

# گردشی در جهان

ایان موریسون

مترجم: غلامرضا شاه‌علی

سرشناسه	: موریسون، ایان، ۱۹۴۳ - م. Morison, Ian
عنوان و نام پدیدآور	: گردش در جهان / ایان موریسون؛ مترجم غلامرضا شاه‌علی.
مشخصات نشر	: شیراز: غلامرضا شاه‌علی، ۱۳۹۳.
مشخصات ظاهری	: ۴۷۴ ص.: مصور، جدول، نمودار.
شابک	: 978-600-04-2498-5
وضعیت فهرست نویسی	: فیبا
یادداشت	: عنوان اصلی: A journey through the universe: Gresham lectures on astronomy, 2015.
موضوع	: نجوم
شناسه افزوده	: شاه‌علی، غلامرضا، ۱۳۴۵، مترجم
رده بندی کنگره	: QB ۵۱/م ۸گ ۴ ۱۳۹۳
رده بندی دیویی	: ۵۲۰
شماره کتابشناسی ملی	: ۳۷۳۳۶۰۸

# گردشی در جهان

نویسنده: ایان موریسون • مترجم: غلامرضا شاه‌علی

ناشر: مترجم

صفحه/قطع: ۴۷۴ ص/وزیری • نوبت چاپ: اول/بهار ۱۳۹۴

طراح جلد: فاطمه شاه‌علی

شمارگان: ۵۰۰ نسخه

شابک: ۵-۲۴۹۸-۰۴-۰۶۰۰-۹۷۸-۵ • ISBN: 978-600-04-2498-5

قیمت: ۳۰۰۰۰ تومان

ارتباط با ناشر (مترجم): ۰۹۱۷۳۰۰۵۵۶۹ - gshahali@gmail.com

تصویر پشت جلد: دنباله‌دار Lovejoy ( www.apod.nasa.gov ، ۱۷ ژانویه ۲۰۱۵ )

دریافت رایگان نسخه دیجیتال کتاب از وبگاه [www.gshahali.ir](http://www.gshahali.ir)

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ





تقدیم بہ روح بلند و آسمانی عارف مجاہد  
مرحوم حاج سید علمبرکبر ابو قلابسر (ر)

﴿وَتَبَارَكَ الَّذِي لَهُ مُلْكُ السَّمَاوَاتِ وَالْأَرْضِ وَمَا بَيْنَهُمَا  
وَعِنْدَهُ عِلْمُ السَّاعَةِ وَإِلَيْهِ تُرْجَعُونَ﴾

زخرف / ۸۵

و خجسته است کسی که فرمانروایی آسمان‌ها و زمین و آنچه میان  
آن دو است از آن اوست، و علم قیامت نزد اوست و به سوی او  
بازگردانده می‌شوید.

## فهرست

---

پیشگفتار مترجم	۹
مقدمه نویسنده	۱۱
فصل ۱: مراقبین آسمان	۱۳
فصل ۲: خورشید	۲۷
فصل ۳: سیمای منظومه شمسی	۴۵
فصل ۴: سیارات صخره‌ای	۵۹
فصل ۵: در جستجوی سیارهٔ ایکس	۸۵
فصل ۶: سفر به سیارات بیرونی	۱۰۱
فصل ۷: قاصدان سرنوشت	۱۲۷
فصل ۸: برخورد!	۱۳۹
فصل ۹: چهارصد سال تلسکوپ	۱۶۵
فصل ۱۰: خانوادهٔ ستارگان	۱۸۵
فصل ۱۱: ستاره‌های کهن سال	۲۰۱
فصل ۱۲: در جستجوی جهان‌های دیگر	۲۲۵
فصل ۱۳: آیا ما تنها هستیم؟ جستجوی حیات در فراسوی زمین	۲۴۳
فصل ۱۴: جهان جزیره‌ای ما	۲۶۱
فصل ۱۵: شگفتی‌های آسمان در نیم‌کرهٔ جنوبی	۲۸۳
فصل ۱۶: حق با ایشیتین است!	۳۰۵
فصل ۱۷: سیاه‌چاله؛ لازم به ترس نیست!	۳۲۱
فصل ۱۸: زمان	۳۴۳
فصل ۱۹: میراث هابل	۳۵۷

---

فصل ۲۰: جهان خشن .....	۳۸۱
فصل ۲۱: جهان ناپیدا: ماده تاریک و انرژی تاریک .....	۴۰۳
فصل ۲۲: پس‌تاب آفرینش .....	۴۲۷
فصل ۲۳: تا بی‌نهایت و فراتر از آن: نگاهی به کیهان .....	۴۴۹
فهرست مفصل کتاب .....	۴۶۳



## پیشگفتار مترجم

بنام خالق یکتا

خدای بزرگ را سپاسگزارم که بار دیگر امکان ترجمه کتابی در حوزه نجوم فراهم آمد. کتاب حاضر، که تنها سه ماه پس از انتشار نسخه انگلیسی آن با عنوان «A Journey through the Universe» به فارسی ترجمه شده است، به صورتی زیبا جنبه‌های گوناگون ستاره‌شناسی را پوشش داده، خواننده علاقه‌مند را با تازه‌ترین دستاوردها آشنا می‌سازد.

با توجه به اهتمام نویسنده کتاب آقای ایان موریسون به عرضه هرچه بیشتر اطلاعات، مطالب بسیاری از این کتاب بدون پیش‌زمینه مطرح شده است. از این رو ممکن است مطالعه آن برای برخی خوانندگان سؤالاتی را به دنبال داشته باشد که امیدوارم با مراجعه به کتاب‌های مفصل‌تر، یا جستجو در اینترنت، پاسخ سؤالات خود را بیابند.

آقای موریسون مطالب این کتاب را پیش از جمع‌آوری، در سخنرانی‌های عمومی خود ایراد کرده است. این مطالب در عین به هم پیوستگی، از یک استقلال نسبی نیز برخوردارند، از این رو گاهی یک مطلب در چند فصل تکرار شده است<sup>۱</sup>.

بر خلاف کتاب‌های گذشته‌ام، در این کتاب پانوش‌ها را به آخر هر فصل منتقل کرده‌ام. اهتمام من به استفاده هرچه بیشتر از واژگان مصوب «فرهنگستان ادب و زبان فارسی» است. در پاره‌ای موارد، توضیحاتی را که وبگاه فرهنگستان برای یک واژه ارائه کرده است عیناً در پانوش آورده‌ام. حرف (ف) در پایان برخی توضیحات به همین اشاره دارد. ضمناً با توجه به استقلال نسبی هر فصل، برخی پانوش‌ها در چند فصل تکرار شده است.

این کتاب (ترجمه فارسی) به صورت رایگان در اختیار علاقه‌مندان قرار می‌گیرد. برای دانلود کتاب به وبگاه این جانب با آدرس [www.gshahali.ir](http://www.gshahali.ir) مراجعه کنید.

هرچند تلاشم را برای عرضه کتابی با حداقل خطا مبذول داشته‌ام، لغزش‌های ناخواسته را بعید

---

۱- فایل ویدئویی این سخنرانی‌ها هم‌اکنون قابل دسترسی است. توصیه می‌کنم مقدمه نویسنده را در ادامه بخوانید.

---

نمی‌دانم. لذا از خوانندگان محترم تقاضا دارم در صورت مشاهده هرگونه اشتباه، این جانب را مطلع سازند تا ان شاء الله ویرایش‌های بعدی کتاب با کمترین خطا عرضه گردد.

غلامرضا شاه‌علی

بهمن ۱۳۹۳

gshahali@gmail.com

## مقدمه نویسنده

---

گرچه در تمام زندگی کاری، من یک ستاره‌شناس رادیویی بوده‌ام، از رصد آسمان نیز بسیار لذت می‌برم. در دوازده سالگی، با استفاده از تلسکوپ‌ی که از مقوا و عدسی‌های اهدایی عینک‌سازم ساخته شده بود، به رصد دهانه‌های ماه و اقمار مشتری پرداختم. حالا نیز که این نوشته را می‌نویسم، کتاب باریک پدرم را با عنوان «ماهیت جهان» نوشته فرد هویل بر روی میز تحریر در کنارم دارم. این کتاب بود که با الهام گرفتن از آن یک ستاره‌شناس شدم.

در دوره کارشناسی در دانشگاه آکسفورد توانستم کمی ستاره‌شناسی بخوانم. پس از آن و با دیدن آگهی برای رشته تازه‌تأسیس نجوم رادیویی در رصدخانه جُدِرل بانک، من، که هم به نجوم و هم به رادیو علاقه داشتم، به مطالعه در آنجا مشغول شدم و در ابتدا، در سال ۱۹۶۵، به مطالعه سطح ماه با رادار پرداختم.

راهنمای من در دوره دکتری، عصرها کلاس‌هایی را درباره نجوم در دانشکده محلی ارائه می‌کرد، و به دلیل بیماری از من خواست که این کار را بر عهده بگیرم. اجرای این کلاس‌ها در بیشتر دوره کاری من باعث شد که تجربه زیادی در توضیح مفاهیم نجومی برای مخاطبین عمومی کسب کنم، ضمن اینکه مسئولیت یک درس عمومی پیرامون ستاره‌شناسی برای دانشجویان سال اول فیزیک در دانشگاه منچستر نیز به این تجارب افزود.

شاید همین تجارب بود که کمک کرد در سال ۲۰۰۷ به عنوان استاد نجوم گرشام برگزیده شوم. این قدیمی‌ترین کرسی ستاره‌شناسی در جهان است که از سال ۱۵۹۷ برقرار بوده، زمانی به کریستوفر ورن<sup>۱</sup> تعلق داشت. در این پست و در مدت بیش از چهار سال، در شهر لندن بیش از ۲۵ سخنرانی درباره نجوم داشته‌ام. هریک از این سخنرانی‌ها ایجاب می‌کرد که دست‌نوشته‌ای را آماده کنم، و تقریباً تمام فصل‌های این کتاب مبتنی بر همان دست‌نوشته‌هاست، البته پس از به‌روزرسانی کامل. در حقیقت، دلیل آنکه این کتاب را زودتر جمع‌آوری نکردم آن بود که می‌خواستم نتایج دو تلسکوپ فضایی عمده را که تا سال ۲۰۱۳ منتشر نشد در کتاب بگنجانم:

تلسکوپ پلانک، که به مطالعهٔ زمینهٔ ریزموج کیهانی پرداخت؛ و تلسکوپ کپلر، که به جستجوی سیارات فرامنظومه‌ای در کهکشان راه‌شیری مشغول بود.

تمام سخنرانی‌های من ضبط و ویدئویی شد و در سایت دانشکدهٔ گرشام قابل دسترسی است (کافی است عبارت «Gresham College lectures by Ian Morison» را جستجو کنید). عنوان این سخنرانی‌ها شبیه به عناوین فصل‌های این کتاب است، لذا در صورت تمایل، می‌توانید آن‌ها را به‌عنوان مکمل مطالب کتاب تماشا کنید (یا گوش دهید). در این خصوص، شاید این کتاب منحصر به فرد باشد. البته فصل‌های ۳ و ۱۰، که به جنبه‌های منظومه شمسی و خواص ستارگان می‌پردازد، بر سخنرانی ویژه‌ای مبتنی نیستند و برای تکمیل اطلاعات کتاب اضافه شده‌اند.

اگر مایلید محاسباتی را که نتیجهٔ آن‌ها در کتاب ارائه شده است دنبال کنید، می‌توانید کتاب «درآمدی بر نجوم و کیهان‌شناسی» را بخوانید؛ و اگر با خواندن این کتاب به تماشای عجایب جهان علاقه‌مند شدید، می‌توانید کتاب دیگر من را پیرامون مشاهده و تصویربرداری از آسمان، با عنوان «An Amateur's Guide to Observing and Imaging the Heavens» مطالعه کنید. صادقانه امیدوارم این کتاب در ارتقاء دانش و درک شما پیرامون جهانی که در آن زندگی می‌کنیم مفید باشد.

# فصل ۱

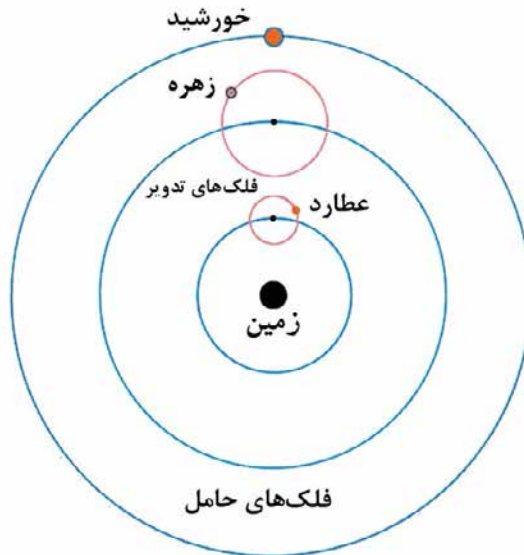
## مراقبین آسمان

شاید بتوان ستاره‌شناسی را قدیمی‌ترین علم نامید. این دانش در یک نکتهٔ اصولی با دیگر علوم متفاوت است: «نمی‌توان آن را در آزمایشگاه تجربه کرد.» ستاره‌شناس تنها می‌تواند آنچه را در آسمان می‌بیند رصد کند، آنگاه به بررسی مشاهداتش و انطباق آن‌ها با نظریه‌های موجود بپردازد. پیش از آنکه گردش خود را از فصل ۲ آغاز کنیم، مایلیم با نگاه به برخی از ستاره‌شناسانی که در گذشته سهم بزرگی در ارتقاء دانش ما داشته‌اند، کمی از تاریخ نجوم را در اختیارتان قرار دهم.

### ۱-۱ اثبات تئوری کپرنیکی منظومه شمسی توسط گالیله

یکی از اولین موفقیت‌های نجوم رصدی، سلسله مشاهدات زهره توسط گالیله بود. این مشاهدات نشان داد که خورشید، و نه زمین، در مرکز منظومه شمسی قرار دارد، تأییدی بر الگوی کپرنیک و خط بطلان بر نظریهٔ بطلمیوس. گالیله مشتری را نیز رصد کرده، چهار قمری را که امروزه قمرهای گالیله‌ای<sup>۱</sup> نام دارند در حال گردش به دور آن دیده بود؛ و بدین ترتیب دریافت که تمام اجسام به دور زمین گردش نمی‌کنند.

در مدل ارائه شده توسط بطلمیوس (که البته دقیق‌تر از آن چیزی است که معمولاً گفته می‌شود) سیارات در مدارهایی دایره‌ای بنام فلک تدویر<sup>۲</sup> حرکت می‌کنند. مرکز این مدارها بر روی دایره‌هایی بزرگ‌تر بنام فلک حامل<sup>۳</sup> به دور زمین می‌چرخد. بدین ترتیب بطلمیوس توانست حرکت پس‌رونده<sup>۴</sup> سیاره‌هایی چون مریخ و مشتری را، که گاهی به نظر می‌رسد در آسمان به عقب برمی‌گردند، توضیح دهد. او حتی حرکت زهره و عطارد را نیز با این مدل توجیه می‌کرد. تصور بر این بود که مرکز فلک تدویر هر یک از این دو سیاره با سرعت زاویه‌ای مشابه حرکت خورشید به دور زمین می‌چرخد و این دو مرکز بر روی خط واصل بین زمین و خورشید قرار دارد. از این رو این دو



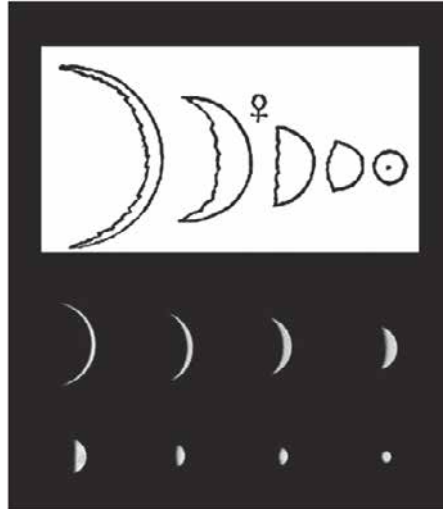
شکل ۱-۱: مرکز فلک تدویر زهره و عطارد با سرعت زاویه‌ای مشابه خورشید به دور زمین می‌چرخد.

سیاره را گاهی قبل از طلوع خورشید و گاهی بعد از غروب آن می‌توان دید. از آنجاکه عطارد به خورشید نزدیک‌تر از زهره دیده می‌شود، بطلمیوس مدار فلک تدویر و فلک حامل این سیاره را نزدیک‌تر از زهره به زمین رسم کرد. به عبارتی در مدل وی عطارد نزدیک‌ترین سیاره به زمین است!

همان‌طور که در **شکل ۱-۱** می‌بینید، در مدل بطلمیوس زهره بین زمین و خورشید قرار دارد و به همین خاطر همواره باید از پشت روشن شود، بنابراین تنها می‌تواند هلال‌هایی از خود نشان دهد، بدون آنکه در اندازه زاویه‌ای آن تغییر چشم‌گیری به وجود آید. برعکس، در مدل کپرنیک زهره دور خورشید می‌چرخد. وقتی بین زمین و خورشید قرار دارد هلال‌های آن مشاهده می‌گردد و در آن طرف خورشید، قرص نسبتاً کامل خود را در معرض دید قرار می‌دهد. از آنجاکه فاصله زهره از زمین بسیار متغیر است، اندازه زاویه‌ای آن (زاویه‌ای که سیاره در هنگام رؤیت از زمین در بین آن قرار می‌گیرد) نیز تغییر زیادی از خود نشان می‌دهد.

**شکل ۲-۱** مجموعه نقاشی‌هایی از زهره را نشان می‌دهد که گالیله با کمک تلسکوپ شکستی

شکل ۱-۲: نقاشی‌های زهره توسط گالیه (بالا) در مقایسه با عکس‌های جدید زهره که از زمین گرفته شده است (پایین).



ساده خود رسم کرد. در کنار این نقاشی‌ها، تصاویری را که به کمک تلسکوپ‌های امروزی گرفته شده است می‌بینید. گالیه نه تنها اهله‌های زهره را نشان داد، بلکه قطر زاویه‌ای متغیر آن‌ها را نیز به درستی ترسیم کرد. این نقاشی‌ها دقیقاً پیشگویی مدل کپرنیکی را تأیید می‌کرد: قرص نسبتاً کامل زهره و قطر زاویه‌ای کوچک آن، هنگامی که در طرف دیگر خورشید قرار دارد؛ و هلال‌های باریک همراه با اندازه زاویه‌ای بزرگ وقتی که به زمین نزدیک است.

بدین ترتیب، رصدهای گالیه که با ساده‌ترین ابزار ممکن انجام شده بود، توانست برنده رقابت بین دو مدل منظومه شمسی را تعیین کند. درست به همین ترتیب، و البته با ابزاری بسیار پیچیده‌تر، ستاره‌شناسان قادر به گزینش از بین نظریه‌های رقیب درباره جهان بوده‌اند، داستانی که بعداً به آن خواهیم پرداخت.

## ۱-۲ کره سماوی

با نگاه به آسمان در یک شب صاف، می‌توان تصور کرد که ستارگان بر دیواره درونی یک کره، موسوم به کره سماوی، که مرکز آن همان مرکز زمین است، قرار گرفته‌اند. ستاره‌شناسان قدیم جهت به خاطر سپردن ستارگان در آسمان، آن‌ها را در دسته‌هایی قرار می‌دادند. این دسته‌ها به صورت‌های فلکی معروف‌اند و نشانگر مردان همچون جبار<sup>۵</sup> (شکارچی)،

زنان مانند ذات‌الکرسی<sup>۶</sup> مادر امرأة‌المسلله<sup>۷</sup>، حیوانات و پرندگان مانند ثور<sup>۸</sup> (گاو نر) و دجاجه<sup>۹</sup>، و اجسام بی‌جانی چون شلیاق<sup>۱۰</sup> (چنگ) هستند. این دسته‌بندی‌ها ارزش حقیقی ندارد - ستاره‌ها اساساً در محل‌هایی تصادفی در آسمان قرار گرفته‌اند - هرچند که برخی چون ستاره‌های روشن آبگردان بزرگ<sup>۱۱</sup> در صورت فلکی دب اکبر<sup>۱۲</sup> همه باهم در یک ابر (از غبار و گاز) زاده شده‌اند.

### ۳-۱ یک موفقیت بزرگ رصدی دیگر

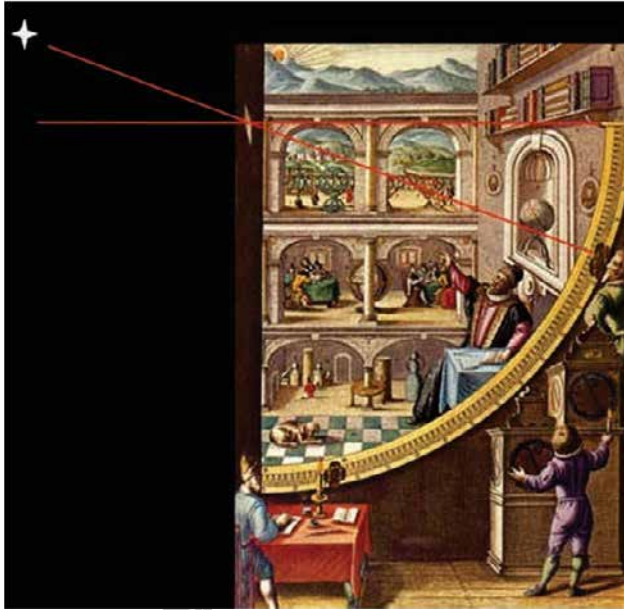
حال در موقعیتی هستیم که می‌توانیم رصدهایی را که منجر به یک پیشرفت اساسی دیگر در فهم ما از منظومه شمسی شد شرح دهیم.

در سال ۱۵۷۲، تیکو براهه، نجیب‌زاده جوان دانمارکی که همه علاقه‌اش به نجوم بود، یک ابرنواختر<sup>۱۳</sup> را در صورت فلکی ذات‌الکرسی رصد کرد. مشاهدات منتشرشده وی پیرامون «ستاره جدید»، اعتقاد فراگیر به تغییرناپذیری آسمان را درهم شکست، و او به ستاره‌شناسی بسیار معروف و مورداحترام بدل شد.

وی به این نتیجه رسید که برای پیش‌بینی تغییرات احتمالی دیگر در آسمان، لازم است که در ابتدا یک فهرست دست‌اول از ستارگان را در اختیار داشت. چهار سال بعد پادشاه دانمارک، جزیره هاون (Hven) و پول کافی در اختیار تیکو قرار داد تا قلعه‌ای در آن بسازد، قلعه‌ای که او نام اورانی‌بورگ<sup>۱۴</sup> را به یاد اورانیا<sup>۱۵</sup>، خدای آسمان‌ها در فرهنگ یونانی، بر آن نهاد. تیکو در محوطه قلعه، رصدخانه‌ای نیمه‌زیرزمینی بنام اشترن‌بورگ<sup>۱۶</sup> ساخت. او و رصدگرهای گروهش در مدت بیست سال به اندازه‌گیری موقعیت ستارگان و اندازه‌گیری بسیار مهم دیگر، یعنی ثبت موقعیت سیاره‌ها، پرداختند.

**شکل ۳-۱** رصدخانه تیکو و روش اندازه‌گیری‌های وی را نشان می‌دهد. یک ناظر، ستاره (یا سیاره‌ای) را از میان پنجره کوچکی که بر دیوار رو به جنوب قرار داشت رؤیت می‌کرد. دو چیز اندازه‌گیری می‌شد؛ ابتدا یک همکار، زمان گذر را هنگام عبور ستاره از نصف‌النهار<sup>۱۷</sup> ثبت می‌کرد؛ و در ثانی، با استفاده از یک ربع‌دایره مدرج، ناظر می‌توانست ارتفاع ستاره (بلندی زاویه‌ای ستاره از افق) را در هنگام گذر اندازه بگیرد. همکار، در پایین تصویر سمت راست، در کنار ساعت ایستاده است تا زمان گذر را اندازه بگیرد و منشی، که پایین سمت چپ پشت میز نشسته است، این زمان و





شکل ۱-۳: یک ربع دایره که تیکو براهه از آن برای اندازه‌گیری ارتفاع ستاره یا سیاره هنگام عبور از نصف النهار (رو به جنوب) استفاده می‌کرد.

ارتفاع خوانده شده ستاره را در دفتر گزارش روزانه یادداشت می‌کرد. او بدین ترتیب می‌توانست موقعیت یک ستاره را بر روی کره سماوی تعیین کند.

نه تنها فهرست ستارگان تیکو براهه ۱۰ بار دقیق‌تر از هر فهرستی تا آن زمان بود - خطای موقعیت ۷۷۷ ستاره هرگز از ۴ دقیقه قوسی تجاوز نکرد (یک دقیقه قوسی برابر است با یک شصتم درجه) - بلکه او در مدت ۲۰ سال رصد، نمودار حرکت سیاره‌ها را نیز رسم کرده بود. همین رصدهای سیارات بود که دومین موفقیت بزرگ نجوم رصدی را در قرن‌های شانزدهم و هفدهم به ارمان آورد: قوانین سه‌گانه کپلر پیرامون حرکت سیارات.

با درگذشت فردریک دوم در سال ۱۵۸۸، تیکو پشتیبان خود را از دست داد. آخرین رصد او در هاون در سال ۱۵۹۶، یعنی پیش از آنکه تیکو دانمارک را ترک کند، صورت گرفت. پس از یک سال مسافرت در اطراف اروپا، تیکو به‌عنوان ریاضی‌دان سلطنتی دربار رودلف دوم، امپراتور روم، انتخاب و در قلعه بناتکی<sup>۱۸</sup> مستقر گردید. در اینجا بود که یک ریاضی‌دان جوان به نام یوهان کپلر<sup>۱۹</sup>

به‌عنوان همکار با وی مشغول به کار شد. تیکو محاسبه مدار سیاره مریخ را به او سپرد. کیپلر گمان می‌کرد این کار تنها چند ماه به‌طور می‌انجامد، اما برخلاف تصور وی، چندین سال طول کشید. یک مشکل اساسی وجود داشت؛ مشاهدات مریخ از زمین صورت گرفته بود که خود در مداری به دور خورشید حرکت می‌کرد. تا مدار دقیق زمین به دست نمی‌آمد، محاسبه پارامترهای مدار مریخ ممکن نبود. در آنچه جرقه‌ای از نبوغ نامیده شده است، کیپلر دریافت که مریخ در هر ۶۸۷ روز (دوره تناوب مداری مریخ) دقیقاً به موقعیت سابق خود در منظومه شمسی بازمی‌گردد؛ از این رو مشاهدات زمین از مریخ در مجموعه تاریخ‌هایی با ۶۸۷ روز فاصله، می‌توانست به‌طور کلی جهت دستیابی به مدار زمین مورد استفاده قرار گیرد. (همان‌گونه که البته مشاهدات آن روزهای مریخ از زمین می‌توانست مورد استفاده قرار گیرد.) با حل معادله مدار زمین، کیپلر توانست پارامترهای مداری مریخ را بیابد.

#### ۴-۱ قوانین حرکت سیارات

با استفاده از اطلاعات ارزشمندی که تیکو درباره موقعیت سیاره‌ها فراهم کرده بود، کیپلر توانست قوانین سه‌گانه تجربی خود را فرمول‌بندی کند. کلمه «تجربی» اشاره دارد به اینکه این قوانین بر هیچ نظریه عمیق‌تری بنا نهاده نشده بود، اما به‌درستی حرکت مشاهده‌شده سیارات را توصیف می‌کرد. دو قانون اول در سال ۱۶۰۹ منتشر شد و قانون سوم در سال ۱۶۱۸. قانون اول:

**سیارات در مدارهای بیضوی به دور خورشید در حرکت‌اند، خورشید در یکی از کانون‌های بیضی قرار دارد.**

قانون دوم:

**بردار شعاعی - خط فرضی بین مرکز سیاره و مرکز خورشید - در زمان‌های مساوی مساحت‌های مساوی را جاروب می‌کند.**

این قانون اشاره دارد که سیارات در یک مدار بیضوی، وقتی که به خورشید نزدیک‌ترند سریع‌تر حرکت می‌کنند - همین‌طور که به خورشید نزدیک می‌شوند، انرژی پتانسیل از دست می‌دهند؛ و چون انرژی کل باید ثابت باشد، انرژی جنبشی آن‌ها افزایش می‌یابد، و لذا تندتر حرکت می‌کنند.

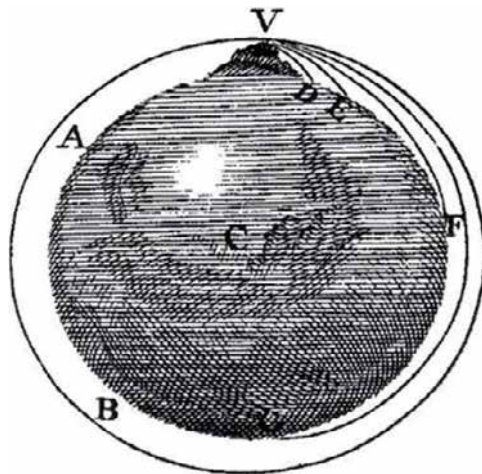
در قانون سوم، ارتباط بین دوره تناوب سیاره،  $T$ ، و نیم قطر بزرگ مدار آن،  $a$ ، بیان می‌شود:  
**مربع دوره تناوب سیاره،  $T$ ، متناسب است با مکعب نیم قطر بزرگ مدار آن،  $a$ . (برای یک مدار دایره‌ای، نیم قطر بزرگ عبارت است از شعاع دایره.)**

از نتایج بسیار مهم قانون سوم این بود که ستاره‌شناسان توانستند نقشه بسیار دقیقی از منظومه شمسی رسم کنند. موقعیت نسبی سیاره‌ها با دقت رسم شد؛ اما نقشه هیچ مقیاسی نداشت. مانند اینکه یک نقشه دقیق از کشور داشته باشید، اما ندانید که به طور مثال یک کیلومتر از سطح زمین معادل چند سانتیمتر بر روی نقشه است. یک راه حل برای این مشکل، اندازه‌گیری دقیق یک فاصله طولانی، و البته منطقی، بر روی نقشه بود. بدین ترتیب یک مقیاس برای نقشه به دست می‌آمد و فاصله هر دو نقطه دیگر قابل محاسبه بود.

## ۱-۵ آیزاک نیوتون و قانون جاذبه عمومی

آیزاک نیوتون در خانه‌ای روستایی نزدیک گرنتهم<sup>۲۰</sup> در سال ۱۶۴۲، سال مرگ گالیله، به دنیا آمد. پدرش، که او هم آیزاک نیوتون نام داشت، قبل از تولد وی از دنیا رفته بود. وقتی دوساله شد مادرش هُنّا با کشیش کلیسای محل ازدواج کرد و آیزاک تحت تربیت مادر بزرگش قرار گرفت، جایی که کاملاً مانند یک یتیم با او رفتار می‌شد. برای تحصیل به مدرسه رایگان زبان در گرنتهم رفت و در آنجا اتاقی کرایه کرد. او چندان به تحصیل علاقه نداشت و گزارش تحصیلی مدرسه حاکی از تنبلی و بی‌اعتنایی وی به درس بود. بعدها مادرش برای مدیریت زمین کشاورزی و مایملک خود، آیزاک را از مدرسه درآورد، ولی به زودی مشخص شد که وی علاقه و استعداد این جور کارها را ندارد.

یکی از دایی‌ها مادرش را ترغیب کرد که آیزاک باید آماده ورود به دانشگاه شود، لذا در سال ۱۶۶۰ اجازه یافت به مدرسه رایگان زبان در گرنتهم برگردد و تحصیل خود را تمام کند. در آنجا با مدیر مدرسه هم‌اتاق بود و به طور خصوصی از وی آموزش می‌دید. وقتی در سال ۱۶۶۱ به دانشکده ترینیتی<sup>۲۱</sup> در آکسفورد راه یافت از دیگر هم‌قطاران کم‌بزرگ‌تر بود. لیسانس خود را در ۱۶۶۵ دریافت کرد. اما بعد از آن ناچار گردید به خانه بازگردد زیرا دانشگاه به دلیل طاعون تعطیل شد. در آنجا بود که در مدت دو سال، و با وجودی که هنوز ۲۵ سال نداشت، نبوغ وی آشکار گردید.



شکل ۱-۴: آزمایش ذهنی نیوتون با استفاده از گلوله توپ

داستانی (احتمالاً ساختگی) وجود دارد که نیوتون زیر درخت سیب در مزرعه کنار خانه‌شان نشسته بود. او احتمالاً به خوبی می‌توانسته ماه را در آسمان، در تریبج اول یا آخر، ببیند. گفته می‌شود سیبی بر سرش (و یا کنارش) افتاد و او را به این فکر انداخت که چرا ماه همین‌گونه به زمین سقوط نمی‌کند.

لحظه نبوغ‌آمیز نیوتون آنگاه بود که دریافت ماه هم در حال سقوط به سمت زمین است! او از کارهای گالیله در مورد مسیر حرکت پرتابه‌ها آگاه بود، و در شاهکار خود اصول<sup>۲۲</sup> که در سال ۱۶۸۶ منتشر شد، نشان داد که اگر یک گلوله توپ به طور افقی از بالای کوهی شلیک شود، با نادیده گرفتن مقاومت هوا، چه اتفاقی می‌افتد. گلوله مسیری سهموی به سمت زمین طی می‌کند؛ و با افزایش بیشتر و بیشتر سرعت شلیک، دورتر و دورتر از کوه فرود می‌آید. با دورتر شدن محل فرود، انحناى زمین نیز باید در نظر گرفته شود. در رساله‌ای معروف بنام «شرحی بر نظام جهان»<sup>۲۳</sup> که در دهه ۱۶۸۰ منتشر شد، او شکل ۱-۴ را نشان داد. کوه آن قدر بلند است که از جو زمین خارج می‌شود. البته این یک آزمایش ذهنی است، نه واقعی! می‌توان دید که اگر سرعت به اندازه کافی زیاد باشد، گلوله هرگز سقوط نمی‌کند و در مداری به دور زمین قرار می‌گیرد. (البته دقیق‌تر آن است که پس از یک دور، به پشت توپ برخورد می‌کند، اما این را نادیده می‌گیریم.)

نیوتون همین منطق را برای حرکت ماه به کار برد. او متوجه شد که اگر جاذبه گرانشی بین

زمین و ماه باعث شود ماه درست به اندازه مناسب به سوی زمین سقوط کند، آن هم دائماً در مداری دور زمین می چرخد. نیوتون به حد کافی از ماه شناخت داشت و توانست شتاب جاذبه را در فاصله ماه حساب کند. برای این منظور لازم بود که شعاع گردش ماه به دور مرکز زمین (با فرض مداری دایره‌ای) و دوره تناوب آن را بداند. او شعاع را  $۳۸۴,۰۰۰$  کیلومتر و دوره تناوب را  $۲۷/۳۲$  روز یا  $S \times ۲/۳۶ \times ۱۰^۶$  برگزید. او نشان داد که  $g$  (شتاب ناشی از گرانش) در فاصله ماه  $\frac{1}{۳۶.۶}$  شتاب در سطح زمین است.

نیوتون همچنین می دانست که شعاع زمین  $۶۴۰۰$  کیلومتر است؛ از این رو ماه در فاصله  $۳۸۴,۰۰۰$  کیلومتری از زمین، دقیقاً  $۶۰$  بار از مرکز زمین، نسبت به سطح زمین از مرکز زمین، دورتر بود. لذا مقدار  $g$  در فاصله ماه تقریباً به طور دقیق متناسب با مربع فاصله از مرکز زمین کاهش یافته بود!

این کشف، نیوتون را به قانون معروف عکس مجذور<sup>۲۴</sup> هدایت کرد: نیروی جاذبه گرانشی بین دو جسم با افزایش فاصله بین آن دو، متناسب با معکوس مجذور آن فاصله، کاهش می یابد. البته نیوتون مشکلی در راه انتشار قانونش داشت. او باید ثابت می کرد که نیروی اعمال شده به وسیله یک جسم کروی، دقیقاً با نیروی اعمالی چنانچه تمام جرم کره در مرکز آن متمرکز می شد، برابر بود. این کار تنها از عهده حساب دیفرانسیل و انتگرال برمی آید. نیوتون مدتی از وقت خود را صرف تعریف و توسعه نظریات این رشته نمود و آنگاه بود که احساس کرد می تواند قانون خود را منتشر کند.

نیوتون دریافته بود که نیروی جاذبه باید مستقیماً متناسب با جرم جسم باشد. همچنین بر اساس قانون سومش، او می دانست که چنانچه زمین بر جسمی چون ماه نیرو وارد کند، آن جسم نیز باید نیرویی برابر بر زمین وارد نماید. بدین ترتیب او این گونه استدلال کرد که بر اساس این تقارن، اندازه نیروی جاذبه بایستی متناسب با جرم هر دو جسم باشد.

بنابراین قانون او بیان می کرد که نیروی  $F$  بین دو جسم مستقیماً متناسب است با حاصل ضرب جرم آن دو، و با مجذور فاصله بین مرکز آن دو نسبت عکس دارد. از این رو، نیرو برابر است با حاصل ضرب این دو عامل، ضرب در یک ثابت بنام  $G$ ، ثابت گرانش (جاذبه).

نیوتون چگالی متوسط زمین را  $۵۴۰۰ \text{ kgm}^{-۳}$  تخمین زد و با محاسبه جرم آن،  $G$  را به دست

آورد. او فرض کرد که چگالی زمین به طرف عمق آن افزایش می‌یابد و به سادگی چگالی سطح زمین، یعنی  $2700 \text{ kgm}^{-3}$  را دو برابر نمود. (این تقریبی خوب و خوش اقبال بود، زیرا مقدار واقعی  $5520 \text{ kgm}^{-3}$  است!) مقداری که او برای  $G$  به دست آورد  $6/76 \times 10^{-11} \text{ Nm}^2 \text{ kg}^{-2}$  بود. به دلیل برآورد خوش اقبالی که برای چگالی متوسط زمین داشت، این یک نتیجه خیلی خوب بود. مقداری که امروزه برای  $G$  مورد قبول است،  $6/67 \times 10^{-11} \text{ Nm}^2 \text{ kg}^{-2}$  می‌باشد.

قانون نیوتون، قانون جاذبه عمومی (جهانی) نامیده شد. اما چرا جهانی؟ نیوتون، با استفاده از قانون دوم (نیرو برابر است با جرم ضرب در شتاب) و قانون گرانش خودش، توانست قانون سوم حرکت سیارات کپلر را استخراج نماید. این کار به او نشان داد که قانونش در کل منظومه شمسی آن زمان معتبر است؛ برای او این یعنی جهانی!

## ۶-۱ چارلز مسیه: یک رصدگر بزرگ

مسیه<sup>۲۵</sup>، ستاره‌شناس فرانسوی، تمام رصدهایش را از هتل کلونی در پاریس<sup>۲۶</sup> انجام داد. او تمام انواع پدیده‌های نجومی را، از قبیل اختفا<sup>۲۷</sup>، گذر<sup>۲۸</sup>، و گرفت<sup>۲۹</sup>، رصد می‌کرد، اما عاشق کشف و رصد دنباله‌دارها بود. کشف ۱۳ دنباله‌دار برای او شهرت زیادی به ارمغان آورد. او به عضویت انجمن سلطنتی درآمد، و برای فرهنگستان علوم انتخاب شد.

در اوت سال ۱۷۵۸، زمانی که مسیه مشغول کاوش آسمان در جستجوی دنباله‌دارهای جدید بود، به چیزی شبیه به یک سحابی کم‌نور و ضعیف در صورت فلکی ثور برخورد. به خیال اینکه آنچه دیده یک دنباله‌دار است، آن را در شب‌های بعد هم رصد کرد و به زودی دریافت که آن یک دنباله‌دار نیست، چراکه در آسمان حرکت نمی‌کرد. برای اینکه در آینده هم خودش و هم دیگران، وقتشان در حین رصد تلف نشود، تصمیم گرفت یک فهرست از اجسام سحابی مانند، که در نگاه اول ممکن است با دنباله‌دار اشتباه گرفته شوند، تهیه کند. بدین ترتیب این جسم در صورت فلکی ثور، اولین جسم در فهرست وی نام گرفت: M۱. این باقی‌مانده یک ابرنواختر است که در سال ۱۰۵۴ مشاهده شد، و حالا به عنوان سحابی خرچنگ<sup>۳۰</sup> شناخته می‌شود؛ چراکه یک ستاره‌شناس قرن نوزدهم بنام ویلیام پارسون، در حالی که آن را با تلسکوپ نیوتونی ۷۲ اینچ و بسیار خوب خود رصد کرده بود، تصور کرد که به یک خرچنگ نعل‌اسبی شبیه است. کار جمع‌آوری فهرست مسیه

به صورت جدی تا سال ۱۷۶۴ آغاز نشد، و در مدت هفت ماه، ۳۸ مدخل دیگر هم به آن اضافه شده بود؛ از قبیل سحابی کروی جاثی<sup>۳۱</sup>، M۱۳، سحابی سیاره‌ای دمبل<sup>۳۲</sup>، M۲۷ و کهکشان امراة‌المسلله<sup>۳۳</sup>، M۳۱.

نخستین فهرست مسیه با ۴۵ عضو در سال ۱۷۷۴، و آخرین آن با ۱۰۳ عضو در سال ۱۷۸۱ منتشر شد. این فهرست تا ۱۱۰ عضو افزایش یافته است، زیرا ستاره‌شناسان و تاریخ‌دانان شواهد هفت جسم ژرف‌آسمان<sup>۳۴</sup> دیگر را به دست آورده‌اند که یا خود مسیه یا همکارش پییر میسن<sup>۳۵</sup>، اندکی پس از انتشار آخرین فهرست رصد کرده بودند. فهرست مسیه، یک منبع شگفت‌انگیز برای ستاره‌شناسان غیرحرفه‌ای به حساب می‌آید، زیرا بسیاری از زیباترین اجسام سماوی را که با یک تلسکوپ کوچک می‌توان دید در خود جا داده است؛ هر نوع جسمی، از خوشه‌های کروی و باز، سحابی‌های سیاره‌ای و پخشیده، تا بسیاری از روشن‌ترین کهکشان‌ها که می‌توان از عرض‌های میانی شمالی مشاهده کرد. با توجه به اینکه مسیه این اجسام را با تلسکوپ شکستی نسبتاً کوچک خود کشف کرد (البته بدون آلودگی نوری که حالا بسیاری از ما از آن رنج می‌بریم)، آن‌ها را که از جذاب‌ترین اجسام در عمق آسمان هستند، می‌توان عملاً با تمام تلسکوپ‌های غیرحرفه‌ای مشاهده نمود.

## ۱-۷ ادموند هالی و اندازه‌گیری واحد نجومی

بیشتر شهرت ادموند هالی<sup>۳۶</sup> به خاطر دنباله‌داری است که نام وی را بر خود دارد و داستان اکتشاف آن در فصل ۷ خواهد آمد. اما او از بینشی نیز برخوردار بود که او را قادر ساخت فاصله بین زمین و خورشید<sup>۳۷</sup> را تعیین کند.

در منظومه شمسی، بدیهی‌ترین اندازه‌گیری عبارت است از فاصله بین زمین و یکی از دو سیاره مجاورش، زهره یا مریخ. چنانچه این فاصله معلوم شود، با استفاده از قانون سوم کپلر می‌توان فاصله زمین از خورشید را محاسبه کرد. در سال ۱۶۷۸ هالی دریافت که اگر بتوان گذر یک سیاره را از مقابل سطح خورشید، از دونقطه در زمین با فاصله زیاد از یکدیگر رصد کرد، اختلاف اندک در مشاهده این گذر از دونقطه، ما را قادر می‌سازد با استفاده از شیوه اختلاف منظر<sup>۳۸</sup>، فاصله آن سیاره را به دست آوریم. مشکل اینجاست که طولانی‌ترین فاصله ممکن در زمین، یعنی قطر آن برابر با

۱۲/۷۶۵ km، در مقایسه با فاصله سیاره‌ها کوچک است، و از این رو اختلاف زاویه‌ای که قرار است اندازه‌گیری شود بسیار کوچک و در معرض خطا خواهد بود.

تلاش وسیعی به عمل آمد تا دو گذر زهره در قرن هجدهم رصد شود. در سال ۱۷۶۱، موفق‌ترین رصدها به وسیله دو نقشه‌بردار، جریمایا دیکسون و چارلز میسون<sup>۳۹</sup>، در دماغه امید نیک<sup>۴۰</sup> انجام شد. (بیشتر شهرت این دو برای خط دیکسون-میسون است. آن‌ها کار مساحی این خط را در سال‌های بین ۱۷۶۳ تا ۱۷۶۷ انجام دادند تا منازعه مرزی بین مستعمرات بریتانیا در آمریکای مستعمراتی<sup>۴۱</sup> حل شود.) مشهور است که کاپیتان جیمز کوک<sup>۴۲</sup> به همراه ستاره‌شناس خود چارلز گرین و طبیعت‌شناس جوزف بانکس<sup>۴۳</sup> به تاهیتی<sup>۴۴</sup> سفر کرد تا گذر سال ۱۷۶۹ را رصد کند، و قلعه‌ای را در پوینت ونوس<sup>۴۵</sup> (نقطه زهره) ساخت. آن‌ها زمانی را که زهره کاملاً وارد لبه خورشید شد و سپس درست پیش از ترک آن ثبت کردند. از دو گذر در قرن هجدهم، مقداری که برای واحد نجومی به دست آمد برابر بود با ۱۵۲/۴ میلیون کیلومتر.

کوک به دریانوردی خود در اطراف زلاندنو ادامه داد و نقشه‌جایی را که او خلیج داسکی<sup>۴۶</sup> نامید رسم کرد. او در دومین سفر جهانی خود به جایی که امروزه داسکی ساوند<sup>۴۷</sup> نام دارد بازگشت و پنج هفته در بندر پیکرسگیل<sup>۴۸</sup> ماند. ستاره‌شناس همراهش، ویلیام ولز<sup>۴۹</sup> پس از تخریب یک جریب جنگل، رصدخانه‌ای را در کنار بندر بنا کرد و موقعیت دقیق آن را اندازه گرفت<sup>۵۰</sup>. این موقعیت برای سال‌ها دقیق‌ترین موقعیت شناخته شده در نیم کره جنوبی بود.

پس از رصد گذر سال ۲۰۰۴ در انگلستان در آسمان صاف، از من دعوت شد تا چند ستاره‌شناس را برای رصد گذر سال ۲۰۱۲ به بندر پیکرسگیل ببرم. در کمال خوش‌شانسی، آسمان صاف بود و من توانستم زمان ورود و خروج زهره را ثبت کنم. از ترکیب رصدهای من و رصدهای ناظر دیگری در انکریج<sup>۵۱</sup> آلاسکا (با خط مبنایی نزدیک به ۱۰,۰۰۰ km؛ تقریباً با اطمینان می‌توان گفت بلندترین خط مبنایی که تاکنون مورد استفاده قرار گرفته است) من مقدار واحد نجومی را برابر با ۱۴۶,۰۰۰,۰۰۰ km به دست آوردم. این مقدار به شکل جالب توجهی به مقدار مسلم واحد نجومی نزدیک است و تقریباً از همان دقت اندازه‌گیری‌های قرن هجدهم برخوردار می‌باشد.

اندازه‌گیری واقعاً دقیق واحد نجومی تا سال ۱۹۶۲ محقق نشد، و آن زمانی بود که رادارهای قدرتمند با استفاده از تلسکوپ‌های رادیویی بزرگ در جُدرل بانک<sup>۵۲</sup> در انگلستان، در آمریکا و در



شوروی سابق توانستند بازتاب‌هایی را از سطح زهره دریافت کنند. امروزه مقدار پذیرفته شده عبارت است از  $۱۶۹/۵۹۷/۸۷۰/۶۹۱$  km، تنها اندکی کمتر از ۱۵۰ میلیون کیلومتر.

## مانوش‌ها

- 1 - Galilean moons
- 2 - Epicycle
- 3 - Deferent
- 4 - retrograde motion
- 5 - Orion
- 6 - Cassiopeia
- 7 - Andromeda
- 8 - Taurus
- 9 - Cygnus
- 10 - Lyra
- 11 - Big Dipper
- 12 - Ursa Major

۱۳ - supernova: یک ستاره جدید و خیلی روشن.

۱۴ - Uraniborg؛ به معنی قلعه اورانی.

- 15 - Urania

۱۶ - Stjerneborg؛ به معنی قلعه ستاره.

۱۷ - Meridian؛ نصف‌النهار نیم‌دایره‌ای است در آسمان بین قطب‌های شمال و جنوب، که از سمت‌الرأس عبور کرده، افق را در جنوب قطع می‌کند.

- 18 - castle of Benátky
- 19 - Johannes Kepler
- 20 - Grantham
- 21 - Trinity
- 22 - Principia
- 23 - A Treatise of the System of the World
- 24 - inverse square law
- 25 - Charles Messier
- 26 - Hôtel de Cluny in Paris
- 27 - occultation
- 28 - transit
- 29 - eclipse
- 30 - Crab Nebula
- 31 - Hercules
- 32 - Planetary Nebula Dumbbell
- 33 - Andromeda
- 34 - deep-sky object
- 35 - Pierre Méchain
- 36 - Edmond Halley

۳۷ - یک واحد نجومی، با علامت اختصاری AU.

38 - parallax

39 - Jeremiah Dixon and Charles Mason

۴۰ - Cape of Good Hope؛ شبه‌جزیره صخره‌ای واقع در ساحل جنوبی آفریقای جنوبی که مشرف به

اقیانوس اطلس است. (مترجم)

۴۱ - Colonial America؛ دوره‌ای از تاریخ آمریکا، پیش از استقلال آن در سال ۱۷۷۶. (مترجم)

42 - James Cook

43 - Charles green and Joseph Banks

44 - Tahiti

45 - Point Venus

46 - Dusky Bay

47 - Dusky Sound

48 - Pickersgill Harbour

49 - William Wales

۵۰ - محل احداث این رصدخانه را Astronomer's Point می‌نامند.

51 - Anchorage

52 - Jodrell Bank

نسخه رایگان

## فصل ۲

### خورشید

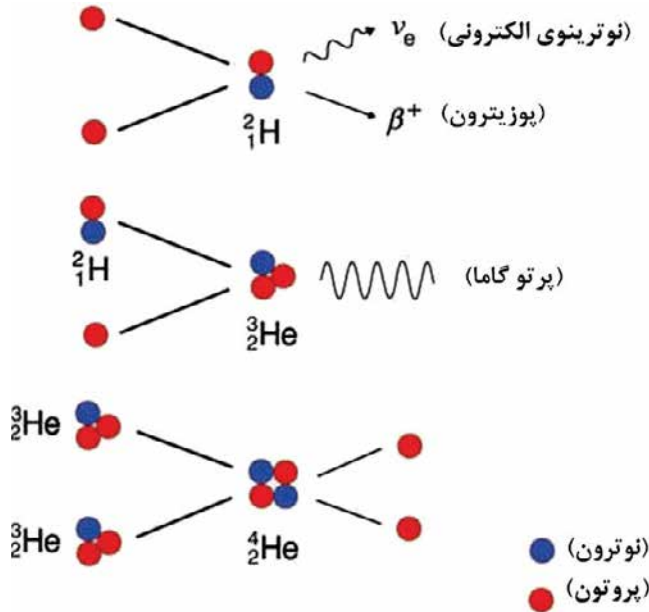
هر گردش باید از جایی شروع شود. شاید با پیروی از نظرات کپرنیک به جای بطلمیوس، منطقی‌ترین نقطه برای شروع مرکز خورشید باشد. در اینجا دما به حدود ۱۵ میلیون درجه کلوین می‌رسد؛ دمایی که برای ما هیچ معنی واقعی ندارد، جز آنکه بگوییم خیلی داغ است! این دما به سادگی به ما می‌گوید که ذرات در هسته مرکزی خورشید با چه سرعتی در حرکت‌اند، و این کلیدی است برای اینکه بدانیم خورشید چگونه انرژی خود را تولید می‌کند. هسته خورشید به طور عمده متشکل است از پروتون (هسته اتم هیدروژن)، ذرات آلفا (هسته هلیوم، شامل دو پروتون و دو نوترون) و الکترون.

تا اواخر قرن نوزدهم، دانشمندان نمی‌توانستند بفهمند که خورشید چگونه این نور و حرارت زیاد را تولید می‌کند. اگر خورشید به طور کامل از چیزی مانند زغال سنگ (به همراه اکسیژن لازم برای سوختن) درست شده بود، در مدت حدود هزار سال سوخته و تمام می‌شد. از آنجاکه خورشید دست کم برای هزاران سال نور و گرما گسیل می‌کرد، بدیهی بود که یک منبع شیمیایی نمی‌توانست عامل انرژی خورشید باشد. حدود سال ۱۸۷۰، هلمهولتز<sup>۱</sup> دریافت که اگر خورشید در حال انقباض باشد، تغییر انرژی آن می‌تواند منبع انرژی خورشیدی باشد. با دانستن جرم و اندازه خورشید، و مقدار انرژی‌ای که پیوسته خورشید در حال تولید و گسیل به درون فضا است، او توانست حساب کند که چقدر خورشید باید منقبض شود تا انرژی مشاهده شده را تأمین نماید. بدین ترتیب او دریافت که خورشید می‌توانست این خروجی انرژی را برای حدود ۲۰ میلیون سال حفظ کند. در اواخر قرن نوزدهم، مردم از این فرض که سن منظومه شمسی کمتر از ۲۰ میلیون سال است کاملاً خوشحال بودند؛ لذا ایده هلمهولتز به عنوان راه محتمل برای تولید انرژی در خورشید، تقریباً به صورت فراگیر پذیرفته شد.

اما هنوز قرن به پایان نرسیده بود که زمین‌شناسان دریافتند سن بسیاری از صخره‌های زمین و فسیل‌های درون آن، قطعاً صدها میلیون سال است؛ بنابراین نظر هلمهولتز اشتباه بود. در سال ۱۹۰۵، اینشتین رابطه معروف  $E = mc^2$  را به عنوان بخشی از نظریه نسبیت خاص منتشر کرد. بدین ترتیب می‌شد حدس زد که چون  $c$  (سرعت نور) خیلی بزرگ است، مقدار اندکی جرم ( $m$ ) می‌تواند به انرژی عظیمی تبدیل گردد. تا حدود سال ۱۹۲۵، فیزیکدانان جرم پروتون (هسته هیدروژن) را تعیین کرده بودند و همچنین دریافته بودند که جرم ذره آلفا (هسته هلیوم) اندکی کمتر از چهار پروتون است. آن‌ها فهمیدند که چهار هسته هیدروژن ممکن است بتواند با هم جوش خورده، یک هسته هلیوم را بسازد (فرایندی موسوم به گداخت<sup>۲</sup>) و جرمی که ظاهراً ناپدید می‌شود به انرژی تبدیل گردد.

این مشکل است! زیرا هسته‌های هیدروژن، پروتون‌هایی هستند با بار مثبت، و همدیگر را دفع می‌کنند. برای غلبه بر این نیروی دافعه، پروتون‌ها باید با سرعتی نزدیک به سرعت نور به سمت یکدیگر حرکت کنند. این کار تنها در دمای خیلی بالا ممکن است - دمای از مرتبه ۱۰ میلیون کلین. به دلیل جرم زیاد خورشید، فشار در مرکز آن (موسوم به هسته) باید خیلی بالا باشد تا بتواند با جرم لایه‌های رویین که بخش اعظم خورشید را تشکیل می‌دهند مقابله کند. محاسبات نشان می‌دهد که هسته به دمای مورد نیاز رسیده، از آن تجاوز می‌نماید. لذا منبع این انرژی، یک واکنش گداخت هسته‌ای در مرکز خورشید است. وقتی غبار و گازی که خورشید را می‌ساختند تحت گرانش خود رمبش نمودند، دما در مرکز افزایش یافت و پروتون‌ها سریع‌تر حرکت کردند. زمانی که دما از حدود ۱۰ میلیون کلین فراتر رفت، انرژی پروتون‌ها به آن حد رسید که دو پروتون در فرایند برخورد تا آنجا به هم نزدیک شوند که پدیده‌ای موسوم به «تونل‌زنی مکانیک کوانتومی<sup>۳</sup>» بتواند ایفای نقش کند. بدین ترتیب یکی از آن‌ها می‌توانست بر سد پتانسیل ناشی از نیروی الکترومغناطیسی بین دو پروتون چیره شود.

در نظریه کوانتوم، ذرات را (مانند دو پروتونی که به هم نزدیک می‌شوند) می‌توان به صورت تابع موج توصیف نمود. تابع موج عبارت است از احتمال یافتن ذره در یک مکان معین. اگر ذره در کنار سد پتانسیل باشد، تابع موج آن به صورت نمایی در سد محو می‌شود، اما همچنان یک دامنه کوچک در طرف دیگر سد خواهد داشت. بنابراین همچنان احتمال بسیار کمی وجود دارد که ذره



شکل ۲-۱: مراحل سه گانه در چرخه پروتون-پروتون. مراحل اول و دوم دو بار صورت می گیرد تا دو هسته هلیوم-۳ مورد نیاز برای مرحله سوم فراهم گردد.

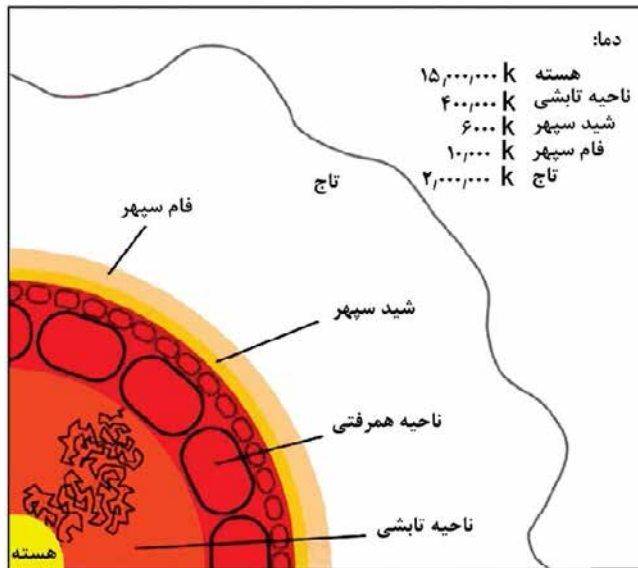
بتواند در طرف دیگر سد ظاهر شود. در این صورت، می گوئیم ذره در سد تونل زده است. بدین ترتیب، تونل زنی کوانتومی این اجازه را به یک ذره (در اینجا یک پروتون) می دهد که با عبور از میان یک سد پتانسیل بلندتر از انرژی جنبشی خود، اصول مکانیک کلاسیک را زیر پا بگذارد. در فرایندی که گفته شد، پروتون ها می توانند آن قدر به هم نزدیک شوند که نیروی قوی هسته ای آن ها را به طور موقت به هم پیوند دهد، و این پیش از واپاشی یکی از پروتون ها و تبدیل به یک نوترون، یک پوزیترون و یک نوترینوی الکترونی است. بدین ترتیب یک دوترون (هسته دوتریوم) باقی می ماند، که ترکیبی است از یک پروتون و یک نوترون. سپس پوزیترون با یک الکترون نابود می گردد، و انرژی جرم آن ها به وسیله دو فوتون پرتو گاما (و گاهی بیشتر) به خارج گسیل می شود. این نخستین گام در چیزی است که چرخه پروتون-پروتون نام دارد و توضیح آن در ادامه خواهد آمد (شکل ۲-۱ را ببینید).

اولین گام در چرخه پروتون-پروتون فوق العاده کند است. پروتون نوعاً یک میلیارد سال پیش

از اجرای این واکنش درنگ می‌کند! از این رو این مرحله گامی محدودکننده در چرخه واکنش‌های هسته‌ای است و سرعت کلی واکنش را تعیین می‌نماید. در اینجا ذکر این نکته ارزشمند است که کندی این واکنش برای حضور ما در زمین بسیار حیاتی است. اگر سرعت واکنش تنها ۱۰ برابر بود، خورشید تمام منبع انرژی خود را در ۱ میلیارد سال و نه ۱۰ میلیارد سال (که در ادامه به دست خواهیم آورد) می‌سوزاند و دیگر فرصتی برای شکل‌گیری نژاد بشر وجود نداشت!

## ۱-۲ چرخه پروتون - پروتون

- (۱) برهم‌کنش دو پروتون به تشکیل یک دوترون، شامل یک پروتون و یک نوترون، می‌انجامد. بار یکی از پروتون‌ها به وسیله یک پوزیترون (پادماده الکترون) دور می‌شود. یک نوترینوی الکترونی نیز تولید می‌گردد.
  - (۲) یک پروتون دیگر با دوترون برهم‌کنش کرده، هسته‌ای با دو پروتون و یک نوترون تولید می‌شود. این محصول ایزوتوپی از هلیوم بنام هلیوم-۳ است. یک پرتو گاما (فوتونی بسیار پرانرژی) تابش می‌گردد.
  - (۳) از برهم‌کنش دو هسته هلیوم-۳، یک هسته هلیوم (یا ذره آلفا) به همراه دو پروتون تولید می‌شود. پروتون‌ها می‌توانند در واکنش‌های بعدی شرکت کنند.
- این پایان ماجرا نیست. پوزیترون مرحله اول به سرعت با الکترون برهم‌کنش کرده، یک یا چند فوتون پرتو گاما حاصل می‌شود. فشار تولیدشده در هسته خورشید در نتیجه این واکنش‌های هسته‌ای از رمبش آن جلوگیری می‌نماید.
- فوتون‌ها - در ابتدا پرتو گاما- در مسیر خود به سمت سطح خورشید، به طور پیوسته با ماده برهم‌کنش دارند. مسیر آن‌ها پس از هر برهم‌کنش تصادفی است و لذا مانند راه رفتن تصادفی<sup>۴</sup> عمل می‌کنند. در نتیجه مدت زمانی از مرتبه ۱۰۰,۰۰۰ سال طول می‌کشد تا انرژی بتواند «ناحیه تابشی»<sup>۵</sup> اطراف هسته را که حدود دوسوم شعاع خورشید را در بر گرفته است، پشت سر بگذارد. در مسیر حرکت به سمت خارج، دما کم می‌شود؛ و چون فوتون‌ها در تعادل حرارتی با گاز هستند، طول موجشان افزایش می‌یابد.
- ناحیه‌ای با ضخامت حدود یک سوم شعاع خورشید، بین لبه بیرونی ناحیه تابشی و سطح



شکل ۲-۲: سطح مقطعی از خورشید؛ ناحیه‌های مورد اشاره در متن به همراه دمای آن‌ها.

خورشید، «ناحیه همرفتی» نام دارد. در اینجا، انرژی ابتدا به وسیله سلول‌های بزرگ همرفتی و سپس سلول‌های ریز، به خارج منتقل می‌شود (شکل ۲-۲). در نتیجه سطح خورشید، موسوم به شیدسپهر، دانه دانه و مانند کندوی زنبور عسل خودنمایی می‌کند. مرکز دانه‌ها، جایی که جریان همرفتی انرژی را به سطح می‌آورد، روشن‌تر است. پس از تابش انرژی به فضا و سرد شدن، ماده از لبه دانه‌ها به درون خورشید بازمی‌گردد و به همین دلیل این ناحیه تاریک‌تر است.

اتم هلیوم از دو پروتون، دو نوترون و دو الکترون ساخته شده است. مجموع جرم تک‌تک این ذرات  $4/0.331 \text{ amu}$  است. اما هلیوم-۴ جرم کمتری دارد، حدود  $4/0.026$  واحد جرم اتمی، یعنی  $0.305 \text{ amu}$  سبک‌تر از اجزاء تشکیل‌دهنده آن است. این همان جرمی است که در فرایند گداخت هسته‌ای به انرژی تبدیل شده است. درصد کاهش جرم عبارت است از  $\frac{0.305}{4} \times 100\%$  معادل  $7.6\%$ . برای تأمین این انرژی خروجی در خورشید، باید در هر ثانیه  $5/7 \times 10^{11} \text{ kg}$  هیدروژن به هلیوم تبدیل شود.

می‌دانیم که جرم خورشید  $2 \times 10^{30} \text{ kg}$  است، بنابراین از تقسیم آن بر مقدار کاهش جرم در ثانیه، عمر خورشید حدود ۱۰۰ میلیارد سال به دست می‌آید. اما همه جرم خورشید تبدیل نمی‌شود؛

بخشی به این خاطر که تنها ۷۵٪ آن هیدروژن است، ولی همچنین به این دلیل که دمای کافی (۱۵ میلیون کلوین) برای گداخت هسته‌ای تنها در هسته خورشید فراهم است. براساس پیش‌بینی مدل‌های نظری تنها ۱۰٪ جرم خورشید می‌تواند تبدیل شود. از این رو تصور ما این است که خورشید، به‌عنوان یک ستاره هیدروژن‌سوز، حدود ۱۰ میلیارد سال می‌درخشد. خورشید ۴/۵ میلیارد سال است که می‌درخشد، پس لازم نیست نگران کاهش فوری گرما و نور باشیم. اما در درازمدت، یک نگرانی برای جانداران روی زمین وجود دارد. شاید تعجب‌آور باشد، با کاهش درصد هیدروژن در هسته و افزایش هلیوم، نرخ گداخت هیدروژن به هلیوم عملاً افزایش می‌یابد؛ لذا با گذشت زمان، خورشید در حال داغ‌تر شدن است. در حال حاضر، خورشید ۲۰٪ داغ‌تر از زمانی است که منظومه شمسی تشکیل شد، و حدود یک میلیارد سال دیگر، انرژی خروجی از آن به اندازه‌ای می‌رسد که سطح زمین برای حیات بیش از حد داغ خواهد بود.

## ۲-۲ مسئله نوترینوی خورشیدی

با توجه به نرخ معلوم واکنش در چرخه پروتون-پروتون، حدود  $2 \times 10^{38}$  نوترینوی الکترونی در هر ثانیه تولید می‌شود، و جا دارد توجه کنیم که نوترینوها حدود ۲٪ از انرژی خروجی را با خود حمل می‌کنند. بنابراین تنها ۹۸٪ انرژی به وسیله تابش الکترومغناطیسی از خورشید دور می‌شود. در اینجا لازم است بدانیم که در مدل استاندارد فیزیک ذرات، سه گونه نوترینو وجود دارد: الکترونی، میونی و تائوئی. نوترینوهای تولیدی در خورشید از نوع نوترینوی الکترونی است.

چرخه پروتون-پروتون (که به زنجیره pp I معروف است) حدود ۶۸٪ انرژی خورشید را تأمین می‌کند. نوترینوهای تولیدی در این زنجیره انرژی نسبتاً کمی، معادل  $0.26 \text{ MeV}$  دارند و تا این اواخر قادر به آشکارسازی آن‌ها نبودیم. اما دو زنجیره دیگر نیز وجود دارد: زنجیره pp II با سهم ۱۴٪ در انرژی خورشیدی و زنجیره pp III با تنها ۱۱٪ سهم انرژی. اهمیت زنجیره pp III در نوترینوهای پرنرژی است که تولید می‌کند (از  $7 \text{ MeV}$  تا  $14 \text{ MeV}$ ) که باعث آشکارسازی راحت‌تر آن‌ها می‌شود.

در آزمایشی برای آشکارسازی نوترینوهای خورشیدی در دهه ۱۹۷۰، ری دیویس<sup>۸</sup> مخزنی را با ۳۸۰ مترمکعب از تتراکلرواتیلن ( $\text{C}_2\text{Cl}_4$ )، در عمق ۱۴۹۳ متری زیر زمین در معدن هومس‌تیک در



تاکوتای جنوبی<sup>۹</sup> قرار داد. در اعماق زمین اثر اشعه کیهانی که باعث خطا در آشکارسازی می شود (با جذب توسط لایه های صخره ای فوقانی) حذف می گردید. بسیار به ندرت نوترینویی از زنجیره ppIII با هسته کلر واکنش انجام می داد و تولید ایزوتوپ رادیواکتیو آرگون می کرد. پس از یک ماه دیویس مخزن را خالی کرد تا اتم های آرگون را از آن بیرون بکشد. به طور متوسط ۱۰ نوترینو در ماه شناسایی شد. مسئله آن بود که این رقم تنها یک سوم تعداد مورد انتظار را تشکیل می داد. با یادآوری اینکه این نوترینوها از واکنش های نسبتاً نادر در زنجیره ppIII سرچشمه می گرفتند، این می توانست ناشی از عدم فهم صحیح ما از این واکنش ها باشد. اما آزمایش های جدید نتایج دیویس را تأیید کرده است. او جایزه فیزیک نوبل در سال ۲۰۰۲ را برای کارش دریافت نمود. کمبود نوترینوهای مشاهده شده مسئله نوترینوی خورشیدی<sup>۱۰</sup> نام گرفت.

در ژرفای یک معدن بسیار عمیق در سادبری<sup>۱۱</sup> کانادا، کره ای ۱۲ متری که ۱۰۰۰ تن آب سنگین را در خود جای داده است، قرار دارد. (آب سنگین آبی است که در هسته خود از یک دوترون به جای پروتون سود می برد.) در هر روز حدود ۱۰ نوترینوی خورشیدی با دوترون واکنش نموده، دو پروتون و یک الکترون بسیار پرانرژی را ایجاد می کند. این الکترون با سرعتی بیش از سرعت نور در مایع حرکت می کند و یک موج ضربه<sup>۱۲</sup>، مشابه آنچه هواپیمای مافوق صوت تولید می کند، به وجود می آورد. این موج ضربه نور آبی رنگی را تولید می نماید که به تابش چرنکوف<sup>۱۳</sup> معروف است و به شکل مخروط گسترش می یابد. بدنه مخزن را حدود ۹۱۶ آشکارساز فوتون احاطه کرده است که وظیفه آشکارسازی تابش چرنکوف را بر عهده دارند (حدود ۵۰ فوتون در هر رویداد). بدین ترتیب شمارش تعداد نوترینوهای آشکار شده امکان پذیر است. آشکارساز سادبری تأیید نمود که تعداد نوترینوهای الکترونی که از خورشید به زمین می رسد تنها حدود ۳۳٪ تعداد مورد انتظار است.

در آزمایشی دیگر، ۲ تن نمک خالص (NaCl) به آب سنگین مخزن اضافه شد تا حساسیت آن را برای تشخیص میون و تائو سه برابر کند. به نظر می رسد که تعداد کل نوترینوهای اندازه گیری شده با منشأ خورشید، با تعداد نوترینوهای الکترونی که خورشید باید تولید کند همخوانی خوبی دارد. تنها راه توجیه آن است که گویا نوترینوهای الکترونی در مسیر حرکت از خورشید می توانند به یکی از دو نوع نوترینوی دیگر تبدیل شوند (یا نوسان کنند).

تصور می شد که نوترینوی الکترونی مانند فوتون بدون جرم است. همان طور که اینشتین نشان

داد، هر چیزی که با سرعت نور در حرکت است، گذر زمان را تجربه نمی‌کند. بنابراین به هیچ عنوان یک نوترینوی الکترونی نمی‌توانست به یکی از دو نوع دیگر تبدیل شود. اما اگر نوترینو جرم داشته باشد، با سرعت نور حرکت نخواهد کرد؛ لذا گذر زمان را تجربه کرده، امکان نوسان به نوترینوی میونی با تائوئی وجود خواهد داشت. عقیده بر این است که در مسیر حرکت از مرکز خورشید تا زمین، نوترینوها خود را به صورت یکنواخت بین هر سه نوع توزیع می‌کنند - از این رو تنها یک سوم نوترینوهای الکترونی برای آشکارسازی باقی می‌ماند - دقیقاً مطابق با مشاهدات. مسئله نوترینوی خورشیدی بدین ترتیب حل شده است!

### ۳-۲ جو خورشید: شیدسپهر، فامسپهر و تاج خورشیدی

اگر به خورشید بنگریم (با استفاده از صافی‌های مناسب) به نظر می‌رسد که لبه کاملاً متمایزی دارد. البته در عمل سطحی برای خورشید وجود ندارد. در حقیقت دید ما تا آنجا در جو خورشید نفوذ می‌کند که گاز به اصطلاح از لحاظ اپتیکی غلیظ می‌شود. این لایه که عمیق‌ترین لایه قابل دید در جو خورشید است شیدسپهر<sup>۱۴</sup> نام دارد (علت این نام گذاری در انگلیسی آن است که فوتون‌هایی که می‌بینیم از آنجا سرچشمه می‌گیرد) و ضخامت آن به حدود ۵۰۰ کیلومتر می‌رسد. دما از ۶۵۰۰ K در عمق به ۴۴۰۰ K در نواحی بالایی آن می‌رسد. دمای مؤثر شیدسپهر حدود ۵۸۰۰ K است. انتقال همرفتی انرژی از پایین، سطحی خال دار را موجب شده است - دانه‌های خورشیدی با پهنای حدود ۱۰۰۰ km. هر دانه ۵ تا ۱۰ دقیقه دوام می‌آورد؛ گاز داغی که از زیر این سطح بالا می‌آید، انرژی خود را تابش کرده، سرد شده، مجدداً پایین می‌رود.

ناحیه‌ای با ضخامت ۲۰۰۰ کیلومتر بالای شیدسپهر، «فامسپهر»<sup>۱۵</sup> نام دارد. چگالی گاز در این ناحیه حدود ۱۰,۰۰۰ بارافت می‌کند و دما از ۴۴۰۰ K در بالای شیدسپهر به حدود ۲۵,۰۰۰ K افزایش می‌یابد. بالای این قسمت «ناحیه گذار»<sup>۱۶</sup> است، جایی که دما به سرعت بالا می‌رود و در فاصله چند صد کیلومتر به حدود یک میلیون کلوین می‌رسد. ناحیه گذار به منطقه بیرونی خورشید که «تاج خورشیدی»<sup>۱۷</sup> نام دارد ختم می‌شود و در آنجا دما به بیش از دو میلیون کلوین می‌رسد. شکل و گستره تاج خورشیدی به شدت به فعالیت خورشیدی، که در «چرخه لکه خورشیدی»<sup>۱۸</sup> تغییر می‌کند، بستگی دارد؛ اما نوعاً تا چندین برابر شعاع خورشید امتداد می‌یابد. در کمینه خورشیدی،

وقتی که فعالیت پایین است، در استوای خورشید تا نقاط دورتری امتداد دارد و الگوی میدان مغناطیسی خورشید به خوبی در نزدیکی قطب‌ها قابل ترسیم است. در بیشینه خورشیدی شکل کلی یکپارچه‌تر است و ساختاری پیچیده دارد.

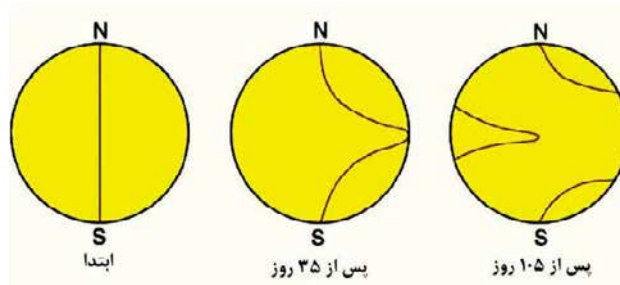
چگالی تاج بسیار پایین است، حدود  $10^{14}$  بار کمتر از جو در سطح زمین، و درخشش آن در ناحیه مرئی حدود یک میلیون بار کمتر از شیدسپهر است. از این رو تنها در کسوف کامل خورشید، یا با استفاده از تلسکوپ‌های ویژه‌ای بنام تاج‌نگار<sup>۱۹</sup> که نور را از قرص خورشید حذف می‌کند، قابل مشاهده است. اینکه چگونه تاج خورشیدی به این دمای بالا می‌رسد همچنان یک راز است، اما تصور بر این است که انرژی به وسیله میدان مغناطیسی به داخل آن منتقل می‌شود.

## ۲-۴ میدان مغناطیسی خورشید و چرخه لکه خورشیدی

تصویر سطح خورشید معمولاً نواحی تیره‌تری را بر روی آن نشان می‌دهد. این نواحی لکه‌های خورشیدی نام دارند و اغلب به صورت دوتایی یا گروهی ظاهری می‌شوند - یک گروه لکه خورشیدی. هر لکه یک سایه<sup>۲۰</sup> در مرکز دارد که با نیم سایه‌ای روشن‌تر<sup>۲۱</sup> احاطه شده است. دلیل تیره‌تر بودن لکه‌ها آن است که دمای آن‌ها معمولاً از دمای سطحی کمتر است. دمای سایه حدود هزار کلوین پایین‌تر از اطراف است. گاهی در اطراف یک گروه از لکه‌های خورشیدی منطقه‌ای روشن‌تر از سطح عادی دیده می‌شود. به این نواحی شنزار<sup>۲۲</sup> می‌گویند.

از حرکت لکه‌های خورشیدی در سطح آن جهت اندازه‌گیری دوره تناوب چرخشی خورشید استفاده شده است. دوره تناوب در استوای خورشید حدود ۲۸ روز به دست آمده است، اما با افزایش عرض جغرافیایی بیشتر می‌شود و بر اثر پدیده‌ای که چرخش تفاضلی<sup>۲۳</sup> نام دارد در قطب‌ها به حدود ۳۵ روز می‌رسد. لکه‌های خورشیدی ارتباط تنگاتنگی با این چرخش تفاضلی و تأثیر آن بر میدان مغناطیسی خورشید دارند.

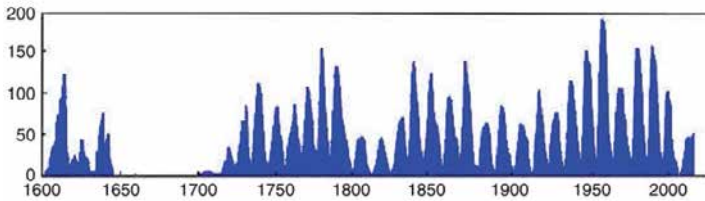
میدان خورشید باید از حرکت ذرات باردار به وجود آمده باشد و عامل آن تقریباً به طور قطع در ناحیه همرفتی قرار دارد، هرچند که هنوز مدل خوبی برای آن ارائه نشده است. فرض کنید در زمانی معین، خورشید میدان دوقطبی یکنواختی داشته باشد؛ درست شبیه به براده‌های آهن تحت نفوذ میدان مغناطیسی یک آهن ربای میله‌ای. با نگاه به چهره خورشید، ما می‌توانیم خط میدان را



شکل ۲-۳: پیچش میدان مغناطیسی خورشید به دلیل چرخش تفاضلی خورشید.

در مرکز قرص خورشید درست در زیر شیدسپهر تصور کنیم. میدان و محیط اطرافش را چسبیده به هم در نظر بگیرید. حال ۳۵ روز در زمان پیش می‌رویم. میدان در نزدیکی قطب‌ها یک چرخش کامل کرده و در همان نقطه‌ای که از زمین دیده می‌شد، قرار گرفته است؛ اما در نزدیکی استوا، اضافه چرخشی برابر با  $\frac{35-28}{24}$  از یک دور یا  $360^\circ \times \frac{1}{4}$  داشته است، معادل  $90^\circ$  (شکل ۲-۳) را ببینید). پس از سه چرخش دیگر در قطب، میدان نزدیک استوا یک بار بیشتر چرخیده است. ملاحظه می‌کنید که میدان «تاییده» شده، متراکم‌تر می‌گردد. به دنبال این داستان، میدان «شناور» شده، در برخی نقاط حلقه وار از سطح خورشید بالا می‌آید. جایی که میدان مغناطیسی از سطح بیرون می‌زند، از حرکت جریان همرفتی انرژی به طرف بیرون جلوگیری می‌کند. از این رو این نقاط سردتر از دیگر قسمت‌ها خواهند بود؛ به عبارتی یک لکه خورشیدی ظاهر می‌شود. انرژی‌ای که در اینجا راهی به بیرون ندارد، مایل است که از نقاط دیگر در اطراف گروه لکه‌های خورشیدی به بیرون راه یابد؛ به همین دلیل این ناحیه داغ‌تر و در نتیجه روشن‌تر است - یک شنزار.

می‌توان قطبش میدان را در سطوح خورشید اندازه گرفت. ما می‌توانیم قطبش میدان متناظر با لکه‌های مزدوج خورشیدی را بسنجیم. یک جفت لکه خورشیدی را در نیم کره بالایی در نظر بگیرید. با فرض اینکه قطب شمال در بالا است، میدان به سمت ما از سطح خارج می‌شود و قطبش مثبت دارد. وقتی که دوباره به سطح وارد می‌شود، پشت به ما و قطبش آن منفی است. از این رو لکه‌ها قطبش مخالف دارند. در نیم کره بالایی لکه سمت چپ قطبش مثبت داشته، سمت راستی قطبش منفی دارد. با توجه به تغییر جهت میدان در استوا، این قطبش در نیم کره جنوبی برعکس است.



شکل ۲-۴: تعداد متوسط لکه‌های خورشیدی در ۴۰۰ سال گذشته.

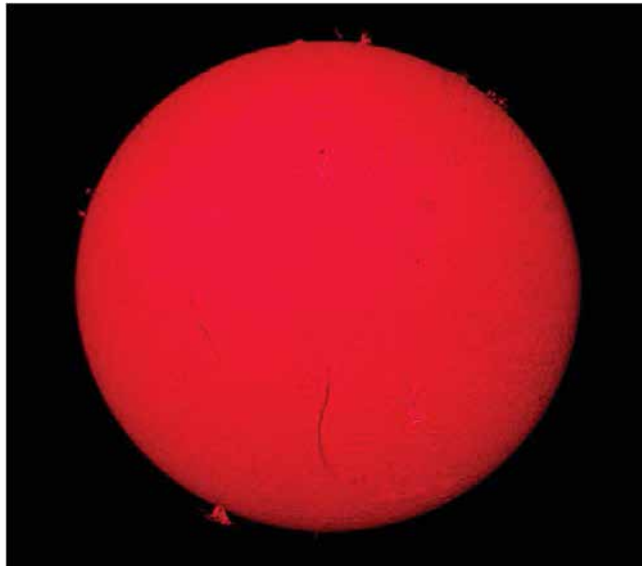
پیچش میدان مغناطیسی از حالت ابتدایی خود، به تدریج باعث افزایش تعداد لکه‌های قابل مشاهده در سطح خورشید می‌شود. این رقم بعد از ۳ تا ۴ سال به بالاترین حد می‌رسد، که بیشینه لکه خورشیدی نام دارد. پس از آن شدت میدان شروع به کاهش می‌کند و تعداد لکه‌ها در یک بازه ۷ تا ۸ ساله به نقطه‌ای می‌رسد که چهره خورشید عاری از لکه می‌گردد، این نقطه را کمینه لکه خورشیدی می‌نامند. (این حالت در سال‌های ۲۰۰۷ تا ۲۰۰۹ رخ داد، که یک دوره خیلی طولانی از کمینه لکه خورشیدی بود.)

تمام فرایند مجدداً تکرار می‌شود و به چرخه لکه خورشیدی معروف است. اغلب گفته می‌شود که چرخه ۱۱ ساله است، هرچند که این عدد می‌تواند تا حدی تغییر کند و در دهه‌های اخیر به طور میانگین ۱۰/۵ سال بوده است. چرخه دوم یک ویژگی متمایز دارد؛ قطبش میدان وارونه می‌شود. بنابراین شاید بهتر باشد طول یک چرخه را ۲۱ سال بدانیم، نه ۱۱ سال.

**شکل ۲-۴** نموداری از تعداد لکه‌های خورشیدی را از سال ۱۶۰۰ نشان می‌دهد. تغییرات دوره‌ای آن کاملاً آشکار است. نمودار دو مشخصه جالب را دارد: فقدان کامل لکه‌ها در اواخر قرن هفدهم، معروف به کمینه ماندر<sup>۲۴</sup>؛ و فعالیت روبه افزایش خورشیدی در ۵۰ سال منتهی به آغاز هزاره سوم؛ البته با کاهش فعالیت، به ویژه در بیشینه‌ای که قله آن در سال ۲۰۱۳ است.

## ۵-۲ زبانه‌ها، شراره‌ها و باد خورشیدی

چنانچه خورشید به هنگام کسوف در نور گذار  $H\alpha$  (بخوانید: اچ آلفا)، یا به وسیله یک تلسکوپ ویژه  $H\alpha$ ، مورد رصد قرار گیرد، اغلب ستون‌های روشنی از گاز دیده می‌شود که از فام سپهر به درون تاج خورشیدی کشیده شده‌اند. این ستون‌ها زبانه‌های خورشیدی<sup>۲۵</sup> نام دارند (شکل ۲-۵). عامل



شکل ۲-۵: یک تصویر H $\alpha$  از خورشید که زبانه‌ها را در لبه سطح آن نشان می‌دهد.

آن‌ها گاز یونیده‌ای است که میدان مغناطیسی خورشید آن را به طرف بالا حمل کرده است، و سپس از تاج به درون فام‌سپهر ریزش می‌کند. خورشید پیوسته در حال جوشش و فوران ذرات به خارج است. این ذرات به وسیله میدان مغناطیسی خورشید با شتاب از آن دور می‌شوند و چیزی را می‌سازند که باد خورشیدی<sup>۲۶</sup> نام دارد. از برهم‌کنش باد خورشیدی و جو زمین، شفق‌های قطب شمال و جنوب پدید می‌آید که بعداً به آن خواهیم پرداخت.

شراره‌های خورشیدی<sup>۲۷</sup> که از فام‌سپهر و تاج خورشیدی سرچشمه می‌گیرند، انفجارهای شدیدی هستند که تصور می‌شود انرژی آن‌ها از گسستن خطوط میدان مغناطیسی و بازپیوستن آن‌ها به یکدیگر و در پی آن آزاد شدن انرژی مغناطیسی به دست می‌آید. در بازه‌ای از چند دقیقه تا چند ساعت، یک انرژی کل بین  $۱۰^{۲۲}$  تا  $۱۰^{۲۵}$  ژول آزاد می‌شود. این انرژی، پروتون‌ها، الکترون‌ها و یون‌های سنگین‌تر را شتاب بخشیده، به سرعت‌های نسبی، نزدیک به سرعت نور، می‌رساند. شراره‌ها بیشتر بالای نواحی فعال در اطراف لکه‌های خورشیدی رخ می‌دهند، جایی که میدان‌های شدید مغناطیسی از سطح خورشید بیرون زده، به تاج خورشید نفوذ می‌کنند. به همین دلیل شراره‌ها در زمان بیشینه خورشیدی فراوان‌ترند.



شکل ۲-۶: شفق شمالی.

شراره‌ها به چیزی که «برون‌ریزی جرم از تاج»<sup>۲۸</sup> نامیده می‌شود ارتباط دارند. در این پدیده موادی شامل الکترون، پروتون و مقدار کمی عناصر سنگین‌تر چون هلیوم، اکسیژن و آهن از تاج خورشید دفع می‌شود. این مواد بخشی از میدان مغناطیسی تاج را با خود حمل می‌کند. جریان‌هایی از ذرات پرانرژی مشاهده شده‌اند که تنها در مدت ۱۵ دقیقه به زمین رسیده‌اند (یعنی حرکت با سرعتی تقریباً برابر با یک سوم سرعت نور). آن‌ها می‌توانند تهدیدی برای فضاوردان باشند و در گذشته به تجهیزات ماهواره‌ها آسیب می‌رساندند. امکان تداخل با ارتباطات رادیویی موج کوتاه وجود دارد و برهم‌کنش بین میدان مغناطیسی سوار بر آن‌ها و خطوط انتقال الکتریسیته می‌تواند به مشکلاتی همچون قطع شبکه منجر شود؛ اتفاقی که در مارس ۱۹۸۹ در کانادا، در استان کبک رخ داد.

## ۲-۶ شفق قطبی<sup>۲۹</sup>

یکی از جلوه‌های زیبای برهم‌کنش باد خورشیدی و جو زمین، نمایش‌های رنگارنگ نور است که در آسمان شب دیده می‌شود (شکل ۲-۶). آن‌ها بیشتر در نواحی اطراف قطب‌های شمال و جنوب مغناطیسی دیده می‌شوند و به شفق شمالی و جنوبی معروف‌اند. شفق شمالی<sup>۳۰</sup> به رنگ سبز و قرمز جلوه می‌کند و بیشتر در اطراف اعتدال بهاری و پاییزی دیده می‌شود؛ هرچند هنوز دلیل این تقارن را نمی‌دانیم.

شفق‌های قطبی از برخورد ذرات باردار و اتم‌ها در نقاط بالایی جو زمین به وجود می‌آیند. چون خطوط میدان مغناطیسی زمین در بالای قطب‌های مغناطیسی شمال و جنوب به درون فضا باز می‌شوند، احتمالاً ذرات باردار در نزدیکی قطب‌های مغناطیسی، راحت‌تر به نقاط بالایی جو دسترسی پیدا می‌کنند. در آنجا این ذرات با اتم‌های گاز درون جو برخورد کرده، الکترون‌ها را به ترازهای بالاتر انرژی می‌رانند. با برگشت الکترون‌ها به حالت پایه، نور تابش می‌شود. بیشترین نور به نظر می‌رسد از اکسیژن اتمی تابش شود، با درخششی مایل به سبز در طول موج ۷/۵۷۷ نانومتر و درخشش قرمز تیره در طول موج ۶۳۰ نانومتر. در میان انبوه رنگ‌های دیگر که گاهی مشاهده می‌شود، نیتروژن اتمی برانگیخته رنگ آبی تابش می‌کند، درحالی‌که نیتروژن مولکولی رنگ ارغوانی تولید می‌نماید. اغلب شفق قطبی به شکل نوارهایی پرده‌مانند است که در جهت شرق به غرب هم‌خط شده‌اند. گاهی این نوارها به آهستگی تغییر می‌کنند، ولی در زمان‌های دیگر پیوسته در حرکت به نظر می‌رسند. راستای میدان زمین در محل ناظر، شکل آن‌ها را تعیین می‌کند، و مشاهدات نشان داده‌اند که الکترون‌های باد خورشیدی در مسیری حلزونی شکل و در امتداد خطوط میدان مغناطیسی به سمت زمین حرکت می‌کنند. نویسنده خود شاهد این منظره حیرت‌آور ناشی از حرکت الکترون‌ها در امتداد خطوط میدان مغناطیسی و تشکیل شفق درست بالای سر بوده است. در چشم‌انداز دور، به نظر می‌رسد که پرتوهای همگرای شفق قطبی به صورت پرتوهای عمودی نور به سمت بالا رفته، چیزی را که تاج نام دارد درست بالای خود شکل می‌دهند.

## ۷-۲ خسوف و کسوف

اگر مدار ماه در صفحه مداری زمین به دور خورشید قرار داشت، در اول ماه قمری کسوف (خورشیدگرفتگی) و در میانه آن خسوف (ماه‌گرفتگی) داشتیم. اما به دلیل این حقیقت که مدار ماه ۵ درجه کج است، معمولاً ماه در بالا یا پایین خط زمین-خورشید قرار دارد، و گرفت‌ها کمتر رخ می‌دهد. شاید تصور کنید که ماه در هنگام خسوف کاملاً محو می‌شود، اما این‌گونه نیست. نوری که در جو زمین پراکنده می‌شود روی ماه می‌افتد، و لذا ماه را همچنان می‌توان دید. اگر در هنگام خسوف، زمین را از ماه مشاهده می‌کردیم، لبه قرمزرنگی را اطراف زمین می‌دیدیم، چراکه غبار موجود در جو زمین نور آبی را بیشتر از قرمز پخش می‌کنند. از این رو تنها نور قرمز به اطراف زمین

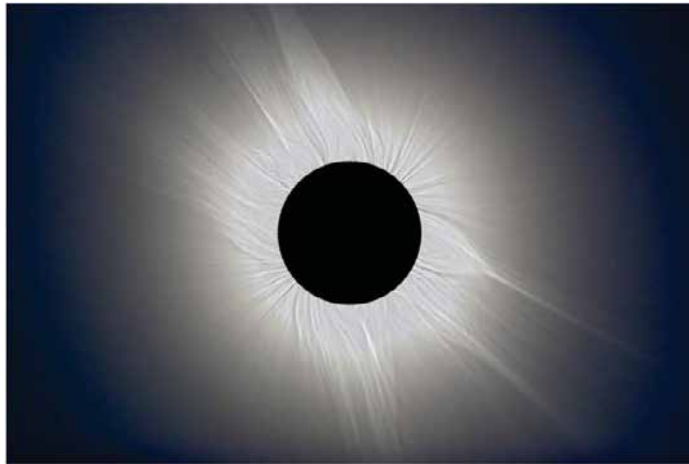


می‌رسد، و همین نور است که بازتابش آن را از ماه می‌بینیم. در خسوف کلی، ماه متمایل به قرمز است، و روشنایی و رنگ آن کاملاً به میزان غبار موجود در جو زمین بستگی دارد. به دنبال فوران آتش‌فشانی گسترده (مانند رویداد کوه سنت هلن<sup>۳۱</sup> در سال ۱۹۸۰)، نور آن قدر کم به ماه می‌رسد که به رنگ خاکستری تیره دیده می‌شود؛ برعکس، زمانی که جو عاری از گردوغبار است، با یک رنگ زیبای قرمز متمایل به نارنجی خودنمایی می‌کند.

به دلیل برهم‌کنش‌های کشندی (جزر و مدی) بین ماه و زمین، ماه به تدریج در حال دور شدن از زمین است. این حقیقت که فعلاً اندازه زاویه‌ای ماه اندکی بیش از خورشید است باعث به وجود آمدن یکی از تماشایی‌ترین رویدادهای سماوی بنام خورشیدگرفتگی کلی<sup>۳۲</sup> یا کسوف کلی می‌شود. برای یک گرفت کلی، باید ماه در صفحه منظومه شمسی (صفحه‌ای که شامل زمین و خورشید است) قرار گیرد، در مرحله ماه نو بوده، اندازه زاویه‌ای آن بزرگ‌تر از خورشید باشد. دوره تناوب مداری ماه به دور زمین ۲۷/۳ روز است، بنابراین در هر ۱۳/۶۵ روز یک بار از صفحه دایره البروج عبور می‌کند (در دو نقطه، موسوم به نقاط گرهی<sup>۳۳</sup>). فاصله بین دو ماه نو (دوره تناوب هلالی ماه) ۲۹/۵ روز است، لذا این دو واقعه در دوره‌ای برابر با کوچک‌ترین مضرب مشترک ۱۳/۶۵ و ۲۹/۵ هم‌زمان می‌شوند. در حقیقت، چون برای یک گرفت کلی لازم نیست که ماه دقیقاً در نقطه گرهی مدار خود باشد، مقداری خطا نیز مجاز است، و به طور تقریبی در هر ۱۷۷ روز یک خورشیدگرفتگی رخ می‌دهد ( $۱۷۷ = ۶ \times ۲۹/۵$  و  $۱۷۷/۴۵ = ۱۳ \times ۱۳/۶۵$ ).

البته هر گزتی لزوماً کلی نیست. هم ماه و هم زمین مداری بیضوی دارند. اگر ماه در دورترین فاصله از زمین باشد (در آنجا که نقطه اوج<sup>۳۴</sup> نام دارد، و لذا اندازه زاویه‌ای ماه کوچک‌تر است) و زمین در نزدیک‌ترین فاصله به خورشید قرار بگیرد (در حضیض، جایی که خورشید بزرگ‌ترین اندازه زاویه‌ای را دارد)، ماه نمی‌تواند خورشید را به طور کامل بپوشاند. گرفت‌های این حالت حلقوی هستند، چون حلقه‌ای از خورشید همچنان دور ماه دیده می‌شود. این وضعیت را اغلب «حلقه آتش» می‌نامند و هنگام سپیده دم یا غروب که خورشید قرمز رنگ شده، بسیار دیدنی است.

در یک گرفت کامل، نخست سایه ماه در آغاز چیزی که به مسیر گرفت<sup>۳۵</sup> معروف است زمین را لمس می‌کند. پهنای طول مسیر به موقعیت زمین و ماه در مدارشان بستگی دارد. نزدیک استوا، ماه به سطح زمین نزدیک‌تر است، در نتیجه اندازه زاویه‌ای آن بزرگ‌تر و مسیر گرفت پهن‌تر



شکل ۲-۷: خورشیدگرفتگی کلی در مارس ۲۰۰۶.

می‌باشد؛ و همین‌جا است که می‌توان طولانی‌ترین گرفت‌های کلی را مشاهده کرد. طولانی‌ترین کسوف کلی ممکن، حدود ۷ دقیقه و ۳۰ ثانیه طول می‌کشد. این کسوف در استوا و در زمانی که زمین در دورترین نقطه از خورشید و ماه در نزدیک‌ترین فاصله به زمین قرار دارد رخ می‌دهد. طولانی‌ترین گرفت ممکن در ۳۰۰۰ سال آینده، در ۱۶ ژوئیه سال ۲۱۸۶ اتفاق خواهد افتاد و ۷ دقیقه و ۲۹ ثانیه طول خواهد کشید. طولانی‌ترین کسوف معاصر در هاوایی و در ۱۱ ژوئیه سال ۱۹۹۱ مشاهده شد و کسوف کلی ۶ دقیقه و ۵۳ ثانیه طول کشید. اینکه تاریخ‌ها در سال این‌قدر به هم نزدیک هستند اتفاقی نیست (۱۱ و ۱۶ ژوئیه). زمین در ۴ ژوئیه در اوج مداری خود، دورترین فاصله از خورشید، قرار دارد؛ بنابراین طولانی‌ترین گرفت‌های کلی اطراف این تاریخ روی می‌دهد. پیشینیان دریافتند که مجموعه گرفت‌ها، کسوف و خسوف روی هم، در هر ۱۸ سال و ۱۱ روز و ۸ ساعت تکرار می‌شود (این دوره تناوب زمانی را ساروس<sup>۳۶</sup> می‌نامند). به علت وجود یک سوم شبانه‌روز در این دوره تناوب، گرفت‌های مشابه خورشیدی پس از سه دوره ساروس (۵۴ سال و ۳۴ روز) در یک نقطه از زمین مشاهده می‌شود (در دو دوره متوالی ساروس، مجموعه گرفت‌ها برای دو نقطه که یک سوم محیط زمین فاصله دارند تکرار می‌شود).

هنگام خورشیدگرفتگی کلی، امکان رصد تاج خورشید وجود دارد (شکل ۲-۷). اطراف کمینه خورشیدی، معمولاً می‌توان ستون‌های بلند نور را که به فضا کشیده شده‌اند، تقریباً در امتداد

استوای خورشید مشاهده کرد؛ هم‌زمان نزدیک قطب‌ها، الگوی میدان مغناطیسی خورشید قابل‌رؤیت است (در شکل ۲-۷ این دو نشان داده شده است). نزدیک بیشینه خورشیدی، تاج دچار هرج و مرج بیشتری می‌شود و ساختار کمتری را می‌توان دید.

## یادداشت‌ها

- 1 - Hermann von Helmholtz
- 2 - Fusion
- 3 - Quantum-mechanical tunnelling
- 4 - Random Walk
- 5 - Radiative Zone
- 6 - Convective Zone
- 7 - atomic mass units (amu)
- 8 - Ray Davis
- 9 - Homestake Mine in South Dakota
- 10 - Solar Neutrino Problem
- 11 - Sudbury, in Canada
- 12 - Shockwave
- 13 - Cherenkov Radiation
- 14 - photosphere
- 15 - Chromosphere
- 16 - Transition Region
- 17 - Solar Corona
- 18 - Sun Spot Cycle
- 19 - Coronagraph
- 20 - Umbra
- 21 - Penumbra

۲۲- Plage؛ کلمه‌ای فرانسوی مترادف Beach در انگلیسی. این پدیده‌ها شبیه به شنزارهای روشنی هستند که در زمینه تیره‌تر کنارشان به چشم می‌آیند. (مترجم)

- 23 - Differential Rotation
- 24 - Maunder minimum
- 25 - Solar Prominences
- 26 - Solar Wind
- 27 - Solar Flares
- 28 - Coronal Mass Ejection
- 29 - Aurora
- 30 - Aurora Borealis
- 31 - Mount St Helens
- 32 - total solar eclipse
- 33 - Nodal Points
- 34 - Apogee
- 35 - Eclipse Track
- 36 - Saros

[www.gshahali.ir](http://www.gshahali.ir)

نسخه رایگان

## فصل ۳

### سیمای منظومه شمسی

می‌دانیم اگر کاسه بزرگی از آب در اختیار داشتیم، زحل در آن شناور می‌ماند؛ اما چطور به این نتیجه رسیده‌ایم؟ در این فصل نگاهی خواهیم داشت به منظومه شمسی خودمان به عنوان نمونه‌ای از منظومه‌های خورشیدی، و اینکه چطور ستاره‌شناسان توانسته‌اند اندازه و جرم سیارات را به دست آورند (بدین ترتیب می‌توانیم چگالی آن‌ها را حساب کنیم و دریابیم که زحل روی آب شناور می‌ماند). در ادامه، مدار سیارات را مورد بحث قرار خواهیم داد؛ اینکه چطور تابش خورشید و ویژگی‌های سیارات، دمای سطح آن‌ها را تعیین می‌کند؛ و اینکه چگونه جو یک سیاره در طول حیات آن شکل می‌گیرد و تغییر می‌کند.

#### ۱-۳ سیاره چیست؟

تا همین اواخر، تعریف معینی برای سیاره وجود نداشت، و حتی برای مدتی، *سِرس*<sup>۱</sup> که بزرگ‌ترین جسم در کمربند سیارک‌ها بین مریخ و مشتری است، به عنوان سیاره شناخته می‌شد. در سال ۲۰۰۵ کشف یک جرم سماوی (ابتدا بنام UB<sub>۳۱۳</sub> ۲۰۰۳) اعلان گردید. این جسم کمی بزرگ‌تر از پلوتون است و در فاصله ۹۶/۷ AU از خورشید قرار دارد (سه برابر فاصله پلوتون). این کشف ضرورت یک تصمیم‌گیری را ایجاد نمود که آیا این جسم باید دهمین سیاره منظومه شمسی باشد و یا اینکه در عوض، پلوتون کنار گذاشته شود. پلوتون به طور قابل ملاحظه‌ای کوچک‌تر از چیزی است که در ابتدا و هنگام کشف تصور می‌شد، مدار بیضوی آن بسیار کشیده است و با صفحه منظومه شمسی زاویه‌ای بزرگ می‌سازد. اگر در زمان‌های اخیر کشف گردیده بود، بسیار بعید است که عنوان سیاره به آن داده می‌شد.

افلاک‌نمای هایدن<sup>۲</sup>

زمانی که قرار شد افلاک‌نمای معتبر هایدن در موزه تاریخ طبیعی آمریکا در نیویورک، نمایشگاه منظومه شمسی جدید خود را برپا کند، مدیر آن، نیل تایسون<sup>۳</sup>، به این نتیجه رسید که پلوتون جایی در آن ندارد - منظومه شمسی تنها هشت سیاره داشت - و اینکه پلوتون فقط یکی از کوتوله‌های یخی بی‌شماری است که در ورای نپتون قرار دارند. وقتی نیویورک تایمز این حقیقت را در ۲۲ ژانویه ۲۰۰۱ منتشر کرد، هم عموم مردم و هم برخی دانشمندان معروف، صدای اعتراضشان بلند شد. اما تایسون پای حرفش ایستاد و نمایشگاه بدون تغییر ادامه یافت.

این سؤال که چه چیز را باید یک سیاره دانست تا نشست اتحادیه بین‌المللی نجوم<sup>۴</sup> (IAU) در اوت سال ۲۰۰۶ مورد توجه جدی قرار نگرفت. تعریف مورد اتفاق سه قسمت داشت:

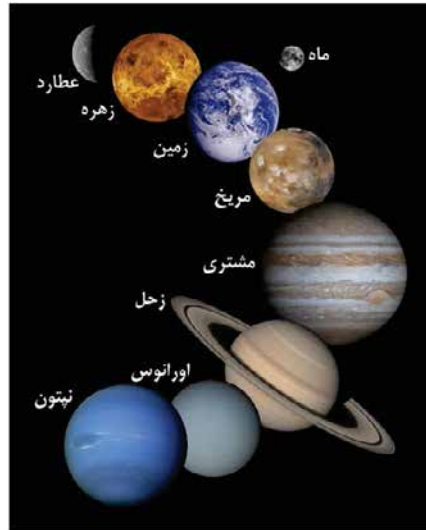
## سیاره:

- (۱) به دور خورشید گردش می‌کند.
- (۲) به قدر کافی جرم دارد تا گرانش آن بر استحکامش فائق آمده، تقریباً گرد شود. در این حالت گفته می‌شود که در تعادل هیدرواستاتیک<sup>۵</sup> قرار دارد.
- (۳) مدار خود را «پاک» کرده است؛ یعنی آنکه تنها جسم با آن اندازه است که در منظومه شمسی و در آن فاصله از خورشید قرار دارد.

دو قسمت اول نسبتاً واضح است، اما قسمت سوم کمتر. معنی آن اساساً این است که نباید هیچ جسم دیگری با اندازه‌ای قابل مقایسه، در آن مدار به دور خورشید گردش کند. این قسمت سوم بود که عنوان پلوتون را از آن گرفت.

IAU تعریفی نیز برای آنچه که به سیاره کوتوله<sup>۶</sup> معروف است وضع کرد. این اجسام دو شرط اول و دوم تعریف سیاره را برآورده می‌کنند، ولی شرط سوم را خیر. به علاوه آن‌ها نباید قمر جسم دیگری باشند. بدین ترتیب هم‌اکنون پلوتون و  $UB_{۳۱۳}$  ۲۰۰۳، که حالا نام اریس<sup>۷</sup> به خود گرفته، دو سیاره کوتوله شناخته می‌شوند. سیاره کوچک سِرِس نیز در تعریف سیاره کوتوله جا می‌گیرد، بنابراین در ابتدا ما هشت سیاره (شکل ۳-۱) و سه سیاره کوتوله در منظومه شمسی داشتیم. البته با گذشت زمان و کشف اجرام بزرگ دیگر در ورای نپتون، تعداد سیاره‌های کوتوله افزایش می‌یابد.

شکل ۳-۱: هشت سیاره منظومه شمسی و ماه.  
 عطارد (مارینر ۱۰)؛  
 زهره (ماژلان)؛  
 مریخ (Mars Global Surveyor)؛  
 مشتری (کاسینی)؛  
 زحل، اورانوس و نپتون (ویجر).

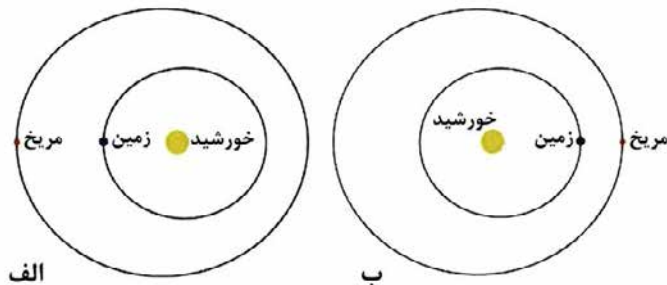


تا پایان سال ۲۰۱۳، اتحادیه بین‌المللی نجوم (IAU) دو جسم دیگر را به عنوان سیاره کوتوله شناسایی کرده بود: هائومیا و ماکی‌ماکی<sup>۸</sup>، هرچند هنوز جزئیات این دو به حدی که بتوان مطمئن بود در تعریف سیاره کوتوله می‌گنجد مورد رصد قرار نگرفته است. اگر فرض شود که سپیدایی<sup>۹</sup> یک جسم دور کمتر از یک است (که باید این طور باشد)، از روشنایی و فاصله آن می‌توان کمینه قطر آن را برآورد کرد. اگر این مقدار بزرگ‌تر از ۸۳۸ کیلومتر باشد (که در این صورت جسم بر اثر گرانش خود به شکل کره‌ای خواهد بود)، IAU اجازه می‌دهد چنین جسمی تحت این فرض که سیاره کوتوله خواهد بود، نام‌گذاری شود.

در اوت سال ۲۰۱۱، مایک براون<sup>۱۰</sup>، که گروه کاشف اریس را در رصدخانه پالومار<sup>۱۱</sup> رهبری کرده بود، فهرستی از ۳۹۰ جسم را منتشر کرد که نامزد سیاره کوتوله بودند (با احتمال‌های متفاوت، از «ممکن» تا «تقریباً مطمئن»). او یازده عدد از آن‌ها را عملاً با اطمینان، سیاره کوتوله می‌داند، شامل کواوار و سدنا<sup>۱۲</sup>، به همراه دوازده جسم دیگر که با احتمال خیلی بالا سیاره کوتوله هستند.

### ۲-۳ مدار سیاره‌ها

سیارات در مداری بیضوی، که خورشید در یک کانون آن قرار دارد، به دور خورشید می‌چرخند. نیم‌قطر بزرگ،  $a$ ، یک پارامتر کلیدی است که نصف قطر بزرگ بیضی می‌باشد. در یک مدار



شکل ۳-۲: موقعیت‌هایی که مریخ در کوچک‌ترین (الف) و بزرگ‌ترین (ب) اندازه زاویه‌ای در هنگام مقابله دیده می‌شود.

دایره‌ای  $a$  شعاع مدار خواهد بود. به دلیل خروج از مرکز مدار سیاره‌ها،  $e$ ، فاصله آن‌ها از خورشید از مقدار کمینه  $a(1-e)$  (در حضیض<sup>۱۳</sup>) تا بیشینه  $a(1+e)$  (در اوج<sup>۱۴</sup>) تغییر می‌کند. در منظومه شمسی، زهره با خروج از مرکز  $0/07$ ، عملاً مداری دایره‌ای دارد. مدار نپتون و زمین، به ترتیب با خروج از مرکز  $0/01$  و  $0/17$ ، تقریباً دایره‌ای است. عطارد و سیاره‌های کوتوله پلوتون و اریس، به ترتیب با  $0/249$ ،  $0/441$  و  $0/249$ ، کشیده‌ترین مدار را دارند. جالب توجه است که پلوتون در قسمتی از مدارش می‌تواند از نپتون به خورشید نزدیک‌تر شود. خروج از مرکز مدار مریخ نتیجه‌ای جالب دارد<sup>۱۵</sup>. وقتی که مریخ در هر دو سال و دو ماه، به نزدیک‌ترین موقعیت از زمین می‌رسد، فاصله آن از ما ممکن است بسیار متفاوت باشد. در نتیجه، اندازه زاویه‌ای مریخ در تقرب‌های آن تقریباً تا دو برابر تغییر می‌کند، و همین، مقدار جزئیات سطحی آن را که می‌توانیم از زمین ببینیم تعیین می‌نماید. مریخ در چند روز مقابله<sup>۱۶</sup> به ما نزدیک است، و ما می‌توانیم آن را در آسمان نیمه شب ببینیم. چنانچه در هنگام مقابله، زمین در حضیض و مریخ در اوج مداری خود باشد، اندازه زاویه‌ای مریخ کوچک‌ترین است (شکل ۳-۲-الف). در شکل ۳-۲-ب وضعیت برعکس است، و آن هنگامی است که مریخ با بزرگ‌ترین قطر زاویه‌ای در هنگام مقابله دیده می‌شود.

در چهارم ژوئیه هر سال، زمین در اوج، یعنی دورترین فاصله از خورشید قرار دارد؛ از این رو نزدیک‌ترین تقرب‌های مریخ در ماه‌های تابستان رخ می‌دهد. نزدیک‌ترین تقرب برای حدود  $60,000$  سال، در ۲۷ اوت ۲۰۰۳ رخ داد، وقتی که مریخ  $55,758,006$  km از زمین فاصله داشت و



قطر زاویه‌ای آن اندکی بیش از ۲۵ ثانیه قوسی بود. برعکس، چنانچه در هنگام مقابله زمین در حضیض باشد و مریخ در اوج، مانند شکل ۳-۲-الف، اندازه زاویه‌ای اندکی کمتر از ۱۴ ثانیه قوسی است؛ تفاوتی بسیار چشمگیر!

اندازه زاویه‌ای که این سال‌ها در حین مقابله مشاهده می‌شود در حال افزایش است، تا اینکه در ۲۷ ژوئیه ۲۰۱۸، مریخ به قطر زاویه‌ای ۲۴/۳۱ ثانیه قوسی برسد، و این تنها اندکی کمتر از پیشینه مطلق خواهد بود.

### زاویه میل مداری

زاویه میل مداری یک سیاره عبارت است از زاویه‌ای که صفحه مداری آن با صفحه منظومه شمسی می‌سازد. بر اساس تعریف، صفحه منظومه شمسی زمین را در برمی‌گیرد، پس زاویه میل مداری زمین صفر است. زوایای میل مداری سیاره‌ها کوچک‌اند، مگر در مورد عطارد با  $7^\circ$ ، و سیاره‌های کوتوله پلوتون و اریس، به ترتیب با  $17^\circ$  و  $44/2^\circ$ .

### ۳-۳ ویژگی‌های سیارات

#### جرم سیارات

می‌توان جرم سیاره را به دست آورد اگر:

- (۱) سیاره یک یا چند قمر طبیعی داشته باشد؛ مانند زمین، مریخ، مشتری، زحل، اورانوس و نپتون. و سیارات کوتوله پلوتون (کازن<sup>۱۷</sup>) و اریس (دیسنومیا<sup>۱۸</sup>).
- (۲) سیاره یک ماهواره مصنوعی داشته باشد؛ مانند فضاپیماهای ماژلان<sup>۱۹</sup> به دور زهره و فضاپیماهای مسنجر<sup>۲۰</sup> به دور عطارد.
- (۳) یک ماهواره مصنوعی از کنار آن عبور کرده باشد؛ مانند عبور مارینر ۱۰ از کنار عطارد.

بدین ترتیب اندازه‌گیری جرم تمام سیاره‌های منظومه شمسی و دو تا از سیاره‌های کوتوله آن میسر شده است. اجازه دهید برای مثال جرم مریخ را به دست آوریم.

#### محاسبه جرم مریخ

مریخ قمری دارد به نام فوبوس<sup>۲۱</sup> که با دوره تناوب ۷ ساعت و ۳۹/۲ دقیقه (S ۲۷, ۵۵۲)، و

در مداری تقریباً دایره‌ای با نیم‌قطر بزرگ  $۹۳۷۷/۲ \text{ km}$  یا  $۹/۳۷۷۲ \times ۱۰^۶ \text{ m}$  به دور مریخ گردش می‌کند. با این مقادیر و دانستن مقدار ثابت جهانی گرانش،  $G$ ، و فرض یک مدار دایره‌ای، به سادگی می‌توان جرم را حساب کرد<sup>۲۲</sup>. پس از محاسبه، از اینکه دریافتیم مقدار من،  $۶/۴۳ \times ۱۰^{۲۳} \text{ kg}$ ، بسیار به جرم پذیرفته‌شده برای مریخ،  $۶/۴۲ \times ۱۰^{۲۳} \text{ kg}$ ، نزدیک است خوشحال شدم. محاسبه ساده‌ام کمی خطا دارد، زیرا کشیدگی اندک مدار فوبوس را نادیده گرفتم.

### چگالی سیارات

از بزرگی زاویه‌ای سیاره و فاصله آن، قطر سیاره و سپس حجم آن به دست می‌آید؛ و با دانستن جرم سیاره، چگالی آن حساب می‌شود. برای نمونه زحل را در نظر بگیرید. شکل آن کره کامل نیست بلکه یک کره وار پیچ<sup>۲۳</sup> است؛ از این رو شعاع استوایی آن بیش از شعاع قطبی است. با استفاده از مقدار متوسط  $۵۹,۰۰۰ \text{ km}$  برای شعاع، حجم آن  $۷/۷۶ \times ۱۰^{۲۳} \text{ m}^۳$  به دست می‌آید. جرم زحل  $۵/۷ \times ۱۰^{۲۶} \text{ kg}$  است و در نتیجه چگالی آن  $۶۶۲ \text{ kg/m}^۳$  خواهد بود که اندکی کمتر از مقدار پذیرفته‌شده  $۶۸۷ \text{ kg/m}^۳$  است. دقت کنید که این عدد از چگالی آب،  $۱۰۰۰ \text{ kg/m}^۳$  در دمای  $۴^\circ\text{C}$ ، کمتر است!

### دوره تناوب چرخشی

در سیاره‌هایی چون مریخ، مشتری و زحل، می‌توان چرخش نشانه‌ای را بر سطح و یا درون جو مشاهده کرد؛ مانند «لکه قرمز» که در جو مشتری قرار دارد.

سطح عطارد از زمین قابل تشخیص نیست و زهره هم با ابر پوشیده شده است. در مورد عطارد، از رصد نشانه‌های ضعیف چنین برداشت می‌شد که این سیاره به صورت کشندی به خورشید قفل شده است (مانند ماه نسبت به زمین) و لذا دوره تناوب چرخشی آن برابر با دوره تناوب مداری آن (۸۸ روز زمین) می‌بود. در این صورت، یک نیم‌کره همواره رو به خورشید بوده، داغ می‌شد، و نیم‌کره دیگر رو به فضای خارج، خیلی سرد بود. اما مسئله زمانی آغاز شد که دمای سطح رو به زمین را در هنگام مقارنه سفلی<sup>۲۴</sup>، با استفاده از گسیل رادیویی و فرسرخ آن اندازه گرفتند. دما خیلی بالاتر از چیزی بود که انتظار می‌رفت؛ و این یعنی آنکه در گذشته نزدیک، این سمت رو به خورشید بوده است. پاسخ این معما زمانی به دست آمد که دوره تناوب چرخشی آن به وسیله رادار

برابر با ۶۴۷/۵۸ روز اندازه‌گیری شد. بنابراین عطارد پس از دو بار گردش به دور خورشید، سه بار دور خود چرخیده است. به نظر می‌رسد زمانی که در مدار بیضوی خود به خورشید نزدیک است، به صورت کشندی قفل می‌شود، و هنگامی که دورتر شد می‌تواند به دور محور خود بچرخد. رصدهای راداری در دهه ۱۹۶۰ نشان داد که سرعت چرخش زهره بسیار کند است و ۲۴۳/۰۱ روز طول می‌کشد تا یک بار به دور محورش بچرخد، یعنی ۱۸/۳ روز بیشتر از زمان گردش به دور خورشید! حتی تعجب‌آورتر این که جهت چرخش آن برعکس جهت مورد انتظار است. چنانچه از بالا به منظومه شمسی بنگریم ملاحظه می‌شود که تمام سیارات به صورت پادساعت‌گرد به دور خورشید گردش می‌کنند. چرخش به دور خود نیز در اکثر سیاره‌ها پادساعت‌گرد است، اما زهره (همراه با اورانوس و پلوتون) در جهت چرخش عقربه‌های ساعت می‌چرخد. این چرخش را پس‌رونده<sup>۲۵</sup> می‌نامند.

### دمای سیارات

به سه روش می‌توان دمای سطح سیاره را اندازه گرفت و یا برآورد کرد:

- (۱) در مورد عطارد، زهره و مریخ، فضاپیماهای ارسالی دمای سطح را مستقیماً اندازه‌گیری کرده‌اند.
- (۲) دمای سیارات بیرونی<sup>۲۶</sup> را می‌توان از تابش فرورسرخ آن‌ها برآورد کرد.
- (۳) با فرض اینکه سیاره مانند جسم سیاه عمل می‌کند و انرژی دریافتی از خورشید را تابش می‌نماید، می‌توان دمایی اسمی برای سیاره به دست آورد. (بایستی بین انرژی جذب‌شده از خورشید و گسیل‌شده به وسیله سیاره تعادل وجود داشته باشد. این حالت در مورد مشتری چندان صادق نیست، چراکه به تدریج در حال انقباض است، و لذا انرژی پتانسیل گرانشی در حال تبدیل به گرما می‌باشد.)

اگر از روش اخیر دمای سطح زمین را محاسبه کنیم به مقدار ۲۷۸ کلوین می‌رسیم. این عدد از دمای متوسط واقعی سطح زمین خیلی دور نیست. اما آیا باید این گونه باشد؟ ۵۰٪ زمین، به طور متوسط، پوشیده از ابر است و از این رو تنها حدود ۷۷٪ انرژی خورشیدی را جذب می‌کند. اگر این کاهش را لحاظ کنیم، دمای زمین تنها ۲۶۰ کلوین خواهد بود. اما اثر گلخانه‌ای، ناشی از وجود

دی اکسید کربن، متان و بخار آب در جو، باعث می شود که زمین به اندازه یک جسم سیاه کامل تابش نکند، و بدین ترتیب دمای زمین بالا می رود. (گازهای گلخانه ای تابش فرسرخ زمین را جذب کرده، در جهات مختلف منتشر می کنند. از این رو بسیاری از تابش فرسرخ به زمین بازمی گردد.) این دو اثر تقریباً همدیگر را خنثی می کنند و دمای متوسط ۲۸۸ کلوین را به ما می دهند. این نکته لازم به ذکر است که بدون گازهای گلخانه ای در جو زمین، سیاره ما قابل سکونت نبود.

### گرم شدن زمین

گازهای اصلی تشکیل دهنده جو زمین، یعنی نیتروژن،  $N_2$ ، و اکسیژن،  $O_2$ ، گاز گلخانه ای نیستند. دلیل آن این است که گازهای دواتمی مانند این دو، اشعه فرسرخ را نه جذب و نه تابش می کنند. دی اکسید کربن گاز گلخانه ای اصلی در جو است. برای اعصار متمادی درصد آن در جو پایدار مانده است، اما متأسفانه سوختن سوخت های فسیلی (که دارای کربن ذخیره شده هستند) به سرعت در حال افزایش دی اکسید کربن موجود در جو است، و به طور قطع بیشترین سهم را در این حقیقت که دمای زمین در ۷۰ سال اخیر بالا رفته است، دارد. این رویداد را «گرم شدن زمین» یا «گرم شدن آب و هوا»<sup>۲۷</sup> می نامند. (از آنجا که دمای زمین در سال های نخست قرن بیست و یکم افزایش نیافته است، عبارت «گرم شدن زمین» بی صدا کنار گذاشته شده است.)

بخار آب یکی از گازهای گلخانه ای است که عملاً بیشترین سهم را در اثر گلخانه ای دارد، یعنی چیزی بین ۳۶٪ تا ۶۶٪. مقدار بخار آب موجود در هوا از جایی به جای دیگر دارای تفاوت چشمگیری است، اما در کل، فعالیت انسان بر میزان غلظت آن تأثیر مستقیم ندارد (مگر در جاهایی مثل زمین های آبیاری شده) و اثرات آن بر آب و هوای زمین ثابت مانده است.

هم اکنون مقدار دو گاز گلخانه ای دیگر هم در حال افزایش است:

- توانایی حفظ گرما در متان ( $CH_4$ ) ۲۰ برابر دی اکسید کربن است. ما هر ساله ۵۰۰ میلیون تن متان به جو اضافه می کنیم. این کار از طریق پرورش دام، معادن زغال سنگ، کندوکاو برای نفت و گاز طبیعی، مزارع برنج و پوسیدگی زباله در محل انباشت آن صورت می گیرد.

۲) هرساله بین ۷ تا ۱۳ میلیون تن اکسید نیتروژن، ناشی از کودهای نیتروژنی، فضولات حیوانی و انسانی و آگزوز خودروها، به جو وارد می‌شود.

بیش از دو درجه افزایش در دمای متوسط زمین می‌تواند عواقب بسیار زیان‌باری برای نسل بشر به دنبال داشته باشد؛ به همین دلیل موضوع با جدیت در حال پیگیری است.

### سپیدایی (Albedo)

همان‌گونه که مثال زمین نشان داد، دمای سیاره عملاً تحت تأثیر دو عامل است: نخست اینکه چقدر از انرژی تابشی خورشید به فضا بازتابش می‌شود - موسوم به سپیدایی سیاره - و دوم، اثر گازهای گلخانه‌ای، اگر وجود داشته باشد.

سپیدایی زمین حدود ۰/۳۷ است، بدین معنی که ۳۷٪ انرژی خورشیدی را منعکس می‌کند و لذا ۶۳٪ آن را جذب می‌نماید. سپیدایی زهره حدود ۰/۷ است (مقدار ذکر شده در منابع از ۰/۶۵ تا ۰/۸۵ متغیر است)، در نتیجه تنها ۳۰٪ انرژی تابشی خورشید را جذب می‌کند. اما جو متشکل از دی‌اکسید کربن آن به قدری غلیظ است که دمای سطح آن به‌طور چشمگیری بالا می‌رود. مریخ دارای یک سپیدایی برابر با ۰/۱۵ است، از این‌رو بیشتر انرژی خورشیدی را جذب می‌کند، اما دی‌اکسید کربن اندک موجود در جو آن (حدود ۰/۰۱ زمین) نمی‌تواند گرمای زیادی را به دام اندازد؛ بدین دلیل هم‌اکنون سطح آن برای بقای گونه‌های حیات بر پایه آب/کربن بیش‌ازحد سرد است. با وجود این در گذشته، زمانی که آتش‌فشان‌های عظیم مقادیر گسترده‌ای گاز (شامل بخار آب، دی‌اکسید کربن و متان) را در جو منتشر می‌کردند، دمای آن به میزان قابل توجهی بالاتر بوده، احتمالاً حیات می‌توانسته است در آنجا پا بگیرد.

### ۳-۴ جو سیارات

در تمام موارد، سرمنشأ ابتدایی جو سیاره، سحابی خورشیدی‌ای بوده است که خورشید و دیگر سیارات از آن درست شدند. از این‌رو ترکیبی شبیه به خورشید داشته، به‌طور عمده از عناصر سبک هیدروژن و هلیوم تشکیل می‌شده است. این سحابی تنها منبع جو سیارات بیرونی بود، اما نمی‌توانسته به سیارات درونی کمک زیادی کرده باشد؛ چراکه پیش از شکل‌گیری این سیاره‌ها،

باد خورشیدی ستاره جوان، بیشتر سحابی خورشیدی را به خارج، آن طرف سیارات داخلی، پرتاب کرد. به اضافه، همان گونه که در ادامه خواهیم دید، سطح نسبتاً گرم و گرانش پایین این سیارات نمی‌توانسته جوئی متشکل از گازهای سبک را حفظ کند.

جوئی را متشکل از چند نوع گاز مختلف، برخی با مولکول‌های سبک چون هیدروژن و هلیوم، و بعضی با مولکول‌های سنگین‌تر مانند دی‌اکسید کربن، آمونیاک و متان، در نظر بگیرید. قانون «همپارشی انرژی<sup>۲۸</sup>» اظهار می‌دارد که تمام گونه‌های مولکولی در جو، انرژی جنبشی تقریباً یکسانی دارند ( $\frac{1}{2}mv^2$ ). یعنی این که در دمای یکسان، مولکول‌های سبک‌تر با جرم کمتر، سریع‌تر از مولکول‌های سنگین‌تر حرکت می‌کنند. انرژی جنبشی متوسط مولکول‌های گاز بستگی به دمای جو دارد، پس در دمای بالاتر، مولکول‌ها سریع‌تر حرکت می‌کنند.

در دمای معین (و بالطبع انرژی جنبشی معین)، سرعت مولکول با ریشه دوم جرمش نسبت معکوس دارد، از این رو مولکول‌های هیدروژن (جرم مولکولی ۲) به‌طور متوسط با سرعتی چهار برابر مولکول‌های اکسیژن (جرم مولکولی ۳۲) حرکت می‌کنند. اگر احياناً مولکولی در قسمت فوقانی جو به سمت بالا حرکت کند، در صورتی که از سرعت کافی برخوردار باشد، می‌تواند از سرعت فرار سیاره تجاوز کرده، به فضا بگریزد. سرعت فرار به جرم سیاره بستگی دارد، از این رو واضح است که سیاره‌های داغ و سبک می‌توانسته‌اند تمام مولکول‌های سبک‌تری را که روزی احتمالاً در جو خود داشته‌اند، از دست بدهند، در حالی که سیاره‌های سردتر و پرجرم‌تر قادر خواهند بود که حتی سبک‌ترین مولکول‌ها را در جو خود نگهدارند.

برای نیتروژن (جرم مولکولی ۲۸) و اکسیژن (جرم مولکولی ۳۲) در جو زمین و دمای حدود ۳۰۰ کلوین، سرعت مولکولی به ترتیب برابر است با ۰/۵۲ و ۰/۴۸ کیلومتر بر ثانیه. این ارقام بسیار کمتر از سرعت فرار از زمین، ۱۱/۲ km/s، است و از این رو انتظار نداریم این گازها از جو زمین فرار کنند. البته حقیقت ماجرا به این سادگی نیست. به علت برخورد بین مولکول‌ها، همه آن‌ها با یک سرعت حرکت نمی‌کنند؛ برخی از سرعت میانگین سریع‌ترند و برخی کندتر. تعداد نسبی مولکول‌هایی که سرعتشان حول و حوش مقدار میانگین است از «توزیع ماکسول-بولتزمن<sup>۲۹</sup>» به دست می‌آید. سرعت گسر بسیار کوچکی از مولکول‌های گاز به‌طور قابل ملاحظه‌ای بیشتر از متوسط است؛ یک مولکول از هر دو میلیون مولکول سرعتی سه برابر مقدار متوسط دارد و از هر ۱۰<sup>۱۶</sup> مولکول یکی با

سرعتی بیش از پنج برابر متوسط حرکت می کند. نتیجه این که حتی اگر سرعت متوسط مولکولی بسیار کمتر از سرعت فرار باشد، تعداد خیلی کمی از آن ها ممکن است سرعتشان به اندازه ای باشد که فرار کنند. محاسبه نشان می دهد که اگر سرعت فرار سیاره ای بیش از شش برابر سرعت متوسط یک نوع مولکول معین باشد، در آن صورت در طول حیات منظومه شمسی، مقدار قابل توجهی از آن مولکول فرار نکرده است.

در جو زمین، سرعت متوسط مولکولی اکسیژن و نیتروژن بسیار کمتر از یک ششم سرعت فرار است. ولی ماه را با سرعت فرار  $2/4 \text{ km/s}$  در نظر بگیرید؛ با فرض این که اگر هم جوّی داشته دمای آن به اندازه جو زمین بوده است، سرعت متوسط مولکولی نیتروژن و اکسیژن تنها حدود یک پنجم سرعت فرار در ماه می باشد، و بنابراین عجیب نیست که الآن جوّی ندارد. اگر عطارد جو داشت، دمای آن حدود  $700 \text{ K}$  می بود و در نتیجه سرعت متوسط مولکولی نیتروژن و اکسیژن حدود  $0/8 \text{ km/s}$  می شد که خیلی بیشتر از یک ششم سرعت فرار عطارد،  $4/2 \text{ km/s}$ ، است. این مولکول ها به اندازه کافی فرصت داشته اند تا فرار کنند.

بر پایه همین استدلال ها متوجه می شویم چرا مقدار هیدروژن در اتمسفر زمین این قدر کم است. مولکول های هیدروژن به طور متوسط با سرعت حدود  $2 \text{ km/s}$  حرکت می کنند که کمی بیشتر از یک ششم سرعت فرار زمین است. بنابراین هیدروژن می توانسته است فرار کند و حالا تنها  $55/0000\%$  از جو را تشکیل می دهد! در عوض مشتری را در نظر بگیرید؛ سرعت فرار آن  $60 \text{ km/s}$  است با دمای سطح  $100$  کلوین. سرعت حرکت مولکول های هیدروژن در جو مشتری تنها حدود  $1 \text{ km/s}$  است، یعنی یک شصتم سرعت فرار. به همین دلیل هیدروژن بیشترین سهم را در جو مشتری دارد.

### خلاصه

- عطارد، ماه و دیگر قمرها، به استثنای تیتان و تریتون<sup>۳۰</sup>، جو مؤثری ندارند، هرچند که عطارد جوّی گذرا و بی نهایت رقیق دارد که از هیدروژن و هلیومی که به طور موقت از باد خورشیدی به تله می اندازد درست می شود.
- دیگر سیارات زمینسان<sup>۳۱</sup> نمی توانند هیدروژن یا هلیوم را نگه دارند، لذا همه جو

ابتدایی ناشی از سحابی خورشیدی را ازدست داده‌اند.

- سیاره‌های بیرونی، هم پرجرم هستند و هم سرد، از این رو توانسته‌اند همه گازهای سبکی را که از سحابی خورشیدی کسب کرده‌اند، حفظ کنند. اگرچه جرم تیتان و تریتون مشابه ماه است، اما به دلیل سرمای کافی توانسته‌اند جوئی، عمدتاً از نیتروژن و متان، برای خود نگه دارند.
- سیاره‌های کوتوله پلوتون و اریس آن قدر سرد هستند که نیتروژن و هر گاز دیگری در آنجا منجمد شده، قسمتی از پوسته می‌شود.

### جو ثانوی

زهره، زمین و مریخ، بعدها و در ادامه حیات خود، جو دیگری را از گازهای خروجی آتش‌فشانی به دست آوردند. تصور می‌شود که تنها ۱٪ از اتمسفر کنونی زمین، باقی مانده از جو اولیه آن باشد. انفجارهای آتش‌فشانی، مقادیر مختلفی گاز را که از ذوب پوسته سیاره در عمق زیاد سرچشمه می‌گیرد تولید می‌کند. فوران‌ها متفاوت‌اند؛ اما در کل، گازهایی چون بخار آب، دی‌اکسید کربن، دی‌اکسید گوگرد، سولفید هیدروژن، آمونیاک، نیتروژن و اکسید نیتروژن آزاد می‌کنند. عقیده بر این است که نور فرابنفش، بخار آب را در لایه‌های بالایی جو زهره و مریخ به هیدروژن و هیدروکسیل (OH) شکسته است. سپس با فرار مولکول‌های هیدروژن، بخار آب از جو این دو سیاره حذف شده است.

### تحول جو زمین

دیدیم که چگونه جو ابتدایی زمین، که اساساً از هیدروژن و هلیوم تشکیل شده بود، از دست رفت و جو دیگری ناشی از گازهای خروجی آتش‌فشانی جایگزین آن شد. این جو در ابتدا از دی‌اکسید کربن و بخار آب، همراه با مقداری نیتروژن ولی عملاً بدون هیچ اکسیژنی، تشکیل شده بود، و شاید ۱۰۰ برابر مقدار کنونی گاز داشت. با سرد شدن زمین، بیشتر دی‌اکسید کربن در آب اقیانوس‌ها حل شد و به صورت کربنات در آن رسوب کرد.

تغییر اساسی حدود ۳/۳ میلیارد سال قبل آغاز شد، و آن زمانی بود که نخستین باکتری‌های مولد اکسیژن در زمین پدید آمد. این باکتری‌ها در طی چند میلیارد سال، بیشتر اکسیژن موجود در



جو ما را به وجود آوردند. سپس، باکتری‌ها و اکسیژن می‌توانستند با آمونیاک خروجی از آتش‌فشان‌ها واکنش کرده، نیتروژن بیشتری را تولید کنند. بقیه نیتروژن نیز از تأثیر تابش فرابنفش بر آمونیاک، در فرآیندی موسوم به نورکافت<sup>۳۲</sup>، به دست آمد.

با گسترش پوشش گیاهی، میزان اکسیژن جو به‌طور چشمگیری بالا رفت و لایه اوزون ظاهر شد. این لایه، گونه‌های نوشکفته حیات را از گزند پرتو فرابنفش محافظت می‌نمود و آن‌ها را قادر ساخت تا علاوه بر اقیانوس‌ها، در خشکی نیز به زندگی ادامه دهند. تقریباً تا ۲۰۰ میلیون سال قبل، حدود ۳۵٪ جو را اکسیژن تشکیل می‌داد. باقیمانده آن عمدتاً نیتروژن بود، زیرا برخلاف دیگر گازهای موجود در جو ثانوی، به راحتی در آب حل نمی‌شود.

فعالیت آتش‌فشانی، ذخیره مولکولی جو را بازسازی می‌نماید. به‌ویژه با تجدید پیوسته گاز گلخانه‌ای دی‌اکسید کربن، گرمای لازم برای ادامه حیات در سطح زمین تأمین شده است. کربنات‌هایی که از حل شدن دی‌اکسید کربن در اقیانوس‌ها به وجود می‌آیند، و صدف جانوران دریایی ساخته شده از کربنات کلسیم، در بستر اقیانوس ته‌نشین می‌شوند. به این ترتیب، شاید انتظار این باشد که میزان دی‌اکسید کربن در جو کاهش یابد و در نتیجه زمین سردتر شود. اما حرکت صفحات اقیانوسی پوسته زمین، آن‌ها را در مقابل صفحات قاره‌ای بالا می‌آورد. با توجه به چگالی بالاتر صفحات اقیانوسی، آن‌ها به زیر صفحات قاره‌ای نفوذ می‌کنند - فرایندی موسوم به فرورانش<sup>۳۳</sup> - و فعالیت آتش‌فشانی، دی‌اکسید کربن را به جو بازمی‌گرداند. در درازمدت، فرایندی که امروزه مشکلات بسیاری را برای بشر به وجود می‌آورد، از قبیل زمین‌لرزه و سونامی، بخشی از مسئولیت حفظ حیات بر روی زمین را بر عهده داشته است.

## پانویس‌ها

- 1 - Ceres
- 2 - Hayden Planetarium
- 3 - Neil deGrasse Tyson
- 4 - International Astronomical Union (IAU)
- 5 - Hydrostatic Equilibrium
- 6 - Planet Dwarf
- 7 - Eris
- 8 - Haumea and Makemake

- 10 - Mike Brown
- 11 - Palomar Observatory
- 12 - Quaoar and Sedna
- 13 - Perihelion
- 14 - Apehelion

۱۵ - نقطهٔ اوج مدار زمین نزدیک به نقطهٔ حضیض مدار مریخ است و بالعکس. (مترجم)

۱۶ - Opposition، هنگامی که زمین بین خورشید و مریخ قرار دارد، از این رو مریخ نسبت به خورشید در سمت مقابل آسمان است.

- 17 - Charon
- 18 - Dysnomia
- 19 - Magellan spacecraft
- 20 - MESSENGER spacecraft
- 21 - Phobos

۲۲ - جزئیات محاسبه را در کتاب درآمدی بر نجوم و کیهان‌شناسی، بخش ۳-۳-۱ ببینید. (مترجم)

۲۳ - Oblate Spheroid؛ در قطب‌ها فرو رفته است.

۲۴ - Inferior Conjunction؛ زمانی که عطارد بین خورشید و زمین قرار می‌گیرد و از این رو ما نیمهٔ پشت به خورشید را مشاهده می‌کنیم.

۲۵ - Retrograde، به معنی حرکت معکوس.

۲۶ - به چهار سیارهٔ مشتری، زحل، اورانوس و نپتون سیاره‌های بیرونی می‌گویند. چهار سیارهٔ دیگر سیارات درونی نامیده می‌شوند.

- 27 - Global Warming or Climate Change
- 28 - Equipartition of Energy
- 29 - Maxwell-Boltzmann Distribution
- 30 - Titan and Triton

۳۱ - Terrestrial Planets؛ منظور سیاره‌های عطارد، زهره و مریخ است. (مترجم)

- 32 - Photolysis
- 33 - Subduction

## فصل ۴

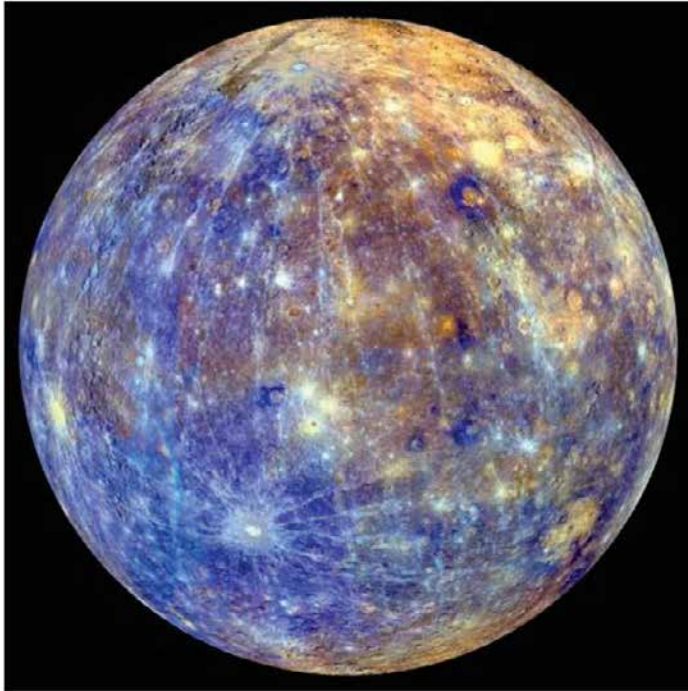
### سیارات صخره‌ای

دانش ما پیرامون منظومه شمسی با استفاده از فضاپیماها افزایش چشمگیری داشته است. فضاپیماهایی که با گذر از کنار سیاره‌ها، گردش به دور آن‌ها و حتی فرود بر آن‌ها، عکس‌هایی با کیفیت بسیار بالا و داده‌هایی ذی‌قیمت در اختیار ما قرار داده‌اند. در این فصل به مطالعه زمین و ماه، و همچنین سیاره‌های عطارد، زهره و مریخ خواهیم پرداخت. دو فصل بعد از این به سیارات بیرونی می‌پردازد، و بر جنبه‌های مربوط به ویژگی‌های آن‌ها، نحوه کشف و قمرهایشان تأکید دارد. مطالب این سه فصل شامل اطلاعاتی است که من بیشترین علاقه را به آن‌ها داشته‌ام، و تنها می‌توانم امیدوار باشم آنچه برای من جالب بوده، برای شما نیز جالب باشد.

#### ۴-۱ عطارد

تاکنون تنها دو فضاپیما به دیدار عطارد رفته است؛ مارینر ۱۰<sup>۱</sup> که اواسط دهه ۱۹۷۰ سه بار از کنار آن عبور کرد، و فضاپیمای مسنجر<sup>۲</sup> در اوایل سال ۲۰۰۸. یکی از تصاویر فضاپیمای اخیر را در **شکل ۴-۱** می‌بینید. عطارد شباهت بسیاری به نقاط کوهستانی ماه دارد.

در سال ۱۹۹۱، با استفاده از آنتن ۷۰ متری گلدستون<sup>۳</sup> و فرستنده ۵۰۰ کیلوواتی آن، عطارد مورد مشاهده راداری قرار گرفت. بازتاب‌های رادار به وسیله «آرایه بسیار بزرگ»<sup>۴</sup> در نیومکزیکو دریافت شد تا تصاویر راداری با وضوح بالا فراهم گردد. در کمال تعجب، بازتابی بسیار قوی از ناحیه قطب شمال عطارد دریافت شد، که به بازتاب‌های قوی دیده شده از کلاهک‌های قطبی پوشیده از یخ مریخ بسیار شبیه بود. در دماهای خیلی پایین، یخ به خوبی سیگنال‌های رادار را بازتابش می‌کند. کسی انتظار یافتن یخ در عطارد را نداشت؛ اما کف دهانه‌های نزدیک به دو قطب، با دمایی که تا ۱۲۵ K کاهش می‌یابد، همواره در سایه است. بنابراین اگر یخی در آنجا وجود داشته باشد،



شکل ۴-۱: تصویر عطارد که هنگام عبور فضاییمای مستجراز کنار آن در ژانویه ۲۰۰۸ گرفته شده است.

می‌تواند میلیاردها سال باقی بماند. تصور بر این است این یخ، که بعداً در قطب جنوب نیز مشاهده شد، به جامانده از دنباله‌دارهایی است که در گذشته به عطارد برخورد کرده‌اند. در سال ۲۰۰۴، فضاییمای دوم ناسا زمین را به مقصد عطارد ترک کرد. این فضاییما اولین عبورش را از کنار عطارد در ژانویه ۲۰۰۸ انجام داد، و در سال ۲۰۱۱، پس از دو عبور دیگر از کنار سیاره، فضاییما وارد یک مدار بیضوی به دور آن شد. شاید تعجب کنید که ورود به مداری به دور عطارد هفت سال طول کشید، اما این کار از آنچه تصور می‌شود مشکل‌تر است. هر فضاییمایی که به سمت عطارد حرکت می‌کند، به تعبیری در حال سقوط به طرف خورشید است و در نتیجه انرژی جنبشی فراوانی به دست می‌آورد. بنابراین، مشکل رسیدن به آنجا نیست، بلکه کم کردن سرعت تا حدی است که بتوان در مدار به دور آن قرار گرفت! عملاً انرژی لازم برای گردش به دور عطارد بیش از فرار از منظومه شمسی است.

اروپا و ژاپن در حال طراحی مأموریتی مشترک به عطارد هستند که قرار است در اوت ۲۰۱۵

پرتاب شود. این فضاپیما، موسوم به بیبی کولومبو، در ژانویه ۲۰۲۰ به عطارد خواهد رسید.<sup>۵</sup> دو مدارگرد به سوی عطارد حمل خواهد شد. نخستین آن‌ها «مدارگرد سیاره‌ای عطارد<sup>۶</sup>» نام دارد، که وظیفه حمل یک دستگاه تصویربرداری متشکل از دوربین‌های زاویه باز و زاویه بسته، طیف‌سنج‌های فروسرخ، فرابنفش، گاما، پرتو ایکس و نوترون، به همراه یک تلسکوپ برای شناسایی اجسام نزدیک زمین<sup>۷</sup>، یک ارتفاع‌سنج لیزری و تجهیزات دیگر را بر عهده دارد. «مدارگرد مغناطیس سپهر عطارد<sup>۸</sup>» وظیفه حمل مجموعه‌ای از مغناطیس‌سنج‌های تشخیص شدت و راستا، آشکارسازهای ذرات باردار، یک دریافت‌کننده امواج، یک تابشگر یون مثبت<sup>۹</sup> و یک دستگاه تصویربرداری را بر عهده دارد.

در ابتدا امید می‌رفت که یک سطح نشین کوچک نیز گنجانده شود، که می‌توانست حدود یک هفته بر سطح عطارد دوام بیاورد، اما در سال ۲۰۰۳ و به دلیل محدودیت‌های بودجه، این طرح کنار گذاشته شد.

#### ۲-۴ زهره

زهره زمانی دو نام داشت، ستاره شامگاهی یا هسپروس و ستاره صبح یا فوسفروس<sup>۱۰</sup>؛ زیرا که گاهی در حال درخشش در شرق پیش از سپیده دم است و در وقت دیگری در حال درخشش در غرب پس از غروب خورشید. گفته می‌شود که یونانیان ابتدا آن‌ها را دو جسم متفاوت می‌پنداشتند، اما بعدها با نظر بابلیان مبنی بر یکی بودن آن‌ها هم عقیده شدند<sup>۱۱</sup>.

زهره روشن‌ترین جرم سماوی در آسمان بعد از ماه است. همان‌گونه که در فصل اول نشان داده شد، اندازه زاویه‌ای زهره، به دلیل گردش به دور خورشید، تا ۵ برابر تغییر می‌کند. با وجود این، وقتی که از زمین دورتر است و بالطبع اندازه زاویه‌ای کوچک‌تری دارد، درصد بیشتری از سطح آن روشن دیده می‌شود. این دو اثر همدیگر را تا حد زیادی خنثی می‌کنند و در نتیجه روشنایی زهره برای چندین ماه ثابت باقی می‌ماند. زهره به دلیل سپیدایی بالا و بازتابش ۷۰٪ نور خورشید، درخشان به نظر می‌رسد. این مقدار بازتابش ناشی از سطح کاملاً پوشیده از ابر آن است.

در هر ۱۲۰ سال دو بار، و به فاصله ۸ سال از یکدیگر، گذر زهره از مقابل خورشید دیده می‌شود. (در قرن ۲۱، سال‌های ۲۰۰۴ و ۲۰۱۲) این گذرها از لحاظ تاریخی بسیار مهم بودند، زیرا روشی را



شکل ۴-۲: تصویر یک دشت بازالتی به وسیله سطح نشین ونرا ۱۴.

برای محاسبه فاصله زهره، و به دنبال آن و بر اساس قانون سوم کپلر، اندازه گیری واحد نجومی فراهم می‌آوردند. کشف استرالیا توسط کاپیتان کوک<sup>۱۲</sup> به دنبال سفر علمی وی به جزیره تاهیتی، جزیره‌ای واقع در جنوب اقیانوس آرام، جهت رصد گذر سال ۱۷۶۸ زهره اتفاق افتاد.

بسیاری از اطلاعات ما پیرامون زهره از راه مشاهدات به وسیله فضاپیما به دست آمده است. در دسامبر ۱۹۶۲، فضاپیما ماریتر ۲ از فاصله حدود ۳۵۰۰۰ km از سطح آن عبور کرد. مشاهدات فرورسوخ و ریزموج نشان داد علی‌رغم اینکه فراز ابرها بسیار سرد است، سطح آن در دمای حداقل  $۴۲۵^{\circ}\text{C}$  قرار دارد. این فضاپیما نشانه‌ای از میدان مغناطیسی نیافت.

روس‌ها بارها تلاش کردند تا فضاپیما را بر سطح زهره بنشانند. این کار در ابتدا با شکست مواجه می‌شد. هیچ کس پیش‌بینی نمی‌کرد که فشار جو در آنجا صدمبار بیشتر از زمین باشد. نتیجه آن بود که چترهای فرود در ابتدا بیش از حد بزرگ انتخاب می‌شد. این امر فرود فضاپیما را بسیار کند می‌کرد و در نتیجه باطری‌ها قبل از رسیدن به سطح سیاره تخلیه می‌شدند. فضاپیماهای دیگر بر اثر فشار بسیار زیاد در پایین جو مچاله شدند. بالاخره در سال ۱۹۷۰، ونرا<sup>۱۳</sup> به سطح سیاره رسید و به مدت ۲۳ دقیقه اطلاعات دما را ارسال نمود. سپس ونرای ۹ و ۱۰ اولین تصاویر را از سطح آنجا ارسال کردند. این تصاویر سطحی از سنگ‌های پراکنده و تخته‌سنگ‌هایی بازالت‌گونه را نشان می‌داد (شکل ۴-۲). در سال ۱۹۸۵ و در مسیر رصد دنباله دار هالی، دو فضاپیما روسی وگا، کاوشگرهایی را با بالون به درون جو زهره ارسال کردند. این کاوشگرها با پرواز در ارتفاع حدود ۵۳ کیلومتری از سطح، وجود بادهای مرتفع را در جو بسیار متلاطم نشان دادند.

رصدهای راداری، ابتدا از زمین و سپس به وسیله فضاپیما مدارگرد ماژلان، اطلاعات مفصلی راجع به ساختمان سطح آن در اختیار ما قرار داده است. ماژلان توانست در مدت ۴/۵ سال



شکل ۳-۴: سطح زهره آن گونه که رادار فضاپیمای ماژلان تصویربرداری نموده است.

نقشه‌ای با کیفیت بسیار بالا از ۹۸٪ سطح آن رسم کند (شکل ۳-۴). حدود ۸۰٪ سطح را دشت‌های آتش‌فشانی صاف تشکیل می‌دهد و مابقی به نواحی مرتفع تعلق دارد. یکی از دو ناحیه مرتفع در نیم‌کره شمالی و دیگری درست در جنوب استوا است. قاره شمالی «ایشتار ترا»<sup>۱۴</sup> نام دارد (نامی که از اله عشق بابل گرفته شده است) و تقریباً به اندازه استرالیا است. در «ماکسول مانتز»<sup>۱۵</sup> ارتفاع به ۱۱ کیلومتر از سطح دشت می‌رسد. قاره جنوبی «آفروdit ترا»<sup>۱۶</sup> نامیده می‌شود، اسمی که از اله عشق یونان گرفته شده است. این قاره، با وسعتی قابل مقایسه با آمریکای جنوبی، تا حدی بزرگ‌تر است. سطح آن را حفره‌های برخوردی، کوه و دره پوشانده است؛ ضمن آنکه یک عارضه آتش‌فشانی کلوچه‌مانند و منحصر به فرد بنام فارا<sup>۱۷</sup> با قطری نزدیک به ۵۰ km و ارتفاع ۱ km در آن دیده می‌شود. تصور بر این است که سطح آنجا حدود ۵۰۰ میلیون سال عمر دارد، در نتیجه در آنجا تعداد بسیار بیشتری آتش‌فشان در مقایسه با زمین می‌بینیم (در زمین، آتش‌فشان‌های قدیمی‌تر از حدود ۱۰۰ میلیون سال دچار خوردگی شده‌اند). ظاهراً مقدار دی‌اکسید گوگرد موجود در جو در حال تغییر است، که می‌تواند به فعالیت مداوم آتش‌فشانی اشاره داشته باشد.

مشخص شده که جو آن اساساً متشکل است از دی‌اکسید کربن و مقدار کمی نیتروژن، با جرمی ۹۳ برابر جو زمین. همین باعث شده که فشار در سطح زهره حدود ۹۲ برابر فشار در سطح زمین



شکل ۴-۴: سامانه زمین-ماه. آژانس فضایی اروپا (ESA) این سامانه را یک «سیاره دوگانه» می‌داند.

باشد. ابرهای ضخیمی از دی‌اکسید گوگرد وجود دارد و ممکن است حتی باران‌هایی از اسیدسولفوریک در بالای جو ببارد! البته با توجه به دمای سطحی بیش از  $460^{\circ}\text{C}$ ، این باران هرگز به سطح زهره نخواهد رسید. علت این دمای سطحی بسیار بالا، اثر گاز گلخانه‌ای ناشی از جو مملو از دی‌اکسید کربن است.

تصور می‌شود که ساختمان درونی زهره شبیه به زمین باشد، با هسته، گوشته و پوسته. احتمالاً عدم حرکت صفحات پوسته<sup>۱۸</sup> باعث گردیده که هسته آن به اندازه زمین سرد نشود و قسمتی از آن به صورت مایع باشد. زهره تقریباً هم‌میزان زمین است با قطری تنها  $650\text{ km}$  کمتر و جرمی معادل  $81/5\%$  جرم زمین. احتمالاً زمانی جو آن به جو زمین شبیه‌تر بوده، اما تحول آن را به مسیری بسیار متفاوت برده است!

### ۳-۴ زمین

سامانه زمین-ماه (شکل ۴-۴) از برخورد جسمی به زمین، که تصور می‌شود حدود  $10\%$  زمین جرم داشته است، در اوایل شکل‌گیری منظومه شمسی پدید آمده است. قسمتی از جرم مرکب به فضا پرتاب شد و ماه را، بسیار نزدیک‌تر به زمین از فاصله کنونی، به وجود آورد. از آنجا که جرم و اندازه نسبی ماه قابل مقایسه با زمین است، گاهی این دو را مانند یک «سیاره دوگانه»<sup>۱۹</sup> تصور می‌کنند.



گازهای خروجی از آتش‌فشان‌ها جو ثانوی زمین را ایجاد کرد و با میعان بخار آب، اقیانوس‌ها به وجود آمدند. مقداری آب اضافی نیز از برخورد دنباله‌دارها فراهم شد. حدود ۴ میلیارد سال قبل، یک «نظام مولکولی خودهمتاساز»<sup>۲۰</sup> - حیات- پدید آمد، فتوسنتز انرژی خورشیدی را به دام انداخت و محصول جانبی آن، اکسیژن، در جو انباشته شد. در پی آن، لایه‌ای از اوزون، شار تابش فرابنفش را بر روی سطح کاهش داد، و بقای انواع گوناگون حیات را بر زمین امکان‌پذیر ساخت. سطح زمین با حرکت صفحات آن شکل گرفت و با تشکیل قاره‌های پهناوری چون پانگه‌آ<sup>۲۱</sup>، گونه‌های جانداران توانستند بر آن ساکن شوند.

در عصر کامبرین<sup>۲۲</sup>، پس از دوره‌ی سرمای شدیدی که باعث یخبندان زمین شد، گونه‌های چندسلولی حیات شروع به رشد و نمو کردند. در مدت حدود ۵۳۵ میلیون سال از آن زمان، پنج انقراض دسته‌جمعی وجود داشته که منجر به مرگ بسیاری گونه‌ها شده است. آخرین انقراض ۶۵ میلیون سال قبل رخ داد، زمانی که یک سیارک یا دنباله‌دار بزرگ، با قطر دست‌کم ۱۰ کیلومتر، دهانه چیکسولاب<sup>۲۳</sup> را در شبه‌جزیره یوکاتان مکزیک ایجاد کرد. غبار ایجادشده، نور ورودی خورشید به زمین را کاهش داد و به دنبال آن رشد گیاهان کند شد. شاید این یکی از دلایل مرگ دایناسورها و ۷۰٪ گونه‌های حیات در آن زمان بوده است<sup>۲۴</sup>. پستانداران کوچکی جان سالم به در بردند، و نهایتاً با تکامل آن‌ها انسان پدید آمد!

زمین ما سیاره‌ای است صخره‌ای، با هسته، گوشته و پوسته. چرخش آن سبب شده که در استوا برآمده شده، قطر آن ۴۳ km بیشتر از فاصله بین دو قطب باشد. به همین دلیل قله کوه چیمبورازو<sup>۲۵</sup> در اکوادور بیشترین فاصله را از مرکز زمین دارد. کوه اورست با ۸/۸ km ارتفاع و دره ماریانا با عمق ۱۰/۹ km دو کران سطح زمین هستند. با وجود این، سطح زمین عملاً از توپ بیلیارد صاف‌تر است!

هسته مرکزی دمایی حدود ۷۰۰۰ K دارد که نتیجه واپاشی ایزوتوپ‌های رادیواکتیو پتاسیم، اورانیوم و توریم است. همه این ایزوتوپ‌ها نیمه‌عمری بیش از یک میلیارد سال دارند. جریان‌های همرفتی درون صخره مذاب، این حرارت را به سمت پوسته بالا آورده، در آنجا گدازه‌ها تشکیل نقاط داغ دادند و فعالیت آتش‌فشانی را ایجاد کردند؛ فعالیتی که جو ثانوی را برای زمین به ارمغان آورد. هم‌اکنون قسمت اعظم جو را نیتروژن (۷۸٪) و اکسیژن (۲۱٪) تشکیل می‌دهد. ۱٪ باقیمانده

شامل بخار آب، دی اکسید کربن، اوزون، متان و دیگر گازهای کمیاب می شود. جا دارد دوباره اشاره کنیم که بدون گرمای ناشی از گازهای گلخانه‌ای دی اکسید کربن، بخار آب و متان، دمای زمین حدود  $18^{\circ}\text{C}$  - بود و تقریباً به طور قطع حیاتی وجود نداشت.

مردمان قدیم زمین را در مرکز جهان قرار می دادند و نژاد بشر را ویژه می انگاشتند. پس از آنکه معلوم شد خورشید یکی از میلیاردها ستاره کهکشان است، یک اصل میانه پدید آمد. عقیده بر این شد که سیارات بسیاری چون زمین با حیات پیشرفته‌ای مانند بشر وجود دارد؛ پس ما ویژه نبودیم. اما به تدریج معلومات ما درباره تاریخچه زمین افزایش یافت؛ دانستیم که چگونه حرکت صفحات آن باعث بازگشت دی اکسید کربن به درون جو شده است، چگونه مشتری از برخورد تعداد بی شماری دنباله دار به زمین جلوگیری می کند و چگونه ماه بزرگ ما باعث پایداری محور چرخش زمین می شود. بر اساس این حقایق، امروزه بعضی دانشمندان اعتقاد دارند شرایطی که به پدید آمدن و ادامه حیات زندگی هوشمند در زمین انجامید، بسیار نادر و کمیاب است. گویا واقعاً ما ویژه هستیم، و بعید نیست که تنها گونه حیات پیشرفته در کهکشان راه شیری باشیم.

#### ۴-۴ ماه

ماه پنجمین قمر بزرگ منظومه شمسی است. قطر آن کمی بیش از یک چهارم قطر زمین، فاصله متوسط آن از ما حدود ۳۰ برابر قطر زمین و جاذبه گرانشی بر سطح آن تقریباً یک ششم زمین است. به دلیل مدار بیضوی، اندازه زاویه‌ای آن تا ۱۲٪ تغییر می کند؛ از  $55.48^{\circ}$  در هنگام حضیض، نزدیک ترین فاصله اش به زمین، تا  $49.23^{\circ}$  در هنگام اوج، دورترین فاصله اش از زمین. در مجموع و در زمان های مختلف، ۵۹٪ از سطح ماه را می توانیم مشاهده کنیم. دلیل آن هم قسمتی به مدار بیضوی کشیده ماه برمی گردد، قسمتی به زاویه میل مداری آن و بخشی هم به این حقیقت که به هنگام طلوع و غروب ماه، ما آن را از موقعیت های نسبی متفاوت در فضا می بینیم. این اثر رخ گرد<sup>۲۶</sup> نامیده می شود.

یک خطای معروف دید در مورد ماه باعث می شود که ماه در نزدیک افق در بزرگترین صورت به نظر برسد. در حالی که قطعاً وقتی بالا در وسط آسمان است، کمترین فاصله را با ما دارد (اگر در استوا باشید، تقریباً به اندازه شعاع زمین نزدیک تر است) و عملاً اندازه زاویه‌ای آن  $1/5$ ٪ بزرگ تر



شکل ۴-۵: ماه

است! بین برداشت ما از اندازه و این که جسم را در چه فاصله‌ای از خود تصور می‌کنیم، یک پیوند وجود دارد. به نظر می‌رسد که ما کرهٔ سماوی را بالای سر خودمان می‌بینیم، اما نه یک نیم‌کرهٔ حقیقی، بلکه به صورت مسطح. پس باور داریم که جسم در بالای سرمان به ما نزدیک‌تر است تا افق. حال وقتی که ماه را بالای سرمان می‌بینیم، مطمئنیم که به ما نزدیک‌تر است، از این رو در ذهن خودمان اندازهٔ آن را کوچک می‌کنیم!<sup>۲۷</sup>

ماه تنها ۸٪ نور تابشی به خود را منعکس می‌کند (شکل ۴-۵) و از این لحاظ یکی از کمترین بازتابش‌ها را در بین اجرام منظومه شمسی دارد. بازتابش ماه تقریباً معادل زغال سنگ است. طرفی از ماه که رو به زمین است سمت نزدیک ماه نام دارد، و طرف دیگر، سمت دور (نه سمت تاریک) نامیده می‌شود. حتی با چشم غیرمسلح می‌توان دو نوع سطح متمایز را در سمت نزدیک تشخیص داد. نقاط روشن‌تر، کوهستان‌های ماه نام دارد و نقاط تیره‌تر به ماریا<sup>۲۸</sup> معروف است. علت این نام‌گذاری آن است که در ابتدا تصور می‌شد مناطق تیره‌تر اقیانوس و دریا باشد، و از این رو نام‌های زیبایی مانند اقیانوس طوفان‌ها<sup>۲۹</sup>، دریای آرامش<sup>۳۰</sup> و خلیج رنگین‌کمان‌ها<sup>۳۱</sup> برای آن‌ها انتخاب شد.

وقتی که برای اولین بار در سال ۱۹۵۹ سمت دور ماه توسط کاوشگر روسی لونا ۳<sup>۳۳</sup> عکس برداری شد، یک ویژگی تعجب‌آور این بود که تقریباً هیچ‌گونه ماریا آنجا وجود نداشت.

امروزه می‌دانیم که نواحی ماریا از گدازه‌های بازالتی پوشیده شده است. بسیاری از این نواحی گرد هستند، مانند دریای بحران‌ها<sup>۳۳</sup> که نشان‌دهنده برخورد‌های بزرگ است. این برخوردها پوسته ماه را شکافته، باعث خروج گدازه شده‌اند، و آن‌ها نیز تورفتگی‌ها را پر کرده‌اند. این حقیقت که نواحی ماریا نسبت به نقاط کوهستانی، تا حدودی با حفره و دهانه پوشیده شده است نشان می‌دهد که آن‌ها در اواخر دوره شکل‌گیری منظومه شمسی به وجود آمدند؛ زمانی که سطح سیارات و قمرها به وسیله خرده‌اضافات به جامانده پس از شکل‌گیری این اجرام مورد بمباران قرار گرفت.

در سمت نزدیک، ماریا حدود ۳۲٪ سطح را پوشانده است، اما سمت دور تنها چند قطعه دارد که مجموعاً ۲٪ مساحت آن را تشکیل می‌دهد. این مطلب نیاز به توضیح دارد و ظاهراً عوامل متعددی در آن دخیل بوده است. به نظر می‌رسد عناصری که با واپاشی رادیواکتیو تولید گرما می‌کنند در نیم کره نزدیک (رو به زمین) متمرکز شده‌اند. از این رو آتش‌فشان‌هایی که با تولید گدازه بستر محل برخورد را پر می‌کردند، فعال‌تر بوده‌اند. پوسته نیز احتمالاً نازک‌تر است و گدازه راحت‌تر می‌توانسته به سطح راه پیدا کند. شاید، به احتمال کمتر، جاذبه زمین اجسامی را به دام انداخته است که بعداً به سمت نزدیک برخورد کردند و نواحی مسطح ماریا را آسیب رساندند.

قسمت‌های با رنگ روشن‌تر ماه، نواحی مرتفع (نواحی کوهستانی) نامیده می‌شود. این نواحی اغلب از ماریا مرتفع‌ترند و نام رسمی آن‌ها ترا<sup>۳۴</sup> است. ما باید انتظار این ارتفاع بالاتر را داشته باشیم. سنگ‌های بازالتی که ماریا را می‌سازند از سنگ‌های سازنده ارتفاعات چگال‌ترند. برای اینکه ماه در اوایل شکل‌گیری، زمانی که قسمتی از مواد درونی مذاب بود، در شرایط تعادل هیدرواستاتیک قرار داشته باشد، بایستی در عمق ثابتی زیر سطح، فشار در همه جا یکسان می‌بود. به عبارت دیگر، جرم ستون‌های ماده بالای این عمق (مثلاً جرم ستون‌هایی از ماده به قطر یک متر، از آن نقطه تا سطح ماه) باید برابر باشد. یعنی آنکه ستون متشکل از مواد سبک‌تر باید بلندتر باشد، پس نواحی کوهستانی بالاتر از ماریا قرار می‌گیرند.

در اطراف لبه دهانه‌هایی که از برخوردهای عظیم ساخته شده‌اند، چند رشته‌کوه برجسته دیده می‌شود - بقایای به جامانده از لبه‌های بیرونی دره‌های برخوردی. جالب است که چهار ناحیه بر

لبه دهانه پیری<sup>۳۵</sup> در قطب شمال ماه همواره روشن است. آنجا می‌تواند جایگاهی مناسب برای یک پایگاه در ماه باشد، چراکه صفحات خورشیدی می‌توانند منبعی دائمی برای تأمین انرژی فراهم آورند. علت هم این حقیقت است که ماه به مقدار بسیار کمی نسبت به صفحه دایره البروج کج است. یک پیامد دیگر این حقیقت آن است که برخی نواحی در ته دهانه‌های نزدیک قطب همواره در سایه هستند. در نتیجه، یخ احتمالی به جامانده از برخورد دنباله‌دارها همچنان باقی مانده است و منبعی برای تأمین آب، اکسیژن و هیدروژن به شمار می‌رود. اما رصدهای راداری اخیر از زمین این گمان را ایجاد کرده است که نشانه‌های راداری که بر یخ دلالت می‌کند شاید ناشی از گدازه‌های مربوط به دهانه‌های برخوردی جوان باشد. وجود یخ آب همچنان نیاز به اثبات دارد.

یکی از ویژگی‌های بسیار آشکار سطح ماه دهانه‌هایی است که در زمان برخورد سیارک‌ها و دنباله‌دارها به سطح ماه به وجود آمده است. حدود نیم میلیون دهانه وجود دارد که قطر آن‌ها بیش‌تر از یک کیلومتر است. قطر بزرگ‌ترین آن‌ها حدود ۲۲۴۰ km و ارتفاع آن ۱۳ km است. دو دهانه جوان و برجسته که در طرف نزدیک دیده می‌شود، تیکو و کپرنیک نام دارند. هنگام بدر و زمان‌های نزدیک به آن، اشعه‌هایی با رنگ روشن دیده می‌شود که از گدازه‌های درون تیکو ساطع می‌گردد. لذا این دهانه را «دهانه مشعشع»<sup>۳۶</sup> می‌نامند.

سطح ماه با چیزی که «سنگ پوشه ماه»<sup>۳۷</sup> نام دارد پوشیده شده است. ضخامت آن در نواحی ماریا ۳ تا ۵ متر است و در نواحی کوهستانی به ۱۰ تا ۲۰ متر می‌رسد. زیرا این پوشش ناحیه‌ای است از سنگ‌های بسیار خرد و پراز ترک، با ضخامت بین ۱۰ تا ۴۰ کیلومتر. عقیده بر این است که ماه نیز مانند زمین دارای پوسته (حدود ۵۰ km ضخامت)، گوشته و هسته است. پس از شکل‌گیری ماه، هنگامی که هنوز مذاب بود، عناصر سنگین‌تر در فرآیندی بنام تفریق<sup>۳۸</sup> به سمت مرکز فرورفتند و هسته‌ای چگال را به وجود آوردند. تصور می‌شود که هسته عمدتاً آهنی ماه کوچک باشد، با شعاعی کمتر از ۳۵۰ km، که دست‌کم در برخی قسمت‌ها همچنان مذاب باقی مانده است.

### کِشند (جزر و مد)

جزر و مد اقیانوس‌ها نتیجه قانون عکس مجذور در گرانش، و همچنین اندازه زمین است. نیروی گرانش در طرف نزدیک‌تر زمین به ماه بیشتر از قسمت میانی و در آنجا بیشتر از سمت مقابل است.

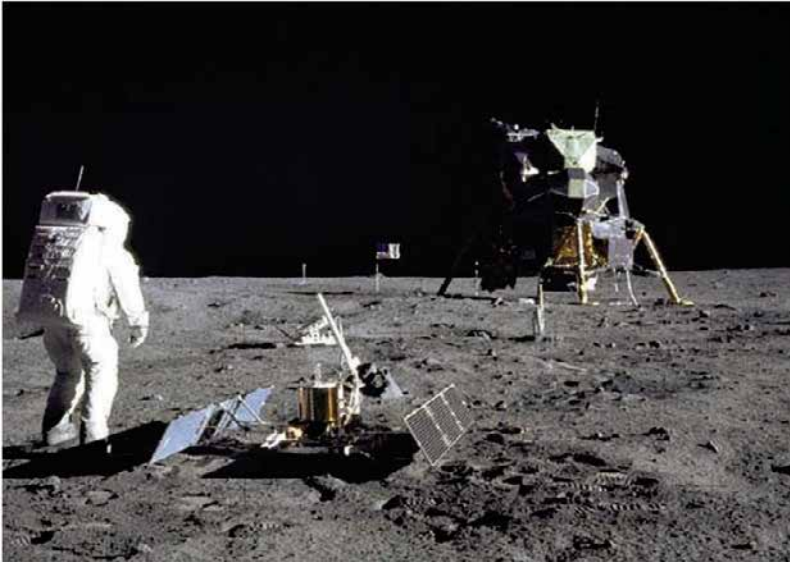
این موضوع باعث یک اثر تفاضلی گرانشی موسوم به «نیروی کشندی»<sup>۳۹</sup> می‌شود که اثر آن با توان سوم فاصله کاهش می‌یابد.<sup>۴۰</sup> نتیجه آنکه اقیانوس‌ها کشیده شده، به شکل بیضی درمی‌آیند، به گونه‌ای که سطح دریا، هم در سمت نزدیک‌تر به ماه بالا می‌آید (و انتظار هم همین است) و هم در سمت دورتر (که کمتر واضح است و نیاز به توضیح دارد). علت مورد اخیر این است که نیروی جاذبه ماه بر اقیانوس‌ها در سمت دورتر، کمتر از همین نیرو بر قسمت میانی است.<sup>۴۱</sup> با حرکت زمین به دور محور خود، این دو برآمدگی به دور زمین می‌چرخند؛ بنابراین در شبانه‌روز دو مد داریم. از آنجاکه ماه خود در حال گردش به دور زمین است، آن هم با دوره تناوبی که چندان از ۲۴ روز بیشتر نیست، مدهای دوگانه در هر شبانه‌روز یک ساعت زودتر ظاهر می‌شوند.

خورشید نیز یک نیروی کشندی ایجاد می‌کند، لکن اثر آن کمتر از ماه (حدود ۴۶٪) است. در زمان ماه نو و بدر (ماه کامل)، نیروهای کشندی همدیگر را تقویت می‌کنند و باعث مد بیشینه، موسوم به مد بهاری<sup>۴۲</sup> یا مهکشند می‌شوند، درحالی‌که در تربیع اول و سوم آن‌ها تا حدی همدیگر را خنثی می‌کنند و مد کمینه یا گهکشند را با تغییرات کمتر جزرومد می‌سازند. از آنجاکه هم ماه و هم زمین در مدارهای بیضوی حرکت می‌کنند، ارتفاع مهکشندها به طور چشم‌گیری تغییر می‌نماید. هنگامی که ماه در حضيض است مدها بلندتر هستند، و اگر این حالت زمانی رخ دهد که زمین نیز در حضيض مداری خود (نزدیک‌ترین نقطه به خورشید) در زمستان باشد، بلندترین مدها اتفاق می‌افتد.

جفتیدگی گرانشی<sup>۴۳</sup> بین ماه و اقیانوس‌ها بر مدار ماه اثر می‌گذارد. به دلیل چرخش زمین، برآمدگی‌های کشندی مستقیماً به سمت ماه (پشت به ماه) قرار نمی‌گیرند. اثر کلی این عدم تقارن، انتقال تکانه زاویه‌ای ناشی از چرخش زمین به ماه است. در نتیجه ماه به مداری بالاتر، با دوره تناوبی طولانی‌تر، حرکت می‌کند. فاصله ماه و زمین هر ساله حدود  $3/8$  cm بیشتر می‌شود.<sup>۴۴</sup>

### سفر اکتشافی به ماه

ماه بیش از هر جسم دیگری در منظومه شمسی مورد مطالعه قرار گرفته است: مدارگردهای ماه از بالا از آن عکس گرفته‌اند، سطح آن توسط چندین مهنورد مورد مطالعه قرار گرفته است - اولین آن‌ها لونا ۹<sup>۴۵</sup> در سال ۱۹۶۵، و به دنبال آن دیگر کاوشگران روسی و ناسا. سفرهای اکتشافی به



شکل ۴-۶: پایگاه آرامش (Tranquillity Base). ماه‌نشین عقاب در پشت لرزه‌نگار قرار دارد. اطلاعاتی که لرزه‌نگار جمع‌آوری می‌کرد با استفاده از یک آنتن استوانه‌ای به زمین ارسال می‌شد. پشت سر این آنتن و در زاویه‌ای عمود به سمت زمین، بازتابنده لیزری ماه (Lunar Laser Reflector) واقع شده است. عکس توسط نیل آرمسترانگ، خدمه آپولو ۱۱ گرفته شده است.

ماه در برنامه آپولوی ناسا به اوج رسید و شش فضاییما انسان را بر روی ماه نشان‌دند. نمونه‌هایی از سنگ ماه در سه مأموریت روسی (لونا ۱۶، ۲۰ و ۲۴) و مأموریت‌های آپولو (۱۱، ۱۲، ۱۴، ۱۵، ۱۶ و ۱۷) به زمین آورده شد.

همان‌گونه که در شکل ۴-۶ نشان داده شده است، مأموریت‌های آپولو تجهیزاتی علمی برای اندازه‌گیری جریان گرما، میدان‌های مغناطیسی، نوسانات زلزله و همچنین «آینه‌های گوشه مکعبی»<sup>۴۶</sup> در ماه به جا گذاشتند. هر مجموعه آینه شامل صد عنصر بازتابش‌کننده شبیه به چشم‌گره است. نور تلسکوپ‌های زمینی که مجهز به لیزر هستند توسط این آینه‌ها منعکس می‌شود و امکان اندازه‌گیری فاصله ماه تا این تلسکوپ‌ها را با دقت کمتر از یک سانتیمتر فراهم می‌آورد. همچنین بدین وسیله توانسته‌اند مدار ماه را با دقت بسیار زیاد اندازه بگیرند. باید خاطر نشان کرد که این آینه‌ها دلیلی انکارناپذیرند بر این که مأموریت‌های آپولو به ماه قطعاً صورت گرفته است! جنبه جالبی از نظریه پراش<sup>۴۷</sup> راجع به این آینه‌ها وجود دارد: اگر آینه‌ها یکپارچه بودند، نور

مستقیماً به محلی که پالس لیزری ارسال شده بود منعکس می‌شد. مشکل اینجا است که نور عملاً بعد از ۲/۵ ثانیه به محل ارسال بازمی‌گردد؛ در این فاصله تلسکوپ به همراه زمین اندکی چرخیده است و دیگر در محلی نیست که بتواند پالس برگشتی را دریافت کند. استفاده از تعدادی بازتابنده کوچک، باریکه برگشتی را پهن می‌کند، به گونه‌ای که پالس قابل آشکارسازی باشد.

پس از ۲۵ سال آرامش در سفرهای ماه، اخیراً فضایی‌هایی از اروپا، آمریکا و چین به مدار ماه بازگشته‌اند. در اواخر سال ۲۰۱۳، چین با یک فرود نرم<sup>۴۸</sup>، مه‌نوردی را با نام خرگوش یشمی<sup>۴۹</sup> در دهانه خلیج رنگین کمان‌ها فرود آورد. این مه‌نورد یک محموله پیچیده را با خود حمل می‌کرد، شامل رادار نافذ در زمین<sup>۵۰</sup> که می‌توانست سنجش‌هایی را از خاک و پوسته ماه جمع‌آوری کند. بر اساس گزارش‌ها، این مه‌نورد می‌توانست از شیب‌هایی با زاویه ۳۰ درجه بالا برود و با سرعت ۲۰۰ متر بر ساعت حرکت کند. نام این مه‌نورد از یک افسانه قدیمی چینی درباره یک خرگوش که روی ماه زندگی می‌کند و دست‌آموز الهه ماه بنام چنگ‌ای<sup>۵۱</sup> است گرفته شده است. متأسفانه دوره فعالیت این مه‌نورد کوتاه بود.

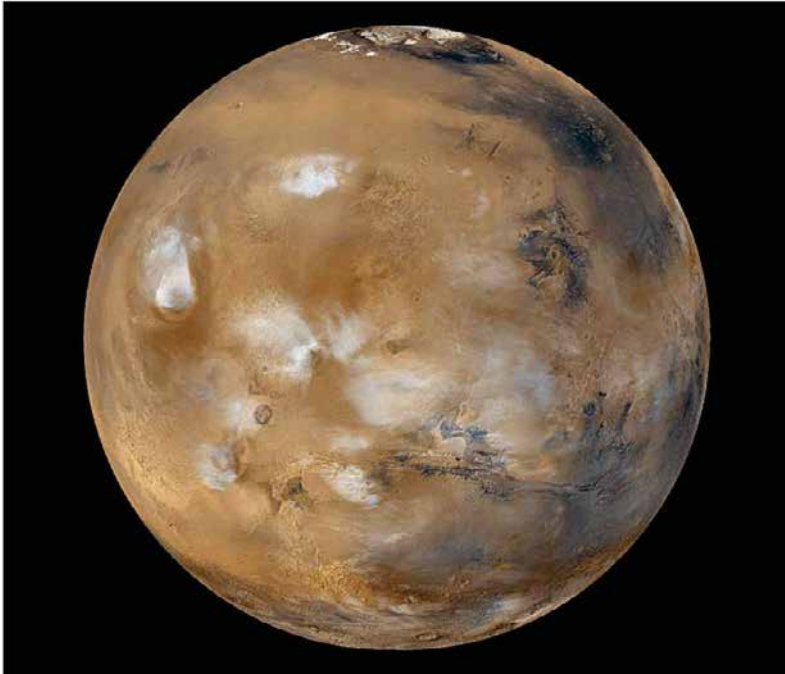
یک مأموریت چینی برای سال ۲۰۱۷ برنامه‌ریزی شده است تا نمونه‌هایی از خاک ماه را به زمین بیاورد. این مأموریت می‌تواند زمینه‌ساز مأموریت‌های رباتیک بیشتر باشد، و در ادامه، احتمالاً، به یک سفر انسانی به ماه در دهه ۲۰۲۰ ختم شود.

#### ۴-۵ مریخ

مریخ را اغلب سیاره سرخ می‌نامند، اما از دید نویسنده بیشتر به صورتی روشن نزدیک است. سیاره‌ای صخره‌ای است با قطری نصف قطر زمین اما جرمی یک‌دهم آن (شکل ۴-۷). رنگ متمایل به قرمز ناشی از اکسیدهای آهن بر سطح آن است که به سنگ آهن یا زنگار معروف‌اند، و غباری به نرمی پودر تالک<sup>۵۲</sup> می‌سازند. جو رقیقی دارد، با غلظتی حدود یک صدم جو زمین که عمدتاً از دی‌اکسید کربن (۹۵٪) ساخته شده است. نیتروژن (۳٪)، آرگون (۱/۶٪) و رگه‌هایی از بخار آب و اکسیژن هم در آن یافت می‌شود.

از آنجاکه محور زمین و مریخ به یک اندازه کج است، فصل‌های مشابهی دارند؛ با این تفاوت که طول فصل‌ها در مریخ حدود دو برابر زمین است، چراکه سال مریخی تقریباً به اندازه دو سال





شکل ۴-۷: تصویری از مریخ که به وسیله رایانه تولید شده است. در پایین سمت راست والس مارینریس (Valles Marineris) قرار دارد، ژرف‌دره‌ای چهار بار عمیق‌تر و سه بار طولانی‌تر از ژرف‌دره بزرگ (Grand Canyon) روی زمین. در سمت چپ چندین آتش‌فشان شامل قله المپوس (آتش‌فشانی سه بار بلندتر از کوه اورست) دیده می‌شود. در بالا، کلاهک قطبی شمالی متشکل از یخ آب در حال ذوب و یخ خشک (دی‌اکسید کربن جامد) قرار دارد.

زمین طول می‌کشد. دمای سطح مریخ از  $14^{\circ}\text{C}$  - در زمستان تا  $20^{\circ}\text{C}$  در تابستان در نوسان است. مریخ همچنین از طوفان‌های گردوغبار رنج می‌برد که گاهی می‌تواند کل سطح سیاره را بپوشاند. دو کلاهک یخی قطبی دارد که عمدتاً از یخ آب ساخته شده، ولی لایه‌ای از دی‌اکسید کربن جامد (یخ خشک) روی آن را پوشانده است. در قطب جنوب عمق لایه دی‌اکسید کربن حدود ۸ متر است که بر روی یخ آب به ضخامت ۳ km و در محدوده‌ای به قطر ۳۵۰ km قرار دارد. قطر کلاهک قطب شمال ۱۰۰۰ km و ضخامت آن حدود ۲ km است. در زمستان، یخ خشک لایه‌ای یک متری را روی یخ آب (در قطب شمال) ایجاد می‌کند که باعث کاهش دی‌اکسید کربن موجود در جو و به دنبال آن کاهش فشار جو می‌شود.

### آیا تمدنی در مریخ وجود داشته است؟

گاليله اولین کسی بود که مریخ را با تلسکوپ و در سال ۱۶۰۹ رصد کرد، اما تلسکوپ کوچک او جزئیاتی از سطح آن را نشان نداد. در تقرب سال ۱۸۷۷ مریخ به زمین، یک ستاره‌شناس ایتالیایی بنام جووانی اسکیاپارلی<sup>۵۳</sup> با استفاده از تلسکوپ ۲۲ سانتیمتری توانست سطح مریخ را رسم کند و اولین نقشه‌های تفصیلی را ارائه نماید. این نقشه‌ها خطوطی را شامل می‌شدند که شیوپارلی آن‌ها را Canali نامید، به معنی شیار در زبان ایتالیایی (مترادف Channel در انگلیسی). اما این کلمه به Canal در انگلیسی ترجمه شد که اشاره به آبراه ساخت انسان دارد و به دنبال آن این حس پدید آمد که شاید نژادی هوشمند در مریخ ساکن باشد. این نکته را باید اشاره کرد که هیچ آبراهی از زمین قابل شناسایی نبود، اما این گونه تصور شد که آن‌ها می‌توانند جهت آبیاری استفاده شوند و مزارع کنارشان را که از زمین دیده می‌شد آبیاری کنند.

تحت تأثیر رصدهای اسکیاپارلی، پرسپروال لوئل رصدخانه‌ای را در آریزونا بنا نهاد<sup>۵۴</sup>. او رصدهای مفصلی از مریخ انجام داد که نشان می‌داد شبکه پیچیده‌ای از کانال‌های آب‌رسانی در آنجا وجود دارد. اما با بزرگ‌تر شدن تلسکوپ‌ها، علیرغم عوارض واضح بر سطح مریخ، شیارهای کمتری دیده شد. به نظر می‌رسد آن‌ها خطای دید بودند. با وجود این، طلسم حیات پیشرفته در مریخ تا دهه ۱۹۶۰ باطل نشد و آن زمانی بود که فضایی‌های مارینر ناسا به مریخ رسید. (یک تصویر فریبنده از تخته‌سنگی عظیم، موسوم به «چهره بر روی مریخ»، توسط فضایی‌های وایکینگ ۱ در ۱۹۶۱ به دست آمد. بعضی تصور کردند که آن نمادی بزرگ از تمدنی در گذشته است. اما عکس دقیقی که توسط «نقشه‌بردار سراسری مریخ»<sup>۵۵</sup> در سال ۲۰۰۱ گرفته شد نشان داد که آن یک تخت‌تپه<sup>۵۶</sup> است - تپه یا کوهی پهن که لبه‌هایی با شیب تند دارد.)

عکس‌های دقیق فضایی‌های مارینر، دره‌های بزرگ و آتش‌فشان‌های پهناوری را نشان داد. یکی از این‌ها قلّه اولمپوس<sup>۵۷</sup>، بزرگ‌ترین آتش‌فشان شناخته‌شده در منظومه شمسی است. قطر دهانه آن ۸۵ km است و پهنای پایه مخروط آتش‌فشان به ۵۵۰ km می‌رسد. دهانه آتش‌فشان تقریباً ۲۷ km بالاتر از سطح مریخ است، سه بار بلندتر از کوه اورست! دانشمندان دریافتند که در زمان فعالیت این آتش‌فشان‌های عظیم‌الجثه، حدود سه میلیارد سال قبل، جو مریخ بسیار غلیظ‌تر از حال بوده است. اثر گازهای گلخانه‌ای در جو سبب می‌شده است که دمای سطح مریخ آن‌قدر

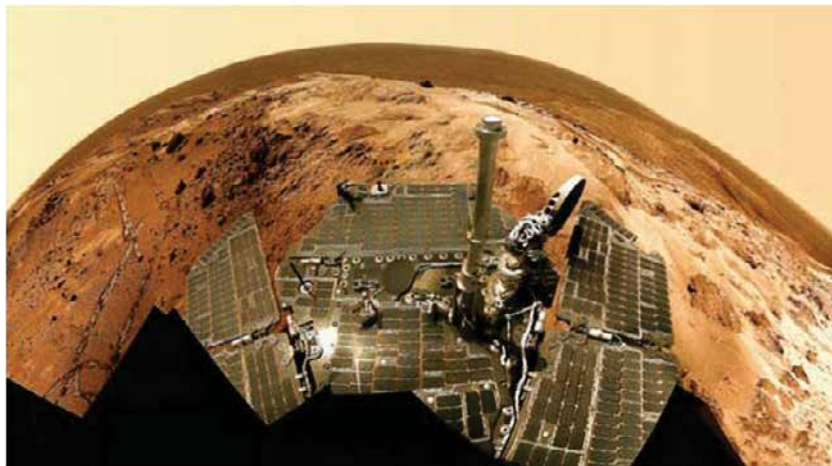
بالا رود که آب امکان وجود روی آن را پیدا نماید. دیگر عوارض قابل رؤیت بر سطح مریخ به خوبی نشان می‌داد که جریان آب در آنجا وجود داشته است. این موضوع گمانه‌زنی‌هایی را دامن زد که شاید گونه‌هایی از حیات ساده در آن زمان در مریخ وجود داشته است.

همین احتمال کافی بود که در سال ۱۹۷۶ دو سطح‌نشین وایکینگ به آنجا فرستاده شود. هدف آن‌ها، علاوه بر عکس‌برداری از سطح و جمع‌آوری داده‌های علمی، جستجوی هرگونه دلیل و مدرکی برای حیات بود. آن‌ها سه آزمایش انجام دادند و گرچه فعالیت شیمیایی غیرمنتظره‌ای را در خاک مریخ یافتند، اما به هیچ‌گونه گواهی دال بر وجود موجودی زنده دست پیدا نکردند. با توجه به جو رقیق مریخ (بدون لایه اوزون)، نور فرابنفش بسیار بیشتر از زمین به سطح آن می‌رسد، به طوری که از وجود حیات بر روی آن جلوگیری می‌نماید. اگر هم روزی حیات در مریخ وجود داشته است، امروزه تنها در زیر سطح مریخ می‌توان انتظار یافتن شواهد آن را داشت.

۳۰ سال طول کشید تا یک کاوشگر اختصاصی دیگر به منظور جستجوی حیات به مریخ فرستاده شد. قرار بود این کاوشگر، موسوم به بیگل ۲<sup>۵۸</sup>، که طراحی و ساخت آن در انگلستان انجام شده بود، در روز کریسمس سال ۲۰۰۳ بر مریخ فرود آید. این کاوشگر چند هفته پیش از آن، فضاییمای مادر را، موسوم به Mars Express، در یک مسیر درست ترک کرده بود. اما ظاهراً هنگام نشستن بر سطح و در یک فرود نامناسب دچار سانحه شد - لحظه‌ای غمناک برای من، چراکه مسئولیت دریافت نخستین سیگنال‌ها از سطح و با استفاده از تلسکوپ ۷۶ متری لاول در جدرل بانک<sup>۵۹</sup> بر عهده من بود.

### مدارگردها، مریخ‌نوردها و سطح‌نشین فونیکس

پس از دوره‌ای که به نظر می‌رسید بسیاری از کاوشگران مریخ محکوم به شکست شده‌اند، موفقیت‌های اخیر تا حد بسیار زیادی درک ما را از سطح آن بالا برده است؛ یا به وسیله دوربین‌های با تفکیک‌پذیری بالا که به دور سیاره می‌گردند، مانند آن‌هایی که روی مدارگرد شناسایی مریخ<sup>۶۰</sup> که در نوامبر ۲۰۰۶ کار نقشه‌برداری مریخ را آغاز کرد قرار دارند، یا با مریخ‌نوردهای روح (شکل ۴-۸) و فرصت<sup>۶۱</sup> که در سال ۲۰۰۴ بر مریخ فرود آمدند. تا آغاز سال ۲۰۱۵، فرصت همچنان عملیاتی بود. مأموریت اولیه این مریخ‌نوردها، واری و تحقیق در طیف وسیعی از خاک و سنگ‌هایی بود که



شکل ۴-۸: تصویر پانوراما از مریخ که به وسیله مریخ‌نورد روح در دهانه گوسف (Gusev Crater) گرفته شد.

احتمالاً سرنخی از فعالیت گذشته آب را در خود داشتند. این دو مریخ‌نورد در دو سمت مخالف مریخ، که به نظر می‌رسید در گذشته تحت تأثیر آب مایع بوده‌اند، فرود آمدند؛ یعنی در دهانه گوسف<sup>۶۲</sup>، احتمالاً یک دریاچه در گذشته در یک دهانه برخوردی بسیار بزرگ، و فلات مریدیانی<sup>۶۳</sup>، جایی که از رسوبات کانی آن چنین برمی‌آید که مریخ یک گذشته مرطوب داشته است. آن‌ها بسیار موفق بودند، و با هم بیش از ۲۰ کیلومتر بر سطح مریخ حرکت کردند. در سال ۲۰۰۴، دانشمندان تصاویری را عرضه کردند که یک الگوی طبقه‌بندی شده<sup>۶۴</sup> و لایه‌بندی چلیپایی<sup>۶۵</sup> را در صخره‌های درون یک دهانه در فلات مریدیانی نشان می‌داد، به این معنی که زمانی آب در آن جریان داشته است؛ و در عین حال، یک توزیع نامنظم از کلر و بُرم این نکته را الهام می‌کرد که روزگاری آنجا خط ساحلی یک دریای نمکی بوده که حالا بخار شده است. در تأیید فرضیه گذشته مرطوب، مریخ‌نورد فرصت، هماتیت را به شکل کره‌های کوچک پیدا کرده است که نام آن‌ها را زغال اخته گذاشته‌اند. این کره‌ها تنها می‌توانستند در رسوبات صخره‌ای غوطه‌ور در آب‌های زیرزمینی تشکیل شوند.

همچنین در سال ۲۰۰۴، ناسا اعلان کرد که مریخ‌نورد روح به سرنخ‌هایی در یک صخره، موسوم به هامفری<sup>۶۶</sup>، دست یافته که می‌تواند شواهدی بر وجود آب در گذشته باشد. ظاهراً این صخره حاوی کانی‌هایی بلوری است که در شکاف‌های کوچک جا خوش کرده‌اند. به احتمال زیاد این کانی‌ها پیش از بلور شدن، در آب حل شده، به درون صخره منتقل شده‌اند. زمانی که در

دسامبر ۲۰۰۷، یکی از چرخ‌های روح به درستی نمی‌چرخید، لایه بالایی خاک مریخ را خراشاند و تکه زمینی را کشف کرد که به نقاطی از زمین که در آن آب یا بخار ناشی از چشمه‌های داغ با صخره‌های آتش‌فشانی تماس گرفته‌اند، شبیه بود. اینجا در زمین، چنین محل‌هایی اغلب سرشار از باکتری است، چراکه آب داغ محیطی را فراهم می‌سازد که در آن، حیات میکروبی قابل رشد و نمو است.

در ابتدا هرگز انتظار نمی‌رفت که این مریخ‌نوردها مدت طولانی به مأموریت خود ادامه دهند، چراکه تصور می‌شد غبار به سرعت صفحات خورشیدی آن‌ها را به گونه‌ای بیوشاند که آن‌ها از کار بمانند. اما دانشمندان نمی‌دانستند که تنوره‌های دیو<sup>۶۷</sup> (گردبادهای کوچک که قادرند به سرعت سطح مریخ را درنوردند) می‌توانند صفحات را تمیز جارو کنند. تا مارس ۲۰۰۵، توانایی صفحات به ۶۰٪ تنزل کرده بود، اما ناگهان به ۹۳٪ افزایش یافت! روز بعد مریخ‌نورد روح توانست از یک تنوره دیو که به سرعت بر سطح مریخ در حرکت بود فیلم برداری کند. گاهی طوفان‌های عظیم غبار، جو مریخ را در برمی‌گیرند؛ زمانی که مدارگرد مارینر ۹ در نوامبر ۱۹۷۱ به مریخ رسید، سطح آن کاملاً زیر غبار دفن شده بود. به تدریج که طوفان فروکش کرد، نخستین عارضه‌ای که دیده شد، گول‌دهانه<sup>۶۸</sup> در قلّه کوه المپوس بود که تا ارتفاع بالا از سطح مریخ قد کشیده بود. با نزدیک شدن به پایان ژوئن ۲۰۰۷، یک سری طوفان‌های غباری، مانع رسیدن ۹۹٪ از نور مستقیم خورشید به مریخ‌نوردها شد، و آن‌ها به دلیل کمبود نیرو در آستانه ازکارافتادن کامل قرار گرفتند. هر دوی آن‌ها در حالت خواب زمستانی قرار داده شدند تا طوفان‌ها را از سر بگذرانند، و خوشبختانه توانستند جان سالم به دربرده، سال دیگر مریخ را ببینند.

شواهد بیشتر از آب به دام افتاده در زیر سطح و در یک لایه همیشه منجمد، زمانی به دست آمد که سطح‌نشین فونیکس<sup>۶۹</sup> بیلچه خود را برای حفریک گودال در خاک مریخ به کار گرفت. بدین ترتیب یخ زیرسطحی آشکار شد، و همان‌طور که انتظار می‌رفت به دلیل جو رقیق، تبخیر آن در چند روز بعد آغاز شد. این تأییدی بود بر مشاهدات انجام شده به وسیله فضاییمای اودیسه مریخ<sup>۷۰</sup> و مدارگرد شناسایی مریخ<sup>۷۱</sup> مبنی بر وجود یخ در زیر سطح تقریباً تمام نیمه شمالی مریخ. اما تا زمانی که نتوانیم در سطح مریخ اقدام به حفاری کنیم، عمق آن را، و به همین ترتیب مقدار آبی را که زیر سطح قرار دارد، نخواهیم دانست.

## کنجکاوی

در نوامبر سال ۲۰۱۱، کنجکاوی<sup>۷۲</sup>، مریخ‌نوردی به اندازه خودرو، از دماغه کاناورال<sup>۷۳</sup> برای یک سفر ۵۶۳ میلیون کیلومتری به سوی مریخ پرتاب شد. در اوت ۲۰۱۲، این مریخ‌نورد توانست با موفقیت از فضاپیمای مادر، که در بالای سرش معلق بود، بر سطح دهانه گیل<sup>۷۴</sup> فرود آید. اهداف کنجکاوی شامل تحقیق دربارهٔ اقلیم مریخ و زمین‌شناسی آن است، و همچنین ارزیابی اینکه آیا محل فرود، شرایط مناسب برای حیات میکروبی را در گذشته داشته است یا خیر. در مجموعه‌ای از آزمایش‌ها که به آینده نظر دارد، مقدار تابش در مسیر حرکت تا مریخ را نیز اندازه‌گیری کرد؛ و همچنان که به کاوش در سطح مریخ مشغول است، به اندازه‌گیری سطح تابش ادامه می‌دهد - بدین ترتیب اطلاعاتی را در اختیار ما قرار می‌دهد که برای سفر آیندهٔ انسان مهم است.

تغذیهٔ کنجکاوی را یک مولد گرماالکتریکی رادیوایزوتوپی<sup>۷۵</sup> بر عهده دارد؛ مانند آنچه در دو سطح‌نشین موفق وایکینگ ۱ و ۲ در سال ۱۹۷۶ مورد استفاده قرار گرفت، و ۲/۵ کیلووات ساعت انرژی را در روز تأمین می‌کند. سوخت این مولد عبارت از ۴/۸ کیلوگرم دی‌اکسید پلوتونیوم ۲۳۸ (غیر شکافتی) است. گرمای حاصل از واپاشی آن به وسیلهٔ ترموکوپل به الکتریسیته تبدیل می‌شود، و یک انرژی ثابت را در تمام فصل‌ها و سراسر روز و شب فراهم می‌آورد.

راهبرد تحلیل بدین ترتیب است: نخست دوربین‌های با قدرت تفکیک بالا به جستجوی عوارض موردعلاقه می‌پردازد. وقتی یک صخرهٔ جالب پیدا شد، کنجکاوی می‌تواند تکهٔ کوچکی را با یک لیزر فرورسرخ بخار کند و با بررسی طیف حاصل به مطالعهٔ ترکیبات صخره بپردازد. اگر مطلوب بود، آنگاه مریخ‌نورد می‌تواند با استفاده از بازوی بلند خود، یک میکروسکوپ و طیف‌سنج پرتو ایکس را به نقطهٔ موردنظر نزدیک کرده، یک نگاه دقیق‌تر به آن بیندازد؛ و حتی می‌تواند با سوراخ کردن تخته‌سنگ، نمونه‌ای از آن را به آزمایشگاه‌های درون مریخ‌نورد منتقل کند.

تجهیزات همراه قادر به سنجش محیط مریخ هستند: رطوبت، فشار، دما، سرعت باد، و تابش فرابنفش. دوربین‌های اجتناب از خطر با ۱۲۰ درجه میدان دید، تصاویری برجسته (سه بعدی) می‌گیرند، که پردازش آن‌ها به وسیلهٔ رایانه‌های داخلی، مریخ‌نورد را از برخورد به موانع غیرمترقبه محافظت می‌کند.

در اکتبر ۲۰۱۲، نخستین تحلیل پراش پرتو ایکس<sup>۷۶</sup> از خاک مریخ اجرا شد و حضور چندین



شکل ۴-۹: تصویر فوبوس که به وسیله مدارگرد شناسایی مریخ در مارس ۲۰۰۸ گرفته شده است.

کانی را آشکار ساخت؛ کانی‌هایی از قبیل فلداسپات، پیروکسن و زبرجد<sup>۷۷</sup>. به نظر می‌رسید این نمونه شبیه به خاک‌های بازالتی هوازده<sup>۷۸</sup> در آتش‌فشان‌های هاوایی باشد. نام ۱/۲ میلیون نفر بر یک قطعه سلیسیومی که حالا بر عرشه کنجکاو نصب است، حک شد. به علاوه، پلاکی با امضای باراک اوباما و جو بایدن، رئیس‌جمهور آمریکا و معاونش، به همراه دستخط کلرا ما (Clara Ma)، دختر ۱۲ ساله‌ای از کانزاس که در یک رقابت نوشتاری، نام کنجکاو را برای مریخ‌نورد به کار برد نیز نصب است.

### قمرها

مریخ دو قمر دارد، فوبوس و دیموس<sup>۷۹</sup>، که احتمالاً سیارک‌هایی به اسارت درآمده هستند. فوبوس کوچک است با شکلی نامنظم و قطری حدود ۲۲ کیلومتر (شکل ۴-۹). این قمر مریخ را در ارتفاع ۹۳۷۷ km دور می‌زند، یعنی نزدیک‌تر از هر قمر دیگری به سیاره‌اش؛ و آن قدر سریع به دور آن می‌چرخد که عملاً از غرب طلوع می‌کند و در شرق غروب می‌نماید. قطر دیموس تنها ۶ کیلومتر است و مداری نسبتاً دایره‌ای دارد. کمی بیش از ۳۰ ساعت طول می‌کشد تا یک بار مریخ را دور بزند که چندان طولانی‌تر از شبانه‌روز مریخ نیست. از این رو بین طلوع و غروب، حدود ۲/۷ روز دیده

می‌شود. با توجه به اندازه زاویه‌ای کوچک آن - تنها ۲/۵ ثانیه قوسی - از سطح مریخ مانند ستاره به نظر می‌رسد و به روشنایی که ما زهره را می‌بینیم دیده می‌شود.

#### ۴-۶ سی‌رس و سیاره‌های خرد

در سال ۱۷۶۸، یوهان بوده<sup>۸۰</sup> اظهار داشت که احتمالاً سیاره‌ای بین مریخ و مشتری وجود دارد. او به قانون تیتوس - بوده<sup>۸۱</sup> تکیه داشت، قانونی تجربی که یوهان دانیل تیتوس در سال ۱۷۶۶ ارائه کرده بود و با تقریب‌هایی فاصله نسبی مدار سیاره‌ها را از خورشید تعیین می‌نمود. این قانون پیش‌بینی می‌کرد که باید سیاره‌ای در فاصله ۲/۸ AU از خورشید وجود داشته باشد. با کشف اورانوس در چند سال پیش از آن که با پیش‌بینی این قانون به خوبی سازگار بود، گروهی ۲۴ نفره از ستاره‌شناسان، که به پلیس سماوی<sup>۸۲</sup> معروف شدند، تلاش خود را یکی کردند تا با جستجویی منظم سیاره احتمالی را بیابند. هرچند آنان سی‌رس را کشف نکردند، اما چندین سیاره کوچک - یا سیارک - را در آنچه امروزه «کمربند اصلی سیارک‌ها»<sup>۸۳</sup> نام دارد، یافتند.

جسمی که به سی‌رس معروف شد، به وسیله چوپته پیاتسی<sup>۸۴</sup> در اول ژانویه ۱۸۰۱ کشف شد. او در ابتدا آن را دنباله‌دار تصور می‌کرد. قطر آن حدود ۹۵۰ km است و آن قدر جرم دارد که در تعادل هیدرواستاتیک باشد (آن را به صورت کره درآورد)، از این رو سی‌رس کوچک‌ترین سیاره کوتوله است. سی‌رس حدود یک سوم جرم سیارک‌های کمربند اصلی را، که هم‌اکنون مدار بیش از ۱۷۰,۰۰۰ عدد از آن‌ها محاسبه شده است، به خود اختصاص می‌دهد. در سال ۲۰۰۶، اتحادیه بین‌المللی نجوم این سیارک‌ها را در رده «اجسام کوچک منظومه شمسی»<sup>۸۵</sup> طبقه‌بندی نمود.

تصور بر این است که سی‌رس آن قدر بزرگ است که تفریق شده باشد؛ به این معنی که عناصر صخره‌ای سنگین‌تر در مرکز متمرکز شده‌اند، و روی این هسته را گوشته‌ای یخی پوشانده است (مخلوطی از یخ آب و مواد معدنی چون کربنات‌ها و خاک رس).

### پانویس‌ها

- 1 - Mariner 10
- 2 - MESSENGER spacecraft
- 3 - 70-metre Goldstone antenna
- 4 - Very Large Array (VLA)



۵- BepiColombo: بر اساس آخرین اخبار، این مأموریت در ژوئیه ۲۰۱۶ به فضا پرتاب خواهد شد، و در ژانویه ۲۰۲۴ به عطارد خواهد رسید. (مترجم)

- 6 - Mercury Planetary Orbiter
- 7 - Near-Earth Objects
- 8 - Mercury Magnetospheric Orbiter
- 9 - positive ion emitter
- 10 - Hesperus and Phosphorus

۱۱ - 'Hesperus is Phosphorus'، جمله‌ای در فلسفه زبان که به درک این حقیقت اشاره دارد.

- 12 - Captain Cook
- 13 - Venera 7
- 14 - Ishtar Terra
- 15 - Maxwell Montes
- 16 - Aphrodite Terra
- 17 - Farra

۱۸ - Plate Tectonics: حرکت بخش‌هایی از پوسته نسبت به هم.

- 19 - Double Planet
- 20 - self-replicating molecular system

۲۱ - Pangaea، قاره‌ای پهناور که تصور می‌شود ۲۰۰ میلیون سال قبل تکه‌تکه شد و قاره‌های کنونی از آن ایجاد گردید. (مترجم)

- 22 - Cambrian era
- 23 - Chicxulub crater

۲۴ - تردیدهایی در مورد این نظریه به وجود آمده است. برخی نظریات جدید انفجارهای بزرگ آتش‌فشانی را منشأ انقراض دایناسورها می‌داند. (مترجم)

- 25 - Mount Chimborazo in Ecuador
- 26 - Libration

۲۷ - دلایل متعددی برای این خطای دید بیان شده است. جهت مطالعه بیشتر می‌توانید موضوع را در منابع تحت عنوان Moon Illusion پیگیری نمایید. (مترجم)

۲۸ - Maria جمع Mare، در لاتین به معنی دریا.

- 29 - Oceanus Procellarum (Ocean of Storms)
- 30 - Mare Tranquillitatis (the Sea of Tranquillity)
- 31 - Sinus Iridum (Bay of Rainbows)
- 32 - Luna 3
- 33 - Mare Crisium

۳۴ - Terrae، به معنی زمین، خاک.

- 35 - crater Peary
- 36 - Rayed Crater
- 37 - Lunar Regolith
- 38 - Differentiation
- 39 - Tidal Force

۴۰- در متن اصلی کتاب «توان چهارم فاصله» ذکر شده است؛ اما با مراجعه به دیگر منابع، به طور مثال Ostlie، توان سوم فاصله صحیح است. (مترجم)

۴۱- از این رو برآیند نیرو برآب اقیانوس ها در سمت دورتر به گونه ای است که مد ایجاد می شود. (نیروی جاذبه بر نواحی مرکزی زمین بیشتر از نواحی دور است، اما به علت صلب بودن زمین و مایع بودن آب اقیانوس، بستر اقیانوس در سمت دورتر به همراه قسمت مرکزی اندکی به طرف ماه حرکت می کند و این در حالی است که این جابه جایی برای آب اقیانوس کمتر است.) (مترجم)

۴۲- Spring Tide؛ جزرو مد چندان ارتباطی با فصول سال ندارد. spring tide در اصل به معنی جزرو مد چپشی است.

43 - Gravitational Coupling

۴۴- عکس العمل این نیرو باعث می شود که سرعت چرخش زمین کند شود و در نتیجه طول شبانه روز بسیار به کندی در حال افزایش است. در گذشته خیلی دور، حدود ۴۰۰ میلیون سال قبل، شبانه روز ۲۲ ساعت بوده است. (مترجم)

45- Lunar 9

۴۶- Corner-Cube Light Reflectors، گوشه مکعبی ها می توانند نور تابشی را موازی نور اولیه بازتاب کنند. (مترجم)

47- Diffraction Theory

۴۸- soft-landing: نوعی از فرود که بدون آسیب رسانی به ساختارهای هواپیما یا راکت انجام می گیرد. (مترجم)

۴۹- Jade Rabbit؛ در فرهنگ چین (و برخی کشورهای شرق آسیا) نام خرگوشی است که پستی و بلندی های ماه آن را مجسم می کند. (مترجم)

50 - ground-penetrating radar

51 - Chang'e

52 - talcum powder

53 - Giovanni Schiaparelli

۵۴- Percival Lowell؛ رصدخانه در Flagstaff بنا شد و بعدها به دلیل کشف پلوتون معروف گردید.

55 - Mars Global Surveyor

56 - Mesa

57 - Olympus Mons

58 - Beagle II

59 - Lovell Telescope at Jodrell Bank

60 - Mars Reconnaissance Orbiter

61 - Spirit and Opportunity

62 - Gusev Crater

63 - Meridiani Planum

64 - stratified pattern

۶۵- cross-bedding: نوعی ساختار لایه‌ای حاصل از نهشته شدن لایه‌های مورب بر روی سطح

شیب‌دار. (فرهنگستان زبان و ادب فارسی)

66 - Humphrey

67 - dust devils

۶۸- caldera: گودال ژمبشی بزرگی در قلّه آتش‌فشان که دارای شکلی مدور و در برخی موارد کمی

کشیده است و ابعاد آن چند برابر مجراهای درون آن است. (فرهنگستان زبان و ادب فارسی)

69 - Phoenix lander

70 - Mars Odyssey

71 - Mars Reconnaissance Orbiter

72 - Curiosity

73 - Cape Canaveral

74 - Gale Crater

75 - radioisotope thermoelectric generator (RTG)

76 - X-ray diffraction analysis

77 - feldspar, pyroxenes and olivine

78 - weathered basaltic soils

79 - Phobos and Deimos

80 - Johann Elert Bode

81 - Titius-Bode Law

82 - Celestial Police

83 - Main Asteroid Belt

84 - Giuseppe Piazzi

85 - Small Solar System Bodies

[www.gshahali.ir](http://www.gshahali.ir)

نسخه رایگان

# فصل ۵

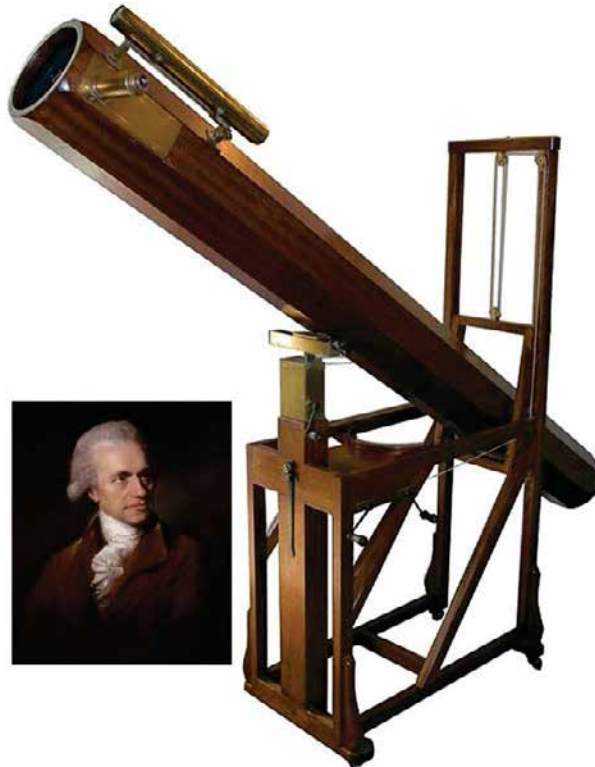
## در جستجوی سیارهٔ ایکس

این یک داستان ۲۰۰ ساله است، و آغازش به آنجا برمی‌گردد که معلوم شد اورانوس مدار پیش‌بینی شدهٔ خود را دنبال نمی‌کند و احتمالاً تحت تأثیر یک سیارهٔ دیگر که هنوز کشف نشده بود قرار دارد؛ سیاره‌ای که البته پس از کشف، نپتون نام گرفت. داستان با جستجوی آنچه پرسپوال لوئل<sup>۱</sup> «سیاره ایکس» نامید (ایکس به معنی ناشناخته) و در ورای نپتون قرار داشت ادامه یافت؛ و در نهایت، جستجوی سیارهٔ دهم در آن سوی پلوتون (حرف ایکس به معنی ۱۰ نیز می‌باشد). خواهیم دید که جستجوی سیاره دهم عملاً در اوت ۲۰۰۶ به پایان رسید، و آن زمانی بود که پلوتون از مقام خود به‌عنوان یک سیاره خلع شد و تعداد سیارات در منظومه شمسی به هشت تنزل یافت.

### ۱-۵ اورانوس

اورانوس اولین سیاره‌ای بود که در عصر جدید کشف شد. گرچه می‌توان آن را با چشم غیرمسلح دید (هرچند به سختی)، بدون تلسکوپ امکان نداشت بتوان نشان داد که آن یک سیاره است و نه یک ستاره. حتی پس از آنکه استفاده از تلسکوپ رایج گردید، به دلیل اپتیک نسبتاً ضعیف آن‌ها، بارها در ردهٔ ستارگان دسته‌بندی می‌شد؛ تا آنکه ویلیام هرشل<sup>۲</sup> در سال ۱۷۸۱ آن را به‌عنوان سیاره شناسایی نمود.

از آنجاکه تلسکوپ‌های موجود رضایت هرشل را جلب نمی‌کرد، تصمیم گرفت برای خود یک تلسکوپ بازتابی بسازد. در آن زمان، آینه‌ها با استفاده از آلیاژی از دو قسمت مس و یک قسمت قلع ساخته می‌شدند. او کار ساختن آینه را در آشپزخانه منزلش انجام داد. تا سال ۱۷۷۸، یک تلسکوپ عالی (شکل ۵-۱)، با آینه‌ای به قطر کمی بیشتر از ۶ اینچ (۱۵۰ mm) ساخته بود و با آن به جستجو در پهنهٔ آسمان پرداخت. در شب ۱۳ مارس ۱۷۸۱، او جسمی را مشاهده نمود که ظاهر



شکل ۵-۱: نسخه‌ی مشابه تلسکوپ‌ی که ویلیام هرشل با آن اورانوس را کشف کرد.

ستاره نداشت و در ابتدا گمان کرد که ستاره‌ی دنباله‌دار است.

رصد‌های ماه‌های بعد نشان داد که این جسم مانند دنباله‌دارها مدار بیضوی کشیده یا سهموی نداشت، بلکه سیاره‌ای بود در یک مدار تقریباً دایره‌ای، و نیم‌قطر بزرگ آن اندکی بیش از ۱۹ برابر نیم‌قطر بزرگ زمین بود.

به‌زودی مشخص شد که چرا هرشل، برخلاف دیگران، تشخیص داده بود که آن یک سیاره است. مقایسه همزمان با دیگر تلسکوپ‌ها، کیفیت بسیار بالای تصویر را در تلسکوپ هرشل نشان داد. هرشل ثابت کرده بود که یک سازنده‌ی توانای تلسکوپ است! حداکثر اندازه زاویه‌ای اورانوس ۴/۱ ثانیه قوسی است، و آن‌گونه که نویسنده با تلسکوپ‌ی عالی، کمی کوچک‌تر از تلسکوپ هرشل، مشاهده کرده است، مانند یک قرص ریز آبی متمایل به سبز به نظر می‌رسد. از این رو اگر سامانه‌ی

اپتیکی تلسکوپ خوب نباشد، به سختی می‌توان آن را از ستاره تمیز داد. این حقیقت که سیاره بارها در قرن قبل از آن در نقشه‌ها ثبت شده بود (هرچند به‌عنوان سیاره شناخته نشده بود)، موجب شد که مدار دقیق آن محاسبه گردد و بعدها همین، عاملی اساسی در کشف نپتون بود. هرشل به‌سرعت مورد تحسین قرار گرفت و عضوی از انجمن سلطنتی شد. سیارهٔ جدید اورانوس نام گرفت، هرچند که او تمایل داشت آن را به خاطر پادشاه انگلستان، ستارهٔ جرج بنامد.

## ۵-۲ نپتون

نپتون را می‌توان با یک تلسکوپ کوچک دید، و حتی گالیله آن را رصد کرده بود. او در ۲۸ دسامبر سال ۱۶۱۲، زمانی که در حال مشاهده مشتری بود، نپتون را به‌عنوان ستاره‌ای با قدر ۸ ثبت کرد و یک ماه بعد آن را در دو شب متوالی در کنار ستاره‌ای مشاهده نمود. وی متوجه شد که جدایی آن‌ها تغییر کرده است و به‌راحتی می‌توانست به این نتیجه رسیده باشد که یکی از آن دو ستاره نیست، بلکه سیاره است! پس از آن به‌وسیلهٔ جان هرشل، فرزند ویلیام هرشل، نیز رصد شد و او هم اعتقاد داشت که ستاره است.

کشف نهایی نپتون یکی از جالب‌ترین داستان‌ها در ستاره‌شناسی است. موقعیت آن به‌طور مستقل توسط دو ریاضی‌دان پیش‌بینی شده بود، جان آدامز در کمبریج، و اوربین لوریه در رصدخانهٔ پاریس<sup>۳</sup>. این موضوع از یک حقیقت کلیدی دربارهٔ اورانوس سرچشمه می‌گرفت: اورانوس بارها، و قبل از آنکه به‌عنوان سیاره شناسایی شود، توسط ویلیام هرشل مورد رصد قرار گرفته بود. جان فلم‌استید<sup>۴</sup> از سال ۱۶۹۰، چندین بار آن را رصد کرده، نام ۳۴<sup>۵</sup> را برای آن برگزیده بود. از آن زمان تا کشف نهایی اورانوس به‌عنوان سیاره، بارها مشخصات آن ثبت شده بود. ستاره‌شناس فرانسوی پی‌یر لومونیه<sup>۶</sup> دست‌کم ۱۲ بار اورانوس را بین سال‌های ۱۷۵۰ تا ۱۷۶۹ رصد کرده بود. با ترکیب این رصدهای به‌اصطلاح قدیمی و رصدهای دقیق‌تری که بعد از شناسایی آن به‌عنوان سیاره صورت گرفت، بلافاصله می‌توانستند مداری دقیق برای اورانوس محاسبه نمایند. اما تا سال ۱۸۲۱ مشخص شده بود که اورانوس به نظر نمی‌رسید مدار پیش‌بینی شدهٔ خود را دنبال کند، از این‌رو این فکر پدید آمد که شاید مدار آن توسط سیاره‌ای در آن طرف اورانوس، که هنوز کشف نشده بود، مختل می‌گردد.

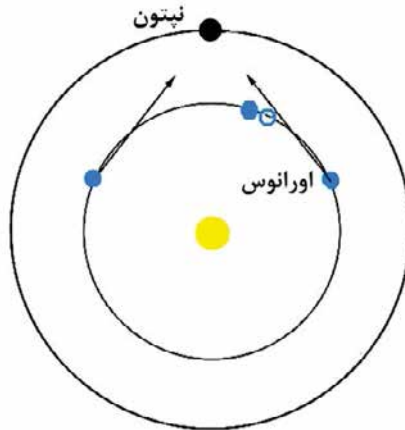
جان آدامز<sup>۷</sup> که در دانشکده سنت جان در کمبریج مطالعه می‌کرد، در سال ۱۸۴۳ با کسب رتبه اول و به‌عنوان بهترین ریاضی‌دان دوره خود فارغ‌التحصیل شد. او به عضویت کالج درآمد و تصمیم گرفت مطالعاتش را به حل مشکل مدار اورانوس اختصاص دهد و باور داشت که این مشکل از یک سیاره دورتر ناشی می‌شود. آدامز در سپتامبر ۱۸۴۵ پاسخی به دست آورد، و تصور می‌شود که آن را به استاد نجوم کمبریج، جیمز چالیس<sup>۸</sup> داد. در ۲۱ سپتامبر به خانه ستاره‌شناس سلطنتی، جرج ایری<sup>۹</sup> رفت، ولی او در منزل نبود. مجدداً در ۲۱ اکتبر به دیدار وی رفت، اما ایری به بهانه شام او را نپذیرفت، او هم در دست‌نوشته‌ای راه‌حل را به ایری داد. ایری که نتوانست دست‌نوشته را به خوبی متوجه شود، در نامه‌ای از آدامز توضیح خواست، اما به نظر می‌رسد که آدامز پاسخی نداد؛ شاید به این دلیل که از حرکت وی سرخورده شده بود.

در همین حین در پاریس، لووریه<sup>۱۰</sup> نیز، که به درخواست رئیسش در حال کار روی همین مشکل بود، موقعیتی را برای سیاره به دست آورد. به نظر می‌رسد در رصدخانه پاریس رغبتی به پیگیری پیش‌بینی او نشان داده نشد، شاید به دلیل آنکه چندان مورد علاقه نبود؛ لذا لووریه آن را برای ایری فرستاد. او به شباهت موقعیت‌های پیش‌بینی شده برای سیاره پیشنهادی پی برد؛ از این رو در ژوئیه ۱۸۴۶ از چالیس در کمبریج درخواست کرد که به دنبال آن بگردد. متأسفانه چالیس نقشه دقیقی از ستارگان، برای منطقه‌ای که امید می‌رفت سیاره در آنجا پیدا شود، در اختیار نداشت؛ از این رو شروع به ساخت نقشه نمود. اگر او مجدداً به مشاهده محل همه اجرامی که در نقشه آورده بود می‌پرداخت، می‌توانست سیاره پیش‌بینی شده را بیابد، چراکه نسبت به ستارگان زمینه کمی جابه‌جا شده بود.

در ۱۸ سپتامبر، لووریه نامه‌ای به یوهان گاله<sup>۱۱</sup> در رصدخانه برلین نوشت و از وی خواست تا جستجویی انجام دهد. گاله نامه را در ۲۳ سپتامبر دریافت کرد و همکاریش، هاینریش دارست<sup>۱۲</sup> اظهار داشت که نقشه‌ای جدید از منطقه موردنظر در اختیار دارند و اگر سیاره در همان منطقه باشد به راحتی می‌توانند آن را بیابند. آن‌ها همان شب به رصد پرداختند و تنها ۳۰ دقیقه بعد، سیاره را تنها ۱° دورتر از محل لووریه پیدا کردند.

در حقیقت چالیس در ۲۹ سپتامبر متوجه شده بود که یکی از ۳۰۰ ستاره‌ای که نقشه‌برداری کرده است، مانند قرص به نظر می‌رسد - چیزی که درباره سیارات رخ می‌دهد - اما چون شخص





شکل ۵-۲: مدار اورانوس در چارچوب مرجعی که در آن نپتون ساکن است.

محتاطی بود، منتظر رصدهای بیشتری ماند تا حرکت آن را در بین ستارگان نشان دهد. اما موفق نشد این کار را قبل از اعلان کشف سیاره در روزنامه تایمز، به تاریخ اول اکتبر ۱۸۴۶، انجام دهد. ویلیام لاسل<sup>۱۳</sup>، با تلسکوپ ۲۴ اینچی که خود ساخته بود، بلافاصله به رصد سیاره جدید پرداخت، به این امید که قمری را بیابد. او رصدهایش را در ۲ اکتبر آغاز کرد و در ۱۰ اکتبر قمر نپتون، تریتون<sup>۱۴</sup> را یافت.

افتخار کشف نپتون به طور مشترک به آدامز و لووریه تعلق دارد. جالب توجه است که پیش بینی آن‌ها در مورد مدار نپتون چندان دقیق نبود، و تنها برای ۱۰ سال، از ۱۸۴۰ تا ۱۸۵۰، پیش بینی‌های آن‌ها به طور معقول با محل واقعی سیاره مطابقت داشت. اخیراً، کشف برگه‌هایی که از رصدخانه سلطنتی در گرینویچ مورد سوءاستفاده قرار گرفته بود، تردیدهایی را بر ادعای آدامز وارد می‌کند؛ شاید او لایق اعتباری مساوی با لووریه نباشد.

با مرور رویدادهای گذشته، می‌توان به راحتی پیش بینی کرد که نپتون را باید کجا می‌یافتند. نمودار نپتون و اورانوس (شکل ۵-۲) در یک دستگاه مختصات چرخان رسم شده است، به گونه‌ای که نپتون در آسمان ثابت به نظر می‌رسد. از آنجاکه اورانوس سریع‌تر به دور خورشید می‌گردد و مدار آن کوچک‌تر است، از کنار نپتون «در مسیر داخلی» عبور می‌کند. شما ملاحظه می‌کنید که با نزدیک شدن اورانوس به نپتون، جاذبه بین آن دو میل دارد که اورانوس را در

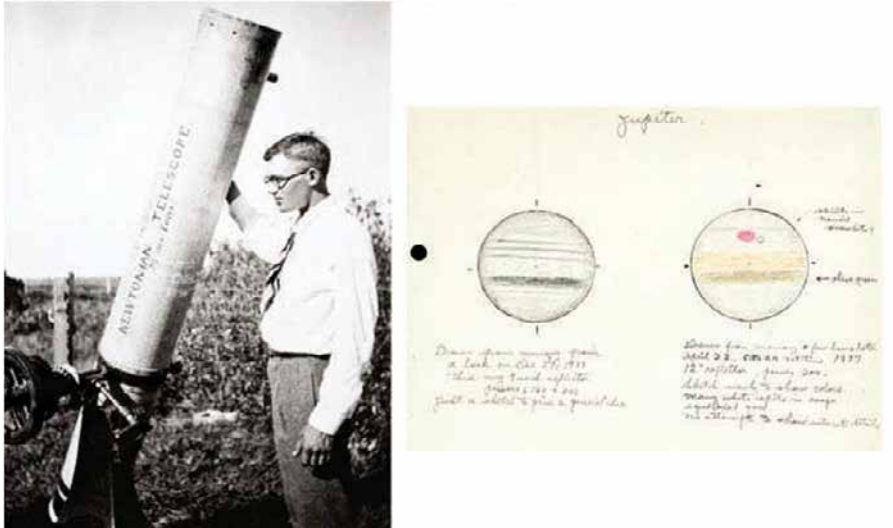
مدارش پیش بیندازد، لذا جلوتر از محلی که انتظار داریم قرار داشته باشد، ظاهر می‌شود (دایره توپر به جای دایره توخالی). با گذر اورانوس به آن طرف موقعیت نپتون، جاذبه گرانشی آن‌ها باعث کندی حرکت اورانوس می‌شود، تا این‌که بالاخره اورانوس مجدداً موقعیت مورد انتظار خود را به دست می‌آورد. می‌توان دید زمانی که اورانوس بیشترین جلو افتادگی را در مدارش دارد، نپتون باید در ورای موقعیت اورانوس باشد.

### ۳-۵ پلوتون

کشف پلوتون نیز داستانی شبیه به نپتون دارد. نه مدار اورانوس و نه مدار نپتون به خوبی قابل تعریف نبودند و گمان می‌رفت یک سیاره دورتر وجود داشته باشد که بر مدار این دو تأثیر می‌گذارد - پرسپوال لوئل، با شهرتی که از مریخ داشت، آن را سیاره ایکس نامید. در سال ۱۹۰۵ مدار آن را پیش‌بینی کرده بود و در رصدخانه فلگ‌استف<sup>۱۵</sup> با عکس‌برداری به جستجوی آن پرداخت. هیچ چیز یافت نشد، و پس از محاسبات دقیق‌تر، دوباره در ۱۹۱۴ جستجو از سر گرفته شد. او و گروه همراهش در رصدخانه بدون هیچ موفقیتی، جستجو را تا مرگ لوئل در سال ۱۹۱۶ ادامه دادند. هرچند پلوتون قطعاً در برخی عکس‌هایی که در ۱۹ مارس ۱۹۱۵ گرفته شد پیدا بود، ولی مورد شناسایی قرار نگرفت، چراکه بسیار کم‌نورتر از حد انتظار بود.

به دنبال مسائلی که در وصیت‌نامه لوئل پس از مرگش در سال ۱۹۱۶ به وجود آمد، عملاً رصدخانه تا ۱۹۲۹ از فعالیت بازماند، تا آنکه سرپرست آن زمان رصدخانه، وستو اسلایفر<sup>۱۶</sup> جستجوی دوباره‌ای را شروع کرد. یک ستاره‌شناس غیرحرفه‌ای و جوان بنام کلاید تامبو<sup>۱۷</sup> نقاشی‌هایی را که از مشتری و با استفاده از تلسکوپ نیوتونی خود کشیده بود، برای اسلایفر فرستاد؛ به این امید که شغلی به وی پیشنهاد شود (شکل ۳-۵). نقاشی‌ها اسلایفر را تحت تأثیر قرار داد و او را به کار گرفت تا با اخترنگار<sup>۱۸</sup> ۱۳ اینچ رصدخانه، که دوربینی با زاویه باز بود، عکس‌برداری کند.

دو عکس را که با فاصله زمانی از هم گرفته شده بود در «مقایسه‌کننده چشمک‌زن»<sup>۱۹</sup> مورد مقایسه قرار می‌دادند. عکس‌ها را پشت سر هم و به سرعت می‌نگریستند. جسمی که در فاصله بین دو عکس برداری جابه‌جا شده است، در اینجا به نظر می‌رسد که از جای خود می‌پرد، درحالی‌که ستاره‌ها سر جای خود ثابت می‌مانند. بدین ترتیب اجسام سیاره‌ای قابل شناسایی هستند. اولین



شکل ۵-۳: کلاید تامبو و تلسکوپ ساخت خودش به همراه نقاشی‌هایی که از مشتری کشیده بود.

جستجو برای سیاره X موفقیت‌آمیز نبود، لذا تامبو تصمیم گرفت خودش دست‌به‌کار شود. در ۱۸ فوریه ۱۹۳۰، تامبو، از دو عکسی که در ژانویه ۱۹۳۰ گرفته شده بود سیاره‌ای جدید کشف کرد. حرکت سیاره در رصدهای بعدی تأیید شد و در ۱۳ مارس ۱۹۳۰ کشف آن اعلان گردید. اسم آن را ونتیا برنی<sup>۲۰</sup> دختر ۱۱ ساله یکی از اساتید آکسفورد، روز بعد از آن پیشنهاد کرد. (پلوتون نام خدای رومی عالم اموات بود که می‌توانست خود را ناپدید کند.) با توجه به این‌که دو حرف اول پلوتون با حروف ابتدای پرسپوال لوئل، کسی که کشف در رصدخانه وی صورت گرفته بود، همخوانی داشت، این نام با استقبال مواجه شد.

در ابتدا تصور بر این بود که پلوتون اندازه قابل ملاحظه‌ای دارد - علی‌رغم اینکه تنها به صورت جسم نقطه‌ای ستاره‌مانند، بدون هیچ اندازه زاویه‌ای، مشاهده می‌شد. باید از آن چنان جرمی برخوردار بود که بتواند اختلال در مدار اورانوس و نپتون را توجیه کند. با لابی‌گری و اعمال نفوذ رصدخانه لوئل، عجیب نیست که عنوان سیاره به آن داده شد. راهی وجود دارد که می‌توان با آن اندازه نپتون را برآورد کرد، و آن استفاده از سپیدایی است - مقدار نور خورشید که از سطح جسم منعکس می‌شود. برای مثال، زهره که کاملاً پوشیده از ابر است، دارای یک سپیدایی بالا برابر با ۶۵٪ است، به این معنی که ۶۵٪ نوری را به آن می‌تابد منعکس می‌نماید. سپیدایی زمین، با

پوشش نیمه‌ابری، ۰/۳۷ است و برای مریخ تنها ۰/۱۵ می‌باشد؛ و در انتها نوبت به عطارد و ماه می‌رسد، به ترتیب با سپیدایی ۰/۱۱ و ۰/۰۷. سپیدایی اجسامی که در کمربند سیارکی هستند تا حدود ۰/۰۵ کاهش می‌یابد، و در یک دنباله‌دار نمونه، سپیدایی به ۰/۰۴ می‌رسد. در انتهای دیگر، انسلا دوس، قمر زحل، یکی از بالاترین سپیدایی‌های شناخته شده در بین اجسام منظومه شمسی را دارد، و ۰/۹۹ نور فرودی بر خود را بازمی‌تاباند.

بنابراین قدر ظاهری یک جسم به فاصله، اندازه، و سپیدایی آن بستگی دارد. لذا چون فاصله پلوتون را می‌دانیم، و اگر مقداری را برای سپیدایی آن فرض کنیم، می‌توانیم اندازه آن را برآورد نماییم. حتی در همان ابتدا، اگر یک سپیدایی میانه برای آن در نظر گرفته شده بود، چندان بزرگ به نظر نمی‌رسید؛ و با استفاده از یک چگالی سیاره‌ای نوعی، از جرم کافی برای آنکه آن اختلال‌های فرضی را در مدار نپتون موجب شود (که به پیش‌بینی لوئل درباره سیاره ایکس انجامید) برخوردار نبود.

در درازمدت، روشی وجود دارد که مقدار دقیق اندازه سیاره را در اختیار ما قرار می‌دهد: گاهی یک سیاره از مقابل یک ستاره عبور می‌کند و مدت اختفای ستاره<sup>۲۱</sup> به فاصله سیاره از خورشید، قطر آن، و اینکه مرکز سیاره با چه فاصله‌ای (نزدیکی) از مقابل موقعیت ستاره عبور کند، بستگی دارد. برای مدت اختفا یک مقدار بیشینه وجود دارد. در بسیاری از این گونه اختفاها، این بیشینه به دست خواهد آمد، و از آن، قطر سیاره محاسبه می‌شود. اختفاهای پلوتون نادر است، اما به زودی مشخص شد که پلوتون نمی‌تواند آن چنان بزرگ باشد. تا سال ۱۹۵۵، جرم برآورد شده پلوتون تا حدود جرم زمین کاهش یافته بود، و محاسبات بیشتر در سال ۱۹۷۱ آن را تا حد مریخ تنزل داد (اگر به همین منوال ادامه می‌یافت، پلوتون به زودی از هستی ساقط می‌شد!).

در یک کشف کلیدی در سال ۱۹۷۶ معلوم شد که مشخصات بازتابش سطح پلوتون، نظیر مشخصات یخِ متان است، و از این رو یک سپیدایی بالا، حدود ۰/۶۶ را دارد (معادل سپیدایی زهره). بنابراین پلوتون نسبت به اندازه خود، بسیار درخشان بود؛ و این، بالطبع، اندازه تخمینی آن را کاهش داد. با احتساب یک چگالی معقول، جرم پلوتون نمی‌توانست بیش از یک یا دو درصد جرم زمین باشد.

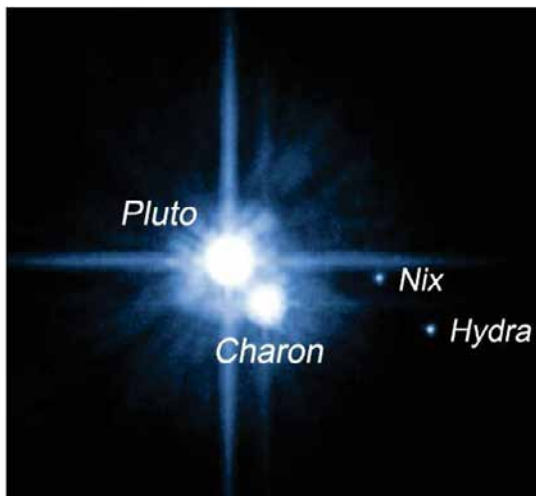
## ۵-۴ کاژن

در دههٔ ۱۹۷۰، جیمز کریستی<sup>۲۲</sup> در رصدخانهٔ ناول در واشینگتن، به رصد سیاره‌ها به منظور تصحیح پارامترهای مداری آن‌ها مشغول بود. او برخی تصاویر پلوتون را به دلیل آنکه کشیده به نظر می‌رسیدند حذف می‌کرد. این پدیده، بر اساس تجربهٔ نویسنده، زمانی رخ می‌دهد که تلسکوپ به خوبی آسمان را دنبال نمی‌کند، در نتیجه تصاویر کشیده می‌شوند. ولی او متوجه شد که اولاً، تصویر ستارگان عالی است، یعنی آنکه تلسکوپ درست کار می‌کند؛ و ثانیاً، با گذشت زمان، کشیدگی پلوتون به دور آن حرکت می‌کند. معلوم شد که کریستی در حال رصد حرکت یک قمر به دور پلوتون، که حالا کاژن<sup>۲۳</sup> نام دارد، بوده است، و کشف آن در ۲۲ ژوئن ۱۹۷۸ اعلان شد. در سال ۱۹۹۰، تلسکوپ فضایی هابل<sup>۲۴</sup> توانست از دو قرص مجزای پلوتون و کاژن تصویربرداری نماید. (کاژن قابقرانی بود که مرده‌ها را در عرض رودخانهٔ افسانه‌ای استیکس جابه‌جا می‌کرد و با پلوتون ارتباط نزدیکی داشت؛ لذا نامی ایده‌آل بود. ضمن آنکه حروف اول آن مشابه نام همسر کریستی، کارلین بود!)

با داشتن نیم‌قطر بزرگ و دوره تناوب یک قمر، می‌توان جرم سیاره را محاسبه نمود. برای اولین بار محاسبهٔ دقیق جرم پلوتون ممکن شد، و این جرم تنها ۰/۲٪ جرم زمین به دست آمد. این جرم بسیار کمتر از آن بود تا تأییراتی را که به موجب آن، وجودش پیش‌بینی شده بود، بر اورانوس و نپتون داشته باشد. بنابراین پلوتون کوچک‌تر و بسیار کم‌جرم‌تر از سیاره‌های زمینسان<sup>۲۵</sup> است. رصد اختفاهای متقابل بین پلوتون و کاژن نیز اندازه‌گیری دقیق قطر پلوتون را ممکن ساخت؛ و مقدار نزدیک به ۲۳۰۰ کیلومتر به دست آمد. بدین ترتیب قطر پلوتون بیش از دو برابر قطر بئرس، و جرم آن ۱۲ برابر جرم بئرس، بزرگ‌ترین جسم در کمربند سیارکی است.

در سال ۲۰۰۵ دو قمر دیگر بنام نیکس و هایدرا<sup>۲۶</sup> کشف شد (شکل ۵-۴). نیکس خدای تاریکی و شب، و مادر کاژن بود. دو قمر دیگر به نام‌های کربروس و استیکس<sup>۲۷</sup> به ترتیب در سال‌های ۲۰۱۱ و ۲۰۱۲ کشف شدند.

در ۱۸ ژانویهٔ سال ۲۰۰۶، فضاییمایی بنام «افق‌های نو»<sup>۲۸</sup> زمین را برای یک سفر ۹ ساله به مقصد پلوتون و ماوراء آن ترک کرد. «افق‌های نو» در ۲۸ فوریهٔ ۲۰۰۷ از کنار مشتری گذشت، و در



شکل ۴-۵: تصویر تلسکوپ فضایی هابل از پلوتون و سه قمرش

حرکتی که به مانور قلاب سنگ<sup>۲۹</sup> معروف است، با استفاده از میدان گرانش مشتری سرعتش را به حدود  $83,000 \text{ km/h}$  افزایش داد. بعد از بیش از  $4/8$  میلیارد کیلومتر پرواز، این فضاپیما در ژوئیه سال ۲۰۱۵ از کنار پلوتون و کاژن خواهد گذشت؛ و سپس امید است در مأموریتی اضافه، دیداری از اجرام کمربند کویپر داشته باشد.

## ۵-۵ در جستجوی سیارهٔ دهم

در پی برخورد تکه‌های دنباله‌دار شومیکر-لوی ۹ به مشتری در ژوئیه ۱۹۹۴، که لکه‌هایی بزرگ‌تر از زمین بر سطح آن به جا گذاشت (به تفصیل در فصل ۸ به آن خواهیم پرداخت)، دولت‌ها به خوبی متوجه تهدیدی شدند که دنباله‌دارها و سیارک‌ها ممکن است برای زمین داشته باشند. از این رو به سرمایه‌گذاری در پروژه‌های رصدی پرداختند که اجسام به اصطلاح نزدیک زمین<sup>۳۰</sup> را شناسایی می‌کرد، به این امید که بتوان در زمان مناسب آن‌هایی را که یک تهدید برای زمین به حساب می‌آیند شناسایی کرده، اقدام مناسب را برای انحراف آن‌ها و جلوگیری از برخورد انجام داد. روش کار اساساً ساده است. دو عکس را با فاصلهٔ حدود یک ساعت از یک منطقهٔ آسمان می‌گیرند. با فرض اینکه تلسکوپ به درستی ستاره‌ها را دنبال می‌کند، تصویر ستاره‌ها شبیه نقطه

خواهد بود، اما به دلیل حرکت سیارک‌ها به دور خورشید، تصویر آن‌ها ممکن است کمی کشیده باشد، و البته محل آن‌ها در فاصلهٔ بین دو عکس جابه‌جا شده است. در روزهای نخست، دو تصویر را باهم در دستگاه مقایسه‌کنندهٔ چشمک‌زن نگاه می‌کردند - مانند دستگاهی که تامبو به کمک آن توانست پلوتون را کشف کند. وقتی دو تصویر را پی‌درپی نگاه کنند، جسمی که حرکت کرده به نظر می‌رسد جلو و عقب می‌پرد، و بدین ترتیب از ستارگان زمینه قابل تشخیص است. یک روش دیگر، مشاهدهٔ دو تصویر به صورت یک زوج برجسته‌بینی<sup>۳۱</sup> (زوج استروسکپی) است. در این صورت، یک سیارک به صورت شناور بالای ستارگان ظاهر می‌شود. واضح است که این کار بسیار وقت‌گیر است، اما با استفاده از یک تلسکوپ اشمیت که می‌تواند در هر نوبت، تصویری از آسمان با وسعت چند درجه بگیرد، در هر شب رصد، مساحتی مناسب از آسمان پوشش داده می‌شود.

### کوتوله‌های یخی

بالاخره فناوری تا آنجا پیشرفت کرد که با استفاده از آرایه‌های بزرگ CCD، یک راه‌حل تماماً رایانه‌ای برای این مشکل پیدا شد. دو تصویر دیجیتالی که با فاصلهٔ زمانی گرفته شده‌اند به وسیلهٔ یک برنامهٔ پیچیدهٔ رایانه‌ای مورد مقایسه قرار می‌گیرند تا هر حرکتی شناسایی شود. هرچه فاصله از خورشید دورتر باشد، تغییر موقعیت بین دو تصویر کمتر خواهد بود. با استفاده از این فناوری، امکان کشف صدها سیارک و دنباله‌دار، و با هیجان تمام، چیزهایی که به کوتولهٔ یخی معروف شده، در ورای مدار نپتون قرار دارند، فراهم آمده است. دلیل این نام‌گذاری آن است که عمدتاً از یخ ساخته شده‌اند. البته آن‌ها را به درستی «اجسام فرانپتونی»<sup>۳۲</sup> یا حتی «اجسام کمربند کویپر» نیز می‌نامند، زیرا این نامی است که به منطقهٔ وسیعی در ورای نپتون اطلاق می‌شود.

نخستین کوتولهٔ یخی را باب مک‌میلن<sup>۳۳</sup> با استفاده از تلسکوپ ۹۰ سانتیمتری مشاهده فضا در دانشگاه آریزونا<sup>۳۴</sup> کشف کرد. نام آن از خدای هندوها، وارونا<sup>۳۵</sup>، گرفته شد و در ابتدا تصور بر این بود که قطر آن حدود ۹۰۰ کیلومتر باشد. اندکی بعد، ایکسیون<sup>۳۶</sup> کشف شد، با این تصور که قطر آن ۸۰۰ کیلومتر است. تنها راه برآورد قطر این بود که سپیدایی آن‌ها حدس زده شود، چیزی که ۰/۵ فرض شد. امروزه به نظر می‌رسد که سپیدایی این اجسام بالاتر از مقداری است که در ابتدا تصور می‌شد (حدود ۰/۷) و از این رو کوچک‌ترند - تازه‌ترین برآورد برای قطر وارونا ۵۰۰ کیلومتر است.

در اکتبر ۲۰۰۱، به دنبال کاری چندین ساله، یک ابزار عالی پا به هستی گذاشت. این ابزار، از یک تلسکوپ ۴۸ اینچ ساموئل اوشین در کوه پالومار<sup>۳۷</sup> (یک تلسکوپ اشمیت با میدان دید خیلی باز) همراه با یک آرایه جدید CCD با ۵۰ مگا پیکسل، موسوم به NEAT<sup>۳۸</sup> (دوربین پیگرد سیارک نزدیک زمین) تشکیل می‌شد. گرچه هدف اولیه آن کشف اجسام نزدیک زمین بود، پس از اندکی، در ژانویه سال ۲۰۰۲، مایک براون و همکارانش در رصدخانه پالومار، یک کوتوله یخی دیگر را با قطر تخمینی ۸۰۰ کیلومتر کشف کردند، و در ژوئن همان سال، جسم دیگری را کشف کردند که احتمالاً قطر بزرگ‌تری داشت.

مطمئناً چیزی طول نمی‌کشید که جسمی قابل رقابت با پلوتون کشف شود، و همین‌طور هم شد. گروه در همان شب نخستِ رصد به موفقیت دست یافت، و آن زمانی بود که جسمی با قطر تقریبی ۷۰۰ کیلومتر و نام ۲۰۰۳ OP۳۳ کشف گردید. تا پایان سال، کشف کوتوله‌های یخی به کاری نسبتاً عادی تبدیل شد، و تا فوریه ۲۰۰۴ بیش از ۳۰ کوتوله کشف شده بود. در ۱۹ فوریه، کشف ۲۰۰۴ DW که بعداً نام اورکوس<sup>۳۹</sup> (خدای رومی جهان اموات) بر آن نهاده شد، به وسیله گروه اعلان گردید. قطر آن ۱۶۰۰ کیلومتر برآورد می‌شد، یعنی حتی بزرگ‌تر از کارن قمر پلوتون.

#### سدنا

سدنا<sup>۴۰</sup>، که در ابتدا ۲۰۰۳ VB۱۲ نام داشت، از تصاویری که در نوامبر ۲۰۰۳ گرفته شده بود کشف شد. مداری بسیار کشیده دارد؛ در زمان کشف، حدود ۱۱ میلیارد کیلومتر از خورشید فاصله داشت، تقریباً به اندازه پلوتون، اما در زمان دورترین موقعیت مداری، این فاصله به ۱۴۶ میلیارد کیلومتر (۹۷۵ و ۲۴ برابر فاصله متوسط پلوتون) می‌رسد. دوره تناوب مداری آن ۱۲۰۰۰ سال بود. سدنا، با قطر حدود ۱۸۰۰ کیلومتر، بزرگ‌ترین جسمی بود که از زمان کشف پلوتون در منظومه شمسی کشف شده بود - پس مطمئناً دیری نمی‌پایید که جسمی بزرگ‌تر از پلوتون کشف می‌شد. هرچند خود مایک براون در آن زمان نمی‌دانست، آن جسم پیش از آن بر روی دیسک سخت یارانه‌اش (هارد دیسک) وجود داشت.

#### ۲۰۰۳ UB<sub>۳۱۳</sub>

اگر جسمی در ورای پلوتون در فاصله خیلی دور باشد، طبیعی است که حرکت ظاهری آن در پهنه



آسمان کمتر از پلوتون خواهد بود. به منظور اجتناب از موارد اشتباه، نرم‌افزار (که وظیفهٔ پردازش تصاویر را بر عهده داشت) اجسامی را که در هر ساعت کمتر از  $1/5$  ثانیهٔ قوسی در آسمان جابه‌جا می‌شدند شناسایی نمی‌کرد. بدین ترتیب نرم‌افزارِ براون هر جسمی را در ورای  $12$  میلیارد کیلومتر رد می‌کرد. اما با کشف سدنا درست در لبهٔ این مرز، براون تصمیم گرفت آستانهٔ شناسایی را کاهش دهد، و دوباره به پردازش تصاویر بپردازد. آن‌ها با کمی خجالت، یک کوتولهٔ یخی را یافتند که در واقع باید پیش از آن شناسایی می‌شد. در ابتدا نام سانتا<sup>۴۱</sup> را بر آن نهادند، چراکه در  $28$  دسامبر، در آستانهٔ سال نو مسیحی آن را پیدا کرده بودند. سانتا به شکل تخم‌مرغ است، به سرعت دور خود می‌چرخد، و یک قمر کوچک دارد.

تنها هشت روز بعد، براون سه کوتولهٔ یخی دیگر را نیز کشف کرد. دو تا از آن‌ها  $K31021A$  و  $K31021B$ ، کم‌نور بودند، اما  $K31021C$  بسیار روشن‌تر بود. در هر ساعت تنها  $1/4$  ثانیهٔ قوسی جابه‌جا می‌شد، و این اشاره به فاصلهٔ زیاد آن داشت. در فاصلهٔ  $97AU$  یا  $14/5$  میلیارد کیلومتری از خورشید قرار دارد - تقریباً سه بار دورتر از پلوتون. اینکه در چنین فاصله‌ای این قدر روشن به نظر می‌رسد نشانگر آن است که باید خیلی بزرگ باشد، احتمالاً بزرگ‌تر از پلوتون. شاید سیارهٔ ایکس یافت شده بود! گروه براون پیش از آن نامی را برای جسمی که گمان می‌رفت سیارهٔ دهم باشد برگزیده بودند. بدیهی است که آن نام باید با حرف ایکس شروع می‌شد. آن‌ها نام زینا<sup>۴۲</sup> را انتخاب کرده بودند.

در زمان کشف، زینا در دورترین فاصلهٔ مداری خود بود، و با دوره تناوب  $557$  سال، تا  $275$  سال دیگر به حوض مداری خود (نزدیک‌ترین فاصله تا خورشید) نخواهد رسید. در حوض، به فاصلهٔ  $5/6$  میلیارد کیلومتری از خورشید می‌رسد. مدار آن  $44$  درجه نسبت به صفحهٔ منظومه شمسی کج است - متأسفانه این آغاز خوبی برای اینکه زینا به عنوان سیاره دسته‌بندی شود نبود. در واقع براون و همکارانش، اعتقادی به اینکه پلوتون هم یک سیاره است نداشتند. با وجود این، بلافاصله معلوم شد که زینا باید از پلوتون بزرگ‌تر باشد. با توجه به روشنایی مشاهده‌شده و فاصلهٔ معلوم آن، و فرض اینکه  $100\%$  نور فرودی را بازتابش می‌کند (سپیدایی ۱)، قطری برابر با پلوتون داشت. با فرض سپیدایی یک کوتولهٔ سفید نوعی، حدود  $0/7$ ، باید تا حدی از پلوتون بزرگ‌تر باشد. زینا در  $29$  ژوئیه  $2005$  به مطبوعات معرفی شد. بعداً معلوم شد که زینا یک قمر هم دارد، که

در ابتدا گابریل<sup>۴۳</sup> نام گرفت.

برای کشفی به این بزرگی، کمیته نامگان جسم کوچک<sup>۴۴</sup> وابسته به اتحادیه بین‌المللی نجوم می‌توانست در مدت یک روز بر یک نام رسمی برای زینا به توافق برسد. مشکل آنجا بود که فقط اگر آن یک کوتوله یخی بود، کمیته می‌توانست آن را نام‌گذاری کند، اما اگر قرار بود یک سیاره به حساب آید، کمیته حرفی برای گفتن نداشت. این موضوع باعث شد پاسخ به این سؤال که سیاره چیست و چه چیز سیاره نیست بیش‌ازپیش ضروری باشد. همان‌طور که در فصل ۳ توضیح داده شد، در اوت ۲۰۰۶ اتحادیه بین‌المللی نجوم یک تعریف رسمی برای سیاره ارائه کرد - و بدین ترتیب پلوتون را کنار گذاشت. بر اساس آن، امکان یافتن هیچ سیاره دیگری وجود نداشت، اما زینا و اجسام به قدر کفایت بزرگ دیگری که ممکن بود در ورای پلوتون یافت شوند در گروه سیاره‌های کوتوله قرار می‌گرفتند.

### یک نام رسمی برای زینا

با تثبیت وضعیت زینا به عنوان یک سیاره کوتوله، باید یک نام رسمی به آن می‌دادند. براون نام اریس<sup>۴۵</sup> را پیشنهاد کرد که الهه دعا و ناسازگاری در فرهنگ یونانی بود. به سختی می‌شد نامی بهتر از این انتخاب کرد، چراکه زینا موجب یکی از تلخ‌ترین مشاجره‌ها در تاریخ نجوم شده بود! قمر زینا نیز که در ابتدا گابریل نام گرفته بود به یک نام رسمی نیاز داشت، و آن را دیسنومیا<sup>۴۶</sup> نامیدند؛ یک نام مناسب، زیرا او دختر اریس، و دیو بی‌قانونی بود.

پس از این بود که پلوتون و اریس شماره خود را در فهرست سیاره‌های جزء<sup>۴۷</sup> دریافت کردند؛ ۱۳۴،۳۴۰ برای پلوتون و ۱۳۶،۱۹۹ برای اریس. به نظر من این نام‌گذاری کمی تحقیرآمیز است؛ چراکه سیاره جزئی که به احترام ونتیا برنی<sup>۴۸</sup> نام‌گذاری شد شماره ۶،۲۳۵ است، و حتی آن هم که به احترام من نام گرفت شماره ۱۵،۷۲۷ است. اجسام اطراف آن‌ها در فهرست سیارات جزء تنها چند کیلومتر قطر دارند - مطمئناً این نمی‌تواند صحیح باشد. در حقیقت، من یک راه‌حل به IAU پیشنهاد کردم مبنی بر اینکه سیارات کوتوله نباید در فهرست سیارات جزء قرار بگیرند، بلکه باید در فهرستی مخصوص به خود با عنوان سیارات کوتوله وارد شوند. در این صورت، سیرس DP 01، پلوتون DP 02 و اریس DP03 خواهند بود. متأسفانه به نظر می‌رسد که IAU این پیشنهاد را

نیذیرفته است.

## ۵-۶ چه تعداد سیارهٔ کوتوله؟

تا اینجا، تنها بی‌رس و پلوتون آن قدر مفصل مورد رصد قرار گرفته‌اند که بتوان ثابت کرد در تعریف سیاره کوتوله جا می‌گیرند. چون اریس پرجرم‌تر از پلوتون است، تقریباً به‌طور یقین کروی است، و لذا IAU آن را به‌عنوان یک سیاره کوتوله پذیرفته است. بر اساس تصمیم IAU، اجسام فرانپتونی با قدر مطلق کمتر از +۱ (و از این رو با فرض اینکه بازتاب‌کنندهٔ کامل هستند، باید قطر کمینهٔ آن‌ها ۸۳۸ کیلومتر باشد) بایستی با فرض اینکه سیارهٔ کوتوله هستند نام‌گذاری شوند. تا پایان سال ۲۰۱۳ دو جسم دیگر هم این ملاک‌ها را برآورده کردند و در گروه سیارات کوتوله قرار گرفته، نام ماک‌ماکی و هائومیا<sup>۴۹</sup> را گرفتند.

هنوز اکتشافات زیادی باید صورت پذیرد؛ اما خوب، سیارهٔ ایکس هرگز کشف نخواهد شد.

پانوشته‌ها

- 1 - Percival Lowell
- 2 - William Herschel
- 3 - John Couch Adams at Cambridge, and Urbain Le Verrier at the Paris Observatory
- 4 - John Flamsteed
- 5 - 34 Tauri
- 6 - Pierre Lemonnier
- 7 - John Couch Adams
- 8 - James Challis, Professor of Astronomy at Cambridge
- 9 - Astronomer Royal, George Airy
- 10 - Le Verrier
- 11 - Johann Galle at the Berlin Observatory
- 12 - Heinrich d'Arrest
- 13 - William Lassell
- 14 - Triton
- 15 - Flagstaff Observatory
- 16 - Vesto Melvin Slipher
- 17 - Clyde Tombaugh
- 18 - Astrograph
- 19 - Blink Comparator
- 20 - Venetia Burney

۲۱ - Occultation: پنهان شدن موقت یک جرم آسمانی در پشت جرم آسمانی دیگر.

- 22 - James Christy at the Naval Observatory in Washington
- 23 - Charon
- 24 - Hubble Space Telescope

۲۵ - Terrestrial Planet؛ هریک از چهار سیاره کوچک منظومه شمسی با ساختار صلب و صخره‌ای، شامل زمین و عطارد و زهره و مریخ. و همچنین هر سیاره کوچک و صلب، مانند زمین، در منظومه‌های دیگر.

26 - Nix and Hydra

27 - Kerberos and Styx

28 - New Horizons

۲۹ - Slingshot Manoeuvre؛ استفاده از حرکت نسبی و گرانشی سیاره یا دیگر ساختارهای آسمانی

برای تغییر مسیر و تغییر سرعت فضاپیما.

30 - Near-Earth Objects (NEOs)

31 - Stereoscopic Pair

32 - trans-Neptunian objects

33 - Bob McMillan

34 - 90-cm University of Arizona Spacewatch Telescope

35 - Varuna

36 - Ixion

37 - 48-inch Samuel Oschin Telescope on Palomar Mountain

38 - Near Earth Asteroid Tracking camera (NEAT)

39 - Orcus, a Roman god of the underworld

40 - Sedna

41 - Santa

42 - Xena

43 - Gabrielle

44 - Committee on Small Body Nomenclature

45 - Eris

46 - Dysnomia

47 - minor planet

۴۸ - Venetia Burney؛ کسی که پس از کشف پلوتون به وسیله کلاید تامبو، این نام را برای آن

پیشنهاد کرد.

49 - Makemake and Haumea

## فصل ۶

### سفر به سیارات بیرونی

شاید یکی از بزرگ‌ترین دستاوردها در سفر فضایی بدون سرنشین، فراوانی اطلاعاتی است - اگر نگوییم تصاویر حیرت‌آور- که از برنامه ناسا در ارسال کاوشگر به بخش‌های بیرونی منظومه شمسی به دست آمده است. در اینجا به ترسیم نزدیک به ۴۰ سال کاوش خواهیم پرداخت؛ از کاوشگرهای پایونی‌یر و ویجر<sup>۱</sup> در دهه‌های هفتاد و هشتاد قرن گذشته، تا مطالعه مشتری به وسیله فضایی‌های گالیله در آغاز هزاره، و اخیراً، کاوشگران کاسینی و هویگنس<sup>۲</sup> که به مطالعه زحل و تیتان پرداختند.

#### ۱-۶ پایونی‌یر<sup>۱</sup>

پایونی‌یر<sup>۱</sup> در دوم مارس ۱۹۷۲ از کیپ کاناورال<sup>۳</sup> به فضا پرتاب شد، و نخستین فضایی‌ای بود که با عبور از میان کمربند سیارکی به مشتری رسید. این فضایی‌ها در ۱۵ ژوئن همان سال به کمربند سیارکی وارد شد - ناحیه‌ای به پهنای ۲۸۰ میلیون کیلومتر و ضخامت ۸۰ میلیون کیلومتر. این کمربند مواد و اجسامی با اندازه‌های بسیار متفاوت را در برمی‌گیرد، از ذرات غبار تا سیارک‌های بزرگی که با سرعت‌هایی تا  $72,000 \text{ km/h}$  حرکت می‌کنند، و دانشمندان از این بیم داشتند که پایونی‌یر<sup>۱</sup> نتواند از میان آن‌ها عبور کند. حتی تصور می‌شد که خرده‌های درون کمربند سیارکی آن قدر متراکم باشد که هر فضایی‌ای را از کار بیندازد. خوشبختانه معلوم شد که این نگرانی‌ها بی‌اساس بوده است.

پایونی‌یر<sup>۱</sup>، که در سوم دسامبر ۱۹۷۳ با سرعت تقریب  $131,000 \text{ km/h}$  به مشتری رسید، نخستین فضایی‌ای بود که رصدهای مستقیمی از این سیاره داشت و تصاویر نزدیکی از آن تهیه کرد. پایونی‌یر<sup>۱</sup> نقشه کمربندهای تابشی شدید این سیاره گول‌گازی را ترسیم کرد، موقعیت

میدان مغناطیسی سیاره را تعیین نمود، و نشان داد که مشتری به طور عمده از مایع ساخته شده است. پس از رویارویی با مشتری، پایونی ۱۰ به پرواز خود ادامه داد و به بررسی نواحی بیرونی منظومه شمسی پرداخت. در آنجا باد خورشیدی<sup>۴</sup> و پرتو کیهانی<sup>۵</sup> را مورد مطالعه قرار داد. در سال ۱۹۸۳، پایونی ۱۰ نخستین جسم ساخت بشر بود که از مدار پلوتون، که در آن زمان دورترین سیاره از خورشید بود، عبور کرد و به جمع‌آوری و ارسال اطلاعات ارزشمند علمی در مناطق بیرونی منظومه شمسی ادامه داد، تا اینکه در ۳۱ مارس ۱۹۹۷ مأموریت آن رسماً پایان یافت. در سال ۲۰۰۳ ارتباط با پایونی ۱۰ قطع شد. این کاوشگر هم‌اکنون به سمت ستاره دبران<sup>۶</sup> در صورت فلکی ثور در حرکت است.

## ۲-۶ پایونی ۱۱

یک سال بعد، در آوریل سال ۱۹۷۳، پایونی ۱۱ به فضا پرتاب شد. و در دسامبر ۱۹۷۴ به مشتری رسید. از فاصله ۴۲,۵۰۰ کیلومتری قله ابرهای مشتری گذشت، و علیرغم بمباران شدیدی که از کمربندهای تابشی مشتری دریافت کرد<sup>۷</sup>، خوشبختانه جان سالم به دربرد. با توجه به اینکه پایونی ۱۰ به تمام اهداف مأموریت اصلی در مشتری نائل شده بود، پایونی ۱۱ از گرانش مشتری برای افزایش سرعت خود استفاده کرد و رهسپار زحل شد. در سال ۱۹۷۹، پایونی ۱۱ نخستین فضایی بود که از کنار زحل می‌گذشت، و پس از آن سفر طولانی خود را خارج از منظومه شمسی و در راستای صورت فلکی عقاب آغاز نمود. این فضاپیما از ۲۱,۰۰۰ کیلومتری زحل عبور کرده، یک حلقه جدید و دو قمر دیگر را کشف کرد، همچنین یک جو غلیظ را روی تیتان، بزرگ‌ترین قمر زحل، شناسایی نمود. تجهیزات آن، تابش گرمایی از درون زحل را اندازه گرفت، مغناطیس سپهر<sup>۸</sup> و میدان مغناطیسی زحل را بررسی کرد، و با توجه به تأثیرات گرانشی آن بر مسیر حرکت فضاپیما، به کاوش ساختار داخلی آن پرداخت.

اندازه‌گیری‌های انجام شده از محیط تابشی مشتری به وسیله دو فضایی پایونی ۱۱ باعث شد که دستگاه‌های الکترونیکی در مأموریت‌های متعدد بعدی به مشتری و زحل، به صورت مناسب «مسلح» شوند، و بتوانند در مقابل کمربندهای تابشی شدیدی که اطراف این سیارات وجود دارد ایستادگی کنند.

### ۳-۶ پایونی پرو کمک آن به سیتی<sup>۹</sup> (جستجوی هوش فرازمینی)

حساس ترین و پیچیده ترین برنامه سیتی (SETI)، پروژه فونیکس بود که از سال ۱۹۹۸ تا ۲۰۰۳، با رصد بیش از ۸۰۰ ستاره شبیه به خورشید، به دنبال هر سیگنال و علامتی بود که احتمال داشت از جای دیگری غیر از زمین سرچشمه گرفته باشد. در این پروژه، دو تا از بزرگ ترین تلسکوپ های رادیویی جهان مورد استفاده قرار گرفت: بشقاب ۳۰۰ متری آرسیبو در پورتوریکو<sup>۱۰</sup>، و تلسکوپ ۷۶ متری لاول در جدرل بانک انگلستان<sup>۱۱</sup> (جایی که من دانشمند پروژه بودم). رصد همزمان با استفاده از دو تلسکوپ با فاصله زیاد به این معنی بود که تداخل محلی، کشف ناخواسته و جعلی را موجب نمی شد. با توجه به چرخش زمین، سیگنالی که با یک بسامد معین مخابره شده بود، به دلیل پدیده دوپلر، در این دو تلسکوپ با دو بسامد متفاوت دریافت می گردید. این کار ما را قادر می ساخت که هر سیگنال دریافتی از ماهواره هایی را که به دور زمین و خورشید در گردش بودند، حذف کنیم. اما چطور می توانستیم ثابت کنیم که سامانه به صورت کاملاً درست کار می کند؟ هرروز، پیش از آغاز نوبت ۱۲ ساعته رصد، سیگنال بسیار ضعیفی را که همچنان از کاوشگر فضایی پایونی یرو<sup>۱۰</sup> مخابره می شد شناسایی می کردیم (در آن موقع پایونی یرو<sup>۱۰</sup> بیش از ۱۱ میلیارد کیلومتر از زمین فاصله داشت). آخرین سیگنال این کاوشگر در ۲۳ ژانویه ۲۰۰۳ از فاصله ۱۲ میلیارد کیلومتری - تقریباً دو برابر فاصله متوسط پلوتون - دریافت شد.

### ۴-۶ ویجرا و ۲

ویجرا در ۵ سپتامبر ۱۹۷۷، دو هفته پس از فضاییمای دوقلوییش، ویجرا<sup>۲</sup>، به وسیله ناسا به فضا پرتاب شد. اما چون خط سیر آن کوتاه تر بود، زودتر به مشتری و زحل رسید. در کمال شگفتی، همچنان با زمین در ارتباط است، و یک مأموریت تمدید شده را برای موقعیت یابی و مطالعه کمر بند کوپیر و مرزهای بیرونی منظومه شمسی پیگیری می کند. دانشمندان دریافته بودند که یک هم راستایی نادر در سیارات بیرونی (هر ۱۷۵ سال یک بار) ویجرا را قادر می سازد از فنی موسوم به «کمک گرانشی»<sup>۱۲</sup> استفاده کرده، به کمک انرژی گرانشی سیاراتی که از کنار آن ها عبور می کند سرعت خود را افزایش دهد، و بتواند از عهده آنچه را در آن زمان «گردش باشکوه»<sup>۱۳</sup> می نامیدند برآید. این یک سری کمک های گرانشی پیوسته بود که یک کاوشگر را قادر می ساخت به تمام

چهار سیاره غول منظومه شمسی، تنها در یک دوره ۱۲ ساله، و نه ۳۰ ساله، سر بزنند. (اگر یک فضاپیما در فاصله نزدیک از پشت یک سیاره عبور کند، جاذبه گرانشی سعی می‌کند فضاپیما را به سطح سیاره ساقط نماید، از این رو کاوشگر در امتداد راستای مدار سیاره، سرعت می‌گیرد. حال اگر کاوشگر از سرعت کافی برخوردار باشد، به سیاره برخورد نمی‌کند، بلکه حرکت خود را در یک مسیر جدید با سرعتی فوق‌العاده بیش‌تر ادامه می‌دهد. این فن را گاهی «قلاب‌سنگ گرانشی یا سیاره‌ای<sup>۱۴</sup>» نیز می‌نامند.)

ویجر ۱ در ژانویه ۱۹۷۹ تصویربرداری از مشتری را آغاز کرد. نزدیک‌ترین تقرب آن در ۵ مارس ۱۹۷۹ و در فاصله تنها ۲۷۶,۰۰۰ کیلومتر بالای قله ابرهای مشتری بود. در مدت ۴۸ ساعت، قمرها، حلقه‌ها، میدان‌های مغناطیسی و کمر بند تابشی مشتری را مطالعه کرد؛ و فعالیت آتش‌فشانی بر روی داخلی‌ترین قمر مشتری، آیو، را به‌عنوان یک کشف مهیج در پرونده خود ثبت نمود. هر دو ویجر توانستند مانور کمک گرانشی را با موفقیت در مشتری اجرا کنند، و راه خود را به سمت زحل ادامه دهند. ویجر ۱ در نوامبر ۱۹۸۰ به زحل رسید، و در آن زمان در فاصله ۱۲۳,۰۰۰ کیلومتری از قله ابرهای زحل قرار داشت. یک سال قبل از آن، پایونی ۱۱ یک جو متراکم را در تیتان شناسایی کرده بود. لذا این فرصت غنیمت شمرده شد و ویجر ۱ به جای ادامه گردش باشکوه خود به سمت اورانوس و نپتون، به تحقیق بیشتر درباره این موضوع پرداخت. این عبور نزدیک، ویجر ۱ را به سمت خارج از صفحه منظومه شمسی (که سیارات در آن قرار دارند) منحرف ساخت، و بدین ترتیب گردش سیاره‌ای آن به پایان رسید. (در غیر این صورت، ویجر ۱ می‌توانست از پلوتون نیز بگذرد.)

در سپتامبر ۲۰۱۳، ناسا اعلان کرد که ویجر ۱ به‌عنوان نخستین جسم ساخت بشر، در ۲۵ اوت ۲۰۱۲ از خورمرز<sup>۱۵</sup> گذشته است. انتظار این است که این کاوشگر تا سال ۲۰۲۵ به مأموریت خود ادامه دهد، و سپس مولدهای آن از تأمین نیروی کافی برای تجهیزات کاوشگر باز خواهند ماند. ویجر ۲ بر روی یک مسیر منحنی‌تر و آرام‌تر پرتاب شد و در صفحه دایره البروج باقی ماند. با عبور از کنار مشتری و زحل، راه خود را به سمت اورانوس و نپتون ادامه داد، و برای این کار از مانور کمک گرانشی هنگام عبور از کنار زحل در سال ۱۹۸۱ و اورانوس در سال ۱۹۸۶ سود جست. شاید بتوان آن را پربارترین سفر فضایی بدون سرنشین دانست که تاکنون انجام شده است، چراکه از



تمام چهار سیاره بیرونی و سامانه قمرها و حلقه‌هایشان دیدار کرده است. ویجر ۲ دوربین‌هایی را برای تصویربرداری، و همچنین تجهیزاتی را برای اندازه‌گیری‌هایی در طول موج‌های فرابنفش، فرسرخ و رادیویی به همراه داشت. به علاوه می‌توانست چگالی ذرات زیراتمی، شامل پرتوهای کیهانی، را در فضای بیرونی اندازه بگیرد.

در ژوئیه سال ۱۹۷۹، ویجر ۲ به فاصله ۵۶۰,۰۰۰ کیلومتری از قله ابرهای مشتری رسید و نشان داد که لکه سرخ بزرگ<sup>۱۶</sup>، یک طوفان پیچیده با چرخش پادساعت گرد است که به همراه تعداد بسیاری از طوفان‌ها و پیچک‌های<sup>۱۷</sup> کوچک‌تر، درون سامانه پیچیده و نواری ابرهای مشتری جا خوش کرده است. شاید مهیج‌ترین کشفی که به وسیله دو فضاپیمای ویجر به وقوع پیوست، پدیده آتش‌فشانی در آیو بود. این دو فضاپیما در مجموع، فوران ۹ آتش‌فشان را رصد کردند و به شواهدی مبنی بر وقوع فوران‌های دیگر در فاصله بین عبور دو ویجر دست یافتند.

ویجر ۱ تعداد زیادی عوارض خطی جالب بر سطح دومین قمر داخلی مشتری، اروپا<sup>۱۸</sup>، مشاهده کرده بود، و دانشمندان بر این تصور بودند که احتمالاً آن‌ها شکاف‌هایی عمیق است. اما تصاویر با کیفیت بالا که از ویجر ۲ به دست آمد نشان داد که «احتمالاً با قلم‌ماژیک نقاشی شده است». این تصور پدیدار گشت که ممکن است اروپا دارای یک پوسته نازک از یخ آب باشد، که احتمالاً بر یک اقیانوس عمیق شناور است، و گرمای کشندی<sup>۱۹</sup> ناشی از نزدیکی اروپا به مشتری، این اقیانوس را مایع نگه می‌دارد. ویجر ۲ سه قمر کوچک جدید را نیز کشف کرد: ادراستیا، متیس و تبه<sup>۲۰</sup>.

دو سال بعد، ویجر ۲ از پشت زحل عبور کرد. در این وضعیت، ویجر ۲ مدتی ناپدید شد و دوباره پدیدار گشت، و چون سیگنال‌های رادیویی ویجر ۲ به ناچار از میان جو زحل عبور می‌کرد، دانشمندان توانستند به اطلاعاتی پیرامون دمای جو زحل و نمودار چگالی آن دست یابند. در بالای ابرها، دما حدود  $203^{\circ}\text{C}$  - بود، در حالی که در پایین‌ترین عمقی که اندازه‌گیری شد، دما به  $130^{\circ}\text{C}$  - افزایش یافت.

## ۶-۵ آنچه درباره اورانوس می‌دانیم

اورانوس اولین سیاره‌ای بود که در عصر جدید کشف شد. به سختی می‌توان آن را با چشم غیرمسلح دید و اگر کمک تلسکوپ نبود، به دلیل سرعت آهسته آن در آسمان، نمی‌توانستیم آن را به‌عنوان

یک سیاره از ستاره تشخیص دهیم. حتی پس از آنکه استفاده از تلسکوپ رایج گردید، به دلیل اپتیک نسبتاً ضعیف آن‌ها، بارها در رده ستارگان دسته‌بندی می‌شد، تا آنکه ویلیام هرشل در سال ۱۷۸۱ آن را به عنوان سیاره شناسایی نمود.

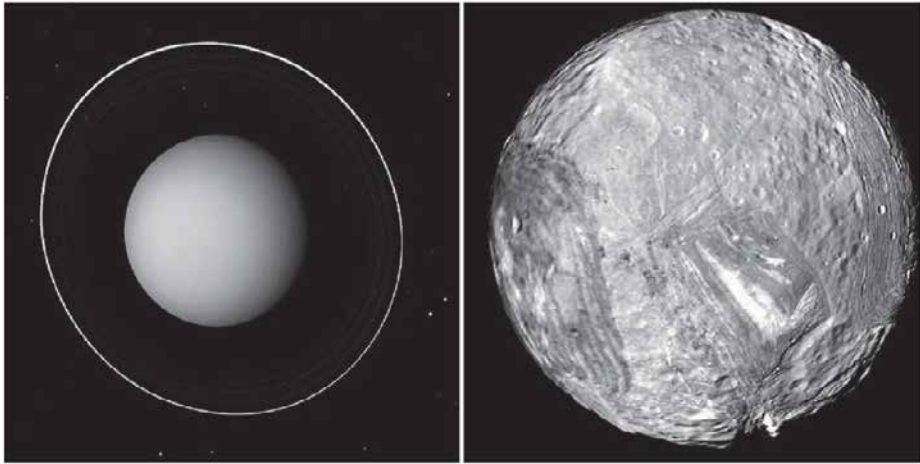
اورانوس هر ۸۴ سال یک بار و در فاصله میانگین حدود ۱۹ AU از خورشید، آن را دور می‌زند. به نظر می‌رسد که لایه‌های ابر سطحی با دوره تناوب کوتاه ۱۴ ساعت در حال چرخش‌اند، اما دلیل آن بادهای مرتفع در جو فوقانی است. دوره تناوب چرخشی اورانوس ۱۷ ساعت و ۱۴ دقیقه است. با وجود آنکه در بیشتر سیارات، محور چرخش سیاره، با اعماض، بر صفحه منظومه شمسی عمود است، کجی محور اورانوس  $98^\circ$  است، از این رو در عمل به دور خورشید می‌غلتد. هر قطب حدود ۴۲ سال، به طور مداوم، در نور خورشید قرار دارد و ۴۲ سال در تاریکی. برخلاف زمین، همین باعث می‌شود که قطب‌ها گرم‌تر از استوا باشند.

اورانوس با جرمی  $14/5$  برابر زمین، کم‌جرم‌ترین سیاره در میان سیارات غول است، و دومین چگالی پایین را در بین آن‌ها به خود اختصاص می‌دهد ( $1290 \text{ kg/m}^3$ ). احتمالاً هسته‌ای صخره‌ای دارد که حدود دو برابر جرم زمین است و در بالای آن مخلوطی از یخ‌های مختلف مانند، آب، آمونیاک و متان قرار گرفته است؛ و لایه گازی بیرونی، که از هیدروژن و هلیوم با جرمی تقریباً برابر با جرم زمین، ساخته شده است. با توجه به این‌که سهم یخ در جرم اورانوس بسیار بیشتر از گاز است، اغلب آن را سیاره یخی می‌نامند و نه گازی.

### حلقه‌های اورانوس

در ۱۰ مارس ۱۹۷۷ و با استفاده از تلسکوپ رصدخانه هوابرد کوپر<sup>۲۱</sup>، قرار بر آن شد که اختفای<sup>۲۲</sup> ستاره SAO ۱۵۸۶۸۷ به وسیله اورانوس مورد رصد قرار گیرد. درست پیش از آنکه ستاره به کلی ناپدید شود، نور آن از جو اورانوس عبور می‌کند؛ با مقایسه طیف ستاره در این زمان با زمان قبل از اختفا، می‌توان اطلاعاتی از جو سیاره به دست آورد.

تلسکوپ به خوبی در حال رصد ستاره، قبل از زمان مقرر اختفا بود، ولی با ناپدید شدن ناگهانی آن، ستاره‌شناسان کمی آشفته شدند. پس از مدت زمانی پراز اضطراب، سیگنال بازگشت، اما با چهار کاهش جزئی دیگر دنبال شد. حال دانشمندان، با اطمینان منطقی از این‌که تجهیزاتشان



شکل ۶-۱: تصویری از اورانوس و حلقه‌هایش و قمر آن، میراندا، که در سال ۱۹۸۶ توسط ویجر ۲ گرفته شد.

مشکلی ندارد، به رصد ادامه دادند. پس از اختفا، مجدداً همان سیر قبل از آن، ولی به طور معکوس، تکرار شد. ستاره‌شناسان فهمیدند که این گرفت پنج مرحله‌ای ستاره، باید توسط مواد پنج حلقه به دور اورانوس پیش آمده باشد، و حلقه خارجی (بنام اپسیلون) از همه ضخیم‌تر است. با توجه به مدت زمان این گرفت‌ها، آن‌ها توانستند قطر حلقه‌ها را اندازه بگیرند؛ خارجی‌ترین حلقه حدود  $44,000 \text{ km}$  از مرکز اورانوس فاصله داشت (شکل ۶-۱).

### ۶-۶ ویجر ۲ در کنار اورانوس

در ۲۴ ژانویه سال ۱۹۸۶، زمانی که ویجر ۲ به فاصله  $81,000$  کیلومتری از قله ابرهای اورانوس رسید، مستقیماً به تصویربرداری از سامانه حلقه‌ها پرداخت، و با کشف حلقه‌های دیگر، تعداد آن‌ها به ۱۱ حلقه رسید. ظاهراً سامانه حلقه‌های اورانوس نسبتاً جوان است، و هم‌زمان با اورانوس تشکیل نشده است. تصور بر این است که ذرات تشکیل‌دهنده حلقه‌ها، بقایای یک قمر باشد که به دلیل یک برخورد بسیار سریع، یا اثرات کشندی، متلاشی شده است.

دانشمندان دریافته‌اند که شدت کمربندهای تابشی اورانوس مانند کمربندهای تابشی زحل است. این تابش به گونه‌ای است که پرتوافکنی آن هر متانی را که در سطح یخی قمرهای داخلی و ذرات حلقه‌ها به دام افتد، تیره می‌کند، و احتمالاً به تیرگی سطح قمرها و ذرات حلقه‌ها، که تقریباً

به صورت یکدست به رنگ خاکستری تیره هستند، کمک کرده است.

اطراف قطب روشن اورانوس، لایه‌ای از مه و غبار در ارتفاع بالا شناسایی شد. همچنین مشخص شد که این ناحیه مقادیر زیادی نور فرابنفش تابش می‌کند، پدیده‌ای که به روزدرخش<sup>۲۳</sup> معروف است. دمای میانگین جو حدود  $213^{\circ}\text{C}$  - است.

میراندا، داخلی‌ترین قمر از میان پنج قمر بزرگ اورانوس، یکی از عجیب‌و غریب‌ترین اجسام در منظومه شمسی است. تصاویر مفصل ویجر ۲ (شکل ۶-۱) ژرف‌دره‌های عظیمی به عمق ۱۹ کیلومتر که از شکست زمین به وجود آمده بودند، لایه‌های پادگانه<sup>۲۴</sup>، و مخلوطی از سطوح جوان و پیرا نشان می‌داد. تصور بر این است که احتمالاً میراندا در گذشته بر اثر یک برخورد شدید به چندین تکه متلاشی شده است، و آنچه می‌بینیم از گرد هم آمدن دوباره آن تکه‌ها به وجود آمده است. همان‌طور که در شکل ۶-۱ نشان داده شده است، یک پرتگاه وجود دارد موسوم به «Verona Rupes»، که به نظر می‌رسد ۷ کیلومتر ارتفاع داشته باشد، و از این رو بلندترین پرتگاه در منظومه شمسی به حساب می‌آید. به دلیل گرانش بسیار پایین در میراندا، اگر کسی از بالای این صخره سقوط کند، حدود شش دقیقه فرصت دارد به تفکر پیرامون زندگی گذشته خود پردازد!

## ۶-۷ ویجر ۲ در کنار نپتون

نپتون را می‌توان حتی با تلسکوپ کوچک دید، و گالیله نیز آن را رصد کرده بود. او در ۲۸ دسامبر سال ۱۶۱۲، زمانی که در حال مشاهده مشتری بود، نپتون را به عنوان ستاره‌ای کم‌نور ثبت کرد و یک ماه بعد آن را در دو شب متوالی در کنار ستاره‌ای دیگر مشاهده نمود. وی متوجه شد که جدایی آن‌ها تغییر کرده است و به راحتی می‌توانست به این نتیجه رسیده باشد که یکی از آن دو ستاره نیست، بلکه سیاره است!

افتخار کشف نپتون به طور مشترک به آدامز از دانشگاه کمبریج و لوریه از رصدخانه پاریس تعلق دارد. این دو، از اختلالاتی که جاذبه گرانشی نپتون بر مدار اورانوس وارد کرده بود، موقعیت آن را حساب کرده بودند. نپتون از لحاظ قطر چهارمین سیاره، و از لحاظ جرم سومین سیاره است؛ یعنی اندکی از همزاد نزدیکش، اورانوس، پرجرم‌تر می‌باشد. جو نپتون عمدتاً از هیدروژن و هلیوم تشکیل شده است، همراه با حدود ۱٪ متان که احتمالاً به رنگ آبی روشن آن کمک می‌کند. سرعت باد در



شکل ۶-۲: تصویر نپتون و ابرهای روشن و تیره در جو آن؛ و قمر نپتون، تریتون. تصاویر به وسیلهٔ ویجر ۲ در سال ۱۹۸۹ گرفته شد.

جو آن می‌تواند به  $2000 \text{ km/h}$  برسد، یعنی بالاترین سرعت در تمام سیاره‌ها، وقتی ویجر ۲ در سال ۱۹۸۹ از کنار نپتون عبور می‌کرد، لکهٔ سیاه بزرگی را مشاهده نمود (شکل ۶-۲) که با لکهٔ سرخ بزرگ مشتری قابل مقایسه بود. ضمناً دمای قلهٔ ابرها را  $218^\circ \text{C}$  - اندازه گرفت. شبانه‌روز آن تقریباً  $16/11$  ساعت طول می‌کشد و محور آن به اندازهٔ زمین کج است.

نپتون و اورانوس را اغلب به عنوان غول‌های یخی می‌شناسند، چراکه هم نسبت به مشتری و زحل کوچک‌ترند و هم درصد یخ بیشتری در آن‌ها یافت می‌شود. هستهٔ نپتون، با جرمی معادل زمین، از یخ و صخره به وجود آمده است. گواشته، با جرمی حدود ۱۲ برابر زمین، از آب، آمونیاک و متان ساخته شده است. جو آن را ابرهای مرتفع فرا گرفته که بر سطح آبی‌رنگ آن سایه می‌افکند. مانند اورانوس، نپتون هم سامانه‌ای حلقوی دارد. حلقه‌های متمایل به قرمز، احتمالاً از ذرات یخ، که با سیلیکات یا موادی با پایهٔ کربن پوشیده شده است، ساخته شده‌اند. به ترتیب از مرکز نپتون، حلقهٔ پهن و کم‌رنگ گاله<sup>۲۵</sup> در فاصلهٔ  $42,000 \text{ km}$ ، حلقهٔ لوریه در فاصلهٔ  $53,000 \text{ km}$  و حلقهٔ باریک آدامز در فاصلهٔ  $63,000 \text{ km}$  قرار دارند. در بین ۱۳ قمر نپتون، بزرگ‌ترین و تنها قمری که به اندازهٔ کافی جرم دارد تا کروی شود، تریتون<sup>۲۶</sup> است، که برخلاف سایر قمرهای بزرگ سیارات، مداری پس‌رونده<sup>۲۷</sup> دارد. این موضوع بر این دلالت می‌کند که تریتون از کمر بند کویپر به اسارت درآمده است. کمر بند کویپر ناحیه‌ای است شامل تعداد فراوانی اجرام کوچک در آن طرف مدار

نپتون. این قمر همواره یک سمت خود را به نپتون نشان می‌دهد و به تدریج در حال کم کردن ارتفاع است، به طوری که عاقبت بر اثر گرانش متلاشی شده، سامانه حلقوی نپتون را گسترده‌تر خواهد کرد. تریتون شامل یک پوسته از نیتروژن منجمد است که بر یک گوشته یخی قرار دارد. اعتقاد بر این است که گوشته بر یک هسته محکم از سنگ و آهن واقع شده است. سطح تریتون نسبتاً جوان می‌باشد. بخشی از پوسته را آیفشان‌هایی فرا گرفته است که عقیده بر آن است نیتروژن فوران می‌کند (شکل ۶-۲).

### ویجر همچنان در سفر

پس از پایان مأموریت سیاره‌ای، ویجر ۲ همچنان در حال دور شدن از خورشید است و حالا در فاصله ۱۳/۶ میلیارد کیلومتری قرار دارد - بیش از دو برابر فاصله خورشید تا پلوتون، اما هنوز درون محدوده مدار سیاره کوتوله اریس. راستای حرکت آن به سمت ستاره مشخصی نیست، اما باید بعد از حدود ۲۹۶,۰۰۰ سال از کنار ستاره شعرای یمانی (شباهنگ) که هم‌اکنون ۸/۴ سال نوری از خورشید فاصله دارد، بگذرد. امید است بتوان سیگنال‌های رادیویی آن را (که حالا خیلی ضعیف است) تا دست کم سال ۲۰۲۵ دریافت کرد - یک مأموریت فضایی که تا آن موقع، ۴۸ سال پس از پرتاب طول کشیده است!

### ۶-۸ مأموریت گالیله به سمت مشتری

فضایپیمای گالیله در سال ۱۹۸۹ پرتاب شد، و پس از عبور از کنار زمین و زهره و انجام مانور کمک گرانشی، در ۷ دسامبر سال ۱۹۹۵ به مشتری رسید. از جمله دستاوردهای گالیله اینکه، برای اولین بار از نزدیکی سیارک‌ها عبور کرد (گاسپرا و آیدا<sup>۲۸</sup>) و نخستین قمر سیارکی را کشف کرد (قمر آیدا، داکتیل<sup>۲۹</sup>). همچنین کاوشگری را به جو مشتری فرستاد. در مسیر خود توانست از برخورد تکه‌های دنباله‌دار شومیکر-لوی ۹ به جو مشتری تصویربرداری کند - این برخورد، از دید زمین، در آن طرف لبه مرئی مشتری رخ داد. به دلیل فاصله‌اش از خورشید، صفحات خورشیدی کارایی نداشتند، لذا الکتریسیته لازم به وسیله دو مولد گرماالکتریکی رادیوایزوتوپی تأمین می‌شد. این مولدها از طریق واپاشی پرتوزای پلوتونیوم ۲۳۸ انرژی فضایپیمای را فراهم می‌آوردند. (پیش از پرتاب، گروه‌های زدهسته‌ای، با نگرانی از آنچه آن را «خطر غیرقابل قبول پلوتونیوم برای سلامت جامعه در صورت

سقوط فضاپیما» می‌نامیدند، به دنبال توقیف قضایی برای ممانعت از پرتاب گالیله بودند.)  
 گالیله، پس از رسیدن به مشتری و برای مأموریت اصلی دوساله خود، گردش در بیضی‌های کشیده را به دور مشتری آغاز کرد. بدین ترتیب توانست از بخش‌های مختلف مغناطیس‌سپهر پهن‌اور مشتری نمونه‌گیری کند. مدارهای کشیده، همچنین، این امکان را برای گالیله فراهم آورد که از نزدیک بزرگ‌ترین قمرهای گالیله‌ای مشتری عبور کند. پس از تکمیل موفقیت‌آمیز مأموریت اصلی، فضاپیما چندین بار از فاصله بسیار نزدیک دو قمر آیو و اروپا گذشت.

در ژوئیه ۱۹۹۵، پنج ماه پیش از رسیدن به مشتری، گالیله کاوشگری را رها کرد تا به جو مشتری وارد شود. این کاوشگر، نزدیک به یک ساعت به جمع‌آوری اطلاعات پرداخت و در این مدت ۱۵۰ کیلومتر در جو مشتری پایین رفت، تا اینکه فشار به ۲۳ برابر فشار زمین رسید و دما تا  $153^{\circ}\text{C}$  بالا رفت. کاوشگر دریافت که جوی که از میان آن عبور کرده است، متلاطم‌تر و داغ‌تر از حد انتظار بود.

در حین مأموریت، گالیله اقدام به انجام آزمایش‌هایی کرد که مستقیماً به مطالعات سیاره‌ای او ارتباطی نداشت. هنگام عبور از کنار زمین در دومین مانور کمک گرانشی، امکان ارتباط با ماهواره‌ها را با استفاده از پالس‌هایی از لیزرهای نوری پر قدرت مورد آزمایش قرار داد. آزمایش کاملاً موفقیت‌آمیز بود، و من اطمینان دارم که امروزه تعدادی از ماهواره‌های نظامی از این شیوه استفاده می‌کنند تا به سرعت، و به روشی که استراق سمع از آن بسیار مشکل است، اطلاعات خود را به زمین ارسال کنند. کارل ساگان<sup>۳۰</sup> دست به ابداع یک سری آزمایش زد تا ببیند آیا گالیله می‌تواند نشانه‌های حیات ساده یا پیشرفته را در اینجا روی زمین شناسایی کند، و بدین ترتیب بفهمیم چگونه می‌توان حیات را روی دیگر سیارات شناسایی کرد. او، برای مثال، متوجه جذب بسیار قوی نور قرمز بر روی قاره‌ها شد که ناشی از سبزینه در گیاهان در حال فتوسنتز بود، و همچنین سیگنال‌های رادیویی در باند باریک که تنها از یک حیات هوشمند سرچشمه می‌گیرد.

در نهایت، زمانی که مولد پلوتونیومی نتوانست انرژی لازم را تأمین کند، گالیله به طور عمد فرمان سقوط به مشتری را دریافت کرد تا هرگونه احتمال برخورد آتی به اروپا که ممکن بود به آلودگی این قمر یخی بینجامد، از بین برود. پس از ۱۴ سال در فضا بودن و ۸ سال پیمایش و نقشه‌برداری از مشتری و قمرهای آن، بالاخره گالیله در ۲۱ سپتامبر ۲۰۰۳ با سرعت حدود  $48\text{ km/s}$



شکل ۳-۶: تصویر مشتری، لکه سرخ بزرگ و قمرهای آیو (پایین چپ) و گانیمد (بالا راست). در زمان گرفتن این عکس، کمربند استوایی جنوبی (South Equatorial Belt) ناپدید شده بود.

به درون جو مشتری شیرجه زد، و بدین ترتیب یکی از موفق‌ترین مأموریت‌های ناسا پایان پذیرفت (شکل ۳-۶).

## ۹-۶ آنچه امروزه درباره مشتری و قمرهایش می‌دانیم

همراه با زحل، اورانوس و نپتون، مشتری **Error! Bookmark not defined.** یکی از غول‌های گازی در منظومه شمسی است و جرم آن به‌تنهایی از  $2/5$  برابر جرم مجموع سیاره‌های دیگر بیشتر می‌باشد. جرم داخلی آن را عمدتاً هیدروژن (حدود ۷۱٪) و هلیوم (۲۴٪) تشکیل می‌دهد و حدود ۵٪ باقی‌مانده به عناصر سنگین‌تر اختصاص دارد. از این رو ترکیبات آن شباهت نزدیکی به سحابی خورشیدی‌ای دارد که از آن ساخته شد. جالب است بدانید اگر مشتری جرم بیشتری داشت، قطر آن عملاً کاهش می‌یافت، بنابراین حجم آن تقریباً حداکثر حجمی است که یک سیاره با این ترکیبات می‌تواند داشته باشد.

عقیده بر این است که مشتری از یک هسته چگال تشکیل شده که روی آن رالایه‌ای از هیدروژن فلزی<sup>۳۱</sup> پوشانیده است و پس‌از آن، لایه بیرونی با ضخامت حدود ۱۰۰۰ km قرار دارد.



قسمت عمده لایه بیرونی از هیدروژن مولکولی است. لایه‌ای ابر به ضخامت تقریبی ۵۰ km دائماً مشتری را پوشانده است. ابرها از بلور آمونیاک ساخته شده‌اند که به صورت نوارهایی به موازات استوا، در عرض‌های مختلف جغرافیایی چیده شده‌اند. نوارهای با رنگ روشن را ناحیه<sup>۳۲</sup>، و نوارهای تیره‌رنگ را کمر بند<sup>۳۳</sup> می‌نامند. رنگ‌های قهوه‌ای و نارنجی که در ابرهای مشتری دیده می‌شود ناشی از ترکیبات فسفر و گوگرد است که در معرض اشعه فرابنفش خورشید قرار گرفته است. در برخی عرض‌های جغرافیایی، ابرهای مرتفع آمونیاک بلوری، ابرهای تیره‌تری را که در ارتفاع پایین‌تر جو تشکیل شده‌اند - همان ابرهای قهوه‌ای و نارنجی - می‌پوشانند، و بدین ترتیب نواحی رنگ پریده را در بین کمر بندها ایجاد می‌کنند.

### لکه سرخ بزرگ

بادهایی که سرعتشان تا ۱۰۰ m/s می‌رسد در جو مشتری متداول است. الگوهای دورانی مخالف که قسمتی به علت سرعت بالای چرخش مشتری ایجاد می‌شود، موجب طوفان و آشوب در جو می‌گردد. شکل و رنگ نواحی و کمر بندها از سالی به سال دیگر تغییر می‌کند، اما الگوی کلی ثابت می‌ماند. بدون شک معروف‌ترین علامت ویژه جو مشتری، لکه سرخ بزرگ<sup>۳۴</sup> است؛ یک طوفان دائمی و اچرخندی<sup>۳۵</sup> که بزرگ‌تر از دو برابر قطر زمین می‌باشد و دست کم از سال ۱۸۳۱ مشاهده شده است. جهت چرخش آن، با دوره تناوب ۶ روزه، پادساعت گرد است. تصور بر این است که پایدار باشد، و از این رو به یک مشخصه دائمی، یا دست کم طولانی مدت، در جو مشتری تبدیل شده است. البته در مکان ثابتی قرار ندارد و علیرغم ماندن در عرض جغرافیایی ۲۲° جنوبی، از زمان اولین رصد تاکنون چندین بار سیاره را دور زده است. پدیده‌هایی مشابه، اما کوچک‌تر، نیز رایج می‌باشد: بیضی‌هایی سفید از ابرهای سرد در بالای جو، و بیضی‌های گرم‌تر قهوه‌ای در قسمت‌های پایین‌تر. این طوفان‌های کوچک گاهی باهم یکی شده، طوفان‌های بزرگ‌تری را شکل می‌دهند؛ مانند آنچه در سال ۲۰۰۰ رخ داد و سه بیضی گون سفید، که اولین بار در ۱۹۳۸ مشاهده شده بودند، باهم ادغام و یکی شدند. سال‌های بعد، رنگ آن به قرمز گرایید و از این رو لکه سرخ کوچک<sup>۳۶</sup> نام گرفته است.

### حلقه‌های مشتری



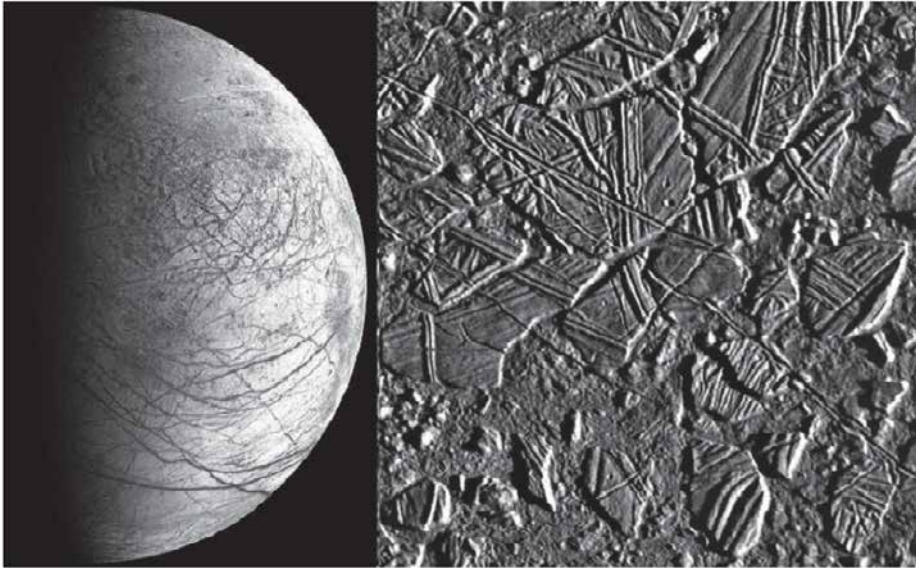
شکل ۶-۴: قمرهای گالیله‌ای مشتری.

مشتری یک سامانه بسیار کم‌نور از حلقه‌های سیاره‌ای دارد که از سه قسمت تشکیل شده است: هاله درونی، حلقه روشن تراصلی و حلقه «لعاب‌عنکبوتی»<sup>۳۷</sup> بیرونی که دو جزء متمایز دارد. به نظر می‌رسد حلقه‌ها از غبار درست شده باشند، و حلقه اصلی احتمالاً از موادی که از دو قمر ادراستیا و متیس<sup>۳۸</sup> و بر اثر برخورد شهاب سنگ بیرون ریخته به وجود آمده است. کشش قوی جاذبه مشتری، مواد را از برگشت به سطح قمرها باز می‌دارد و آن‌ها به تدریج به سمت مشتری حرکت می‌کنند. تصور می‌شود که دو جزء حلقه لعاب‌عنکبوتی به شکلی مشابه و از قمرهای تیه و آمالتیا<sup>۳۹</sup> به وجود آمده‌اند.

### قمرهای گالیله‌ای مشتری

حتی یک تلسکوپ بسیار کوچک هم می‌تواند چهار قمر بزرگ مشتری را به دور آن شناسایی کند (شکل ۶-۴). این قمرها به ترتیب فاصله از مشتری، آیو، اروپا، گانیمد و کالیستو<sup>۴۰</sup> نام دارند. اندازه آن‌ها قابل مقایسه با ماه است. کشف آن‌ها در سال ۱۶۱۰ به وسیله گالیله به وی نشان داد که تمام اجسام منظومه شمسی به دور خورشید نمی‌گردند، و این گواه دیگری بر مدل کپرنیکی منظومه شمسی بود.

رسدهای سال ۱۶۷۶ توسط ستاره‌شناس دانمارکی کریستین رومر<sup>۴۱</sup>، پیرامون زمان گرفت آن‌ها وقتی که از پشت مشتری عبور می‌کردند، به اولین تعیین سرعت نور انجامید. هر گرفت آیو در ۴۲/۵ ساعت، یعنی دوره تناوب آن، یک بار رخ می‌دهد<sup>۴۲</sup>، و بدین ترتیب یک ساعت کیهانی می‌سازد. رومر مجموع زمان ۴۰ بار گردش آیو را در دو موقعیت مختلف زمین نسبت به مشتری



شکل ۶-۵: سطح اروپا ترک‌هایی را نشان می‌دهد که بر اثر خمیدگی کشندی (tidal flexure) و کوه یخ شناور (iceberg) به وجود آمده‌اند.

اندازه‌گیری کرد و متوجه شد که در حین نزدیک شدن زمین به مشتری، ۴۰ بار گردش آیو، در مجموع، ۲۲ دقیقه کمتر از زمانی که زمین در حال دور شدن از مشتری است، یعنی شش ماه بعد، طول می‌کشد. این تغییر در دوره تناوب بر اثر پدیده دوپلر رخ می‌دهد، از این رو او توانست نسبت سرعت نور را به سرعت مداری زمین به دور خورشید حساب کند. او این نسبت را حدود ۹۳۰۰ به دست آورد. با توجه به این که سرعت مداری زمین حدود  $30 \text{ km/s}$  است، سرعت نور برای اولین بار  $279,000 \text{ km/s}$  محاسبه شد. (این کار عملاً توسط هویگنس و بر اساس رصدهای رومر صورت پذیرفت.)

دو قمر نزدیک به مشتری، آیو و اروپا، بسیار مورد علاقه هستند. آیو چهارمین قمر بزرگ منظومه شمسی، با قطر  $3,642 \text{ km}$  است. در سال ۱۹۷۹، زمانی که تصاویر بسیار دقیق آیو از فضاپیمای ویجر به زمین رسید، ستاره‌شناسان بسیار شگفت‌زده شدند. آنان سطح آیو را، با بیش از ۴۰۰ آتش‌فشان، آبله‌گون یافتند. به زودی مشخص شد که نیروهای عظیم کشندی، ناشی از فاصله کم آیو با مشتری، داخل آن را کوبیده و له کرده است. بر اثر گرمای تولیدشده، قسمت‌های داخلی آیو

به صورت مذاب درآمده است. در نتیجه، برخلاف دیگر قمرهای خارجی منظومه شمسی که پوشیده از یخ هستند، آیو پوسته‌ای از سیلیکات صخره‌ای دارد که بر هسته‌ای مذاب از آهن یا سولفید آهن قرار گرفته است. قسمت اعظم سطح آیورا دشت‌هایی تشکیل می‌دهد که از ترکیبات قرمز و نارنجی گوگرد، و شبنمی یخ‌زده از دی‌اکسید گوگرد سفید و درخشان، پوشیده شده است. بر روی دشت‌ها بیش از صد قله دیده می‌شود، برخی از اورست بلندتر؛ یک جهان بسیار غریب!

در مقابل، اروپا، ششمین قمر بزرگ منظومه شمسی با قطر اندکی بیش از ۳۰۰۰ km، پوسته‌ای یخی دارد. زیر پوسته، صخره‌ای سیلیکاتی است، که احتمالاً بر هسته‌ای آهنی قرار دارد. سطح یخی آن (شکل ۶-۵) یکی از صاف‌ترین سطوح در منظومه شمسی است. تصاویر نزدیک، ترک‌هایی را در یخ نشان می‌دهد؛ گویا که قسمت‌هایی از سطح از هم جدا می‌شوند، سپس با یخ تازه پر می‌گردند. این نشان می‌دهد که پوسته بر روی اقیانوسی مایع شناور است؛ اقیانوسی که با گرمای نیروی کشندی، به دلیل نزدیکی آن به مشتری، گرم می‌شود. با این شرایط، برخی امکان حیات بر اروپا را متصور می‌دانند. پیشنهادهای بلندپروازانه‌ای نیز برای فرود فضاپیما و حفر یخ داده شده است تا مشخص شود آیا شکلی از حیات در آنجا وجود دارد یا خیر.

در دسامبر ۲۰۱۳، ناسا گزارش کرد که تصاویر گرفته‌شده به وسیله تلسکوپ فضایی هابل بر وجود هیدروژن و اکسیژن بالای نیم‌کره جنوبی این قمر اشاره دارد. مشاهدات با ستونی از بخار آب به ارتفاع ۲۰۰ کیلومتر سازگار است. اگر بتوان این را ثابت کرد، ممکن است بدون نیاز به حفر یخ، امکان شناسایی مولکول‌های آلی یا حتی شواهدی مبنی بر حیات وجود داشته باشد. مأموریت «جویس»<sup>۴۳</sup> متعلق به آژانس فضایی اروپا، ایسا<sup>۴۴</sup>، که قرار است در سال ۲۰۲۲ پرتاب شود، در دهه ۲۰۳۰ دو بار از نزدیکی این قمر عبور خواهد کرد، و حتی اگر ستونی در نزدیکی استوای اروپا وجود داشته باشد، ممکن است بتواند از میان آن پرواز کند. ناسا چند طرح مقدماتی را برای یک مأموریت به اروپا، موسوم به اروپا کلیپر، آماده کرده است. این مأموریت، یک سال یا بیشتر در مجاورت این قمر مرموز خواهد بود.

## ۶-۱۰ مأموریت کاسینی به زحل

فضاپیمای کاسینی - هویگنس یک مأموریت مشترک ناسا، ایسا (آژانس فضایی اروپا) و انجمن

نجوم هند<sup>۴۵</sup> است. این فضاپیما در سال ۱۹۹۷ به فضا پرتاب شد و همچنان در حال مطالعهٔ زحل و قمرهای آن می‌باشد. فضاپیما از دو قسمت اصلی ساخته شده بود: مدارگرد کاسینی ناسا و کاوشگر هویگنس ایسا، که قرار بود بر سطح بزرگ‌ترین قمر زحل، تیتان، فرود آید. کاسینی-هویگنس در اول ژوئیه ۲۰۰۴ وارد مدار به دور زحل شد، و در ۲۵ دسامبر همان سال، کاوشگر هویگنس را به سمت تیتان پرتاب کرد. هویگنس، که در ۱۴ ژانویه ۲۰۰۵ به تیتان رسید، با عبور از میان جو، بر سطح آن نشست. این نخستین فرود در منظومه شمسی بیرونی<sup>۴۶</sup> بود.

در مسیر خود به سوی زحل، کاسینی از نزدیکی مشتری عبور کرد و مفصل‌ترین تصویر رنگی (تا آن زمان) را از مشتری تهیه کرد - عوارضی با وسعت تنها ۶۴ کیلومتر را نشان می‌داد. رصدهای کاسینی از نوری که به وسیلهٔ ذرات موجود در حلقه‌های مشتری پراکنده می‌شد نشان داد که ذرات دارای شکل نامنظم هستند، و به احتمال زیاد از موادی سرچشمه می‌گیرند که بر اثر برخورد شهاب سنگ‌های کوچک به قمرهای مشتری، متیس و ادراستیا، رها شده‌اند.

### آزمایش نظریهٔ نسبیت عام اینشتین

در مسیر مشتری، کاسینی از پشت خورشید عبور می‌کرد، لذا فرصتی برای آزمایش نظریهٔ نسبیت عام اینشتین فراهم شد. به دلیل انحنای فضا در مجاورت خورشید، سیگنال‌های رادیویی که از کاسینی به ما می‌رسیدند، به ناچار در امتداد مسیر طولانی‌تری حرکت می‌کردند (در مقایسه با وضعیتی که خورشید وجود نداشت). این باعث تأخیری حدود ۲۰۰ میکروثانیه در زمان دریافت سیگنال‌ها می‌شود (موسوم به تأخیر شاپیرو<sup>۴۷</sup>). این تأخیر با دقت یک در ۵۰,۰۰۰ با پیش‌بینی نظریهٔ اینشتین موافق بود - یکی از بهترین آزمایش‌های این نظریه تا امروز.

### رسیدن به زحل

پس از یک سفر هفت‌ساله، در اول ژوئیه ۲۰۰۴، فضاپیما از میان شکاف بین حلقهٔ F و G عبور کرد، و با گذر از فاصلهٔ ۳۳,۶۰۰ کیلومتری از قلهٔ ابرهای زحل، وارد مدار شد. تنها یک روز بعد، اولین گذرش را (هرچند دور) از کنار بزرگ‌ترین قمر زحل، تیتان، انجام داد. تصاویر، ابرهای متان بالای قطب جنوب و عوارض سطحی بسیاری را نشان می‌داد. مطالعات راداری تیتان که در اکتبر ۲۰۰۴ انجام گرفت سطح نسبتاً صافی را نشان می‌داد که ارتفاع عوارض آن حداکثر به ۵۴ متر می‌رسید.

شاید چندان تعجب آور نکنید، اما کاسینی چند قمر دیگر را گرداگرد زحل کشف کرده است - با نام‌هایی همچون متون، پالی‌نی، پلی دیوس، دانیس و آنگائون<sup>۴۸</sup>. در ۱۱ ژوئن ۲۰۰۴، کاسینی از کنار قمر فیبی<sup>۴۹</sup> عبور کرد. از تصاویر نزدیک و خیلی روشن چنین برمی‌آید که مقادیر زیادی یخ آب درست زیر سطح آن وجود دارد.

مأموریت اصلی کاسینی در ۳۰ ژوئیه ۲۰۰۸ به پایان رسید، اما با توجه به وضعیت عالی مدارگرد، مأموریت تا پایان ژوئن ۲۰۱۰ تمدید شد، و سپس در فوریه ۲۰۱۰ بار دیگر تا ۲۰۱۷ - زمان انقلاب تابستانی در نیم کره شمالی زحل - تمدید گردید.

## ۶-۱۱ آنچه درباره زحل و قمرهایش می دانیم

گالیله اولین کسی بود که با تلسکوپ خود در سال ۱۶۱۰ زحل را رصد کرد و کمی هم بهت زده شد. او سیاره را این گونه توصیف نمود: «گوش دارد و از سه جسم کنار هم با زاویه‌ای ثابت، که وسطی حدود سه برابر دوتای دیگر است، تشکیل شده است.» او وقتی بیشتر حیرت زده شد که دو سال بعد ملاحظه نمود دو جسم خارجی محو شده‌اند. او با تعجب از خود پرسید: «آیا زحل بچه‌هایش را بلعیده است؟» و زمانی که در سال ۱۶۱۳ دوباره ظاهر شدند بیشتر مبهوت گشت. در سال ۱۶۵۵، کریستین هویگنس<sup>۵۰</sup> با تلسکوپ بسیار بهتر به رصد زحل پرداخت و اظهار داشت که زحل با یک سامانه حلقوی احاطه شده است. او نوشت: «زحل با یک حلقه نازک و مسطح، بدون تماس در هیچ نقطه‌ای، احاطه شده است، و نسبت به دایره البروج مایل است.»

با بهبود تلسکوپ‌ها، جزئیات بیشتری دیده می‌شد. در سال ۱۶۷۵، جووانی کاسینی<sup>۵۱</sup> مشاهده کرد که سامانه حلقوی از تعدادی حلقه کوچک‌تر که با شکاف‌هایی از هم جدا شده‌اند، تشکیل شده است. بزرگ‌ترین این شکاف‌ها به شکاف کاسینی شناخته می‌شود<sup>۵۲</sup>. در اواسط قرن نوزدهم، جیمز ماکسول<sup>۵۳</sup> نشان داد که حلقه‌های یکپارچه و جامد نمی‌توانستند پایدار باشند و از هم می‌پاشند. پس سامانه حلقوی باید از تعداد بی‌شماری ذره، که به صورت جداگانه دور زحل گردش می‌کنند، ساخته شده باشد. این مطلب ضمناً می‌فهماند که سرعت گردش دایره مختلف حلقه‌ها یکسان نبود. در سال ۱۸۹۵، جیمز کیلر از رصدخانه لیک<sup>۵۴</sup>، با مطالعه طیف‌نگاری سامانه حلقوی، این موضوع را ثابت کرد.



شکل ۶-۶: زحل و حلقه‌هایش. نقطه کوچک درست بعد از حلقه‌های روشن در سمت چپ، زمین است.

بی‌شک زحل به دلیل حلقه‌هایش زیباترین جسمی است که در منظومه شمسی می‌توان با یک تلسکوپ کوچک دید. کلید سردرگمی گالیله در توضیح هویگنس نهفته است: سامانه حلقوی، به دلیل کجی محور زحل، نسبت به دایره البروج مایل است. تصور کنید که قطب شمال زحل در نقطه‌ای از مدارش به سمت خورشید کج شده باشد. ما، روی زمین نزدیک به خورشید، بیشتر نیم‌کره شمالی و حلقه‌ها را در بازترین حالت خود خواهیم دید. درست کمتر از ۱۵ سال بعد زحل در نقطه مقابل مدار خود قرار دارد، درحالی که حالا قطب جنوب آن به سمت خورشید کج شده است. بدین ترتیب نیم‌کره جنوبی را بهتر می‌بینیم و حلقه‌ها نیز کاملاً گسترده هستند. در بین راه، وسط این دو حد، حلقه‌ها را درحالی که لبه آن‌ها به سمت ما است می‌بینیم و درست همان‌گونه که گالیله مشاهده کرد، به نظر می‌رسد که حلقه‌ها ناپدید شده‌اند. بنابراین زمین، در هر دور گردش زحل، دو بار در صفحه حلقه‌های آن قرار می‌گیرد؛ تقریباً هر ۱۵ سال یک‌بار.

تعجب‌آور نیست که حلقه‌ها ظاهراً ناپدید می‌شوند، زیرا تصور بر این است که ضخامت آن‌ها کمتر از ۱ km باشد. اندازه ذرات تشکیل‌دهنده حلقه‌ها متفاوت است؛ از غبار گرفته تا قطعاتی به قطر چند متر که عمدتاً از یخ آب (حدود ۹۳٪) همراه با کربن غیر بلوری (حدود ۷٪) درست شده‌اند. از زمین سه حلقه قابل مشاهده است که از ارتفاع ۶۶۳۰ km تا ۱۲۰,۷۰۰ km بالای استوای زحل کشیده شده‌اند. حلقه بیرونی، حلقه A، شکافی قابل توجه بنام شکاف انکه<sup>۵۵</sup> دارد (البته خود انکه هرگز این شکاف را مشاهده نکرد)؛ درحالی که شکاف کاسینی حلقه A را از حلقه میانی B، یا حلقه روشن، جدا می‌کند. درون حلقه B حلقه کم‌نورتر C، یا حلقه کِرپ<sup>۵۶</sup>، قرار دارد.

دو حلقه دیگر نیز اخیراً کشف شده است؛ درون حلقه C یک حلقه بسیار کم نور D به چشم می خورد و بیرون حلقه A یک حلقه نازک F.

درباره مبدأ تشکیل حلقه‌ها (شکل ۶-۶) دو نظریه وجود دارد:

(۱) یکی از قمرها به داخل حد روش<sup>۵۷</sup> سیاره وارد شده، نیروهای کشندی سیاره آن را خرد کرده است. (وقتی که جسمی کوچک به جسمی پرجرم نزدیک می شود، اثر نیروی جاذبه به سمت نزدیک تر آن بیشتر از سمت دورتر است. بدین ترتیب یک نیروی تفاضلی در امتداد جسم وارد می شود که میل دارد آن را متلاشی کند. حد روش فاصله ای از سیاره است که در آن، این نیرو، یک جسم کوچک نوعی را خرد می کند.)

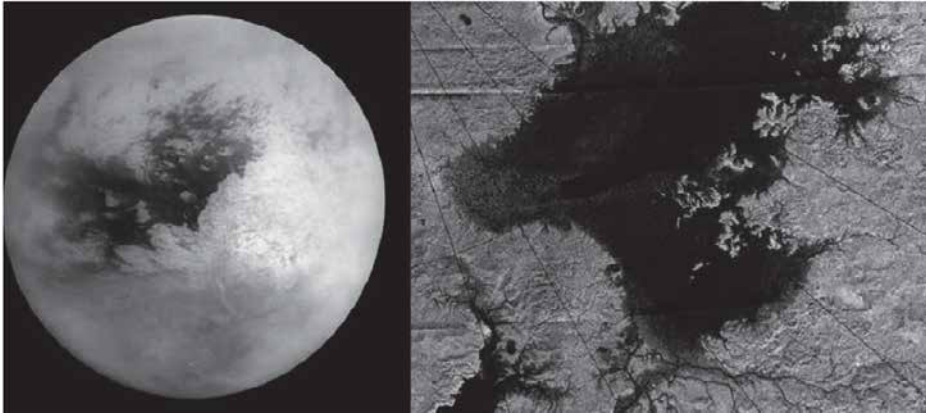
(۲) یکی از قمرها به وسیله دنباله داری بزرگ یا یک سیارک مورد اصابت قرار گرفته و همان نتیجه حاصل شده است.

ساختاری را که در حلقه‌ها می بینیم ناشی از اثر تجمعی<sup>۵۸</sup> کشش گرانشی مربوط به قمرهای فراوان زحل است. چنانچه دوره تناوب یکی از قمرها مضرب ساده‌ای از دوره تناوب ذراتی باشد که در فاصله معینی (نزدیک تر) از مرکز زحل قرار دارند، یک تشدید<sup>۵۹</sup> رخ می دهد که آن قسمت از سامانه حلقوی را از ذرات پاک می کند. به همین ترتیب قمر میماس<sup>۶۰</sup> شکاف کاسینی را از ذرات پاک می نماید.

## تیتان

تیتان بزرگ ترین قمر زحل و تنها قمر منظومه شمسی است که به داشتن جوّی چگال معروف است. همچنین به غیر از زمین، تنها جسمی است که در سطح آن شواهدی از وجود مایع به دست آمده است. این مایع به شکل دریاچه‌هایی از هیدروکربن در نواحی قطبی است. حدود ۵۰٪ بزرگ تر و ۸۰٪ پرجرم تر از ماه است، بعد از قمر گانیمید مشتری، از لحاظ اندازه در رتبه دوم قرار دارد و از عطارد بزرگ تر (و نه پرجرم تر) است. مانند ماه به صورت کشندی قفل شده است و همواره یک سمت خود را به زحل نشان می دهد. تیتان پوسته‌ای نسبتاً صاف، متشکل از یخ آب دارد. در زیر این لایه، قسمت درونی است که از صخره ساخته شده است. جوّی نسبتاً چگال، عمدتاً از نیتروژن (حدود ۹۸٪)، آن را احاطه کرده، فشار سطح آن بیش از یک و نیم برابر زمین است. درون جو،





شکل ۶-۷: تصویر تیتان و یک دریاچه متان بر سطح آن از دید فضاپیمای کاسینی.

ابرهایی از متان و اتان، و همچنین مه رقیق نارنجی‌رنگی وجود دارد. نور فرابنفش خورشید باعث شکستن متان موجود در جو به مولکول‌های آلی می‌شود و این مه را به وجود می‌آورد. منبع این متان تا حدی مرموز است، چراکه نور فرابنفش خورشید باید متان را در مدت ۵۰ میلیون سال از جو بزداید. رصد‌های انجام‌گرفته، ابتدا توسط تلسکوپ فضایی هابل و سپس فضاپیمای کاسینی (در نور فروسرخ جهت نفوذ در مه)، نشان می‌دهد که نوارهای پهنی از عوارض تیره و روشن بر سطح تیتان وجود دارد. بزرگ‌ترین عارضه روشن، زانِدو<sup>۶</sup> نام دارد با وسعتی حدود استرالیا.

### کاوشگر هویگنس

در ۲۵ دسامبر ۲۰۰۴، کاوشگر هویگنس از مدارگرد کاسینی که آن را تا زحل حمل کرده بود، جدا شد و با کمک چتر در جو آن پایین رفت تا اینکه در ۱۴ ژانویه ۲۰۰۵ بر سطح تیتان نشست. تصاویر سطح که از ارتفاع حدود ۱۶ کیلومتری گرفته شده چیزهایی را نشان می‌داد که به نظر می‌رسد کانال‌های زهکش در زمین‌های مرتفع با رنگ روشن هستند و به دشت‌ها یا دریا‌های تیره‌تر که در پایین قرار دارند ختم می‌شوند. از برخی عکس‌ها، حتی جزیره و خطوط ساحلی پوشیده از مه نیز برداشت می‌شد. هیچ نشانی از مایع در زمان فرود کشف نشد، اما علائم قوی دال بر وجود آن در گذشته نزدیک به دست آمد (شکل ۶-۷).

به محض فرود، یک نفوذسنج<sup>۶۲</sup> کندشوندگی<sup>۶۳</sup> آن را مورد مطالعه قرار داد. در ابتدا تصور می‌شد که سطح، پوسته‌ای سخت دارد که بر روی ماده‌ای چسبنده قرار گرفته است. یک دانشمند رنگ و ترکیب سطح را با «خامه سوخته» مقایسه نمود و دیگری با پا نهادن بر سرگین گاو! شاید هم کاوشگر بر تکه سنگ کوچکی نشسته، سپس جابجا شده بود. در حقیقت ممکن است سطح، ماسه‌زاری از دانه‌های یخ باشد که دشتی صاف و پوشیده از تکه‌های یخ آب را تشکیل داده است.

### دریاچه‌های تیتان

اطلاعاتی که از ویجر ۱ و ۲ به دست آمد نشان داد که تیتان دارای یک جو غلیظ بوده، ترکیبات و دمای آن تقریباً به صورتی است که می‌تواند از دریاچه‌های هیدروکربن‌های مایع (اتان یا متان) بر روی سطح پشته‌بانی کند. در حین گذر از کنار تیتان در ۲۲ ژوئیه ۲۰۰۶، رادار فضایی کاسینی از عرض‌های شمالی تصویربرداری کرد، و تعدادی مناطق پهناور و صاف (شکل ۶-۷) به صورت نقاطی بر سطح نزدیک به قطب دیده شد. گروه کاسینی-هویگنس به این نتیجه رسید که عوارضی که دیده می‌شد، تقریباً به طور یقین دریاچه‌های هیدروکربنی هستند. بعضی از آن دریاچه‌ها در گودی قرار دارند و به نظر می‌رسد کانال‌هایی به آن‌ها ختم می‌شود. در ۸ ژوئیه ۲۰۰۹، زمانی که یک بازتاب منظم (آینه‌ای) در باند فرورسرخ از خط ساحلی دریاچه‌ای که به دریای کراکن<sup>۶۴</sup> معروف است دیده شد. داده‌های کاسینی اشاره به این داشت که تیتان در دریاچه‌های قطبی خود، گاز طبیعی و دیگر هیدروکربن‌های مایع را، به میزان صدها برابر منابع شناخته شده نفت و گاز طبیعی در زمین، جای داده است. حجم کلی این دریاچه‌ها حدود ۱۵ برابر حجم دریاچه میشیگان است. تلماسه‌های بیابانی در امتداد استوا، گرچه فاقد مایع آشکار هستند، بیش از تمام منابع زغال سنگ در زمین، مواد آلی دارند.

### انسلا دوس

انسلا دوس، که در سال ۱۷۹۸ به وسیله ویلیام هرشل کشف شد، ششمین قمر بزرگ زحل است. فضایی مایع ویجر نشان داد که سطح یخی انسلا دوس، تقریباً تمام نور خورشید را که به آن برخورد می‌کند، باز می‌تاباند. ویجر ۲ این نکته را آشکار ساخت که علی‌رغم اندازه کوچک، با قطر تنها ۴۹۶ km، این قمر دارای گستره وسیعی از عوارض است، از سطوح قدیمی با دهانه‌های بسیار، تا

مناطقى به جوانى ۱۰۰ میلیون سال.

در سال ۲۰۰۵، زمانى که کاسینی چندین بار از کنار انسلادوس گذشت، دودستونى غنى از آب را کشف کرد که از مناطق قطب جنوب آن بیرون می‌ریخت. این کشف، به همراه این واقعیت که دهانه‌های برخوردی بسیار کمی (اگر باشد) در این ناحیه وجود دارد، نشان داد که انسلادوس از لحاظ زمین‌شناسی فعال است. تقریباً به همان دلیل که قمر مشتری، آیو، فعالیت آتش‌فشانی دارد، به نظر می‌رسد نزدیکی انسلادوس به زحل به تولید گرمای کشندی درون آن می‌انجامد. از بررسی گاز خروجی چنین برمی‌آید که از یک منبع آب مایع زیرسطحی سرچشمه می‌گیرد. این موضوع به همراه ترکیبات شیمیایی جالبی که در ستون گاز یافت شده است، این گمانه را تقویت می‌کند که حتی ممکن است انسلادوس بتواند گونه‌های حیات ساده را پشتیبانی نماید. سوخت کاسینی بسیار کاهش یافته است و قرار است مأموریت آن در سال ۲۰۱۷ پایان یابد. برای این کار، کاوشگر را با یک شیرجه‌مخرب به درون جو زحل هدایت می‌کنند.

## ۶-۱۲ مأموریت «افق‌های نو» به پلوتون و قمرهایش

همان‌طور که در فصل ۵ گفتیم، پلوتون را کلاید تامبواز دو عکسی که در ژانویه ۱۹۳۰ گرفته بود کشف کرد، نام آن را ونتیا برنی، دختر ۱۱ ساله یکی از اساتید آکسفورد، یک روز بعد و هنگامی که از کشف پلوتون مطلع شد، پیشنهاد کرد. پلوتون نام خدای رومی عالم اموات بود که می‌توانست خود را ناپدید کند. با توجه به این که دو حرف اول پلوتون با حروف ابتدای پرسپوال لوئل، کسی که کشف در رصدخانه وی صورت گرفته بود، همخوانی داشت، این نام با استقبال مواجه شد.

در سال ۱۹۷۸، جیمز کریستی<sup>۶۵</sup> که در رصدخانه ناوال در واشینگتن کار می‌کرد، یک قمر پلوتون را که حالا کاژن نام دارد کشف کرد؛ و در سال ۲۰۰۵، تلسکوپ فضایی هابل دو قمر دیگر بنام نیکس و هایدرا را کشف نمود. رصدهای کاژن امکان تعیین جرم پلوتون را فراهم آورد - که بسیار کمتر از چیزی بود که در ابتدا تصور می‌شد و بی‌تردید اگر اخیراً کشف شده بود، هرگز عنوان سیاره را دریافت نمی‌کرد. با وجود این، از زمان کشف قسمتی از فرهنگ ما شده است و نویسنده کمی غمگین شد که در سال ۲۰۰۶ به یک سیاره کوتوله تنزل رتبه یافت.

نیوهورایزنز<sup>۶۶</sup> (افق‌های جدید) در ابتدا برای سفر به تنها سیاره بازمید نشده منظومه شمسی

برنامه‌ریزی شده بود<sup>۶۷</sup>. این فضاپیما در ۱۸ ژانویه سال ۲۰۰۶، زمین را برای یک سفر ۹ ساله به مقصد پلوتون و ماورای آن ترک کرد. بعد از بیش از ۴/۸ میلیارد کیلومتر پرواز، این فضاپیما حدود ژوئیه سال ۲۰۱۵ از کنار پلوتون و کارن خواهد گذشت؛ و سپس امید است در مأموریتی اضافه، دیداری از اجرام کمربند کویپر داشته باشد. «افق‌های جدید» در ۲۸ فوریه ۲۰۰۷ از کنار مشتری گذشت، و با استفاده از کشش جاذبه مشتری و مانور قلاب‌سنگ یا کمک گرانشی، سرعتش را به ۸۳,۰۰۰ km/h افزایش داد، و در حال گذر، عکس‌های فرسوخ از مشتری و قمرهایش گرفت. علاوه بر تجهیزات علمی، فضاپیما مقداری مصنوعات فرهنگی نیز به همراه دارد، که شامل پرچم آمریکا، سکه ربع دلاری فلوریدا و مقداری از خاکستر کلاید تامبو است.

## پانوشته‌ها

- 1 - Pioneer and Voyager
- 2 - Cassini and Huygens
- 3 - Cape Canaveral

۴ - برون‌شارش ذرات پرنانژی از خورشید.

۵ - ذرات بسیار پرنانژی ناشی از انفجارات ستاره‌ای درون کهکشان راه شیری که وارد منظومه شمسی می‌شوند.

- 6 - Aldebaran

۷ - این کمربندها ۴۰۰۰ بار قوی‌تر از کمربندهای زمین هستند.

۸ - Magnetosphere: ناحیه‌ای در اطراف زمین یا هر سیاره دیگر که ذرات باردار در آن به دام می‌افتند و رفتارشان تحت تأثیر میدان مغناطیسی سیاره قرار می‌گیرد. (ف)

- 9 - the Search for Extra-Terrestrial Intelligence (SETI)
- 10 - 300-metre Arecibo dish in Puerto Rico
- 11 - 76-metre Lovell Telescope at Jodrell Bank
- 12 - Gravity Assist
- 13 - Grand Tour
- 14 - planetary or gravitational slingshot

۱۵ - Heliopause؛ مرز بین کره نفوذ خورشید و فضای بین‌ستاره‌ای.

- 16 - Great Red Spot
- 17 - storms and eddies
- 18 - Europa
- 19 - Tidal Heating
- 20 - Adrastea, Metis and Thebe

۲۱ - Kuiper Airborne Observatory، مشهور به KAO، تأسیس ۱۹۷۵ میلادی، نام یک رصدخانه متعلق به ناسا. این رصدخانه بر روی یک فروند هواپیمای سی ۱۴۱ آ (C-141A) استارلیفتر سوار بود، یک تلسکوپ بازتابی کاسگرین ۹۲ سانتیمتری داشت که برای رصد آسمان در طیف ۱ تا ۵۰۰ میکرومتر طراحی شده بود. قابلیت پرواز این رصدخانه در ارتفاع ۱۴ کیلومتری به هر نقطه از زمین این مزیت را داشت که از لایه رطوبتی

جو زمین فراتر رفته و امواج مادون قرمز را از فضا دریافت کند. این رصدخانه در ۱۹۹۵ بازنشسته گردید و اکنون توسط تلسکوپ سوفیا جایگزین شده است. (مترجم)

- 22 - Occultation
- 23 - Dayglow
- 24 - terraced layers
- 25 - Galle
- 26 - Triton
- 27 - retrograde orbit
- 28 - Gaspria and Ida
- 29 - Dactyl
- 30 - Carl Sagan (1934-1996)

۳۱- هیدروژن فلزی هیدروژنی است بسیار فشرده، به گونه‌ای که الکترون‌ها می‌توانند به راحتی و شبیه به فلزات، در آن حرکت کنند.

- 32 - Zone
- 33 - Belt
- 34 - Great Red Spot

۳۵- Anticyclonic storm، طوفان ساعت‌گرد در نیم‌کره شمالی و پادساعت‌گرد در نیم‌کره جنوبی حول پرفشارها.

- 36 - Red Spot Junior
- 37 - Gossamer
- 38 - Adrastea and Metis
- 39 - Thebe and Amalthea
- 40 - Io, Europa, Ganymede and Callisto
- 41 - Christensen Rømer

۴۲- این دوره تناوب مربوط به حالتی است که زمین، مشتری و خورشید تقریباً در یک راستا هستند. در این نقطه مداری، برای چند روز، فاصله زمین از مشتری تقریباً ثابت می‌ماند. (مترجم)

- 43 - JUICE - JUpiter ICy moons Explorer
- 44 - European Space Agency (ESA)
- 45 - Astronomical Society of India

۴۶- نواحی بعد از مریخ در منظومه شمسی.

- 47 - Shapiro delay
- 48 - Methone, Pallene, Polydeuces, Daphnis and Aegaeon
- 49 - Phoebe
- 50 - Christiaan Huygens
- 51 - Giovanni Domenico Cassini
- 52 - Cassini Division
- 53 - James Clerk Maxwell
- 54- James Keeler of the Lick Observatory

۵۵- Encke gap؛ پیش از سال ۲۰۰۸ و تصویب IAU به Encke Division شناخته می‌شد. (مترجم)

- 56 - Crepe Ring
- 57 - Roche limit
- 58 - Cumulative Effect
- 59 - resonance
- 60 - Mimas
- 61 - Xanadu
- 62 - penetrometer

- 63 - Deceleration
- 64 - Kraken Mare
- 65 - James Christy
- 66 - New Horizons

۶۷ - در زمان پرتاب، پلوتون هنوز در گروه سیارات قرار داشت.

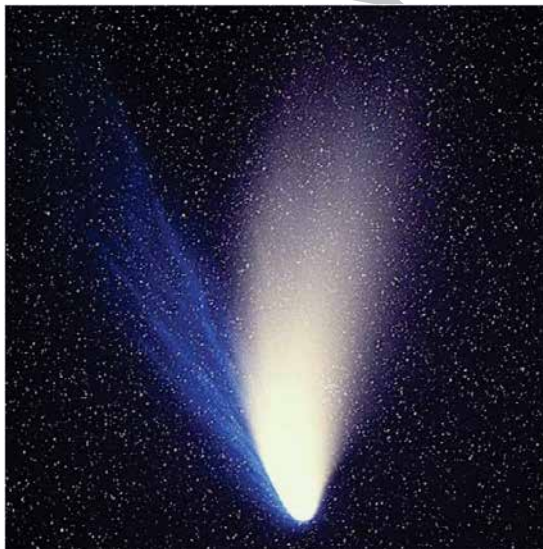
نسخه رایگان

## فصل ۷

### قاصدان سرنوشت

دنباله‌دارها برخی از زیباترین مناظر را در آسمان خلق می‌کنند، مانند منظره دنباله‌دار هیل-باب<sup>۱</sup> که در شکل ۷-۱ دیده می‌شود؛ اما در زمان‌های باستان، پیش از آنکه ماهیت واقعی آن‌ها شناخته شود، اغلب موجب ترس بودند. ارسطو عقیده داشت که دنباله‌دارها پدیده‌هایی گازی در بالای جو هستند که گاهی شعله‌ور می‌شوند. او دنباله‌دار را «ستاره‌ای مودار» مجسم می‌کرد و برای نامیدن آن از کلمه یونانی «kometes» از ریشه «kome» به معنی «موی بلند» استفاده می‌نمود. آن‌ها را به فال بد می‌گرفتند، چیزی که از مصیبت یا مرگ پادشاه در آینده خبر می‌داد.

تیکو براهه رصد‌های دقیقی از دنباله‌دار سال ۱۵۷۷ انجام داد، و با اندازه‌گیری فاصله آن در چندین نقطه متفاوت، نشان داد که فاصله آن تا زمین حداقل ۴ برابر ماه است. در سال ۱۶۸۷،



شکل ۷-۱: دنباله‌دار هیل-باب.

نیوتون توانست نشان دهد که مسیر دنباله‌داری که در زمستان ۱۶۸۰/۱۶۸۱ دیده شده بود بر یک مدار سهموی منطبق است و خورشید در کانون آن قرار دارد. بدین ترتیب نشان داده بود که دنباله‌دارها عضوی از منظومه شمسی هستند و به دور خورشید می‌گردند.

## ۷-۱ دنباله‌دار هالی

ادموند هالی<sup>۲</sup> مدار ۲۴ دنباله‌داری را که بین سال‌های ۱۳۳۷ تا ۱۶۹۸ مشاهده شده بود محاسبه کرد. او دریافت که دنباله‌دارهایی که در سال‌های ۱۵۳۱، ۱۶۰۷ و ۱۶۸۲ دیده شده بودند عناصر مداری بسیار شبیه به هم دارند، از این رو اطمینان پیدا کرد که آن‌ها «جلوه‌هایی» از یک دنباله‌دار هستند. هالی حتی توانست، با در نظر گرفتن اثر گرانشی مشتری و زحل، تفاوت‌های جزئی را توضیح دهد. دوره تناوب دنباله‌دار حدود ۷۶ سال بود، لذا پیش‌بینی کرد که در اواخر سال ۱۷۵۷ مجدداً برگردد. محاسبات دقیق‌تر توسط سه ریاضیدان فرانسوی نشان داد که در حقیقت در مارس ۱۷۵۹ نزدیک‌ترین فاصله به خورشید را خواهد داشت. این دنباله‌دار اولین بار به وسیله یوهان پالیچ<sup>۳</sup>، کشاورز و ستاره‌شناس غیرحرفه‌ای آلمانی، در روز کریسمس ۱۷۵۸ رؤیت شد. هالی، که در ۱۷۴۲ از دنیا رفته بود، زنده نماند تا برگشت آن را ببیند؛ اما به یادبودش، دنباله‌دار را «PI/Halley» نام نهادند (PI به خاطر آنکه اولین دنباله‌دار شناخته شده‌ای بود که دوره تناوب داشت).

دنباله‌دار هالی در زمان نبرد هیستینگز<sup>۴</sup> در سال ۱۰۶۶ در آسمان بود و در فرسینه بایو<sup>۵</sup> ترسیم شد (شکل ۷-۲). البته این دنباله‌دار برای پادشاه هارولد خوش‌یمن نبود!

بسته به موقعیت مداری زمین در زمان نزدیک شدن هالی به خورشید، این دنباله‌دار می‌تواند پرنور و تماشایی باشد، مانند سال ۱۰۶۶ و ۱۹۱۰، یا بسیار دور از زمین در موقعیتی که با چشم غیرمسلح به سختی قابل تشخیص است، مانند سال ۱۹۸۵/۱۹۸۶. اولین عکس از دنباله‌دار در سال ۱۹۱۰ گرفته شد، زمانی که بسیار به زمین نزدیک بود، طوری که گذر زمین از دنباله آن هشدارهایی را در پی داشت! تصور می‌شود که نقاش «جوتو دی بوندونه»<sup>۶</sup> دنباله‌دار را در سال ۱۳۰۱ مشاهده نمود و با الهام از آن «ستاره بیت‌الحم»<sup>۷</sup> را در اثر آبرنگ خود، «ستایش زردشتیان»<sup>۸</sup> در سال ۱۳۰۵ رسم کرد. به همین خاطر فضاییمایی که برای عبور از کنار دنباله‌دار هالی در سال

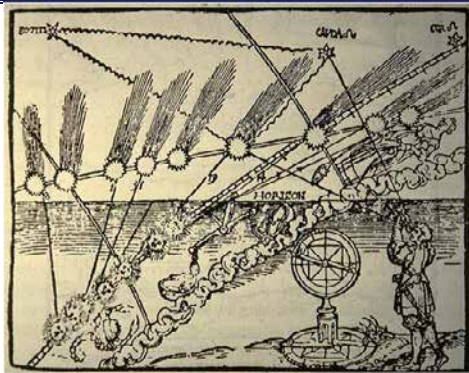




شکل ۷-۲: دنباله دار هالی در فرشینه بایو، آنطور که سال ۱۰۶۶ در آسمان ظاهر شده بود.

۱۹۸۵ ارسال شد، جوتو نام گرفت. این دنباله دار بار دیگر سال ۲۰۶۱ در آسمان ظاهر خواهد شد. امروزه یک دنباله دار را به عنوان «جسم کوچک منظومه شمسی» رده بندی می کنند؛ جسمی که به دور خورشید می گردد و در نزدیکی خورشید بک گیسو (جوئی کشیده که قابل دیدن است) و گاهی یک دنباله از خود به نمایش می گذارد. هسته دنباله دار، نوعاً قطری از مرتبه ۱۰ کیلومتر دارد و از سنگ و غبار که بیخ آنها را به هم چسبانده، تشکیل شده است. از این رو عبارت «گلوله برفی کثیف» که گاهی مورد استفاده قرار می گیرد، کاملاً مناسب است. دنباله دارهای با دوره تناوب طولانی، بقایای به جامانده از تراکم سحابی خورشیدی هستند و از دورترین نقاط منظومه شمسی می آیند. فاصله این نقاط از خورشید تا یک سال نوری می رسد و معمولاً درجایی قرار دارند که ابر اورت<sup>۹</sup> نامیده می شود.

این ابر، که تصور می شود تعداد دنباله دارهای موجود در آن از مرتبه یک تریلیون باشد، به احترام ستاره شناس هلندی، جان هنریک اورت<sup>۱۰</sup> که این ایده را در سال ۱۹۵۲ عمومی ساخت، ابر اورت نام گرفت. البته این نظریه ابتدا توسط ستاره شناس استونی، ارنست آپیک<sup>۱۱</sup> در سال ۱۹۳۲



شکل ۷-۳: دنباله‌دار سال ۱۵۳۲ که پتر آپیان آن را مشاهده کرد. دنباله به سمت دور از خورشید نشانه رفته است.

مطرح شده بود، لذا بهتر و صحیح‌تر آن است که «ابر آپیک-اورت» نامیده شود. این گونه دنباله‌دارها معمولاً تنها یک بار دیده می‌شوند، اما گاهی نیز مشتری و زحل مدارشان را به حدی منحرف می‌کنند که در قسمت‌های درونی منظومه شمسی، با دوره تناوبی نسبتاً کوتاه، به دام می‌افتند. در آن صورت دنباله‌دارهای با دوره تناوب کوتاه شناخته می‌شوند، که بر اساس تعریف، دوره تناوبشان کمتر از ۲۰۰ سال است. با وجود این، عقیده بر این است که بیشتر دنباله‌دارهای با دوره تناوب کوتاه از کمر بند کوپپر، آن طرف مدار نپتون، سرچشمه می‌گیرند. از حدود ۳۰۰۰ دنباله‌داری که تاکنون شناخته شده است، چند صد دنباله‌دار دوره تناوب کوتاه دارند. به طور متوسط هر سال یک دنباله‌دار به حد رؤیت با چشم غیر مسلح می‌رسد، اما تنها یکی از ده تا را می‌توان به آسانی دید.

## ۷-۲ هسته دنباله‌دار

هسته دنباله‌دارها قطری بین ۵/۰ تا ۵۰ کیلومتر دارند و دارای ترکیباتی بسیار غنی هستند: عمدتاً صخره، غبار و یخ آب، به همراه گازهای یخ‌زده‌ای چون دی‌اکسید کربن، منواکسید کربن، متان و آمونیاک. این ایده «گلوله برفی کثیف» را در سال ۱۹۵۰ فرد ویپل<sup>۱۲</sup> مطرح کرد، کسی که به تنهایی شش دنباله‌دار را کشف کرده بود. آن را به صورت رسمی تر به نظریه «کنگومرای یخی»<sup>۱۳</sup> می‌شناسند. هسته دنباله‌دارها همچنین حاوی بسیاری از ترکیبات آلی چون متانول، فرمالدئید، اتانول و اتان و احتمالاً مولکول‌های پیچیده‌تری چون اسیدهای آمینه نیز هستند. بسیار کوچک‌تر از آن هستند که توسط گرانش خودشان به شکل کره درآیند، از این رو شکلی نامنظم دارند.

به دلیل اندازه کوچک و سپیدایی پایین دنباله دارها، معمولاً نمی‌توان آن‌ها را در منظومه شمسی بیرونی دید. زمانی که یک دنباله دار به منظومه شمسی درونی<sup>۱۴</sup> نزدیک می‌شود، تابش خورشید موجب تبخیر یخ، گازهای منجمد و دیگر مواد سبک درون آن می‌گردد. بدین ترتیب غباری که درون یخ محبوس بود آزاد شده، به همراه گاز، ابری بزرگ و فوق‌العاده رقیق موسوم به گیسو<sup>۱۵</sup>، اطراف هسته تشکیل می‌دهد. نیروی وارد بر گیسو از طرف فشار تابشی خورشید<sup>۱۶</sup> و باد خورشیدی<sup>۱۷</sup>، به تشکیل دنباله‌هایی می‌انجامد که طبیعتاً سمت مخالف خورشید را نشانه رفته‌اند. این موضوع نخستین بار به وسیله ستاره‌شناس آلمانی، پتر آپین<sup>۱۸</sup>، در سال ۱۵۳۱ نشان داده شد (شکل ۷-۳).

با عبور دنباله دار از میان منظومه شمسی درونی، احتمالاً می‌توان گیسو و دنباله آن را از زمین دید. جریان‌های گاز و غبار، هر یک دنباله‌ای مجزا می‌سازند، در راستاهایی که اندکی باهم متفاوت است. دنباله‌ای که از گاز یا یون تشکیل شده (دنباله سمت چپ در شکل ۷-۱)، به شدت از فشار تابشی و میدان مغناطیسی خورشید تأثیر می‌پذیرد و مستقیماً به سمت مخالف خورشید نشانه می‌رود. دنباله یونی اغلب به رنگ آبی ظاهر می‌شود، چراکه متداول‌ترین یون، یعنی یون منواکسید کربن ( $CO^+$ )، نور آبی را بیش از قرمز پخش می‌کند. دنباله‌ای که از غبار شکل گرفته زردرنگ است، و میل دارد در امتداد مدار دنباله دار قرار گیرد؛ اغلب به شکل منحنی است، چراکه ذرات سنگین‌تر غبار کمتر تحت تأثیر فشار تابشی و باد خورشیدی قرار می‌گیرند. گاهی، به دلیل زاویه دید ما، عملاً ممکن است این‌طور به نظر آید که بخشی از دنباله غباری از هسته دنباله دار به سمت خورشید کشیده شده است - یک پاددنباله<sup>۱۹</sup>. این منظره نادر نوعاً زمانی رخ می‌دهد که زمین از صفحه مدار یک دنباله دار عبور می‌کند و غبار دنباله دار، که در یک صفحه نازک قرار دارد، از کنار دیده می‌شود.

اکثر دنباله دارها کم‌نورتر از آن هستند که بدون دوربین دوچشمی یا تلسکوپ دیده شوند. شاید در هر دهه یک بار، یک دنباله دار به حدی از روشنایی برسد که با چشم غیرمسلح دیده شود. گاهی ممکن است یک دنباله دار دچار یک فوران عظیم و ناگهانی گاز و غبار شود، و از این رو اندازه و روشنایی گیسو به طور موقت تا حد زیادی افزایش یابد. این اتفاق در سال ۲۰۰۷ برای دنباله دار هولمز روی داد، به طوری که این دنباله دار برای مدتی با چشم غیرمسلح دیده می‌شد.



شکل ۷-۴: تصویر هسته دنباله‌دار هالی که در سال ۱۹۸۵ به وسیله فضاپیمای جوتو گرفته شد.

اندازه گیسو ممکن است از خورشید تجاوز کند، و معروف است که دنباله‌های یونی تا یک واحد نجومی امتداد می‌یابند؛ بنابراین دنباله‌دارها بزرگ‌ترین اجسام در منظومه شمسی هستند. با نزدیک شدن دنباله‌دار به خورشید، اندازه گیسو و دنباله افزایش می‌یابد. بیش‌ترین وضوح دنباله‌دار مربوط به زمانی است که بلافاصله از کنار خورشید عبور کرده است، از این رو بهترین زمان رصد آن‌ها مدتی قبل از سپیده‌دم یا بعد از غروب است. با هر بار عبور از کنار خورشید، دنباله‌دار قسمتی از مواد خود را از دست می‌دهد و عاقبت به صورت دنباله‌ای از غبار درمی‌آید؛ یا این‌که به جسمی بی‌روح و خرد، شبیه به سیارک‌ها، تبدیل خواهد شد.

سپیدایی بسیار کم دنباله‌دارها، احتمالاً نشان‌دهنده این حقیقت است که آن‌ها حاوی مقادیر فراوانی ترکیبات آلی هستند. کاوشگر فضایی جوتو نشان داد که هسته دنباله‌دار هالی تنها حدود ۴٪ نور خورشید را بازتابش می‌کند، و این در حالی است که فضاپیمای «Deep Space 1» مشخص نمود که این عدد برای دنباله‌دار بوری<sup>۲۰</sup> تنها حدود ۲/۶٪ است.

تصویر جوتو (شکل ۷-۴) نشان داد که هسته کروی نیست و فوران‌ها تنها از تعدادی روزنه در سمت رو به خورشید سرچشمه می‌گیرند. این حقیقت که سمت دور از خورشید هیچ فعالیتی از خود نشان نمی‌دهد بر این دلالت دارد که هدایت گرمایی در داخل دنباله‌دار کم است. چگالی هسته تنها حدود  $0.5 \text{ g/cm}^3$  است - نصف چگالی آب-، لذا، چون چگالی یخ  $1 \text{ g/cm}^3$  و چگالی غبار حدود  $2/5 \text{ g/cm}^3$  است، باید مقدار زیادی فضای خالی درون هسته وجود داشته باشد. این تصویر

گویای یک حقیقت جالب است. دنباله دارها تنها اجسام درون منظومه شمسی هستند که از یک سازوکار پیشرانش<sup>۲۱</sup> به شکل جت‌هایی در سمت رو به خورشید برخوردارند. این یعنی آنکه مدار دنباله دار پس از مواجهه آن با خورشید، ممکن است اندکی نسبت به قبل تغییر کند.

### ۳-۷ بارش‌های شهابی

هر بار که یک دنباله دار در مدار خود از کنار خورشید می‌گذرد، مقداری از یخ آن بخار شده، پاره‌هایی از ماده دنباله دار در فضا پخش می‌گردد. این پاره‌ها اندازه‌های متفاوتی دارند، از یک ذره غبار تا دانه‌هایی به اندازه ماسه و حتی سنگ‌ریزه‌های کوچک. ذرات به اندازه غبار بسیار بیش‌تر از آن‌هایی است که به اندازه ماسه هستند، و این‌ها نیز، به نوبه خود، بسیار بیشتر از دانه‌های اندازه سنگ‌ریزه هستند. این ذرات به تدریج در امتداد تمام مدار دنباله دار پخش می‌شوند و چیزی را که جریان شهاب‌واره‌ای<sup>۲۲</sup> نام دارد درست می‌کنند. با گردش زمین به دور خورشید، مدار آن ممکن است از میان یک جریان شهاب‌واره‌ای عبور کند، و در این صورت، ذرات با سرعت زیاد وارد جو زمین شده، با سوختن به شهاب<sup>۲۳</sup> تبدیل می‌شوند. انرژی ذرات، گازی را که شهاب از میان آن می‌گذرد به حالت برانگیخته برده، الکترون را از اتم‌های گاز جدا می‌کند. این الکترون‌ها می‌توانند امواج رادیویی را بازتاب کنند، و باعث پژواک راداری<sup>۲۴</sup> شوند، چیزی که در اواخر دهه ۱۹۴۰ در جُدِرل بانک مورد مطالعه قرار گرفت.

دنباله‌دارهایی که موجب معروف‌ترین بارش‌های شهابی می‌شوند، شناسایی شده‌اند. برای مثال، دنباله دار هالی بارش جباری را در اکتبر به بار می‌آورد. اگر جریان شهاب‌واره‌ای متراکم باشد، گاهی می‌توانیم یک طوفان شهابی تماشایی را ببینیم. ذرات بزرگ‌تر چیزی را می‌سازند که آذرگویی<sup>۲۵</sup> نام دارد، و حتی ممکن است در نزدیکی زمین منفجر شوند، که در این صورت آن‌ها را

#### بارش‌های شهابی قابل توجه

برساوشی‌ها	Perseids	اواسط اوت	دنباله دار سویفت-تاتل (Comet 109P/Swift-Tuttle)
جباری‌ها	Orionids	اواخر اکتبر	دنباله دار هالی
اسدی‌ها	Leonids	اواسط نوامبر	دنباله دار تمپل-تاتل
جوزایی‌ها	Geminids	اواسط دسامبر	سیارک فیتون ۳۲۰۰ (Minor planet 3200 Phaethon)

آتش‌گوی<sup>۲۶</sup> می‌نامند و غرش صوتی<sup>۲۷</sup> را به دنبال دارند. شهاب‌واره‌های خیلی بزرگ ممکن است به زمین برسند، و منجر به یک شهاب‌سنگ<sup>۲۸</sup> شوند.

چون ذرات در مسیرهای موازی حرکت می‌کنند، به نظر می‌رسد که همه از یک نقطه واحد در آسمان سرچشمه می‌گیرند. این نقطه را کانون بارش<sup>۲۹</sup> می‌نامند و ناشی از اثر پرسپکتیو (دورنما) است، شبیه به خطوط راه‌آهن که به نظر می‌رسد در یک نقطه دور به هم می‌رسند. معمولاً بارش‌های شهابی را به نام کلهکشان می‌خوانند که به نظر می‌رسد از آن سرچشمه گرفته‌اند. اغلب می‌توان بارش‌ها را برای چند شب دید، و سپس به دلیل اینکه موقعیت زمین در مدار تغییر می‌کند، کانون بارش اندکی جابه‌جا می‌شود.

یکی از معتبرترین بارش‌های شهابی، بارش شهابی برساوشی<sup>۳۰</sup> است که در ۱۲ اوت، معمولاً با حدود ۶۰ شهاب در ساعت، به بیشینه خود می‌رسد. اگر زمین به ویژه از میان یک بخش غنی جریان عبور کند، نرخ شهاب‌ها می‌تواند بیشتر هم باشد، تا بیش از صد شهاب در ساعت (مانند سال ۱۹۹۹). شاید بتوان بارش اسدی<sup>۳۱</sup> را تماشایی‌ترین بارش شهابی دانست، که اطراف ۱۷ نوامبر به بیشینه خود می‌رسد. تقریباً در هر ۳۳ سال، بارش اسدی، با هزاران شهاب در ساعت، یک طوفان شهابی را تولید می‌کند. آخرین دو طوفان اسدی سنگین در ۱۹۳۳ و ۱۹۶۶ رخ داد، اما طوفان سال ۱۹۹۹ چندان تماشایی نبود.

## ۴-۷ مأموریت استارداست

استارداست<sup>۳۲</sup> یک مأموریت بین‌سیاره‌ای آمریکا بود که مأموریت اصلی آن تحقیق پیرامون ساختار دنباله‌دار وایلد ۲ (Comet Wild 2) و گیسوی آن، از طریق جمع‌آوری نمونه‌ای از غبار دنباله‌دار و بازگشت به زمین بود. این فضاپیما در ۷ فوریه ۱۹۹۹ به فضا پرتاب شد و در ۲ ژانویه ۲۰۰۴ از کنار دنباله‌دار گذشت. در راه، از فاصله ۳۳۰۰ کیلومتری سیارک آنفرانک<sup>۳۳</sup> ۵۵۳۵ عبور کرد و چندین عکس گرفت. در حین عبور از کنار دنباله‌دار وایلد ۲، نمونه‌هایی از غبار گیسوی آن را جمع‌آوری کرد و عکس‌هایی از هسته یخی آن گرفت.

زمانی که فضاپیما از کنار دنباله‌دار می‌گذشت، سرعت برخورد ذرات موجود در گیسو به  $6100 \text{ m/s}$  می‌رسید، یعنی نه برابر سرعت گلوله تفنگ! گرچه ذرات به دام افتاده هریک کوچک‌تر از

دانه ماسه بودند، چنین سرعت بالایی در زمان جمع‌آوری می‌توانست آن‌ها را به‌طور کامل بخار کند، و یا دست‌کم، شکل و ترکیب شیمیایی آن‌ها را تغییر دهد. برای اجتناب از این رویداد، ذرات دنباله‌دار در یک هواژل<sup>۳۴</sup> با چگالی فوق‌العاده پایین جمع‌آوری شدند. هواژل یک جامد است با پایه سیلیسیوم و ساختاری متخلخل و شبیه به اسفنج، که ۹۹/۹٪ حجم آن فضای خالی است. چگالی آن هزار بار از شیشه، یکی دیگر از جامدهای با پایه سیلیسیوم، کمتر است. زمانی که ذرات به هواژل برخورد می‌کردند، به داخل آن فرومی‌رفتند، و ضمن کاهش سرعت، حفره‌ای شبیه به هویج تا ۲۰۰ برابر اندازه خودشان ایجاد کرده، متوقف می‌شدند.

این هواژل در یک «اتاقک برگشت نمونه»<sup>۳۵</sup> جاسازی شد. اتاقک در زمان عبور فضاپیما از نزدیکی زمین در ۱۵ ژانویه ۲۰۰۶ از آن رها گردید و با چتر نجات در صحرای دریاچه بزرگ نمکی یوتا<sup>۳۶</sup> فرود آمد. در هنگام عبور از میان جو، سرعت اتاقک به ۴۶,۵۰۰ km/h رسید، و این سریع‌ترین سرعت ورود به جو زمین است که یک جسم ساخت بشر تاکنون به آن دست یافته است. یک آذرگویی بزرگ و غرش صوتی در غرب یوتا و شرق نوادا<sup>۳۷</sup> مشاهده گردید.

نمونه‌هایی که به وسیله فضاپیما بازگردانده شده بود به مرکز فضایی جانسون در وبستر، تگزاس<sup>۳۸</sup>، به یک اتاق تمیز که ضریب تمیزی آن ۱۰۰ برابر اتاق عمل بیمارستان بود، منتقل شد تا اطمینان یابند آلودگی زمینی به غبار دنباله‌دار و ستاره‌راهی ندارد. (بیشتر سنگ‌های نمونه‌ای که به وسیله آپولو از ماه آورده شد نیز در این مرکز نگهداری می‌شود.)

شیارهای درون هواژل دانشمندان را قادر ساخت ذرات ریزی را که جمع‌آوری شده بود بیابند. مجله Science در شماره دسامبر ۲۰۰۶ به صورت مفصل تحلیل دانشمندان را منتشر کرد. در میان یافته‌های آن‌ها، کشف گستره وسیعی از ترکیبات آلی قرار داشت، که دو تا از آن‌ها حاوی نیتروژنی بودند که از لحاظ زیستی قابل استفاده بود. ترکیبات هیدروکربنی، با طول زنجیره‌ای بلندتر از آن‌هایی که در محیط پخشیده بین ستاره‌ای<sup>۳۹</sup> مشاهده شده بود، یافت گردید. نمونه‌های غبار ستاره‌ای حاوی مقدار فراوانی از سیلیکات‌های بی‌شکل<sup>۴۰</sup> هستند، و حضور آن‌ها در وایلد ۲ مؤید اختلاط منظومه شمسی با ماده بین ستاره‌ای است، چیزی که به صورت طیف نمودی از مشاهدات نجومی گذشته استنباط شده بود.

شکل ۷-۵: این تصویر زیبا ۶۷ ثانیه پس از آنکه دنباله‌دار تمپل ۱ فضاپیماى برخوردکنندهٔ دیپایمپکت را معدوم کرد گرفته شد.



## ۷-۵ برخورد دیپایمپکت

دیپایمپکت<sup>۴۱</sup> یک کاوشگر ناسا بود که در ۱۲ ژانویه ۲۰۰۵ به فضا پرتاب شد. برنامهٔ آن، مطالعهٔ ترکیبات درونی دنباله‌دار<sup>۴۲</sup> تمپل ۱ از طریق تصادم قسمتی از فضاپیما به دنباله‌دار بود؛ بنابراین، دیپایمپکت نخستین کاوشگری بود که مواد را از سطح یک دنباله‌دار بیرون می‌ریخت. در ۲۹ ژوئن، قسمت برخوردکننده با موفقیت از فضاپیما که در حال عبور از کنار دنباله‌دار بود جدا شد. در این موقعیت، فضاپیما و قسمت برخوردکننده مستقیماً رو به سوی دنباله‌دار در حرکت بودند. سپس فضاپیما ۱۴ دقیقه موتور خود را روشن کرد تا از برخورد خودش جلوگیری کرده، با عبور از کنار دنباله‌دار به تصویربرداری از آن، و رلهٔ داده‌هایی که دوربین و تجهیزات برخوردکننده جمع‌آوری می‌کردند بپردازد.

بر اساس قوانین بین‌المللی، نمی‌توان پرتابه یا موشکی را به سمت یک جسم فضایی شلیک کرد. از این رو، برخوردکننده در سه نوبت به تصحیح مدار خود پرداخت، به طوری که در مسیر دنباله‌دار قرار گیرد و به جای برخورد آن به دنباله‌دار، دنباله‌دار به آن برخورد کند! در مدت تقرب به سمت دنباله‌دار، تصاویری را به فضاپیماى مادر فرستاد؛ و آن‌هم تصاویر را به زمین ارسال نمود. آخرین تصویر درست سه ثانیه قبل از برخورد گرفته شد. انرژی برخورد نهایی (شکل ۷-۵) معادل پنج تُن تی‌ان‌تی بود، و برای مدت کوتاهی، دنباله‌دار شش بار درخشان‌تر از معمول شد. ستون بزرگی از مواد فوران کرد. نتیجه‌ای که اندکی موجب ناراحتی شد آن بود که فضاپیما



نتوانست از دهانه‌ای که باید از این برخورد به وجود می‌آمد عکس بگیرد. مشاهدات زمینی نشان داد که دنباله‌دار برای ۱۳ روز مشغول فوران گاز از محل برخورد بود، و تصور می‌شود که دنباله‌دار در اثر برخورد، در مجموع ۲۵۰ میلیون کیلوگرم آب، و بین ۱۰ تا ۲۵ میلیون کیلوگرم غبار از دست داد. تا حدی تعجب‌آور اینکه، مادهٔ حفرشده حاوی غبار بیشتر و یخ کمتری نسبت به حد انتظار بود. به علاوه، ماده از آنچه انتظار می‌رفت نرم‌تر بود و بیشتر به پودر تالک<sup>۴۳</sup> می‌ماند تا به ماسه. مواد دیگری که از مشاهدات طیف‌نمودی<sup>۴۴</sup> کشف شد عبارت بود از خاک رس، کربنات، و سیلیکات‌های شُدیمی و بلوری. سنجش‌های اندازه و جرم نشان داد که حدود ۷۵٪ دنباله‌دار فضای خالی است، که با مشاهدات فضاپیمای جوتو از دنباله‌دار هالی مطابقت داشت.

## ۶-۷ دو نظر نهایی

تصور بر این است که احتمالاً برخورد دنباله‌دارها به زمین، مواد آلی بسیاری را به سطح آن آورده است. ضمناً دانشمندان بر این باورند که چنین برخوردهایی، بیشتر آب موجود در سیارهٔ ما را تأمین کرده، مطمئناً بر سمت‌وسوی تحول در زمین تأثیر داشته است. جدای از مناظر زیبایی که در آسمان خلق می‌کنند، برای خیلی از چیزها باید ممنون دنباله‌دارها باشیم!

پانویس‌ها

- 1 - Comet Hale-Bopp
- 2 - Edmond Halley
- 3- Johann Georg Palitzsch
- 4 - Battle Of Hastings
- 5 - Bayeux Tapestry
- 6 - Giotto Di Bondone
- 7 - Star Of Bethlehem
- 8 - The Adoration Of The Magi
- 9 - Oort Cloud
- 10 - Jan Hendrik Oort
- 11 - Ernst Opik
- 12 - Fred L. Whipple
- 13 - Icy Conglomerate

۱۴ - ناحیه‌ای از منظومه شمسی که شامل سیارات زمین‌سان و سیارک‌ها می‌شود. (مترجم)

- 15 - Coma
- 16 - Sun's Radiation Pressure
- 17 - Solar Wind
- 18 - Peter Apian

- 19 - Antitail
- 20 - Comet Borrelly
- 21 - Propulsion Mechanism
- 22 - Meteoroid Stream

۲۳ - Meteor: رگه نور که معمولاً چند ثانیه دوام می‌آورد.

- 24 - Radar Echo
- 25 - Fireball

۲۶ - Bolide: شهابی بسیار پرنور که منفجر و تکه تکه می‌شود و گاه صدای انفجار آن پس از مدتی به گوش می‌رسد. (ف)

- 27 - Sonic Boom

۲۸ - Meteorite: تکه سنگ باقی مانده از شهاب‌واره که پس از سوختن در جو به زمین رسیده باشد. (ف)

- 29 - Radiant
- 30 - Perseid Meteor Shower
- 31 - Leonid Shower
- 32 - Stardust Mission
- 33 - Asteroid 5535 Annefrank

۳۴ - Aerogel: نوعی ژل که در آن، جزء مایع ژل با گاز جایگزین شده است. (مترجم)

- 35 - Sample Return Capsule (Src)
- 36 - Utah's Great Salt Lake Desert
- 37 - Nevada
- 38 - Johnson Space Center in Webster, Texas.
- 39 - Diffuse Interstellar Medium
- 40 - Amorphous Silicates
- 41 - Deep Impact
- 42 - Comet Tempel 1
- 43 - Talcum Powder
- 44 - Spectroscopic Observations

# فصل ۸

## برخورد!

تصویر ماه یادآور این واقعیت است که اجسام منظومه شمسی، از جمله زمین، در گذشته متحمل میلیون‌ها برخورد شده‌اند - چیزی که در آینده نیز ادامه خواهد یافت، البته خوشبختانه با نرخی بسیار کمتر. در هر صورت، زمین، به دلیل جرم بیشتر، بیش از ماه دچار برخورد شده است؛ اما به جز چند جا، فرسایش زمین آثار تمام آن‌ها را از سطح خود پاک کرده است. برخورد باقی‌مانده‌های منظومه شمسی، از قبیل سیارک‌ها و دنباله‌دارها، موجب چیزی می‌شود که دهانه برخوردی<sup>۱</sup> نام دارد. این نام را می‌توان برای هر گودالی که از برخورد با سرعت خیلی بالایی یک جسم به جسم بزرگ‌تر ناشی می‌شود به کار برد. دهانه‌های برخوردی، تورفتگی‌های تقریباً گردی هستند که معمولاً لبه آن‌ها بالا آمده است، از گودی‌های صاف و کوچک به شکل کاسه، تا دهانه‌های بزرگ با لبه‌هایی پراز شیار پهن و یک یا چند قله در مرکز. در نتیجه برخوردهای سنگین، حوضه‌های برخوردی<sup>۲</sup> غول‌پیکری مانند ماریا بر سطح ماه به وجود می‌آید، جایی که پوسته ماه شکافته شده و گدازه توانسته است از زیر به بالا فوران کرده، گودی ناشی از برخورد را پر کند. این گودی‌های دریامانند<sup>۳</sup>، که در عطارد نیز دیده می‌شود، حاصل یک دوره بمباران شدید در منظومه شمسی درونی است که حدود ۳/۸ میلیارد سال قبل پایان یافت. از آن موقع تا کنون، نرخ تولید دهانه در منظومه شمسی درونی تا حد زیادی پایین آمده است (هرچند همچنان محسوس است). اما حدود هر یک میلیون سال، زمین چند برخورد را تجربه می‌کند، برخوردهایی آن قدر بزرگ که دهانه‌هایی با قطر ۲۰ کیلومتر ایجاد می‌شود. فرسایش سطح زمین به سرعت آن‌ها را از بین می‌برد؛ با وجود این، حدود ۱۷۰ دهانه برخوردی، با قطری از چند ده متر تا حدود ۳۰۰ کیلومتر، در زمین شناسایی شده است. سن بیشتر این دهانه‌ها کمتر از ۲۰۰ میلیون سال است.

تا دهه ۱۹۳۰ این باور عمومی وجود داشت که دهانه‌های زمین، منشأ آتش‌فشانی دارند و نه

برخوردی. تا اینکه در دهه ۱۹۶۰، پژوهشگران، به طور برجسته یوجین شومیکر<sup>۴</sup>، به شواهد روشنی دست یافتند که نشان می‌داد آن‌ها بر اثر برخورد به وجود آمده‌اند. برای مثال، کوارتز ضربه‌ای را شناسایی کردند که تنها در یک رویداد برخوردی امکان تولید آن وجود دارد. تا سال ۱۹۷۰، بیش از ۵۰ دهانه برخوردی در زمین یافت شده بود.

## ۸-۱ تشکیل دهانه

سرعت یک جسم هنگام برخورد به زمین از حدود  $11 \text{ km/s}$  تا  $70 \text{ km/s}$  متغیر است. البته نوعاً سرعت برخورد حدود  $25 \text{ km/s}$  می‌باشد - این سرعت‌ها از سرعت مداری اجسام درون منظومه شمسی استخراج شده است. بدین ترتیب می‌توان چنین رویدادهایی را شبیه‌سازی کرد. به نظر می‌رسد که جسم برخوردکننده در زمین نفوذ کرده، یک انفجار زیرزمینی را که منجر به تبخیر مواد بالای آن خواهد شد، به وجود می‌آورد. در این صورت، معمولاً مهم نیست جسم با چه زاویه‌ای به زمین برخورد می‌کند، و دهانه‌هایی که پدید می‌آید همواره گرد هستند؛ مگر برخوردهای با زاویه خیلی کوچک، که موجب دهانه‌های بیضوی خواهند شد. در برخوردهای بزرگ، مواد زیادی بیرون می‌ریزد. بیشتر این مواد در فاصله‌ای کمتر از چند برابر شعاع دهانه فرود می‌آید. اما برخی ممکن است تا فواصل دوری سفر کنند و «پرتوهایی» را بسازند، مانند آنچه به مرکزیت دهانه تیکو در ماه می‌بینیم. حتی این امکان وجود دارد که مقداری از مواد دفع شده از سرعت فرار سیاره یا قمر تجاوز کرده، به سفر درون منظومه شمسی بپردازند، تا شاید به صورت شهاب‌سنگ روی زمین فرود آیند. به همین ترتیب چند نمونه از سنگ مریخ در اختیار ما قرار گرفته است و در حال تحقیق بر روی آن‌ها پیرامون علائم حیات هستیم.

## ۸-۲ دهانه‌ها بر روی زمین

شاید معروف‌ترین دهانه برخوردی روی زمین، «دهانه شهابی<sup>۵</sup>»، حدود ۶۰ کیلومتر شرق فلگ‌استف<sup>۶</sup> در آریزونا شمالی است. این دهانه حدود ۵۰,۰۰۰ سال قبل، زمانی که منطقه را چمنزار پوشانده بود و ماموت‌های پشمالو آن را به اشغال خود درآورده بودند، تشکیل شد. اغلب آن را به افتخار دانیل بارینجر<sup>۷</sup>، کسی که نخستین بار اعلام کرد این دهانه باید بر اثر برخورد

شهاب سنگ به وجود آمده باشد، دهانه بارینجر<sup>۸</sup> می نامند. قطر این دهانه حدود ۱/۲ کیلومتر و عمق آن ۱۷۰ متر است (شکل ۸-۱)، و لبه آن ۴۵ متر از دشت اطراف بلندتر می باشد. در مرکز آن توده ای تقریباً ۲۲۰ متری از خرده سنگ وجود دارد. دانشمندان بر این باورند که بقایای شهاب سنگ در زیر لبه، در سمت جنوبی دهانه، دفن شده است؛ شهاب سنگی آهنی-نیکلی، تقریباً به عرض ۵۰ متر، که تصور می شود با سرعت ۱۲/۸ km/s به دشت برخورد کرده است. شهاب سنگ در ابتدا حدود ۶۰۰/۰۰۰ تن وزن داشته، اما احتمالاً نیمی از آن هنگام عبور از جو زمین تبخیر شده است. شهاب سنگی که این دهانه را ایجاد کرد به صورت رسمی «شهاب سنگ گنیون دیابلو»<sup>۹</sup> نامیده می شود (این نام به دلیل شهر گنیون دیابلو در آریزونا<sup>۱۰</sup>، که هم اکنون متروکه است، و در ۱۹ کیلومتری شمال آن قرار داشت، به این شهاب سنگ داده شده است).

در سال ۱۹۶۰، یوجین شومیکر<sup>۱۱</sup> توانست با کاوش خود، و کشف کانی استیشویت<sup>۱۲</sup> در دهانه، فرضیه بارینجر را تأیید کند. این کانی نوع کمیابی از سیلیس (دی اکسید سیلیسیوم) است که تنها در جایی یافت می شود که صخره های حاوی کوارتز در اثر یک رویداد برخورد یا انفجار هسته ای به شدت ضربه خورده اند. امکان ایجاد این ماده در فعالیت آتش فشانی نیست. از زمانی که شومیکر نخستین دلیل قطعی را از یک برخورد فرازمینی بر سطح زمین ارائه کرد، دهانه های برخوردی



شکل ۸-۱: دهانه بارینجر یا شهابی در آریزونا، آمریکا.

بسیاری در سراسر جهان شناسایی شده است، اما همچنان «دهانه شهابی» گیرترین چشم‌انداز را دارد. شومیکر با استفاده از این دهانه، در دهه ۱۹۶۰ و پیش از مأموریت‌های آپولو، ساختار دهانه‌ها را به فضانوردان آموزش می‌داد.

### دهانه‌های نورتلینگریس و اشتاینهایم<sup>۱۳</sup> در آلمان

دو دهانه برخوردی در جنوب آلمان، مهم‌ترین دهانه‌های برخوردی در اروپا هستند. تصور بر این است که این دو از برخورد یک سیارک دوتایی (دو سیارک هم‌چرخش<sup>۱۴</sup>) حدود ۱۴/۴ میلیون سال قبل به وجود آمده‌اند. دهانه بزرگ‌تر، دهانه ریس<sup>۱۵</sup>، ۲۴ کیلومتر عرض دارد و کف آن ۱۲۰ متر پایین‌تر از بقایای فرسوده لبه است. چنانچه هوا کاملاً تمیز باشد، در روز می‌توان از یک سمت، لبه دیگر را دید؛ اما اندازه به‌گونه‌ای است که دهانه چندان واضح به نظر نمی‌رسد. در اینجا نیز همچون دهانه بارینجر، یوجین شومیکر نشان داد که دهانه بر اثر برخورد شهاب‌سنگ به وجود آمده است. وی به همراه ادوارد چاو، در سنگ‌هایی که در ساخت کلیسای شهر نورتلینگن استفاده شده بود، کوارتز ضربه‌ای (کوزیت) را یافت (شهر نورتلینگن درون دهانه قرار دارد). جالب اینجاست که ساختمان‌های سنگی در نورتلینگن، میلیون‌ها الماس ریز را، تماماً کوچک‌تر از ۰/۲ میلی‌متر، در خود جای داده‌اند. این الماس‌ها زمانی به وجود آمدند که بخشی از سیارک به یک نهشته گرافیت<sup>۱۶</sup> محلی، که قرن‌هاست از آن سنگ استخراج می‌شود، برخورد کرد.

دهانه کوچک‌تر، دهانه اشتاینهایم، در ۴۲ کیلومتری غرب/جنوب غربی مرکز دهانه ریس قرار دارد و ۳/۸ کیلومتر عرض آن است. اگر از کنار دیواره آن در یک سمت به دهانه بنگریم، شکل دهانه‌ای آن به خوبی قابل تشخیص است و یک برون‌زد<sup>۱۷</sup> مواد با ارتفاع کم در کف دهانه دیده می‌شود. عقیده بر این است که دهانه ریس را یک سیارک با قطر ۱/۵ km، و دهانه اشتاینهایم را سیارکی با قطر ۱۵۰ متر ایجاد کرده است. این دو، با زاویه حدود ۴۵ درجه از سطح زمین و از راستای غرب/جنوب غربی به منطقه برخورد کرده‌اند. در زمان برخورد، سرعت آن‌ها حدود ۲۰ km/s بوده است و معادل ۲۹ میلیون کیلوتن تی‌ان‌تی قدرت انفجار داشتند. مواد دفع شده از دهانه ریس تا فاصله ۴۵۰ کیلومتری شمال شرقی یافت شده است و تصور بر این است منبع تکتایت‌های مولداوایتی<sup>۱۸</sup> باشد که در بوهم و موراوی<sup>۱۹</sup> یافت شده‌اند.

## حادثهٔ چیکشلوب

دهانه چیکشلوب<sup>۲۰</sup> یک دهانهٔ برخوردی باستانی است که در زیر شبه جزیره یوکاتان در مکزیک<sup>۲۱</sup> دفن شده است و مرکز آن نزدیک شهر چیکشلوب می باشد. قطر دهانه بیش از ۱۸۰ km است، از این رو سومین ساختار برخوردی بزرگ و مورد تأیید در جهان به حساب می آید (این دهانه را سیارکی به قطر دست کم ۱۰ km به وجود آورده است). دهانه را یک ژئوفیزیکدان به نام گلن پنفیلد<sup>۲۲</sup> در اواخر دههٔ ۱۹۷۰، در حین جستجو به دنبال نفت، کشف کرد. پنفیلد در داده های خود، یک کمان زیرآبی عظیم را به طول ۷۰ km یافت. این کمان با یک بی هنجاری گرانشی بر روی نقشه ای از یوکاتان که در دههٔ ۱۹۶۰ تهیه شده بود همخوانی داشت. ضمناً این کمان، وجود یک دهانهٔ بزرگ را نیز به ذهن متبادر می ساخت، موضوعی که به دلایل تجاری به اطلاع عموم رسانده نشد. پنفیلد یک کمان دیگر را نیز روی زمین پیدا کرد که با کمان ابتدایی، یک دایره به قطر ۱۸۰ km می ساخت. همانند محل دیگر دهانه های برخوردی، در اینجا نیز کوارتز ضربه ای یافت شد، و این تأییدی بود بر شاهد گرانشی و ساختاری یک برخورد بزرگ.

سن صخره ها و تحلیل ایزوتوپی نشان داد که تاریخ این ساختار ضربه ای به پایان دورهٔ کرتاسه<sup>۲۳</sup> (موسوم به مرز<sup>۲۴</sup> K-Pg) یازمی گردد، تقریباً ۶۵ میلیون سال قبل، و این خود دلالتی است بر اینکه این حادثه در انقراض دایناسورها نقش داشته است. البته نمی توان این را تنها دلیل مرگ دایناسورها دانست. این برخورد انرژی ای معادل ۱۰۰ میلیون مگاتن تی ان تی آزاد کرد - دو میلیون بار بیشتر از قوی ترین انفجارهای بشری! در سال ۲۰۰۷، مقاله ای که در مجلهٔ Nature منتشر شده بود اظهار داشت که «سیارک چیکشلوب» ناشی از یک تصادم در کمربند سیارکی است که ۱۶۰ میلیون سال پیش رخ داد و منجر به ایجاد خانوادهٔ سیارکی باپتیسستینا<sup>۲۵</sup> شد. بزرگ ترین عضو باقی مانده از این خانواده، سیارک باپتیسستینا ۲۹۸ است. شواهدی وجود دارد مبنی بر اینکه سیارک برخوردکننده عضوی از یک گروه نادر سیارک ها موسوم به کندریت های کرین دار<sup>۲۶</sup> بوده است (مانند خانوادهٔ باپتیسستینا). [اخیراً این اظهارات مورد تردید قرار گرفته است و منشأ سیارک چیکشلوب همچنان مورد مناقشه است. (مترجم)] این برخورد یکی از بزرگ ترین سونامی ها را، با ارتفاعی که به چند هزار متر می رسید، در تاریخ سیارهٔ زمین به وجود آورد. ضمن اینکه، ابری از

غبار، خاکستر و بخار بسیار داغ از دهانه به هوا منتشر شد. خرده‌هایی، هم از سیارک و هم از منطقه برخورد، براثر انفجار به خارج از جو پرتاب شده، پس از ورود مجدد به جو تا حد التهاب داغ شدند و حریق‌های گسترده‌ای را به بار آوردند. احتمالاً امواج ضربه ناشی از انفجار، زمین‌لرزه‌ها و فوران‌های آتش‌فشانی را در سراسر زمین به دنبال داشته است. گسیل غبار و ذرات توانست تمام سطح زمین را برای سال‌ها بپوشاند؛ بدین ترتیب تابش خورشید کاهش یافت، فتوسنتز گیاهان مختل شد و از این رو تمام زنجیره غذایی تحت تأثیر قرار گرفت.

مدرک اصلی بر وقوع یک برخورد بزرگ، علاوه بر خود دهانه، در یک لایه نازک از خاک رس موجود در سند زمین‌شناختی<sup>۲۷</sup> از سراسر جهان قرار دارد که تاریخ آن به مرز K-Pg بازمی‌گردد. این لایه، ایریدیوم را با تراکمی که به صورت غیرطبیعی بالا است در خود جای داده است. تراکم ایریدیوم از لحاظ وزنی به شش بخش (یا بیشتر) در میلیارد می‌رسد، درحالی‌که در پوسته زمین، در کل، این مقدار تنها ۰/۴ است. برخلاف زمین، شهاب‌سنگ‌ها می‌توانند حاوی ایریدیوم با درصد وزنی حدود ۴۷۰ بخش در میلیارد باشند. این فرضیه به نظر معقول می‌آید که پس از تبخیر سیارک برخوردکننده، ایریدیوم در جو منتشر شد، با دیگر موادی که براثر برخورد به خارج پرتاب شده بودند مخلوط گردید، و سپس بر سطح زمین فرونشست. بدین ترتیب لایه خاک رس غنی از ایریدیوم پدید آمد.

کشف دهانه چیکشلوب این نظریه را تقویت نمود که انقراض گروه‌های بی‌شماری از حیوانات و گیاهان، شامل دایناسورها، احتمالاً براثر یک برخورد عظیم رخ داده است. زمان این رویداد انقراض تقریباً با حادثه چیکشلوب همخوانی دارد، اما نمونه‌های اخیر از هسته چیکشلوب نشان می‌دهد که برخورد حدود ۳۰۰,۰۰۰ سال پیش از انقراض انبوه واقع شد، و بدین ترتیب این برخورد نمی‌توانسته عامل مستقیم در مرگ دایناسورها بوده باشد. شاید این برخورد یکی از چند برخورد بزرگ، در یک دوره چند صد هزار ساله بوده است. به علاوه، در همان زمان‌ها دمای زمین بالا رفت. دلیل آن، دی‌اکسید کربنی بود که از فوران پرحجم گدازه‌ای که تله‌های دیکن<sup>۲۸</sup> را در هند به وجود آورد، آزاد شد. این یک مشکل واقعی برای دایناسورها بود. احتمال دارد یک برخورد دیگر ۳۰۰,۰۰۰ سال پس از چیکشلوب، شاید در بستر دریا زیر اقیانوس هند، ضربه نهایی را بر پیکر دایناسورها وارد



آورده است.

### تونگوسکا: ۳۰ ژوئن ۱۹۰۸

رویداد تونگوسکا<sup>۲۹</sup> یک انفجار پرقدرت بود که نزدیک رود تونگوسکا در سیبری، در ۳۰ ژوئن سال ۱۹۰۸ اتفاق افتاد. اعتقاد بر این است که این رویداد ناشی از انفجار یک شهاب سنگ بزرگ یا پاره‌ای از یک دنباله‌دار به قطر چند ده متر در ارتفاع ۵ تا ۱۰ کیلومتری بالای سطح زمین بوده است. هرچند که شهاب یا دنباله‌دار در هوا ترکیب و مستقیماً به زمین برخورد نکرد، این رویداد همچنان به عنوان یک برخورد تلقی می‌شود؛ برخوردی که تقریباً معادل ۱۲ مگاتن تی‌ان‌تی انرژی آزاد کرد (حدود ۱۰۰۰ برابر بمب اتمی که آمریکا بر هیروشیما انداخت). رویداد تونگوسکا (شکل ۸-۲) بزرگ‌ترین رویداد برخورد در تاریخ معاصر زمین است. برآوردها حاکی از این بود که موج انفجار حدود ۸۰ میلیون درخت را در وسعتی به اندازه ۲۱۵۰ کیلومترمربع قطع کرد. اگر انفجار چند ساعت دیرتر اتفاق می‌افتاد، شهر سنت پترزبورگ را ویران می‌نمود. حدود ساعت هفت و چهارده دقیقه صبح به وقت محلی، بومیان منطقه و ساکنان روسی تبار



شکل ۸-۲: خرابی به دنبال برخورد تونگوسکا.

در تپه‌های شمال غربی دریاچه بایکال<sup>۳۰</sup>، ستونی از نور آبی را، تقریباً به روشنایی خورشید، مشاهده کردند که در پهنه آسمان حرکت می‌کرد؛ و حدود ۱۰ دقیقه بعد، یک نور شدید و صدایی شبیه به شبیه به آتش توپخانه ملاحظه شد. یک موج ضربه صداها را همراهی می‌کرد. این موج توانست مردم را به زمین زده، پنجره‌ها را تا صدها کیلومتر دورتر بشکند. ایستگاه‌های لرزه‌نگاری در سراسر روسیه، انفجاری معادل ۵ ریشتر را ثبت کردند. به دنبال برخورد، ذرات یخی که در دمای فوق‌العاده سرد در لایه‌های بالایی جو تشکیل شده بود، میزان روشنایی را هنگام غروب و سپیده دم افزایش داد، طوری که لندن‌ها می‌توانستند با آن نور روزنامه بخوانند!<sup>۳۱</sup>

### گزارش یک شاهد عینی

در زمان صبحانه، کنار خانه در پست تجاری واناوارا<sup>۳۲</sup> رو به شمال نشسته بودم. ناگهان درست در سمت شمال، روی جاده تونگوسکا، دیدم آسمان دو نیم شد و آتش گسترده‌ای جنگل را فراگرفت. شکاف آسمان بزرگ‌تر شد و آتش تمام سمت شمال را پوشاند. در آن لحظه آن چنان داغ شدم که نمی‌توانستم تحمل کنم، گویی لباسم آتش گرفته بود. از سمت شمال، جایی که آتش وجود داشت، گرمای شدیدی می‌آمد. من خواستم لباسم را پاره کنم و دور بیندازم، اما در آن هنگام آسمان بسته شد، و صدای مهیبی به گوش رسید. من چند متر پرتاب شدم و برای لحظه‌ای از هوش رفتم، اما همسرم بیرون دوید و من را به خانه هدایت کرد. پس از آن چنان صدایی آمد، گویی صخره‌ها فرومی‌ریختند یا توپخانه در حال آتش بود. زمین می‌لرزید، و از ترس سرم را پایین گرفته بودم، نکند سنگ به آن برخورد کند. وقتی که آسمان باز شد، باد داغ بین خانه‌ها وزیدن گرفت، گویی از توپ‌ها می‌آمد، و روی زمین اثر آن مانند جاده باقی ماند. باد داغ به محصولات آسیب رساند. بعداً دیدیم که بسیاری از پنجره‌ها خرد شده بود، و در آغل، قسمتی از قفل آهنی شکسته بود.

در زمان برخورد، کنجکاو علمی کمی درباره آن وجود داشت؛ شاید به دلیل دورافتاده بودن منطقه تونگوسکا، و هر سابقه و سندی از هیئت‌های نخستین اعزامی به محل نیز احتمالاً در جریان جنگ جهانی اول، انقلاب سال ۱۹۱۷ روسیه و جنگ داخلی روسیه، مفقود شده است. در سال ۱۹۲۱، معدن‌شناس روسی لئونید کولیک<sup>۳۳</sup> در حین مأموریت به همراه گروه تحقیقاتی متعلق

به فرهنگستان علوم شوروی، از بستر رودخانه تونگوسکا دیدن کرد و از توضیحات محلی به این نتیجه رسید که عامل انفجار، برخورد یک شهاب سنگ غول پیکر بوده است. گروه بار دیگر در سال ۱۹۲۷ بازگشت و بالاخره به محل برخورد رسید. آن‌ها در کمال تعجب نتوانستند دهانه‌ای بیابند و در عوض، با منطقه‌ای روبرو شدند به عرض ۸ کیلومتر که از تنه سوخته درختان پوشیده شده بود. در فاصله‌های دورتر، درختان در جهت دور از مرکز به زمین افتاده بودند. دانشمندان در دهه ۱۹۶۰ دریافتند که منطقه‌ای به شکل پروانه به عرض ۷۰ km و طول ۵۵ km تسطیح شده بود، اما همچنان خبری از دهانه نبود. آن‌ها توانستند کره‌های ریزی را از سیلیکات و سنگ آهن مغناطیسی، شامل درصد بالایی از نیکل نسبت به آهن، کشف کنند، و به این نتیجه رسیدند که آن کره‌ها منشأ فرازمینی دارند، چراکه در شهاب سنگ‌ها یافت می‌شوند. به علاوه، باتلاق‌هایی که در جای جای منطقه به چشم می‌خورد، به صورتی غیرمعمول حاوی نسبت بالایی از ایریدیوم است، شبیه به لایه ایریدیومی که در مرز K-Pg یافت شد. دانشمندان بر این باورند که این ناشی از خرده‌های جسم برخوردکننده‌ای است که در باتلاق‌ها رسوب کرده است.

در یک سری آزمایش، با استفاده از جنگل‌های مدل (چوب کبریت به جای درخت) و مواد منفجره کوچک که بر روی سیم‌هایی به سمت پایین لغزنده می‌شدند، الگوهای انفجاری به شکل پروانه پدید می‌آمد که به صورت خیره‌کننده‌ای به الگوهای یافت شده در محل تونگوسکا شباهت داشت. از این آزمایش‌ها چنین برمی‌آید که جسم با زاویه ۳۰ درجه نسبت به زمین نزدیک شده، در هوا منفجر شده بود.

جدال بر سر اینکه جسم تونگوسکا یک شهاب سنگ بود یا پاره کوچکی از دنباله‌دار (که در این صورت هیچ نشانی از خود باقی نمی‌گذاشت) همچنان ادامه دارد. یک منشأ دنباله‌دار می‌توانست آسمان برافروخته در ابتدای شب را که تا چندی پس از برخورد در سراسر اروپا مشاهده شد، توضیح دهد.<sup>۳۴</sup> شاید پاره‌ای از دنباله‌دار کوتاه دوره‌انکه<sup>۳۵</sup> بود، که مسئول بارش شهابی بتا تور<sup>۳۶</sup> است؛ زمان و راستای تقرب آن، با این فرضیه سازگار است. برخی چنین استدلال می‌کنند که یک جسم با منشأ دنباله‌دار نمی‌تواند تا این حد به زمین نزدیک شود، اما دیگران اظهار می‌دارند که آن جسم، یک دنباله‌دار مرده بود با پوششی از یک گوشته سنگی، و همین گوشته امکان ورود به جو را برای دنباله‌دار فراهم کرد. در حمایت از نظر مخالف، رزینی که از مغز درختان در ناحیه برخورد استخراج

شده بود، حاوی سطح بالایی از موادی بود که معمولاً در سیارک‌های صخره‌ای یافت می‌شود و در دنباله‌دارها کمیاب است. در ژوئن ۲۰۰۷ اعلان شد که دانشمندی از دانشگاه بولونیا<sup>۳۷</sup> دریاچه‌ای را در منطقه تونگوسکا به عنوان یک دهانه احتمالی ناشی از رویداد تونگوسکا شناسایی کرده‌اند. آن‌ها منکر این نیستند که جسم تونگوسکا در هوا منفجر شد، بلکه اعتقاد دارند یک پاره یک متری از انفجار سالم باقی ماند و به زمین برخورد کرد. هنوز جروبحث ادامه دارد!

زمین پیوسته در معرض بمباران شهاب سنگ‌هایی است که معمولاً با سرعت بیش از ۱۰ km/s حرکت می‌کنند. بیشتر آن‌ها کوچک‌اند، اما گاهی یک بزرگ‌تر هم وارد می‌شود. به دلیل گرمایی که در حین عبور در میان جو تولید می‌گردد، بیشتر آن‌ها قبل از رسیدن به زمین می‌سوزند. به نظر می‌رسد شهاب سنگ‌های سنگی با قطر تقریبی ۱۰ متر، در هر سال یک بار انفجاری را در قسمت‌های بالایی جو تولید می‌کنند که قدرت آن به ۲۰ کیلو تن تی‌ان‌تی می‌رسد. اما رویدادهایی در محدوده مگاتن، مانند تونگوسکا، بسیار نادرتر است، شاید در هر ۳۰۰ سال یک بار.

### چند رویداد معاصر

در ۱۰ اوت ۱۹۷۲، شهابی که به «آذرگوی روزگاهی کبیر ۱۹۷۲»<sup>۳۸</sup> معروف شد، بر روی کوه‌های راکی در حال حرکت به سمت شمال، از آمریکا به کانادا، دیده شد. یک شهاب سنگ زمین خراش<sup>۳۹</sup> بود که از فاصله ۵۷ کیلومتری سطح زمین عبور کرد. بسیاری عبور آن را در جو دیدند، و یک جهانگرد در پارک ملی بزرگ تیتون در ایالت وایومینگ توانست با یک دوربین ۸ میلی متری از آن فیلم رنگی بگیرد.

در ۲۳ مارس ۱۹۸۹، یک سیارک آپولویی<sup>۴۰</sup> با قطر ۳۰۰ متر، موسوم به آسکلپیوس<sup>۴۱</sup> ۴۵۸۱، از ۷۰۰٫۰۰۰ کیلومتری زمین گذشت، و دقیقاً از جایی عبور کرد که زمین شش ساعت قبل در آنجا بود. اگر سیارک به زمین برخورد می‌کرد، بزرگ‌ترین انفجار در تاریخ ثبت شده را به وجود می‌آورد، هزاران بار پر قدرت تر از قوی ترین بمب هسته‌ای که بشر منفجر کرده است.

در ۶ ژوئن سال ۲۰۰۲، جسمی با قطر تخمینی ۱۰ متر وارد جو زمین بر روی دریای مدیترانه شد (بین یونان و لیبی) و در هوا منفجر گردید. انرژی آزاد شده معادل ۲۶ کیلو تن تی‌ان‌تی برآورد شد، یعنی چیزی قابل مقایسه با یک سلاح هسته‌ای کوچک.

در ۱۸ مارس ۲۰۰۴، یک سیارک ۳۰ متری، موسوم به ۲۰۰۴FH، تنها از فاصله ۴۲/۶۰۰ کیلومتری زمین عبور کرد، یعنی حدود یک دهم فاصله ماه. این نزدیک‌ترین عبور سیارک بود که مشاهده می‌شد. عقیده بر این است که سیارک‌های مشابه، هر دو سال به این فاصله از زمین نزدیک می‌شوند.

در ۵ اکتبر ۲۰۰۸، دانشمندان بر اساس محاسبات متوجه شدند که یک سیارک نزدیک زمین که تازه کشف شده بود، موسوم به ۲۰۰۸TC۳، در ۶ اکتبر روی سودان به زمین برخورد می‌کند، ساعت ۵:۴۶ صبح به وقت محلی. سیارک درست مطابق پیش‌بینی وارد جو شد، و این نخستین دفعه بود که یک برخورد سیارکی به زمین به درستی پیش‌بینی می‌گردید. ورود جسم به جو زمین بالای سودان شمالی با سرعت  $12/8 \text{ km/s}$  مورد تأیید قرار گرفت، و مسیر آن در سطحی وسیع و از هواپیما رصد شد. در جستجوی قطعات سیارک ۲۰۰۸TC۳، دانشجویان، اساتید و دیگر کارکنان دانشگاه خارطوم به خط شدند و صحرا را تفحص کردند. تاکنون ۲۸۰ قطعه شهاب‌سنگ، مجموعاً به وزن پنج کیلوگرم یافت شده است.

### شهاب چیلیابینسک<sup>۴۲</sup>

در ۱۵ فوریه ۲۰۱۳، یک سیارک نزدیک زمین، بالای روسیه وارد جو زمین شد. سرعت ورود آن  $18/6 \text{ km/s}$ ، تقریباً ۶۰ برابر سرعت صوت، برآورد گردید. نور ناشی از شهاب از خورشید روشن‌تر بود و در سطح وسیعی از منطقه مشاهده شد. شاهدان عینی یک گرمای شدید را نیز از آذرگویی احساس کردند.

سیارک بالای استان چیلیابینسک در هوا و در ارتفاع تقریبی  $23/3$  کیلومتری منفجر شد و موج ضربه قدرتمندی تولید کرد. خوشبختانه قسمت اعظم موج ضربه در هوا جذب گردید، هرچند حدود ۷۲۰۰ خانه در شش شهر از موج انفجار صدمه خورد. جراحات حدود ۱۵۰۰ نفر در حدی بود که به خدمات پزشکی نیاز داشتند—عمدتاً بر اثر شکستن شیشه پنجره‌ها، زمانی که موج ضربه حدود دو دقیقه پس از انفجار رسید و شیشه‌ها را به داخل پرت کرد. عقیده بر این است که انرژی در این انفجار هوایی تقریباً معادل ۵۰۰ کیلوتن تی‌ان‌تی بود. صدای ناشی از انفجار چندین بار در سراسر جهان پیچید و یک روز طول کشید تا فروکش کند. جالب‌توجه اینکه تعداد قابل توجهی از

دوربین‌هایی که امروزه بسیاری از روس‌ها در خودرو خود از آن استفاده می‌کنند توانستند عبور شهاب را ثبت کنند. این تصاویر نشان داد که شهاب از جنوب شرقی نزدیک شد و حدود ۴۰ کیلومتر جنوب چیلیابینسک مرکزی، در ارتفاع ۳/۲۳ کیلومتری بالای کورکینو<sup>۴۳</sup> منفجر گردید. تکه‌های شهاب در جهت دریاچه چبارکول<sup>۴۴</sup> به حرکت خود ادامه دادند.

تصور بر این است که اندازه شهاب بین ۱۷ تا ۲۰ متر بود، و حدود ۱۲٫۰۰۰ تن وزن داشت (سنگین‌تر از برج ایفل) و بزرگ‌ترین جسم طبیعی شناخته شده‌ای بود که از زمان رویداد تونگوسکا در سال ۱۹۰۸ وارد جو زمین می‌شد. در چند روز پس از این حادثه، تکه‌هایی از این جسم در بیش از ۲۵۰ نقطه کشف شد، و مهم اینکه حفره‌ای به قطر شش متر در یخ موجود بر سطح منجمد دریاچه چبارکول یافت گردید. تصویربرداری مغناطیسی که بعداً انجام شد یک شهاب‌سنگ به قطر ۶۰ سانتیمتر را در گل‌ولای بستر دریاچه شناسایی کرد. این قطعه را در ۱۶ اکتبر ۲۰۱۳ بالا کشیدند، و با وزن ۶۵۴ kg، کج شده، به ترازوهای وزن‌کشی آسیب رساند و به سه تکه تقسیم شد.

### ۳-۸ دنباله‌داری که به مشتری برخورد کرد

یوجین شومیکر یک زمین‌شناس تیزهوش بود و در اوایل دهه ۱۹۷۰ امید داشت که یک فضاانورد شده، به ماه سفر کند. اما به دلیل شرایط پزشکی کنار گذاشته شد. او در چند مأموریت فضایی آمریکا درگیر بود، از جمله مأموریت‌های آپولو، که در آن‌ها به آموزش فضاانوردان پیرامون ساختار دهانه‌های ماه پرداخت. شاید بتوان شومیکر را نخستین فردی دانست که دانشمندان و عامه مردم را متوجه خطر برخورد سیارک یا دنباله‌دار به زمین کرد.

او و همسرش کارولین -یک گروه بزرگ که بعداً دیوید لوی<sup>۴۵</sup> نیز به آن پیوست- حدود ۸۰۰ سیارک و ۲۰ دنباله‌دار را کشف کردند. در شب ۲۴ مارس ۱۹۹۳، آن‌ها عکسی گرفتند که چیزی شبیه به یک دنباله‌دار را نشان می‌داد که دارای چند هسته بود. از نزدیکی و حرکت این قطعات چنین برمی‌آمد که به سیاره مشتری مربوط می‌شدند. وجود این جسم به زودی از طرف جیمز اسکوتی، عضو برنامه مراقبت فضا در دانشگاه آریزونا، مورد تأیید قرار گرفت و نام شومیکر-لوی ۹ (SL9) بر آن نهاده شد، چراکه نهمین دنباله‌دار کوتاه‌دوره‌ای بود که این گروه در حین جستجو به دنبال اجسام نزدیک زمین (NEO) کشف می‌کردند.

مشاهدات بعدی نشان داد که این جسم به جای گردش به دور خورشید، در یک مدار بسیار کشیده و با دوره تناوب حدود دو سال، مشتری را دور می‌زد. به نظر می‌رسید در اواخر دهه ۱۹۶۰ یا اوایل دهه ۱۹۷۰، مشتری آن را از مسیر اولیه‌اش به دور خورشید منحرف کرده، به چنگ خود انداخته بود، و دنباله‌دار عملاً یک قمر موقت برای مشتری شده بود. محاسبات نشان می‌داد که در ۷ ژوئیه ۱۹۹۲، به فاصله ۴۰,۰۰۰ کیلومتری از قله ابرهای مشتری وارد شده بود. این فاصله در محدوده‌ای است که حد روش<sup>۴۶</sup> سیاره نام دارد، که در آن، نیروهای کشندی می‌تواند یک جسم را متلاشی کند. در نتیجه، هسته دنباله‌دار به ۲۳ پاره خرد شده بود. این پاره‌ها از A تا W برچسب خوردند. آن‌ها، با مداری اندکی متفاوت از یکدیگر، پشت سر هم قطار شده بودند و به تدریج از هم فاصله می‌گرفتند. اندازه قطعاتی که قابل رؤیت بود از چند صد متر تا چند کیلومتر برآورد می‌شد، و از این رو قطر دنباله‌دار اولیه را تا ۵ km حدس می‌زدند.

پس از تعیین دقیق مدار این قطعات، معلوم شد که آن‌ها در ژوئیه سال بعد و در مدت پنج روز به مشتری برخورد خواهند کرد - قطار هسته‌ها در مدت پنج روز، جو مشتری را بمباران خواهند کرد. طبیعی است که این ماجرا هیجان زیادی را پدید آورد، چراکه ستاره‌شناسان تا پیش از آن هرگز تصادم اجسام منظومه شمسی را ندیده بودند. این فرصتی را برای دانشمندان فراهم می‌کرد که به درون جو مشتری نگاه کنند، زیرا انتظار می‌رفت این برخوردها، مواد را از لایه‌هایی که معمولاً در زیر ابرها مخفی هستند به بیرون پرتاب کند.

معلوم شد که محل برخورد درست در آن طرف لبه مشتری واقع خواهد شد، و از این رو در دید مستقیم زمین نخواهد بود. اما چرخش مشتری، پس از مدت کوتاهی، آثار برخوردها را بر چهره آن ظاهر می‌ساخت. با وجود این، فضایی گالیله در مسیر خود جهت کاوش مشتری، می‌توانست برخوردها را در هنگام وقوع مشاهده کند. تلسکوپ فضایی هابل بر روی مشتری تنظیم شد، به امید رصد ستونی از مواد که انتظار می‌رفت تا بالاتر از قله ابرها صعود کند، و شاید از ورای لبه مشتری قابل رؤیت بود.

نخستین برخورد در ساعت ۲۰:۱۳ به وقت جهانی در ۱۶ ژوئیه ۱۹۹۴ اتفاق افتاد، و آن زمانی بود که قطعه A با سرعت حدود ۶۰ km/s خود را به نیم کره جنوبی مشتری کوبید. تجهیزات گالیله یک آذرگویی را تشخیص دادند که دمای آن به حدود ۲۴۰,۰۰۰ K می‌رسید، در حالی که دما

نوفاً در قله ابرهای مشتری حدود  $130\text{ K}$  است. سپس این آذرگویی منبسط شد و به سرعت تا دمای  $1500\text{ K}$  سرد گردید. ستون ناشی از این آذرگویی سریعاً خود را به ارتفاعی بیش از  $3700\text{ km}$  رساند و تلسکوپ هابل توانست آن را رصد کند.

ستاره‌شناسان از قبل توقع دیدن آذرگویی‌های ناشی از برخوردها را داشتند، اما نمی‌دانستند پدیده‌های جوئی که از این برخوردها پیش می‌آید، از زمین چگونه دیده خواهد شد. رصدگران اندکی پس از نخستین برخورد، لکه تیره عظیمی را دیدند. این لکه حتی در تلسکوپ‌های خیلی کوچک نیز قابل رؤیت بود، و پهنای آن به حدود  $6000\text{ km}$  می‌رسید (برابر با شعاع زمین). در مدت شش روز پس از این، ۲۱ برخورد مجزا مشاهده شد. بزرگ‌ترین آن‌ها، که ناشی از برخورد قطعه G در ۱۸ ژوئیه بود، لکه تیره عظیمی به عرض  $12000\text{ km}$  را به وجود آورد (شکل ۸-۳). برآورد می‌شود که انرژی آزادشده از این برخورد معادل  $6,000,000$  مگاتن تی‌ان‌تی بود (۶۰۰ برابر زرادخانه هسته‌ای جهان).

امید اینکه این برخوردها بتواند اطلاعات بیشتری را پیرامون جو مشتری در اختیار ما قرار دهد، از مطالعات طیف‌نمودی<sup>۴۷</sup> برآورده شد. این مطالعات، خطوط جذبی در طیف مشتری ناشی از گوگرد دواتمی ( $S_2$ ) و دی‌سولفید کربن ( $CS_2$ ) را آشکار ساخت؛ و این نخستین بار بود که این دو



شکل ۸-۳: تصویر تلسکوپ فضایی هابل از محل برخورد قطعات F و G

که مانند یک جفت چشم بر سطح مشتری به نظر می‌رسند.



در مشتری کشف می‌شد، و تنها مرتبه دوم از کشف  $S_p$  در یک جسم نجومی به حساب می‌آمد. دیگر مولکول‌های کشف شده عبارت بودند از آمونیاک ( $NH_3$ ) و سولفید هیدروژن ( $H_2S$ )، اما در کمال تعجب برای ستاره‌شناسان، مولکول‌های حامل اکسیژن، از قبیل دی‌اکسید گوگرد ( $SO_2$ ) شناسایی نشد. مقدار آبی نیز که مورد شناسایی قرار گرفت کمتر از پیش‌بینی بود، و این می‌توانست دو دلیل داشته باشد: لایه آبی که تصور می‌شد زیر ابرها وجود داشته باشد نازک‌تر از حد پیش‌بینی شده بود، و یا اینکه، قطعات دنباله‌دار به اندازه کافی نفوذ نکردند.

برخورد شومیکر-لوی ۹، نقش مشتری را به‌عنوان یک جاروی مکنده کیهانی برای منظومه شمسی درونی پررنگ کرد. جاذبه گرانشی قوی مشتری باعث می‌شود که بسیاری از دنباله‌دارها و سیارک‌های کوچک به آن برخورد کنند. اگر مشتری وجود نداشت، احتمال برخورد در سیارات درونی منظومه شمسی بسیار بیشتر بود. بدون مشتری، رویدادهای انقراض، مانند آنچه ۶۵ میلیون سال قبل در پایان دوره کرتاسه رخ داد، بسیار متداول‌تر بود و چه بسا امکان رشد و تکامل حیات هوشمند در زمین فراهم نمی‌آمد!

#### ۸-۴ برخوردهای اخیر در مشتری

لکه برخوردها بر مشتری تا ماه‌ها به‌سادگی قابل رؤیت بود، لذا مشاهدات قدیمی مشتری مورد بازبینی قرار گرفت شاید چنین رویدادی قبلاً نیز اتفاق افتاده باشد، اما چیزی یافت نشد. با وجود این، رویدادهایی از این دست باید در گذشته منظومه شمسی واقع شده باشد، و شواهد آن در مشاهدات فضایی و دیگر از سلسله دهانه‌ها بر سطح گانیمد (سه) و کالیستو (سیزده) یافت شد.

با توجه به کثرت منجمان غیرحرفه‌ای که امروزه به رصد مشتری مشغول‌اند (و اغلب با استفاده از یک شیوه مخصوص در عکس‌برداری<sup>۴۸</sup>، تا حد زیادی تأثیر جو زمین را حذف می‌کنند) در سال‌های اخیر چندین برخورد ثبت شده است.

در ۱۹ ژوئیه ۲۰۰۹، آنتونی وسلی<sup>۴۹</sup> برخوردی را که منجر به یک لکه سیاه بر جو مشتری شد رصد کرد، و نخستین کسی بود که آن را گزارش نمود. از مشاهداتی که به وسیله تلسکوپ هابل صورت پذیرفت چنین برمی‌آید که حادثه رصد شده، حاصل برخورد یک سیارک به قطر تقریباً ۵۰۰ m بوده است.

در ۱۰ سپتامبر ۲۰۱۲ در ساعت ۱۱:۳۵ به وقت جهانی، ستاره‌شناس غیرحرفه‌ای دان پترسون، با استفاده از تلسکوپ ۱۲ اینچی<sup>۵۰</sup> خود، به صورت دیداری، یک آذرگویی را بر مشتری شناسایی کرد که یکی دو ثانیه دوام آورد. جرج هال نیز در حال فیلم‌برداری از مشتری بود و به طور اتفاقی توانست یک بُرش چهارثانیه‌ای از برخورد را ضبط کند. بر اساس برآورد، شهاب‌سنگی با قطر کمتر از ۱۰ m این آذرگویی را به وجود آورده بود. در هر سال، ممکن است چندین برخورد با این اندازه در مشتری رخ دهد. برخورد ۲۰۱۲، شصتمین برخورد رصدشده بر مشتری، و چهارمین برخورد بر مشتری بود که بین سال‌های ۲۰۰۹ تا ۲۰۱۲ دیده می‌شد.

اما این داستان پایان غمناک و تلخی دارد. در سال ۱۹۹۷، یوجین شومیکر در یک سفر سالانه در جستجوی دهانه‌های سیارکی به استرالیا رفته بود، و آنجا در سن ۶۹ سالگی بر اثر حادثهٔ رانندگی کشته شد. اندکی از خاکستروی در شیشهٔ کوچکی به همراه فضاییمای لوناپروسپکتور<sup>۵۱</sup> به فضا فرستاده شد، و هم‌اکنون همراه با فضاییما بر روی ماه آرام گرفته است. اطراف اتاقک فضاییما، بر ورقی از آلیاژ برنج، تصویر دنباله‌دار هیل-باپ، تصویر دهانهٔ شومیکر در آریزونای شمالی، و قطعه‌ای از رومئو و ژولیت، اثر ویلیام شکسپیر، حک شده است.

## ۸-۵ اجسام نزدیک زمین (NEOs): کشف آن‌ها و تهدید بالقوه برای زمین

این‌ها اجسامی هستند که دور خورشید، که مدارشان آن‌ها را به فاصلهٔ  $1/3$  AU از خورشید نزدیک می‌کند؛ و این در حالی است که بسیاری از این مدارها، مدار زمین را قطع می‌نماید. بخش اعظمی از آن‌ها سیارک هستند<sup>۵۲</sup>، اما تعدادی نیز دنباله‌دارهای مردهٔ کوتاه‌دوره می‌باشند. تا بهار ۲۰۱۳، ۹۶۸۳ جسم نزدیک زمین (NEO) کشف شده بود، که ۹۳ عدد از آن‌ها دنباله‌دار، و مابقی سیارک بودند. قطر آن‌ها از حدود ۵۰ متر تا ۳۲ کیلومتر (گانیمد ۱۰۳۶) متغیر است. دومین آن‌ها از لحاظ بزرگی، اروس ۴۳۳ است که مقصد مأموریت نیبیر<sup>۵۳</sup> (NEAR) در سال ۲۰۰۰ بود. تعداد سیارک‌های نزدیک زمین با قطر بیش از یک کیلومتر بین ۵۰۰ تا ۱۰۰۰ عدد برآورد می‌شود. این سیارک‌ها تنها چند میلیون سال در مدار خود دوام می‌آورند، و یکی از این عواقب محتوم در انتظار آن‌هاست:

به سیارات داخلی برخورد می‌کنند؛

به دلیل تقرب نزدیک به سیاره، از منظومه شمسی به بیرون پرت می‌شوند؛

یا اینکه به درون خورشید سقوط می‌نمایند. با توجه به مطلب بالا، این طور می‌توان تعداد سیارک‌های نزدیک به زمین را که در حال حاضر مشاهده می‌شوند توجیه کرد که آن‌ها، تحت تأثیر پدیده‌های گرانشی مشتری، از مدار خود در کمربند سیارکی بین مریخ و مشتری منحرف می‌شوند، و بدین ترتیب همواره ذخیره‌ای از سیارک‌های نزدیک زمین وجود دارد.

کم‌وبیش در هر صدسال، انتظار می‌رود سیارکی آهنی یا صخره‌ای بزرگ‌تر از حدود ۵۰ متر به سطح زمین برخورد کند و حادثه‌ای محلی را به بار آورد، یا اینکه امواج کشندی تولید نماید. در هر صد هزار سال، انتظار داریم سیارکی بزرگ‌تر از یک کیلومتر به زمین اصابت کرده، مصیبت‌هایی عالم‌گیر همچون حادثهٔ چیکشلوب را موجب شود. عواقب آشکار برخوردهای دنباله‌دار شومیکر-لوی ۹ بر مشتری، دولت‌ها را نسبت به تهدیدهای احتمالی برای زمین هوشیار نمود؛ از این رو برنامه‌هایی بنیان نهاده شد تا به کشف اجسام نزدیک به زمین پرداخته، اندازه و مسیر حرکتشان را در آینده مشخص کند، و بدین ترتیب هر تهدید بالقوه مورد ارزیابی قرار گیرد.

### برنامه‌هایی برای شناسایی اجسام نزدیک زمین

#### پروژه لی‌نییر<sup>۵۴</sup> (LINEAR)

برنامهٔ لی‌نییر در سال ۱۹۹۶، و در ابتدا با استفاده از یک تلسکوپ که برای رصد ماهواره‌های اطراف زمین طراحی شده بود، آغاز گردید. این برنامه هم‌اکنون از دو تلسکوپ یک متری و یک تلسکوپ نیم متری در سوکورو واقع در نیومکزیکو<sup>۵۵</sup> سود می‌برد. تا سال ۲۰۰۴، سالانه ده‌ها هزار جسم را کشف می‌کرد، و ۶۰٪ کشف‌های جدید سیارکی را به خود اختصاص می‌داد. دوربین از یک آرایهٔ بزرگ سی‌سی‌دی<sup>۵۶</sup> برای مشاهدهٔ میدان دید دودرجه‌ای تلسکوپ استفاده می‌کند. هر شب می‌توان منطقهٔ وسیعی از آسمان را رصد کرد؛ بدین ترتیب که هر ناحیهٔ هدف در آسمان، در هر شب پنج بار مورد مشاهده قرار می‌گیرد. این جستجو عمدتاً در امتداد دایرهٔ البروج (صفحهٔ منظومه شمسی) است، جایی که انتظار می‌رود بیشترین اجسام نزدیک زمین یافت شود.

#### ردیابی سیارک‌های نزدیک زمین<sup>۵۷</sup> (NEAT)

این پروژه از یک تلسکوپ ۱/۲ متری در مائوئی هاوایی استفاده می‌کرد. مشاهدات در دسامبر

۱۹۹۹ آغاز شد و هر ماه در شش شب قبل از ماه نو صورت می گرفت. نتیجه هر نوبت مشاهده ۱۰ ساعته، ۱۵ مگابایت اطلاعات بود (فشرده شده ۲۶ گیگابایت!) که برای تجزیه و تحلیل به آزمایشگاه پیشرفته جت<sup>۵۸</sup> (JPL) منتقل می شد. اجسام شناسایی شده فوراً از طریق «مرکز خرده سیارک<sup>۵۹</sup>» به جوامع رصدی در سراسر جهان گزارش می گردید.

### مراقبت فضایی

پروژه مراقبت فضایی<sup>۶۰</sup>، که آغاز آن به سال ۱۹۸۰ بازمی گردد، از یک تلسکوپ ۰/۹ متری در رصدخانه قله کیت در آریزونا<sup>۶۱</sup> برای شکار اجسام نزدیک زمین استفاده می کند. اخیراً این پروژه یک تلسکوپ ۱/۸ متری را در اختیار گرفته (در همان رصدخانه) که امکان کاوش در ۰/۷ قدر ضعیف تر را نیز فراهم می سازد. تلسکوپ ۰/۹ متری با یک پاره چین<sup>۶۲</sup> از سی سی دی ارتقا یافته است که این توانایی را به تلسکوپ می دهد تا آسمان را دست کم شش بار سریع تر پوشش دهد. بدین ترتیب نرخ شناسایی سیارک هایی که به زمین نزدیک می شوند به حدود ۳۰۰ سیارک در سال افزایش یافته است.

### پاسگان فضایی

«پاسگان فضایی<sup>۶۳</sup>» عنوان کلی برای این برنامه های به هم مرتبط است که بنا بود ۹۰٪ سیارک های نزدیک زمین با قطر بیش از یک کیلومتر را تا سال ۲۰۰۸ کشف کند. هم اکنون تعداد این سیارک ها از ۹۰۰ فراتر رفته است. اگر جمعیت سیارک های نزدیک زمین با قطر بیش از یک کیلومتر، ۱۰۰۰ باشد (مطابق پیش بینی چندین مطالعه)، تعداد ۹۰۰ به معنی ۹۰٪ آن ها است؛ بنابراین پروژه به هدف خود رسیده است، هرچند از مهلت ۱۰ ساله ای که در حکم سال ۱۹۹۲ از طرف کنگره آمریکا به ناسا داده شده بود، تا حدی طولانی تر شد.

### آینده

هم اکنون ناسا دستور دارد پروژه ای را در ادامه پاسگان فضایی به اجرا درآورد که هدف آن یافتن ۹۰٪ اجسام نزدیک زمین با قطر بیش از ۱۴۰ متر تا پایان سال ۲۰۲۰ است. از آنجاکه این اجسام بسیار کم نورترند، نسل جدیدی از تلسکوپ های خیلی بزرگ تر مورد نیاز خواهد بود. احتمالاً این پروژه از تلسکوپ عظیم<sup>۶۴</sup> LSST نیز بهره خواهد برد. دیگر تلسکوپ های جدید عبارت خواهند بود

از تلسکوپ ۴/۲ متری<sup>۶۵</sup> DCT و تلسکوپ<sup>۶۶</sup> Pan-STARRS.

### چگونه این کار انجام می‌شود؟

غیرممکن است بتوان تنها از یک مشاهده، مدار یک جسم را محاسبه کرد. با یک مشاهده، اطلاعات ناچیزی به دست می‌آید. تنها می‌دانیم که سیارک در یک مخروط قرار دارد که اندازه زاویه‌ای آن مخروط از خطای موقعیت اندازه‌گیری شده به دست می‌آید. با یک رصد دیگر می‌توان یک موقعیت را پیدا کرد، و سه مشاهده یا بیشتر، تعیین تقریبی مدار را ممکن می‌سازد. مادامی که مدار تقریبی یک جسم نزدیک زمین تعیین شد، با استفاده از دو فنّ دیگر می‌توان آن را اصلاح نمود؛ اولاً، علیرغم اینکه رادارهای قوی نمی‌توانند موقعیت دقیق این اجسام را مشخص کنند، می‌توانند سرعت دقیق تقرب یا پسرفت آن‌ها را در اختیار ما قرار دهند، که این یک کمک مهم است؛ و دوماً، می‌توان تصاویر قدیمی و آرشیو را که ممکن است جسم در آن‌ها دیده شود مورد بررسی قرار داد، و اگر دیده شد، موقعیت دقیق آن‌ها در زمانی در گذشته، یک کمک قابل توجه در تعیین دقیق مدار خواهد بود.

### ارزیابی خطر اجسام نزدیک زمین

ستاره‌شناسان با استفاده از دو مقیاس به ارزیابی خطر هر جسم نزدیک زمین می‌پردازند. مقیاس ساده‌تر را مقیاس تورینو<sup>۶۷</sup> می‌نامند، که از اعداد صفر تا ده استفاده می‌کند. رتبه صفر برای حالتی است که یک جسم احتمال بسیار کمی دارد که به زمین برخورد کند، یا کوچک‌تر از آن است که دست‌نخورده به جو زمین نفوذ نماید (بنابراین هیچ خطری ندارد)؛ اما رتبه ده یعنی آنکه تصادم حتمی است، و جسم برخوردکننده آن قدر بزرگ است که بتواند یک فاجعه جهانی را به بار آورد. مقداری که به یک جسم نزدیک زمین اختصاص می‌یابد مبتنی بر احتمال برخورد و انرژی جنبشی<sup>۶۸</sup> آن است. مقیاس پالمو<sup>۶۹</sup> شبیه به همین، اما پیچیده‌تر است.

### مقیاس تورینو

بالاترین رکورد در مقیاس تورینو به یک جسم نزدیک زمین ۲۷۰ متری تعلق دارد به نام آپوفیس<sup>۷۰</sup> که در دسامبر ۲۰۰۴ رتبه ۲ به آن داده شد، و بعداً به ۴ ارتقا یافت. در حال حاضر انتظار

می‌رود که این جسم در جمعه ۱۳ آوریل ۲۰۲۹ از نزدیکی زمین عبور کند، اما چون به هیچ‌عنوان امکان برخورد آن به زمین وجود ندارد، رتبه آن به صفر تنزل یافت. ممکن است در سال ۲۰۲۹ و هنگام گذر از کنار زمین، مدار آن دچار اختلال شود، از این رو چه بسا در آینده رتبه آن افزایش یابد. این نخستین جسم نزدیک زمینی بود که مقدار مقیاس تورینوی آن بالاتر از یک بود. در فوریه ۲۰۰۶، رتبه اختصاص یافته به ۲۰۰۴VD۱۷ در ابتدا عدد ۲ بود، چراکه احتمال می‌رفت در سال ۲۱۰۲ به زمین برخورد کند، اما رصدهای بیشتر دوباره آن را به صفر تنزل داده است. سیارک ۲۰۰۷VK۱۸۴ که در ۱۲ نوامبر ۲۰۰۷ به وسیله پیمایش آسمان کاتالینا<sup>۷۱</sup> کشف شد، دارای رتبه ۱ در مقیاس تورینو است. از مشاهدات چنین برمی‌آید که این سیارک به احتمال یک به ۳۱٫۳۰۰ در ژوئن ۲۰۴۸ به زمین برخورد می‌کند. قطر این سیارک ۱۳۰ متر برآورد شده است، لذا می‌تواند یک تهدید مهم، اما نه جهان‌شمول، برای زمین باشد.

پیش‌بینی‌های برخورد، اغلب خبرسازند! معمولاً مشاهدات اولیه حاکی از احتمال فزاینده برخورد است، اما رصدهای بیشتر این احتمال را به صفر می‌رساند. در ابتدا، زمانی که تنها چند رصد انجام شده است، بیضی خطا<sup>۷۲</sup> اطراف مسیر جسم، بسیار بزرگ است و ممکن است زمین را نیز در برگیرد. این موضوع، به یک احتمال کوچک، اما غیر صفر، برای برخورد منجر می‌شود. رصدهای بعدی، بیضی خطا را تا حد زیادی کوچک می‌کند، اما اگر همچنان شامل زمین باشد، احتمال برخورد را افزایش می‌دهد، چراکه در این وضعیت، زمین درصد بیشتری از ناحیه خطا را می‌پوشاند. در نهایت، همان‌طور که قبلاً گفته شد، رصدهای راداری یا کشف جسم در تصاویر آرشویی، امکان تعیین مدار را با دقت بیشتر فراهم می‌آورد. در این مرحله بیضی خطا کوچک‌تر شده، معمولاً زمین را در بر نمی‌گیرد، لذا احتمال خطا به نزدیک صفر بازمی‌گردد.

در نتیجه، پوشش خبری اغراق‌آمیز از سیارک‌هایی که ممکن است (مبتنی بر تعداد محدودی رصد) به زمین برخورد کند، اغلب مشکل‌آفرین است. معمولاً رصدهای بیشتر نشان می‌دهد که این‌ها تهدید محسوب نمی‌شوند. در حال حاضر، گزارش تهدیدهای احتمالی مدیریت می‌شود تا از هشدارهای اشتباه جلوگیری به عمل آید، و احتمال این وجود دارد که مقیاس تورینو را به نفع مقیاس پالرمو (که دیرفهم‌تر است!) کنار بگذارند. تا نوامبر ۲۰۱۳، سیارک ۲۰۰۷VK۱۸۴ تنها جسم نزدیک زمین است که احتمال برخورد آن در ۱۰۰ سال آینده بالای صفر می‌باشد.<sup>۷۳</sup>

### برای دفع خطر چه کنیم؟

با توجه به اینکه در حال حاضر، تقریباً تمام اجسام نزدیک زمین که بالقوه تهدید به حساب می‌آیند کشف شده‌اند، با احتمال زیاد می‌توان جسمی را که ممکن است در مسیر برخورد باشد، چندین سال زودتر شناسایی کرد. در چنین صورتی، فناوری کنونی ما می‌تواند جهت منحرف کردن و دور نمودن جسم تهدیدکننده از زمین مورد استفاده قرار گیرد. نکته کلیدی برای این کار، ایجاد اختلال در حرکت جسم، هنگامی است که در دورترین فاصله از خورشید قرار دارد. در این نقطه، انرژی جنبشی، سرعت و مهم‌تر از همه تکانه جسم در یک کمینه است و از این رو انرژی کمتری برای تغییر مدار آن مورد نیاز می‌باشد. منفجر کردن جسم درست پیش از برخورد، تنها باعث می‌شود که به جای یک جسم بزرگ، میلیون‌ها جسم کوچک‌تر بر زمین ببارد (به طور گسترده با همان خسارات).

هم زمین و هم جسم برخوردکننده به دور خورشید در گردش‌اند، و یک برخورد تنها زمانی رخ می‌دهد که هر دو در یک زمان به یک نقطه از فضا برسند. زمین با سرعت  $30 \text{ km/s}$  در مدار خود حرکت می‌کند و قطر آن تقریباً  $12,750 \text{ km}$  است؛ بنابراین در مدت اندکی بیش از هفت دقیقه، مسافتی به اندازه قطر خود می‌پیماید. حال اگر بتوانیم عبور جسمی را که به سمت زمین در حرکت است برای مدتی از این مرتبه (بسته به هندسه دو مدار) به پیش یا عقب بیندازیم، آن جسم به زمین برخورد نخواهد کرد. لذا بدیهی است که باید زمان دقیق رسیدن جسم، با این دقت معلوم باشد تا بتوان برخورد را پیش‌بینی کرد، و تشخیص داد چه تغییری در مدار آن ضروری است.

با فرض اینکه یک موشک بتواند به جسم موردنظر، زمانی که از خورشید دور است، برسد، نظرات مختلفی برای ایجاد یک تغییر کوچک در مدار آن وجود دارد. برای مثال، یک بمب هیدروژنی که بالای سطح منفجر شود، نوترون‌های پرسرعتی تولید می‌کند که به مواد روی سطح جسم، قسمتی که رو به انفجار قرار دارد، برخورد خواهند کرد. آنگاه این مواد منبسط شده، به فضا پرت می‌شوند، و بدین ترتیب نیروی مخالفی بر سیارک وارد می‌کنند که اندکی آن را هل می‌دهد و به سمت یک مدار جدید، دور از مسیر زیان‌بار، می‌رانند. نیازی به تغییر زیاد نیست، یک تغییر جزئی در سرعت سیارک سبب می‌شود که سیارک به طور کامل از مسیر زمین کنار برود. توجه داشته باشید

که قرار نیست انفجارها به حدی قوی باشد که جسم را منفجر کند، لذا حتی می‌توان از چند انفجار کوچک در یک دوره زمانی استفاده کرد.

آژانس فضایی اروپا طرح یک مأموریت فضایی را، موسوم به دون کیحوته<sup>۷۴</sup>، آماده می‌کند که تلاش می‌کند تکانه یک جسم نزدیک زمین (NEO) را با یک برخورد ساده تغییر دهد. در مورد تهدید سیارکی محتمل، آپوفیس ۹۹۹۴۲، فضاییمایی به وزن کمتر از یک تن می‌تواند انحراف لازم را در مدار آن به وجود آورد. ایده دیگر استفاده از «کشانه گرانشی»<sup>۷۵</sup> است (شکل ۸-۴)، یک فضاییمای سنگین که روی جسم معلق می‌ماند و از این رو گرانش جسم آن را به سمت خود می‌کشد. با حرکت آرام فضاییمای کشانه در طول چند سال، شاید با استفاده از «پیشراشه یونی»<sup>۷۶</sup>، می‌توان مدار را به اندازه کافی تغییر داد. جذابیت این طرح آن است که بر اجسام چرخان یا آن‌هایی که «توده‌های قله‌سنگی»<sup>۷۷</sup> هستند نیز مؤثر است، چراکه انفجار هسته‌ای ممکن است این اجسام را متلاشی کند. یک ایده زیبایی دیگر، موسوم به «جرم‌ران»<sup>۷۸</sup>، عبارت است از یک دستگاه خودکار بر سیارک، به منظور سوراخ کردن و پرتاب مواد به فضا، و بدین ترتیب تحمیل یک فشار آرام و پیوسته بر جسم، و در همان زمان، کاهش جرم آن. درنهایت، شاید بتوان از فشار تابشی



شکل ۸-۴: «کشانه گرانشی» برای تغییر مدار یک سیارک یا دنباله‌دار که امکان برخورد آن به زمین وجود دارد.



خورشید استفاده کرد؛ بدین صورت که یک بادبان بزرگ خورشیدی بر جسم نصب شود تا فشار ناشی از نور خورشید به تدریج جسم را از مسیر منتهی به تصادم با زمین منحرف نماید.

## ۸-۶ دنباله‌دارها و مشکلات آن‌ها

شکی وجود ندارد که زمانی در آینده، یک دنباله‌دار به زمین برخورد خواهد کرد - البته اصلاً نمی‌دانیم چه موقع. مشکل همین است. در مورد سیارک‌ها، به نظر می‌رسد پس از مدتی می‌توان مدار تمام آن‌هایی را که خطر عمده برای زمین به حساب می‌آیند شناسایی کرد، و از این‌رو سال‌ها قبل از وقوع یک برخورد احتمالی، آن را پیش‌بینی نمود و اقدام مناسب را اتخاذ کرد. در مورد دنباله‌دارهای کوتاه‌دوره نیز که مدارشان قابل اصلاح است همین شرایط حاکم است. اما همواره دنباله‌دارهایی به منظومه شمسی درونی وارد می‌شوند که هرگز پیش از آن رصد نشده‌اند، و به نظر نمی‌رسد ما وقت کافی برای اقدام مقتضی در اختیار داشته باشیم. چنین رویدادی می‌تواند به سادگی پایان تمدن بشری را به دنبال داشته باشد. البته لازم نیست هراسان باشیم. احتمال چنین برخوردی تنها یک بار در حدود هر ۳۰۰ میلیون سال است، و لذا امکان چنین اتفاقی در طول زندگی ما بسیار بسیار ناچیز است.

اما به هر حال این احتمال صفر نیست، و از آنجاکه تصور می‌کنم حیات هوشمند در کهکشان ما بسیار نادر است، و از این‌رو نسل بشر، تقریباً ویژه است، حس می‌کنم باید کاری کرد تا بشر از این عاقبت ناگوار در امان بماند. شاید بتوان دو استراحتگاه زیرزمینی را در دو سوی زمین بنا نمود، و هر مدتی گروهی از نژادهای مختلف در آن‌ها به گذران تعطیلات خود بپردازند. در صورت وقوع یک فاجعه جهانی، انرژی و تدارکات کافی برای تأمین چندین سال آن‌ها وجود خواهد داشت، تا اینکه غبار جو فرو بنشیند، و آن‌ها بتوانند به یک آینده جدید پا بگذارند. آیا این نظر خیلی احمقانه است؟  
و بالاخره؛

یک قاعده ساده در زندگی: دم را غنیمت بشمار!

## پانویسها

- 1 - Impact Crater
- ۲ - Impact Basin؛ دهانه برخوردی بزرگی که در آن چند حلقه کوه هم مرکز وجود دارد. (ف)
- 3 - Mare Depression
- 4 - Eugene M. Shoemaker
- 5 - Meteor Crater
- 6 - Flagstaff in northern Arizona, USA
- 7 - Daniel Barringer
- 8 - Barringer Crater
- ۹ - Canyon Diablo meteorite؛ به معنی شهاب سنگ ژرف دره شیطان.
- 10 - Canyon Diablo, Arizona
- 11 - Eugene M. Shoemaker
- ۱۲ - Stishovite؛ شکلی فوق العاده سخت و چگال از کوارتز که تحت شرایط گرما و فشار بالا به وجود می آید. (مترجم)
- 13 - Nördlinger Ries and Steinheim Crater
- 14 - co-rotating asteroids
- 15 - Ries Crater
- ۱۶ - Deposit. graphite deposit؛ هر نوع ماده موجود در زمین سست یا سخت که بر اثر فرایند یا عاملی طبیعی انباشته شده باشد. (ف)
- ۱۷ - Outcrop؛ بخشی از یک سازند یا ساختار زمین شناختی که در سطح زمین پدیدار می شود. (ف)
- ۱۸ - Tektite moldavite tektite؛ جسمی شیشه ای، کوچک و تیره که تصور می شود محصول برخورد شهاب سنگی باشد. ریشه این واژه یونانی است به معنی مذاب. Moldavite؛ یک تکتایت سبز که در جمهوری چک یافت شده است. (مترجم)
- ۱۹ - Bohemia and Moravia؛ دو منطقه در اروپای مرکزی که هم اکنون در جمهوری چک قرار دارند. (مترجم)
- 20 - Chicxulub Crater
- 21 - Yucatán Peninsula in Mexico
- 22 - Glen Penfield
- ۲۳ - Cretaceous Period؛ دوره ای در زمان بندی زمین شناسی.
- 24 - K-Pg boundary
- 25 - Baptistina family of asteroids
- 26 - carbonaceous chondrites
- 27 - geological record
- ۲۸ - Deccan traps of India؛ یکی از بزرگترین عوارض آتش فشانی بر روی زمین، واقع در فلات دیکن. (مترجم)
- 29 - Tunguska event

30 - Lake Baikal

۳۱- تا چند روز پس از انفجار، آسمان شب در آسیا و اروپا روشن بود. (مترجم)

۳۲- Vanavara Trading Post؛ ۶۵ کیلومتر جنوب انفجار.

33 - Leonid Kulik

۳۴- آسمان برافروخته ناشی از غبار و یخ در دنباله دنباله دار بود که در لایه های بالای جو پراکنده شده بود.

35 - short-period Comet Encke

36 - Beta Taurid meteor shower

37 - University of Bologna

38 - The 1972 Great Daylight Fireball

39 -Earth-grazing meteoroid

۴۰- Apollo asteroid؛ گروهی از سیارک ها که حضيض مداری آن ها درون مدار زمین قرار دارد.

(مترجم)

41 - 4581 Asclepius

42 - Chelyabinsk meteor

43 - Korkino

44 - Lake Chebarkul

45 - David Levy

46 - Roche limit

47 - spectroscopic studies

48 - Lucky imaging

49 - Anthony Wesley

50 - Meade 12-inch LX200 telescope

51 - Lunar Prospector

۵۲- NEAs؛ سیارک های نزدیک زمین.

53 - Near-Earth Asteroid Rendezvous (NEAR)

54 - Lincoln Near-Earth Asteroid Research (LINEAR) project

55 - Socorro in New Mexico

56 - large format CCD array

57 - Near-Earth Asteroid Tracking (NEAT)

58 - Jet Propulsion Laboratory

59 - Minor Planet Center (MPC)

60 - Spacewatch

61 - Kitt Peak Observatory in Arizona

62 - a mosaic of CCDs

63 - Spaceguard

۶۴- Large Synoptic Survey Telescope؛ تلسکوپ بزرگ پیمایش هم دید؛ یک تلسکوپ ۸/۴

متری با میدان دید گسترده، مجهز به یک دوربین ۳۲۰۰ مگاپیکسلی. البته شروع به کار رسمی این تلسکوپ در سال ۲۰۲۲ خواهد بود.

65 - Discovery Channel Telescope

66 - Panoramic Survey Telescope and Rapid Response System

67 - Torino scale

۶۸- انرژی جنبشی را برحسب مگاتن تی ان تی بیان می کنند.

- 69 - Palermo scale
- 70 - 99942 Apophis
- 71 - Catalina Sky Survey
- 72 - error ellipse

۷۳- در مارس ۲۰۱۴ و به دنبال رصدهای بیشتر، احتمال برخورد این سیارک در سال ۲۰۴۸ منتفی شد. از آن تاریخ، رتبه هیچ جسمی در مقیاس تورینو بالاتر از صفر نیست. (مترجم)

۷۴- Don Quijote؛ در فارسی به دون کیشوت معروف است.

- 75 - Gravity Tractor
- 76 - Ion Thruster

۷۷- rubble piles؛ جسمی در ستاره شناسی که یکپارچه نیست، و از چندین قطعه صخره تشکیل شده که تنها بر اثر گرانش بینشان به هم پیوسته اند. (مترجم)

- 78 - Mass Driver

نسخه رایگان

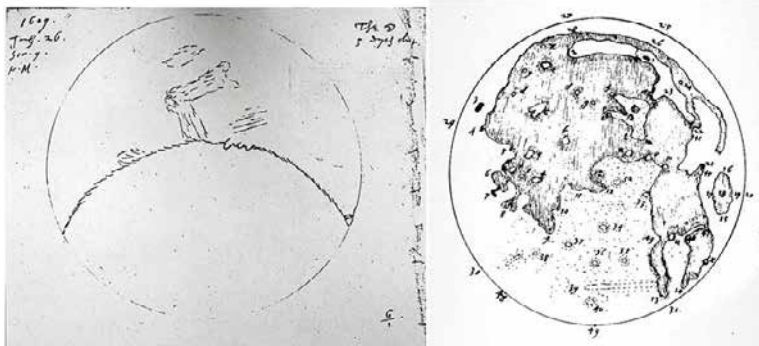
# فصل ۹

## چهارصد سال تلسکوپ

در اکتبر سال ۱۶۰۸، یک عینک‌ساز فلاندري (منطقه‌ای در بلژیک امروزی) به نام هانس لیپرسهای<sup>۱</sup> تقاضای ثبت اختراع تلسکوپ کوچکی را نمود که امکان دیدن اجسام دور را به گونه‌ای فراهم می‌ساخت گویی نزدیک‌اند. آوازه آن به سرعت در سراسر اروپا پیچید، و دیری نپایید که چنین تلسکوپ‌هایی به راحتی در معرض خرید عموم قرار گرفت. در انگلستان، یک ریاضی‌دان به نام توماس هریوت<sup>۲</sup> از یکی از این تلسکوپ‌های کوچک استفاده کرد و آنچه را که نخستین رصد تلسکوپی از ماه را به حساب می‌آید انجام داد. تاریخ نخستین نقاشی‌های ساده (شکل ۹-۱) به ۲۶ ژوئن ۱۶۰۹ بازمی‌گردد، که با یک نقشهٔ تحسین‌برانگیز از ماه دنبال شد. هریوت مشاهدات خود را عمومی نکرد، و در نتیجه، تصور همه آن است که گالیله نخستین کسی بود که با استفاده از تلسکوپ اولین نقاشی‌های نجومی را کشید.

این تلسکوپ کوچک در ژوئن ۱۶۰۹ توجه گالیله را به خود جلب کرد. او به سرعت قواعد حاکم بر تلسکوپ را فهمید و خودش یک تلسکوپ با بزرگنمایی هشت ساخت. گالیله، با سایش عدسی‌های خود و بهینه‌سازی شکل عدسی‌های شیئی، به تدریج بزرگنمایی و کیفیت تصویر تلسکوپ را بهبود بخشید، و رصد آسمان را از پاییز ۱۶۰۹ آغاز کرد. در مارس ۱۶۱۰، او کتاب «پیام‌آور ستارگان»<sup>۳</sup> را منتشر نمود و در آن به تشریح مشاهداتش از ماه و سیارات، به ویژه مشتری و قمرهایش، پرداخت:

در هفتم ژانویهٔ امسال، سال ۱۶۱۰، در ساعت اول شب، زمانی که اجسام آسمان را با تلسکوپ نگاه می‌کردم، مشتری خود را به من عرضه کرد؛ و چون من یک وسیلهٔ بسیار عالی را برای خود مهیا کرده بودم، دریافتم (درحالی‌که پیش از آن به دلیل ضعف تجهیزاتم



شکل ۹-۱: نقشه ماه به وسیله توماس هریوت در ۲۶ ژوئیه ۱۶۰۹ (چپ)

و نقشه بعدی و جالب تروی از ماه کامل.

نمی دانستم) که در کنار سیاره، سه ستاره کوچک، اما خیلی روشن، وجود دارد. گرچه بر این باور بودم که آن‌ها ستاره ثابتی هستند، تا حدی کنجکاو می‌ماندم چراکه به نظر می‌رسید در یک خط کاملاً مستقیم موازی دایرة البروج واقع شده‌اند، و باشکوه‌تر از دیگر هم‌اندازه‌های خود بودند... دو ستاره در سمت شرقی و یکی در غرب بود. ستاره شرقی‌تر و ستاره غربی بزرگ‌تر از دیگری به نظر می‌رسیدند. من توجهی به فاصله بین آن‌ها و مشتری نداشتم، زیرا همان‌طور که گفتم در ابتدا تصور کردم که آن‌ها ستاره‌های ثابت‌اند. اما زمانی که هشتم ژانویه (شب بعد) پس از مدتی که نمی‌دانم صرف چه شد به همین کاوش بازگشتم، آرایش کاملاً متفاوتی را یافتم. هر سه ستاره حالا در غرب مشتری بودند، نزدیک‌تر به هم، و در فاصله مساوی از یکدیگر...

در دهم ژانویه... تنها دو تا از آن‌ها بود، اما حالا در شرق، و سومی (همان‌طور که حدس زدم) پشت مشتری مخفی شده بود... به هیچ روشی نمی‌توانستم چنین آرایشی را به حرکت مشتری نسبت دهم، ضمن اینکه مطمئن بودم این‌ها همان ستاره‌های بودند که رصد کرده بودم... حیرت من حالا به شگفتی تبدیل شده بود. من مطمئن بودم که این تغییرات ظاهری به ستاره‌های مشاهده شده تعلق داشت، نه به مشتری، و تصمیم گرفتم این کاوش را با دقت و توجه بیشتر ادامه دهم...

حالا بدون تردید به این نتیجه رسیده بودم که در آسمان سه سیاره در حال حرکت

اطراف مشتری وجود دارد، مانند زهره و عطارد به دور خورشید، و این در رصدهای بعدی از روز برایم روشن تر شد. سه تا نبودند، بلکه چهار سیاره به دور مشتری گردش می کردند.

گالیله به مشاهدات خود ادامه داد و برخی از آن ها را به صورت رمزی به کیپلر رساند. آن ها عبارت بودند از رصدهای زحل، که «دسته هایی» را نشان می دادند (سامانه حلقوی)؛ و رصدهای زهره، که پس از رمزگشایی می گفت: «مادر عاشقان (زهره) از شکل های ماه تقلید می کند» - گالیله مشاهده کرده بود که زهره دارای اهله است.

همان طور که در فصل یک گفتیم، مهم ترین مشاهدات گالیله مربوط به زهره بود، زیرا ثابت کرد که مدل کپرنیکی منظومه شمسی، و نه بطلمیوسی، صحیح است.

برای تولید تصاویر قابل قبول، طول این تلسکوپ های ساده باید نسبت به قطر عدسی شیئی آن ها خیلی دراز می بود. به همین دلیل این تلسکوپ ها خیلی بدهیکل شدند. مشکل آن است که در یک شیئی که از یک عدسی تک ساخته شده است، کانون در نور آبی و قرمز از کانون در نور سبز فاصله دارد. با استفاده از یک عدسی این چنینی در تلسکوپ و تلاش برای حصول بهترین تصویر (احتمالاً جایی که نور سبز در کانون قرار می گیرد) تصویری با کیفیت به رنگ سبز، روی تصاویری خارج از کانون در نور آبی و قرمز، دیده می شود، و اطراف تصویر را هاله ای ارغوانی می پوشاند. این پدیده را ابیراهی فامی<sup>۴</sup> می نامند.

## ۱-۹ دوتایی بی فام و تلسکوپ های شکستی غول پیکر

با ترکیب یک عدسی دوکوژ از شیشه کراون و یک عدسی تخت-کاو از شیشه فلینت، می توان چیزی را ساخت که دوتایی بی فام<sup>۵</sup> نام دارد - اشاره به اینکه ابیراهی فامی تا حد زیادی برطرف شده است. امتیاز ساخت این عدسی دوتایی ابتدا بنام جان دولاند<sup>۶</sup> در سال ۱۷۵۶ ثبت گردید؛ اما اطمینان داریم که اولین عدسی های بی فام توسط چستر مور هال<sup>۷</sup> در حدود سال ۱۷۳۳ ساخته شد. بدین ترتیب امکان ساخت تلسکوپ های شکستی با عدسی شیئی بسیار بزرگ تر فراهم آمد. این عدسی ها نه تنها نور بیشتری را جمع آوری می کردند و لذا می توانستند اجسام ضعیف تر را آشکار کنند، بلکه همچنین کیفیت عکس یا «توان تفکیک»<sup>۸</sup> تلسکوپ را نیز ارتقاء دادند و از این رو عصر تلسکوپ های شکستی غول پیکر آغاز شد، که در ساخت تلسکوپ پرکز با دهانه ۴۰ اینچ<sup>۹</sup> به اوج

خود رسید.

گرچه از لحاظ تئوری هرچه دهانهٔ تلسکوپ بزرگ‌تر باشد توان تفکیک آن بالاتر است، در عمل توان تفکیک به وسیلهٔ چیزی که «دید»<sup>۱۰</sup> نام دارد محدود می‌شود. جو دارای سلول‌هایی از هوا است که ضریب شکست در آن‌ها اندکی متفاوت است. باد این سلول‌ها را به ارتفاع بالاتر از تلسکوپ می‌برد و آن‌ها تقریباً مانند شیشه‌های مشجر عمل می‌کنند. ستاره یک منبع نقطه‌ای است و از لحاظ تئوری باید تصویری ایجاد کند که دهانهٔ تلسکوپ آن را تعیین می‌نماید (یک قرص مرکزی که حلقه‌هایی ضعیف، موسوم به الگوی ایری<sup>۱۱</sup>، آن را احاطه کرده است). در عمل، تصویر ستاره از دید ناظری در انگلستان، عرضی حدود ۲ تا ۳ ثانیه قوسی داشته، به شدت لرزان است. این یک دلیل است برای اینکه چرا باید تلسکوپ‌های حرفه‌ای روی کوه‌های مرتفع در جزایر، از قبیل لاپالما در اقیانوس اطلس و هاوایی در اقیانوس آرام<sup>۱۲</sup>، یا در ارتفاعات رشته‌کوه آند در شیلی<sup>۱۳</sup> بنا شوند. در این مناطق، هوای بسیار کمتری بالای تلسکوپ است، و به دلیل گذر هوا از روی دریا، معمولاً تلاطم آن کمتر می‌باشد. در بهترین شرایط، «دید» ممکن است توان تفکیک را به نیم ثانیه قوسی محدود کند. از این رو، گرچه تلسکوپی با دهانهٔ بزرگ‌تر قطعاً جزئیات بیشتری را نشان خواهد داد، اما این افزایش برای قطر بیشتر از ۴۰۰ سانتیمتر چندان قابل توجه نیست. بهترین محل برای یک تلسکوپ نوری فضا است، مانند تلسکوپ فضایی هابل؛ جایی که توان تفکیک کامل آن، معادل ۰.۵ ثانیه قوسی در طول موج مرئی، محقق می‌شود. تلاطم جو، و در نتیجه «دید»، از شبی به شب دیگر فرق می‌کند. در دید بد، تصویر ستاره «بادکرده» به چشم می‌آید، و به نظر می‌رسد که ماه در حال جوشیدن است! در چنین شب‌هایی کیفیت تصویر را تماماً جو تعیین می‌کند. اما به ندرت ممکن است جو آرام باشد؛ که در این صورت آنچه شما می‌توانید ببینید به دهانهٔ تلسکوپ، مدل و کیفیت اپتیک آن بستگی خواهد داشت.

زمانی که شکستی‌های غول‌پیکر اصلی‌ترین ابزار نجومی به حساب می‌آمدند، رصدگران علاقه داشتند به مشاهدهٔ ستارگان پیردازند. رصدهای دقیق از ستاره شعرای یمانی (شبهانگ) نشان داد که این ستاره مسیری سینوسی را در آسمان دنبال می‌کند. در سال ۱۸۴۴، ستاره‌شناس آلمانی فردریش بسل<sup>۱۴</sup> فهمید که این حرکت سینوسی باید ناشی از یک ستارهٔ همدم باشد که دور شعرای یمانی می‌گردد. لذا، این مرکز جرم سامانهٔ ستاره‌ای است که یک مسیر خطی را دنبال می‌کند



(موسوم به حرکت ویژه<sup>۱۵</sup> سامانه) و دو ستاره در دو طرف این مرکز جرم نوسان می‌نمایند. با تجزیه و تحلیل مسیر، این امکان فراهم آمد که وجود یک ستاره استنباط گردد؛ ستاره‌ای که حالا شباهنگ ب نام دارد با جرمی تنها ۰/۰۶ خورشید، و دور شباهنگ می‌گردد. این ستاره همدم مستقیماً مشاهده نشده بود، چراکه با توجه به تلسکوپ‌های آن زمان و به دلیل پخش نور در آن‌ها، در تابش شعری ایمانی گم می‌شد. در سال ۱۸۶۲، زمانی که الوَن کلارک<sup>۱۶</sup> با رصد شباهنگ به عنوان یک ستارهٔ آزمون، در حال آزمایش اپتیک تازه در یک تلسکوپ شکستی ۱۸/۵ اینچی بود، برای نخستین بار این ستارهٔ همدم با قدر ۹ را دید. امروزه آن را یک ستاره از نوع کوتوله سفید<sup>۱۷</sup> می‌شناسیم.

یکی از مهم‌ترین مجموعه رصدها با استفاده از یک تلسکوپ شکستی به وسیلهٔ وستو اسلیفر در رصدخانهٔ لوئل انجام شد. در این رصدخانه بود که پرسپیکال لوئل با استفاده از تلسکوپ شکستی ۲۴ اینچی، کانال‌های مریخ را کشیده بود. اسلیفر به رصد طیف‌نمودی<sup>۱۸</sup> از ۲۴ «سحابی سفید<sup>۱۹</sup>» پرداخت و نشان داد که آن‌ها با سرعت زیاد نسبت به کهکشان ما در حرکت بودند. برخی از کهکشان‌های مجاور به سمت ما می‌آمدند (گرانش، به تدریج اعضای گروه کهکشان‌های محلی ما را به رمبش وامی‌دارد، تا در نهایت یک کهکشان غول و بی‌ریخت را تشکیل دهند)، اما بیشتر آن‌ها از ما دور می‌شدند.

تا سال ۱۹۱۵، اسلیفر مقدار جابجایی (در خطوط طیف) ۱۵ کهکشان را اندازه گرفته بود، که یازده عدد از آن‌ها به سمت قرمز گرایش داشت. دو سال بعد، ۶ قرمزگرایی دیگر نیز اندازه‌گیری شده بود، و معلوم گردید که تنها کهکشان‌های نزدیک‌تر (آن‌هایی که در گروه محلی ما قرار دارند) آبی‌گرایی دارند. از جابه‌جایی‌های اندازه‌گیری شده، و با استفاده از رابطهٔ دوپلر، او توانست سرعت تقرب یا دور شدن این کهکشان‌ها را محاسبه کند. خواهیم دید که این اطلاعات توسط ادوین هابل<sup>۲۰</sup>، در آنچه شاید بزرگ‌ترین اکتشاف رصدی قرن گذشته بود، مورد استفاده قرار گرفت و به نظر کمی بی‌انصافی است که اسلیفر مورد توجه بیشتر واقع نشده است.

## ۲-۹ تلسکوپ بازتابی

تلسکوپ نیوتونی به وسیلهٔ اسحاق نیوتون اختراع شد. او اعتقاد داشت که نمی‌توان بر مشکل

ابیراهی فامی، که تلسکوپ‌های شکستی ساده در آن زمان از آن رنج می‌بردند غلبه کرد. متأسفانه تصور نمی‌شود که او رصد نجومی مهمی با آن انجام داده باشد. در این نوع تلسکوپ، آینه اولیه نور را به کانون که در مرکز لوله قرار دارد بازتابش می‌کند. در این قسمت، برای اینکه سرِ ناظر مانعی در مسیر نور نباشد، آینه‌ای تخت قرار دارد که نور را به کنار منعکس می‌نماید و تصویر، درست در خارج از لوله تلسکوپ، در محلی که عدسی چشمی قرار دارد تشکیل می‌شود.

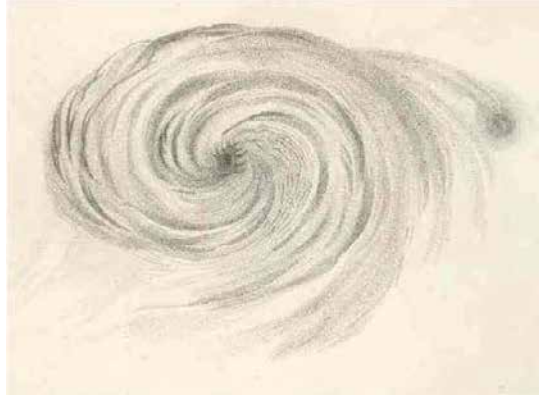
### کشف اورانوس

نخستین کشف بزرگ با استفاده از یک تلسکوپ بازتابی، کشف سیاره اورانوس به وسیله ویلیام هرشل بود که از آلمان به انگلستان آمده بود (در فصل ۵ توضیح داده شد). به زودی مشخص شد که چرا هرشل، برخلاف دیگران، تشخیص داده بود که اورانوس یک سیاره است. مقایسه همزمان با دیگر تلسکوپ‌ها، کیفیت بسیار بالای تصویر را در تلسکوپ هرشل نشان داد. هرشل ثابت کرده بود که یک سازنده توانای تلسکوپ است! حداکثر اندازه زاویه‌ای اورانوس  $4/1$  ثانیه قوسی است، و آن گونه که نویسنده با تلسکوپی عالی، کمی کوچک‌تر از تلسکوپ هرشل، مشاهده کرده است، مانند یک قرص ریز آبی متمایل به سبز به نظر می‌رسد. از این رو اگر تلسکوپ از یک اپتیک خوب برخوردار نباشد، به سختی می‌توان آن را از ستاره تمیز داد.

### ۳-۹ هیولای بیرکاسل<sup>۲۱</sup>

در دهه ۱۸۴۰، ویلیام پارسونز، آینه‌ها، لوله و دیگر لوازم مورد نیاز را برای ساخت یک تلسکوپ بازتابی ۷۲ اینچی، که به مدت سه ربع قرن بزرگ‌ترین تلسکوپ نوری در جهان بود، فراهم کرد. با این وسیله که در محوطه خانه خود در بیرکاسل ایرلند نصب کرده بود، او توانست تصاویر زیبایی از اجسام فضایی رسم نماید. شاید برجسته‌ترین آن‌ها مربوط به جسمی می‌شد که در فهرست مسیه<sup>۲۲</sup> پنجاه و یکم است و به «کهکشانی گردابی»<sup>۲۳</sup> شناخته می‌شود. این اولین نقاشی بود که بازوهای مارپیچی یک کهکشان را نشان می‌داد و شباهت بسیاری به تصاویر عکاسی امروزی دارد (شکل ۲-۹). (کهکشان در حال برهم‌کنش با کهکشانی دیگر به نام NGC ۵۱۹۵ است که در سمت راست نقاشی دیده می‌شود.)

شکل ۹-۲: M۵۱، کهکشان گردابی، آنطور که ویلیام پارسون با استفاده از تلسکوپ ۷۲ اینچی خود در بیرکاسل کشید.



گرچه هنوز ستاره‌شناسان غیرحرفه‌ای به صورت گسترده از تلسکوپ‌های نیوتونی استفاده می‌کنند، بیشتر تلسکوپ‌های حرفه‌ای، گونه‌های متفاوتی از تلسکوپ کاسگرین<sup>۲۴</sup> هستند. در این تلسکوپ‌ها، آینه‌ی ثانویه یک هذلولی‌گون است که نور را به درون یک حفره‌ی مرکزی در آینه‌ی اولیه، که زیر آن صفحه‌ی کانونی قرار دارد، بازتابش می‌کند. نصب تجهیزات سنگین مانند طیف‌سنج در این قسمت بسیار راحت‌تر است. کیفیت تصویر در آینه‌ی اولیه‌ی سهموی (که در تلسکوپ‌های نیوتونی و کاسگرین استفاده می‌شود) با فاصله گرفتن از محور و به دلیل یک ابیراهی اپتیکی بنام گیسو<sup>۲۵</sup> به سرعت کاهش می‌یابد. اگر آینه‌ی اولیه نیز به جای سهموی، هذلولی‌گون باشد، گیسو از بین می‌رود و تلسکوپ، که به ریچی-کرتین<sup>۲۶</sup> معروف است، برای رصدهای میدان باز مناسب است. این تلسکوپ توسط جرج ریچی و هنری کرتین<sup>۲۷</sup> در اوایل دهه‌ی ۱۹۱۰ اختراع شد. بیشتر تلسکوپ‌های حرفه‌ای ریچی-کرتین هستند.

#### ۹-۴ تلسکوپ ۱۰۰ اینچی هوکر در کوه ویلسون

هیولای بیر کاسل بزرگ‌ترین تلسکوپ در جهان بود تا اینکه در سال ۱۹۱۷، تلسکوپ ۱۰۰ اینچی هوکر در رصدخانه‌ی کوه ویلسون، واقع در کوه‌های بالای لوس‌آنجلس، بنا شد. (آلودگی نوری فزاینده ناشی از لوس‌آنجلس یک معضل است!) ادوین هابل به‌عنوان یک منجم در این رصدخانه مشغول به کار شد و با استفاده از آن، یکی از مهم‌ترین اکتشافات قرن گذشته را به نام خود ثبت

کرد. او در اواخر دهه ۱۹۲۰ به اندازه‌گیری فاصله تا کهکشان‌هایی پرداخت که می‌توانست گونه‌ای از ستاره‌های متغیر بسیار روشن را در آن‌ها مشاهده نماید. روشنایی این ستارگان، موسوم به متغیرهای قیفاووسی<sup>۲۸</sup>، در دوره تناوب‌هایی بسیار منظم تغییر می‌کند. دوره تناوب و روشنایی آن‌ها به هم مربوط است، لذا با اندازه‌گیری دوره تناوب، می‌توان روشنایی مطلق چنین ستاره‌هایی را در فواصل دور، مثلاً در کهکشان‌ها، به دست آورد. سپس، از روشنایی رصد شده (ظاهری) قیفاووسی، امکان محاسبه فاصله آن، و بدین ترتیب فاصله کهکشانی که در آن قرار دارد، فراهم می‌آید. این‌گونه بود که او توانست نشان دهد چیزهایی که آن موقع «سحابی‌های سفید» نامیده می‌شدند، خارج از کهکشان راه شیری قرار دارند، و اینکه جهان بسیار بزرگ‌تر از آن است که تصور می‌شد. در فصل ۱۹ به شرح این مطلب خواهیم پرداخت که چگونه او فاصله‌های را که خود اندازه‌گیری کرده بود با سرعت دور شدن کهکشان‌ها (که اسلیفر آن‌ها را به دست آورده بود) ترکیب کرد و نموداری از سرعت در مقابل فاصله را ارائه نمود، و از ماهیت خطی نمودار دریافت که ما در یک جهان در حال انبساط زندگی می‌کنیم.

## ۹-۵ تلسکوپ ۲۰۰ اینچی هیل در رصدخانه پالومار

تلسکوپ بعدی، و یکی از مهم‌ترین تلسکوپ‌هایی که تاکنون ساخته شده است، تلسکوپ هیل در رصدخانه پالومار<sup>۲۹</sup> بود. در سال ۱۹۲۸، جرج هیل<sup>۳۰</sup> از رصدخانه کوه ویلسون، کمکی شش میلیون دلاری از مؤسسه راکفلر<sup>۳۱</sup> برای «ساخت یک رصدخانه، شامل یک تلسکوپ بازتابی ۲۰۰ اینچی، ... و تمام هزینه‌های دیگری که در آماده‌سازی رصدخانه متحمل می‌شود» دریافت کرد. با توجه به آلودگی نوری فزاینده ناشی از لوس‌آنجلس، دیگر نمی‌شد کوه ویلسون را به‌عنوان مکانی مناسب برای یک رصدخانه به حساب آورد، لذا محلی در ارتفاع ۱۷۱۲ متری بر کوه پالومار، ۱۶۰ کیلومتر جنوب شرقی پاسادینا، در ایالت کالیفرنیا<sup>۳۲</sup>، انتخاب گردید.

به دنبال تلاش‌های ناموفق در ساخت آینه اولیه از کوارتز، شرکت «کورنینگ گلس ورکس<sup>۳۳</sup>» موفق به قالب‌ریزی آینه از پیرکس<sup>۳۴</sup> شد - شیشه‌ای با انبساط گرمایی پایین که بسیار کمتر از شیشه معمولی منبسط و منقبض می‌شود، لذا در ظروف آشپزخانه مورد استفاده قرار می‌گیرد. سپس مهندسان طراحی ساختمان تلسکوپ را آغاز کردند؛ که صدها تن وزن داشت، اما قادر بود با

دقت و به نرمی حرکت کند، و اجسام سماوی را در آسمان دنبال نماید. در زمان حرکت، آینه باید شکل خود را تا چند میلیونیم سانتیمتر حفظ می‌کرد. بدین منظور، چندین تدبیر انقلابی و خلاقانه مهندسی در این طرح پیاده شد، شامل سازه باز تلسکوپ با استفاده از خَرپای<sup>۳۵</sup> سِری ریر<sup>۳۶</sup> و بالشتک‌های روغنی. مجموعه‌ای زیبا از نقاشی‌های این تلسکوپ به وسیله راسل پورتر<sup>۳۷</sup> ارائه شده است.

بنای گنبد در سال ۱۹۳۶ آغاز شد، و این در حالی بود که شالوده‌های تلسکوپ تا عمق ۶/۷ متری از بستر سنگی کوه فرومی‌رفت. گنبد، به بلندی ۴۱/۱ متر و قطر ۴۱/۷ متر، در مدت دو سال تکمیل شد. ضمناً در همان سال ۱۹۳۶، شیشه خام برای ساخت آینه به وسیله قطار به پاسادینا انتقال یافت (با سرعتی کمتر از ۴۰ کیلومتر بر ساعت و در مدت ۱۶ روز!) سپس به مدت ۱۱ سال در آزمایشگاه اپتیک کالتک، ۴۵۰۰ کیلوگرم شیشه ساییده، دور ریخته شد، و سطح آینه برای دستیابی به دقت لازم صیقل یافت. این زمان طولانی ناشی از جنگ جهانی دوم بود، که در حین آن تمام کار روی تلسکوپ متوقف گردید، و نهایتاً در سپتامبر ۱۹۴۵ از سر گرفته شد. آینه تکمیل شده در نوامبر ۱۹۴۷ از پاسادینا به پالومار منتقل شد، و دو سال دیگر وقت صرف شد تا کار صیقل نهایی، تنظیم و تراز آن به پایان برسد. در ژانویه ۱۹۴۹، ۲۱ سال پس از اعانه‌ای که برای ساخت تلسکوپ پرداخت شده بود، ادوین هابل نخستین عکس را با این تلسکوپ ۲۰۰ اینچی (دو متری) گرفت. این تلسکوپ برای ۴۵ سال بزرگ‌ترین تلسکوپ جهان به حساب می‌آمد.

تلسکوپ هیل نقشی مهم در مطالعه اختروش‌ها<sup>۳۸</sup> ایفا کرد - دلیل نام‌گذاری این اجسام به اختروش آن است که آن‌ها بر روی یک عکس اپتیکی مانند ستاره ظاهر می‌شوند. اختروش‌ها را برای نخستین بار در مجموعه‌ای از رصدهای رادیویی در رصدخانه جُدرل بانک کشف کرده بودند. این رصدها نشان می‌داد تعداد اندکی از منابع رادیویی که تا آن زمان شناخته شده بودند، اندازه زاویه‌ای کمتر از یک ثانیه قوسی دارند. با توجه به اینکه جو باعث می‌شد که حتی اجسام نقطه‌ای نیز در مشاهدات اپتیکی دارای یک اندازه زاویه‌ای حدود ۲ ثانیه قوسی باشند، به احتمال زیاد آن‌ها اجسامی شبیه ستاره در نزدیکی ما بودند. در زمان اختفای روشن‌ترین آن‌ها به وسیله ماه، موسوم به C3 ۲۷۳ (چراکه ۲۷۳ امین جسم در فهرست سوم کمبریج از منابع رادیویی بود) موقعیت بسیار دقیقی از آن به دست آمد. با توجه به اینکه موقعیت دقیق لبه ماه در

زمان آغاز و انجام اختفا معلوم بود، موقعیت این جسم با دقت چند ثانیه قوسی پیدا شد. پس از این بود که امکان استفاده از تلسکوپ هیل برای عکس برداری از جسم فراهم آمد. گرچه تصویر آن بسیار به ستاره شبیه بود، فورانی که تا حدود ۶ ثانیه قوسی امتداد داشت در یک طرف آن دیده می شد، از این رو قطعاً یک ستاره نبود. مارتن اشمیت، ستاره شناس هلندی که به آمریکا مهاجرت کرده، در کالیتک مشغول به کار بود، از تلسکوپ هیل استفاده نمود تا طیف این جسم را تهیه کند. آنچه به دست آمد به هیچ طیفی که تا آن زمان مشاهده شده بود شباهت نداشت. مدتی طول کشید تا اشمیت دریابد خطوطی را که در طیف می دید ۱۶٪ به سمت قرمز جابه جا شده اند. این مقدار قرمزگرایی نشان می داد که فاصله جسم حدود ۲ میلیارد سال نوری بود - در آن زمان، دورترین جسم شناخته شده در جهان به حساب می آمد. البته ۲۷۳ C3 یکی از نزدیک ترین اخترشها به ما است، و در حال حاضر دورترین مورد شناخته شده در فاصله ۱۳ میلیارد سال نوری قرار دارد. بنابراین اخترشها از جمله دورترین و درخشان ترین اجسامی هستند که می توان در جهان مشاهده کرد.

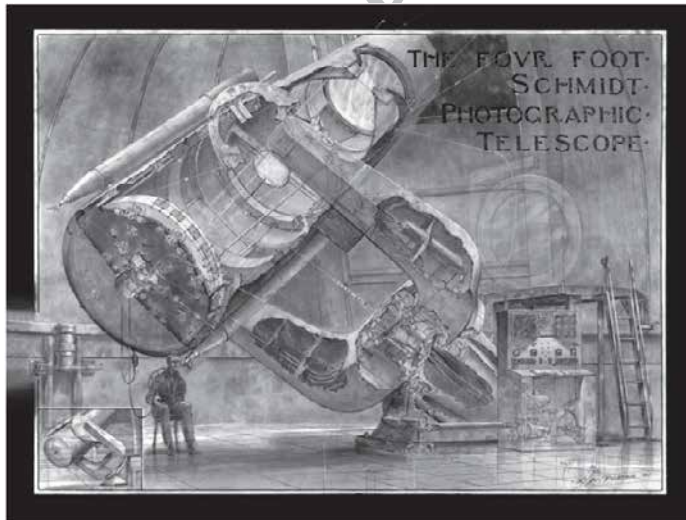
## ۹-۶ دوربین اشمیت

دوربین اشمیت در سال ۱۹۳۰ توسط برنارد اشمیت<sup>۳۹</sup> اختراع شد. او می خواست وسیله ای طراحی کند که میدان دید آن خیلی وسیع بوده، ابیراهی هایی همچون گیسو در آن وجود نداشته باشد و با نسبت کانونی کوتاه، امکان رصد ستاره های ضعیف تر را در یک مدت زمان نوردهی معین فراهم آورد. برای حذف ابیراهی فامی، از آینه (و نه عدسی) در اولیه استفاده شد؛ اما میدان دید وسیع و حذف گیسو، آینه ای کروی را ایجاد می نمود، و این در حالی است که آینه های کروی از ابیراهی کروی<sup>۴۰</sup> رنج می برند. او دریافت که این ابیراهی را می توان با قرار دادن یک صفحه (شفاف) تصحیح کننده در محل شعاع انحنای آینه کروی حذف کرد. برای جبران استفاده از آینه کروی بجای سهموی (جبران اختلاف مسافتی که پرتو نور در این دو می پیماید)، ضخامت این صفحه در نقاط مختلف دهانه متفاوت است.

دوربین اشمیت یکی از مفیدترین ابزار در ستاره شناسی نوین به حساب می آید؛ وسیله ای مطلوب در عکس برداری از میدان های وسیع ستارگان در راه شیری، با نمایش ۱۰,۰۰۰ ستاره بر روی

یک نگاتیو! فریتس تسویکی<sup>۴۱</sup> با استفاده از یک دوربین اشمیت ۱۸ اینچی به مطالعه کیهکشان‌های خوشه گیسو پرداخت و نخستین شواهد بر وجود «ماده تاریک» را ارائه نمود، موضوعی که در فصل ۲۱ به تشریح آن خواهیم پرداخت. پیمایش و نقشه برداری از آسمان به کمک چنین دوربین‌هایی انجام می‌شود؛ یکی از معروف‌ترین آن‌ها تلسکوپ اشمیت ۴۸ اینچی ساموئل اوشین در رصدخانه پالومار<sup>۴۲</sup> است (شکل ۹-۳)؛ پروژه «پیمایش آسمان پالومار»<sup>۴۳</sup> که در ۱۹۵۸ تکمیل شد به وسیله این تلسکوپ صورت پذیرفت. در این پروژه، صفحه فیلم ۳۵/۶ سانتیمتر مربع بود و مساحتی از آسمان را به عرض ۶ درجه پوشش می‌داد. این پیمایش در ابتدا تمام آسمان نیم کره شمالی را تا میل ۲۷- درجه می‌پوشاند. صفحات عکاسی از امولسیون‌های حساس به آبی و قرمز ساخته می‌شد و به ستاره‌هایی تا حدود ۱,۰۰۰,۰۰۰ بار ضعیف‌تر از حد بینایی چشم حساس بود.

انگلستان در سال ۱۹۷۳ تلسکوپ مشابه را در استرالیا، رصدخانه اسپرینگ سایدینگ<sup>۴۴</sup> ساخت، که یک پیمایش متناظر را از آسمان نیم کره جنوبی بر عهده داشت. نویسنده در سال ۱۹۹۰، سیارک شماره ۱۵,۷۲۷ را که هم‌اکنون به نام وی «ianmorison» نام‌گذاری شده است،



شکل ۹-۳: نقاشی سال ۱۹۴۱ راسل پورتر از تلسکوپ ۴۸ اینچی اشمیت ساموئل اوشین در رصدخانه پالومار. در بالا می‌توان صفحه تصحیح‌کننده را دید، که در پایین و سمت چپ آن، صفحه عکاسی در وسط لوله تلسکوپ قرار داده شده است.

کشف کرد. این کشف به وسیلهٔ تلسکوپ ۲ متری آلفرد - ینش در رصدخانهٔ توتنبورگ آلمان<sup>۴۵</sup>، بزرگ‌ترین دوربین اشمیت در جهان، صورت گرفت.

## ۷-۹ راه‌های بهبود کیفیت تصویر در تلسکوپ‌های زمینی

چنانچه یک تلسکوپ آرمانی را در فضا داشته باشیم، توان تفکیک مستقیماً با معکوس قطر آن متناسب است. یک جبهه موج صفحه‌ای از ستاره‌ای دور تصویری ایجاد می‌کند که توان تفکیک زاویه‌ای آن تنها به وسیلهٔ پراش نور محدود می‌شود و تلسکوپ را «محدودشده به پراش»<sup>۴۶</sup> می‌نامند.

اما در زمین، تلاطم موجود در جو، جبهه موج را از شکل طبیعی خارج می‌کند و باعث خطای فاز در آینه می‌شود. حتی در بهترین مکان‌ها، تلسکوپ‌های زمینی نمی‌توانند به یک توان تفکیک زاویه‌ای، بهتر از آنچه که تلسکوپی با قطر حدود ۲۰ cm دارد، دست پیدا کنند. خطای جبهه موج می‌تواند از بی‌دقتی در سطح آینه و یا تأثیرات ناشی از تغییرات گرانشی و گرمایی در آینه و ساختمان نگه‌دارندهٔ آن نیز به وجود آید.

بدین ترتیب خطای جبهه موج بر دو دسته است:

- ۱) خطاهای با تغییرات کند ناشی از تأثیرات گرانشی و گرمایی بر آینه. این خطاها به وسیلهٔ سامانه‌های «اپتیک فعال»<sup>۴۷</sup> اصلاح می‌شود.
- ۲) خطاهای با تغییرات سریع ناشی از تلاطمات جوی. تصحیح این خطاها بر عهدهٔ سامانه‌های «اپتیک سازگار»<sup>۴۸</sup> است.

### اپتیک فعال

از این عبارت در توضیح روش‌های اصلاح خطاهای کند در آینه و سازهٔ آن استفاده می‌شود. در چنین سامانه‌ای، آینه - که نسبتاً باریک است - بر روی تعداد زیادی محرک<sup>۴۹</sup> (شاید تا ۱۵۰ عدد) تکیه دارد. این محرک‌ها می‌توانند به سطح پشت آینه نیرو وارد کنند و بدین ترتیب شکل سطح آن را تنظیم نمایند. تصویر یک ستاره در فواصل معین زمانی، و برای مدتی حدود ۳۰ ثانیه، مورد تجزیه و تحلیل قرار می‌گیرد و یک رایانه خطاهای احتمالی در سطح را که نتیجهٔ آن در تصویر دیده



می‌شود استخراج می‌نماید. به دنبال آن، رایانه تصحیح لازم (نیروی لازم) را برای هر محرک جهت دستیابی به بهترین کیفیت در تصویر محاسبه می‌کند.

### اپتیک سازگار

این عبارتی است که در توضیح اصلاح خطای فاز ناشی از جو استفاده می‌شود. در یک آینه بزرگ، خطاهای فاز با تغییرات سریع معادل است با چند میکرومتر خطا در طول مسیر نور. چنانچه ستاره‌ای به اندازه کافی روشن در میدان دید وجود داشته باشد (تا تصویری از قرص ابری تولید کند که اندازه زاویه‌ای آن به وسیله دهانه تلسکوپ تعیین می‌گردد) تصویر عملی آن که دچار اعوجاج شده است در یک رایانه مورد تجزیه و تحلیل قرار می‌گیرد و تصحیحات لازم اعمال می‌شود. بدین ترتیب با تصحیح خطاهای شکل موج، تصویری محدود شده به پراش<sup>۵۰</sup> به دست می‌آید. اصلاح آینه اولیه در هر چند میلی‌ثانیه و با دقت مورد نظر حدود  $0.2/0$  میکرومتر کاملاً غیرممکن است. لذا از یک آینه کوچک (۸ تا ۲۰ سانتیمتری) تغییر شکل پذیر در مسیر نور استفاده می‌شود. سطح این آینه به وسیله تعداد زیادی محرک پیزوالکتریک تغییر می‌کند و با تغییر آن‌ها اثرات جو جبران می‌گردد. در رصدهایی که در باند فرورسرخ نزدیک<sup>۵۱</sup> انجام می‌شود (چون طول موج بلندتر است) آسان‌تر می‌توان شکل موج را به طور کامل اصلاح نمود و بدین ترتیب تلسکوپ در حالت «محدود شده به پراش» کار می‌کند. البته چنین سامانه‌هایی همچنان می‌توانند در طول موج مرئی تصحیحاتی تا ۱۰ برابر فراهم آورند.

اغلب ستاره مرجع مناسبی در میدان دیدی که جسم هدف قرار دارد دیده نمی‌شود، لذا امروزه از ستاره مرجع مصنوعی استفاده می‌کنند. برای این کار با شلیک لیزر، اتم‌های سدیم در بالای جو و در ارتفاع حدود ۹۰ km تحریک می‌شود. بدین ترتیب می‌توان ستاره مرجع را در فاصله مناسب از هدف ایجاد نمود. البته باید مراقب هواپیماهایی که در ارتفاع پرواز می‌کنند بود!

### آینه‌های تلسکوپ در استقرار سمتی-ارتفاعی (به روش دوران شیشه مذاب)

یک پیشرفت عمده در ساخت آینه‌های بزرگ تلسکوپ زمانی محقق شد که توانستند قالب حاوی شیشه مذاب را زمانی که در کوره قرار دارد بچرخانند. چرخش کوره با سرعت مناسب، هنگامی که شیشه مذاب است موجب می‌گردد تا سطح شیشه، شکلی سهموی به خود گیرد. پس از تکمیل

روند سرد شدن، سطحی که خطای آن کسر کوچکی از سانتیمتر است به دست می‌آید. بدین ترتیب دیگر نیازی به برداشتن مقدار فراوانی شیشه از مرکز آینه نیست (با آینه ۲۰۰ اینچی هیل مقایسه کنید) و این به شدت هزینه و زمان ساخت یک آینه سهموی را کاهش می‌دهد. با داشتن سطحی تقریباً درست، برای دستیابی به شکل سهموی دقیق از یک دستگاه فرز مخصوص استفاده می‌شود که در آن، یک ابزار چرخان مملو از ذرات الماس کار سایش را انجام می‌دهد. در این شیوه، سطحی با دقت حدود ۵۰ میکرومتر به دست می‌آید. سپس یک ماده صیقل دهنده بسیار نرم کار صیقل نهایی را بر عهده می‌گیرد، و سطح را با دقت بهتر از ۲۵ نانومتر (یک میلیونیم اینچ) صیقل می‌دهد.

در ۲۰ سال گذشته، با این شیوه تعداد زیادی تلسکوپ در کلاس ۸ متری ساخته شده است. با توجه به پیشرفت در سامانه‌های حرکت تلسکوپ‌ها و استفاده از یارانه در کنترل آن‌ها، این تلسکوپ‌ها دارای استقرار سمتی-ارتفاعی<sup>۵۲</sup> هستند. این یک استقرار ساده و دومحوره برای نگهداری و چرخش تلسکوپ حول دو محور عمود بر هم است: یک محور عمودی (ارتفاعی)، و یک محور افقی (سمتی). بزرگ‌ترین مزیت در یک استقرار سمتی-ارتفاعی، سادگی در طراحی مکانیکی آن است که هزینه را به شدت کاهش می‌دهد. برای دنبال کردن یک جسم در آسمان، استقرار سمتی-ارتفاعی باید بتواند با سرعت متفاوت حول هر دو محور بچرخد، ضمن اینکه صفحه عکاسی (یا امروزه، دوربین سی‌سی‌دی) را نیز باید چرخاند تا چرخش میدان دید که نتیجه این نوع استقرار است جبران شود. استقرار سمتی-ارتفاعی، همچنین، هزینه ساخت گنبدی را که تلسکوپ را می‌پوشاند کاهش می‌دهد، چراکه سازه تلسکوپ جمع‌وجورتر است. تمام تلسکوپ‌های نوری بزرگ کنونی، و در دست ساخت، از این نوع استقرار استفاده می‌کنند.

### آینه‌های چندتکه

به نظر می‌رسد قطر بیشینه برای ساخت یک آینه یکپارچه حدود ۸/۴ متر باشد. از این رو امروزه شیوه‌های دیگری را به کار می‌گیرند تا در عمل به دهانه بزرگ دست یابند. برای این کار، نور دو یا چند آینه کوچک تر باهم ترکیب شده، یک تصویر را می‌سازند. یک نمونه اولیه عبارت بود از «تلسکوپ چندآینه‌ای» که از شش آینه ۱/۸ متری استفاده می‌کرد (این آینه‌های مازاد، در ابتدا

برای شرکت در پروژه ماهواره‌های جاسوسی آمریکا ساخته شده بودند). این تلسکوپ، پس از تکمیل در سال ۱۹۷۹، دارای دهانه مؤثری برابر با  $4/5$  متر بود، تقریباً به بزرگی تلسکوپ هیل. با وجود این، همواره یکی از چالش‌ها عبارت بود از نگهداری تک‌تک آینه‌ها دقیقاً در یک راستا؛ لذا در سال ۱۹۹۹، این آینه‌های کوچک با یک آینه  $6/5$  متری که با روش چرخان (در بالا به آن پرداختیم) ساخته شده بود تعویض گردیدند.

در سال ۲۰۰۸، تلسکوپ دوچشمی بزرگ<sup>۵۳</sup> کامل شد. این تلسکوپ از دو آینه  $8/4$  متری سود می‌برد. آینه‌ها به صورت همزمان عمل کرده، دهانه مؤثری برابر با  $11/8$  متر را در اختیار ما قرار می‌دهند؛ لذا در حال حاضر، این بزرگ‌ترین تلسکوپ اپتیکی جهان است که در زیر یک گنبد قرار دارد. البته اندازه مجموع دو آینه  $22/8$  متر است، و در برخی کاربردها، توان تفکیک مؤثر این تلسکوپ برابر با تلسکوپی به این اندازه می‌باشد - حدود  $1/3$  ثانیه قوسی.

## ۸-۹ تلسکوپ‌های شمال و جنوب جیمینی

رصدخانه جیمینی<sup>۵۴</sup> شامل دو تلسکوپ  $8/1$  متری است. جیمینی شمال در موناکی هاوایی در ارتفاع  $4214\text{ m}$ ، و جیمینی جنوب در شیلی<sup>۵۵</sup> و در ارتفاع  $2737\text{ m}$  قرار دارد. این تلسکوپ‌های دوقلو باهم تمام آسمان را پوشش می‌دهند و این در حالی است که هر دو سایت در هوایی تمیز و شرایط جوی عالی قرار دارد. طراحی آن‌ها به گونه‌ای است که به ویژه در طول موج فرورسرخ به خوبی کار می‌کنند و برای این منظور از پوشش نقره در آینه‌هایشان استفاده شده است. نقره درصد بسیار بیشتری از تابش فرورسرخ را، در مقایسه با آلومینیومی که در بیشتر آینه‌ها استفاده می‌شود، منعکس می‌کند. از آنجا که بخار آب تابش فرورسرخ را جذب می‌کند، هر دو تلسکوپ در بالای قله بلند کوه جای گرفته‌اند، محلی که بخار آب بسیار کمی در هوا وجود دارد.

## ۹-۹ تلسکوپ‌های کک

تلسکوپ‌های دوقلوی کک<sup>۵۶</sup> در ارتفاع  $4200\text{ m}$  بر فراز موناکی هاوایی، بزرگ‌ترین تلسکوپ‌های فرورسرخ و نوری جهان هستند. آن‌ها آینه‌های اولیه‌ای با قطر  $10\text{ m}$  دارند. هر آینه از  $36$  قسمت شش ضلعی که موقعیتشان به وسیله اپتیک فعال تنظیم می‌شود تشکیل شده است، به گونه‌ای که

کل مجموعه مانند آینه واحدی عمل می‌کند. وقتی که گنبد باز می‌شود، مدتی طول می‌کشد تا تلسکوپ با دمای شب به حالت پایدار برسد. برای کاهش این اثر، درون گنبد یک در طول روز تا دمای انجماد خنک می‌شود.

در هنگام رصد و در هر ثانیه دو بار، سامانه اپتیک فعال موقعیت قسمت‌های آینه را با دقت  $4\text{ nm}$  کنترل می‌کند و تغییر حالت‌های احتمالی ناشی از گرما و جاذبه را جبران می‌نماید. تلسکوپ‌های یک از سامانه اپتیک سازگار نیز استفاده می‌کنند. در این سیستم از آینه‌های تغییر شکل پذیر با قطر  $15\text{ cm}$  استفاده شده است که می‌توانند در هر ثانیه  $670$  بار تغییر شکل دهند. بدین ترتیب اعوجاج ناشی از جو حذف می‌گردد و کیفیت تصویر تا  $10$  بار بهبود می‌یابد. تلسکوپ‌های کک، با استفاده از شیوه سرعت شعاعی<sup>۵۷</sup> که در فصل ۱۲ به آن خواهیم پرداخت، کمک شایانی به شناسایی سیاره‌های فراخورشیدی نموده‌اند.

## ۹-۱۰ تلسکوپ خیلی بزرگ (VLT)<sup>۵۸</sup>

این تلسکوپ توسط رصدخانه جنوبی اروپا<sup>۵۹</sup> اداره می‌شود و ۴ تلسکوپ  $8/2$  متری را در برمی‌گیرد. این تلسکوپ‌ها، هم می‌توانند به صورت مستقل کار کنند و هم ترکیبی، که در این صورت معادل یک تلسکوپ  $16$  متری است - چیزی که آن را بزرگ‌ترین تلسکوپ نوری جهان می‌سازد. این تلسکوپ قادر است محدوده طول موج‌هایی از فرابنفش نزدیک تا  $25\ \mu\text{m}$  در فروسرخ را رصد کند. وی‌ال‌تی (VLT) در رصدخانه پارانال، در بیابان آتاکاما<sup>۶۰</sup> واقع در شمال شیلی و در ارتفاع  $2600\text{ m}$  قرار دارد (یکی از بهترین محل‌های رصد در دنیا). هریک از ۴ تلسکوپ به نام یکی از اجسام آسمانی به زبان مایوچی نام‌گذاری شده است: آنتو (خورشید)، کووین (ماه)، ملی پال (صلیب جنوبی) و پیون (ستاره شعرای یمانی)<sup>۶۱</sup>.

یکی از دستاوردهای قابل توجه آن، اولین عکس مرئی از سیاره‌ای فراخورشیدی بود؛ البته به دور یک کوتوله قهوه‌ای و نه یک ستاره معمولی. این سیاره در طول موج فروسرخ و در هنگام استفاده از سامانه اپتیک سازگار رصد شد. با پیگیری مسیر ستارگانی که اطراف سیاه‌چاله ابرسنگین در مرکز کهکشان ما در گردش‌اند، موضوعی که در فصل ۱۷ به آن خواهیم پرداخت، جرم سیاه‌چاله محاسبه شده است. با استفاده از وی‌ال‌تی ستاره‌شناسان توانسته‌اند سن پیرترین ستاره شناخته

شده در کهکشان راه شیری را برابر با  $13/2$  میلیارد سال به دست آورند، و جو یک سیاره فراخورشیدی را مورد تجزیه و تحلیل قرار دهند.

## ۹-۱۱ تداخل سنج‌های نوری

در نجوم رادیویی، رصدهای بسیاری از ترکیب سیگنال‌های دو تلسکوپ مجزا در آنچه که تداخل سنج<sup>۶۲</sup> نام دارد انجام گرفته است. با توسعه این شیوه، آرایه‌ای از آنتن‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرد و تلسکوپی ساخته می‌شود که توان تفکیک آن معادل یک تلسکوپ تک با قطری برابر با اندازه آرایه می‌باشد. بدین ترتیب ستاره‌شناسان رادیویی توانسته‌اند به یک توان تفکیک برابر، یا بزرگ‌تر از تلسکوپ‌های نوری دست یابند. می‌توان نور دو یا چند تلسکوپ وی‌ال‌تی را با شش (یا کمتر) تلسکوپ  $1/8$  متری که در مجاورت آن‌ها قرار دارد ترکیب نمود و یک تداخل سنج را به وجود آورد. در سال ۲۰۰۸، وی‌ال‌تی توانست به تصویربرداری از ساختار درونی ستاره آنا شاه‌تخته<sup>۶۳</sup> بپردازد، ستاره‌ای که هر آن ممکن بود به صورت یک فرانواختر<sup>۶۴</sup> منفجر شود. در سال ۲۰۱۲، هر چهار تلسکوپ وی‌ال‌تی باهم ترکیب شد و آینه‌ای با اندازه مؤثر ۱۳۰ متر به دست آمد.

تداخل سنج بزرگ دیگر، دو تلسکوپ ۱۰ متری یک را در موناکی هاوایی به هم متصل می‌کند. امید می‌رفت بتوان با ساخت تلسکوپ‌های کوچک، آرایه‌ای شبیه به آرایه وی‌ال‌تی ساخت، اما در حال حاضر ساخت هر تلسکوپ دیگری در محل قلّه کوه ممنوع است.

## ۹-۱۲ تلسکوپ‌های روباتیک

با استفاده از سامانه‌های پیچیده رایانه‌ای و ارتباطات بسیار سریع از راه اینترنت، می‌توان تلسکوپ‌ها را از راه دور کنترل کرد. امروزه این تلسکوپ‌های روباتیک با آینه‌هایی به قطر حدود ۲ متر، مانند دو تلسکوپ فولکس<sup>۶۵</sup> در هاوایی و استرالیا، در حال گسترش در سرتاسر جهان هستند. یک استفاده مخصوصاً جالب عبارت است از مشاهده پدیده عدسی گرانشی به وسیله یک ستاره نزدیک از یک ستاره دورتر. معمولاً مشاهدات با استفاده از شبکه‌ای از تلسکوپ‌های روباتیک صورت می‌پذیرد. این تلسکوپ‌ها به صورت پیوسته میلیون‌ها ستاره را به سمت مرکز کهکشان زیر نظر دارند تا تعداد فراوانی از ستاره‌های پس‌زمینه را فراهم آورند. به همان ترتیب که یک عدسی

کوژ می‌تواند نور یک جسم دور را در چشم متمرکز کرده، کاری کند که روشن‌تر به نظر رسد، اگر یک ستاره دور از پشت یک ستاره نزدیک‌تر عبور نماید، نور ستاره دور دستخوش یک افزایش موقت خواهد شد. این افزایش ممکن است برای روزهای طولانی ادامه داشته، قلهٔ روشنایی به ۱۰ برابر حالت عادی برسد. تاکنون هزاران مورد از رویدادهای این‌چنینی رصد شده است. همان‌گونه که در فصل ۱۲ توضیح خواهیم داد، این شیوه در شناسایی سیارات فراخورشیدی، که موجب یک افزایش روشنایی ثانویه در دو پهلوی [نمودار] روشنایی ستاره می‌گردند، استفاده شده است.

تلسکوپ‌های روباتیک، همچنین، در مشاهدهٔ پس‌تاب<sup>۶۶</sup> رویدادهای گذرا که به فوران‌های پرتو گاما<sup>۶۷</sup> شناخته می‌شوند، ابزاری کلیدی به حساب می‌آیند. در فصل ۲۰ توضیح داده خواهد شد که این فوران‌ها بسیار کوتاه هستند و ابتدا در محدودهٔ پرتوهای گاما شناسایی می‌شوند (مثلاً با استفاده از تلسکوپ مدارگرد پرتو گامای سوئیفت<sup>۶۸</sup>). موقعیت چنین فورانی فوراً از طریق اینترنت به تلسکوپ‌های روباتیک در سراسر جهان ارسال می‌شود. این تلسکوپ‌ها می‌توانند به سرعت رو به موقعیت فوران پرتو گاما نشانه روند و موقعیت دقیق آن را به دست آورند. بدین ترتیب می‌توان منبع فوران را یافت و به واکاوی آن پرداخت.

در مقیاس کوچک‌تر، تلسکوپ‌های روباتیک تا قطر حدود ۳۰ سانتیمتر برای استفادهٔ ستاره‌شناسان غیرحرفه‌ای، جهت عکس‌برداری از محل‌های مرتفع و آسمان‌های تیره، در دسترس است. من با استفاده از یک چنین تلسکوپی واقع در اسپانیا، با قطر دهانهٔ ۸ اینچ، از کهکشان M۳۳ در صورت فلکی مثلث<sup>۶۹</sup> عکس گرفته‌ام که در شکل ۱۴-۱۲ آن را می‌بینید.

## ۹-۱۳ تلسکوپ فضایی هابل

این تلسکوپ یکی از پربارترین ابزار و وسایل علمی است که تاکنون ساخته شده است، و ارزش آن را دارد که بسیاری از فصل ۱۹ به پوشش آن اختصاص یابد.

## مآنوشآها

- 1 - Hans Lippershey
- 2 - Thomas Harriot
- 3 - The Starry Messenger
- 4 - chromatic aberration
- 5 - Achromatic Doublet or Achromat
- 6 - John Dolland
- 7 - Chester Moore Hall
- 8 - Resolution
- 9 - 40-inch aperture Yerkes Telescope

۱۰- Seeing؛ آابعی از آلاطم و آشآفآگی های آوی .

- 11 - Airy pattern
- 12 - La Palma in the Atlantic Ocean and Hawaii in the Pacific Ocean
- 13 - Chilean Andes
- 14 - Friedrich Bessel
- 15 - Proper Motion
- 16 - Alvan Clark

۱۷- White Dwarf؛ شبیه به وضعیت نهایی آورشید ما.

- 18 - Spectroscopic Observation

۱۹- White Nebula؛ نامی که در ابتدا بر کهکشانها نهاده بودند.

- 20 - Edwin Hubble

۲۱- Leviathan of Birr Castle؛ لقبی برای آلسکوپ آول پیکر ویلیام آارسونز. (مآرآم)

- 22 - Messier's catalogue
- 23 - Whirlpool Galaxy
- 24 - Cassegrain telescope
- 25 - Coma
- 26 - Ritchey–Chrétien telescope
- 27- George Willis Ritchey and Henri Chrétien
- 28 - Cepheid Variables
- 29 - Hale Telescope at the Palomar Observatory
- 30 - George Ellery Hale
- 31 - Rockefeller Foundation
- 32 - Pasadena, California

۳۳- Corning Glass Works؛ از سال ۱۹۸۹ نام آن به شرکت آورنینگ آغییر آرده اسآ. (مآرآم)

- 34 - Pyrex

۳۵- truss؛ آریا؛ آابی فولادی یا آوبی یا آآنی یا از آلیاژهای سبک که از آعضوهای کششی و فشاری

آشکیل شده اسآ. (ف)

- 36 - Serrurier truss open telescope structure
- 37 - Russell Porter
- 38 - quasars: quasi-stellar objects
- 39 - Bernhard Schmidt
- 40 - Spherical Aberration

- 41 - Fritz Zwicky
- 42 - 48-inch Samuel Oschin Schmidt Telescope at Palomar Observatory
- 43 - Palomar Sky Survey
- 44 - Siding Spring Observatory in Australia
- 45- Alfred-Jensch-Telescope at Tautenburg Observatory
- 46 - diffraction limited
- 47 - Active Optics
- 48 - Adaptive Optics
- 49 - Actuator
- 50 - diffraction-limited image
- 51 - near infrared
- 52 - alt-azimuth (alt/az) mount
- 53 - Large Binocular Telescope
- 54 - Gemini Observatory
- 55- Mauna Kea, Hawaii and Cerro Pachón, Chile
- 56 - twin Keck Telescopes
- 57 - radial velocity method
- 58- Very Large Telescope (VLT)
- 59 - European Southern Observatory (ESO)
- 60- Paranal Observatory, in the Atacama Desert
- 61- Antu, Kueyen, Melipal and Yepun.
- 62 - interferometer
- 63 - Eta Carinae
- 64 - Hypernova
- 65 - Faulkes Telescopes
- 66 - Afterglow
- 67 - gamma-ray bursts
- 68 - Swift orbiting gamma-ray telescope
- 69 - M33 in Triangulum



# فصل ۱۰

## خانوادهٔ ستارگان

تمام نوری را که می‌توانیم در آسمان ببینیم در واقع از سطح ستارگان سرچشمه گرفته است و مطمئناً آن‌ها، به خاطر وجود ما، مهم‌ترین اجسام جهان هستند. گرما و نور خورشید زندگی را در زمین ممکن می‌سازد، و چرخهٔ حیاتِ ستاره‌هایی که میلیاردها سال قبل وجود داشته‌اند، عناصری را ساخته که هم ما و هم گیاهانی که حیات ما به آن‌ها وابسته است از آن‌ها به وجود آمده‌ایم. در این فصل به بحث پیرامون ویژگی‌های ستارگان به طور کلی خواهیم پرداخت، اینکه چگونه این ویژگی‌ها اندازه‌گیری می‌شود، و همچنین اینکه خورشید ما در میان دیگر ستارگان، در کجا واقع شده است.

### ۱-۱۰ درخشندگی ستارگان

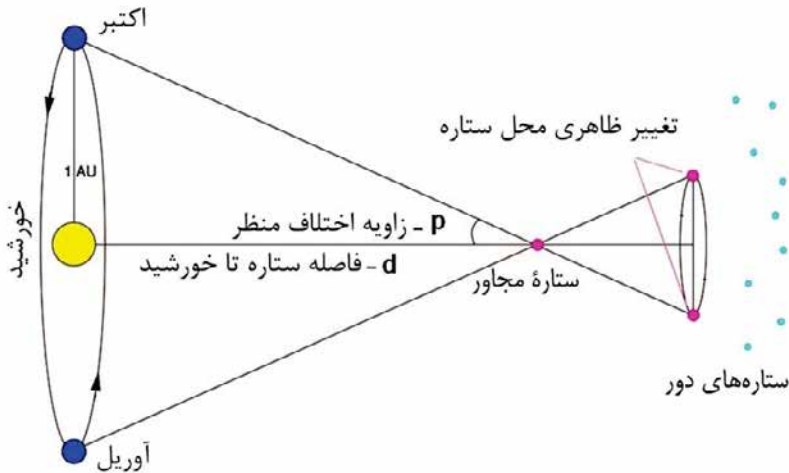
درخشندگی ذاتی ستارگان<sup>۱</sup> دامنهٔ بسیار وسیعی دارد. درخشندگی خورشید،  $L_{\text{sun}}$  به عنوان درخشندگی مرجع انتخاب می‌شود ( $3.828 \times 10^{26} \text{ W}$ ). خورشید عملاً ستارهٔ مناسبی برای مرجع درخشندگی است، چراکه در میانهٔ نمودار (در مقیاس لگاریتمی) جایی بین روشن‌ترین و کم‌نورترین ستارگان برای خود اختیار کرده است.

روشنایی ظاهری یک ستاره، آن‌طور که در آسمان دیده می‌شود، هیچ‌چیزی دربارهٔ روشنایی ذاتی ستاره به ما نمی‌گوید - یک ستارهٔ بسیار روشن در فاصلهٔ دور ممکن است روشنایی ظاهری بسیار کمتری نسبت به ستاره‌ای کم‌نور که در مجاورت ما است، داشته باشد. لذا، برای آنکه بتوان روشنایی ذاتی ستاره‌ها به دست آورده، بدین ترتیب درخشندگی آن‌ها را نسبت به خورشید حساب کنیم، ناچاریم اثر فاصلهٔ ستارگان را در روشنایی حذف کنیم (روشنایی ستارگان متناسب با عکس مجذور فاصلهٔ آن‌ها است). برای این منظور باید بتوانیم فاصلهٔ آن‌ها را اندازه بگیریم.

## ۱۰-۲ فاصله ستارگان

برای اندازه‌گیری فاصله ستارگان، روش «اختلاف منظر» مورد استفاده قرار می‌گیرد<sup>۳</sup>. در این روش باید جسم را از دو نقطه که فاصله‌ای باهم دارند (به نام خط‌مبنا) مشاهده کرد و اختلاف در زاویه را آن‌طور که مقابل اجسام دور دیده می‌شود اندازه گرفت. هرچه جسم دورتر باشد، خط‌مبنای طولانی‌تری نیاز است. در خصوص ستارگان، اختلاف زاویه‌ای محسوسی از نقاط مختلف زمین وجود ندارد، لذا به خط‌مبنایی که به‌طور چشمگیری بلند باشد احتیاج داریم. خوشبختانه یک خط‌مبنای بلند در اختیار ما است، و آن قطر مدار زمین به دور خورشید است. بیشتر ستاره‌ها آن‌قدر دور هستند که اگر آن‌ها را از دو سمت مخالف مدار زمین نسبت به خورشید بنگریم، مثلاً در پاییز و بهار، تغییر زیادی در موقعیتشان مشاهده نمی‌کنیم (شکل ۱۰-۱). از این رو این ستارگان را می‌توان به‌عنوان نقاط مرجع در نظر گرفت و جابه‌جایی در موقعیت ستاره‌های نزدیک‌تر را نسبت به آن‌ها اندازه گرفت. با دانستن مدار زمین و تغییر زاویه‌ای در موقعیت ستاره، فاصله آن قابل محاسبه است.

زوایای اندازه‌گیری شده بسیار کوچک است، یک ثانیه قوسی یا کمتر، و به زمان‌های دقیق اندازه‌گیری بستگی دارد. جهت تعیین فاصله، تغییر در زاویه موقعیت یک ستاره (که با استفاده از



شکل ۱۰-۱: شیوه اختلاف منظر

خط‌مبنای ۲ AU محاسبه شده است) به چیزی که اختلاف منظر ستاره نامیده می‌شود تبدیل می‌گردد. این اختلاف منظر عبارت است از تغییر زاویه‌ای موقعیت ستاره، چنانچه با خط‌مبنای دقیقاً ۱ AU رصد می‌شود. پس از این، می‌توان فوراً فاصله ستاره را به دست آورد.<sup>۴</sup>

### پارسک

از آنجاکه زاویه و فاصله به طور معکوس به هم ارتباط دارند، می‌توان واحدی را برای فاصله تعیین نمود به گونه‌ای که اختلاف منظر یک ستاره در آن فاصله برابر با یک ثانیه قوسی باشد. این واحد پارسک<sup>۵</sup> نامیده می‌شود و واحدی است که معمولاً به وسیله ستاره‌شناسان حرفه‌ای مورد استفاده قرار می‌گیرد. رابطه ساده عبارت است از:

$$d = \frac{1}{p} \text{ pc}$$

$d$  برحسب پارسک و  $p$  اختلاف منظر برحسب ثانیه قوسی است. (علامت اختصاری پارسک pc است.)

بنابراین ستاره‌ای که در مقابل زاویه ۱ ثانیه قوسی قرار دارد، در فاصله ۱ pc واقع شده است. این فاصله معادل ۳/۲۶ سال نوری است، از این رو:

۱ پارسک برابر است با ۳/۲۶ سال نوری

ستاره‌ای که در اختلاف منظر آن  $\frac{1}{p}$  ثانیه قوسی است، در فاصله ۱۰ pc یا ۳۲/۶ سال نوری واقع شده است. اختلاف منظر نزدیک‌ترین ستاره ۰/۷۷۲ arcsec است (arcsec = ثانیه قوسی)؛ متناظر با فاصله  $d$  که به صورت زیر به دست می‌آید:

$$\begin{aligned} d &= \frac{1}{0.772} \text{ pc} \\ &= 1.295 \text{ pc} \\ &= 1.295 \times 3.26 \text{ ly} \\ &= 4.22 \text{ سال نوری} \end{aligned}$$

این ستاره در منظومه ستاره‌ای چندگانه آلفا قنطورس<sup>۶</sup> قرار دارد و عجیب نیست که با توجه به فاصله‌اش، پروکسیما قنطورس<sup>۷</sup> (قنطورس نزدیک) نام گرفته است.

در عمل و در اغلب موارد چیزها به این سادگی نیست. همه ستاره‌ها در حال حرکت به دور مرکز

کهکشان هستند، از این رو به آهستگی در عرض آسمان جابجا می‌شوند (مگر آنکه جهت حرکت آن‌ها مستقیماً به طرف ما یا به سمت مخالف باشد). به این حرکت، «حرکت ویژه<sup>۸</sup>» ستاره می‌گویند و معمولاً واحد آن ثانیه قوسی در سال است. بنابراین چنانچه تغییر موقعیت ستاره در دو طرف مدار زمین اندازه‌گیری شود، نمی‌توان فهمید که این تغییر ناشی از اختلاف منظر است یا حرکت ویژه و یا ترکیبی از هر دو. برای تفکیک این دو اثر، باید ستاره را بعد از یک دوره یک‌ساله، زمانی که زمین دقیقاً در موقعیت ابتدایی خود است رصد کنیم. هرگونه جابه‌جایی در محل ستاره پس از دوره یک‌ساله تنها ناشی از حرکت ویژه خواهد بود. با اندازه‌گیری دقیق این حرکت، سهم اختلاف منظر در جابه‌جایی ستاره به دست می‌آید. در عمل رصدهای چندساله بهترین نتیجه را می‌دهد.

### ۱۰-۳ هیپارکوس و گایا

آشفته‌گی‌های جو، میزان دقت در تعیین موقعیت ستارگان را محدود می‌کند. تا همین چند مدت پیش، تعداد ستاره‌هایی که اختلاف منظر آن‌ها به دست آمده بود، از چند هزار و حداکثر تا فاصله ۴۰ pc (۱۳۰ سال نوری) تجاوز نمی‌کرد. در سال ۱۹۸۹، ماهواره هیپارکوس<sup>۹</sup> جهت رصد موقعیت ستارگان بدون مزاحمت جو زمین به فضا پرتاب شد. در مدت سه سال و با دقتی حدود یک میلی‌ثانیه قوسی، فاصله و حرکت ویژه ۱۱۸,۰۰۰ ستاره تا فاصله حدود ۹۰ pc (۳۰۰ سال نوری) اندازه‌گیری شد. داده جمع‌آوری شده توسط هیپارکوس، به پیش‌بینی زمان اصابت دنباله‌دار شومیکر-لوی ۹ به مشتری کمک نمود. با وجود این، هیپارکوس تنها توانست اندازه‌گیری‌هایی فقط در گستره حدود ۱٪ اندازه کهکشان انجام دهد.

به دنبال مأموریت هیپارکوس که به آژانس فضایی اروپا تعلق داشت، تلسکوپ فضایی گایا<sup>۱۰</sup> در دسامبر ۲۰۱۳ به فضا پرتاب شد تا به نقطه لاگرانژی<sup>۱۱</sup> زمین-خورشیدی L<sub>2</sub>، حدود ۱/۵ کیلومتری زمین و مستقیماً در راستای دور از خورشید (سمت مقابل زمین نسبت به خورشید)، سفر کند. در کل، هرچه یک جسم از خورشید دورتر باشد، دوره تناوب آن (یا سال آن) طولانی‌تر است. اما در نقطه L<sub>2</sub>، یک فضاپیما کشش زمین را نیز دقیقاً در همان جهت خورشید احساس می‌کند - با این تأثیر که گویی جرم خورشید تا حدی افزایش یافته است - و لذا سریع‌تر به دور خورشید حرکت

می‌نماید. نکته هوشمندانه آن است که درست در یک فاصله مناسب از زمین، دوره تناوب فضاییما دقیقاً برابر با یک سال زمین خواهد بود، لذا نسبت به زمین، در یک نقطه فضا خواهد ماند. پس از رسیدن به نقطه L<sub>2</sub> در ژانویه ۲۰۱۴، یک چتر آفتابی به قطر ۱۰ متر باز شد. این چتر همواره رو به خورشید است، و ضمن خنک نگه داشتن گیایا، با استفاده از صفحات خورشیدی در سطح رو به خورشید، انرژی گیایا را تأمین می‌کند.

این مأموریت قرار است یک نقشه سه بعدی (یک فهرست از فضای سه بعدی) از حدود یک میلیارد ستاره، سیاره و سیارک را گردآوری کند. این اجسام نماینده حدود ۱٪ از جمعیت راه شیری است، و داده‌های که از آن‌ها به دست می‌آید، ساختار کهکشان ما را به تفصیل نشان می‌دهد. گیایا موقعیت ستاره‌های روشن‌تر را با دقت ۷ میکروثانیه قوسی اندازه می‌گیرد - معادل قطر یک سکه کوچک در فاصله ماه - و با رصد هر ستاره تا ۷۰ بار در مدت مأموریت پنج ساله، خواهد توانست حرکت آن‌ها را در فضا ره‌گیری کند. این دقت بسیار بالا، گیایا را قادر خواهد ساخت که لنگش را در مسیر یک ستاره، که به وجود یک سیاره در اطراف آن اشاره دارد، کشف کند؛ ضمن اینکه با عبور تصویر سیارک‌ها و دنباله‌دارها در عرض دوربین یک میلیارد پیکسلی، گیایا آن‌ها را شناسایی می‌کند. تجهیزات ثانویه به اندازه‌گیری ویژگی‌های فیزیکی ستاره‌های روشن‌تر می‌پردازد، و ویژگی‌هایی از قبیل درخشندگی، دمای مؤثر، گرانش و ترکیب شیمیایی. با استفاده از این داده‌ها می‌توان منشأ، ساختار و تاریخچه تحول کهکشان راه شیری مورد مطالعه قرار داد.

ضمناً با استفاده از شیوه‌ای موسوم به «اختلاف منظر طیف نمودی»<sup>۱۲</sup> می‌توان به اندازه‌گیری فاصله‌ها در پهنه کهکشان پرداخت. البته توضیح این شیوه در همین فصل و پس از آشنایی با طیف ستارگان خواهد آمد.

## ۱۰-۴ رنگ و دمای سطحی ستاره

با صرف کمی وقت و تماشای ستارگان، ملاحظه می‌نمایید که آن‌ها رنگ‌های گوناگونی دارند. بدالجوزا در صورت فلکی جبار<sup>۱۳</sup> و دبران در صورت فلکی ثور<sup>۱۴</sup> نارنجی هستند. عیوق در صورت فلکی ارابه‌ران<sup>۱۵</sup> تاحدی زرد، و رِجل الجبار<sup>۱۶</sup>، آم هم در صورت فلکی جبار، سفید متمایل به آبی است. رنگ‌هایی که ما مشاهده می‌کنیم تابعی از دمای سطحی ستاره است. با افزایش دمای سطح

ستاره از حدود ۳۰۰۰ به ۲۰٫۰۰۰ کلوین، رنگ ستاره از قرمز به سمت نارنجی، زرد، سفید و آبی حرکت می‌کند.

## ۵-۱۰ طیف ستارگان

بسته به دمای فام سپهر یک ستاره، مجموعه‌ای از خطوط جذبی (تیره) در طیف یک ستاره مشاهده می‌شود. برای مثال، هیدروژن خنثی مجموعه‌ی منحصر به فردی از خطوط طیفی را تولید می‌کند. این خطوط، موسوم به سری بالمر<sup>۱۷</sup>، از طول موج ۳۶۳/۴۶ nm در فرابنفش شروع و تا ۶۵۶/۳ nm در قرمز ادامه می‌یابد. مشخص‌ترین آن‌ها خط قرمز با طول موج ۶۳۵/۳ nm است که خط H $\alpha$  (بخوانید اچ-آلفا) نام دارد. این خط در ابرهایی از گاز دیده می‌شود، جایی که الکترون به وسیله تابش فرابنفش به ترازهای برانگیخته منتقل شده، سپس به ترازهای پایین‌تر انرژی برمی‌گردد.

چشمان ما به نور قرمز خط H $\alpha$  حساس نیستند و متأسفانه، ما رنگ بسیار کمی را در جهان با چشمانمان می‌بینیم. اما چشمان ما به نور سبز بسیار حساس‌ترند. با استفاده از یک تلسکوپ ۱۶ اینچی، من توانسته‌ام بخش مرکزی سحابی سیاره‌ای دمبل<sup>۱۸</sup> را که به رنگ سبز روشن<sup>۱۹</sup> به نظر می‌رسد مشاهده کنم.

اتم‌های دیگر نیز، در حالت یونیده یا خنثی، سری مشابهی از خطوط تولید می‌کنند که بستگی به دمای جو ستاره دارد. از این رو طیفی که ما مشاهده می‌کنیم مخلوطی از تمام این خطوط است و شدیداً به دما بستگی دارد. برای مثال، چنانچه دمای جو ستاره حدود ۹۰۰۰ k باشد، سری بالمر هیدروژن<sup>۲۰</sup> قوی‌ترین خطوط است. در دماهای خیلی بالا، عملاً تمام اتم‌های هیدروژن یونیده‌اند، لذا خطوط بالمر بسیار ضعیف است. با وجود این، انرژی بسیار زیادتری برای یونش کامل هلیوم لازم است، در نتیجه هم خطوط هلیوم خنثی (He I) و هم هلیوم تک یونیده (He II) دیده می‌شود.

در اواخر قرن نوزدهم، طیف هزاران ستاره به وسیله ستاره‌شناسان دانشگاه هاروارد عکس برداری شد. این طیف‌ها جهت دسته‌بندی ستارگان به رده‌های طیفی<sup>۲۱</sup> مورد استفاده قرار گرفت. برای مثال در ستاره‌های رده A، خطوط بالمر هیدروژن در قوی‌ترین صورت خود دیده می‌شدند. ستارگانی که خطوط هیدروژن موجود در طیف آن‌ها ضعیف بود و خطوط هلیوم دیده

می‌شد، رده O نام گرفتند. در کل، ستارگان به هفت رده طیفی تقسیم شدند که به ترتیب کاهش دما عبارت‌اند از: O، B، A، F، G، K و M. داغ‌ترین آن‌ها O و سردترینشان M است. هر رده به ۱۰ زیرگروه تقسیم می‌شود، در نتیجه داغ‌ترین ستارگان در یک رده، مثلاً رده G، G0 و سردترین آن‌ها G9 نامیده می‌شود. خورشید ما در رده G2 قرار دارد، پس نزدیک به انتهای داغ‌تر رده G واقع شده است.

- ستاره‌های رده O از حدود  $60,000k$  تا متغیرند. زمانی که تحول ستارگان بحث شد خواهیم دید که این ستارگان طول عمری بسیار کوتاه دارند و لذا نسبتاً کمیاب هستند.
  - ستاره‌های رده B سردترند، از دمای  $30,000k$  تا  $10,000k$ .
  - ستاره‌های رده A محدوده دمایی از  $10,000k$  تا  $7500k$  دارند.
  - ستاره‌های رده F از  $7500k$  تا  $6000k$  هستند.
  - ستاره‌های رده G که خورشید را هم شامل می‌شود، دماهایی از  $6000k$  تا  $5000k$  را پوشش می‌دهند.
  - ستاره‌های رده K محدوده دمایی از  $5000k$  تا  $3500k$  دارند.
  - ستاره‌های رده M، با دمای سطحی کمتر از  $3500k$ ، سردترین ستارگان هستند.
- در جدول زیر، درصد ستارگان در رده‌های گوناگون طیفی، بر اساس برآوردهای فعلی، نشان داده شده است.

رده	رنگ	تعداد (درصد)
O	آبی	۰/۰۰۳
B	آبی - سفید	۰/۱۳
A	سفید	۰/۶۳
F	سفید - زرد	۳/۱
G	زرد	۸
K	نارنجی	۱۳
M	قرمز	۷۵

خواهید دید که درصد بزرگی از ستارگان، ستاره‌های سرد رده M هستند و درصد بسیار کمی ستاره رده O و B وجود دارد.

نکته قابل توجه از این جدول آن است که خورشید، علیرغم آنچه گاهی بیان می‌شود، با یک ستاره متوسط فاصله زیادی دارد؛ با توجه به اینکه حدود ۹۶٪ ستارگان ضعیف‌تر، و تنها ۴٪ روشن‌تر از خورشیدند، این ستاره عملاً به خوبی در بالای جدول لیگ ستارگان جا خوش کرده است!

### ۱۰-۶ اختلاف منظر طیف نمودی

از آنجاکه طیف ستارگان حتی برای ستاره‌های بسیار دور نیز قابل اندازه‌گیری است، ما می‌توانیم مقیاس فاصله ستاره‌ای را در پهنه کهکشان گسترش دهیم و حتی نیم‌نگاهی نیز به کهکشان‌های مجاور داشته باشیم. شیوه مورد استفاده به «اختلاف منظر طیف نمودی»<sup>۲۲</sup> معروف است - هرچند که هیچ ربطی به اختلاف منظر ندارد! این روش برای استدلال ساده استوار است که تمام ستارگان یک رده طیفی، مثلاً ستاره‌های رده F0، دارای درخشندگی ذاتی یکسانی هستند. حال فرض کنید ستاره‌ای از رده F0 را مشاهده کردیم که ۱۰,۰۰۰ بار از ستاره‌ای از همین رده و در مجاورتمان، که فاصله آن را با روش اختلاف منظر ۸ pc به دست آورده‌ایم، کم‌نورتر است. قانون عکس مجذور به ما می‌گوید که ستاره دور باید  $(10,000)^{\frac{1}{2}}$  یا ۱۰۰ بار دورتر باشد، یعنی در فاصله ۸۰۰ pc قرار دارد.

مثالی دیگر: دو ستاره از رده B8 را در نظر بگیرید؛ مانند ستاره رجل الجبار در صورت فلکی جبار و یک ستاره با طیف مشابه که در ابر بزرگ ماژلانی رصد شده است.<sup>۲۳</sup> رجل الجبار ۲۳ میلیون بار روشن‌تر از ستاره دور به نظر می‌رسد، پس با استفاده از قانون عکس مجذور و دانستن فاصله رجل الجبار، می‌توانیم حساب کنیم که ابر بزرگ ماژلانی در فاصله حدود ۴۸,۰۰۰ پارسک یا ۱۵۶,۰۰۰ سال نوری قرار دارد.

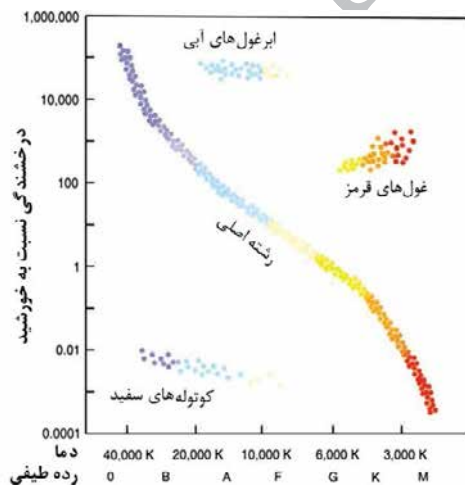
روش اختلاف منظر طیف نمودی از دو مشکل بنیادی رنج می‌برد. اول آنکه ستاره‌های یک رده طیفی الزاماً درخشندگی یکسانی ندارند. چراکه درخشندگی ستاره، تا حدی به چیزی که فلزی بودن<sup>۲۴</sup> ستاره - در صد عناصر سنگین‌تر از هلیوم یا هیدروژن در ساختار آن - نامیده می‌شود، بستگی دارد. همین موضوع دقت این روش را کم می‌کند.



اندازه‌گیری درخشندگی ستارگان دور از مشکلی دیگر نیز رنج می‌برد و آن «خاموشی»<sup>۲۵</sup> است، نامی که به جذب نور توسط غبار بین راه اطلاق می‌شود. این مشکل روشنایی مشاهده شده ستاره را کاهش می‌دهد و باعث می‌شود که ستاره دورتر به نظر رسد. با وجود این، نور جذب شده توسط غبار در انتهای آبی طیف (طول موج کوتاه‌تر) بیش‌تر از انتهای قرمز آن (طول موج بلندتر) است. از این رو ستاره‌ای که نور آن از میان ابرهای غبار عبور کرده است قرمزتر از آنچه باید، به نظر می‌رسد. با استفاده از این اثر، می‌توان برآوردی از میزان تأثیر بر روشنایی ظاهری ستاره به دست آورده، یک تصحیح مناسب را به کار بست.

### ۱۰-۷ نمودار هردسبرونگ-راسل

در اوایل قرن بیستم، آینار هردسبرونگ در دانمارک و هنری راسل در دانشگاه پرینستون آمریکا<sup>۲۶</sup>، به طور مستقل نموداری از درخشندگی ستارگان نسبت به دمای آن‌ها رسم نمودند که به نمودار هردسبرونگ-راسل یا نمودار اچ-آر (H-R) معروف شده است (شکل ۱۰-۲). هر دو محور لگاریتمی است. محور  $x$  دما را نشان می‌دهد (توجه کنید که به سمت چپ نمودار، دما افزایش می‌یابد) و البته در شکل ۱۰-۲، من رده طیفی را نیز آورده‌ام. محور عمودی معرف روشنایی است که نسبت به خورشید بیان می‌گردد.



شکل ۱۰-۲: نمودار هردسبرونگ-راسل

«رشته اصلی<sup>۲۷</sup>» ناحیه‌ای به شکل حرف S انگلیسی است که از بالا سمت چپ (ستاره‌های بسیار روشن رده O با دمای سطحی بالا) تا پایین سمت راست (ستاره‌های ضعیف رده M با دمای سطحی پایین) امتداد دارد. این ناحیه بین ۸۰٪ تا ۹۰٪ تمام ستارگان را در برمی‌گیرد. ستاره‌هایی که در قسمت پایین سمت راست رشته اصلی قرار دارند، «کوتوله‌های قرمز<sup>۲۸</sup>» نامیده می‌شوند، چراکه درخشندگی آن‌ها بسیار کمتر از خورشید است.

بالای رشته اصلی و در سمت راست نمودار، منطقه‌ای از ستارگان روشن است با رنگ‌هایی از زرد تا نارنجی و قرمز. از آنجاکه این ستاره‌ها بسیار روشن هستند، ستارگان غول<sup>۲۹</sup> نام گرفته‌اند، مانند ستاره دَبَران در ثور که یک غول قرمز نامیده می‌شود (اگرچه آن‌ها عملاً رنگ نارنجی دارند). در بالای نمودار ناحیه‌ای وجود دارد که ستارگان فوق‌العاده پرنور، از آبی تا قرمز، به نام ابرغول‌ها<sup>۳۰</sup> در آنجا یافت می‌شود. یدالجوزا، یک ابرغول قرمز در جبار، در منتهی‌الیه سمت راست بالای نمودار جا خوش کرده است. در مقابل، در منتهی‌الیه سمت چپ بالای نمودار، می‌توان ستاره رجل‌الجبار را یافت که روشن‌ترین ستاره در جبار است و روشنایی آن حدود ۴۵٫۰۰۰ برابر خورشید می‌باشد. این ستاره یک ابرغول آبی است.

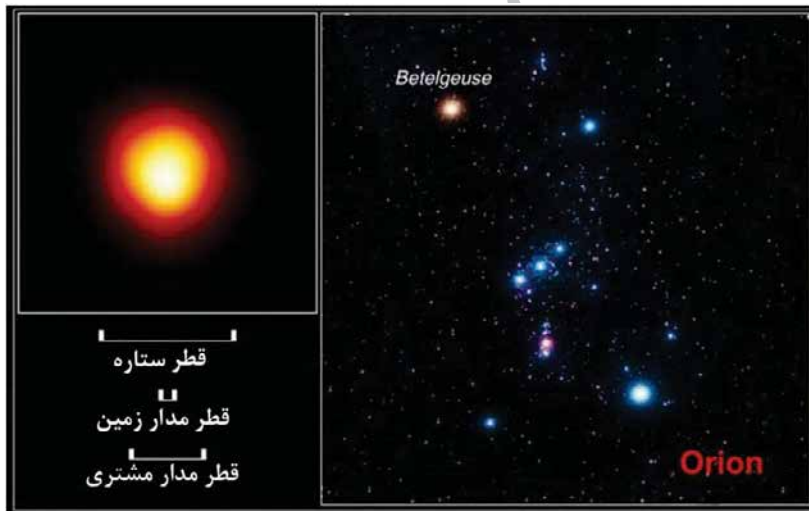
پایین رشته اصلی ناحیه‌ای قرار دارد که در آن ستاره‌های کوتوله سفید<sup>۳۱</sup> یافت می‌شوند. (دمای سطح آن‌ها دامنه وسیعی را در بر گرفته است و الزاماً سفید نیستند.) همدم ستاره شعرای یمانی در صورت فلکی کلب اکبر<sup>۳۲</sup> (سگ بزرگ) یک کوتوله سفید است. در فصل ۱۱ که پیرامون تحول ستارگان است خواهیم دید که کوتوله‌های سفید بقایای ستارگانی چون خورشید هستند. آن‌ها خیلی کوچک‌اند، در حدود اندازه زمین، از این رو حتی آن‌هایی که دمای سطحی بسیار بالایی دارند چندان درخشنده نیستند.

دلیل آنکه بیشتر ستاره‌ها در رشته اصلی دیده می‌شوند آن است که ستارگان در این ناحیه، با تولید انرژی به وسیله گداخت هسته‌ای هیدروژن به هلیوم، بیشتر عمر خود را به عنوان اجسامی پایدار سپری می‌نمایند. با تحول ستاره، محل آن در نمودار اچ-آر تغییر می‌کند و گفته می‌شود که ستاره در امتداد یک مسیر تحولی درون نمودار حرکت می‌نماید. مرحله غولی در زندگی ستاره نسبتاً کوتاه است، و به همین دلیل است که ما تعداد ستارگان بسیار کمتری را در این مرحله می‌بینیم.

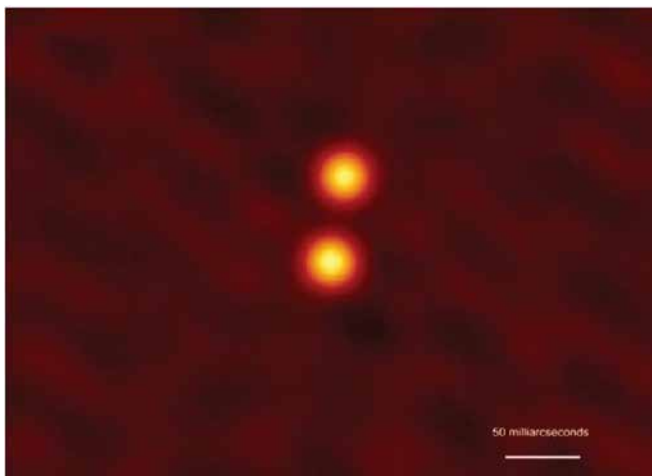
کوتوله‌های سفید، مرحله نهایی بسیاری از ستارگان هستند و در مدت میلیاردها سال به تدریج سرد می‌شوند؛ بنابراین به سمت پایین و طرف راست نمودار اچ-آر حرکت می‌کنند. به مرور زمان، با افزایش تعداد ستارگانی که در کهکشان ما به پایان عمر خود می‌رسند، تعداد این ستاره‌ها نسبت به ستاره‌های رشته اصلی افزایش خواهد یافت.

### ۱۰-۸ اندازه ستارگان: اندازه‌گیری مستقیم

اندازه زاویه‌ای ستارگان نسبتاً نزدیک، مستقیماً به دست می‌آید. قطر خورشید، که قبلاً محاسبه شد، با دانستن اندازه زاویه‌ای و فاصله آن نتیجه می‌شود. تنها یک ستاره وجود دارد (یدالجوزا، ابرغولی قرمز در صورت فلکی جبار) که اندازه زاویه‌ای آن را می‌توان مستقیماً با یک تلسکوپ مناسب مشاهده نمود. در سال ۱۹۹۵، اولین تصویر این ستاره با استفاده از دوربین جسم کم‌نور تلسکوپ فضایی هابل<sup>۳۳</sup> گرفته شد و اندازه زاویه‌ای آن حدود ۰/۰۵ ثانیه قوسی به دست آمد (شکل ۱۰-۳). با در اختیار داشتن بهترین برآورد از فاصله این ستاره، می‌توان قطر آن را حساب کرد، که حدود یک میلیارد کیلومتر، تقریباً ۷۰۰ برابر خورشید، به دست آمده است. در شیوه‌ای موسوم به «تداخل سنجی اپتیکی»<sup>۳۴</sup> از دو یا چند آینه که به فاصله چند ده متر از



شکل ۱۰-۳: تصویر تلسکوپ فضایی هابل از یدالجوزا.

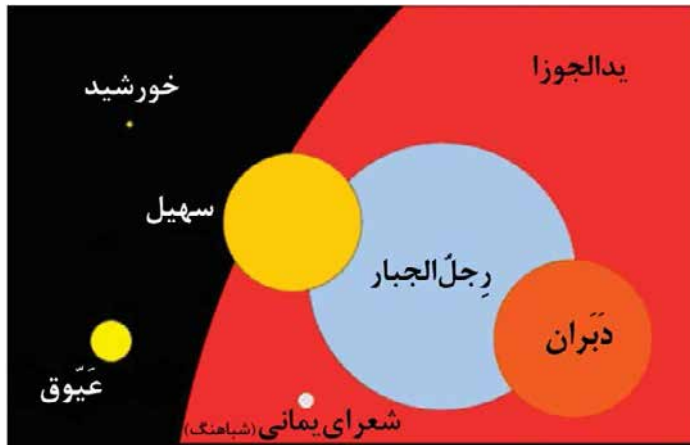


شکل ۱۰-۴: تصویر ستاره دوتایی عیوق که با تداخل سنج نوری COAST در رصدخانه نجوم رادیویی مولارد، متعلق به دانشگاه کمبریج، تهیه شده است.

هم قرار گرفته‌اند، استفاده می‌شود. نور آینه‌ها باهم ترکیب شده، اثر آن یک تلسکوپ نوری گول پیکر خواهد بود. بدین ترتیب توان تفکیک بسیار بالاتری نسبت به یک تلسکوپ تک، مانند تلسکوپ هابل با آینه‌ای  $۲/۴$  متری، به دست می‌آید. از این شیوه در اندازه‌گیری قطر زاویه‌ای ستاره‌های نزدیک استفاده شده است. با داشتن فاصله ستارگان که از روش اختلاف منظر به دست می‌آید، قطر آن‌ها قابل محاسبه است. **شکل ۱۰-۴** تصویری از ستاره دوتایی عیوق را نشان می‌دهد که در آن، دو ستاره تنها  $۵۰$  میلی‌ثانیه قوسی از هم فاصله دارند.

در سال ۲۰۰۲، با ترکیب نور دو تلسکوپ  $۸/۲$  متری از آرایه تلسکوپ خیلی بزرگ (VLT) در شیلی، یک تداخل سنج با خط‌مبنای  $۱۰۲/۴$  متر ایجاد شد. بدین ترتیب توان تفکیک آن معادل یک تلسکوپ نوری با قطر  $۱۰۰$  متر بود. به وسیله آن، قطر زاویه‌ای پروکسیما قنطورس، نزدیک‌ترین ستاره به زمین،  $۱/۰۲ \pm ۰/۰۸$  میلی‌ثانیه قوسی اندازه‌گیری شد. (اتفاقاً این مقدار برابر است با اندازه زاویه‌ای یک فضا‌نورد بر روی ماه، چنانچه از زمین نگریسته شود!) پروکسیما قنطورس در فاصله  $۱/۳$  پارسکی قرار دارد، از این رو قطر آن  $۱۰^۹ \times ۱/۴$  m به دست آمد که حدود یک هفتم قطر خورشید است.

در کل، شعاع ستارگان در رشته اصلی از حدود  $۲۰$  برابر خورشید در بالا سمت چپ نمودار اچ-آر، تا  $۰/۱$  خورشید در پایین سمت راست نمودار متغیر است (**شکل ۱۰-۵**). شعاع ستاره‌ها در ناحیه‌ای



شکل ۱۰-۵: اندازه نسبی چند ستاره

که ستاره‌های غول قرار دارند حدود ۱۰ تا ۱۰۰ برابر خورشید است؛ برای مثال، دبّران در ثور شعاعی ۴۵ برابر خورشید دارد. ستارگان ابرغولی چون یدالجوزا اغلب تپش می‌کنند. شعاع این ستاره بین ۷۰۰ تا ۱۰۰۰ برابر خورشید، در یک دوره حدود ۲۱۰۰ روزه، تغییر می‌نماید.

### ۹-۱۰ جرم ستارگان

جرم خورشید نقطه شروعی برای تعیین جرم دیگر ستارگان است. چنانچه ستاره‌ای را در یک سامانه دوتایی به دور ستاره‌ای G2 شبیه به خورشید رصد کنیم، می‌توانیم جرم آن را تعیین نماییم. این شیوه از تعمیم قانون سوم کپلر که توسط آیزاک نیوتون استخراج گردید استفاده می‌کند. نیوتون نشان داد که مجذور دوره تناوب مداری به صورت معکوس متناسب است با مجموع دو جرمی که دور هم در گردش‌اند. لذا اگر بتوان دوره تناوب و طول محور بزرگ مدار یک سامانه دوتایی را به دست آورد، مجموع دو جرم حساب می‌شود. فرض کنید یک سامانه دوتایی را رصد می‌کنیم که یک ستاره در آن از رده G2 است (با فرض جرم مساوی خورشید) و دیگری ستاره رده A0. اگر جرم مجموع ۴ برابر خورشید به دست آمد، در آن صورت جرم ستاره اخیر سه برابر خورشید خواهد بود. بدین ترتیب درمی‌یابیم که ستاره A0 سه برابر خورشید جرم دارد. حال اگر در یک سامانه دوتایی با مجموع جرم ۴/۵ برابر خورشید، یکی از ستاره‌ها از رده A0 بود، نتیجه

می‌گیریم که جرم ستاره دیگر  $1/5$  برابر خورشید است. با توجه به دمای  $7000\text{K}$  و طیف آن، می‌فهمیم که ستاره رده  $F2$  جرمی برابر با  $1/5$  برابر خورشید دارد. از این رصدها مشخص شده است که پرچم‌ترین ستارگان  $50$  برابر خورشید جرم دارند، و جرم کم‌جرم‌ترین آن‌ها  $1/18$  خورشید است.

### ۱۰-۱۰ مدت زندگی ستارگان

ستاره‌های پرچم‌تر در هسته خود داغ‌ترند و بسیار سریع‌تر از کم‌جرم‌ها سوخت هیدروژن خود را تمام می‌کنند. با فرض این که ستارگان درصد مشابهی از جرم خود را در هسته می‌سوزانند، نتیجه طبیعی آن خواهد بود که ستاره‌های پرچم‌تر عمر کوتاه‌تری بر رشته اصلی خواهند داشت.

ستاره *رجل‌الجبار* را به‌عنوان مثال در نظر بگیرید: جرم آن  $7$  برابر خورشید است و این در حالی است که درخشندگی آن  $45,000$  بار از خورشید بیشتر است؛ بنابراین تنها برای مدتی معادل  $\frac{17}{45,000}$  عمر خورشید در رشته اصلی باقی می‌ماند. تصور ما این است که خورشید حدود  $10$  میلیارد سال در رشته اصلی باقی خواهد ماند، و این بدین معنی است که *رجل‌الجبار* تنها می‌تواند برای حدود  $\frac{1}{3600}$  این مدت، یعنی حدود  $4$  میلیون سال، در رشته اصلی بماند! این رقم عملاً زیاد برآورد شده است؛ چراکه *رجل‌الجبار* بسیار داغ است، بنابراین درصد قابل توجهی از انرژی خود را در طیف فرابنفش تابش می‌کند که در درخشندگی بصری مورد توجه قرار نمی‌گیرد. یک اندازه‌گیری دیگر برای درخشندگی وجود دارد که به «درخشندگی تابش سنجی»<sup>۳۵</sup> معروف است و در آن تمام انرژی خروجی در کل طیف امواج الکترومغناطیس محاسبه می‌شود. بر این اساس، درخشندگی تابش سنجی *رجل‌الجبار* حدود  $66,000$  برابر خورشید است و نه  $45,000$  برابر، لذا عمر آن در رشته اصلی به حدود  $2/7$  میلیون سال کاهش می‌یابد.

در انتهای دیگر رشته اصلی، یک ستاره کوتوله قرمز ممکن است از یک درخشندگی برابر با  $\frac{1}{10,000}$  خورشید برخوردار باشد، اما با جرمی تنها  $1/8$  خورشید. این دو ویژگی، عمری حدود  $2000$  برابر خورشید برای آن به ارمغان می‌آورد که بسیار طولانی‌تر از سن کنونی جهان است. در حقیقت، درحالی که در ستاره‌هایی چون خورشید تنها  $10\%$  جرم ستاره در رشته اصلی به هلیوم تبدیل خواهد

شد، با به هم خوردن درون ستارگان کم جرم مانند کوتوله قرمز توسط جریان همرفت، درصد بیشتری از جرم آن‌ها به هلیوم تبدیل می‌گردد و از این رو عمر آن‌ها حتی از مقدار بالا نیز طولانی‌تر خواهد بود.

## پانویس‌ها

۱- Luminosity، انرژی خروجی ستارگان در تمام طیف الکترومغناطیس

2 - Parallax

۳- دقت کنید که این تنها روش نیست؛ اما در نردبان فاصله، این شیوه جزء اولین پله‌ها می‌باشد؛

بدین معنی که دقت و صحت شیوه‌های دیگر عمدتاً وابسته به این روش است. (مترجم)

۴- برای آشنایی بیشتر با این روش، کتاب درآمدی بر نجوم و کیهان‌شناسی، بخش ۶-۲ را ببینید.

5 - Parsec

6 - Alpha Centauri multiple star system

7 - Proxima Centauri

8 - proper motion

9- High Precision Parallax Collecting Satellite(Hipparcos)

10 - Gaia space telescope

11 - Sun-Earth Lagrange point L2

12 - spectroscopic parallax

13 - Betelgeuse in Orion

14 - Aldebaran in Taurus

15 - Capella in Auriga

16 - Rigel

17 - Balmer series

18 - Dumbbell planetary nebula

۱۹ - نور ناشی از خط  $H\beta$

20 - hydrogen Balmer series

21 - Spectral Types

22 - spectroscopic parallax

۲۳- Large Magellanic Cloud (LMC): کهکشانی در مجاورت راه شیری.

24 - Metallicity

25 - Extinction

26- Ejnar Hertzsprung and Henry Russell

27 - Main Sequence

28 - Red Dwarf

29 - Giant Star

30 - Supergiant

31 - White Dwarf

32 - Canis Major

33- Faint Object Camera of the Hubble Space Telescope (HST)

34 - Optical Interferometry

35 - Bolometric Luminosity

# فصل ۱۱

## ستاره‌های کهن سال

این فصل به بررسی تحول ستارگان در مراحل آخر زندگی پرداخته، بقایای آن‌ها را پس از مرگ تشریح خواهد نمود: کوتوله‌های سفید، ستاره‌های نوترونی و سیاه‌چاله‌ها.

برای تبدیل یک جرم گازی در حال رمبش به ستاره، باید گداخت هسته‌ای در مرکز آن آغاز شود. این واکنش به دمایی حدود ۱۰ میلیون کلوین نیاز دارد و این مهم تنها زمانی دست‌یافتنی است که جرم در حال انقباض بیش از حدود  $10^{29}$  kg باشد؛ تقریباً  $\frac{1}{3}$  جرم خورشید یا ۲۰ برابر جرم مشتری.

در ستارگان کم‌جرم، کمتر از حدود ۰/۵ جرم خورشید، فرآیند تبدیل هیدروژن به هلیوم از طریق گداخت هسته‌ای، شبیه به خورشید است. اما علی‌رغم اینکه در ستاره‌های پرجرم‌تر، گداخت هسته‌ای تنها ۱۰٪ جرم ستاره را تبدیل می‌کند (جرم موجود در هسته ستاره)؛ تصور بر این است که در ستاره‌هایی که کم‌ترین جرم را دارند، جریان‌های همرفتی با به هم زدن درون ستاره، بیشتر جرم آن را در واکنش هسته‌ای شرکت می‌دهد. بدین ترتیب مدت زمانی که آن‌ها می‌توانند فرایند گداخت هیدروژن به هلیوم را اجرا کنند افزایش می‌یابد - دوره‌ای که بسیار طولانی‌تر از سن کنونی جهان است. از این رو ما هیچ گواهی مبتنی بر مشاهده مستقیم در اختیار نداریم که نشان دهد پس از توقف گداخت هسته‌ای در این ستارگان چه اتفاقی می‌افتد، و تنها می‌توانیم از مدل‌سازی‌های رایانه‌ای برای تحقیق درباره آنچه ممکن است رخ دهد، استفاده نماییم.

برای گداخت هلیوم به عناصر سنگین‌تر، دماهایی از مرتبه ۱۰۰ میلیون کلوین نیاز است؛ و این نیازمند جرمی کافی در لایه‌های اطراف هسته است تا با تأمین فشار لازم، ستاره به آن دما دست یابد. در ستارگانی با جرم کمتر از ۰/۵ جرم خورشید، فشار کافی برای فراهم نمودن دمایی که جهت آغاز سوختن هلیوم لازم است وجود ندارد. در نتیجه، نهایتاً پس از توقف گداخت هسته‌ای که



هیدروژن را به هلیوم تبدیل می‌کند<sup>۲</sup>، ستاره به آرامی شروع به رمبش کرده، بعد از یک دوره چند صد میلیارد ساله به آنچه کوتوله سفید نام دارد تبدیل می‌گردد. پس از هزاران میلیارد سال، کوتوله سفید تا آنجا سرد می‌شود که دمای سطحی آن پایین‌تر از حدی است که بتواند نور قابل توجهی را گسیل دارد. در این مرحله، باقی‌مانده بی‌جان به کوتوله سیاه<sup>۳</sup> تبدیل شده است. هم‌اینک هیچ کوتوله سفیدی ناشی از ستارگان کم‌جرم وجود ندارد؛ اما در ادامه که به ستارگان میان‌جرم می‌پردازیم به تفصیل درباره کوتوله‌های سفید بحث خواهیم کرد، چراکه عاقبت این ستارگان نیز به کوتوله‌های سفید ختم می‌شود؛ کوتوله‌هایی که هم‌اکنون رصد شده‌اند.

تمامی ستارگان در محدوده ۰/۵ تا ۸ برابر جرم خورشید، عاقبتی مشترک به شکل کوتوله سفید دارند. با وجود این، تفاوتی در فرآیند گداخت هسته‌ای از هیدروژن به هلیوم، بین ستاره‌هایی با جرم بیش از دو برابر خورشید و کمتر از آن وجود دارد.

در ستاره‌هایی با کمتر از دو برابر جرم خورشید، مانند خورشید خودمان، عمده انرژی از آنچه چرخه پروتون-پروتون نام دارد به دست می‌آید. اما فرآیند پیچیده‌تری وجود دارد موسوم به چرخه کربن-نیتروژن-اکسیژن (CNO) که بین ۱٪ تا ۲٪ از انرژی کل خورشید ناشی از آن است. در ستارگانی با جرم بیشتر از ۲ خورشید، این فرآیند که به طور مستقل توسط کارل وایتس‌زکر و هانس بته<sup>۴</sup> به ترتیب در سال‌های ۱۹۳۸ و ۱۹۳۹ ارائه گردید، غالب می‌شود. این چرخه یک راه بسیار مؤثر در تبدیل هیدروژن به هلیوم است، و از این رو هیدروژن در ستاره‌های پرجرم‌تر سریع‌تر سوخته، انرژی خروجی از هسته ستاره را افزایش می‌دهد. چون این افزایش انرژی باید با تابش از سطح ستاره متعادل گردد، این ستارگان آبی‌تر و درخشان‌تر هستند.

نتیجه خالص این چرخه عبارت است از گداخت دو پروتون و تشکیل یک ذره آلفا همراه با دو پوزیترون، دو نوترینوی الکترونی (که مقداری از انرژی ستاره را به بیرون حمل می‌کند) و سه پرتو گاما. کربن به صورت کاتالیزور عمل می‌کند و بازتولید می‌شود. دو پوزیترون با نابودی دو الکترون، مقداری انرژی به صورت پرتو گاما آزاد می‌کنند. در هر نابودی دو پرتو گاما تولید می‌شود.

زمانی که فرآیند CNO به یک حالت تعادل رسید، واکنش‌های هر مرحله با نرخی یکسان پیش خواهد رفت. کندترین واکنش در این چرخه، به تبدیل  $^{14}\text{N}$  به  $^{15}\text{O}$  مربوط می‌شود. از این رو برای

فراهم شدن نرخ یکسان، بایستی تعداد هسته نیتروژن موجود به طور چشمگیری بیش از اکسیژن و کربن باشد. بدین ترتیب با گذشت زمان، مقدار نسبی نیتروژن افزایش می‌یابد تا اینکه تعادل برقرار شود. در این مرحله، با توجه به پایداری تعداد کل ذرات نیتروژن، کربن و اکسیژن، مقدار نیتروژن فراوان‌ترین خواهد بود. این فرآیند اساساً تمام نیتروژن موجود در جهان را تولید می‌کند و به همین سبب برای ما اهمیت فوق‌العاده‌ای دارد، چراکه نیتروژن یکی از عناصر اصلی در تمامی گونه‌های حیات بر روی زمین است.

### ۱-۱۱ فرایند سه آلفا

بالاخره، خواه به وسیله زنجیره پروتون-پروتون و خواه به وسیله چرخه CNO، هسته ستاره به هلیوم تبدیل خواهد شد. در این هنگام گداخت هسته‌ای متوقف می‌شود و فشار درون هسته که از رمبش گرانشی جلوگیری می‌کند، سقوط می‌نماید. لذا هسته ستاره شروع به کوچک شدن می‌کند و در همان حین دمای آن افزایش می‌یابد. در نهایت، زمانی که دما به حدود ۱۰۰ میلیون کلوین رسید، واکنشی جدید معروف به فرایند سه آلفا ( $3\alpha$ ) اتفاق می‌افتد. علت این نام‌گذاری آن است که سه هسته هلیوم، که ذرات آلفا نیز نامیده می‌شوند، در این فرایند درگیر هستند. این فرایند فوق‌العاده زیرکانه است. بدیهی است در هسته آکنده از هلیوم، اولین واکنش هسته‌ای عبارت است از گداخت دو هسته  ${}^4\text{He}$  و تولید  ${}^8\text{Be}$ . اما  ${}^8\text{Be}$ ، با طول عمر  $10^{-16}$  s، بسیار ناپایدار است و عملاً بلافاصله به دو هسته  ${}^4\text{He}$  اولیه واپاشی می‌نماید. تنها زمانی که دمای هسته تا ۱۰۰ میلیون کلوین بالا رفته است، احتمال دارد یک هسته دیگر  ${}^4\text{He}$  بتواند پیش از واپاشی  ${}^8\text{Be}$  با آن جوش بخورد و یک هسته  ${}^{12}\text{C}$  تولید نماید. برای ما روی زمین بسیار حیاتی است که این چنین اختلاف دمایی بین دمای گداخت هیدروژن به هلیوم (حدود ۱۵ میلیون کلوین)، و دمای گداخت هلیوم به  ${}^{12}\text{C}$  (۱۰۰ میلیون کلوین) وجود دارد. در غیر این صورت، چنانچه امکان این فرایند در دماهای نزدیک به دمای زنجیره پروتون-پروتون یا CNO وجود داشت، ستاره نمی‌توانست پایدار با طولانی مدتی با درخشندگی نسبتاً ثابت در هنگام حضور در رشته اصلی داشته باشد. این مهم باعث گردیده است که دمایی پایدار برای میلیاردها سال روی زمین استقرار یابد و امکان تکامل حیات

هوشمند فراهم آید.

اما هنوز مشکل واقعی دیگری در راه دست یابی به  $^{12}\text{C}$  وجود دارد. دمایی حدود ۱۰۰ میلیون کلوین لازم است تا هسته  $^4\text{He}$  شانس معقولی برای جوش با هسته  $^9\text{Be}$ ، پیش از واپاشی آن، پیدا نماید. در این دما، هسته  $^4\text{He}$  به سرعت در حال حرکت است و از این رو انرژی جنبشی فراوانی دارد. انتظار این است که این انرژی از تولید یک هسته پایدار  $^{12}\text{C}$  جلوگیری نماید چراکه به آن اندازه بزرگ است که بتواند هسته تازه شکل گرفته را متلاشی کند. [اگر یک توپ بیلیارد سفید ( $^4\text{He}$ ) به آرامی به یک توپ بیلیارد قرمز ( $^9\text{Be}$ ) برخورد نماید، همدیگر را لمس کرده، کنار هم قرار می گیرند. اما اگر این برخورد با سرعت بالا رخ دهد، احتمالاً هر دو متلاشی می شوند.]

پس چرا  $^{12}\text{C}$  این قدر فراوان است؟ این مسئله توسط اخترفیزیکدان انگلیسی فرد هویل<sup>۵</sup>، در اوایل دهه ۱۹۵۰ با قوت پیگیری شد. او در آن زمان اظهار داشت: «آزآنجا که ما در این جهان با کربن احاطه شده ایم و زندگی ما بر مبنای کربن است، ستاره ها باید روشی بسیار مؤثر برای ساخت آن یافته باشند و من به دنبال کشف آن روش هستم.»

او دریافت اگر می شد حالتی برانگیخته برای هسته متصور بود، انرژی اضافه ای که در واکنش وجود داشت (و انتظار می رفت باعث تکه تکه شدن هسته تازه شکل گرفته  $^{12}\text{C}$  شود) می توانست در هسته جای گیرد. به عبارت دیگر، یک حالت برانگیخته در هسته کربن وجود داشته باشد (که در فیزیک ذرات، تشدید<sup>۶</sup> نام دارد) به گونه ای که انرژی آن نسبت به حالت پایه درست برابر با انرژی اضافی باشد. گرچه هسته اتم معمولاً در حالت پایه قرار دارد، به دلیل ماهیت کوانتومی آن، می تواند با جذب انرژی (مثلاً برهم کنش با یک فوتون پرتو گاما) به حالتی برانگیخته جهش نماید. این هسته پس از مدتی به حالت پایه برمی گردد و یک پرتو گاما با همان انرژی تابش می کند. این روند شبیه به جذب یک فوتون انرژی در اتم و برانگیزش الکترون به تراز بالتر است. در گام بعدی، الکترون در یک یا چند مرحله به ترازهای پایین تر جهش نموده، فوتون تابش می کند.

هویل فهمید که یک هسته کربن پایدار تنها در صورتی به دست می آید که حالتی برانگیخته داشته باشد؛ به گونه ای که این حالت از لحاظ انرژی، بسیار نزدیک به انرژی مازاد سه  $^4\text{He}$  که در کنار هم آن را می سازند، باشد. بدین ترتیب هسته حاصل به یک حالت برانگیخته رفته، با تابش

یک فوتون پرتو گاما به حالت پایه و پایدار برمی‌گردد.

برخی آزمایش‌ها در اواخر دهه ۱۹۴۰ احتمال وجود این حالت را تقویت می‌نمود، اما به هویل گفته شد که این نتایج اشتباه است. هویل استدلال می‌کرد که باید یک حالت برانگیخته مناسب وجود داشته باشد، در غیر این صورت ما نیز نمی‌توانستیم وجود داشته باشیم. او با اصرار فراوان از فیزیکدانان حالت پایه در مؤسسه فناوری کالیفرنیا (کالتک) به رهبری ویلیام فاوُلر<sup>۱</sup> خواست تا آزمایش‌ها را تکرار کنند. فاوُلر این کار را کرد (گفته می‌شود فقط برای اینکه هویل را دست‌به‌سر کند) و دریافت که واقعاً یک حالت برانگیخته در محدوده ۵٪ انرژی پیش‌بینی شده توسط هویل وجود دارد! در حقیقت هویل از اصل انسان‌محوری<sup>۲</sup> استفاده می‌کرد. بر اساس این اصل وجود ما به عنوان ناظر، قیدهایی را بر جهانی که در آن زندگی می‌کنیم قرار می‌دهد. ویلیام فاوُلر جایزه نوبل را (بخشی به خاطر این کار) دریافت نمود. بسیاری اعتقاد دارند که هویل نیز به دلیل این مشاهده تیزبینانه و کاری که پس از آن جهت نمایش چگونگی سنتز عناصر در ستارگان انجام داد، می‌بایست جایزه نوبل را دریافت می‌کرد.

برای جرم معینی از گاز، میزان انرژی‌ای که در فرآیند (۳α) آزاد می‌شود تنها حدود ۱۰٪ مقدار انرژی‌ای است که در تشکیل هلیوم از هیدروژن تولید شده است، لذا مدت زمان مرحله هلیوم‌سوزی تنها حدود ۱۰٪ مدتی خواهد بود که ستاره در رشته اصلی قرار داشته است.

در مرحله هلیوم‌سوزی، هسته ستاره شاید تا  $\frac{1}{5}$  اندازه ابتدایی خود فشرده شود و به دمایی حدود ۱۰۰ میلیون کلوین برسد؛ به علاوه لایه‌ای از هیدروژن که در اطراف هسته می‌سوزد. انرژی‌ای که بدین ترتیب تولید شده باعث می‌گردد بخش‌های بیرونی ستاره نیز تحت تغییراتی اساسی قرار گیرد. شعاع ستاره، در کل، افزایش می‌یابد و به حدود ۱۰ برابر می‌رسد؛ اما در همان زمان سطح ستاره خنک می‌شود و (در ستاره‌ای با جرم خورشید) به حدود ۳۵۰۰ کلوین می‌رسد. در آن هنگام ستاره رنگی نارنجی دارد و به غول قرمز<sup>۳</sup> (شاید نامی خودسرانه) تبدیل شده است.

برای ستاره‌های میان جرم با جرمی کمتر از خورشید، این روند تقریباً تا مرز تشکیل عناصر به وسیله گداخت هسته‌ای پیش می‌رود، چراکه جرم موجود بر روی هسته ستاره آن قدر نیست که بتواند دما را به اندازه کافی افزایش دهد تا واکنش‌های هسته‌ای بیشتری اتفاق افتد. ستارگانی که در بخش بالایی این محدوده جرمی قرار دارند می‌توانند یک واکنش هسته‌ای دیگر را اجرا کرده،

یک ذره آلفای دیگر را با یک هسته کربن ترکیب کنند تا اکسیژن ساخته شود. عقیده بر آن است که این واکنش به همراه واکنش (۳α)، منابع اصلی کربن و اکسیژن موجود در جهان هستند. بدیهی است که اگر این عناصر درون ستارگان باقی می‌ماندند، ما وجود نداشتیم. ستارگان باید بسیاری از مواد خود را به درون فضا بیرون بریزند - نمونه‌ای دیگر از اصل انسان محوری - و این دقیقاً آن چیزی است که مشاهده می‌شود.

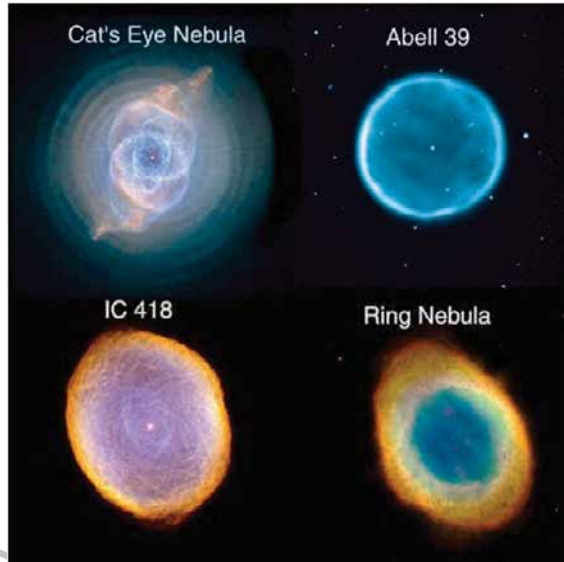
### ۲-۱۱ ستارگان متغیر

در مراحل آخر عمر، پایداری ستاره کمتر می‌شود و حتی ممکن است اندازه آن نوسان کند. با بزرگ شدن ستاره، مساحت جانبی آن نیز افزایش می‌یابد؛ روندی که در جهت افزایش درخشندگی است. اما در همان زمان، دمای سطحی کاهش پیدا می‌کند و به قرمز رنگ شدن ستاره می‌انجامد. با توجه به اینکه انرژی تابشی با توان چهارم دما متناسب است، عملاً با بزرگ شدن ستاره درخشندگی آن کاهش می‌یابد. برعکس، با کوچک شدن ستاره، رنگ آن به آبی می‌گراید و درخشندگی آن افزایش پیدا می‌کند. تغییرات متناوب در رنگ و درخشندگی منجر به چیزی می‌شود که ستاره متغیر<sup>۱۱</sup> نام دارد. بادهای ستاره‌ای شدید در این مرحله از زندگی ستاره‌ها دیده می‌شود؛ از این رو بیشتر پوشش بیرونی خود را در فضا از دست می‌دهند.

### ۳-۱۱ سحابی سیاره‌ای

بالاخره به نظر می‌رسد ستاره آن قدر ناپایدار می‌شود که قسمت‌های خارجی خود را به بیرون پرت می‌کند. این قسمت‌ها در اطراف هسته باقیمانده، «سحابی سیاره‌ای»<sup>۱۲</sup> را به وجود می‌آورند. سحابی‌های سیاره‌ای از جمله زیباترین اجسامی به حساب می‌آیند که در جهان مشاهده می‌کنیم (شکل ۱-۱۱). بسیاری از آن‌ها را، مانند سحابی حلقوی و سحابی دمبل<sup>۱۳</sup>، می‌توان با تلسکوپ کوچکی رصد کرد. با بیش از ۱۵۰۰ سحابی سیاره‌ای شناخته شده، این سحابی‌ها نسبتاً فراوان هستند. انتظار آن است که تعدادی بسیار بیشتر، شاید بیش از ۵۰٫۰۰۰، در کهکشان ما وجود داشته باشد که البته به وسیله خطوط غبار مخفی شده‌اند. عبارت «سحابی سیاره‌ای» یک نام‌گذاری اشتباه است، چراکه آن‌ها هیچ ارتباطی با سیارات ندارند؛ هرچند که بسیاری از آن‌ها ظاهری شبیه

شکل ۱۱-۱: سحابی‌های سیاره‌ای. در تمام این موارد می‌توان باقیماندهٔ ستاره را در مرکز دید



به قرص دارند. آن‌ها پوسته‌هایی از گاز رقیق هستند که با سرعت چند ده کیلومتر در ثانیه در حال انبساط می‌باشند. مقداری غبار نیز در آن‌ها یافت می‌شود و جرمی نوعاً یک‌دهم تا یک‌پنجم خورشید دارند. تصور بر آن است که هر ساله حدود ۱۰ سحابی سیاره‌ای تشکیل می‌شود، بنابراین محیط بین‌ستاره‌ای در هر سال تقریباً به اندازهٔ جرم یک خورشید غنی‌تر می‌گردد.

#### ۱۱-۴ کوتوله سفید

در مرکز سحابی‌های سیاره‌ای، یک ستارهٔ سفید یا آبی-سفید قرار دارد. این ستاره‌ها چندان روشن نیستند؛ از این رو تلسکوپ‌های نسبتاً بزرگی برای دیدن آن‌ها لازم است. (نویسنده یک بار و در شرایط مناسب، با کمک تلسکوپ ۱۶ اینچ، ستاره را در مرکز سحابی حلقوی مشاهده نمود.) این ستاره در حال نزدیک شدن به آخرین مرحله از عمر خویش است، جایی که کوتوله سفید نام دارد. زمانی که واکنش‌های هسته‌ای پایان پذیرد، آنچه در هسته باقی مانده است تحت گرانش منقبض می‌شود. کربن و اکسیژن مواد اصلی تشکیل‌دهنده آن است و عاری از لایه‌های خارجی می‌باشد، چراکه توسط بادهای شدید ستاره‌ای و دفع سحابی سیاره‌ای، لایه‌های خارجی از آن جدا شده است. این حقیقت که انقباض بالاخره متوقف می‌شود به اثر شناخته‌شدهٔ مکانیک کوانتومی

موسوم به «فشار تبهگنی»<sup>۱۴</sup> برمی‌گردد. در سال ۱۹۲۶، فاولر دریافت که در نتیجه اصل طرد پاولی، بیش از دو الکترون نمی‌تواند یک تراز انرژی مشخص را اشغال نماید. با پر شدن ترازهای مجاز انرژی، الکترون‌ها شروع به فراهم نمودن یک فشار می‌کنند، موسوم به فشار تبهگنی الکترون<sup>۱۵</sup>، که نهایتاً انقباض را متوقف می‌نماید. این فشار تنها به چگالی، و نه دما، بستگی دارد، و نتیجه جالب این حقیقت آن است که هر چه جرم کوتوله سفید بی‌ستر باشد، شعاع آن کوچک‌تر است!

نتیجه دیگر این حقیقت - حمایت شدن به وسیله فشار تبهگنی الکترون - آن است که یک جرم حدی وجود دارد که نمی‌توان از آن تجاوز نمود. این جرم به ترکیب ستاره بستگی دارد و برای مخلوطی از کربن و اکسیژن، حدود  $1/4$  جرم خورشید است. این نتیجه در سال ۱۹۳۱ توسط ساپرحمانیان چاندرااسخار<sup>۱۶</sup>، زمانی که تنها ۱۹ سال داشت، منتشر شد! در سال ۱۹۸۳، چاندرااسخار به حق جایزه نوبل را برای این و کار دیگری دریافت کرد. ما بعداً خواهیم دید چنانچه جرم در حال رمبش بیش از حد چاندرااسخار باشد، چه اتفاقی خواهد افتاد.

شعاع کوتوله‌های سفید از  $0.008$  تا  $0.02$  شعاع خورشید متغیر است. اندازه بزرگ‌ترین آن‌ها (و از این رو کم‌جرم‌ترین) قابل مقایسه با زمین است که شعاعی  $0.009$  خورشید دارد. جرم کوتوله‌های سفید مشاهده شده، در محدوده  $0.17$  تا  $1/33$  جرم خورشید قرار دارد، بنابراین واضح است که باید چگالی بالایی داشته باشند. با توجه به اینکه جرمی برابر خورشید در حجمی یک میلیون بار کوچک‌تر متراکم‌تر شده است، چگالی آن نسبت به خورشید بیستی از مرتبه یک میلیون برابر باشد - حدود یک میلیون گرم بر سانتیمتر مکعب. (بیش از یک تن از ماده کوتوله سفید را می‌توان در یک قوطی کبریت جا داد!)

### کشف کوتوله‌های سفید

اولین کوتوله سفید شناخته شده به وسیله ویلیام هرشل در سال ۱۷۸۳ کشف شد. این کوتوله بخشی از سامانه ستاره‌ای سه‌تایی ۴۰ نهر<sup>۱۷</sup> بود. آنچه عجیب به نظر می‌رسید آن بود که علیرغم رنگ سفید (که معمولاً نشان‌دهنده ستارگان روشن است) درخشندگی بسیار پایینی داشت. البته این به دلیل اندازه کوچک آن است، زیرا گرچه هر مترمربع آن بسیار درخشانده است، اما تعداد مترهای مربع بسیار کم می‌باشد!

دومین کوتوله سفید کشف شده شباهنگ ب<sup>۱۸</sup> نام دارد که همدم شعرای یمانی (شباهنگ)، درخشان‌ترین ستاره در نیم کره شمالی است. فردریش بسل<sup>۱۹</sup> اندازه‌گیری‌های دقیقی از محل شعرای یمانی در آسمان، که به دلیل حرکت ویژه تغییر می‌کرد، انجام داد. حرکت ستاره خطی نبود، و بسل توانست به این استنباط دست یابد که شعرای یمانی همدمی دارد. مرکز جرم آن‌ها باید مسیری مستقیم در پهنه آسمان می‌داشت، اما هم شعرای یمانی و هم همدم آن به دور مرکز جرم گردش می‌کردند و همین، مسیری موجی شکل را برای شعرای یمانی رقم می‌زد. به دلیل نزدیکی بسیار این دو ستاره، رصد شباهنگ ب فوق‌العاده مشکل است، چراکه نور پخش شده از ستاره شعرای یمانی در اپتیک تلسکوپ آن را محو می‌نماید. یک تلسکوپ شکستی بسیار تمیز، کمترین پخش نور را دارد. زمانی که آلون کلارک<sup>۲۰</sup> در سال ۱۸۶۲ یک تلسکوپ جدید شکستی ۱۸ اینچ را آزمایش می‌کرد، شباهنگ ب را برای نخستین بار مشاهده نمود.

### آینده کوتوله‌های سفید

دمای سطحی مشاهده شده در کوتوله‌های سفید در محدوده‌ای از ۴۰۰۰ تا ۱۵۰٫۰۰۰ کلوین قرار دارد، لذا رنگ آن‌ها از نارنجی تا آبی-سفید متغیر است. تابش آن‌ها تنها از گرمایی که درونشان اندوخته شده است سرچشمه می‌گیرد، مگر آنکه موادی از ستاره همدم به سوی آن‌ها سرازیر شود. با توجه به سطح جانبی خیلی کوچک، زمانی بسیار طولانی لازم است تا سرد شوند؛ دمای سطحی پایین می‌آید، رنگ قرمز می‌شود و درخشندگی نیز کاهش پیدا می‌کند. هرچه دما پایین‌تر باشد، سرعت تلفات انرژی کمتر است. لذا زمان سرد شدن یک کوتوله سفید از ۲۰٫۰۰۰ به ۵۰۰۰ کلوین مشابه خواهد بود با سرد شدن از ۵۰۰۰ به ۴۰۰۰ کلوین. در حقیقت سن جهان آن قدر نیست که شاهد کوتوله‌های سفیدی با دمای چندان پایین‌تر از ۴۰۰۰ کلوین باشیم. سردترین کوتوله سفیدی که تاکنون مشاهده شده است، ۲۴۶ + WD۰۳۴۶، دمای سطحی ۳۹۰۰ کلوین دارد.

### کوتوله‌های سیاه

در نهایت، کوتوله سفید آن قدر سرد می‌شود که دیگر تابشی قابل دیدن نخواهد داشت و در آن زمان به کوتوله سیاه تبدیل خواهد شد. البته این کوتوله‌ها را همچنان می‌توان در طیف فروسرخ رصد نمود، هرچند که بسیار ضعیف خواهند بود. ضمناً حضور آن‌ها را در مداری به دور ستاره‌های



معمولی، می‌توان از تأثیرشان بر حرکت ستاره همدم استنباط کرد.

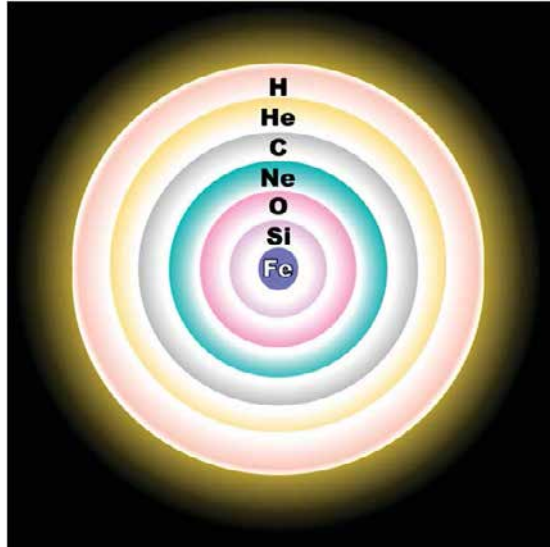
## ۱۱-۵ ستارگان پرجرم

در ستاره‌هایی که جرمشان از حدود ۸ برابر جرم خورشید تجاوز می‌کند، جرم موجود بر روی هسته آن قدر زیاد است که دمای آن را به حدی بیشتر از ستارگان کم جرم‌تر می‌رساند. این وضعیت به ربایش ذرات آلفا<sup>۲۱</sup> اجازه می‌دهد که جلوتر رود (ذرات آلفا می‌توانند از مرحله ساخت کربن و اکسیژن جلوتر بروند). پس از ساخت کربن و اکسیژن، حال امکان ساخت عناصر سنگین‌تر که عدد اتمی آن‌ها با مضربی از ۴ افزایش می‌یابد فراهم است<sup>۲۲</sup>. بدین ترتیب در فرآیند گداخت هسته‌ای و به نوبت،  $^{16}\text{O}$  به  $^{20}\text{Ne}$ ،  $^{20}\text{Ne}$  به  $^{24}\text{Mg}$  و  $^{24}\text{Mg}$  به  $^{28}\text{Si}$  تبدیل شده، هسته‌ای مملو از سیلیسیوم تولید می‌گردد.

برای آنکه هریک از واکنش‌های بالا رخ دهد، به ترتیب نیاز به افزایش دما است؛ چراکه ذرات آلفای ورودی، سد پتانسیل بزرگ‌تری را جهت تونل‌زنی در مقابل خود می‌بینند. در این گیرودار، پروتون‌ها نیز می‌توانند با این عناصر واکنش نمایند. بدین ترتیب هسته‌هایی با عدد اتمی میانی (اعدادی بین اعداد اتمی بالا)، مانند  $^{19}\text{F}$  و  $^{23}\text{Na}$  تولید می‌شود؛ البته فراوانی این عناصر کمتر است. بدین ترتیب ستاره‌ای با ساختمانی لایه‌لایه پدید می‌آید که در آن، عناصر هر لایه متفاوت از دیگری است؛ عناصر سنگین‌تر به مرکز نزدیک‌تر خواهند بود.

چنانچه دما به حدود مرتبه  $3 \times 10^9 \text{ K}$  برسد، در یک سری واکنش، سیلیسیوم به  $^{32}\text{S}$ ،  $^{36}\text{Ar}$  و پس از چند مرحله به  $^{56}\text{Ni}$  تبدیل می‌گردد. سیلیسیوم سوزی، هسته‌ای از آهن (اکثریت) و نیکل تولید می‌کند. آهن و همسایگان آن در جدول اتمی، پایدارترین هسته‌ها را دارا می‌باشند. از این رو واکنش‌های دیگر جهت ساخت هسته‌های سنگین‌تر، گرماگیر است (این واکنش‌ها به جای تأمین انرژی، انرژی جذب می‌کنند). اینجا نقطه‌ای است که گداخت هسته‌ای به ناچار متوقف می‌شود و ستاره، به اصطلاح، از هسته‌ای آهنی برخوردار است. این هسته با لایه‌هایی سبک‌تر، که همچنان در حال سوختن هستند، احاطه شده است و ساختاری به وجود می‌آورند که به شکل ۱۱-۲ شبیه است.

شکل ۱۱-۲: پوسته‌های شبه‌پیاز که به صورت گداخت در حال سوختن هستند. این وضعیت مربوط است به آخرین مراحل در تحول یک ستاره غول.



انرژی آزاد شده، در هر مرحله از سوختن کاهش می‌یابد؛ در نتیجه زمان سپری شدن هر مرحله کوتاه‌تر خواهد بود. ستاره‌ای با جرمی ۲۰ برابر خورشید، حدود ۱۰ میلیون سال از عمر خود را روی رشته اصلی سپری کرده، هیدروژن را به هلیوم می‌سوزاند. پس از آن، در مدت حدود یک میلیون سال، هلیوم را به کربن و در ۳۰۰ سال کربن را به اکسیژن می‌سوزاند. اکسیژن سوزی حدود ۲۰۰ روز طول می‌کشد و سیلیسیوم سوزی تنها در مدت دو روز خاتمه می‌یابد!

به مجرد اینکه هسته به حالت آهنی خود رسید، اوضاع به سرعت پیش می‌رود. در دماهای موجود در هسته (از مرتبه  $8 \times 10^9 \text{ K}$  در ستاره‌ای ۱۵ برابر جرم خورشید) فوتون‌ها آن قدر انرژی دارند که می‌توانند هسته‌های سنگین را متلاشی کنند؛ فرآیندی که به «فروپاشی فوتونی<sup>۲۳</sup>» معروف است. یک هسته آهن می‌تواند در این واکنش ۱۳ هسته هلیوم تولید کند، سپس این هسته‌های هلیوم به پروتون و نوترون تجزیه می‌شوند. با توجه به اینکه در زمان تولید عناصر سنگین انرژی آزاد می‌شد، این روند معکوس بسیار گرماگیر است (برای پیشرفت به انرژی نیاز دارد). بنابراین دما به شدت کاهش می‌یابد. در آن زمان فشار کافی جهت حمایت از هسته وجود ندارد و هسته شروع به رمبش می‌نماید تا آنکه «ستاره نوترونی<sup>۲۴</sup>» زاده شود.

در تشکیل ستاره نوترونی، الکترون‌های آزاد با پروتون‌های تولیدی در فروپاشی فوتونی هلیوم

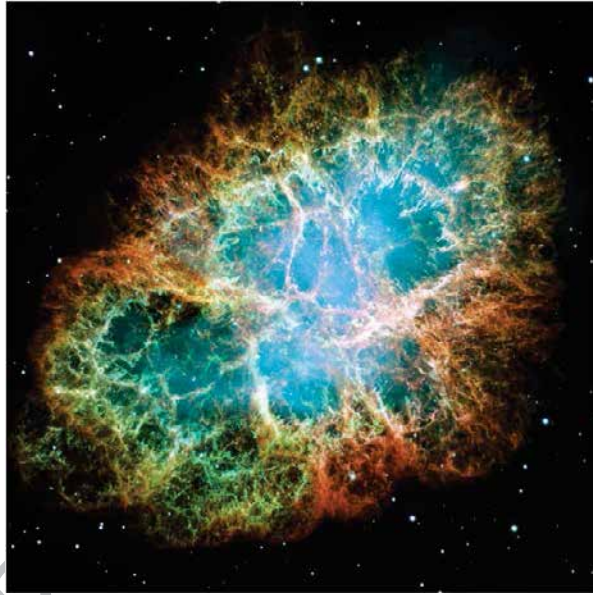
ترکیب شده، نوترون و نوترینوی الکترونی به دست می‌آید. نوترینوهای الکترونی به ندرت با مواد ستاره برهم‌کنش دارند، بنابراین بلافاصله ستاره را ترک کرده، مقادیر زیادی انرژی را با خود خارج می‌کنند. (درخشندگی نوترینویی در ستاره‌ای با جرم ۲۰ برابر خورشید، در یک بازه کوتاه زمانی تا هفت قدر از درخشندگی فوتونی آن تجاوز می‌نماید!) قسمت‌های بیرونی هسته با سرعت‌هایی تا  $70,000 \text{ km/s}$  رمبش می‌کند و در مدت تقریباً یک ثانیه، هسته‌ای که در ابتدا به اندازه زمین بود، به کره‌ای با شعاع ۴۰ کیلومتر فشرده می‌شود! این روند آن قدر سریع رخ می‌دهد که قسمت‌های خارجی ستاره، شامل لایه‌هایی که در آن‌ها هلیوم، کربن و اکسیژن در حال سوختن است، عملاً در فضا معلق می‌ماند و سقوط به طرف هسته را آغاز می‌کند.

رمبش هسته تا آنجا ادامه می‌یابد که چگالی در قسمت‌های مرکزی آن به حدود سه برابر چگالی هسته اتم، حدود  $8 \times 10^{14} \text{ g/cm}^3$  برسد. در این چگالی، نیروی قوی هسته‌ای که در هسته به صورت جاذبه عمل می‌کند، به نیروی دافعه تبدیل می‌شود - اثری که به واسطه اصل طرد پاولی در نوترون‌ها به وجود می‌آید و «فشار تبهگنی نوترونی»<sup>۲۵</sup> نام دارد. بر اثر این فشار، هسته حرکت ارتجاعی پیدا می‌کند، و یک موج ضربه به سمت بیرون، به طرف هسته خارجی در حال رمبش ستاره، منتشر می‌شود. از آنجاکه حالا مواد بالایی بسیار متراکم‌اند، تمام نوترینوها نمی‌توانند فوراً فرار کنند و انرژی بیشتری را به جبهه ضربه منتقل می‌کنند؛ بدین ترتیب موج ضربه راه خود را به سمت بیرون ستاره می‌گشاید و در آنجا یک درخشندگی بیشینه، حدود  $10^9$  برابر خورشید تولید می‌کند. این مقدار با تمام درخشندگی کهکشانی که ستاره در آن جا خوش کرده است قابل مقایسه می‌باشد!

## ۱۱-۶ ابرنواختر نوع دو

این سیر اتفاقات، «ابرنواختر نوع ۲»<sup>۲۶</sup> نام دارد. روشنایی بیشینه در هر سال حدود ۱۰۰ بار کاهش می‌یابد، تا آنجا که بالاخره از دید پنهان می‌شود. اعتقاد ما بر این است که این چنین ابرنواخترهایی در کهکشان ما به صورت متوسط در هر ۴۴ سال یک بار روی می‌دهد. متأسفانه غبار موجود در صفحه کهکشان تنها اجازه دیدن ۱۰ تا ۲۰٪ آن‌ها را به ما می‌دهد، از این رو اغلب دیده نمی‌شوند.

شکل ۱۱-۳: سحابی خرچنگ. در زوج ستاره‌هایی که در مرکز سحابی قرار دارند، ستاره پایین‌تر در سمت راست ستاره نوترونی است. [در این تصویر مشخص نشده است. (مترجم)]



### سحابی خرچنگ

در ۴ ژوئیه سال ۱۰۵۴، یک طالع‌بین درباری در زمان پادشاهان سانگ به نام یانگ وی ته<sup>۲۷</sup>، ابرنواختی را در صورت فلکی ثور مشاهده کرد. لایه گازی که در این انفجار ابرنواختی به بیرون پرتاب شده بود، در عصر جدید در سال ۱۷۳۱ توسط جان بیویس<sup>۲۸</sup> کشف شد. بیویس آن را در اطلس آسمان خود به نام «Uranographia Britannica» جای داد. بعدها، در سال ۱۷۵۸، چارلز مسیه<sup>۲۹</sup> در هنگامی که آسمان را برای بازگشت دنباله‌دار هالی جستجو می‌کرد، مستقلاً آن را کشف نمود. این ابرنواختی به‌عنوان اولین جسم در فهرست مسیه<sup>۳۰</sup>، M1 نام گرفت. ویلیام پارسون<sup>۳۱</sup> شکل آن را با استفاده از تلسکوپ ۷۱ اینچی خود در ایرلند کشید، و این‌گونه فکر کرد که شبیه به خرچنگ نعل‌اسبی است، لذا نام آن را سحابی خرچنگ<sup>۳۲</sup> گذاشت، نامی که امروزه نیز به آن شناخته می‌شود.

سحابی خرچنگ (شکل ۱۱-۳)، حدود ۱۰۰۰ سال پس از نخستین مشاهده، همچنان در حال انبساط با سرعت ۱۵۰۰ km/s است و درخشندگی آن ۱۰,۰۰۰ بار بیشتر از خورشید می‌باشد. به نظر می‌رسد بیشتر این تابش نتیجه حرکت الکترون‌ها در نزدیکی سرعت نور (معروف به الکترون‌های



شکل ۱۱-۴: ابرنواختر ۱۹۸۷A در ابر بزرگ ماژلانی.

نسبیتی) و گردش مارپیچ به دور خطوط میدان مغناطیسی در سحابی باشد. این حقیقت که سحابی هنوز این قدر فعال به نظر می‌رسد به صورت معمایی باقی مانده بود؛ تا اینکه در سال ۱۹۶۹، ستاره‌ای نوترونی (که بقایای هسته ستاره است) در مرکز سحابی کشف شد. در ادامه توضیحات تفصیلی آن خواهد آمد. هنوز می‌توان پوسته گازی را، که هم‌اکنون اندازه‌ای حدود  $6 \times 4$  دقیقه قوسی دارد، با تلسکوپی کوچک رصد کرد.

تصور می‌شود که سحابی خرچنگ باقی‌مانده یک ابرنواختر نوع ۲ باشد. در سال ۱۹۸۷، یک ابرنواختر (۱۹۸۷A) در کهکشان مجاور ما، ابر بزرگ ماژلانی، مشاهده شد و تصور بر این است که آن هم ابرنواختر نوع ۲ باشد. اما به نظر می‌رسد آن‌هایی که توسط تیکو براهه در سال ۱۵۷۲ و کپلر در سال ۱۶۰۴ رصد شدند، بر اثر سازوکار متفاوتی به وجود آمده‌اند و «ابرنواختر نوع یک<sup>۳۳</sup>» نام گرفته‌اند.

### ابرنواختر ۱۹۸۷A

در فوریه سال ۱۹۸۷، یک ابرنواختر در ابر بزرگ ماژلانی، کهکشانی در نزدیکی راه شیری، مشاهده شد و مدت‌ها با چشم غیرمسلح قابل رؤیت بود (شکل ۱۱-۴). این ابرنواختر به عنوان نزدیک‌ترین ابرنواختر قابل مشاهده از سال ۱۶۰۴ شناخته می‌شود.

جنبه‌ای از انفجار این ابرنواختر ارزش یادآوری دارد و آن زمان این انفجار است که به طور شگفت‌آوری سودمند واقع شد. در اواخر دهه ۱۹۷۰، یک مدل فیزیک ذرات به نام «نظریه متحد

بزرگ<sup>۳۴</sup>» پیشنهاد می‌کرد که پروتون‌ها با نیمه‌عمر  $10^{31}$  سال واپاشی می‌نمایند. به این معنی که اگر تعدادی پروتون در اختیار باشد، بعد از  $10^{31}$  سال نیمی از آن‌ها واپاشی کرده است. بدیهی است که این آزمایش را نمی‌توان پیاده نمود، اما در صورت مشاهده تعداد زیادی پروتون، امکان تشخیص واپاشی آن در مدت نسبتاً کوتاهی وجود دارد. عقیده بر این بود که پروتون به یک پوزیترون و یک پیون خنثی واپاشی می‌کند. پیون بلافاصله به دو فوتون پرتوگاما واپاشی می‌نماید. پوزیترون نیز پس از آن با یک الکترون واکنش کرده، به دو فوتون دیگر پرتو گاما نابود می‌شود.

برای این منظور، تعدادی آشکارساز در دهه ۱۹۸۰ ساخته شد. یکی از آن‌ها رصدخانه زیرزمینی کامیوکای ژاپن<sup>۳۵</sup> بود که ۱۰۰۰ متر زیر زمین قرار داشت. برای تأمین پروتون، ۳۰۰۰ تن آب خالص در استوانه‌ای به ارتفاع ۱۶ متر و قطر ۱۵/۶ متر جای گرفت و جداره داخلی استوانه با ۱۰۰۰ لامپ تکثیرکننده نور<sup>۳۶</sup> پوشانده شده بود. وظیفه PMT شناسایی پرتوهای گامای تولیدی در واپاشی پروتون بود. این رصدخانه در سال ۱۹۸۳ فعال شد و حساسیت آن در سال ۱۹۸۵ ارتقا یافت. تا امروز، حتی با کمک آشکارساز جدید با ۵۰,۰۰۰ تن آب، هیچ واپاشی رضایت بخشی از پروتون گزارش نشده است؛ ضمن آنکه نسخه‌های جدیدتر GUT اظهار می‌دارد که احتمالاً نیمه‌عمر به  $10^{35}$  سال نزدیک تر است. اما آنچه بسیار مهم است آن بود که این آشکارساز، که پس از ارتقاء سال ۱۹۸۵ در سال ۱۹۸۶ به طور کامل عملیاتی شد، می‌توانست نوترینو را نیز آشکار نماید. نظریه نسبت خاص اینشتین اظهار می‌دارد که هیچ ذره‌ای نمی‌تواند با سرعتی که نور در خلأ دارد حرکت کند. با وجود این در محیطی چگال تر مانند آب، سرعت نور کمتر است و امکان آنکه ذره‌ای با سرعت بیش از سرعت نور در آن حرکت کند، وجود دارد<sup>۳۷</sup>. اگر ذره باردار باشد، تابشی موسوم به تابش چرنکوف<sup>۳۸</sup> از آن ساطع می‌گردد. این رویداد شبیه به ایجاد یک غرش صوتی است هنگامی که هواپیما از سرعت صوت تجاوز می‌کند. برهم‌کنش نوترینو با الکترون موجود در آب باعث انتقال تقریباً تمام تکانه نوترینو به الکترون می‌شود و به دنبال آن الکترون در همان جهت و با سرعتی نسبی به حرکت درمی‌آید.

الکترون نسبی تولید تابش چرنکوف می‌کند که می‌توان آن را به وسیله لامپ‌های تکثیرکننده نور در اطراف مخزن آشکار کرد. مخروط در حال انبساط نور، حلقه‌ای از لامپ‌ها را تحریک می‌کند.

محل این لامپ‌ها جهت حرکت نوترینو را نشان می‌دهد. این قابلیت آن را به چیزی بیش از یک آشکارساز تبدیل می‌کند، چیزی شبیه به تلسکوپ، اما یک تلسکوپ خیلی بی‌ریخت!

زمانی که تنها چند ماه بعد، انفجار ابرنواختر ۱۹۸۷A دیده شد (و این همان تقارن فوق‌العاده سودمندی بود که به آن اشاره کردیم)، آزمایش کامیوکاند ۱۱ نوترینو را ظرف ۱۵ ثانیه آشکار ساخت. تجهیزاتی مشابه در اوهایو ۸ نوترینوی دیگر را در ۶ ثانیه آشکار نمود و آشکارسازی در روسیه در ۵ ثانیه ۵ نوترینو را تشخیص داد. این ۲۴ نوترینو تنها نوترینوهایی هستند که تاکنون از یک انفجار ابرنواختری ثبت شده است. شاید تعجب کنید که نوترینوها حدود ۳ ساعت قبل از آنکه ابرنواختر دیده شود، آشکار شدند؛ نه به خاطر آنکه آن‌ها سریع‌تر از نور حرکت کرده بودند! بلکه از این رو که مستقیماً از هسته در حال رمبش بیرون می‌آمدند؛ درحالی که نور مرئی تا مدتی بعد، زمانی که موج ضربه به سطح ستاره رسید، گسیل نشد. آشکارسازی آن ۲۴ نوترینو تأییدی کامل بود برای مدل‌های نظری که برای رمبش هسته ستارگانِ پرجرم ارائه شده بود و مطابق با پیش‌بینی نظری که حدود  $10^{58}$  نوترینو در این چنین اتفاقاتی تولید می‌گردد، این رصدها همچنین اجازه داد تا حد بالایی برای جرم نوترینو تعیین شود. اگر فرض کنیم که نوترینو سفر خود را از ابرنواختر، کمی پیش از نور شروع کرده باشد، اینکه آن‌ها پس از مسافتی ۱۶۹,۰۰۰ ساله پیش از نور به زمین رسیده‌اند به این معنی است که سرعتی بسیار نزدیک (کمتر از یک قسمت در  $10^8$ ) به سرعت نور دارند. این موضوع، و این حقیقت که نوترینوهای کم‌انرژی و پرنانرژی باهم رسیده‌اند، به ما این امکان را می‌دهد که حد بالایی برای جرم نوترینو قرار دهیم. این جرم نباید بیشتر از حدود سه میلیونیم جرم الکترون باشد.

## ۷-۱۱ ستاره‌های نوترونی

آنچه از این انفجار مهیب باقی می‌ماند بستگی به جرم هسته در حال رمبش دارد. اگر ستاره‌هایی که جرم کلی آن‌ها بین ۸ تا ۱۲ برابر جرم خورشید است رمبش نمایند، حاصل کار یک ستاره نوترونی خواهد بود. هسته این ستارگان توسط فشار تبهگنی نوترون که در بالا توضیح داده شد، حمایت می‌شود. این گونه ستاره‌های نوترونی نوعاً جرمی معادل  $1/4$  خورشید خواهند داشت؛ از این رو در عمل شبیه به یک هسته عظیم اتم هستند با حدود  $10^{57}$  نوترون. آن‌ها شعاعی بین ۱۰ تا ۱۵

کیلومتر خواهند داشت - مدل‌های نظری هنوز آن چنان دقیق نیستند. با فرض شعاع ۱۰ کیلومتر، چگالی متوسط  $10^{14} \times 6/65 \text{ g/cm}^3$  خواهد بود - بیش از چگالی هسته اتم!

گرانش در سطح این ستاره بسیار قوی است؛ برای ستاره‌ای با  $1/4$  جرم خورشید و شعاع ۱۰ کیلومتر، شتاب جاذبه بر سطح آن ۱۹۰ میلیارد بار از شتاب جاذبه بر سطح زمین بیشتر است و جسمی که از فاصله ۱ متری افتاده است سرعتی معادل  $6/88$  میلیون کیلومتر بر ساعت خواهد داشت! با یک محاسبه ساده نیوتونی، سرعت فرار از سطح  $0/643C$  به دست می‌آید ( $0/643$  برابر سرعت نور). بدین ترتیب هنگام بررسی ستارگان نوترونی، هم نسبیت خاص و هم نسبیت عام را باید در نظر گرفت. ساختمان یک ستاره نوترونی بسیار پیچیده است؛ حتی قسمتی از آن می‌تواند به صورت یک دریای ابرسیال از نوترون<sup>۳۹</sup> باشد که در آن صورت هیچ گرانروی<sup>۴۰</sup> نخواهد داشت. این موضوع می‌تواند منجر به نتیجه‌ای قابل مشاهده گردد که بعداً توضیح خواهیم داد.

ستاره نوترونی احتمالاً پوسته‌ای خارجی متشکل از هسته‌های سنگین، عمدتاً آهن و نیکل، دارد. پوسته داخلی شامل عناصری چون کریپتون، نوترون‌هایی به صورت ابرسیال و الکترون‌های تبهگن نسبیتی می‌باشد. قسمت‌های داخلی‌تر، زیر پوسته، مخلوطی است از ابرسیال نوترونی، پروتون‌های ابرسانا و الکترون‌های تبهگن نسبیتی. در آخر، هسته‌ای از پیون یا دیگر ذرات بنیادی قرار گرفته است.

مانند کوتوله‌های سفید، ستاره‌های نوترونی نیز با افزایش جرم، کوچک‌تر و چگال‌تر می‌شوند؛ اما نقطه‌ای وجود خواهد داشت که در آنجا فشار تبهگنی نوترونی دیگر نمی‌تواند جرم ستاره را تحمل کند. بنابراین، مانند حد چاندراسکار برای جرم حدی در کوتوله‌های سفید، حدی معادل سه تا چهار جرم خورشید برای ستاره نوترونی پیش‌بینی می‌شود. بیش از این حد، رمبش تا تشکیل یک سیاه‌چاله ادامه می‌یابد.

ستاره‌ها به دور خود می‌چرخند، مانند خورشید که حدود هر ۲۵ روز یک‌بار در استوای خود می‌چرخد. بدین ترتیب هسته ستاره دارای تکانه زاویه‌ای است. با رمبش هسته، بیشتر این تکانه باید حفظ شود (مقداری نیز به مواد اطراف منتقل می‌گردد). از این رو ستاره نوترونی حاصل، به سرعت به دور خود می‌چرخد و دوره تناوب چرخشی آن شاید به چند میلی‌ثانیه برسد. همچنین انتظار می‌رود که ستاره نوترونی میدان مغناطیسی بسیار قوی داشته باشد. نتایج رصدی این



میدان در حال چرخش، شرایطی را فراهم نموده است که ما می‌توانیم ستاره‌های نوترونی را کشف کرده، به تحقیق پیرامون مشخصات آن‌ها بپردازیم.

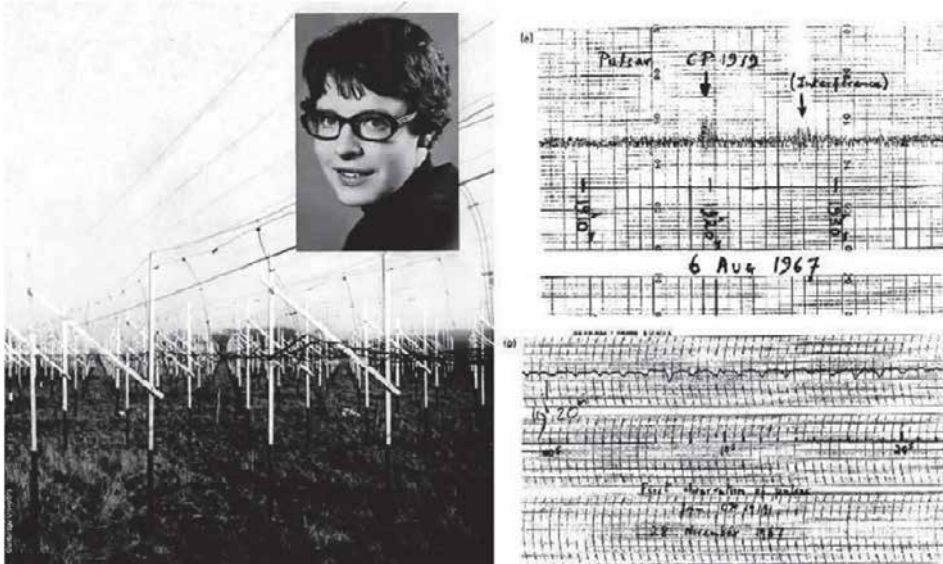
در آغاز تولد، دمای سطح ستاره نوترونی شاید به  $10^{11}$  k برسد، اما به سرعت به حدود  $10^9$  k سقوط می‌کند. بیشتر انرژی را نوترینوها در مدت ۱۰۰۰ سال بیرون می‌برند، و در این مدت دمای سطح تا چند میلیون کلوین کاهش می‌یابد. سپس فوتون‌ها وظیفه انتقال انرژی از سطح را به صورت پرتو ایکس بر عهده می‌گیرند و دمای آن برای ۱۰۰۰ سال بعد نزدیک به یک میلیون کلوین باقی می‌ماند. درخشندگی ستاره در آن زمان با خورشید قابل مقایسه خواهد بود.

این توضیحی است بر اینکه چرا سحابی خرچنگ همچنان مرئی است. ستاره‌شناسان می‌دانستند که ستاره‌ای نزدیک به مرکز سحابی، طیفی بسیار عجیب دارد. اگر ثابت می‌شد که آن ستاره‌ای نوترونی مربوط به انفجار ابرنواختری است، انرژی خارج شده از آن با برانگیختن گاز پرتاب شده به درون محیط بین ستاره‌ای، سحابی را مرئی نگه می‌داشت. روشی که به وسیله آن این مطلب مورد تأیید قرار گرفت، و اینکه چگونه تاکنون بیش از ۲۰۰۰ ستاره نوترونی کشف شده است، یکی از جالب‌ترین داستان‌های ستاره‌شناسی نوین است.

## ۸-۱۱ کشف تپندها

زمانی که ستارگان را از میان جو زمین مشاهده می‌کنیم، می‌بینیم که چشمک می‌زنند. علت این امر، آشفتگی‌های درون جو است که بین ناظر و ستاره مانند عدسی‌های کوژ و کاو، که یک درمیان پشت سر هم آمده‌اند، عمل می‌کند. بدین ترتیب نور ستاره در گذر از لایه‌ای همگرا شده، ستاره کمی روشن‌تر به نظر می‌رسد، سپس لایه دیگر آن را واگرا نموده، روشنایی آن را کاهش می‌دهد.

اثری مشابه در ارتباط با منابع رادیویی وجود دارد که علت آن بی‌نظمی‌های موجود در باد خورشیدی است - حباب‌های گاز خروجی از خورشید که با دور شدن از آن منبسط می‌شوند. دانشمندان متوجه شدند که با مطالعه مقدار چشمک منبع رادیویی، زمانی که در فواصل مختلف زاویه‌ای نسبت به خورشید قرار دارد، می‌توانند به روشی برای محاسبه اندازه زاویه‌ای منبع دست یابند. از این روش می‌توان در کشف منابع رادیویی با اندازه زاویه‌ای خیلی کوچک، معروف به اختروش‌ها<sup>۴۱</sup>، نیز استفاده کرد. برای انجام این آزمایش به آنتن بسیار بزرگی نیاز بود. تونی



شکل ۱۱-۵: جاسیلین بل و آرایه کمبریج که نخستین تپنده را کشف کرد، در سمت راست سابقه (رکورد) اکتشاف دیده می‌شود.

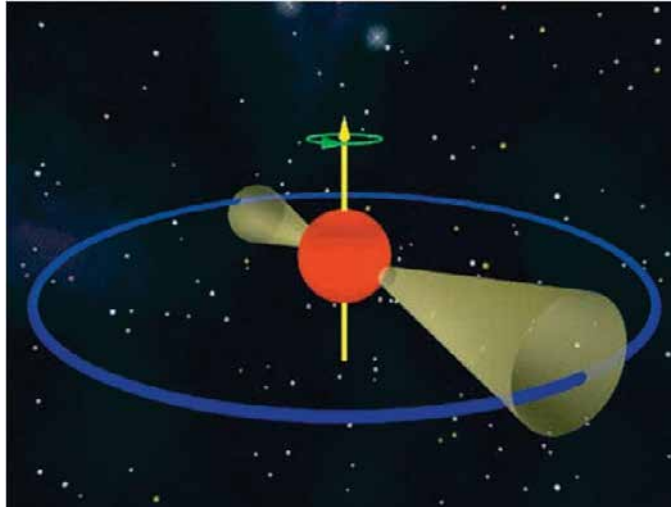
هیوئیش<sup>۴۲</sup> در آزمایشگاه‌های بزرگ رادیویی مولارد واقع در کمبریج<sup>۴۳</sup>، یک دانشجوی دکتری به نام جاسیلین بل<sup>۴۴</sup> را به کار گرفت تا ابتدا در ساخت آنتن کمک کند (آرایه‌ای از ۲۰۴۸ دوقطبی) و سپس به انجام رصد و تجزیه و تحلیل آن بپردازد. آرایه، منابع رادیویی را در حین عبور از نصف‌النهار رصد می‌کرد. بدین ترتیب یک منبع رادیویی معین، هرروز و در زمانی که روی نصف‌النهار ظاهر می‌شد، رصد می‌گردید.

سیگنال منابع رادیویی روی طوماری از کاغذ رسم می‌شد، و حدود ۱۲۰ متر از این طومار در هرروز تولید می‌گردید. به زودی بل (شکل ۱۱-۵) توانست بین سیگنال منبع و سیگنال مزاحم، که اغلب خودروهای عبوری از کنار رصدخانه آن را تولید می‌کردند، تفکیک قائل شود. در ژوئیه سال ۱۹۶۷، توده‌ای متراکم از سیگنال را بر روی کاغذ مشاهده نمود که نه به اثر سیگنال منبع رادیویی شبیه بود و نه سیگنال تداخل. نکتهٔ گول‌زنندهٔ دیگر این بود که این اثر در شب مشاهده شده بود، زمانی که منبع رادیویی دور از سمت خورشید بود و انتظار نمی‌رفت که چشمکی دیده شود. با بررسی نمودارها، او ملاحظه کرد که پیش از آن نیز سیگنالی مشابه از همان نقطه آسمان ثبت شده

است. همچنین متوجه شد که در روزهای بعد، همواره پس از تعداد معینی روز نجومی و در دوره‌های کاملاً مشابه، این سیگنال دوباره ظاهر می‌شد؛ نکته‌ای که مشخص می‌کرد این منبع رادیویی، هر چه بود، در بین ستارگان قرار داشت و نه در منظومه شمسی. هیوئیش و بل دستگاه را به رسم‌کننده سریع نمودار مجهز نمودند تا این اثر توده‌ای را با دقت بیشتر بررسی نمایند. با کمال تعجب دریافتند که این توده تصادفی نبود، بلکه از یک سری پالس با فاصله دقیق از یکدیگر، با دوره تناوب  $1/33724S$  تشکیل شده بود. رصدهایی با استفاده از تلسکوپ دیگری در کمبریج وجود سیگنال را تأیید کرد و همچنین مشخص شد که با تغییر بسامد رصد، زمان‌های ورود پالس اندکی تغییر می‌کرد. این اثر را پاشش<sup>۴۵</sup> (پراکنش) می‌نامند و دقیقاً شبیه به این حقیقت است که طول موج‌های متفاوت نور با سرعت‌های گوناگون در شیشه حرکت می‌کند. محیط بین ستاره‌ای خلأ کامل نیست، بنابراین می‌تواند این اثر را به وجود آورد؛ اما تنها در صورتی قابل مشاهده است که منبع پالس‌ها در فاصله‌ای بسیار دور خارج از منظومه شمسی باشد.

در آن زمان، هیچ ستاره‌شناس نظری در گروه کمبریج، ایده‌ای از اینکه چه پدیده طبیعی می‌تواند موجب سیگنال‌هایی با دوره تناوبی این چنین دقیق شود، در ذهن نداشت. به نظر می‌رسید که هیچ ستاره یا حتی کوتوله سفیدی نمی‌توانست با این سرعت تپش نماید؛ لذا آن‌ها تصور کردند شاید این سیگنال‌ها از تمدنی فرازمینی سرچشمه گرفته باشد. بل که منبع را LGM1 نامیده بود<sup>۴۶</sup>، کمی از این موضوع دلخور شد زیرا به رصدهای واقعی او لطمه می‌زد. مدتی بعد، منبع دیگری با مشخصات مشابه و دوره تناوب اندکی تندتر، یعنی  $1/2$  ثانیه، کشف شد. این کشف تاحدی بل را تسکین داد، زیرا بسیار غیرمحمتمل بود که دو گروه تمدن فرازمینی از یک روش و فرکانس برای ارتباط با سیاره غیربرجسته‌ای چون زمین استفاده نمایند!

چند روز قبل از آنکه مقاله مربوط به این کشف در مجله *Nature* مورخ فوریه ۱۹۶۸ منتشر شود، هیوئیش این کشف را برای گروهی از ستاره‌شناسان در کمبریج اعلان نمود. فرد هوپل در میان آنان بود و اظهار داشت که ممکن است این سیگنال، گسیل‌های تپنده‌ای باشد که از یک ستاره نوترونی و در حال نوسان سرچشمه گرفته است - بقایای نظری یک ابرنواختر که تا آن زمان رصد نشده بود. پس از یک اجلاس مطبوعاتی که به دنبال انتشار مقاله در *Nature* برگزار شد، خبرنگار دیلی تلگراف نام تپنده<sup>۴۷</sup> را برای این اجسام مبهم ابداع نمود.



شکل ۱۱-۶: باریکه‌های دوقلو (بیم‌های دوقلو) که از یک تپنده گسیل می‌شود.

حدود سه ماه بعد، در مقاله‌ای که آن‌هم در *Nature* منتشر شد، توماس گلد از دانشگاه گرنل آمریکا<sup>۴۸</sup>، توضیحی قانع‌کننده برای سیگنال‌های تپنده ارائه داد. گلد اظهار داشت که سیگنال‌ها قطعاً از ستاره‌های نوترونی سرچشمه گرفته‌اند، اما این ستاره‌ها نوسان نمی‌کنند، بلکه به سرعت به دور محور خور می‌چرخند. او حدس زد که این چرخش، به همراه میدان مغناطیسی که انتظار می‌رفت بسیار قوی باشد، دو دسته بیم رادیویی پیوسته و یکنواخت را در امتداد محور خطوط میدان مغناطیسی تولید می‌نماید؛ یک دسته بیم در بالای قطب شمال مغناطیسی و دیگری بالای قطب جنوب مغناطیسی. اگر محور میدان مغناطیسی هم‌جهت با محور چرخش ستاره نباشد (موردی مشابه زمین)، این دو بیم رادیویی اطراف آسمان را جاروب می‌کنند، چیزی شبیه به فانوس دریایی (شکل ۱۱-۶). حال چنانچه یکی از دو بیم از محل ما در آسمان بگذرد، تلسکوپ‌های رادیویی ما آن‌ها را به صورت پالس‌های منظم و پشت سرهم شناسایی می‌نماید (دقیقاً همان‌گونه که بل مشاهده کرده بود). دوره تناوب این پالس‌ها نشان‌دهنده سرعت چرخش ستاره نوترونی است.

گلد در این مقاله بیان کرد که ستاره نوترونی، به دلیل پایستاری تکانه زاویه‌ای در زمان شکل‌گیری آن، به راحتی امکان چرخش در چنین سرعت‌هایی را دارد. او انتظار داشت که بیشتر

تپنده‌ها حتی از این دو ستاره‌ای که نخستین بار توسط بل کشف شده بودند سریع‌تر بچرخند و نرخ پیشینه ۱۰۰ پالس در ثانیه را پیشنهاد نمود.

از آن زمان تاکنون حدود ۲۰۰۰ تپنده کشف شده که دوره تناوب بیشتر آن‌ها بین ۰/۲۵ تا ۲ ثانیه است. عقیده بر این است که با کاهش سرعت چرخش، سازوکار تابش در تپنده از کار می‌افتد و کندترین تپنده‌ای که تاکنون شناسایی شده است دوره تناوب ۴/۳۰۸ ثانیه دارد. در دسته‌ای از «تپنده‌های میلی‌ثانیه‌ای»<sup>۴۹</sup>، مجاورت یک ستاره همدم باعث گردیده است که ستاره نوترونی مواد را از لایه بیرونی آن به سمت خود جذب نماید. این کار به انتقال تکانه زاویه‌ای نیز منجر می‌شود و به همین دلیل این‌گونه ستاره‌های نوترونی دوره تناوبی در حد میلی‌ثانیه دارند (نام آن‌ها نیز از این ویژگی گرفته شده است). سریع‌ترین تپنده شناخته شده در هر ثانیه ۷۰۰ بار می‌چرخد - سرعت نقطه‌ای بر استوای آن ۲۰٪ سرعت نور است، نزدیک به نقطه‌ای که به صورت نظری تصور بر این است که در آنجا ستاره نوترونی متلاشی شود.

انرژی تابش شده به وسیله تپنده‌ها از تکانه زاویه‌ای بسیار بالای آن‌ها به دست می‌آید، چیزی که سبب می‌شود نرخ کاهش سرعت تپنده‌ها بی‌اندازه کند باشد. در نتیجه، آن‌ها ساعت‌هایی بسیار دقیق می‌سازند؛ دقتی که در برخی موارد بهترین ساعت‌های اتمی را به چالش می‌کشد. دوره تناوب تمام تپنده‌ها به آرامی افزایش می‌یابد (به استثنای زمانی که در حین ساخت تپنده‌های میلی‌ثانیه‌ای، سرعت چرخش آن‌ها افزوده می‌شود) و نوعاً عمر آن‌ها چند ده میلیون سال است. ارتباط بین تپنده‌ها و بقایای ستاره نوترونی ابرنواختری آنگاه مورد تأیید قرار گرفت که مشخص شد ستاره غریب در مرکز سحابی خرچنگ یک تپنده با دوره تناوب ۰/۳۳۳ ثانیه است - در هر ثانیه بیش از ۳۰ بار می‌چرخد. تپنده دیگری در باقی مانده ابرنواختر بادبان<sup>۵۰</sup> کشف گردید. هردوی این تپنده‌ها، نه تنها در محدوده امواج رادیویی، بلکه در تمام طیف الکترومغناطیسی، از جمله نور مرئی، پرتو ایکس و گاما، تابش می‌کنند.

بیشتر تپنده‌ها در امتداد صفحه کهکشان دیده می‌شوند، و این چیزی است که انتظار آن را داریم، چراکه آن‌ها بقایای ستارگان هستند. با وجود این و در کمال تعجب، تعداد فراوانی در خارج از صفحه کهکشان مشاهده می‌شوند. آرایه ۲۱۷ کیلومتری مرلین در رصدخانه جُدرل بانک<sup>۵۱</sup> قادر است اندازه‌گیری‌های دقیقی از مکان تپنده‌ها به عمل آورد. با اندازه‌گیری‌های مکانی انجام گرفته

در مدت چند سال توسط آرایه، مشخص شده است که بسیاری از تپنده‌ها با سرعتی قابل مقایسه و حتی بیشتر از سرعت فرار از کهکشان (حدود  $500 \text{ km/s}$ ) در حال حرکت هستند. سریع‌ترین سرعت تپنده‌ای که تاکنون اندازه‌گیری شده (این مورد به وسیله آرایه ۵۰۰۰ کیلومتری VLBA در آمریکا)  $1100 \text{ km/s}$  می‌باشد - لندن تا نیویورک در ۵ ثانیه!

واضح است که این تپنده‌ها با انرژی بسیار زیاد از انفجار ابرنواختری سازنده‌شان به بیرون پرتاب شده‌اند. بنابراین توانسته‌اند اطراف کهکشان به گردش درآیند و حتی در برخی موارد، کهکشان را به سمت اعماق فضای بین کهکشانی ترک کنند. ظاهراً انفجار ابرنواختری به طور معمول در یک سمت ستاره نوترونی شدیدتر است که در این صورت ستاره مانند گلوله تفنگ، به سرعت به بیرون پرتاب می‌شود. در بعضی موارد، حتی می‌توان مسیر حرکت تپنده را به عقب برگشت و به باقیمانده گازی ابرنواختر رسید. وضعیتی که در آن، تپنده درون پوسته گازی ابرنواختر باقی می‌ماند، مانند سحابی خرچنگ، بسیار نادر به نظر می‌رسد.

## ۹-۱۱ سیاه چاله

در مورد بیشتر ستاره‌های پر جرم، فشار تبهگنی نوترونی، دیگر قادر نیست هسته را در برابر رمبش محافظت کند، در نتیجه یک سیاه چاله به وجود می‌آید. این اجسام دلربا ارزش آن را دارند که فصلی دیگر را (فصل ۱۷) به خود اختصاص دهند!

## پانوشته‌ها

- ۱ - در کتاب درآمدی بر نجوم و کیهان‌شناسی، تقریباً  $\frac{1}{13}$  جرم خورشید یا ۸۰ برابر جرم مشتری ذکر شده است. (مترجم)
- ۲ - مدل‌سازی ستاره کوتوله قرمز با جرم  $0.1$  خورشید، این زمان را پس از حدود ۶ تریلیون سال از عمر ستاره نشان می‌دهد.

- 3 - Black Dwarf
- 4 - Carl von Weizsäcker and Hans Bethe
- 5 - Triple Alpha Process ( $3\alpha$ )
- 6 - Fred Hoyle
- 7 - Resonance
- 8 - William Fowler
- 9 - Anthropic Principle

- 10 - Red Giant
- 11 - Variable Star
- 12 - Planetary Nebula
- 13 - Ring and Dumbbell nebulae
- 14 - Degeneracy Pressure
- 15 - electron degeneracy pressure
- 16- Subramanyan Chandrasekhar
- 17 - 40 Eridani
- 18 - Sirius B
- 19 - Friedrich Bessel
- 20 - Alvan Clark
- 21 - capture of alpha particles

۲۲ - این عناصر با جذب ذرات آلفا تولید می‌شوند.

- 23 - photodisintegration
- 24 - neutron star
- 25 - neutron degeneracy pressure
- 26 - Type II supernova
- 27 - Yang Wei-T'e
- 28 - John Bevis
- 29 - Charles Messier
- 30 - Messier catalogue
- 31- William Parsons, 3rd Earl of Rosse
- 32 - Crab Nebula
- 33 - Type I supernova
- 34 - Grand Unified Theory (GUT)
- 35- Kamioka Underground Observatory
- 36- Photomultiplier Tube (PMT)

۳۷- توجه نمایید که براساس نسبیت، سرعت حد، سرعت نور در خلأ می‌باشد و نه سرعت آن در محیط‌های دیگر. (مترجم)

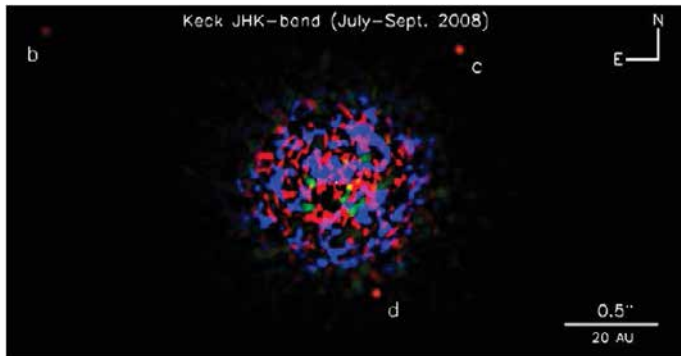
- 38 - Cherenkov radiation
- 39 - a superfluid sea of neutrons
- 40 - Viscosity
- 41 - Quasars
- 42 - Antony Hewish
- 43- Mullard Radio Astronomy Laboratories at Cambridge
- 44 - Jocelyn Bell
- 45 - Dispersion
- 46 - Little Green Men 1
- 47 - Pulsar
- 48 - Thomas Gold at Cornell University in Ithaca, USA
- 49 - Millisecond Pulsars
- 50 - Vela supernova
- 51 - 217-km MERLIN array at Jodrell Bank Observatory

## فصل ۱۲

### در جستجوی جهان‌های دیگر

این موضوع یکی از مهیج‌ترین عرصه‌های تحقیقاتی است که هم‌اکنون در حال انجام است و ماهانه کشف سیاره‌های جدیدی اعلان می‌گردد. در این فصل، شیوه‌هایی که جهت کشف آن‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرد توضیح داده خواهد شد و سپس ویژگی‌های هر یک مورد بحث قرار خواهد گرفت. شاید در اینجا یک هشدار لازم باشد. یک تلاش آشکار عبارت است از یافتن منظومه‌های سیاره‌ای، مانند منظومه شمسی، که شاید سیاره‌ای در آن‌ها منزلگاه حیات باشد. تاکنون، برخلاف انتظار بسیاری از ستاره‌شناسان، اکثریت قریب به اتفاق منظومه‌های خورشیدی یافت شده شباهتی به منظومه ما ندارد، چیزی که ممکن است انسان را به این نتیجه برساند که منظومه‌ای خورشیدی شبیه منظومه ما بسیار نادر است. من حتی شنیده‌ام که یک اخترزیست‌شناس برجسته این دیدگاه را مطرح کرده است. اما فکر نمی‌کنم این گونه نتیجه‌گیری صحیح باشد. بنا بر دلایلی که به زودی روشن خواهد شد، شیوه‌هایی که به طور گسترده تا این تاریخ مورد استفاده قرار گرفته است به سختی می‌توانستند سیارات منظومه خودمان را آشکار نمایند. پس چندان تعجب آور نیست که تاکنون نتوانسته‌ایم منظومه‌ای همچون منظومه شمسی بیابیم. با استفاده از شیوه‌های جدید وضعیت بهتر خواهد شد، اما مدتی طول می‌کشد تا به ایده‌ای واقعی که مشخص می‌کند منظومه‌های خورشیدی، همچون منظومه ما، هرچند مدت یک بار در کهکشان پدید آمده‌اند دست یابیم. داستان کشف اولین سیاره‌ای که ستاره‌ای چون خورشید را دور می‌زند در جای خود بسیار جالب است؛ اما برای درک ظرافت‌های آن، لازم است اطلاعاتی راجع به چگونگی کشف این سیاره و بیشتر سیاره‌هایی که تاکنون شناسایی شده‌اند، به دست آوریم.





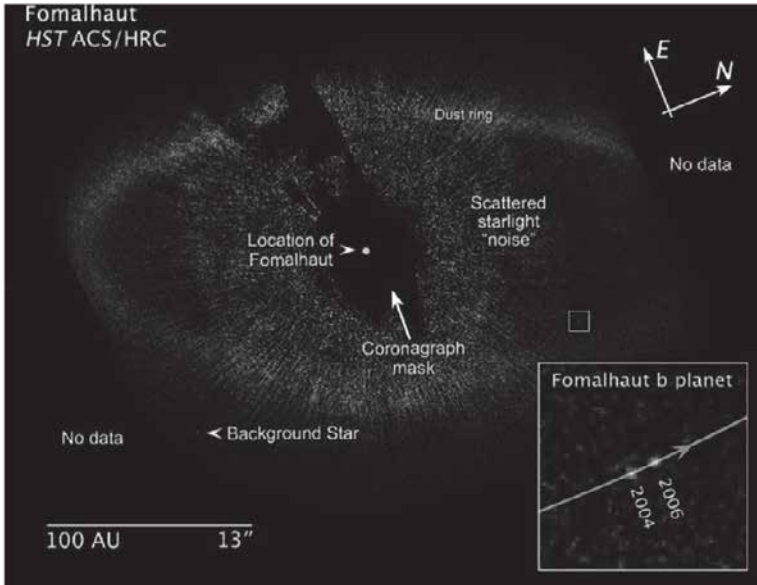
شکل ۱۲-۱: یک تصویر فرورسرخ که تلسکوپ یک آن را گرفته و سه سیاره را به دور ستاره HR ۸۷۹۹ نشان می‌دهد.

## ۱-۱۲ شناسایی دیداری سیاره‌ها در اطراف ستاره‌های معمولی

مدت‌ها این عقیده وجود داشت که شناسایی سیارات به وسیلهٔ تصویربرداری مستقیم عملی نیست، به این دلیل که نور انعکاسی از سیاره در تابش نور ستاره گم می‌شود. با وجود این، روش‌های ستارگان در فرورسرخ کمتر از باند مرئی است و اختلاف روشنایی (بین سیاره و ستاره) کاهش می‌یابد، و این شناسایی را آسان‌تر می‌کند. در حقیقت، یک جسم در اندازهٔ سیاره در مدار به دور یک کوتولهٔ قهوه‌ای کشف شده بود. دانشمندان با استفاده از تلسکوپ ۸ متری وی ال تی در شیلی، و به کمک اپتیک سازگار برای تصحیح آشفتگی‌های جوی، به این کشف دست یافتند. این شیوه در باند فرورسرخ بسیار کارایی دارد و امکان دسترسی به توان تفکیک بالاتر را برای تلسکوپ‌ها فراهم می‌آورد، از این رو می‌توان سیاراتی را دید که در فاصلهٔ زاویه‌ای کوچکی از ستاره‌شان قرار دارند.

## ۲-۱۲ سیاراتی که در فرورسرخ مشاهده شده‌اند

در نوامبر ۲۰۰۸، گروهی از ستاره‌شناسان با استفاده از تلسکوپ ۱۰ متری کِک و تلسکوپ ۸ متری جیمینی شمال، کشف سه سیاره را اطراف ستارهٔ HR ۸۷۹۹ در فاصلهٔ ۱۲۹ سال نوری اعلام نمودند<sup>۱</sup> (شکل ۱۲-۱). این بار نیز مشاهدات در فرورسرخ انجام شده بود، و علاوه بر آن، از یک وسیلهٔ اختفاساز برای حذف مقدار زیادی از نور ستاره استفاده کرده بودند. جرم این سه سیاره چندین برابر مشتری است و حتی نزدیک‌ترین آن‌ها دارای مداری است که شعاع آن معادل فاصلهٔ نپتون تا خورشید، حدود ۳۰ AU می‌باشد.



شکل ۱۲-۲: ترکیبی از دو تصویر تلسکوپ فضایی هابل از منظومه ستاره‌ای فَم‌الحوث

### ۱۲-۳ سیاره‌ای که تلسکوپ فضایی هابل در نور مرئی کشف کرد

کشف اولین سیاره در نور مرئی نیز در نوامبر ۲۰۰۸ اعلان شد. این اکتشاف مبتنی بر دو رصد از ستاره فَم‌الحوث<sup>۲</sup> در سال‌های ۲۰۰۴ و ۲۰۰۶ بود. این ستاره در فاصله ۲۵ سال نوری از خورشید قرار دارد. اینجا نیز از یک قرص اختفاساز<sup>۳</sup> استفاده شد تا قسمت اعظم نور ستاره را حذف کند. همان‌طور که در شکل ۱۲-۲ می‌بینید، آن سوی نوبه ناشی از نور پراکنده ستاره، یک حلقه غبار به خوبی دیده می‌شود. در پایین سمت راست محل ستاره، یک جسم کم‌نور را در تصویر مشاهده کردند و متوجه شدند در دو سال فاصله بین مشاهدات، این جسم حرکت کرده است. این سیاره فَم‌الحوث ب است، با جرمی حدود ۳ برابر مشتری، که در فاصله حدود ۱۷ میلیارد کیلومتر یا ۷۳ AU از فَم‌الحوث به دور آن گردش می‌کند. بدین ترتیب، تاکنون این تنها سیاره‌ای است که امکان تصویربرداری از آن در نور مرئی فراهم شده است.

با وجود این، محققانی که داده‌های سال ۲۰۱۱ مربوط به آرایه بزرگ میلی‌متری آتاکاما<sup>۴</sup> را تجزیه و تحلیل می‌کردند، بر سر اینکه آن یک سیاره است، و حتی وجود آن، مناقشه کردند. اما در

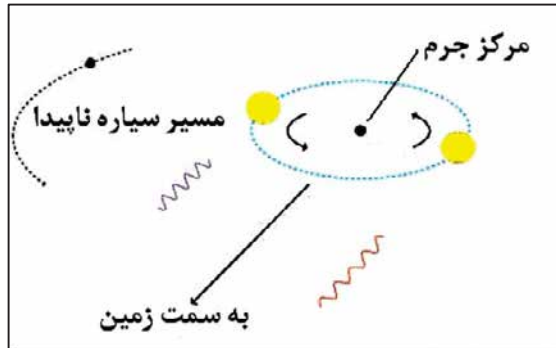
اکتبر ۲۰۱۲، گروهی به سرپرستی ٲین کاری<sup>۵</sup> در دانشگاه تورنتو نخستین بازگشت مستقل فَم الحوت ب را اعلام نمودند و جان تازه‌ای به این ادعا که فَم الحوت ب یک سیاره است بخشیدند. آن‌ها بار دیگر، و با استفاده از الگوریتم‌های جدید و قدرتمندتر جهت جداسازی نور سیاره از ستاره، به تحلیل داده‌های ابتدایی هابل پرداختند و وجود فَم الحوت ب را تأیید نمودند. امروزه برخی بر این عقیده‌اند که نور شناسایی شده، نوری نیست که از سطح یک سیاره بازتاب می‌شود، بلکه نوری است که از یک قرص بزرگ دور سیاره‌ای<sup>۶</sup> در اطراف یک سیارهٔ پرجرم، اما نادیده، پراکنده می‌گردد. بحث دربارهٔ وجود این سیاره تا آنجا بالا گرفت که لقب مردهٔ متحرک به آن دادند، گرچه این لقب در هیچ مقالهٔ علمی به چشم نمی‌خورد.

#### ۱۲-۴ شیوه سرعت شعاعی (لنگش دوپلری) در شناسایی سیارات

منظومه شمسی خود ما بینشی خوب از این روش، و نقاط قوت و ضعف آن در اختیار ما می‌گذارد. ستاره‌شناسان اغلب از عبارت «سیارات به دور خورشید گردش می‌کنند» استفاده می‌نمایند. اما این عبارت کاملاً صحیحی نیست. مدلی را به مقیاس از منظومه شمسی در نظر بگیرید که در آن خورشید و سیارات با جرم و موقعیت مناسب در مدار خود قرار دارند. همهٔ اجسام بر صفحه‌ای مسطح و بی‌وزن واقع شده‌اند. با آزمایش و خطا، می‌توان نقطه‌ای را یافت که تمام مدل بر روی یک سوزن در تعادل قرار گیرد. این نقطه، مرکز ثقل مدل منظومه شمسی است. مرکز ثقل منظومه شمسی را مرکز جرم<sup>۷</sup> آن می‌نامند؛ نقطه‌ای در فضا که هم خورشید و هم سیارات به دور آن می‌چرخند.

از آنجاکه جرم مشتری از مجموع جرم دیگر سیاره‌ها بیشتر است، موقعیت آن تأثیر زیادی بر محل مرکز جرم دارد، به گونه‌ای که مرکز جرم در فاصله‌ای از مرکز خورشید و در جهت تقریبی مشتری قرار گرفته است. در حقیقت، اگر مشتری تنها سیارهٔ منظومه شمسی بود، مرکز جرم همواره خارج از خورشید قرار داشت. چنانچه تمام سیاره‌های بزرگ در یک طرف خورشید واقع شوند<sup>۸</sup>، مرکز جرم دورتر از مرکز خورشید خواهد بود؛ و اگر مشتری در طرف مقابل سیارات باشد، مرکز جرم به مرکز خورشید نزدیک‌تر است. به طور متوسط، فاصلهٔ مرکز جرم از مرکز خورشید حدود  $1/25$  شعاع آن است، و بین دو کران  $0/3$  و  $2$  شعاع خورشید تغییر می‌کند.

شکل ۱۲-۳: تغییر در طول موج یک خط طیفی، هنگامی که ستاره به دور مرکز جرم منظومه خورشیدی خود گردش می‌کند.



فرض کنید از نقطه‌ای بسیار دور بر صفحه منظومه شمسی، به مشاهده منظومه شمسی می‌پردازیم. به دلیل نور خورشید، سیارات را نمی‌توانستیم ببینیم؛ اما لاقلاً بر اساس اصول، می‌توانستیم وجودشان را تشخیص دهیم. با توجه به حرکت خورشید به دور مرکز جرم منظومه شمسی، گاهی در حال حرکت به سمت ما و گاهی نیز در حال دور شدن از ما می‌بود. اگر می‌توانستیم دقیقاً محل خطوط طیفی را در طیف خورشیدی اندازه بگیریم، می‌توانستیم تغییرات جابه‌جایی دوپلری را به دست آورده، آن را به سرعت تقرب یا دور شدن تبدیل کنیم (شکل ۱۲-۳). کل منظومه شمسی نیز ممکن بود در حال حرکت به سمت ما یا دور شدن از ما باشد، در این صورت یک تغییرات دوره‌ای را پیرامون یک مقدار متوسط مشاهده می‌نمودیم.

دوباره برای سادگی، فرض کنید که منظومه شمسی تنها یک سیاره داشته باشد: مشتری. خورشید را می‌دیدیم که هر ۱۱/۸۶ سال - دوره تناوب مدار مشتری - یک بار به دور مرکز جرم می‌چرخید. با داشتن محل مرکز جرم، می‌توان سرعت خورشید را در گردش به دور آن به دست آورد. این سرعت  $13 \text{ m/s}$  است، بدین معنی که تفاوت سرعت بیشینه و کمینه  $26 \text{ m/s}$  خواهد بود.

دقت فعلی در اندازه‌گیری دوپلری  $2 \text{ m/s}$  تا  $3 \text{ m/s}$  است، اما امید است که به زودی تا حدود  $0.5 \text{ m/s}$  بهبودی یابد. طیف‌سنج‌های دقیق با توان تفکیک بسیار بالا برای رصد نور ستارگان مورد استفاده قرار می‌گیرند. نور ستاره ابتدا از میان یک سلول گاز عبور داده می‌شود تا خطوط طیفی مرجع را فراهم آورد و بدین ترتیب اندازه‌گیری جابه‌جایی دوپلری میسر گردد.

بدین ترتیب دقت این روش به اندازه‌ای هست که بتوان مشتری را در گردش به دور خورشید تشخیص داد. در عین حال برای اطمینان از وجود هرگونه دوره تناوب در حرکت خورشید، لازم است

حداقل برای نیم دوره، و ترجیحاً یک دوره کامل، آن را رصد کرد. از این رو رصدها باید در طول سالیان متمادی صورت پذیرد تا بتوان سیاراتی را که در فاصله دور از ستاره خود قرار دارند تشخیص داد. دلیل عمده این که تاکنون سیاره‌های کمی در مدارهای بزرگ کشف شده‌اند، همین است؛ چند مدتی پیش نیست که این رصدها مورد استفاده قرار گرفته‌اند. اما یک محدودیت دیگر وجود دارد که احتمالاً شما نیز دریافته‌اید: اگر یک منظومه خورشیدی را در دوردست، و درست از بالا یا پایین آن رصد کنیم، هیچ‌گونه لنگش دوپلری نمی‌بینیم؛ لذا هیچ سیاره‌ای را از این منظومه نمی‌توان تشخیص داد. چنانچه اطلاعات اضافی پیرامون جهت‌گیری صفحه مداری یک منظومه خورشیدی دور در اختیار نداشته باشیم، تنها می‌توانیم جرم کمینه یک سیاره را به دست آوریم و نه جرم واقعی آن را. اگر بعدها، برای مثال، گذر سیاره را از مقابل خورشیدش رصد کنیم، می‌فهمیم که صفحه مداری آن منظومه شامل زمین هم می‌شود و بدین ترتیب جرم اندازه‌گیری شده، جرم واقعی آن سیاره است و نه یک حد پایین.

سیاره‌ای تک در یک مدار دایره‌ای، یک منحنی دوپلری ایجاد می‌کند که یک موج سینوسی ساده است. اگر مدار سیاره بیضوی باشد، یک منحنی دوپلری پیچیده‌تر، ولی با دوره منظم، به دست می‌آید. در صورت وجود یک خانواده سیاره، منحنی پیچیده است و تنها در مقیاس‌های زمانی بسیار طولانی تکرار می‌گردد. با وجود این، هنوز می‌توان آن را برای شناسایی تک‌تک سیارات درون منظومه مورد تجزیه و تحلیل قرار داد.

به همان روشی که حرکت مداری خورشید را در حضور مشتری حساب کردیم، می‌توان سرعت مداری آن را در حضور زمین به دست آورد. این مقدار  $1\text{ m/s}$  است؛ بسیار پایین‌تر از حساسیت فعلی و پیش‌بینی شده در روش سرعت شعاعی. بنابراین جهت شناسایی سیاره‌هایی مانند زمین، باید از روش‌های دیگر استفاده کرد. با به ثمر نشستن دیگر شیوه‌ها (که توضیح داده خواهد شد) و تجزیه و تحلیل رصدهای طولانی مدت با روش سرعت شعاعی، منظومه‌های خورشیدی شبیه به منظومه خودمان در حال کشف شدن است؛ اما هنوز نمی‌توان درباره فراوانی آن‌ها چیزی گفت.

## ۱۲-۵ کشف اولین سیاره به دور ستاره‌ای خورشیدگونه

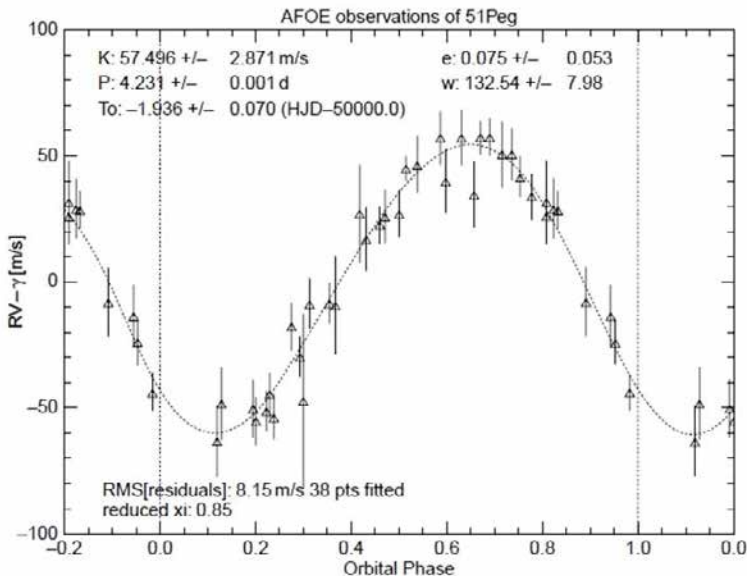
در سال ۱۹۸۸، چند ستاره‌شناس کانادایی<sup>۹</sup> با توجه به اندازه‌گیری‌های دوپلری، اظهار داشتند که

احتمالاً ستارهٔ گاما قیفاووس<sup>۱۰</sup> سیاره‌ای در مدار به دور خود دارد. رصدهای آن‌ها درست در آستانهٔ توانایی تجهیزاتشان بود و به‌طور گسترده از طرف جامعه ستاره‌شناسی رد شد. بالاخره در سال ۲۰۰۳ وجود سیاره تأیید گردید، اما متأسفانه سال‌ها از اولین کشف تأییدشدهٔ یک سیاره به دور ستاره‌ای از رشته اصلی می‌گذشت.

دو ستاره‌شناس آمریکایی، پل باتلر و جفری ماری<sup>۱۱</sup>، اولین کسانی بودند که به‌طور جدی به شکار سیارات فراخورشیدی<sup>۱۲</sup> پرداختند. آن‌ها مشاهداتشان را از سال ۱۹۸۷ آغاز کردند؛ اما با این فرض که منظومه‌های سیاره‌ای دیگر شبیه به منظومهٔ خودمان هستند، تا چند سال توقع یافتن سیاره‌ای را نداشتند. لذا داده‌های آن‌ها برای تجزیه و تحلیل آتی به آرشیو سپرده شد. از این‌رو زمانی که کشف سیاره‌ای به دور ستارهٔ موسوم به ۵۱ پگاسی<sup>۱۳</sup> از سوی میشل مایرو و دیدیه کلوز<sup>۱۴</sup>، در ۶ اکتبر سال ۱۹۹۵، اعلان شد، کمی تکان خوردند.

ستارهٔ ۵۱ پگاسی درست در سمت راست مربع صورت فلکی فرس اعظم<sup>۱۵</sup> قرار دارد و ستاره‌ای است از ردهٔ G5، کمی سردتر از خورشید و با جرمی معادل  $1/0.6$  آن. مایرو و کلوز در حال مطالعهٔ تپش ستارگان بودند. این تپش باعث جابه‌جایی دوپلری در خطوط طیفی نیز می‌شود. درحالی‌که حساسیت دستگاهشان تنها  $15 \text{ m/s}$  بود، آن‌ها واقعاً انتظار یافتن سیاره‌ای را نداشتند. اما در کمال تعجب متوجه یک حالت تناوبی در حرکت ستارهٔ ۵۱ پگاسی شدند؛ دوره تناوب  $4/23$  روز بود با دامنهٔ سرعت  $57 \text{ m/s}$  [منظور دامنهٔ نمودار است]. نمودار به سینوسی نزدیک است، به این معنی که مدار تقریباً دایره‌ای می‌باشد (شکل ۱۲-۴).

از سرعت ستاره و دوره تناوب مدار، محیط و به دنبال آن شعاع حرکت ستاره را به دست می‌آوریم.  $4/23$  روز معادل است با  $365,472$  ثانیه؛ با توجه به سرعت ستاره ( $57 \text{ m/s}$ ) محیط حرکت آن برابر است با  $30,831,904 \text{ m} = 20,831,904 \text{ m} = 57 \times 365,472$ ، و از آنجا شعاع  $3,315,500 \text{ m}$  به دست می‌آید. این شعاع، فاصله مرکز ستاره است تا مرکز جرم منظومه. احتمالاً به خاطر می‌آورید که با داشتن دوره تناوب مداری و فاصله زمین از خورشید، و دانستن ثابت جهانی گرانش،  $G$  (که از راه آزمایش به دست آمده است) می‌توان جرم خورشید را محاسبه کرد. درست به همین ترتیب جرم ستاره ۵۱ پگاسی برابر با  $10^3 \times 2 \times 1/0.6$  به دست می‌آید. حال می‌توان فاصلهٔ سیاره را از ستاره حساب کرد، که نتیجه  $0.52 \text{ AU}$  است. این مقدار کاملاً درون فاصلهٔ  $0.39 \text{ AU}$  که فاصلهٔ



شکل ۱۲-۴: اندازه‌گیری‌های سرعت شعاعی از ۵۱ پگاسی  
به وسیله کورزنیک و کونتوس (Korzennik and Contos)

مدار عطارد از خورشید است واقع شده و تنها ۰.۱ برابر شعاع ستاره است. حال با توجه به تعادل سیاره و ستاره حول مرکز جرم، می‌توانیم به آسانی جرم سیاره را حساب کنیم، که ۰/۴۷ جرم مشتری خواهد بود. اما این جرم تنها در صورتی است که صفحه مداری آن شامل زمین نیز می‌شد، و از این رو جرم کمینه سیاره است. با توجه به جهات تصادفی صفحه سیارات، می‌توان نشان داد که جرم یک سیاره، به‌طور متوسط، دو برابر مقدار کمینه است. لذا سیاره‌ای که دور ۵۱ پگاسی گردش می‌کند احتمالاً از لحاظ جرم بسیار به مشتری شبیه می‌باشد. زمانی که باتلر و مارسی از این کشف مطلع شدند، دریافتند که نه تنها آن‌ها بر اساس داده‌های خودشان مبتنی بر رصدهای چندین ساله از پگاسی قادر به تأیید این سیاره‌اند - کاری که تنها ۶ روز بعد انجام شد - بلکه اگر سیاره‌های پرجرم دیگری نیز با دوره تناوب کوتاه حول ستارگانی که رصد کرده بودند وجود داشت، می‌توانستند به سرعت آن‌ها را بیابند. امید ایجاد شد، و طی سال‌های بعد، آن‌ها پر دستاوردترین شکارچیان سیاره شدند.

کسی توقع یافتن یک غول گازی را در این فاصله نزدیک از ستاره نداشت، اما بسیاری از سیاره‌هایی که در ابتدا کشف شدند، فاصله و اندازه‌ای مشابه داشتند. تصور نمی‌شود که یک سیاره غول‌پیکر بتواند در چنین فاصله نزدیکی از ستاره تشکیل شود؛ لذا فرض بر این است که آن‌ها باید زمانی در اوایل شکل‌گیری‌شان، از نقاط دورتر منظومه خورشیدی خود به داخل مهاجرت کرده باشند. در این حرکت، به احتمال قوی، سیارات کوچک‌تر (زمین‌گونه) را که در فاصله‌ای نزدیک‌تر به ستاره تشکیل شده بودند به بیرون پرتاب کرده‌اند. بالطبع در این منظومه‌ها نمی‌توان انتظار یافتن حیات داشت.

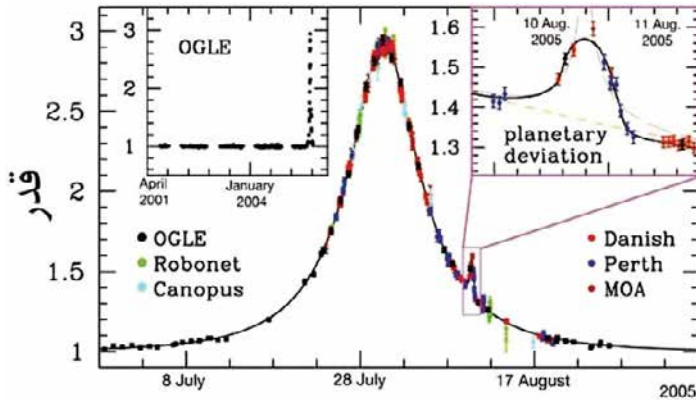
روش لنگش دوپلری ثابت کرده است که بسیار کارآمد است، اما حتی در بهترین حالت و با دقت موردنظر  $0.5 \text{ m/s}$  تا  $1 \text{ m/s}$ ، این شیوه هرگز قادر به شناسایی سیاره‌هایی با جرم مشابه زمین نیست، هرچقدر هم به ستاره نزدیک باشند.

## ۱۲-۶ ریزعدسی گرانشی

این شیوه‌ای است که قابلیت آن را دارد که به شناسایی سیارات هم‌جرم زمین نایل آید. نظریه نسبیت عام اینشتین، با رصد جابه‌جایی ظاهری ستارگان به دلیل انحنای فضا در نزدیکی خورشید، به اثبات رسید. این اثر باعث پدیده‌ای می‌شود که به عدسی گرانشی معروف است؛ یا به طور صریح‌تر، ریزعدسی گرانشی، چراکه نتایج آن در مقیاس خیلی کوچک است. همان‌گونه که یک عدسی کوژ می‌تواند نور یک جسم دور را به درون چشم متمرکز کرده، باعث گردد جسم روشن‌تر دیده شود، اگر ستاره‌ای دور از پشت ستاره‌ای نزدیک‌تر عبور کند، نور ستاره دور دچار یک افزایش موقتی می‌شود که ممکن است روزهای طولانی ادامه یابد. روشنایی بیشینه می‌تواند به ۱۰ برابر حالت معمولی برسد.

اگر ستاره عدسی، سیاره‌ای به دور خود داشته باشد، آن هم می‌تواند برای خود یک حالت ریزعدسی (کوچک) ایجاد کند و بدین‌وسیله امکان شناسایی خود را فراهم آورد. برای مشاهده این رویداد به حالتی از هم‌راستایی بسیار نادر نیاز است، به‌گونه‌ای که تعداد بسیار زیادی از ستارگان دور به طور پیوسته باید رصد شوند تا رویداد ریزعدسی سیاره‌ای شناسایی شود. رصدها معمولاً با کمک شبکه‌هایی از تلسکوپ‌های خودکار صورت می‌گیرد (مانند آن‌هایی که گروه OGLE را





شکل ۱۲-۵: مشاهدات انجام شده به وسیله کنسرسيوم OGLE ریزعدسی را که به وسیله یک سیاره به جرم ۵/۵ برابر زمین به وجود آمده است نشان می دهد.

تشکیل می دهند) که پیوسته در حال رصد میلیون ها ستاره به سمت مرکز کهکشان هستند تا تعداد زیادی ستاره زمین را فراهم آورند.

اگر تلسکوپی متوجه افزایش روشنایی ستاره ای شود، کل شبکه، که به منظور رصد پیوسته در تمام جهان پخش شده اند، پایش بی وقفه ای را فراهم می آورند. حضور سیاره، با یک روشنایی اضافی بسیار کوتاه مدت بروز می کند، که به صورت جهشی در شاخه کناری منحنی اصلی روشنایی ظاهر می شود.

در ۲۵ ژانویه ۲۰۰۶، کشف OGLE-۲۰۰۵-BLG-۳۹۰Lb اعلان شد. این کشف مبتنی بود بر مشاهداتی که در شکل ۱۲-۵ نشان داده شده است. جرم این سیاره ۵/۵ برابر زمین برآورد می شود و به دور یک ستاره کوتوله قرمز، با فاصله حدود ۲۱,۵۰۰ سال نوری از زمین به سمت مرکز کهکشان، می چرخد. فاصله سیاره از خورشیدش ۲/۶ AU است. در زمان کشف، این سیاره کمترین جرم را در بین سیاره های فراخورشیدی شناخته شده به دور ستاره های رشته اصلی دارا بود. دمای سطح این سیاره حدود  $220^{\circ}\text{C}$  زیر صفر است؛ احتمالاً یک جو رقیق دارد، با یک هسته صخره ای که زیر یک کلاهک منجمد دفن شده است.

از معایب این روش آن است که هم راستایی پیش آمده، که به ایجاد رویداد عدسی گرانشی و شناسایی سیاره منجر می شود، بسیار بعید است که دوباره تکرار گردد. از طرفی سیاره های شناسایی شده، معمولاً هزاران سال نوری دور هستند، از این رو پیگیری آن ها با دیگر روش ها عملاً غیرممکن

می‌باشد. با وجود این، چنانچه بتوان تعداد کافی ستارهٔ پس‌زمینه را در مدت زمانی طولانی رصد کرد، بالاخره این روش باید ما را قادر سازد برآوردی از فراوانی سیارات زمین‌گونه در کهکشان به دست آوریم.

در اوایل سال ۲۰۰۸، روش ریزعدسی گرانشی، دو سیارهٔ غول‌گازی را مشابه مشتری و زحل شناسایی نمود. این دو سیاره به دور ستاره‌ای در فاصلهٔ ۵۰۰۰ سال نوری، و در منظومه‌ای که شباهت‌های خیره‌کننده‌ای با منظومه ما دارد، در گردش‌اند. این کشف نشان می‌دهد که سیاره‌های غول‌پیکر به تنهایی زندگی نمی‌کنند، بلکه احتمال یافتن آن‌ها در دسته‌های خانوادگی بیشتر است. جرم سیارهٔ نزدیک‌تر ۰/۷۱ مشتری، و فاصلهٔ آن از ستارهٔ میزبانش ۲/۳ برابر فاصلهٔ زمین از خورشید است. دومین ستاره جرم کمتری دارد، یعنی ۰/۲۷ جرم مشتری؛ و فاصلهٔ آن تا ستارهٔ میزبان دو برابر است.

جدای از جرم ستارهٔ میزبان که نصف خورشید است، این منظومه شباهت‌های چشم‌گیری با منظومه شمسی دارد. هم نسبت جرم دو سیارهٔ بزرگ (۳ به ۱) و هم نسبت فاصلهٔ آن‌ها از ستاره میزبان (۱ به ۲) به طور قابل ملاحظه‌ای شبیه به مشتری و زحل است. نسبت بین دوره تناوب مداری آن‌ها - به ترتیب ۵ سال و ۱۴ سال - نیز بسیار به مشتری و زحل شبیه است (۲ به ۵). این منظومه بیش از هر منظومه‌ای که قبل از آن شناسایی شده بود به منظومه شمسی خودمان شباهت دارد. درحالی‌که هم‌اکنون بیش از ۱۰۰۰ سیارهٔ شناخته‌شده وجود دارد که دور ستاره‌های دیگر در گردش‌اند (به‌علاوهٔ تعداد بسیار بیشتری نامزد تأیید نشده)، تعداد منظومه‌های خورشیدی دارای چندین سیاره که تاکنون شناسایی شده‌اند، بسیار کمتر است. با قرار گرفتن سیاره‌های کوچک‌تر در محدودهٔ شیوه‌های شناسایی ما، این تعداد قطعاً افزایش خواهد یافت.

تا پایان سال ۲۰۱۳، در مجموع ۲۴ منظومهٔ سیاره‌ای به روش ریزعدسی گرانشی کشف شده است (شامل دو منظومهٔ چند سیاره‌ای)، که ۲۶ سیارهٔ فراخورشیدی را در خود جای داده‌اند. جرم این سیارات از ۰/۰۱ جرم مشتری (Gliese 581 e) تا ۹/۴ برابر آن متفاوت است، یعنی از ۲/۵ برابر تا ۳۰۰۰ برابر جرم زمین. فاصلهٔ آن‌ها از خورشیدشان از ۰/۲ تا ۸/۳ واحد نجومی است. برای دیدن فهرست جدیدترین سیاره‌های ریزعدسی به وب‌گاه زیر مراجعه کنید:

<http://exoplanet.eu/catalog/?f=%22microlensing%22+IN+detection>

## ۱۲-۷ اخترسنجی

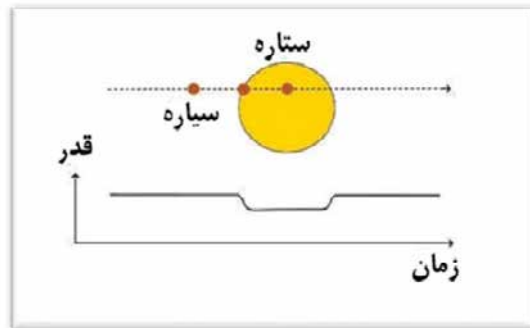
علم محاسبه دقیق موقعیت، موسوم به اخترسنجی<sup>۱۶</sup>، قدیمی‌ترین روشی است که برای شناسایی سیارات به کار گرفته می‌شود. در دهه‌های ۱۹۵۰ و ۱۹۶۰، ادعا شد که چند سیاره با این روش کشف شده است. متأسفانه هنوز هیچ‌کدام مورد تأیید قرار نگرفته و تا پایان سال ۲۰۰۷، هیچ سیاره‌ای به این روش شناسایی نشده بود؛ هرچند تلسکوپ هابل وجود سیاره‌ای را اطراف گلایزه<sup>۱۷</sup> ۸۷۶ تأیید کرده است.

در این شیوه، جابه‌جایی ستاره در طول زمان با دقت فراوان بررسی می‌شود. تمامی منظومه‌های خورشیدی در حال گردش به دور مرکز کهکشان هستند (این سفر برای خورشید ما در حدود ۲۳۰ میلیون سال طول می‌کشد) و در بازه‌های کوتاه زمانی اساساً به خط راست حرکت می‌کنند. با وجود این، چنانچه ستاره در یک سامانه دوتایی، یا منظومه سیاره‌ای، قرار داشته باشد، نقطه‌ای که به خط راست حرکت می‌کند مرکز ستاره نیست، بلکه مرکز جرم سامانه (منظومه) است (امیدوارم از بحث‌های گذشته دلیل این ادعا را بدانید). لذا، ستاره با حرکت بر یک مدار ریز دایره‌ای یا بیضوی حول مرکز جرم، مسیری پرپیچ‌وخم را در آسمان دنبال می‌کند. تاکنون، به‌غیر از مورد گلایزه ۸۷۶، رصدهای انجام گرفته با این روش از آن‌چنان دقتی برخوردار نبوده است که بتوان وجود سیاره‌ای را شناسایی نمود.

سیاره اطراف گلایزه ۸۷۶، که در فاصله ۱۵/۶ سال نوری قرار دارد، نخستین بار با استفاده از شیوه سرعت شعاعی در سال ۱۹۹۸ مورد شناسایی قرار گرفت. اندازه‌گیری‌های سرعت شعاعی، به همراه دو سال اندازه‌گیری اخترسنجی به وسیله تلسکوپ فضایی هابل، این امکان را فراهم آورد که جهت‌گیری صفحه مداری سیاره‌ها تعیین شود؛ به گونه‌ای که جرم واقعی سیارات، و نه کمینه، در آن منظومه به دست آمده است.

همان‌طور که در فصل ۱۰ گفتیم، فضایی‌مای گایا، که در دسامبر ۲۰۱۳ پرتاب شد، دقت کافی را برای تعیین موقعیت دارد (۷ میکروثانیه قوسی)، و لذا قادر است با این شیوه سیارات را به دور ستاره‌های روشن نسبتاً نزدیک شناسایی کند. متأسفانه مأموریت تداخل‌سنجی فضایی ناسا (SIM)<sup>۱۸</sup>، که قرار بود دقت یک میکروثانیه قوسی را کسب نماید و بدین ترتیب قادر بود سیاره‌ها را

شکل ۱۲-۶: اثر گذر سیاره‌ای بر روشنایی یک ستاره.



در فواصلی بسیار دورتر از ۳۰ سال نوری شناسایی کند، در سال ۲۰۱۰ لغو گردید. روش اخترسنجی، به دلیل حساسیت بیشتر به سیاره‌ها در فاصله‌های مداری دورتر، مکمل مناسبی برای دو شیوه سرعت شعاعی و گذر است. البته این‌گونه سیارات دوره تناوب مداری طولانی خواهند داشت، لذا شناسایی آن‌ها به مشاهداتی در طول سال‌های متمادی نیاز دارد.

## ۱۲-۸ گذر سیاره‌ای

با افزایش تعداد غول‌های گازی شناخته شده در مدارهای نزدیک، به طور منطقی احتمال این‌که صفحه مداری برخی از آن‌ها شامل زمین نیز بشود، افزایش یافته است. در چنین موردی، سیاره در هر گردش خود از مقابل ستاره عبور کرده، یک افت قابل اندازه‌گیری در روشنایی ستاره به وجود می‌آورد (شکل ۱۲-۶).

بینیم اگر از فاصله‌ای بسیار دور به خورشید نگاه کنیم، در صورت عبور سیاره‌ای به اندازه مشتری از مقابل آن، چقدر از روشنایی خورشید کاسته می‌شود. قطر خورشید حدود ۱۰ برابر مشتری است، پس مساحت سطح مقطع آن ۱۰۰ برابر مشتری خواهد بود. در زمان گذر مشتری از مقابل خورشید، سطح مؤثر آن از ۱۰۰ به ۹۹ کاهش می‌یابد و کاهش ۱٪ در روشنایی را باعث می‌شود.

در صورت توجه و مراقبت در حین اندازه‌گیری، این دقت قابل دسترسی است. در ۵ نوامبر سال ۱۹۹۹، دو گروه، گذر یک سیاره را که قبلاً با شیوه سرعت شعاعی شناسایی شده بود، در مدار به دور ستاره HD ۲۰۹۴۶۹ ثبت کردند. در حین گذر، روشنایی ستاره ۱/۷٪ کاهش یافت.

در سال ۲۰۰۲، سیاره OGLE-TR-۵۶B با روش گذر کشف شد و بعداً با شیوه سرعت شعاعی

مورد تأیید قرار گرفت. در سال ۲۰۰۶، تلسکوپ فضایی هابل کاوشی را از ۱۸۰,۰۰۰ ستاره، و تا فاصله ۲۶,۰۰۰ سال نوری به سمت برآمدگی مرکز کهکشان انجام داد. در این کاوش ۱۶ نامزد برای سیارات فراخورشیدی به دست آمد که ۳ عدد از آن‌ها مورد تأیید قرار گرفته است. اگر هر ۱۶ نامزد مورد تأیید قرار می‌گرفت، دلیلی بود بر این که تعداد سیاره‌های هم‌اندازه با مشتری در کهکشان از مرتبه ۶۰۰۰ میلیون است. ۵ سیاره از سیاراتی که اخیراً کشف شده است با دوره تناوبی کمتر از یک روز به دور ستاره خود می‌چرخند. نامزد کوتاه‌ترین دوره تناوب - تنها ۱۰ ساعت - فقط ۱/۲ میلیون کیلومتر از خورشید نسبتاً کوچک و کوتوله قرمز فاصله دارد و دمای سطح آن ۱۴۰۰k برآورد می‌شود! جرم این سیاره حداقل باید ۱/۶ برابر مشتری باشد تا نیروهای کشندی ناشی از ستاره آن را متلاشی نکند.

روش گذر این مشکل را دارد که تنها در صورتی قابل استفاده است که لبه مدار سیاره تقریباً به سمت زمین باشد. حدود ۱۰٪ از سیاره‌ها در مدارهای نزدیک، گذر خود را نشان می‌دهند. این کسر در سیاره‌هایی با مدارهای بزرگ بسیار کوچک‌تر است، زیرا هم‌راستایی باید دقیق‌تر باشد. تنها حدود ۰/۵٪ از سیارات مشابه زمین در مدار به دور ستاره‌هایی مشابه خورشید باعث گذر می‌شوند. دو مأموریت فضایی موسوم به کپلر و کوروت<sup>۱۹</sup> به آرایه‌های بسیار بزرگ سی‌سی‌دی مجهزند که میدان دید بسیار وسیعی را برای آن‌ها به ارمغان آورده است، لذا آن‌ها می‌توانند به طور پیوسته تعداد زیادی ستاره را رصد کنند.

روش گذر در واقع دو مزیت مهم دارد. اول این که چون مدتی طول می‌کشد تا سیاره به طور کامل در مقابل ستاره قرار گیرد، اندازه سیاره را می‌توان از منحنی نور به دست آورد. با ترکیب این مقدار و جرم سیاره که از روش سرعت شعاعی به دست می‌آید، چگالی سیاره محاسبه می‌شود، و بدین ترتیب می‌توان اطلاعاتی از ساختار فیزیکی آن کسب کرد.

مزیت دوم این است که در این روش می‌توان جو سیاره را مورد مطالعه قرار داد. هنگام گذر سیاره از مقابل ستاره، نور ستاره از جو سیاره عبور می‌کند. با مطالعه دقیق طیف ستاره در هنگام گذر، خطوط جذبی‌ای ظاهر می‌شود که به عناصر موجود در جو سیاره مربوط است.

سیاره فرامنظومه‌ای HD ۲۰۹۴۵۸b، که موقتاً اوسیریس<sup>۲۰</sup> نام گرفت، نخستین سیاره‌ای بود که در حال گذر از مقابل ستاره‌اش رصد شد. مشاهدات تلسکوپ فضایی هابل در ابتدا دنباله‌ای از

هیدروژن در حال تبخیر را کشف کرد که ممکن است به مرور زمان، سیاره را به طور کامل از گاز محروم ساخته، هسته‌ای صخره‌ای و مرده باقی بگذارد. رصدهای اخیر تلسکوپ هابل نشان می‌دهد که سیاره با هاله‌ای کشیده از اکسیژن و کربن احاطه شده است و عقیده بر این است که به شکل توپ راگی باشد. این اتم‌های سنگین‌تر، در مسیر حرکت هیدروژن‌های اتمی که از جو فرار می‌کنند گرفتار شده، از قسمت‌های پایین جو بالا می‌آیند؛ چیزی شبیه به غبار در یک گردباد.

## ۹-۱۲ رصدخانه فضایی کپلر

کپلر یک رصدخانه فضایی در مدار خورشید است که ناسا آن را به هدف کشف سیارات شبیه زمین به دور ستاره‌های دیگر، با استفاده از شیوه گذر سیاره‌ای، در ۷ مارس ۲۰۰۹ پرتاب کرد. این فضاپیما، با نامی برگرفته از نام ستاره‌شناس عصر رنسانس، یوهان کپلر، به منظور کاوش ناحیه‌ای از کهکشان راه شیری در صورت فلکی دجاجة طراحی شده بود؛ و به علاوه، پایش پیوسته بیش از ۱۴۵٫۰۰۰ ستاره رشته اصلی با استفاده از یک آرایه ۹۵ مگاپیکسلی سی سی دی که در صفحه کانونی یک آینه اولیه به قطر ۱/۴ متر قرار دارد. سیصد نوردهی، هر یک به مدت ۶ ثانیه، در مجموع یک نوردهی مؤثر ۳۰ دقیقه‌ای را فراهم می‌آورد. این تصاویر پس از تحلیل ابتدایی در فضاپیما و کاهش حجم داده‌ها، به زمین ارسال می‌گردند.

هدف آن از این قرار بود: کشف ده‌ها سیاره فرامنظومه‌ای به اندازه زمین در کمربند حیات<sup>۲۱</sup> خورشید خود یا نزدیک به کمربند حیات، و برآورد اینکه چند میلیارد ستاره در کهکشان ما چنین سیاره‌هایی را دارد. بر اساس طرح ابتدایی، قرار بود عمر این فضاپیما ۳/۵ سال باشد. به سادگی می‌توان دریافت چرا برای شناسایی یک سیاره مانند زمین که در طول یک سال به دور خورشید خود گردش می‌کند، سه یا چهار سال زمان نیاز است. این شیوه به دست کم دو، یا برای اطمینان سه گذر سیاره احتیاج دارد. ممکن است بخت یار باشد و در اولین روز رصد، یک گذر اتفاق افتد. در این صورت، گذر دوم تنها بعد از یک سال و یک روز، و گذر تأییدی سوم پس از دو سال و یک روز مشاهده خواهد شد. اما ممکن است نخستین گذر در پایان سال اول رخ دهد و سه سال لازم باشد تا سه گذر مشاهده شود. حتی اگر تنها به دو گذر نیاز بود، در یک مدت ۳/۵ ساله، فقط نیمی از سیاراتی که دوره تناوبشان دو سال است کشف می‌شد.

زمانی که نخستین مشاهدات مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت، دانشمندان دریافتند که سطح نوفه در دستگاه بالاتر از حد انتظار است - قسمتی از آن به دلیل متغیربودن ذاتی خود ستارگان، که بالاتر از حد توقع بود. بدین ترتیب، مأموریت برای رسیدن به تمام اهداف خود، به گذرهای بیشتری نیاز داشت تا با اطمینان یک سیاره را شناسایی کند. لذا قرار بر این شد که مأموریت به ۷/۵ سال تمدید شود، یعنی تا سال ۲۰۱۶.

شناسایی سیارات به دیدن تغییرات بسیار کوچک در روشنایی بستگی دارد (کیپلر می‌توانست تغییرات ۸۰ قسمت در میلیون را آشکار کند)، بنابراین ستارگان متغیر نامزدهای بارز نمی‌بودند. ظرف چند ماه معلوم شد حدود ۷۵۰۰ ستاره از فهرست هدف ابتدایی متغیرند و لذا از فهرست حذف شدند تا نامزدهای تازه جای آن‌ها را بگیرند.

همانند تلسکوپ فضایی هابل، نشانه‌روی تلسکوپ (راستای تلسکوپ) به وسیله مجموعه‌ای از «چرخ‌های واکنشی» کنترل می‌شد (چیزی شبیه به ژيروسکوپ). شاید به خاطر داشته باشید (و در فصل ۱۹ خواهیم گفت) که این ابزار در تلسکوپ هابل در جریان مأموریت‌های تعمیراتی تعویض گردید، لذا این تلسکوپ برای سال‌های متمادی عملیاتی باقی ماند. امکان تعویض آن‌ها در کیپلر وجود نداشت، و متأسفانه در ۱۱ مه ۲۰۱۳، دومین چرخ از چهار چرخ واکنشی خراب شد، و بدین ترتیب نخستین دوره از جمع‌آوری داده‌های علمی به پایان رسید. تا ژوئیه ۲۰۱۳، کیپلر ۱۳۴ سیاره فراخورشیدی تأیید شده را در ۷۶ منظومه ستاره‌ای کشف کرده بود، علاوه بر این، ۳۲۷۷ نامزد همچنان در انتظار تأییدند. در نوامبر ۲۰۱۳، نتایج بیشتری منتشر شد، و تعداد کل به ۳۵۰۰ سیاره رسید. در آن زمان تنها ۱۶۷ نامزد مورد تأیید قرار گرفته بودند، اما احتمالاً اکثریت قاطعی از این‌ها واقعاً سیاره فراخورشیدی هستند.

از این نامزدها:

- ۶۷۴ عدد قطری کمتر از ۲/۵ برابر زمین دارند.
- ۱۰۷۶ عدد قطری بین ۲/۵ تا ۴ برابر زمین دارند.
- ۱۴۵۷ عدد قطری بین ۴ تا ۱۲ برابر زمین دارند.
- ۲۲۹ عدد قطری بین ۱۲ تا ۳۰ برابر زمین دارند.
- ۱۰۲ عدد قطری بیش از ۳۰ برابر زمین دارند.

بر اساس داده‌های مأموریت فضایی کپلر، عقیده بر این است که حدود ۴۰ میلیارد سیاره به اندازه زمین در کمرند حیات ستاره‌های شبیه به خورشید و کوتوله‌های قرمز درون منظومه شمسی در حال گردش هستند. شاید یازده میلیارد از این سیاره‌ها به دور ستاره‌های شبیه به خورشید در گردش اند. برآورد می‌شود که از هر پنج ستاره شبه خورشید، یکی میزبان یک سیاره صخره‌ای در کمرند حیات خود است، و احتمالاً نزدیک‌ترین سیاره این چینی تنها ۱۲ سال نوری از ما فاصله دارد.

ناسا استفاده‌های دیگری را از کپلر در نظر گرفته است. حساسیت طیف‌سنجی آن از ۸۰ قسمت در میلیون به ۳۰۰ قسمت در میلیون کاهش یافته است، اما حتی این حساسیت نیز بسیار بهتر از چیزی است که از زمین قابل دستیابی می‌باشد. استفاده‌های ممکن که مورد توجه قرار گرفت عبارت بود از جستجوی سیارک‌ها و دنباله‌دارها، کاوش درباره شواهد ابرنواخترها، و یافتن سیارات فراخورشیدی از راه ریزعدسی گرانشی.

هنوز داده‌های یک سال از مشاهدات در انتظار تجزیه و تحلیل است، انتظار می‌رود تعداد بسیار بیشتری سیاره فراخورشیدی در این داده‌ها کشف شود - با بهبود شیوه‌های تحلیل، تعداد این نامزدها از ژانویه تا نوامبر ۲۰۱۳ تا ۷۸٪ افزایش یافته است، و تعداد بیشتری از این سیارات وارد گذر سوم شده‌اند. نتایج کپلر از این لحاظ بسیار دلگرم‌کننده است که علیرغم آنچه در نگاه اول به نظر می‌آید، به احتمال زیاد، منظومه‌های خورشید مانند منظومه شمسی ما کاملاً فراوان‌اند.

در دومین اجلاس علمی کپلر در نوامبر ۲۰۱۳، گروه علمی کپلر یک مأموریت اضافه موسوم به K2 را پیشنهاد کردند. آن‌ها نشان دادند که اگر کپلر به صورت مناسب رو به خورشید جهت داده شود، دو چرخ واکنشی باقیمانده می‌توانند نشانه‌رویِ تلسکوپ را پایدار نگه دارند، به شرط آنکه میدان‌های ستارگان در صفحه دایره البروج باشد. هر میدان هدف را تنها می‌شد برای ۴۰ روز (و گاهی تا ۷۰ روز) رصد کرد، و تنها حدود ۱۰,۰۰۰ تا ۲۰,۰۰۰ ستاره نسبتاً روشن (و نه حدود ۱۵۰,۰۰۰ ستاره) را می‌شد در این مدت پایش کرد. این محدودیت اخیر عملاً این پیامد مهم را دارد که چون سیاره در حال چرخش به دور ستاره‌های روشن‌تر است، رصدهای بعدی از زمین و با استفاده از شیوه سرعت شعاعی می‌تواند جهت تأیید آن مورد استفاده قرار گیرد.



## پانوشتها

۱- اخیراً کشف سیارهٔ چهارم نیز اعلان شده است. (مترجم)

- 2 - Fomalhaut
- 3 - occulting disc
- 4 - Atacama Large Millimeter Array (ALMA)
- 5 - Thayne Currie
- 6 - large circumplanetary disc
- 7 - Barycentre

۸- رویدادی که در دههٔ ۱۹۸۰ پیش آمد و مأموریت‌های فضایی‌های وِیجر را به سیارات بیرونی موجب شد.

- 9- Bruce Campbell, G. A. H. Walker, and S. Yang
- 10 - Gamma Cephei
- 11- Paul Butler and Geoffrey Marcy
- 12 - Extra-Solar Planet
- 13 - 51 Pegasi
- 14- Michael Mayor and Didier Queloz
- 15 - Pegasus
- 16 - Astrometry
- 17 - Gliese 876
- 18- Space Interferometry Mission (SIM)
- 19- Kepler and COROT
- 20 - Osiris
- 21 - Habitable Zone

## فصل ۱۳

### آیا ما تنها هستیم؟ جستجوی حیات در فراسوی زمین

در فصل ۴ موضوع حیات در گذشتهٔ مریخ و جستجو دربارهٔ آن را بحث کردیم، و در فصل ۶ به بررسی حیات احتمالی در اقیانوس زیرسطحی در قمر اروپا پرداختیم. به علاوه، شاید تعجب کنید، اما بعید نیست که بتوانیم شواهدی از حیات را بر سیارات نه چندان دور در کهکشان بیابیم. در چند سال آینده احتمالاً برنامهٔ جستجو برای سیارات فرامنظومه‌ای جایی را خواهد یافت که یک سیارهٔ صخره‌ای درون کمربند حیات خورشید خود وجود دارد، و در آن هنگام شاید به این احساس برسیم که زندگی ممکن است آنجا وجود داشته باشد.

اجازه دهید خود را به جای یک تمدن بزرگ در کهکشان قرار دهیم که چندان از ما دور نیست. آیا آن‌ها می‌توانستند بفهمند که در زمین حیات وجود دارد؟ حقیقتاً پاسخ مثبت است. آن‌ها می‌توانستند، و این شناسایی بر اساس گرفتن طیف فرورسرخ از جو سیارهٔ ما بود. اگر آن‌ها طیف مریخ و زهره را می‌گرفتند یک طیف تخت با یک باند جذبی عمیق ناشی از حضور دی‌اکسید کربن در جو می‌یافتند. اما طیف جو زمین بسیار متفاوت بود. حضور بخار آب در جو زمین، بخش‌های دورتر طیف را نزدیک‌تر می‌آورد و سه باند جذبی، و نه یکی، وجود خواهد داشت. در کنار باند مربوط به دی‌اکسید کربن، آن‌ها بانندی را ناشی از متان می‌یافتند، که یا نشانگر حیات بود (هر نوع، مثلاً گاو!) و یا نشانهٔ فعالیت آتش‌فشانی. اما مهم‌تر آنکه آن‌ها بانندی را ناشی از اوزون می‌یافتند. اوزون تنها در صورتی می‌تواند در یک جو وجود داشته باشد که اکسیژن آزاد موجود باشد. اما اکسیژن فوق‌العاده واکنش‌پذیر است، لذا اگر پیوسته از طریقی جایگزین نشود، هرگونه حضور آن به زودی ناپدید می‌گردد. شیوهٔ تجدید اکسیژن در جو ما عبارت است از واکنش فتوسنتز — یک ویژگی از حیات گیاهی در زمین.

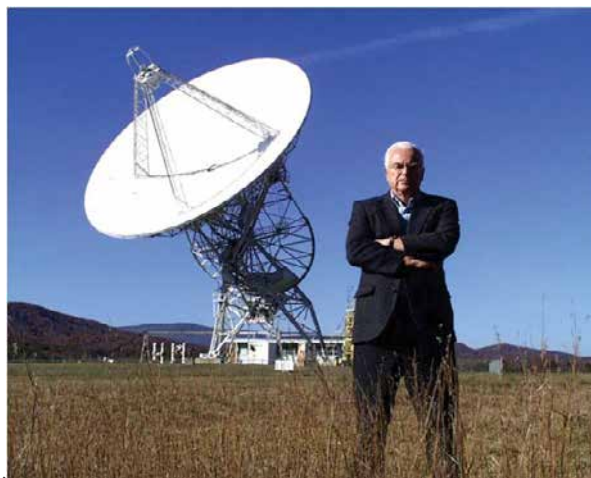
به همین ترتیب، اگر شواهدی مبنی بر وجود بخار آب و اوزون را در جو یک سیارهٔ

فرمانظومه ای بیابیم می توانیم با اطمینان بگوییم که گونه‌ای از حیات در آنجا وجود دارد. اغلب از من می پرسند چرا خود را محدود می کنیم و معمولاً در جاهایی که شرایط شبیه به زمین دارند به دنبال گونه‌های دیگر حیات می گردیم. چرا ما واقعیت‌های زندگی خودمان را بر گونه‌های دیگر حیات تحمیل می کنیم؟ در پاسخ، توجیه من دو بخشی است. دیدید که در ستاره‌ها، تا حدی پرچرم‌تر از خورشید ما، نیتروژن از گداخت هیدروژن به هلیوم تولید می شود، و در مراحل پایانی زندگی در ستارگانی شبیه به خورشید ما، اول کربن و سپس اکسیژن تولید می گردد. با توجه به این، گونه‌های مختلف حیات بر سیاره ما عمدتاً از عناصری در جهان که فراوان‌ترین آن‌ها هستند ساخته شده‌اند. به علاوه، همگان متفق‌اند که کربن پیچیده‌ترین شیمی را در بین عناصر دارد، و از این رو یک عنوان کامل، یعنی شیمی آلی، به آن اختصاص یافته است. بنابراین شکل‌های مختلف حیات مبتنی هستند بر فراوان‌ترین عناصر که شیمی کربن آن‌ها را به هم وصل کرده است. آیا این طور نیست که به احتمال زیاد، اکثریت گسترده‌ای از گونه‌های دیگر حیات نیز از یک شیمی مشابه استفاده خواهند کرد؟

### ۱۳-۱ ستی

ستی<sup>۱</sup> (جستجوی هوش فرازمینی) حالا قریب به ۵۰ سال است که بدون موفقیت به کار خود ادامه می دهد. با وجود این نمی توان نتیجه گرفت که ما در کهکشان راه شیری تنها هستیم. درست است که بیشتر ستاره‌شناسان در حال حاضر بر این موضوع اتفاق نظر دارند که تمدن‌های هوشمند بسیار کمتر از چیزی است که زمانی تصور می شد، اما نمی توانیم بگوییم اصلاً وجود ندارد. به عبارت دیگر، ستی تأکید دارد که شاید آن‌ها در فاصله‌های دورتری از ما قرار دارند، و این در حالی است که ما تاکنون عملاً و به صورت جدی تنها بخش ریز و ناچیزی از کهکشان را جستجو کرده‌ایم. باید تا اواسط دهه ۲۰۲۰ صبر کنیم، یعنی زمانی که یک تجهیزات، که حالا در مرحله طراحی است، این توانایی را به ما می دهد که سیگنال‌های رادیویی با توان واقعی را از پهنه تمام کهکشان شناسایی کنیم. این احتمال نیز وجود دارد که نژاد بیگانه به جای رادیو، از نور برای ارتباط استفاده کند، اما کاوش‌های اپتیکی ستی که در حال پایش پالس‌های لیزری است درست در ابتدای راه است.

شکل ۱۳-۱: فرانک دریگ و تلسکوپ ۲۵ متری در گرین بانک، جایی که او پروژه عظمی را اجرا کرد



### ۱۳-۲ تاریخچه

این موضوع با ساخت تلسکوپ رادیویی ۷۶ متری مارک یک در سال ۱۹۵۷ در جُدرل بانک<sup>۲</sup> به ذهن متبادر شد. در سال ۱۹۵۹ دو ستاره‌شناس آمریکایی به نام جوزیه کوکونی و فیلیپ موریسون<sup>۳</sup>، مقاله‌ای را به مجله *Nature* ارائه کردند که در آن اظهار می‌داشتند اگر دو تلسکوپ رادیویی قابل مقایسه با اندازه مارک یک در اختیار بود، امکان برقراری ارتباط رادیویی در فواصل بین ستاره‌ای وجود داشت. آن‌ها تعدادی ستاره شبه خورشید و نزدیک را پیشنهاد کردند که می‌شد آن‌ها را رصد کرد و دید آیا سیگنالی قابل شناسایی وجود دارد یا خیر. این فهرست ستاره‌های تاو قیطس و اپسیلون نهتر<sup>۴</sup> را، هر دو در فاصله ۱۰ تا ۱۲ سال نوری، در برمی‌گرفت. آن‌ها همچنین اشاره داشتند که خطوط طیفی رادیویی H و OH، که بسامدهای آن‌ها برای تمدن‌هایی که قادر به ارتباط با ما هستند معلوم خواهد بود، در بخش بسیار آرامی از طیف رادیویی قرار دارند و می‌توانند به عنوان نشانگرهایی در دو انتهای باند بسامدهایی عمل کنند که ممکن است برای ارتباط بین ستاره‌ای مورد استفاده قرار گیرند. این باند بسامدی به چاله آب<sup>۵</sup> مشهور شده است (چون:



در سال بعد فرانک دریگ<sup>۶</sup>، پدر بستی، با استفاده از تلسکوپ ۲۵ متری گرین بانک در ویرجینیای غربی (شکل ۱۳-۱)، روزانه شش ساعت و برای دو ماه، در آنچه پروژه عظمی<sup>۷</sup> نام گرفت، به رصد



1		2		1	4	3
1	16	1		1		1
1	11	1		1		11
						1
	6	2			3	1
1	24	3	12	1	21	1
	1	1	1	2	1	1
Q	1	16	1	1	3	1
U	1	1	3	1	1	1
J	1	31	3	11	1	1
5	1				1	1
	14	1		113	1	11
1	3	1		1	1	1
1	4	1		1	1	1
	4	1	1	1	11	111
	1			1		2
1	1	1			11	1
						14

Wow!

شکل ۱۳-۲: تلسکوپ بیگ ار (گوش بزرگ) و سیگنال Wow! که در سال ۱۹۷۷ دریافت شد.

تاوقیطس و اِپسیلون نهر پرداخت. دو سیگنال کوتاه، در محدوده‌ای که باید یک باند حفاظت شده برای نجوم رادیویی باشد، شناسایی شد، اما عقیده بر این است که این دو سیگنال به وسیله هواپیمای جاسوسی فوق سری یو دو<sup>۸</sup> مخابره شده بود.

### ۱۳-۳ سیگنال Wow!

از آن زمان حدود ۱۰۰ کاوش جدی ستی وجود داشته است. در سال ۱۹۷۷، یک تلسکوپ به نام «گوش بزرگ»<sup>۹</sup> که به وسیله دانشگاه ایالت اوهایو عملیاتی شده بود (شکل ۱۳-۲) و از ۱۹۷۴ کاوش ستی را در تمام آسمان اجرا می‌کرد، سیگنالی را گرفت که به نظر می‌رسید تمام مشخصه‌های درست را داشته باشد. آن را سیگنال «Wow!» می‌نامند، زیرا ستاره‌شناسی که داده‌ها را تحلیل

می‌کرد این واژه را در حاشیه برگه خروجی رایانه نوشت. متأسفانه در رصدهای بعدی، هیچ سیگنال دیگری از این ناحیه از آسمان دریافت نشد.

برای آنکه یک پیام رادیویی تا آنجا که ممکن است برای شناسایی در فواصل بین‌ستاره‌ای ساده باشد، تقریباً با اطمینان می‌توان گفت که باید به شکل یک سیگنال از نوع کد مورس با پهنای باند یک هرتز یا کمتر باشد - در مقایسه با مخابرات رادیویی که به پهنای باند چند کیلوهرتز نیاز دارد. شناسایی چنین سیگنال‌هایی به دریافت‌کننده‌های بسیار ویژه‌ای با میلیون‌ها کانال برای پوشش باند بسامدهای مورد جستجو نیازمند است. پل هوروویتس<sup>۱۰</sup> در هاروارد، یک پیشتاز در این میدان، دریافت‌کننده‌هایی را تهیه کرد که به صورت همزمان ۸۰ میلیون کانال را، هر یک به پهنای باند ۰/۵ هرتز، تحلیل می‌کرد. با استفاده از تلسکوپ ۲۵ متری هاروارد - اسمیت سونیان در اوک ریج<sup>۱۱</sup>، این دریافت‌کننده‌ها برای کاوش تمام «چاله‌آب» در پروژه‌های متا و بتا<sup>۱۲</sup> مورد استفاده قرار گرفتند.

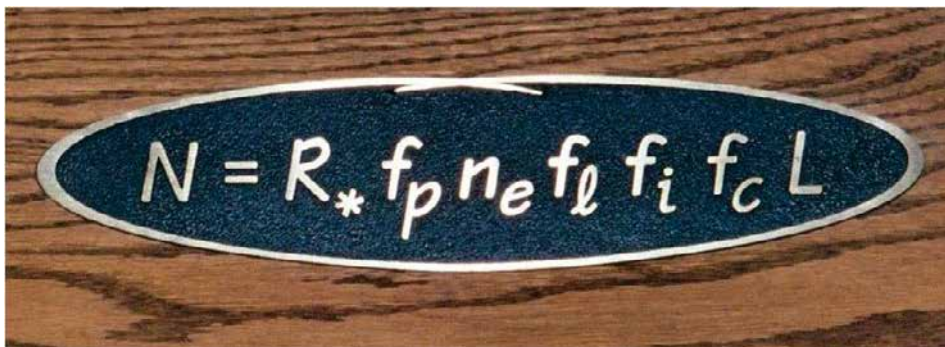
### ۱۳-۴ پروژه‌های سرنديپ و فونیکس

در دو جستجوی مهم از تلسکوپ ۳۰۵ متری آرسیبو در پورتوریکو<sup>۱۳</sup> استفاده شد. نخستین آن‌ها، پروژه سرنديپ<sup>۱۴</sup>، همچنان ادامه دارد، در حالی که دومین آن‌ها، پروژه فونیکس<sup>۱۵</sup>، در سال ۲۰۰۳ پایان یافت. سرنديپ، تحت اشراف دانشگاه کالیفرنیا، برکلی، از بشقاب آرسیبو با روش «سوار بر دوش» استفاده می‌کند؛ بدین ترتیب که دستگاه جمع‌کننده سیگنال که به آن اختصاص دارد، آسمان را نزدیک به هر جایی که ستاره‌شناسان دیگر، تلسکوپ را به آن سو نشانه روند، رصد می‌کند. گرچه رصدگران سیتی هیچ کنترلی بر محل رصد ندارند، در مدت چند سال بیشتر آسمانی که در دسترس تلسکوپ است مورد رصد قرار خواهد گرفت (اکثر این قسمت‌ها برای چند بار). بنابراین سرنديپ به دنبال سیگنال‌هایی است که بیش از یک بار از یک ناحیه آسمان دیده می‌شوند. بخش کوچکی از این داده‌ها، مربوط به یک باند باریک از بسامدهای رادیویی نزدیک خط ۱۴۰۰ مگاهرتز هیدروژن، به وسیله رایانه‌های خانگی در سراسر جهان تحلیل شده است (در پروژه موسوم به SETI@home). پس از چند سال، تعدادی سیگنال با مشخصه‌های مناسب برای چند مرتبه آشکار شده بودند و یک جلسه رصدی ویژه برای مشاهده جزئیات تشکیل شد. اما

هیچ سیگنالی در داده‌ها به عنوان یک سیگنال واقعی مورد تأیید قرار نگرفت.

این یک مشکل واقعی را مشخص می‌کند: یک سیگنال فرازمینی ممکن است گذرا باشد، و حقیقت آن است که انسان باید بتواند فوراً به این نتیجه برسد که یک سیگنال دارای منشأ فرازمینی است. این دلیل پروژه فونیکس بود. این پروژه، پس از آنکه کنگره آمریکا بودجه را قطع کرد، از دل پروژه ستی ناسا سر برآورد. این کار را مؤسسه ستی برای ناسا مدیریت کرده بود. این مؤسسه، پس از آن، بودجه خصوصی دست‌وپا کرد تا بخش جستجوی هدف‌دار برنامه ناسا را ادامه دهد و اطراف ۸۰۰ ستاره نزدیک و شبه‌خورشید را رصد کند. در پروژه فونیکس از دو تلسکوپ استفاده شد. بدین ترتیب با استفاده از مشاهدات همزمان، هرگونه سیگنالی که از درون منظومه شمسی سرچشمه گرفته بود حذف می‌گردید و یک تأیید فوری برای هر سیگنال فرامنظومه‌ای به دست می‌آمد. در ابتدا زوج‌های تلسکوپ در استرالیا و آمریکا مورد استفاده قرار گرفت، اما ناسا با کمک مالی، یک ارتقاء اساسی را برای بزرگ‌ترین تلسکوپ رادیویی جهان در آرسیبو در پورتوریکو فراهم آورده بود، از این‌رو حدود ۳۰ هفته زمان اختصاصی برای اجرای مشاهدات ستی در پروژه فونیکس به آن تعلق گرفت. در اجلاسی که سال ۱۹۹۶ پیرامون تلسکوپ‌های بزرگ رادیویی برگزار شد، به صورت اتفاقی در کنار دانشمند پروژه نشسته بودم. او به من درباره پیشنهاد استفاده از آرسیبو گفت و اینکه آن‌ها به یک تلسکوپ بسیار بزرگ رادیویی نیاز دارند تا در کنار آن فعالیت نماید. فوراً به آن‌ها پیشنهاد دادم که از تلسکوپ ۷۶ متری لاول در رصدخانه خودم، جدرل بانک، استفاده کنند - در آن زمان هنوز چهارمین تلسکوپ بزرگ در جهان بود. این پیشنهاد قبول شد و دستگاه دریافت‌کننده در تابستان ۱۹۹۸ روی تلسکوپ نصب شد و رصدها در پاییز آغاز گردید.

با توجه به فاصله دو تلسکوپ در دو سوی اقیانوس اطلس، هر تداخل موضعی در هر کدام از دو تلسکوپ، بلافاصله کنار گذاشته می‌شد. به علاوه، در نتیجه چرخش زمین و تغییر در بسامد دریافتی ناشی از پدیده دوپلر، یک سیگنال از خارج از منظومه شمسی، در جدرل بانک با بسامدی دریافت می‌شد که دقیقاً و بر اساس محاسبه، ۲ kHz پایین‌تر از بسامد دریافتی در آرسیبو بود. بدین ترتیب، زمانی که آرسیبو یک سیگنال بیگانه را دریافت می‌کرد، دریافت‌کننده جدرل بانک، با تنظیم روی بسامد لازم، تلاش می‌کرد آن سیگنال را تأیید کند. این کار آن‌ها را قادر می‌ساخت هر سیگنال دریافتی از خود زمین یا ماهواره‌های اطراف در منظومه شمسی را کنار بگذارند. این سامانه هر روز با



شکل ۱۳-۳: یک لوح در صدخانه گرین بانک به یادبود معادله دریک.

رصد سیگنال بسیار ضعیف فضایی پایونی ۱۰، که در آن زمان در فاصله‌ای بسیار دورتر از پلوتون از زمین قرار داشت، تنظیم می‌شد. در مدت پنج سال رصد، با حدود شش هفته رصد در هر سال، ۸۲۰ منظومه با ستاره‌های شبه خورشید رصد شد - امروزه می‌دانیم برخی از آن‌ها دارای سیاره هستند. شاید نیازی به گفتن نباشد که هیچ سیگنال مثبتی شناسایی نشد.

### ۱۳-۵ معادله دریک

عدم موفقیت بالا منجر به این پرسش شد که احتمال وجود تمدن‌های دیگر در کهکشان راه شیری، آنهایی که تلاش می‌کنند با ما تماس بگیرند، چقدر است. اگر انتظار وجود تمدن‌های دیگر را در کهکشان نداریم، امتیاز زیادی برای جستجو وجود ندارد. گروهی برجسته از دانشمندان برای نخستین بار در یک گردهمایی که فرانک دریک آن را در سال ۱۹۶۱ در جُدول بانک ترتیب داده بود، به این مشکل پرداختند. همان‌طور که دستور جلسه بود، او به یک معادله دست یافت که تلاش می‌کرد تعداد تمدن‌های درون کهکشان ما را که ممکن بود بخواهند با ما ارتباط برقرار کنند، برآورد نماید. این معادله، معروف به «معادله دریک»<sup>۶</sup> (شکل ۱۳-۳)، دو بخش دارد. در بخش نخست تلاش بر این است که مشخص شود هرچند وقت یک بار تمدن‌هایی هوشمند در کهکشان پدید می‌آید، و بخش دوم، مدت زمان لازم را برای آنکه یک چنین تمدنی پس از پدید آمدن با ما ارتباط برقرار نماید تعیین می‌کند.

بدیهی است که برخی از عامل‌های این معادله شناخته شده‌اند؛ مانند تعداد ستارگانی که



هرساله در کهکشان زاده می‌شوند، درصدی از آن‌ها که همچون خورشید به اندازه کافی داغ هستند و البته آن قدر زندگی می‌کنند که به زندگی هوشمند اجازه پدیدار گشتن را بدهند، و درصدی از این ستارگان که منظومه‌های خورشیدی مانند منظومه شمسی دارند. اما برآورد دیگر عوامل بسیار سخت‌تر است. برای مثال، در سیاره‌ای با محیط زیست مناسب، به نظر می‌رسد حیات ساده امکان ظهور داشته باشد - چیزی که در اینجا، و به مجرد آنکه زمین امکان پذیرش حیات را پیدا کرد، اتفاق افتاد. با وجود این، میلیاردها سال طول کشید تا زندگی چندسلولی به وجود آید و در نهایت به گونه‌های هوشمند تکامل پیدا کند. از این رو به نظر می‌رسد یک سیاره بایستی از اقلیمی ملایم و پایدار برای مدت زمانی بسیار طولانی برخوردار باشد. شرایطی که اجازه چنین رویدادی را بر روی یک سیاره می‌دهد چندان پیش‌پاافتاده نیست. زمین ما یک ماه بزرگ دارد که محور چرخش آن را تثبیت می‌کند. سطح زمین بر اثر حرکت صفحات آن بازسازی می‌شود، پدیده‌ای که به وسیله آن، دی‌اکسید کربن محصور در کرینات‌ها دوباره به جو برمی‌گردد. این چرخه کمک کرده است تا زمین به اندازه کافی گرم بماند و آب مایع بتواند شرایط رشد و نمو را بر سطح زمین فراهم آورد. حضور مشتری، تعداد دنباله‌دارهایی را که به زمین برخورد می‌کند کاهش داده است. هرچند که این برخوردها مقدار زیادی از آب موجود در زمین را به ارمغان آورده است، تعداد بیش از حد برخورد می‌تواند مانع تکامل گونه‌های هوشمند شود. آن گونه که بعضی نوشته‌اند، شاید ما بر روی یک زمین نایاب زندگی می‌کنیم. چند نمونه مشابه ممکن است در بین ستارگان وجود داشته باشد؟

پیش از این تصور عمومی این چنین بود که پس از شکل‌گیری حیات چندسلولی، تکامل، حیات را به سوی هوشمندی سوق داده است. اما این عقیده در سال‌های اخیر به چالش کشیده شده است - گونه‌های غیرهوشمند، اما به خوبی سازگار یافته، شاید برای زمان‌هایی بسیار طولانی حکم‌فرما باشند و بدین ترتیب از ظهور گونه‌های هوشمند جلوگیری کنند.

آخرین عامل در این قسمت از معادله، درصد تمدن‌هایی است که قادرند با ما ارتباط برقرار کنند، البته چنانچه تمایلی داشته باشند. تمدن ما، علیرغم توانایی، تاکنون تلاشی برای ارتباط نداشته است. حقیقتاً کسانی وجود دارند که فکر می‌کنند غیرعقلانه است دیگران را آگاه سازیم که ما در اینجا بر روی زمین، صاحب ملکی زیبا در میان فضای بین‌ستاره‌ای هستیم! هرگونه تلاشی برای ارتباط بایستی در درازمدت صورت پذیرد. زمان رفت و برگشت در یک مکالمه دوطرفه صدها و

یا هزاران سال طول خواهد کشید. در حال حاضر تأمین هزینه برای چنین برنامه‌ای سخت است. اغلب این گونه استناد می‌شود که ۱۰ تا ۲۰ درصد تمدن‌ها مایل به ارتباط هستند، چیزی که به نظر خوش بینانه می‌آید.

یکی از موضوعاتی که اغلب به عنوان روشی برای شناسایی تمدن‌های پیشرفته‌ای که مایل به ارتباط با ما نیستند بیان می‌شود، تابش نشت کرده، برای مثال، از رادار و یا فرستنده‌های تلویزیونی است. به عقیده من، این موضوع بعید است. طبق تعریف، هر سیگنالی که با عبور از فواصل بین ستاره‌ای، آن هم به صورت غیر عمدی، امکان آشکارسازی داشته باشد، بسیار در مصرف انرژی و لخرج بوده است. ما خود در روی زمین در حال جایگزینی فرستنده‌های پر قدرت تلویزیونی با فرستنده‌های کم قدرت دیجیتال هستیم، فرستنده‌های ماهواره‌ای توان بسیار کمی دارند و شبکه‌های فیبر نوری اصلاً تشعشع نمی‌کنند. نشت سیگنال، احتمالاً، مدت بسیار کوتاهی در دوره زندگی یک تمدن پیش می‌آید و بعید است که ما بتوانیم از آن مطلع شویم. شاید رادارهای فرودگاه آن‌ها، و حتی رادارهای پر قدرت جهت دیده‌بانی سیارک‌های نزدیک به زمینشان، در درازمدت فعال باشند و شانس برای شناسایی در اختیار ما قرار دهند، اما نباید روی آن‌ها حساب کنیم.

پس ارزش‌یابی و ترکیب تمام این عوامل، زمان متوسط برای هر بار ظهور یک تمدن پیشرفته در کهکشان به دست می‌آید. اگر برآورد این که هر چند وقت یک بار تمدنی هوشمند پدید می‌آید سخت است، برآورد آنکه آن تمدن چه مدت زمانی، به طور متوسط، تلاش می‌کند با ما ارتباط برقرار کند نیز به همان اندازه مشکل خواهد بود. اصولاً با داشتن جمعیتی پایدار و انرژی گداخت هسته‌ای، یک تمدن هوشمند برای میلیون‌ها سال امکان بقا دارد. اغلب مدت زمانی معادل ۱۰۰۰ سال برای این دوره ارتباط لحاظ می‌گردد. این طول زمان نقشی تعیین کننده در برآورد تعداد تمدن‌های دیگری که ممکن است هم‌اکنون در کهکشان وجود داشته باشند، دارد. برای مثال، اگر در هر ۱۰۰,۰۰۰ سال تمدنی پا بگیرد، یک برآورد منطقی آن است که تمدن‌ها برای ۱۰۰۰ سال اقدام به ارتباط می‌نمایند. بعید است که در هر زمان معین بیش از یکی وجود داشته باشد. با وجود این، چنانچه به طور متوسط آن‌ها یک میلیون سال در مرحله ارتباط باقی بمانند، می‌توانیم انتظار داشته باشیم که هم‌اکنون ۹ تمدن دیگر نیز در کهکشان ما حاضر باشد.

در آنچه که حساس‌ترین جستجویی بوده که تاکنون صورت پذیرفته است، یعنی پروژه

فونیکس، هر ستاره تنها برای ۱/۵ ساعت رصد شد. بنابراین اگر قرار بود ما شانس برای شناسایی یک سیگنال داشته باشیم، باید آن سیگنال عملاً پیوسته می بود؛ و این یعنی یک تلاش فراوان از طرف هر تمدن دیگر. اگر آن‌ها در نزدیکی ما در کهکشان بودند، احتمالاً از تحلیل طیف فرسوخ زمین می دانستند که گونه‌ای از حیات در اینجا وجود دارد. مگر اینکه حیات هوشمند بسیار فراوان باشد، در غیر این صورت دورتر از آن هستند که بتوانند منظومه شمسی ما را به عنوان یک هدف ممکن در نظر بگیرند.

زمانی که برای نخستین بار معادله دریک تعیین مقدار شد، برآورد تعداد دیگر تمدن‌ها بسیار زیاد بود. رقم‌های صدها هزار و حتی یک میلیون نیز گزارش شد. امروزه ستاره‌شناسانی که به ارزش‌یابی معادله دریک می پردازند خوش بینی بسیار کمتری دارند. اکثر برآوردها در محدوده ۱۰ تا چند صد قرار دارد، و معدودی از ستاره‌شناسان اعتقاد دارند که در این لحظه زمانی، ما تنها تمدن هوشمند در کهکشانییم. باید بگوییم که من نیز از این افراد هستم. یک دلیل آن است که تحقیقات جدید نشان می دهد که گذار از حیات تک سلولی به چندسلولی بسیار غیرمحتمل است بنابراین، گرچه من خوشحالم که باور دارم حیات ساده در کهکشان رایج و فراوان خواهد بود، حیات هوشمند احتمالاً بسیار نادر است و تصور می کنم که ما تنها تمدن هوشمند در کهکشان خود در حال حاضر هستیم.

حقیقت آن است که ما نمی دانیم. زمانی با فراست بسیار گفته شد: «معادله دریک یک روش تحسن برانگیز برای قرار دادن مقدار زیادی جهالت و نادانی در یک فضای کوچک است». کاملاً صحیح، اما یک نتیجه روشن این است که ما نمی توانیم بگوییم در کهکشان تنها هستیم. سستی تنها امید ما در پی بردن آن است که آیا تمدن هوشمند دیگری وجود دارد یا خیر.

### ۱۳-۶ سستی در باند اپتیکی

ستارگان، تابنده‌های قوی امواج رادیویی نیستند. از این رو تولید یک سیگنال در حضور نوفه رادیویی ناشی از یک ستاره (به ویژه ستاره‌ای که در مرکز منظومه خورشیدی‌ای قرار دارد که سیگنال از آن مخابره می شود)، به صورتی که بتوان آن را در یک فاصله دور شناسایی کرد، کار مشکلی نیست. زمانی که برای نخستین بار سستی مطرح شد، عقیده بر این بود که غیرممکن است

به درخشندگی فراتر از یک ستاره در بخش مرئی طیف دست یافت. اما چارلز تاونز<sup>۱۷</sup>، بلافاصله پس از آنکه لیزر را اختراع نمود، دریافت که لیزر می‌تواند در زمان‌های کوتاه، پالس‌هایی با شدت بسیار زیاد تولید کند که به راحتی روشن‌تر از یک ستاره هستند. بدین ترتیب ستی در باند اپتیکی پایه‌گذاری شد. دستگاه‌های لیزر، نزدیک به آنچه مورد نیاز است، امروزه برای تسلیحات «جنگ ستارگان» و نیروگاه‌های برق گداخت هسته‌ای تهیه می‌گردد، لذا به راحتی می‌توان تصور کرد که تمدن‌های پیشرفته آن‌ها را داشته باشند.

دان ورتمایرو و جف ماریسی<sup>۱۸</sup> در دانشگاه کالیفرنیا، برکلی، و پُل هوروویتس<sup>۱۹</sup> در دانشگاه هاروارد، پیشگامان ستی در باند اپتیکی، موسوم به O-SETI، هستند. کاوش لیزر پالسی برکلی<sup>۲۰</sup> را دان ورتمایر هدایت می‌کند و هدف آن رصد ۲۵۰۰ ستاره نزدیک است که عمدتاً شبیه به خورشیدند. در این رصد، به دنبال پالس‌های خیلی کوتاه و روشنی هستند که ممکن است یک میلیارد ثانیه دوام داشته، یک تمدن دور آن را به وسیله یک لیزر پالسی قدرتمند ارسال کرده باشد. در یک کاوش دیگر برکلی، دنبال سیگنال‌های لیزری می‌گردند که برای کسربزرگی از زمان برقرار است. این کاوش، به سرپرستی جف ماریسی، یک برنامه ۱۰۰۰ ستاره‌ای برای جستجوی سیگنال‌های باند فراباریک<sup>۲۱</sup> در بخش مرئی طیف است (شبیه به ستی در باند رادیویی، radio-SETI). آن‌ها در نظر دارند در میان هزاران طیف با توان تفکیک فوق‌العاده بالا، به دنبال خطوط بسیار تیز بگردند. در یک کاوش در حال اجرا (و بسیار موفق) سیاره‌ای، تاکنون اطلاعات بسیاری جمع‌آوری شده است.

نخستین دستگاه آشکارساز هوروویتس بر روی تلسکوپ ۶۱ اینچی دانشگاه هاروارد، زمانی که خود در حال اجرای یک نقشه‌برداری و موقعیت‌یابی از ۲۵۰۰ ستاره مجاور و شبه‌خورشید بود، سوار شد. اولین نورگیری در اکتبر ۱۹۹۸ بود. آشکارسازهای بسیار حساس مورد استفاده قرار گرفت، چراکه پالس‌های با مقیاس نانو ثانیه مستعد تحریک خطا هستند. از این رو شعاع نور به دو قسمت تقسیم می‌شود و برای یک پالس با ارزش، هر دو آشکارساز باید یک رویداد را شناسایی کنند. در مدت ۲۷ ماه نخست مشاهدات به وسیله دستگاه هاروارد، به طور متوسط در هر سه شب دو شناسایی انجام گرفت. به نظر می‌رسید که این رویدادهای شناسایی ارتباطی با قدر (روشنایی) ستارگان ندارد و هیچ حالت تناوبی در آن‌ها دیده نمی‌شد. در حقیقت، هیچ دلیل روشنی وجود



شکل ۱۳-۴: تلسکوپ ۱/۸ متری هاروارد برای استفاده ستی در باند اپتیکی.

نداشت که ثابت کند آن‌ها از نوری سرچشمه می‌گرفتند که از سمت ستاره هدف به تلسکوپ وارد می‌شد.

پس از این، گروه هاروارد کاوش‌های هدف‌دار خود را با گروهی در پرینستون ترکیب کرد تا به مشاهدات همزمان در دو محل جداگانه بپردازند. تا نوامبر ۲۰۰۳، ۱۶۰۰۰ رصد با صرف ۲۴۰۰ ساعت انجام شده بود، اما هیچ پالسی به‌طور همزمان در دو نقطه شناسایی نشد (البته با ملاحظه تأخیر زمانی مناسب ناشی از فاصله دو محل).

در سال ۲۰۰۳، تلسکوپ هاروارد بازنشته شد، و از این‌رو کاوش هدف‌دار متوقف گردید. از آن زمان تاکنون، این گروه یک کاوش تمام‌آسمان را طراحی کرده، مأموریت آن را به یک تلسکوپ ۷۲ اینچی (۱/۸ متری) که به‌صورت سفارشی ساخته شده است سپرده‌اند. این تلسکوپ در آوریل ۲۰۰۶ عملیاتی شد و در شکل ۱۳-۴ نشان داده شده است. تلسکوپ به یک آرایه از ۱۰۲۴ آشکارساز نور مجهز است. این آرایه، ناحیه‌ای از آسمان را به عرض ۰/۲ درجه و ارتفاع ۱/۶ درجه رصد می‌کند. این تلسکوپ، یک تلسکوپ نصف‌النهاری<sup>۲۲</sup> است که یک میل معین بر کره سماوی را هنگامی که از نصف‌النهار عبور می‌کند، رصد می‌نماید. بدین ترتیب در مدت یک شبانه‌روز، یک باریکه ۳۶۰ درجه‌ای از آسمان به ضخامت ۱/۶ درجه، رصد خواهد شد. شب بعد، ارتفاع تلسکوپ

طوری تنظیم خواهد شد که نوار کناری را رصد کند. پس از حدود ۲۰۰ شب صاف، تمام آسمانی که در پریستون دیده می‌شود مورد رصد قرار گرفته است و کاوش تکرار می‌گردد.

## ۱۳-۷ آیا می‌توانیم به شاهدهی دال بر تمدن‌های دیگر در نزدیکی خود

### دست یابیم؟

با توجه به اینکه امواج رادیویی و نور با سریع‌ترین سرعت ممکن در فضا حرکت می‌کنند، معمولاً دیگر روش‌های ممکن برای ارتباط نادیده گرفته شده است. اما اگر سرعت مهم نباشد، ارسال فضایی در پهنهٔ کهکشان به عنوان یک محیط ارتباطات یک طرفه، می‌تواند شیوه‌ای معقول برای برقراری ارتباط به حساب آید. در حقیقت چهار فضایی پایونی ۱۰ و ۱۱ و وِیجر ۱ و ۲، که حالا خارج از منظومه شمسی به درون فضا سرازیر شده‌اند، پیام‌هایی را از تمدن ما با خود دارند. هرکس که به آن‌ها دست یابد، کمی دربارهٔ ما، منظومهٔ شمسی که در آن ساکنیم، و حتی (به صورتی هوشمندانه) زمانی که فضاییما زمین را ترک کرد، فرا خواهد گرفت.

شبهه به فیلم «اودیسه فضایی»، این امکان وجود دارد که یک سفینهٔ بیگانه بر ماه نشسته است (جایی که از عواقب فرسایش، که ما در زمین از آن رنج می‌بریم، در امان باشد) و انتظار ما را بکشد تا او را کشف کنیم. یا شاید یک فضاییما بیگانه در اطراف خورشید کشف شود. هرچند خیالی است، اما غیرممکن نیست که روزی شاهدهی را دال بر یک تمدن فرمانظومه‌ای در گذشته بیابیم، بدون آنکه آن‌ها از طرف خود قصدی می‌داشتند. امروزه ما مقادیر زیادی زبالهٔ فضایی تولید می‌کنیم. ذراتی به اندازهٔ حدود یک میکرومتر، شاید ناشی از آلیاژهای نامتعارف، به وسیلهٔ فشار تابشی از منظومه شمسی به خارج پرت می‌شوند، و در آیندهٔ بسیار دور بر سطح یک قمر فاقد هوا فرود خواهند آمد. زمانی که خورشید به پایان عمر خود می‌رسد، بادهای شدید خورشیدی مقادیر بیشتری از ذرات را به محیط بین‌ستاره‌ای خواهد فرستاد. آیا ممکن است ما چنین موادی را از یک تمدن دیگر، درون غباری که سنگ پوشهٔ ماه<sup>۳۳</sup> را می‌سازد، پیدا کنیم؟

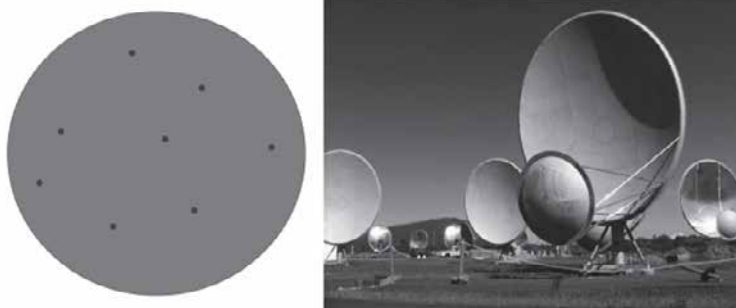
برای اینکه اصلاً چنین اموری ممکن باشد، باید در گذشتهٔ دور، تمدن‌های زیادی به قابلیت‌های بالای فناوری دست یافته باشند. اگر یک چنین تمدنی در هر ۱۰۰٫۰۰۰ سال پدیدار می‌گشت، از زمانی که عناصر سنگین‌تر به اندازه‌ای در محیط بین‌ستاره‌ای رسید که گیاهان شکل

گرفتند و حیات هوشمند پدید آمد - شاید در مدت ۴ میلیارد سال - احتمالاً ۴۰,۰۰۰ تمدن پیشرفته آمده و رفته است. آیا ممکن است یکی از آن‌ها شاهدهی را دال بر وجود خود باقی گذاشته باشد؟

### ۱۳-۸ آینده ستی در باند رادیویی

ستاره‌شناسان ستی مدت‌هاست که در رؤیای داشتن یک تلسکوپ بزرگ مخصوص به خودشان به سر می‌برند. بخشی از این رؤیا با ساخت قسمتی از آرایه تلسکوپی آلن در هت کریک کالیفرنیا<sup>۲۴</sup> برآورده شده است. این آرایه، به عنوان یک پروژه مشترک بین مؤسسه ستی و آزمایشگاه نجوم رادیویی در دانشگاه کالیفرنیا، برکلی، بنا داشت به جستجوی هوش فرازمینی بپردازد، و همزمان، کاوش نجومی نیز انجام دهد. (همکاری برکلی در آوریل ۲۰۱۲ پایان یافت، و از آن تاریخ، مدیریت این پروژه بر عهده یک مؤسسه پژوهشی مستقل غیرانتفاعی موسوم به SRI International است.) همان‌طور که احتمالاً تصور کرده‌اید، این یک تلسکوپ متعارف نیست، بلکه با استفاده از پیشرفت‌های شگرف در فناوری رایانه، به یک تجهیزات با انعطاف‌پذیری بالا تبدیل شده است، تا آنجا که جیل تارتر<sup>۲۵</sup> از مؤسسه ستی اظهار داشته است: «فولاد جای خود را به سیلیسیوم می‌دهد»<sup>۲۶</sup>.

هزینه ساخت یک آنتن بزرگ با یک بشقاب به شدت با افزایش قطر بالا می‌رود (هزینه متناسب است با توان سوم قطر بشقاب). بر اساس اصول، می‌توان با آرایه‌ای از آنتن‌های کوچک‌تر به همان مساحت مورد نظر دست یافت، با این تفاوت که در اینجا، هزینه ساخت متناسب است با مجذور قطر. اما از طرف دیگر، کار سخت ترکیب سیگنال‌ها از تک‌تک آنتن‌ها را باید در نظر گرفت. با کاهش هزینه تجهیزات الکترونیکی - دریافت‌کننده‌ها روی آنتن‌ها، ارتباط آن‌ها با سامانه پردازشگر مرکزی به وسیله فیبر نوری، و تجهیزات ترکیب داده - این آرایه آنتن‌ها (تعداد زیاد با قطر کم) هم عملی‌تر است و هم به صرفه‌تر. البته علاوه بر آنچه گفته شد، یک دلیل بسیار بنیادی‌تر وجود دارد که چرا این رویکرد به صورت ویژه برای مقاصد ستی مناسب‌تر است. آنتنی با یک بشقاب بزرگ، تنها به سیگنال‌هایی حساس است که از ناحیه بسیار کوچک آسمان دریافت می‌کند<sup>۲۷</sup>. این مقدار برای یک آنتن ۱۲۰ متری که در ناحیه «چاله آب» رصد می‌کند از مرتبه ۷ تا ۸ دقیقه قوسی خواهد بود. (استفاده از سامانه دریافت‌کننده با چند بیم، می‌تواند این مقدار را با یک



شکل ۱۳-۵: (چپ) بیم‌های چندگانه که آرایهٔ تلسکوپی آلن (ATA) آن‌ها را ایجاد کرده است. (راست) آنتن‌های آرایهٔ تلسکوپی آلن.

ضریب کوچک افزایش دهد.) حال فرض کنید که همین مساحت مؤثر از ترکیب سیگنال‌های ۳۵۰ آنتن  $۷ \times ۶$  متری به دست آید (مانند ATA). این آنتن‌های کوچک پهناهای بانندی دارند که حدود  $\frac{1}{4}$  بار بزرگ‌تر است (پهنای باند مستقیماً با قطر تغییر می‌کند)، یعنی بیش از ۲ درجه! در قلب آرایه، سیگنال‌های تمام آنتن‌ها باهم ترکیب شده، یک بیم با اندازه‌ای قابل مقایسه با یک آنتن تک ۱۲۰ متری، و درعین حال باهمان حساسیت، می‌سازند. پس هیچ چیزی گم نمی‌شود، اما چیزهای بسیاری به دست می‌آید. اگر به وسیلهٔ تجهیزات الکترونیکی اضافی، سیگنال آنتن‌ها به صورت اندکی متفاوت باهم ترکیب شوند، می‌توان یک بیم باریک دیگر را در جایی درون بیم اصلی که از آنتن‌های کوچک به دست می‌آید، ایجاد نمود (شکل ۱۳-۵). اما اگر بتوان یک بیم دوم را ایجاد کرد، با اضافه نمودن الکترونیک بیشتر می‌توان به بیم سوم، چهارم و ... دست یافت. لذا ATA چندین بیم خواهد داشت و از این رو می‌تواند ستاره‌های زیادی را به صورت همزمان، مادامی که گروه برکلی در حال مشاهدهٔ تپنده‌ها و دیگر اجسام نجومی در همان ناحیه از آسمان هستند، رصد کند.

نخستین فاز، شامل ۴۲ آنتن، در پاییز ۲۰۰۷ مشغول به کار شد، و رصدهای سستی خود را با کاوش مرکز کهکشان آغاز کرد. با وجود این، در آوریل ۲۰۱۱ و به دلیل کمبود بودجه، ATA در حالت خواب قرار داده شد. سپس، با یافتن سرمایه‌ای کوتاه‌مدت، بار دیگر عملیات ATA در دسامبر همان سال آغاز گردید.



از جنبه‌های بسیار، ATA نشان می‌دهد که تجهیزات رادیویی ستی در نهایت از لحاظ فناوری به چه صورت خواهد بود - دست کم برای چندین دهه. هم‌اکنون یک طرح بزرگ ۳۸ میلیون یورویی در دست مطالعه است تا فناوری را برای آنچه که «آرایه کیلومتر مربعی»<sup>۲۸</sup> نام دارد به حد کمال برساند. همان طور که از اسم آن برمی‌آید، هدف دستیابی به یک سطح جمع‌آوری کننده یک کیلومتر مربعی است - یک میلیون مترمربع، و معادل حدود ۹۰ بشقاب تک ۱۲۰ متری. در این صورت، این آرایه تقریباً دو مرتبه قدر از ATA حساس‌تر خواهد بود. همانند ATA، این طرح نیز از رویکرد «قطر کم/تعداد زیاد» استفاده می‌کند، هرچند آنتن‌ها احتمالاً تا حدی بزرگ‌تر خواهند بود، شاید به ارتفاع ۱۶ متر. یک هسته مرکزی از آنتن‌ها وجود خواهد داشت، با ایستگاه‌هایی که در تعدادی از بازوهای مارپیچ قرار دارد. قطر نهایی آرایه بیش از ۳۰۰۰ کیلومتر خواهد بود، لذا باید آن را در یک منطقه بزرگ و کم جمعیت بنا نهاد. دماغه شمالی در آفریقای جنوبی<sup>۲۹</sup> به عنوان محل آرایه مرکزی برگزیده شده است.

SKA با مشارکت ۱۷ کشور ساخته می‌شود و برای ساخت فاز نخست آن، شامل حدود ۱۰٪ تمام آرایه، به سرمایه‌ای حدود ۶۵۰ میلیون یورو نیاز دارد؛ از این رو حقیقتاً یک پروژه عظیم است. بر اساس برنامه، ساخت فاز اول در سال ۲۰۱۷ آغاز خواهد شد و نخستین رصدها تا سال ۲۰۲۰ شروع می‌گردد. قرارگاه این پروژه در رصدخانه جدرل بانک در انگلستان است. این پروژه نیز مانند ATA از این توانایی برخوردار است که چندین بیم را بسازد، لذا، برای مثال، درحالی که یک جستجو به دنبال تپنده‌ها در حال اجرا است، از این بیم‌ها نیز می‌توان برای جستجوی هر سیگنال بیگانه استفاده کرد.

آیا باید از اینکه تاکنون هیچ سیگنالی کشف نشده است دلسرد شد؟ واقعاً نه، چرا که همان طور که پتر بکس<sup>۳۰</sup> از مؤسسه ستی اظهار داشته است، از حدود ۱۰۰ جستجوی انجام شده از سال ۱۹۶۰، تنها پروژه‌های سرنديپ و فونیکس (به دلیل استفاده از تلسکوپ بزرگ آرسیبو) حساسیت لازم را برای تشخیص سیگنال‌های دورتر از همسایگی ما در فضا داشته‌اند. استفاده از SKA جستجو را به نقاط دورتر امتداد می‌دهد، و همچنین اگر، آن چنان که امروزه بسیاری از ستاره‌شناسان باور دارند، حیات هوشمند به صورت بسیار پراکنده در کهکشان گسترده شده باشد، یک شانس واقعی را برای شناسایی آن‌ها خواهد داشت.

هیچ راهی بهتر از نقل قول از کوکونی و موریسون در مقاله ۱۹۵۹ برای پایان دادن به این فصل نیست: «برآورد احتمال موفقیت [در جستجوی ما به دنبال حیات فرامنظومه‌ای] مشکل است؛ اما اگر هرگز جستجو نکنیم، شانس موفقیت صفر خواهد بود.»

## پانوشتها

- 1 - Search for Extra-Terrestrial Intelligence (SETI)
- 2 - 76-metre Mark I radio telescope at Jodrell Bank
- 3 - Giuseppe Cocconi and Philip Morrison
- 4 - Tau Ceti and Epsilon Eridani
- 5 - water hole
- 6 - Frank Drake
- 7 - Project Ozma
- 8 - U2 spy-plane
- 9 - Big Ear
- 10 - Paul Horowitz
- 11 - 25-metre Harvard-Smithsonian telescope at Oak Ridge
- 12 - projects META and BETA
- 13 - 305-metre Arecibo Telescope in Puerto Rico
- 14 - Project SERENDIP
- 15 - Project Phoenix
- 16 - Drake equation
- 17 - Charles Townes
- 18 - Dan Werthimer and Geoff Marcy
- 19 - Paul Horowitz
- 20 - Berkeley pulsed laser search
- 21 - ultra narrow band signals
- 22 - transit telescope
- 23 - Lunar Regolith
- 24 - Allen Telescope Array (ATA) at Hat Creek in California
- 25 - Jill Tarter

۲۶- اشاره به استفاده فراوان از تجهیزات الکترونیکی و قطعات نیمه‌رسانا که عمدتاً از سیلیسیوم

ساخته می‌شوند. (مترجم)

۲۷- این ویژگی را در آنتن‌های رادیویی با عبارت «پهنای باریکه» (beamwidth) بیان می‌کنند.

- 28 - Square Kilometre Array (SKA)
- 29 - Northern Cape in South Africa
- 30 - Peter Backus

## فصل ۱۴

### جهان جزیره‌ای ما

#### ۱-۱۴ راه‌شیری

در یک شب تاریک و آسمانی شفاف، می‌توانیم نواری روشن را در عرض آسمان ببینیم که به آن راه‌شیری<sup>۱</sup> می‌گویند. نور این نوار از هزاران هزار ستاره سرچشمه می‌گیرد. ستارگان آن چنان به صورت فشرده در کنار هم قرار گرفته‌اند که چشم انسان قادر نیست آن‌ها را به صورت نقاط نورانی از هم تفکیک نماید. این نمایی از کهکشان ما، یعنی کهکشان راه‌شیری است که به دلیل وجود ابرهای غبار، ساختاری تماشایی از خود به نمایش می‌گذارد. نوار نور یکنواخت نیست؛ بیشترین حد روشنایی و کشیدگی آن در جهت صورت فلکی قوس<sup>۲</sup> است، به این معنی که در آن سمت به قلب کهکشان نگاه می‌کنیم. با وجود این، به دلیل غبار تنها یک‌دهم راه تا آنجا را می‌بینیم. در سمت مخالف آسمان، راه‌شیری کمتر نمایان است، نشانه‌ای بر این که ما در نزدیکی لبه کهکشان زندگی می‌کنیم؛ و بالاخره این حقیقت که ما نواری از نور را می‌بینیم به ما می‌گوید که ستارگان، غبار و گازی که کهکشان ما را می‌سازند به شکل یک قرصی تخت هستند (شکل ۱-۱۴).

یک تصویر مفصل از مرکز کهکشان در صورت‌های فلکی قوس و عقرب در شکل ۱-۲ نشان داده شده است.



شکل ۱-۱۴: سطح مقطع کهکشان ما.



شکل ۱۴-۲: نمایی از قلب کهکشان. رگه‌های غبار دید ما را به سمت مرکز محدود می‌کند.

حدود ۹۶٪ از مادهٔ مرئی کهکشان را ستارگان تشکیل می‌دهند و ۴٪ باقیمانده بین گاز (۳٪) و غبار (۱٪) تقسیم می‌شود. در اینجا منظور از «مرئی» آن است که آشکارسازی آن‌ها را می‌توان به وسیلهٔ تابش الکترومغناطیسی، در باندهای مرئی، فرورسرخ یا رادیویی انجام داد. همان‌گونه که در فصل ۲۱ به تفصیل خواهیم گفت، تصور می‌شود که مؤلفهٔ دیگری از کهکشان وجود داشته باشد که نمی‌توانیم آن را مستقیماً شناسایی کنیم و به آن ماده تاریک می‌گوییم.

## ۱۴-۲ خوشه‌های باز ستاره‌ای

در میان زمینهٔ کلی ستارگان، گروه‌هایی نزدیک به هم از ستاره‌ها را می‌بینیم که خوشه نام دارند. این خوشه‌ها به دو دسته تقسیم می‌شوند: خوشه باز<sup>۳</sup> و خوشه کروی<sup>۴</sup>. خوشه‌های باز نتیجهٔ تشکیل گروهی از ستارگان در یک ابر غول‌پیکر گاز و غبار هستند و از این رو طبیعی است که در امتداد صفحهٔ راه‌شیری، یعنی قرص کهکشان، یافت شوند. به مرور زمان ستاره‌ها از هم دور می‌شوند؛ اما تا زمانی که جوان هستند، آن‌ها را نسبتاً در کنار هم و به صورت فشرده می‌بینیم.



شکل ۱۴-۳: خوشهٔ پروین (راست) و خوشهٔ دوتایی برساوش (چپ).

مهم‌ترین نمونه‌های قابل مشاهده در نیم کره شمالی، خوشه قلائص<sup>۵</sup> و خوشه پروین<sup>۶</sup> در صورت فلکی ثور<sup>۷</sup>، و خوشه دوتایی در برساوش<sup>۸</sup> است. شکل ۱۴-۳ خوشه دوتایی در برساوش و خوشه پروین را نشان می‌دهد. ستارگان خوشهٔ پروین از میان ابری از غبار عبور می‌کنند که ذرات آن، نور آبی را پراکنده می‌نماید.

### ۱۴-۳ خوشه‌های کروی

این خوشه‌ها، در مقایسه با خوشه‌های باز، ستاره‌های بسیار کهن‌سالی هستند که در اجتماعاتی کروی و به هم فشرده (به قطر حدود ۲۰۰ سال نوری) و متشکل از ۲۰,۰۰۰ تا یک میلیون ستاره قرار گرفته‌اند (شکل ۱۴-۴). تماشایی‌ترین این خوشه‌ها در نیم کره شمالی به M۱۳ در صورت فلکی جاثی<sup>۹</sup> مربوط می‌شود، در حالی که ۴۷ توکانا<sup>۱۰</sup> گوهری در نیم کره جنوبی است. (یک جسم تماشایی‌تر در نیم کرهٔ جنوبی اُمگا قنطورس است که عموماً آن را یک خوشه کروی می‌دانستند، اما امروزه تصور می‌شود که هستهٔ یک کهکشان کوچک باشد که ستاره‌های بیرونی آن به وسیلهٔ نیروهای گرانشی کهکشان ما از آن جدا شده‌اند.) سن آن‌ها به آغاز کهکشان راه شیری برمی‌گردد و در دورهٔ ابتدایی شکل‌گیری ستارگان در کهکشان به وجود آمده‌اند؛ البته منشأ دقیق و نقش آن‌ها در تحول کهکشان هنوز روشن نیست. خوشه‌های کروی به دور مرکز کهکشان در گردش‌اند و نسبتاً به شکل کروی توزیع شده‌اند، از این رو به تشکیل چیزی که هاله کهکشانی<sup>۱۱</sup> نام دارد کمک می‌کنند. ما حدود ۱۵۰ خوشه کروی را در ارتباط با کهکشانمان می‌شناسیم و احتمالاً ۲۰ خوشه دیگر نیز وجود داشته باشد که توسط غبار از دید ما مخفی مانده است. شکل کروی آن‌ها به این



خوشهٔ کروی M۵ در صورت فلکی حیه (Serpens).

دلیل است که گرانش، آن‌ها را محکم به هم مقید نموده و به همین سبب ستاره‌ها در نزدیک مرکز بسیار فشرده هستند.

#### ۱۴-۴ محیط بین‌ستاره‌ای، و سحابی‌های نشری و تاریک

گاز و غبار به همراه یکدیگر محیط بین‌ستاره‌ای<sup>۱۲</sup> را تشکیل می‌دهند. تمام گاز، به جز ۲٪، از هیدروژن و هلیومی تشکیل می‌شود که عمدتاً هنگام مه‌بانگ<sup>۱۳</sup> در آغاز جهان تولید شدند. در ابتدا، حدود ۷۵٪ هیدروژن و ۲۵٪ هلیوم وجود داشت، اما با تولید هلیوم و دیگر عناصر در ستارگان و انتشار آن‌ها در فضا، درصد هیدروژن به حدود ۷۰٪ کاهش، و درصد هلیوم به ۲۸٪ ارتقا یافت. گاز باقیمانده را عناصر دیگر تشکیل می‌دهند. این عناصر، از قبیل کربن، اکسیژن و نیتروژن، در ستارگان تولید شده‌اند و گازهایی چون منواکسید کربن (CO) و سیانوژن (CN) را می‌سازند. ذرات غبار از توده‌های ریز موادی به وجود آمده‌اند که شامل کربن، سیلیسیوم و آهن می‌شود و قطر آن‌ها بین  $10^{-7}$  تا  $10^{-6}$  متر است<sup>۱۴</sup>.

بیشتر محیط بین‌ستاره‌ای به چشم ما آشکار نیست، اما در برخی مناطق می‌توانیم سحابی نشری<sup>۱۵</sup> را ببینیم (جایی که گاز در حال درخشش است) و یا اینکه سحابی تاریک<sup>۱۶</sup> را ملاحظه نماییم (محلی که ابری از غبار در مقابل ناحیه‌ای روشن از آسمان، به صورت نیم‌رخ تاریک ظاهر



شکل ۱۴-۵: سحابی جبار.

می‌شود). شاید تماشایی‌ترین نمونه از یک سحابی نشری، سحابی بزرگ در صورت فلکی جبار باشد که برای سادگی سحابی جبار<sup>۱۷</sup> نامیده می‌شود - ناحیه‌ای که ستارگان در حال شکل‌گیری هستند و گاز هیدروژن توسط نور فرابنفش تابیده شده از ستاره‌های بسیار داغ و جوان (به شکل ذوزنقه در قلب آن) برانگیخته می‌شود (شکل ۱۴-۵). این نوع سحابی نشری را یک منطقه H II (بخوانید: اچ دو) می‌نامند، چراکه حاوی هیدروژن یونیده شده‌ای است که در آن، الکترون به وسیله فوتون فرابنفش تابیده شده از ستارگان بسیار داغ، از پروتون جدا شده است. پروتون‌ها و الکترون‌ها دوباره باهم ترکیب شده، اتم‌های هیدروژن خنثی (H I، اچ یک) تولید می‌کنند. الکترون‌ها با گذار از ترازهای مجاز انرژی، به پایین‌ترین تراز انرژی سقوط می‌نمایند و در این فرایند فوتون‌هایی با طول موج‌های مختلف تابش می‌کنند. یکی از این گذارها به خط نشری قرمز روشن با طول موج ۶۵۶۳ آنگستروم می‌انجامد؛ از این رو در تصاویر گرفته شده، این نواحی به یک رنگ زیبای صورتی - قرمز دیده می‌شوند.



شکل ۱۴-۶: سحابی سراسب (راست)، و سحابی عقاب (چپ).

به عنوان نمونه‌ای از سحابی تاریک می‌توان از سحابی «کیسه زغال»<sup>۱۸</sup> نام برد که در مقابل زمینه راه شیری، نزدیک به صورت فلکی صلیب جنوبی<sup>۱۹</sup> دیده می‌شود. اغلب می‌توان هر دو نوع سحابی را باهم دید، مانند آنچه در سحابی عقاب در صورت فلکی حیّه<sup>۲۰</sup> (مار) و سحابی سر اسب<sup>۲۱</sup> در صورت فلکی جبار قابل رؤیت است (شکل ۱۴-۶). در این دو مورد، به ترتیب ستون‌های تاریک غبار و «سراسب» در مقابل تابش روشن ابرهای گازی برانگیخته دیده می‌شود.

#### ۱۴-۵ اندازه، شکل و ساختمان راه شیری

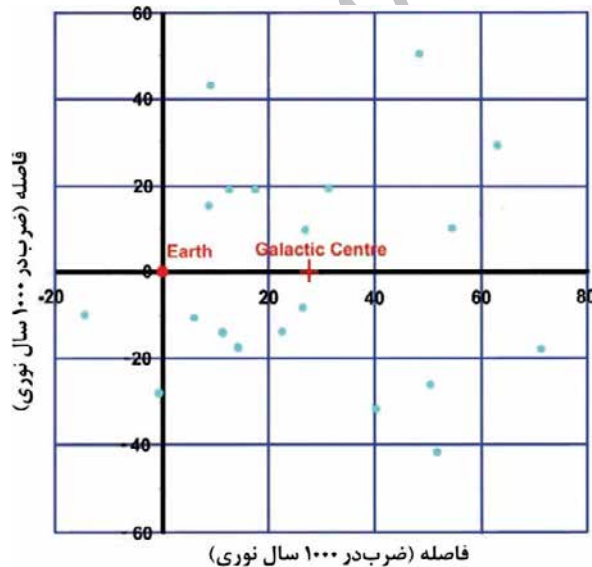
در فصل ۱۰ شیوه اختلاف منظر، که ما را قادر می‌سازد فاصله تا ستاره‌های مجاور را اندازه بگیریم، توضیح داده شد. با این شیوه توانسته‌ایم فاصله تا تعدادی از ستاره‌های آر آر شلیاق<sup>۲۲</sup> را به دست آوریم. این ستارگان متغیر با یک دوره تناوب که تابعی از درخشندگی آن‌ها است تپش می‌کنند. بدین ترتیب می‌توان آن‌ها را به عنوان «شمع استاندارد»<sup>۲۳</sup> برای اندازه‌گیری فواصل نجومی به کار برد. اگر با استفاده از اختلاف منظر، فاصله تا یک ستاره آر آر شلیاق نزدیک مشخص شود، و یکی با دوره تناوب مشابه در فاصله دور رصد گردد، می‌توان قانون عکس مجذور را برای تعیین فاصله آن مورد استفاده قرار داد. از آنجاکه ستاره‌های آر آر شلیاق نوعاً ۵۰ بار درخشان‌تر از خورشید هستند، می‌توان از آن‌ها در تعیین فاصله تا برخی از خوشه‌های کروی نزدیک‌تر استفاده کرد. به روشی



مشابه، می‌توان از ستاره‌های متغیر قیفاووسی<sup>۲۴</sup> استفاده کرد (تا ۱۰,۰۰۰ بار درخشان‌تر از خورشید؛ در فصل ۱۹ به تفصیل آن‌ها را شرح خواهیم داد) و اندازه‌گیری‌های فاصله را به سرتاسر کهکشان تعمیم داد.

در یک سری مشاهدات نوآورانه تا سال ۱۹۱۹، هارلو شِپلی توانست با استفاده از رصد ستارگان آر آر شلیاق و ستاره‌های متغیر قیفاووسی، فاصله تا ۱۰۰ خوشه کروی مربوط به کهکشان راه‌شیری را به دست آورد و دریافت که توزیعی کروی دارند. منطقی بود که مرکز این توزیع باید مرکز کهکشان باشد. شاپلی فاصله خورشید تا مرکز کهکشان را حدود ۳۰,۰۰۰ سال نوری برآورد نمود و قطر کهکشان را ۱۰۰,۰۰۰ سال نوری به دست آورد. شکل ۱۴-۷ یک سطح مقطع از کهکشان را به همراه محل سحابی‌های کروی مشاهده‌شده توسط شِپلی نشان می‌دهد.

ما هم‌اکنون می‌دانیم که خورشید در فاصله ۲۷/۷ هزار سال نوری از مرکز کهکشان قرار دارد؛ و با استفاده از اندازه‌گیری‌های طیف‌نمودی به منظور مشاهده حرکت آن نسبت به سحابی‌های کروی، می‌توان به این نتیجه رسید که خورشید با سرعت حدود ۲۳۰ km/s در حال گردش به دور مرکز کهکشان است و تقریباً هر ۲۳۰ میلیون سال یک بار دور آن گردش می‌کند. به نظر می‌رسد که



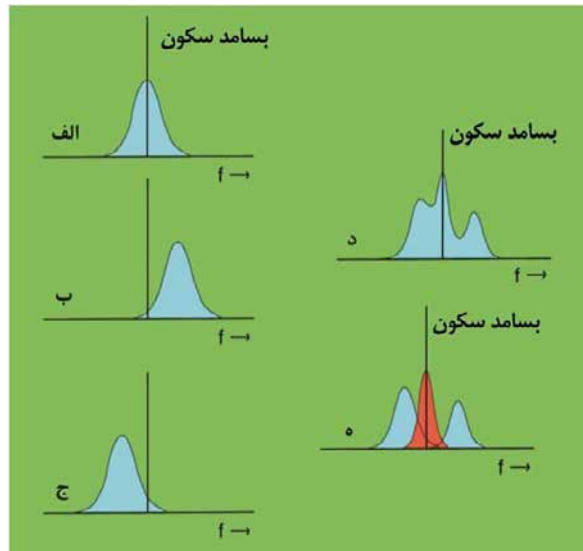
شکل ۱۴-۷: توزیع خوشه‌های کروی، بر اساس مشاهدات هارلو شِپلی.

قسمت‌های مرکزی کهکشان مانند یک جسم صلب می‌چرخد، به طوری که با دور شدن از مرکز، سرعت چرخش بیشتر می‌شود. با اندازه‌گیری سرعت چرخش ستارگان و گاز به دور مرکز کهکشان، برحسب فاصله آن‌ها از مرکز، «منحنی چرخش کهکشانی»<sup>۲۵</sup> تولید می‌شود. شکل این منحنی آن‌طور که تصور می‌کنیم نیست؛ موضوعی که در فصل ۲۱ که به ماده تاریک مربوط است، به تفصیل به آن خواهیم پرداخت.

اما ساختمان کهکشان چگونه است؟ هیدروژن خنثی (HI) یک خط طیفی رادیویی با طول موج ۲۱ cm تابش می‌کند. رصدهای رادیویی این خط در امتداد صفحه راه‌شیری نشان می‌دهد که تراکم گاز در این قرص یکنواخت نیست، بلکه در ابرهایی متمرکز شده‌اند که سرعت دور یا نزدیک شدن آن‌ها را می‌توان با استفاده از جابه‌جایی دوپلری در طول موج مشاهده شده آن‌ها تعیین کرد. با استفاده از این اطلاعات می‌توان محل این ابرهای گازی را ترسیم نمود و با این کار، طرحی از بازوان مارپیچی ظاهر می‌شود. به عبارتی ما در یک کهکشان مارپیچی زندگی می‌کنیم که تصور می‌شود کاملاً شبیه به کهکشان مجاورمان، امرأة المسلسله<sup>۲۶</sup> (اندرومدا) باشد.

## ۱۴-۶ مشاهدات خط هیدروژن

اتم هیدروژن خنثی شامل یک پروتون و یک الکترون است. در کنار حرکت آن‌ها در مدار به دور یکدیگر، پروتون و الکترون مشخصه‌ای به نام اسپین<sup>۲۷</sup> (چرخش) دارند. هرچند که این عملاً یک مفهوم برگرفته از مکانیک کوانتومی است، اما به چرخش زمین و خورشید به دور محور خودشان شبیه است. با این تشابه، اسپین ممکن است ساعت‌گرد یا پادساعت‌گرد باشد. بدین ترتیب اسپین پروتون و الکترون، یا در یک راستا و یا در خلاف جهت یکدیگر است. در یک میدان مغناطیسی (که در کهکشان وجود دارد) انرژی حالتی که در آن دو اسپین هم‌راستا هستند، اندکی بیشتر از حالتی است که دو اسپین خلاف جهت یکدیگرند. بسیار به ندرت (با احتمال  $2/9 \times 10^{-15} \text{ s}^{-1}$ ) یک اتم مجزا از هیدروژن خنثی بین این دو حالت گذار انجام می‌دهد و یک خط طیف رادیویی در بسامد ۱۴۲۰/۴۰۵۷۵ MHz گسیل می‌دارد. طول موج این بسامد حدود ۲۱ cm است، لذا اغلب به خط ۲۱ cm شناخته می‌شود. یک اتم هیدروژن تک، این گذار را در مقیاس زمانی از مرتبه ۱۰ میلیون سال انجام می‌دهد، اما از آنجا که مقدار بسیار زیادی اتم هیدروژن در محیط بین‌ستاره‌ای وجود



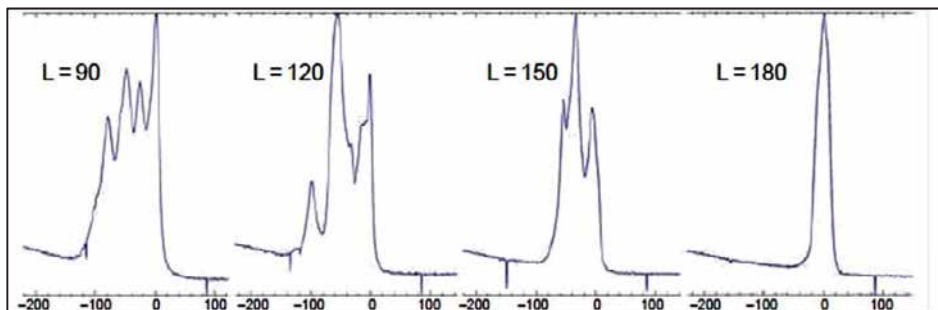
شکل ۱۴-۸: پروفایل‌های خط هیدروژن.

دارد، به راحتی می‌توان آن را با تلسکوپ‌های رادیویی مشاهده نمود. برای اولین بار در سال ۱۹۵۱، این خط طیفی رادیویی توسط پروفسور ادوارد پرسل<sup>۲۸</sup> و دانشجوی کارشناسی ارشد وی، هارولد یوئین<sup>۲۹</sup> در دانشگاه هاروارد و به کمک یک آنتن ساده بوقی شناسایی شد.

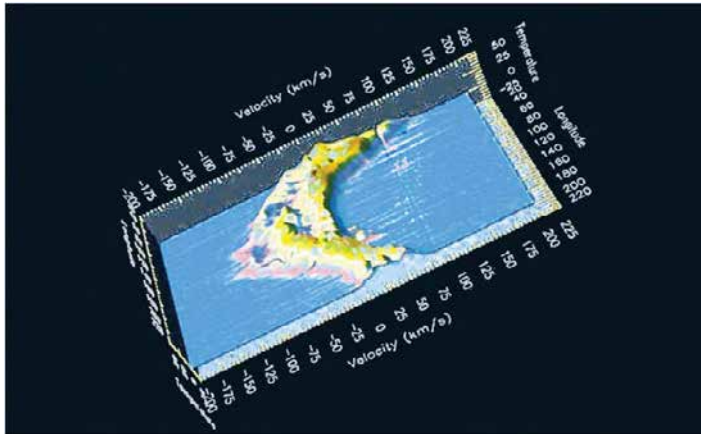
حال ببینیم اگر کهکشان ما چند بازوی مارپیچی داشت چه می‌دیدیم. علاوه بر محل اجتماع ستارگان و غبار، تمرکز گاز هیدروژن نیز در این بازوها بیشتر خواهد بود. از آنجاکه تمام مواد درون کهکشان در حال چرخش به دور مرکز آن است، اگر در جهات مختلف در امتداد صفحه کهکشان نگاه کنیم، مواد موجود در بازوها - در بعضی جهات ممکن است چند بازو وجود داشته باشد - با سرعت‌های گوناگونی نسبت به ما، در حال نزدیک یا دور شدن هستند. لذا خط هیدروژنی که از این بازوهای متفاوت سرچشمه می‌گیرد دچار جابه‌جایی دوپلری شده، به بسامدهای بالاتر یا پایین‌تر منتقل می‌شود. با توجه به حرکت گاز در قسمتی از بازو که ما رصد می‌کنیم، پروفایل خط تولیدی توسط هر بازو تقریباً به شکل گاوسی خواهد بود (شکل ۱۴-۸-الف). این پروفایل، گاز را در نزدیکی ما، در همان بازویی که قرار داریم، نشان می‌دهد و از این رو سرعت متوسط آن نسبت به ما صفر است. اگر تلسکوپ رادیویی، تابشی از هیدروژن در یک بازوی مارپیچی که در حال نزدیک

شدن به ما است دریافت کند، می‌بینیم که پروفایل گاوسی به سمت بسامدهای بالاتر جابه‌جا شده است (شکل ۱۴-۸-ب) درحالی‌که اگر بازو در حال دور شدن باشد، این جابه‌جایی به سمت بسامدهای پایین‌تر خواهد بود (شکل ۱۴-۸-ج). در کل، چنانچه در جهتی دلخواه نگاه کنیم، احتمالاً چند بازو را مشاهده خواهیم نمود، لذا پروفایل حاصل پیچیده‌تر خواهد شد، چیزی که در شکل ۱۴-۸-د نشان داده شده است. این پروفایل پیچیده را می‌توان به پروفایل‌های مجزا مربوط به هر بازو تفکیک کرد (شکل ۱۴-۸-ه).

**شکل ۱۴-۹** چند پروفایل خط هیدروژن را که با یک تلسکوپ رادیویی  $6/4$  متری در رصدخانه جُدرل بانک رصد شده است نشان می‌دهد. عرض کهکشانی<sup>۳۰</sup> مربوط به هر کدام مشخص شده است. عرض صفر به این معنی است که تلسکوپ مستقیماً به مرکز کهکشان نشانه رفته است و عرض  $180^\circ$  یعنی آنکه تلسکوپ در جهت مخالف، به سمت خارج از کهکشان نشانه‌گیری شده است. می‌بینید که در حالت اخیر تنها یک قله در طیف وجود دارد که مرکز آن نسبت به ما در سرعت صفر قرار دارد. عمده این گسیل از هیدروژن در بازوی ماریچی محلی است، که البته نسبت به ما ساکن می‌باشد. مقداری نیز ناشی از بازوهای بیرونی است؛ اما از آنجاکه این بازوها نسبت به خط دید به صورت عمودی حرکت می‌کنند، هیچ جابه‌جایی دوپلری از خود بروز نمی‌دهند. با توجه به اینکه ما درون بازوی ماریچی خود قرار داریم، همواره یک قله در سرعت نسبی صفر وجود خواهد داشت، اما چنانچه در جهات دیگر به درون راه‌شیری بنگریم، قله‌های دیگری متناظر با دیگر بازوها در طیف مشاهده می‌نماییم. به طور مثال در عرض  $90^\circ$  ( $L=90$ ) سه بازوی ماریچی دیگر را می‌بینیم.



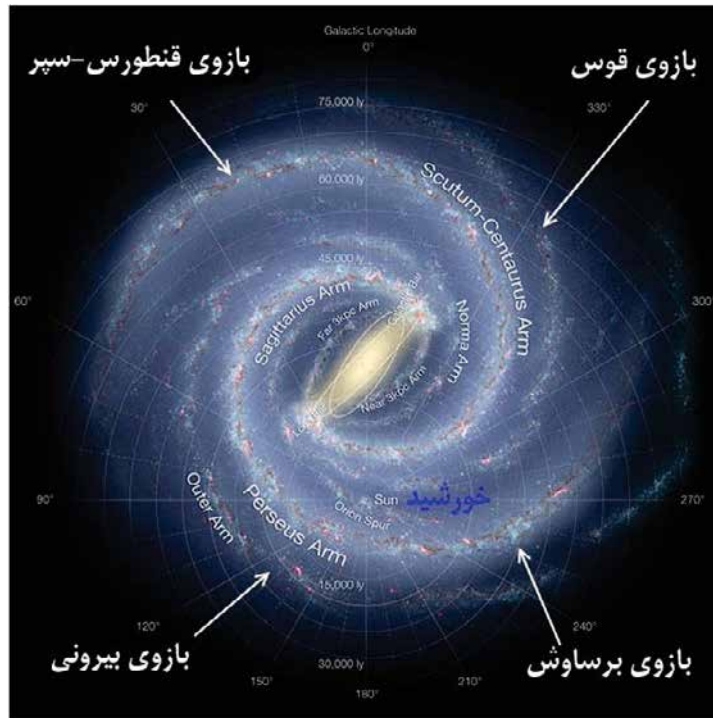
شکل ۱۴-۹: پروفایل‌های خط هیدروژن کهکشانی.



شکل ۱۴-۱۰: نقشهٔ توپوگرافی قسمتی از راه‌شیری که با تلسکوپ رادیویی ۶/۴ متری در رصدخانهٔ جُدرل بانک به دست آمده است.

به وسیلهٔ رصد این گونه پروفایل‌های خط هیدروژن در امتداد صفحهٔ کهکشان، و با استفاده از مدلی برای منحنی چرخش کهکشان، می‌توان محل هر بازویی را که در امتداد خط دید از میان کهکشان مشاهده می‌شود، به دست آورد و بدین ترتیب تصویری از ساختمان ماریپیچی کهکشان خود رسم نمود. شکل ۱۴-۱۰ قسمتی از صفحهٔ راه‌شیری را نشان می‌دهد. برجستگی عمودی مربوط به روشنایی هیدروژن است. بازوی محلی مانند یک رشته کوه در سمت راست نقشه پدیدار می‌شود، درحالی‌که بازوی برساوش به سمت چپ کج شده است. بازوی خارجی و دورتر کهکشان را که به صورت کوه پایه ظاهر شده، می‌توان در قسمت‌های دورتر و سمت چپ نقشه دید.

این حقیقت که کهکشان ما ساختمانی ماریپیچی دارد تا حدی به معما شبیه است. خورشید در طول حیات خود حدود ۲۰ بار مرکز کهکشان را دور زده است، پس چرا بازوهای ماریپیچی در هم نیچیده‌اند؟ پاسخ از یک سرنخ مشاهداتی به دست می‌آید. برجستگی بازوهای ماریپیچی در دیگر کهکشان‌ها به دلیل تعداد زیاد ستارگان روشن و آبی در آن‌ها است - به یاد بیاورید که یک ستاره بسیار داغ به تنهایی تا ۵۰,۰۰۰ برابر خورشید می‌درخشد! اما می‌دانیم که ستاره‌های خیلی داغ باید جوان باشند چراکه عمر بسیار کوتاهی دارند، بنابراین ساختمان ماریپیچی که هم‌اکنون می‌بینیم آن چیزی نیست که در گذشته قابل مشاهده بوده است. همان‌گونه که برتیل لیندبلاد<sup>۳۱</sup> نخستین



شکل ۱۴-۱۱: تصویری هنری از ساختار کهکشان راه شیری برگرفته از تصاویر فرسرخ که تلسکوپ فضایی اسپیتزر گرفته است.

بار اظهار نمود، به نظر می‌رسد که بازوهای ماریچی گذرا هستند و توسط یک موج چگالی ماریچی که به دور مرکز کهکشان می‌چرخد به وجود آمده‌اند؛ موجی که با عبور از میان غبار و گاز، اطراف کهکشان را جاروب می‌کند. این موج با عبور خود، گاز را متراکم نموده، رمبش آن را تحریک می‌نماید. بدین ترتیب ستارگان پرجرم و آبی در محل بازوها شکل می‌گیرند. ستارگان آبی جوان، محلی را که موج اخیراً عبور کرده است نشان می‌دهند؛ اما در پی آن هزاران هزار ستاره مسن‌تر (با روشنایی کمتر) که قرصی یکنواخت‌تر را تشکیل می‌دهند، باقی می‌ماند.

#### ۱۴-۷ یک نقشه فرسرخ از کهکشان راه شیری

تصاویر فرسرخ مربوط به تلسکوپ فضایی اسپیتزر ناسا<sup>۳۳</sup>، به همراه اثر هنری که در شکل ۱۴-۱۱ نشان داده شده است، اشاره به این دارد که ساختار ماریچ و باشکوه راه شیری را تنها دو بازو که از

دو انتهای یک میله مرکزی از ستارگان بیرون زده‌اند، ایجاد کرده است. دو بازوی عمده کهکشانی به دو انتهای یک میله مرکزی ضخیم متصل هستند - از این رو امروزه بر این باوریم که کهکشان ما یک مارپیچ میله‌ای است. در تصویر، بازوی برساوش از بالا سمت راست میله بیرون آمده است و به دور آن به سمت پایین کشیده شده است؛ و بازوی قنطورس - سپر<sup>۳۳</sup> از پایین سمت چپ خارج شده، به سمت بالا چرخیده است. این دو بازو، متراکم‌ترین اجتماع از ستارگان پیر و جوان را در برمی‌گیرند، در حالی که دو بازوی کوچک‌تر که کمتر متمایز هستند (بازوهای بیرونی و قوس) و بین دو بازوی بزرگ قرار دارند، عمدتاً از گاز و کانون‌های فعال تشکیل ستاره پر شده‌اند. خورشید ما نزدیک یک بازوی کوچک و جزئی موسوم به بازوی جبار، یا مهمیز جبار<sup>۳۴</sup>، بین بازوهای قوس و برساوش، قرار دارد.

#### ۱۴-۸ سیاه‌چاله‌ای فوق‌سنگین در قلب کهکشان ما

با وجود این که مرکز کهکشان در طول موج‌های مرئی به وسیله غبار پنهان شده است، در طول موج‌های رادیویی می‌توانیم تا قلب کهکشان نفوذ کنیم. ستاره‌شناسان توانسته‌اند منبع رادیویی متراکمی را به نام قوس<sup>۳۵</sup> در صورت فلکی قوس کشف نمایند که اعتقاد داریم مشخص‌کننده محل یک سیاه‌چاله فوق‌سنگین در قلب کهکشان است. چگونه از وجود این سیاه‌چاله مطمئن شویم؟ همان‌گونه که توانستیم جرم خورشید را از سرعت مداری زمین و فاصله‌اش تا خورشید به دست آوریم، می‌توانیم با اندازه‌گیری سرعت ستاره‌های در حال گردش به دور قوس<sup>۳۶</sup> در صورت فلکی قوس کشف کنیم. ستاره‌ای را در فرورسرخ و در فاصله تنها ۱۷ ساعت نوری از مرکز کهکشان (سه برابر فاصله پلوتو تا خورشید) رصد کرده است. این رصد همه را قانع کرد که این ستاره تحت نفوذ جسمی با میدان جاذبه بسیار بزرگ قرار دارد؛ درعین حال باید آن جسم فوق‌العاده متراکم باشد - یک سیاه‌چاله فوق‌سنگین. هم‌اکنون مشخص شده که جرم آن بین  $\frac{3}{2}$  تا ۴ میلیون برابر جرم خورشید است که در حجمی یک‌دهم اندازه مدار زمین محبوس می‌باشد. در فصل ۱۷ که به سیاه‌چاله‌ها مربوط است، بیشتر به این موضوع خواهیم پرداخت.

## ۱۴-۹ جایگاه ما در جهان

در هر جهتی که به فضا نگاه کنیم، کهکشان‌هایی را با گستره‌ای از شکل‌های متفاوت می‌بینیم. این کهکشان‌ها، شامل صدها میلیون تا صدها میلیارد ستاره، سنگ بنای اصلی جهان هستند. ادوین هابل سامانه‌ای را برای دسته‌بندی آن‌ها ابداع نمود که به صورت گسترده مورد استفاده قرار می‌گیرد. وی کهکشان‌ها را بر اساس ظاهرشان در تصاویر عکاسی دسته‌بندی کرد. هابل انواع مختلف کهکشان‌ها را در آنچه که به رشته هابل<sup>۳۷</sup> معروف شد قرار داد. آن‌ها در سه گروه جای گرفتند: بیضوی، مارپیچ (با دو زیرگروه میله‌ای و عادی) و کهکشان‌های نامنظم. (لازم به ذکر است که مسیر تحول کهکشان‌ها در امتداد رشته هابل نیست، لذا این نام‌گذاری، شاید چندان مفید نباشد.)

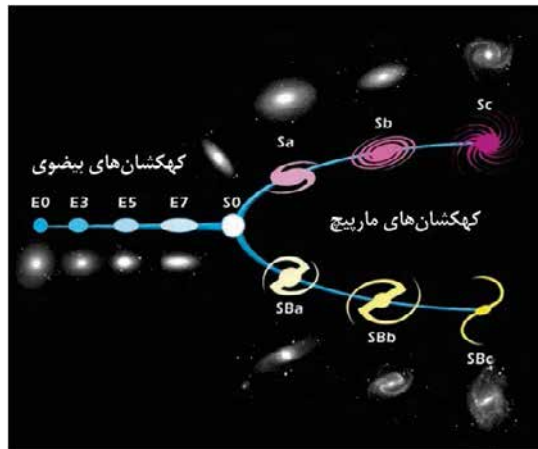
## ۱۴-۱۰ دیگر کهکشان‌ها

در حالی که کهکشان‌ها، که در ابتدا سحابی‌های سفید نام داشتند، مورد رصد قرار گرفته‌اند، این بحث که آیا درون کهکشان راه‌شیری قرار دارند یا خارج آن تا اوایل قرن بیستم به جایی نرسید؛ و در آن زمان بود که مشاهدات انجام گرفته، عمدتاً بر روی متغیرهای قیفاووسی، ستاره‌شناسان را قادر ساخت تا فاصله آن‌ها را اندازه بگیرند. مشخص شد آن‌ها اجسامی خارج از کهکشان ما هستند، که هم‌اکنون در سرتاسر کیهان قابل مشاهده می‌باشند. کهکشان‌ها را می‌توان به چند رده، و سپس زیررده، تقسیم نمود؛ و این یک تقسیم‌بندی است که نخستین بار به وسیله ادوین هابل صورت پذیرفت. با کشف کهکشان‌های بیشتر و بیشتر، معلوم شد که آن‌ها گروه‌هایی (تا ۱۰۰ کهکشان) و خوشه‌هایی (شامل صدها تا هزاران کهکشان) را تشکیل می‌دهند.

## کهکشان‌های بیضوی

همان‌گونه که از نام آن‌ها برمی‌آید، این کهکشان‌ها شکلی بیضی‌گون دارند، چیزی شبیه به توپ راگی. در هنگام مشاهده، شکل آن‌ها از حالتی عملاً دایره‌ای، که هابل آن را E0 نامید، تا E7، یعنی نمونه‌های کاملاً کشیده، متغیر است. کهکشان‌های بیضوی غول‌پیکر تا ۱۰,۰۰۰ میلیارد برابر جرم خورشید را در حجمی حدود ۹ برابر کهکشان ما -قطری حدود ۳۰۰,۰۰۰ سال نوری- جای





رشته هابل

می‌دهند. این کهکشان‌ها، پرجرم‌ترین کهکشان‌ها هستند، هرچند که تعداد آن‌ها نسبتاً کم است. کهکشان‌های بیضوی‌ای که چند میلیون برابر جرم خورشید را در حجمی به عرض چند هزار سال نوری جای داده‌اند، بسیار فراوان هستند. کهکشان‌های بیضوی حدود یک سوم تمام کهکشان‌های جهان را به خود اختصاص داده‌اند.

### کهکشان‌های مارپیچ

این کهکشان‌ها، مانند کهکشان ما، ساختمانی مارپیچ و تخت دارند. اولین رصد بازوان مارپیچی در یک کهکشان توسط ویلیام پارسون صورت گرفت. در دهه ۱۸۴۰، او آینه و دیگر لوازم مورد نیاز را برای ساخت یک تلسکوپ بازتابی ۷۲ اینچی، که به مدت سه ربع قرن بزرگ‌ترین تلسکوپ نوری در جهان بود، فراهم کرد. با این وسیله که در بیرکاسل ایرلند نصب شده بود، او توانست تصاویر زیبایی از اجسام فضایی رسم نماید. شاید برجسته‌ترین آن‌ها مربوط به کهکشان گردابی بود. این اولین نقاشی‌ای بود که بازوهای مارپیچی یک کهکشان را نشان می‌داد و شباهت بسیاری به تصاویر عکاسی مدرن دارد. (این کهکشان در حال برهم‌کنش با کهکشانی دیگر به نام NGC ۵۱۹۵ است که در قسمت سمت راست شکل ۹-۲ دیده می‌شود.)

کهکشان‌های مارپیچ قسمت اعظم کهکشان‌های روشن‌تر را تشکیل می‌دهند. هابل در ابتدا آن‌ها را در چهاررده جای داد: S0، Sa، Sb و Sc. کهکشان‌های S0، که اغلب کهکشان‌های

عدسی گونه نامیده می‌شوند، هسته‌ای بسیار بزرگ دارند. بازوان آن‌ها که به سختی قابل دیدن است، به طور بسیار فشرده درهم پیچیده شده است. با حرکت به سمت Sc، هسته نسبتاً کوچک‌تر و بازوها بازتر می‌شود. در بسیاری از کهکشان‌ها، به نظر می‌رسد که بازوان مارپیچ از دو طرف یک میله مرکزی بیرون آمده‌اند. این کهکشان‌ها، مارپیچ‌های میله‌ای<sup>۳۸</sup> نام دارند و به SBa، SBb و SBC مشخص می‌شوند. تصور می‌شد که کهکشان راه شیری یک کهکشان Sb یا Sc باشد، اما هم‌اکنون شواهدی در دست است که نشان می‌دهد کهکشان یک میله دارد که آن را به SBb یا SBC تبدیل می‌کند.

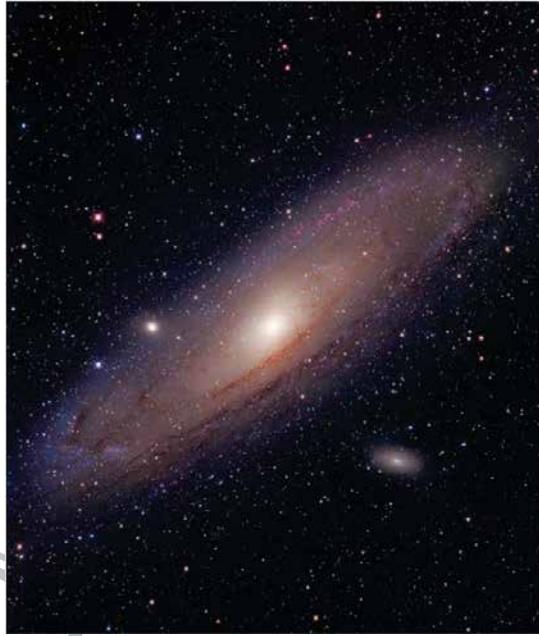
### کهکشان‌های نامنظم

درصد کمی از کهکشان‌ها هیچ‌گونه شکل مشخصی ندارند، لذا با عنوان کهکشان‌های نامنظم<sup>۳۹</sup> دسته‌بندی می‌شوند. یک نمونه نزدیک، ابر کوچک ماژلانی<sup>۴۰</sup> است. همدم آن، ابر بزرگ ماژلانی، نیز معمولاً نامنظم شناخته می‌شود؛ هرچند که خصوصیات شبیه به مارپیچ میله‌ای کوچک از خود نشان می‌دهد. کهکشان‌های این چنین کوچک چندان پرنور نیستند، لذا نمی‌توانیم تعداد زیادی از آن‌ها را ببینیم؛ اما احتمالاً آن‌ها فراوان‌ترین نوع هستند.

### ۱۴-۱۱ گروه‌ها و خوشه‌های کهکشانی

بیشتر کهکشان‌ها در گروه‌هایی شامل چند ده کهکشان، یا خوشه‌هایی که تا چند هزار کهکشان را در برمی‌گیرند، یافت می‌شوند. کهکشان راه شیری خودمان در «گروه محلی»<sup>۴۱</sup> قرار دارد که حدود ۴۰ کهکشان را در حجمی از فضا به عرض سه میلیون سال نوری شامل می‌شود. کهکشان ما یکی از سه کهکشان مارپیچی است (به همراه M۳۱ و M۳۳) که بر گروه استیلا داشته، اکثر جرم آن را تشکیل می‌دهد. کهکشان ما و M۳۱، یا همان کهکشان امرأةالمسلسله که در شکل ۱۴-۱۲ نشان داده شده است، در جرم و اندازه قابل مقایسه هستند. جاذبه گرانشی، این دو را به هم نزدیک می‌کند؛ به گونه‌ای که پس از چند میلیارد سال باهم ادغام شده، یک کهکشان بیضوی خواهند ساخت. M۳۳ در صورت فلکی مثلث<sup>۴۲</sup>، شکل ۱۴-۱۳، سومین کهکشان بزرگ در گروه است. تعداد زیادی کهکشان بیضوی کوتوله در گروه وجود دارد، مانند دو کهکشانی که به دور M۳۱ می‌چرخند

شکل ۱۴-۱۲: کهکشان امرأة‌المسلسله،  
M۳۱، همراه با دو کهکشان بیضوی  
کوئوله M۳۱ (مرکز سمت چپ) و M۱۱۰  
(پایین سمت راست).



شکل ۱۴-۱۳: M۳۳ در صورت فلکی  
مثلاث



و در شکل ۱۴-۱۲ دیده می‌شوند. M۳۲ یک کهکشان بیضوی کوچک از نوع E۲ است که در سمت چپ هسته M۳۱، درست خارج از بازوهای مارپیچ آن قرار دارد، و NGC۲۰۵ (M۱۱۰) یک بیضوی کشیده‌تر، از نوع E۵ یا E۶ است که در پایین سمت راست M۳۱ دیده می‌شود. گروه محلی چندین کهکشان نامنظم بزرگ، مانند ابرهای ماژلانی، و حداقل ۱۰ نامنظم کوئوله را نیز در برمی‌گیرد. با توجه به این که راه شیری حدود ۲۰٪ آسمان را مخفی می‌کند، احتمالاً کهکشان‌های بیشتری در گروه وجود داشته باشد که آن طرف راه شیری پنهان شده‌اند.

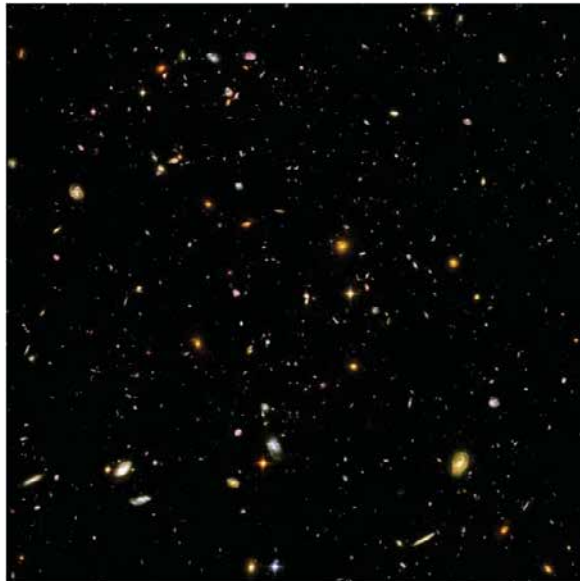


شکل ۱۴-۱۴: قلب خوشه کیهکشان سنبله. M۸۶ بالای مرکز، و M۸۴ سمت راست مرکز قرار دارند. «کیهکشان‌های دو چشم» (NGC ۴۴۳۵ و NGC ۴۴۳۸) بالا سمت چپ تصویر دیده می‌شوند.

ناحیه‌ای در صورت فلکی سنبله<sup>۴۳</sup> درست در غرب اسد<sup>۴۴</sup> مملو از صدها کیهکشان است و از این رو قلمرو کیهکشان‌ها نامیده می‌شود. ۱۶ عدد از آن‌ها به قدری روشن هستند که چارلز مسیه آن‌ها را با استفاده از تلسکوپ خود با دهانه تنها چند سانتیمتر رصد کرده، در فهرست قرار داد. در این جهت، ما در حال نگاه کردن به قلب خوشه‌ای کیهکشان‌های متشکل از حدود ۲۰۰۰ عضو هستیم که به دلیل صورت فلکی سنبله، که خوشه را در آن می‌بینیم، آن را خوشه سنبله نامیده‌اند (شکل ۱۴-۱۴). دو خوشه نزدیک دیگر، خوشه گیسو و خوشه جانی است. خوشه‌های کیهکشان‌های نوعاً ۵۰ تا ۱۰۰۰ کیهکشان را در فضایی به قطر ۶ تا ۳۵ میلیون سال نوری در برمی‌گیرند. جرم کلی این خوشه‌ها بین  $10^{14}$  تا  $10^{15}$  برابر جرم خورشید است.

## ۱۴-۱۲ ابرخوشه‌ها

به نظر می‌رسد که گروه‌ها و خوشه‌های کوچک، ساختارهایی بزرگ‌تر را ایجاد می‌نمایند. این ساختارها ابرخوشه نام دارند و اندازه آن‌ها از مرتبه ۳۰۰ میلیون سال نوری است (۱۰۰ برابر اندازه گروه محلی ما). معمولاً یک ابرخوشه از خوشه‌ای بسیار پربرابر و فراگیر تشکیل می‌شود که چند گروه کوچک‌تر آن را احاطه کرده‌اند. خوشه فراگیر در ابرخوشه محلی، خوشه سنبله است. این ابرخوشه، که اغلب ابرخوشه سنبله<sup>۴۵</sup> نامیده می‌شود، به شکل بیضی تخت است و حدود ۱۵۰ میلیون سال نوری امتداد دارد. خوشه سنبله در مرکز، و گروه محلی ما نزدیک به یک انتهای آن واقع شده



شکل ۱۴-۱۵: تصویر «میدان فرازرف هابل»

است. در همان جهت کلی، اما در فاصله‌ای دورتر، خوشه گیسو با بیش از ۱۰۰۰ کهکشان قرار دارد. این خوشه، خوشه فراگیر در ابرخوشه گیسو<sup>۴۶</sup> در فاصله ۳۳۰ میلیون سال نوری است. دو ابرخوشه مجاور دیگر در جهت صورت‌های فلکی برساوش/حوت و حیّه/قنطورس، به ترتیب در فاصله ۱۵۰ و ۲۳۰ میلیون سال نوری قرار دارند.

این فواصل بسیار دور فراتر از آن است که بتوان از مقیاس فاصله متغیرهای قیفاووسی استفاده نمود. در فصل ۱۹، با عنوان «میراث هابل»، خواهیم دید چگونه مشاهدات «ابرنواختر نوع یک‌آ» که اخیراً صورت گرفته است جهت محاسبه فواصلی تا این اندازه مورد استفاده قرار می‌گیرد. با وجود این، یادآوری روشی بسیار ساده که پیش از این شیوه جدید مورد استفاده قرار می‌گرفت سودمند است. به طور منطقی می‌توان این گونه تصور نمود که بزرگ‌ترین کهکشان‌های هر خوشه هم‌اندازه هستند. از آنجاکه ممکن است اندازه بزرگ‌ترین کهکشان در یکی، بسیار بزرگ‌تر از بزرگ‌ترین کهکشان در بسیاری از دیگر خوشه‌ها باشد، می‌توان سومین کهکشان بزرگ در خوشه را برگزید. اگر اندازه آن‌ها روی صفحه عکاسی به دست آید، می‌توان آن‌ها را با کهکشانی که فاصله‌اش را می‌دانیم مقایسه نمود، به این امید که هم‌اندازه باشند. با داستانی مشابه، می‌توان با

اندازه‌گیری قدر یک کهکشان فاصله آن را برآورد کرد.

دورترین کهکشان‌هایی که تاکنون مشاهده شده است در تصویر میدان فراژرف هابل، **شکل ۱۴-۱۵**، دیده می‌شود. برخی از آن‌ها درست در زمانی ۰/۷ میلیارد سال پس از پیدایش جهان مشاهده می‌شوند، تنها ۵٪ سن کنونی آن.

ساختار کلی جهان مانند یک اسفنج است؛ ناحیه‌هایی در آن قرار دارد که عملاً خالی هستند (موسوم به تهیگاه<sup>۴۷</sup>) و خوشه‌ها و ابرخوشه‌های کهکشانی آن‌ها را احاطه کرده‌اند. الگوی سه‌بعدی را «تار عنکبوت کیهانی<sup>۴۸</sup>» می‌نامند. این الگو ناشی از تأثیر گرانش برافت‌وخیزهای بسیار کوچک در چگالی اولیه جهان است؛ و این افت‌وخیزها، خود از توده‌توده شدن ماده تاریک، یا جهان نامرئی، به وجود می‌آید - موضوعی که در فصل ۲۱ مورد بحث قرار خواهد گرفت. آن نواحی که اندکی چگال‌تر بودند، ماده را از نواحی کم‌چگال‌تر به سمت خود ربودند - در نتیجه این نواحی خالی‌تر شدند و تهیگاه‌هایی را به وجود آوردند که می‌بینیم. سپس، تمرکز ماده اطراف تهیگاه‌ها به ایجاد خوشه‌ها و ابرخوشه‌های کهکشانی منجر شد.

### پانویس‌ها

- 1 - Milky Way
- 2 - Sagittarius
- 3 - Open Cluster
- 4 - globular cluster
- 5 - Hyades
- 6 - Pleiades
- 7 - Taurus
- 8 - Double Cluster in Perseus
- 9 - Hercules
- 10 - 47 Tucanae
- 11 - Galactic Halo
- 12- Interstellar Medium (ISM)
- 13 - Big Bang

۱۴- شبیه به اندازه ذرات دود و قابل مقایسه با طول موج نور مرئی. این ذرات غبار نور مرئی را جذب و پخش می‌کنند، و بدین ترتیب رگه‌های تاریک غبار را می‌سازند که دید ما را در امتداد صفحه راه‌شیری محدود می‌کند.

- 15 - Emission Nebula
- 16 - Dark Nebula
- 17 - Orion Nebula
- 18 - Coal Sack

- 
- 19 - Southern Cross
  - 20 - Eagle Nebula in Serpens
  - 21 - Horsehead Nebula
  - 22 - RR Lyrae stars
  - 23 - Standard Candle
  - 24 - Cepheid variable stars
  - 25- Galactic Rotation Curve
  - 26 - Andromeda
  - 27 - Spin
  - 28 - Edward Purcell
  - 29 - Harold Ewen
  - 30 - Galactic Latitude (L)
  - 31 - Bertil Lindblad
  - 32 - NASA's Spitzer Space Telescope
  - 33 - Scutum-Centaurus Arm
  - 34 - Orion Spur
  - 35 - Sgr A
  - 36 - Paranal Observatory
  - 37 - Hubble sequence
  - 38 - barred spirals
  - 39 - Irregular galaxies
  - 40 - Small Magellanic Cloud (SMC)
  - 41 - Local Group
  - 42 - Triangulum
  - 43 - Virgo
  - 44 - Leo
  - 45 - Virgo Supercluster
  - 46 - Coma Supercluster
  - 47 - Void
  - 48 - Cosmic web

# فصل ۱۵

## شگفتی‌های آسمان در نیم کره جنوبی

از عرض‌های شمالی بخشی از آسمان را هرگز نمی‌توانیم ببینیم، و بخشی نیز آن قدر از ارتفاع پایین در سمت جنوب عبور می‌کند که نمی‌توانیم آن را به خوبی مشاهده کنیم. این ناحیه، قلب کهکشان راه شیری را پوشش می‌دهد و شامل خوشه‌ها و سحابی‌های زیبای بسیاری می‌شود. دو کهکشان همسایه ما، ابرهای ماژلانی، یک ستاره که به احتمال زیاد ابرنواختر نزدیک بعدی خواهد بود، زوج کهکشانی که در حال برخورد با یکدیگرند، و یک خوشه کروی شامل ستاره‌های موسیقیایی<sup>۱</sup>، همه در این ناحیه قرار دارند.

### ۱-۱۵ راه شیری

ناحیه مرکزی راه شیری، در امتداد صورت‌های فلکی قوس و عقرب، یک چشم‌انداز واقعاً زیباست (شکل ۱-۱۵). می‌توانیم میدان‌های مملو از ستاره را ببینیم که رگه‌های غبار از میان آن‌ها عبور کرده، به وسیله سحابی‌های روشن و خوشه‌های ستاره‌ای مزین شده‌اند؛ سحابی‌هایی همچون سحابی مرداب<sup>۲</sup> و سحابی سه تکه<sup>۳</sup>، و خوشه‌هایی چون M۶ و M۷ در صورت فلکی قوس و «جعبه جواهرات شمالی»<sup>۴</sup> در صورت فلکی عقرب. سحابی‌های تاریک نیز، مانند سحابی پیپ<sup>۵</sup> در مرز



شکل ۱-۱۵: راه شیری، آن طور که از شیلی دیده می‌شود.



صورت‌های فلکی قوس و عقرب، و کیسه‌زغال در صورت فلکی صلیب جنوبی<sup>۶</sup>، وجود دارد. منطقه‌ای از راه‌شیری که از سرزمین‌های شمالی قابل مشاهده نیست از صورت فلکی عقرب و در امتداد راه‌شیری تا صورت فلکی کلب اکبر<sup>۷</sup> کشیده شده است. نخستین صورت فلکی مهم و برجسته در این مسیر، صورت فلکی قنطورس<sup>۸</sup> است که سه جسم آن، آلفا قنطورس (رجل قنطورس)، امگا قنطورس و قنطورس آ در ادامه مورد بحث قرار خواهند گرفت. یکی از کوچک‌ترین صورت‌های فلکی، صلیب جنوبی، تا حدی در محاصره صورت فلکی قنطورس قرار دارد. صلیب جنوبی شامل یک خوشهٔ باز زیبا، موسوم به جعبه جواهر، و یکی از برجسته‌ترین سحابی‌های تاریک معروف به کیسه‌زغال است. پس از آن در امتداد راه‌شیری، صورت فلکی شاه‌تخته<sup>۹</sup> قرار دارد؛ یک خوشهٔ باز موسوم به Mel ۱۰۱، یا خوشهٔ پروین جنوبی<sup>۱۰</sup>، به همراه سحابی اِتا شاه‌تخته<sup>۱۱</sup> که ستارهٔ اِتا شاه‌تخته در آن جای دارد، در این صورت فلکی جا خوش کرده‌اند. ستارهٔ اِتا شاه‌تخته احتمالاً ابرنواختر بعدی در نزدیکی ما خواهد بود و در ادامه به آن خواهیم پرداخت. سپس نوبت به بادبان<sup>۱۲</sup> می‌رسد؛ پناهگاه یک باقیماندهٔ ابرنواختری که در قلب آن یک ستارهٔ نوترونی چرخان، موسوم به تپندهٔ بادبان، قرار دارد. در نهایت، با عبور از صورت فلکی کشتی دُم<sup>۱۳</sup>، به کلب اکبر می‌رسیم.

## ۱۵-۲ قلب راه‌شیری

«مرکز کهکشانی<sup>۱۴</sup>» نامی است که به مرکز در حال چرخش کهکشان راه‌شیری داده شده است و در راستای صورت‌های فلکی قوس، حوا و عقرب قرار دارد. زمانی که به تصاویر راه‌شیری نگاه می‌کنیم مناطقی گسترده را می‌بینیم که نور به وسیلهٔ ابرهای تاریک غبار بین ستاره‌ای سد شده است (شامل مقدار زیادی سیلیسیوم و کربن)، از این رو نمی‌توان مرکز کهکشانی را در طول موج‌های مرئی، فرابنفش یا پرتو ایکس نرم<sup>۱۵</sup> مورد مطالعه قرار داد. اما می‌توان آن را در دو انتهای طیف الکترومغناطیسی، در طول موج‌های پرتو گاما، پرتو ایکس سخت، فرسرخ، رادیویی و زیرمیلی متری رصد کرد. راستا و فاصلهٔ آن را نخستین بار هارلو شِپلی به دست آورد. او در حدود سال ۱۹۱۸، فاصله تا ۱۰۰ خوشهٔ کروی<sup>۱۶</sup> را که به کهکشان راه‌شیری مربوط بودند اندازه گرفت. او دریافت که توزیع آن‌ها کروی است، و طبیعتاً مرکز آن‌ها باید همان مرکز کهکشان باشد. لذا به این

نتیجه رسید که مرکز کهکشان حدود ۲۸,۰۰۰ سال نوری از منظومه شمسی فاصله دارد. با رصد حرکت خورشید نسبت به خوشه‌های کروی، می‌توان حساب کرد که خورشید با سرعت حدود  $230 \text{ km/s}$  در حال حرکت به دور مرکز کهکشان است، سفری که یک دور آن حدود ۲۲۰ میلیون سال طول می‌کشد.

مرکز کهکشانی میلیون‌ها ستاره را در برگرفته است. بسیاری از آن‌ها ستاره‌های قرمز و پیررشته اصلی هستند (هنوز به گداخت هیدروژن به هلیوم در هسته مشغول می‌باشند)، اما این ناحیه مملو از ستاره‌های پرجرمی نیز هست که به نظر می‌رسد چند میلیون سال پیش در یک انفجار تشکیل ستاره زاده شده‌اند. امروزه به نظر نمی‌رسد فرایند تشکیل ستاره در مرکز کهکشان روی دهد، اما بر اساس مطالعات، پیش‌بینی می‌شود بعد از حدود ۲۰۰ میلیون سال، یک رویداد ستاره‌فشانی<sup>۱۷</sup> دیگر وجود خواهد داشت؛ رویدادی که در آن، ستاره‌های بسیاری به سرعت متحول شده، با نرخ ۱۰۰ برابر نرخ که هم‌اکنون مشاهده می‌شود، ابرنواختر می‌سازند. عقیده بر این است که راه‌شیری در هر ۵۰۰ میلیون سال یک بار متحمل رویداد ستاره‌فشانی از این نوع می‌گردد.

در دو سمت مرکز کهکشان یک میله قرار دارد که از ستاره‌های قرمز تشکیل شده است. تصور بر این است که این میله ۲۷,۰۰۰ سال نوری درازا داشته باشد. این میله نسبت به خط واصل خورشید و مرکز کهکشان حدود ۴۴ درجه کج است، و با یک حلقه محاصره شده است که بیشتر فرایند تشکیل ستاره در کهکشان در آن متمرکز است. بسیاری از کهکشان‌ها این چنین حلقه‌ای را نشان می‌دهند؛ و حلقه راه‌شیری، اگر از کهکشان ام‌راة‌المسلسله به آن نگاه می‌شد، روشن‌ترین ویژگی منحصر به فرد در کهکشان بود.

### ۱۵-۳ سیاه‌چاله‌ای فوق‌سنگین در قلب کهکشان ما

با وجود اینکه مرکز کهکشان در طول موج‌های مرئی به وسیله غبار پنهان شده است، در طول موج‌های رادیویی می‌توانیم تا قلب کهکشان نفوذ کنیم. ستاره‌شناسان بدین ترتیب توانسته‌اند منبع رادیویی متراکمی را به قوس<sup>۱۸</sup> در صورت فلکی قوس کشف نمایند که اعتقاد دارند مشخص‌کننده محل یک سیاه‌چاله فوق‌سنگین در قلب کهکشان است. چگونه از وجود این سیاه‌چاله مطمئن شویم؟ همان‌گونه که می‌توانیم جرم خورشید را از سرعت مداری زمین و



شکل ۱۵-۲: سامانه ستاره‌ای آلفا قنطورس.

فاصله‌اش تا خورشید به دست آوریم، می‌توانیم با اندازه‌گیری سرعت ستاره‌های در حال گردش به دور قوس‌آ در فواصل خیلی نزدیک، جرم آن را برآورد کنیم. برای مثال، یکی از تلسکوپ‌های ۸ متری VLT در رصدخانه پارانال در شیلی، ستاره‌ای را در فرورسرخ و در فاصله تنها ۱۷ ساعت نوری از مرکز کهکشان (سه برابر فاصله پلوتون تا خورشید) رصد کرده است. این رصد همه را قانع کرد که ستاره تحت نفوذ جسمی با میدان جاذبه بسیار بزرگ قرار دارد؛ درعین حال باید آن جسم فوق‌العاده متراکم باشد - یک سیاه‌چاله فوق‌سنگین. هم‌اکنون مشخص شده که جرم آن بین  $3/2$  تا ۴ میلیون برابر جرم خورشید است که در حجمی یک‌دهم مدار زمین محبوس می‌باشد.

## ۱۵-۴ صورت فلکی قنطورس

### آلفا قنطورس

آلفا قنطورس، که به «پای قنطورس»<sup>۱۹</sup> نیز معروف است، با چشم غیرمسلح به صورت یک ستاره تک دیده می‌شود، و روشن‌ترین ستاره در صورت فلکی قنطورس<sup>۲۰</sup> است (چیزی که از نام‌گذاری آن به روش بایر<sup>۲۱</sup> نیز به ذهن‌خطور می‌کند) و چهارمین ستاره روشن در آسمان. با تلسکوپ می‌توان دید که آلفا قنطورس در حقیقت یک سامانه دوتایی نزدیک است، معروف به سامانه آلفا قنطورس‌آ و ب<sup>۲۲</sup>، که اغلب به اختصار «α Cen AB» نوشته می‌شود (شکل ۱۵-۲). آلفا قنطورس‌آ ستاره پرجرم‌تر در سامانه است؛ با جرمی حدود ۱۰٪ بیشتر از خورشید، و حجمی حدود ۲۳٪ بزرگ‌تر، هر ۲۲ روز یک‌بار به دور خود می‌چرخد - سرعتی بسیار مشابه با خورشید. همدم آن، آلفا قنطورس‌ب، اندکی کوچک‌تر و کم‌نورتر از خورشید است، با جرمی برابر با  $0/9$  جرم خورشید. این سامانه یک عضو دیگر نیز دارد، آلفا قنطورس‌ج<sup>۲۳</sup>، که با فاصله  $2/18$  درجه در آسمان قرار گرفته است. این سه



شکل ۱۵-۳: امگا قنطورس

باهم، یک سامانه ستاره‌ای سه تایی را می‌سازند، موسوم به آلفا قنطورس آ-ب-ج<sup>۲۴</sup>. آلفا قنطورس ج را معمولاً پروکسیما قنطورس می‌نامند، چراکه نزدیک‌ترین ستاره به خورشید است و در فاصله ۴/۲ سال نوری قرار دارد، یعنی ۰/۲۱ سال نوری نزدیک‌تر از آلفا قنطورس آ و ب. پروکسیما قنطورس یک ستاره کوتوله قرمز است که می‌توان آن را با یک تلسکوپ کوچک مشاهده کرد و جرمی حدود یک هشتم خورشید دارد. با توجه به اینکه هر سه ستاره در حال حرکت در فضا در یک راستای تقریباً مشابه هستند، تصور عمومی آن است که پروکسیما قنطورس به صورت گرانشی به سامانه آلفا قنطورس آ و ب پیوند خورده است و با دوره تناوب چند صد هزار سال به دور آن‌ها می‌گردد، البته این امکان نیز وجود دارد که این ستاره در حال عبور از کنار آن دو در یک مسیر هذلولوی است.

### امگا قنطورس

امگا قنطورس، شکل ۱۵-۳، مدت‌هاست که به‌عنوان یک خوشه کروی شناخته می‌شود - یک گروه کروی متراکم، نوعاً شامل یک میلیون ستاره، که تاریخ آن‌ها به آغاز تشکیل کهکشان بازمی‌گردد. این جسم در فهرست بطلمیوس به‌عنوان ستاره آورده شده است. ستاره‌شناس آلمانی،

یوهان بایر نیز که همچنان آن را یک ستاره می‌پنداشت، در اطلس ستارگان سال ۱۶۰۳ خود، اورانومتری، آن را امگا قنطورس<sup>۲۵</sup> نام نهاد. بایر در فهرست خود، از ترکیب یک حرف کوچک یونانی، از قبیل آلفا، بتا، گاما، و غیره، با نام لاتین صورت فلکی‌ای که ستاره در آن قرار داشت، نامی را به هر ستاره نسبت می‌داد. نخستین کسی که دریافت امگا قنطورس یک خوشه کروی است، ستاره‌شناس انگلیسی ویلیام هرشل در دهه ۱۸۳۰ بود. این خوشه، روشن‌ترین و بزرگ‌ترین خوشه کروی منتسب به کهکشان ما است. ما تنها یک خوشه کروی را می‌شناسیم که روشن‌تر و پرجرم‌تر است، و آن مایال دو<sup>۲۶</sup> در کهکشان امراةالمسلسله می‌باشد.

امگا قنطورس در فاصله حدود ۱۵٫۸۰۰ سال نوری از زمین قرار دارد و چند میلیون ستاره را در خود جای داده است. در مرکز آن، ستاره‌ها آن قدر متراکم هستند که به طور متوسط، تنها ۰/۱ سال نوری از هم فاصله دارند. تصور بر این است که سن این خوشه به زمان تشکیل راه‌شیری برمی‌گردد، یعنی حدود ۱۲ میلیارد سال پیش، و یکی از معدود خوشه‌های کروی است که با چشم غیرمسلح دیده می‌شود (تقریباً به بزرگی ماه کامل). اما برخلاف دیگر خوشه‌های کروی، امگا قنطورس حاوی چندین نسل از ستارگان است و امروزه چنین می‌پنداریم که این خوشه به احتمال زیاد هسته کهکشان کوتوله‌ای است که ستارگان بیرونی آن به وسیله کهکشان راه‌شیری گسسته شده، جذب گردیده‌اند (همین وضعیت برای خوشه کروی مایال دو نیز متصور است).

### یک سیاه‌چاله مرکزی؟

در سال ۲۰۰۸ ستاره‌شناسان ادعا کردند که شواهدی را دال بر وجود یک سیاه‌چاله با جرم متوسط در مرکز این خوشه یافته‌اند. رصدهایی که با تلسکوپ فضایی هابل و رصدخانه جیمینی انجام شد نشان داد که ستاره‌های نزدیک‌تر به هسته با سرعت بیش‌تری نسبت به ستاره‌های دورتر حرکت می‌کنند (غیر از این انتظار نداریم). اما سرعت گردش آن‌ها به دور مرکز، بر یک جاذبه گرانشی ناشی از یک جسم نادیدنی چگال و پرجرم دلالت دارد - به احتمال زیاد یک سیاه‌چاله. آن‌ها جرمی حدود ۴۰٫۰۰۰ برابر خورشید را برای سیاه‌چاله پیش‌بینی می‌کنند، یعنی بین جرمی که از رمبش ستاره‌های پرجرم مانند اتا شاه‌تخته (چند برابر جرم خورشید) به دست می‌آید و آنچه در قلب کهکشان‌های بزرگ یافت می‌شود (جرمی از حدود ۴ میلیون برابر جرم خورشید، مثلاً در مرکز



شکل ۱۵-۴: صلیب جنوبی، با کیسه زغال در پایین سمت چپ آن.

راه‌شیری، تا چند میلیارد برابر جرم خورشید در کهکشان‌های بیضوی غول). با توجه به اینکه امروزه بر این عقیده‌ایم که در هسته تمام کهکشان‌ها سیاه‌چاله یافت می‌شود، این یک شاهد دیگر بر یک منشأ کهکشانی، و نه خوشه‌ای است.

### ۱۵-۵ صورت فلکی صلیب جنوبی

ستاره‌های آلفا و بتا فنطورس را اغلب ستاره‌های نشانگر می‌نامند، چراکه ناظر را به سمت صلیب کوچکی که صورت فلکی صلیب کوچک<sup>۲۷</sup> را می‌سازد هدایت می‌کنند (شکل ۱۵-۴). از نیم‌کره شمالی و عرض‌های پایین‌تر از  $+25^\circ$  می‌توان این صورت فلکی را در آوریل دید، و به دلیل حرکت تقدیمی زمین، پس از حدود ۱۰۰۰ سال، تنها از مناطق جنوب انگلستان (و به خوبی از آمریکا) دیده خواهد شد. سه ستاره از چهار ستاره‌ای که صلیب را می‌سازند، یعنی آلفا صلیب جنوبی<sup>۲۸</sup>، مُمَهظه<sup>۲۹</sup> و دلتا صلیب جنوبی<sup>۳۰</sup>، ستاره‌های غول بسیار جوان هستند - با سنی حدود ۱۰ تا ۲۰ میلیون سال و عضوی از همان خوشه ستاره‌ای در حال حرکت. ستاره اصلی در این صورت فلکی، آلفا صلیب جنوبی، یک سامانه دوتایی است. این زوج ستاره‌ای ۳۲۰ سال نوری از خورشید فاصله دارند، و

هریک تقریباً دو برابر آن هستند. ستاره‌ای که در واقع روشن‌ترین ستاره در صورت فلکی صلیب جنوبی است، عملاً بتاصلیب جنوبی یا همان مُمهظه می‌باشد؛ یک غول آبی-سفید، پنج برابر قطر خورشید، در فاصله حدود ۵۸۰ سال نوری که ۸۰۰۰ بار از خورشید درخشان‌تر است.

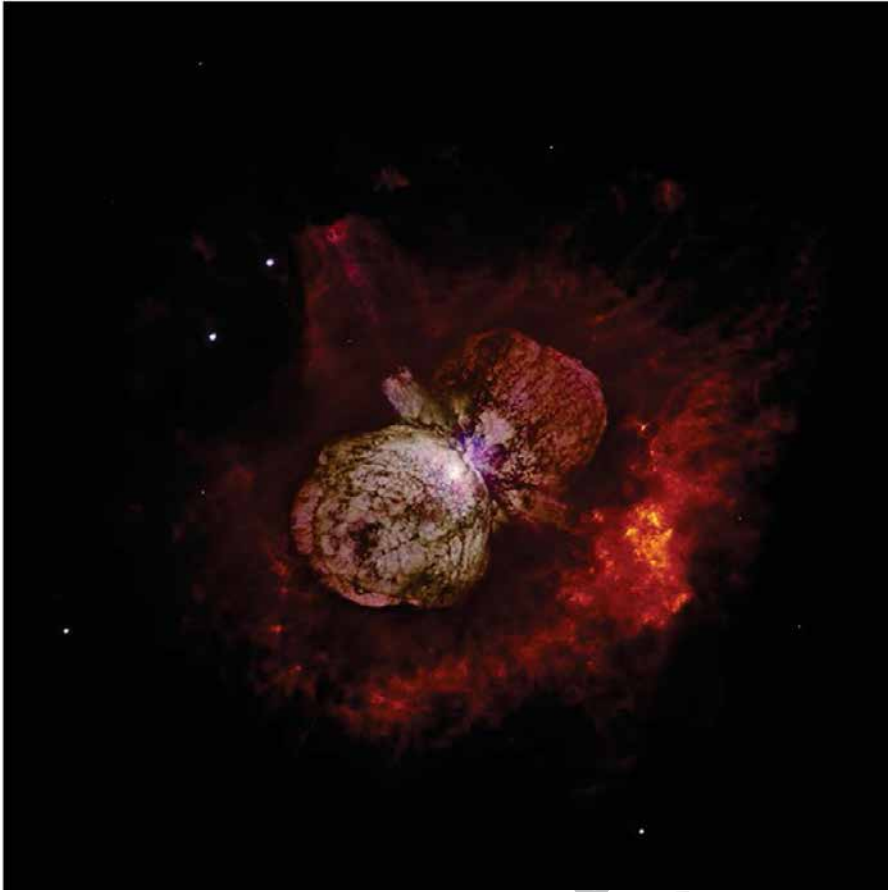
یک خوشه بسیار نزدیک به بتاصلیب جنوبی، خوشه زیبای جعبه جواهر است، که حدود صد ستاره قابل دیدن را در بر گرفته است و حدود ۱۰ میلیون سال سن دارد. این خوشه حاوی تعداد زیادی ستاره آبی-سفید با درخشش بالا، به همراه یک ابرغول قرمز در مرکز است که یک کنتراست رنگی زیبا را می‌سازد. نام این خوشه را سر جان هرشل بر آن نهاد. او این خوشه را شبیه به یک قطعه جواهر زیبا می‌دانست. درست در جنوب جعبه جواهر، یک منطقه گلابی شکل از سحابی تاریک به وسعت ۵×۷ درجه قرار دارد. این سحابی، موسوم به کیسه زغال، یک منطقه متراکم از غبار و گاز است که حدود ۲۰۰۰ سال نوری از ما دور بوده، نور ستاره‌های دورتر را مخفی می‌کند. این سحابی، که به خوبی با دوربین دوچشمی دیده می‌شود، برجسته‌ترین سحابی تاریک در امتداد صفحه راه شیری می‌باشد.

## ۱۵-۶ صورت فلکی شاه‌تخته

شاه‌تخته سه جسم شایان توجه را در بر گرفته است:

**خوشه پروین جنوبی**، Mel ۱۰۱، نام یک خوشه باز درخشان و جذاب است که ظاهر و روشنایی بالایش آن را قابل مقایسه با خوشه معروف پروین در صورت فلکی ثور می‌سازد. این خوشه یکی از روشن‌ترین خوشه‌های باز در آسمان جنوبی است، که در فاصله حدود ۴۸۰ سال نوری قرار دارد و شامل حدود ۶۰ ستاره می‌باشد. عقیده بر این است که سن آن حدود ۵۰ میلیون سال است. تینا شاه‌تخته روشن‌ترین ستاره در خوشه است و به آسانی با چشم غیرمسلح دیده می‌شود، اما برای دیدن بقیه ستاره‌ها معمولاً باید از دوربین دوچشمی استفاده کرد.

**سحابی انا شاه‌تخته**، که به سحابی شاه‌تخته نیز معروف است، یک سحابی روشن و بزرگ است که چند خوشه باز ستاره‌ای را احاطه می‌کند. این خوشه‌ها از آن جهت مهم هستند که دو تا از پرچم‌ترین و درخشان‌ترین ستاره‌ها در راه شیری، انا شاه‌تخته و HD ۹۳۱۲۹۸ در آن‌ها قرار دارند. این سحابی در فاصله تقریبی بین ۶۵۰۰ و ۱۰٫۰۰۰ سال نوری از زمین واقع شده است و تعداد زیادی



شکل ۱۵-۵: اتا شاه‌تخته و سحابی اطراف آن؛ تصویری که تلسکوپ فضایی هابل آن را تهیه کرده است.

ستاره آبی و داغ از رده O را در خود جای داده است. این یکی از بزرگ‌ترین سحابی‌های پخشیده در آسمان است - چهار بار بزرگ‌تر و روشن‌تر از سحابی جبار. درون سحابی، یک عارضه بسیار کوچک‌تر معروف به سحابی آدمک قرار دارد که ستاره اتا شاه‌تخته را احاطه نموده است. تصور بر این است که این عارضه از آن ستاره در جریان یک طغیان عظیم در دهه ۱۸۴۰، که مدت کوتاهی اتا شاه‌تخته را به دومین ستاره روشن در آسمان تبدیل کرد، بیرون ریخته است.

**اتا شاه‌تخته** را شاید بتوان جالب‌ترین ستاره تک در نیم کره جنوبی دانست. اولین بار ادموند هالی در سال ۱۶۷۷ آن را در فهرست خود قرار داد. این ستاره، که در فاصله ۷,۵۰۰ سال نوری قرار



دارد، یک ستاره متغیر بسیار پرجرم است؛ بسیار ناپایدار می باشد، و انتظار می رود در آینده ای که از لحاظ نجومی نزدیک است به صورت یک ابرنواختر منفجر گردد. گرچه زمانی تصور می شد که اتا شاه تخته یک ستاره غول منفرد است، امروزه بر این باوریم که بخشی از یک سامانه است که دست کم شامل دو ستاره با جرم مرکب ۱۰۰ برابر خورشید بوده، حدود ۴ میلیون بار روشن تر از خورشید می باشد. این دو ستاره با دوره تناوب ۵/۵۲ سال به دور یکدیگر گردش می کنند. روشنایی آن به شدت متغیر است و در سال ۱۸۴۳ به اوج خود رسید، یعنی زمانی که به دومین ستاره روشن در آسمان تبدیل شد (اندکی روشن تر از ستاره سهیل<sup>۳۱</sup>، اما کم نورتر از شعرای یمانی). در حال حاضر، تنها در یک شب تاریک و آسمان صاف می توان آن را با چشم غیر مسلح دید. چنین ستاره هایی نسبتاً نادرند، شاید تنها چند ده تا از آن ها در کهکشانی مانند راه شیری وجود داشته باشد.

اتا شاه تخته را یک جفت ابر باد کرده و بزرگ از گاز و غبار احاطه کرده است (شکل ۱۵-۵). عرض این ابرها ۱۰ میلیارد مایل است، حدود اندازه منظومه شمسی، و زمانی تشکیل شدند که حدود ۱۶۰ سال قبل، اتا شاه تخته دچار یک فوران عظیم شد. در مدتی پس از آن، اتا شاه تخته تقریباً به اندازه یک انفجار ابرنواختری نور مرئی گسیل داشت، اما جان سالم به دربرد! این دو ابر که در انفجار به وجود آمدند با سرعت حدود ۲/۴ میلیون کیلومتر بر ساعت به سمت بیرون حرکت می کنند. هنوز دلیل فوران های گسترده در اتا شاه تخته معلوم نیست؛ اما به احتمال زیاد دلیل آن افزایش فشار تابشی ناشی از درخشندگی بسیار بالای ستاره است. پس از فوران سال ۱۸۴۳، روشنایی اتا شاه تخته رو به افول گذاشت، و بین ۱۹۰۰ تا ۱۹۴۰ تقریباً با چشم غیر مسلح دیده نمی شد. احتمالاً دلیل آن محاصره ابرهای غباری بودند که دو لب را تشکیل می دهند. اتا شاه تخته ناگهان در سال های ۱۹۹۸-۱۹۹۹ روشنایی خود را دو برابر کرد، و دوباره دیدنی شد.

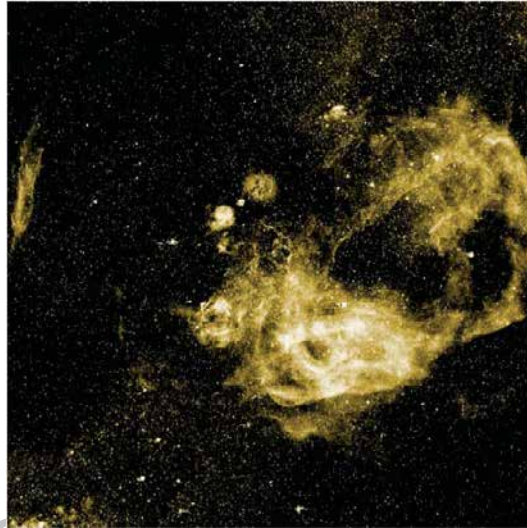
انتظار داریم اتا شاه تخته در یک میلیون سال آینده به صورت یک ابرنواختر یا فرانو اختر<sup>۳۲</sup> منفجر شود. از آنجاکه سن فعلی و مسیر تحول آن نامطمئن است، ممکن است در چند هزار سال آینده، یا حتی در چند سال بعد، منفجر شود. یک فوران مشابه با آنچه اتا شاه تخته در ۱۸۴۱-۱۸۴۳ نشان داد در سال ۲۰۰۴ در ستاره SN ۲۰۰۶jC مشاهده شد، ستاره ای که با فاصله حدود ۷۷ میلیون سال نوری در صورت فلکی سیاه گوش<sup>۳۳</sup> قرار دارد. در ابتدا یک ابرنواختر تصور می شد، اما همچون اتا شاه تخته، علیرغم بیرون ریزی حدود ۰/۰۱ برابر جرم خورشید به درون فضا - حدود ۲۰ برابر جرم

مشتری- جان سالم به دربرد. با وجود این، درست دو سال بعد، در ۹ اکتبر سال ۲۰۰۶ به صورت یک ابرنواختر نوع ۱b منفجر شد. به همین خاطر، برخی بر این نظرند که ممکن است انا شاه‌تخته در مدت عمر ما، یا حتی در چند سال آینده، منفجر شود. اما دیگران می‌گویند به احتمال زیاد انا شاه‌تخته در مرحله ابتدایی تحول خود است، و ماده درون هسته آن همچنان قادر است از گداخت هسته‌ای پشتیبانی نماید (و لذا از رمبش آن جلوگیری نماید).

اگر بنا بود انا شاه‌تخته به یک فرانواختر تبدیل شود، احتمالاً به پرتاب فوران‌های پرتو گاما در راستای محور چرخش سیاه‌چاله‌ای که به دست می‌آید می‌پرداخت. خوشبختانه، همان طور که در تصویر هابل دیده می‌شود، در حال حاضر محور چرخش رو به زمین نیست؛ اما به عنوان عضوی از یک سامانه دوتایی، این محور می‌تواند تغییر کند، و اگر در زمان انفجار رو به زمین بود، محاسبات نشان می‌دهد که انرژی دریافتی (به شکل پرتو گاما) معادل یک کیلوتن تی ان تی بر کیلومتر مربع روی تمام نیم کره‌ای است که رو به ستاره می‌باشد. گونه‌های حیات زمینی به وسیله جو زمین محافظت خواهند شد، اما پرتوهای گاما می‌توانند فضاپیماها یا ماهواره‌ها و لایه اوزون را نابود کنند. در هر حال، احتمالاً آن قدر روشن خواهد بود که در روز دیده می‌شود، و در شب می‌توان به مطالعه کتاب در نور آن پرداخت!

## ۱۵-۷ صورت فلکی بادبان

جالب‌ترین جسم در صورت فلکی بادبان، باقیمانده ابرنواختری بادبان<sup>۳۴</sup> است که در شکل ۱۵-۶ نشان داده شده است؛ نتیجه یک انفجار ستاره‌ای در ۱۱,۰۰۰ تا ۱۲,۳۰۰ سال قبل در فاصله حدود ۸۰۰ سال نوری. در سال ۱۹۶۸، یک ستاره نوترونی به شکل یک تپنده کشف شد که به آن مربوط بود، و از این رو نخستین دلیل رصدی برای اینکه ستاره‌های نوترونی از ابرنواخترها به وجود می‌آیند فراهم آمد، موضوعی که در فصل ۱۱ شرح داده شد. تپنده بادبان در هر ۸۹ میلی ثانیه یک بار دور خود می‌چرخد - ۱۱ بار در هر ثانیه - و با وجود اینکه یک تپنده رادیویی است، می‌توان آن را در نور مرئی نیز رصد کرد، و روشن‌ترین منبع باثبات پرتو گاما در آسمان می‌باشد. تپنده‌ها معمولاً با سرعت زیاد از ستاره در حال انفجار به خارج پرتاب می‌شوند، و تپنده بادبان با سرعت حدود ۱۲۰۰ km/s در حال حرکت در فضا است.



شکل ۱۵-۶: باقیمانده ابرنواختری بادبان.



شکل ۱۵-۷: ابرهای بزرگ و کوچک ماژلانی.

خوشه کروی ۴۷ توکانا درست در سمت چپ ابر کوچک ماژلانی دیده می شود.

## ۱۵-۸ ابرهای ماژلانی

دو ابر ماژلانی، شکل ۱۵-۷، عضوی از گروه محلی کهکشان ما هستند. ابر بزرگ ماژلانی<sup>۳۵</sup> چهارمین کهکشان بزرگ در این گروه پس از (به ترتیب) کهکشان امرأةالمسلسله یا M۳۱، راه شیری و M۳۳ در صورت فلکی مثلث است. این دو ابر، هر دو، به عنوان کهکشان های کوتوله نامنظم دسته بندی

می‌شوند، هرچند ابر بزرگ ماژلانی برخی خصوصیات یک مارپیچ میله‌ای را داراست. آن‌ها در فاصله تقریبی ۱۶۰٫۰۰۰ سال نوری (ابر بزرگ) و ۱۹۷٫۰۰۰ سال نوری (ابر کوچک) قرار دارند و حدود ۷۵٫۰۰۰ سال نوری از هم دورند. تا چندی پیش چنین تصور می‌شد که آن‌ها به دور راه‌شیری گردش می‌کنند، اما ظاهراً از پژوهش‌های جدید چنین برمی‌آید که این طور نیست، و احتمالاً آن‌ها در حال عبور از کنار راه‌شیری با سرعت ۸۴۰ km/s هستند. تنها کهکشان بیضوی و کوتوله قوس و کهکشان کوتوله کلب اکبر به راه‌شیری نزدیک‌ترند. ابر بزرگ ماژلانی نخستین بار در سال ۱۹۶۴ پس از میلاد و در عرض ۱۵° ۱۲ در جنوب عربستان ثبت گردید. بعداً این زوج را آنتونیو پیگفتا، در طی جهانگردی به همراه فردیناند ماژلان از سال ۱۵۱۹ تا ۱۵۲۲، گزارش نمود، و مدت‌ها بعد نام ماژلان بر آن‌ها نهاده شد. این دو کهکشان در آسمان شب جنوبی به صورت ابرهای کم‌نور دیده می‌شوند، و از این رو ابر نام گرفتند. ساختار آن‌ها از این لحاظ با کهکشان ما متفاوت است که کسر بزرگ‌تری از جرم آن (در مقایسه با راه‌شیری) به هیدروژن و هلیوم تعلق دارد. لذا کسر کوچک‌تری به عناصر سنگین‌تر مربوط است. در آن‌ها ستاره‌هایی از خیلی پیر تا خیلی جوان دیده می‌شود، و این یعنی یک تاریخ طولانی از ساخت ستاره.

از ابرهای ماژلانی به راه‌شیری می‌نگریستیم، منظره‌ای تماشایی را در مقابل خود می‌دیدم که حدود ۳۶ درجه از آسمان را می‌پوشاند - پهنای حدود ۷۰ ماه کامل. از آنجاکه آن‌ها به خوبی بالای صفحه کهکشانی راه‌شیری قرار دارند، هر ناظری در آنجا، یک چشم‌انداز مورب از تمام کهکشان را در مقابل خود می‌بیند - بسیار بهتر از آنچه ما از کهکشان خود می‌بینیم، چراکه غبار بین‌ستاره‌ای دید ما را به درون صفحه کهکشان محدود می‌کند.

### ابر کوچک ماژلانی ۳۶

این ابر یک کهکشان نامنظم کوتوله است با قطری حدود ۷۰۰۰ سال نوری؛ شامل چند صد ستاره با یک جرم کلی که حدود ۷ میلیارد برابر جرم خورشید برآورد می‌شود. (به یاد داشته باشید که جرم خورشید به خوبی بالاتر از مقدار متوسط در بین جرم ستارگان است؛ ستاره‌های کمتری با جرم بیش از خورشید وجود دارد، و بسیاری از ستارگان جرمی کمتر از خورشید دارند.) میل آن ۷۳- درجه است، از این رو تنها از نیم کره جنوبی و عرض‌های پایین در نیم کره شمالی قابل رؤیت است. ابر

کوچک ماژلانی به صورت یک تکه مبهم از نور در آسمان شب، به پهنای حدود ۳ درجه در صورت فلکی توکانا، ظاهر می‌شود. به دلیل روشنایی سطحی بسیار پایین آن، تنها در محلی که آسمان آن واقعاً تیره است می‌توان آن را دید.

ابر کوچک ماژلانی یک نقش کلیدی در برپایی «نردبان فاصله<sup>۳۷</sup>» ایفا کرد، چیزی که امکان تعیین فاصله را تا اجسامی که در ابتدا سحابی‌های سفید نام داشتند فراهم آورد (کهکشان‌ها)؛ داستانی که در فصل ۱۹ به تفصیل به آن خواهیم پرداخت.

### ابر بزرگ ماژلانی

جرم این ابر به حدود ۱۰ میلیارد برابر جرم خورشید می‌رسد - حدود یک دهم جرم راه شیری، و قطر آن حدود ۱۴۰۰۰ سال نوری است. ابر بزرگ ماژلانی حاوی یک میله بسیار شاخص در مرکز خود است، به این معنی که شاید در گذشته یک کهکشان مارپیچ میله‌ای بوده است که بر اثر برهم‌کنش‌های کشندی با راه شیری و ابر کوچک ماژلانی دچار این آشفتگی گردیده است. این ابر، شبیه به بسیاری از کهکشان‌های نامنظم، غنی از گاز و غبار است، و سحابی رطیل<sup>۳۸</sup> را به عنوان فعال‌ترین منطقه تولید ستاره در گروه محلی کهکشان‌ها در خود جای داده است. سحابی رطیل (که به ماهی‌زرین<sup>۳۹</sup> نیز شناخته می‌شود) یک ناحیه H II (ناحیه‌ی اچ دو؛ ناحیه‌ای از گاز هیدروژن که به وسیله نور فرابنفش ناشی از ستاره‌های داغ و جوان برانگیخته شده است) در ابر بزرگ ماژلانی است. این ابر را در ابتدا یک ستاره می‌پنداشتند، و نام ماهی‌زرین ۳۰ نیز از همین پندار است، اما در سال ۱۷۵۱، نیکولاس لوئیس دلاکای<sup>۴۰</sup> ماهیت واقعی آن را تشخیص داد. می‌توان به آسانی ابر بزرگ ماژلانی را با دوربین دوچشمی دید که با توجه به فاصله حدود ۱۷۰٫۰۰۰ سال نوری آن، باید فوق‌العاده درخشان باشد - آن‌چنان روشن که اگر به اندازه سحابی جبار (نزدیک‌ترین منطقه H II) به زمین نزدیک بود، سحابی رطیل [روی سطح زمین] تولید سایه می‌کرد. در حقیقت، این ابر بزرگ‌ترین (با عرض حدود ۶۵۰ سال نوری) و فعال‌ترین ناحیه شناخته‌شده ساخت ستاره درون گروه محلی کهکشان ما است. بیشتر انرژی‌ای که سحابی را به حالت برانگیخته می‌برد ناشی از یک خوشه ستاره‌ای متراکم (به عرض ۳۵ سال نوری و جرم ۴۵٫۰۰۰ برابر خورشید) در قلب آن است.

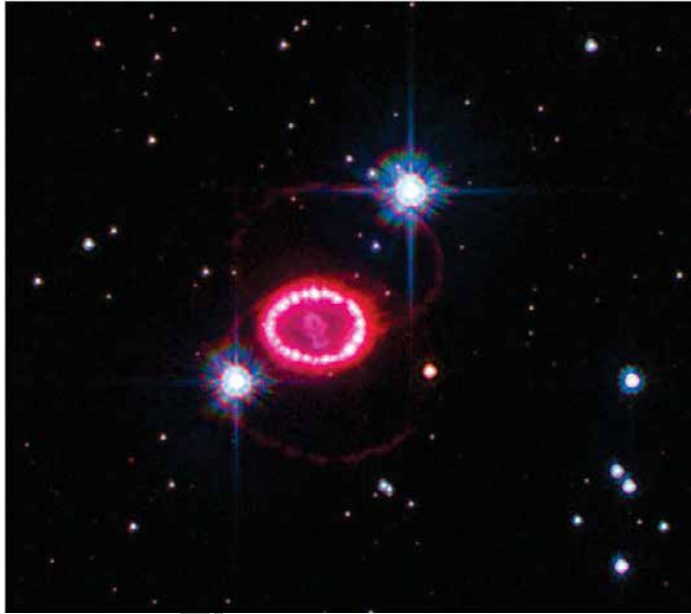
## ۱۵-۹ ابرنواختر ۱۹۷۸۸

ابرنواختر ۱۹۷۸۸ را نخستین بار در حول وحوش سحابی رطیل در ۲۳ فوریه ۱۹۸۷ دیدند. این ابرنواختر، با قدر بصری بیشینه ۳-، به اندازه‌ای روشن بود که بتوان آن را با چشم غیرمسلح دید؛ و نزدیک‌ترین ابرنواختر مشاهده شده از زمان SN۱۶۰۴، ابرنواختر کپلر که در صورت فلکی حوا دیده شده بود، به حساب می‌آمد. روشنایی آن در ماه مه به بیشینه خود رسید و به‌آرامی در ماه‌های بعد کاهش یافت؛ بدین ترتیب برای نخستین بار این فرصت را در اختیار ستاره‌شناسان امروزی قرار داد که به مشاهده یک ابرنواختر نزدیک بپردازند. این ابرنواختر را آیان شلتون و اُسکار دوهادلی<sup>۴۱</sup> در رصدخانه لاس کامپاناس شیلی، در ۲۴ فوریه ۱۹۸۷ کشف کردند. آیان عکسی را که گرفته بود فوراً ظاهر کرد، اما یک عکس زودتر (اولین عکسی که ابرنواختر را نشان می‌داد) که به وسیله آلبرت جونز<sup>۴۲</sup> در نیوزلند (زلاندنو) گرفته شده بود تا صبح بعد ظاهر نشد، از این رو آیان را به‌عنوان کاشف اعلان نمودند.

به‌زودی معلوم شد ستاره‌ای که پس از انفجار، این ابرنواختر را تولید کرده بود، یک ابرغول آبی به نام «Sanduleak-69° 202a» است. عجیب بود، زیرا در آن زمان گمان نمی‌رفت که یک ابرغول آبی بتواند چنین رویداد ابرنواختری را تولید نماید. امروزه بر این باوریم که این ستاره نیا (پدربزرگ) در یک سامانه دوتایی قرار داشت، و ستاره‌های این سامانه حدود ۲۰,۰۰۰ سال پیش از انفجار باهم ادغام شده، ابرغول آبی را به وجود آوردند. بیشتر ابرنواخترها با گذشت زمان و با از دست دادن انرژی خود، رو به افول می‌گذارند، اما در کمال تعجب، گسیل‌های رادیویی و پرتو ایکس ۱۹۸۷A با گذشت زمان روشن‌تر شد، و موج‌ضربه ناشی از انفجار، یک ابر متراکم از گاز و غبار را که مدتی قبل از ستاره فوران کرده، آن را به محاصره درآورده بود، برانگیخت.

## فاصله تا SN۱۹۸۷A

امروزه تصاویر SN۱۹۸۷A به‌وسیله تلسکوپ فضایی هابل سه حلقه روشن را اطراف آن نشان می‌دهد (این حلقه‌ها، مواد باد ستاره‌ای متعلق به ستاره نیا هستند که به‌وسیله جرقه فرابنفش ناشی از انفجار ابرنواختری برانگیخته شده‌اند). حلقه‌ها تا سه ماه بعد، زمانی که نور فرابنفش توانست به آن‌ها برسد، روشن نشدند. بدین ترتیب می‌توان شعاع آن‌ها را برحسب روز نوری به



شکل ۱۵-۸: حلقه درونی اطراف ابرنواختر SN1987A

دست آورد. بزرگی این حلقه‌های آن قدر است که تلسکوپ فضایی هابل بتواند به دقت اندازه زاویه‌ای آن‌ها را حساب کند؛ حلقه داخلی که در شکل ۱۵-۸ نشان داده شده است شعاعی حدود  $0.8$  ثانیه قوسی دارد. با آگاهی از اندازه زاویه‌ای و قطر حلقه داخلی، فاصله آن با استفاده از هندسه ساده حدود  $168,000$  سال نوری به دست می‌آید. این رصدهای مهم به یک برآورد از فاصله زمین تا مرکز ابر بزرگ ماژلانی منجر شده است، چیزی حدود  $52.0 \pm 1.3$  kpc. این اندازه‌گیری، یک مقدار جدید برای تنظیم نقطه صفر مقیاس فاصله قیفاووسی در اختیار ما قرار داده است؛ چیزی که دانش ما را از فواصل کیهانی، و در نتیجه مقدار ثابت هابل (ضریب مقیاس جهان)، تا حد زیادی بهبود بخشیده است.<sup>۴۳</sup>

### ۱۵-۱۰ خوشه کروی ۴۷ توکانا

خوشه ۴۷ توکانا<sup>۴۴</sup>، اغلب با نام اختصاری 47 Tuc، یک خوشه کروی به عرض ۱۲۰ سال نوری است که در فاصله حدود  $16,700$  سال نوری در صورت فلکی توکانا قرار دارد. می‌توان آن را با چشم

شکل ۱۵-۹: خوشه کروی ۴۷ توکانا



غیرمسلح بسیار نزدیک به (در راستای) ابر کوچک ماژلانی دید (شکل ۱۵-۷). این خوشه را نیکولاس لوئیس دلاکای در سال ۱۷۵۱ کشف کرد. در یک آسمان بسیار تاریک، تقریباً به اندازه ماه کامل به نظر می‌آید. با توجه به توضیحات پیشین، اگر فرض کنیم که امگا قنطورس یک خوشه کروی نیست، ۴۷ توکانا روشن‌ترین خوشه کروی در آسمان است، و به دلیل برخورداری از یک هسته بسیار روشن و چگال، جایی که ستارگان بسیار متراکم کنار هم قرار گرفته‌اند (شکل ۱۵-۹)، مورد توجه قرار گرفته است.

### جستجو به دنبال سیارات درون ۴۷ توکانا

تلسکوپ فضایی هابل اخیراً با استفاده از شیوه اختفای ستاره‌ای، سیارات بزرگ با مدار نزدیک را در ۴۷ توکانا مورد جستجو قرار داده است<sup>۴۵</sup>. تلسکوپ هابل حدود ۳۴٫۰۰۰ ستاره را مورد رصد قرار داد، اما هیچ منحنی نوری که بتوان به صورتی قانع‌کننده‌ای آن را ناشی از اختفای ستاره به وسیله یک سیاره دانست، پیدا نکرد. این مشاهدات، به صورتی که کنجکاوی را برمی‌انگیزد، نشان داد که چنین «مشتري‌های داغی» نسبت به اطراف ستاره‌ها در همسایگی خودمان، باید در ۴۷ توکانا بسیار کمتر از باشد (دست کم یک‌دهم). شاید دلیل این باشد که محیط ستاره‌ای چگال حتی برای چنین سیارات نزدیکی ناامن است، یا اینکه فرایند تشکیل سیارات در این زمان بسیار متفاوت از زمانی است که ۴۷ توکانا به وجود آمد، یعنی حدود ۱۲ میلیارد سال پیش.



## تپنده‌های میلی‌ثانیه‌ای در ۴۷ توکانا

خوشه ۴۷ توکانا به شدت موردعلاقه ستاره‌شناسان رادیویی است، چراکه دست کم ۲۳ جسم را که اصطلاحاً تپنده میلی‌ثانیه‌ای نام دارند در خود جای داده است. در این تپنده‌ها، عبور یک ستاره ستاره نوترونی را قادر ساخته است که ماده را از پوش بیرونی ستاره در حال عبور (یا یک همدم در مدار یک دوتایی) به سمت خود بکشد. این فرایند به انتقال تکانه زاویه‌ای نیز می‌انجامد، و این یعنی افزایش سرعت چرخش تپنده تا دوره تناوب‌هایی در حد میلی‌ثانیه، چیزی که نام این نوع تپنده نیز از آن گرفته شده است. سریع‌ترین تپنده شناخته شده در هر ثانیه بیش از ۷۰۰ بار به دور خود می‌چرخد (نقطه‌ای بر استوای آن با سرعتی برابر با ۲۰٪ سرعت نور حرکت می‌کند، یعنی نزدیک به نقطه‌ای که به صورت نظری تصور می‌شود ستاره نوترونی در آن متلاشی شود!)

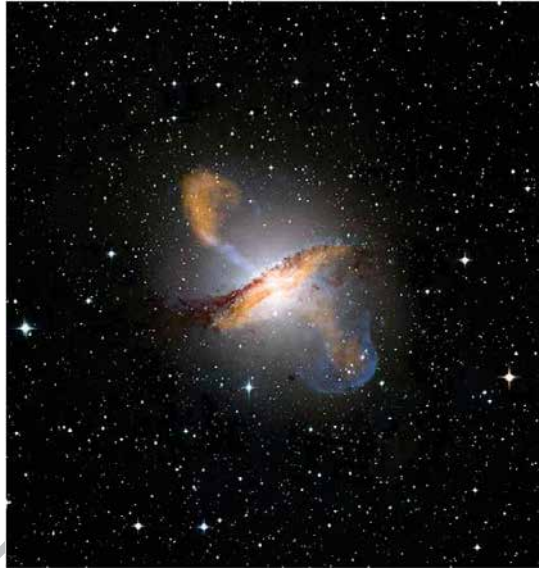
هسته چگال ۴۷ توکانا یک منزلگاه مناسب برای تپنده‌های میلی‌ثانیه‌ای است، آن‌هایی که دوره تناوبشان بین ۸ تا ۲ میلی‌ثانیه می‌باشد. بنابراین سریع‌ترین آن‌ها در هر ثانیه حدود ۵۰۰ بار دور خود می‌چرخد. اگر قطار پالس‌هایی که از یک تپنده میلی‌ثانیه‌ای به دست می‌آید را تقویت کرده، به یک بلندگوی بوقی اعمال کنیم، دوره تناوب چنان است که صدایی یکنواخت تولید می‌شود، و نه رشته‌ای از پالس‌های منظم. البته التفات داشته باشید که این امواج صوتی نیست که در تلسکوپ‌های رادیویی در حال دریافت است! این صداها را می‌توانید در آدرس زیر ببینید:

[www.jb.man.ac.uk/research/pulsar/Education/Sounds/](http://www.jb.man.ac.uk/research/pulsar/Education/Sounds/)

## ۱۵-۱۱ قنطورس آ

قنطورس آ یک کهکشان بیضوی یا عدسی‌گونه است همراه با یک رگه غبار بر روی آن، که با حدود ۱۱ میلیون سال نوری فاصله در صورت فلکی قنطورس قرار دارد (شکل ۱۵-۱۰). این کهکشان، به‌عنوان پنجمین کهکشان روشن در آسمان، فوق‌العاده جالب است، چراکه به نظر می‌رسد نتیجه یک ادغام بین دو کهکشان کوچک‌تر باشد. نخستین بار جان هرشل در سال ۱۸۴۷ آن را به‌عنوان یک «کهکشان خاص»<sup>۴۶</sup> شناسایی کرد، و در سال ۱۹۶۶ به‌عنوان یکی از بهترین نمونه‌ها از یک کهکشان آشفته با جذب غبار<sup>۴۷</sup>، در اطلس کهکشان‌های خاص جای گرفت. برآمدگی کهکشانی<sup>۴۸</sup> عمدتاً از ستاره‌های قرمز پیر تشکیل شده است، اما بیش از صد ناحیه ساخت ستاره (مانند سحابی

شکل ۱۵-۱۰: قنطورس آ



جبار یا سحابی رطیل در ابر بزرگ ماژلانی) در قرص آن شناسایی شده است که به تشکیل ستاره در دوران متأخر مربوط است. به نظر می‌رسد که قنطورس آ در حال بلعیدن یک کهکشان مارپیچ کوچک‌تر است - فرایندی که معمولاً یک دوره شدید از ساخت ستاره را آغاز می‌کند. این‌ها کهکشان‌هایی هستند که چند فرایند درون آن‌ها باعث تمایزشان نسبت به کهکشان‌های دیگر می‌شود، به ویژه در مقدار گسیل رادیویی که آن‌ها تولید می‌کنند. پیش از این گفته شد که در قلب کهکشان ما یک منبع رادیویی موسوم به قوس آ قرار دارد که یکی از قوی‌ترین منابع رادیویی در کهکشان ما است. با وجود این، اگر راه شیری در فاصله دوری قرار داشت، این منبع رادیویی ضعیف‌تر از آن بود که دیده شود، و راه شیری در گروه کهکشان‌های معمولی قرار می‌گرفت. اما کهکشان‌هایی وجود دارند که گسیل رادیویی آن‌ها بسیار بیشتر است و همچون یک فانوس دریایی در پهنه جهان می‌درخشند. از آنجاکه بیشتر گسیل اضافی در بخش رادیویی طیف قرار دارد، این‌ها را کهکشان‌های رادیویی می‌نامند. (پسوندها «آ» در نام قنطورس آ به این معنی است که روشن‌ترین کهکشان رادیویی در صورت فلکی است.) کهکشان‌های دیگر یک مقدار اضافی از گسیل پرتو ایکس تولید می‌کنند، و به صورت جمعی، همه را کهکشان‌های فعال می‌نامند. هرچند ندارند، فرایندهایی در آن‌ها وجود دارد که به وضوح پارانرژی هستند، و همین فرایندها است که

آن‌ها را به اجسامی جالب برای مطالعه ستاره‌شناسان تبدیل کرده است. قنطورس آیکی از نزدیک‌ترین کهکشان‌های رادیویی به زمین است، از این‌رو ستاره‌شناسان حرفه‌ای به طور گسترده‌ای آن را مورد مطالعه قرار داده‌اند.

### هسته فعال کهکشانی

اعتقاد ما بر این است که عامل تابش‌های قوی درست در قلب کهکشان قرار دارد، جایی که «هسته فعال کهکشانی»<sup>۴۹</sup> نامیده می‌شود. پیش‌از این گفته شد که تصور می‌شود سیاه‌چاله‌ای فوق‌سنگین در مرکز کهکشان ما وجود دارد. هم‌اکنون اعتقاد داریم که در مرکز تمام کهکشان‌های بزرگ بیضوی و مارپیچ، سیاه‌چاله‌هایی که تا چند میلیارد جرم خورشید را در خود جای داده‌اند قرار دارد. این سیاه‌چاله‌ها در اکثر کهکشان‌ها آرام هستند، اما در بعضی، ماده در حال سقوط به درون سیاه‌چاله است (چیزی که هم‌اکنون مشاهده می‌کنیم) و فرایندهایی را که منجر به تابش رادیویی و پرتو ایکس می‌شود راه‌اندازی می‌نماید. یک زوج فوران نسبیتی که مسئول گسیل در طول موج‌های رادیویی و پرتو ایکس هستند انرژی خود را از مجاورت سیاه‌چاله فوق‌سنگین در مرکز کهکشان اخذ می‌کنند. ستاره‌شناسان با توجه به مشاهدات رادیویی فوران در فاصله یک دهه به این نتیجه رسیده‌اند که بخش‌های داخلی فوران با سرعتی حدود نصف سرعت نور در حال حرکت است. از برخورد فوران به گازی که در بخش‌های بیرونی کهکشان قرار دارد، و ایجاد ذرات بسیار پرانرژی، پرتو ایکس بیشتری تولید می‌گردد. قنطورس آ نزدیک‌ترین کهکشان به زمین است که با یک سیاه‌چاله فوق‌سنگین درون خود، فعالانه در حال دادن انرژی به یک فوران است. تصور بر این است که سیاه‌چاله در قلب آن، جرمی ۱۰۰ میلیون برابر خورشید دارد.

بینیم وقتی سقوط ستاره‌ای به درون سیاه‌چاله آغاز می‌شود، چه اتفاقی می‌افتد. از آنجاکه یک طرف ستاره به سیاه‌چاله نزدیک‌تر است، نیروی گرانش بر آن از طرف دیگر بیشتر خواهد بود. بدین ترتیب یک نیرو، موسوم به نیروی کشندی<sup>۵۰</sup>، بر ستاره وارد می‌شود که با نزدیک‌تر شدن به سیاه‌چاله افزایش می‌یابد. بر اثر این نیرو، نهایتاً ستاره به گاز و غباری که از آن ساخته شده است متلاشی می‌گردد. با سقوط ماده، یک اتفاق دیگر نیز رخ می‌دهد. بعید است که ستاره‌ای مستقیماً به داخل سیاه‌چاله سقوط کند، بلکه حرکتی چرخشی خواهد داشت. به عبارت دیگر، ستاره با

چرخش به دور سیاه چاله، به تدریج فاصله خود را با آن کاهش می‌دهد. با نزدیک تر شدن مواد، به دلیل پایستاری تکانه زاویه‌ای، سرعت آن افزایش می‌یابد. نتیجه چرخش مواد در نزدیکی سیاه چاله و با سرعت‌های متفاوت، ایجاد اصطکاک و تولید گرما است، به طوری که مواد به دماهایی بیش از یک میلیون درجه کلوین می‌رسند. چنین موادی مقادیر فراوان تابش پرتو ایکس را گسیل می‌دارد. این پرتو را تنها اگر بتوانیم به سمت جایی که سیاه چاله قرار دارد نگاه کنیم، می‌توانیم رصد کنیم. سیاه چاله با حلقه‌ای از مواد موسوم به قرص برافزایشی<sup>۵۱</sup> احاطه شده است. غبار درون این قرص به حدی است که سیاه چاله ناپیدا است. اما اگر بحسب اتفاق، این قرص نسبت به خط دید ما تقریباً عمود باشد، می‌توانیم درون آن را به سمت ناحیه‌ای که سیاه چاله قرار دارد ببینیم و گسیل پرتو ایکس را مشاهده کنیم.

گداخت هسته‌ای هیدروژن می‌تواند اندکی کمتر از ۱٪ از جرم سکون آن را به انرژی تبدیل کند. چیزی که کمتر معروف است آن است که عمل سقوط به درون چاه پتانسیل گرانشی نیز می‌تواند به تبدیل جرم به انرژی بینجامد. در مورد یک سیاه چاله فوق سنگین، انرژی‌ای معادل ۱۰٪ جرم می‌تواند پیش از سقوط آن به درون افق رویداد آزاد شود = پربازده‌ترین منبع انرژی که ما از آن اطلاع داریم. نتیجه این انرژی، اغلب دو فوران از ذرات است که در خلاف جهت یکدیگر و در امتداد محور چرخش سیاه چاله، از آن دور می‌شوند. این دو فوران، که با سرعتی نزدیک به نور حرکت می‌کنند، سوراخی را در گاز احاطه‌کننده کهکشانش ایجاد می‌کنند و به همین دلیل سرعت ذرات کاهش می‌یابد. سپس آن‌ها در تمام طیف الکترومغناطیسی پرتوافشانی می‌کنند و بدین سان امکان مشاهده فوران‌ها فراهم می‌آید. اگر احياناً یکی از فوران‌ها به سمت ما نشانه رفته باشد، گسیل مشاهده شده ممکن است بسیار قوی باشد، و بدین ترتیب این اجسام را در پهنه جهان می‌توان دید.

## پانوشته‌ها

- 1 - Musical Stars
- 2 - Lagoon nebula
- 3 - Trifid nebula
- 4 - Northern Jewel Box
- 5 - Pipe Nebula
- 6 - Coal Sack in Crux

- 7 - Canis Major  
 8 - Centaurus  
 9 - Carina  
 10 - Southern Pleiades  
 11 - Eta Carinae Nebula  
 12 - Vela  
 13 - Puppis  
 14 - The Galactic Centre  
 15 - soft X-ray
- ۱۶- خوشه‌هایی با حدود یک میلیون ستاره که تاریخ آن‌ها به زمان تشکیل کهکشان ما بازمی‌گردد.
- 17 - starburst event  
 18 - Sgr A\*  
 19 - Rigel Kent
- ۲۰- قنطورس نام یک موجود افسانه‌ای است با نمایی نیمه انسان و نیمه اسب. (مترجم)
- 21 - Bayer designation  
 22 - Alpha Centauri AB  
 23 -  $\alpha$  Cen C  
 24 -  $\alpha$  Cen AB-C  
 25 -  $\omega$  Centauri  
 26 - Mayall II in the Andromeda Galaxy
- ۲۷- Crux؛ کوچک‌ترین، اما یکی از بارزترین صورت‌های فلکی در میان ۸۸ صورت فلکی آسمان.
- 28 - Acrux or Alpha Crucis  
 29 - Mimosa  
 30 - Delta Crucis  
 31 - Canopus  
 32 - Supernova or Hypernova  
 33 - Lynx  
 34 - Vela supernova remnant  
 35 - large Magellanic Cloud (LMC)  
 36 - Small Magellanic Cloud (SMC)  
 37 - distance ladder  
 38 - Tarantula Nebula  
 39 - 30 Doradus  
 40 - Nicolas Louis de Lacaille  
 41 - Ian Shelton and Oscar Duhalde  
 42 - Albert Jones in New Zealand
- ۴۳- برای اطلاع بیشتر از روش محاسبه فاصله تا ابر بزرگ ماژلانی به کتاب «درآمدی بر نجوم و کیهان‌شناسی» بخش ۸-۳-۲ مراجعه کنید. (مترجم)
- 44 - 47 Tucanae
- ۴۵- این سیارات با عبور از مقابل ستاره خود، به صورت موقت مقداری از نور آن را سد می‌کنند.
- 46 - Peculiar Galaxy  
 47 - disturbed galaxy with dust absorption  
 48 - Galactic Bulge  
 49-Active Galactic Nucleus (AGN)  
 50 - Tidal Force  
 51 - Accretion Disc

## فصل ۱۶

### حق با اینشتین است!

هدف از این فصل، رسیدن به یک درک از نظریه نسبیت عام اینشتین است، و اینکه چطور در مدتی نزدیک به یک قرن، از تمام آزمایش‌های رصدی سربلند بیرون آمده است.

در نظریه نسبیت خاص اینشتین، فرض بر این است که هیچ چیز نمی‌تواند سریع‌تر از سرعت نور،  $3 \times 10^8$  km/s، در میان فضا حرکت کند. عبارت «در میان» مورب نوشته شده است، چراکه انبساط فضا می‌تواند مواد را با سرعتی بیش از نور از هم دور کند. یک کلوچه کشمشی را در نظر بگیرید: زمانی که آن را از اجاق فر بیرون می‌آوریم، امیدواریم کلوچه نسبت به زمانی که خمیر آن را درون فر می‌گذاشتیم بزرگ‌تر شده، دانه‌های کشمش از هم دورتر شده باشند. این دانه‌ها در میان خمیر حرکت نکرده‌اند، بلکه به دلیل انبساط خمیر از هم دور شده‌اند. به روشی مشابه، انبساط فضا می‌تواند اجسام درون آن را با سرعتی بیش از نور از یکدیگر دور کند.

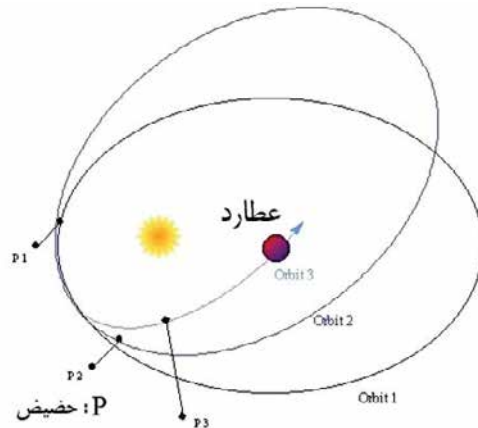
شاید با یک آزمایش ذهنی روشن شود که در صورت برقراری فرض بالا، قانون گرانش نیوتون نمی‌تواند کاملاً صحیح باشد. فرض کنید خورشید ناگهان از هستی محو شود. طبق قانون نیوتون این تغییر بلافاصله در کل جهان حس می‌شود، و بلادرنگ زمین در مسیری مماس از مدارش خارج می‌گردد. اینشتین دریافت که موضوع نباید به این شکل باشد. نه تنها ما مرگ خورشید را تا  $8/32$  دقیقه بعد نخواهیم فهمید - زمان لازم برای نور تا فاصله خورشید و زمین را بپیماید - بلکه زمین نیز باید تا آن مدت همچنان گرانش خورشید را حس کند و تنها زمانی از مدار خارج شود که ما نیز دیگر خورشید را نمی‌بینیم. البته در اینجا فرض شده که آنچه اطلاعات میدان گرانش خورشید را حمل می‌کند نیز با سرعت نور منتشر خواهد شد. در نتیجه، چیزی باید در فضا منتشر شود که اطلاعات مربوط به تغییر در میدان گرانش را با خود حمل می‌کند. بدین ترتیب بود که اینشتین وجود امواج گرانشی<sup>۱</sup> را برای حمل این‌گونه اطلاعات پیش‌بینی نمود. بعداً خواهیم دید که وجود

چنین امواجی به طور غیرمستقیم نشان داده شده است، و احتمالاً دیری نخواهد پایید که شواهد مستقیم وجود آن‌ها نیز به دست آید.

در سال ۱۹۱۵، اینشتین نظریهٔ عمومی نسبیت را که اغلب «نسبیت عام» نامیده می‌شود، منتشر کرد. این نظریه در اصل یک نظریهٔ گرانش است. در جهان ما، اجسام در یک پیوستار<sup>۲</sup> فضا-زمان چهاربعدی قرار دارند که سه مختصهٔ فضایی را با یک مختصهٔ چهارم، یعنی زمان، ترکیب می‌کند. برای سادگی، در ادامه تنها عبارت «فضا» مورد استفاده قرار خواهد گرفت. در غیاب ماده، نظریهٔ اینشتین فضا را «تخت» پیش‌بینی می‌کند. البته واژهٔ تخت تا حدی ناقص است، چراکه یک سطح مسطح دوبعدی را به ذهن متبادر می‌سازد. در حقیقت، تنها معنی آن این است که نور به خط مستقیم حرکت می‌کند، لذا دو بیم نور که در ابتدا موازی هستند، موازی باقی خواهند ماند. در فضای تخت، مجموع زوایای داخلی یک مثلث ۱۸۰ درجه خواهد بود. هندسهٔ اقلیدسی برقرار است! (من شخصاً مایلم جنبشی را آغاز کنم برای توقف نامیدن فضا با واژهٔ «تخت» و به جای آن، استفاده از عبارت‌های فضای «اقلیدسی» یا فضا «با انحنای صفر»!).

حال اگر جرمی به درون فضای تخت وارد شود، آن را به یک فضا با انحنای مثبت تبدیل می‌کند؛ به گونه‌ای که دو بیم نور که در آغاز موازی هستند، همگرا خواهند شد، و مجموع زوایای داخلی مثلث بیش از ۱۸۰ درجه خواهد بود. یک تشبیه ساده و دوبعدی برای این فضا، یک ورق کشیده و تخت از لاستیک است. ساچمه‌های ریز بر روی آن به خط راست حرکت می‌کنند. حال اگر یک توپ سنگین بر روی لاستیک قرار داده شود، یک فرورفتگی ایجاد می‌کند و اگر یک ساچمه نزدیک شود، یک مسیر منحنی را دنبال خواهد کرد. درست به همین ترتیب، فضا در اطراف خورشید دارای انحنای مثبت است و زمین تنها در حال دنبال کردن مسیر طبیعی خود در میان این فضای منحنی است - هیچ نیرویی وجود ندارد که بر آن عمل کند.

یک جهان (سیاره) کروی را تصور کنید که ساکنان آن تماماً (اما به اشتباه) بر این باورند که سطح آنجا تخت است. در منطقهٔ نزدیک به قطب شمال، سطح یخی عملاً بدون اصطکاک است. ساکنان از یک وسیلهٔ نقلیه شبیه به هواناو<sup>۳</sup> استفاده می‌کنند به طوری که در حین حرکت، هیچ نیروی اصطکاکی احساس نمی‌شود. دو وسیله، به فاصلهٔ ۱۰ کیلومتر از هم که به یک اندازه از قطب دورند، همزمان با سرعت مساوی بر روی مسیرهای موازی روی یخ به سمت شمال حرکت



شکل ۱۶-۱: حرکت تقدیمی مدار عطارد

می‌کنند. چون سرنشینان این دو وسیله بر این باورند که سطح آنجا تخت است، انتظار خواهند داشت که فاصله بین خود را در این مسافت بر روی یخ حفظ کنند. از این رو تا حدی متعجب (و احتمالاً مجروح) خواهند شد وقتی که در قطب شمال به هم برخورد کنند! برای پایبندی به این باور که سطح جهان آن‌ها تخت است، آن‌ها ناچارند نیرویی را، که احتمالاً آن را گرانش می‌نامند، فرض کنند که توضیح دهد چرا وسیله نقلیه آن‌ها به سوی یکدیگر کشیده شد. به روشی مشابه، ما نیروی گرانش را فرض می‌کنیم تا مشاهدات ما را بر مبنای این باور (غلط) که فضای سه‌بعدی در مجاورت جرم تخت است، و نه منحنی، توضیح دهد.

**گرانش نیرویی است که ما ابداع می‌کنیم تا رویدادهایی را که مشاهده می‌کنیم (از قبیل گردش سیارات به دور خورشید) بر اساس این باور که فضا تخت است (درحالی‌که در حقیقت دارای انحنا مثبت است) توضیح دهیم.**

نخستین آزمون نظریه اینشتین، به کارگیری آن برای توضیح مدار عطارد بود. همان‌طور که قانون اول کپلر درباره حرکت سیارات می‌گوید، مدار عطارد باید یک بیضی باشد که خورشید در یک کانون آن قرار دارد. اگر خورشید یک کره بود و هیچ سیاره دیگری وجود نداشت، نقطه نزدیک‌ترین تقرب، موسوم به حضیض خورشیدی، در فضا ثابت می‌ماند. اما پهن‌شدگی خورشید (پخ در دو قطب آن) و اختلالات ناشی از دیگر سیارات باعث می‌شود که مدار دچار حرکت تقدیمی شود (شکل ۱۶-۱). مشاهدات دقیق نشان داد که مقدار این حرکت تقدیمی،  $۵۵۹۹/۷$  ثانیه قوسی در قرن، با



آنچه از نظریه نیوتون به دست می‌آمد به مقدار ۴۳ ثانیه قوسی در قرن اختلاف دارد. به کارگیری نظریه نسبیت یک جمله تصحیح‌کننده به مقدار  $0.4 \pm 42/98$  ثانیه قوسی را فراهم آورد - دقیقاً مقدار لازم برای حذف ناهنجاری!

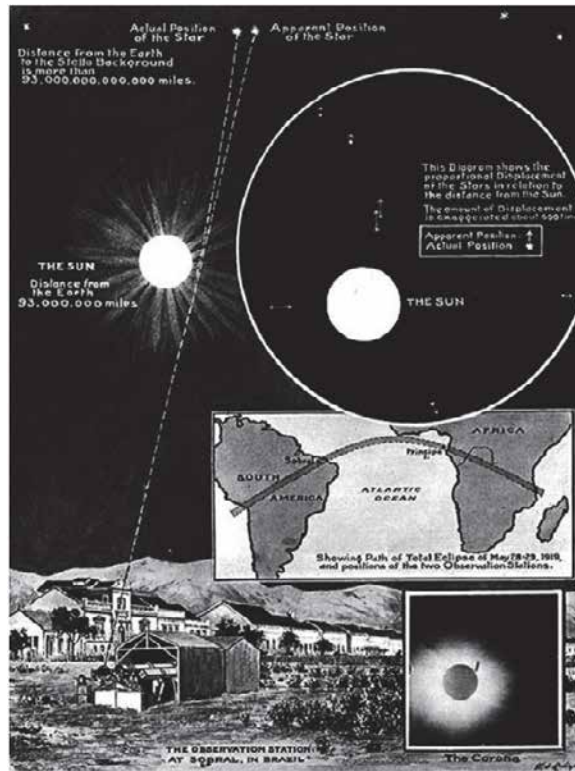
دانشمندان دریافتند که می‌توان نظریه اینشتین را با مشاهده ستارگان، زمانی که در نزدیکی خورشید دیده می‌شوند، آزمود. بر اساس پیش‌بینی نظریه وی، نزدیک‌ترین ستارگان به اندازه  $1/75$  ثانیه قوسی جابه‌جا می‌شدند - نزدیک به محدودیت‌هایی که به دلیل وجود جو، در دقت اندازه‌گیری وارد می‌شود.

### ۱-۱۶ دو خورشیدگرفتگی مهم

ما معمولاً نمی‌توانیم موقعیت ستارگان را نزدیک به خورشید، مگر در یک خورشیدگرفتگی کلی، تعیین کنیم. از این رو، گرفت‌های سال ۱۹۱۹ و ۱۹۲۲، که پس از انتشار نظریه نسبیت روی می‌دادند، یک نقش مهم در تاریخ علم بازی کردند. اصول کار ساده است. قبل از کسوف عکس‌هایی از آسمان، ناحیه‌ای که خورشید در گرفت کلی آنجا خواهد بود، می‌گیریم تا موقعیت اسمی ستارگان به دست آید. در گرفت کلی نیز عکس‌هایی از همان ناحیه می‌گیریم - تنها زمانی که می‌توان ستارگان را نزدیک خورشید دید - و محل ستاره‌ها را باهم مقایسه می‌کنیم.

به دنبال دو سفر علمی پیرامون کسوف در ۲۹ مه ۱۹۱۹، سرآرتور ادینگتون<sup>۴</sup> نتیجه‌ای را که مشتاقانه پیش‌بینی شده بود به جهان اعلان نمود. اینشتین درست می‌گفت. با نگاه به گذشته، گرچه این تأیید آن‌چنان که ادینگتون ترسیم می‌کرد قطعی و قانع‌کننده نبود، اما باید منصف بود، او تمام صفحات عکاسی را برای هر کس دیگری که مایل بود آن‌ها را تحلیل کند، در دسترس قرار داد.

سرآرتور ادینگتون رهبری هیئت انگلیسی را به جزیره پرنسیپ اقیانوس اطلس<sup>۵</sup> جهت رصد گرفت کلی خورشید در مه ۱۹۱۹ بر عهده داشت. هم‌زمان مجموعه رصدهای دیگری نیز در سوبرال برزیل<sup>۶</sup> صورت گرفت. تلسکوپ‌های مورد استفاده باید متحرک می‌بودند و همین دقت آن‌ها را محدود می‌کرد. بدیهی است که تصاویر کنترل (تصاویر ابتدایی از ستارگان) باید در شب گرفته می‌شد که سردتر از روز بود. حتی بدون در نظر گرفتن این مشکلات، آزمایش ساده نبود. انحراف



شکل ۱۶-۲: آزمایش خورشیدگرفتگی سال ۱۹۱۹

پیش بینی شده  $1/6$  ثانیه قوسی باید با تصویر ستاره که از زمین گرفته شده بود و به دلیل اغتشاشات جوی اندازه آن ۱ تا ۲ ثانیه قوسی بود، مقایسه می‌گردید. داده‌های به دست آمده از مشاهدات به اندازه‌ای که آن موقع ابراز شد قطعی نبود. تلسکوپ جزیره پرنسیپ ۱۶ عکس گرفت، اما ابر جزئی کیفیت آن‌ها را کاهش داد. دو عکس قابل استفاده تلسکوپ پرنسیپ، هرچند با کیفیتی پایین، انحراف متوسط  $1/62$  ثانیه قوسی را پیشنهاد می‌کرد.

در سوبرال شرایط بهتر بود و دو تلسکوپ مورد استفاده قرار گرفت (شکل ۱۶-۲). اما متأسفانه کانون دستگاه اصلی به هم خورد (احتمالاً به دلیل کاهش دما هنگام کسوف) و تصاویر ستارگان واضح نبود. از این رو اندازه‌گیری مشکل بود و از این تصاویر نتیجه‌ای حدود  $0/93$  ثانیه قوسی نتیجه شد. اما یک دستگاه ده سانتیمتری کوچک‌تر توانست ۸ عکس واضح بگیرد و این تصاویر

مقدار میانگین  $0.12 \pm 1/98$  ثانیه قوسی را نشان می‌دادند. اگر داده تمام تلسکوپ‌ها آورده می‌شد، نتیجه قاطعی به دست نمی‌آمد؛ اما ادینگتون نتایج تلسکوپ بزرگ‌تر در سوبرال را با کمی توجیه کم‌ارزش نمود و بیشترین تکیه را بر داده‌های پریسیپ، که خود رهبری کرده بود، قرار داد. در ششم نوامبر همان سال، ستاره‌شناس سلطنتی و رئیس انجمن سلطنتی اعلام کرد که شواهد به طور قاطع به نفع تئوری اینشتین است. با وجود این، دانشمندان بسیاری در آن وقت وجود داشتند که احساس می‌کردند دلایل خوبی برای این تردید وجود دارد که آیا مشاهدات توانسته بود به دقت این نظریه را بیازماید.

آزمایش مؤثرتر در سال ۱۹۲۲ توسط گروه ویلیام کمپل از رصدخانه لیک<sup>۷</sup> با رصد کسوف کلی در استرالیا صورت گرفت. آن‌ها یک جابه‌جایی ستاره‌ای را برابر با  $0.11 \pm 1/72$  ثانیه قوسی تعیین کردند. پیش از آن کمپل ایمان داشت که نظریه‌های اینشتین غلط است، اما وقتی رصدهایش خلاف آن را ثابت کرد بلافاصله اشتباه خود را پذیرفت و از آن پس طرفدار نسبیت شد. (معمولاً انسان به آزمایشی که نتایج آن خلاف انتظار آزمایش‌کننده است ایمان پیدا می‌کند!)

## ۱۶-۲ عدسی‌های گرانشی

اگر جرم خورشید بتواند یک جابه‌جایی کوچکی در موقعیت یک جسم دور ایجاد کند، پس جرم یک کهکشان هم باید بتواند. گاهی یک کهکشان، نزدیک به خط دید یک جسم دورتر است. جرم کهکشان، فضای اطراف آن را تغییر شکل می‌دهد و یک عدسی گرانشی<sup>۸</sup> می‌سازد. بسته به موقعیت‌های نسبی، این عدسی می‌تواند چند تصویر از جسم دور تولید کند، یا حتی نور یا گسیل رادیویی آن را به صورت یک کمان یا حلقه بگستراند - موسوم به حلقه اینشتین<sup>۹</sup>.

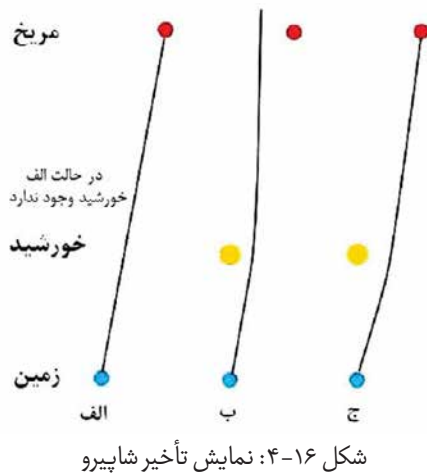
در سال ۱۹۷۷، رصدهای انجام‌شده با استفاده از تلسکوپ لاول در جُدرل بانک دو اخترش را کشف کرد که موقعیت آن‌ها حدود ۶ ثانیه قوسی از هم فاصله داشت و نزدیک به موقعیت یک کهکشان در پیش‌زمینه بود (شکل ۱۶-۳). اخترش‌ها منابع رادیویی روشن و بسیار دوری هستند که در صفحات عکاسی مانند ستارگان ظاهر می‌شوند - نام آن‌ها نیز بر همین اساس است: اجسام شبه‌ستاره<sup>۱۰</sup>. به زودی معلوم شد که ما در حال مشاهده دو تصویر از یک جسم هستیم (که حالا آن را اخترش دوتایی می‌نامند)، چیزی که نتیجه عدسی گرانشی ناشی از کهکشان پیش‌زمینه بود.



شکل ۱۶-۳: تصویر تلسکوپ فضایی هابل از «اختروش دوگانه»

اما یک تفاوت ظریف وجود دارد. طول مسیر در فضا بین ما و اختروش، برای یکی از تصاویر به اندازه ۴۱۷ روز نوری طولانی تر است. پس ما به طور همزمان، آن اختروش را در دو زمان از حیاتش می بینیم - دو زمان به فاصله ۴۱۷ روز! زمان و فضا واقعاً برهم کنش دارند، چیزی که نشان می دهد چرا فضا-زمان در نظریه اینشتین به صورت ضمنی وارد شده است. بدین ترتیب پیش بینی نظریه اینشتین درباره عدسی های گرانشی اثبات شد.

(شاید بپرسید چگونه این اختلاف زمانی اندازه گیری شد. اختروش ها کهکشانشان های غول پیکری هستند که در قلب خود یک سیاه چاله فوق سنگین دارند. ماده ستاره ای که درون سیاه چاله سقوط می کند، منبع انرژی اختروش را فراهم می آورد. نرخ مصرف ماده، و به دنبال آن انرژی خروجی اختروش، تغییر می کند. نتیجه آن است که روشنایی با زمان تغییر می کند. تصور کنید روشنایی تصویری که نور آن فاصله کوتاه تری را پیموده است به سرعت تا ۱۰٪ افزایش یابد. در این صورت ما این تغییر را در روشنایی تصویری که نور آن فاصله بیشتری می پیماید، پس از مدتی خواهیم دید، چیزی که به اختلاف طول این دو مسیر بستگی دارد. از مقایسه منحنی های



روشنایی مربوط به این دو تصویر، دریافتند که در اختلاف زمانی ۴۱۷ روز یک انطباق وجود دارد.) در دهه ۱۹۶۰، اروین شاپیرو<sup>۱۱</sup> متوجه شد که یک راه دیگر برای آزمودن نظریهٔ اینشتین وجود دارد که بالقوه بسیار دقیق تر است. شاپیرو یک پیشگام در ستاره‌شناسی راداری بود و دریافت زمان لازم برای اینکه یک پالس رادار به یک سیاره رفته، از آن بازگردد، در صورت عبور پالس از نزدیکی خورشید تغییر می‌کند. در شکل ۱۶-۴، قسمت الف مسیر مستقیم یک پالس رادار را به و از مریخ نشان می‌دهد که در آن فرض شده است خورشید وجود ندارد و در نتیجه فضا تخت است. مسیر ب نشان می‌دهد که به دلیل انحنای فضا اطراف خورشید، پالس راداری که در امتداد این مسیر ارسال شده است به سمت چپ کج شده، به مریخ نمی‌رسد. برای آنکه پالس به مریخ برسد باید مسیری را طی کند که اندکی به سمت راست موقعیت حقیقی آن است، مسیر ج، تا انحنای فضا نزدیک خورشید آن را به سمت مریخ کج کند. پالس بازگشتی نیز دقیقاً همین مسیر را دنبال می‌کند. با توجه به اینکه این پالس ناچار بود مسیر طولانی‌تری را در رفت و برگشت به مریخ پیماید، نسبت به زمانی که خورشید حضور نداشت مدت بیشتری را در راه بود. بنابراین پالس رادار دچار تأخیر می‌شود. این تأخیر، موسوم به تأخیر شاپیرو، که تا ۲۰۰ میکروثانیه می‌رسد، یک آزمون عالی را برای نظریهٔ اینشتین فراهم آورد.

آزمون‌های دیگر با استفاده از تأخیر شاپیرو، حتی با دقتی بیشتر، از پایش سیگنال‌های فضاپیما

هنگامی که مسیر سیگنال از کنار خورشید عبور می‌کرد، انجام شد. در سال ۱۹۷۹، تأخیر شاپیرو با دقت یک در هزار با استفاده از سیگنال‌های ارسالی از فضاپیما و ایکینگ روی مریخ اندازه‌گیری شد. اخیراً، مشاهدات دانشمندان ایتالیایی با استفاده از داده‌های فضاپیما کاسینی، در مسیر خود به سوی زحل در سال ۲۰۰۲، نظریه نسبیت عام اینشتین را با دقتی ۵۰ برابر بیش از اندازه‌گیری‌های گذشته تأیید کرد. در آن تاریخ، فضاپیما و زمین در دو سوی مخالف خورشید و به فاصله بیش از یک میلیارد کیلومتر از هم بودند. آن‌ها به دقت تغییر در زمان رفت و برگشت سیگنال رادیویی را هنگامی که از کنار خورشید می‌گذشت اندازه گرفتند. یک سیگنال از ایستگاه شبکه عمق فضا در گلدستون، کالیفرنیا<sup>۱۳</sup> مخابره شد. این سیگنال به فضاپیما در آن طرف خورشید رسید و یک سیگنال دیگر را که به گلدستون بازگشت فعال نمود. چندین شیوه بسامدی برای حذف اثر جو خورشید بر سیگنال مورد استفاده قرار گرفت، و بدین ترتیب زمان دقیق این سفر به دست آمد. آزمایش کاسینی نظریه اینشتین را با دقت ۲۰ در میلیون تأیید کرد.

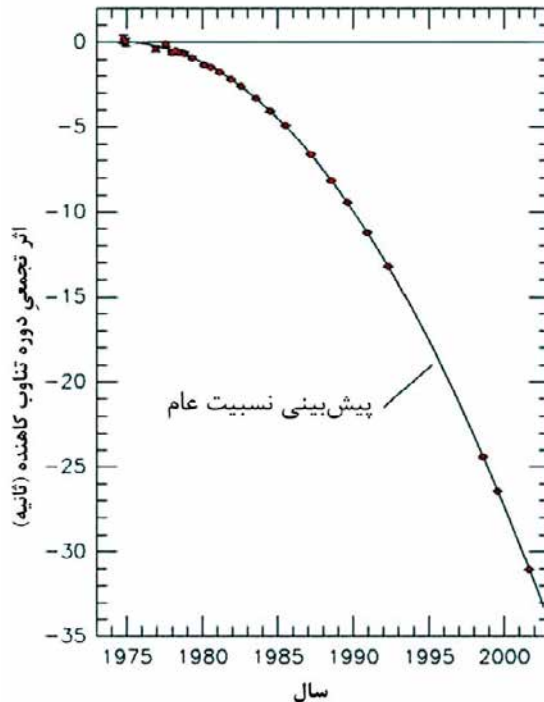
### ۱۶-۳ شبکه ماهواره‌ای سامانه موقعیت‌یاب جهانی<sup>۱۳</sup>

هرچند نمی‌توان آن را دقیقاً آزمایشی برای نظریه‌های اینشتین دانست، شبکه سامانه موقعیت‌یاب جهانی به زیبایی نشان می‌دهد که چطور، اگر دو نظریه اینشتین در نظر گرفته نشود، شبکه GPS نمی‌تواند کار کند. اساس کار GPS عبارت است از ارسال سیگنال‌های بسیار دقیق تنظیم زمان از شبکه‌ای از ماهواره‌هایی که دور زمین می‌چرخند. اگر محل ماهواره‌ها هنگام ارسال سیگنال‌های زمان معلوم باشد، یک دریافت‌کننده زمینی می‌تواند فاصله تا هر ماهواره مشاهده شده را حساب کند و بدین ترتیب موقعیت خود را بر سطح زمین به دست آورد. سیگنال‌های زمان از ساعت‌های اتمی با میزرها هیدروژنی<sup>۱۴</sup> استخراج می‌شود که در هر ماهواره حمل می‌گردد. ماهواره‌ها در ارتفاع حدود ۲۰,۲۰۰ کیلومتری و با سرعت  $14,000 \text{ km/s}$  به دور زمین گردش می‌کنند. هر دوی این عبارات قابل تأمل هستند. نظریه نسبیت خاص اینشتین نشان می‌دهد که یک ساعت متحرک، هرگاه از محلی در حال سکون مشاهده شود، به نظر می‌رسد کند کار می‌کند. نتیجه اینکه، اگر میزرها هیدروژنی طوری تنظیم شود که روی زمین سیگنال‌های زمانی دقیق را تولید کند، به نظر می‌رسد هنگامی که در مدار قرار دارد در هر روز  $7/2$  میلی‌ثانیه عقب می‌افتد. از این رو می‌توان ساعت را روی

زمین برای کارکرد سریع‌تر تنظیم کرد، به گونه‌ای که وقتی در مدار قرار گرفت، دقیق کار کند. اما در اینجا نظریهٔ نسبیت عام اینشتین نادیده گرفته شد. در ارتفاع ۲۰۰، ۲۰ کیلومتری، مقدار شتاب جاذبه،  $g$ ، در مقایسه با سطح زمین به اندازهٔ یک چهارم کاهش می‌یابد. در نتیجهٔ چیزی که قرمزگرایی گرانشی<sup>۱۵</sup> نام دارد، ساعت‌ها در میدان‌های گرانشی ضعیف‌تر سریع‌تر کار می‌کنند، پدیده‌ای که باعث می‌شود ساعت‌ها در آن ارتفاع، در مقایسه با سطح زمین، در هر روز ۴۵/۹ میکروثانیه جلو بیفتند. برای اینکه ساعت‌ها در مدار درست کار کنند، باید آن‌ها را بر روی زمین طوری تنظیم کرد که در هر روز حدود ۳۸/۷ میکروثانیه عقب بیفتند!

## ۱۶-۴ تپندهٔ دوتایی

با کشف نخستین تپندهٔ دوتایی<sup>۱۶</sup> در سال ۱۹۷۴ به وسیلهٔ راسل تیلر و جوزف هالس<sup>۱۷</sup>، پیشرفت بزرگ دیگر در آزمون نظریهٔ اینشتین فراهم آمد. تپنده‌ها را به تفصیل در فصل ۱۱ بحث کردیم، و این حقیقت که آن‌ها ساعت‌های فوق‌العاده دقیقی هستند آن‌ها را به ابزاری بسیار باارزش برای آزمایش نظریهٔ اینشتین تبدیل کرده است. در سامانهٔ تپندهٔ دوتایی که تیلر و هالس کشف کردند، یک تپنده با جرم  $1/4$  برابر خورشید در حال گردش به دور یک ستارهٔ همدم با جرم مساوی است؛ پس این سامانه از دو جسم هم‌چرخش با جرم ستاره‌ای تشکیل شده است. بر اساس پیش‌بینی نسبیت عام، چنین سامانه‌ای امواج گرانشی تابش می‌کند - موج‌هایی در فضا-زمان که با سرعت نور در جهان منتشر می‌شوند. هرچند امروزه آشکارسازهای امواج گرانشی در سراسر جهان فعال است، این تابش گرانشی بسیار ضعیف‌تر از آن است که مستقیماً آشکار شود. اما امواج گرانشی یک اثر را به دنبال دارد که می‌توان آن را شناسایی کرد. همین‌طور که سامانهٔ دوتایی در نتیجهٔ امواج گرانشی انرژی از دست می‌دهد، دو ستاره باید به تدریج با حرکتی مارپیچ به سمت هم حرکت کنند. این حقیقت که یکی از این دو جسم یک تپنده است این امکان را به ما می‌دهد که عناصر مداری سامانه را بسیار به دقت به دست آوریم. مشاهدات دقیق در مدت ۴۰ سال از زمانی که نخستین بار کشف شد (شکل ۱۶-۵)، نشان می‌دهد که چگونه دو جسم به آرامی و به صورت مارپیچ به هم نزدیک می‌شوند؛ دقیقاً مطابق با پیش‌بینی‌های اینشتین! تیلر و هالس به دلیل این کار برجسته در سال ۱۹۹۳ موفق به دریافت جایزهٔ نوبل در فیزیک شدند.



شکل ۱۶-۵: مشاهدات نخستین تپنده دوتایی به وسیله تیلر و هالس

و اما نوبت به یک سامانه تپنده دیگر می‌رسد، موسوم به تپنده دوگانه<sup>۱۸</sup>، که در آن هر دو جسم تپنده هستند. این سامانه یکی از سخت‌گیرانه‌ترین آزمون‌های نسبیت عام را تا این تاریخ فراهم آورده است. این سامانه در کاوشی کشف گردید که با تلسکوپ پارکز در استرالیا، و با استفاده از دریافت‌کننده‌ها و تجهیزات داده‌برداری<sup>۱۹</sup> که در رصدخانه جدرل بانک متعلق به دانشگاه منچستر ساخته شده بود، انجام گرفت. با تحلیل داده‌های حاصل به کمک یک ابررایانه در جدرل بانک، تپنده دوگانه در سال ۲۰۰۳ کشف شد. این سامانه از دو تپنده با جرم  $1/25$  و  $1/34$  برابر خورشید ساخته شده است که به ترتیب با نرخ چرخش  $2/8$  ثانیه و  $23$  میلی ثانیه دور خود می‌چرخند. آن‌ها در هر  $2/4$  ساعت یک بار دور هم گردش می‌کنند و نیم‌قطر بزرگ مدارشان اندکی کمتر از قطر خورشید است. ستاره‌های نوترونی با سرعت  $0.01\%$  سرعت نور در حرکت‌اند، از این‌رو این سامانه‌ای است که در آن، پدیده‌های نسبیت عام از هر سامانه دیگری آشکارتر است. در این لحظه زمانی،



پیش‌بینی نسبت عام این است که این دو ستاره نوترونی با نرخ ۷ میلی‌متر در روز به صورت مارپیچ به هم نزدیک می‌شوند. مشاهداتی که در سراسر جهان انجام شده است، شامل مشاهدات تلسکوپ لاول در جدرل بانک، نشان می‌دهد که این تقرب دقیقاً مطابق پیش‌بینی است.

در حقیقت، در همین یک سامانه، پنج پیش‌بینی نسبت عام را می‌توان آزمود. یکی از آن‌ها که دقت بالایی را فراهم آورده است اندازه‌گیری تأخیر شاپیرو است. از بخت خوب، لبه صفحه مداری دو تپنده رو به ما است. از این رو، هنگامی که یکی از دو تپنده در دورترین نقطه از ما قرار دارد، پالس‌های آن ناچار است از کنار تپنده نزدیک‌تر عبور کرده، به تلسکوپ‌های رادیویی ما برسد. لذا این پالس‌ها باید مسیر طولانی‌تری را از بین فضای منحنی اطراف تپنده نزدیک‌تر پیموده، دچار یک تأخیر که نزدیک به ۹۲ میکروثانیه است شوند. اندازه‌گیری‌های انجام شده با دقت ۰/۰۵٪ با تئوری همخوانی دارد. دست کم تا ۹۹/۹۵٪ حق با اینشتین است!

با توجه به نزدیک شدن تدریجی این دو ستاره نوترونی، زمانی در آینده فرا خواهد رسید که این دو ادغام شده، به احتمال زیاد یک سیاه‌چاله را خواهند ساخت. در زمان ادغام این دو، چیزی تولید خواهد شد که تنها می‌توان آن را سونامی موج گرانشی نامید. شدتی که برای چنین موج گرانشی پیش‌بینی می‌شود به اندازه‌ای است که این موج را بتوان به وسیله آشکارسازهای موج گرانشی که در زمین ساخته می‌شود آشکار کرد. احتمالاً دیری نخواهد پایید که موج گرانشی، به جای اینکه استنباط گردد، مستقیماً آشکار شود.

اما چطور می‌توان این موج گرانشی را آشکار کرد؟ شاید روش ممکن برای تشخیص یک موج سونامی که اقیانوس را درمی‌نوردد، در اینجا به کار آید. در یک آزمایش ذهنی، فرض کنید دو قایق در فاصله یک کیلومتر از یکدیگر قرار دارند و یک دستگاه دقیق لیزری، فاصله بین آن دو را اندازه می‌گیرد. چنانچه یک موج سونامی ابتدا به یکی از آن‌ها برسد، قایق، در حین عبور موج از زیر آن، یک حرکت دایره‌ای پیدا می‌کند. بدین ترتیب یک تغییر کوچک و لحظه‌ای در فاصله بین دو قایق ایجاد می‌شود، و دستگاه لیزری آن را آشکار می‌سازد. کمی بعد، موج به قایق دوم خواهد رسید و بار دیگر تغییری در فاصله احساس می‌گردد. البته توجه داشته باشید اگر موج سونامی همزمان و از کنار به هر دو قایق برخورد کند آشکار نمی‌شود، زیرا حرکت قایق‌ها عمود بر فاصله مورد اندازه‌گیری است. برای غلبه بر این معضل، باید از سه قایق که یک مثلث قائم‌الزاویه را می‌سازند استفاده کرد.



شکل ۱۶-۶: آشکارساز موج گرانشی لیگو. دو بازوی عمود بر هم را می بینید.

بدین ترتیب امواج از هر زاویه‌ای به قایق‌ها برسند شناسایی می‌شوند. این دقیقاً همان شیوه‌ای است که در آشکارسازهای موج گرانشی، همچون لیگو<sup>۲۰</sup> در آمریکای شمالی، به کار گرفته می‌شود (شکل ۱۶-۶). لیگو از ابزاری موسوم به تداخل‌سنج لیزری استفاده می‌کند. این وسیله می‌تواند زمانی را که طول می‌کشد تا نور فاصله بین دو آینه معلق را بییماید با دقت بسیار زیاد اندازه بگیرد. این دو آینه، به فاصله ۴ کیلومتر از یکدیگر، یک بازوی تداخل‌سنج را می‌سازند؛ و دو آینه دیگر نیز بازوی دوم را به وجود می‌آورند که بر بازوی نخست عمود بوده، شکلی مانند حرف L تشکیل می‌شود. نور لیزر از محل تقاطع دو بازو وارد می‌شود و یک باریکه شکاف<sup>۲۱</sup> آن را بین دو بازو تقسیم می‌نماید. نور لیزر پیش از بازگشت به باریکه شکاف، چندین بار بین دو آینه رفت و برگشت می‌کند. هرگونه انحرافی در طول مسیر را می‌توان با دقت فوق‌العاده زیاد اندازه گرفت - جنبش‌هایی به کوچکی یک هزارم قطر پروتون قابل‌اندازه‌گیری است! برای دستیابی به این دقت، آینه‌ها و مسیرهای نور بین آن‌ها در یکی از بزرگ‌ترین دستگاه‌های خلأ در جهان قرار داده می‌شوند. این دستگاه، با حجمی نزدیک به ۸۵۰۰ مترمکعب، تا فشار تنها یک تریلیونیم فشار جو تخلیه می‌گردد. دستگاه‌های بسیار دقیقی لازم است تا آینه‌های معلق را از ارتعاشات طبیعی، همچون لرزه‌های زمین، جدا سازد.

تا این تاریخ، هیچ موج گرانشی به صورت مستقیم آشکار نشده است. آشکارسازهای موج

گرانشی نخواهند توانست ادغام دو ستاره نوترونی را در تپنده دوگانه آشکار نمایند، چراکه بر اساس پیش‌بینی، این رویداد بعد از ۸۴ میلیون سال رخ خواهد داد. با وجود این، به اعتقاد ما چنین سامانه‌های دوتایی فراوان است، و چنین رویدادی باید در مقیاس‌های زمانی چندساله در کهکشان ما اتفاق افتد. تا سال ۲۰۱۵ حساسیت دستگاه‌های لیگو تا حد زیادی ارتقاء خواهد یافت و آنگاه، بیشتر اتفاقاتی که در جهان پیرامون ما رخ می‌دهد قابل شناسایی خواهد بود - آشکارسازی مستقیم امواج گرانشی نباید چندان دور باشد.

با وجود آنچه گفته شد، گرچه نشان می‌دهیم که نظریهٔ اینشتین با دقت زیادی برقرار است، این نمی‌تواند تمام داستان باشد. در حال حاضر یکی از پیچیده‌ترین مسائل در فیزیک نظری، تلاش برای هماهنگ نمودن نظریهٔ نسبیت عام با مکانیک کوانتومی است. (نسبیت عام به تشریح گرانش می‌پردازد و به ساختار بزرگ مقیاس جهان، شامل ستارگان، سیارات و کهکشان‌ها، مربوط است. اما مکانیک کوانتومی، نیروهای بنیادی را که در مقیاس اتمی ماده عمل می‌کنند، توصیف می‌نماید.) تصور رایج این است که مکانیک کوانتومی و نسبیت عام آشتی ناپذیرند، اما می‌توان نسبیت عام را به ذرات بی‌جرمی موسوم به گراویتون<sup>۲۲</sup> مرتبط کرد. وجود این ذرات هرگز اثبات نشده است، اما نظریات کوانتیدهٔ ماده، وجود آن‌ها را لازم می‌داند. آن‌ها، با حمل اطلاعات دربارهٔ تغییرات در توزیع جرم، مانند ذرات پیام‌رسان عمل می‌کنند؛ به همان صورتی که نیروهای بنیادی دیگر نیز ذرات پیام‌رسان دارند. برای مثال، فوتون، پیام‌رسان نیروی الکترومغناطیسی است، و گلوئون<sup>۲۳</sup> پیام‌رسان نیروی قوی است (نیرویی که گروه‌های سه‌تایی کوارک را به هم پیوند می‌دهد تا پروتون و نوترون ایجاد شود).

گراویتون یک عنصر اصلی در بیشتر فیزیک نظری مدرن است. یک کوشش اصلی در برخورددهندهٔ بزرگ هادرونی<sup>۲۴</sup>، بزرگ‌ترین شتاب‌دهنده و برخورددهندهٔ جهان، فراهم آوردن شواهدی بر وجود گراویتون است، هرچند بعید است بتواند آن را آشکار نماید.

یک مشکل آن است که نیروی گرانش حدود  $10^{39}$  بار ضعیف‌تر از دیگر نیروهایی است که جهان را کنترل می‌کنند. یک نظر آن است که شاید، گرانش واقعاً یک قدرت ذاتی شبیه به دیگر نیروها دارد، با این تفاوت که ضعیف‌تر به نظر می‌رسد چون که در فضایی با ابعاد بیشتر عمل می‌کند. این ایده ارتباطی با نظریه‌های ریسمان پیدا می‌کند، جایی که ممکن است در حقیقت ۱۱

بعد وجود داشته باشد. شش بعد از این ابعاد یازده گانه، محکم درهم پیچیده اند و ذرات بنیادی (موسوم به ریسمان) را می سازند. روش ارتعاش این ریسمان ها، نوع ذره را تعریف می کند. چهار بعد دیگر به فضا و زمان تعلق دارد. بدین ترتیب یک بعد باقی می ماند. برخی بر این عقیده اند که گراویتون می تواند به این بعد مخفی نفوذ کند، و از این رو، گرانش به نظر بسیار ضعیف تر از چیزی است که واقعاً هست.

هنوز چیزهای زیادی است که نمی دانیم و باید فراگیریم!

## پانوشتها

- 1 - Gravitational Waves
- 2 - Continuum
- 3 - Hovercraft
- 4 - Sir Arthur Eddington
- 5 - Atlantic island of Principe
- 6 - Sobral in Brazil
- 7 - William Campbell's team from the Lick Observatory
- 8 - Gravitational Lens
- 9 - Einstein ring
- 10 - Quasi-Stellar Object
- 11 - Irwin A. Shapiro
- 12 - Deep Space Network station in Goldstone, California
- 13 - Global Positioning System satellite network (GPS)
- 14 - Hydrogen Maser Atomic Clock
- 15 - Gravitational Redshift
- 16 - Binary Pulsar
- 17 - Russell Taylor and Joseph Hulse
- 18 - Double Pulsar
- 19 - Data Acquisition Equipment
- 20 - Laser Interferometer Gravitational Wave Observatory (LIGO), in North America
- 21 - Beam Splitter
- 22 - Graviton
- 23 - Gluon
- 24 - Large Hadron Collider

## فصل ۱۷

### سیاه چاله؛ لازم به ترس نیست!

به نظر می‌رسد شهرت سیاه چاله‌ها از آنجا است که تصور می‌شود در کهکشان راه افتاده، هر سیاره و ستاره‌ای را که سر راهشان می‌بینند بالا می‌کشند! واقعاً این طور نیست. اگر خورشید ما یک سیاه چاله بود، ما به گردشمان به دور آن، درست مانند حالا ادامه می‌دادیم - در آن صورت تنها از گرما و نور خبری نبود. حتی اگر ستاره‌ای به سمت یک سیاه چاله پرجرم حرکت می‌کرد، به احتمال زیاد تاب خورده، از کنار آن می‌گذشت - درست مانند این حقیقت که تعداد بسیار اندکی از دنباله‌دارها به خورشید برخورد می‌کنند، بلکه از کنار آن رد می‌شوند تا شاید دوباره بازگردند. حال اگر قوت قلبی گرفته‌اید، به بحث پیرامون سیاه چاله‌ها می‌پردازیم.

#### ۱-۱۷ سیاه چاله چیست؟

اگر توپی را در استوا با یک سرعت فزاینده به صورت عمودی به هوا پرتاب کنیم، نقطه‌ای وجود خواهد داشت که سرعت توپ به  $11/2 \text{ km/s}$  می‌رسد. در این صورت توپ به زمین بازمی‌گردد، بلکه از کشش گرانش زمین فرار می‌کند. این سرعت فرار زمین است. اگر چگالی زمین بیشتر بود (جرم آن بیشتر، یا شعاعش کوچک‌تر بود، و یا هر دو)، سرعت فرار افزایش می‌یافت. پییر سیمون لاپلاس<sup>۱</sup> دریافت که اگر جرم درون یک حجم معین از مقداری بیشتر باشد، سرعت فرار از سرعت نور تجاوز می‌کند، و از این رو حتی نور نیز نمی‌تواند بگریزد. مدت‌ها بعد، فیزیکدان برجسته آمریکایی جان ویلر<sup>۲</sup>، نام «سیاه چاله» را برای چنین جسمی ابداع نمود.

تصور کنید چگالی زمین به شدت افزایش می‌یافت و درعین حال زمین می‌توانست اندازه فعلی خود را حفظ کند، به طوری که سرعت فرار در سطح زمین به مرز سرعت نور می‌رسید و لذا به یک سیاه چاله تبدیل می‌شد. در این صورت سطح زمین به چیزی که افق رویداد<sup>۳</sup> سیاه چاله نام دارد

تبدیل می‌گردید. البته حقیقت آن است که این گرانش بی‌اندازه، مواد زمین را له کرده، به چیزی با اندازه صفر و چگالی بی‌نهایت در مرکز آن تبدیل می‌کند که اغلب با عنوان تکینگی<sup>۴</sup> از آن یاد می‌شود. با وجود این، افق رویداد دقیقاً همان اندازه باقی می‌ماند. نکته بنیادی آن است که قطر افق رویداد تنها به جرم ماده تشکیل‌دهنده سیاه‌چاله وابسته است و هیچ ارتباطی به حجم آن ندارد. همان‌طور که در ادامه خواهیم دید، بر این باوریم که تقریباً تمام درون سیاه‌چاله را فضای خالی پر کرده است.

سیاه‌چاله‌ها هیچ اندازه و جرمی که دقیقاً تعریف شده باشد ندارند. تا همین چند وقت پیش، ما تنها به شواهد وجود سیاه‌چاله در دو وضعیت دست یافته بودیم. اول آنکه، با جرمی معادل میلیون‌ها خورشید، در قلب کهکشان‌ها یافت می‌شوند و سیاه‌چاله‌های قوق سنگین نام دارند؛ و دومین وضعیت آنکه، بر این باوریم از رمبش ستاره‌های غول به جرم ۲۰ برابر خورشید یا بیشتر، که هسته آن‌ها جرمی متجاوز از حدود ۴ برابر خورشید دارد، سیاه‌چاله پدید می‌آید. این نقطه‌ای است که در آن، بر اساس باور ما، فشار تبهگنی نوترونی (که باعث می‌شود هسته‌های ستاره‌ای در محدوده جرم ۱/۴ تا ۳ برابر جرم خورشید، ستاره نوترونی بسازند) دیگر نمی‌تواند از رمبش گرانشی جلوگیری کند. اخیراً شواهدی مبنی بر وجود سیاه‌چاله‌های میان‌جرم، شاید به جرم ۴۰/۰۰۰ برابر خورشید، در حال ایجاد است. این سیاه‌چاله‌ها در مرکز آنچه در گذشته به عنوان خوشه‌های کروی دسته‌بندی شده‌اند یافت گردیده‌اند. امگا قنطورس یکی از این خوشه‌ها است. اما گواه بر وجود یک سیاه‌چاله، همراه با این حقیقت که این خوشه، ستاره‌های جوان بسیار بیشتری نسبت به آنچه از نام خوشه کروی برمی‌آید در بر گرفته است، بر این دلالت دارد که شاید آن، به جای خوشه کروی، هسته باقیمانده از یک کهکشان کوتوله باشد که ستاره‌های بیرونی آن به وسیله پدیده‌های گرانشی کهکشان راه‌شیری از اطراف آن پراکنده شده‌اند.

احتمالاً بر اساس نظریه نسبیت عام اینشتین بهتر می‌توان سیاه‌چاله را تصور نمود. این نظریه اظهار می‌دارد که یک جسم پرجرم، فضای اطراف خود را آشفته کرده، به صورت منحنی درمی‌آورد، به گونه‌ای که برای مثال، نور دیگر در خط راست حرکت نمی‌کند، بلکه اطراف محل جرم دور می‌زند. به زبان ساده، سیاه‌چاله جایی است که جرم آن قدر بزرگ است که انحنای فضا به خود برمی‌گردد، و لذا نور نمی‌تواند فرار کند.

## ۱۷-۲ سیاه چاله شوارتس شیلد

در ساده ترین مورد، هنگامی که باقیمانده ستاره دارای چرخش نیست، افق رویداد شعاعی دارد موسوم به شعاع شوارتس شیلد، که مستقیماً متناسب با جرم است.

درون یک افق رویداد برای همیشه از ما پوشیده است. اما نظریه های اینشتین وجود یک تکینگی را در مرکز یک سیاه چاله غیرچرخان پیش بینی می کند، نقطه ای با حجم صفر و چگالی بی نهایت، که تمام جرم سیاه چاله در آنجا قرار گرفته است و فضا-زمان به صورت بی نهایت درهم پیچیده شده است. من علاقه ای به تکینگی ندارم؛ به نظر اینشتین آن ها نقاطی هستند که قوانین فیزیک برای تشریح آنچه وجود دارد ناکافی است. ما می دانیم که به هر طریق، نظریه های کلاسیک اینشتین درباره گرانش بایستی با نظریه کوانتوم ترکیب شود، و لذا نسبت تقریباً به طور قطع نمی تواند آنچه را در قلب سیاه چاله رخ می دهد، پیش بینی نماید. ما نامی را برای نظریه مربوطه برگزیده ایم - گرانش کوانتومی - اما هنوز باید فرمول بندی شود.

بر اساس فیزیک ذرات، هستک ها از کوارک های بالا و پایین ساخته شده اند. ممکن است در چگالی هایی بالاتر از آنچه به وسیله فشار تبهگنی نوترونی قابل تحمل است، ماده کوارکی پیش آید، یعنی گازی تبهگن از کوارک ها. ماده تبهگن کوارکی ممکن است در هسته ستاره های نوترونی واقع شود و همچنین ممکن است در ستارگان فرضی کوارکی نیز پدید آید. اینکه آیا ماده تبهگن کوارکی می تواند در این مواقع وجود داشته باشد یا نه، بستگی دارد به معادلات حالت مربوط به ماده تبهگن نوترونی و همچنین معادلات حالت مربوط به ماده تبهگن کوارکی؛ چیزی که اطلاعات ما راجع به آن کم است. برخی نظریه پردازان معتقدند که حتی کوارک ها نیز از ذرات بنیادی تری بنام پرتون<sup>۵</sup> ساخته شده اند. در این صورت، ماده تبهگن پرتونی می تواند در فشارهایی بالاتر از حد قابل تحمل ماده تبهگن کوارکی وجود داشته باشد. آیا ماده موجود در قلب سیاه چاله به شکل یکی از این مواد است؟

بیابید تنها فرض کنیم ماده در قلب یک سیاه چاله به جرم  $10$  برابر خورشید به شکل ماده تبهگن کوارکی است. این سیاه چاله چه اندازه ای دارد؟ قطر نوترون حدود  $10^{-15}$  m است و تصور بر این است که قطر کوارک بیش از  $10^{-18}$  m نباشد. اجازه دهید فرض کنیم قطر کوارک  $10^{-18}$  m

است، پس ۱۰۰۰ بار از قطر نوترون کمتر است. قطر یک ستاره نوترونی به جرم  $1/4$  برابر خورشید حدود ۲۰ کیلومتر می‌باشد. با توجه به اینکه حجم متناسب با توان سوم قطر است، حجم یک توده کوارک به جرم  $1/4$  خورشید  $(10^3)$  بار کوچک‌تر است (اگر در هر نوترون یک کوارک وجود داشت)؛ به عبارت دیگر قطر این توده  $m \frac{20000}{1000000000}$  است، برابر با  $0/00002$  متر یا  $0/02$  میلی‌متر! چون به ازای هر نوترون، سه کوارک وجود دارد، مقدار بالا باید تا حدی افزایش یابد. از آنجا که سیاه‌چاله حدود هفت بار پرجرم‌تر است، قطر جرم کوارکی حدود دو برابر است، یا  $0/04$  میلی‌متر [توضیحات پاورقی قبل را ببینید]. این مقدار بسیار کوچک است، اما بی‌نهایت کوچک نیست. البته اگر همان‌طور که برخی اعتقاد دارند، کوارک نقطه‌ای بوده، اندازه نداشته باشد، چه کسی می‌تواند بگوید تکینگی وجود ندارد.

هرچه جرم سیاه‌چاله بیشتر باشد، اندازه شعاع شوارتس‌شیلد بزرگ‌تر است: سیاه‌چاله‌ای با جرمی ۱۰ برابر دیگری، شعاعی ۱۰ برابر آن خواهد داشت. شعاع یک سیاه‌چاله با جرمی معادل خورشید، ۳ کیلومتر است؛ بنابراین شعاع سیاه‌چاله‌ای با جرم ۱۰ خورشید، ۳۰ کیلومتر خواهد بود.

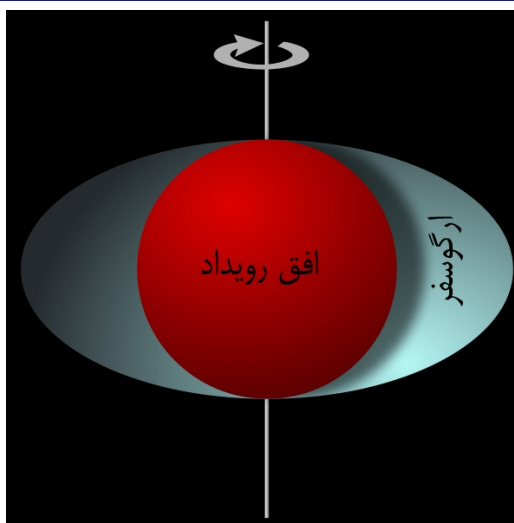
### ۱۷-۳ سیاه‌چاله کر

قضیه‌ای وجود دارد، موسوم به قضیه بدون مو<sup>۷</sup>، که ادعا می‌کند تمام پاسخ‌های سیاه‌چاله‌ای مربوط به معادلات اینشتین-ماکسول در ارتباط با گرانش و الکترومغناطیس، به‌طور کامل به وسیله تنها سه ویژگی قابل مشاهده توصیف می‌گردد: جرم، بار الکتریکی. تکانه زاویه‌ای. به مجرد اینکه ماده به درون افق رویداد سقوط کرد، تمام اطلاعات دیگر (واژه مو استعاره‌ای است برای این) درباره ماده ناپدید می‌گردد و به‌طور دائم از دسترس ناظر بیرونی خارج می‌شود. (این تا حدی قابل مناقشه است، زیرا این قضیه، این اصل را که اگر اطلاعات کامل درباره یک دستگاه فیزیکی در یک نقطه از زمان معلوم باشد در هر زمان دیگری باید بتوان حالت آن را تعیین کرد، نقض می‌نماید).

در بزرگ‌مقیاس، ماده خنثی است، لذا تصور نمی‌شود که سیاه‌چاله‌ها حامل بار الکترومغناطیسی باشند؛ اما از طرف دیگر، ستارگان، غبار و گازی که ممکن است به شکل سیاه‌چاله درآیند دارای تکانه زاویه‌ای -انرژی چرخشی- هستند همان‌طور که یک ستاره چرخان دارد. از این رو، در کل تصور بر این است که سیاه‌چاله‌ها در حال چرخش هستند. این موضوع آن‌ها را

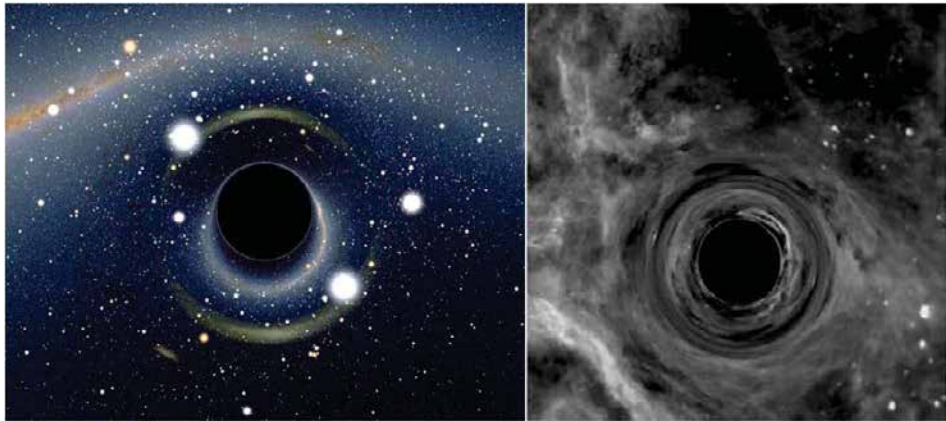


شکل ۱۷-۱: سیاه چاله کِر



بسیار جالب‌تر می‌کند، اما در عین حال بسیار پیچیده‌تر! ژمی کِر<sup>۹</sup> نخستین کسی بود که در سال ۱۹۶۳ پاسخ‌های لازم برای یک سیاه چاله چرخان را به دست آورد، و از این رو آن‌ها را سیاه چاله کِر<sup>۹</sup> می‌نامند. بر این باوریم که اکثریت عمده سیاه چاله‌ها در ابتدا از این نوع هستند، اما سازوکاری وجود دارد (با نامی برگرفته از راجر پنروز<sup>۱۰</sup>) که به صورت نظری اجازه می‌دهد یک سیاه چاله چرخان تکانه زاویه‌ای از دست بدهد. لذا احتمالاً این سیاه چاله‌ها در نهایت به سیاه چاله‌های شوارتس شیلد تبدیل شوند.

مانند سیاه چاله شوارتس شیلد، در قلب سیاه چاله کِر نیز یک تکینگی وجود دارد که به وسیله افق رویداد محاصره گردیده است، اما پس از آن، یک ناحیه تخم‌مرغی شکل از فضای درهم پیچیده است که ارگوسفر نام دارد (شکل ۱۷-۱). عامل ایجاد ارگوسفر، چرخش سیاه چاله است، چیزی که فضا را در اطراف آن با خود می‌کشد. (این پدیده، موسوم به کشید چارچوب<sup>۱۱</sup>، روشی را برای اینکه دریابیم سیاه چاله در حال چرخش است در اختیار ما قرار می‌دهد.) مرز ارگوسفر و فضای معمولی در ورای آن را حد ایستا<sup>۱۲</sup> می‌نامند. جسمی که درون ارگوسفر قرار دارد می‌تواند از چرخش سیاه چاله انرژی کسب کند و پرتاب شود. بدین ترتیب در فرایندی موسوم به فرایند پنروز<sup>۱۳</sup>، تکانه زاویه‌ای از سیاه چاله گرفته می‌شود. البته اگر جسمی از افق رویداد عبور کند، هرگز قادر به فرار نخواهد بود.



شکل ۱۷-۲: شبیه‌سازی یک سیاه‌چاله مجاور بین ما و راه‌شیری

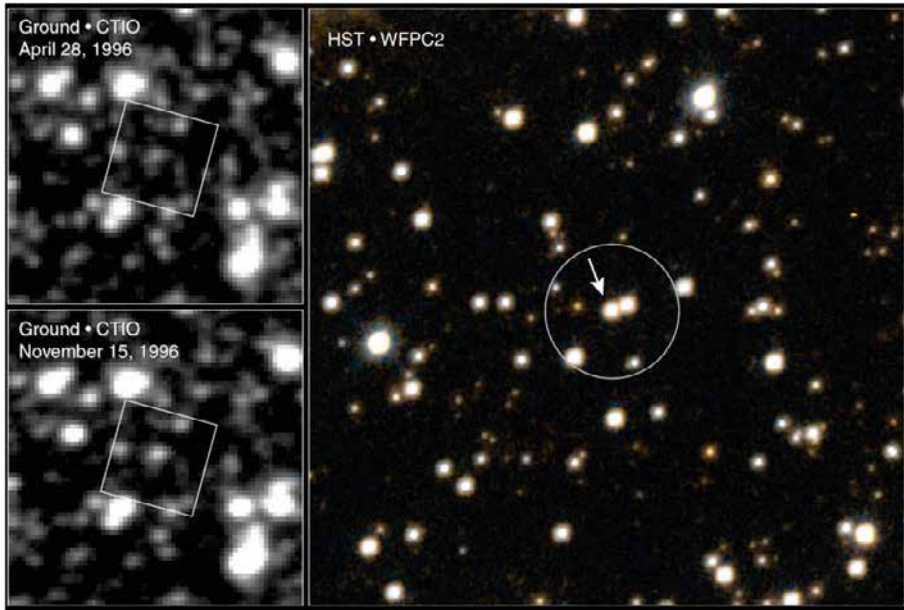
## ۱۷-۴ چگونه می‌توانیم آن‌ها را کشف کنیم؟

### آیا می‌توانیم آن‌ها را ببینیم؟

گرچه هرگز کسی یک سیاه‌چاله را به صورت مستقیم ندیده است، این امکان، دست کم بر اساس اصول، وجود دارد که اگر کسی به اندازه کافی نزدیک شود، یکی از آن‌ها را ببیند. این موضوع ناشی از این حقیقت است که جرم آن، فضا-زمان را در اطرافش از حالت طبیعی خارج کرده، با ایجاد عدسی گرانشی، آنچه را در ورای آن می‌بینیم کج و معوج می‌سازد. این عدسی تقریباً شبیه به قاعده یک لیوان بلور عمل می‌کند و منابع نقطه‌ای را به شکل کمان یا حتی دایره درمی‌آورد، چیزی که به حلقه‌های اینشتین<sup>۱۴</sup> معروف است. دو تصویر در **شکل ۱۷-۲** نشان می‌دهند اگر کسی به اندازه کافی به یک سیاه‌چاله که بین ما و راه‌شیری قرار دارد نزدیک شود چه مشاهده می‌کند. با توجه به اینکه تصویر به هم پیچیده راه‌شیری یک دایره کاملاً سیاه را احاطه کرده است، می‌توان این‌طور گفت که ما در حال دیدن سیاه‌چاله‌ایم، گرچه البته ما تنها سایه آن را می‌بینیم.

### با استفاده از ریزعدسی گرانشی

پدیده عدسی گرانشی مربوط به یک جرم عظیم، راه دیگری را برای تشخیص یک سیاه‌چاله در اختیار ما قرار می‌دهد. از آنجاکه این جرم تقریباً مانند یک عدسی کوژ یا ذره بین عمل می‌کند، تصویر یک ستاره را که پشت آن قرار دارد روشن‌تر می‌سازد. این پدیده، هزاران بار در هنگام عبور



شکل ۱۷-۳: مشاهدات از یک رویداد ریزعدسی

یک ستاره نزدیک از مقابل یک ستاره دور مشاهده شده است. در آنچه که به رویداد ریزعدسی گرانشی<sup>۱۵</sup> معروف است، روشنایی ستاره دور ممکن است تا حد بسیار زیادی افزایش یابد. (اگر ستاره پیش‌زمینه دارای سیاره‌ای اطراف خود باشد که آن هم از مقابل ستاره دور عبور می‌کند، این سیاره نیز می‌تواند سبب افزایش روشنایی شود؛ این خود شیوه‌ای است برای شناسایی سیارات فرامنظومه‌ای.) اگر، آن‌چنان‌که انتظار می‌رود، باقیمانده‌هایی از سیاه‌چاله وجود داشته باشد که در کهکشان در حال گردش باشند، آن‌ها نیز منجر به رویدادهای عدسی می‌شوند، و بدین ترتیب حضور آن‌ها قابل تشخیص است.

در سمت چپ شکل ۱۷-۳، دو تصویر از یک میدان ستاره‌ای وجود دارد که با یک تلسکوپ زمینی رصد شده است و روشنایی یک ستاره را ناشی از رویداد ریزعدسی گرانشی نشان می‌دهد. در سمت راست تصویر تلسکوپ فضایی هابل از همان میدان است که به وضوح ستاره عدسی شده (ستاره دور) را تفکیک می‌کند و لذا روشنایی واقعی آن را تعیین می‌نماید. با توجه به افزایش در روشنایی، می‌توان دریافت که جرم جسم پیش‌زمینه باید دست کم ۶ برابر خورشید باشد. اگر این

جسم ستاره بود، دیده می‌شد و ستاره پس‌زمینه را تحت الشعاع قرار می‌داد. چون هیچ ستاره پیش‌زمینه‌ای دیده نمی‌شود، می‌توان به این نتیجه رسید که جرمی که تولید عدسی می‌کند باید یک سیاه‌چاله باشد.

### با تعیین جرم یک ستاره همدم ناپیدا

سیاه‌چاله‌ای با جرم ستاره زمانی ایجاد می‌شود که یک ستاره پرجرم با یک انفجار ابرنواختری به زندگی خود پایان می‌دهد. اگر این نوع سیاه‌چاله به صورت مجزا وجود داشته باشد، شناسایی آن، جز با شیوه ریزعدسی گرانشی که پیش‌ازاین توضیح داده شد، بسیار مشکل خواهد بود. اما ستارگان بسیاری در سامانه‌های دوتایی به سر می‌برند. در یک سامانه دوتایی که یکی از اعضای آن سیاه‌چاله است، گرانش سیاه‌چاله می‌تواند ماده را از ستاره همدم به سوی خود کشیده، یک قرص برافزایشی<sup>۱۶</sup> از گاز تشکیل دهد که به صورت مارپیچ روی سیاه‌چاله می‌ریزد. به دلیل پایستاری تکانه زاویه‌ای، با نزدیک شدن گاز به سیاه‌چاله، سرعت چرخش آن افزایش می‌یابد. سرعت‌های تفاضلی چرخشی که بدین ترتیب به وجود می‌آید باعث اصطکاک بین لایه‌های قرص شده، دمای ماده را تا بیش از یک میلیون کلوین بالا می‌برد. از این رو این مواد شروع به تابش می‌نمایند که بیشتر آن در قسمت پرتو ایکس طیف است. تلسکوپ‌های پرتو ایکس تعداد زیادی از این سامانه‌های پرتو ایکس را تاکنون شناسایی کرده‌اند. تصور می‌شود که در برخی از این سامانه‌ها یک سیاه‌چاله وجود داشته باشد.

اگر جرم همدم نامرئی از حدود ۴ برابر خورشید بیشتر باشد، احتمالاً یک سیاه‌چاله است. یک نمونه عالی در کهکشان ما دجانه<sup>۱۷</sup> X-1 است. علت این نام‌گذاری آن است که اولین منبع پرتو ایکس بود که در صورت فلکی دجانه<sup>۱۸</sup> کشف شد و بارزترین منبع پرتوهای پرنانرژی ایکس در آسمان است. این سامانه، که معمولاً Cyg X-1 نامیده می‌شود، یک سامانه ستاره دوتایی است و شامل ستاره‌ای ابرغول با دمای سطحی ۳۱,۰۰۰ کلوین (که رده طیفی آن روی مرز بین O و B واقع شده است) و یک جسم فشرده می‌شود. جرم ستاره ابرغول ۲۰ تا ۴۰ برابر خورشید است و مشاهدات انجام‌گرفته روی پارامترهای مداری آن، همدمی را به جرم ۸/۷ برابر خورشید نشان می‌دهد. این

مقدار به خوبی بالاتر از حد ۴ برابر جرم خورشید برای ستارگان نوترونی است، بنابراین تصور می‌شود که یک سیاه چاله باشد.

در ادامه، ماجرای کشف یکی از بهترین نامزدهای سیاه چاله در کهکشان راه شیری می‌آید که من در آن نقش کوچکی داشتم.

در تابستان سال ۱۹۷۵، یک ماهواره پرتو ایکس موسوم به آرپل چهار<sup>۱۹</sup> که دانشگاه لیستر آن را ساخته و عملیاتی کرده بود، یکی از قوی‌ترین منابع پرتو ایکس را که تا آن زمان مشاهده شده بود کشف کرد. این منبع در صورت فلکی تک شاخ<sup>۲۰</sup> قرار داشت، سمت چپ صورت فلکی جبار. متأسفانه در آن روزها ماهواره‌های پرتو ایکس نمی‌توانستند موقعیت دقیق را در اختیار قرار دهند، لذا امکان تعیین سامانه ستاره‌ای که منجر به این زبانه می‌شد، و به دنبال آن مشاهدات در دیگر طول موج‌ها، میسر نبود.

پروفسور کن پاوندز<sup>۲۱</sup> با من تماس گرفت و پرسید که آیا تلسکوپ‌های جدرل بانک می‌توانند در تعیین مکان منبع این زبانه پرتو ایکس مورد استفاده قرار گیرند؛ چراکه احتمال داشت این منبع، مقادیر قابل توجهی گسیل رادیویی نیز داشته باشد. من بلافاصله تلسکوپ مارک دو را برای رصد ناحیه‌ای از آسمان که مشاهدات آرپل چهار اشاره داشت، مورد استفاده قرار دادم، اما هیچ منبع رادیویی روشنی مشاهده نشد. به نظر می‌رسد هیچ تلسکوپ رادیویی یا اپتیکی دیگری نیز در آن زمان نمی‌توانست منبع گسیل پرتو ایکس را آشکار نماید.

متأسفانه، یک تلسکوپ دیگر که می‌توانست با مارک دو ترکیب شده، وسیله‌ای عالی را برای کاوش بسازد به وسیله رصدگران مهمان در حال استفاده بود. اما یک هفته بعد، بار دیگر امکان استفاده آن فراهم آمد و توانستیم یک کاوش حساس را با تمرکز بر موقعیت اسمی آغاز کنیم. در آن روزها نقشه‌های کاغذی مورد استفاده قرار می‌گرفت و نقشه آسمان که بدین ترتیب تولید شد حدود ۶ متر عرض داشت. از بخت خوش، ما آسمان را به اندازه کافی برای یافتن امواج رادیویی که از جسم شعله‌ور گسیل می‌شد، کاوش کرده بودیم؛ این جسم در فاصله چهار اینچی از لبه نقشه ما قرار داشت - بسیار دورتر از موقعیت اسمی آن. روز مهیجی بود! موقعیت دقیق جسم و مشاهدات رادیویی بعدی ما در مجله *Nature* در کنار نتایج ابتدایی پرتو ایکس منتشر شد. این منبع دو نام

دارد، تک شاخ ایکس یک<sup>۲۲</sup>، و A0620-00. نام اخیر یک ویرایش کوتاه از موقعیت ما است: بُعد  $۰۰^{\circ}۲۰'۴۵''$  و  $۰۶^h ۳۳^m ۴۴/۵^s$ .

رصدهای گسترده در دهه ۱۹۸۰ مشخص کرد که این منبع، به صورتی قابل مناقشه، بهترین نامزد برای سیاه چاله (با جرم ستاره) بود که تا آن زمان کشف گردیده بود. زبانه پرتو ایکس را ماده ستاره همدم که در حال سقوط بر قرص برافزایشی اطراف سیاه چاله بود تولید می کرد. A0620-00 قبلاً در سال ۱۹۱۷ نیز زبانه کشیده بود. زبانه ای که در سال ۱۹۷۵ رصد شد شدیدترین زبانه ای است که تاکنون مشاهده شده است. پس چرا ما بر این باوریم که یک سیاه چاله عامل این فوران های پرتو ایکس بود؟ در موقعیتی که ما به دست آوردیم یک ستاره از رده K دیده می شود. جرم این ستاره ها نوعاً ۰/۵ تا ۰/۸ برابر جرم خورشید است. با توجه به اندازه گیری های طیف این ستاره، می توان استنباط کرد که ستاره با دوره تناوب ۰/۳۲ روز، با سرعت مداری ۴۶۰ km/s، در حال گردش به دور یک جسم ناپیدا است. احتمالاً این اندازه گیری ها برای شما آشنا است؛ در فصل ۱۲ توضیح دادیم که چگونه با این روش می توان وجود یک سیاره را اطراف ستاره استنباط نمود، و فاصله آن از ستاره و جرم کمینه آن را محاسبه کرد. در مورد کنونی، زمانی که دو جسم سنگین هم گردش<sup>۲۳</sup> وجود دارد، از حرکت مشاهده شده تنها می توانیم جرم مجموع آن ها را به دست آوریم؛ و این مقدار حدود ۱۰/۵ برابر جرم خورشید است. حال با احتساب جرم بیشینه ۰/۸ برابر خورشید برای ستاره رده K، به این نتیجه می رسیم که جرم همدم ناپیدا باید حدود ۹/۷ برابر خورشید باشد. این مقدار کاملاً از جرم کمینه برای سیاه چاله ای که از یک ستاره نتیجه می شود، بالاتر است. به نظر می رسد این سیاه چاله که در فاصله ۳۵۰۰ سال نوری قرار دارد، نزدیک ترین سیاه چاله به منظومه شمسی است.

## ۱۷-۵ سیاه چاله های فوق سنگین

امروزه باور داریم که در مرکز تمام کهکشان های بزرگ بیضوی و مارپیچ، سیاه چاله هایی قرار دارند که جرمشان بسیار بیشتر از آن هایی است که از تحول ستاره های مجزا نتیجه می شوند - عقیده بر این است که سنگین ترین آن ها جرمی چند میلیارد برابر خورشید دارند. در ابتدا، با توجه به اینکه بر این باور بودیم آن ها انرژی لازم را برای آنچه «کهکشان های فعال<sup>۲۴</sup>» نام دارند تأمین می کردند،

وجودشان را به صورت غیرمستقیم ثابت می‌کردیم. در این کهکشان‌ها برخی فرایندها، به ویژه مقدار تابش رادیویی که آن‌ها تولید می‌کنند، به گونه‌ای رخ می‌دهد که آن‌ها را از انواع معمولی متمایز می‌سازد. در قلب کهکشان ما یک منبع رادیویی موسوم به قوس آ قرار دارد که یکی از قوی‌ترین منابع رادیویی در کهکشان ما است. با وجود این، اگر راه‌شیری در فاصله دوری قرار داشت، این منبع رادیویی ضعیف‌تر از آن بود که دیده شود، و راه‌شیری در گروه کهکشان‌های معمولی قرار می‌گرفت. اما کهکشان‌هایی وجود دارند که گسیل رادیویی آن‌ها فوق‌العاده بیشتر است و همچون یک فانوس دریایی در پهنه جهان می‌درخشند. از آنجاکه بیشتر گسیل اضافی در بخش رادیویی طیف قرار دارد، این‌ها را کهکشان‌های رادیویی می‌نامند. کهکشان‌های دیگری مقدار اضافی از گسیل پرتو ایکس تولید می‌کنند، و به صورت جمعی، همه را کهکشان‌های فعال می‌نامند. هرچند نادرند، فرایندهایی در آن‌ها وجود دارد که به وضوح پرنرژی هستند، و همین فرایندها است که آن‌ها را به اجسامی جالب برای مطالعه ستاره‌شناسان تبدیل کرده است.

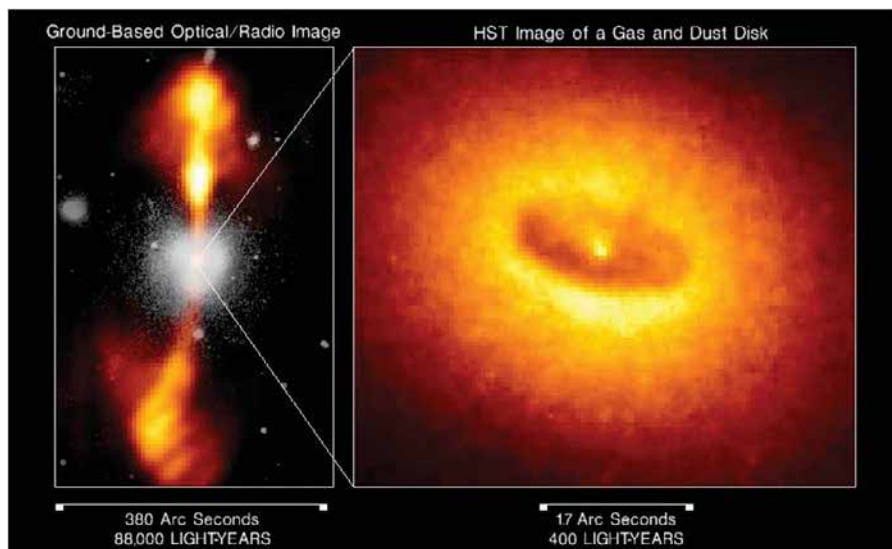
اعتقاد ما بر این است که عامل تابش‌های قوی درست در قلب آن‌ها قرار دارد، جایی که هسته فعال کهکشانی<sup>۲۵</sup> (AGN) نامیده می‌شود. در اینجا است که ماده هم‌اکنون در حال سقوط به درون سیاه چاله است و فرایندهایی را که منجر به گسیل‌های رادیویی و پرتو ایکس می‌شود تغذیه می‌کند.

این اجسام بسیار درخشان برای نخستین بار توسط ستاره‌شناسان رادیویی، و به دنبال یک سری آزمایش‌هایی که جهت محاسبه اندازه زاویه‌ای منابع رادیویی طراحی شده بود، کشف شدند. در اوایل دهه ۱۹۶۰، علائم دریافتی توسط تلسکوپ رادیویی ۷۵ متری مارک یک<sup>۲۶</sup> در جُدرل بانک با آن‌هایی که از تلسکوپ‌های کوچک رادیویی در مناطقی با فواصل زیاد در شمال انگلستان به دست می‌آمد، ترکیب شد. مشاهدات نشان داد که اندازه زاویه‌ای تعدادی از قوی‌ترین منابع رادیویی کمتر از یک ثانیه قوسی است؛ در حقیقت آن قدر کوچک که بر صفحه عکاسی شبیه به ستاره ظاهر می‌شدند. بدین ترتیب آن‌ها را اجسام شبه ستاره یا اخترش<sup>۲۷</sup> نامیدند. این نام‌گذاری بدین معنی بود که شناسایی آن‌ها بسیار مشکل است مگر این که محل دقیق آن‌ها مشخص می‌شد. اولین اخترش شناسایی شده، دویست و هفتاد و سومین جسم در فهرست سوم منابع رادیویی کمبریج بود، لذا C3۲۷۳ نام گرفت.

هرچند تصویر این اختروش که با تلسکوپ ۵ متری (۲۰۰ اینچی) هیل<sup>۲۸</sup> گرفته شد بسیار به ستاره شباهت داشت، فورانی که تا حدود ۶ ثانیه قوسی امتداد می‌یافت در یک طرف آن دیده می‌شد. مارتن اشمیت توانست در طیف بسیار غیرمعمول این جسم، خطوط گسیل هیدروژن را بیابد که تا حدود ۱۶٪ به سمت قرمز جابه‌جا شده بودند - بسیار بیشتر از هر جسمی که پیش از آن مشاهده شده بود. این قرمزگرایی بدین اشاره داشت که فاصله جسم حدود ۲۵۰۰ میلیون سال نوری بود - دورترین جسم شناخته شده در جهان تا آن زمان. اما C3۲۷۳ یکی از نزدیک‌ترین اختروش‌ها به ما است و دورترین اختروشی که تاکنون شناسایی شده در فاصله حدود ۱۳ میلیارد سال نوری قرار دارد! از این رو اختروش‌ها یکی از دورترین و درخشان‌ترین اجسامی هستند که در جهان می‌توان مشاهده نمود. یک دلیل برای آنکه آن‌ها این قدر روشن ظاهر می‌شوند آن است که بیشتر گسیل در دو باریکه مخالف متمرکز می‌شود، و معمولاً ما اختروش‌ها را جایی می‌بینیم که باریکه‌ها به سمت ما نشانه - درست مانند نور یک لامپ ۶ ولتی؛ اگر نور این لامپ به وسیله چراغ‌قوه در یک باریکه متمرکز شود، ما می‌توانیم آن را از فاصله‌ای بسیار دورتر ببینیم، به شرط آنکه باریکه نور به سمت ما باشد. حتی در این صورت نیز خروجی انرژی بیشتر از چیزی بود که منطقاً از گداخت هسته‌ای به دست می‌آمد.

گداخت هسته‌ای هیدروژن تنها می‌تواند کمتر از ۱٪ از جرم سکون آن را به انرژی تبدیل کند. چیزی که کمتر شناخته شده آن است که عمل سقوط به درون چاه پتانسیل گرانشی نیز می‌تواند به تبدیل جرم به انرژی بینجامد. در مورد یک سیاه‌چاله فوق سنگین، انرژی‌ای معادل ۱۰٪ جرم می‌تواند پیش از سقوط آن به درون افق رویداد آزاد شود - پربازده‌ترین منبع انرژی که ما از آن اطلاع داریم. اگر مطابق آنچه انتظار داریم سیاه‌چاله در حال چرخش باشد، بازده این تبدیل می‌تواند تا ۳۰٪ افزایش یابد. نتیجه این انرژی، اغلب دو فوران از ذرات است که در خلاف جهت یکدیگر و در امتداد محور چرخش سیاه‌چاله، از آن دور می‌شوند. این ذرات، که با سرعتی نزدیک به نور حرکت می‌کنند، سوراخی را در گاز احاطه‌کننده کهکشانش ایجاد می‌کنند و به همین دلیل سرعت آن‌ها کاهش می‌یابد. سپس آن‌ها در تمام طیف الکترومغناطیسی پرتوافشانی می‌کنند و بدین‌سان امکان مشاهده فوران‌ها فراهم می‌آید. اگر یکی از فوران‌ها به سمت ما نشانه رفته باشد، تابش مشاهده شده بسیار قوی خواهد بود و لذا این اجسام را می‌توان درست در دیگر سوی جهان دید.





شکل ۱۷-۴: کهکشان فعال NGC ۴۲۶۱

می‌توان جرم لازم را برای یک اختروش روشن که با درخشندگی از مرتبه  $10^{41}$  می‌درخشد حساب کرد. با فرض اینکه تنها ۱۰٪ جرم به انرژی تبدیل می‌شود، چنین سیاه چاله‌ای در طول سال به حدود ۱۷۵ برابر جرم خورشید برای مصرف نیاز دارد.<sup>۳۹</sup>

### ۱۷-۶ کهکشان فعال NGC ۴۲۶۱

در فصل ۱۵، بخش «هسته فعال کهکشانی»، آنچه که به دنبال سقوط یک ستاره به سمت یک سیاه چاله رخ می‌دهد، شرح داده شد. مقادیر فراوانی تابش پرتو ایکس ساطع می‌شود، اما تنها در صورتی قابل رؤیت است که قرص برافزایشی تقریباً به صورت عمود بر خط دید قرار داشته باشد. این وضعیت در کهکشان فعال NGC ۴۲۶۱ برقرار است. تصویر تلسکوپ فضایی هابل در سمت راست **شکل ۱۷-۴** یک قرص گول‌پیکر از گاز و غبار سرد را به عرض تقریباً ۳۰۰ سال نوری نشان می‌دهد که یک سیاه چاله احتمالی در هسته کهکشان را سوخت‌رسانی می‌کند. این قرص با تزریق ماده به درون سیاه چاله، آن را تغذیه می‌کند؛ و سیاه چاله ماده را فشرده و گرم می‌نماید، موضوعی که پیش‌از این توضیح داده شد. ذراتی که از نزدیکی سیاه چاله شتاب گرفته‌اند دو فوران مخالف از

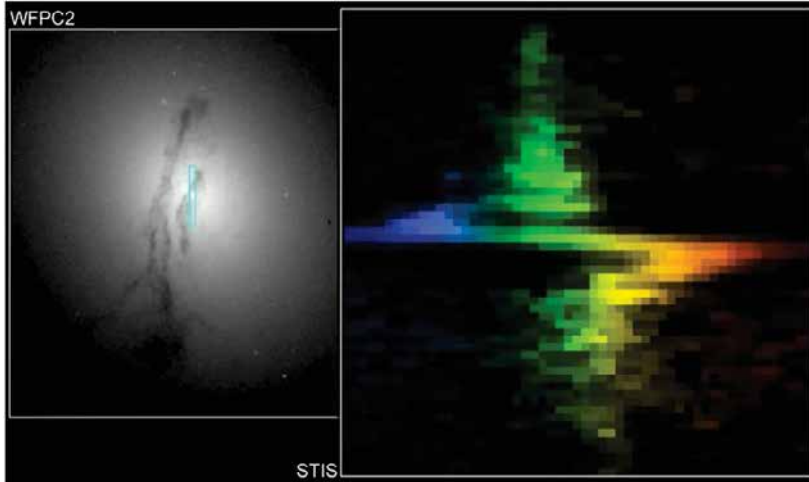
ذرات تولید می‌کنند. این ذرات، با توجه به شتابی که دارند، گسیل رادیویی ساطع می‌نمایند و دو «لب» رادیویی را که ما مشاهده می‌کنیم می‌سازند. این فوران‌ها عمود بر قرص هستند، مانند یک محور درون چرخ - و این دقیقاً همان چیزی است که اگر یک سیاه‌چاله چرخان، موتور مرکزی NGC ۴۲۶۱ را تشکیل دهد، انتظار داریم.

## ۱۷-۷ اندازه هسته فعال کهکشانی

یک رصد ساده از اختروش‌ها وجود دارد که می‌تواند اندازه ناحیه در حال گسیل اطراف سیاه‌چاله را تا حدودی نشان دهد. بر اساس مشاهدات، خروجی رادیویی و نور یک اختروش، در دوره‌هایی تنها چندساعته، می‌تواند به صورت چشمگیری تغییر کند. شاید تعجب کنید، اما با استفاده از همین می‌توان به صورتی منطقی به برآوردی از اندازه سیاه‌چاله رسید، موضوعی که در آزمایش ذهنی زیر نشان خواهیم داد.

تصور کنید تمام سطح خورشید در یک زمان تاریک می‌شد. با توجه به زمان لازم برای اینکه نور از خورشید به زمین برسد، هیچ تغییری را تا  $۸/۳۲$  دقیقه بعد نمی‌دیدیم. سپس، در ابتدا می‌دیدم که ناحیه مرکزی قرص تاریک می‌شد، زیرا این قسمت به ما نزدیک‌تر است و مدت زمان کمتری برای نور لازم است تا به ما برسد. اما بعد، این ناحیه تاریک گسترش می‌یافت و تمام سطح مرئی خورشید را می‌پوشاند. علت این است که نور نواحی دورتر خورشید، پس از خاموشی نور مرکز، همچنان به ما می‌رسد. با توجه به اینکه شعاع خورشید  $۶۹۵,۰۰۰$  کیلومتر است، زمان لازم برای اینکه این تغییر رخ دهد عبارت است از تقسیم این فاصله بر سرعت نور؛ و بدین ترتیب به  $۲/۳۱$  ثانیه می‌رسیم. بنابراین واضح است که ظاهر یک جسم نمی‌تواند فوراً روشنایی خود را تغییر دهد، و تنها این کار را در مقیاس‌های زمانی از مرتبه زمان حرکت نور در عرض جسم در حال تابش انجام می‌دهد.

تصور کنید یک هسته فعال کهکشانی، روشنایی خود را بر اساس مشاهدات در مدت ۱۲ ساعت، یعنی ۷۲۰ دقیقه، به صورت چشمگیری تغییر دهد. با توجه به اینکه نور هر واحد نجومی را در مدت  $۸/۳۲$  دقیقه می‌پیماید (زمان حرکت نور از خورشید تا زمین)، اندازه این جسم باید از مرتبه  $\frac{۷۲۰}{۸/۳۲}$  AU یا حدود ۸۶ AU باشد.



شکل ۱۷-۵: مشاهدات تلسکوپ فضایی هابل از کهکشان فعال M۸۴

### ۱۷-۸ اندازه‌گیری جرم سیاه چاله‌های فوق سنگین

در سال‌های اخیر ستاره‌شناسان به شواهد مستقیم بیشتری از حضور سیاه چاله‌های فوق سنگین دست یافته‌اند. این شواهد با اندازه‌گیری سرعت ستارگان یا غباری به دست آمده است که اطراف مرکز کهکشان‌هایی که سیاه چاله‌ها در آن قرار دارند می‌چرخند. دو نمونه در ادامه می‌آید: نخست کهکشان M۸۴، که در خوشه سنبله در فاصله حدود ۵۰ میلیون سال نوری قرار دارد، و دوم کهکشان خودمان، راه شیری.

### ۱۷-۹ کهکشان M۸۴

تصویر سمت راست در شکل ۱۷-۵ چیزی را نشان می‌دهد که طیف نگار تلسکوپ هابل<sup>۳۰</sup> از نواری در مرکز کهکشان M۸۴ تهیه کرده است. این نوار را در تصویر سمت چپ می‌بینید. نمودار سمت راست، جابه‌جایی دوپلری را در طیف موادی که به دور مرکز کهکشان می‌چرخند نشان می‌دهد. با حرکت از بالا به سمت مرکز، به یک آبی‌گرایی ناگهانی می‌رسیم، که حرکت سریع گاز را به سمت ما نشان می‌دهد. بر اساس این جابه‌جایی دوپلری، سرعت به سمت ما به حدود ۴۰۰ km/s در فاصله تنها ۲۶ سال نوری از مرکز می‌رسد. با عبور از مرکز، علامت این سرعت شعاعی

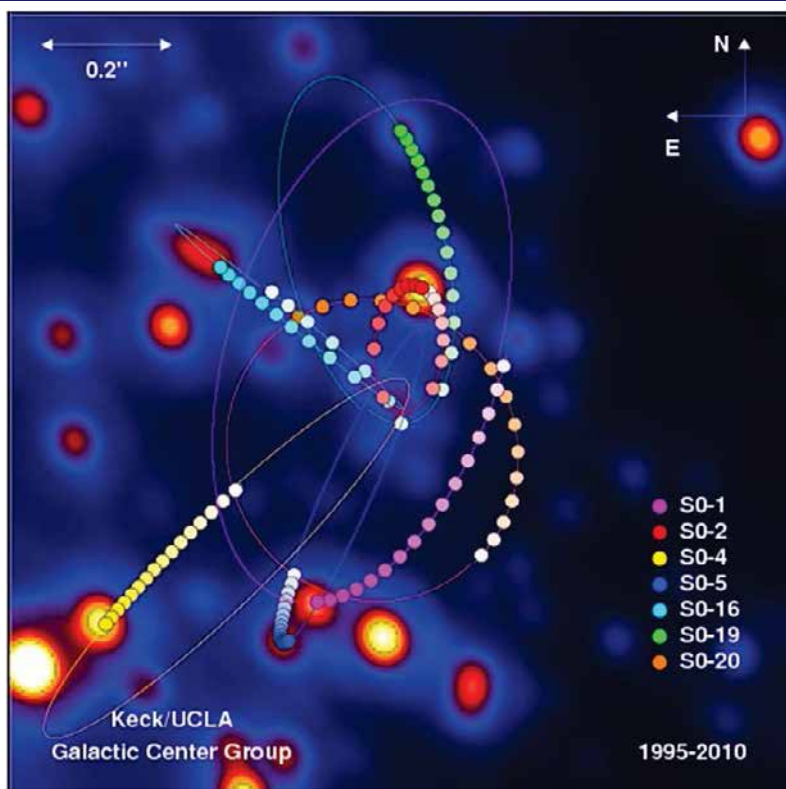
به سرعت معکوس می‌شود و یک قرمزگرایی را به بار می‌آورد، که همان سرعت در جهت مخالف (در حال دور شدن از ما) را نشان می‌دهد.

بدیهی‌ترین تعبیر برای این داده‌ها آن است که یک قرص چرخان بزرگ اطراف هسته  $M_{84}$  وجود دارد که سطح مقطع آن دیده می‌شود - این تعبیر، با توجه به این حقیقت که هسته آن بسیار فعال است و فوران‌هایی از ذرات را گسیل می‌دارد که موجب تابش‌های رادیویی قوی می‌شود، تقویت می‌گردد.

مشاهدات این امکان را برای ما فراهم می‌سازد که جرم ناحیه مرکزی را، دقیقاً به همان شیوه که جرم خورشید را حساب می‌کنیم، به دست آوریم. با اطلاع از سرعت گازی که اطراف سیاه‌چاله می‌چرخد و فاصله آن از سیاه‌چاله، و همچنین مقداری که بر اساس آزمایش برای ثابت جهانی گرانش،  $G$ ، به دست آورده‌ایم، به جرمی حدود  $300$  میلیون برابر جرم خورشید می‌رسیم. انتظار داریم بیشترین جرم در سیاه‌چاله‌ای نزدیک به مرکز کهکشان باشد. حال با داشتن جرم، می‌توان شعاع افق رویداد را محاسبه کرد، چیزی که  $8/8 \times 10^6$  km به دست می‌آید - اندکی کمتر از اندازه مدار سیاره زهره.

## ۱۰-۱۷ کهکشان راه‌شیری

در مرکز کهکشان ما یک منبع قوی رادیویی موسوم به قوس وجود دارد. از آنجا که می‌دانیم مناطق اطراف سیاه‌چاله‌های فوق‌سنگین به شدت در بخش رادیویی طیف تابش می‌کنند، مدت‌ها است که دانشمندان فکر می‌کنند در قلب کهکشان ما یک چنین سیاه‌چاله‌ای قرار دارد. در فرسوخ، می‌توان اثرات جو زمین را حذف کرد و تصاویری تولید نمود که تنها عامل محدودکننده در آن‌ها قطر تلسکوپ است. در تلسکوپ ۱۰ متری یک در قله موناکی در هاوایی، توان تفکیک به حدود  $\frac{1}{3}$  ثانیه قوسی می‌رسد، تقریباً معادل تلسکوپ فضایی هابل در بخش مرئی طیف. با این توان تفکیک توانسته‌ایم تصویر ستاره‌های مجزا را نزدیک مرکز کهکشان تهیه کنیم، و با مشاهداتی که در مدت ۱۵ سال انجام شد، مدار تعدادی از ستاره‌ها را تعیین نموده‌ایم. همان‌طور که پیش‌از این دیدیم، با دانستن دوره تناوب و اندازه مدارهای ستاره‌ای، می‌توان جرم جسمی را که آن‌ها به دور آن در گردش هستند یافت، و این دقیقاً همان چیزی است که گروه دانشگاه کالیفرنیا،



شکل ۱۷-۶: مشاهدات ستارگانی که مدار گردش آن‌ها به دور مرکز کهکشان راه شیری است.

لوس آنجلس<sup>۳۱</sup> (UCLA) به آن دست یافته‌اند.

**شکل ۱۷-۶** ناحیه‌ای را در مرکز کهکشان ما به وسعت  $1 \times 1$  ثانیه قوسی نشان می‌دهد که در فرورسرخ و به وسیله تلسکوپ کِک در سال ۲۰۱۰ رصد شده است. در این شکل، مسیر ۱۵ ساله هفت ستاره که اطراف مرکز کهکشان گردش می‌کنند رسم شده است. یکی از ستاره‌ها، موسوم به S0-2، با دوره تناوب تنها  $15/78$  سال گردش می‌کند، و ستاره دیگری موسوم به S0-16 تا فاصله  $45 \text{ AU}$  به مرکز کهکشان نزدیک شد، که در آن فاصله با سرعت  $12,000 \text{ km/s}$  حرکت می‌کرد! بر اساس این داده‌ها، مناسب‌ترین مقدار برای جرم جسم مرکزی  $4/1$  میلیون برابر جرم خورشید است، و این اطلاعات، بهترین گواهی است که تاکنون بر وجود یک سیاه چاله فوق سنگین در مرکز کهکشان خودمان به دست آورده‌ایم.

## ۱۱-۱۷ سیاه چاله‌ها کاملاً سیاه نیستند

در دهه ۱۹۷۰، استفان هاوکینگ<sup>۳۳</sup> نشان داد که به دلیل اثرات مکانیک کوانتومی، سیاه چاله‌ها عملاً تابش‌هایی گسیل می‌کنند - آن‌ها به طور کامل سیاه نیستند! انرژی لازم برای تابش، آن‌گونه که در زیر توضیح داده خواهد شد، از جرم سیاه چاله سرچشمه می‌گیرد. در نتیجه، سیاه چاله به تدریج جرم از دست می‌دهد، و شاید تعجب‌آور باشد که با کم شدن جرم، نرخ تابش افزایش می‌یابد. بدین ترتیب سیاه چاله با شدتی فزاینده به تابش ادامه داده، جرم از دست می‌دهد، تا اینکه در نهایت بخار شود.

تئوری لازم برای توضیح این رویداد بسیار پیچیده است و از نظریه مکانیک کوانتومی درباره ذرات مجازی سرچشمه می‌گیرد - جرم و انرژی می‌توانند خودبه‌خود پدید آیند، به شرط آنکه دوباره و به سرعت ناپدید شوند، بدین ترتیب اصل عدم قطعیت هایزنبرگ را نقض نمی‌کنند. در آنچه که به «افت وخیز خلا»<sup>۳۳</sup> معروف است، یک ذره و یک پادذره می‌توانند از هیچ پدید آیند؛ مدت خیلی کوتاهی وجود داشته باشند و سپس یکدیگر را نابود کنند. این دو می‌توانند، برای مثال، دو فوتون با اسپین مخالف باشند. اگر این واقعه بسیار نزدیک به افق رویداد یک سیاه چاله رخ دهد، ممکن است یک ذره با عبور از افق به درون سیاه چاله سقوط کند، و در این حال دیگری فرار نماید. برای آنکه انرژی کل پایستار بماند، ذره‌ای که به درون سیاه چاله سقوط می‌کند باید انرژی منفی داشته باشد - معادل با جرم منفی - که بدین ترتیب جرم سیاه چاله را کاهش می‌دهد. ذره فراری انرژی را با خود از سیاه چاله دور می‌کند و اصولاً می‌تواند آشکار شود. بدین ترتیب به نظر می‌رسد که سیاه چاله در حال تابش است. این تابش را تابش هاوکینگ<sup>۳۴</sup> می‌نامند.

می‌توان گفت سیاه چاله‌ها یک دمای مؤثر دارند، موسوم به دمای هاوکینگ، که متناسب است با گرانش سطحی سیاه چاله. هرچه جرم سیاه چاله بیشتر باشد (و از این رو شعاع افق رویداد آن بزرگ‌تر شود)، گرانش سطحی و دمای مؤثر کوچک‌تر خواهد بود. این دما حتی در سیاه چاله‌های به جرم ستاره نیز فوق‌العاده کوچک است، از مرتبه  $10^{-7}$  نانو کلوین ( $10^{-7}$  K)، و چون دمای مؤثر به صورت معکوس متناسب است با جرم، در سیاه چاله‌های فوق‌سنگین بسیار کمتر خواهد بود. جسمی را در نظر بگیرید که در حمامی از تابش در یک دمای معین قرار دارد - مثلاً در یک اتاق

در دمای ۲۰ درجه سانتی گراد (۲۹۳ K). تنها اگر جسم از این داغ‌تر باشد می‌تواند گرما را به صورت تابش از دست بدهد؛ اگر سردتر باشد تابش را جذب کرده، گرم‌تر می‌شود. سیاه چاله‌ها در جهانی حضور دارند که فضای آن حالا و به دلیل زمینه ریزموج کیهانی<sup>۳۵</sup> (پس تاب خلقت؛ به جامانده از نابودی ذرات ماده و پادماده در زمان مهبانگ. این موضوع در فصل ۲۲ بحث خواهد شد)، در دمای مؤثر حدود ۲/۷ کلوین است. اگر دمای سیاه چاله پایین‌تر از این مقدار باشد، نمی‌تواند تبخیر شود، و در حقیقت، انرژی کسب خواهد کرد. بدین ترتیب جرم آن به دلیل فوتون‌های ورودی افزایش می‌یابد و از این رو به جای کوچک شدن، رشد خواهد کرد. دمای ۲/۷ کلوین بسیار بالاتر از دمای مؤثر سیاه چاله‌ها، حتی با جرم ستاره‌ای است. بنابراین در این زمان، هیچ کدام از سیاه چاله‌هایی که می‌شناسیم نمی‌توانند در حال تبخیر باشند. برای اینکه سیاه چاله دارای دمای هاوکینگ بالاتر از ۲/۷ کلوین بوده، بتواند تبخیر شود، باید از ماه سبک‌تر باشد، آن هم جسمی با قطر کمتر از یک دهم میلی‌متر!

به مجرد اینکه سیاه چاله تبخیر خود را آغاز کند، جرم از دست می‌دهد و به دنبال آن کوچک می‌شود. دمای هاوکینگ آن افزایش می‌یابد، لذا با شدت بیشتری به تابش ادامه داده، سریع‌تر جرمش کاسته می‌شود. این یک فرایند افسارگسیخته است، لذا سیاه چاله در نهایت با یک جرقه تابشی کورکننده ناپدید می‌گردد.

از طرف دیگر، سیاه چاله‌های کوچک، اگر وجود داشته باشند، در یک لحظه تبخیر می‌شوند. اگر سیاه چاله‌هایی وجود داشت که جرم آن‌ها قابل مقایسه با یک خودرو بود (با قطر تقریبی  $10^{-۲۴}$  متر)، آن‌ها در مدتی از مرتبه نانو ثانیه تبخیر می‌شدند، و در این فرایند درخشش آن‌ها به بیش از ۲۰۰ برابر خورشید می‌رسید!

البته این امکان وجود دارد که سیاه چاله‌های ریزی از برخورد ذرات در برخورددهنده هادرونی بزرگ در سرن<sup>۳۶</sup> تولید شود. برخی نگران این هستند که این سیاه چاله‌ها رشد کرده، جهان را ببلعند. اما باور ما این است که آن‌ها اساساً به محض ایجاد، تبخیر خواهند شد - در یک مقیاس زمانی  $10^{-۱۸}$  ثانیه‌ای. عقیده بر این است که در مدت تاریخ زمین، پرتوهای گامای بسیار پرانرژی توانسته است تعداد بی‌شماری از چنین سیاه چاله‌های ریز را خلق کند، اما خوشبختانه و در عین دلگرمی، ما هنوز اینجا هستیم.

در فصل ۲۱ به این بحث خواهیم پرداخت که جهان با نرخ فزاینده در حال انبساط است. دلیل آن، فشار ناشی از انرژی تاریک است که به نظر می‌رسد ۷۳٪ از جرم/انرژی جهان را به خود اختصاص داده است. با توجه به اینکه دمای زمینۀ ریزموج کیهانی به صورت معکوس با اندازه جهان متناسب است، این دما نیز با نرخ فزاینده‌ای در حال سقوط است. در نهایت و با گذشت اعصار متمدنی، زمانی که این دمای به جامانده از مهبانگ به اندازه کافی پایین آمد و با فرض صحت نظریۀ هاوکینگ، سیاه چاله‌های با جرم خورشید بالاخره شروع به تبخیر می‌کنند، البته در یک مقیاس زمانی  $10^{100}$  سال!

### ۱۷-۱۲ آیا ممکن است سیاه چاله‌ها هم اکنون در حال تبخیر باشند؟

اجازه دهید فرض کنیم در زمان مهبانگ، سیاه چاله‌هایی با جرم متفاوت (و لذا دمای مؤثر متفاوت) خلق شدند. با سرد شدن جهان، ابتدا سبک‌ترها شروع به تبخیر کردند و سپس نوبت به سنگین‌ترها رسید، و حالا، همان‌طور که پیش‌ازین گفتیم، تنها آن‌هایی که جرمشان قابل مقایسه با ماه است امکان تبخیر دارند. لحظات پایانی در چنین تبخیری به فوران‌های سنگین پرتوهای گاما منجر می‌شد، که ماهواره‌های ما می‌توانستند آن را آشکار نمایند. حقیقت آن است که ما آنچه را که فوران‌های پرتو گاما نامیده می‌شود مشاهده می‌کنیم، اما تصور آن است که این فوران‌ها از درآمیختن دو باقیمانده ستاره‌ای و تشکیل یک سیاه چاله به وجود می‌آیند. این حقیقت که ما نمی‌توانیم نشان دهیم آن‌ها از تبخیر یک سیاه چاله ایجاد می‌شوند، مایه حسرت برای استفان هاوکینگ است، چراکه اگر این‌طور بود، تقریباً به‌طور قطع او برنده جایزه نوبل می‌شد.

### پانویس‌ها

- 1 - Pierre-Simon Laplace
- 2 - John Wheeler
- 3 - Event Horizon
- 4 - Singularity
- 5 - Preon

۶- به نظر می‌رسد این روش محاسبه اشتباه است، زیرا باید ۲۰ کیلومتر بر ۱۰۰۰ تقسیم شود و نه یک میلیارد. در این صورت، قطر توده کوارکی برابر با ۲۰ متر خواهد بود. (مترجم)

- 7 - no-hair theorem
- 8 - Roy Kerr



- 9 - Kerr black hole
- 10 - Roger Penrose
- 11 - Frame Dragging
- 12 - Static Limit
- 13 - Penrose process
- 14 - Einstein rings
- 15 - Gravitational Microlensing Event
- 16 - Accretion Disc
- 17 - Cygnus X-1
- 18 - Cygnus

۱۹- Ariel IV؛ البته منابع دیگر، مانند کتاب «Prisons of Light - Black Holes» اثر کیتی فرگوسن

(Kitty Ferguson)، یا مجله New Scientist مورخ ۲۳ اکتبر ۱۹۷۵، ماهواره آرپل پنچ (Ariel V) را

کاشف این سیاه چاله می دانند. (مترجم)

- 20 - Monoceros
- 21 - Professor Ken Pounds
- 22 - Monoceros X-1
- 23 - co-orbiting
- 24 - Active Galaxies
- 25 - Active Galactic Nucleus (AGN)
- 26 - 75-metre Mark I radio telescope
- 27 - Quasar
- 28 - 200-inch Hale Telescope

۲۹- در کتاب درآمدی بر نجوم و کیهانشناسی، بخش ۸-۳-۵، جزئیات محاسبه آورده شده است.

(مترجم)

- 30 - Hubble Space Telescope Imaging Spectrograph
- 31 - University of California, Los Angeles
- 32 - Stephen Hawking
- 33 - Vacuum Fluctuation
- 34 - Hawking radiation
- 35 - Cosmic Microwave Background (CMB)
- 36 - Large Hadron Collider at CERN

# فصل ۱۸

## زمان

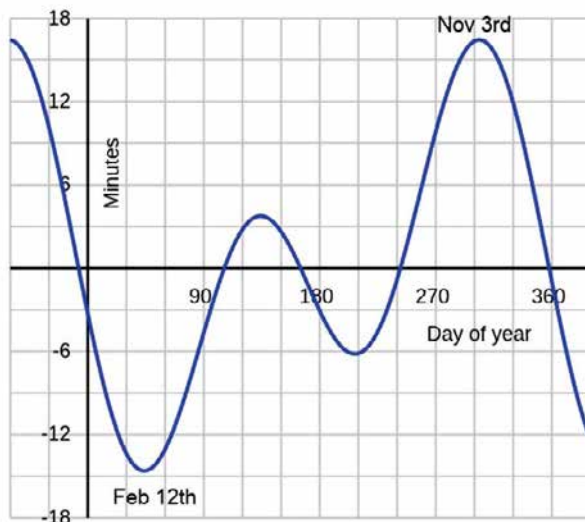
این فصل، همان طور که از عنوان آن برمی آید، درباره مفهوم مبهم و رازآلود زمان است - موضوعی که شاید کمتر از هر موضوع دیگری در فیزیک درک شده است. تقریباً غیرممکن است بتوان تعریفی برای زمان ارائه داد، و شاید قابل فهم ترین تعریف به وسیله فیزیکدان جان ویلر مطرح شد که گفته بود: «زمان عبارت است از شیوه طبیعت برای جلوگیری از اینکه همه چیز باهم رخ دهد!» در ابتدا بینیم ستاره شناسان تا پیش از دهه ۱۹۶۰، چگونه گذشت زمان را اندازه می گرفتند.

### ۱-۱۸ زمان خورشیدی محلی

برای قرن ها، شبانه روز مستقیماً به عبور خورشید در عرض آسمان ارتباط داشت، و ۲۴ ساعت عبارت بود از زمان بین دو گذر متوالی خورشید از نصف النهار (خطی در آسمان، بین شمال و جنوب). این استاندارد زمانی را «زمان خورشیدی محلی» می نامند و همان زمانی است که ساعت آفتابی نشان می دهد. بدیهی است زمانی را که چنین ساعت هایی نشان می دهند از این سو به آن سوی انگلستان تغییر می کند، چراکه هرچه به غرب برویم ظهر دیرتر است. اختلافی که بدین ترتیب به دست می آید تعجب آور است. در مجموع، انگلستان در ۹/۵۵ درجه از طول جغرافیایی کشیده شده است. با توجه به اینکه ۱۵ درجه معادل با یک ساعت است، ۹/۵۵ درجه یک اختلاف زمانی اندکی بیش از ۳۸ دقیقه را ایجاد می کند.

### ۲-۱۸ زمان میانگین گرینویچ

با گسترش راه آهن در انگلستان، این اختلاف ساعت باعث دردسر شد و بدین دلیل در تمام انگلیس ساعت لندن و یا گرینویچ مورد استفاده قرار گرفت. مشکل دیگر پس از ساخت ساعت های دقیق تر



شکل ۱۸-۱: معادله زمان: اختلاف بین زمان میانگین گرینویچ (ساعت جهانی) و زمان خورشیدی محلی در رصدخانه گرینویچ.

ظاهر شد: چون مدار گردش زمین بیضوی است، طول شبانه روز اندکی تغییر می‌کند. لذا ۲۴ ساعتی را که ساعت‌ها اندازه می‌گرفتند، طول میانگین شبانه روز در یک سال تعریف کردند. این استاندارد زمانی به «زمان میانگین گرینویچ»<sup>۲</sup> یا (GMT) معروف شد.

### ۱۸-۳ معادله زمان

استفاده از زمان گرینویچ این پیامد را دارد که در طول سال ساعت‌ها نسبت به خورشید جلو یا عقب می‌روند. اختلاف بین GMT و زمان خورشیدی محلی در گرینویچ، معادله زمان<sup>۳</sup> نامیده می‌شود (شکل ۱۸-۱). نتیجه آن است که خورشید حتی در لندن همواره در هنگام ظهر به سمت جنوب (روی نصف النهار) نیست. بر اساس ساعتی که زمان گرینویچ را نشان می‌دهد، خورشید گاهی تا ۱۶ دقیقه و ۳۳ ثانیه پیش از ظهر از نصف النهار عبور می‌کند و گاهی هم پس از ۱۴ دقیقه و شش ثانیه بعد از ظهر. یعنی آنکه زمان طلوع و غروب خورشید همواره نسبت به وسط روز متقارن نیست. این اثر به ویژه اطراف کریمس قابل توجه است. هرچند کوتاه‌ترین روز ۲۱ دسامبر یا انقلاب زمستانی<sup>۴</sup> است، زودترین غروب در ۱۰ دسامبر رخ می‌دهد و دیرترین طلوع در دوم ژانویه. لذا صبح‌ها تا دو هفته پس از ۲۱ دسامبر همچنان تاریک‌تر می‌شوند، هرچند که تا اول ژانویه غروب‌ها به طور

قابل ملاحظه‌ای روشن‌تر شده‌اند.

## ۱۸-۴ زمان جهانی

در سال ۱۹۲۸، زمان جهانی<sup>۵</sup> (UT) رسماً جایگزین زمان میانگین گرینویچ شد (هرچند که این عنوان هنوز متداول نشده است)، اما تا سال ۱۹۶۷، سالی که تعریف ثانیه تغییر کرد، این زمان مشابه با زمان گرینویچ بود! تا پیش از این، یک ثانیه عبارت بود از  $\frac{1}{86400}$  شبانه‌روز میانگین که با چرخش زمین تعیین می‌شد. بدین ترتیب سرعت چرخش زمین مبنای معیار زمان بود. مشکل این تعریف آن است که بر اساس نیروهای کشندی ماه، سرعت چرخش زمین به تدریج کاهش می‌یابد، و در نتیجه طول واحد زمان، ثانیه، افزایش پیدا می‌کند. این مشکل چیزی نبود که فیزیکدانان از آن بگذرند، از این رو در سال ۱۹۶۷ یک تعریف جدید برای ثانیه ابداع گردید:

**یک ثانیه عبارت است از مدت زمان ۹,۱۹۲,۶۳۱,۷۷۰ دوره تناوب تابش متناظر با گذار بین دو تراز فوق ظریف<sup>۶</sup> حالت پایه<sup>۷</sup> اتم سزیم ۱۳۳.**

لذا ساعت‌های ما هم‌اکنون به زمان اتمی استاندارد مربوط می‌شوند، زمانی که از معیار بسامد باریکه سزیم (که بعداً توضیح داده خواهد شد) جهت تعیین طول ثانیه استفاده می‌کند. به هر حال چرخش زمین به کند شدن خود ادامه می‌دهد و بسیار به تدریج، هم‌زمانی بین موقعیت خورشید در آسمان و ساعت‌های ما از دست می‌رود. برای فائق آمدن بر این مشکل، وقتی که اختلاف بین این دو به یک ثانیه رسید، یک ثانیه (ثانیه کبیسه) به زمان اضافه می‌شود. این کار معمولاً در نیمه‌شب عید سال نو مسیحی و یا ۳۰ ژوئن انجام می‌گیرد. از زمان تغییر تعریف ثانیه، به ناچار ۲۲ ثانیه کبیسه اضافه شده است؛ تقریباً هر ۱۸ ماه یک ثانیه. البته بین سال‌های ۱۹۹۸ تا ۲۰۰۵ چیزی اضافه نشد، یعنی آنکه سرعت کند شدن نظم خاصی ندارد. ثانیه‌های کبیسه در سامانه‌هایی چون شبکه موقعیت‌یاب جهانی<sup>۸</sup> (GPS) آزاردهنده هستند و فشارهایی جهت کنار گذاشتن آن‌ها وجود دارد که البته بدیهی است مورد مخالفت ستاره‌شناسان قرار می‌گیرد! اگر هیچ تصحیحی صورت نمی‌گرفت، و این روند کاهش سرعت در ۴۰ سال گذشته، یعنی ۵۶/۰ ثانیه به ازای هر سال، ادامه یابد، در آن صورت پس از ۱۰۰۰ سال اختلاف بین زمان جهانی و زمان خورشیدی به حدود ۹ دقیقه می‌رسد.

## ۱۸-۵ زمان نجومی

اگر زمان سنج الکترونیکی خود را که با زمان جهانی کار می‌کند در هنگام عبور ستاره رِجل الجبار در صورت فلکی جبار، از نصف‌النهار به کار اندازید و شب بعد، در هنگام عبور دوباره این ستاره از نصف‌النهار آن را متوقف کنید، ملاحظه می‌نمایید که زمان اندازه‌گیری شده ۲۳ ساعت و ۵۶ دقیقه و ۰۹/۴ ثانیه است و نه ۲۴ ساعت. این مدت را یک روز نجومی<sup>۸</sup> می‌نامند و برابر است با طول شبانه‌روز چنانچه نسبت به حرکت ظاهری ستارگان اندازه‌گیری شود.

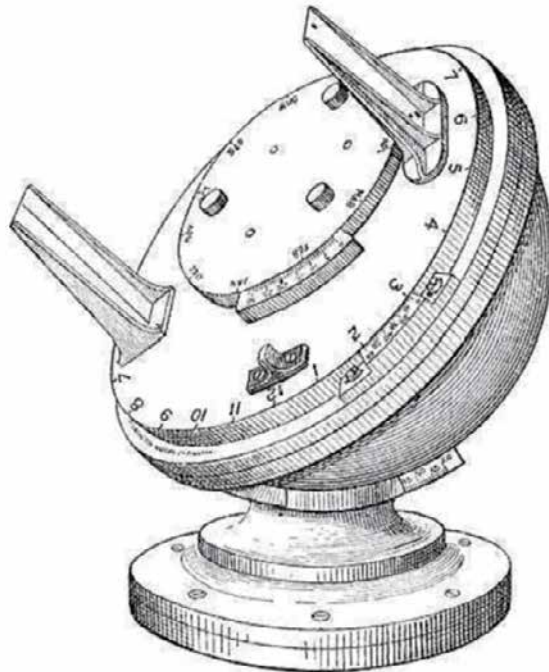
چرا روز نجومی این مقدار است؟ تصور کنید که زمین به دور محور خود نمی‌چرخید و ما در طرف تاریک آن به رصد می‌پرداختیم. در نقطه‌ای از زمان، ستاره رِجل الجبار را در سمت جنوب (در حال عبور از نصف‌النهار) می‌دیدیم. با حرکت زمین به دور خورشید، به نظر می‌رسید که این ستاره به سمت غرب حرکت می‌کند و سه ماه بعد، از دیدگان غایب می‌شد. شش ماه پس از ناپدید شدن در غرب، از شرق طلوع می‌کرد و دقیقاً یک سال بعد از اولین رصد، مجدداً آن را به سمت جنوب می‌دیدیم. لذا در صورت عدم چرخش زمین، ستاره رِجل الجبار هر یک سال یک بار دور زمین می‌چرخید و از این رو هر روز نجومی یک سال زمین طول می‌کشید. اما عملاً در این مدت زمین حدود ۳۶۵ بار چرخش داشته، نسبت به ستاره رِجل الجبار (یا هر ستاره دیگر)  $۳۶۵+۱$  بار چرخیده است؛ بنابراین ۳۶۶ روز نجومی در یک سال وجود دارد. به همین دلیل روز نجومی اندکی کوتاه‌تر است و تقریباً  $\frac{۳۶۵}{۳۶۶}$  شبانه‌روز زمین است.

تفاوت این دو  $\frac{۱}{۳۶۶}$  شبانه‌روز است یا  $\frac{۱۴۴۰}{۳۶۶}$  دقیقه، برابر با  $\frac{۳}{۹۳}$  دقیقه، که معادل است با ۳ دقیقه و  $\frac{۵۵}{۸}$  ثانیه. در این محاسبه ساده، طول روز نجومی ۲۳ ساعت و ۵۶ دقیقه و  $\frac{۴}{۲}$  ثانیه به دست آمد که به مقدار واقعی بسیار نزدیک است.

## ۱۸-۶ انواع ساعت‌ها

### ساعت آفتابی

در بین ساعت‌ها، شاید بتوان این ساعت را بنیادی‌ترین ساعت دانست که بر اساس تعریف، زمان خورشیدی محلی را نشان می‌دهد. البته متأسفانه این ساعت در انگلستان و در مقایسه با



شکل ۱۸-۲: زمان سنج خورشیدی گیبز

کشورهای جنوبی‌تر چندان استفاده‌ای ندارد. ساعت‌های آفتابی به شکل‌های مختلف ساخته می‌شوند: برخی با یک صفحه تخت افقی که شاخص به ستاره قطبی اشاره دارد، برخی با صفحات عمودی بر دیوار ساختمان‌ها، و در برخی نیز یک نوار اطراف شاخص کشیده شده است. در ساخت این ساعت‌ها، هنر و ریاضیات باهم به کار گرفته می‌شود. در یکی از انواع جالب آن، موسوم به ساعت آفتابی آنالماتیک<sup>۹</sup>، انسان در نقش شاخص عمودی عمل می‌کند.

در سال ۱۹۰۶، جرج جیمز گیبز<sup>۱۰</sup> چیزی را اختراع کرد که خودش نام زمان سنج خورشیدی<sup>۱۱</sup> بر آن نهاد (شکل ۱۸-۲). این ساعت، که در کارخانه برای طول و عرض جغرافیایی خریدار تنظیم می‌شد، یک قرص چرخان داشت که شاخص روی آن قرار می‌گرفت. پس از تنظیم تاریخ، معادله زمان جبران می‌شد، و بدین ترتیب زمان میانگین گرینویچ با دقتی بهتر از یک دقیقه تعیین می‌گردید.

## ساعت‌های آبی

این ساعت‌ها نسبتاً جالب هستند، و تا اختراع ساعت پاندولی، دقیق‌ترین ساعت بودند. در ساده‌ترین آن‌ها، یک استوانه با سطح مقطع ثابت از یک منبع یکنواخت آب پر می‌شد. ممکن بود یک شناور، با یک بازوی عمودی دندانه‌دار بر روی آن، بالا آمده، عقربه ساعت را بر صفحه یک ساعت بچرخاند. نکته کلیدی برای دقت در تمام ساعت‌های آبی، داشتن یک چشمه ثابت آب بود تا جریان آب به درون ساعت ثابت باشد. یک روش خوب برای دستیابی به این مهم این بود که آب بیشتر از نیاز ساعت به درون مخزن هدایت شود تا همواره به صورت سرریز تا لبه پر باشد. بدین ترتیب یک لوله خروجی در فاصله‌ای زیر سطح آب به صورت یک چشمه ثابت آب بالای ساعت عمل کرده، در یک فشار ثابت خواهد بود. بعداً ساعت‌های آبی طوری طراحی شدند که با فراهم آوردن یک دستگاه مکانیکی، یک عقربه ساعت‌شمار (و شاید یک عقربه دقیقه‌شمار) را به حرکت درآورند. برخی نیز بر پایه چرخ آب استوار بودند، که بدین ترتیب با سرعت ثابت چرخیده، عقربه‌ها را پس از تعدادی چرخ‌دنده به حرکت درمی‌آوردند.

## ساعت‌های آونگی

ایده استفاده از پاندول در ساعت به گاليله منسوب است. در سال ۱۶۰۲، زمانی که وی دانش‌آموز بود، چراغ آویزانی را در کلیسای پیزا دید که به عقب و جلو نوسان می‌کرد. گاليله دریافت دوره تناوب نوسان یک آونگ (دست‌کم در نوسان‌های نسبتاً کوچک) مستقل از دامنه آن است. در سال ۱۶۰۳ یکی از دوستان گاليله با استفاده از یک آونگ ساده به اندازه‌گیری نبض بیمارانش پرداخت.

در سال ۱۶۴۱، در سن ۷۷ سالگی و زمانی که کاملاً نابینا بود، گاليله به کمک پسرش، توجه خود را به استفاده از آونگ در ساخت یک ساعت معطوف کرد، اما گرچه نقشه‌ها آماده شده بود و در سال ۱۶۴۹ ساعتی نیز تا حدی ساخته شد، کار هرگز تکمیل نگردید. در سال ۱۶۵۷، دانشمند هلندی کریستین هویگنس<sup>۱۲</sup>، با الهام از کار گاليله یک ساعت آونگی اختراع و به نام خود ثبت کرد. طرح ابتدایی آن از یک چرخ‌دنگ<sup>۱۳</sup> استفاده می‌کرد که به یک بازوی آونگ نسبتاً پهن نیاز داشت، در نتیجه دوره تناوب آن تا حدی متغیر بود. او در طرح دوم خود از چرخ‌دنده استفاده کرد تا نوسان

را محدود کند، و سپس در طرح سوم خود، با استفاده از آرواره‌های منحنی توانست طول آونگ را بسته به نوسان تغییر دهد و مشکل را تا حد زیادی تصحیح نماید. بعداً در سال ۱۶۷۰، ساعت‌سازان چرخ‌دنگ جدیدی (به شکل لنگر) اختراع کردند که نوسان پاندول را به ۴ تا ۶ درجه کاهش می‌داد. بدین ترتیب امکان استفاده از پاندول‌های درازتر و آهسته‌تر در جعبه ساعت فراهم آمد. برای نوسان یک ثانیه، طول پاندول حدود یک متر است. ساعت‌های دراز و باریکی که با استفاده از این پاندول‌ها ساخته شده بودند به ساعت‌های پدربزرگ معروف شدند، و به دلیل دقت بیشتر آن‌ها، بعد از سال ۱۶۹۰ به تدریج یک عقربه دقیقه‌شمار نیز اضافه شد.

یک مشکل در ساعت‌های پاندولی این بود که آن‌ها در تابستان و به دلیل انبساط میلیه پاندول، کند کار می‌کردند (عقب می‌رفتند). با اختراع پاندول جیوه‌ای این مشکل برطرف شد. این نوع ساعت، یک محفظه جیوه به‌عنوان وزنه انتهای پاندول داشت، و پاندول مشبک نیز از میلیه‌هایی از آهن و روی در کنار هم استفاده می‌کرد. در دوره‌های اخیر، پاندول‌هایی از جنس اینوار<sup>۱۴</sup>، آلیاژی از فولاد و نیکل، با ضریب انبساط فوق‌العاده پایین مورد استفاده قرار گرفته است. یک هدف کلیدی در این ساعت‌ها، تلاش برای آن است که پاندول تا آنجا که ممکن است آزادانه حرکت کند. در دقیق‌ترین ساعت‌های پاندولی، تنها در هر ۳۰ ثانیه یک پالس به پاندول اعمال می‌شود. نوسان پاندول (و به دنبال آن، دوره تناوب) از تغییرات در فشار هوا نیز اندکی تأثیر می‌پذیرد. می‌توان از یک وسیله بادی<sup>۱۵</sup> که اندازه‌اش با فشار تغییر می‌کند برای جبران این استفاده کرد، اما برخی از بهترین انواع ساعت‌های پاندولی در محیط نزدیک خلأ کار می‌کنند. این نکته را باید توجه داشت، چون دوره تناوب یک پاندول تابعی از کشش گرانشی زمین است، باید آن‌ها را، هم بر اساس ارتفاع از سطح دریا و هم عرض جغرافیایی، تنظیم نمود.

### ساعت‌های کوارتز

ساعت‌های کوارتز<sup>۱۶</sup> از یک نوسانگر الکترونیکی استفاده می‌کنند که به وسیله یک بلوره کوارتز تنظیم می‌شوند. این ساعت‌ها دست‌کم ده بار از ساعت‌های خوب مکانیکی دقیق‌ترند. در جدیدترین ساعت‌های کوارتز، نوسان‌ساز بلوره کوارتز به شکل یک دیپازن کوچک است. این دیپازن که با لیزر برش خورده است در بسامد ۳۲,۷۶۸ هرتز ارتعاش می‌کند. این بسامد برابر با ۳<sup>۱۵</sup>



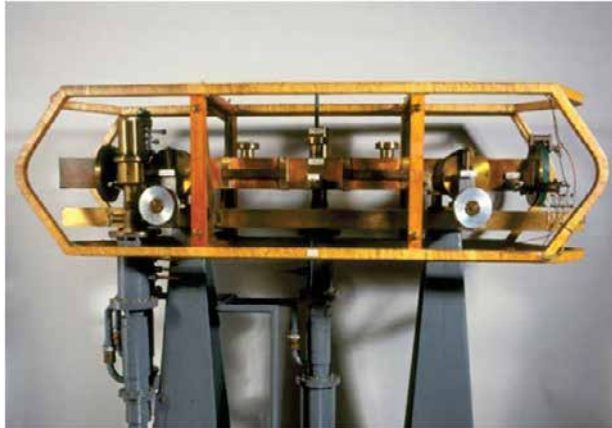
هرتز است. بدین ترتیب با انتخاب زنجیره‌ای از ۱۵ تقسیم‌کننده (بر دو) می‌توان سیگنال یک هرتز را به دست آورد. این سیگنال، عقربه‌ی ثانیه‌شمار ساعت را به کار می‌اندازد. یک ساعت مچی کوارتز معمولی در هرروز و در دمای بدن، کمتر از نیم ثانیه عقب یا جلو می‌رود.

اگر ساعت کوارتز را در دمایی ثابت (البته در حد معقول) نگه داریم، می‌توان به خطایی کمتر از ۱۰ ثانیه در سال دست یافت. برای افزایش دقت، در زمان سنج‌های کوارتز که قرار است به‌عنوان معیارهای زمان مورد استفاده قرار گیرند از یک اجاق بلوره‌ای استفاده می‌شود تا بلوره را در دمای ثابت نگه دارد. از دهه‌ی ۱۹۳۰، معیارهای زمان مبتنی بر کوارتز جانشین ساعت‌های پاندولی شدند. در سال ۱۹۳۲، یک ساعت کوارتز توانست تغییرات ریز و هفتگی در نرخ چرخش زمین را اندازه بگیرد، و اینکه (به دلیل نیروهای کشندی ماه) نرخ چرخش در حال کند شدن بود.

### ساعت‌های اتمی

معیارهای زمانی کوارتزی تا دهه‌ی ۱۹۶۰ همچنان مورد استفاده باقی ماندند تا اینکه ساعت‌های اتمی جای آن‌ها را گرفتند. این ساعت‌ها، دقیق‌ترین معیار شناخته شده برای زمان و بسامد هستند، و از سیگنال دقیق ریزموجی استفاده می‌کنند که الکترون‌ها هنگام تغییر تراز انرژی خود در اتم گسیل می‌دارند. خطا در این ساعت‌ها به یک در  $۱۰^{۱۴}$  می‌رسد، یعنی حدود  $۱۰^{-۹}$  ثانیه در سال. نخستین ساعت دقیق اتمی را لوئیس اسن در سال ۱۹۵۵ در آزمایشگاه ملی فیزیک<sup>۱۷</sup> در انگلستان ساخت. این ساعت از باریکه‌ای از اتم‌های سزیم ۱۳۳ استفاده می‌کرد که از میان یک استوانه عبور می‌نمود. این استوانه به‌عنوان یک کاواک شدید<sup>۱۸</sup> در بسامد گسیلی از اتم‌های سزیم عمل می‌کرد (شکل ۱۸-۳). در بیشتر کشورها، چنین ساعت‌هایی که مبتنی بر باریکه سزیم هستند، معیار بنیادی زمان را فراهم می‌آورند. اما این ساعت‌ها خیلی گران هستند و معمولاً با ساعت‌های اتمی مبتنی بر میزر هیدروژنی<sup>۱۹</sup> پشتیبانی می‌گردند.

میزر هیدروژنی از این حقیقت استفاده می‌کند که پایین‌ترین تراز انرژی اتم هیدروژن، هنگامی که در میدان مغناطیسی قرار گیرد، به دو تراز تقسیم می‌شود. در تراز انرژی بالاتر، اسپین پروتون و الکترون موازی است، و در تراز پایین‌تر پادموازی است. باریکه‌ای از اتم‌های هیدروژن تولید می‌شود (با تعداد مساوی از هر دو حالت) و از میان یک آهنربای مخصوص (شش قطبی)



شکل ۱۸-۳: نخستین ساعت اتمی سزیمی

عبور داده می‌شود. بدین ترتیب باریکه به دو باریکه با حالت‌های اسپینی متفاوت تقسیم می‌گردد. باریکه‌ای را که در تراز بالاتر است به درون یک کاواک تشدید وارد می‌کنند. این کاواک حاوی تابش در بسامدی است که متناظر است با گذار از تراز بالاتر به پایین‌تر، یعنی  $۱,۴۲۰,۴۰۵,۷۵۲$  هرتز. این تابش، اتم‌های ورودی را تحریک می‌کند تا تابش نمایند و سطح تابش را در کاواک بالا برند. یک کاوند<sup>۲۰</sup> کوچک، اندکی از انرژی را از کاواک بیرون می‌کشد. این انرژی جهت قفل کردن یک نوسان‌ساز بلوره‌ای بر بسامدی با دقت مساوی مورد استفاده قرار می‌گیرد. سپس می‌توان این بسامد را به صورت متوالی تقسیم نمود و به پالس یک هرتز برای راه‌اندازی ساعت دست‌یافت.

در متداول‌ترین ساعت‌های اتمی از اتم‌های روبیدیم استفاده می‌کنند. این ساعت‌ها در بسیاری از کاربردهای تجاری، هوافضا و قابل‌حمل مورد استفاده قرار می‌گیرند. این‌ها ارزان هستند، اما ذاتاً دقت کمتری دارند. با وجود این، آن‌ها را می‌توان به صورت دوره‌ای به وسیله یک گیرنده GPS تصحیح کرد و به دقتی طولانی‌مدت، برابر با معیارهای زمان ملی آمریکا، دست‌یافت.

امروزه یکی از دقیق‌ترین ساعت‌های اتمی که مورد استفاده مداوم است، NIST-F1 می‌باشد، که هم‌اکنون معیار اصلی زمان و بسامد در آمریکا به حساب می‌آید. این یک ساعت اتمی با چشمه سزیم است که بسامد تشدید (۹,۱۹۲,۶۳۱,۷۷۰ هرتز) را از اتم‌های سزیم، زمانی که عملاً ساکن هستند، استخراج می‌نماید. شش باریکه لیزر فرسرخ به نرمی اتم‌های سزیم را تارسیدن به شکل



شکل ۱۸-۴: توپ زمان در رصدخانه سلطنتی، گرینویچ

یک توپ به هم می‌فشارند. بدین ترتیب حرکت اتم‌ها کند شده، تا دماهایی نزدیک به صفر مطلق سرد می‌شوند. این فرایند به زیبایی اثر جابه‌جایی دوپلری را حذف می‌کند، پدیده‌ای که ساعت‌های اتمی را که از اتم‌های در حرکت استفاده می‌کنند تحت تأثیر قرار می‌دهد. در ساعت اتمی NIST-F1 دقت به  $5 \times 10^{-16}$  می‌رسد، به این معنی که در بیش از ۶۰ میلیون سال، نه یک ثانیه عقب می‌رود و نه جلو. این ساعت ۱۰ بار دقیق‌تر از ساعت اتمی است که از سال ۱۹۶۳ تا ۱۹۹۹ در آمریکا به عنوان معیار زمان و بسامد مورد استفاده قرار می‌گرفت.

### ۷-۱۸ انتقال زمان: نه به آن سادگی که به نظر می‌رسد

هر روز، به استثنای یکشنبه‌ها، در ساعت یک بعدازظهر تفنگی از برج و باروهای قلعه ادینبورگ شلیک می‌شود تا زمان را به ساکنان شهر و کشتی‌ها در بندر لیث<sup>۲۱</sup> خبر دهد. اگر ساعت‌ها را در قصر هالی‌رود، که در انتهای دیگر رویال مایل<sup>۲۲</sup> قرار دارد، با شنیدن این سیگنال زمان تنظیم کنند، عملاً پنج ثانیه عقب خواهند بود، چراکه این مدتی است که لازم است تا سیگنال از قلعه ادینبورگ به قصر برسد.

اگر انتقال زمان به وسیله سیگنال رادیویی یا نور صورت پذیرد، خطا بسیار کوچک‌تر خواهد بود. بالای پشت‌بام رصدخانه سلطنتی در گرینویچ یک «توپ زمان» قرار دارد (شکل ۱۸-۴). این توپ اندکی پیش از ساعت یک بعدازظهر بالا برده می‌شود و سر ساعت، بر اساس ساعت اصلی در

رصدخانه، پایین می‌افتد. بدین ترتیب، زمان سنج‌های دریایی مستقر در کشتی‌های واقع در بندر به‌دقت قابل تنظیم بودند و میزان خطای آن‌ها در روز به دست می‌آمد. زمان سنج‌ها این امکان را برای کشتی‌ها فراهم می‌آوردند که طول جغرافیایی خود را با مشاهده زمان عبور خورشید از نصف‌النهار (بالاترین نقطه در آسمان) اندازه بگیرند. تصور کنید در دریا، ۱۰ روز پس از تنظیم زمان سنج در لندن، ساعت کشتی هنگام عبور خورشید از نصف‌النهار، ساعت ۱۳ و ۵ ثانیه را نشان می‌دهد. فرض کنید زمان سنج کشتی در هر روز نیم ثانیه جلو می‌رود. با کم کردن ۵ ثانیه (میزان خطا در ۱۰ روز) به زمان واقعی، یعنی ساعت ۱۳ می‌رسیم. این ساعت نشان می‌دهد که کشتی در طول جغرافیایی ۱۵ درجه غربی قرار دارد (طول گرینویچ صفر است)، چراکه ۲۴ ساعت معادل ۳۶۰ درجه است و یک ساعت متناظر با ۱۵ درجه خواهد بود.

### ساعت‌های رادیویی

ساعت‌های رادیویی<sup>۳۳</sup>، که امروزه به‌صورت گسترده در دسترس هستند، مبتنی بر ساعت‌های کوآرتز می‌باشند، اما یک مدار اضافی دارند که سیگنال‌های زمان را از تعدادی از فرستنده‌های موج کوتاه در جهان دریافت می‌کند. این سیگنال‌ها برای تصحیح ساعت (اغلب در نیمه‌شب) مورد استفاده قرار می‌گیرند و حتی می‌توانند ساعت‌ها را بر اساس زمان تابستانی نیز تنظیم کنند. دقت ساعت‌های رادیویی تا یک ثانیه است، چیزی که برای بیشتر مردم مناسب می‌باشد. یک نکته جالب آن است که چنین ساعتی در لندن حدود ۱/۶ میلی‌ثانیه عقب است چراکه این مدت لازم است تا سیگنال زمان از فرستنده واقع در کامبریا<sup>۳۴</sup> در شمال غربی انگلستان به لندن برسد.

تا پیش از ظهور ساعت‌هایی که با GPS تنظیم می‌شوند، دستگاه سنجش زمان در رصدخانه جدرل بانک، که نویسنده آن را ساخته بود، از سیگنال زمان MSF که از راگی<sup>۳۵</sup> در مرکز انگلستان ارسال می‌شد برای تنظیم خود استفاده می‌کرد. برای تصحیح این تأخیر زمانی، یک ساعت اتمی قابل حمل به راگی ارسال شد و با ساعت آنجا همزمان گردید. پس از آنکه این ساعت به رصدخانه بازگردانده شد توانستیم زمان لازم را برای اینکه سیگنال MSF فاصله راگی تا رصدخانه را بپیماید اندازه بگیریم. ساعت رصدخانه طوری تنظیم شد که هر تیک ثانیه در آن اندکی پیش از رسیدن سیگنال MSF و درست به اندازه این زمان تأخیر به صدا درآید.

## ۱۸-۸ تپنده‌ها: بهترین ساعت‌های طبیعی در جهان

در فصل ۱۱، کشف تپنده‌ها و ماهیت آن‌ها مورد بحث قرار گرفت و اشاره شد که آن‌ها ساعت‌هایی بسیار دقیق می‌سازند. تپنده‌ها به آرامی انرژی تابش می‌کنند. این انرژی از تکانه زاویه‌ای آن‌ها استخراج می‌شود. تکانه زاویه‌ای آن قدر بالا است که نرخ کندشدن به صورتی استثنایی پایین می‌باشد و از این رو تپنده‌ها ساعت‌های دقیقی را می‌سازند. حتی برخی از تپنده‌ها می‌توانند دقت بهترین ساعت‌های اتمی را به چالش بکشند. یک از بهترین ساعت‌های تپنده در حال حاضر ۱۷۱۳+۰۷ است. این تپنده به وسیله ماده‌ای که از یک کوتوله سفید همدم بر آن سقوط می‌کند، تغذیه می‌شود؛ در حال حاضر دوره تناوب پالس‌ها ۴/۵۷ میلی‌ثانیه است - ۲۱۸/۸ بار چرخش در هر ثانیه - و هم‌اکنون با نرخ ۲۰۰ نانوثانیه در ۱۲ سال کند می‌شود. یعنی خطایی کمتر از یک در ۱۰<sup>۱۳</sup>.

## ۱۸-۹ معیار زمان مطلق: زمان کیهانی

در سال ۱۹۰۵، آلبرت اینشتین مقاله خود را درباره نظریه نسبیت خاص منتشر کرد. شاید یکی از معروف‌ترین جنبه‌های این نظریه آن است که به نظر می‌رسد ساعت‌های متحرک نسبت به یک ساعت ساکن در کنار ناظر، کندتر کار می‌کند - پدیده‌ای موسوم به اتساع زمان<sup>۲۶</sup>. این پیش‌بینی به وسیله پرواز ساعت‌های اتمی بسیار دقیق به اثبات رسیده است و باید در سامانه‌های GPS در نظر گرفته شود.

با توجه به نسبی بودن زمان، آیا واقعاً می‌توانیم معیاری را برای زمان تعریف کنیم که با آن به مشاهده تحول جهان بپردازیم؟ شاید بتوان چیزی را تعریف کرد که زمان کیهانی نامیده می‌شود، یعنی زمانی که یک ساعت ساکن نسبت به کل جهان نشان می‌دهد. اما ارتباط این زمان با ساعت‌های زمینی چگونه است؟ می‌دانیم که زمین به دور خورشید در حرکت است، و خورشید هر ۲۲۰ میلیون سال یک بار به دور مرکز کهکشان راه شیری گردش می‌کند. اما آیا می‌توانیم سرعت حرکت منظومه شمسی را نسبت به جهان به دست آوریم؟ شاید تعجب‌آور باشد، ولی می‌توانیم. از سال ۱۹۶۵، مشاهداتی از آنچه زمینه ریزموج کیهانی<sup>۲۷</sup> نام دارد انجام گرفته است. این

تابش را به طور عمده مخلوطی از امواج فرسرخ با طول موج بلند و امواج رادیویی با طول موج خیلی کوتاه تشکیل می‌دهند. برای سادگی فرض کنید که این تابش تنها از یک طول موج به وجود آمده و منظومه شمسی در یک جهت معین نسبت به آن در حرکت است. پدیدهٔ دوپلر، طول موج ظاهری را که مشاهده می‌کنیم تغییر خواهد داد. زمانی که در راستای حرکت منظومه شمسی نگاه می‌کنیم، این تابش به آبی جابه‌جا شده، به نظر می‌رسد طول موج کوتاه‌تری دارد. برعکس، در جهت مخالف، تابش دچار قرمزگرایی شده، طول موج بلندتری خواهد داشت. با توجه به اندازه‌گیری‌های دقیق از تابش زمینه ریزموج کیهانی، هم‌اکنون می‌دانیم که در حال حرکت در میان فضا به سمت صورت فلکی اسد با سرعت حدود  $650 \text{ km/s}$  هستیم ( $2,340,000 \text{ km/h}$  یا  $0.22\%$  سرعت نور). این سرعت ما نسبت به کل جهان است.

بدین ترتیب می‌توانیم حساب کنیم که زمان یک ساعت ساکن نسبت به جهان -ساعتی که زمان کیهانی را نشان می‌دهد- چه تفاوتی با ساعت‌های ما دارد. اینشتین رابطه‌ای را ارائه کرد که نسبت زمان یک ساعت متحرک به یک ساعت ساکن را در اختیار ما قرار می‌دهد. در اینجا این نسبت برابر است با  $1/0.000023$ . این عدد بسیار کوچک است، لذا با یک تقریب بسیار خوب می‌توانیم از ساعت‌هایمان برای اندازه‌گیری مقیاس‌های زمانی جهان استفاده کنیم.

## ۱۰-۱۸ اتساع زمان گرانشی

اینشتین در نظریه نسبیت عام خود نشان داد که ساعت در یک میدان گرانشی قوی، کندتر از میدان ضعیف کار کرده، نوعی اتساع زمان موسوم به «اتساع زمان گرانشی»<sup>۲۸</sup> را به وجود می‌آورد. هرچه میدان گرانشی قوی‌تر شود، مانند هنگام نزدیک شدن به یک سیاه‌چاله، اتساع زمان بزرگ‌تر می‌شود. در جایی که افق رویداد سیاه‌چاله نام دارد -که از درون آن حتی نور نیز نمی‌تواند بگریزد- اتساع زمان از دید ناظری که در فضای آزاد قرار دارد، بی‌نهایت می‌شود و زمان عملاً منجمد می‌گردد!

## ۱۱-۱۸ از چه موقع زمان آغاز شد؟

همان‌طور که در فصل ۱۹ توضیح خواهیم داد، ادوین هابل نشان داد که جهان در حال انبساط

است. اگر نرخ انبساط ثابت فرض شود - نسبت به آنچه که ثابت هابل نام دارد - می‌توان با برون‌یابی به عقب، به جایی رسید که جهان هیچ اندازه‌ای نداشت - مبدأ و آغاز زمان در جهان ما. البته با توجه به ثابت نبودن نرخ انبساط در مدت حیات جهان، نتیجه را باید اصلاح نمود. اگر مقدار کنونی را برای ثابت هابل بپذیریم، سن جهان حدود ۱۳/۸ میلیارد سال به دست می‌آید.

## پانوشته‌ها

- 1 - Local Solar Time
  - 2 - Greenwich Mean Time (GMT)
  - 3 - Equation of Time
  - 4 - Winter Solstice
  - 5 - Universal Time (UT)
  - 6 - two hyperfine levels
  - 7 - Global Positioning System (GPS) Network
  - 8 - Sidereal Day
  - 9 - Analemmatic Sundial
  - 10 - George James Gibbs
  - 11 - Helio-chronometer
  - 12 - Christiaan Huygens
  - 13 - Escapement
  - 14 - Invar
  - 15 - Bellow
  - 16 - Quartz Clock
  - 17 - National Physical Laboratory
  - 18 - Resonant Cavity
  - 19 - Hydrogen Maser Atomic Clock
  - 20 - Probe
  - 21 - port of Leith
  - 22 - Holyrood Palace, at the other end of the Royal Mile
  - 23 - Radio clocks
  - 24 - Cumbria
  - 25 - Rugby
  - 26 - Time Dilation
- ۲۷ - تابشی که از زمانی نزدیک به آغاز جهان سرچشمه گرفته، هم‌اکنون در تمام جهان پخش است.  
در فصل ۲۲ به این موضوع خواهیم پرداخت.
- 28 - Gravitational Time Dilation

# فصل ۱۹

## میراث هابل

ادوین هابل، فرزند ویرجینیا و جان هابل، در ۲۰ نوامبر ۱۸۸۹ در مارشفیلد، میسوری آمریکا<sup>۱</sup>، به دنیا آمد. علاقه وی به نجوم از آنجا مشخص می‌شود که در سن ۱۲ سالگی، مقاله وی درباره سیاره مریخ در یک روزنامه محلی انتشار یافت! او به همراه خانواده به ویٹن، ایلینویز<sup>۲</sup>، محل کار پدرش، نقل مکان کرد. وی در آنجا به دبیرستان ویٹن رفت، و نه تنها در درس عالی بود، بلکه در دوومیدانی و فوتبال نیز خوش درخشید. (او برای مدتی رکورد پرش ارتفاع را در بین دبیرستان‌های ایلینویز در اختیار داشت.) پس از فارغ‌التحصیلی از دبیرستان ویٹن، راتبه<sup>۳</sup> دانشگاه شیکاگو را دریافت کرد و در آنجا به مطالعه فیزیک، نجوم و ریاضیات پرداخت.

هابل در پاییز ۱۹۰۶ به دانشگاه رفت، و با توجه به قد یک متر و هشتاد سانتیمتری و هیکل مناسب، به زودی به ستاره ورزش‌های ژیمناستیک و دوومیدانی تبدیل شد. در سال سوم دانشگاه در ۶ بازی از ۱۲ بازی بسکتبال، که عنوان اولی را برای دانشگاه شیکاگو به دنبال داشت، بازی کرد (شکل ۱۹-۱). او در مارس ۱۹۱۰، و درحالی که نفر دوم کلاس بود، فارغ‌التحصیل شد.

او موفق به دریافت راتبه<sup>۴</sup> تحصیلی با ارزش رودز برای مطالعه حقوق در آکسفورد شد (بخشی به دلیل توصیه‌نامه‌ای که روبرت میلیکان<sup>۵</sup>، که بعدها در سال ۱۹۲۳ برنده جایزه نوبل فیزیک شد، برای وی نوشت). در کمال تعجب، او مطالعه حقوق و اسپانیایی را برگزید (ظاهراً به اصرار پدرش) اما اغلب به رصدخانه دانشگاه سر می‌زد و به فراگیری موضوع جدید با عنوان عکاسی سماوی از استاد آنجا، هربرت ترنر<sup>۶</sup>، می‌پرداخت.

در مدتی که در آکسفورد بود، به نظر می‌رسد ادوین مقداری قیافه گیر شده بود، و در برگشت، خواهرانش را با نحوه لباس پوشیدنش متحیر کرد. برادر ورزشکارشان حالا شنل و شلوار گشاد به تن داشت، و مغرورانه یک چوب‌دستی نیز می‌گرفت. با یک انگشتر نقش‌دار در انگشت کوچک، یک



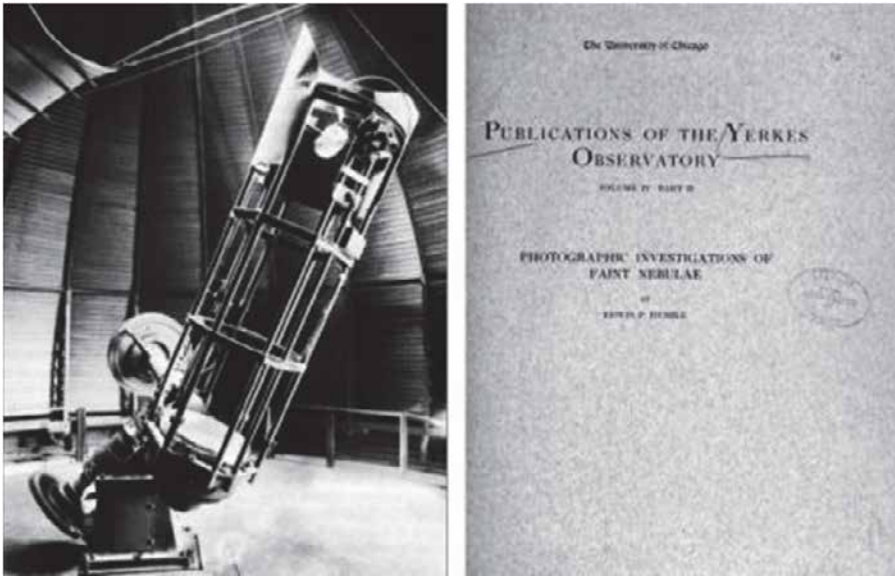


شکل ۱۹-۱: هابل به عنوان یک دهنده، قهرمان بسکتبال، و (در راست) در برگشت از آکسفورد

ساعت مچی را که از مسابقهٔ پرش ارتفاع برده بود بردست داشت.

پس از مراجعت به آمریکا، در ابتدا به تدریس فیزیک و ریاضیات در دبیرستان نیوآلبانی در ایندیانا<sup>۷</sup> مشغول شد. سپس، با قبولی در آزمون وکالت در سال ۱۹۱۳، در لوئیزیویل، کنتاکی<sup>۸</sup>، وکیل شد. اصلاً معلوم نیست که هابل عملاً تا چه حد به وکالت پرداخت. او تا سال ۱۹۱۴ از حقوق خسته شده بود. در اوت همان سال تصمیم گرفت به دانشگاه شیکاگو برگشته، برای اخذ مدرک دکتری به مطالعهٔ ستاره‌شناسی بپردازد. در شیکاگو جایی برای رصدخانه نبود، لذا دانشگاه رصدخانهٔ خود را در ساحل دریاچه ژنو<sup>۹</sup>، ۱۲۰ کیلومتر شمال غربی شیکاگو، بنا کرده بود. در اینجا، آن‌ها با پول وثیقهٔ چارلز تایسون پیرکز<sup>۱۰</sup>، مرد قدرتمند در تراموای شهری شیکاگو، بزرگ‌ترین تلسکوپ شکستی جهان را با قطر دهانهٔ ۴۰ اینچ ساخته بودند.

اما هابل از تلسکوپ بازتابی ۲۴ اینچی که در رصدخانه بود استفاده می‌کرد. او با عکس‌برداری از مناطقی از آسمان، به مطالعهٔ آنچه که در آن زمان به سحابی‌های سفید معروف بودند (و امروزه کهکشان شناخته می‌شوند) پرداخت. یک از اجسام به‌زودی توجه وی را جلب کرد: او زمانی که دریافت یکی از اجسام هدف، معروف به NGC ۲۲۶۱، در مقیاس‌های زمانی نسبتاً کوتاه به صورت قابل توجهی تغییر می‌کند، شگفت‌زده شد. هابل این جسم را به‌عنوان «بهترین نمونه از یک سحابی شبه‌دنباله‌دار در آسمان‌های شمالی» توصیف کرد. این کشف جدید در مجلهٔ *Astrophysical Journal* منتشر شد. هابل در این مقاله با احتیاط اظهار داشت: «هیچ تلاشی در اینجا برای توضیح این پدیده انجام نمی‌شود، این سحابی باید خیلی نزدیک باشد.» (این



شکل ۱۹-۲: تلسکوپ ۲۴ اینچ در رصدخانه پرکز. هابل با استفاده از آن به تصویربرداری و مطالعهٔ سحابی‌های کم‌نور می‌پرداخت.

سحابی، که امروزه آن را با عنوان سحابی متغیر هابل<sup>۱۱</sup> می‌شناسیم، در مدت تنها چند هفته ظاهر خود را به صورت قابل توجهی تغییر می‌دهد؛ یک سحابی بازتابی از گاز و غبار ریزی است که از ستاره آر تک شاخ<sup>۱۲</sup> بیرون می‌ریزد. با عرضی حدود یک سال نوری، در فاصلهٔ تقریباً ۲۵۰۰ سال نوری در صورت فلکی تک شاخ قرار دارد. تصور بر این است که توده‌های متراکمی از غبار تیره از نزدیکی ستاره آر تک شاخ عبور کرده، سایه‌های متحرکی را بر روی غبار بازتابی که سحابی را می‌سازد، می‌افکند.

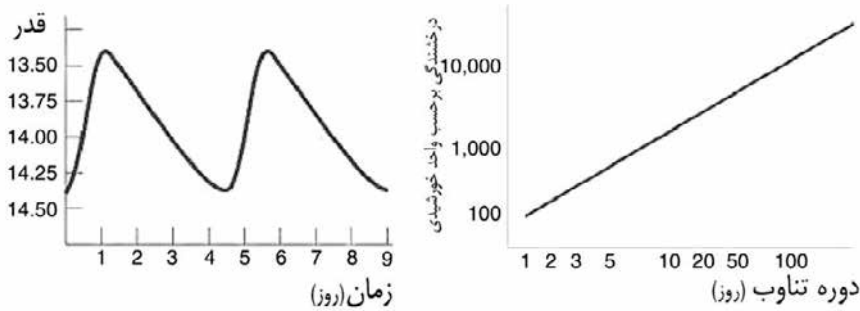
تا زمانی که پایان نامهٔ هابل (شکل ۱۹-۲) تکمیل شد، ستاره‌شناسان دیگر حدود ۱۷,۰۰۰ سحابی را فهرست‌بندی کرده بودند. هابل در پایان نامهٔ خود نوشت: «آگاهی ما از ماهیت سحابی‌ها فوق‌العاده کم است... دست کم به نظر می‌رسد برخی از سحابی‌های پخشیدهٔ بزرگ، که با ستاره‌های قابل مشاهده با چشم غیرمسلح ارتباط دارند، درون سامانهٔ ستاره‌ای (کهکشان راه‌شیری) قرار گرفته‌اند... اما دیگران، به ویژه مارییج‌های غول‌پیکر که هیچ حرکت قابل‌رؤییتی ندارند، ظاهراً خارج از سامانهٔ ما هستند.» هرچند پایان نامه او تا حدی از لحاظ فنی متزلزل، و

تعبیرات نظری آن نسبتاً به هم ریخته بود، مبنای اکتشافات بزرگی را پایه ریزی کرد که هابل بنا بود در ۱۰ سال بعد به آن‌ها دست یابد.

در اوایل سال ۱۹۱۷، هنگامی که هابل مشغول کار بر روی رساله دکتری خود و اتمام آن بود، به وسیله جرج هیل برای عضویت در رصدخانه کوه ویلسون<sup>۱۳</sup> در پاسادانای کالیفرنیا دعوت شد. با وجود این، پس از بیداری شبانه برای تکمیل پایان نامه و ارائه آن در صبح بعد، هابل برای خدمت سربازی نام نویسی کرد و این تلگراف را برای هیل ارسال نمود: «متأسفم نمی توانم دعوت شما را بپذیرم. عازم جنگ هستم.» هابل با درجه سروانی وارد ارتش شد و بعدها به درجه سرگردی ارتقا یافت. او به فرانسه اعزام شد و در آنجا به عنوان افسر عملیات و صف خدمت کرد. او در سال ۱۹۱۹ به آمریکا بازگشت و بلافاصله سراغ هیل رفت تا به گروه وی در رصدخانه کوه ویلسون بپیوندد. دو سال پیش از این، تلسکوپ ۱۰۰ اینچ هوکر<sup>۱۴</sup> تکمیل شده بود. او تا آخر عمر در عضویت این رصدخانه باقی ماند. تنها در جنگ جهانی دوم، بار دیگر به ارتش آمریکا پیوست؛ او رئیس بخش بالستیک و مدیر تونل‌های ابرصوتی باد<sup>۱۵</sup> در مجتمع تحقیقات نظامی آبردین در مرلند<sup>۱۶</sup> بود. برای کارهایش در آنجا، هابل نشان لیاقت دریافت کرد.

## ۱۹-۱ قانون هابل

پیش از آنکه بتوانیم به بحث پیرامون آنچه که شاید بزرگ‌ترین اکتشاف قرن قبل بود بپردازیم، لازم است با دو مجموعه مشاهدات بسیار مهم آشنا شویم. نخستین مجموعه به مشاهدات هنری پتا لویت<sup>۱۷</sup>، هنگامی که در رصدخانه کالج هاروارد کار می‌کرد، مربوط است. در آنجا او به رئیس بخش نورسنجی عکاسی<sup>۱۸</sup> منصوب شد. گروه وی، با استفاده از دستگاه اندازه گیری عکاسی که دوشیزه لویت آن را ساخته بود و یک محدوده روشنایی با اختلاف بیش از ۱۷ قدر (۷ میلیون بار تفاوت) را پوشش می‌داد، به مطالعه ستارگان برای تعیین قدر آن‌ها پرداختند. بسیاری از صفحات عکاسی که لویت به بررسی آن‌ها می‌پرداخت در ایستگاه جنوبی رصدخانه هاروارد در آرکیپا، پرو<sup>۱۹</sup>، گرفته شده بودند. از آنجا امکان مشاهده ابرهای ماژلانی وجود داشت، و او زمان زیادی را به بررسی صفحات مربوط به آن‌ها و جستجوی ستارگان متغیر اختصاص داد. در بین ستارگان متغیر بسیاری که در این دو ابر مشاهده شد، ۲۵ ستاره متغیر قیفاووسی وجود داشت. این ستاره‌ها از جمله



شکل ۱۹-۳: رابطه درخشندگی- دوره تناوب و منحنی نوری در یک متغیر قیفاووسی.

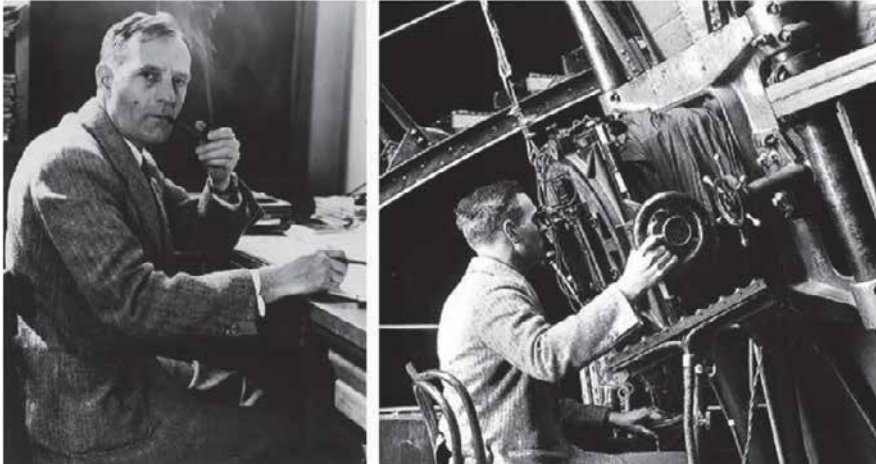
روشن‌ترین ستارگان آسمان هستند- بین ۱۰۰۰ تا ۱۰۰,۰۰۰ بار روشن‌تر از خورشید- و پس از ستارهٔ دلتا قیفاووس<sup>۲۰</sup>، که به‌عنوان یک متغیر در سال ۱۷۸۴ به‌وسیلهٔ ستاره‌شناس بریتانیایی جان گودریک<sup>۲۱</sup> کشف شده بود، به این نام شناخته می‌شوند. ستارگان قیفاووسی به‌صورت منظم تپش می‌کنند؛ روشنایی آن‌ها به‌سرعت به یک بیشینه افزایش می‌یابد و سپس به آرامی سقوط می‌کند. با توجه به روشنایی بسیار زیاد این ستاره‌ها، می‌توان آن‌ها را از فاصله‌های خیلی دور دید. لویت دوره تناوب ۲۵ قیفاووسی را در ابر کوچک ماژلانی تعیین کرد و در سال ۱۹۱۲ آنچه را که از آن زمان به رابطهٔ درخشندگی- دوره تناوب معروف شده است، اعلان نمود. او اظهار داشت: «یک خط راست را می‌توان به‌سادگی بین هر دو سری از نقاط متناظر با بیشینه‌ها و کمینه‌ها (مربوط به روشنایی متغیرهای قیفاووسی) ترسیم نمود، و بدین ترتیب نشان داد که یک رابطهٔ ساده بین روشنایی و دوره تناوب متغیرها وجود دارد.» با توجه به اینکه ابر کوچک ماژلانی در فاصله‌ای زیاد از زمین قرار داشت و نسبتاً کوچک بود، لویت همچنین دریافت: «از آنجاکه احتمالاً این متغیرها در فاصله‌ای تقریباً یکسان از زمین قرار دارند، دوره تناوب آن‌ها ظاهراً به‌گسیل واقعی نور از آن‌ها مربوط است، چیزی که به‌وسیلهٔ جرم، چگالی، و روشنایی سطحی آن‌ها تعیین می‌گردد.»

رابطهٔ بین درخشندگی و دوره تناوب در یک متغیر قیفاووسی کاملاً دقیق است؛ یک قیفاووسی با دوره تناوب سه‌روزه متناظر است با یک درخشندگی حدود ۸۰۰ برابر خورشید، درحالی‌که یک قیفاووسی با دوره تناوب سی‌روزه حدود ۱۰,۰۰۰ بار روشن‌تر از خورشید است (شکل ۱۹-۳). لذا، برای مثال، تصور کنید که دوره تناوب یک قیفاووسی را که در کهکشانی دور قرار دارد اندازه‌گرفتیم

و مشاهده کردیم که ۱۰/۰۰۰ بار از یک متغیر قیفاووسی با همین دوره تناوب که در ابر بزرگ ماژلانی قرار دارد کم‌نورتر است. با توجه به قانون عکس مجذور فاصله، می‌توانیم دریابیم که این قیفاووسی (و کهکشانی که در آن قرار دارد) ۱۰۰ بار دورتر از ابر بزرگ ماژلانی است؛ یا به عبارت دیگر،  $100 \times 51/2 \text{ kpc}$  که برابر است با فاصله‌ای معادل  $16,600,000$  سال نوری. بنابراین ستاره‌های قیفاووسی شمع‌های استاندارد هستند که برای تعیین فاصله تا خوشه‌ها و کهکشان‌ها به کار می‌آیند. (چون محل دقیق متغیر قیفاووسی را در خوشه یا کهکشان نمی‌دانیم، یک عدم قطعیت کوچک وجود خواهد داشت، اما این خطا آن قدر کوچک است که می‌توان از آن چشم پوشید.)

برای مدت‌های مدید این بحث وجود داشت که آیا «سحابی‌های سفید» درون راه‌شیری هستند یا خارج آن. در سال ۱۹۱۲ وستو اسلیفر<sup>۲۳</sup> در رصدخانه لوتل مشاهدات خود را از خطوط طیفی در M۳۱، سحابی عظیم در امرأة‌المسلسله، منتشر نمود، و دریافت که آن‌ها یک جابه‌جایی به سمت آبی از خود نشان می‌دهند. با فرض اینکه این آبی‌گرایی ناشی از جابه‌جایی دوپلری بود، این موضوع اشاره به این داشت که امرأة‌المسلسله با سرعت  $300 \text{ km/s}$  در حال حرکت به سمت ما بود - سریع‌تر از هر جسم دیگری تا آن زمان. اسلیفر نوشت: «مقدار این سرعت، که تاکنون بی‌سابقه است، این سؤال را برمی‌انگیزد که آیا ممکن نیست دلیل این جابه‌جایی شبه‌سرعت چیز دیگری غیر از پدیده دوپلری باشد، اما من بر این اعتقادم که در حال حاضر هیچ تعبیر دیگری برای آن نداریم.» سه سال بعد، او جابه‌جایی طیفی در خطوط ۱۴ کهکشان دیگر را گزارش نمود که به جز سه کهکشان، مابقی با سرعت زیاد از ما دور می‌شدند. این شاید اشاره به این داشت که این اجسام بخشی از کهکشان ما نبودند، چراکه جابه‌جایی‌های اندازه‌گیری شده از اجسام شناخته شده درون کهکشان بسیار کمتر بود.

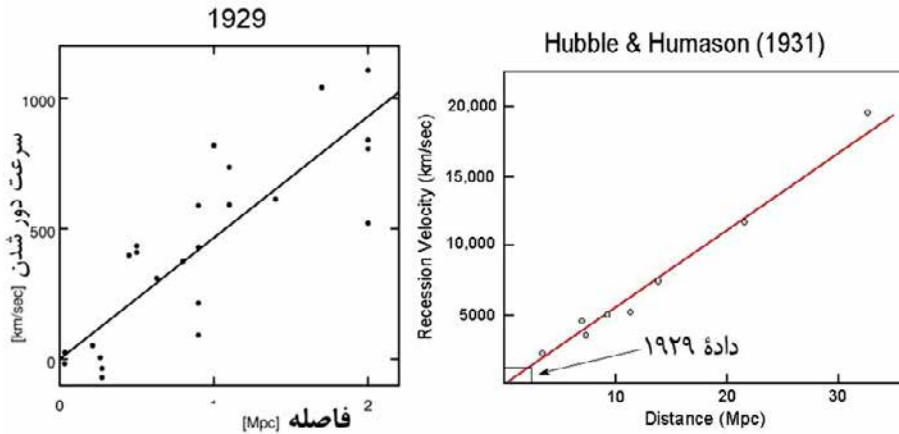
اما هارلو شاپلی<sup>۲۴</sup> نظری مخالف داشت. او که پیش از آن توانسته بود با استفاده از متغیرهای قیفاووسی اندازه کهکشان و محل خورشید را در آن حساب کند، یک ستاره‌شناس بسیار مورد احترام بود و بسیاری این سخن وی را که این سحابی‌ها درون راه‌شیری قرار دارند می‌پذیرفتند. نکته کلیدی در اظهارات وی این بود که در این اجسام نواخترهایی مشاهده شده بود، و اگر این اجسام در فاصله بسیار دوری قرار داشتند، این نواخترها به ناچار باید تا حد غیرقابل تصویری روشن می‌بودند. (همین طور بود؛ آن‌ها ابرنواختر بودند!)



شکل ۱۹-۴: ادوین هابل در پشت میز، و در کانون تلسکوپ ۱۰۰ اینچ هوکر در رصدخانه کوه ویلسون. با استفاده از این تلسکوپ، هابل فاصله تا «سحابی‌های سفید» را اندازه می‌گرفت.

آنچه واقعاً نیاز بود، اندازه‌گیری فاصله تا یکی از این «سحابی‌های روشن» بود. هابل می‌دانست اگر او بتواند یک متغیر قیفاووسی را در یکی از آن‌ها یافته، دوره تناوب نوسان آن را اندازه بگیرد، می‌تواند روشنایی آن را با یک دوره تناوب مشابه که در ابر کوچک ماژلانی مشاهده شده بود مقایسه کند. اگر مثلاً، ۱۰۰ بار کم‌نورتر بود، می‌فهمید که در فاصله‌ای ۱۰ بار دورتر از ابر کوچک، که فاصله‌اش معلوم بود، قرار گرفته است. سحابی ام‌اِرم‌اِلم‌سلسله یک هدف آشکار بود و نهایتاً، در یک تصویر که در شب‌های ۵ و ۶ اکتبر ۱۹۲۳ گرفته شد، او یکی را یافت و بدین ترتیب توانست فاصله ام‌اِرم‌اِلم‌سلسله را ۸۶۰,۰۰۰ سال نوری محاسبه کند - بسیار فراتر از محدوده کهکشان ما، که در آن زمان تصور می‌شد حدود ۳۰۰,۰۰۰ سال نوری قطر دارد. (شما متوجه خواهید شد که این مقادیر حدود سه بار بزرگ‌تر از مقادیری است که امروزه مورد قبول واقع شده‌اند. متغیرهای قیفاووسی به دو دسته اصلی تقسیم می‌شوند، و آن‌هایی که در ام‌اِرم‌اِلم‌سلسله مشاهده شدند چندین بار روشن‌تر از قیفاووسی‌هایی بودند که هنری پیتا لوییت در ابر کوچک ماژلانی مشاهده کرده بود. این موضوع به کاهش فاصله محاسبه شده می‌انجامد.)

کشف هابل، که در ۳۰ دسامبر ۱۹۲۴ اعلان شد، عمیقاً درک ما را از جهان تغییر داد. هابل (شکل ۱۹-۴) کار خود را با اندازه‌گیری فاصله تا کهکشان‌هایی که قرمزگرایی آن‌ها را وستو اسلیفر



شکل ۱۹-۵: نمودارهای هابل در سال‌های ۱۹۲۹ و ۱۹۳۱

به دست آورده بود ادامه داد. او فاصله‌هایی را که اندازه گرفته بود با اندازه‌گیری‌های سرعت به وسیله اسلیفر ترکیب کرد و به نتیجه‌ای دست یافت که شاید بتوان آن را به‌تنهایی مهم‌ترین کشف در قرن گذشته دانست.

هابل متوجه شد که کهکشان‌های دورتر، با سرعت بیشتری دور می‌شوند، و به عبارت دیگر، هرچه فاصله بیشتر، سرعت بالاتر (شکل ۱۹-۵). این کشف به قانون هابل مشهور شده است: سرعت دور شدن متناسب است با فاصله. چرا این کشف تا این حد مهم بود؟ جهانی یک‌بعدی را مانند شکل ۱۹-۶ در نظر بگیرید. در ابتدا سه عضو این جهان ۱۰ کیلومتر از هم فاصله دارند. حال این جهان در مدت یک ساعت به صورت یکنواخت به دو برابر منبسط می‌شود. از دید عضو سمت چپ، به نظر می‌رسد که عضو میانی در این یک ساعت ۱۰ کیلومتر جابه‌جا شده است، درحالی‌که عضو سمت راست در این مدت ظاهراً ۲۰ کیلومتر حرکت کرده است - سرعت ظاهری دور شدن متناسب است با فاصله. بدین ترتیب این فاصله خطی بین سرعت دور شدن و فاصله نشان می‌داد



شکل ۱۹-۶: نمایی از یک جهان یک‌بعدی در حال انبساط

که جهان در حال انبساط است، و نه ایستا، آن چنان که بسیاری در آن زمان باور داشتند. سرعت دورشدن و فاصله به صورت مستقیم متناسب بودند و از طریق ثابت هابل،  $H_0$ ، به هم مربوط می شدند. مقداری که از داده های ابتدایی هابل برای این ثابت به دست آمد حدود  $500 \text{ (km/s)/Mpc}$  بود. شاید استفاده از واژه «ثابت» گمراه کننده باشد. این مقدار در صورتی واقعاً ثابت بود که جهان از زمان به وجود آمدن به صورت خطی منبسط شده بود. اما این طور نیست، و به همین دلیل از اندیس صفر استفاده می شود:  $H_0$  مقدار کنونی ثابت هابل است. با این فرض ساده که جهان در تمام مدت با یک نرخ خطی منبسط شده است، می توان در زمان به عقب برگشت و به نقطه ای رسید که جهان هیچ اندازه ای نداشت (منشأ آن) و بدین ترتیب سن جهان را برآورد کرد، چیزی که به سن هابل معروف است. این سن به راحتی از  $\frac{1}{H_0}$  به دست می آید، و با استفاده از مقدار  $500 \text{ (km/s)/Mpc}$  به سن حدود ۲ میلیارد سال می رسیم:

$$\begin{aligned} \frac{1}{H_0} &= \frac{1 \text{ Mpc}}{500 \text{ km/s}} \\ &= \frac{3/26 \text{ میلیون سال نوری}}{500 \text{ km/s}} \\ &= \frac{3/26 \times 10^6 \times 365 \times 24 \times 3600 \times 3 \times 10^5 \text{ s}}{500} \\ &= \frac{3/26 \times 10^6 \times 3 \times 10^5 \text{ سال}}{500} \\ &= 1/96 \times 10^9 \text{ سال} \\ &= \text{حدود ۲ میلیارد سال} \end{aligned}$$

بدیهی است که این مقدار اشتباه است؛ داده ای که هابل برای واسنجی (کالیبراسیون) فاصله استفاده کرد اشتباه بود، و به علاوه، او عملاً در حال مشاهده یک گروه روشن تر از متغیرهای قيفاووسی بود. به همین دلیل به برآوردی بسیار کمتر از مقدار واقعی برای فاصله تا کهکشان ها هدایت شد.

هابل، همچنین، با دسته بندی کهکشان ها بر اساس شکلی که در تصاویر عکاسی داشتند، رایج ترین روش طبقه بندی آن ها را ابداع نمود. او گروه های مختلف کهکشان ها را در آنچه که به



رشته هابل معروف شد مرتب نمود. کهکشان‌ها در سه گروه جای گرفتند: کهکشان‌های بیضوی، مارپیچ (که به دو زیرگروه مارپیچ معمولی و میله‌ای تقسیم می‌شدند) و نامنظم. پس از جنگ جهانی دوم، هابل از ساخت تلسکوپ غول‌پیکر ۲۰۰ اینچی در کوه پالومار، جنوب کوه ویلسون، پشتیبانی نمود، و همین باعث شد که تصویر وی در سال ۱۹۴۸ بر روی جلد مجله *Time* قرار گیرد. او به این افتخار نائل آمد که نخستین رصد را با این تلسکوپ انجام دهد، و هابل NGC ۲۶۶۱ را برای رصد انتخاب کرد، یعنی همان سحابی شبه‌دنباله‌دار که اولین بار آن را در سال ۱۹۱۴ مطالعه کرده بود. متأسفانه در سال ۱۹۵۳، اندکی پس از تکمیل تلسکوپ ۲۰۰ اینچ، هابل بر اثر حمله قلبی درگذشت. تا آن زمان، ستاره‌شناسان برای جایزه نوبل در نظر گرفته نمی‌شدند. این وضعیت تا کمی بعد نیز ادامه داشت؛ اما چون هرگز این جایزه به مرده تعلق نمی‌گیرد، او هرگز برنده جایزه نوبل نشد، افتخاری که کاملاً لیاقتش را داشت.

## ۱۹-۲ تلسکوپ فضایی هابل

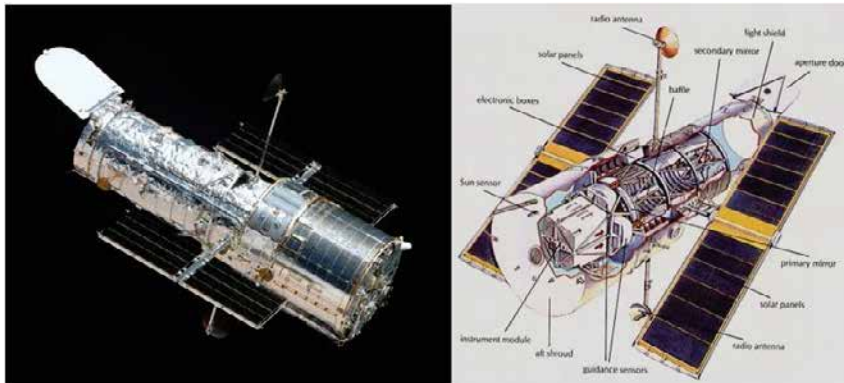
در سال ۱۹۴۶، ستاره‌شناس لیمن اسپیتزر<sup>۲۴</sup> مقاله «مزایای نجومی یک رصدخانه فرازمینی» را نوشت و در آن، دو مزیت اصلی را که یک رصدخانه فضایی نسبت به تلسکوپ‌های زمینی داراست مورد بحث قرار داد. نخست آنکه، توان تفکیک زاویه‌ای تنها به وسیله اندازه آینه محدود می‌شد (با فرض یک آینه ایده‌آل) و نه آشفتگی و تلاطمات جوی، و دوم آنکه تلسکوپ فضایی می‌تواند در طول موج‌های فروسرخ و فرابنفش، که به شدت به وسیله جو زمین جذب می‌شوند، به رصد بپردازد. او در سال ۱۹۶۵ به ریاست کمیته‌ای منصوب شد که وظیفه تعریف اهداف علمی برای چنین تلسکوپی را بر عهده داشت. (برای تجلیل از کار وی، تلسکوپ فضایی فروسرخ «اسپیتزر» به افتخار وی نام‌گذاری شده است.)

سرمایه‌گذاری ساخت تلسکوپ فضایی هابل به سال ۱۹۷۰ بازمی‌گردد. این تلسکوپ، که سال ۱۹۸۳ تاریخ پیشنهادی برای پرتاب آن بود، به وسیله ناسا و با کمک آژانس فضایی اروپا ساخته شد. قرار بر این بود که شاتل فضایی آن را به مدار ببرد، اما در کنار مشکلات بسیار دیگر، فاجعه چلنجر به تأخیر در پرتاب آن منجر شد. بالاخره در ۲۴ آوریل ۱۹۹۰، شاتل دیسکاوری آن را در با خود به فضا برد تا در مدار قرار دهد. مدار پایین تلسکوپ (۵۵۹ کیلومتر) به این معنی بود که

بسیاری از اجسام را تنها می‌شد حداکثر ۱۲ ساعت، پیش از آنکه زمین آن‌ها را مخفی کند، مورد رصد پیوسته قرار داد. اما از طرف دیگر، مدار پایین این امکان باارزش (و آن‌طور که بعداً معلوم شد، امکان حیاتی) را برای هابل فراهم می‌آورد که در طول حیات کاری خود به وسیله پروازهای دیگر شاتل تعمیر و بهینه‌سازی شود. از سال ۱۹۹۳ تا سال ۲۰۰۹ پنج مأموریت تعمیراتی انجام شد. در این مأموریت‌ها، ضمن جایگزینی قسمت‌هایی که طول عمر کاری آن‌ها محدود بود - به‌ویژه ژيروسکوپ‌هایی که برای جهت‌دهی تلسکوپ به سمت اجسام هدف استفاده می‌شود - تجهیزات بهینه و ارتقا یافت، و بدین ترتیب قابلیت‌های تلسکوپ تا حد زیادی افزایش پیدا کرد.

کار محاسبات آینه اولیه ۲/۴ متری به شرکت پركين-المر<sup>۲۵</sup> سپرده شد. طراحی تلسکوپ هابل یک نوع ریچی-کریترین از تلسکوپ بازتابی کاسگرین است. این طرح، یک میدان دید وسیع با کیفیت تصویر عالی را فراهم می‌آورد و هم‌اکنون در بسیاری از تلسکوپ‌های اپتیکی بزرگ مورد استفاده است. عیب این طرح آن است که آینه‌های اولیه و ثانویه هذلولوی هستند، و به همین دلیل، ساخت و آزمایش آن‌ها مشکل است. با توجه به اینکه قرار بود تلسکوپ هابل در طول موج‌های فرابنفش مورد استفاده قرار گیرد، برای دستیابی به اپتیکی مطلوب که تنها پراش آن را محدود<sup>۲۶</sup> می‌کرد باید آینه را با دقت ۱۰ نانومتر، حدود ۱/۶۵ طول موج نور قرمز، صیقل می‌دادند. شرکت پركين-المر در سال ۱۹۷۹ ساخت آینه را آغاز کرد و برای این کار از شیشه‌ای با انبساط فوق‌العاده کم<sup>۲۷</sup> استفاده کرد. برای کاهش وزن، آینه از صفحاتی به ضخامت یک اینچ در بالا و پایین تشکیل شده بود که یک شبکه‌بندی شش‌وجهی در میان آن‌ها قرار داشت. صیقل آینه در سال ۱۹۸۱ پایان یافت، و سپس آینه را با آب داغ که از یون زدوده شده بود شستشو دادند. پوشش بازتاب‌کننده از جنس آلومینیوم بود که به وسیله روکشی از فلوراید منیزیم حفاظت می‌شد.

در مدار پایین، این تلسکوپ (شکل ۱۹-۷) باید عبور مرتب از نور مستقیم خورشید به سایه زمین را تحمل کند، لذا پوششی از یک عایق چندلایه مورد استفاده قرار می‌گیرد تا دمای درونی را پایدار نگه دارد. سامانه اپتیکی بریک چارچوب از گرافیت-اپوکسی سوار است تا اجزای آن دقیقاً در یک راستا قرار گیرد. سامانه هدایت تلسکوپ فضایی هابل از ژيروسکوپ‌هایی استفاده می‌کند که به وسیله سه حسگر ظریف هدایت کنترل می‌شوند، و بدین ترتیب تلسکوپ را در مدت رصد دقیقاً به سمت هدف نگه می‌دارد. عملیات علمی تلسکوپ هابل تحت اشراف و کنترل «مؤسسه علوم



شکل ۱۹-۷: تلسکوپ فضایی هابل. توجه کنید: تصویر سمت چپ، آرایه‌های کوچک‌تر صفحات خورشیدی را که در مأموریت تعمیر و نگهداری چهارم نصب شدند نشان می‌دهد.

تلسکوپ فضایی «در بالتیمور»<sup>۲۸</sup> می‌باشد. این مؤسسه، مشاهدات تلسکوپ را زمان بندی می‌کند و به پشتیبانی از ستاره‌شناسانی می‌پردازد که از تلسکوپ هابل استفاده می‌کنند (به همراه یک مؤسسه حمایت اروپایی در آلمان). زمان بندی مشاهدات کاری دشوار است، چراکه تلسکوپ نباید به سمتی نزدیک به خورشید، زمین یا ماه نشانه‌گیری شود، در غیر این صورت نور پخش شده به مشاهدات صدمه می‌زند، و چه بسا که به تجهیزات نیز آسیب برساند. به دلیل مدار پایین تلسکوپ (عملاً در قسمت بالایی جو)، مدار آن به مرور زمان تغییر می‌کند و لذا نمی‌توان موقعیت آن را تا چند روز پیش از یک مشاهده پیشنهادی به دقت پیش‌بینی نمود.

### یک آینه مخدوش

پس از پرتاب تلسکوپ، آزمایش‌های اولیه نشان داد که یک مشکل جدی وجود دارد. تصویر ستارگان، که باید قطرشان حدود  $0.1$  ثانیه قوسی می‌بود، بیش از  $1$  ثانیه قوسی عرض داشتند - در حد تصاویر زمینی! تجزیه و تحلیل تصاویر مشخص کرد که آینه اولیه از ابیراهی کروی رنج می‌برد، چراکه آینه - علی‌رغم برخورداری از دقیق‌ترین محاسبات - به شکلی اشتباه ساییده شده بود. نتیجه آن بود که تصویر یک ستاره از دو بخش تشکیل می‌شد: یک هسته مرکزی به قطر  $0.1$  ثانیه قوسی که حدود  $15\%$  تمام نور را شامل می‌شد (درحالی‌که به صورت نظری این مقدار باید حدود  $84\%$  می‌بود)، و نور باقیمانده تشکیل یک هاله اطراف هسته می‌داد و قطری حدود  $1$  ثانیه قوسی

داشت. هنوز امکان تصویربرداری از اجسام روشن وجود داشت و طیف‌نمایی چندان تحت تأثیر قرار نگرفته بود، اما تصویربرداری از اجسام کم‌نور (همچون کهکشان‌های دور) عملاً غیرممکن بود. روش‌هایی که پیش از آن به وسیله ستاره‌شناسان رادیویی ابداع شده بود و تصاویری با کیفیت بالا را از آرایه‌های پراکندهٔ تلسکوپ‌ها تولید می‌کرد تا حدی به کمک آمدند. تلسکوپ فضایی هابل توانست در سه سال نخست، پیش از آنکه نخستین مأموریت تعمیراتی بتواند راه‌حلی را برای مشکل فراهم آورد، مشاهدات پرباری را داشته باشد.

گرچه آینهٔ اولیهٔ شکلی اشتباه داشت، دقیقاً از این شکل اشتباه پیروی می‌کرد، و این بسیار بهتر از آینه‌ای بود که با داشتن شکلی صحیح، به خطا ساخته شده بود! پس از پی بردن به خطای موجود در شکل آینه، امکان طراحی و ساخت تجهیزات اپتیکی برای تصحیح وجود داشت. این تجهیزات، که همان خطا را ولی به صورت معکوس داشتند، در نخستین مأموریت تعمیراتی در سال ۱۹۹۳ نصب شدند. (چیزی شبیه به عدسی‌های کاو در عینک من، که با توجه به دور شدن شبکیهٔ چشم من از عدسی چشم، آن را تصحیح می‌کنند و یک بینایی کامل در اختیار من قرار می‌دهند.) مشخص شد وسیله‌ای را که شرکت پرکین-المر برای آزمایش آینهٔ اولیه به کار برده بودند (موسوم به تصحیح‌کنندهٔ صفر<sup>۲۹</sup>) به صورتی ناصحیح سرهم‌بندی شده بود و این خطا در انحنای سطح را به دنبال داشت. به نظر می‌رسید که آن‌ها آزمایش‌های انجام‌شده با دو دستگاه تصحیح‌کنندهٔ صفر دیگر را که دقت کمتری داشتند نادیده گرفته بودند. هر دوی این دستگاه‌ها نشان داده بودند که آینهٔ دچار یک ابیراهی کروی شده است. برای جا دادن سامانهٔ اپتیکی تصحیح‌کننده (موسوم به COSTAR) در تلسکوپ هابل، به ناچار باید در ابتدا یکی از تجهیزات هابل قربانی می‌شد. تا سال ۲۰۰۲ تمام تجهیزات اولیه‌ای که برای تصحیح آن‌ها به COSTAR نیاز بود با تجهیزاتی که هریک اپتیک تصحیح‌کننده برای خود داشت تعویض شد. از این‌رو در سال ۲۰۰۹ COSTAR جای خود را به یک طیف‌نگار جدید داد.

دانشمندان می‌دانستند که چهار ژيروسکوپ مورد استفاده در سامانهٔ نشانه‌روی تلسکوپ دارای طول عمر محدودی هستند، از این‌رو تلسکوپ را به گونه‌ای طراحی کرده بودند که بتوان آن را به صورت منظم تعمیر و نگهداری نمود. اما نخستین مأموریت تعمیر و نگهداری در دسامبر ۱۹۹۳ از اهمیت ویژه‌ای برخوردار بود چراکه فضانوردان ناچار بودند در مدت ده روز کار گسترده‌ای را انجام

داده، اپتیک تصحیح کننده را نصب نمایند. هفت فضاورد شاتل، آرایه های خورشیدی را نیز تعویض کردند و رایانه ها را ارتقا دادند. سپس تلسکوپ فضایی هابل به یک مدار بالاتر برده شد تا پسار<sup>۳۰</sup> و کاهش مداری ناشی از آن، که در مدت سه سال پس از پرتاب به آن مبتلا شده بود، جبران شود. خوشبختانه این مأموریت کاملاً موفقیت آمیز بود، و در ژانویه ۱۹۹۴، ناسا نخستین تصویر کاملاً با کیفیت را منتشر نمود.

مأموریت های دیگر تعمیر و نگهداری در فوریه ۱۹۹۷، دسامبر ۱۹۹۹ و مارس ۲۰۰۲ انجام گرفت. در مأموریت چهارم آرایه های خورشیدی برای دومین بار تعویض شد. این آرایه های جدید، علیرغم آنکه از لحاظ اندازه تنها دوسوم آرایه های قدیمی بودند، ۳۰٪ انرژی بیشتر تأمین می کردند؛ و در ضمن با کاهش چشمگیر پسار جوی، مدت زمانی را که لازم بود پس از آن بار دیگر تلسکوپ به مدار بالاتر برگردانده شود افزایش می دادند. این یک عامل مهم در افزایش عمر تلسکوپ هابل بود. مأموریت بعدی برای اکتبر ۲۰۰۵ برنامه ریزی شده بود و قرار بر این بود که خدمه شاتل دو ژيروسکوپ شکسته را تعویض و یک دوربین جدید سی سی دی را نصب نمایند (WFC3 جایگزین WFPC2)؛ ضمناً یک طیف نگار جدید را در فضای COSTAR (که دیگر نیازی به آن نبود) نصب می کردند. فاجعه شاتل کلمبیا در فوریه ۲۰۰۳ تمام پروازهای شاتل را برای دو سال به تأخیر انداخت. بر اساس دستورالعمل ایمنی جدید (که مقرر داشت تمام پروازهای آینده شاتل باید بتوانند در صورت بروز مشکل در حین پرواز به سلامت به ایستگاه فضایی بین المللی برسند) تمام مأموریت های تعمیر و نگهداری کنار گذاشته شد، چراکه شاتل قادر نبود در یک مأموریت، هم به تلسکوپ فضایی هابل و هم ایستگاه فضایی بین المللی برسد. بدین ترتیب تلسکوپ هابل در سال ۲۰۱۰ به پایان عمر عملیاتی خود می رسید؛ و این رویداد بسیار پیش از پرتاب تلسکوپ فضایی جیمز وب<sup>۳۱</sup> رخ می داد، که آن موقع قرار بود در سال ۲۰۱۴ انجام شود اما حالا تا دست کم سال ۲۰۱۸ به تعویق افتاده است.

ستاره شناسان، با توجه به تأثیر علمی شگرف تلسکوپ هابل، بسیار نگران بودند. از این رو کنگره از ناسا خواست تا راه هایی را برای نجات تلسکوپ هابل بررسی نماید. مأموریت های خودکار (روباتیک) مورد ملاحظه قرار گرفت و به دلیل «امکان پذیر نبودن» رد شد. در سال ۲۰۰۵، مدیر جدید ناسا، میشل گریفین، به مرکز پرواز فضایی گودارد<sup>۳۲</sup> این اختیار را داد تا تمهیدات لازم جهت

یک پرواز باسرنشین برای نگهداری هابل را فراهم آورد. این پرواز برای اکتبر ۲۰۰۸ زمان بندی شد. اما از کارافتادن یک واحد اصلی داده‌گردانی<sup>۳۳</sup> در تلسکوپ هابل در سپتامبر ۲۰۰۸ باعث شد که پرواز تا مه ۲۰۰۹ به تأخیر افتد، تا بتوان یک جایگزین را نیز برای این واحد به همراه برد. (تلسکوپ فضایی هابل یک سامانه داده‌گردانی پشتیبان نیز داشت که با موفقیت فعال شد، اما اگر این نیز از کار می‌افتاد، تلسکوپ هابل زمین‌گیر می‌شد).

دو تجهیزات جدید نصب شد. یکی از آن‌ها، دوربین میدان عریض<sup>۳۴</sup> ۳، حساسیت هابل را در بخش مرئی و فرابنفش طیف تا ۳۵ بار افزایش می‌داد. فضانوردان در همان زمان، شش بسته باطری، سه واحد حسگر سرعت، یکی از حسگرهای هدایت دقیق، و ژيروسکوپ‌های موقعیت را تعویض کردند، ضمن آنکه یک پوشش جدید محافظ گرما نیز برای تلسکوپ هابل فراهم آوردند. هابل در سپتامبر ۲۰۰۹ کار خود را از سر گرفت و امید می‌رود تا پایان سال ۲۰۱۴ و حتی پس از آن همچنان به طور کامل عملیاتی باقی بماند.

در ابتدا بنا بر این بود که هابل را با یک شاتل به زمین بازگردانند. با توجه به بازنشستگی ناوگان شاتل، این کار دیگر ممکن نبود، لذا مهندسين ناسا سامانه‌ای<sup>۳۵</sup> را طراحی کردند که در آخرین مأموریت تعمیر و نگهداری به بدنه انتهایی هابل متصل گردید. بدین ترتیب امکان این وجود خواهد داشت که در آینده تلسکوپ هابل را در پایان عمر پربار خود به چنگ انداخته، به وسیله یک فضاپیما (احتمالاً روباتیک) به سلامت از مدار خارج نمود.

### ۱۹-۳ دانش هابل

در طول عمر بیش از ۲۰ ساله هابل، احتمالاً این تلسکوپ پربارترین تجهیزات علمی است که تاکنون ساخته شده است: بیش از ۳۰,۰۰۰ جسم منفرد را نشانه رفته است، و متجاوز از ۴۴ ترا بیت داده تولید نموده که با استفاده از آن، ستاره‌شناسان نزدیک به ۹۰۰۰ مقاله را منتشر کرده‌اند. لذا در ادامه تنها می‌توان به تعدادی از جالب‌ترین دستاوردهای تلسکوپ فضایی هابل پرداخت.

### مشاهده SN۱۹۸۷A

در فوریه ۱۹۸۷، یک ابرنواختر در ابر بزرگ ماژلانی مشاهده شد و بلافاصله عملاً در کانون تمام

تلسکوپ‌هایی قرار گرفت که می‌توانستند آسمان جنوبی را رصد کنند. این ابرنواختر، که امکان برداشتن یک گام کلیدی در تعیین مقیاس فاصله کیهانی را فراهم آورده است (فاصله تا ابر بزرگ ماژلانی) به صورت پیوسته زیر نظر تلسکوپ هابل قرار داشت. به نظر می‌رسید مدتی پیش از انفجار ستاره، حلقه‌ای از گاز از آن بیرون زده، ستاره را محاصره کرده بود. این حلقه در ابتدا دیده نمی‌شد؛ اما همین که نور فرابنفش ناشی از انفجار که با سرعت نور حرکت کرد به حلقه رسید، گاز را به درخشش واداشت. اگر حلقه عمود بر خط دید ما بود، تمام آن همزمان روشن می‌شد، اما این طور نیست. از این رو بخش نزدیک‌تر حلقه پس از ۷۵ روز روشن شد و بخش دورتر پس از ۳۹۰ روز - این اختلاف ناشی از زمان حرکت نور در عرض حلقه است که موجب می‌شود روشن شدن بخش‌های دورتر با تأخیر مشاهده گردد.

با استفاده از این مشاهدات، شعاع حلقه  $232/5$  روز نوری به دست آمد. اما همچنین، از آنجاکه تلسکوپ هابل از توان تفکیک مناسب برای تصویربرداری از حلقه برخوردار بود (شکل ۸ در فصل ۱۵)، قطر حلقه  $1/72$  ثانیه قوسی اندازه‌گیری شد. با داشتن قطر زاویه‌ای و فاصله از یک سمت حلقه تا سمت دیگر آن برحسب روز نوری (۴۶۵ روز نوری)، می‌توان فاصله ابرنواختر را محاسبه کرد<sup>۳۶</sup>. ابر بزرگ ماژلانی در فاصله  $52 \text{ kpc}$  یا  $170,000$  سال نوری قرار دارد. بدین ترتیب یک مقدار جدید برای نقطه صفر در مقیاس فاصله قیفاووسی به دست آمد، که در ادامه توضیح داده خواهد شد؛ موضوعی که باعث گردید ثابت هابل با دقت بیشتری اندازه‌گیری شود.

### اندازه‌گیری مقیاس فاصله جهان، ثابت هابل و سن جهان

ثابت هابل، که اندازه‌ای برای نرخ انبساط جهان به حساب می‌آید (و از آن می‌توان سن جهان را تعیین کرد)، به اندازه‌گیری دو چیز از یک کهکشان دور بستگی دارد: سرعت دور شدن و فاصله آن. مورد اول را می‌توان نسبتاً به سادگی از قرمزگرایی که در خطوط طیفی دیده می‌شود اندازه گرفت. اما مورد دوم بسیار سخت‌تر است و به مشاهده اجسامی با روشنایی معلوم نیاز دارد. توان تفکیک عالی در تلسکوپ هابل، ستاره‌شناسان را قادر ساخته است متغیرهای قیفاووسی را، که پیش از این توضیح داده شدند، تا فاصله‌هایی بسیار دورتر از قبل مطالعه کنند. دوره تناوب این ستاره‌ها به صورت نزدیکی با روشنایی مطلق آن‌ها در ارتباط است، از این رو می‌توان متغیرهای



شکل ۱۹-۸: (چپ) متغیرهای قیفاووسی در NGC ۳۰۱۲ و همچنین محل ابرنواختر نوع ۱a در سال ۱۹۹۵. (راست) ابرنواخترهای نوع ۱a در کهکشان‌های دور.

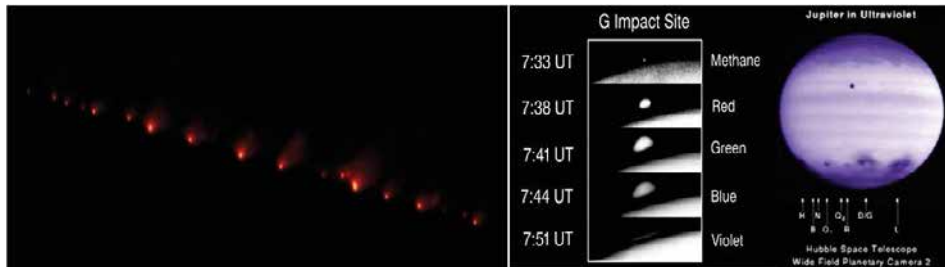
قیفاووسی را به عنوان «شمع‌های استاندارد» مورد استفاده قرار داد. چون دوره تناوب به آسانی اندازه‌گیری می‌شود، می‌توان روشنایی را به دست آورد و بدین ترتیب، با استفاده از قانون عکس مجذور، فاصله را پیدا کرد.

این شیوه، برای مثال، امکان تعیین فاصله تا کهکشان NGC ۳۰۱۲ (شکل ۱۹-۸، چپ) را فراهم آورد و معلوم شد که ۹۲ میلیون سال نوری است. در سال ۱۹۹۵ یک ابرنواختر نوع ۱a در این کهکشان مشاهده شد. این ابرنواخترها از یک روشنایی فوق‌العاده بالا و خوش‌تعریف برخوردارند و در فصل ۲۱ بیشتر مورد بحث قرار خواهند گرفت. تلسکوپ هابل توانسته است آن‌ها را در کهکشان‌های بسیار دور رصد کند، و از این رو با مقایسه روشنایی مشاهده‌شده آن‌ها (شکل ۱۹-۸، راست) با روشنایی مشاهده‌شده NGC ۳۰۱۲، فاصله آن‌ها قابل تعیین می‌باشد. این فاصله در کنار قرمزگرایی، خطا را در مقدار ثابت هابل به کمتر از ۵٪ کاهش داده است - مقداری برابر با  $74/2 \pm 3/6$  (km/s)/Mpc، و از آن سن جهان  $13/75 \pm 0/11$  میلیارد سال به دست آمده است. (توجه: مقداری که تلسکوپ هابل برای ثابت هابل تعیین کرده تا حدی بزرگ‌تر از مقداری است که به وسیله مشاهدات فضایی پلانک از زمینه ریزموج کیهانی، که در فصل ۲۲ توضیح خواهیم داد، به دست آمده است. مقدار این فضاپیما  $68 \pm 1$  است.)

### شومیکر-لوی ۹

تلسکوپ فضایی هابل توانست قطاری از دنباله‌دارهایی را که ناشی از متلاشی شدن دنباله‌داری به





شکل ۱۹-۹: (راست) اثر برخورد بر سطح مشتری. (وسط) ستون‌های دود که از محل برخورد برخاست. (چپ) رشته‌ای از دنباله‌دارهایی که شومیکر-لوی ۹ را می‌ساختند..

نام شومیکر-لوی ۹ بودند (در فصل ۹ با عنوان «برخورد» توضیح داده شد) به تصویر بکشد. این دنباله‌دار در ابتدا به چنگ مشتری افتاد، سپس آن قدر نزدیک شد که از حد روش عبور کرد و به حدود ۲۵ قسمت مجزا متلاشی گردید. بر اساس پیش‌بینی، این قطعات ظرف یک هفته در سال ۱۹۹۴ به سطح مشتری برخورد می‌کردند. محل برخورد پشت لبه مشتری بود، اما تلسکوپ هابل توانست ستون‌های دود را که از محل برخورد به هوا می‌رفت تصویربرداری کند، و پس از حدود یک ساعت که خود محل‌های برخورد وارد دید شدند از آن‌ها نیز عکس تهیه کند (شکل ۱۹-۹).

### پلوتون و کمر بند کویپر

در سال ۲۰۰۵، تلسکوپ هابل دو قمر جدید پلوتون را، موسوم به نیکس و هیدرا<sup>۳۷</sup>، کشف کرد؛ و توانست تغییراتی شگرف را در علائم سطحی این سیاره کوتوله نشان دهد. دو قمر کوچک دیگر، موسوم به کربروس و استایکس<sup>۳۸</sup>، به ترتیب در ۲۰۱۱ و ۲۰۱۲ کشف شدند. این دو قمر اخیر زمانی کشف شدند که ستاره‌شناسان در جستجوی یک سامانه حلقوی احتمالی اطراف پلوتون بودند، چراکه چنین ذراتی به دور پلوتون ممکن است برای فضایی‌های نیوهورایزرنر<sup>۳۹</sup> که طبق برنامه در ۱۴ ژوئیه ۲۰۱۵ به پلوتون می‌رسد خطرناک باشد. تلسکوپ هابل تعداد زیادی از اجسام کمر بند کویپر<sup>۴۰</sup> را شناسایی کرده است، و در سال ۲۰۰۹، مشاهدات آن امکان محاسبه مدار یک قمر کوچک را، موسوم به وی‌وت<sup>۴۱</sup>، اطراف یک جسم کمر بند کویپر به قطر حدود ۹۰۰ کیلومتر، به نام کواوار<sup>۴۲</sup>، فراهم آورد. بدین ترتیب جرم کواوار نیز به دست آمد، و با داشتن اندازه آن، چگالی محاسبه شد. در کمال تعجب، به نظر می‌رسد این چگالی حدود ۴/۲ باشد، به این معنی که این جسم از صخره

است، و نه آن طور که انتظار می‌رفت از یخ.

### سیارات فراخورشیدی در برآمدگی کیهانی

تلسکوپ هابل به مشاهده ۱۸۰,۰۰۰ ستاره در راستای مرکز کهکشان پرداخت تا نشان دهد آیا تعداد محلی سامانه‌های سیاره‌ای به دور ستارگان قابل تعمیم به تمام کهکشان هست یا خیر. این مشاهدات به کشف ۱۶ سیاره نامزد منجر شد -رقمی که با تعدد سیارات در همسایگی خورشید سازگار است- و نشان داد که سامانه‌های سیاره‌ای در کهکشان پخش شده است. از این سیارات، پنج سیاره در زمانی کمتر از روز زمینی به دور ستاره خود می‌چرخند.

### جو سیارات فرامنظومه‌ای

تلسکوپ هابل توانسته است با رصد گذر سیاره از مقابل ستاره، ترکیبات جوی را در دو سیاره اندازه بگیرد. سیاره مقداری از نور ستاره را سد می‌کند (نوعاً یک تا دو درصد در سیارات غول گازی) و لذا ستاره تا حدی کم‌نور می‌شود. با وجود این، زمانی که سیاره بین ما و ستاره قرار دارد، مقداری از نور ستاره از میان جو سیاره عبور می‌کند. با مقایسه طیف نور ستاره پیش از گذر و در حین گذر، می‌توان حضور و فراوانی مواد شیمیایی و گازهایی را که در جو سیاره وجود دارند تعیین کرد. مشاهدات هابل از ستاره HD ۲۰۹۴۵۸ نشان داده است که جو سیاره آن شامل سدیم، اکسیژن، کربن و هیدروژن می‌باشد؛ و جالب‌تر اینکه در مورد ستاره HD ۱۸۹۷۳۳، در سیاره آن شواهدی مبنی بر وجود دی‌اکسید کربن، بخار آب و متان مشاهده شده است!

### فوران‌های پرتو گاما

تلسکوپ فضایی هابل از کهکشان‌هایی که میزبان تعداد زیادی فوران طولانی‌مدت پرتو گاما<sup>۴۳</sup> هستند تصویر گرفته است. مشاهدات از نظریه‌ای پشتیبانی می‌کند که این نوع فوران پرتو گاما را نتیجه رمبش یک ستاره پرجرم و تشکیل یک سیاه‌چاله می‌داند. در فصل ۲۰ فوران‌های پرتو گاما به تفصیل پوشش داده می‌شود.

### مطالعات ماده تاریک و انرژی تاریک

تلسکوپ فضایی هابل، با طراحی توزیع سه بعدی ماده تاریک در یک برش از جهان تا فاصله ۶/۵

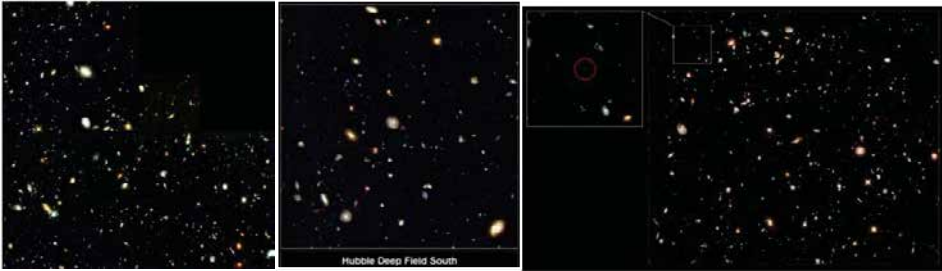
میلیارد سال نوری، کمک شایانی به مطالعه ماده تاریک نموده است. این تلسکوپ، با رصد ابرنواخترهای نوع Ia تا فاصله‌های دور (فواصل کیهان‌شناختی) شواهد زیادی را مبنی بر وجود ماده تاریک فراهم آورده است.

### تشکیل و تحول کهکشان: میدان‌های ژرف هابل

یکی از اهداف کلیدی تلسکوپ فضایی هابل، مطالعه کهکشان‌های دور با توان تفکیکی بسیار بالاتر از چیزی بود که از زمین امکان داشت. بدین ترتیب ستاره‌شناسان می‌توانستند تحول آن‌ها را مطالعه کنند، چراکه هرچه دورتر باشند، آن‌ها را در زمان‌هایی عقب‌تر و نزدیک‌تر به آغاز جهان می‌بینیم. پس از بهبود سامانه اپتیکی هابل، مطالعات اولیه نشان می‌داد که تفاوت‌های اساسی بین ویژگی‌های کهکشان‌های کنونی (آن‌هایی که در نزدیکی ما هستند) و آن‌هایی که در وضعیت چند میلیارد سال پیش مشاهده می‌شوند وجود دارد.

در تلسکوپ‌های بزرگ، زمان رصد را «کمیت‌های تخصیص زمان» توزیع می‌کنند. این کمیت‌ها بهترین پیشنهادهای رصدی از طرف ستاره‌شناسان را برمی‌گزینند. با وجود این، درصدی از زمان رصد تلسکوپ (تا ۱۰٪) به عنوان «زمان احتیاطی مدیر» تعیین می‌شود. بدین ترتیب مدیر تلسکوپ می‌تواند زمانی را، اغلب برای مشاهده پدیده‌های گذرا مانند ابرنواخترها، اختصاص دهد. در سال ۱۹۹۵، زمانی که اپتیک هابل به عملکرد مطلوب دست یافت، روبرت ویلیامز، مدیر آن موقع مؤسسه علوم تلسکوپ فضایی، تصمیم گرفت بخش قابل توجهی از زمان احتیاطی خود را به مطالعه کهکشان‌های دور اختصاص دهد و چیزی را که به میدان ژرف هابل<sup>۴۴</sup> شهرت یافت تولید نماید.

ناحیه‌ای از آسمان در عرض بالای کهکشانی (به خوبی دور از صفحه کهکشان راه شیری) انتخاب شد. بدین ترتیب مقدار غباری که دید ما را در امتداد صفحه کهکشان کور می‌کرد به حداقل رسید، و همچنین از ستاره‌های روشن پس‌زمینه و منابع شناخته‌شده فرسوخ، فرابنفش و پرتو ایکس اجتناب شد. میدان برگزیده در صورت فلکی کلب اکبر قرار داشت - منطقه‌ای در نیم کره شمالی - لذا مشاهدات بعدی را می‌شد به وسیله تلسکوپ‌های نوری، مانند تلسکوپ‌های ۱۰ متری کک در موناکی هاوایی، و تجهیزات رادیویی VLA و مرلین پیگیری نمود. میدان دید تنها ۵/۳



شکل ۱۹-۱۰: (راست) میدان فراژرف هابل (۲۰۰۹) و تصویر VLT از دورترین کهکشانی که تا آن زمان شناخته شده بود. (وسط) میدان ژرف هابل جنوب (۱۹۹۸). (چپ) میدان ژرف هابل شمال (۱۹۹۵).

دقیقه قوسی مساحت داشت، درست  $\frac{1}{38,000}$  مساحت تمام آسمان. در کل، بیش از ۱۰ روز مشاهدات میدان هدف در چهار طول موج فروسرخ نزدیک، قرمز، آبی و فرابنفش نزدیک انجام شد (در این مدت تلسکوپ هابل حدود ۱۵۰ بار زمین را دور زد). رصدهایی نیز از منطقه اطراف هدف صورت گرفت تا به مشاهدات بعدی به وسیله تجهیزات دیگر کمک کند (شکل ۱۹-۱۰).

در مجموع ۳۴۲ تصویر مجزا گرفته شد. پس از تمیز کردن اثرات پرتو کیهانی و رد ماهواره‌ها و اصلاح نور پخش شده، این تصاویر باهم ترکیب شد و چهار تصویر تک‌رنگ، در هر طول موج یک تصویر، به دست آمد. سپس سه تا از تصاویر چهارگانه باهم ترکیب شد تا یک تصویر با «رنگ مصنوعی» به دست آید، که تقریبی بود از رنگ‌های واقعی کهکشان‌های موجود در تصویر. حدود ۳۰۰۰ کهکشان مجزا، که هم کهکشان‌های مارپیچ و هم کهکشان‌های نامنظم را شامل می‌شد، قابل شناسایی بود. یکی از برجسته‌ترین موارد یافت شده، کشف تعداد زیادی کهکشان با قرمزگرایی بسیار بالا بود - بسیاری متناظر با فاصله‌هایی حدود ۱۲ میلیارد سال نوری.

مشاهدات بعدی در محدوده بسیار وسیع طیفی انجام شده است: گسیل فروسرخ از ۱۳ عدد از کهکشان‌های قابل رؤیت در تصاویر اپتیکی رصد شده است که به مقادیر فراوان غبار مربوط به تشکیل ستاره ارتباط دارد؛ مشاهدات پرتو ایکس به وسیله رصدخانه پرتو ایکس چاندرا<sup>۴۵</sup>، شش منبع را در میدان ژرف هابل آشکار ساخت. آرایه مریلین در جدرل بانک ۱۶ منبع را در میدان ژرف هابل شناسایی کرد و توانست موقعیت دقیق آن‌ها را تعیین کند. من احساس می‌کنم این یکی از بزرگ‌ترین کارهایی است که به وسیله مریلین صورت پذیرفته است، و به خود می‌بالم که یکی از

طراحان و سازندگان آن بوده‌ام.

در سال ۱۹۹۸، تلسکوپ فضایی هابل به رصد یک منطقه متناظر در آسمان نیم کره جنوبی پرداخت. این رصد، بسیار شبیه به میدان ژرف، از اصل کیهان‌شناختی<sup>۴۶</sup> حمایت می‌کرد. این اصل اظهار می‌دارد که جهان در بزرگ‌ترین مقیاس خود، همگن است. یک کاوش گسترده‌تر، اما با حساسیت کمتر، به‌عنوان بخشی از «کاوش ژرف مبادی با رصدخانه‌های بزرگ»<sup>۴۷</sup> صورت پذیرفته است. بخشی از این کار که بر عهده تلسکوپ هابل بود برای یک میلیون ثانیه (۳/۱۱ روز) در بیش از ۴۰۰ بار گردش به دور زمین مورد رصد قرار گرفت و میدان فراژرف هابل خلق شد، تصویری که دومین تصویر میدان ژرف اپتیکی از لحاظ حساسیت تا امروز به حساب می‌آید. اجسامی کم‌نور از قدر ۳۰ آشکار شدند، که معادل است با جمع‌آوری یک فوتون در مدت یک دقیقه رصد! (از کهکشان‌های مجاور در هر دقیقه میلیون‌ها فوتون به ما می‌رسد.) تصویری که به دست آمد حدود ۱۰،۰۰۰ کهکشان را نشان می‌دهد. یکی از این کهکشان‌ها، که به وسیله تلسکوپ ۸ متری رصدخانه جنوبی اروپا در شیلی مورد رصد قرار گرفت، دارای یک قرمزگرایی است که نشان می‌دهد مربوط به زمانی است که جهان تنها ۶۰۰ میلیون سال سن داشت - دورترین و کهن‌سال‌ترین کهکشان که تا آن موقع مشاهده شده بود.

در سپتامبر ۲۰۱۲، ناسا یک ویرایش جدید از میدان فراژرف را با اصلاحات بیشتر منتشر نمود. این تصویر، موسوم به میدان فوق‌العاده ژرف<sup>۴۸</sup>، بخش کوچکی از فضا را در مرکز میدان فراژرف هابل نشان می‌دهد. زمان کل نوردهی دو میلیون ثانیه (۲۳ روز) بود. این تصویر کهکشان‌هایی را نشان می‌دهد که به ۱۳/۲ میلیارد سال قبل برمی‌گردند، و یک کهکشان را نشان می‌دهد که بر اساس تئوری تنها ۴۵۰ میلیون سال پس از رویداد مه‌بانگ تشکیل شده است.

چه آموخته‌ایم؟ کهکشان‌ها در گذشته دور، کوچک‌تر و از نظر شکل نامنظم‌تر از آن‌هایی بودند که در اطراف خود می‌بینیم (و از این رو متأخرترند). این مشاهدات با این نظریه که کهکشان‌های کوچک به هم برخورد کرده، با جمع‌آوری گاز به تدریج کهکشان‌های بزرگ‌تر را که می‌بینیم ساختند، سازگار است. ستاره‌شناسان با تحلیل نرخ تشکیل ستاره در کهکشان‌هایی که در قرمزگرایی مختلف قرار دارند (و از این رو سن مختلفی دارند) به این نتیجه رسیده‌اند که تشکیل ستاره در ۸ تا ۱۰ میلیارد سال قبل به اوج خود رسید، و از آن تاریخ به حدود یک دهم مقدار پیشینه

خود کاهش یافته است. کهکشان‌های اولیه زمانی تشکیل شدند که تنها مقادیر کمی عناصر سنگین‌تر از هیدروژن و هلیوم که در مه‌بانگ خلق شدند، وجود داشتند، لذا تقریباً هیچ غباری موجود نبود. تلسکوپ هابل نشان داده است که این کهکشان‌ها بسیار آبی هستند - درست آن‌طور که توقع داریم. یک نتیجهٔ دیگر به درک ماده تاریک مربوط بود. تصور بر این بود که بخش عمده‌ای (از ماده تاریک) به شکل کوتولهٔ قرمز و اجسام سیاره‌ای در هالهٔ کهکشانی است، موسوم به اجسام اخترفیزیکی فشرده و سنگین در هاله<sup>۴۹</sup>، اما تصویر ژرف هابل نشان داد که تعداد کوتوله‌های قرمز مرئی چندان قابل توجه نبود (تنها حدود ۲۰ ستارهٔ پیش‌زمینه در میدان مشاهده شد). رصدهای تلسکوپ هابل از مرکز کهکشان‌ها این نکته را نیز آشکار کرده است که جرم سیاه‌چاله‌های فوق‌سنگین که آنجا ساکن هستند در ارتباط تنگاتنگ با جرم برآمدگی‌های ستاره‌ای<sup>۵۰</sup> در مرکز کهکشان‌ها است. از این نکته برمی‌آید که تحول کهکشان‌ها ارتباط بسیار نزدیکی با سیاه‌چاله‌های درون آن‌ها دارد.

### تصاویر میراث هابل

یک جنبه از تلسکوپ فضایی هابل وجود دارد که به ارث به تمام ما رسیده است. گروه تصویربرداری میراث هابل<sup>۵۱</sup> با استفاده از بخش کوچکی از زمان رصد، تعدادی از زیباترین تصاویر نجومی را که تاکنون دیده شده است خلق کرده است. امروزه این تصاویر در تمام کتاب‌های ستاره‌شناسی (شامل همین کتاب) مورد استفاده قرار می‌گیرد تا زیبایی جهانی را که در آن زندگی می‌کنیم به ما نشان دهد.

### پانویس‌ها

1 - Marshfield, Missouri, USA

2 - Wheaton, Illinois

۳- واژهٔ مصوب فرهنگستان زبان و ادب فارسی معادل بورسیه، به معنی هزینه‌ای که برای تحصیل در

رشته یا دوره‌ای معین به شخصی اختصاص داده شود. (مترجم)

4 - Rhodes scholarship

5 - Robert Millikan

6 - Herbert Hall Turner

7 - New Albany, Indiana

8 - Louisville, Kentucky

9 - Lake Geneva

- 10 - Charles Tyson Yerkes
- 11 - Hubble's Variable Nebula
- 12 - R Monocerotis
- 13 - Mount Wilson Observatory, in Pasadena, California
- 14 - 100-inch Hooker telescope
- 15 - supersonic wind tunnels
- 16 - Aberdeen Proving Ground in Maryland
- 17 - Henrietta Leavitt
- 18 - photographic photometry
- 19 - Harvard Observatory's southern station in Arequipa, Peru
- 20 - Harvard Observatory's southern station in Arequipa, Peru
- 21 - John Goodricke
- 22 - Vesto Slipher
- 23 - Harlow Shapley
- 24 - Lyman Spitzer
- 25 - Perkin-Elmer Corporation
- 26 - Diffraction-Limited Optics

۲۷ - محصول شرکت Corning: این نوع شیشه را به همین نام می‌شناسند.

- 28 - Space Telescope Science Institute, in Baltimore
- 29 - Null Corrector
- 30 - Drag
- 31 - James Webb Space Telescope (JWST)
- 32 - Goddard Space Flight Center
- 33 - data handling unit
- 34 - Wide Field Camera 3 (WFC3)
- 35 - Soft Capture and Rendezvous System

۳۶ - رجوع کنید به کتاب درآمدی بر نجوم و کیهان‌شناسی، بخش ۸-۳-۲. (مترجم)

- 37 - Nix and Hydra
- 38 - Kerberos and Styx
- 39 - New Horizons spacecraft
- 40 - Kuiper Belt objects (KBOs)
- 41 - Weywot
- 42 - Quaoar
- 43 - long-duration gamma ray burst (GRB)
- 44 - Hubble Deep Field (HDF)
- 45 - Chandra X-ray Observatory
- 46 - Cosmological Principle
- 47 - Great Observatories Origins Deep Survey
- 48 - eXtreme Deep Field (XDF)
- 49 - Massive Astrophysical Compact Halo Objects (MACHOs)
- 50 - Stellar Bulges
- 51 - Hubble Heritage Imaging team

## فصل ۲۰

### جهان خشن

در این فصل قصد داریم قدرتمندترین انفجارها در جهان را که می‌توان امروزه مشاهده کرد بررسی کنیم، و همچنین به مطالعه آغاز خود جهان از مهبانگ<sup>۱</sup> بپردازیم. داستان با کشف آنچه «فوران‌های پرتو گاما»<sup>۲</sup> نام دارد آغاز می‌شود، کشفی که از خوش‌شانسی‌های جنگ سرد بود. یک نکته جالب این است که واژه «امروزه» در بالا به چه معنی است. ما این رویدادها را حالا می‌بینیم، اما همان‌طور که خواهیم دانست، آن‌ها در کیهانشان‌هایی در دوردست‌های جهان رخ می‌دهند، لذا ما در حال دیدن رویدادهایی هستیم که عملاً میلیاردها سال قبل اتفاق افتادند.

#### ۲۰-۱ کشف فوران‌های پرتو گاما

زمانی که در اواخر دهه ۱۹۵۰، پیمان‌های منع آزمایش هسته‌ای در حال مذاکره بود، مشاوران علمی رئیس‌جمهور آیزنهاور توجه او را به این نکته جلب کردند که ممکن است اتحاد جماهیر شوروی تلاش کند به صورت مخفی آزمایش‌های هسته‌ای را در فضا انجام دهد. تصمیم بر آن شد که یک سری ماهواره‌هایی طراحی و به فضا پرتاب شود که می‌توانستند فوران دوتایی مشخصه پرتوهای گاما<sup>۳</sup> را که از انفجار هسته‌ای ناشی می‌شود شناسایی کنند.

اسم رمز «ولاً»<sup>۴</sup> برای این پروژه نهاده شد، به معنی مراقبین، و نخستین فضاییما در اکتبر ۱۹۶۳ پرتاب شد. این فضاییما، که در ارتفاع ۱۲۰,۰۰۰ کیلومتری دور زمین گردش می‌کرد، شش آشکارساز پرتو گاما را به همراه تجهیزات دیگر با خود حمل می‌نمود. آشکارسازهای پرتو گاما با استفاده از یدید سزیم ساخته شده بودند، که اگر پرتوهای گاما از میان آن عبور می‌کرد، جرقه می‌زد.

داده را باید به صورت دستی تحلیل می‌کردند. در سال ۱۹۶۹، دانشمندانی که با داده ثبت شده در دوم ژوئیه ۱۹۶۷ کار می‌کردند، یک جهش، یک افت، یک جهش دوم و یک دنباله کاهشی

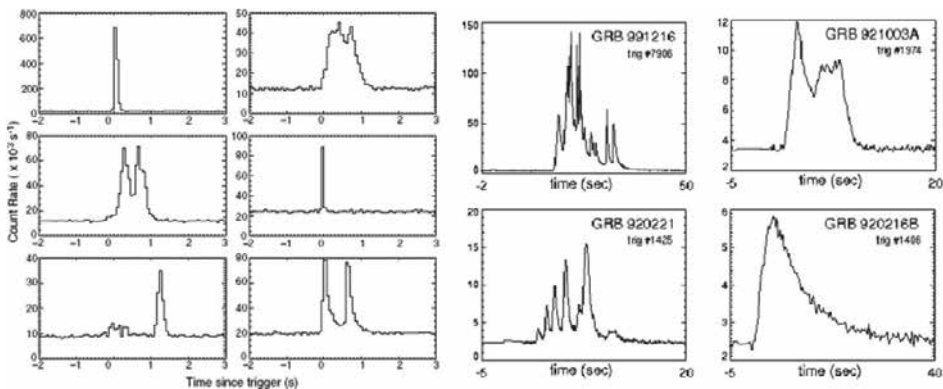


طولانی و تدریجی را در داده یافتند. همان طور که رهبر گروه، ری کلیاسایل<sup>۵</sup>، اظهار داشت، آنچه بلافاصله مشخص شد آن بود که این نمی‌توانست پاسخی به یک آزمایش هسته‌ای مخفی باشد. گروه وی احتمال وجود شراره‌های خورشیدی و ابرنواخترها را بررسی کردند اما چیزی را که ممکن بود عامل این رویداد مرموز باشد نیافتند. با پرتاب نسل‌های جدیدتر از ماهواره‌های وِلا و حمل آشکارسازهای حساس‌تر، تعداد رویدادهای ثبت شده به سرعت افزایش یافت.

بعداً، زمانی که زوج‌های ماهواره که توانایی زمان‌سنجی در آن‌ها ارتقا یافته بود پرتاب شدند، امکان تعیین تقریبی راستاهایی که این پالس‌های پرتو گاما از آن سرچشمه می‌گرفتند فراهم آمد. زمان رسیدن پالس‌ها را به زوج‌های وِلا ۵a و ۵b، و وِلا ۶a و ۶b می‌شد با دقت  $\frac{1}{100}$  ثانیه اندازه گرفت، درحالی‌که زمان حرکت نور بین زوج‌های ماهواره در امتداد قطر مداری آن‌ها حدود یک ثانیه بود. بدین ترتیب امکان این وجود داشت که راستای رویداد نسبت به خط بین هر زوج ماهواره تا حدود ۱۰ درجه تعیین گردد. با داشتن دو زوج ماهواره، دانشمندان می‌توانستند یک یا دو راستای احتمالی را برای منبع رویداد بیابند.

همان طور که گمان می‌رفت، دریافتند که فوران‌ها از بیرون منظومه شمسی می‌آید. همچنین، به دلیل آنکه به صورت تصادفی در آسمان پخش بودند، چنین برداشت می‌شد که منابع در کهکشان ما قرار ندارند (که در آن صورت انتظار می‌رفت منابع در امتداد صفحه راه شیری قرار داشته باشند) بلکه در جهان فراتر بودند.

کلیاسایل نخستین نتایج را در سال ۱۹۷۳ منتشر کرد، و در مقاله‌ای در مجله *Nature* با عنوان «مشاهدات فوران‌های پرتو گاما با مبدأ کیهانی» به جزئیات ۱۶ فوران تأیید شده پرداخت. در نتیجه، یک رصدخانه ماهواره پرتو گاما که بسیار حساس‌تر بود طراحی و ساخته شد. این رصدخانه، موسوم به رصدخانه پرتو گامای کامپتون<sup>۶</sup>، در سال ۱۹۹۱ به فضا پرتاب شد و به آرایه‌ای گسترده از ماهواره‌های زمینی و کاوشگران عمق آسمان پیوست که آشکارسازهای بسیار کوچک‌تری را با خود حمل می‌کردند. در مدت شش سال، نزدیک به ۲۰۰۰ فوران را مشاهده نمود (شکل ۲۰-۱). این فوران‌ها یک توزیع همسانگرد را در پهنه آسمان نشان می‌دادند و این تأییدی بود بر اینکه آن‌ها به کهکشان ما مربوط نیستند.



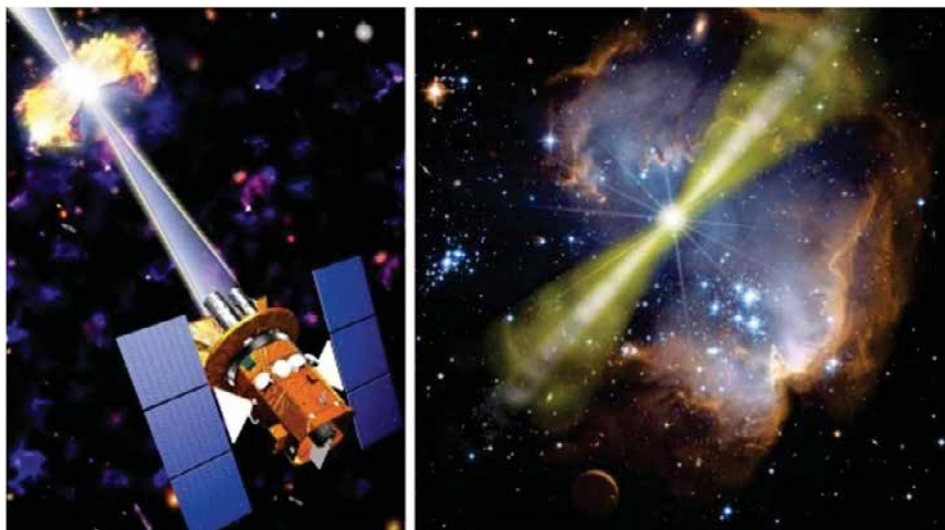
شکل ۲۰-۱: پروفایل‌های فوران پرتو گاما: پروفایل‌های سمت چپ به فوران‌های کوتاه‌دوره تعلق دارد (کمتر از ۲ ثانیه)، و پروفایل‌های سمت راست مربوط به فوران‌های بلنددوره است (بیشتر از ۲ ثانیه).

## ۲۰-۲ منبع این فوران‌های پرتو گاما چیست؟

برای سال‌ها پس از کشف فوران‌های پرتو گاما، ستاره‌شناسان به دنبال یک قرینه می‌گشتند: یک جسم نجومی که موقعیت آن با یک فوران که اخیراً مشاهده شده بود همخوانی داشت. تمام این جستجوها ناموفق بود، و در موارد اندکی، زمانی که موقعیت فوران پرتو گاما به خوبی به دست می‌آمد، هیچ جسم روشنی، با هر ماهیتی، دیده نمی‌شد. از این وضعیت چنین برمی‌آمد که منشأ این فوران‌ها یا ستاره‌های بسیار کم‌نور بود یا کهکشان‌های فوق‌العاده دور. آنچه واقعاً لازم به نظر می‌رسید، رصدهای بسیار سریع بعدی در طول موج‌های دیگر بود تا به محض مشاهده یک فوران، بلافاصله امکان شناسایی منبع آن فراهم می‌آمد.

در فوریه سال ۱۹۹۷ گشایش حاصل شد، و آن زمانی بود ماهواره بیوساکس<sup>۷</sup> یک فوران را شناسایی کرد (GRB ۹۷۰۲۲۸). دوربین پرتو ایکس آن بلافاصله به جهتی که فوران از آن راستا سرچشمه می‌گرفت نشانه‌گیری شد و فوراً گسیل در حال افول پرتو ایکس را آشکار نمود. مهم‌تر آنکه ۲۰ ساعت پس از فوران، تلسکوپ ویلیام هرشل انگلستان در لاپالما<sup>۸</sup> توانست یک قرینه نوری در حال افول را شناسایی کند. به مجرد آنکه فوران پرتو گاما خاموش شد، تصویربرداری ژرف توانست در محل فوران، یک کهکشان میزبان را با نور کم و در فاصله دور شناسایی نماید.

به دلیل درخشندگی بسیار کم این کهکشان، فاصله دقیق آن تا چند سال مشخص نشد؛ اما



شکل ۲۰-۲: ماهواره سوویفت در حال مشاهده فوران پرتو گاما، و نقاشی یک هنرمند از ظاهر احتمالی فوران.

پیش از آن، با کشف GRB ۹۷۰۵۰۸ به وسیله بیوساکس در اواخر همان سال یک پیشرفت دیگر حاصل شد. ظرف ۴ ساعت از کشف این رویداد، موقعیت آن به دست آمد، و از این رو گروه‌های تحقیقاتی توانستند مشاهدات خود را بسیار زودتر از فوران‌های قبل آغاز نمایند. طیف این جسم یک قرمزگرایی  $z = 0.835$  را نشان می‌داد؛ بدین ترتیب جسم در فاصله تقریبی ۶ میلیارد سال نوری از زمین قرار داشت، و این نخستین تعیین فاصله دقیق برای یک فوران پرتو گاما بود. این تعیین فاصله ثابت کرد که فوران‌های پرتو گاما در کهکشان‌های فوق العاده دور رخ می‌دهند.

با توجه به نقش بنیادی زمان در مشاهدات بعدی که باید به دنبال شناسایی یک فوران پرتو گاما انجام شود، هرگاه یک تلسکوپ پرتو گاما، از قبیل سوویفت<sup>۹</sup> (شکل ۲۰-۲)، موقعیت فوران را تعیین کند، بلافاصله آن را از طریق «شبکه مختصات فوران پرتو گاما»<sup>۱۰</sup> مخابره می‌نماید. سپس با استفاده از این موقعیت‌ها، تلسکوپ‌های زمینی فوراً به سمت منبع مورد نظر چرخانده می‌شوند تا به موقع بتوانند گسیل پس تاب را در طول موج‌های بلندتر مشاهده نمایند. فضایی سوویفت که در سال ۲۰۰۴ پرتاب شد و همچنان عملیاتی است، مجهز به تلسکوپ‌های نوری و پرتو ایکس است. این تلسکوپ‌ها قادرند به صورت خودکار، و پس از شناسایی یک فوران به وسیله آشکارساز بسیار حساس پرتو گاما در ماهواره، به سمت فوران بچرخند و به مشاهده گسیل پس تاب بپردازند.

بر روی زمین، تلسکوپ‌های نوری متعددی ساخته یا اصلاح شده‌اند تا بتوانند در طرح کنترل خودکار شرکت کرده، بلافاصله به سیگنال‌های ارسالی از طریق شبکه مختصات فوران پرتو گاما، GRBCN، پاسخ دهند. بدین ترتیب تلسکوپ‌ها می‌توانند به سرعت و ظرف چند ثانیه از زمان دریافت اطلاعات موقعیت، به سمت فوران پرتو گاما بچرخند و مشاهدات بعدی را هنگامی که هنوز گسیل پرتو گاما حاضر است انجام دهند.

یک فرصت جالب در سال ۲۰۰۸ وجود داشت که متأسفانه تحقق نیافت. یک فوران پرتو گاما، ۰۸۰۳۱۹B، آن چنان قرینه پرنوری داشت که قله درخشندگی آن به قدر مرئی ۵/۸ رسید. چنانچه آسمان کاملاً تاریک بود، آن را می‌شد با چشم غیرمسلح دید. اگر کسی در آن زمان در حال تماشای آسمان در راستای صحیح بود، فوتون‌هایی که بر شبکه چشم او فرود می‌آمدند ۷/۵ میلیارد سال در راه بودند، لذا او بیش از نیمی از عمر جهان را به عقب نگریسته بود!

در سال ۲۰۰۹، فضاپیمای سوویفت فوران GRB ۰۹۰۴۲۳ را در صورت فلکی اسد شناسایی کرد. پس تاب آن در فروسرخ شناسایی شد و از این رو ستاره‌شناسان توانستند قرمزگرایی آن را تعیین کنند. این فوران با قرمزگرایی ۸/۲، دورترین جسمی است که تاکنون در جهان شناخته شده است. در زمان کشف، GRB ۰۹۰۴۲۳ متقدم‌ترین جسمی بود که تا آن زمان شناسایی شده بود، و نور آن زمانی گسیل شده بود که جهان تنها ۶۳۰ میلیون سال سن داشت.

(در اکتبر ۲۰۱۰، تلسکوپ خیلی بزرگ (VLT) مربوط به رصدخانه جنوبی اروپا در شیلی یک کهکشان را در فروسرخ مشاهده کرد که قرمزگرایی آن به ۸/۵۵ می‌رسید؛ و این یعنی فاصله ۱۳/۱۲ میلیارد سال نوری. نور این کهکشان تنها ۶۰۰ میلیون سال پس از آغاز جهان گسیل شده بود. با توجه به اینکه جهان از زمان گسیل این نور در حال انبساط بوده است، تصور بر این است که این کهکشان هم‌اکنون در فاصله ۳۰ میلیارد سال نوری قرار دارد!)

پس جمع‌بندی آنچه می‌دانیم این است: فوران‌های پرتو گاما عبارت‌اند از جرقه‌هایی از پرتو گاما که با انفجارهای فوق‌العاده پرنرژی در کهکشان‌های دور همراه می‌شوند و درخشان‌ترین رویدادهای الکترومغناطیسی شناخته شده در جهان می‌باشند. این فوران‌ها از چند میلی‌ثانیه تا چند دقیقه می‌توانند دوام داشته باشند، هرچند یک فوران نوعی چند ثانیه بیشتر دوام ندارد. فوران‌ها به دو گروه تقسیم می‌شوند؛ کوتاه (کمتر از ۲ ثانیه) و بلند (بیشتر از ۲ ثانیه). فوران اولیه

معمولاً یک پس تاب طولانی‌تر را که در طول موج‌های بلندتر (پرتو ایکس، فرابنفش، ایتیکی، فروسرخ و رادیویی) گسیل می‌شود به دنبال دارد.

### ۲۰-۳ چه مقدار انرژی آزاد می‌شود؟

اندازه‌گیری فاصله تقریبی تا ۹۷۰۵۰۸ RGB در سال ۱۹۹۷ امکان محاسبه انرژی گسیلی در طول رویداد را فراهم آورد. مقدار انرژی فرودی  $E$  بر یک آشکارساز با مساحت معلوم (مثلاً  $۰/۱$  مترمربع) مشخص است. چون به احتمال زیاد این آشکارساز دقیقاً رو به راستای فوران نیست، سطح مؤثر آن کمتر خواهد بود، مثلاً  $۰/۰۵$  مترمربع. پس انرژی فرودی بر یک مترمربع برابر با  $E \times ۲۰$  خواهد بود. اگر انرژی فوران به صورت همسانگرد (به صورت مساوی در تمام راستاها) گسیل شده بود، انرژی گسیلی کل به سادگی محاسبه می‌گردید: مساحت کره‌ای را که آن کهکشان در مرکز قرار دارد در فاصله زمین بر حسب متر محاسبه کرده، آن را  $A$  می‌نامیم، و سپس  $A$  را در مقدار فرودی بر یک مترمربع ضرب می‌کنیم؛  $E \times ۲۰ \times A$ . گرچه  $E$  بسیار کوچک است،  $A$  عدد هنگفتی است، از این رو انرژی گسیلی که به دست می‌آید تقریباً برابر خواهد بود با انرژی‌ای که از تبدیل تمام جرم خورشید در یک لحظه به انرژی الکترومغناطیسی آزاد می‌گشت!

هیچ فرایند شناخته شده‌ای در جهان نمی‌تواند این مقدار انرژی را در چنین زمان کوتاهی تولید کند، از این رو می‌توان به این نتیجه رسید که انرژی دریافتی به صورت جهت‌دار است و نه همسانگرد. تقریباً با اطمینان می‌توان گفت که انرژی در یک جفت باریکه مخالف هم در امتداد قطر، و در راستای محور چرخش جسم اولیه، گسیل می‌شود. بدون شک این جسم باید یک سیاه‌چاله باشد. گداخت هسته‌ای تنها می‌تواند کمتر از  $۱\%$  از جرم سکون یک جسم را به انرژی تبدیل کند، اما با سقوط ماده به درون یک سیاه‌چاله چرخان، تا  $۳۰\%$  جرم سکون به انرژی قابل تبدیل است - این پربازده‌ترین فرایند تبدیل جرم به انرژی است که می‌شناسیم.

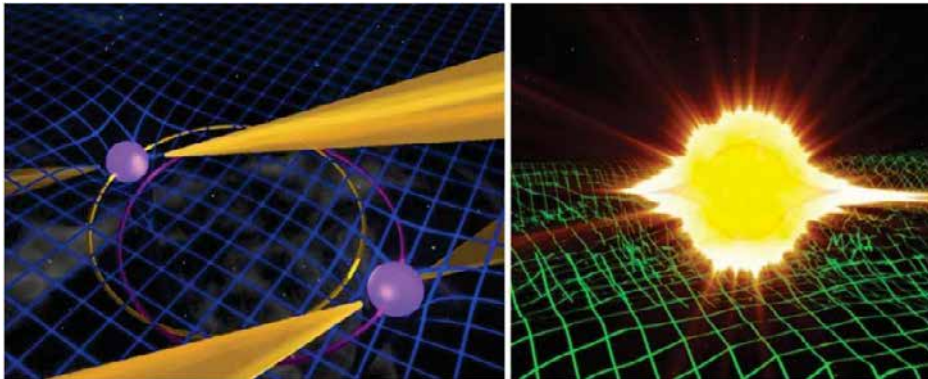
مشاهدات نشان می‌دهد که پهنای زاویه‌ای این باریکه‌ها چند درجه است. در نتیجه، انتظار داریم پرتوهای گامایی که از بیشتر فوران‌ها گسیل می‌شود به زمین نرسد، و هرگز آشکار نشوند. اما زمانی که یکی از این دو باریکه به سمت زمین نشانه رفته باشد، تمرکز انرژی آن باعث می‌شود که فوران بسیار روشن‌تر از حالتی به نظر آید که اگر انرژی به صورت همسانگرد گسیل می‌شد. لذا

انرژی ای که باید در انفجار آزاد شود تا حد زیادی کاهش می یابد. با توجه به این، به نظر می رسد فوران های پرتو گاما حدود  $\frac{1}{3}$  جرم خورشید را به انرژی تبدیل می کنند. این ازلحاظ تئوری امکان پذیر است، و می توان آن را با انرژی آزاد شده در یک ابرنواختر روشن نوع ۱b مقایسه نمود. با توجه به آمار به دست آمده در ۲۰ سال گذشته، به نظر می رسد که فوران های پرتو گاما، تنها با چند رویداد به ازای هر کهکشان در مدت یک میلیون سال، فوق العاده نادرند. هیچ موردی در کهکشان راه شیری مشاهده نشده است، که البته عجیب نیست، زیرا شانس چنین رویدادی در ۴۰ سال گذشته فوق العاده کم بوده است.

### ۲۰-۴ عامل فوران های پرتو گاما چیست؟

امروزه بر این باوریم که این دو نوع فوران کوتاه و بلند، هر یک عامل مجزا دارند. در هر دو مورد، فوران زمانی گسیل می شود که یک سیاه چاله شکل می گیرد، اما در دو فرایند کاملاً متفاوت. هر دو از تحول یک ستاره غول، همان طور که در فصل ۱۱ گفتیم، نتیجه می شوند. ابرنواخترها، ستاره های نوترونی را به وجود می آورند، که برخی از آن ها را می توان به صورت ستاره های تپنده مشاهده کرد. کشف یک سامانه تپنده دوتایی به وسیله ستاره شناسان در جُدُرل بانک، به درک ما از عامل احتمالی فوران های کوتاه مدت یک تلنگر زد. این سامانه، موسوم به تپنده دوگانه<sup>۱۱</sup>، از دو تپنده به جرم  $1/25$  و  $1/34$  برابر خورشید تشکیل شده است که به ترتیب با دوره تناوب  $2/8$  ثانیه و  $23$  میلی ثانیه به دور خود می چرخند (شکل ۲۰-۳). آن ها در هر  $2/4$  ساعت یک بار یکدیگر را دور می زنند. طول محور بزرگ مدار گردش آن ها اندکی کمتر از قطر خورشید است. این ستاره های نوترونی با سرعت  $0.1\%$  سرعت نور در حال حرکت اند، از این رو پدیده های نسبیت عام در این سامانه از هر سامانه شناخته شده دیگری آشکارتر است.

یک پیش بینی کلیدی نسبیت عام اینستین آن است که یک زوج جسم هم گردش<sup>۱۲</sup>، امواج گرانشی گسیل می دارند - امواج ریزی در فضا- زمان که با سرعت نور در جهان منتشر می شوند. در نتیجه، سامانه بالا در حال از دست دادن انرژی خواهد بود. این انرژی از تکانه زاویه ای سامانه به دست می آید، از این رو کاهش آن موجب می شود که دو تپنده به تدریج به هم نزدیک شوند. در این لحظه از زمان، بر اساس پیش بینی نسبیت عام، این دو ستاره نوترونی باید با سرعت ۷



شکل ۲۰-۳: نقاشی خیالی از «تپنده دوگانه» و اعوجاجی که آن‌ها در فضا-زمان ایجاد می‌کنند (چپ) و فوران پرتو گاما به دنبال ادغام این دو تپنده (راست).

میلی متر در روز به صورت مارپیچ به هم نزدیک شوند. از زمان کشف این سامانه تاکنون، مشاهدات انجام شده در سراسر جهان، شامل مشاهداتی که با استفاده از تلسکوپ لاول در جدرل بانک صورت پذیرفته است این کاهش فاصله را دقیقاً بر طبق پیش بینی نشان می‌دهد.

در نهایت این دو تپنده در هم جوش خواهند خورد. در این تپنده دوگانه، این رویداد تا حدود ۸۴ میلیون سال دیگر رخ نخواهد داد، اما تعداد زیادی از چنین سامانه‌هایی در کهکشان ما و دیگر کهکشان‌ها وجود دارد که در آن‌ها مجموع جرم ستاره‌های نوترونی از حد جرم برای ستاره‌های نوترونی که حدود ۳ برابر جرم خورشید است تجاوز می‌کند. اعتقاد داریم عامل فوران‌های کوتاه‌دوره پرتوهای گاما، ادغام نهایی زوج ستاره نوترونی و تشکیل یک سیاه‌چاله است. سقوط ماده از قرص برافزایشی اطراف به درون سیاه‌چاله جدید، این انفجار را نیرومند می‌کند.

در برخی مدل‌های دیگر نیز که برای توضیح فوران‌های کوتاه‌دوره پیشنهاد شده است، یک ستاره نوترونی و یک سیاه‌چاله در هم ادغام می‌شوند، و یا یک ستاره نوترونی منفرد، با سقوط ماده از قرص برافزایشی اطراف بر روی آن دچار رمبش شده، جرم آن از آنچه که برای فشار تبه‌گنی نوترونی قابل تحمل است تجاوز می‌کند، و لذا به یک سیاه‌چاله رمبش می‌نماید.

## ۲۰-۵ فوران‌های بلنددوره

بیشتر فوران‌های پرتو گاما که مشاهده شده‌اند دوره‌ای بزرگ‌تر از ۲ ثانیه دارند و در گروه فوران‌های

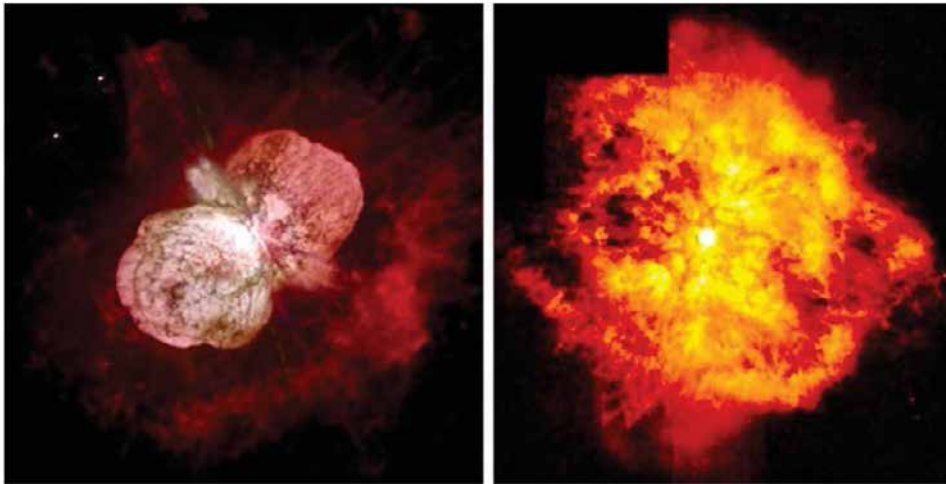
بلنددوره پرتو گاما<sup>۱۳</sup> قرار می‌گیرند. از آنجاکه این فوران‌ها در اکثریت هستند و معمولاً پس‌تاب‌های روشن‌تری دارند، با تفصیل بسیار بیشتری نسبت به قرینه‌های کوتاه‌دوره‌شان (کمتر از ۲ ثانیه) مورد مطالعه قرار گرفته‌اند. عملاً تمام فوران‌های بلنددوره که به خوبی مطالعه شده‌اند با کهکشان‌های ستاره‌فشانی که نرخ تولید ستاره در آن‌ها بالاست ارتباط دارند، و در موارد بسیاری یک ابرنواختر خیلی روشن نیز درگیر است. بنابراین بدون شک فوران‌های بلنددوره با مرگ ستارگان سنگین در ارتباط‌اند. از این‌رو بر این باوریم که بیشتر فوران‌های پرتو گامای مشاهده شده، باریکه‌هایی از تابش شدیدی هستند که هنگام یک رویداد ابرنواختری یا فرانوختری آزاد می‌شود.

### چه ستاره‌هایی موجب فوران‌های بلنددوره پرتو گاما می‌شوند؟

به دلیل آنکه بیشتر منابع فوران پرتو گاما فاصله بسیار زیادی از زمین دارند، شناخت سامانه‌های اولیه‌ای که این انفجارها را تولید می‌کنند یک چالش بزرگ است. سازوکاری که منشأ این فوران‌ها را توضیح داده، بیش از همه مورد پذیرش گسترده قرار گرفته است، مدل رمبشی می‌باشد. در این مدل، هسته یک ستاره فوق‌العاده سنگین که به سرعت می‌چرخد، در مراحل پایانی تحول خود به یک سیاه‌چاله رمبش می‌کند. (جرم هسته بیشتر از آن است که فشار تبهگنی نوترونی بتواند آن را حمایت کند، لذا رمبش ادامه می‌یابد تا اینکه یک سیاه‌چاله تشکیل شود، همان‌طور که در فصل ۱۷ توضیح داده شد.) ماده‌ای که اطراف سیاه‌چاله تازه به وجود آمده قرار دارد به سمت مرکز سقوط می‌کند و یک قرص برافزایشی<sup>۱۴</sup> را می‌سازد. ریزش این ماده به درون سیاه‌چاله، زوجی از فوران‌های نسبیتی را در امتداد محور چرخش به راه می‌اندازد. این فوران‌ها لایه‌های بیرونی ستاره را سوراخ می‌کنند. همین‌که در نهایت به سطح ستاره رسیدند، باریکه‌های پرتو گاما به درون فضا تابش می‌کنند.

نزدیک‌ترین ستارگان به ما که احتمال می‌رود فوران‌های بلندمدت پرتو گاما را تولید کنند به گروهی از ستارگان موسوم به «ولف-رایت»<sup>۱۵</sup> تعلق دارند. این ستارگان فوق‌العاده داغ و پرجرم هستند و بیشتر هیدروژن خود، یا تمام آن را بر اثر فشار تابشی از دست داده‌اند. ستاره‌های آتاشاه‌تخته و WR ۱۲۴ (شکل ۲۰-۴) نامزدهای احتمالی برای فوران‌های پرتو گاما در آینده می‌باشند.





شکل ۲۰-۴: تصویر تلسکوپ فضایی هابل از ستاره اتاشاه تخته (چپ) و ستاره ولف-رایت ۱۲۴ WR (راست) و سحابی‌های پیرامون آن‌ها. هر دوی این ستاره‌ها نامزدی برای فوران‌های بلنددوره احتمالی در آینده‌اند.

شاید گفتن این نکته ضروری باشد که تاکنون هیچ مدل کاملاً پذیرفته شده‌ای وجود ندارد که بیان کند چگونه فوران‌های پرتو گاما انرژی را به تابش تبدیل می‌کنند. هر مدل موفق برای گسیل فوران پرتو گاما باید بتواند فرایند فیزیکی را برای تولید گسیل پرتو گاما، آن‌طور که با محدوده وسیعی از منحنی‌های نوری، طیف‌ها و دیگر مشخصه‌هایی که مشاهده می‌شود مطابقت داشته باشد، توضیح دهد. یک چالش، نیاز به توضیح تبدیلات بسیار پربازده انرژی است که از برخی انفجارها تلقی می‌شود. به نظر می‌رسد برخی از فوران‌های پرتو گاما می‌توانند تا نیمی از انرژی انفجار را به پرتوهای گاما تبدیل کنند. بر اساس مشاهدات اخیر (در سال ۲۰۰۸) مربوط به قرینه نوری و روشن GRB ۰۸۰۳۱۹B، و همبستگی<sup>۱۶</sup> منحنی نوری آن با منحنی نور پرتو گاما، چنین پیشنهاد شده است که ممکن است «اثر معکوس کامپتون»<sup>۱۷</sup> دلیل فوران‌ها باشد. در این مدل، فوتون‌های کم انرژی به وسیله الکترون‌های نسبیتی که از انفجار به دست می‌آیند، پخش می‌شوند. بدین ترتیب انرژی آن‌ها چندین برابر شده، به پرتوهای گاما تبدیل می‌گردند.

ماهیت پس تاب‌هایی را که در طول موج‌های بلندتر دیده می‌شوند (از پرتو ایکس تا رادیویی) و به دنبال فوران‌های پرتو گاما می‌آیند، ساده‌تر می‌توان توضیح داد. هر انرژی که به وسیله انفجار آزاد شده است ولی در خود فوران تابش نمی‌گردد، ماده را تا سرعت‌هایی نزدیک به سرعت نور

شتاب می‌دهد. برخورد این ماده با گاز بین ستاره‌ای اطراف موجب یک موج ضربه می‌شود که با سرعت نسبیتی به درون فضای بین ستاره‌ای منتشر می‌گردد. زمانی که الکترون‌های پارانرژی درون موج ضربه به وسیله میدان‌های مغناطیسی قوی شتاب می‌گیرند، به گسیل تابش سنکروترون<sup>۱۸</sup> در بیشتر محدوده طیف الکترومغناطیسی پرداخته، این پستاب‌ها را به وجود می‌آورند.

## ۲۰-۶ آیا باید بترسیم؟

در حال حاضر به طور متوسط در هر روز یک فوران پرتو گاما شناسایی می‌شود. با توجه به وجود میلیاردها میلیارد کهکشان در جهان، و اینکه این تعداد فوران به رصد تمام آسمان مربوط است، می‌توان چنین برداشت کرد که وقوع چنین فورانی در یک کهکشان، یک رویداد فوق‌العاده نادر است. در کهکشان خودمان، راه شیری، انتظار داریم در هر ۱۰۰,۰۰۰ تا ۱,۰۰۰,۰۰۰ سال یک فوران رخ دهد. از آنجا که این تابش به صورت یک باریکه خواهد بود، تنها کسر کوچکی از این انفجارها به سمت زمین نشانه خواهند رفت؛ پس چندان جای نگرانی نیست. با وجود این، اگر یک فوران نزدیک زمین رخ داده، به سمت زمین نشانه می‌رفت، می‌توانست تأثیرات شگرفی بر زیست کره زمین داشته باشد. جذب تابش در جو موجب تفکیک نوری<sup>۱۹</sup> نیتروژن شده، اکسید نیتروژن به وجود می‌آورد که اوزون را نابود می‌کند. تصور بر این است که یک فوران پرتو گاما در فاصله‌ای حدود ۳۰۰۰ سال نوری می‌تواند تا نیمی از لایه اوزون زمین را نابود کند. بدین ترتیب نور فرابنفش بیشتری از خورشید به سطح زمین می‌رسد، که همراه با تابش مستقیم فرابنفش از فوران، می‌توانست تأثیر عظیمی بر زنجیره غذایی داشته، بالقوه یک انقراض دسته جمعی را موجب شود. بر اساس برآورد، احتمال چنین رویدادی یک بار در هر میلیارد سال است؛ و گرچه مدرک مستقیمی در دست نیست، احتمالاً رویداد انقراض اردوئیسین-سیلورین<sup>۲۰</sup> در حدود ۴۴۰ میلیون سال قبل نتیجه چنین رویدادی بوده است.

به نظر می‌رسد شواهدی وجود داشته باشد که ستاره‌های غولی که فوران‌های پرتو گاما را در پایان عمرشان تولید می‌کنند، در گذشته، زمانی که ستاره‌ها عمدتاً از هیدروژن و هلیوم ساخته شده بودند و عناصر سنگین‌تر بسیار کمتر از حالا بود، فراوان‌تر بودند. در حال حاضر سهم خوبی از

راه‌شیری به عناصر سنگین‌تر تعلق دارد؛ لذا خوشبختانه این اثر ممکن است تعداد چنین فوران‌های بلنددوره‌ای را در حال یا آینده کاهش دهد. اما ادغام دو ستاره نوترونی، یا یک ستاره نوترونی با یک سیاه‌چاله، و ایجاد یک فوران کوتاه‌دوره، می‌تواند در هر زمانی رخ دهد. اگر چنین فورانی در نزدیکی ما حادث شود و باریکه آن به سمت ما باشد، همچنان حیات در زمین در معرض خطر طولانی‌مدت خواهد بود.

## ۲۰-۷ مهبانگ و آغاز جهان

مهبانگ را به درستی بزرگ‌ترین انفجار در تمام اعصار می‌دانند، اما انفجاری کاملاً متفاوت از آن‌هایی که امروزه مشاهده می‌کنیم:

مهبانگ در فضا رخ نداد، بلکه فضا را خلق کرد.  
 مهبانگ در زمان رخ نداد، بلکه زمان را خلق کرد.  
 همان‌طور که سنت اوگاستین گفت: «جهان با زمان خلق شد، نه در زمان.» (در فصل آخر در این مورد بیشتر بحث خواهیم کرد).  
 تمام جاهایی را که امروز می‌بینیم، در لحظه خلقت در یک نقطه بودند.  
 در نظریه مهبانگ اولیه، جهان از یک تکینگی<sup>۲۱</sup> با چگالی بی‌نهایت و حجم صفر، شامل تمام انرژی‌ای که هم‌اکنون در جهان ما وجود دارد (بسیاری از آن به شکل جرم)، پدید آمد.

زمانی که تئوری‌ها دیگر نمی‌توانند فیزیکِ شرایطِ فرین<sup>۲۲</sup> را توضیح دهند، تکینگی‌ها ظاهر می‌شوند. حتی اگر هیچ تکینگی هم وجود نداشت، یک نگرانی واقعی آن است که چگونه تمام جرمی که در جهان مشاهده می‌کنیم (و البته با مقدار بیشتری که مشاهده نمی‌کنیم) می‌تواند در یک منطقه تقریباً بی‌نهایت کوچک از فضای خالی جا شده باشد. پاسخ آن است که این‌طور نبود. همان‌طور که خواهیم دید، در دوره‌ای موسوم به تورم<sup>۲۳</sup>، مقدار گسترده‌ای انرژی به وجود آمد که به نوبه خود، ذرات بنیادی را که سازنده جهان ما هستند تولید نمود. اما همچنان این سؤال باقی است: چطور تمام این از هیچ سرچشمه می‌گیرد؟ در کمال تعجب، پاسخ آن است که محتوای کلی

انرژی در جهان صفر است. این احمقانه به نظر می‌رسد. اما دو نوع انرژی وجود دارد: یک نوع انرژی ای که از رابطهٔ اینشتین،  $E = mc^2$ ، با مادهٔ موجود در جهان در ارتباط است، به علاوهٔ انرژی حرکت این ماده (انرژی جنبشی)، که در مجموع آن را انرژی «مثبت» در نظر می‌گیریم؛ و همچنین یک انرژی «منفی» به شکل انرژی پتانسیل گرانشی. چنین برمی‌آید که در جهان ما، این دو نوع انرژی با هم برابر و مخالف هستند، در نتیجه مجموع آن‌ها صفر است!

خودروی را در بالای یک تپه در نظر بگیرید. انرژی پتانسیل آن برابر است با  $mgh$  که در آن  $m$  جرم خودرو،  $g$  شتاب ناشی از گرانش، و  $h$  ارتفاع از سطح مجاور است. اگر خودرو از بالای تپه رانده می‌شد تا به پایین بغلتد، این انرژی آزاد می‌گردد و خودرو به سرعتی دست می‌یافت که عامل انرژی جنبشی در آن بود. نسبت خاص اینشتین نیز اظهار می‌دارد که خودرو مقداری جرم به دست می‌آورد. پس انرژی از نوعی به نوع دیگری تبدیل شده است. شما می‌توانید به آسانی ببینید که گرانش با انرژی منفی در ارتباط است: خودرو با حرکت به پایین تپه انرژی جنبشی کسب کرده است. اما این انرژی دقیقاً با کاهش در انرژی گرانشی آن متعادل می‌شود، چراکه به مرکز زمین نزدیک‌تر شده است؛ بنابراین مجموع دو انرژی صفر می‌ماند.

یک مثال دیگر دنباله‌دارهایی است که به خورشید نزدیک می‌شوند. با سقوط به چاه گرانشی خورشید، آن‌ها انرژی پتانسیل گرانشی از دست می‌دهند. اما چون هیچ تلفات انرژی در فضا وجود ندارد، این کاهش باید با افزایش در انرژی جنبشی جبران شود - آن‌ها با نزدیک شدن به خورشید، بسیار سریع‌تر حرکت می‌کنند.

در رشته حوادثی که مهبانگ را تشکیل داد، و در ادامه تشریح خواهد شد، تمام ماده، پادماده و فوتون به وسیلهٔ انرژی ای که در پی دوره‌ای موسوم به «تورم» آزاد شد، تولید گردید. تمام این ذرات و انرژی جنبشی آن‌ها، انرژی مثبت را تشکیل می‌دهند. اما این انرژی دقیقاً به وسیلهٔ انرژی منفی گرانشی هر چیزی که هر چیز دیگر را می‌کشد، متعادل می‌گردد. انرژی کل جهان صفر است! بر اساس این نظریهٔ انرژی صفر، که به وسیلهٔ تورم کلید خورد، همهٔ آن چیزی که برای آغاز جهان بدان نیاز بود تنها حجم بسیار کوچکی از انرژی است که تورم می‌توانست در آن شروع شود.

پرسش نهایی آن است که چه چیز این بستهٔ انرژی را تولید کرد، و آن چیز کجا بود؟ در فصل آخر به این بحث می‌پردازیم که برخی فکر می‌کنند شاید این رویداد در زمان و فضایی «ماقبل

هستی» اتفاق افتاده است؛ اما همان طور که پیش تر گفتیم، ممکن است از هیچ پدید آمده باشد و زمان و فضا همراه با خود جهان خلق شدند.

اصل عدم قطعیت هایزنبرگ - اصلی بنیادی در نظریه کوانتوم - یک توضیح طبیعی را برای اینکه چگونه ممکن است انرژی از هیچ پدیده آمده باشد، فراهم می آورد. در سرتاسر جهان، افت و خیزهای کوانتومی سبب می شود که ذرات و پادذرات خودبه خود به وجود آیند. با این شرط که آن ها همدیگر را در چارچوب زمانی که اصل عدم قطعیت تعیین می کند از بین می برند (خنثی می کنند)، قانون پایستاری انرژی نقض نمی شود. تولد و مرگ این زوج های «ذره مجازی» به عنوان «افت و خیزهای کوانتومی» شناخته می شود، و بخشی از فیزیک است که بسیار خوب آزمایش شده است. در هنگام محاسبه ترازهای انرژی در اتم ها، به طور قطع باید افت و خیزهای کوانتومی در نظر گرفته شود. چنانچه تأثیر زوج های مجازی ذره را (مانند الکترون و پوزیترون) وارد نکنیم، ترازهای پیش بینی شده انرژی با ترازهایی که در آزمایش اندازه گیری می شود همخوانی نخواهد داشت.

شاید پیش از ولادت جهان ما، افت و خیزهای کوانتومی در جریان بود. اکثریت گسترده ای از ذرات به سرعت ناپدید شدند، اما یکی از آن ها فرصت یافت زنده بماند، و شرایط مناسب را برای آغاز تورم فراهم آورد. از اینجا بود که حجم فضای بسیار کوچک ابتدایی، با یک ضریب بسیار بزرگ متورم گردید، و جهان ما زاده شد. اگر این فرضیه درست باشد، پاسخ این پرسش که «از کجا آمد» آن است که «از هیچ» سرچشمه گرفت، و انرژی کل صفر است. اما حیرت آور اینکه، این فرایند به تولید یک جهان با ساختار و پیچیدگی باورنکردنی و زیبایی فوق العاده منتهی شد.

## ۲۰-۸ تورم

ایده تورم یک بخش جدایی ناپذیر از فهم کنونی ما از داستان مهبانگ است. تورم، جدا از نقش آن در خلق ماده موجود در جهان، به زیبایی دو مشکل را که بر نظریه های استاندارد مهبانگ سایه افکنده بود توضیح می دهد.

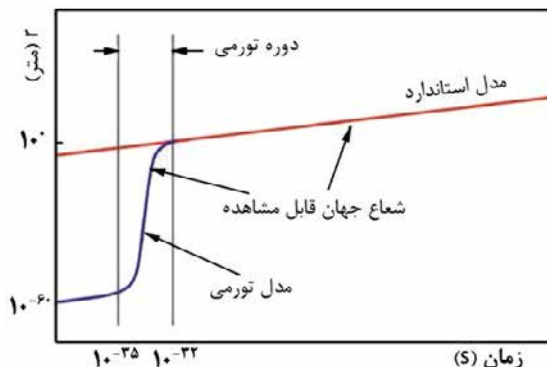
زمانی که پنزیاس و ویلسون<sup>۲۴</sup> تابش موسوم به زمینه ریزموج کیهانی را کشف کردند (در فصل ۲۲ به تفصیل در این باره بحث خواهیم کرد) دریافتند که دمای تمام جهان مرئی یکسان است. اگر

در یک راستا به جهان نگاه کنیم، تابش (که دمای آن بخش از فضا را به ما می‌گوید)  $۱۳/۶$  میلیارد سال در راه بوده است - سن جهان. اگر در راستای مخالف بنگریم، دقیقاً همان دما را می‌بینیم - آن تابش نیز  $۱۳/۶$  میلیارد سال راه پیموده است. در مدل‌های استاندارد مهبانگ، زمان کافی برای آنکه تابش بتواند از یکی از این مناطق به دیگری سفر کند وجود نداشته است - این دو منطقه نمی‌توانند «بدانند» که دمای دیگری چقدر است، زیرا این اطلاعات نمی‌تواند سریع‌تر از سرعت نور حرکت کند. پس چرا آن‌ها دقیقاً در یک دما هستند؟ این پرسش را «مسئله افق»<sup>۲۵</sup> می‌نامند.

شاید یک تشبیه کمک کند. از اتاق دیده‌بانی یک کشتی، دو کشتی دیگر در حالی دیده می‌شوند که با داشتن پرچمی مشابه، در جهت مخالف حرکت می‌کنند. به دلیل انحنای زمین، ملوانان این دو کشتی نمی‌توانند یکدیگر را ببینند، پس چطور است که پرچم یکسانی دارند؟ پاسخ روشن است: آن‌ها زمانی باید آن قدر به هم نزدیک بوده‌اند که بتوان پرچم‌ها را (که با سرعت کمتر از نور حرکت می‌کنند) به هر کشتی داد. در این صورت آن‌ها زمانی در گذشته به صورت علی به هم ارتباط داشتند.<sup>۲۶</sup> به صورتی مشابه، تمام جهان باید در آغاز خود، و در حجمی از فضا با قطر کوچک‌تر از زمان حرکت نور در عرض آن (با قطری که نور می‌توانست عرض آن را بپیماید)، به صورت علی مرتبط بوده باشد.

از مشاهدات چنین برمی‌آید که فضا در جهان، بسیار نزدیک (کمتر از ۱٪) به فضای اقلیدسی بود (فضایی بدون انحنای که اغلب «فضای تخت» نامیده می‌شود)، به گونه‌ای که در غیاب جرم، نور به خط مستقیم حرکت می‌کرد. نظریه مهبانگ هیچ دلیل ویژه‌ای برای اینکه چرا باید این طور باشد ارائه نمی‌کند. هر انحنایی که جهان در ابتدا داشت، با گذشت زمان تقویت می‌شد - یک فضا اندکی با انحنای مثبت، مثبت و مثبت‌تر می‌شد و برعکس. این حقیقت که مشاهدات ما هیچ انحنایی را نشان نمی‌دهد یک «تنظیم دقیق» را به ذهن متبادر می‌سازد، و هیچ چیز در نظریه استاندارد مهبانگ وجود ندارد که توضیح دهد چرا این طور است. این را «مسئله تختی»<sup>۲۷</sup> می‌نامند.

نظریه تورم، که در ابتدا آلن گوت<sup>۲۸</sup> آن را مطرح کرد و سپس دیگران به اصلاح آن پرداختند، به این مسائل می‌پردازد. در این داستان، تمام جهان مرئی در ابتدا در حجمی از مرتبه اندازه یک پروتون جا داشت. حدود  $۱۰^{-۳۵}$  S پس از پیدایش، این حجم فضا به صورت نمایی شروع به انبساط



شکل ۲۰-۵: دوره تورمی جهان

کرد و در مدت حدود  $10^{-33}$  s،  $10^0$  تا  $10^6$  برابر شد - اندازه یک کره با قطری از مرتبه یک متر (شکل ۲۰-۵). (برخی می گویند یک توپ گلف یا یک گریپ فروت). این انبساط شگرف فضا، هندسه فضا را وادار کرد که اقلیدسی یا «تخت» شود، درست همان طور که با انبساط یک بادکنک، سطح آن تخت و تخت تر به نظر می آید. (بنابراین تورم به صورت طبیعی یک جهان تخت را نتیجه می دهد). تورم همچنین تضمین می کرد که تمام جهان مرئی یک دمای یکسان داشت، و از این رو راه حلی را برای مسئله افق ارائه می نمود؛ بدین صورت که پیش از دوره تورمی، حجم فضا-زمانی که حالا جهان مرئی را به وجود می آورد به حدی کوچک بود که تابش می توانست به آسانی در عرض آن حرکت کند و آن را به تعادل گرمایی برساند.

## ۲۰-۹ خط زمان برای جهان آغازین

عصر پلانک: صفر تا  $10^{-33}$  ثانیه

دوره پیش تورمی. حجم کوچکی از فضا، شاید شامل مقدار خیلی کمی ماده، در ماهایی فوق العاده بالا.

چهار نیروی جهان - گرانش، نیروی قوی هسته ای، نیروی ضعیف هسته ای، و نیروی الکترومغناطیسی - باهم ترکیب شده، یک نیرو می سازند. (در حال حاضر هیچ نظریه ای نداریم که این را توضیح دهد).

عصر اتحاد (یکی سازی) بزرگ:  $10^{-۴۳}$  تا  $10^{-۲۵}$  ثانیه

پس از عصر پلانک، به دنبال انبساط و سرد شدن جهان، گرانش شروع به جدایی از نیروهای دیگر، یعنی الکترومغناطیسی و نیروهای قوی و ضعیف هسته‌ای، می‌کند. در این مقیاس شاید بتوان فیزیک را با یک نظریه متحد بزرگ توصیف کرد. در انتهای این دوره، با جدا شدن نیروی قوی هسته‌ای از ترکیب نیروی ضعیف هسته‌ای و نیروی الکترومغناطیسی، اتحاد بزرگ از هم می‌گسلد.

دوره تورمی:  $10^{-۳۵}$  تا  $10^{-۳۲}$  ثانیه

نیروی قوی هسته‌ای از ترکیب نیروی ضعیف هسته‌ای و نیروی الکترومغناطیسی جدا می‌شود. این جدایی، عصر تورم را کلید می‌زند. در این دوره، اندازه جهان با ضربی از مرتبه  $10^{۵۰}$  افزایش می‌یابد. اندازه نهایی جهان پس از این مدت چندان روشن نیست، اما برآوردها اندازه‌ای از توپ گلف تا گریپ فروت، و از آن تا کره‌ای به قطر یک متر را در برمی‌گیرد. از این نقطه به بعد، جهان با سرعتی بسیار آهسته‌تر منبسط می‌شود - انبساط هابلی - و در ابتدا به دلیل جاذبه گرانشی ماده درون آن، سرعت آن کم می‌گردد. در این زمان، افت و خیزهای کوانتومی در چگالی انرژی به تولید «دانه‌ها» می‌انجامد. این دانه‌ها هستند که ساختار بعدی جهان را شکل می‌دهند. یک «تغییر فاز» به انبساط تورمی پایان می‌دهد و مقدار فراوانی انرژی را آزاد می‌کند. پلاسمایی داغ و نسبیتی از ذرات و تابش تولید می‌شود. در ابتدا تعدادی تقریباً برابر از ذرات و پادذرات به وجود می‌آید، اما با یک اضافه بسیار جزئی از ذرات ماده (حدود یک در یک میلیارد).

عصر کوارک:  $10^{-۱۲}$  تا  $10^{-۶}$  ثانیه

بر این باوریم که تمام ذرات بنیادی از طریق سازوکار هیگز<sup>۲۹</sup> جرم اندوزی می‌کنند. حالا، برهم کنش‌های بنیادی گرانش، الکترومغناطیس، برهم کنش قوی و برهم کنش ضعیف، شکل امروزی را به خود می‌گیرند. اما دما همچنان بالاتر از آن است که کوارک‌ها بتوانند به هم پیوند خورده، هادرون<sup>۳۰</sup> بسازند (شامل پروتون و نوترون). جالب است اخیراً نوعی سوپ کوارک-گلوئون<sup>۳۱</sup> در برخورددهنده بزرگ هادرونی در سن<sup>۳۲</sup> بازتولید شده است، و این فیزیکدانان را قادر ساخته به مطالعه شرایطی پردازند که درست یک میلیاردیم ثانیه پس از آغاز جهان حاکم بود!



دوره هادرونی:  $10^{-6}$  تا یک ثانیه

پلاسمای کوآرک-گلوئون که جهان را در برگرفته بود به اندازه کافی سرد می‌شود و هادرون‌ها، شامل باریون‌هایی<sup>۳۳</sup> چون پروتون و نوترون، می‌توانند تشکیل شوند. تقریباً یک ثانیه پس از مهبانگ، نوترینوها واجفتیده شده، سفر آزاد خود را در میان فضا آغاز می‌کنند.

دوره لپتونی: ۱ تا  $10^{-6}$  ثانیه

بیشتر ذرات و پادذرات در پایان دوره هادرونی یکدیگر را نابود می‌کنند، و بدین ترتیب لپتون‌ها و پادلپتون‌ها<sup>۳۴</sup> (از قبیل فوتون) باقی می‌مانند که جرم غالب را در جهان به خود اختصاص می‌دهند. تقریباً  $10^{-6}$  ثانیه پس از مهبانگ، دمای جهان تا نقطه‌ای سقوط می‌کند که دیگر زوج لپتون/پادلپتون خلق نمی‌شود، و بیشتر لپتون‌ها و پادلپتون‌ها با نابودی یکدیگر از بین می‌روند. تنها اندکی لپتون باقی می‌ماند.

عصر هسته‌زایی: ۳ تا ۱۷ دقیقه

کوآرک‌های بالا و پایین، تعداد تقریباً مساوی پروتون و نوترون تولید می‌کنند. بار یک کوآرک بالا  $\frac{2}{3}+$  و بار کوآرک پایین  $\frac{1}{3}-$  است. پروتون از دو کوآرک بالا و یک کوآرک پایین ساخته شده است و از این رو بار آن برابر است با  $1+$  [ $\frac{2}{3} = +\frac{2}{3} - (-\frac{1}{3}) = +\frac{2}{3} + (-\frac{1}{3})$ ] و نوترون از یک کوآرک بالا و دو کوآرک پایین ساخته شده است و لذا بار آن صفر است [ $0 = (+\frac{2}{3}) + (-\frac{1}{3}) - (-\frac{1}{3})$ ]. اما نوترون آزاد ناپایدار است و با نیمه عمر تنها  $10^{-8}$  دقیقه به یک پروتون، یک الکترون و یک پادنوترینو<sup>۳۵</sup> وامی‌پاشد. بنابراین در چند دقیقه بعد، تعداد نوترون‌ها کاهش یافته، تعداد پروتون‌ها افزایش می‌یابد. تنها نوترون‌هایی که می‌توانند جان سالم به دربرند آن‌هایی هستند که به وسیله گداخت هسته‌ای در هسته هلیوم (که ذرات آلفا نیز نام دارند) وارد می‌شوند. همزمان مقدار کمی هلیوم ۳ (دو پروتون، یک نوترون)، دوتریوم (یک پروتون، یک نوترون) و لیتیم (سه پروتون، چهار نوترون) نیز تولید می‌شود. مقدار نسبی این عناصر به چگالی جهان در این زمان بستگی دارد. از این رو اندازه‌گیری فراوانی کنونی آن‌ها (با احتساب سنتز هسته‌ای که از آن تاریخ در ستارگان رخ داده است، و به مرور زمان فراوانی هلیوم را افزایش، و فراوانی هیدروژن را کاهش داده است) می‌تواند ما را از شرایطی که باید بر جهان اولیه حاکم بوده

باشد آگاه سازد. به ازای هر پروتون، یک الکترون وجود دارد، پس جهان در کل خنثی است. پس از ۱۷ دقیقه دما تا آنجا سقوط می‌کند که هیچ هسته‌زایی<sup>۳۶</sup> دیگری نمی‌تواند به وقوع بپیوندد.

### عصر فوتونی: ۳ دقیقه تا ۳۸۰,۰۰۰ سال

در این مدت، انرژی فوتون‌ها به دلیل انبساط جهان به تدریج کاهش می‌یابد. اما بسیاری از آن‌ها همچنان دارای انرژی‌هایی بالاتر از  $۱۳/۶$  الکترون‌ولت (انرژی پیوندی الکترون در یک اتم هیدروژن) هستند. معنی این کلام آن است که اگر یک پروتون، الکترونی را به دام اندازد تا یک اتم هیدروژن بسازد، به سرعت یک فوتون با انرژی کافی از راه می‌رسد و الکترون را از هسته جدا می‌کند. از این رو هیچ اتمی نمی‌تواند تشکیل شود، و جهان از فوتون، الکترون، پروتون و ذرات آلفا (هسته‌های هلیوم) به همراه ماده تاریک درست شده است. فوتون‌ها پس از برخورد به الکترون‌ها پراکنده می‌شوند و درست مانند قطرات آب که با پراکندن نور یک مه مات را می‌سازند، جهان در مقابل نور، کدر و مات خواهد بود.

### ماده تاریک به شکل توده درمی‌آید: ۷۰,۰۰۰ سال

بر اساس نظریه استاندارد کیهان‌شناسی، در این مرحله، غلبه با ماده تاریک<sup>۳۷</sup> است. با توجه به اینکه ماده تاریک با حمام تابشی که توزیع ماده معمولی را بسیار یکنواخت نگه می‌دارد ترکیب نمی‌شود، می‌تواند به تدریج تحت گرانش در مناطقی متراکم‌تر متمرکز شده، ناهمگنی‌های ریزی را که از تورم کیهانی به جامانده است تقویت نماید. بدین ترتیب مناطق متراکم، متراکم‌تر شده، مناطق رقیق رقیق‌تر می‌شود. تاکنون هیچ نظریه‌ای در اختیار نداریم که منشأ آن را زودتر از این بیان کند.

یک تغییر بنیادی حدود ۳۸۰,۰۰۰ سال پس از مه‌بانگ به وقوع پیوست. با ادامه انبساط جهان، انرژی فوتون‌ها نوعاً به زیر  $۱۳/۶$  الکترون‌ولت سقوط کرد و امکان تشکیل اتم‌های هیدروژن و هلیوم فراهم آمد. دیگر الکترون آزادی وجود نداشت که نور را پراکنده کند و جهان شفاف شد؛ و این دورترین زمانی است که تا آن می‌توانیم به عقب بازگشته، جهان را ببینیم. در آن هنگام دمای جهان حدود ۳۰۰۰ کلوین بود، و جهان با نوری زرد-نارنجی پر شده بود. از آن زمان، جهان تقریباً هزار برابر شده است و دما به همان نسبت تا حدود ۳ کلوین پایین آمده است (عملاً

۲/۷۳ کلوین). بنابراین، هم‌اکنون تابش در ناحیه بین بخش رادیویی با طول موج کوتاه و فرسرخ بلند از طیف رادیویی قرار دارد، و چیزی را که امروزه آن را زمینه ریزموج کیهانی یا «پس‌تاب آفرینش» می‌نامیم تشکیل می‌دهد؛ در فصل ۲۲ به این موضوع خواهیم پرداخت. نقشه‌های این تابش در عرض آسمان، آثار افت و خیزهای کوانتومی را که در مرحله تورمی مهبانگ شکل گرفتند نشان می‌دهد، و یکی از شواهدی است که بر جدایی ناپذیر بودن تورم از داستان مهبانگ دلالت دارد. آن‌ها اساساً توزیع ماده تاریک را در این زمان نشان می‌دهند. محل‌های تمرکز ماده تاریک مانند چاه‌های گرانشی عمل کردند و ماده معمولی را به درون خود کشیدند. در مدت ۵۰۰ میلیون سال بعد، این محل‌های تمرکز ماده تاریک و معمولی، مناطقی از هیدروژن و هلیوم را به وجود آوردند که از تراکم کافی برای تشکیل نخستین ستارگان و کهکشان‌ها برخوردار بودند.

### یک نکته

گرچه سناریوی بالا به نظر می‌رسد کاملاً با حقایق شناخته شده منطبق باشد و مدل استاندارد کنونی درباره تحول آغازین جهان است، همچنان یکی دو نکته مبهم وجود دارد و چه بسا که این مدل درست نباشد. مدل‌های دیگری نیز وجود دارد که مثلاً، آغاز جهان ما را آغاز زمان نمی‌داند، ضمن اینکه تاکنون هیچ نظریه‌ای نتوانسته است چگونگی پیدایش ماده تاریک را توضیح دهد.

## پانوشته‌ها

۱ - Big Bang؛ یک انفجار منحصربه‌فرد و بسیار متفاوت.

2 - Gamma-Ray Bursts (GRBs)

۳ - double burst of gamma rays؛ فوتون‌های بسیار پرانرژی.

4 - Vela (meaning 'watchers')

5 - Ray Klebasabel

6 - Compton Gamma Ray Observatory

7 - BeppoSAX

8 - William Herschel Telescope on La Palma

9 - Swift

10 - Gamma-Ray Burst Coordinates Network (GRBCN)

11 - Double Pulsar

12 - a pair of co-orbiting objects

13 - long gamma-ray bursts

14 - Accretion Disc

15 - Wolf-Rayet star

16 - Correlation

17 - inverse Compton effect

۱۸ - synchrotron emission: این نام‌گذاری از آنجا است که این تابش نخستین بار در یک

شتاب‌دهنده دایره‌ای سنکروترون، زمانی که الکترون‌ها با سرعت‌های نسبی درون آن حرکت می‌کردند، مشاهده شد.

19 - Photodissociation

20 - Ordovician–Silurian extinction

21 - Singularity

22 - extreme conditions

23 - inflation

24 - Penzias and Wilson

25 - Horizon Problem

26 - causally connected

27 - flatness problem

28 - Alan Guth

29 - Higgs mechanism

30 - Hadron

31 - quark–gluon soup

32 - Large Hadron Collider at CERN

33 - Baryon

34 - Leptons and Antileptons

35 - Antineutrino

36 - Nucleosynthesis

۳۷ - در فصل ۲۱ به آن خواهیم پرداخت.

## فصل ۲۱

### جهان ناپیدا: ماده تاریک و انرژی تاریک

شاید شگفت‌آورترین جنبه جهان ما آن باشد که ما تنها حدود ۱٪ از جرم و انرژی آن را می‌بینیم (به شکل ستارگان و سحابی‌های روشن). ۴٪ دیگر از جرم آن به شکل غبار و گاز است، اما حدود ۹۵٪ باقی می‌ماند که نیاز به توضیح دارد. برای ما باوریم که بخش عمده‌ای از این به شکل «ماده تاریک» است. این نام را به آن دلیل برای ماده تاریک انتخاب کرده‌اند که با نور برهم‌کنش ندارد و از این رو نامرئی است؛ اما با توجه به این حقیقت که جرم دارد، بر ماده معمولی یک جاذبه گرانشی اعمال می‌کند، و گواه ما مبنی بر وجود آن نیز بر همین استوار است.

اولین سؤالی که باید پرسید آن است که آیا این محتوای ناپیدا از جنس ماده معمولی (باریونی) است که فقط نور گسیل نمی‌کند، مانند گاز و غبار، یا اجسامی از قبیل کوتوله‌های قهوه‌ای، ستاره‌های نوترونی یا سیاه‌چاله‌ها. این اجسام اخیراً ماچو<sup>۱</sup> می‌نامند چراکه بسیاری از آن‌ها در هاله‌های کهکشانی که اطراف کهکشان‌ها کشیده شده‌اند ساکن می‌باشند.

دو شاهد در اختیار ما است که نشان می‌دهد مقدار کلی ماده معمولی در جهان تنها حدود ۴٪ از محتوای جرم/انرژی است. نخستین آن‌ها به اندازه‌گیری درصد‌های نسبی هیدروژن، هلیوم، لیتیم و ایزوتوپ‌های آن‌ها که در مه‌بانگ تشکیل شدند بستگی دارد. بدین ترتیب یک حد بالای حدود ۴ تا ۵٪ برای ماده معمولی (باریونی) به دست می‌آید؛ و دومین گواه اینکه اگر مقدار قابل توجهی از جرم به شکل ماچو بود، مطالعات ریزعدسی گرانشی آن‌ها را شناسایی می‌کرد (همان‌طور که تاکنون تعدادی سیاره را کشف کرده است؛ فصل ۱۲ را ببینید). گرچه، برای مثال، می‌دانیم که تپنده‌ها در هاله کهکشانی یافت می‌شوند، جرم کلی آن‌ها و دیگر ماچوها نمی‌تواند جرم مفقود را توضیح دهد. بنابراین همچنان باید به دنبال توضیحی برای حدود ۹۶٪ از محتوای جرم/انرژی جهان باشیم. بر اساس برخی شواهد مشاهداتی، تصور می‌شود که یک بخش اساسی

از آن به شکل ماده تاریک غیرباریونی است، که معمولاً فقط با عبارت ماده تاریک نامیده می شود.

## ۲۱-۱ ماده تاریک در خوشه های کهکشانی

نخستین گواهِ مقدار فراوانِ مادهٔ ناپیدا، از مشاهدات انجام گرفته به وسیلهٔ فریتس تسویکی<sup>۲</sup> در دههٔ ۱۹۳۰ به دست آمد. تسویکی یک ستاره شناس سویسی بود که بیشتر عمر خود را در رصدخانه پالومار صرف کرد و به یک استاد نجوم در مؤسسهٔ فناوری کالیفرنیا<sup>۳</sup> تبدیل شد. او خدمات مهم بسیاری به نجوم عرضه کرد؛ برای مثال، در سال ۱۹۳۴ او و والتر باده<sup>۴</sup> واژهٔ «ابرنواختر» را ابداع نمودند و چنین فرض کردند که آن‌ها مرحلهٔ گذار ستارگان معمولی به ستاره های نوترونی بوده، منشأ پرتوهای کیهانی هستند. در سال ۱۹۳۷، او وجود عدسی های گرانشی را پیش بینی نمود، موضوعی که در فصل ۱۶ به آن پرداختیم. تنها پنج سال پس از مرگ وی در سال ۱۹۷۴، این عدسی ها در کاوشی که در رصدخانهٔ جُدرل بانک انجام گرفت کشف شدند. اگر او در زمان این کشف زنده بود، به باور من یک کاندید بسیار قوی برای جایزه نوبل محسوب می شد. البته تسویکی یک شخصیت تندخو داشت. او در اواخر عمر احساس می کرد که ارزش کافی را برای کار او قائل نیستند، از این رو برای توهین هایی که به همکارانش می کرد شهره بود.

تسویکی نقش مهمی در تهیهٔ یک دوربین اشمیت برای رصدخانهٔ پالومار داشت. این دوربین، که در فصل ۹ مورد بحث قرار گرفت، می تواند به تصویربرداری از یک میدان وسیع بپردازد و وسیله ای بسیار عالی در نقشه برداری و پیمایش آسمان است. تسویکی شخصاً عدسی ۱۸ اینچی تصحیح کننده ای را که به وسیلهٔ طراح این نوع تلسکوپ، برنارد اشمیت، آماده شده بود از آلمان به رصدخانه حمل کرد. او با استفاده از این دوربین به خوشهٔ کهکشانی گیسو در فاصلهٔ ۳۲۱ میلیون سال نوری پرداخت و مشاهده کرد که اعضای بیرونی تر این خوشه با سرعتی بسیار بالاتر از حد انتظار حرکت می کنند. او توانست سرعت آن‌ها را بر اساس جابه جایی در خطوط طیفی کهکشان اندازه بگیرد.

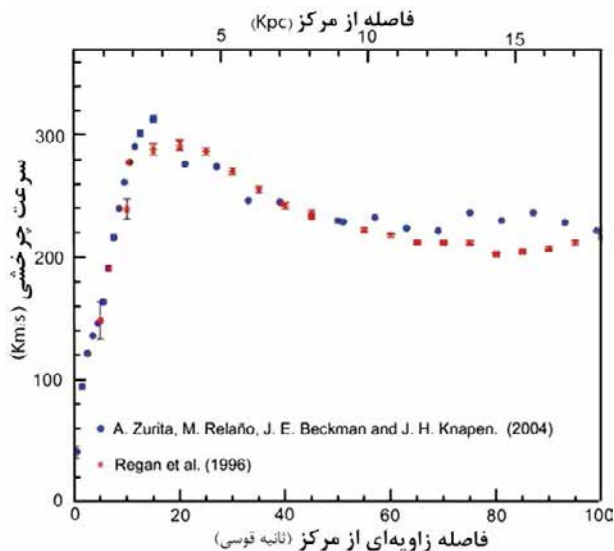
زمانی که برای اولین بار در اوایل دههٔ ابتدایی قرن قبل، طیف کهکشان ها مشاهده شد، دریافتند که خطوط طیفی آن‌ها، همچون خطوط هیدروژن و کلسیم، نسبت به محل این خطوط زمانی که در آزمایشگاه مشاهده می شدند جابه جا شده است. در کهکشان های نزدیک، این خطوط

به سمت انتهای آبی طیف جابه جا شده بودند، اما در کهکشان‌هایی فراتر از گروه محلی، این خطوط به سمت قرمز جابه جا شده بود. این پدیده را قرمزگرایی یا آبی‌گرایی می‌نامند، و در یک توضیح ساده، به سرعت دور شدن یا نزدیک شدن کهکشان مربوط می‌شوند؛ مانند بم شدن صدای سوت قطاری که در حال دور شدن است، و آن را به عنوان پدیده دوپلر می‌شناسیم.

خوشه‌ای از کهکشان‌ها را تصور کنید که در زمان ایجاد، تمام اعضای آن بی حرکت باشند. گرانش به سرعت آن‌ها را به رمبش وامی‌دارد تا یک جسم گول‌پیکر تشکیل شود. از طرف دیگر، اگر کهکشان‌ها نسبت به هم سرعت بسیار بالایی داشتند، انرژی جنبشی آن‌ها را قادر می‌ساخت که درون جهان پخش شوند، و خوشه پراکنده می‌شد؛ درست مانند یک موشک که اگر سرعت کافی داشته باشد می‌تواند از میدان گرانش زمین فرار کند. این حقیقت که ما خوشه‌های کهکشانی را میلیاردها سال پس از آفرینششان می‌بینیم اشاره به این دارد که باید یک تعادل بین کشش گرانشی جرم کلی خوشه و انرژی میانگین اعضا وجود داشته باشد. این اندیشه در آنچه که به «قضیه ویریال»<sup>۵</sup> معروف است تبلور پیدا می‌کند، به گونه‌ای که اگر بتوان سرعت اعضای خوشه را یافت، می‌توان جرم کل خوشه را برآورد نمود. تسویکی با انجام این محاسبات نشان داد که باید مقادیر بسیار بیشتری جرم نسبت به آنچه می‌توان از محتوای مرئی خوشه گیسو به دست آورد در آن وجود داشته باشد.

## ۲-۲۱ ماده تاریک در کهکشان‌های مارپیچ

در دهه ۱۹۷۰، مشکلی در ارتباط با دینامیک کهکشان‌ها ظاهر شد. ورا روبین<sup>۶</sup> به مشاهده نور نواحی اچ دو<sup>۷</sup> در تعدادی از کهکشان‌های مارپیچ پرداخت (نواحی اچ دو: ابرهای یونیده هیدروژنی، مانند سحابی جبار). این نواحی اچ دو به همراه ستارگان و دیگر مواد مرئی در کهکشان‌ها حرکت می‌کنند، اما از آنجاکه بسیار روشن هستند، ساده‌تر از دیگر مواد مرئی مشاهده می‌شوند. نواحی اچ دو، خط طیفی عمیق و قرمز رنگ آلفا هیدروژن (اچ آلفا) گسیل می‌دارند. با اندازه‌گیری جابه‌جایی دوپلری در این خط طیفی، روبین توانست نمودار سرعت آن‌ها را به دور مرکز کهکشان به صورت تابعی از فاصله آن‌ها از مرکز رسم کند. او توقع داشت که ابرهای دورتر از مرکز کهکشان (جایی که انتظار می‌رفت بیشتر جرم متمرکز شده باشد) با سرعت کمتری بچرخند،



شکل ۲۱-۱: نمودار چرخش  
کهکشانی برای کهکشان  
NGC ۱۵۳۰

درست همان طور که سیاره‌های بیرونی آهسته‌تر به دور خورشید حرکت می‌کنند. در این حرکت، معروف به حرکت کپلری، سرعت چرخش به صورت معکوس با ریشه دوم فاصله از مرکز کاهش می‌یابد. (این مطلب در قانون سوم کپلر درباره حرکت سیارات نمایش داده شده است، و می‌توان آن را از قانون گرانش نیوتون استخراج نمود.)

روبین، در کمال تعجب، متوجه شد که سرعت‌های چرخشی ابرها با افزایش فاصله از مرکز کاهش نمی‌یابد، و حتی در برخی موارد تا حدی زیاد می‌شود (شکل ۲۱-۱). تمام جرم یک کهکشان در مرکز آن جمع نشده است، با وجود این، انتظار داریم سرعت چرخشی با افزایش شعاع و خارج از مناطق درونی کهکشان کاهش یابد، هرچند که این کاهش به آن سرعتی نیست که اگر تمام جرم در مرکز جمع شده بود. یک نمونه عینی: سرعت چرخش خورشید ما به دور مرکز کهکشان راه شیری باید حدود  $160 \text{ km/s}$  می‌بود، اما در حقیقت حدود  $220 \text{ km/s}$  است. تنها راه توجیه این نتایج آن است که یا ستارگان در کهکشان در یک هاله بزرگ از ماده ناپیدا قرار گرفته‌اند - که تا آن طرف کهکشان مرئی کشیده شده است - یا اینکه قانون گرانش نیوتون برای فواصل بسیار زیاد اعتبار ندارد. این ماده ناپیدا، که مشاهدات روبین اثرات گرانشی آن را کشف کرد، گواهِ دیگری بر وجود ماده تاریک است.

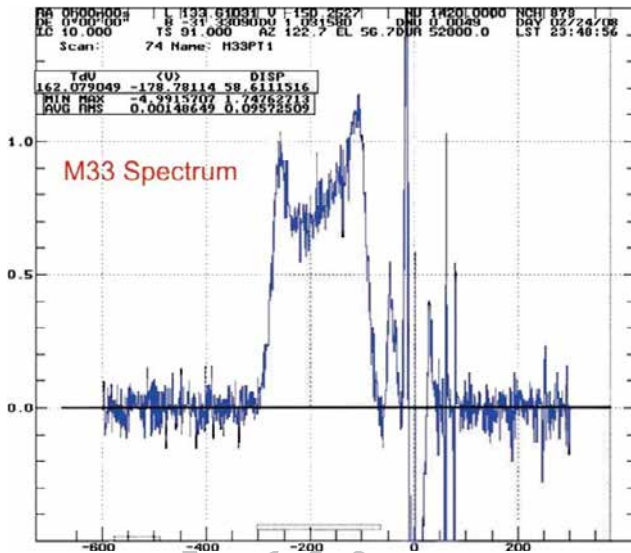


در سال ۱۹۸۱، یک شکل اصلاح شده از قانون نیوتن، موسوم به دینامیک نیوتنی اصلاح شده<sup>۸</sup>، به وسیله میلگروم<sup>۹</sup> پیشنهاد شد. او اظهار داشت که قانون دوم نیوتن زمانی که برای نیروهای گرانشی به کار گرفته می شود، تنها در شتاب گرانشی بالا تأیید شده است، و هرگز صحت و سقم آن در جایی که شتاب گرانشی فوق العاده کوچک می باشد آزموده نشده است - مانند وضعیتی که برای ستارگان در لبه یک کهکشان، جایی که نیروهای گرانشی بسیار ضعیف است، پیش می آید. با گزینش مناسب پارامترها، نظریه MOND می تواند به درستی منحنی چرخش مشاهده شده در کهکشان ها را مدل سازی نماید. اما کار بسیار دشوارتر در مقابل این نظریه، توضیح مشاهدات دیگری است که بر وجود ماده تاریک دلالت دارند، از قبیل دینامیک خوشه های کهکشانی و عدسی گرانشی. از این رو، نظریه MOND بیش از این مورد بررسی قرار نمی گیرد.

### ۲۱-۳ توزین یک کهکشان: جرمی بیش از آنچه مشاهده می کنیم وجود دارد

از مشاهدات خط هیدروژن که در بالا توضیح دادیم می توان استفاده کرد و جرم یک کهکشان را محاسبه نمود. در شکل ۲۱-۲ نمودار طیف خط هیدروژن را مربوط به کهکشان مجاورمان M۳۳، که در فاصله  $10^{22} \times 2/36$  (حدود ۲/۹ میلیون سال نوری) قرار دارد، می بینید. این تصویر به وسیله یک دستگاه کوچک، که بر روی تلسکوپ نصب می شود و من و همکارانم آن را برای استفاده دانشجویان کارشناسی در دانشگاه منچستر ساختیم، تهیه شده است. (در شکل ۱۴-۱۳ می توانید تصویر M۳۳ را ببینید.)

در شکل ۲۱-۲ محور افقی، با استفاده از پدیده دوپلر، از بسامد به سرعت تبدیل شده است. این نمودار دو مورد اطلاعات را درباره کهکشان در اختیار ما قرار داد. اول اینکه، طیف M۳۳ دارای یک پهنا در بسامد است، که ناشی از این حقیقت است که در حال چرخش می باشد - یک طرف کهکشان به سوی ما در حرکت است، در حالی که طرف دیگر دور می شود. مورد دوم اطلاعات اینکه، مرکز گسیل هیدروژن در M۳۳ متناظر با سرعت  $180 \text{ km/s}$  - است. شاید شما از این عدد استنباط کنید که این کهکشان با این سرعت از ما دور می شود، اما این طور نیست. از آنجاکه جز تعداد معدودی، تمام کهکشان ها در حال دور شدن از ما هستند، قرارداد مورد استفاده از این قرار است که به کهکشان های دور شونده سرعت مثبت، و به کهکشان هایی که در حال نزدیک شدن به ما



شکل ۲۱-۲: طیف خط هیدروژن M۳۳ در صورت فلکی مثلث که با استفاده از تلسکوپ رادیویی ۶/۴ متری در رصدخانه جُدرل بانک تهیه شده است.

هستند سرعت منفی نسبت داده می‌شود. پس M۳۳ با سرعت ۱۸۰ km/s در حال حرکت به سمت ما است. اما می‌دانیم که منظومه شمسی خود با سرعت حدود ۲۲۰ km/s به دور مرکز کهکشان می‌چرخد. لذا با در نظر گرفتن این سرعت، عملاً M۳۳ با سرعتی حدود ۲۴ km/s در حال نزدیک شدن به کهکشان راه شیری است.

پهنای خط طیفی حدود ۲۰۰ km/s است، بنابراین هیدروژن در لبه این کهکشان ظاهراً با سرعت ۱۰۰ km/s به دور مرکز آن می‌چرخد. گرچه کهکشان دایره‌ای فرض شده است، لکن ابعاد آن بر صفحه عکاسی حدود ۷۱ × ۴۵ دقیقه قوسی است، به عبارتی با زاویه‌ای حدود ۳۹ درجه  $[\arcsin(\frac{45}{71}) \approx 39^\circ]$  نسبت به خط دید ما کج است. از این رو مقداری که ما اندازه می‌گیریم از مقدار واقعی کمتر خواهد بود. (اگر صفحه کهکشان عمود بر ما بود، هیچ‌گونه پهنای چرخشی در طیف خط هیدروژن مشاهده نمی‌کردیم.) بنابراین سرعت حقیقی چرخش قسمت‌های خارجی این کهکشان به دور مرکز آن باید نزدیک به  $\frac{100}{\sin 39} = 158 \text{ km/s}$  باشد.

با دانستن فاصله کهکشان و اندازه زاویه‌ای آن، می‌توانیم شعاع آن را محاسبه کنیم. عرض M۳۳ حدود ۷۱ دقیقه قوسی است و در فاصله  $10^{22} \times \frac{2}{36}$  m قرار دارد. با توجه به این دو، مقدار شعاع  $10^{20} \times \frac{2}{4}$  m به دست می‌آید. اگر توزیع جرم کهکشان متقارن باشد، اثر گرانش بر گاز

هیدروژن در لبه کهکشان مانند آن است که تمام جرم کهکشان در مرکز آن متمرکز شده است. بدین ترتیب می‌توان با استفاده از همان شیوه‌ای که جرم خورشید محاسبه شد، جرم کلی  $M_{\odot}$  را به دست آورد که حدود ۴۵ میلیارد برابر خورشید خواهد بود.<sup>۱۱</sup>

روش دیگری در برآورد جرم وجود دارد که از «نسبت جرم به نور» ستارگان استفاده می‌کند؛ و آن عبارت است از نسبت جرم ستاره یا خوشه ستاره‌ای به درخشندگی آن. در مورد خورشید، بر اساس تعریف، جرم و درخشندگی یک است؛ پس نسبت جرم به نور آن یک است. می‌توان نسبت جرم به نور را برای تمام ستاره‌ها در  $M_{\odot}$  مشابه خورشید فرض کرد. در این صورت چنانچه نسبت درخشندگی  $M_{\odot}$  به خورشید را محاسبه کنیم، مستقیماً برآوردی از جرم آن نسبت به خورشید به دست خواهیم آورد. بدین ترتیب به جرمی حدود ۵ میلیارد برابر جرم خورشید می‌رسیم. این مقدار یک‌دهم عددی است که در بالا به دست آمد. واضح است که برخی اجرام، مانند گاز و غبار، در  $M_{\odot}$  تابش نمی‌کنند، ضمن این‌که نسبت جرم به درخشندگی در تمام ستارگان شبیه به خورشید نیست - ستاره‌های داغ، درحالی‌که جرمشان با خورشید قابل مقایسه است، بسیار درخشان هستند؛ و ستارگان سردتر (که تعدادشان بسیار بیشتر است) درخشندگی کمتری دارند. نسبت میانگین جرم به نور برای ستارگان، گاز و غبار در کهکشان خودمان حدود  $1/5$  است. لذا با فرض ترکیبی مشابه،  $M_{\odot}$  جرمی حدود ۸ میلیارد برابر خورشید خواهد داشت.

این حقیقت که مقدار بالا هنوز یک ششم مقداری است که قبلاً به دست آمد، گواهی دیگر بر وجود ماده تاریک در آن کهکشان است - به نظر می‌رسد مقدار ماده تاریک در ساختار کهکشان ۵ برابر ماده معمولی آن باشد.

## ۲۱-۴ جهان آغازین و تشکیل کهکشان‌ها

فیزیکدان آمریکایی جرج گیماو<sup>۱۱</sup> نخستین کسی بود که دریافت مهبانگ باید منتهی به تابشی شده باشد که همچنان در جهان پراکنده است. این تابش هم‌اکنون زمینه ریزموج کیهانی<sup>۱۲</sup> نامیده می‌شود و موضوع فصل بعد است. این تابش، که در ابتدا به شکل پرتوهای بسیار پرانرژی گاما بود، به دنبال انبساط جهان و سرد شدن آن، مقداری از انرژی خود را از دست داد، به طوری که پس از ۳۰۰ تا ۴۰۰ هزار سال از پیدایش، قلّه تابش در ناحیه ایتیکی طیف قرار گرفت.

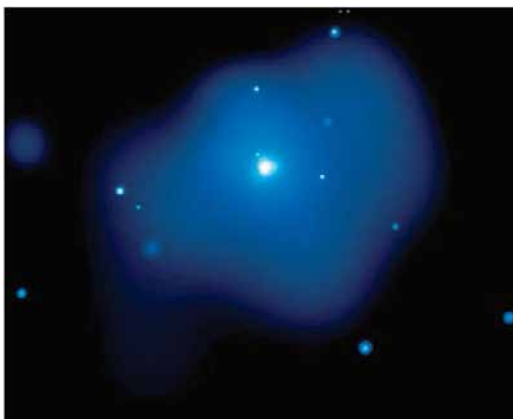
تا آن زمان، انرژی فوتون نوعاً آن قدر زیاد بود که می‌توانست از تشکیل اتم هیدروژن و هلیوم جلوگیری نماید، و از این رو ترکیب جهان عبارت بود از هسته‌های هیدروژن و هلیوم به همراه الکترون‌های آزاد - که بدین ترتیب یک پلازما را تشکیل می‌دادند. همان گونه که قطرات ریز آب موجود در مه نور را پخش می‌کنند، الکترون‌ها نیز فوتون‌ها را پراکنده می‌کردند، لذا جهان مات و غیر شفاف بود. این برهم‌کنش نزدیک بین ماده و تابش در جهان، یک نتیجهٔ سرنوشت‌ساز را موجب شد: توزیع هسته‌ها و الکترون‌ها (مواد معمولی) یک چگالی یکنواخت داشت، مگر در مقیاس‌های بسیار بسیار بزرگ، چراکه فوتون‌ها همچون یک همزن عمل کرده، آنچه را که وجود داشت به هم می‌زدند.

این حقیقت ارزش بحث را دارد که در ادامه می‌آید. زمانی که دما تا آنجا سقوط کند که اتم‌ها بتوانند تشکیل شوند، ماده می‌تواند تحت گرانش شروع به اجتماع در توده‌هایی نموده، ستارگان و کهکشان‌ها را به وجود آورد. شبیه‌سازی‌ها نشان داده‌اند که با توجه به یکنواختی در توزیع گاز اولیه، حدود ۸ تا ۱۰ میلیارد سال وقت لازم است تا این مناطق گازی به حدی چگال شوند که این فرایند به وقوع بپیوندد. اما می‌دانیم که کهکشان‌ها حدود یک میلیارد سال پس از مه‌بانگ به وجود آمدند. چیزی باید فرایند را کمک کرده باشد. بر این باوریم که آن چیز ماده تاریک بود. همان طور که گفته شد، این ماده تحت تأثیر تابش قرار نمی‌گرفت، لذا می‌توانست اندکی پس از مه‌بانگ شروع به تشکیل توده‌هایی تحت گرانش نماید. از این رو، زمانی که ماده معمولی توانست خود را از فوتون‌ها خلاص کند، چاه‌های گرانشی<sup>۱۳</sup> در محل تمرکز مادهٔ تاریک وجود داشت. مادهٔ معمولی می‌توانست به سرعت درون این چاه‌ها سقوط کرده، چگالی خود را افزایش دهد، و بدین ترتیب فرایند تشکیل کهکشان را شتاب بخشد.

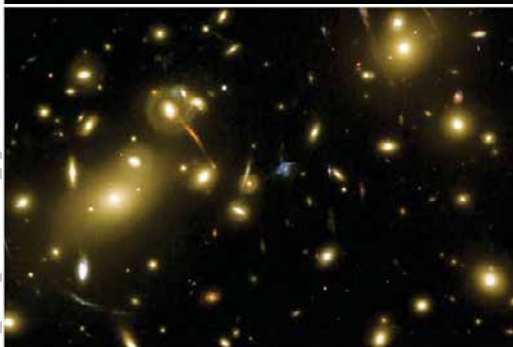
## ۲۱-۵ به دام انداختن گاز

رصدخانهٔ پرتو ایکس چاندرا<sup>۱۴</sup> متعلق به ناسا نشان داده است که کهکشان بیضوی NGC ۴۵۵۵ در ابری از گاز به قطر حدود ۴۰۰,۰۰۰ سال نوری و دمای ۱۰ میلیون کلوین قرار دارد (شکل ۲۱-۳). در این دما، مولکول‌های گاز با سرعت خیلی بالا حرکت می‌کنند، و جرم ستارگان درون کهکشان بسیار کمتر از آن است که از فرار آن‌ها جلوگیری نماید. برای آنکه گاز در مجاورت کهکشان باقی

شکل ۲۱-۳: تصویر ماهواره پرتو ایکس چاندرا متعلق به ناسا از گاز داغ اطراف کهکشان NGC ۴۵۵۵.



شکل ۲۱-۴: تصویر تلسکوپ هابل از خوشه آبل ۲۲۱۸.



بماند، جرم کلی این سامانه باید حدود ۱۰ برابر مجموع جرم ستارگان درون کهکشان، حدود ۳۰۰ برابر جرم ابرگازی باشد.

## ۲۱-۶ عدسی گرانشی

اجسام پرجرم در فضا، فضای اطراف خود را تغییر شکل می دهند و نوری را که از نزدیکی آن ها عبور می کند کج می نمایند. این وضعیت چیزی را به وجود می آورد که عدسی گرانشی<sup>۱۵</sup> نام دارد. ما می توانیم پدیده عدسی را در ستاره های تک (و حتی سیاره ها) و کهکشان های تک مشاهده کنیم. در یک مقیاس بسیار بزرگ تر، جرم یک خوشه کهکشانی می تواند تصویر اجسام دورتر را منحرف کند. تصویر خوشه آبل ۲۲۱۸ (شکل ۲۱-۴) یک نمونه شگفت آور است که تصاویر کهکشان های دورتر را که به صورت کمان درآمده اند نشان می دهد. مقدار پیچش، تابعی از جرم کلی خوشه بین راه است؛ و این روشی است برای برآورد جرم کلی خوشه های کهکشانی، که تأییدی است بر وجود

مادهٔ تاریک. با استفاده از این شیوه، ستاره‌شناسان حتی نشان داده‌اند که چگونه توزیع مادهٔ تاریک در طول ۶ میلیارد سال گذشته، غیریکنواخت و توده‌ای‌تر شده است.

## ۷-۲۱ چه مقدار مادهٔ سیاه غیرباریونی وجود دارد؟

چندین روش برای برآورد میزان مادهٔ تاریک وجود دارد. یکی از مستقیم‌ترین روش‌ها، مبتنی بر تجزیه و تحلیل مفصل افت و خیزها در زمینهٔ ریزموج کیهانی است. درصد مادهٔ تاریک یک تأثیر قابل مشاهده دارد و در بهترین هم‌خوانی با رصدهای کنونی، مادهٔ تاریک حدود ۲۷٪ از محتویات جرم/انرژی جهان را به خود اختصاص می‌دهد. رصدهای دیگر نیز از این نتیجه پشتیبانی می‌کند. با توجه به اینکه تنها حدود ۵٪ به ماده معمولی مربوط است، دو سؤال دیگر باقی می‌ماند: ماده تاریک چیست و حدود ۶۸٪ باقیمانده از جرم/انرژی کلی را چه چیزی تأمین می‌کند؟

## ۸-۲۱ مادهٔ تاریک چیست؟

صادقانه‌ترین پاسخ این است که ما واقعاً نمی‌دانیم. مدل استاندارد فیزیک ذرات وجود آن را پیش‌بینی نمی‌کند و از ملحقات به نظریهٔ استاندارد (که هنوز اثبات نشده‌اند) باید برای پیش‌بینی و چگونگی آشکارسازی آن استفاده نمود. مادهٔ تاریک را می‌توان به دو جزء ممکن تقسیم کرد:

(۱) مادهٔ تاریک داغ از ذرات بسیار سبک که با سرعتی نزدیک به نور حرکت می‌کنند (و از این رو داغ هستند).

(۲) مادهٔ تاریک سرد شامل ذرات نسبتاً سنگین که آرام‌تر حرکت می‌کنند.

شبهه‌سازی‌هایی که تلاش دارند تحول در ساختار جهان<sup>۱۶</sup> را مدل‌سازی نمایند، ایجاب می‌کنند که بیشتر مادهٔ تاریک سرد باشد. اما ستاره‌شناسان مطمئن هستند که سهم کوچکی از مادهٔ تاریک داغ به شکل نوترینو وجود دارد. تعداد نوترینوهای موجود در جهان بسیار فراوان است، اما تصور ابتدایی آن بود که آن‌ها فاقد جرم هستند. رصدهای اخیر، در تلاش برای حل مشکل نوترینوی خورشیدی، که در فصل ۲ به آن پرداختیم، نشان می‌دهد که نوترینو می‌تواند بین سه

گونه نوسان کند: الکترونی، تائوئی و میونی<sup>۱۷</sup>. این مطلب دلالت می‌کند که آن‌ها باید مقداری جرم داشته باشند، اما برآوردهای کنونی آن را کمتر از یک میلیونیم جرم الکترون نشان می‌دهد. از این رو آن‌ها تنها سهم کوچکی از تمام ماده تاریک را به خود اختصاص می‌دهند، چیزی که با شبیه‌سازی‌ها نیز سازگار است.

تأییدی دیگر بر این حقیقت که ماده تاریک داغ فراگیر نیست آن است که اگر این گونه بود، افت‌وخیزهای کوچک مقیاسی که در داده فضاپیمای WMAP می‌بینیم، هموار شده، از بین رفته بودند و ساختار زمینه ریزموج کیهانی مشاهده شده، که در فصل ۲۲ به آن می‌پردازیم، جزئیات بسیار کمتری نشان می‌داد.

### آکسیون‌ها

یک نامزد احتمالی برای ماده تاریک سرد، آکسیون‌های خنثی و سبکی هستند که وجودشان در نظریه پکیا-کوئین<sup>۱۸</sup> در سال ۱۹۷۷ پیش‌بینی گردید. تعداد آن‌ها در هر سانتیمتر مکعب از مرتبه ۱۰<sup>-۱۰</sup> تریلیون است! اگر آکسیون وجود داشته باشد، بر اساس تئوری باید بتواند در حضور یک میدان مغناطیسی قوی به فوتون تبدیل شود (و بالعکس). یک آزمایش ممکن می‌تواند تلاش برای عبور نور از میان دیوار باشد. یک باریکه نور از میان یک کاواک میدان مغناطیسی که در کنار یک مانع نور قرار دارد، عبور داده می‌شود. به ندرت ممکن است فوتونی به یک آکسیون تبدیل گردد که در آن صورت می‌تواند به آسانی از میان دیوار عبور کند. در آن طرف دیوار، با عبور آکسیون از میان کاواکی دیگر و با احتمالی بسیار کم، امکان بازتبدیل آکسیون به فوتون وجود دارد.

آزمایشی دیگر در آزمایشگاه لارنس لیورمور<sup>۱۹</sup> در حال جستجوی فوتون‌های ریزموجی است که در یک کاواک میزان شده<sup>۲۰</sup> ممکن است از واپاشی آکسیون نتیجه شود. در ایتالیا، نور قطبیده در حرکتی رفت و برگشتی، میلیون‌ها بار از میان یک میدان ۵ تسلا عبور داده می‌شود. اگر آکسیون وجود داشته باشد، فوتون‌ها می‌توانند با میدان برهم‌کنش کرده، به آکسیون تبدیل شوند و چرخشی بسیار کوچک و غیرعادی در صفحه قطبش ایجاد کنند. نتایج اخیر وجود آکسیون را با جرمی حدود سه برابر الکترون نشان می‌دهد. البته این موضوع نیازمند تأیید است و ممکن است عوامل دیگری برای اثر مشاهده شده در نور وجود داشته باشد.

یکی از ملحقات مدل استاندارد فیزیک ذرات بنام ابرتقارن<sup>۲۱</sup> پیشنهاد می‌کند که «ذرات سنگین با برهم‌کنش ضعیف» (WIMP)<sup>۲۲</sup> ممکن است جزء اصلی در مادهٔ تاریک سرد باشد. یکی از نامزدهای اصلی نوترالینو<sup>۲۳</sup> است - سبک‌ترین ذرهٔ ابرمتقارن خنثی. در هر ثانیه میلیاردها WIMP می‌تواند از ما عبور کند، و چند راه وجود دارد که شاید بتوان وجود آن‌ها را مستقیم یا غیرمستقیم شناسایی کرد. در ابتدا به مورد اخیر می‌پردازیم.

### آزمایش‌های شناسایی غیرمستقیم

در آزمایش‌های شناسایی غیرمستقیم به دنبال نابودی یا واپاشی WIMP می‌گردیم. اگر این ذرات پادذرهٔ خود نیز باشند، در این صورت دو WIMP می‌توانند یکدیگر را نابود کرده، پرتوهای گاما یا زوج‌های ذره-پادذره تولید کنند؛ و اگر ذرات WIMP ناپایدار باشند، می‌توانند به ذرات ماده معمولی واپاشی نمایند. نتیجهٔ این فرایندها را می‌توان از طریق یک زیادی در پرتو گاما، پادپروتون یا پوزیترونی که از مناطقی که انتظار می‌رود ماده تاریک تمرکز داشته باشد<sup>۲۴</sup> بیرون می‌آیند، شناسایی کرد. با وجود این، فرایندهای دیگری نیز که هنوز کاملاً شناخته نشده‌اند می‌توانند این محصولات واپاشی را تولید کنند، بنابراین شناسایی چنین علامتی نمی‌تواند به معنی یک شاهد قطعی برای ماده تاریک باشد.

تلسکوپ فضایی پرتو گامای فرمی<sup>۲۵</sup> در حال جستجو به دنبال پرتوهای گامایی است که از واپاشی یا نابودی ماده تاریک ناشی می‌شود. گزارشی در آوریل ۲۰۱۲ اعلان کرد که تحلیل داده‌ها از ابزار<sup>۲۶</sup> LAT، شاهدهی قوی را از یک خط ۱۳۰ GeV (۱۳۰ گیگا الکترون‌ولت) در تابش گامایی که از مرکز راه شیری می‌آمد نشان می‌داد، و ظاهراً نابودی WIMP محتمل‌ترین توضیح برای آن بود.

در ۱۵ ژوئن ۲۰۰۶، یک بستهٔ تجهیزاتی موسوم به PAMELA چسبیده به یک ماهوارهٔ روسی که اطراف زمین می‌چرخید به فضا ارسال شد. در ۵ نوامبر ۲۰۰۸، گزارشی رسید مبنی بر اینکه این بسته<sup>۲۷</sup> توانسته است یک زیادی را در پوزیترون‌های پرانرژی که از مرکز راه شیری سرچشمه می‌گرفتند شناسایی کند. این زیادی ممکن است نتیجهٔ یک برهم‌کنش بین دو ذرهٔ ماده تاریک باشد، و لذا، همان‌طور که نویسندگان مقاله در مجله *Nature* می‌گویند، ممکن است نخستین گواه غیرمستقیم را برای نابودی ذرات ماده تاریک بنا کند. انتظار آنان این بود که تمرکز عمده‌ای از



ماده تاریک به سمت مرکز کهکشان وجود داشته باشد، گرچه این را هم اضافه می‌کنند که هنوز شاید بتوان برای آن توجیه دیگری آورد، مانند حضور یک تپنده مجاور.

ایستگاه فضایی بین‌المللی وسیله‌ای را بنام طیف‌سنج مغناطیسی آلفا<sup>۲۸</sup> با خود حمل می‌کند. طراحی این وسیله به گونه‌ای است که بتواند مستقیماً کسری از پرتوهای کیهانی را که به شکل پوزیترون هستند اندازه بگیرد. نخستین نتایج، که در آوریل ۲۰۱۳ منتشر شد، یک زیادی را در پرتوهای کیهانی پرنرژی نشان می‌داد که می‌توانست بالقوه ناشی از نابودی ماده تاریک باشد. با عبور ذرات WIMP از میان خورشید یا زمین، آن‌ها ممکن است به وسیله اتم‌ها متفرق شوند و انرژی از دست دهند؛ که این موجب تمرکزی از این ذرات در مرکز خورشید یا زمین می‌شود. لذا احتمال اینکه دو ذره به هم برخورد کرده، نابود شوند افزایش می‌یابد. این می‌تواند شاری از نوترینوهای پرنرژی تولید کند که از مرکز خورشید یا زمین سرچشمه می‌گیرد. اگر چنین سیگنالی یافت می‌شد، شناسایی آن یک دلیل غیرمستقیم و قوی را بر وجود ماده تاریک از جنس WIMP بنا می‌نمود. از این رو تلسکوپ‌های نوترینوی پرنرژی<sup>۲۹</sup>، از قبیل آماندا، آیس کیوب و آنتارس<sup>۳۰</sup> در جستجوی آن هستند.

### آزمایش‌های شناسایی مستقیم

عقیده بر این است که یک ذره WIMP گاهی با یک هسته اتم برهم‌کنش کرده، آن را به عقب می‌راند - چیزی شبیه به برخورد یک توپ بیلیارد متحرک به یک توپ ساکن. بر اساس اصول، البته با دشواری فراوان، این برهم‌کنش‌ها قابل شناسایی هستند.

هرچند ممکن است در هر ثانیه یک میلیون ذره WIMP از میان هر سانتی‌متر مربع زمین عبور کند، آن‌ها بسیار به ندرت با هسته یک اتم سنگین برهم‌کنش خواهند کرد. برآورد می‌شود که در یک آشکارساز ۱۰ کیلوگرمی، به صورت میانگین در هر روز تنها یک برهم‌کنش رخ دهد. شرایط وقتی بدتر می‌شود که بدانیم پیوسته زیر بمباران پرتوهای کیهانی قرار داریم. این پرتوها از ماده معمولی ساخته شده‌اند و به آسانی برهم‌کنش می‌کنند. هرگونه برهم‌کنش WIMP کاملاً تحت‌الشعاع قرار می‌گیرد! یک روش برای کاهش تعداد پرتوهای کیهانی که وارد آشکارساز می‌شوند آن است که آشکارساز را در اعماق زمین قرار دهیم - مثلاً در ژرفای معدن بولی پوتاش<sup>۳۱</sup> در شمال یورکشایر

انگلستان، در عمق ۱۱۰۰ متری. در این عمق، لایه‌های صخره‌ای از هر یک میلیون پرتو کیهانی، تنها یکی را عبور خواهند داد؛ این در حالی است که از هر یک میلیارد ذره WIMP، تنها سه ذره با صخره بالای آشکارساز برهم‌کنش خواهند داشت.

شرایط حتی از این هم بدتر است؛ رادیواکتیو طبیعی در صخره‌های اطراف دستگاه آزمایش باعث افزایش نوفه‌ای می‌شوند که می‌تواند برهم‌کنش‌های ذرات WIMP را بپوشاند، از این رو آشکارسازها با سپرهایی برای مقابله با تابش از جنس سرب با خلوص بالا یا پلی‌اتیلن احاطه شده‌اند و ممکن است آن‌ها را در مخزن آب غوطه‌ور سازند. خود این آشکارسازها ممکن است ذرات بتا یا آلفا گسیل سازند، لذا در مورد ماده‌ای که از آن ساخته می‌شوند باید دقت کرد. لامپ تکثیرکننده نور<sup>۳۲</sup> نیز مشکل خاص خود را دارد، از این رو با استفاده از هدایت‌کننده‌های نوری، نور را از محل بلوره‌ای<sup>۳۳</sup> که برهم‌کنش در آن رخ می‌دهد به لامپ تکثیرکننده نور که با سپر حفاظت می‌شود منتقل می‌کنند.

در آزمایش‌های کنونی از دو شیوه اصلی برای تشخیص برهم‌کنش‌های WIMP استفاده می‌کنند. در شیوه نخست، هدف آن است که گرمای تولیدی از برخورد یک ذره به اتم در یک جاذب بلوره‌ای مانند ژرمانیوم شناسایی شود. برای تشخیص و شناسایی چنین رویدادهایی از آشکارسازهای برودتی که در ده‌های پایین‌تر از ۱۰۰ میلی‌کلوین کار می‌کنند استفاده می‌نمایند. شیوه دوم از یک مخزن مایع<sup>۳۴</sup> استفاده می‌کند که آشکارسازهای نوری گرداگرد آن را احاطه کرده‌اند. وظیفه این آشکارسازها تشخیص جرقه نوری است که در زمان برهم‌کنش یک ذره با مایع تولید می‌گردد. مهم آن است که هر دوی این شیوه‌ها قادرند بین رویدادهای تولیدی در هنگام پراکنده شدن ذرات زمینه به وسیله الکترون‌ها و رویدادهای مربوط به پراکنده شدن ذرات ماده تاریک به وسیله هسته‌ها تمایز قائل شوند.

### آیا موفقیت ممکن است؟

یک راه ممکن برای نشان دادن برهم‌کنش‌های WIMP در حضور آن‌هایی که به دلیل رادیواکتیو موجود در محل تولید می‌شود، مبتنی بر این حقیقت است که در ژوئن، حرکت زمین به دور خورشید  $(29/6 \text{ km/s})$  هم‌جهت با حرکت خورشید به دور مرکز کهکشان  $(232 \text{ km/s})$  می‌باشد. از این رو

زمین در ژوئن ذرات WIMP بیشتری را در مقایسه با دسامبر، زمانی که این دو حرکت مخالف یکدیگرند، جاروب می‌کند. اختلاف حدود ۷٪ است، لذا انتظار آن است که ذرات WIMP بیشتری در ژوئن نسبت به دسامبر شناسایی شود. با توجه به این که تعداد برهم‌کنش‌های ناشی از رادیواکتیو محلی باید ثابت باشد، روشی برای آشکارسازی به دست می‌آید. در آزمایش ماده تاریک در آزمایشگاه ملی گران ساسو<sup>۳۵</sup> در عمق ۱۴۰۰ متری در ایتالیا، جرقه‌هایی در ۱۰۰ کیلوگرم بلوره یدید سدیم خالص مشاهده شده است. نتایج هفت چرخه سالانه چیزی را که ممکن است به عنوان آشکار شدن تلقی شود، در اختیار ما قرار داده است؛ اما مجدداً، احتمال دارد توضیحات دیگری وجود داشته باشد.

در سال ۲۰۱۱، پژوهشگران با استفاده از آزمایش CRESST<sup>۳۶</sup> در ایتالیا، که آن نیز در آزمایشگاه ملی گران ساسو واقع شده است، شواهدی را مبنی بر ۶۷ برخورد در بلوره‌های آشکارساز ناشی از ذرات زیراتمی ارائه نمودند. آن‌ها به این نتیجه رسیدند که احتمال آنکه تمام این برخوردها بر اثر منابع شناخته شده تداخل یا عدم خلوص رخ داده باشد یک در ۱۰,۰۰۰ است. آشکارسازهای مورد استفاده در CRESST این مزیت را دارند که سه نوع هسته (کلسیم، تنگستن و اکسیژن) در تانگستات کلسیم<sup>۳۷</sup> در کنار هم قرار گرفته‌اند. هر یک از این هسته‌ها از جرم متفاوتی برخوردارند، پس اگر برای مثال، هسته تنگستن - سنگین‌ترین هسته - دچار عقب‌نشینی شود، به این معنی است که خود ذره WIMP سنگین است. از نتایج به دست آمده چنین برمی‌آید که بسیاری از این برخوردها ناشی از ذرات WIMP است، و یا ذرات دیگری که هنوز ناشناخته‌اند.

### آزمایش لوکس

امیدهایی که در بالا ترسیم شد تا حدی به وسیله نتایج آزمایش لوکس<sup>۳۸</sup> که در اکتبر ۲۰۱۳ منتشر شد به ناامیدی گرایید. این آزمایش در رصدخانه دیویس متعلق به تأسیسات پژوهش زیرزمینی سنفورد<sup>۳۹</sup>، که در ژرفای معدن هومس‌تیک در داکوتای جنوبی، آمریکا<sup>۴۰</sup> قرار دارد، انجام می‌گیرد. این آزمایشگاه همان جایی است که ری دیویس مسئله نوترینوهای خورشیدی را کشف کرد<sup>۴۱</sup>، و چون در عمق ۱۵۰۰ واقع شده است شار پرتوهای کیهانی را در مقایسه با سطح تا یک میلیون بار کاهش می‌دهد.

لوکس، به امید به چنگ انداختن برهم کنش‌های WIMP، هدفی را از ۳۶۸ کیلوگرم گزنون بسیار خالص و مایع، که تا دمای  $-100^{\circ}\text{C}$  سرد شده و برای بهره‌مندی از محافظت بیشتر در قلب یک مخزن ۳۱۸٫۰۰۰ لیتری از آب قرار داده شده است، به کار می‌گیرد. گزنون یک ماده جرقه‌زن است که متناسب با مقدار انرژی آزادشده در هر نوع برهم کنش ذره درون آن، نور تولید می‌کند. این نور، سپس، به وسیله آرایه‌ای از آشکارسازهای نوری حساس به یک فوتون منفرد (لامپ تکثیرکننده نور) آشکار می‌شود.

با توجه به خلوص بسیار بالای گزنون، خودش تابش زمینه ذاتی بسیار کمی را تولید می‌کند، و چون سه بار از آب متراکم‌تر است، از نفوذ بیشتر تابشی که از بیرون آشکارساز سرچشمه می‌گیرد به مرکز آن جلوگیری می‌نماید. این وضعیت یک منطقه بسیار آرام را در میانه حجم هدف تولید می‌کند که در آن جستجوی برهم کنش‌های ماده تاریک انجام می‌شود.

از برهم کنش ذرات درون آشکارساز لوکس، هم فوتون تولید می‌شود و هم الکترون. فوتون‌ها، که با سرعت نور در گزنون (حدود  $0.64$  سرعت نور در خلأ) حرکت می‌کنند، بلافاصله به وسیله لامپ‌های تکثیرکننده نور آشکار می‌شوند. این سیگنال فوتونی را  $S_1$  می‌نامند. با تجزیه و تحلیل فوتون‌هایی که به وسیله آرایه‌ای از ۶۱ آشکارساز نوری در بالا و پایین هدف گزنونی شناسایی شده‌اند، می‌توان موقعیت برهم کنش را درون هدف به دست آورد (برحسب دو مختصه  $x$  و  $y$ ). یک میدان الکتریکی درون گزنون مایع باعث می‌شود که الکترون‌ها با سرعت حدود  $1\text{ km/s}$  به سمت بالا، به طرف سطح مایع، حرکت کنند. هنگامی که آن‌ها به سطح می‌رسند و وارد گاز بالایی شوند، بر اثر پدیده برق‌درختی<sup>۴۲</sup> تولید فوتون می‌کنند (سیگنال  $S_2$ )، دقیقاً مانند نوری که در لامپ نئون تولید می‌گردد. هرچه برهم کنش در موقعیت پایین‌تری درون مخزن گزنون رخ دهد، مدت‌زمان بیشتری لازم است تا الکترون‌ها به سطح بیابند و از این رو اختلاف زمانی بین سیگنال‌های  $S_1$  و  $S_2$  بیشتر خواهد شد. بدین ترتیب می‌توان عمق (مختصه  $z$ ) را که برهم کنش در آن اتفاق افتاد پیدا کرد. لوکس می‌تواند مشخص کند که در چه نقطه‌ای درون هدف، برهم کنش‌ها روی می‌دهند.

یک مشکل بنیادی وجود دارد؛ و آن تمایز بین ذرات WIMP و برهم کنش‌های متعددی است که عامل آن‌ها نوترون‌های نفوذی در سپر حفاظتی اطراف هدف گزنونی است که همچنان باقی مانده‌اند. احتمال بالایی وجود دارد که نوترون‌ها، با از دست دادن انرژی جنبشی، با چند هسته

گزنون برهم کنش کرده، در یک چارچوب کوتاه زمانی چندین رویداد را به وجود آورند. از طرف دیگر، احتمال اینکه هر ذره WIMP که از میان هدف عبور کرده، برهم کنش می نماید، بار دیگر نیز برهم کنش داشته باشد تقریباً صفر است. لذا هر ذره WIMP حداکثر یک رویداد خواهد داشت. (البته از آنجایی که ذرات WIMP برهم کنش بسیار ضعیفی دارند، بیشتر آن ها بدون آنکه جلب توجه کنند از میان آشکارساز عبور می کنند.) بدین ترتیب لوکس می تواند برهم کنش های احتمالی WIMP را تشخیص دهد. رویداد دیگری که تمایز آن از برهم کنش WIMP مشکل تر است، رویداد ناشی از برهم کنش الکترون می باشد، چراکه الکترون نیز یک رویداد تک را تولید می کند. با وجود این، واکنش و حرکت روبه عقب الکترون دارای یک شناسه کاملاً معلوم است و لذا می توان آن را جدا نمود.

در ادامه شرح بیشتری از آشکارساز لوکس را می بینید، چراکه احساس می کنم این آشکارساز نمونه ای زیبا از «روش تجربی»<sup>۴۳</sup> است.

### نتایج اولیه

نتایج اولیه لوکس، مبتنی بر مشاهدات ۸۵ روز نخست، در پایان اکتبر ۲۰۱۳ منتشر شد. در این مدت، لوکس ۱۶۰ رویداد منفرد را به ثبت رسانده بود. تمام این رویدادها، که از معیار گزینش تحلیل داده در لوکس گذشته بودند، با زمینه عقب نشینی الکترونی سازگار بودند، لذا عقیده بر این است که هیچ ذره WIMP شناسایی نشده بود. این نتیجه حساس ترین شناسایی مستقیم ماده تاریک است که تاکنون صورت پذیرفته است و هرگونه اشاره ای را مبنی بر شناسایی ذره WIMP در آزمایش های دیگر کنار می زند. برای مثال، یک آشکارساز بسیار کوچک تر از سیلیسیوم فراسرد، سه شناسایی ذره WIMP را اعلان نموده است، اما اگر واقعاً درست بود، آشکارساز بسیار بزرگ تر لوکس باید بیش از ۱۶۰۰ رویداد را شناسایی می کرد - در هر ۸۰ دقیقه یک رویداد - اما هیچ رویدادی شناسایی نشد.

### در آینده چطور؟

لوکس در آینده در دوره های طولانی تری به کار گرفته خواهد شد تا سرنخ هایی از این اجسام مبهم به دست آورد. البته یک آشکارساز بسیار بزرگ تر موسوم به لوکس-زپلین<sup>۴۴</sup> آماده به خدمت است.

گروه زپلین، که آزمایش‌های آن در معدن بالبی در شمال یورکشایر، انگلستان، اجرا شد، پیش‌تاز بسیاری از شیوه‌هایی است که هم‌اکنون در لوکس مورد استفاده قرار می‌گیرد. این گروه، پس از آخرین آزمایش خود در زپلین ۳ در سال ۲۰۱۲، به لوکس پیوست، از این رو لوکس-زپلین مبتنی بر شیوه‌هایی است که در آزمایش‌های لوکس و زپلین به کار گرفته شده است. البته بنا بر این است که از توانایی‌هایی فراتر از آن‌هایی که در آزمایش‌های لوکس و زپلین نمایش داده شده است استفاده شود. در مقایسه با قطر ۰/۴۹ متری لوکس، قطر لوکس-زپلین ۱/۲ متر خواهد بود و حدود ۲۱ برابر گزنون بیش‌تری را در بر خواهد گرفت، لذا حساسیت آن به شدت افزایش خواهد یافت. یکی از پیشرفت‌های لوکس-زپلین این حقیقت خواهد بود که مخزن گزنون با یک مخزن از جنس آکرلیک شفاف احاطه می‌شود که پر از یک ماده جرقه‌زن مایع خواهد بود. بدین ترتیب توانایی حذف رویدادهای ناشی از ذرات پس‌زمینه افزایش قابل توجهی خواهد یافت. اگر لوکس نخستین شناسایی را از ذرات ماده تاریک ثبت نکند، تمام امیدها متوجه لوکس-زپلین خواهد بود.

با وجود این شاید ذرات ماده تاریک به هیچ‌یک از مدل‌های استاندارد ذرات شباهت نداشته باشد؛ در این صورت، ممکن است «آشکارسازهای غیرفعال»<sup>۴۵</sup> مانند لوکس هرگز نتوانند آن‌ها را شناسایی کنند. اما یک رویکرد دیگر وجود دارد که عملاً یک آشکارساز فعال است. در این رویکرد از یک شتاب‌دهنده با انرژی بسیار بالا، همچون برخورددهنده بزرگ هادرونی، استفاده می‌کنند تا ذرات WIMP خلق شود و آن‌ها را از آنچه در نتیجه واپاشی به دست می‌آید شناسایی می‌کنند.

## ۹-۲۱ چقدر ماده تاریک و معمولی وجود دارد، و بقیه چیست؟

ماده تاریک و معمولی، در مجموع حدود ۳۲٪ تمام جرم / انرژی جهان را تشکیل می‌دهند. به نظر می‌رسد اکثریت باقی‌مانده، حدود ۶۸٪، باید چیز دیگری باشد. عقیده بر این است که آن نوعی انرژی نهفته در خود فضا است - انرژی تاریک - که به صورت یکنواخت در سراسر آن گسترده شده است. در حقیقت، این می‌تواند همان چیزی باشد که توسط اینشتین و به منظور ساخت جهان ایستا مورد استفاده قرار گرفت - ثابت کیهانی یا جمله لاندای (Λ). از لاندای مثبت می‌توان به چگالی ثابت انرژی مثبت تعبیر کرد؛ چیزی که تمام جهان را فرا گرفته است، با زمان تغییر نمی‌کند و اثر خالص آن دافعه است. البته گزینه‌های دیگری نیز وجود دارد و یک سری مدل‌های دیگر نیز

که در آن‌ها انرژی به زمان بستگی دارد در حال بررسی است. این مدل‌ها نام‌هایی نیز دارند، مانند کوینتسنس<sup>۴۶</sup> به معنی نیروی پنجم. از آنجاکه مقدار کلی این انرژی و اثرات دافعه آن متناسب با حجم فضا است، با گذشت زمان و بزرگ‌تر شدن جهان، اثرات انرژی تاریک باید آشکارتر شود.

در همه مدل‌های مهبانگ، انبساط اولیه با زمان کند می‌شود؛ چراکه گرانش انبساط را مهار می‌کند. از این رو سرعت انبساط هرگز افزایش نمی‌یابد. اما چنانچه در جهان مؤلفه‌ای با اثر دافعه وجود داشته باشد که با حجم فضا افزایش می‌یابد، اندازه مقیاس جهان به گونه‌ای کاملاً متفاوت با زمان تغییر خواهد نمود. در ابتدا، زمانی که حجم جهان کوچک است، گرانش بر انرژی تاریک استیلا داشته، سرعت اولیه انبساط کم است - درست مانند مدل‌های مهبانگ - اما نقطه‌ای خواهد رسید که اثرات دفعی انرژی تاریک، مساوی با گرانش و سپس افزون می‌گردد، در آن زمان، جهان با سرعتی فزاینده شروع به انبساط خواهد نمود. اگر این گونه باشد، کهکشان‌های دور در فواصلی دورتر از ما، در مقایسه با آنچه مدل‌های مهبانگ پیش‌بینی می‌کنند، قرار خواهند داشت.

## ۲۱-۱۰ شواهدی بر انرژی تاریک

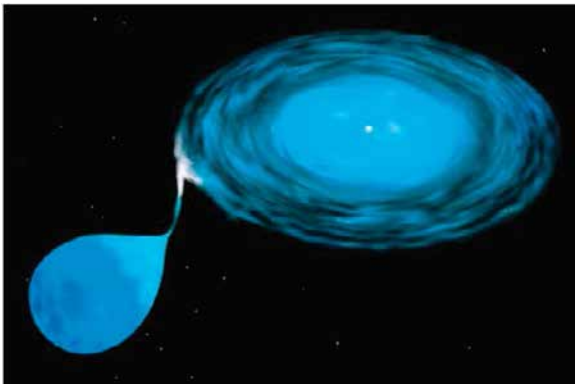
در دهه ۱۹۹۰، امکان اندازه‌گیری فاصله تا کهکشان‌های بسیار دور فراهم آمد. اگر چیزی را که شمع استاندارد نامیده می‌شود در اختیار داشته باشیم می‌توانیم فاصله تا اجسام دور را برآورد نماییم. (شمع‌های استاندارد اجسامی هستند با روشنایی معلوم که برخی از آن‌ها در فواصل مشخص و نزدیک مشاهده شده‌اند.) هابل با چنین شیوه‌ای و با استفاده از ستاره‌های متغیر قیفاووسی با روشنایی بیشینه معین، فاصله تا کهکشان‌ها را اندازه گرفت. این متغیرها، نخستین بار در ابر کوچک ماژلانی که در فاصله معینی از ما قرار دارد مشاهده شده بودند. تصور کنید یکی از این ستارگان در کهکشانی دور رصد شود و روشنایی آن در مقایسه با یک قیفاووسی مشابه در ابر کوچک ماژلانی  $\frac{1}{100}$  باشد. با فرض عدم وجود هرگونه خاموشی<sup>۴۷</sup> ناشی از غبار، با توجه به قانون عکس مجذور، فاصله آن کهکشان ۱۰۰ برابر کوچک‌تر است.

با وجود این، علیرغم آنکه متغیرهای قیفاووسی از جمله روشن‌ترین ستارگان شناخته شده هستند، در مورد فواصلی که می‌توان با آن‌ها اندازه گرفت حدی وجود دارد. چیزی روشن‌تر لازم است. برای یک مدت کوتاه، ابرنواخترها روشن‌ترین جسم در فضا هستند. عقیده بر این است که

در گونه‌ای ابرنواختر، موسوم به ابرنواختر نوع ۱a، روشنایی بیشینه کاملاً معلوم است. برای روشن شدن موضوع به این مثال توجه کنید: گلوله‌ای از پلوتونیوم را با جرمی کمتر از جرم بحرانی در نظر بگیرید. اگر به تدریج و به صورت یکنواخت پلوتونیوم به سطح آن اضافه شود، زمانی خواهد رسید که از جرم بحرانی تجاوز می‌کند و منفجر می‌شود. در هر بار تکرار این آزمایش، قدرت انفجار یکسان خواهد بود، چراکه جرم بحرانی کره پلوتونیوم کاملاً مشخص است. همان گونه که خواهید دید، آنچه در ابرنواختر نوع ۱a رخ می‌دهد تقریباً شبیه به این است.

ابرنواختر نوع ۱a در یک سیستم دوتایی اتفاق می‌افتد. ستاره پرجرم‌تر زودتر متحول شده، به مراحل پایانی خود می‌رسد. هسته مرکزی ستاره احتمالاً به یک کوتوله سفید، در حدود اندازه زمین، تبدیل می‌گردد. سپس همدم آن به غول قرمز تبدیل شده، به طور چشم‌گیری بزرگ می‌شود. به دنبال این فرآیند، با سرریزی و جذب لایه‌های خارجی آن به سطح کوتوله سفید، جرم کوتوله افزایش می‌یابد (شکل ۲۱-۵). در یک نقطه بحرانی، زمانی که جرم کوتوله سفید به حد چاندراسخار، تقریباً ۱/۴۴ جرم خورشید، نزدیک می‌شود، لایه‌های خارجی شعله‌ور خواهند شد و تمام جرم کوتوله در انفجار گرماهسته‌ای ناشی از آن مصرف می‌گردد. از آنجاکه تمام این گونه ابرنواخترها، زمانی که به جرم مشابهی برسند منفجر خواهند شد، انتظار می‌رود که روشنایی بیشینه یکسانی داشته باشند (حدود ۵ میلیارد بار روشن‌تر از خورشید) و بدین ترتیب شمعی استاندارد و عالی خواهند ساخت.

با توجه به روشنایی زیاد ابرنواختر نوع ۱a، می‌توان آن را از فواصل بسیار بسیار دور دید.



شکل ۲۱-۵: ماده در حال تجمع بر یک کوتوله سفید.



روشن‌ترین ستارگان متغیر قیفاووسی، از فواصلی حدود ۱۰ تا ۲۰ میلیون پارسک (حدود ۳۲ تا ۶۴ میلیون سال نوری) دیده می‌شوند. ابرنواخترهای نوع Ia تقریباً ۱۴ قدر (حدود ۲۵۰,۰۰۰ بار) روشن‌تر از متغیرهای قیفاووسی هستند، لذا از فاصله‌ای حدود ۵۰۰ بار دورتر، متناظر با ۱۰۰۰ Mpc قابل دیدن هستند - کسری قابل ملاحظه از شعاع شناخته‌شده جهان. با وجود این، ابرنواخترها نادر هستند و شاید در هر ۳۰۰ سال یک بار در یک کهکشان ماریپچ ظاهر شوند. هم‌اکنون و به‌طور منظم، مشاهداتی از هزاران کهکشان دور در حال انجام است و برنامه‌های پیچیده کامپیوتری به دنبال رویدادهای ابرنواختری است. به محض اولین مشاهده، رصدها در جستجوی منحنی مشخصه نوری ابرنواختر نوع Ia ادامه پیدا می‌کند. این منحنی مشخصه از واپاشی رادیواکتیو نیکل-۵۶، ابتدا به کبالت-۵۶ و سپس به آهن-۵۶، نتیجه می‌شود.

هابل (و سپس دیگران) سرعت ظاهری انبساط کهکشان‌ها را نسبت به فاصله آن‌ها رسم کردند و به نموداری خطی دست یافتند. انتظار نمی‌رفت که این نمودار تا فواصل خیلی دور به صورت خطی ادامه پیدا کند، چراکه با گذشت زمان سرعت انبساط تغییر می‌کرد. انتظار می‌رفت که منحنی در فواصل دور به زیر نمودار خطی سقوط کند چراکه تصور بر این بود که سرعت انبساط جهان ما در حال کند شدن بود. رصد ابرنواخترهای دور از نوع Ia، به تازگی امکان اندازه‌گیری فواصل بسیار دورتر را فراهم آورده است. این اندازه‌ها، به همراه قرمزگرایی مربوطه، ما را قادر ساخته است نمودار هابل را تا نقطه‌ای که دیگر خطی نیست امتداد دهیم. طبق انتظار، نمودار دیگر خطی نیست؛ اما در کمال تعجب، منحنی نسبت به حالت خطی، به سمت بالا حرکت می‌کند و نه به سمت پایین. این دلالت می‌کند که انبساط جهان در حال سرعت گرفتن است و نه آن‌طور که تصور می‌شد در حال کند شدن، و از این رو مدرکی است بر وجود انرژی تاریک.

این اکتشاف مبتنی بر مشاهدات ابرنواختر نوع Ia به وسیله گروه جستجوی ابرنواختری با قرمزگرایی بالا<sup>۴۸</sup> در سال ۱۹۹۸ بود که در سال ۱۹۹۹ به وسیله «پروژه کیهان‌شناسی ابرنواختری»<sup>۴۹</sup> پیگیری شد. در سال ۲۰۱۱ جایزه نوبل فیزیک به این کار تعلق گرفت. این جایزه، «برای کشف انبساط شتاب‌دار جهان از طریق رصد ابرنواخترهای دور»، به دو نیم تقسیم شد؛ نیمی به سول پرلماتر، مدیر پروژه کیهان‌شناسی ابرنواختری<sup>۵۰</sup> اهدا شد، و نیم دیگر را به صورت مشترک، بریان اشمیت و آدام ریس<sup>۵۱</sup>، مدیران گروه جستجوی ابرنواختری با قرمزگرایی بالا، تصاحب نمودند.

## ۲۱-۱۱ ماهیت انرژی تاریک

بر اساس شناخت ما، انرژی تاریک بسیار همگن است، چندان چگال نیست (حدود  $10^{-29} \text{ g/cm}^3$ ) و به نظر می‌رسد با دیگر نیروهای بنیادی، غیر از گرانش، برهم‌کنش نمی‌کند. این موضوع آشکارسازی آن را در آزمایشگاه بسیار سخت می‌سازد.

ساده‌ترین توضیح برای انرژی تاریک آن است که یک حجم از فضا دارای مقداری انرژی بنیادی و ذاتی است، همان‌گونه که اینشتین با ثابت کیهانی خود آن را فرض نمود. نظریه نسبیت خاص اینشتین جرم و انرژی را به وسیله رابطه  $E=mc^2$  به هم مربوط می‌سازد، لذا این انرژی اثری گرانشی خواهد داشت. اغلب آن را انرژی خلأ می‌نامند چراکه چگالی انرژی فضای خالی است. در حقیقت، بسیاری از نظریه‌ها در فیزیک ذرات افت و خیزهایی را در خلأ پیش‌بینی می‌کند که دقیقاً همین نوع انرژی را در خلأ باعث می‌شود. شاید برای احساس اینکه چگونه خلأ کامل شامل انرژی می‌شود این را باید درک کرد که خلأ واقعاً خالی نیست! اصل عدم قطعیت هایزنبرگ این امکان را می‌دهد که ذرات پیوسته به وجود آیند و سریعاً نابود شوند. یک خلأ کامل، با این ذرات مجازی، در حال جوش و خروش است!

بدین ترتیب، و بر اساس اصل عدم قطعیت هایزنبرگ، مقدار انرژی‌ای که می‌تواند وجود داشته باشد دارای یک عدم قطعیت است. این عدم قطعیت کوچک در انرژی،  $\Delta E$ ، اجازه می‌دهد انرژی غیر صفر در بازه‌هایی کوتاه از زمان،  $\Delta T$ ، وجود داشته باشد، به صورتی که  $\Delta E \times \Delta T$  از مرتبه  $\frac{h}{4\pi}$  است و  $h$  (ثابت پلانک) برابر است با  $6.626 \times 10^{-34} \text{ m}^2 \text{ kg s}^{-1}$ .

در نتیجه هم‌ارزی بین ماده و انرژی ( $E=mc^2$ )، این افت و خیزهای کوچک انرژی می‌تواند ذرات ماده تولید کند (ذره و پادذره آن باید با هم تولید شود) که برای مدت کوتاهی به وجود می‌آیند و سپس ناپدید می‌شوند. برای نمونه، پروتون و پادپروتون را با جرم  $1.7 \times 10^{-24} \text{ g}$  در نظر بگیرید. اگر قرار بود یک زوج مجازی آفریده شود، انرژی معادل آن‌ها از  $E = mc^2$  برابر بود با  $3 \times 10^{-3} \text{ erg}$ ، بنابراین تنها می‌توانستند برای زمانی از مرتبه  $3 \times 10^{-25} \text{ s}$  وجود داشته باشند.

تعدادی آزمایش توانسته است این انرژی خلأ را آشکار کند. یکی از آن‌ها آزمایش کزیمیر<sup>۵۲</sup> است

که در آن، اصولاً، دو صفحه فلزی در خلأ و با فاصله‌ای بسیار کم از یکدیگر قرار داده می‌شود. در عمل آسان تر است که از یک صفحه تخت و یک صفحه که قسمتی از یک کره با شعاع بسیار بزرگ است استفاده نمود. این‌گونه بیندیشید که برای ذرات مجازی یک طول موج متناظر وجود دارد (دوگانگی موج-ذره). آن دسته از ذرات مجازی که طول موجشان بلندتر از فاصله بین صفحات است نمی‌توانند بین آن‌ها وجود داشته باشند. بدین ترتیب ذرات مجازی بیشتری در طرف بیرونی آن‌ها وجود دارد و همین عدم توازن، نوعی نیروی جاذبه بین صفحات ایجاد می‌کند.

در یک تشبیه جالب، دو کشتی را در نظر بگیرید که در دریای باز و درحالی که بادی آرام ولی ممتد می‌وزد، برای انتقال بار یا سوخت در کنار یکدیگر پهلو می‌گیرند. در بین این دو، تنها امواجی می‌تواند وجود داشته باشد که طول موجشان کمتر از فاصله تنه دو کشتی است، درحالی که در بیرون، تمام طول موج‌ها امکان حضور دارند. این نابرابری، نیرویی را تولید می‌کند که مایل است دو کشتی را به طرف هم براند. از این‌رو لازم است که هر دو کشتی پیوسته و به صورت فعال از یکدیگر دور نگه داشته شوند.

ثابت کیهان‌شناسی ساده‌ترین راه حل برای مشکل شتاب کیهانی است؛ چراکه تنها یک عدد، با موفقیت، مجموعه‌ای از مشاهدات را توجیه می‌کند و به یک ویژگی اساسی در مدل استاندارد کنونی کیهان‌شناسی تبدیل شده است. مدلی که «مدل لاند- ماده تاریک سرد»<sup>۵۳</sup> نام دارد (چون هم ماده تاریک سرد و هم ثابت کیهانی را درگیر می‌کند) می‌تواند جهت پیش‌بینی آینده جهان مورد استفاده قرار گیرد. در فصل پایانی به این موضوع خواهیم پرداخت.

## مانوش‌ها

- 1 - MACHO (massive astronomical compact halo object)
- 2 - Fritz Zwicky
- 3 - California Institute of Technology
- 4 - Walter Baade
- 5 - virial theorem
- 6 - Vera Rubin
- 7 - H II regions
- 8 - MODified Newtonian Dynamics (MOND)
- 9 - Mordehai Milgrom

۱۱ - George Gamow؛ البته با توجه به ریشه روسی این نام، جرج گاموف نیز تلفظ می‌شود. (مترجم)

12 - Cosmic Microwave Background (CMB)

13 - Gravitational Wells

14 - Chandra X-ray Observatory

15 - Gravitational Lens

۱۶ - توزیع خوشه‌ها و ابرخوشه‌های کهکشانی.

17 - electron, tau and muon neutrinos

18 - Peccei-Quinn theory

19 - Lawrence Livermore Laboratory

20 - tuned cavity

21 - Supersymmetry

22 - Weakly Interacting Massive Particles (WIMPs)

23 - Neutralino

۲۴ - مکان‌هایی همچون مرکز کهکشان ما.

25 - Fermi Gamma-ray Space Telescope

26 - Large Area Telescope instrument

27 - Payload for Antimatter Matter Exploration and Light-nuclei Astrophysics

28 - Alpha Magnetic Spectrometer

29 - high-energy neutrino telescopes

30 - AMANDA, IceCube and ANTARES

31 - Boulby Potash Mine

32 - Photomultiplier tube

۳۳ - بلورهای مانند یدید سدیم.

۳۴ - مانند گزنون یا آرگون

35 - DArk MATter (DAMA) Experiment at the Gran Sasso National Laboratory

36 - Cryogenic Rare Event Search with Superconducting Thermometers, (CRESST)

37 - calcium tungstate

38 - Large Underground Xenon, (LUX)

39 - Davis Laboratory of the Sanford Underground Research Facility (SURF)

40 - Homestake Mine in South Dakota, USA

۴۱ - فصل ۲ را ببینید.

۴۲ - electroluminescence؛ پدیده‌ای نورشناختی و الکتریکی است که در آن ماده بر اثر عبور جریان یا

میدان الکتریکی قوی نور ساطع می‌کند.

43 - experimental technique

44 - LUX-ZEPLIN (LZ)

45 - Passive Detector

46 - Quintessence

47 - Extinction

48 - High-z Supernova Search Team

49 - Supernova Cosmology Project

50 - Saul Perlmutter, leader of the Supernova Cosmology Project

51 - Brian P. Schmidt and Adam G. Riess who led the High-z Supernova Search Team

52 - Casimir experiment

53 - Lambda-Cold Dark Matter Model

## فصل ۲۲

### پس تاب آفرینش

#### ۱-۲۲ پیش‌بینی‌های مه‌بانگ «داغ»؛ حضور تابش درون جهان

دو دانشمند آمریکایی، جرج گیماو و ریچارد دیک<sup>۱</sup>، به صورت مستقل پیش‌بینی کردند که در زمان مه‌بانگ باید دماهای بسیار بالایی وجود می‌داشت - دلایل هر دو برای این پیش‌بینی تا حدی اشتباه بود. گیماو<sup>۲</sup> دمای خیلی بالا را از این‌رو مد نظر داشت که بتواند ساخت تمام عناصری را که در طبیعت یافت می‌شوند به مراحل آغازین جهان نسبت دهد. امروزه می‌دانیم که به‌غیر از نیتروژن (در فرایند CNO)، عناصر در ستارگان و در مراحل پایانی عمر آن‌ها ساخته می‌شوند؛ و در مورد ستارگان پرجرم، در پایان عمرشان و در یک انفجار ابرنواختری.

پیش‌بینی دیگر به وسیله ریچارد دیک، فیزیکدان دانشگاه پرینستون، انجام شد. او نیز مانند فرد هویل به این نظر که جهان از یک نقطه آغازین شروع شده است علاقه‌ای نداشت<sup>۳</sup> و به یک جهان نوسانی معتقد بود؛ به این ترتیب که جهان تا یک اندازه پیشینه منبسط می‌شود، سپس رمبش کرده، به یک چگالی پیشینه می‌رسد، و دوباره حرکت انبساطی خود را از سر می‌گیرد. گیماو نتوانسته بود تشکیل عناصر سنگین‌تر از هلیوم را توضیح دهد، اما هویل و دیگران نشان داده بودند که چگونه عناصر سنگین‌تر در ستارگان تشکیل می‌شدند. از این‌رو، برای آغاز مجدد با یک جهان در حال انبساط، تمام عناصر سنگین‌تر باید نابود می‌شدند. دیک دریافت که گرمای فوق‌العاده بالا (دماهایی دست‌کم حدود یک میلیارد درجه) به خوبی از عهده این کار برمی‌آمد؛ عناصر سنگین به هم برخورد می‌کردند و به اجزای تشکیل‌دهنده آن‌ها، پروتون، الکترون و نوترون شکسته می‌شدند.

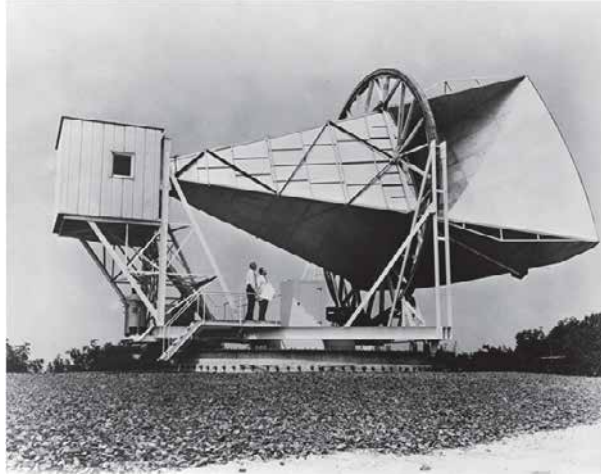
یک نتیجه انکارناپذیر هر دوی این پیش‌بینی‌ها آن است که چنین مرحله داغی در حیات

جهان آغازین، مملو از فوتون‌های بسیار پرانرژی بوده است (در ابتدا به شکل پرتوهای گاما). با انبساط جهان، این تابش به تدریج انرژی خود را از دست داد، و هم‌اکنون در بخش‌هایی از طیف قرار دارد که به فرسرخ دور و امواج رادیویی با طول موج خیلی کوتاه مربوط می‌شود. اما آنچه از این نتیجه برمی‌آید آن است که اگر یک دماسنج در فضای بین کهکشان‌ها قرار گیرد، دمای صفر مطلق را نشان نمی‌دهد، بلکه دما چند درجه بالاتر از صفر مطلق خواهد بود. این تابش را رسماً تابش «زمینه ریزموج کیهانی»<sup>۴</sup> می‌نامند.

در سال ۱۹۴۸، گیماو به همراه دانشجوی خود، رلف آلفر<sup>۵</sup>، مقاله مهمی را با عنوان «منشأ عناصر شیمیایی»<sup>۶</sup> در مجله *Physical Review* منتشر نمود. (گیماو نام هانس بته را نیز به عنوان یکی از نویسندگان مقاله ذکر کرده بود، هرچند وی هیچ نقشی در آن نداشت. این مقاله به مقاله «آلفر-بته-گیماو» مشهور شد که جناسی بود برای سه حرف نخست یونانی، آلفا، بتا و گاما!)<sup>۷</sup>

مقاله نشان می‌داد که چگونه می‌توان مقدار کنونی هیدروژن و هلیوم در جهان را (که اعتقاد داریم حدود ۹۸٪ تمام مواد را به خود اختصاص می‌دهند) عمدتاً براساس واکنش‌هایی که در جریان مهبانگ رخ داد، توجیه نمود. این خود یک حمایت نظری برای نظریه مهبانگ به حساب می‌آمد، هرچند که حضور عناصر سنگین‌تر از هلیوم را توضیح نمی‌داد. در این مقاله، هیچ برآوردی از شدت امروزی زمینه ریزموج کیهانی به میان نیامده بود؛ اما اندکی بعد، دانشجویان گیماو، رلف آلفر و روبرت هرمن<sup>۷</sup> این‌طور پیش‌بینی کردند که پس از میلیاردها سال، پس‌تاب مهبانگ سرد شده است و هم‌اکنون جهان را با تابشی که دمای مؤثر آن پنج درجه بالای صفر مطلق می‌باشد پرکرده است. از آن تاریخ، نام آلفر و هرمن را به صورت گسترده نادیده گرفته‌اند، که البته تا حدی غیرمنصفانه است. پیش‌بینی آن‌ها برای ۲۰ سال به فراموشی سپرده شد. آن‌ها حتی به اشتباه فکر کردند که فناوری آن زمان قادر نبود چنین تابش ضعیفی را شناسایی کند.

البته به طعنه باید گفت که دمای مؤثر جهان را تا آن زمان اندازه‌گیری کرده بودند، اما این دما در یک مجله شیمی منتشر شده بود، از این‌رو تا سال‌ها بعد مورد اطلاع همگانی قرار نگرفت. رادیکال CN می‌تواند در فضا و در نتیجه تفکیک نوری HCN در ابرهای متراکم مولکولی وجود داشته باشد. این رادیکال نخستین بار در سال ۱۹۴۱ به وسیله مک کلار<sup>۸</sup> کشف شد. وی برای این کشف از یک طیف‌نگار کوده<sup>۹</sup> که بر تلسکوپ ۱۰۰ اینچی هوکر در کوه ویلسون نصب شده بود استفاده کرد.



شکل ۲۲-۱: آرنو پنزیاس و روبرت ویلسون در آنتن هولمدل.  
آن‌ها با این آنتن زمینه ریزموج کیهانی را کشف کردند.

رادیو کال CN دارای ترازهای ارتعاشی چرخشی برانگیخته است و مک کلار ترازوی را مشاهده کرد که متناظر با یک دمای مؤثر  $2/3$  درجه بالای صفر مطلق بود. از این مشاهده چنین برمی‌آمد که CN در یک حمام تابش با این دمای مؤثر قرار دارد - نخستین مشاهده زمینه ریزموج کیهانی! ریچارد دیک یک پیشتاز در میدان نجوم رادیویی بود و دریافت که این تابش، که حالا عمدتاً در بخش ریزموج طیف قرار دارد، باید قابل شناسایی باشد. او دو فیزیکدان جوان را به نام‌های دیوید ویلکینسون و پتر رول<sup>۱۰</sup> به کار گرفت تا یک دریافت کننده و آشکارساز بوقی شکل را بسازند و به جستجوی آنچه که آن را «آذرگوی نخستین» نامیدند بپردازند. آن‌ها کارشان را در بهار ۱۹۶۴ آغاز کردند.

## ۲-۲۲ کشف ناخواسته زمینه ریزموج کیهانی

در اینجای داستان به سراغ «آزمایشگاه‌های تلفن بل<sup>۱۱</sup>» می‌رویم، جایی که دو ستاره‌شناس رادیویی، آرنو پنزیاس و روبرت ویلسون، فرصت استفاده از تلسکوپ (شکل ۲۲-۱) و دریافت کننده‌ای را پیدا کرده بودند که پیش از آن برای نخستین آزمایش‌های ارتباط ماهواره‌ای غیرفعال<sup>۱۲</sup> مورد استفاده قرار می‌گرفت (با استفاده از یک بالون بزرگ که با آلومینیوم پوشیده شده

بود، موسوم به اکو). این دریافت کننده، که در زمان خود یکی از بهترین‌ها در جهان به حساب می‌آمد، به گونه‌ای طراحی شده بود که ورود هرگونه نوفه مزاحم را به درون تلسکوپ بوقی شکل به حداقل می‌رساند. آن‌ها به کار با تلسکوپ پرداختند و دریافتند که نوفه پس‌زمینه‌ای که تولید می‌شد بیش از حد انتظار است. احتمال نخست آن بود که این نوفه ناشی از کبوترانی باشد که درون آنتن لانه کرده بودند - در دمای حدود  $290\text{K}$ ، کبوتران نوفه رادیویی تابش می‌کردند - لذا یک تله کبوتر خریدند<sup>۱۳</sup> تا با آن کبوترها را بگیرند. آن‌ها کبوترها را مایل‌ها دورترها می‌کردند، اما کبوترها دوباره به محل اولیه بازمی‌گشتند تا جایی که ناچار شدند با کمک یک کارشناس محلی کبوتر، آن‌ها را دور کنند. در مدت زندگی درون آنتن، کبوترها بیشتر آن را با فضله خود پوشانده بودند. البته پنزیاس و ویلسون در مقاله‌ی ارسال‌ی به مجله‌ی *Science* از آن به «ماده سفید عایق» یاد کردند! این فضولات نیز پاک شد، اما درحالی که هم کبوتران و هم فضولات آن‌ها برطرف شده بود، تغییر اساسی به وجود نیامد. به هر سو که تلسکوپ را می‌چرخاندند، نوفه اضافی ثابت بود - از تمام بخش‌های آسمان به یک اندازه می‌رسید.

زمانی که مشکل به یک ستاره‌شناس رادیویی دیگر به نام برنی برک<sup>۱۴</sup> گفته شد، او پیشنهاد کرد که آن‌ها با روبرت دیک در دانشگاه پرینستون تماس بگیرند. همان‌طور که پیش‌از این گفتیم، دیک در نظریه‌ای مستقلاً اعلام کرده بود که جهان باید از تابش ناشی از مهبانگ پر شده باشد و دانشجوینش در حال ساخت آنتنی بوقی شکل در بالای بخش فیزیک بودند تا بتوانند آن را شناسایی کنند. با اطلاع از مشاهدات پنزیاس و ویلسون، دیک بلافاصله متوجه شد که او و گروهش عقب افتاده‌اند. او به آن دو گفت که نوفه اضافی ناشی از درون آنتن یا گیرنده نیست، بلکه مشاهدات آن‌ها دقیقاً با پیش‌بینی‌هایی که جهان را پراز تابش به‌جامانده از مهبانگ می‌دانست، موافقت دارد. دیک به زودی توانست نتیجه کار آن‌ها را تأیید کند و شاید کمی غیرمنصفانه بود که سهمی در جایزه نوبل که به پنزیاس و ویلسون اهدا شد نداشت.

## ۲۲-۳ آنچه به زمینه ریزموج کیهانی انجامید؛ باور امروزی ما

براین باوریم که جهان در یک انفجار ترمی آغاز شد، انفجاری که توانست حجمی کوچک‌تر از یک پروتون از فضا را، شاید در مدتی کمتر از  $10^{-33}$  تا  $10^{-60}$  برابر منبسط کند و به اندازه‌ای برساند



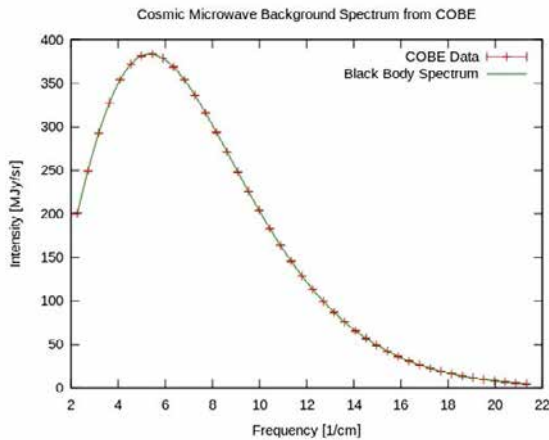
که قطر آن از مرتبه یک متر بود. این فرایند مقدار زیادی انرژی آزاد کرد. نیمی از انرژی پتانسیل گرانشی که از این دوره تورمی پدید آمد به انرژی جنبشی تبدیل شد، و تعداد نسبتاً مساوی ذره و پادذره از آن به وجود آمد؛ اما ذرات ماده به مقدار بسیار اندکی بیشتر بود (تقریباً یک در چند میلیارد). تمام پادذرات با ذره متناظر خود نابود شده، حمای از تابش را به وجود آوردند (زمینه ریزموج کیهانی) درحالی که تعدادی ذره در آن باقی مانده بود.

الکترون های آزاد نور را پخش می کردند - چیزی شبیه به قطرات آب که نور را متفرق می نمایند- و از این رو، مانند مه، جهان مات بود. با انبساط جهان و سرد شدن آن، زمانی رسید که انرژی فوتون ها نوعاً به اندازه ای کم شد که اتم ها توانستند تشکیل شوند (حدود ۳۸۰,۰۰۰ سال پس از مهبانگ). دیگر هیچ الکترون آزادی وجود نداشت که تابش را متفرق کند، لذا جهان شفاف شد. این عقب ترین نقطه زمانی است که می توانیم ببینیم. در این زمان دمای جهان حدود ۳۰۰۰ کلوین بود. از آنجا که در آن هنگام تابش و ماده در تعادل گرمایی بودند، تابش از یک طیف بسیار خوش تعریف برخوردار بود - معروف به طیف جسم سیاه - و قله انرژی در بخش زرد طیف مرئی قرار داشت. از آن زمان، جهان حدود ۱۰۰۰ برابر منبسط شده است. طول موج فوتون هایی که زمینه ریزموج کیهانی را می ساختند نیز ۱۰۰۰ بار بزرگ تر شده است و از این رو هم اکنون در بخشی از طیف متناظر با طول موج کوتاه رادیویی و فرسرخ دور قرار دارد - البته همچنان دارای یک طیف جسم سیاه است. دمای مؤثر جسم سیاه این تابش نیز دقیقاً ۱۰۰۰ بار کاهش یافته است، بنابراین حالا حدود ۳ کلوین می باشد.

این پیش بینی با دمای میانگینی که امروزه از زمینه ریزموج کیهانی اندازه گیری شده است، یعنی ۲/۷۲۵ کلوین، سازگار است. با وجود این، ۳۰ سال طول کشید تا اینکه در سال ۱۹۹۲ فضاپیمای COBE توانست با اندازه گیری های خود از زمینه ریزموج کیهانی نشان دهد که طیف آن دقیقاً همان طیف جسم سیاه است که از سناریوی مهبانگ نتیجه می گردد. از آن تاریخ، انکار انکار این حقیقت که یک «مهبانگ داغ»<sup>۱۵</sup> وجود داشته بسیار مشکل شده است.

## ۲۲-۴ کاوشگر زمینه کیهانی

کاوشگر زمینه کیهانی<sup>۱۶</sup> (COBE) ماهواره ای بود با هدف تحقیق پیرامون تابش زمینه ریزموج



شکل ۲۲-۲: اندازه‌گیری طیف زمینه ریزموج کیهانی به وسیله فضایی COBE.

کیهانی. در ابتدا قرار بود این ماهواره را مأموریت فضایی شاتل در سال ۱۹۸۸ از پایگاه نیروی هوایی وندنبرگ<sup>۱۷</sup> به فضا ببرد، اما انفجار چلنجر این برنامه را به تأخیر انداخت و در نهایت، با یک طراحی مجدد برای کاهش چشمگیر وزن آن، COBE در ۱۸ نوامبر ۱۹۸۹ با یک موشک دلتا<sup>۱۸</sup> در مدار خورشیدآهنگ<sup>۱۹</sup> قرار داده شد.

چندان طولی نکشید که نخستین نتیجه مهم آن به دست آمد. ماهواره COBE، با استفاده از «طیف‌سنج مطلق فرسرخ دور<sup>۲۰</sup>» - طیف‌سنجی برای اندازه‌گیری طیف زمینه ریزموج کیهانی - و تنها با ۹ دقیقه داده بارزش، توانست نمودار یک طیف را رسم کند (شکل ۲۲-۲). میله‌های خطا (تلورانس خطا) در نقاط داده روی این نمودار، درون منحنی نظری جسم سیاهی است که اگر زمینه ریزموج کیهانی واقعاً تابش ناشی از زمانی باشد که تابش و ماده در تعادل گرمایی بودند، باید دیده می‌شد. [ داده‌های ماهواره COBE با نمودار جسم سیاه سازگار بود. (مترجم) ]

دومین دستاورد مهم از تابش‌سنج ریزموج تفاضلی<sup>۲۱</sup>، یک وسیله ریزموج که نقشه نوسانات (یا ناهمسانگردی‌ها) را در زمینه ریزموج کیهانی رسم می‌کرد، به دست آمد. نتایجی که از پایگاه‌های زمینی و با توجه به دقت محدود آن‌ها به دست آمده بود یک دمای یکنواخت را برای زمینه ریزموج کیهانی نشان می‌داد. اما با توجه به حساسیت بیشتر COBE به زودی مشخص شد که دما در سراسر آسمان ثابت نیست؛ اندکی در راستای صورت فلکی اسد گرم‌تر، و در راستای مخالف آن، به

سمت صورت فلکی دلو<sup>۲۲</sup>، سردتر بود. دما در گرم‌ترین منطقه  $3/5 \text{ mK}$  بالاتر از میانگین، و در سردترین منطقه  $3/5 \text{ mK}$  زیر دمای میانگین است.

مشاهداتی از این دست پیش‌بینی شده بود؛ چراکه منظومه شمسی در میان فضا، با گردش به دور مرکز کهکشان، در حال حرکت است. از این رو انرژی فوتون‌هایی که از این مسیر (راستای حرکت) می‌رسند تقویت شده، این فوتون‌ها داغ‌تر به نظر می‌رسند. اما آن‌هایی که از پشت می‌رسند انرژی از دست داده، سردتر به نظر می‌آیند (پدیده دوپلر). اما در کمال تعجب، راستای حرکتی که از این مشاهدات تعیین شد هم‌سو با حرکت مداری منظومه شمسی اطراف کهکشان نبود، بلکه تقریباً در جهت مخالف قرار داشت. از این مشاهدات چنین برمی‌آید که کهکشان ما و تمام گروه محلی کهکشان‌ها با سرعتی بیش از ۲ میلیون مایل در ساعت ( $600 \text{ km/s}$  یا حدود  $1/5$  سرعت نور) نسبت به کل جهان در حرکت هستند. اما چرا؟ به نظر می‌رسد دلیل این حرکت، خوشه‌بندی و ابرخوشه‌بندی کهکشان‌ها در مجاورت ما (در محدوده ۱۰۰ میلیون سال نوری) است، به طوری که در مجموع یک کشش گرانشی به سمت صورت فلکی اسد وجود دارد.

اما یک نکته جالب؛ مشاهدات تابش‌سنج ریزموج نفاذی در ماهواره COBE به وضوح تغییراتی برابر با  $30 \text{ km/s}$  را در سرعت مشاهده‌شده نشان می‌دهد - یک اثر پنج درصدی - که ناشی از حرکت زمین به دور خورشید است - یک گواه خوب که گالیله درست می‌گفت!

### چهره خدا

برجسته‌ترین مشاهده‌ای که COBE انجام داد - و بحث‌انگیزترین آن‌ها - زمانی بود که ناسا و پرکلی اعلان نمودند که COBE افت‌وخیزهای مورد انتظار را در زمینه ریزموج کیهانی کشف کرده است. برخلاف توصیه برخی از اعضای گروه، تصمیم بر آن شد که در گزارش مطبوعاتی یک تصویر نیز ارائه گردد (تصویری که حالا شهرت یافته است). این تصویر به درستی افت‌وخیزها را در دما نشان می‌داد - اما از کجا معلوم که این افت‌وخیزها به زمینه ریزموج کیهانی مربوط بود؟ اطلاعاتی که به همراه تصویر ارائه شد تلاش می‌کرد که موضوع را روشن کند، اما کارآمد نبود و مطبوعات به صورت گسترده آن را نادیده گرفتند. قسمت عمده افت‌وخیزها را نوفه به وجود آورده بود و تنها حدود ۱۰٪ سیگنال به زمینه ریزموج کیهانی نسبت داده شد. اما در این میان، نکته آن بود که

افت‌وخیزها اندکی بیش از چیزی بود که از نوفه انتظار می‌رفت، و از این رو به صورت آماری نشان می‌داد که افت‌وخیزهایی در پس آن قرار دارد.

تصور کنید که مقداری ماسه را به صورت تصادفی روی یک صفحه تخت‌ای به مساحت یک مترمربع می‌پاشید. بدیهی است که سطح صفحه را توده‌هایی از ماسه فرامی‌گرفت که در برخی نقاط مرتفع‌تر بود و شما می‌توانستید آن‌ها را اندازه بگیرید - فرض کنید ارتفاع آن‌ها حدود ۵ سانتیمتر بود. حال همان ماسه را بر سطحی بپاشید که ناهموار است و ارتفاع برخی از ناهمواری‌ها به ۱ سانتیمتر می‌رسد. در این صورت انتظار دارید که قله مرتفع‌ترین توده‌ها کمی بلندتر باشند، شاید به جای ۵ سانتیمتر ۶ سانتیمتر. بدین ترتیب می‌توانید این‌گونه استنباط کنید که صفحه زیر ماسه هموار نبوده است و حتی میزان ناهمواری آن را برآورد نمایید. این دقیقاً روشی است که گروه COBE توانست حضور افت‌وخیزهای زمینه را استنباط نماید. جرج اسموت، زمانی که شخصی از حاضرین در کنفرانس مطبوعاتی از وی درباره اهمیت این نتیجه پرسید، پاسخ داد: «خوب، اگر شما شخص مذهبی باشید، این شبیه به دیدن چهره خداست.» طبیعی بود که این پاسخ، علاقه شدید مطبوعات را به دنبال داشت!

در سال ۲۰۰۶، جان مَدِر و جرج اسموت<sup>۳۳</sup> جایزه نوبل فیزیک را برای این کار دریافت کردند. کمیته جایزه نوبل، این کار را آغاز دوره کیهان‌شناسی دقیق اعلام کرد.

## ۲۲-۵ دلیل افت‌وخیزها در زمینه ریزموج کیهانی

چرا این افت‌وخیزها وجود دارد؟ برای پاسخ به این سؤال باید کمی با ماده تاریک آشنا باشیم، موضوعی که به طور کامل در فصل ۲۱ بحث شد. گرچه هنوز ماده تاریک مستقیماً شناسایی نشده است، حضور آن از بسیاری مشاهدات گوناگون قابل برداشت می‌باشد.

همان‌طور که پیش‌ازین گفتیم، برای مدتی حدود ۳۸۰/۰۰۰ سال پس از مه‌بانگ، ماده و تابش در حال برهم‌کنش بودند؛ و از آنجایی که انرژی فوتون‌ها به حدی بود که اتم‌ها را یونیده می‌کرد، پلاسمایی از هسته‌ها و الکترون‌های آزاد به وجود آمده بود. این وضعیت دو نتیجه را به دنبال داشت:

(۱) تابش و مواد در تعادل گرمایی بودند، از این رو تابش دارای طیف جسم سیاه بود،

چیزی که مشاهدات COBE آن را ثابت کرد.

(۲) پلاسمای متشکل از هسته و الکترون بسیار همگن بود، چراکه فوتون‌ها مانند یک هم‌زن ظریف، پلاسما را به هم می‌زدند.

جا دارد بار دیگر نکته‌ای از بحث فصل گذشته درباره ماده تاریک را که به نتیجه دوم مربوط است تکرار کنیم. زمانی که دما تا آنجا سقوط کند که اتم‌ها بتوانند تشکیل شوند، ماده می‌تواند تحت گرانش شروع به اجتماع در توده‌هایی نموده، ستارگان و کهکشان‌ها را به وجود آورد. شبیه‌سازی‌ها نشان داده‌اند که با توجه به یکنواختی در توزیع گاز اولیه، حدود ۸ تا ۱۰ میلیارد سال وقت لازم است تا این‌که گاز به حدی چگال شود که این مرحله رخ دهد. اما می‌دانیم که کهکشان‌ها حدود یک میلیارد سال پس از مه‌بانگ به وجود آمدند. چیزی باید فرآیند را کمک کرده باشد. ایمان داریم که آن چیز، ماده تاریک غیرباریونی بود. از آنجاکه این ماده با تابش برهم‌کنشی نداشت، بلافاصله پس از مه‌بانگ شروع به تشکیل توده‌هایی تحت گرانش نمود. از این‌رو، زمانی که ماده معمولی توانست خود را از فوتون‌ها خلاص کند، چاه‌های گرانشی در محل تمرکز ماده تاریک وجود داشت. ماده معمولی می‌توانست به سرعت درون این چاه‌ها سقوط کرده، چگالی خود را افزایش دهد؛ بدین ترتیب فرایند تشکیل کهکشان شتاب می‌گرفت.

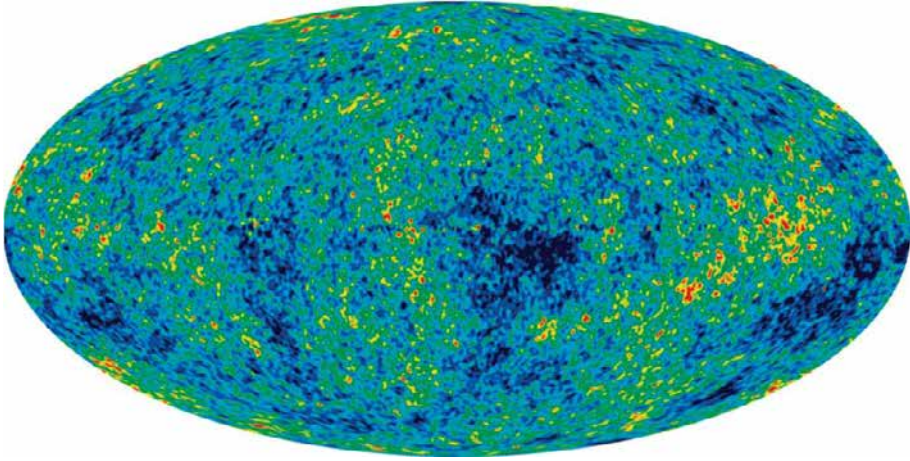
توده‌های متمرکز ماده تاریک که در زمان پیدایش زمینه ریزموج کیهانی وجود داشت، تأثیری مشاهداتی بر آن گذاشته است. حقیقت این است که چنانچه تابش مجبور به صعود از چاه پتانسیل گرانشی باشد، باید نوعی قرمزگرایی موسوم به قرمزگرایی گرانشی را تحمل کند. بدین ترتیب فوتون‌هایی از زمینه ریزموج کیهانی که نواحی متراکم‌تر ماده تاریک را ترک می‌کردند، نسبت به دیگر فوتون‌ها طول موج بلندتری داشتند. همین سبب می‌شود که دمای مؤثر جسم سیاه، مربوط به فوتون‌هایی که از نواحی چگال‌تر ماده تاریک سرچشمه گرفته‌اند، از دمای دیگر فوتون‌ها کمتر باشد و بدین ترتیب افت و خیزهایی در دمای مشاهده شده به وجود می‌آید. از آنجاکه این‌گونه رصدها می‌تواند اطلاعاتی پیرامون جهان، آن‌هم مربوط به تنها حدود ۳۸۰,۰۰۰ سال پس از پیدایش آن، در اختیار ما قرار دهد، تعجب‌آور نیست که تا این حد برای کیهان‌شناسان حائز اهمیت است.

## ۲۲-۶ کاوشگر ناهمسانگردی ریزموج ویلکینسون و فضاییمای پلانک

مشاهدات فضاییمای COBE برای نخستین بار نشان داد که زمینه ریزموج کیهانی دارای یک دمای کاملاً یکنواخت نیست. از آن زمان، مشاهدات کاوشگر ناهمسانگردی ریزموج ویلکینسون و فضاییمای پلانک<sup>۲۴</sup>، و همچنین آن‌هایی که از قله کوه‌ها یا به وسیله بالون‌ها انجام شده است، ما را قادر ساخته تا نقشه این به اصطلاح «شکنج‌ها»<sup>۲۵</sup> را در زمینه ریزموج کیهانی رسم کنیم.

کاوشگر ناهمسانگردی ریزموج ویلکینسون (WMAP) در ابتدا به‌عنوان کاوشگر ناهمسانگردی ریزموج (MAP) شناخته می‌شد، اما به دنبال مرگ یکی از پیشگامان مشاهدات زمینه ریزموج کیهانی، دیوید ویلکینسون<sup>۲۶</sup>، که متأسفانه به دلیل سرطان و در زمانی که داده‌های وی در حال تحلیل بود از دنیا رفت، این نام برای آن انتخاب شد. فضاییمای WMAP در ۳۰ ژوئن ۲۰۰۱ به فضا پرتاب شد و به نقطه لاگرانژی L<sub>۲</sub> زمین و خورشید سفر کرده، در اول اکتبر ۲۰۰۱ به آنجا رسید. این نقطه در فاصله ۱/۵ میلیون کیلومتری از زمین، مستقیماً به سمت دور از خورشید قرار گرفته است. در کل، با دورتر شدن از خورشید، سیاره یا فضاییما با سرعت کمتری در مدار خود به دور خورشید حرکت می‌کند، اما اگر در خط واصل خورشید و زمین باشد، گرانش اضافی زمین به گرانش خورشید اضافه می‌شود و ماهواره سریع‌تر خورشید را دور می‌زند. بنابراین، در یک فاصله مناسب، می‌توان کاری کرد که ماهواره در هر سال زمینی یک بار به دور خورشید بچرخد و از این‌رو دوشادوش زمین خورشید را دور بزند. این موقعیت را L<sub>۲</sub> می‌نامند. در این موقعیت، با توجه به اینکه فضاییما در حال رصد نیمه دور از خورشید آسمان است، می‌تواند در مدت شش ماه نقشه‌ای را از آسمان تهیه کند. فضاییمای WMAP نخستین کاوش تمام آسمان خود را در آوریل ۲۰۰۲ تکمیل نمود.

مشکل بنیادی در تولید یک نقشه تمام آسمان، آلودگی ناشی از گسیل پیش‌زمینه به وسیله کهکشان خودمان و دیگر منابع رادیویی دورتر است. برای فائق آمدن بر این مشکل، فضاییمای WMAP در پنج بسامد به رصد پرداخت تا بتواند این آلودگی‌ها را تشخیص داده، از نقشه کم کند. تابش سنکروترون ناشی از الکترون‌هایی که به صورت مارپیچ اطراف میدان مغناطیسی کهکشان می‌چرخند، در بسامدهای پایین فراگیر است؛ در حالی که در بسامدهای بالاتر تابش غالب به گسیل ناشی از غبار تعلق دارد. سهم هر یک از این گسیل‌ها در بسامدهای پنج‌گانه مقدار متفاوتی است و



شکل ۲۲-۳: نقشه تمام آسمان شکنج‌های زمینه ریزموج کیهانی که به وسیله WMAP در ۲۰۰۸ تهیه شد.

بدین ترتیب می‌توان آن‌ها را شناسایی نمود و کم کرد. نتیجه کار نقشه‌ای است بدون هرگونه سرنخی از اینکه این نقشه درون کهکشان راه‌شیری تهیه شده است! (برای خود من، این کاملاً شگفت‌آور است.)

داده‌های سه ساله WMAP به‌تنهایی نشان داد که جهان باید دربرگیرنده ماده تاریک باشد، و اینکه سن جهان  $13.7$  میلیارد سال است. در داده پنج‌ساله شواهد جدیدی برای زمینه نوترینوی کیهانی<sup>۲۷</sup> وجود داشت، و نشان داد که بیش از نیم میلیارد سال طول کشید تا ستارگان نخستین، جهان را بازیونش<sup>۲۸</sup> نمودند. این داده‌ها، قیده‌های جدیدی را نیز برای تورم کیهانی فراهم آورد. فضای پیمای WMAP نشان داد که در زمانی حدود  $400,000$  سال پس از مه‌بانگ،  $10\%$  جهان را نوترینو،  $12\%$  اتم،  $15\%$  فوتون و  $63\%$  ماده تاریک تشکیل می‌داد. سهم انرژی تاریک در آن زمان ناچیز بود.

داده‌های هفت ساله WMAP در ۲۶ ژانویه ۲۰۱۰ منتشر شد. براساس این اطلاعات، سن جهان  $13.75 \pm 0.11$  میلیارد سال است. دانشمندان متوجه مقداری عدم تقارن نیز در این اطلاعات شدند که در زیر مورد بحث قرار خواهد گرفت. فضای پیمای WMAP تا سپتامبر ۲۰۱۰ به کار داده‌برداری خود ادامه داد. شکل ۲۲-۳ افت‌وخیزهای زمینه ریزموج کیهانی را براساس مشاهدات فضای پیمای WMAP نشان می‌دهد.

## ۲۲-۷ مشاهدات زمینی و با استفاده از بالون

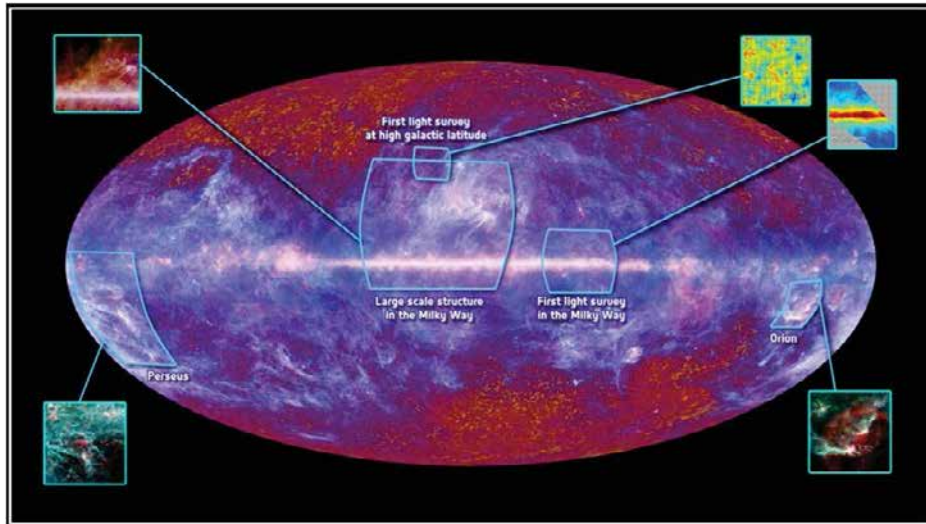
بخار آب تا حد زیادی مشاهدات زمینه ریزموج کیهانی را مختل می‌کند. از این رو پروازهای بالون، از قبیل بومرنگ و ماکزیم<sup>۲۹</sup>، و همچنین آرایه‌هایی از آنتن‌های زمینی، همچون آرایه بسیار کوچک<sup>۳۰</sup> و تصویربردار زمینه کیهانی<sup>۳۱</sup>، واقع در مناطق مرتفع و خشک برای مشاهده نواحی نسبتاً کوچک آسمان مورد استفاده قرار گرفته است. البته توان تفکیک در آن‌ها بالاتر از چیزی است که در ابتدا به وسیله تصویرگر ماهواره‌ای تمام آسمان COBE و WMAP به دست می‌آمد. بدین ترتیب آن‌ها تا حد زیادی به تعمیم طیف توانی، که در ادامه به آن می‌پردازیم، تا مقیاس‌های زاویه‌ای کوچک‌تر کمک نموده‌اند.

## ۲۲-۸ مأموریت پلانک

پلانک یک رصدخانه فضایی بود که به وسیله آژانس فضایی اروپا ساخته شد تا به تکمیل و بهبود مشاهداتی بپردازد که فضاپیمای ناسا، WMAP، از زمینه ریزموج کیهانی انجام می‌داد. پلانک در ۱۴ مه ۲۰۰۹ به مدار پرتاب شد و مانند WMAP به سوی همان نقطه L<sub>2</sub> حرکت کرد. سپس در ۳ ژوئیه در مدار نهایی خود که به شکل عدد ۸ انگلیسی است (8) جای داده شد<sup>۳۲</sup>. سامانه‌های دریافت‌کننده بسامد بالا تا این زمان به دمای عملیاتی خود، تنها یک دهم درجه بالاتر از صفر مطلق، رسیده بودند. پلانک قادر بود مشاهدات خود را در مقیاس‌های زاویه‌ای کوچک‌تر از WMAP انجام دهد و حساسیتی به مراتب بالاتر داشت. به علاوه، مشاهدات را به جای پنج طول موج (مربوط به WMAP) در نه طول موج انجام می‌داد؛ چیزی که به حذف بیشتر آلودگی پیش‌زمینه از داده‌های زمینه ریزموج کیهانی کمک می‌کند. دو سامانه از سامانه‌های دریافت‌کننده که در رصدخانه جدرل بانک طراحی و ساخته شد، حساس‌ترین دریافت‌کننده‌هایی هستند که تاکنون در طول موج مربوطه‌شان ساخته شده است.

گرچه هدف اصلی از این مأموریت مشاهده شدت کل و قطبش در زمینه ریزموج کیهانی نخستین بود، داده‌های آن، با استفاده از اثر سونیاف-زلدوویچ<sup>۳۳</sup>، فهرستی از خوشه‌های کهکشانی را به وجود خواهد آورد، و اثرات عدسی گرانشی را بر زمینه ریزموج کیهانی رصد خواهد کرد. به منظور





شکل ۲۲-۴: نقشه تمام آسمان پلانک.

حذف تأثیرهای راه شیری از تصاویر خام، پلانک مشاهدات مفصلی را از محیط بین ستاره‌ای محلی، گسیل سنکروترون کهکشانی، و میدان مغناطیسی انجام داد.

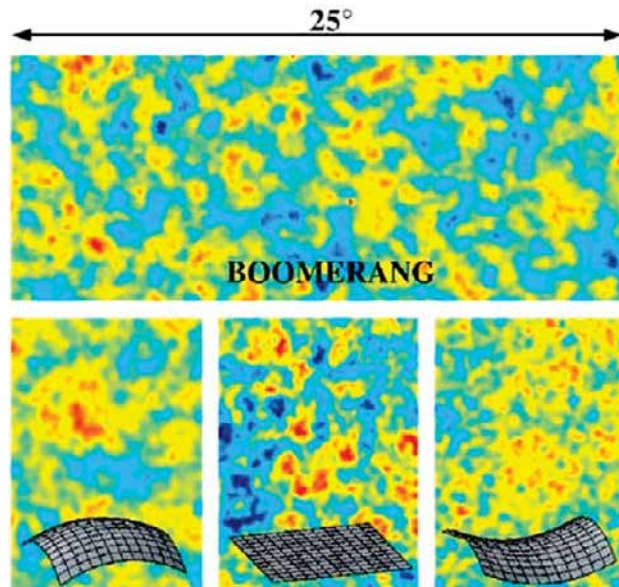
پلانک نخستین کاوش تمام آسمان خود را در ۱۳ اوت ۲۰۰۹ آغاز کرد، و دومین کاوش در ۱۴ فوریه ۲۰۱۰ در پی آن آمد. در اواسط ژوئن ۲۰۱۰ پوشش ۱۰۰٪ آسمان محقق شد. نخستین نقشه‌های تمام آسمان زمینه ریزموج کیهانی در بهار ۲۰۱۳ منتشر گردید (شکل ۲۲-۴).

## ۲۲-۹ نتایج پلانک

### مشاهدات زمینه ریزموج کیهانی چه چیزی درباره جهان به ما گفته‌اند؟

#### ۱ انحنای فضا، و با استفاده از آن، چگالی جهان

فوتون‌هایی که زمینه ریزموج کیهانی را می‌سازند میلیاردها سال است که پهنه فضا را پیموده‌اند و از این رو تحت تأثیر انحنای فضا قرار گرفته‌اند. این انحنای تابعی است از مقدار ماده (و انرژی) در فضا، و لذا تابعی از چگالی آن می‌باشد. اگر چگالی بالاتر از یک مقدار بحرانی باشد، انحنای فضا مثبت خواهد بود (در دو بعد، همچون روی سطح یک کره). اگر چگالی بحرانی باشد، هندسه اقلیدسی برقرار است و گفته می‌شوند که فضا تخت است. اگر چگالی کمتر از این باشد، انحنای فضا منفی

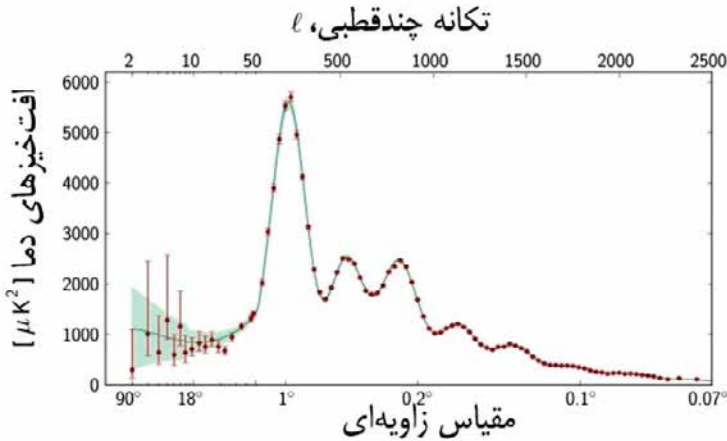


شکل ۲۲-۵: مشاهدات بومرنگ از زمینه ریزموج کیهانی (بالا). در پایین شبیه‌سازی زمینه ریزموج کیهانی در فضایی با انحنای مثبت (چپ)، تخت (وسط) و با انحنای منفی (راست) نشان داده شده است.

خواهد بود (در دو بعد، همچون روی سطح زمین اسب).

مقیاس زاویه‌ای مورد انتظار در افت‌وخیزهای زمینه ریزموج کیهانی را تئوری در اختیار ما قرار می‌دهد. اگر از میان یک فضای تخت آن را مشاهده می‌کردیم، دقیقاً این مقیاس زاویه‌ای را می‌دیدیم. اما اگر از میان فضایی با انحنای مثبت - که نسبتاً مانند عدسی کوژ عمل می‌کند - آن را رصد می‌کردیم، الگویی بزرگ‌تر از پیش‌بینی مشاهده می‌نمودیم، و اگر از میان فضایی با انحنای منفی مشاهده می‌کردیم - که نسبتاً مانند عدسی کاو عمل می‌کند - الگویی کوچک‌تر از پیش‌بینی می‌دیدیم. در یک فضا با انحنای مثبت، تخت، یا منفی، می‌توان الگوی مورد انتظار افت‌وخیزها را شبیه‌سازی کرد و آن‌ها را با مشاهدات مقایسه نمود.

در بخش بالایی شکل ۲۲-۵ افت‌وخیزهای مشاهده‌شده به وسیله آزمایش بالون بومرنگ نشان داده شده است. در بخش پایینی، شبیه‌سازی‌هایی را می‌بینید که مربوط است به فضای تخت یا فضایی با انحنای مثبت و یا منفی. به خوبی معلوم است که الگوی تخت بیشترین شباهت را با آنچه مشاهده شده است دارد.



شکل ۲۲-۶: توان در افت و خیزهای زمینه ریزموج کیهانی

به صورت تابعی از مقیاس زاویه‌ای بر اساس داده‌های پلانک.

با تحلیل مقدار نسبی ساختاری که در مقیاس‌های مختلف زاویه‌ای دیده می‌شود می‌توان این مشاهدات را بر مبنای کمی تری قرار داد. با نگاه به «حباب‌ها» در داده بومرنگ، به نظر می‌رسد مقدار قابل توجهی ساختار در اندازه‌های مقیاسی از مرتبه ۱ درجه دیده می‌شود؛ چیزی که به وسیله موضع نخستین قله در نمودار مقیاس زاویه‌ای پلانک (شکل ۲۲-۶) تأیید می‌گردد.

در حقیقت، قله نمودار تقریباً در  $0.8^\circ$  واقع می‌شود، که دقیقاً همان چیزی است که از فضای تخت توقع داریم. نتایج پلانک و WMAP نشان می‌دهد که فضا با دقت ۱٪ تخت می‌باشد. این نتیجه مهم به یک مقدار چگالی برای جهان، برابر با  $9/9 \times 10^{-30} \text{ g/cm}^3$ ، منجر می‌شود، که معادل با تنها ۵/۹ پروتون در هر مترمکعب است. این مقدار برحسب جرم است، اما هم‌اکنون می‌دانیم که بخش اعظم آن به شکل انرژی است.

## ۲ مقدار نسبی اجزای گوناگون در جهان

در ادامه، مقادیری که از تحلیل داده‌های پلانک به دست می‌آید ابتدا آورده شده است، چراکه انتظار داریم این داده‌ها از آنچه از WMAP و دیگر آزمایش‌ها به دست می‌آید دقیق‌تر باشد. البته داده‌های اخیر در داخل پیرانتز آورده می‌شود، و برای من کمی تعجب‌آور است که مقادیر تا این حد تغییر کرده است.

**ماده معمولی ۴/۹٪ (۴/۵٪)** به این معنی که حدود ۹۵٪ از چگالی انرژی در جهان به شکلی

است که هرگز نمی‌توان آن را مستقیماً در آزمایشگاه شناسایی کرد!

**ماده تاریک ۲۶/۸٪ (۲۲/۷٪)** بخش عمده این، «ماده تاریک سرد»<sup>۳۴</sup> است (منظور از سرد

ذراتی است که نسبتاً آهسته حرکت می‌کنند). احتمالاً ماده تاریک از یک یا چند گونه از ذرات زیراتمی ساخته شده است که بسیار ضعیف با ماده معمولی برهم‌کنش دارند. همان‌طور که پیش‌از این دیدیم، ماده تاریک یک نقش مهم در تشکیل کهکشان‌ها ایفا می‌کند و اثرات گرانشی برجسته‌ای دارد. فیزیکدانان ذرات، نامزدهای قابل‌تأمل بسیاری را برای ماده تاریک اعلام نموده‌اند، و شاید آزمایش‌ها در آستانه شناسایی آن‌ها قرار داشته باشد، موضوعی که در فصل قبل شرح داده شد. این ۲۷٪ شامل بخش کوچکی از «ماده تاریک داغ»<sup>۳۵</sup> نیز می‌شود (منظور از داغ، ذرات نور مانند است؛ از قبیل نوترینو که با سرعت‌هایی نزدیک به نور حرکت می‌کنند). نوترینوها قطعاً سهم کوچکی در کل ماده تاریک دارند، اما مقدار زیاد HDM از توده‌ای شدن اولیه گاز در جهان جلوگیری می‌کرد، چیزی که به تأخیر در ظهور ستارگان و کهکشان‌های نخستین منجر می‌شد. البته پلانک و WMAP به شواهدی دست یافته‌اند که نشان می‌دهد یک دریای نوترینوی کیهانی، به تعدادی که استدلال‌های دیگر آن را توجیه می‌کند، قطعاً وجود دارد.

**انرژی تاریک ۶۸/۳٪ (۷۲/۸٪)** در دهه ۱۹۹۰، مشاهده ابرنواخترها برای دنبال نمودن تاریخ

انبساط جهان مورد استفاده قرار می‌گرفت. این مشاهدات نشان می‌دادند که انبساط در حال سرعت گرفتن بود، و نه کند شدن. تنها اگر ۶۸٪ از چگالی انرژی در جهان به شکل انرژی تاریک باشد (که به صورت گرانشی یک اثر دفعی خواهد داشت)، هم تختی جهان و هم انبساط شتاب‌دار آن قابل توجیه خواهد بود.

### ۳ زمان و قرمزگرایی بازیونش

«قرمزگرایی بازیونش»<sup>۳۶</sup> مربوط به زمانی است که نخستین ستارگان تشکیل شدند، و نور فراابنفشی که به وسیله آن‌ها تولید شد توانست الکترون‌ها را از اتم‌های هیدروژن جدا کند و آن‌ها را یونیده نماید. این فرایند را «بازیونش» می‌نامند، زیرا قبلاً، زمانی که جهان داغ بود - تا حدود ۳۸۰,۰۰۰ سال پس از آغاز آن - هیدروژن یونیده شده بود. در آن زمان، هنگامی که اتم‌ها تشکیل شدند و سرد گردیدند، جهان وارد دوره‌ای شد که اصطلاحاً آن را «دوران تاریک»<sup>۳۷</sup> می‌نامند. این دوره تا زمانی

که جهان بار دیگر از نور ستارگان نخستین پر شد ادامه داشت. داده‌های WMAP نشان می‌داد که دوره بازیونش تقریباً ۴۰۰ میلیون سال پس از مه‌بانگ آغاز می‌شد و حدود ۵۰۰ میلیون سال ادامه داشت.

#### ۴ سن جهان

از داده‌های پلانک، سن جهان ۱۳/۸ میلیارد سال به دست می‌آید که اندکی بیش از چیزی است که WMAP نشان می‌داد، یعنی ۱۳/۷۵ میلیارد سال. از ترکیب داده‌های پلانک با WMAP و دیگر مقادیر تجربی، همچون اطلاعاتی که از عدسی گرانشی به دست آمد، مناسب‌ترین مقدار ۱۳/۷۹ میلیارد سال است.

#### ۵ ثابت هابل

مقداری که از پلانک برای ثابت هابل به دست می‌آید ۶۷ بود که از ترکیب آن با داده‌های دیگر، مقادیری تا حدود  $1 \pm 68$  را فراهم می‌آید. این مقادیر با نتیجه نهایی «پروژه کلیدی تلسکوپ فضایی هابل<sup>۳۸</sup>» که حدود ۷۲ است منطقاً سازگار است، ضمن اینکه از دقت بالاتری برخوردار می‌باشد. من بسیار خوشحالم که این نتیجه بسیار به خوبی موافق چیزی است که از رصد اختروش دوگانه‌ای که ستاره‌شناسان جُدِرل بانک آن را در اوایل دهه ۱۹۸۰ کشف کردند به دست آمد (مقداری که از این اختروش نتیجه شد  $13 \pm 67$  بود). در آن زمان بیشتر نتایج دیگر یا بسیار بالاتر بودند و یا بسیار پایین‌تر، و جای خوشبختی است که نتیجه ما (البته با میله‌های بزرگ خطا) به مقداری که هم‌اکنون مورد قبول است بسیار نزدیک می‌باشد.

#### ۲۲-۱۰ میراث پلانک

در ۱۹ اکتبر ۲۰۱۳، دانشمندان تجهیزات و سامانه‌های خنک‌کننده را در فضاپیما پلانک خاموش کردند، و بدین ترتیب پس از سپری کردن بیش از چهار سال نقشه‌برداری از زمینه ریزموج کیهانی، بخش عملیاتی آن به پایان رسید. یک روز بعد، نرم‌افزاری بارگذاری شد تا از روشن شدن احتمالی آن در آینده جلوگیری نماید، و فرستنده‌ای که داده‌های فضاپیما را به زمین ارسال می‌کرد هرگز نتواند تداخلی را در کاوشگرهای فضایی آینده وارد نماید. پیش‌ازین، فضاپیما طی مانوری از موقعیت L<sub>2</sub> خارج شده بود و تا ابد و در سکوت به دور خورشید خواهد چرخید.

اما فهرست‌ها و نقشه‌ها، و مقادیر فراوان اطلاعاتی که نیازمند تحلیل هستند، میراثی برای کیهان‌شناسان امروزی و نسل آینده خواهد بود. قله‌ها و دامنه‌ها در طیف زمینه ریزموج کیهانی حاوی اطلاعات بسیار مفصلی درباره پارامترهای اصلی کیهان‌شناختی‌ای است که پیش‌ازین مطرح شد. WMAP جزئیات پایه را نهاده‌اند کرد، سپس پلانک، نه تنها این تصویر را تأیید نمود، بلکه تا حد بسیار زیادی بر دقت آن افزود.

## ۱۱-۲۲ جهان مخصوص خود بسازید

گروه WMAP یک نرم‌افزار جالب را ارائه کرده است که می‌توانید آن را با جستجوی عبارت «WMAP CMB power spectrum analyzer» بیابید. این نرم‌افزار نشان می‌دهد با مقادیر متفاوت ماده تاریک و معمولی و مقدار نسبی ماده تاریک، طیف زمینه ریزموج کیهانی چگونه به نظر می‌رسد. مهم است که در ابتدا، مقدار ثابت هابل را حدود ۷۰، «قرمزگرایی بازیونش» را ۱۱ و «شاخص طیفی» را ۰/۹۵ قرار داد. شاخص طیفی، اندازه‌ای است برای مقادیر نسبی افت‌وخیزها در مقیاس‌های مختلف در اوایل و ابتدای جهان. آن طوری که می‌گویند، شما می‌توانید جهان مخصوص به خود بسازید و آنچه را پلانک و WMAP مشاهده می‌کردند ببینید!

## ۱۲-۲۲ تورم و امواج گرانشی

نظریه‌هایی که آغاز جهان را با یک مه‌بانگ می‌دانند و به تورم، که به طور وسیع اندازه آن را افزایش داد، می‌پردازند، اظهار می‌دارند که افت‌وخیزهای کوانتومی ریز که پیش از مرحله تورمی وجود داشتند، پس از تورم بسیار بسیار بزرگ‌تر شدند و به گسیل امواج گرانشی در میان فضا پرداختند. این امواج در هنگام عبور از میان فضا، آن را خم می‌کردند که بر اثر آن، نور اندکی قطبیده می‌شد. بدین ترتیب راستای قطبیده نور در جهان باستان از یک الگوی پیچشی برخوردار بود. اگر این پیش‌بینی صحیح باشد، باید همچنان بتوان نشان آن را در تابش ریزموجی که زمینه ریزموج کیهانی را می‌سازد دید.

چون مقدار قطبش بسیار کوچک است، شناسایی آن فوق‌العاده دشوار می‌باشد. اما بالاخره در

مارس ۲۰۱۴، دانشمندی که از تلسکوپ BICEP2 واقع در قطب جنوب استفاده می‌کردند اعلان نمودند که توانسته‌اند الگوی پیچشی قطبش را که پیش‌بینی شده بود در تابش ریزموج کیهانی شناسایی کنند. (در قطب جنوب، هوا آن‌قدر سرد است که بخار آب منجمد شده، از جو بیرون می‌آید و تابش ریزموج می‌تواند بدون آنکه تضعیف شود از میان آن عبور کند.)

اگر این نتیجه تأیید می‌شد پیامدهایی را به دنبال داشت: اثباتی بود بر وجود یک مرحله تورمی در جهان آغازین؛ یک آشکارسازی غیرمستقیم دیگر برای امواج گرانشی به حساب می‌آمد؛ و شاید مهم‌تر از همه، اینکه گرانش باید کوانتیده باشد. اما پس از اعلان این نتایج، گروه‌های دیگر اظهار داشتند که احتمالاً تأثیر غبار در کهکشان ما - که می‌تواند نتایج بسیار مشابهی را تولید نماید - دست‌کم گرفته شده است. و در ژوئن ۲۰۱۴، زمانی که نتایج BICEP2 به صورت رسمی منتشر شد، گروه اعلان نمودند که اطمینان آن‌ها از نتیجه‌ای که به دست آورده‌اند کاهش یافته است. از زمان اعلان اولیه‌شان، اطلاعات منتشر شده از فضایی پلانک نشان می‌داد که در کل، تأثیرات قطبش ناشی از غبار اطراف بزرگ‌تر از چیزی بود که فرض می‌شد؛ هرچند داده‌های پلانک مربوط به ناحیه‌ای از آسمان که BICEP2 آن را رصد کرده بود هنوز منتشر نشده بود. گروه در مجله *Physics Research Letters* با احتیاط از کشف خود سخن گفتند و امکان اینکه غبار عامل آن باشد را رد نکردند. از این‌رو همچنان مشتاقانه منتظر نتایج فضایی پلانک، که یکی از اهداف آن اندازه‌گیری قطبش موجود در زمینه ریزموج کیهانی بود، هستیم تا ببینیم آیا نتایج BICEP2 تأیید می‌شود، یا اینکه این نتایج خوش‌بینانه اعلان شده بود.

## ۲۲-۱۳ آیا تمام این‌ها باهم جمع می‌شود؟

زمینه ریزموج کیهانی دقیق‌ترین تصویری است که ما از دوران جوانی جهان در اختیار داریم. می‌توان از این تصویر در بررسی و مذاقه در مدل‌های مربوط به آغاز و تحول کیهان استفاده کرد. همخوانی با مدل استاندارد - موسوم به مدل  $\Lambda$ CDM، چراکه ماده تاریک سرد را با ثابت لاند (A) در نظریه نسبیت عام اینشتین متحد می‌کند - کاملاً مناسب است، اما پلانک تأکید دارد که برخی عوارض بی‌هنجار<sup>۳۹</sup> در زمینه ریزموج کیهانی که WMAP آن را دیده بود جدی‌تر از چیزی هستند که قبلاً گمان می‌رفت. بر این اساس شاید چیزی بنیادی در مدل استاندارد مفقود است، و برخی

جنبه‌ها نیاز به بازبینی داشته باشند. به‌ویژه، ممکن است جهان در بزرگ‌ترین مقیاس‌های خود، کاملاً یکنواخت (یا همسانگرد) نباشد.

نقشه تمام‌آسمان زمینه ریزموج کیهانی نشان می‌دهد علیرغم اینکه مشاهدات در مقیاس‌های زاویه‌ای کوچک و متوسط کاملاً با پیش‌بینی‌های مدل استاندارد سازگاری دارد، افت‌وخیزهایی که در مقیاس‌های زاویه‌ای بزرگ - بین ۶ تا ۹۰ درجه - شناسایی شده است حدود ۱۰٪ از حد انتظار ضعیف‌تر می‌باشد. دو بی‌هنجاری دیگر نیز وجود دارد:

۱- به نظر می‌رسد یک عدم‌تقارن اساسی در سیگنال زمینه ریزموج کیهانی که در دو نیم‌کره مخالف آسمان مشاهده شده است وجود دارد و در یکی از دو نیم‌کره، سیگنال تا حد قابل‌توجهی قوی‌تر از دیگری است.

۲- یک عارضه که ابتدا در داده‌های WMAP دیده شد و سپس پلانک آن را تأیید کرد حضور یک به اصطلاح «لکه سرد»<sup>۴</sup> است، جایی که یکی از نقاط با دمای پایین در زمینه ریزموج کیهانی تا حدی بسیار فراتر از انتظار در آسمان پهن می‌شود.

بنابراین کیهان‌شناسان با یک معمای جالب روبرو هستند: به نظر می‌رسد مدل استاندارد کیهان‌شناسی همچنان بهترین راه برای توضیح داده‌های زمینه ریزموج کیهانی است (گرچه هنوز واقعاً ماده تاریک، انرژی تاریک و تورم را درک نمی‌کنیم)، اما بی‌هنجاری‌هایی که پلانک ملاحظه نمود بر این تأکید دارند که این مدل را باید توسعه داد و شاید حتی نیاز باشد آن را یک اصلاح اساسی نمود.

یک نظریه فریبنده وجود دارد که ممکن است لکه سرد را توضیح دهد: آیا این لکه نمی‌تواند نتیجه برهم‌کنش جهان ما با یک جهان دیگر باشد که همراه با این جهان در دوره تورمی ایجاد شد، شاید زمانی که دو حباب در حال انبساط فضا، و نه یکی، باهم به وجود آمد؟ آیا این نخستین گواه بر وجود یک جهان دیگر در ورای جهان ما است؟



## مانوش‌ها

1 - George Gamow and Richard Dicke

۲- این دانشمند روسی است و نام وی با تلفظ روسی گاموف است. در اینجا تلفظ در زبان انگلیسی آورده شده است. (مترجم)

۳- اعتقاد به یک نقطه آغازین برای جهان این سؤال را به دنبال داشت: پیش از آن چه بود؟ فرد هویل، که یک دانشمند منکر خدا بود، برای فرار از پاسخ به این سؤال، به نظریه جهان نوسانی اعتقاد داشت. (مترجم)

۴- Cosmic Microwave Background radiation (CMB): البته نام‌های دیگری نیز دارد، از قبیل «تابش بازمانده» (Relict Radiation) یا آنچه برای عنوان این فصل برگزیده شد: پس تاب آفرینش (The afterglow of creation).

5 - Ralph Alpher

6 - The origin of chemical elements

7 - Robert Herman

8 - A. McKellar

9 - Coude' spectrograph

10 - David Wilkinson and Peter Rol

11 - Bell Telephone Laboratories

12 - passive satellite communication experiments

۱۳- هم‌اکنون این تله در موزه هوا و فضای اسمیتسونیان (Smithsonian) در واشینگتن نگهداری می‌شود.

14 - Bernie Burke

15 - hot Big Bang

16 - Cosmic Background Explorer (COBE)

17 - Vandenberg Air Force Base

18 - Delta rocket

19 - Sun-synchronous orbit

20 - Far-InfraRed Absolute Spectrophotometer (FIRAS)

21 - Differential Microwave Radiometer (DMR)

22 - Aquarius

23 - John Mather and George Smoot

24 - Wilkinson Microwave Anisotropy Probe and Planck spacecraft (WMAP)

۲۵- ripples به معنی موج‌های ریز. در اینجا منظور افت‌وخیزهای دما در دمای مشاهده شده است

که نوعاً ۶۰ میکروکلوین می‌باشد.

26- David Wilkinson

27 - cosmic neutrino background

28 - Reionization

29 - Boomerang and Maxima

30 - Very Small Array

---

31 - Cosmic Background Imager

۳۲ - برای اطلاع از نوع این مدار عبارت Lissajous orbit را در اینترنت جستجو کنید. (مترجم)

33 - Sunyaev-Zel'dovich effect

34 - Cold Dark Matter (CDM)

35 - Hot Dark Matter (HDM)

36 - Reionisation Redshift

37 - Dark Ages

38 - Hubble Space Telescope Key Project

39 - Anomalous Features

40 - Cold Spot

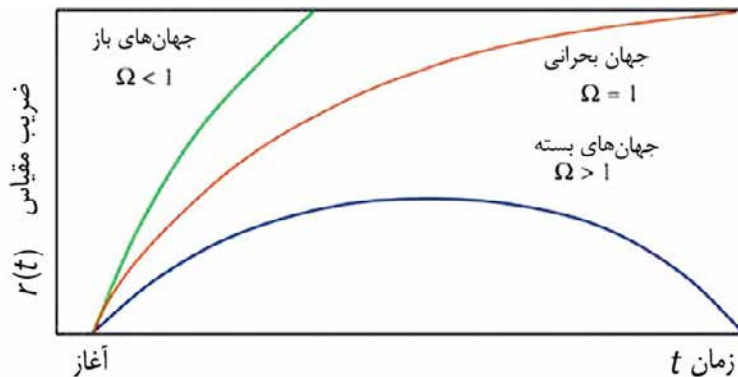
## فصل ۲۳

### تابی نهایت و فراتر از آن: نگاهی به کیهان

کیهان‌شناسی مدرن از نظریه نسبیت عام اینشتین سرچشمه گرفته است، نظریه‌ای که اساساً یک نظریه گرانش است. از آنجاکه گرانش تنها نیروی با برد بی‌نهایت بود که می‌توانست بر مواد خنثی عمل کند، اینشتین دریافت که جهان نیز به‌طور کلی باید از قوانین آن پیروی نماید. او به سمتی هدایت شد که باور کند جهان «ایستا»<sup>۱</sup> یا نامتغیر با زمان است. این تصور، یک مشکل واقعی را پیش پای وی قرار داد، چراکه گرانش یک نیروی جاذبه است، پس طبیعی است که سبب شود اجسام ایستا در فضا به یک نقطه رمبش نمایند. برای غلبه بر این مشکل، او ناچار شد عبارتی را به نام ثابت کیهان‌شناختی<sup>۲</sup>،  $\Lambda$ ، در معادلات خود وارد کند. این عبارت به‌نوعی مانند پادگرانش عمل می‌کند؛ با این ویژگی جالب که با فاصله بزرگ‌تر می‌شود. بدین ترتیب، با یک نیروی کاهنده با فاصله و دیگری افزایش‌دهنده، امکان ارائه پاسخی ایستا فراهم گردید. او بعدها متوجه شد که این وضعیت ناپایدار است و یک جهان ایستا ممکن نیست، از این‌رو آن را بزرگ‌ترین اشتباه خود در زندگی نامید. اینشتین می‌توانست این‌گونه پیش‌بینی کند که جهان یا باید در حال انبساط باشد و یا در حال انقباض؛ اما همان‌گونه که خواهیم دید، شاید آن‌طور هم که فکر می‌کرد در اشتباه نبود.

#### ۱-۲۳ مدل‌های مهبانگ جهان

یک هواشناس روسی به نام فریدمن<sup>۳</sup>، معادلات اینشتین را حل کرد و به مجموعه مدل‌هایی دست یافت که در آن‌ها جهان از یک نقطه، یا تکینگی<sup>۴</sup>، شروع می‌شد. فرد هویل<sup>۵</sup> آن‌ها را مدل‌های مهبانگ نامید - در حقیقت این یک عبارت تحقیرآمیز بود، چراکه هویل خود با طرفداری از نظریه دیگری به نام تئوری حالت پایدار<sup>۶</sup> که توضیح آن در پی خواهد آمد، علاقه‌ای به



شکل ۲۳-۱: مدل های فریدمن برای جهان.

این مدل ها نداشت! در همهٔ این مدل ها، سرعت بالای انبساط در ابتدای آن، به وسیلهٔ نیروی جاذبهٔ گرانشی بین مواد موجود در جهان کند می شود. اگر چگالی مادهٔ درون جهان از یک مقدار بحرانی تجاوز کند انبساط را متوقف می نماید؛ سپس جهان با رمبش به درون خود، به طور وحشتناکی درهم می شکند (این ها را جهان های بسته می نامند). اگر چگالی واقعی از حد بحرانی کمتر باشد، جهان برای همیشه به انبساط خود ادامه می دهد (موسوم به جهان های باز). در حالت بحرانی که مرز بین جهان های باز و بسته است، پس از مدت زمانی نامتناهی، سرعت انبساط جهان به صفر می رسد (جهان تخت یا بحرانی).

یک مثال مفید شلیک پرتابه از زمین است: اگر سرعت پرتابه کمتر از  $11/186 \text{ km/s}$  باشد (سرعت فرار از زمین)، پرتابه در نهایت متوقف شده، به زمین سقوط می کند (هم ارز با جهان های بسته)؛ اگر برابر با  $11/186 \text{ km/s}$  باشد، ضمن فرار از زمین، به مرور زمان سرعت آن کاهش می یابد (هم ارز با جهان بحرانی)؛ و اگر از  $11/186 \text{ km/s}$  بیشتر باشد، سریع تر زمین را ترک می کند (هم ارز با جهان های باز).

این مدل ها، که در شکل ۲۳-۱ نشان داده شده است، به وسیلهٔ ثابتی به نام اُمگا ( $\Omega$ ) از هم متمایز می گردند. بنا به تعریف، اُمگا نسبت چگالی واقعی به چگالی بحرانی است. در جهان های بسته، اُمگا بزرگ تر از یک است، فضا انحنای مثبت دارد، مجموع زوایای داخلی مثلث بیش از  $180^\circ$  درجه است و دو پرتو نور که در ابتدا موازی هستند، نهایتاً به هم می رسند. در جهان های باز، اُمگا

کمتر از یک است، فضا انحنای منفی دارد، مجموع زوایای داخلی مثلث کمتر از ۱۸۰ درجه است و دو پرتوی که در ابتدا موازی هستند به صورت واگرا از هم دور می‌شوند. در حالت بحرانی، اُمگا برابر با یک است؛ فضا را تخت می‌نامند (من عبارت «اقلیدسی» را به «تخت» ترجیح می‌دهم)، مجموع زوایای داخلی مثلث ۱۸۰ درجه است و دو پرتو موازی همواره موازی خواهند ماند. لازم به ذکر است که این تعاریف مربوط به جهان در مقیاس خیلی بزرگ است و همان‌گونه که دیدیم، فضا در مجاورت جسمی پرجرم، مانند ستاره یا کهکشان، به صورت مثبت انحنای پیدا می‌کند.

## ۲۳-۲ انبساط جهان و مشکل سن آن

همان‌طور که در فصل ۱۹ توضیح داده شد، ادوین هابل نشان داد که جهان در حال انبساط است و حتی توانست سن آن را استنباط کند، که حدود ۲ میلیارد سال به دست آمد. در حقیقت در تمام مدل‌های فریدمن، سن واقعی باید کمتر از این مقدار باشد، چراکه جهان در گذشته با سرعت بیشتری در حال انبساط بوده است، و در حالت جهان تخت، سن حقیقی دوسوم عمر هابل، یعنی حدود ۱۳۰۰ میلیون سال می‌باشد. بدیهی بود که این نتیجه مشکلی ایجاد می‌کرد، چراکه عمر منظومه شمسی حدود ۴۵۰۰ میلیون سال تعیین شده بود؛ ضمن این‌که محاسبات هویل و دیگران پیرامون تحول ستارگان نشان می‌داد که عمر برخی از آن‌ها باید بسیار بیشتر از این مقدار باشد، چیزی حدود ۱۰ تا ۱۲ میلیارد سال. هنگام خاموشی‌های جنگ جهانی دوم، والتر باد<sup>۷</sup> با استفاده از تلسکوپ ۱۰۰ اینچ هوکر در کوه ویلسون، به مطالعه ستارگان در کهکشان ام‌اِ۳۰۰۰ (اندرومدا) پرداخت و دریافت که در حقیقت دو نوع متغیر قیفاووسی وجود دارد. در نتیجه ثابت هابل به حدود  $250 \text{ (km/s)/Mpc}$  کاهش یافت. هنوز مشکلات بسیاری در برآورد فاصله‌ها باقی مانده بود، اما به تدریج رصدها دقیق‌تر شد و در نتیجه ثابت هابل به حدود  $70 \text{ (km/s)/Mpc}$  تقلیل پیدا کرد.

بعید است که مقدار حقیقی ثابت هابل اختلاف زیادی با این داشته باشد. اما حدود ۱۴ میلیارد سال که از آن به دست می‌آید متناظر است با تنها حدود  $9/3$  میلیارد سال برای سن یک جهان تخت. با توجه به رصدهای انجام‌گرفته روی خوشه‌های کروی (که برخی از پیرترین ستارگان جهان را شامل می‌شوند) و بقایای ستاره‌ها به صورت کوتوله سفید، تصور می‌کنیم که جهان باید مسن‌تر از ۱۲ میلیارد سال باشد. از این‌رو اگر مقدار کنونی ثابت هابل را باور کنیم، همچنان مشکل

سن در مدل‌های مهبانگ استاندارد فریدمن وجود دارد. این موضوع مهمی است که تاکنون به ندرت ابراز شده است. مدل‌های استاندارد مهبانگ نمی‌توانند درست باشند!

### ۲۳-۳ قرمزگرایی کیهان‌شناختی

در فصل‌های گذشته، قرمزگرایی و آبی‌گرایی که در کهکشان‌ها دیده می‌شود از دیدگاه اثر دوپلر مورد ملاحظه قرار گرفت، و این چیزی است که در مورد آبی‌گرایی کهکشان‌های گروه محلی کاملاً صحیح است. با وجود این، در مورد کهکشان‌های فراتر از گروه محلی ما، با روشی بسیار بهتر می‌توان پیرامون علت قرمزگرایی مشاهده‌شده اندیشید. همان‌گونه که هابل نشان داد، جهان در حال انبساط است؛ پس در گذشته کوچک‌تر بوده است. به علاوه، این‌که فکر کنیم کهکشان‌ها در میان فضا حرکت می‌کنند (فراتر از حرکت آن‌هایی که در گروه محلی ما هستند، یا درون گروه‌ها و خوشه‌های کهکشانی دیگر قرار دارند) تصور صحیحی نیست، بلکه آن‌ها با انبساط جهان از یکدیگر فاصله می‌گیرند. بار دیگر پختن یک کیک کشمش را در نظر بگیرید. ابتدا خمیر با کشمش انباشته شده، سپس پخته می‌شود. پس از خروج از دستگاه فر، کیک نسبت به خمیر ابتدایی باد کرده است (البته امیدواریم که این‌گونه باشد!) و فاصله کشمش‌ها از هم بیشتر شده است. آن‌ها در بین خمیر حرکت نکرده‌اند، بلکه با انبساط آن از هم دور شده‌اند.

زمانی که یک فوتون از کهکشانی دور و متناظر با یک خط طیفی گسیل شد، جهان کوچک‌تر بوده است. در مدتی که فوتون در فضا حرکت می‌کرده تا به ما برسد، جهان منبسط شده و این انبساط طول موج فوتون را، دقیقاً به همان نسبت، کشیده‌تر کرده است. بدین ترتیب طول موج افزایش می‌یابد و منجر به یک قرمزگرایی می‌شود که آن را قرمزگرایی کیهان‌شناختی<sup>۸</sup> می‌نامیم. یک تشبیه ساده آن است که موجی سینوسی را (نشانگر طول موج یک فوتون) روی بادکنکی کم باد بکشیم. حال اگر بادکنک را بیشتر باد کنیم می‌بینیم که فاصله قله‌های موج سینوسی بیشتر می‌شود، به عبارتی طول موج افزایش می‌یابد.

### ۲۳-۴ مدل حالت پایدار جهان

در نتیجه این مشکل سن، بسیاری از ستاره‌شناسان چندان اعتقادی به مدل‌های مهبانگ

نداشتند. در سال ۱۹۴۸، هرمن بوندی، توماس گولد و فرد هویل<sup>۹</sup> (که از ایدهٔ مبدأآنی برای جهان متنفر بودند) نظریهٔ دیگری به نام نظریهٔ «حالت پایدار»<sup>۱۰</sup> را پیشنهاد کردند. تمام نظریه‌های کیهان‌شناسی چیزی را که اصل کیهان‌شناختی<sup>۱۱</sup> نامیده می‌شود در برمی‌گیرند؛ یعنی آنکه در مقیاس بزرگ و در هر زمان معین، منظرهٔ جهان از هر نقطه داخل آن یکسان خواهد بود. (این حقیقت به خوبی به وسیلهٔ تلسکوپ فضایی هابل به اثبات رسیده است. دو تصویر میدان ژرف هابل، یکی مربوط به آسمان شمالی و دیگری مربوط به آسمان جنوبی، مشخصات یکسانی دارند.) بوندی، گولد و هویل این نظریه را توسعه دادند و چیزی را که آن‌ها اصل کیهان‌شناختی کامل<sup>۱۲</sup> می‌نامیدند ارائه کردند. در این اصل عبارت «در هر زمان معین» با «در همهٔ زمان‌ها» جایگزین شد. جهان آن‌ها در مقیاس بزرگ نامتغیر بود. البته نه به این معنی که جهان منبسط نمی‌شد، بلکه ایدهٔ اصلی در قلب این نظریه آن بود که با فاصله گرفتن کهکشان‌ها از یکدیگر به دلیل انبساط جهان، مادهٔ جدید به شکل هیدروژن در فضای بین آن‌ها آفریده می‌شد. این هیدروژن تازه خلق شده، در نهایت، کهکشان‌های جدیدی را به وجود می‌آورد و بدین ترتیب چگالی مشاهده‌شدهٔ کهکشان‌ها پیوسته ثابت می‌ماند. این جهان نه ابتدایی دارد و نه انتهایی خواهد داشت، و همان‌گونه که از نام نظریه برمی‌آید، در حالت پایدار خواهد ماند. با توجه به این‌که همواره مادهٔ جدید در حال خلق شدن است، آن را نظریهٔ آفرینش پیوسته<sup>۱۳</sup> نیز می‌نامند.

### ۲۳-۵ مهبانگ یا حالت پایدار؟

در اوایل دههٔ ۱۹۶۰، آزمایش‌های رصدی جهت‌گزینش یکی از دو نظریه صورت گرفت. فرض کنید بتوانیم چگالی کهکشان‌ها را در نزدیکی خودمان اندازه بگیریم، یعنی تعداد کهکشان‌ها در مکعبی به ابعاد یک میلیون پارسک را به دست آوریم. با توجه به این‌که این کهکشان‌ها در نزدیکی ما هستند، اساساً آن‌ها را در زمان حال می‌بینیم. حال اگر می‌توانستیم چگالی کهکشان‌ها را در جهان دور اندازه بگیریم، در حقیقت چگالی عالم را مربوط به زمانی در گذشته اندازه می‌گرفتیم. در مدل حالت پایدار، این نتایج باید یکسان باشد؛ اما در مدل مهبانگ، چگالی در زمان گذشته باید بیشتر از حال باشد. مارتین رایل<sup>۱۴</sup> در کمبریج، با شمارش منابع رادیویی اقدام به انجام این‌گونه اندازه‌گیری‌ها نمود. اگرچه در داده‌های ابتدایی مشکلاتی وجود داشت، اما بالاخره این نتایج





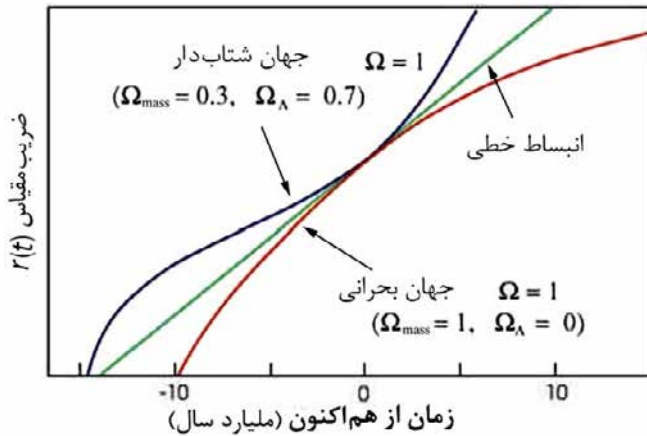
مربوطه‌شان نابود شدند و بدین ترتیب تعداد نسبتاً کمی ذره در اقیانوسی از تابش به‌جا ماند. این توده از مواد باریونی به‌شکل کوارک بود. یک ثانیه پس از آغاز جهان، کوارک‌ها به گروه‌های سه‌تایی تقسیم شده، پروتون‌ها و نوترون‌ها را ساختند. (دو کوارک بالا و یک کوارک پایین تولید پروتون می‌کند، و یک کوارک بالا و دو کوارک پایین یک نوترون را می‌سازد. کوارک بالا  $\frac{2}{3}+$  و کوارک پایین  $\frac{1}{3}-$  بار دارد، در نتیجه بار پروتون  $+1$  و بار نوترون صفر است.) تعداد تقریباً برابری پروتون و نوترون تولید شد. اما از آنجاکه نوترون آزاد، با نیمه‌عمر  $10/6$  دقیقه، ناپایدار است، تنها آن‌هایی باقی ماندند که در هسته هلیوم، که دارای دو پروتون و دو نوترون است، جای گرفتند. بنابراین پس از چند دقیقه، آنچه که ماده (باریونی) معمولی در جهان را تشکیل می‌داد، به‌طور عمده عبارت بود از هسته هیدروژن (پروتون)، هسته هلیوم (ذرات آلفا) و الکترون - یک الکترون به ازای یک پروتون. (ما هم‌اینک بر این باوریم که ماده تاریک نیز به مقداری چندین برابر بیشتر، آفریده شده است. اما در حال حاضر نمی‌دانیم چطور.)

### ۲۳-۷ ترکیب جهان

مشاهدات انجام گرفته از زمینه ریزموج کیهانی (همان‌طور که در فصل پیش به آن پرداختیم)، ابرنواختر نوع Ia، ثابت هابل و توزیع کهکشان‌ها در فضا، همگی مدلی سازگار از جهان را در اختیار ما قرار می‌دهند. با توجه به آخرین مشاهدات زمینه ریزموج کیهانی به‌وسیله فضاییمای پلانک، به نظر می‌رسد که ماده معمولی تنها حدود ۵٪ از مجموع انرژی و جرم جهان را به خود اختصاص می‌دهد، ماده تاریک حدود ۲۷٪ و حدود ۶۸٪ باقی‌مانده به انرژی تاریک تعلق دارد. **شکل ۲۳-۲** نشان می‌دهد چگونه بر این باوریم که اندازه مقیاس جهان در گذشته به مرور زمان تغییر کرده است، و چطور با سرعتی رو به افزایش در آینده منبسط خواهد شد. خواهید دید که سن واقعی جهان شبیه به سن هابل است (انبساط خطی از اندازه صفر) با مقداری که هم‌اکنون اعتقاد داریم  $13/8$  میلیارد سال می‌باشد.

### ۲۳-۸ جهانی مناسب برای حیات هوشمند

همین حقیقت که شما در حال خواندن این کتاب هستید نشان می‌دهد که جهان ما ویژگی‌هایی



شکل ۲۳-۲: نموداری که اندازه مقیاس جهان را با زمان نشان می‌دهد.

کاملاً مناسب جهت رشد حیات هوشمند داشته است. اما چرا باید این طور باشد؟ همان گونه که به شیوایی در کتاب «تنها شش عدد» نوشته مارتین ریسی<sup>۱۹</sup> توضیح داده شده است، چند پارامتر وجود دارد که تأثیری عمده بر چگونگی تحول جهان و این که چگونه ستارگان عناصر لازم برای حیات را تولید می‌کنند، دارند. بیش از این یکی از آن‌ها در این کتاب پوشش داده شده است: ثابت امگا. اگر امگا بیشتر بود، جهان به سرعت رمبش می‌کرد بدون آنکه حیات اجازه تکامل بیابد؛ اگر هم کوچک تر بود، کهکشان‌ها و ستارگان تشکیل نمی‌شدند. به علاوه، چنانچه لاند که به صورت شگفت‌آوری کوچک است، بزرگ‌تر بود، از تشکیل ستارگان و کهکشان‌ها جلوگیری می‌کرد.

در فصل ۲۲ نیز خواندید که چگونه در نتیجه افت وخیزهای چگالی جهان اولیه - به اصطلاح شکنج‌هایی<sup>۲۰</sup> که در زمینه ریزموج کیهانی مشاهده می‌شود- کهکشان‌ها شکل گرفتند. پارامتری که دامنه شکنج‌ها را تعریف می‌کند، مقداری حدود  $10^{-5}$  دارد. اگر این پارامتر کوچک‌تر بود، چگالش ماده تاریک که اندکی پس از مهبانگ اتفاق افتاد (و برای تشکیل کهکشان‌ها نقشی سرنوشت ساز داشت)، هم کمتر بود و هم پراکنده‌تر؛ و در نتیجه آن، ساختار کهکشان‌ها به قدری پربشان بود که تشکیل ستارگان در آن چندان با موفقیت پیش نمی‌رفت و سامانه‌های سیاره‌ای شکل نمی‌گرفت. اگر این پارامتر کمتر از  $10^{-6}$  بود، هرگز کهکشان‌ها به وجود نمی‌آمد! اما اگر این پارامتر بزرگ‌تر از  $10^{-5}$  بود، مقیاس و اندازه شکنج‌ها بیشتر می‌شد و ساختارهایی غول‌آسا، بسیار

بزرگ‌تر از کهکشان‌ها، پدید می‌آید. سپس این ساختارها به سیاه‌چاله‌هایی ابرسنگین رمبش می‌نمودند- جهانی خشن، بدون هیچ جایی برای زندگی!

یکی از پارامترهای جهان ما آن قدر معروف است که تقریباً هیچ‌گاه به آن نیندیشیده‌ایم، و آن تعداد ابعاد فضا است. اگر فضا به جای سه بعد، دو بعد یا چهار بعد داشت<sup>۲۱</sup>، زندگی ممکن نبود.

معادله معروف اینشتین،  $E=mc^2$ ، مقدار انرژی‌ای را که می‌توان از جرم معینی استخراج نمود تعیین می‌کند. واضح است که مقدار  $c$  ارزشی بنیادی دارد. در عمل تنها بخش کوچکی از انرژی نهفته در ماده آزاد می‌شود. برای مثال، در فرآیند تبدیل هیدروژن به هلیوم، ۷٪ از جرم چهار پروتونی که هلیوم را می‌سازند آزاد می‌شود - این درصد ارتباط نزدیکی به قدرت نیروی هسته‌ای قوی دارد. این پارامتر، یعنی ۰/۰۰۷، را، بازده هسته‌ای<sup>۲۲</sup> می‌نامند. اگر این مقدار خیلی کوچک بود، مثلاً ۰/۰۰۶، زنجیره واکنش‌هایی که هلیوم را می‌سازد رخ نمی‌داد. در اولین گام از این واکنش‌ها، دو پروتون تشکیل یک هسته دوتریوم می‌دهد. اما در صورت بازده هسته‌ای ۰/۰۰۶، دوتریوم ناپایدار بود و بدین ترتیب از ادامه واکنش‌هایی که به تولید هلیوم منجر می‌شود جلوگیری می‌کرد- ستارگان راکد و بی‌روح می‌شدند. از طرف دیگر، چنانچه این پارامتر ۰/۰۰۸ بود، بدین معنی که نیروهای هسته‌ای نسبت به نیروهای الکترواستاتیک قوی‌تر بودند، بر دافعه الکترواستاتیک دو پروتون غلبه می‌شد و آن‌ها می‌توانستند به هم بپیوندند، در نتیجه هیدروژنی برای تأمین سوخت ستارگان باقی نمی‌ماند. یک واکنش سرنوشت‌ساز در تحول ستارگان، تولید کربن در فرآیند سه آلفا است. همان‌طور که پیش‌ازین تشریح شد، فرد هویل نقشی کلیدی در فهم این واکنش داشت. او ابراز داشت که حتی تغییری چند درصدی در مقدار مشاهده‌شده ۰/۰۰۷ می‌تواند عواقب وخیمی در میزان کربن تولیدی در ستارگان به جا بگذارد- همراه با نتایج آشکار برای حیات، آن‌گونه که ما می‌شناسیم.

### ۹-۲۳ چند جهانی

چگونه تمام پارامترهایی که در بالا توضیح داده شد، با این ظرافت جهت حیات ما تنظیم شده است؟ دو دلیل محتمل وجود دارد. اول آنکه آفریدگار جهان آن را مخصوص موجودات هوشمند طراحی کرده است، نظری که حکمای الهیات برگزیده‌اند. نظر دوم آن است که جهان‌های بسیاری

وجود دارد، هرکدام با خواصی گوناگون. عبارت چندجهانی<sup>۲۳</sup> به این نظر اطلاق می‌شود. ما هیچ اطلاعی از آنچه در کیهان و فراتر از افق جهان مرئی ما قرار دارد، در دست نداریم. نقاط مختلف می‌توانند خواص گوناگونی داشته باشند. این مناطق را می‌توان جهان‌هایی گوناگون درون کیهان به حساب آورد. قسمتی از کیهان که ما قرار داریم کاملاً بر وفق مراد است.

### ۲۳-۱۰ نظریهٔ ریسمان: رهیافتی دیگر به سوی چندجهانی

مشکلی بنیادی در پیش روی فیزیک‌دانان نظری است. نظریهٔ نسبیت عام اینشتین که به گرانش مربوط می‌شود یک نظریهٔ کلاسیک است، و این در حالی است که دیگر نیروها را می‌توان با مکانیک کوانتومی تشریح کرد. «نظریهٔ همه چیز<sup>۲۴</sup>»، یعنی آنچه که بتواند تمام نیروهای بنیادی را یکپارچه نماید، هنوز یافت نشده است. رهیافتی که با جدیت در حال پیگیری است به نظریهٔ ریسمان<sup>۲۵</sup> برمی‌گردد. نظریه‌های اولیهٔ ریسمان، با ساخت فضا-زمانی ۱۰ بعدی، یک جهان ۱۰ بعدی، و نه ۴ بعدی را تصویر می‌کرد. ۶ بعد اضافی، علاوه بر ۳ بعد فضا و بعد زمان، در نقاطی ریز از فضا با اندازه‌ای از مرتبهٔ  $10^{-35}$  m موسوم به ریسمان متراکم شده‌اند. این ریسمان‌ها سنگ بنای اساسی ماده را تشکیل می‌دهند. ذرات گوناگون و خواص آن‌ها به نحوهٔ ارتعاش این ریسمان‌ها بستگی دارد - تقریباً شبیه به نحوهٔ به حرکت درآوردن تارهای ویولن و ساخت هماهنگ‌های گوناگون صدا. با حرکت این ریسمان‌ها، فضا-زمان اطرافشان، دقیقاً آن گونه که نسبیت عام پیش‌بینی کرده است، منحرف می‌شود. بدین ترتیب، نظریهٔ ریسمان دو نظریهٔ کوانتوم ذرات و نسبیت عام را متحد می‌سازد.

در سال‌های اخیر پنج نظریهٔ ریسمان، هرکدام با ویژگی‌هایی متفاوت، ارائه شده است. در یکی از این نظریه‌ها، ریسمان‌هایی باز (رشته‌هایی با دو سر) همراه با ریسمان‌هایی بسته که تشکیل حلقه می‌دهند، امکان وجود دارند؛ درحالی که چهارتای باقی‌مانده تنها حلقه‌های بسته را شامل می‌شوند. اخیراً، اد ویتن و پُل تاوونزد<sup>۲۶</sup> نظریه‌ای ۱۱ بعدی موسوم به ام-تئوری (M-theory) که هر پنج نظریهٔ رقیب ریسمان را منسجم می‌نماید، ارائه کرده‌اند. این بُعد یازدهم (که ممکن است بیشتر هم باشد) روش دیگری در اندیشیدن پیرامون چندجهانی پیش روی ما قرار می‌دهد.

به مثالی ساده توجه کنید: قرصی از نان را به باریکه‌هایی، مثلاً یک سانتیمتری، برش داده از

هم جدا کنید. بر روی هر برش چند مورچه بگذارید. این برش‌های نان که برای مورچه‌ها عملاً در حکم جهانی دوبعدی است، حداقل برای مدتی آن‌ها را زنده نگه می‌دارد. آن‌ها از وجود دیگر اجتماعات مورچه‌ای در برش‌های مجاور اطلاعی ندارند. اگر می‌توانستند فکر کنند، به این باور می‌رسیدند که در یک جهان تک و دوبعدی زندگی می‌کنند. با وجود این، ما همه آن‌ها را می‌بینیم، در کیهانی که به واقع بعد سومی نیز دارد.

درست به همین ترتیب، به جای بودن در مناطقی مجزا از یک کیهان گسترده با فضایی به هم مرتبط، ممکن است جهان‌های دیگر در فضا-زمان خودشان قرار داشته باشند- در بعدی اضافه مخفی از فضا-زمان ما.

### ۲۳-۱۱ فراتر از خیال ما

در آخرین سخنرانی که در دانشگاه گرشام ایراد کردم، با این جمله سخن خود را به پایان بردم: «... یا حتی اینکه جهان ما تنها یک بخش کوچک از چند جهانی باشد که تا فراتر از خیال ما امتداد دارد!» منظورم این بود که شاید کلیت کیهان و قوانینی که بر وجود آن حاکم است فراتر از فکر انسانی ما باشد. (مطمئناً فراتر از فکر من است!)

علاقه‌مند شدم نظرات مارتین رییس را، که یک ستاره‌شناس سلطنتی است و قبلاً صاحب کرسی نجوم در گرشام بود، و پس از این سخنرانی ابراز داشته بود بخوانم:

- ممکن است برخی از بزرگ‌ترین رازهای جهان هرگز حل نشود، زیرا فراتر از درک بشر هستند. رییس بر این عقیده است که محدودیت‌های ذاتی برای ذهن بشر به این معنی است که شاید هرگز نتوانیم پاسخی برای پرسش‌هایی همچون وجود جهان‌های موازی، سبب مهبانگ، یا ماهیت آگاهی و هشیاری خودمان، بیابیم.
- او حتی انسان را با ماهی مقایسه می‌کند؛ ماهی در میان اقیانوس شنا می‌نماید بدون آنکه هیچ نظر و فکری درباره‌ی آبی که عمر خود را در آن سپری می‌کند داشته باشد.
- شاید یک نظریه‌ی بنیادی حقیقی وجود داشته باشد، اما سخت‌تر از آن باشد که مغز انسان بتواند آن را درک کند.

ظاهراً من تنها نیستم!

## ۲۳-۱۲ آینده جهان

انبساط شتاب‌دار جهان که هم‌اکنون مورد قبول قرار گرفته است پیامد خیلی جالبی دارد. پیش از این تصور می‌شد که با توجه به نرخ کند شونده انبساط، با پیرتر شدن جهان، تعداد کهکشان‌های قابل رؤیت افزایش می‌یابد (زیرا فاصله‌ای را که می‌توانیم ببینیم زیادتر می‌شود). در جهانی که انبساط آن شتاب‌دار است، دقیقاً مخالف این تصور صحیح است - آری، ما قادر خواهیم بود نقاط دورتری از فضا را ببینیم، اما چیزهای کمتر و کمتری را خواهیم دید، زیرا انبساط، کهکشان‌ها را به آن سوی افق دید ما می‌برد.

در مقیاس بزرگ، فضای بین خوشه‌های کهکشانی منبسط خواهد شد - آن‌ها را بیشتر از هم دور می‌کند - اما اعتقاد بر این است که خوشه‌هایی مانند گروه محلی ما بر اثر جاذبه، بسته باقی خواهد ماند. در حقیقت با ادغام اعضای آن، یک کهکشان، به‌طور عمده متشکل از راه‌شیری و کهکشان امرأة‌المسلسله، پدید خواهد آمد. اگر به حدود ۱۰۰ میلیارد سال آینده سفر کنیم، هر ناظری درون این کهکشان، جهانی کاملاً خالی را خواهد دید! انبساط جهان، تمام کهکشان‌ها را به ورای افق دید ما - لبه جهان مرئی - حمل کرده است.

عملاً به چند دلیل، غیرممکن است چنین رصدگرانی چیزی از تحول جهان دستگیرشان شود. برای مثال، قله طیف انرژی مربوط به زمینه ریزموج کیهانی، با جابه‌جایی به سمت قرمز، به حدود ۱ متر رسیده است و در عمل آشکارسازی آن غیرممکن می‌باشد.

از مطالعات نظری پیرامون تحول ستاره‌ای و چگونگی تغییر فراوانی نسبی عناصر با زمان، شاید به خوبی بتوان برآوردی از سن کهکشان داشت (برای مثال، بر اثر هسته‌زایی<sup>۲۷</sup> در ستارگان، مقدار هیدروژن رو به کاهش و هلیوم در حال افزایش است)؛ اما هرگز این استنباط که پیدایش آن با مهبانگ همراه بوده ممکن نیست.

از بخت خوب ما است که در تاریخ جهان، در تنها زمانی زندگی می‌کنیم که میزان انرژی تاریک و ماده تاریک قابل مقایسه‌اند و همچنین زمینه ریزموج کیهانی به آسانی قابل مشاهده است. بدین ترتیب ما قادریم استنباطی از وجود انرژی تاریک، مسیر تحول جهان از مهبانگ و آینده آن در انبساطی گریزپای داشته باشیم.

در زمانی که جهان جوان بود، هیچ ناظری نمی‌توانست درکی از حضور انرژی تاریک داشته باشد، چراکه در آن زمان واقعاً هیچ اثری بر سرعت انبساط نداشت. آن‌هایی که در آینده دور زندگی می‌کنند، به هیچ‌عنوان نخواهند توانست بگویند که در جهانی در حال انبساط زندگی می‌کنند، ضمن آنکه وجود انرژی تاریک را هم نخواهند فهمید! با پایان عمر آخرین ستاره، شواهدی که در قلب درک فعلی ما از پیدایش و تحول جهان قرار دارد، ناپدید خواهد شد.

جالب توجه است که شاید ما در بهترین زمان ممکن زندگی می‌کنیم. زمانی که در آن می‌توانیم به رمزگشایی از رازهای جهان بپردازیم. سپاسگزارم که در این تلاش همراه من بودید.

### پانوشته‌ها

- 1 - Static
- 2 - Cosmological Constant
- 3 - A. A. Friedmann
- 4 - Singularity
- 5 - Fred Hoyle
- 6 - Steady State theory
- 7 - Walter Baade
- 8 - cosmological redshift
- 9 - Herman Bondi, Thomas Gold and Fred Hoyle
- 10 - Steady State
- 11 - Cosmological Principle
- 12 - Perfect Cosmological Principle
- 13 - Continuous Creation
- 14 - Martin Ryle
- 15 - Problem Flatness
- 16 - Horizon Problem
- 17 - Inflation
- 18 - Alan Guth
- 19 - Just Six Numbers by Martin Rees
- 20 - Ripples

۲۱- در جهان دوبعدی، ساختارهای پیچیده وجود نداشت؛ و در جهان چهاربعدی، نیروها با عکس توان سوم سقوط می‌کردند و اتم‌ها نمی‌توانستند تشکیل شوند.

- 22 - Nuclear Efficiency
- 23 - Multiverse
- 24 - Theory of Everything
- 25 - String Theory
- 26 - Ed Witten and Paul Townsend
- 27 - Nucleosynthesis

# فهرست مفصل کتاب

پیشگفتار مترجم .....	۱
مقدمه نویسنده .....	۱۱
<b>فصل ۱: مراقبین آسمان .....</b>	<b>۱۳</b>
۱-۱ اثبات تئوری کپرنیکی منظومه شمسی توسط گاليله .....	۱۳
۲-۱ کره سماوی .....	۱۵
۳-۱ یک موفقیت بزرگِ رصدی دیگر .....	۱۶
۴-۱ قوانین حرکت سیارات .....	۱۸
۵-۱ آیزاک نیوتون و قانون جاذبهٔ عمومی .....	۱۹
۶-۱ چارلز مسیه: یک رصدگر بزرگ .....	۲۲
۷-۱ ادموند هالی و اندازه‌گیری واحد نجومی .....	۲۳
<b>فصل ۲: خورشید .....</b>	<b>۲۷</b>
۱-۲ چرخهٔ پروتون - پروتون .....	۳۰
۲-۲ مسئلهٔ نوترینوی خورشیدی .....	۳۲
۳-۲ جو خورشید: شیدسپهر، فامسپهر و تاج خورشیدی .....	۳۴
۴-۲ میدان مغناطیسی خورشید و چرخهٔ لکه خورشیدی .....	۳۵
۵-۲ زیانه‌ها، شراره‌ها و باد خورشیدی .....	۳۷
۶-۲ شفق قطبی .....	۳۹
۷-۲ خسوف و کسوف .....	۴۰
<b>فصل ۳: سیمای منظومه شمسی .....</b>	<b>۴۵</b>
۱-۳ سیاره چیست؟ .....	۴۵
افلاک‌نمای هایدن .....	۴۶
۲-۳ مدار سیاره‌ها .....	۴۷
زاویهٔ میل مداری .....	۴۹



۴۹	۳-۳ ویژگی‌های سیارات
۴۹	جرم سیارات
۵۰	چگالی سیارات
۵۰	دوره تناوب چرخشی
۵۱	دمای سیارات
۵۳	۴-۳ جو سیارات
۵۵	خلاصه
۵۶	جو ثانوی
۵۶	تحول جو زمین
۵۹	<b>فصل ۴: سیارات صخره‌ای</b>
۵۹	۴-۱ عطارد
۶۱	۴-۲ زهره
۶۴	۴-۳ زمین
۶۶	۴-۴ ماه
۶۹	کِشند (جزر و مد)
۷۰	سفر اکتشافی به ماه
۷۲	۴-۵ مریخ
۷۴	آیا تمدنی در مریخ وجود داشته است؟
۷۵	مدارگردها، مریخ‌نوردها و سطح‌نشین فونیکس
۷۸	کنجکاوی
۷۹	قمرها
۸۰	۴-۶ بَی‌س و سیاره‌های خرد
۸۵	<b>فصل ۵: در جستجوی سیارهٔ ایکس</b>
۸۵	۵-۱ اورانوس
۸۷	۵-۲ نپتون
۹۰	۵-۳ پلوتون
۹۳	۵-۴ کارُن
۹۴	۵-۵ در جستجوی سیارهٔ دهم

۹۵	..... کوتوله‌های یخی
۹۹	..... ۵-۶ چه تعداد سیاره کوتوله؟
۱۰۱	..... <b>فصل ۶: سفر به سیارات بیرونی</b>
۱۰۱	..... ۶-۱ پایونی ۱۰
۱۰۲	..... ۶-۲ پایونی ۱۱
۱۰۳	..... ۶-۳ پایونی یر و کمک آن به بستنی (جستجوی هوش فرازمینی)
۱۰۳	..... ۶-۴ ویجر ۱ و ۲
۱۰۵	..... ۶-۵ آنچه درباره اورانوس می‌دانیم
۱۰۶	..... حلقه‌های اورانوس
۱۰۷	..... ۶-۶ ویجر ۲ در کنار اورانوس
۱۰۸	..... ۶-۷ ویجر ۲ در کنار نپتون
۱۱۰	..... ویجر همچنان در سفر
۱۱۰	..... ۶-۸ مأموریت گالیله به سمت مشتری
۱۱۲	..... ۶-۹ آنچه امروزه درباره مشتری و قمرهایش می‌دانیم
۱۱۳	..... لکه سرخ بزرگ
۱۱۳	..... حلقه‌های مشتری
۱۱۴	..... قمرهای گالیله‌ای مشتری
۱۱۶	..... ۶-۱۰ مأموریت کاسینی به زحل
۱۱۷	..... آزمایش نظریه نسبیت عام اینشتین
۱۱۷	..... رسیدن به زحل
۱۱۸	..... ۶-۱۱ آنچه درباره زحل و قمرهایش می‌دانیم
۱۲۰	..... تیتان
۱۲۱	..... کاوشگر هویگنس
۱۲۲	..... دریاچه‌های تیتان
۱۲۲	..... انسلادوس
۱۲۳	..... ۶-۱۲ مأموریت «افق‌های نو» به پلوتون و قمرهایش
۱۲۷	..... <b>فصل ۷: قاصدان سرنوشت</b>
۱۲۸	..... ۷-۱ دنباله‌دار هالی

- ۲-۷ هسته دنباله دار ..... ۱۳۰
- ۳-۷ بارش های شهابی ..... ۱۳۳
- ۴-۷ مأموریت استارداست ..... ۱۳۴
- ۵-۷ برخورد دیپایمپکت ..... ۱۳۶
- ۶-۷ دو نظر نهایی ..... ۱۳۷

### فصل ۸: برخورد! ..... ۱۳۹

- ۱-۸ تشکیل دهانه ..... ۱۴۰
- ۲-۸ دهانه ها بر روی زمین ..... ۱۴۰
- دهانه های نورتلینگریس و اشتاینهیم در آلمان ..... ۱۴۲
- حادثه چیکشلوب ..... ۱۴۳
- تونگوسکا: ۳۰ ژوئن ۱۹۰۸ ..... ۱۴۵
- چند رویداد معاصر ..... ۱۴۸
- شهاب چیلیابینسک ..... ۱۴۹
- ۳-۸ دنباله داری که به مشتری برخورد کرد ..... ۱۵۰
- ۴-۸ برخوردهای اخیر در مشتری ..... ۱۵۳
- ۵-۸ اجسام نزدیک زمین (NEOs): کشف آن ها و تهدید بالقوه برای زمین ..... ۱۵۴
- برنامه هایی برای شناسایی اجسام نزدیک زمین ..... ۱۵۵
- چگونه این کار انجام می شود؟ ..... ۱۵۷
- ارزیابی خطر اجسام نزدیک زمین ..... ۱۵۷
- برای دفع خطر چه کنیم؟ ..... ۱۵۹
- ۶-۸ دنباله دارها و مشکلات آن ها ..... ۱۶۱

### فصل ۹: چهارصد سال تلسکوپ ..... ۱۶۵

- ۱-۹ دوتایی بی فام و تلسکوپ های شکستی غول پیکر ..... ۱۶۷
- ۲-۹ تلسکوپ بازتابی ..... ۱۶۹
- کشف اورانوس ..... ۱۷۰
- ۳-۹ هیولای بیرکاسل ..... ۱۷۰
- ۴-۹ تلسکوپ ۱۰۰ اینچی هوکر در کوه ویلسون ..... ۱۷۱
- ۵-۹ تلسکوپ ۲۰۰ اینچی هیل در رصدخانه پالومار ..... ۱۷۲

۱۷۴	۶-۹ دوربین اشمیت
۱۷۶	۷-۹ راه‌های بهبود کیفیت تصویر در تلسکوپ‌های زمینی
۱۷۶	اپتیک فعال
۱۷۷	اپتیک سازگار
۱۷۷	آینه‌های تلسکوپ در استقرار سمتی-ارتفاعی (به روش دوران شیشه مذاب)
۱۷۸	آینه‌های چندتکه
۱۷۹	۸-۹ تلسکوپ‌های شمال و جنوب جیمینی
۱۷۹	۹-۹ تلسکوپ‌های یک
۱۸۰	۱۰-۹ تلسکوپ خیلی بزرگ (VLT)
۱۸۱	۱۱-۹ تداخل سنج‌های نوری
۱۸۱	۱۲-۹ تلسکوپ‌های روباتیک
۱۸۲	۱۳-۹ تلسکوپ فضایی هابل
۱۸۵	<b>فصل ۱۰: خانواده ستارگان</b>
۱۸۵	۱-۱۰ درخشندگی ستارگان
۱۸۶	۲-۱۰ فاصله ستارگان
۱۸۷	پارسک
۱۸۸	۳-۱۰ هیپارکوس و گایا
۱۸۹	۴-۱۰ رنگ و دمای سطحی ستاره
۱۹۰	۵-۱۰ طیف ستارگان
۱۹۲	۶-۱۰ اختلاف منظر طیف نمودی
۱۹۳	۷-۱۰ نمودار هردسبرونگ-راسل
۱۹۵	۸-۱۰ اندازه ستارگان: اندازه‌گیری مستقیم
۱۹۷	۹-۱۰ جرم ستارگان
۱۹۸	۱۰-۱۰ مدت زندگی ستارگان
۲۰۱	<b>فصل ۱۱: ستاره‌های کهن سال</b>
۲۰۳	۱-۱۱ فرایند سه آلفا
۲۰۶	۲-۱۱ ستارگان متغیر

- ۲۰۶..... ۱۱-۳ سحابی سیاره‌ای
- ۲۰۷..... ۱۱-۴ کوتوله سفید
- ۲۰۸..... کشف کوتوله‌های سفید
- ۲۰۹..... آینده کوتوله‌های سفید
- ۲۰۹..... کوتوله‌های سیاه
- ۲۱۰..... ۱۱-۵ ستارگان پرجرم
- ۲۱۲..... ۱۱-۶ ابرنواختر نوع دو
- ۲۱۳..... سحابی خرچنگ
- ۲۱۴..... ابرنواختر ۱۹۸۷A
- ۲۱۶..... ۱۱-۷ ستاره‌های نوترونی
- ۲۱۸..... ۱۱-۸ کشف تپنده‌ها
- ۲۲۳..... ۱۱-۹ سیاه‌چاله

## فصل ۱۲: در جستجوی جهان‌های دیگر..... ۲۲۵

- ۲۲۶..... ۱۲-۱ شناسایی دیداری سیاره‌ها در اطراف ستاره‌های معمولی
- ۲۲۶..... ۱۲-۲ سیاراتی که در فروسرخ مشاهده شده‌اند
- ۲۲۷..... ۱۲-۳ سیاره‌ای که تلسکوپ فضایی هابل در نور مرئی کشف کرد
- ۲۲۸..... ۱۲-۴ شیوه سرعت شعاعی (لنگش دوپلری) در شناسایی سیارات
- ۲۳۰..... ۱۲-۵ کشف اولین سیاره به دور ستاره‌ای خورشیدگونه
- ۲۳۳..... ۱۲-۶ ریزعدسی گرانشی
- ۲۳۶..... ۱۲-۷ اخترسنجی
- ۲۳۷..... ۱۲-۸ گذر سیاره‌ای
- ۲۳۹..... ۱۲-۹ رصدخانه فضایی کپلر

## فصل ۱۳: آیا ما تنها هستیم؟ جستجوی حیات در فراسوی زمین..... ۲۴۳

- ۲۴۴..... ۱۳-۱ بیستی
- ۲۴۵..... ۱۳-۲ تاریخچه
- ۲۴۶..... ۱۳-۳ سیگنال Wow!
- ۲۴۷..... ۱۳-۴ پروژه‌های سرنديپ و فونیکس

۲۴۹	..... ۱۳-۵ معادلهٔ دریک
۲۵۲	..... ۱۳-۶ ستی در باند اپتیکی
۲۵۵	..... ۱۳-۷ آیا می‌توانیم به شاهدهی دال بر تمدن‌های دیگر در نزدیکی خود دست‌یابیم؟ ...
۲۵۶	..... ۱۳-۸ آیندهٔ ستی در باند رادیویی
۲۶۱	..... <b>فصل ۱۴: جهان جزیره‌ای ما</b>
۲۶۱	..... ۱۴-۱ راه‌شیری
۲۶۲	..... ۱۴-۲ خوشه‌های باز ستاره‌ای
۲۶۳	..... ۱۴-۳ خوشه‌های کروی
۲۶۴	..... ۱۴-۴ محیط بین‌ستاره‌ای، و سحابی‌های نشری و تاریک
۲۶۶	..... ۱۴-۵ اندازه، شکل و ساختمان راه‌شیری
۲۶۸	..... ۱۴-۶ مشاهدات خط هیدروژن
۲۷۲	..... ۱۴-۷ یک نقشهٔ فروسرخ از کهکشان راه‌شیری
۲۷۳	..... ۱۴-۸ سیاه‌چاله‌ای فوق‌سنگین در قلب کهکشان ما
۲۷۴	..... ۱۴-۹ جایگاه ما در جهان
۲۷۴	..... ۱۴-۱۰ دیگر کهکشان‌ها
۲۷۴	..... کهکشان‌های بیضوی
۲۷۵	..... کهکشان‌های مارپیچ
۲۷۶	..... کهکشان‌های نامنظم
۲۷۶	..... ۱۴-۱۱ گروه‌ها و خوشه‌های کهکشانی
۲۷۸	..... ۱۴-۱۲ آب‌خوشه‌ها
۲۸۳	..... <b>فصل ۱۵: شگفتی‌های آسمان در نیم‌کرهٔ جنوبی</b>
۲۸۳	..... ۱۵-۱ راه‌شیری
۲۸۴	..... ۱۵-۲ قلب راه‌شیری
۲۸۵	..... ۱۵-۳ سیاه‌چاله‌ای فوق‌سنگین در قلب کهکشان ما
۲۸۶	..... ۱۵-۴ صورت فلکی قنطورس
۲۸۶	..... آلفا قنطورس
۲۸۷	..... امگا قنطورس

- ۲۸۸..... یک سیاه‌چاله مرکزی؟
- ۲۸۹..... ۱۵-۵ صورت فلکی صلیب جنوبی
- ۲۹۰..... ۱۵-۶ صورت فلکی شاه‌تخته
- ۲۹۳..... ۱۵-۷ صورت فلکی بادبان
- ۲۹۴..... ۱۵-۸ ابرهای ماژلانی
- ۲۹۵..... ابر کوچک ماژلانی
- ۲۹۶..... ابر بزرگ ماژلانی
- ۲۹۷..... ۱۵-۹ ابرنواختر ۱۹۷۸A
- ۲۹۷..... فاصله تا SN۱۹۸۷A
- ۲۹۸..... ۱۵-۱۰ خوشه کروی ۴۷ توکانا
- ۲۹۹..... جستجو به دنبال سیارات درون ۴۷ توکانا
- ۳۰۰..... تپنده‌های میلی‌ثانیه‌ای در ۴۷ توکانا
- ۳۰۰..... ۱۵-۱۱ قنطورس آ
- ۳۰۲..... هسته فعال کهکشانی
- فصل ۱۶: حق با اینشتین است!** ۳۰۵.....
- ۳۰۸..... ۱۶-۱ دو خورشیدگرفتگی مهم
- ۳۱۰..... ۱۶-۲ عدسی‌های گرانشی
- ۳۱۳..... ۱۶-۳ شبکه ماهواره‌ای سامانه موقعیت‌یاب جهانی
- ۳۱۴..... ۱۶-۴ تپنده دوتایی
- فصل ۱۷: سیاه‌چاله؛ لازم به ترس نیست!** ۳۲۱.....
- ۳۲۱..... ۱۷-۱ سیاه‌چاله چیست؟
- ۳۲۳..... ۱۷-۲ سیاه‌چاله شوارتس‌شیلد
- ۳۲۴..... ۱۷-۳ سیاه‌چاله کر
- ۳۲۶..... ۱۷-۴ چگونه می‌توانیم آن‌ها را کشف کنیم؟
- ۳۲۶..... آیا می‌توانیم آن‌ها را ببینیم؟
- ۳۲۶..... با استفاده از ریزعدسی گرانشی
- ۳۲۸..... با تعیین جرم یک ستاره همدم ناپیدا
- ۳۳۰..... ۱۷-۵ سیاه‌چاله‌های فوق سنگین

۳۳۳	..... ۱۷-۶ کهکشان فعال NGC ۴۲۶۱
۳۳۴	..... ۱۷-۷ اندازه هسته فعال کهکشانی
۳۳۵	..... ۱۷-۸ اندازه گیری جرم سیاه چاله های فوق سنگین
۳۳۵	..... ۱۷-۹ کهکشان M۸۴
۳۳۶	..... ۱۷-۱۰ کهکشان راه شیری
۳۳۸	..... ۱۷-۱۱ سیاه چاله ها کاملاً سیاه نیستند
۳۴۰	..... ۱۷-۱۲ آیا ممکن است سیاه چاله ها هم اکنون در حال تبخیر باشند؟
۳۴۳	..... <b>فصل ۱۸: زمان</b>
۳۴۳	..... ۱۸-۱ زمان خورشیدی محلی
۳۴۳	..... ۱۸-۲ زمان میانگین گرینویچ
۳۴۴	..... ۱۸-۳ معادله زمان
۳۴۵	..... ۱۸-۴ زمان جهانی
۳۴۶	..... ۱۸-۵ زمان نجومی
۳۴۶	..... ۱۸-۶ انواع ساعت ها
۳۴۶	..... ساعت آفتابی
۳۴۸	..... ساعت های آبی
۳۴۸	..... ساعت های آونگی
۳۴۹	..... ساعت های کوارتز
۳۵۰	..... ساعت های اتمی
۳۵۲	..... ۱۸-۷ انتقال زمان: نه به آن سادگی که به نظر می رسد
۳۵۳	..... ساعت های رادیویی
۳۵۴	..... ۱۸-۸ تپنده ها: بهترین ساعت های طبیعی در جهان
۳۵۴	..... ۱۸-۹ معیار زمان مطلق: زمان کیهانی
۳۵۵	..... ۱۸-۱۰ اتساع زمان گرانشی
۳۵۵	..... ۱۸-۱۱ از چه موقع زمان آغاز شد؟
۳۵۷	..... <b>فصل ۱۹: میراث هابل</b>
۳۶۰	..... ۱۹-۱ قانون هابل



- ۱۹-۲ تلسکوپ فضایی هابل ..... ۳۶۶
- یک آینهٔ مخدوش ..... ۳۶۸
- ۱۹-۳ دانش هابل ..... ۳۷۱
- مشاهدهٔ SN۱۹۸۷A ..... ۳۷۱
- اندازه‌گیری مقیاس فاصلهٔ جهان، ثابت هابل و سن جهان ..... ۳۷۲
- شومیکر-لوی ۹ ..... ۳۷۳
- پلوتون و کمر بند کوپیر ..... ۳۷۴
- سیارات فراخورشیدی در برآمدگی کیهانی ..... ۳۷۵
- جو سیارات فرامنظومه‌ای ..... ۳۷۵
- فوران‌های پرتو گاما ..... ۳۷۵
- مطالعات ماده تاریک و انرژی تاریک ..... ۳۷۵
- تشکیل و تحول کهکشان: میدان‌های ژرف هابل ..... ۳۷۶
- تصاویر میراث هابل ..... ۳۷۹
- فصل ۲۰: جهان خشن** ..... ۳۸۱
- ۲۰-۱ کشف فوران‌های پرتو گاما ..... ۳۸۱
- ۲۰-۲ منبع این فوران‌های پرتو گاما چیست؟ ..... ۳۸۳
- ۲۰-۳ چه مقدار انرژی آزاد می‌شود؟ ..... ۳۸۶
- ۲۰-۴ عامل فوران‌های پرتو گاما چیست؟ ..... ۳۸۷
- ۲۰-۵ فوران‌های بلنددوره ..... ۳۸۸
- چه ستاره‌هایی موجب فوران‌های بلنددوره پرتو گاما می‌شوند؟ ..... ۳۸۹
- ۲۰-۶ آیا باید بترسیم؟ ..... ۳۹۱
- ۲۰-۷ مهبانگ و آغاز جهان ..... ۳۹۲
- ۲۰-۸ تورم ..... ۳۹۴
- ۲۰-۹ خط زمان برای جهان آغازین ..... ۳۹۶
- یک نکته ..... ۴۰۰
- فصل ۲۱: جهان ناپیدا: ماده تاریک و انرژی تاریک** ..... ۴۰۳
- ۲۱-۱ ماده تاریک در خوشه‌های کهکشانی ..... ۴۰۴
- ۲۱-۲ ماده تاریک در کهکشان‌های مارپیچ ..... ۴۰۵

- ۲۱-۳ توزین یک کهکشان: جرمی بیش از آنچه مشاهده می‌کنیم وجود دارد ..... ۴۰۷
- ۲۱-۴ جهان آغازین و تشکیل کهکشان‌ها ..... ۴۰۹
- ۲۱-۵ به دام انداختن گاز ..... ۴۱۰
- ۲۱-۶ عدسی گرانشی ..... ۴۱۱
- ۲۱-۷ چه مقدار مادهٔ سیاه غیرباریونی وجود دارد؟ ..... ۴۱۲
- ۲۱-۸ مادهٔ تاریک چیست؟ ..... ۴۱۲
- آکسیون‌ها ..... ۴۱۳
- WIMP ..... ۴۱۴
- نتایج اولیه ..... ۴۱۹
- در آینده چطور؟ ..... ۴۱۹
- ۲۱-۹ چقدر ماده تاریک و معمولی وجود دارد، و بقیه چیست؟ ..... ۴۲۰
- ۲۱-۱۰ شواهدی بر انرژی تاریک ..... ۴۲۱
- ۲۱-۱۱ ماهیت انرژی تاریک ..... ۴۲۴
- فصل ۲۲: پس تاب آفرینش ..... ۴۲۷**
- ۲۲-۱ پیش‌بینی‌های مه‌بانگ «داغ»؛ حضور تابش درون جهان ..... ۴۲۷
- ۲۲-۲ کشف ناخواستهٔ زمینهٔ ریزموج کیهانی ..... ۴۲۹
- ۲۲-۳ آنچه به زمینهٔ ریزموج کیهانی انجامید؛ باور امروزی ما ..... ۴۳۰
- ۲۲-۴ کاوشگر زمینهٔ کیهانی ..... ۴۳۱
- چهرهٔ خدا ..... ۴۳۳
- ۲۲-۵ دلیل افت و خیزها در زمینهٔ ریزموج کیهانی ..... ۴۳۴
- ۲۲-۶ کاوشگر ناهمسانگردی ریزموج ویلکینسون و فضایی پلانک ..... ۴۳۶
- ۲۲-۷ مشاهدات زمینی و با استفاده از بالون ..... ۴۳۸
- ۲۲-۸ مأموریت پلانک ..... ۴۳۸
- ۲۲-۹ نتایج پلانک ..... ۴۳۹
- مشاهدات زمینهٔ ریزموج کیهانی چه چیزی دربارهٔ جهان به ما گفته‌اند؟ ..... ۴۳۹
- ۲۲-۱۰ میراث پلانک ..... ۴۴۳
- ۲۲-۱۱ جهان مخصوص خود بسازید ..... ۴۴۴
- ۲۲-۱۲ تورم و امواج گرانشی ..... ۴۴۴

۲۲-۱۳ آیا تمام این‌ها باهم جمع می‌شود؟ ..... ۴۴۵

### فصل ۲۳: تابی‌نهایت و فراتراز آن: نگاهی به کیهان ..... ۴۴۹

۲۳-۱ مدل‌های مهبانگ جهان ..... ۴۴۹

۲۳-۲ انبساط جهان و مشکل سن آن ..... ۴۵۱

۲۳-۳ قرمزگرایی کیهان‌شناختی ..... ۴۵۲

۲۳-۴ مدل حالت پایدار جهان ..... ۴۵۲

۲۳-۵ مهبانگ یا حالت پایدار؟ ..... ۴۵۳

۲۳-۶ تورم و تشکیل عناصر اولیه ..... ۴۵۴

۲۳-۷ ترکیب جهان ..... ۴۵۵

۲۳-۸ جهانی مناسب برای حیات هوشمند ..... ۴۵۵

۲۳-۹ چندجهانی ..... ۴۵۸

۲۳-۱۰ نظریهٔ ریسمان: رهیافتی دیگر به سوی چندجهانی ..... ۴۵۸

۲۳-۱۱ فراتراز خیال ما ..... ۴۶۰

۲۳-۱۲ آیندهٔ جهان ..... ۴۶۰