۴۷ سال انتشار پیوسته ● بیش از ۹۰هزار خواننده در ماه

لطیفه‌های علمی-تخیلی!
صفحه ۹۲

۵۴۷

دانشمند

ماه‌نامه اردیبهشت ۱۳۸۸ ۱۰۰صفحه، ۱۰۰۰ تومان www.daneshmandonline.ir

نگاهی دوباره به جنگ‌افزارهای ایرانی

«کپلر» در جست‌وجوی حیات فرازمینی

این تارهای شگفت‌انگیز

اشتباهات علمی در باورهای عامه

برنجی مقاوم در برابر طوفان

ماهی‌ها هم خونگرم می‌شوند!

شگفت انگیز

سفری به جهان کوانتومی

شگفت انگیز

سفری به جهان کوانتومی

با ورود به دنیایی که در دل اتم قرار دارد، جهان کلاسیکی فرو می‌پاشد و جهان کوانتومی با قوانین خاص خود رخ می‌نماید...

دیوید لیندلی
ترجمه: علی‌اکبر قزوینی

انگلیسی‌ها ضرب‌المثلی دارند که می‌گوید: "چیزهای خوب در بسته‌های کوچک می‌آیند"، و شاید این ضرب‌المثل در مورد این ویژه‌نامهٔ جمع‌وجور و کم‌حجم نیز صادق باشد. با خواندن این ویژه‌نامه، جهانی را خواهید شناخت که گرچه بنیاد هر آن‌چه که می‌بینیم بر آن بنا شده است، اما تقریبا برای همه ما ناآشنا و غریب است. در این جهان، قوانین عادی کارایی خود را از دست می‌دهند، و فیزیک نیوتنی ـ که آپولو را بر سطح ماه نشاند ـ بی‌اعتبار می‌شود. اینجا دنیای دیگری است، دنیایی کاملا متفاوت.

شاید بیگانگی ما با این جهان و نظریه کوانتومی نیز ناشی از همین "تفاوت" باشد. نام "کوانتوم" آن‌چنان با مفاهیم و اندیشه‌های دشوار، عجیب و دور از ذهن پیوند خورده است که برای بسیاری، ورود به قلمرو آن ناممکن می‌نماید. در این‌که درک نظریه کوانتومی دشوار است، هیچ بحثی نیست. این دشواری را می‌توان از گفته "ریچارد فاینمن"، یکی از چهره‌های مشهور فیزیک کوانتومی نیز دریافت: "... می‌توانم با اطمینان بگویم که هیچ‌کس از مکانیک کوانتومی سر در نمی‌آورد!"

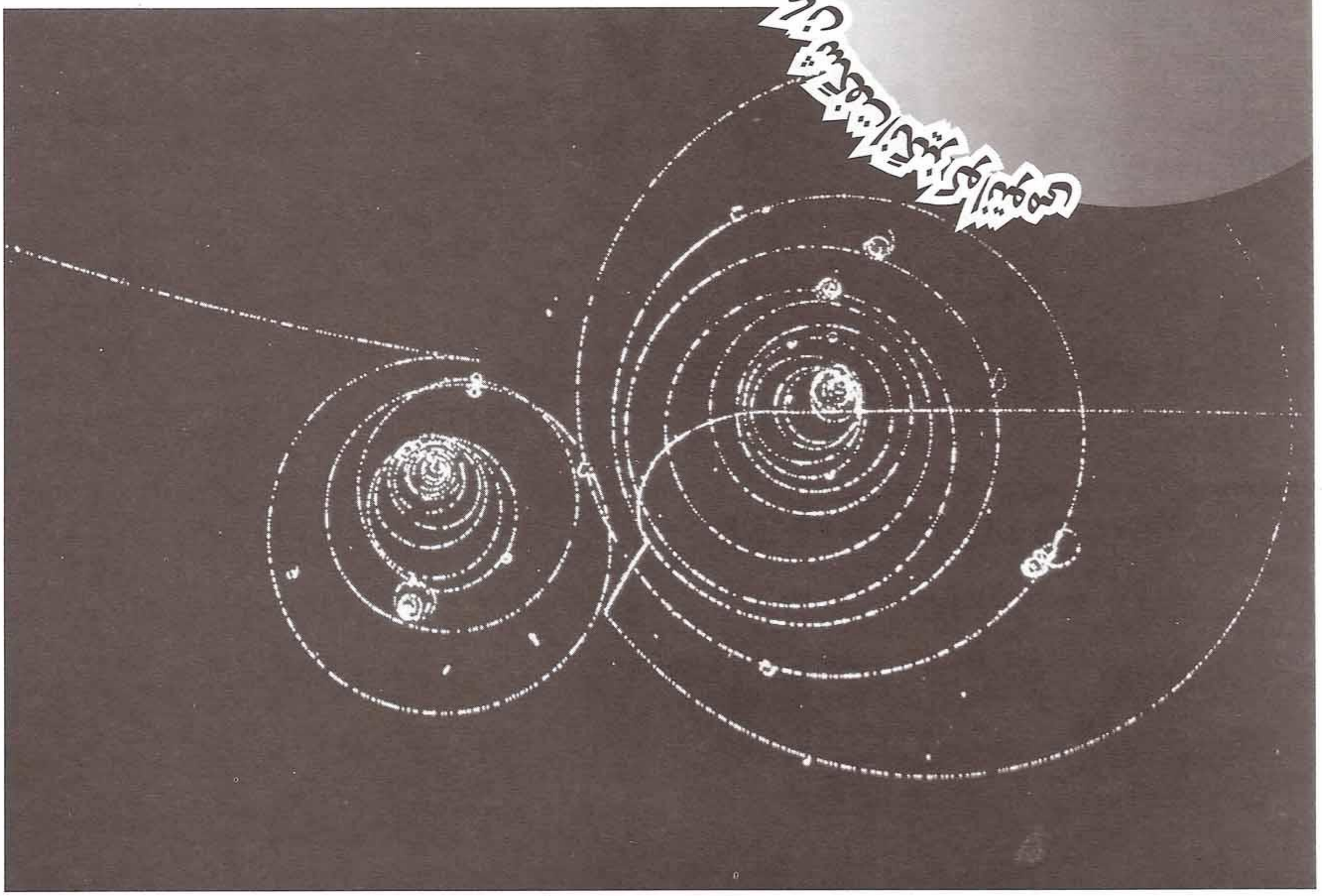
اما زمانی مردم از حرف‌های "نیوتن" هم چیزی نمی‌فهمیدند، و این ماجرا در مورد نظریه‌های "آلبرت اینشتین" نیز تکرار شد. پس از گذشت بیش از سه قرن، اکنون هر دانش‌آموز دبیرستانی با قوانین نیوتن آشنا است و از آنها برای حل مسائل استفاده می‌کند. نظریه‌های اینشتین، با این‌که هنوز هم به طور کامل درک نشده‌اند، اما تا حدودی ملموس‌تر شده‌اند. حداقل، عباراتی همچون "انحنای فضا ـ زمان"، "سیاه‌چاله‌ها"، "جهان چهار بعدی" و... چندان ناآشنا نیستند. دلیل آن شاید این باشد که نظریه‌های اینشتین، همانند نظریه‌های نیوتن، "کلاسیکی" هستند. اما با ورود به دنیایی که در دل اتم قرار دارد، جهان کلاسیکی فرو می‌پاشد و جهان کوانتومی با قوانین خاص خود رخ می‌نماید. برای درک این جهان، باید ذهن خود را از باورهای قبلی ـ و کلاسیکی ـ پاک کرد. با این همه، این دو جهان به هم وابسته‌اند؛ اما چگونه این وابستگی، که انتظار می‌رود با دستیابی به "نظریه کوانتومی گرانش" کشف شود، از آرزوهای برآورده‌نشده فیزیکدان‌هاست. در صورت ارائه چنین نظریه‌ای، شاهد انقلابی دیگر در علم خواهیم بود.

اما این ویژه‌نامه... با این ویژه‌نامه به سفری در جهان کوانتومی خواهیم رفت: از زمانی که نخستین جرقه در ذهن "ماکس پلانک" زده شد شروع خواهیم کرد، و به پژوهش‌های در حال پیشرفتی خواهیم پرداخت که طی چند سال اخیر صورت گرفته‌اند. این ویژه‌نامه، نسخه فارسی یکی از ضمائم مجله "نیو ساینتیست" (New Scientist) است که در زمینه فیزیک کوانتومی منتشر شده است؛ و با زبانی ساده به بیان ویژگی‌ها و ارائه شگفت‌انگیزترین دستاوردهای آن می‌پردازد. مطالعه این ویژه‌نامه، نخستین گام شما برای ورود به جهان کوانتومی خواهد بود و با خواندن آن، سوالات تازه‌ای در ذهن شما شکل خواهد گرفت که پاسخ همه آنها را در این ویژه‌نامه نخواهید یافت. ویژه نامه حاضر، در حکم دروازه‌ای است برای ورود به دنیای پر رمز و راز و شگفت‌انگیز فیزیک کوانتومی.

اجازه بدهید که بیش از این به مقدمه نپردازیم، و باز هم یادآوری کنیم که این ویژه‌نامه را "با فکر باز" بخوانید. احتمالا اکنون برای رفتن به جهان کوانتومی آماده شده‌اید. سفر خوش!

در این ویژه‌نامه می‌خوانید:

پیش گفتار /۴۸
در آغاز... /۴۹
از اینجا به آنجا /۵۱
ارتباط‌های شبح‌گون /۵۴
جاسوسی در کمین /۵۷
معمای بمب کوانتومی /۶۰
اینجا هیچ چیز قطعی نیست /۶۴
مرده یا زنده؟ /۶۸
خانه درگشوده /۷۲
توان موازی /۷۵
ریسمان‌ها و تکینگی‌ها /۷۸
...و جهان کلاسیکی شد! /۸۱



پیش گفتار

"سخنرانی را زیاد جدی نگیرید... فقط راحت بنشینید و از آن لذت ببرید. من می‌خواهم به شما بگویم که طبیعت چگونه رفتار می‌کند. اگر شما بپذیرید که ممکن است رفتار جهان به آن‌چه که من خواهم گفت شبیه باشد، در آن صورت آن را موجودی دلپذیر و فریبا خواهید یافت. به خودتان نگویید که: آخر چگونه ممکن است رفتار آن چنین باشد؟ چون در آن صورت... به درون کوچه بن‌بستی خواهید افتاد که تاکنون هیچ‌کس نتوانسته است از آن فرار کند. کسی نمی‌داند که رفتار طبیعت چگونه می‌تواند چنین باشد..."

این سخنی بود از "ریچارد فاینمن" در مورد نظریه کوانتومی. اگر هشدار او را جدی بگیرید به نفع شماست. زمانی که به پایان این ویژه‌نامه می‌رسید، به عجیب‌ترین مفاهیم یک نظریه واقعا غیرعادی پی‌خواهید برد. اما اگر سعی کنید آن را به صورتی آشنا تصویر کنید، راهی را که در پی گرفته‌اید نومیدانه به درماندگی می‌انجامد. جهان کوانتومی واقعا با جهان عادی تفاوت دارد، و تنها راه ورود به آن، "کنار گذاشتن ناباوری" است. پس فکر خود را آزاد بگذارید تا وقتی که این ویژه‌نامه را به پایان می‌رسانید، تبدیل به یک نابغه شده باشید!

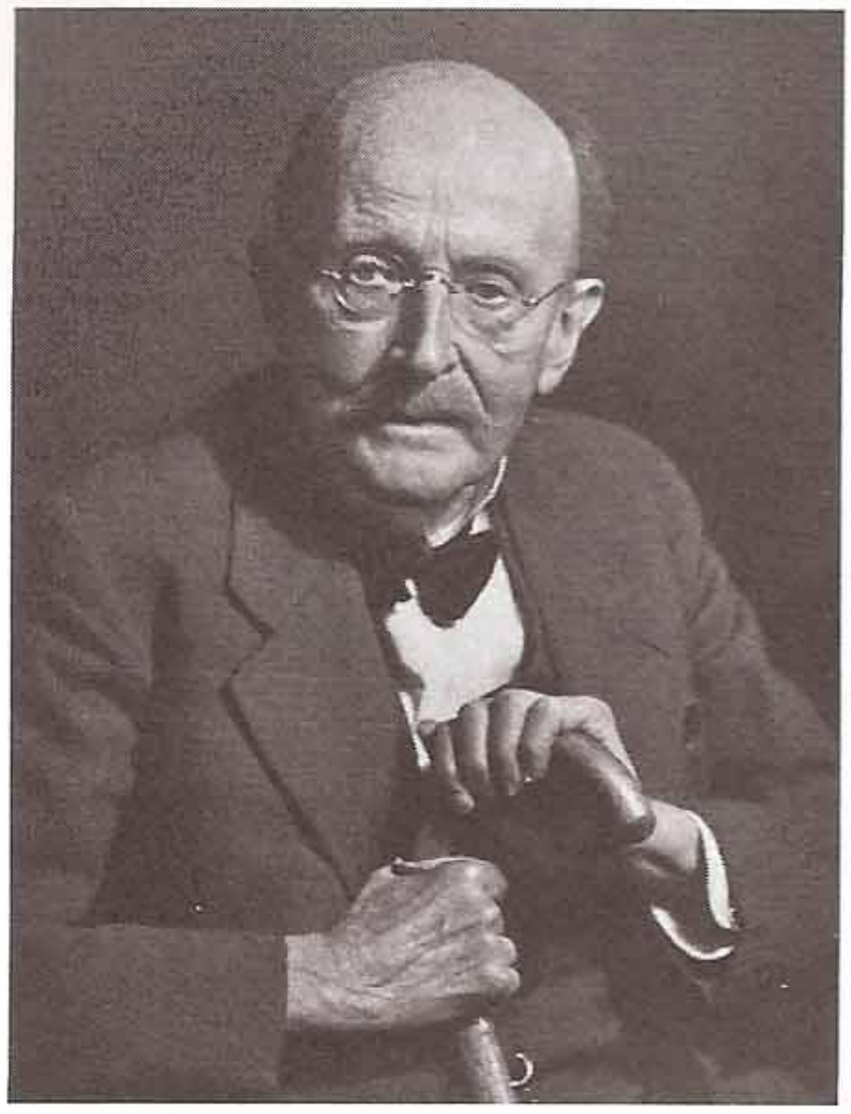
دیوید لیندلی

در آغاز...

در روزگاران دور، مردی زندگی می‌کرد به نام نیوتن، و جهان جایی امن برای همه بود. در آن روزگار وقتی به یک توپ بیلیارد ضربه‌ای می‌زدید، می‌توانستید بگویید که با چه سرعتی و در چه جهتی حرکت خواهد کرد؛ و وقتی توپ می‌ایستاد، دقیقا می‌دانستید که به کجا رسیده است. این تصورهای ساده، بدیهی و حتی لازم به نظر می‌رسیدند. بیشتر مردم معتقدند بودند که اگر فیزیک بخواهد به کار خود ادامه دهد، باید بر چنین پایه‌های استواری قرار گرفته باشد.

اما در اکتبر سال ۱۹۰۰، فیزیکدانی به نام "ماکس پلانک" اندیشه تازه‌ای را به انجمن فیزیک آلمان ارائه کرد. پلانک مردی میانه‌رو بود، و در ۴۲ سالگی برای ایجاد انقلابی بزرگ در فیزیک کمی پیر به نظر می‌رسید؛ ولی کشف او در حال زیر و رو کردن فیزیک کلاسیک توپ بیلیارد بود. آن‌چه که او به شرح آن پرداخت، پاسخ به یک سوال قدیمی بود که: "چرا رنگ تابش یک جسم درخشان، از سرخ به نارنجی تغییر می‌کند و در نهایت، هنگامی که دمای آن افزایش می‌یابد، به رنگ آبی در می‌آید؟" پلانک دریافت که اگر تابش انرژی را همانند ماده به صورت بسته‌های گُسسته فرض کنیم، آن‌گاه می‌توان به پاسخی درست دست یافت. او هر یک از این بسته‌های کوچک انرژی را "کوانتوم"[1] نامید که در لاتین به معنای "مقدار" است و در جمع "کوانتا"[2] خوانده می‌شود. ظاهرا در آن زمان پلانک تصور می‌کرد بعدها شرح دقیق‌تر این کوانتوم‌ها ارائه خواهد شد.

اما خیلی زود معلوم شد که "کوانتِش"[3] انرژی (تقسیم آن به بسته‌های ناپیوسته)، در واقع یک قانون جدید و بنیادی طبیعت است. پلانک که با فیزیک کلاسیک آموزش یافته بود، این نتیجه‌گیری را چندان دوست نداشت، و تا زمان مرگش در برابر آن مقاومت کرد. او جمله مشهوری دارد که می‌گوید: "نظریه‌های جدید علمی جای نظریه‌های قبلی را می‌گیرند، نه به خاطر این‌که مردم افکارشان



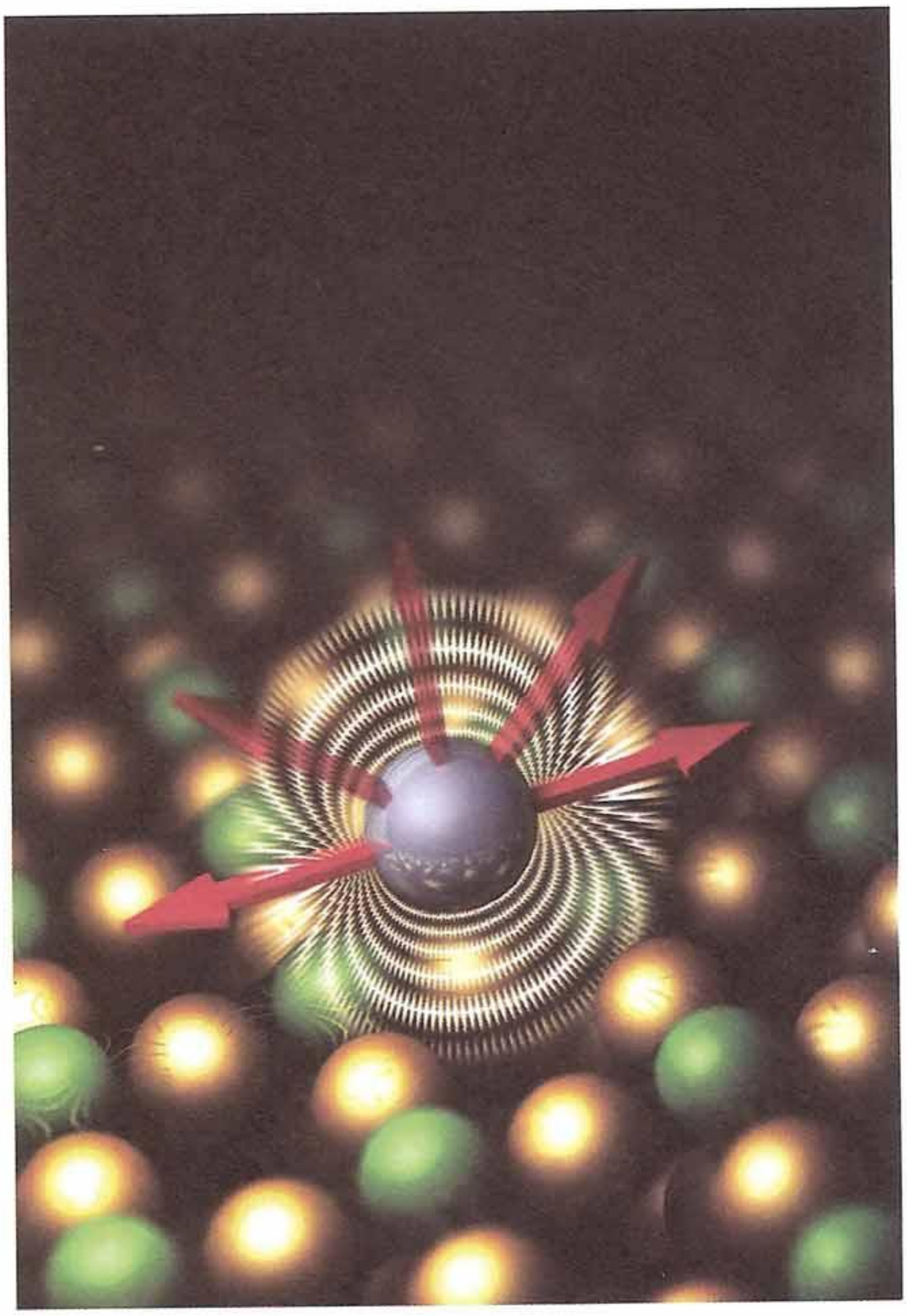
ماکس پلانک در سال ۱۹۴۷. کشف این فیزیکدان برجسته، فیزیک کلاسیک را زیر و رو کرد

را تغییر می‌دهند، بلکه تنها به این دلیل که افراد قدیمی می‌میرند."

اگر پلانک نتوانست با مفاهیم نظریه کوانتومی کنار بیاید، شگفت‌آور نیست، اما اگر شما نتایج آن را بپذیرید، ضرورتا آن‌چه که در واقعیت به نظر می‌رسد، و یا آن‌چه که عقل سلیم و فیزیک نیوتنی حکم می‌کنند، بی‌ارزش خواهد شد. وقتی به اشیا نگاه می‌کنید، تغییر می‌کنند، و رفتار آنها غیر قابل پیش‌بینی است!

بنابر اصل عدم قطعیت، اصلی که ناگزیر از دل نظریه کوانتومی سر در می‌آورد، هرگز نمی‌توانید چیزی را با دقتی که دوست دارید اندازه‌گیری کنید؛ به عبارت دیگر، اندازه‌گیری‌ها بر آن‌چه که مورد اندازه‌گیری است، تاثیر می‌گذارند. سپس مفهوم همزادی موج ـ ذره پیش می‌آید، که به عنوان مثال می‌گوید یک الکترون، گاهی همانند موج و گاهی همانند ذره رفتار می‌کند. به نظر می‌رسد آن‌چه که تمامی این مفاهیم می‌خواهند القا کنند این است که اجسام فیزیکی ـ حتی اگر واقعی باشند ـ به هیچ‌وجه شبیه چیزهایی نیستند که هر کس به طور عادی تصور می‌کند.

اما چگونه چنین نتایج عجیب و هراس‌انگیزی از این عبارت به ظاهر بی‌ضرر پیروی می‌کند که می‌گوید: انرژی از بسته‌های کوچکی به نام کوانتوم تشکیل شده است؟ "ریچارد فاینمن"، فیزیکدان آمریکایی، دوست داشت مسئله را با مثالی ساده بیان دارد. در مورد نور بازتابیده از یک آینه می‌دانیم که از هیچ آینه‌ای بازتابش کامل صورت نمی‌گیرد. بنابراین در حدود ۹۵ درصدِ نور از سطح آینه بازتابیده می‌شود، در حالی که ۵ درصد باقیمانده یا از درون آن گذر می‌کند، یا درآشامیده می‌شود (در آن جذب می‌شود)، و یا به طریقی دیگر از دست می‌رود.



در دوران "پیش کوانتوم" هیچ مشکلی وجود نداشت. وقتی نور به سطح آینه‌ای فرود می‌آمد، به صورت جریان پیوسته‌ای از انرژی در نظر گرفته می‌شد: بیشترِ آن از سطح آینه بازتابیده می‌شد، اما بخشی از آن از درون آینه گذر می‌کرد. اما پلانک نور را به صورت جریانی از کوانتوم‌ها در نظر گرفت و هر کوانتوم را "فوتون" نامید. از آنجا که فوتون تقسیم‌ناپذیر است، بنابراین یا باید بازتاب یابد و یا به طور کامل در آشامیده شود. نمی‌توان فوتونی داشت که ۹۵ درصد آن به سمتی و باقی‌ماندهٔ آن به سمتی دیگر برود. اما در مورد چگونگی اثر آینه بر نور، باید گفت که از هر ۲۰ فوتون، ۱۹تای آن از سطح آینه بازتابیده می‌شوند، در حالی که فوتون باقی‌مانده و سرکش به راه خود ادامه می‌دهد. چه کسی در مورد کار تک‌تک فوتون‌ها تصمیم می‌گیرد؟

نکته اصلی در همین پرسش نهفته است. نظریه کوانتومی می‌گوید آن‌چه که برای هر تک فوتون روی می‌دهد، به هیچ وجه قابل پیش‌بینی نیست. شانس بازتابیده شدن هر فوتون ۹۵ درصد و شانس گذر از آینه یا درآشامیده شدن ۵ درصد است؛ و این همهٔ آن چیزی است که می‌توان گفت. هیچ دستمایه دیگری، مثل سرشتی پنهان مانده و یا سرنخی ناپیدا، در مورد فوتون در اختیار نداریم تا آگاهی دقیق‌تری از آن‌چه که برای هر فوتون روی می‌دهد به دست آوردیم. غیر قابل پیش‌بینی بودن، امری است ذاتی.

مثال دیگری نیز در این مورد وجود دارد. اگر یک عینک آفتابی خود را جلوی چشمانتان بچرخانید، تغییراتی در مقدار نوری که از آن گذر می‌کند خواهید دید. نور، آن‌گونه که "جیمز کلرک ماکسول" در سال ۱۸۶۴ نشان داد، از امواج الکترومغناطیسی است که می‌تواند قطبیده[4] شود؛ درست مانند ریسمانی که به بالا و پایین، از سمتی به سمت دیگر، و یا به صورتی بینابین به حرکت در می‌آوریم. عینک‌های آفتابی، نور قطبیدهٔ قائم را از خود عبور می‌دهند. ولی مانع عبور نور افقی می‌شوند که خاستگاه بیشتر درخشش‌های خیره‌کننده و بازتابش‌هاست.

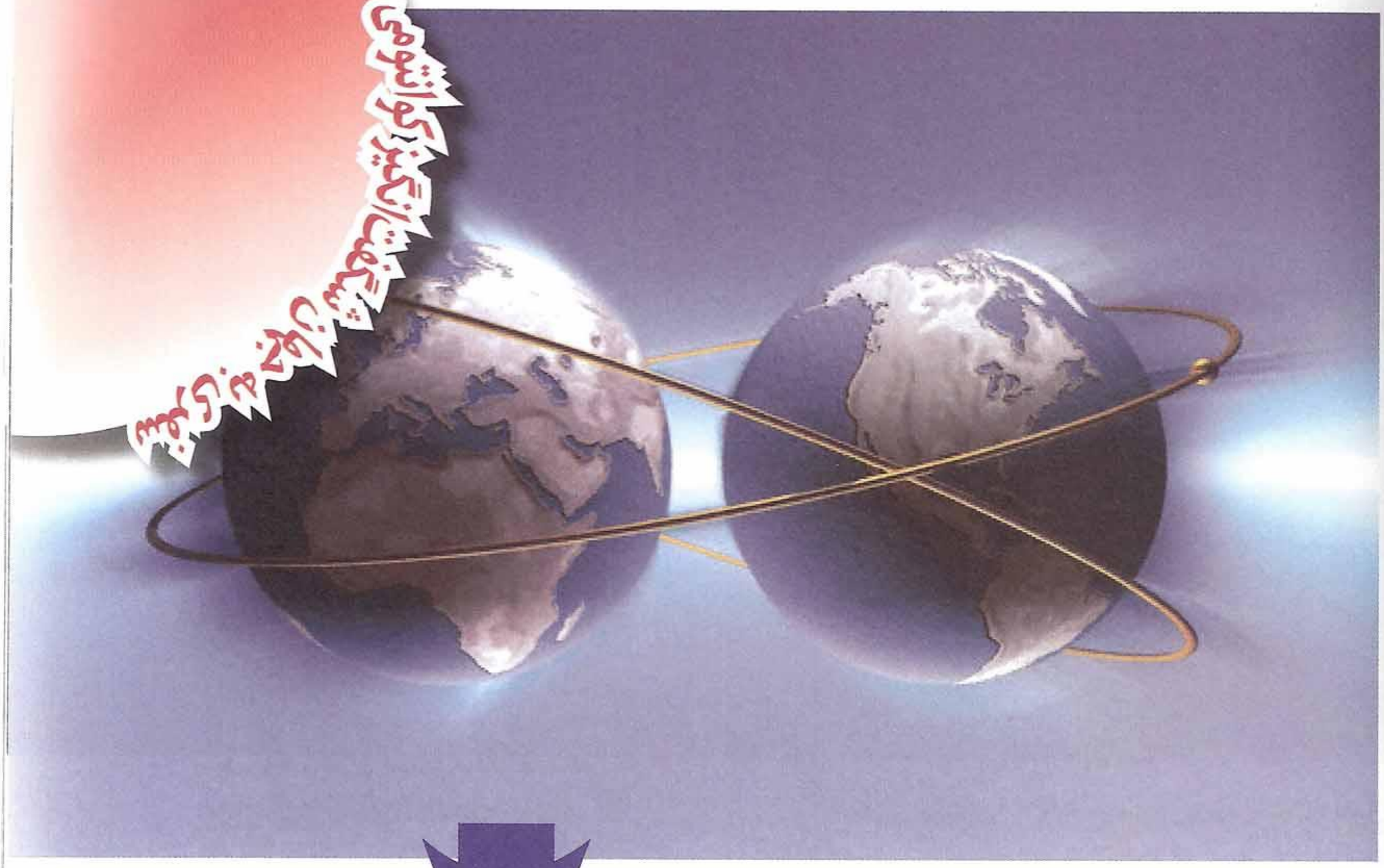
یک فوتون نور که به عینک آفتابی شما می‌رسد، تنها دو انتخاب دارد: گذشتن یا بازگشتن. این فوتون کدام‌یک را انتخاب خواهد کرد؟ در اینجا نیز تنها کاری که می‌توان کرد، این است که احتمال‌های موجود را ارزیابی کنیم. ما هرگز قادر به پیش‌بینی رفتار یک فوتون نخواهیم بود.

در عصر فیزیک کلاسیک، شما می‌توانستید رفتار یک توپ بیلیارد را، هنگامی که به سمت یک توپ دیگر و یا گوشه میز به حرکت در می‌آید، پیش‌بینی کنید. برای این پیش‌بینی، به جرم، سرعت، جهت آن، احتمالا آهنگ چرخش توپ، و نیز سختی یا فَنَرواری آن هنگام برخورد، و مواردی از این دست نیاز داشتید. نام این فهرست از سرشت‌ها، "حالت"[5] کلاسیکی توپ بیلیارد خوانده می‌شود؛ که هر چه بهتر حالت توپ را می‌دانستید، بهتر می‌توانستید رفتار آن را پیش‌بینی کنید. اما نظریه کوانتومی بر همه اینها خط بطلان کشید. تنها کاری که می‌توان کرد این است که "حالت کوانتومی" یک فوتون را برحسب احتمال‌های آن حالت توصیف کنیم، و تغییر این حالت‌ها بستگی به این دارد که کدام‌یک از رفتارهای فوتون مورد نظر شماست. فوتونی که در حال حرکت به سمت آینه است، هنگامی که به آن برسد، یا بازتابیده می‌شود و یا از آن گذر می‌کند. اما اگر همان فوتون به سمت یک صفحهٔ قطبنده در حرکت باشد، آن‌گاه آن را باید به صورت دیگری توصیف کرد. برای یک توپ بیلیارد کلاسیک، مجموعه‌ای از سرشت‌ها ـ جرم، سرعت و مواردی از این دست ـ کافی است تا از همه آن‌چه در مورد توپ تحت هر شرایطی می‌خواهیم بدانیم، آگاه شویم. اما در مورد حالت کوانتومی یک فوتون، موضوع فرق می‌کند.

اکنون دیگر می‌دانیم که چرا فیزیکدان‌های مکتب قدیمی کلاسیک، نظریه کوانتومی را گیج‌کننده، هراس‌انگیز، و احتمالا خطرناک یافتند. چنین به نظر می‌رسد که فوتون دارای هیچ ویژگی وابسته به خود نیست، بلکه آن‌چه را که به آن نسبت می‌دهیم، با اکراه و ناخواسته (از طریق نوعی اسباب‌چینی و دسیسه بین خود و ابزار اندازه‌گیری) به دست می‌آورد. ماهیت واقعیتی که در این مفهوم نهفته است، انسان را به یاد گفته "گرترود اشتاین" در مورد شهر اوکلند در کالیفرنیا می‌اندازد: "هیچ آنجایی در آنجا نیست!"

پی‌نوشت:

1- Quantum/ 2- Quanta/ 3- Quantisation (or Quantization)/ 4- Polarised (or Polarized)/ 5- State



از اینجا به آنجا

آیا روزی خواهد رسید که ما بتوانیم انسان‌ها را به مکان‌های دوردست ارسال کنیم؟ همه چیز به عدم قطعیت‌های عجیب نظریه کوانتومی بستگی دارد

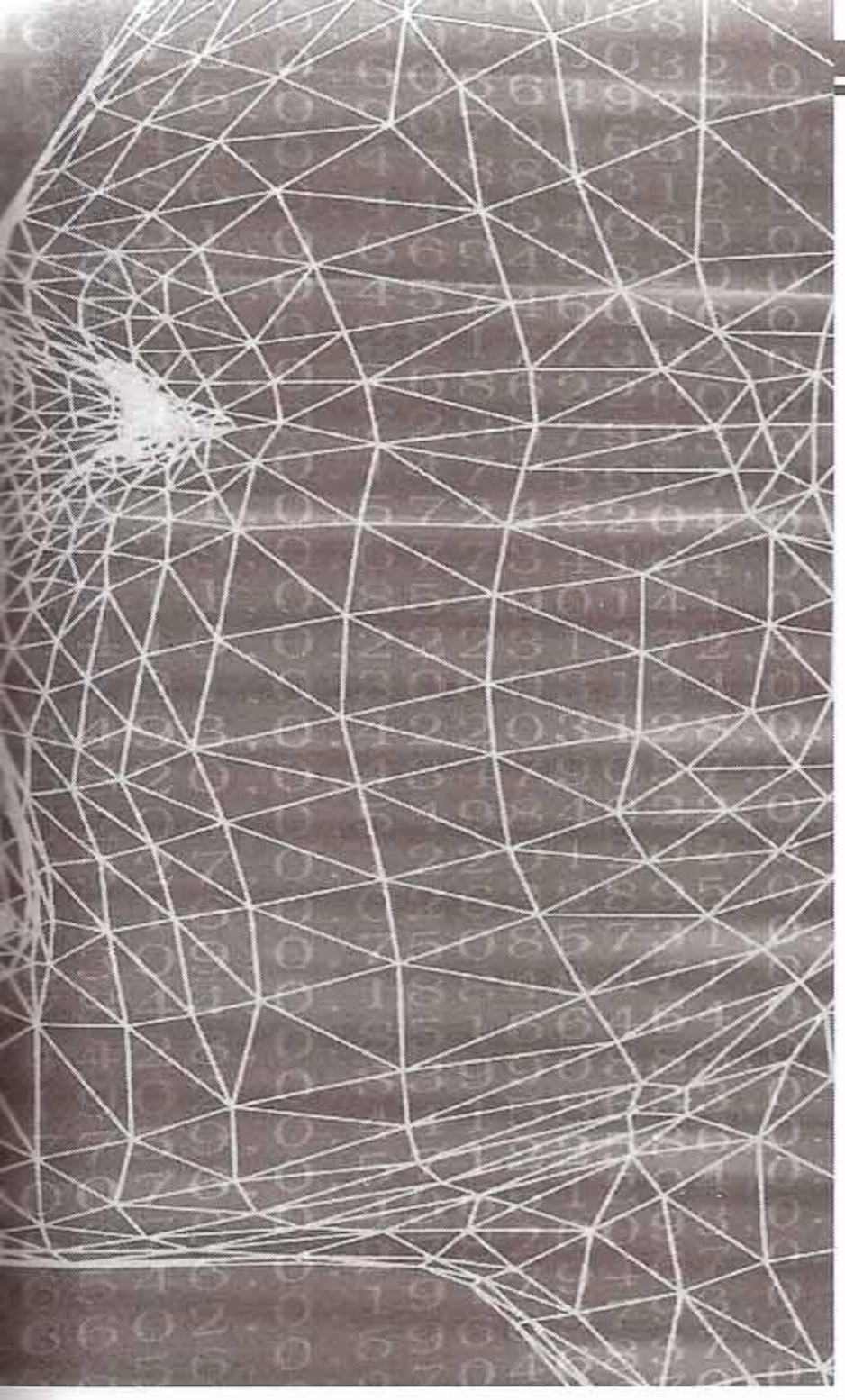
احتمالا آزاردهنده‌ترین جنبه جهان کوانتومی برای فیزیکدان‌هایی که با فیزیک کلاسیک آموزش دیده‌اند، این مسئله است که هیچ چیز تا اندازه‌گیری نشود، حقیقی به نظر نخواهد رسید. فرض کنید می‌خواهیم رفتاری را در مورد یک ذره کوانتومی، مثلا چگونگی قطبش[1] یک فوتون نور، بدانیم. در واقع پیش از اندازه‌گیری، فوتون در جهت خاصی قطبیده نیست. به جای آن، فوتون دارای گسترهٔ شبح‌گونی از قطبش‌های ممکن است، که هر یک از آنها با احتمال ویژه‌ای اندازه‌گیری می‌شود. وقتی قطبش فوتون را اندازه‌گیری می‌کنیم، به یک پاسخ معین دست می‌یابیم. اما مشکل این است که تمامی احتمال‌های شبح‌گون دیگر در این فرایند ناپدید می‌شوند، و حالت نامعین اصلی برای همیشه از دست خواهد رفت.

بنابراین عمل اندازه‌گیری یک ذره، در واقع برخی از اطلاعات مربوط به حالت دست‌نخوردهٔ آن را نابود می‌کند. به نظر می‌رسد که نسخه‌برداری از رفتار این ذرات و کاربست آن در جایی دیگر، از لحاظ عملی ناممکن است.

اما یکی از ترفندهای عجیب جهان کوانتومی، این نتیجه را تغییر می‌دهد. با این ترفند می‌توان یک حالت کوانتومی اندازه‌گیری نشده را ـ تا آنجا که آماده فداکردن نسخه اصلی هستید ـ بازسازی کرد. در این ترفند از همان عدم قطعیتی استفاده می‌شود که در مکان اول، اندازه‌گیری‌های کوانتومی را با مشکل روبه‌رو کرده بود.

"چارلز بِنت" از آزمایشگاه‌های IBM در نیویورک، نخستین فیزیکدانی بود که جنبه نظری ایده "ترابری کوانتومی"[2] را در سال ۱۹۹۳ به جهان معرفی کرد. بنت و همکارانش روشی را در اختیار یک شخصیت فرضی به نام "آلیس" قرار دادند تا او بتواند ذره‌ای را برای دوستش "باب"، که در جایی دور از او زندگی می‌کند، ارسال دارد. روش کار به این صورت است که باب ذره‌ای را می‌سازد که دقیقا حالت ذره اصلی آلیس را دارد، حتی اگر آلیس هرگز نفهمد که آن حالت چه بوده است.

فرض کنید آلیس و باب می‌خواهند نسخه‌ای از یک فوتون را بسازند. آلیس نمی‌تواند فوتون خودش



را اندازه‌گیری کند و نتایج را برای باب بفرستد؛ زیرا این کار، برخی از اطلاعاتی را که باب نیاز دارد، از بین می‌برد. خوشبختانه، نظریه کوانتومی دارای ابزار بهتری برای این ارتباط است. یک زوج اضافی از فوتون‌های "درهم‌تنیده"[۳]، کانال انتقال بین آلیس و باب را می‌گشاید. بنابر نظریه کوانتومی، یک جفت فوتون را به‌گونه‌ای می‌توان درهم‌تنیده کرد که ویژگی‌های آنها به شکلی ناگشودنی به پیوند هم درآیند. چنین پیوندی، حتی اگر فوتون‌ها به دو نقطه مقابل زمین فرستاده شوند، پابرجا خواهند ماند. با اندازه‌گیری یک فوتون در قطب شمال، بلافاصله حالت فوتونی دیگر در قطب جنوب تعیین می‌شود.

اگر دچار سردرگمی شده‌اید نگران نباشید، زیرا افراد سرشناسی مثل "آلبرت اینشتین" و همکاران جوان‌تر او "بوریس پودولسکی" و "ناتان روزن" نیز به همین سرنوشت گرفتار آمدند! آنها سناریویی به نام سناریوی فوتونی را در سر می‌پروراندند تا با استفاده از آن، نشان دهند که مکانیک کوانتومی چقدر پوچ و غیره قابل قبول است. چنین به نظر می‌رسد که این اثر، یعنی اندازه‌گیری در جایی و پیدایش لحظه‌ای آن در جای دیگر، باید انتظاری ناممکن باشد. اما شگفت این‌که آزمایش‌ها نشان دادند که "جفت ذره‌های EPR" (برگرفته از نام سه دانشمند یادشده)، واقعا با این گونهٔ "شبح‌گون"[۴] (شبح‌گون واژه‌ای بود که خود اینشتین به کار می‌برد) پیوند می‌خورند. اکنون می‌پردازیم به حل مسئله آلیس و باب.

آلیس فوتون اندازه‌گیری نشده‌ای در اختیار دارد که می‌خواهد آن را برای باب بفرستد. نخست، او یک جفت از فوتون‌های پیوند خورده EPR را می‌سازد و یکی از آنها را برای خودش نگه می‌دارد و آن دیگر را برای باب ارسال می‌کند. سپس، فوتون اندازه‌گیری نشده خود را به برهم‌کنش با فوتون EPR وامی‌دارد و نتیجهٔ بر هم‌کنش را اندازه می‌گیرد، و پاسخ را با یکی از روش‌های قدیمی (تلفن، پست الکترونیکی، نمابر و یا کبوتر نامه‌بر!) برای باب ارسال می‌کند.

بخش اسرارآمیز کار همین جاست. باب پیام آلیس را دریافت می‌کند، و برحسب آن‌چه که در آن گفته شده، چند عملِ از پیش برنامه‌ریزی شده را بر روی فوتون EPR خود (جفتِ فوتونی که آلیس روی آن کار کرده) انجام می‌دهد. به عنوان مثال، او قطبش فوتون خودش را تغییر می‌دهد، که مقدار این تغییر، به اطلاعات فرستاده شدهٔ آلیس بستگی دارد. در پایان این فرایند، فوتون باب به یک نسخه کاملا مشابه با فوتون اندازه‌گیری نشده اصلی آلیس تبدیل می‌شود. به این ترتیب، حالت کوانتومی فوتون اصلی از آلیس به باب انتقال می‌یابد (گرچه خود فوتون منتقل نمی‌شود).

چه چیزی در این میان رخ می‌دهد؟ باید بدانید که برای بازسازی یک فوتون، لازم است تا اطلاعاتی از حالت آن ارسال شوند که این اطلاعات بر دو نوعند.

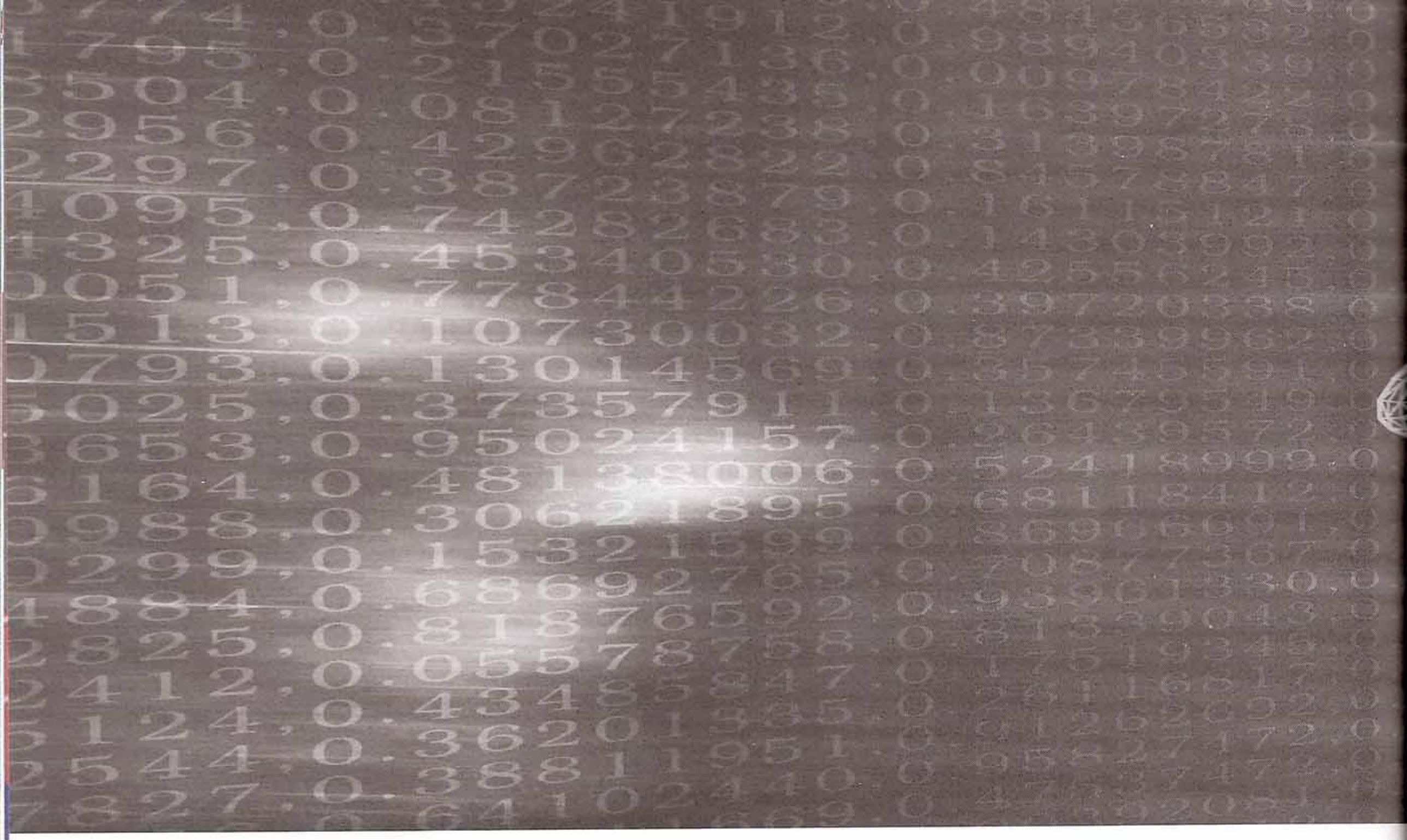
عمل اندازه‌گیری یک ذره، در واقع برخی از اطلاعات مربوط به حالت دست‌نخوردهٔ آن را نابود می‌کند

"چارلز بنت" نخستین فیزیکدانی بود که جنبه نظری ایده "ترابری کوانتومی" را در سال ۱۹۹۳ به جهان معرفی کرد

نوع اول، اطلاعات معمولی و روزمره است، که بخش آسان کار است. شما می‌توانید آن را اندازه‌گیری و جزئیات را از طریق یک مسیر معمولی ارسال کنید. اما برای مورد دوم که کوانتومی است، و با اندازه‌گیری شما ناپدید می‌شود، چه باید کرد؟ ترفند ارسال این نوع اطلاعات، در ارتباط پنهان و شبح‌گون بین فوتون‌های EPR آلیس و باب نهفته است. اگر فوتون ناشناخته آلیس وادار به برهم‌کنش با فوتون EPR شود، آن‌گاه آلیس فوتون EPR باب (نیمهٔ دوم جفتِ درهم تنیده) را می‌سازد، که این فوتون EPR نیز با فوتون ناشناخته برهم‌کنش خواهد داشت.

بنابراین، باب از طریق کانال شبح‌گون EPR اطلاعات کوانتومی عجیب و غریبی از حالت فوتونی که آلیس قصد فرستادن آن را دارد، دریافت خواهد کرد. اما این همه ماجرا نیست، چون آلیس نیز باید برهم‌کنش دو فوتون خودش را اندازه‌گیری کند، و نتیجه را برای باب بفرستد. اگر همه این کارها به درستی انجام شود، باب مجموعه‌ای از اطلاعات کوانتومی شبح‌گون و اطلاعات معمولی و کهن کلاسیکی دریافت می‌کند که به او اجازه می‌دهد فوتون ناشناخته اصلی آلیس را بازسازی کند.

انجام درست این آزمایش، فوق‌العاده پیچیده و مشکل است، امری که اصلا تعجب‌آور نیست. اندازه‌گیری دوگانه‌ای که آلیس هم روی فوتون ناشناخته و هم روی فوتون EPR خود باید انجام دهد، نیاز به طراحی و اجرای دقیق دارد. آلیس و باب باید مطمئن باشند که فوتون‌های EPR به هیچ‌وجه دستخوش برهم‌کنش خارجی نشوند و دست نخورده بمانند. به عنوان مثال، اگر هر فوتون در بخشی از مسیر خود به یک اتم سرگردان برخورد کند،



چنین رویدادی ارتباط شبح‌گون آن را با فوتون‌های دیگر به هم می‌زند. اما در سال ۱۹۹۷ دوگروه از دانشمندان، یکی در دانشگاه اینسبروک و دیگری در دانشگاه رم، موفق شدند یک فوتون را از یک سمت آزمایشگاهشان به سمت دیگر ارسال دارند.

در این فرایند، چند قید جالب خودنمایی می‌کنند. نخست این‌که آلیس باید نتایج اندازه‌گیری‌های خود را با استفاده از یک وسیله استاندارد، که سرعت آن کمتر از سرعت نور است، برای باب بفرستد. بنابراین گرچه بخش شبح‌گون عمل ترابری لحظه‌ای است، اما بخش ناشبح‌گون آن ـ که به اندازه بخش شبح‌گون اهمیت دارد ـ چنین نیست. اما می‌دانیم که سرعت ترابری کوانتومی نمی‌تواند بیش از سرعت نور باشد، چیزی که دانستن آن اینشتین را خوشحال می‌کرد. دوم این‌که اندازه‌گیری آلیس، حالت کوانتومی فوتونِ خود او را آشفته می‌کند. بالاخره قید سوم این است که آلیس و باب، هیچ‌یک هرگز نخواهند دانست که حالت کوانتومی اصلی واقعا چه بوده است. اندازه‌گیری مستقیم یک حالت کوانتومی، همواره اطلاعات مورد نظر را به شکل غیر قابل پیش‌بینی نابود می‌کند. آلیس می‌تواند یک حالت کوانتومی را برای باب بفرستد، ولی باید بداند که هیچ‌یک از طرفین هرگز نخواهند دانست چه حالتی را منتقل کرده‌اند.

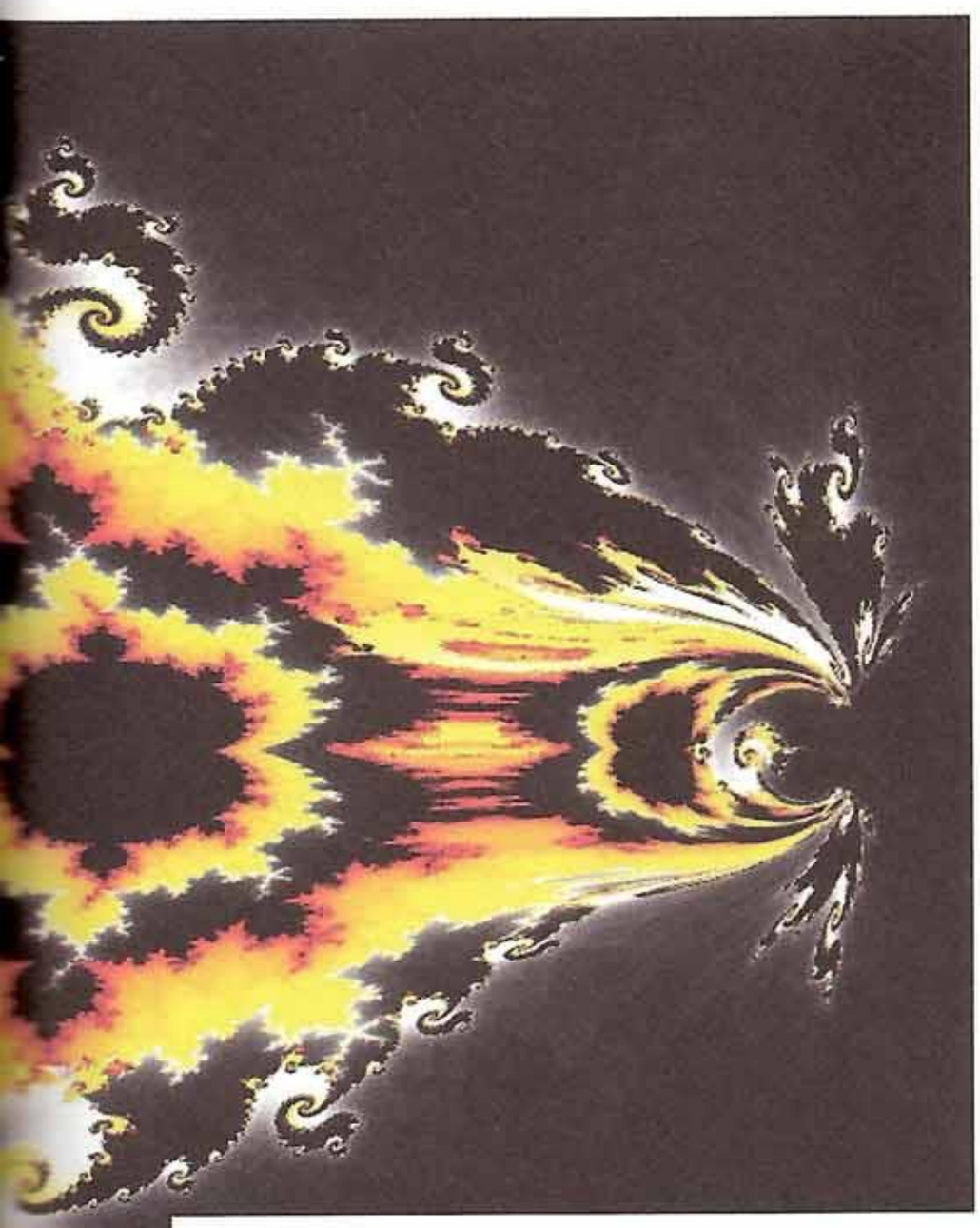
اما تمامی آن‌چه که گفته شد، در مورد ترابری از نوع داستان‌های علمی ـ تخیلی، که در آن انسانی از مکانی به مکانی دیگر ارسال می‌شود، چه نقشی خواهد داشت؟ مشکلات ویژه‌ای در این مورد به ذهن می‌رسد. برای انتقال مجموعه‌ای از اتم‌ها (به جای تنها یک فوتون)، کانال ارتباطی EPR نباید تنها یک فقره از اطلاعات کوانتومی شبح‌گون را گسیل دارد، بلکه مجبور به گسیل مجموعه کاملی از آنهاست. چنین کاری نه تنها نیاز به جفت‌های فراوانی از EPR دارد. (که به اندازه کافی مشکل‌آفرین است)، بلکه هر EPR باید شامل تعداد زیادی از ذرات باشد. فراهم کردن چنین حالتی و ارسال آن به فضا، بدون به هم خوردن یکپارچگی آن، تقریبا ناممکن است. به عنوان مثال، فرض کنید می‌خواهید شخصی به نام "ژان لوک پیکارد" را به نقطه دوردستی از فضا ارسال دارید. برای انجام این کار، شما باید مشخصات کاملی از حالت کوانتومی همگانی هر یک از آخرین الکترون‌ها و اتم‌های بدن او را ـ تماما در یک لحظه ـ ارسال دارید؛ که کاری است مشکل. آلیس باید یک اندازه‌گیری لحظه‌ای ترتیب دهد که همه این اطلاعات را هم‌زمان فراهم آورد، و باب نیز باید بازسازی پیچیده مشابهی را در سوی دیگر انجام دهد. فرض کنید که شما پیکره کوانتومی ژان‌لوک پیکارد را در جایی نابود و در جایی دیگر بازسازی می‌کنید. آیا پیکره بازسازی شده از هر لحاظ شبیه فرد اولیه خواهد بود؟ آیا رفتار و اعمال او شبیه رفتار فرد اصلی است؟... تصور همه این احتمالات را به شما واگذار می‌کنیم.

پی‌نوشت:

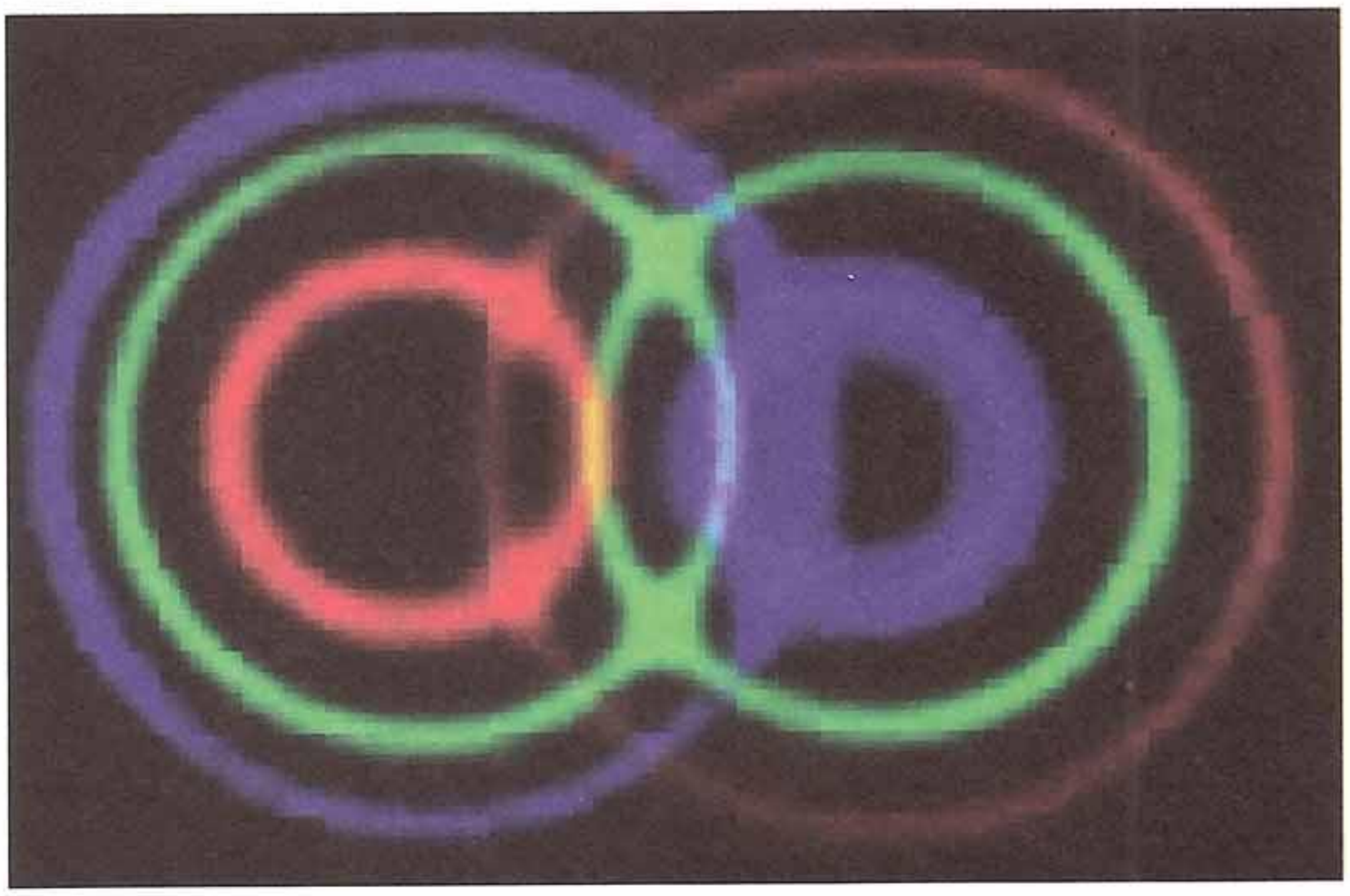
1- Polarisation (or Polarization)/ 2- Quantum teleportation/ 3- Entangled/ 4- Spooky

سفری به خورشید

همه‌چیز کی بهتر شد؟



ارتباط‌های شبح‌گون

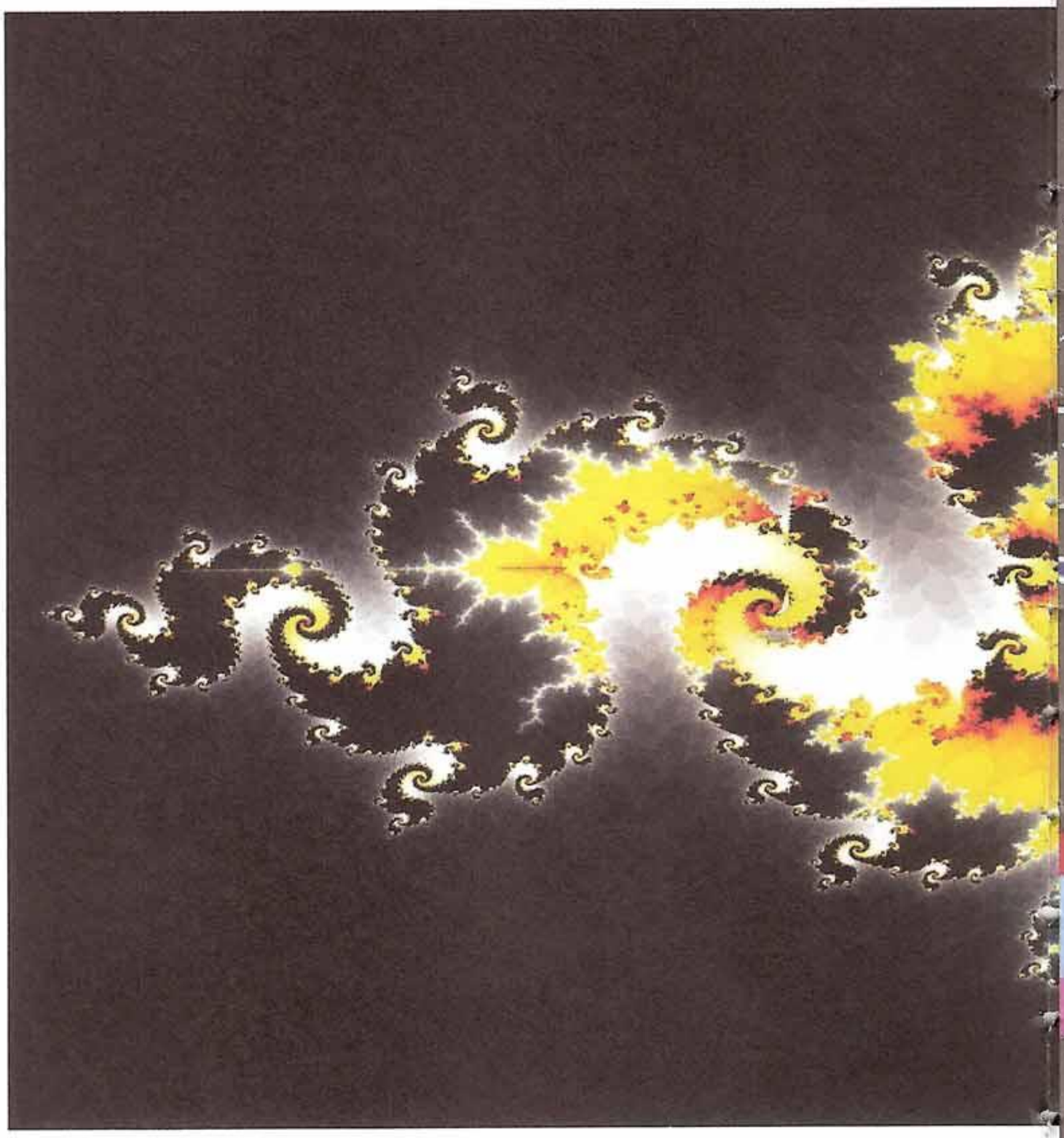


آیا ذرات کوانتومی واقعا می‌توانند از فواصل دور با هم ارتباط لحظه‌ای برقرار کنند، یا ما چیزی را از قلم انداخته‌ایم؟

نه ماکس پلانک و نه آلبرت اینشتین، که فوتون را به جهان معرفی کردند، هیچ‌یک از آن‌چه که انجام داده بودند کاملا راضی نبودند. پلانک ایده بسته‌های کوچک نور را ارائه کرد، اما تمایلی به قبول آنها به عنوان چیزهایی حقیقی ـ به جای ابزارهای ریاضی محض که کار را برای فیزیکدان‌ها آسان‌تر می‌کنند ـ نداشت.

اینشتین مشکل دیگری داشت. تصور نور به عنوان بارانی از گلوله‌های کوچک که می‌توانند به الکترون‌ها ضربه بزنند و آنها را از اتم‌هایشان جدا کنند، برای او هیچ اشکالی نداشت. در واقع، او از این اندیشه استفاده کرد و آن را به عنوان پایه‌ای برای ارائه توصیفی ساده از اثر فوتوالکتریک قرار داد، که در آن تابش نور بر فلزات خاصی موجب یک جریان الکتریکی می‌شود. او حتی چنین استدلال می‌کرد که در نظر گرفتن نور به عنوان "گاز"ی از فوتون‌ها ـ مانند گاز معمولی که از اتم‌های فیزیکی تشکیل شده است ـ درک خوبی را ایجاد می‌کند.

آن‌چه که اینشتین را آزار می‌داد، این سوال بود که آیا فوتون‌ها اشیایی واقعی هستند که عنصر ناخواسته‌ای از احتمال آنها را به درون فیزیک راه داده است یا خیر. اینشتین، گرچه نواندیش بود، اما از جنبه‌ای دیگر بسیار کلاسیک‌گرا باقی ماند: او با تمام وجود به اصل علیت (علت و معلول) معتقد بود. به عبارت دیگر، او می‌گفت اگر تمامی ویژگی‌ها و مشخصه‌های یک جسم را بدانیم، باید بتوانیم رفتار آن را در هر شرایطی به طور



دقیق پیش‌بینی کنیم.

برعکس، نظریه کوانتومی تنها می‌تواند احتمال وقوع رخدادی را پیش‌بینی کند. وقتی جریانی از فوتون‌ها به عدسی‌های یک عینک آفتابی برخورد می‌کند، برخی از آنها از عدسی‌ها گذر می‌کنند و برخی دیگر بازتابیده می‌شوند. اما هیچ راهی برای پیش‌بینی دقیق این‌که هر یک از فوتون‌ها چه راهی را انتخاب می‌کند، وجود ندارد. تنها چیزی که می‌توان گفت، احتمال وقوع هر یک از این رخدادهاست.

اینشتین از نظریه کوانتومی دل خوشی نداشت، زیرا از آن جز مشتی احتمال بی‌ثمر به چنگ نمی‌آورد. در سال ۱۹۳۶، او به همراه "بوریس پودولسکی" و "ناتان روزن"، "باطل‌نمای EPR " را ابداع کرد. در حالی که از هم‌بندی شبح‌گون EPR برای ارسال فوتون‌ها از گوشه‌ای به گوشه دیگر آزمایشگاه استفاده شده، ولی طنز ابداع باطل‌نمای EPR این بود که نشان داده شود این مفهوم نظریه کوانتومی آن‌قدر غیر قابل قبول است که یا باید این نظریه نادرست باشد و یا از جهاتی ناقص. این سه نفر نتوانستند بپذیرند که تنها به این دلیل که اندازه‌گیری‌های کوانتومی ریشه در احتمالات دارند، اندازه‌گیری یک فوتون در مکانی بتواند در مکانی دیگر اثر فیزیکی لحظه‌ای داشته باشد.

باطل‌نمای اصلی EPR تاکنون به شکل‌های مختلفی بیان شده است، اما اجازه بدهید در اینجا با همان فوتون‌ها کار را دنبال کنیم. فرض کنید یک جفت فوتون را که با زاویه ۹۰ درجه نسبت به یکدیگر قطبیده شده‌اند، درهم تنیده‌اید. تا پیش از اندازه‌گیری، نمی‌توانید بدانید که قطبش‌ها چگونه‌اند: ممکن است قائم، افقی، و یا در حالتی بینابین باشند. تمام آن‌چه که با اطمینان کامل می‌دانید، این است که آنها بر یکدیگر عمودند. اکنون این فوتون‌ها را در راستاهای متفاوتی می‌فرستید، و در نقطه‌ای از مسیری که در حال حرکتند، به صافی‌های قطبنده‌ای برخورد می‌کنند که شما با زیرکی سرراهشان قرار داده‌اید.

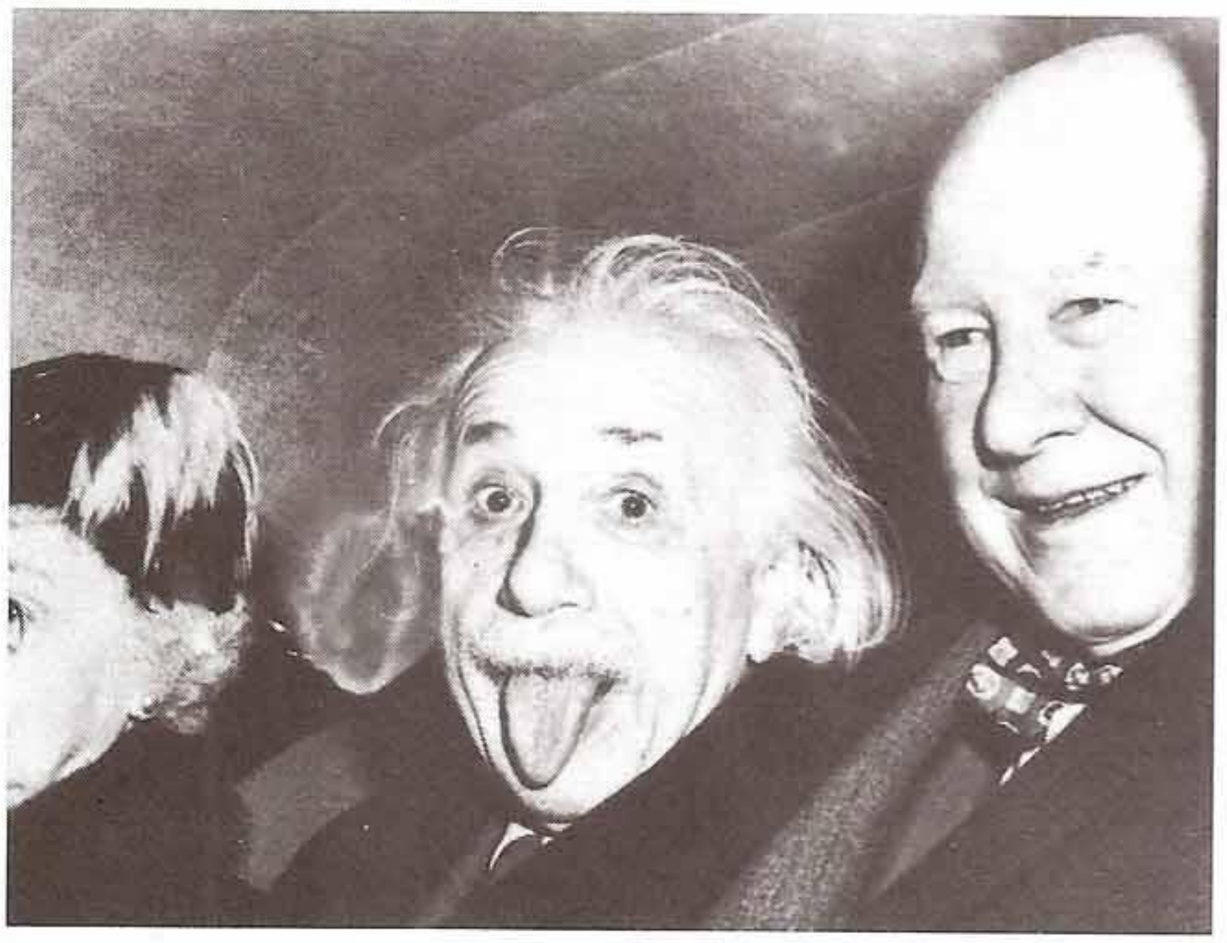
فرض کنید یکی از فوتون‌ها به طور مستقیم از میان یکی از صافی‌هایی که عمود بر مسیر آن قرار گرفته است، گذر کند. این فوتون باید به صورت قائم قطبیده باشد و جفت آن به صورت افقی. به این ترتیب، فوتون دوم از میان یکی از صافی‌های افقی که در مسیرش قرار دارد گذر می‌کند، نه از یک صافی قائم. تا اینجا همه‌چیز به خوبی پیش رفته است. یکی از فوتون‌ها به صورت قائم، و دیگری به صورت افقی قطبیده شده است؛ بنابراین چنان‌که قرار بود، آنها بر یکدیگر عمودند، و همه چیز مرتب به نظر می‌رسد.

اما هنوز کار به پایان نرسیده است. تا زمانی که فوتون اول به صافی برخورد نکرده است، شما نمی‌دانید آیا از میان آن گذر خواهد کرد یا نه. به همین دلیل، این فوتون نیز تا زمانی که به صافی نرسیده، نمی‌داند به چه نوع صافی‌ای برخورد خواهد کرد. شما پیش از اندازه‌گیری، چیزی در مورد قطبش هیچ‌یک از فوتون‌ها نمی‌دانید. تنها چیزی که می‌دانید این است که احتمال گذشتن فوتون از میان صافی (تحت هر زاویه‌ای که قرار داشته باشد)، پنجاه ـ پنجاه است. بنابراین فوتون دوم، تا زمانی که فوتون اول کارش را انجام نداده است، نمی‌تواند بفهمد برای خودش چه پیش خواهد آمد. به این ترتیب رفتار فوتون اول، رفتار فوتون دوم را تعیین می‌کند. فوتون دوم باید به طریقی از فوتون اول، حتی اگر فاصله فیزیکی آنها از یکدیگر زیاد باشد، کسب خبر کند.

فوتون دوم باید به طریقی از فوتون اول، حتی اگر فاصله فیزیکی آنها از یکدیگر زیاد باشد، کسب خبر کند

نکته‌ای را که باید اضافه کرد این است که این خبررسانی باید آنی باشد، حتی اگر هر دو فوتون دقیقا در یک لحظه به صافی‌های خودشان برخورد کنند. پیش‌بینی آن‌چه که هر یک از فوتون‌ها انجام خواهد داد ناممکن است، ولی دو فوتون باید به گونه‌ای هماهنگ با یکدیگر رفتار کند تا قطبش‌هایشان نسبت به یکدیگر دارای ارتباط درست (مثلا عمود بودن در مثال فوق) باشد. آن‌چه که مورد اعتراض اینشتین، پودولسکی و روزن قرار گرفت، در واقع همین معمای رابطه شبح‌گون فوتون‌ها بود. چنین چیزی دقیقا از آنجا ناشی می‌شود که نتایج اندازه‌گیری‌های کوانتومی، تا زمانی که واقعا انجام نگرفته‌اند، غیرقطعی و نامعین هستند.

اما اگر به طریقی قطبش‌های دو فوتون در آغاز تعیین شده باشند، ماجرا فرق می‌کند؛ هر چند که



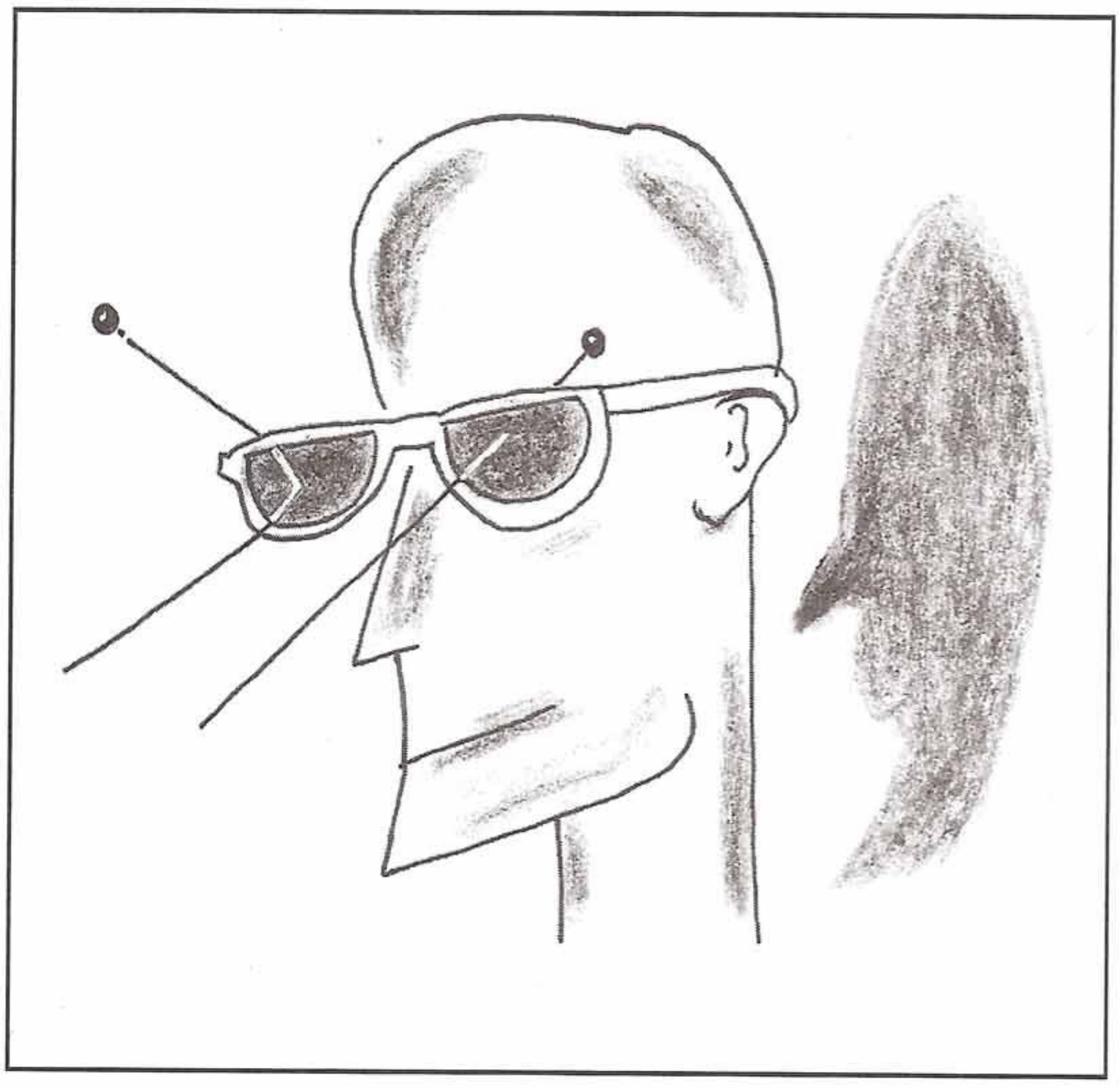
اینشتین از نظریه کوانتومی دل خوشی نداشت، زیرا از آن جز مشتی احتمال بی‌ثمر به چنگ نمی‌آورد!

ندانیم قطبش‌ها به چه گونه‌اند. نتیجه هر اندازه‌گیری در مورد قطبش‌ها هنوز هم پنجاه ـ پنجاه است، زیرا شما از پیش نمی‌دانید که فوتون‌ها هنگام رسیدن به صافی‌ها چه خواهند کرد. اما از نگاه فوتون‌ها، همه چیز از پیش تعیین شده است: هر فوتون در حالت معینی قرار دارد. به این ترتیب، این‌که دو اندازه‌گیری هنگامی مشخص خواهند شد که فوتون‌ها کارشان را انجام دهند، نتیجه یک برنامه‌ریزی قبلی است نه یک ارتباط شبح‌گون.

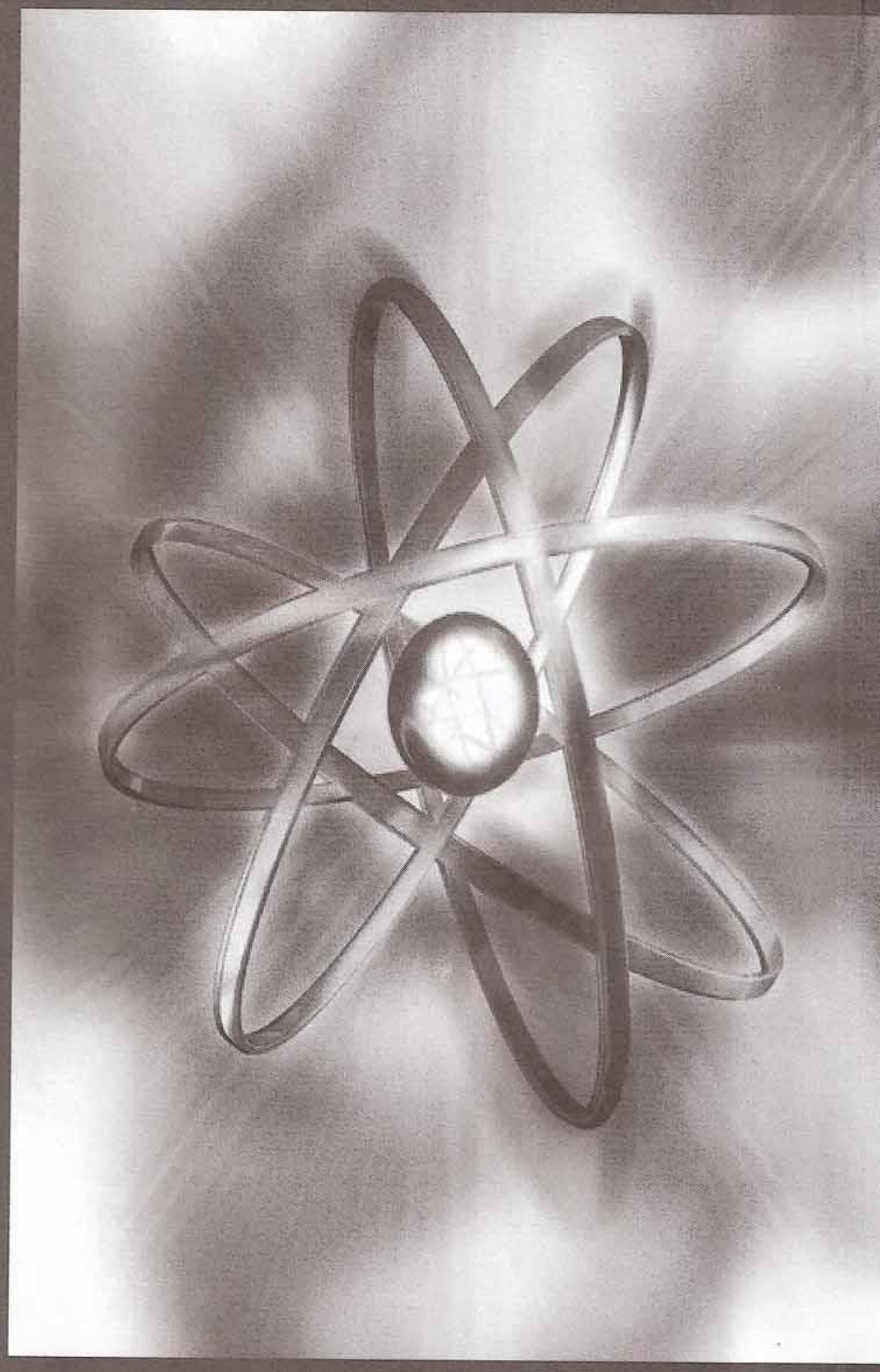
این است آن‌چه که اینشتین کلاسیک‌اندیش قبول داشت. چنین چیزی مثل این است که بگوییم یک توپ بیلیارد که در حال حرکت به سوی شماست، یا قرمز است یا آبی، اما تا زمانی که به آن نگاه نکنید رنگ آن را نخواهید دانست. این نظر کاملا متفاوت است با این‌که بگوییم توپ بیلیارد، تا زمانی که شما آن را نگاه نکرده‌اید، نه قرمز است و نه آبی، و تنها در لحظه‌ای که شما به آن نگاه می‌کنید به یکی از این رنگ‌ها در می‌آید.

به عبارت دیگر، باطل‌نمای EPR چنین استنباط می‌کرد که چون قطبش‌های فوتون‌ها تا زمانی که اندازه‌گیری نشده‌اند نامعین‌اند، از این‌رو این جفت فوتون EPR باید به صورت آنی چنان تبانی کنند تا درستی اندازه‌گیری‌های هم‌زمان بر روی خود را تضمین کنند. چنین تصوری نامعقول به نظر می‌رسد. اینشتین و همکارانش معتقد بودند آن‌چه که معقول‌تر به نظر می‌آید، این است که نظریه کوانتومی ناقص است، و هر فوتون یک سرشت پنهان و مرموز دارد که تنها با دانستن آن، می‌توان نتیجه یک اندازه‌گیری قطبشی را دانست.

بسیار خوب، همه چیز عالی و بی‌نقص به نظر می‌رسد. اما... چگونه می‌توان به این سرشت پنهان فوتون دست یافت؟ آیا راه دیگری جز همان اندازه‌گیری وجود دارد که نتیجه‌اش، بنا به فرض، شما را در این پیشگویی یاری دهد؟ این نکته‌ای است که مسئله را بیشتر به تباهی می‌کشاند. بیشتر فیزیکدان‌ها معتقدند که معمای EPR واقعا یک مسئله گیج‌کننده است. اما آیا این برداشت به این معناست که نظریه کوانتومی نادرست است، و یا آن‌قدر دشوار است که نمی‌توان آن را درک کرد؟ منظور از انتساب سرشت‌های اضافی به فوتون‌ها چیست، در حالی که هیچ راه مستقلی برای شناخت آن سرشت‌ها وجود ندارد، به ویژه آن‌که به نظر می‌رسد آن سرشت‌ها کوچک‌ترین اختلافی در نتایج آزمایش‌ها ایجاد نمی‌کنند؟



به قول "جان بل"، فیزیکدانی که نگرانی اینشتین در مورد نظریه کوانتومی را تایید می‌کرد، "باطل‌نمای EPR از آن دسته سوالاتی است که بیشتر فیزیکدان‌ها احساس می‌کنند اگر بیست دقیقه در مورد آن فکر کنند، آن را به طور کامل درک خواهند کرد؛ اما پس از چند دقیقه خواهند گفت عجب کار دشواری است!"



جاسوسی در کمین

ارتباط‌های عجیب کوانتومی به شما اجازه نمی‌دهند حد سرعت نهایی اینشتین را نادیده بگیرید، ولی برای حفظ یک راز به شما کمک می‌کنند

اگر می‌توانستید با استفاده از ارتباط‌های شبح‌گون بین دو ذره، یک پیام آنی بفرستید، در آن صورت باطل‌نمای EPR نه تنها گیج‌کننده، بلکه هراس‌انگیز نیز می‌نمود. اگر می‌شد به طریقی نتیجه اندازه‌گیری سمت خود را برآورد کنیم، در آن صورت، به دلیل آگاه بودن از چگونگی درهم‌تنیدگی دو ذره، می‌شد نتیجه فرایند سمت دیگر را هم‌زمان طراحی کرد. به این ترتیب، ارتباط شبح‌گون به شما اجازه می‌دهد تا بلافاصله پیامی برای شخصی که چندین سال نوری دورتر از شما قرار دارد بفرستید. اما این برداشت، مشکلات بزرگی در نظریه نسبیت پیش می‌آورد؛ زیرا این نظریه، حرکت هر علامت معنی‌داری با سرعتی بیش از نور را به شدت منع می‌کند.

اما برای اینشتین جای نگرانی نیست. این ترفند به هیچ وجه کارایی ندارد، زیرا نتیجه اندازه‌گیری همواره پنجاه ـ پنجاه است. شما حتی بر آن‌چه که در سمت خودتان اندازه‌گیری می‌کنید هیچ اشرافی ندارید، چه رسد به سمت دیگر!

ولی این هنوز پایان ماجرا نیست. درست است که شما نمی‌توانید از ارتباط شبح‌گون برای گذشتن از سرعت نور استفاده کنید، اما در عوض می‌توان از آن برای ارسال پیام‌های رمزی کاملا مطمئن استفاده کرد. علاوه بر این، نظریه کوانتومی اجازه می‌دهد تا بدانید که آیا جاسوسی در تلاش دستکاری پیام شما هست یا نه.

ریاضی‌دان‌ها علامت‌های رمزی مختلفی را طراحی کرده‌اند که هر یک از آنها با "کلید" ویژه‌ای گشوده می‌شود. کلید، عددی است که تنها شخص فرستنده و گیرنده پیام از آن اطلاع دارند. چگونگی کارکرد آن به این شرح است که فرستنده، پیام نوشته‌شده‌ای را به مجموعه‌ای از رقم‌های دوتایی تبدیل می‌کند، و سپس با استفاده از کلید، یک تبدیل ریاضی را بر آن اعمال خواهد کرد تا رقم‌ها را در هم بریزد. گیرنده، پس از دریافت علامت‌های در هم ریخته و با استفاده از کلید، آن تبدیل ریاضی را وارون می‌کند؛ و به این سادگی پیام اصلی بازسازی می‌شود.

اما این روش نقطه ضعفی دارد. هر دو طرف باید از کلید واحدی استفاده کنند و سپس آن را کاملا محفوظ نگه دارند. از طرف دیگر، کلید می‌تواند از تعدادی اعداد کُتره‌ای[1] تشکیل شده باشد؛ که برای ساختن آن می‌توان از نظریه کوانتومی استفاده کرد. برای مبادله پیام‌های رمز، آلیس و باب نخست باید دستگاهی بسازند که مجموعه جفت‌فوتون‌هایی را پرتاب کند که همسان قطبیده شده باشند. از هر جفت، یک فوتون به سمت آلیس و دیگری به سمت باب می‌رود. برای آشکارسازی فوتون‌ها، آلیس و باب هر یک از صافی خود که قائم قطبیده شده است، استفاده می‌کنند. اگر آلیس فوتونی را ببیند که از صافی‌اش گذشته است، آن‌گاه پی خواهد برد که از صافی باب نیز فوتون همسانی گذشته است؛ و چنان‌چه آلیس فوتونی را نبیند، باب نیز نخواهد دید. اگر دیدن فوتون را با "۱" و ندیدن آن را با "۰" نشان دهیم، هم آلیس و هم باب

رشته‌ای یکسان از اعداد دوتایی را ثبت خواهند کرد؛ و این رشته، کلیدی خواهد بود برای رمزگشایی پیام‌ها.

اکنون فرض کنید جاسوسی از قصد آلیس و باب آگاهی داشته باشد و صافی خود را که به طور قائم قطبیده شده است، در مسیری که به آشکارساز آلیس می‌رسد قرار دهد. جاسوس استراق سمع‌کننده، اطلاعاتِ در حال رفتن به سمت آلیس را می‌رباید و به این ترتیب به کلید دست می‌یابد. این جاسوس برای این‌که پی به وجودش نبرند، به ازای هر فوتونی که از صافی‌اش می‌گذرد، فوتونی کاملا مشابه که قائم قطبیده شده است برای آلیس می‌فرستد، و آلیس آن را کاملا طبیعی می‌بیند و ثبت می‌کند. اگر هیچ فوتونی از صافی جاسوسی نگذرد، او نیز فوتونی برای آلیس نمی‌فرستد، و بنابراین آلیس فوتونی دریافت نمی‌کند. نتیجه چنین ترفندی برای فرستادن پیام این است که جاسوس می‌تواند سر راه فوتون‌ها قرار بگیرد و کلید را به دست آورد، بدون این‌که آلیس و باب بدانند که امنیت پیام آنها از بین رفته است.

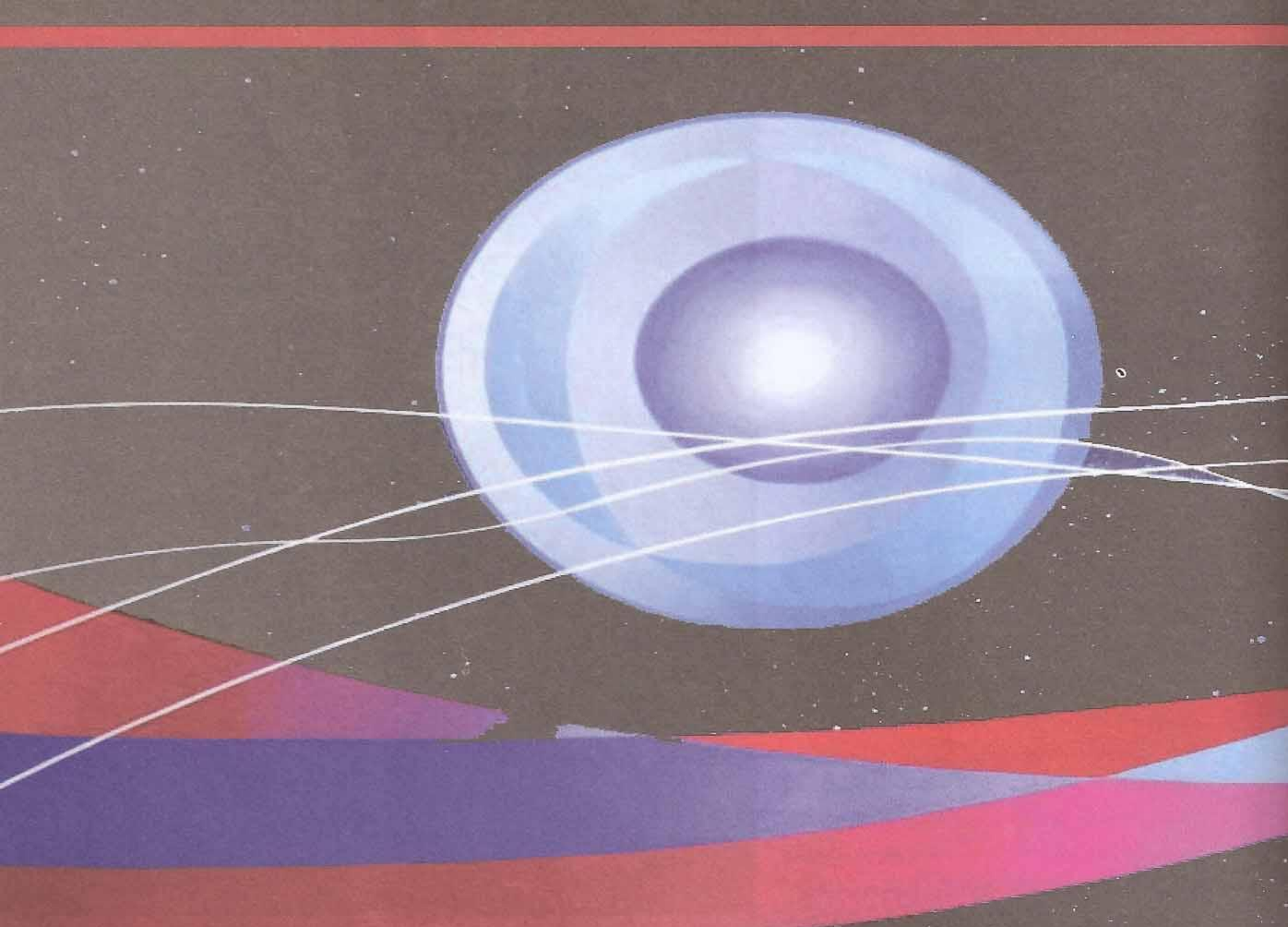
اما با یک روش کمی پیچیده‌تر، آلیس و باب می‌توانند کلیدی بسازند که نه تنها کتره‌ای است، بلکه ایمن از دسترسی دیگران است. اگر کسی بخواهد با زیرکی کامل فوتون‌های آلیس و باب را برباید، آنها به راحتی مطلع خواهند شد. این بار، قهرمانان ما صافی‌های قطبنده‌ای را انتخاب می‌کنند که می‌توان آنها را هم به صورت قائم و هم با زاویه ۴۵ درجه قرار داد. هر زمان که فوتونی می‌آید، آلیس و باب می‌توانند صافی‌های خود را به یکی از دو حالت کتره‌ای یادشده قرار دهند. اگر هر دو صافی به مانند هم قرار داده شوند، که احتمال آن پنجاه درصد است، رخداد همانند قبل خواهد بود. یعنی اگر یکی از آنها فوتونی را ببیند، دیگری نیز خواهد دید.

اما اگر صافی‌ها با زاویه ۴۵ درجه نسبت به یکدیگر قرار گیرند چه اتفاقی خواهد افتاد؟ فرض کنید صافی آلیس قائم است و او یک فوتون را می‌بیند. در این صورت فوتون باب نیز باید به طور قائم قطبیده شده باشد. اما اگر این فوتون‌ها با یک صافی با زاویه ۴۵ درجه روبه‌رو شود، چه پیش خواهد آمد؟ از دیدگاه کلاسیکی، در چنین وضعیتی شدت پرتو نوری که قائم قطبیده شده است، نصف خواهد شد. به زبان کوانتومی، هر فوتون موجود در پرتو نور، برای گذشتن از صافی شانس پنجاه ـ پنجاه دارد. بنابراین شاید باب فوتونی قائم قطبیده را دریافت کند، و شاید اصولا فوتونی را دریافت نکند، که این گمانی است پنجاه ـ پنجاه.

ریاضی‌دان‌ها علامت‌های رمزی مختلفی را طراحی کرده‌اند که هر یک از آنها با "کلید" ویژه‌ای گشوده می‌شود. کلید، عددی است که تنها شخص فرستنده و گیرنده پیام از آن اطلاع دارند

آلیس و باب، هر بار با قرار دادن صافی‌های خود به صورت کتره‌ای، رشته‌ای از جفت فوتون‌های EPR را اندازه‌گیری می‌کنند. در پایان کار، آنها چگونگی قرار دادن صافی خود را درلحظات مختلف به آگاهی یکدیگر می‌رساند و یا در صورت لزوم، با فریاد کشیدن از روی پشت بام می‌توانند این آگاهی را به یکدیگر منتقل کنند! اگر هر دوی آنها حالت‌های یکسانی برای صافی‌های خود انتخاب کرده باشند، می‌دانند که نتیجه باید یکسان باشد، و می‌توانند از اطلاعات به‌دست آمده برای ساختن کلیدی سری استفاده کنند. اما اگر حالت‌های انتخاب شده آنها متفاوت بود، هیچ‌کدام از آنها نمی‌توانند بگویند که دیگری چه چیزی را می‌بایست دیده باشد، و بنابراین از نتایج خود چشم‌پوشی می‌کنند.

چنین چیزی ممکن است گامی به عقب تلقی شود. با



ساختن این کلید، تعداد اندازه‌گیری‌ها دو برابر شده است؛ زیرا نیمی از اندازه‌گیری‌ها باید دور ریخته شود. اما امتیاز این روش در این است که یک جاسوس، بدون نشان دادن خود، نمی‌تواند فوتون‌ها را برباید. این جاسوس اگر بخواهد آشکارساز خودش را برای ربودن فوتون‌های آلیس سر راه آنها قرار دهد، هر بار باید حدس بزند که صافی‌اش را در مقایسه با صافی آلیس قائم نگه دارد یا با زاویه ۴۵ درجه. اگر درست حدس بزند، می‌تواند یک فوتون بدلی برای آلیس بفرستد، و هیچ‌کس از قضیه بویی نخواهد برد. اما اگر اشتباه حدس بزند، نوع دیگر فوتون را (که اشتباه است) برای آلیس خواهد فرستاد.

آلیس هنوز فوتون‌ها را آشکارسازی و نتایج را ثبت می‌کند، اما او و باب می‌توانند اندازه‌گیری‌های خود را آماری به محک بزنند، که نتیجه، وجود جاسوسی را آشکار خواهد کرد. این روش عملی است، زیرا فوتون‌هایی را که آلیس و باب می‌بینند به وسیله وابستگی شبح‌گون EPR با یکدیگر در ارتباطند، و هر استراق سمعی موجب نابودی آن ارتباط می‌شود. در حقیقت، وابستگی EPR اکنون بین باب و جاسوس برقرار شده، و یک وابستگی ناکوانتومی کاملا متفاوت بین جاسوس و آلیس به وجود آمده است. محک‌های آماری به آلیس و باب می‌گوید که آیا ارتباط EPR آنها در طول مبادله فوتون حفظ شده است یا نه، و به این ترتیب مشخص می‌شود که آیا کلید آنها محفوظ مانده است یا خیر.

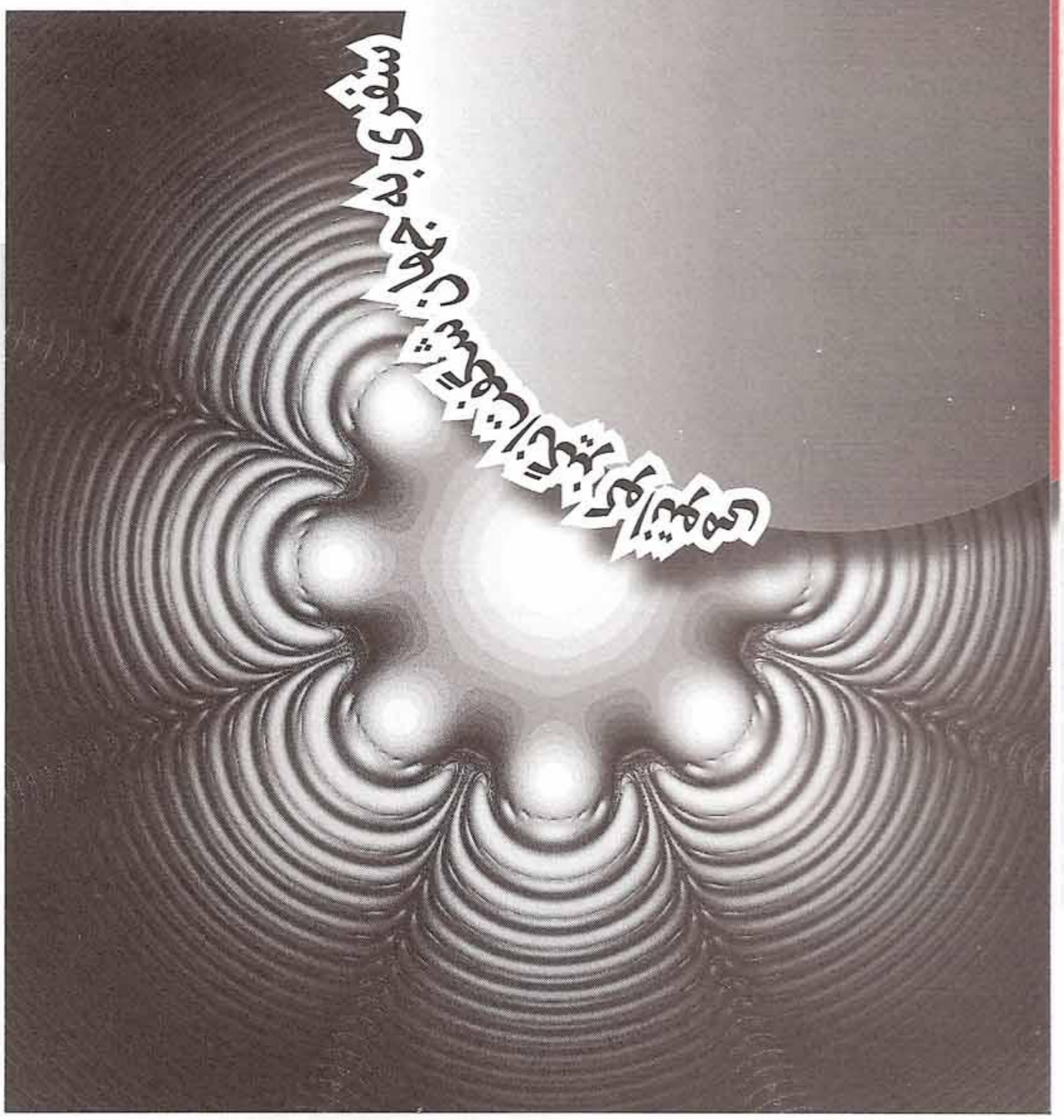
همه آن‌چه که گفته شد، به این معناست که آلیس و باب می‌توانند هر آن‌چه را که انجام می‌دهند، جز نتایج مربوط به خودشان را که در هر اندازه‌گیری به دست می‌آورند، به دنیا اعلام کنند.

آنها می‌توانند کلید رمزی‌شان را ـ بدون فرستادن هیچ‌گونه اطلاعات حساس از محلی به محل دیگر ـ آماده کار کنند، و اگر جاسوسی سعی در به دست آوردن رمز آنها داشته باشد، بلافاصله متوجه خواهند شد.

چند سال پیش، "ریچارد هیوز" و همکارانش در آزمایشگاه ملی لوس‌آلاموس در نیومکزیکو (ایالات متحده)، سیستمی را روی یک شبکه ۱۴ کیلومتری فیبرنوری کار گذاشتند که واقعا به صورت یک کلید رمزی عمل می‌کند. آنها از این دستاورد خود برای اهداف خرابکارانه استفاده نکردند ـ حداقل، تا جایی که ما می‌دانیم...!

پی‌نوشت:

1- Random



معمای بمب کوانتومی

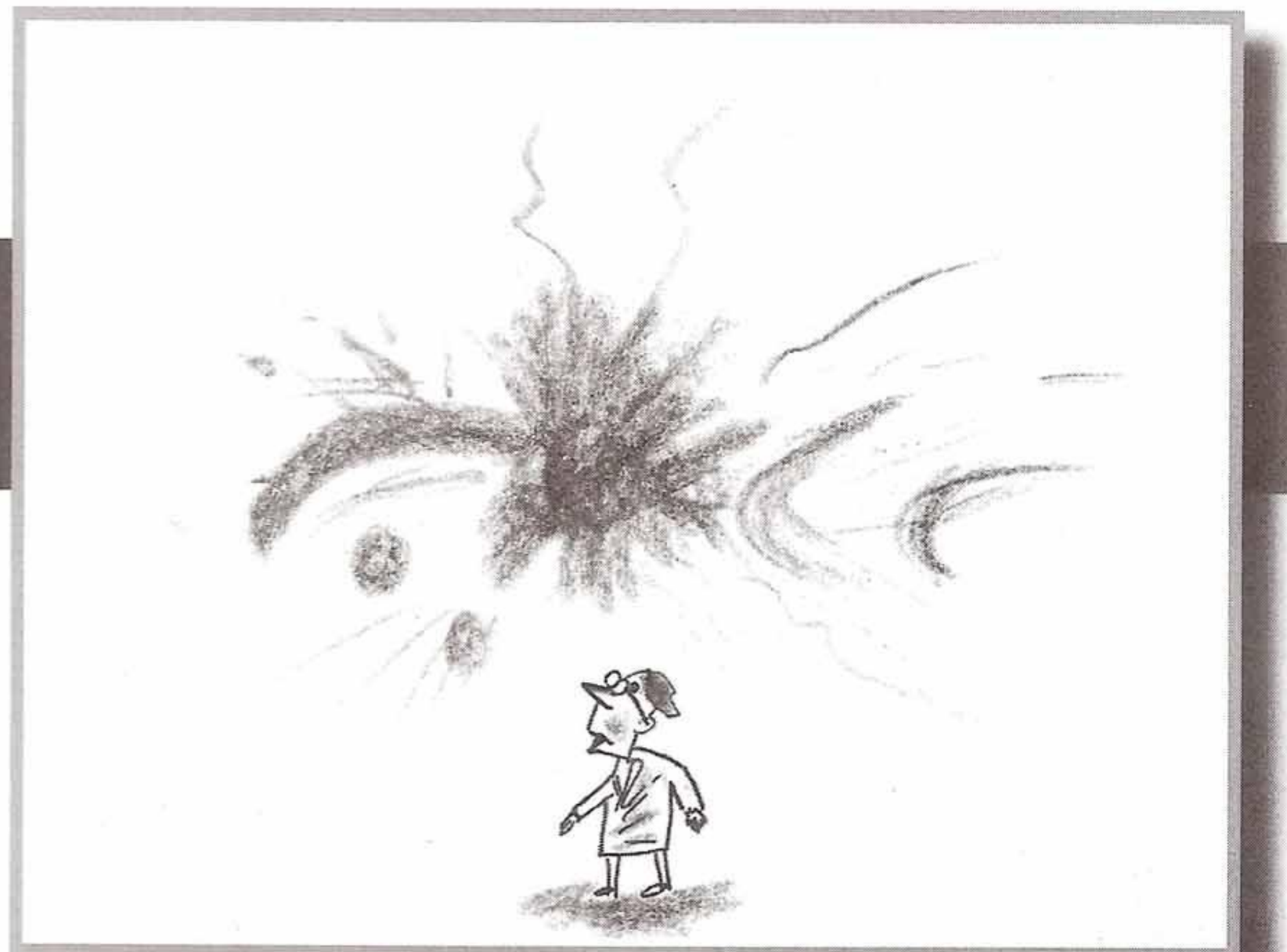
شما چگونه محل بمبی بسیار حساس را که تنها یک فوتون می‌تواند آن را منفجر کند، شناسایی خواهید کرد ـ البته بدون این‌که خود را به کشتن بدهید؟!

هر یک از ما اگر بدانیم فهم نادرست نظریه کوانتومی می‌تواند مرگبار باشد، برای درست فهمیدن آن انگیزه‌ای فراوان خواهیم یافت. مسئله کشف بمب را در نظر بگیرید. فرض کنید به شما گفته شود که ممکن است در این نزدیکی‌ها بمبی باشد که ضامنش آن‌قدر حساس است که تنها یک فوتون می‌تواند آن را منفجر کند. واضح است که شما دوست دارید بدانید آیا بمب در نزدیکی شما هست یا نه، اما نمی‌توانید این کار را به سادگی و تنها با جست‌وجوی اطراف با یک چراغ‌قوه انجام دهید: در این صورت، شما بمب را تنها با منفجر کردن آن کشف خواهید کرد! از دیدگاه کلاسیکی، شما در یک تنگنای ناخوشایند قرار دارید (اگر بمب را به حال خود رها کنید، منفجر خواهد شد؛ و اگر تصمیم به پیدا کردن آن بگیرید، باز هم منفجر خواهد شد). اما ترفندهای نظریه کوانتومی، یک بار دیگر راه نجاتی را پیش پای شما قرار می‌دهد.

این معما را در سال ۱۹۹۳ "آوشالوم الیتزور" و "لو وایدمن" مطرح کردند. خود آنها پاسخی هر چند ناقص، اما هوشمندانه، برای آن یافته بودند. کلید اصلی ایده آنها، دستگاهی به نام "تداخل‌سنج"[1] بود که یک فوتون را به دو بخش تقسیم می‌کند و سپس دوباره آنها را به هم پیوند می‌دهد.

کار تداخل‌سنج با یک آینهٔ "نیمه نقره‌اندود" شروع می‌شود. این آینه به بیان کلاسیکی، نیمی از نوری را که به آن برخورد می‌کند باز می‌تاباند و به نیمه دیگر اجازه عبور از خود را می‌دهد. سپس هر دو بخش بازتابیده و عبور کرده نور، با راهنمایی آینه‌های بازتابنده کامل معمولی، در مسیرهای جداگانه خود حرکت می‌کنند، و در پایان وادار می‌شوند تا دوباره با هم ترکیب شوند. اگر با استفاده از نظریه کوانتومی در مورد این مسئله بیندیشیم، ممکن است این‌گونه به نظر برسد که فوتونی که وارد تداخل‌سنج می‌شود، باید یکی از مسیرها را انتخاب کند. اما این موضوع تنها در حالتی درست است که آشکارسازهایی در طول مسیر برای ثبت پیشروی فوتون وجود داشته باشند. اگر هیچ آشکارسازی برای دریافت اطلاعات بیشتر موجود نباشد، در آن صورت هر توصیف کوانتومی از مکان فوتون باید شامل دو بخش باشد. این دو بخش، مربوط به دو مسیری هستند که فوتون می‌تواند بپیماید.

تداخل‌سنجی را که الیتزور و وایدمن به عنوان آشکارساز بمب خیالی‌شان به کار گرفتند، احتمالات شبح‌گون را به گونه‌ای بازترکیب می‌کند که فوتون بازگردانده شده همواره در یک جهت خاص پدیدار شود. اما این فرایند، یک فرایند آسیب‌پذیر است. اگر عاملی مزاحم کار یکی از فوتون‌های شبح‌گون در مسیرش شود، در آن صورت بازترکیب حساس و ظرفیت به‌هم می‌خورد و به این‌ترتیب، احتمال پدیدار شدن فوتون در هر یک از دو جهت، پنجاه درصد خواهد بود. اکنون تصور

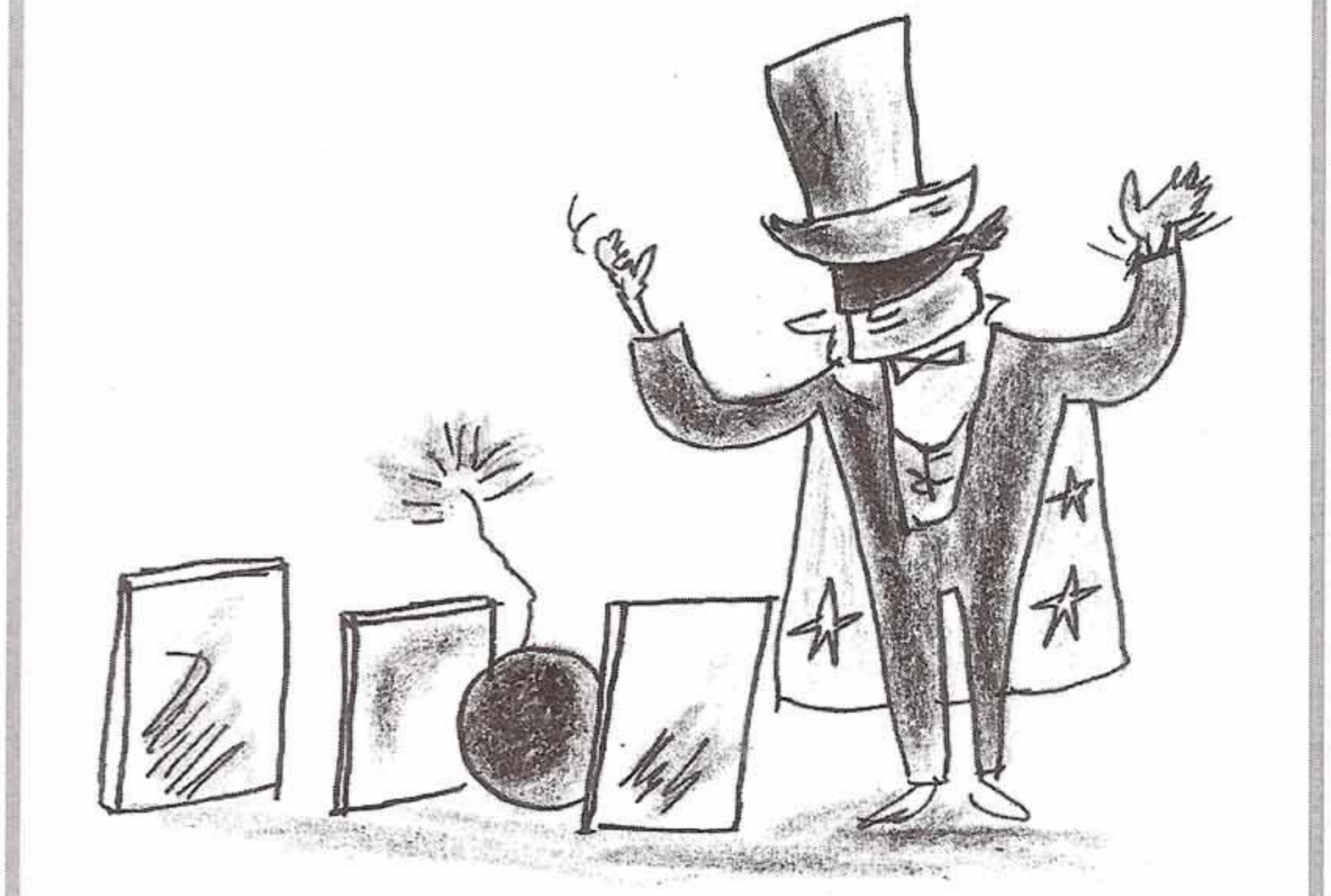


کنید که بمب بسیار حساسی داریم که تنها با یک فوتون می‌تواند منفجر شود، و این بمب در یکی از مسیرهای موجود در تداخل‌سنج قرار دارد. در این صورت چه روی خواهد داد؟

احتمال انفجار بمب، پنجاه درصد است. با این‌که می‌دانیم بمب وسیله بسیار پیشرفته‌ای است، اما در اینجا به صورت یک آشکارساز فوتون عمل می‌کند؛ و هر آشکارسازی که در یکی از مسیرهای تداخل‌سنج قرار داده شود، ۵۰ درصد احتمال برخورد با یک فوتون را خواهد داشت. بوم!

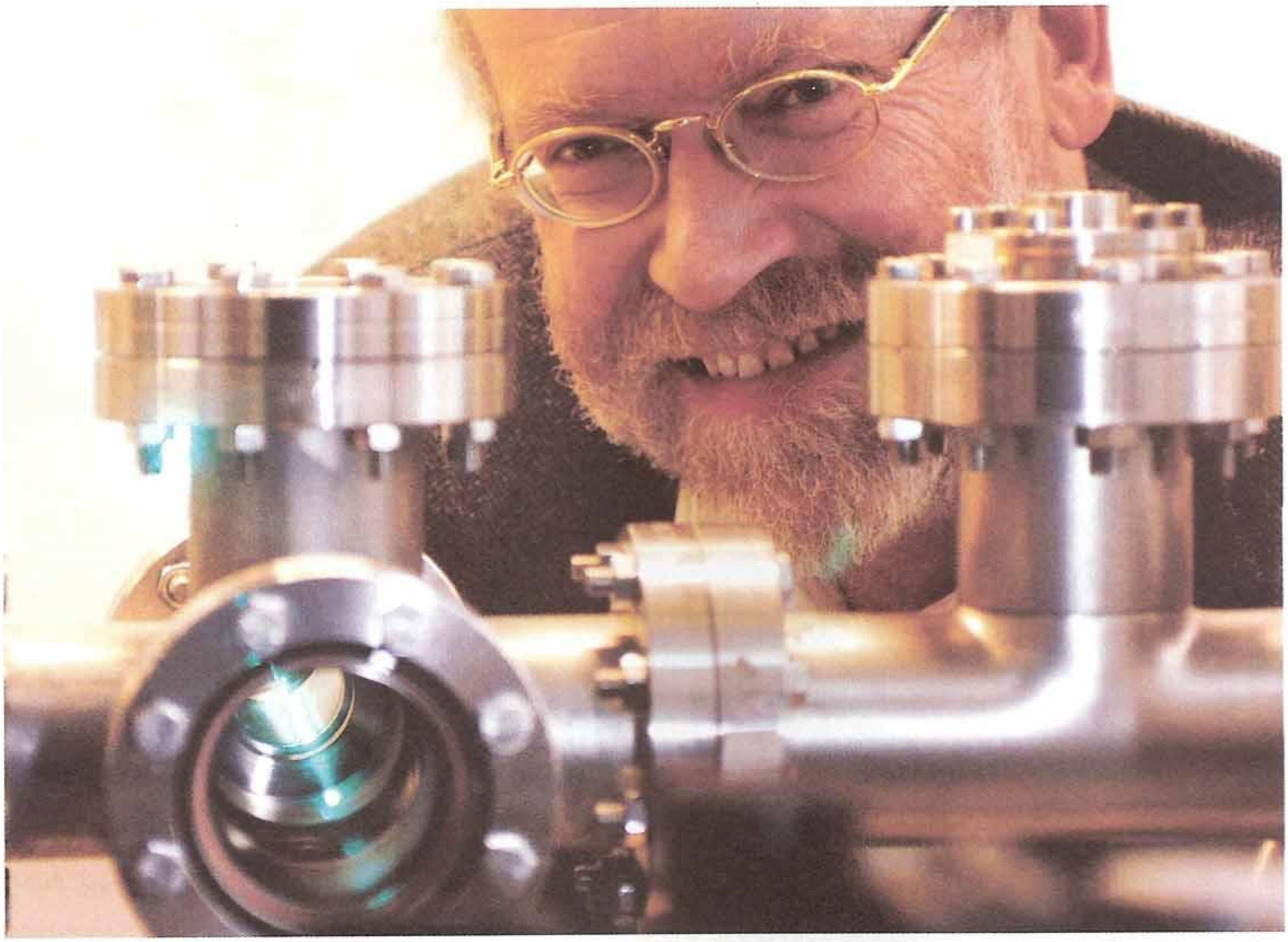
به این ترتیب، ۲۵ درصد احتمال دارد که فوتون در جهت معمولی بیرون آید و در مورد مکان بمب هیچ اطلاعاتی به ما ندهد. جالب‌ترین احتمال، آخرین آن است: ۲۵ درصد احتمال دارد که فوتون در جهت دیگر پدیدار شود. چنین چیزی تنها هنگامی رخ می‌دهد که بمب، داخل تداخل‌سنج باشد. تبریک! شما بمب را کشف کردید، و از آنجا که فوتون بدون آسیب بیرون آمده است، بمب نمی‌تواند منفجر شود.

به بیان ساده، وجود بمب شیوه‌ای را که فوتون به طور هم‌زمان هر دو مسیر داخل تداخل‌سنج را طی می‌کند، تغییر می‌دهد. چنین چیزی به بمب این امکان را می‌دهد که بر حرکت‌های فوتون تاثیر بگذارد، بدون این‌که واقعا با چیزی که "فوتونِ واقعی" نامیده می‌شود برهم‌کنش داشته باشد.



واضح است که این ترفند، نقطه‌ضعف‌های مربوط به خود را دارد. احتمال ۱ به ۲ وجود دارد که بمب منفجر شود ـ که در این حالت همه‌چیز تمام شده است! احتمال این‌که فوتون در جهت معمولی بیرون بیاید و شما پی به وجود بمب نبرید، ۱ به ۴ است. اما اگر این حالت روی دهد، تنها کافی است فوتون دیگری به درون دستگاه بفرستید، و اگر لازم بود یکی دیگر. این کار را تا آنجا ادامه می‌دهید که بمب را کشف و یا آن را منفجر کنید؛ و به این ترتیب شانس شما برای پیدا کردن بمب تا ۱ به ۳ افزایش می‌یابد.

چیز دیگری که می‌تواند به شما



"آنتون سایلینگر" با کمک همکارانش توانست نسخه‌ای تقریبا خطاناپذیر از "بمب‌یاب" کوانتومی را ارائه کند

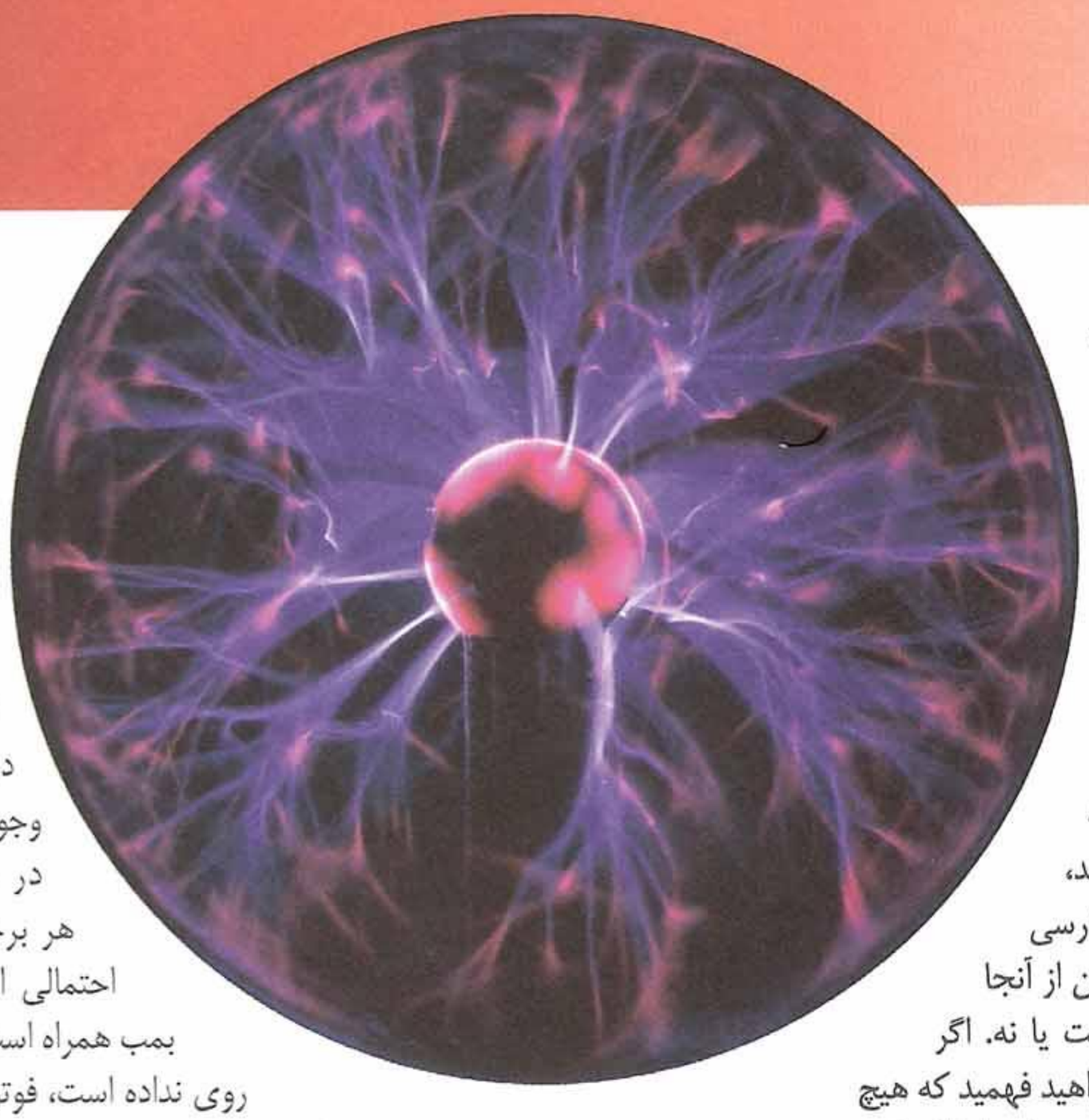
کمک کند، این است که آینه نیمه نقره‌اندود را به گونه‌ای تنظیم کنید تا نور، تنها شانس بسیار کمی برای رفتن به جایی که محل احتمالی بمب است داشته باشد. به این ترتیب، یک فوتون منفرد امکان کمی برای کشف و یا منفجر کردن بمب خواهد داشت، و شما می‌بایست فوتون‌های بسیاری را به داخل دستگاه بفرستید تا بتوانید نتیجه لازم را بگیرید. به این ترتیب، احتمال این‌که در نهایت بمب را بدون منفجر کردن آن کشف کنید، تا ۱ به ۲ افزایش می‌یابد. با این حال، از لحاظ عملی تنها تعداد کمی از متخصصان خنثی کردن بمب حاضر خواهند بود با دستگاهی کار کنند که فقط ۵۰ درصد شانس زنده ماندن به آنها می‌دهد.

تنها دو سال پس از طرح مسئله توسط الیتزور و وایدمن، "آنتون سایلینگر" و گروهش در اینسبروک ـ همان افرادی که ترفند ترابری کوانتومی را انجام دادند ـ نسخه‌ای تقریبا خطاناپذیر از "بمب‌یاب" کوانتومی ارائه کردند. آنها به جای این‌که فوتون‌های جدید را، یکی پس از دیگری، به داخل دستگاه بفرستند و این کار را تا به دست آوردن نتیجه مورد نظر ادامه دهند، روشی را ترتیب دادند که از همان یک فوتون می‌شود بارها و بارها استفاده کرد و آن را در داخل دستگاه به حرکت واداشت.

اتاقکی را در نظر بگیرید که در آن، دو دیوار روبه‌روی هم آینه‌های بازتابنده کامل هستند، که به این ترتیب یک فوتون می‌تواند برای همیشه بین آن دو در رفت و آمد باشد. اکنون با استفاده از یک آینه نسبتا کامل، اتاقک را به دو بخش تقسیم کنید. این آینه به گونه‌ای ساخته شده است که تقریبا تمامی نوری را که به آن برخورد می‌کند باز می‌تاباند، و تنها به مقدار کمی از آن (به عنوان مثال، یک فوتون از هر یک میلیون فوتون) اجازه عبور از خود را می‌دهد. اکنون، یک فوتون را به درون اتاقک و به سمت چپ آینه میانی بفرستید.

وجود بمب شیوه‌ای را که فوتون به طور هم‌زمان هر دو مسیر داخل تداخل‌سنج را طی می‌کند، تغییر می‌دهد

تا زمانی که فوتون مخفیانه به حرکت خود ادامه می‌دهد، ما نمی‌توانیم بفهمیم آیا بازتابیده شده یا از آینه گذر کرده است. این فوتون، کم‌کم تبدیل به یک موجودِ دوگانهٔ شبح‌گون می‌شود، که هر یک از آنها در یکی از دو نیمه اتاقک قرار دارند. نخست، تمامی وجود فوتون در سمت چپ است، اما پس از یک بار برخورد با آینه، احتمال کوچکی از "هستیِ" فوتون به سمت راست نفوذ می‌کند. با هر برخورد دیگر، هر یک از دو "بخش" فوتون دوباره تقسیم می‌شود، اما هنگام ملاقات با یکدیگر در میانه اتاقک، با هم برهم‌کنش نیز می‌کنند. آگاهی از تمامی نتایج این رفت و برگشت‌ها آسان است: پس از گذشت زمانی چند، فوتونی که حرکت خود را کاملا از سمت چپ اتاقک آغاز کرده بود، از آینه میانی خواهد گذشت و کاملا در سمت راست قرار می‌گیرد، و سپس نفوذ تدریجی خود را به سمت چپ آغاز می‌کند.



اکنون فرض کنید کسی به شما بگوید که بمب بسیار حساسی در سمت راست اتاقک قرار دارد. شما فوتونی را وارد سمت چپ اتاقک می‌کنید و می‌گذارید تا با برخورد به آینه‌ها، به جلو و عقب حرکت کند. پس از این‌که برخوردها به تعداد مورد نیاز انجام شد، سمت چپ اتاقک را وارسی می‌کنید تا ببینید آیا فوتون از آنجا به سمت راست رفته است یا نه. اگر رفته باشد، آن‌گاه شما خواهید فهمید که هیچ بمبی در سمت راست وجود ندارد. اما اگر فوتون هنوز در سمت چپ باشد (و این در واقع بخش زیرکانه کار است)، در این صورت می‌دانید که بمب در سمت راست قرار دارد. فراموش نکنید در حالی که شما در جست‌وجوی محل فوتون هستید، احتمال دارد که بمب منفجر شود. اما هر چه شدت بازتابش آینه میانی بیشتر باشد، احتمال انفجار کمتر خواهد بود. اگر آینه مرکزی تقریبا ـ اما نه به طور کامل ـ بازتابگر کامل باشد، شما می‌بایست مدت زمانی تقریبا برابر بی‌نهایت منتظر بمانید تا جست‌وجویتان به نتیجه برسد؛ اما در این فاصله، احتمال کشف بمب تقریبا برابر ۱۰۰ درصد است، در حالی که خطر انفجار آن تقریبا به صفر کاهش می‌یابد.

در نگاه اول، فهمیدن این‌که چرا این روش نسبت به روشی که الیتزور و وایدمن پیشنهاد کردند نتیجه متفاوتی می‌دهد، مشکل به نظر می‌رسد. در هر دو روش، هر یک از گذرهای فوتون احتمال کوچکی برای کشف بمب به دست می‌دهد، و شما تا وقتی که نتیجه مورد نظر را به دست نیاورده‌اند، به فرستادن فوتون‌ها به درون دستگاه ادامه می‌دهید. اما بین این دو روش یک اختلاف اساسی وجود دارد، که باز هم به یکی از ویژگی‌های غیرعادی نظریه کوانتومی وابسته است. در روش الیتزور ـ وایدمن، هر فوتون شانس کمی برای کشف بمب، و احتمال کمی برای منفجر کردن آن دارد. اما فوتون‌های پی‌درپی، این احتمالات را ـ با آهنگی مساوی ـ تقویت می‌کنند؛ و در پایان برای هر یک از دو حالت فوق پنجاه درصد احتمال رویداد وجود خواهد داشت.

در دستگاه سایلینگر نیز هر برخورد فوتون به آینه، با احتمالی اندک در منفجر کردن بمب همراه است، و تا زمانی که انفجار روی نداده است، فوتون به برخوردها و رفت و برگشت‌های خود ادامه می‌دهد. اما هر بار که فوتون به آینه میانی برخورد می‌کند و در منفجر کردن بمب ناموفق می‌ماند، احتمال حضور آن در سمت چپ اتاقک ۱۰۰ درصد است؛ انگار که اصلا به آینه برخورد نکرده است. وقتی که فوتون بار دیگر به آینه برخورد می‌کند تا تلاش دیگری را آغاز کند، مثل این است که پیش از آن هیچ تلاشی نکرده است. بنابراین هیچ اهمیتی ندارد که فوتون چند بار به آینه برخورد کند؛ فوتون در همان بخشی که حرکتش را آغاز کرده بود باقی می‌ماند، که این مسئله ثابت می‌کند که بمب در بخش دیگری قرار دارد.

ترفند استفاده شده در مورد کشف بمب، شدیدا به این نظر وابسته است که می‌گوید یک فوتونِ مشاهده نشده، می‌تواند هم‌زمان در هر دو طرف آینه میانی "وجود داشته باشد". این رویداد عجیب به فراوانی در مکانیک کوانتومی دیده می‌شود و به "اصل عدم قطعیت" معروف است.

پی‌نوشت:

1- Interferometer

همه‌چیز یک تبلیغ بیش نیست

اینجا هیچ چیز قطعی نیست

بنابر یکی از تفسیرهای فیزیک کوانتومی، با هر انتخاب ما جهان چندشاخه می‌شود و هر یک از هستی‌های ما در یکی از این جهان‌های موازی به حیات ادامه می‌دهد

اگر اصرار داشته باشید که از آن‌چه ایمن و آشناست جدا نشوید، در فهمیدن نظریه کوانتومی شکست خواهید خورد. واقعیت این است که قوانین عادی، در جهان کوانتومی به کار نمی‌آیند

نخستین توصیف اصل مشهور عدم قطعیت در سال ۱۹۲۷ صورت پذیرفت. در این سال، یک فیزیکدان آلمانی به نام "ورنر هایزنبرگ" ثابت کرد که می‌توان سرعت یا مکان یک الکترون را اندازه گرفت، اما هر دو اندازه‌گیری را هم‌زمان نمی‌توان انجام داد. به بیان دقیق‌تر، هایزنبرگ ثابت کرد که هر چه اندازه‌گیری مکان الکترون بهتر انجام شود، دقت اندازه‌گیری سرعت آن پایین‌تر خواهد آمد و بر عکس. اندازه‌گیری در واقع یک نوع سازش است، و این شما (آزمایشگر) هستید که باید تصمیم بگیرید چه چیزی را اندازه‌گیری کنید، و پیامدهای آن را نیز باید بپذیرید.

همانند بسیاری از پدیده‌های دیگر در نظریه کوانتومی، اصل عدم قطعیت نیز از عنصر احتمال ناشی می‌شود. هایزنبرگ در این اندیشه بود که بتواند مکان و سرعت یک الکترون را تنها با برخورد با یک فوتون اندازه‌گیری کند. اما هنگامی که یک فوتون به یک الکترون برخورد می‌کند، تنها یک پیامد قابل پیش‌بینی وجود ندارد، بلکه به جای آن گستره‌ای از پیامدهای محتمل را خواهیم داشت. برداشت ویژگی‌های الکترون از رفتار فوتونی که به آن برخورد می‌کند نیز باید به گستره‌ای از احتمالات ـ نه به یک تک‌نتیجه ـ بینجامد. به این ترتیب، می‌رسیم به اصل عدم قطعیت.

ریشه‌های این مفهوم، بااندکی تفاوت، شبیه است به آزمایش "توماس یانگ" در سال ۱۸۰۱ که می‌خواست نشان دهد نور موج است، نه ذره. یانگ با تاباندن نور به دو شکاف موازی نزدیک به هم بر یک صفحه کِدِر، نوارهای تاریک و روشنی مشاهده کرد که به صورت نقشی تداخلی، در محلی که نور به دیوار پشت صفحه برخورد می‌کرد، ایجاد شده بودند. او چنین استدلال کرد که اگر نور از ذراتی که به خط مستقیم حرکت می‌کنند تشکیل شده باشد، باید از میان شکاف‌ها عبور کند و فقط دو خط نورانی روی دیوار دیده شوند. اما از آنجا که نور یک موج است، ستیغ‌ها و پاستیغ‌های آن پس از گذر از شکاف‌ها می‌توانند یکدیگر را تقویت و یا حذف کنند، و به این دلیل بخش‌هایی از دیوار روشن و بخش‌های دیگر تاریک است.

اکنون می‌رویم به سراغ فوتون‌ها. فوتون‌ها به مانند ذره‌اند و بنابراین باید دو نقطه نورانی ایجاد کنند. ولی ضمنا بر خلاف گلوله‌های کلاسیکی، مانند موج با یکدیگر بر هم‌کنش دارند. فوتون‌ها ذراتی با ویژگی‌های موج‌مانندند، و یا اگر خوشتان نمی‌آید، می‌گوییم آنها موج‌هایی هستند که همانند زنجیره‌ای از ذرات رفتار می‌کنند. دقیقا مثل آینه نیمه نقره‌اندود در تداخل‌سنج که فوتون‌ها را "دو نیم" می‌کرد، شکاف‌های یانگ نیز هر فوتون را به دو بخش تقسیم می‌کنند، که این دو بخش در پشت صفحه با یکدیگر تداخل می‌کنند تا نقشی نواری روی

دیوار به وجود آورند. این "پاره"های فوتونی قابل آشکارسازی نیستند: چنان‌چه آشکارسازهایی پشت صفحه و در بالای شکاف‌ها قرار دهید تا ببینید فوتون‌ها چه مسیرهایی را می‌پیمایند، آن‌گاه نتیجه عمل شما نقش‌های تداخلی را از بین خواهد برد! اگر بخواهید رفتار فوتون‌ها را همانند ذراتی در نظر بگیرید که از میان یکی از شکاف‌ها می‌گذرند، نوارهای تاریک و روشن حاصل از رفتار موجی را از دست خواهید داد. در عوض، می‌توانید فوتون‌ها را با رفتاری همانند موج، و یا رفتاری همانند ذره در نظر بگیرید، اما در نظر گرفتن هم‌زمان هر دو رفتار امکان‌پذیر نیست.

این باور عمومی، یکی از کیفیت‌های تعیین‌کننده جهانی کوانتومی است. به خاطر بیاورید که چگونه در باطل‌نمای EPR، برپایه احتمال، این‌که یکی از فوتون‌ها بر جفت دور از خودش اثر لحظه‌ای داشته باشد وجود داشت. از هر دو فوتون درهم‌تنیده، احتمال چندین پیامد بالقوه انتظار می‌رود. این پیامدها را تا زمانی که واقعا مورد اندازه‌گیری قرار نگیرند، نمی‌توان تثبیت کرد. اما می‌دانیم هنگامی که چیزی را برای اندازه‌گیری انتخاب کردیم، باید از دستیابی به آگاهی دیگر چشم‌پوشی کنیم.

مشهور است که اینشتین نمی‌توانست این نظر را بپذیرد که خلقت جهان اتفاقی است. البته تنها وجود احتمالات نبود که او را عصبانی می‌کرد، بلکه تمامی نتایج درهم و برهمی که از آن ناشی می‌شد نیز باعث ناراحتی او بود. تعداد نسبتا زیادی از فیزیکدان‌ها نیز با عقیده اینشتین مبنی بر این‌که چیزی در نظریه کوانتومی وجود دارد که نمی‌تواند کاملا درست باشد، موافق بودند. در طی سالیان متمادی، این فیزیکدان‌ها نظریه‌های مبتکرانه‌ای برای رفع مشکلات موجود ارائه کرده‌اند. در سال ۱۹۵۲، یک فیزیکدان آمریکایی به نام "دیوید بوهم" که با اینشتین نیز کار کرده بود، نسخه‌ای از مکانیک کوانتومی را ارائه کرد که به نظر می‌رسید نگرانی اینشتین را برطرف خواهد کرد.

در نظریه بوهم، ذرات کوانتومی دارای "متغیرهای پنهان" هستند؛ متغیرهای پنهانی که سرشت‌های ذاتی آنها را تشکیل می‌دهند و برای هر ذره، اختصاصی و معین‌اند. هنگامی که روی هر یک از آنها دست به یک اندازه‌گیری می‌زنید، این متغیرهای پنهان با ابزار اندازه‌گیری شما بر هم‌کنش می‌کنند تا نتیجه‌ای حاصل شود. در مجموعه‌ای از ذرات کوانتومی، هر قدر که با دقت مرتب شده باشد، همواره گستره‌ای از متغیرهای پنهان وجود دارد که دقیقا مثل یک گاز معمولی عمل می‌کند، به طوری که برخی از اتم‌ها با سرعت بیشتر و برخی دیگر با سرعتی کمتر از میانگین حرکت می‌کنند.

در این نسخه از نظریه کوانتومی، به دلیل این‌که ذراتی که مورد اندازه‌گیری قرار می‌گیرند دارای گستره‌ای از سرشت‌های ذاتی هستند، اندازه‌گیری‌ها نیز به گستره‌ای از پیامدها منتهی می‌شوند. اصل عدم قطعیت هنوز هم سازگار است.

"ورنر هایزنبرگ" ثابت کرد که می‌توان سرعت یا مکان یک الکترون را اندازه گرفت، اما هر دو اندازه‌گیری را هم‌زمان نمی‌توان انجام داد

"هیو اورت" مفهوم جهان‌های موازی را وارد فیزیک کوانتومی کرد

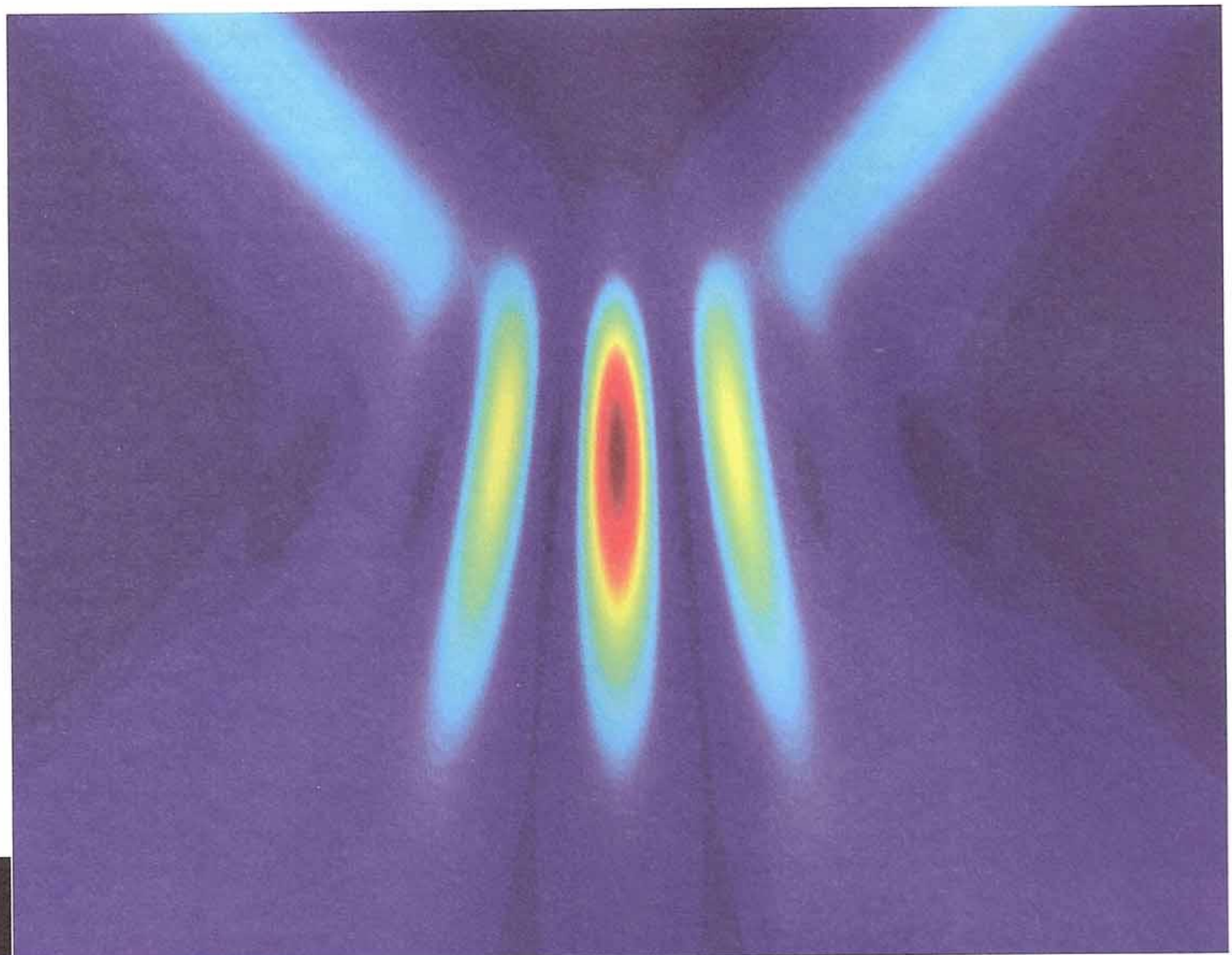
در نظریه "دیوید بوهم"، ذرات کوانتومی دارای "متغیرهای پنهان" هستند؛ متغیرهای پنهانی که سرشت‌های ذاتی آنها را تشکیل می‌دهند و برای هر ذره، اختصاصی و معین‌اند

از لحاظ عملی، نظریه بوهم دقیقا معادل نظریه کوانتومی معمولی است. در واقع، این نظریه یک "بازسازی" و "بازتعبیر" ریاضی از معادلات استاندارد است، و بنابراین به همان نتایج منجر می‌شود.

اما موضوع آزاردهنده‌ای در آن نهفته است: نظریه کوانتومی دارای مجموعه‌ای از سرشت‌های کاملا ناکلاسیکی است، بنابراین اگر چه بوهم تلاش کرد تا تعریف کلاسیکی را به ذات کوانتومی بازگرداند، اما نظریه او نمی‌تواند واقعا یک نظریه کلاسیکی باشد ـ و این‌چنین هم نیست.

به عنوان مثال، در مورد آزمایش دو شکاف یانگ، بنابر نظریه بوهم یک فوتون حتما از میان یکی از شکاف‌ها عبور می‌کند. اگر چنین است، پس چرا این فوتون یک نقش تداخلی را در سمت دیگر ایجاد می‌کند؟ پاسخ این سوال، چیزی است که "موج راهنما" نامیده می‌شود. به عقیده بوهم، در آزمایش یانگ هم موج و هم ذره هر دو وجود دارند، ولی با سرشت‌های متفاوت. موج راهنما ـ دقیقا همانند یک موج کلاسیکی ـ باگذر از میان دو شکاف یک نقش تداخلی ایجاد می‌کند. سپس، ذره به دنبال این موج راهنما راه می‌افتد (و به همین دلیل این موج، راهنما خوانده می‌شود).

انرژی و جهت فوتون‌هایی که به صورت یک زنجیره از میان شکاف‌ها عبور می‌کنند، اندکی با هم تفاوت دارند؛ و درست همانند تیله‌ای که روی کارتن موجداری قرار گرفته باشند، مسیرهای متفاوتی را ـ بسته به چگونگی



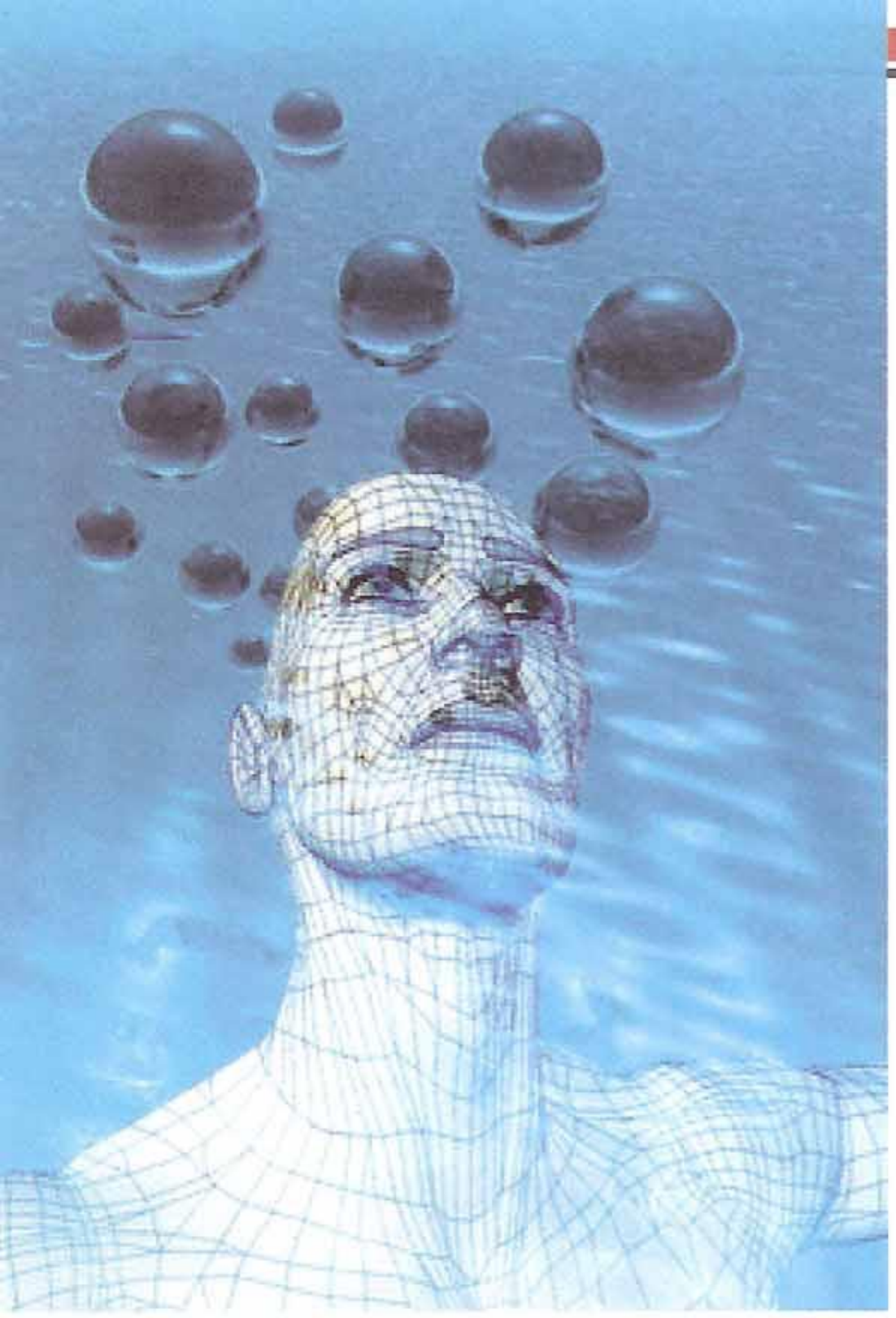
آغاز حرکتشان ـ به دنبال موج راهنما می‌پیمایند. فوتون‌ها با راهنمایی موج راهنما به صفحه می‌رسند، و نقش تداخلی مورد نظر شکل می‌گیرد.

همه‌چیز مرتب به نظر می‌رسد. اما مشکل بزرگ، توضیح این مسئله است که این موج راهنما چیست و چگونه فوتون‌ها را راهنمایی می‌کند. این موج نمی‌تواند یک موج کلاسیکی باشد که برای راهنمایی فوتون‌ها به آنها نیرو وارد کند، زیرا در آن صورت انرژی فوتون‌ها تغییر خواهد کرد ـ در حالی که در واقعیت چنین چیزی رخ نمی‌دهد.

طبیعتِ عجیب موج راهنما، در آزمایش EPR بیشتر مشخص می‌شود. در این آزمایش، موج راهنما اطلاعات را ـ بدون کم و کاست ـ از یکی از ذرات درهم‌تنیده ذره دیگر می‌فرستد؛ و به این ترتیب اندازه‌گیری‌های انجام شده روی این دو جفت ذره همواره درست از آب درمی‌آید. اما موج باید این کار را کاملا آنی انجام دهد. موج راهنما، تجسم فیزیکی مفهوم قدیمی "کُنش از دور" است، و این دقیقا همان چیزی است که اینشتین سعی می‌کرد از آن فرار کند.

پنج سال پس از ارائه نسخه متغیرهای پنهان نظریه کوانتومی از سوی بوهم، فیزیکدانی از دانشگاه پرینستون به نام "هیو اِورِت"، اندیشه کاملا متفاوتی در سر می‌پروراند. در آزمایش EPR، به عنوان مثال، ممکن است شما بدانید که یکی از فوتون‌های موجود در یک جفت فوتون به صورت قائم قطبیده شده است، بنابراین فوتون دیگر باید به صورت افقی قطبیده شده باشد. اما قطبش فوتون‌ها به سادگی می‌تواند عکس این حالت نیز باشد. سوال این است که چرا یکی از احتمالات به وقوع می‌پیوندد ولی احتمال دیگر نه. حرف اورت این بود که هر دو احتمال قطعا روی می‌دهند، اما در "جهان‌های مختلف". او مسئله را به این صورت بیان کرد که هرگاه یک اندازه‌گیری کوانتومی انجام می‌گیرد، جهان‌های مختلف از هم "جدا" می‌شوند؛ و برای هر یک از پیامدهای ممکن یک جهان وجود خواهد داشت. ما به این دلیل یک نتیجه خاص را می‌بینیم که در جهانی زندگی می‌کنیم که این نتیجه در آن روی می‌دهد. در جهان‌های دیگر، همتایان ما یکی دیگر از نتایج را می‌بینند؛ و چنین چیزی در هر تعداد جهانی که شما دوست داشته باشید روی می‌دهد.

جهان‌های بی‌شمار اورت، در محتوای شیوه نظریه کوانتومی هیچ تغییری ایجاد نمی‌کند. اگر دوست داشته باشید، می‌توانید آن را تعبیری متافیزیکی از همان نظریه قدیمی در نظر بگیرید. حتی در این مورد که آیا این "جهان‌های دیگر" واقعی هستند یا نه، می‌توان بحث کرد. اما نگاه کردن به جهانی غیر از جهان خود، به معنای نقض اصل عدم قطعیت خواهد بود. به عنوان مثال، چنین چیزی به این معناست که می‌توان سرعت یک الکترون را در یک جهان و موقعیت آن را در جهانی دیگر اندازه گرفت، و سپس نتایج به دست آمده در این دو جهان را با هم ترکیب و به این وسیله بر محدودیت

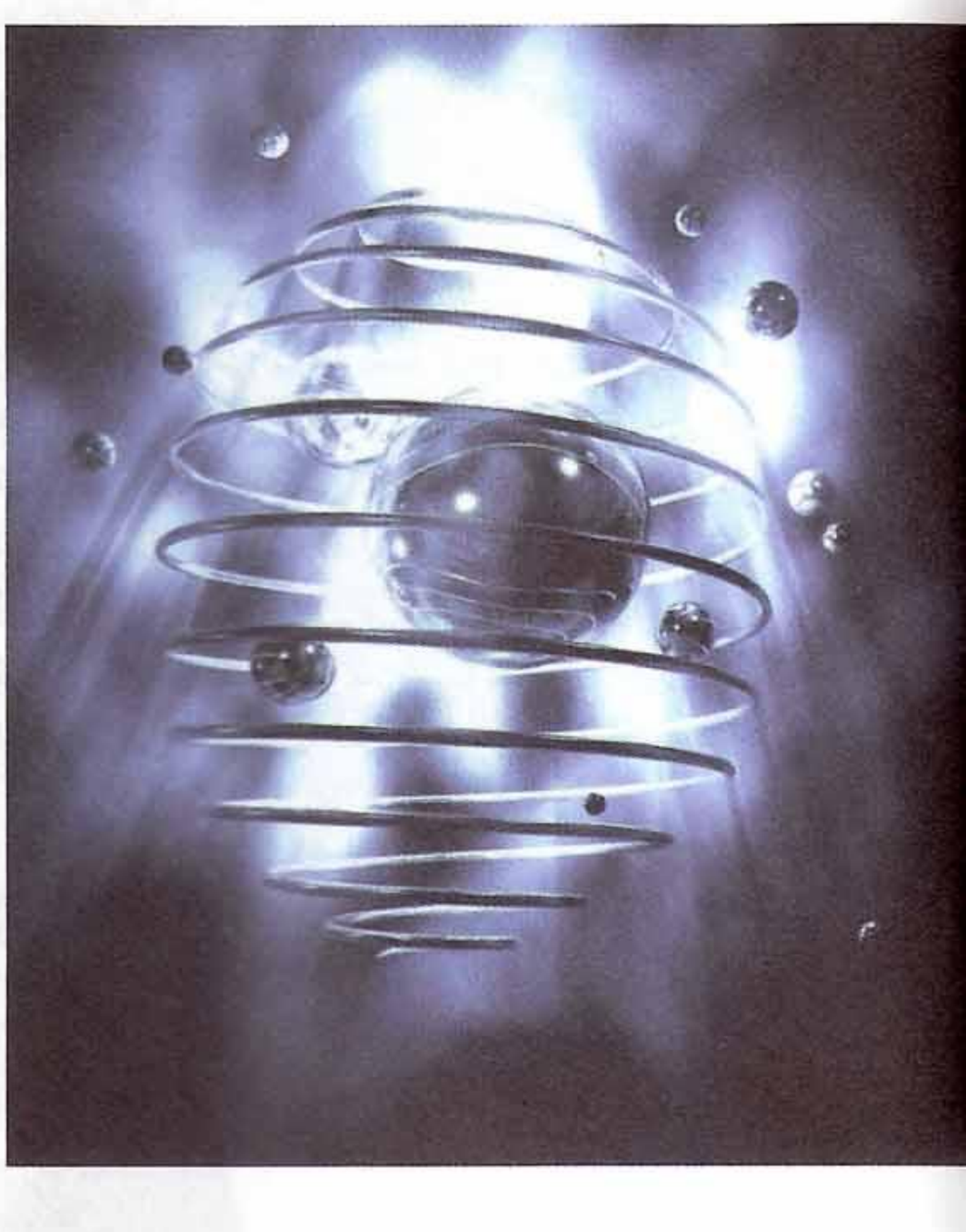


هایزنبرگ غلبه کرد.

بنابراین به محض این‌که یک اندازه‌گیری این جهان‌های جدا از هم را تولید کند، آن جهان‌ها باید دقیقا وکاملا جدا از هم باقی بمانند. آیا این جهان‌ها واقعی هستند؟ این شما هستید که در این مورد تصمیم می‌گیرید. بحث در مورد "تفسیر"های نظریه کوانتومی بحث تازه‌ای نیست و ممکن است گروهی به بی‌نتیجه بودن آن معتقد باشند، زیرا همه آن گفته‌ها به نتایج عملی یکسانی می‌رسند. در واقع، این سوالی است که پاسخ آن به شما برمی‌گردد که چه تصویر ذهنی از جهان کوانتومی در دلپذیر می‌یابید.

در هر حال، اثبات این‌که نظریه کوانتومی با فیزیک کلاسیک تفاوت بنیادی دارد، امکان‌پذیر بوده است. در سال ۱۹۶۴، "جان بل" به یک قضیه ساده و جالب دست یافت که اکنون به نام او خوانده می‌شود. این قضیه مربوط به آزمایش EPR است که در آن، طبق معمول جفت‌هایی از ذرات که درهم‌تنیده‌اند به جهات مختلف فرستاده می‌شوند. بل در مورد این مسئله می‌اندیشید که اگر در دو آزمایش مجبور نباشیم همواره قطبش فوتون را در یک جهت از پیش تعیین شده اندازه‌گیری کنیم، بلکه بین زوایای مختلف یکی را به طور تصادفی برای اندازه‌گیری قطبش انتخاب کنیم، چه روی خواهد داد.

از دیدگاه کلاسیکی، وقتی که دو ذره EPR در مسیرهای جداگانه روانه می‌شوند، نمی‌توانند بر یکدیگر تاثیر بگذارند. مطابق نظریه کوانتومی، ارتباط شبح‌گون باقی می‌ماند، اما صحبت در مورد چگونگی این ارتباط، و یا یافتن راهی برای سنجیدن آن، مشکل است. قضیه بل در واقع همین کار را انجام می‌دهد. این قضیه می‌گوید که در یک رشته از اندازه‌گیری‌های انجام شده بر جفت ذره‌های متوالی، تفاوت های آماری بین تصاویر کوانتومی و کلاسیکی پدیدار می‌شوند. ذرات کوانتومی بیشتر از ذرات کلاسیکی به هم وابسته‌اند، و این نتیجه را می‌توان با انجام آزمایش های ریاضی ساده روی نتایج به دست آمده از یک رشته اندازه‌گیری انجام شده بر جفت‌های EPR، به دست آورد.



بل کمیتی ریاضی را به فرمول درآورد که بنابر نظریه کوانتومی، مقدار آن از مقادیری که تمامی تصاویر کلاسیکی در اختیار می‌گذارند بزرگ‌تر است. بیست سال طول کشید تا قضیه بل با موفقیت به محک زده شود. انجام آزمایش‌های مورد نیاز با دقت و قابلیت اطمینان کافی در این خصوص، کاری دشوار بود. اما در سال ۱۹۸۲، "آلن آسپه" از دانشگاه پاریس موفق به انجام آن شد.

پاسخ درست را نظریه کوانتومی داد که اگر هیچ خاصیتی نداشت، حداقل موجب شد تا تمامی آرزوهای فروخفتهٔ کسانی که در انتظار بازگشت فیزیک کلاسیک به اوج شکوه اولیه‌اش بودند، فروبریزد. علاوه بر این، آزمایش قضیه بل توسط آسپه نشان داد که هر تلاشی برای بازسازی مکانیک کوانتومی به عنوان یک نظریه شبه کلاسیکی، محکوم به شکست است. نظریه کوانتومی چیزی کاملا متفاوت است، و همواره متفاوت خواهد ماند.

در اصل، ماهیت این تفاوت، مفهومی است که "ناجایگزیدگی"[1] خوانده می‌شود. فیزیک کلاسیک قانون شدیدا جایگزیده‌ای از علت و معلول را به نمایش می‌گذارد. چیزی که در نقطه A روی می‌دهد، تنها در نقطه A می‌تواند اثر لحظه‌ای داشته باشد، و اگر این اثر در نقطه B احساس شود، یک تاثیر فیزیکی باید از A به B رفته باشد، که این عمل مستلزم صرف زمانی معین است.

نظریه کوانتومی ناجایگزیده است. در آزمایش EPR اندازه‌گیری در نقطه A، یک اثر ناپیدا، لحظه‌ای، و (بنابر قضیه بل) قابل اندازه‌گیری در نقطه B دارد. بحث در این مورد که آیا عاملی فیزیکی (مادی) از A به B می‌رود یا نه، همواره وجود داشته و هنوز به نتیجه مشخصی نرسیده است. در نظریه بوهم، موج راهنما این اثر لحظه‌ای را منتقل می‌کند. در نگرش اورت، ناجایگزیدگی در جهان‌های بی‌شمار پاشیده شده است. به هر شکل که به آن نگاه کنید، ناجایگزیدگی حتما در جهان کوانتومی به وقوع می‌پیوندد، و هیچ راهی برای فرار از آن وجود ندارد.

پی‌نوشت:

1- Non-locality

سفری به درون جعبه‌ای که گربه‌ها در آن زندگی می‌کنند

مرده یا زنده؟

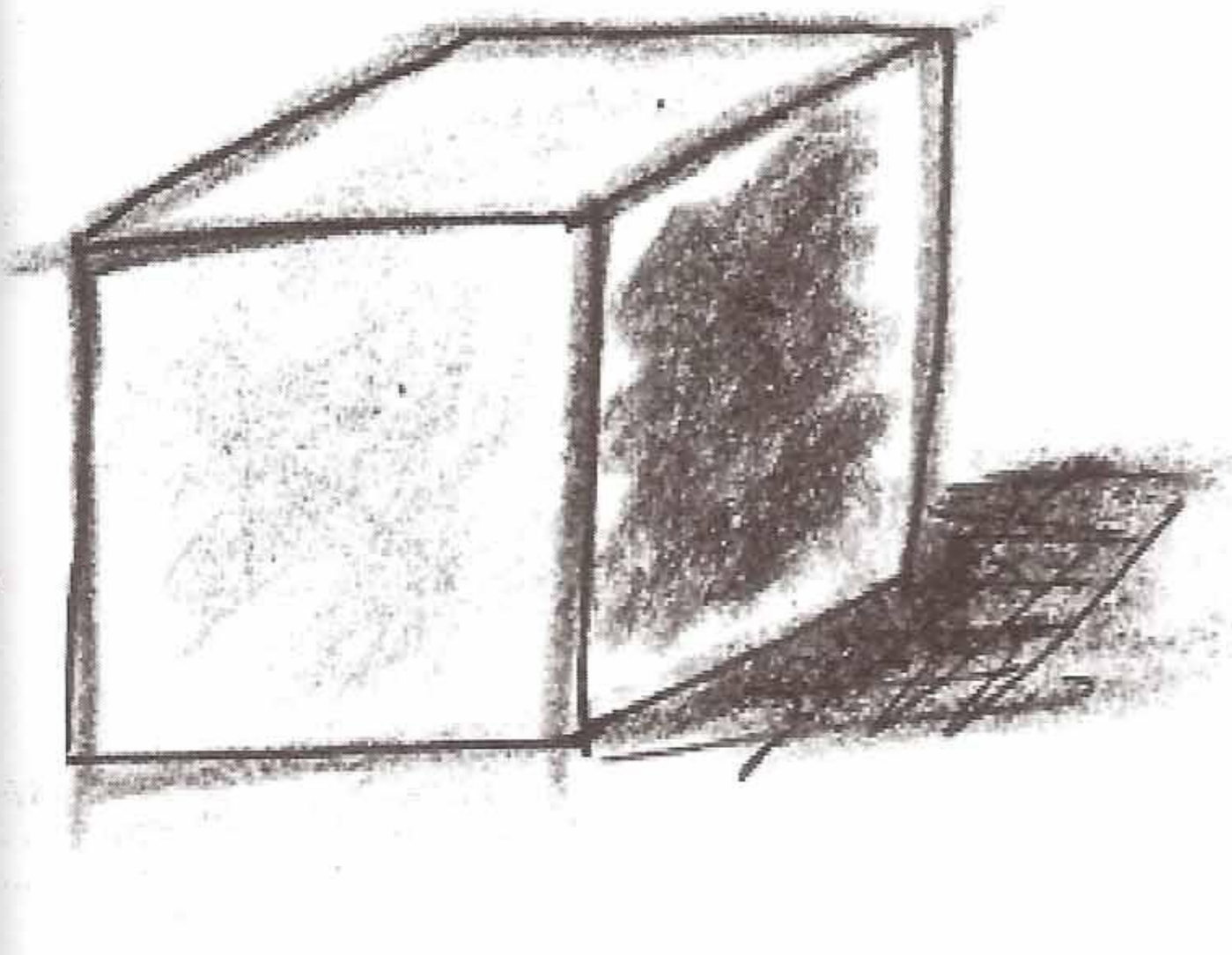
در جهان واقعی، گربه‌ها نمی‌توانند هم زنده باشند و هم مرده. پس چه چیزی آنها را مجبور به انتخاب می‌کند؟

در جهان کوانتومی، آن‌چه که مشاهده می‌شود، نتیجه اندازه‌گیری‌هاست. از یک اندازه‌گیری تنها یک پاسخ معین از میان گستره‌ای از احتمالات پدیدار می‌شود. بدیهی است که اگر اندازه‌گیری‌هایی صورت نگیرد، جهان همواره در غباری از ناآگاهی‌ها دست و پا خواهد زد. اما ببینیم منظور از "اندازه‌گیری"[1] در زمین چیست. آیا این عمل به کوشش انسان و یا مشاهده او نیاز دارد، یا مانند درختی که دور از چشم انسان در جنگلی فرو می‌افتد، در هاله‌ای از ابهام نیز می‌تواند روی دهد؟ حال اگر بنا به فرض بدانیم که اندازه‌گیری چیست، این سوال پیش می‌آید که این اندازه‌گیری با چه دقتی یک سیستم کوانتومی را وادار می‌کند تا از میان گزینه‌های مختلف یکی را انتخاب کند، و در مورد انتخاب یک حالت معین تصمیم بگیرد؟

"نیلز بور" هنگام نوشتن آن‌چه که بعدها به نام "تفسیر کپنهاگی نظریه کوانتومی" شناخته شد، از اهمیت این سوالات کاملا آگاهی داشت. اما او نتوانست پاسخ‌های مناسبی برای آنها بیابد ـ و چنین ادعایی هم نداشت. او می‌گفت که اندازه‌گیری‌ها انجام شدنی هستند، و ما این را می‌دانیم که در هر حال، آشکارسازهای فوتون، فوتون‌ها را آشکار می‌کنند. به تاکید او یک اندازه‌گیری فرایندی است که یک سیستم کوانتومی را وادار می‌کند تا حالت معینی را انتخاب کند. درست است که این یک تعریفِ نسبتا زنجیره‌ای است، که اگر آن را بپذیریم، پیامدهای آن نیز پذیرفتنی است. این اصل، اساس تفسیر کپنهاگی را تشکیل می‌دهد، و نکته اصلی آن در این است که دیگر نباید نگران مفهوم اندازه‌گیری باشیم.

اما این‌که ما یک نظریه فیزیکی بنیادی داشته باشیم که هر چند ممکن است خوب کار کند، اما به اصلی وابسته باشد که هیچ‌کس حتی ادعای فهمیدن آن را ندارد، چندان خوشایند نیست. یکی از موجوداتی که از این اوضاع ناراضی بود، گربه "اروین شرودینگر" بود. این گربه خودش را درون جعبه‌ای می‌یابد که در آن، وسیله‌ای وجود دارد که فوتونی را به سمت یک صافی می‌فرستد و گذشتن یا نگذشتن فوتون از میان آن را ثبت می‌کند. اگر فوتون از میان صافی گذر نکند، هیچ اتفاقی نمی‌افتد. اما اگر گذر کند، فوتون به دستگاهی ضربه می‌زند که آن نیز به نوبه خود یک شیشه محتوی گاز سمی را می‌شکند و در نتیجه، گربه بدشانس می‌میرد. آزمایش به گونه‌ای تنظیم می‌شود که احتمال گذشتن فوتون از میان صافی، پنجاه ـ پنجاه باشد. در نتیجه، وقتی شما در جعبه را باز و به درون آن نگاه می‌کنید، پنجاه درصد احتمال دارد که گربه بیرون بپرد.

همه‌چیز مرتب به نظر می‌رسد، اما آن‌گونه که شرودینگر در سال ۱۹۳۵ خاطرنشان کرد، مشکل زمانی به وجود می‌آید که شما از خود می‌پرسید داخل جعبه ـ پس از انجام اندازه‌گیری فوتون و پیش از آن‌که کسی در جعبه را باز کند ـ چه اتفاقی می‌افتد. پاسخ آن به همین سادگی است که بگوییم وسیله پرتاب فوتون، فوتون را به سمت صافی می‌فرستد، فوتون یا از میان صافی گذر می‌کند و یا نمی‌کند، شیشه محتوی گاز سمی یا می‌شکند و یا نمی‌شکند، و گربه یا می‌میرد



"نیلز بور" معتقد بود که اندازه‌گیری، فرایندی است که یک سیستم کوانتومی را وادار می‌کند تا حالت معینی را انتخاب کند

و یا زنده می‌ماند.

به محض برخورد فوتون به صافی، یک اندازه‌گیری کوانتومی انجام می‌پذیرد، و وقوع رویدادهای بعدی ما را مطمئن می‌کند که پس از این زمان، درون جعبه یا یک گربه مرده وجود خواهد داشت و یا یک گربه زنده. اما چنین چیزی بر این فرض استوار است که وجود فوتونی که به صافی برخورد می‌کند، برای برقراری اندازه‌گیری کافی باشد. حال اگر برای انجام اندازه‌گیری، وجود یک انسان برای مشاهده لازم باشد، چه روی خواهد داد؟ در آن صورت به نظر می‌رسد که گربه باید در یک "حالت گربه‌ایِ" کوانتومیِ نامعین باشد، که نه مرده است و نه زنده اما هر دو حالت را بالقوه در خود دارد؛ و این حالت تا زمانی که کسی در جعبه را برای دیدن درون آن باز نکند، ادامه خواهد داشت. اما برای یک گربه، بودن در یک حالت نیمه مرده ـ نیمه زندهٔ نامعین چه معنایی می‌تواند داشته باشد؛ اگر اصلا معنایی داشته باشد؟!

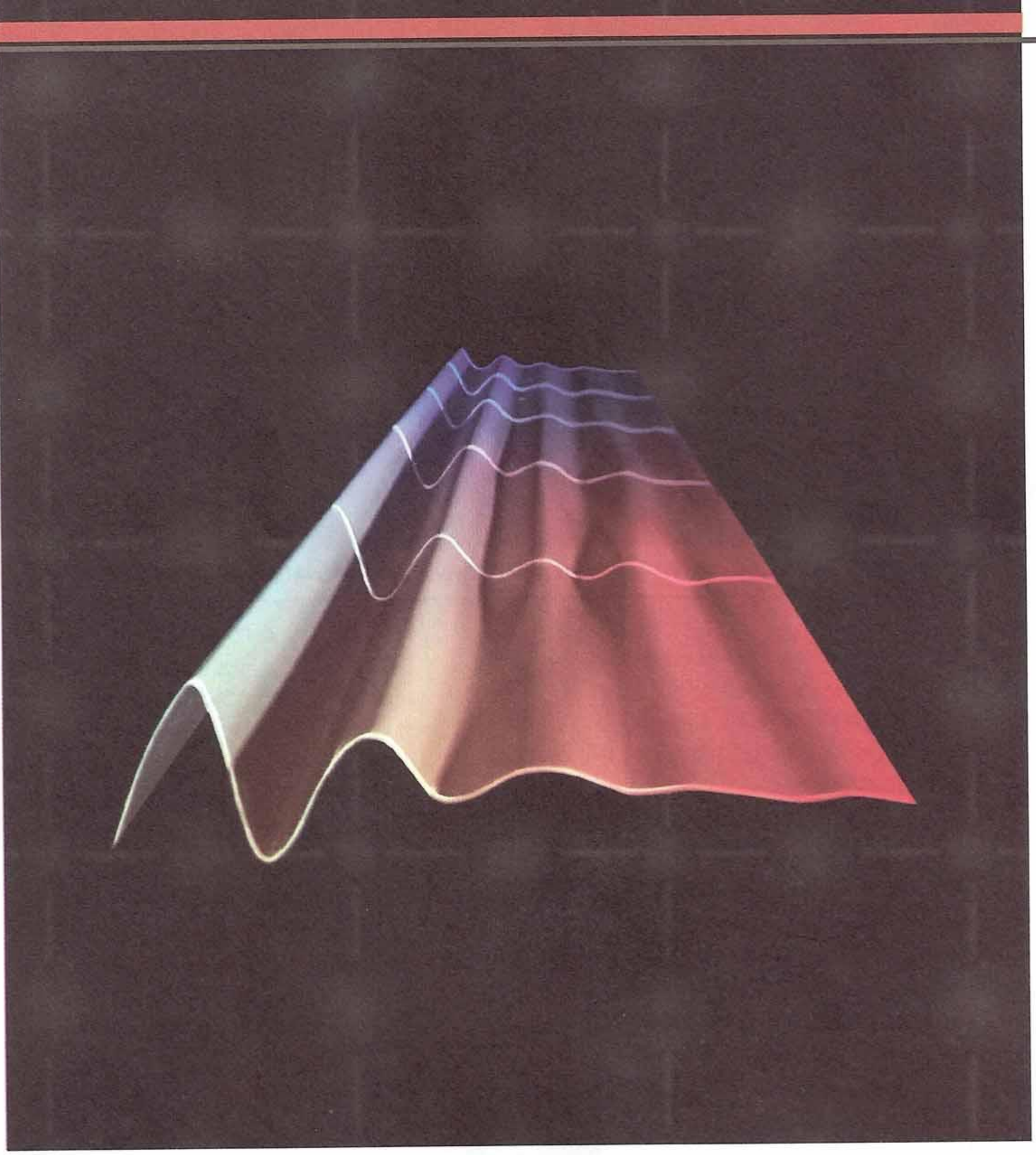
پاسخ بور صریح و روشن بود: این مسئله اصلا اهمیتی ندارد. تنها چیزی را که می‌توان ثابت کرد و نشان داد این است که وقتی در جعبه باز می‌شود، گربهٔ داخل آن یا مرده است و یا زنده. در مورد این‌که یک گربه نیمه مرده ـ نیمه زنده چه معنایی می‌تواند داشته باشد، هیچ مسئله نگران‌کننده‌ای نیست؛ برای این‌که هرگز نمی‌توان چنین موجودی را دید. هر گربه‌ای را که شما می‌بینید، به شکلی ثابت و تغییرناپذیر یا مرده است و یا زنده.

با این حال، در این مورد یک مشکل فیزیکی واقعی وجود دارد. نگرش بور مثل این است که بگوییم رشته‌ای از اشیای کوانتومی (مثل فوتون‌ها) را داریم که می‌توانند در حالت‌های کوانتومی نامعین باشند، و رشته‌ای از اشیای کلاسیکی (مثل گربه‌ها) را داریم که تنها در حالت‌های کلاسیکی معین می‌توانند وجود داشته باشند. مسئله اینجاست که یک گربه از اجزای کوانتومی ـ یعنی پروتون‌ها، نوترون‌ها و الکترون‌ها ـ تشکیل شده است. نظریه کوانتومی به عنوان پایه اصلی تمامی فیزیک در نظر گرفته می‌شود، بنابراین چگونه گربه‌ها به جای این‌که گربه نیمه مرده ـ نیمه زنده کوانتومی باشد، گربه "کاملا مرده یا زنده" کلاسیکی شده‌اند؟

اکنون می‌توان به شکلی دیگر به مسئله اندازه‌گیری نگاه کرد. واقعا در کدام بخش از زنجیره رویدادها ـ از فوتون به صافی و سپس آشکارساز و شیشه گاز سمی و گربه ـ اندازه‌گیری صورت می‌گیرد؟ در چه نقطه‌ای و چگونه، قطعیت کلاسیکی جایگزین عدم قطعیت کوانتومی می‌شود؟

"اروین شرودینگر"، فیزیکدانی که معمای معروف گربه را مطرح کرد

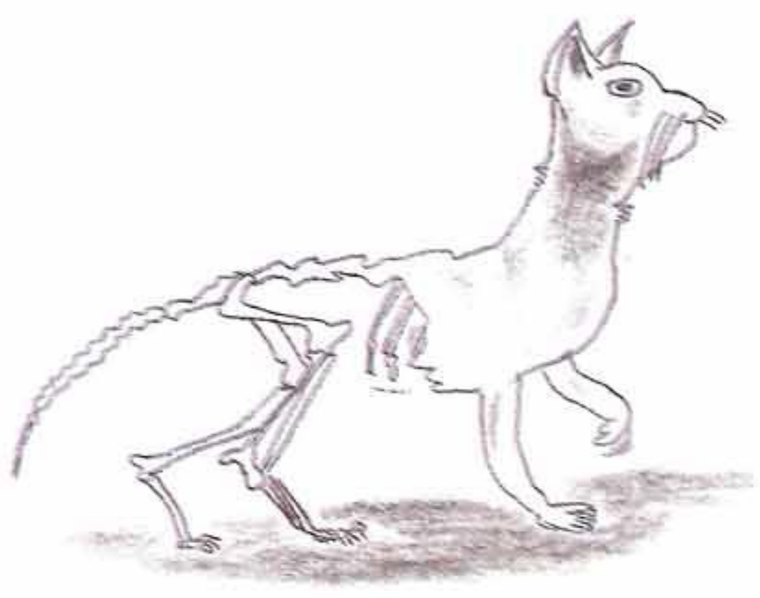
این سوالات به این پرسش باز می‌گردد که صحبت درباره حالت کوانتومی یک شیء مرکب ـ مثل گربه ـ چه معنایی دارد. مرده یا زنده بودن، ویژگی ذاتی اجزای کوانتومی بنیادی یک گربه نیست، بلکه خصوصیت مشترک طریقه قرارگیری تمام این اجزا در کنار هم است. یک حالت گربه‌ای کوانتومی، اگر درست توصیف شده باشد، به معنای شرحی دقیق و کامل از مشخصات



حالت کوانتومی تک‌تک ذرات موجود در گربه است. اگر یک الکترون به حالت انرژی دیگری پرش کند، در آن صورت تمامی وجود گربه با هم به حالت کوانتومی سراسری دیگری پرش خواهد کرد.

واضح است که (تقریبا) بی‌نهایت حالت کوانتومی وجود دارد که همگی به یک گربه مربوطند. حتی وقتی که به نظر می‌رسد گربه به هیچ کاری مشغول نیست (که گربه‌ها معمولا چنین عادتی دارند!)، آرایش کوانتومی درونی او در آشفتگی دائمی به سر می‌برد، و مدام از یک حالت به حالت دیگر پرش می‌کند. اما تمامی این حالت‌های گربه‌ای کوانتومی می‌باید متعلق به یکی از این دو دسته باشند: حالت‌های مربوط به گربه‌های زنده، و یا حالت‌های مربوط به گربه‌های مرده.

آیا می‌توان یک حالت گربه‌ای کوانتومی "نیمه مرده ـ نیمه زنده" واقعی را ساخت؟ از لحاظ نظری، پاسخ مثبت است. یک حالت را از دسته حالت‌های کوانتومی "گربه‌های مرده" و یک حالت را از دسته حالت‌های کوانتومی "گربه‌های زنده" انتخاب کنید و با استفاده از ابزارهای استاندارد، این دو را به صورت ریاضی با هم ترکیب کنید تا تنها یک حالت را به دست آورید که از هر دو احتمال، به اندازه مساوی سهم می‌برد. این

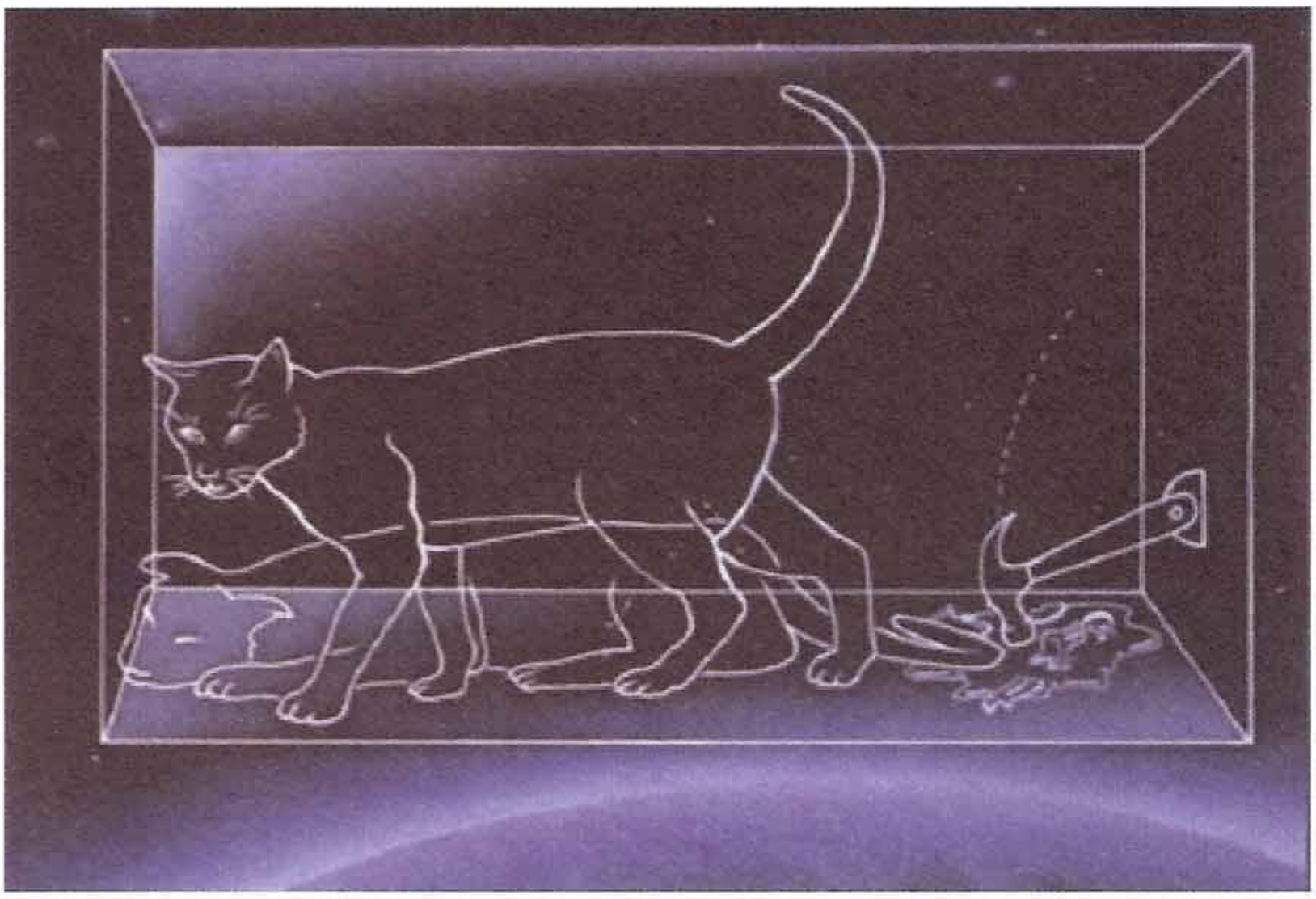


کار، اگر چه در مقیاس بسیار بزرگ‌تری انجام می‌گیرد، اما کاملا همانند است با ترکیب حالت‌های کوانتومی فوتون‌های دارای قطبش‌های افقی یا قائم، برای به دست آوردن فوتونی با حالت نامعین که قطبش آن هنوز اندازه‌گیری نشده است.

حالت قطبشی "نیمه افقی ـ نیمه قائم" یک فوتون، به همین شکل باقی می‌ماند. در اصل، برای حالت گربه‌ای کوانتومی "نیمه مرده ـ نیمه زنده" نیز باید این حالت برقرار باشد. اما در مورد حالت دوم مسائل پیچیده‌ای وجود دارد، چون دو نیمه مرده و زنده گربه آزادند تا به سرعت به هر یک از هزاران حالت مرده و زنده دیگری که درهایشان به روی آنها بازند، تبدیل شوند. علاوه بر این، در حالی که بخش مرده در میان تمامی حالت‌های مرده ممکن حرکت می‌کند، و بخش زنده نیز همین کار را در حالت‌های زنده انجام می‌دهد، کارهای این دو بخش مستقل از یکدیگرند.

برای نمایش یک حالت "نیمه مرده ـ نیمه زنده" واقعی، باید پیوستگی بسیار ویژه‌ای در طریقه اتصال دو بخش تشکیل‌دهنده به یکدیگر وجود داشته باشد. همچنان که هر یک از بخش‌ها تغییر و تحول پیدا می‌کند، این پیوستگی به تدریج از بین می‌رود؛ و به این ترتیب، در عمل گربه به صورتی رفتار نمی‌کند که گویی در یک حالت نیمه مرده ـ نیمه زنده قرار دارد، بلکه به گونه‌ای رفتار می‌کند که گویی یا مرده است و یا زنده ـ و این دقیقا همان چیزی است که از یک گربه انتظار داریم. به بیان دقیق‌تر، هیچ تغییری از "مرده و زنده" به "مرده یا زنده" وجود نداشته است؛ اما از لحاظ عملی، انجام آزمایشی که بتواند چیزی را به غیر از یک گربه مرده یا زنده پیدا کند، ناممکن می‌شود. برای تمامی اهداف عملی، گربه یک موجود کلاسیکی است.

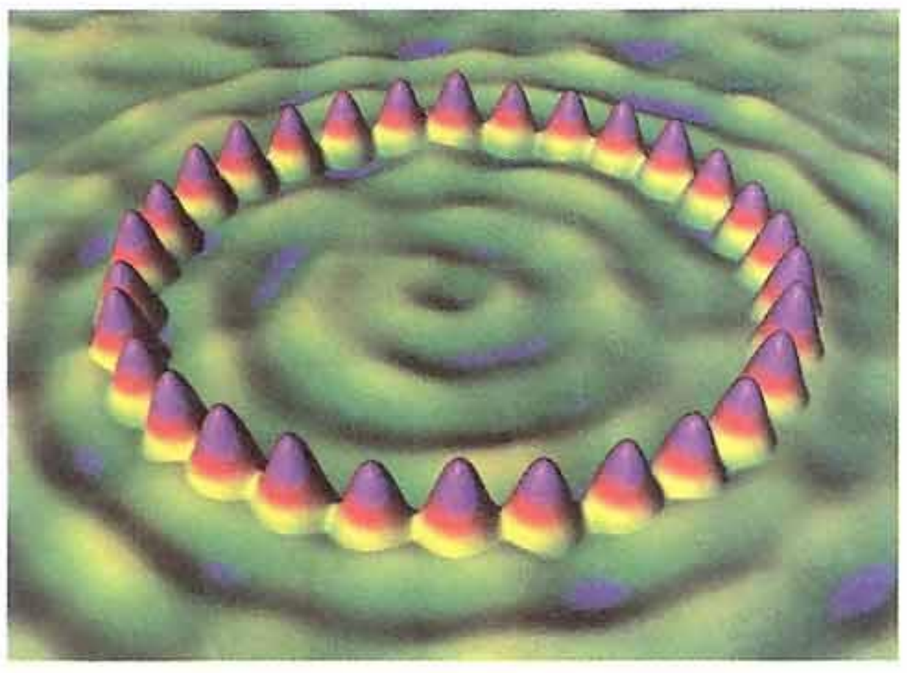
فرایند فوق، یعنی "جدایی"[2] بین اجزای تشکیل‌دهنده یک حالت کوانتومی چندگانه، نشان می‌دهد که نگهداشتن اشیای مرکب در حالت‌های کوانتومیِ خالص چقدر دشوار است. دلیل این مسئله آن است که این اشیا، در معرض بر هم‌کنش‌ها و آثار کُتره‌ای بی‌شمار داخلی و خارجی قرار دارند. خلاصه این‌که وجود یک گربه "نیمه مرده ـ نیمه زنده" ناممکن نیست، بلکه فقط بسیار نامحتمل است ـ و آشکار سازی آن نیز تقریبا ناممکن. روش دیگری برای نگاه کردن به این حالت، این است که بگوییم بر هم‌کنش دائمی اتم‌ها و الکترون‌ها در بدن گربه، به معنای "خوداندازه‌گیری" پیوسته حالت کوانتومی



است. موضوع مشاهده یا آشکارسازی نیست، بلکه این برهم‌کنش بی‌وقفه و دائمی تمامی حالات کوانتومی در بدن یک گربه است که از پایدار ماندن هر یک از حالت‌های مجزا جلوگیری می‌کند. بنابراین انسان‌ها یا گربه‌ها ناگزیر در یک حالت کلاسیکی قابل مشاهده و با معنی قرار می‌گیرند ـ اگر چه حالت کوانتومی درونی گربه دائما در حال تغییر، و کاملا غیر قابل پیش‌بینی است. به عبارت دیگر، این مسئله تقریبا تضمین شده است که هر چیز بزرگی شبیه یک شیء کلاسیکی به نظر برسد، نه کوانتومی ـ و این دقیقا همان چیزی است که دکتر بور توصیه کرده بود!

پی‌نوشت:

1- Measurement/ 2- Decoherence



خانهٔ درگشوده

فهمیدن نظریه کوانتومی دشوار است، اما راه‌هایی برای درک رازهای درونی آن وجود دارد

اگر نظریه کوانتومی چنان‌که از آن انتظار می‌رود کارایی داشته باشد، آن‌گاه دیگر نمی‌توان گربه شرودینگر را در حالت عجیب دوگانه (نیمه مرده ـ نیمه زنده) دید. این انتظار دلگرم‌کننده است، زیرا به تجربه می‌دانیم که گربه‌ها مجموعه‌ای از موجودات کوانتومی غیرزمینی نیستند. پس با این حساب، حالت نامعین گربه شرودینگر واقعا به چه معناست؟

منظور اصلی نیلز بور در پرداختن به نظریه کوانتومی، این بود که همه توجه خود را به آن‌چه که می‌توان دید معطوف کنیم. از نظر او، ماهیتِ به ظاهر ناممکن یا متناقض حالت‌های میانی که بنا به تعریف غیرقابل مشاهده‌اند، نگران‌کننده نیست. این دیدگاه، کاملا منطقی به نظر می‌رسد؛ جز این‌که بدون این حالت‌های میانی عجیب، نمی‌توان کاری انجام داد. درست است که این حالت‌ها غیر قابل مشاهده‌اند، اما بالاخره باید به شکلی وجود داشته باشند.

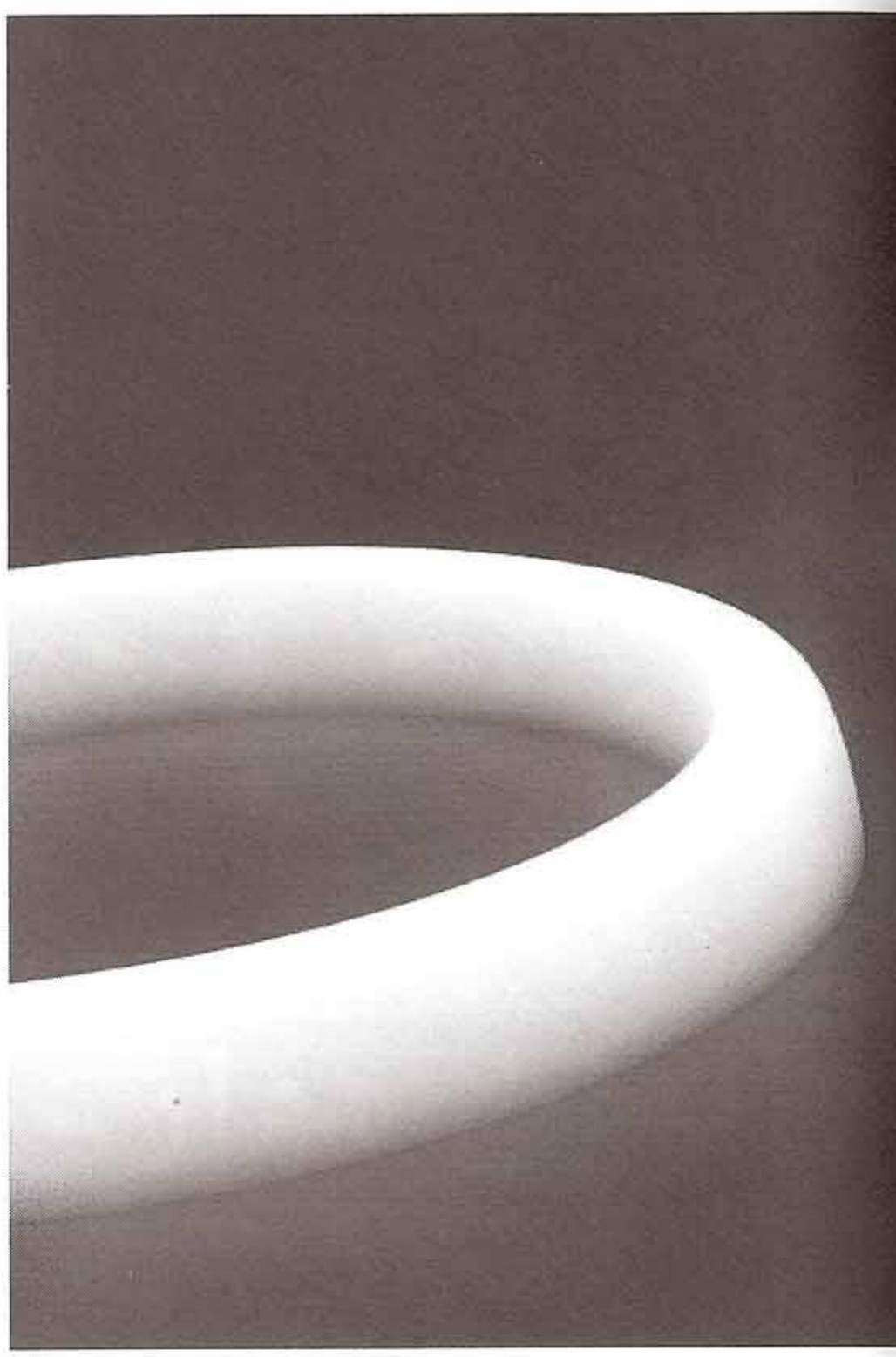
در سال ۱۹۹۶، محققان موسسه ملی استاندارد و فناوری در آمریکا، موفق به ساخت چیزی شدند که آن را به عنوان حالت اتمی "گربه شرودینگر" توصیف کردند. آن‌چه که آنها ساختند، یک اتم بود که برای مدتی هم‌زمان در دو مکان مختلف قرار داشت.

منظور اصلی نیلز بور در پرداختن به نظریه کوانتومی، این بود که همه توجه خود را به آن‌چه که می‌توان دید معطوف کنیم

این اتمی بود که می‌توان آن را "نیمی اینجا ـ نیمی آنجا" نامید. اما اگر بنابر قوانین موجود، چنین حالتی را نمی‌توان مشاهده کرد، پس آن پژوهشگران چگونه وجود آن را اثبات کردند؟

"کریس مونرو" و همکارانش، با دریافت یک الکترون از اتم بریلیوم آن را به صورت یک تک‌یون بریلیوم درآوردند، و سپس با باریکه‌های لیزری، اتمِ یک بار یونیدهٔ بریلیوم را به دام انداختند. بریلیوم معمولا چهار الکترون دارد، که دوتای آنها در بیرونی‌ترین "پوسته" به دور هسته می‌گردند. اگر یکی از این دو الکترون برداشته شود، در دورترین پوسته نسبت به هسته تنها یک الکترون باقی خواهد ماند. الکترون‌ها و هسته‌های اتمی، خاصیتی دارند به نام "اسپین"[1]، که در دهه ۱۹۲۰ کشف شد. حالت الکترون، بر حسب این‌که اسپین آن همسو و یا ناهمسو با اسپین هسته باشد، "بالا" یا "پایین" خوانده می‌شود. از آنجا که احتمال وجود هر دو حالت با هم مساوی است، بیرونی‌ترین الکترون در یک حالت کوانتومی "نیمی بالا ـ نیمی پایین" قرار دارد.

اما انرژی دو حالت اتمی فوق، مقدار کمی با یکدیگر تفاوت دارند. این پژوهشگران با استفاده از لیزرهای



جداگانه که به دقت با این انرژی‌ها تنظیم شده بودند، دو حالت بالا و پایین را به سمت‌های مخالف هم فرستادند ـ بخش "بالا" به سمتی، و بخش "پایین" به سمت مخالف آن. این آرایش مبتکرانه، حالت "نیمی بالا ـ نیمی پایینِ" اتم را به حالت "نیمی اینجا ـ نیمی آنجا" تبدیل کرد؛ که در حالت دوم، دو نیمهٔ حالت کوانتومی اتم از لحاظ فیزیکی از هم جدا شدند و در نهایت به فاصله ۸۰ نانومتر (۸۰ میلیاردم متر) از یکدیگر قرار گرفتند. البته این فاصله چندان زیاد نیست، اما با این حال به مقدار قابل توجهی از خود اتم بزرگ‌تر است.

مونرو و همکارانش نمی‌توانستند اتم را هم‌زمان در دو مکان مختلف مشاهده کنند، بنابراین ممکن است سوال شود که آنها چگونه توانستند به این کار بزرگ خود پی‌ببرند. این گروه با جدا کردن دو حالت از هم، نخست آنها را دور و سپس دوباره به هم نزدیک کردند؛ اما نزدیک کردن آنها را به گونه‌ای انجام دادند که ترکیب دو نیمه حالت کوانتومی اتم اندکی با ترکیب آنها در اتم دست‌نخورده متفاوت باشد. چنین تفاوت کوچکی بود که به عنوان معیاری از سفر جداگانه نیمه‌های "بالا" و "پایین"، می‌توانست مشاهده شود.

آن‌چه که آنها ساختند، یک اتم بود که برای مدتی، هم‌زمان در دو مکان مختلف قرار داشت!

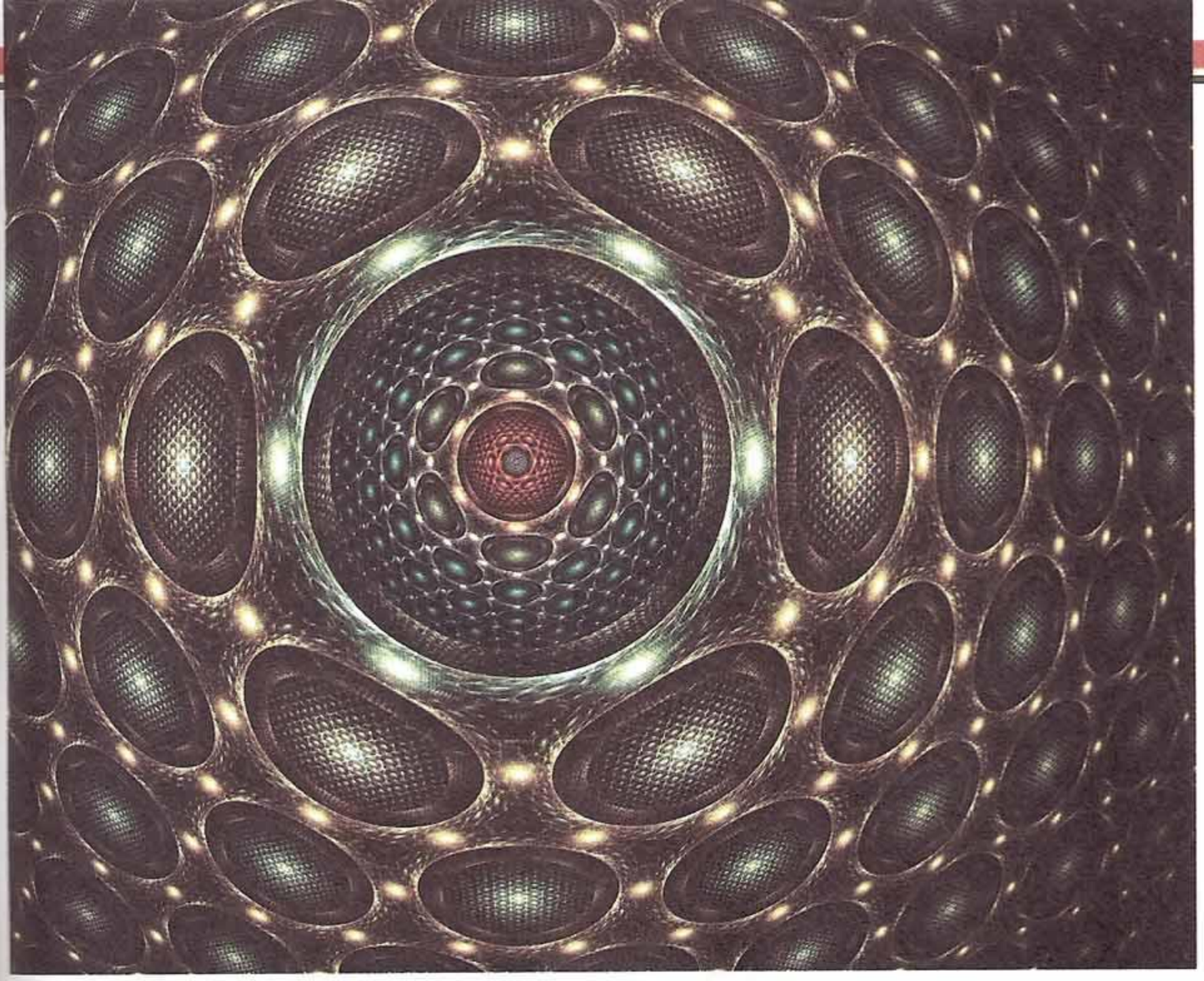
اگر بخواهیم خیلی موشکافانه به این قضیه نگاه کنیم، نمی‌توانیم بگوییم که گروه فوق واقعا "حالت گربه شرودینگر" اتم بریلیوم را پیدا کند. آن‌چه که آنها انجام دادند، پی بردن به وجود این حالت از طریق مشاهداتی بود که بنابر پیش‌بینی نظریه کوانتومی ایجاد می‌شدند. شاید خیال کنید که آنها کلک زده‌اند، اما به یاد داشته باشید که شما می‌خواهید وجود چیزی را نشان دهید که بنابه تعریف، هرگز نمی‌توان واقعا آن را دید.

نمایش‌های جالب دیگر پدیده‌های بنیادی کوانتومی، از اعجازهای نوظهور در فناوری سرچشمه گرفته است. این اعجازها، در واقع قابلیت دستکاری اتم‌های جداگانه و یا گروهی از اتم‌ها، و به دام انداختن آنها به وسیله لیزر یا مغناطیس است. در سال ۱۹۹۵، گروه دیگری از فیزیکدان‌ها چیزی را که "چگالیدهٔ بوز ـ اینشتین" نامیده می‌شود تولید کردند. آنها مجموعه‌ای از چند هزارم اتم روبیدیم را تا نزدیکی صفر مطلق (در واقع ۲۰۰ میلیاردم درجه بالاتر از صفر مطلق) سرد کردند، و در نتیجه تمامی اتم‌ها در "گام سکون" (یک حالت کوانتومی که همه آنها را در برداشت) قرار گرفتند.

اساس این کار ساده است. در حالت عادی، وقتی که اتم‌ها به اطراف می‌جهند، با برخورد به یکدیگر انرژی مبادله می‌کنند و در حالت‌های کوانتومی متفاوت و متغیری قرار می‌گیرند. اما از میان تمامی حالت‌های کوانتومی محتمل، یک حالت وجود دارد که به طور مطلق کمترین مقدار انرژی را دارد، و اگر بتوان مقدار کافی انرژی از یک گروه اتم بیرون کشید، همه آنها در این "حالت بنیادی" قرار می‌گیرند. اینشتین و یک فیزیکدان هندی به نام "ساتیندرا نات بوز"، وجود این حالت را سال‌ها پیش و در دهه ۱۹۲۰ پیش‌بینی کرده بودند.

بنابر گزاره بالا می‌توان به این نتیجه رسید که تنها ذرات "بوزون"[۲] ـ که مقادیر اسپین‌شان عدد صحیح است ـ می‌توانند در چگالیده بوز ـ اینشتین قرار گیرند. ذراتی که مقدار اسپین آنها کسری است (مثل یک دوم،

"ولفگانگ پاؤلی"، فیزیکدانی که "اصل طرد" او مشهور است



سه دوم، پنج‌دوم و...)، "فرمیون"[3] نامیده می‌شوند، و از اصلی به نام "اصل طرد پاؤلی"[4] تبعیت می‌کنند. این اصل می‌گوید که هیچ دو فرمیونی نمی‌توانند هم‌زمان یک حالت کوانتومی را اشغال کنند. مجموعه‌ای ازفرمیون‌ها، همواره باید در حالت‌های کوانتومی متفاوتی باشند؛ که این حالت‌ها را با کمترین انرژی آغاز می‌کنند و به همین ترتیب پیش می‌روند.

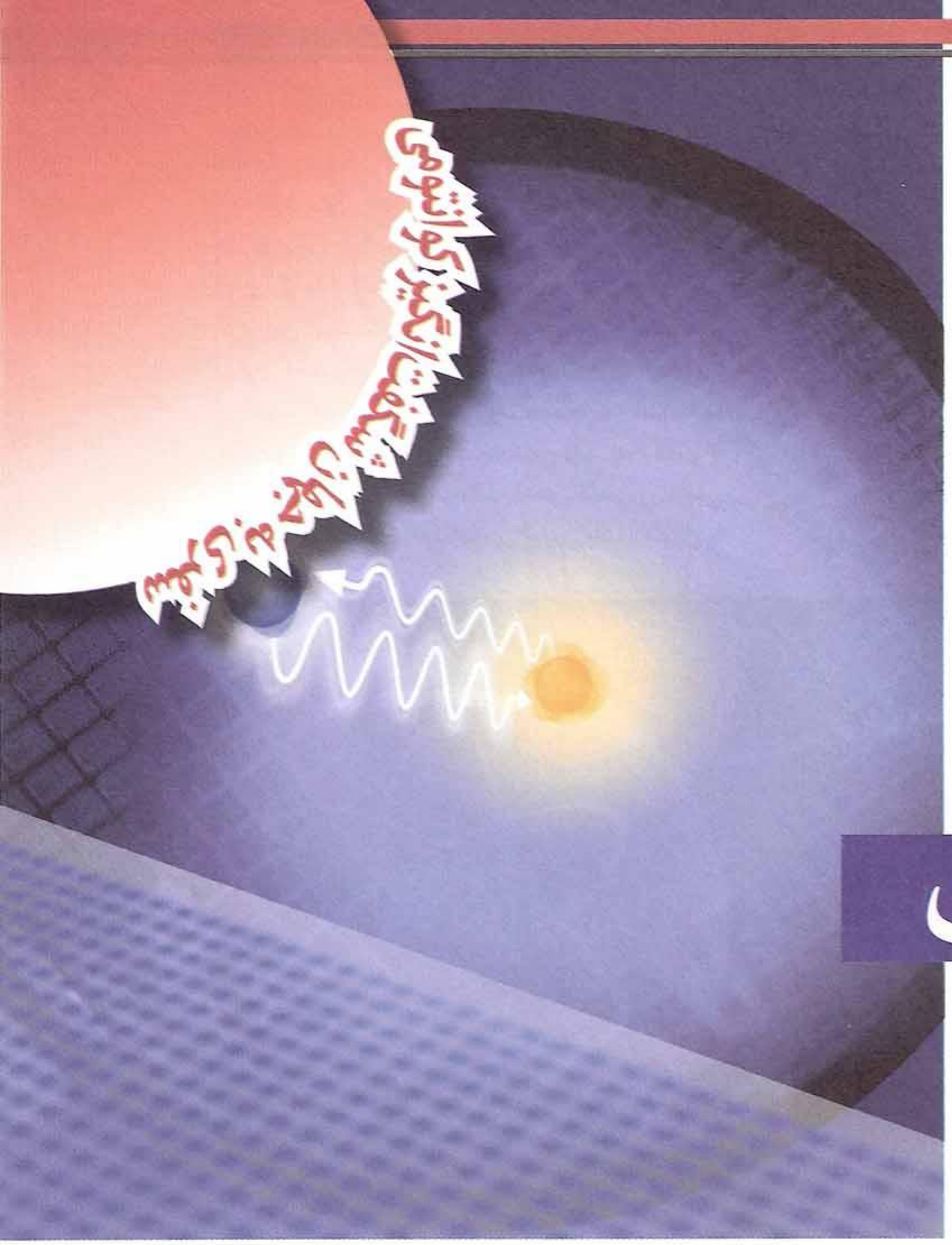
شاید برایتان جالب باشد که بدانید همین موضوع، دلیل وجود "کوتوله‌های سفید" است. کوتوله سفید، پس‌ماندهٔ رو به خاموشیِ ستاره‌ای مثل خورشید ماست که سوخت هسته‌ایش را به اتمام رسانده است. چنین چیزی اندازه کوچکی دارد (خیلی بزرگ‌تر از زمین نیست)، اما بی‌نهایت چگال است؛ چون گرانش، اتم‌های آن را آن‌قدر به هم فشرده است که تمامی الکترون‌های این اتم‌ها آزادانه در کل هسته ستاره حرکت می‌کنند. به دلیل این‌که الکترون‌ها فرمیون هستند، اصل طرد پاؤلی از فشرده شدن بیشتر ستاره در اثر گرانش جلوگیری می‌کند. کوتوله سفید تنها تا جایی به کوچک شدن ادامه می‌دهد که الکترون‌ها، حالت‌های کوانتومی در دسترس را با بیشترین فشردگی و تراکم ممکن پرکنند. تنها اگر ستاره آن‌قدر پرجرم و گرانش آن به اندازه کافی قوی باشد که الکترون‌ها و پروتون‌ها با هم ترکیب شوند و نوترون‌ها را تشکیل دهند، ستاره می‌تواند کوچک‌تر و تبدیل به ستاره نوترونی شود. حتی یک ستاره نوترونی هم محدودیت‌های خاص خود را دارد، زیرا نوترون‌ها نیز فرمیون هستند؛ و اندازه یک ستاره نوترونی ـ همانند کوتوله سفید ـ از همکاری بین نظریه کوانتومی و گرانش تعیین می‌شود.

اما اتم‌های روبیدیم بوزون هستند و آزمایش سال ۱۹۹۵، مجموعه‌ای از این اتم‌ها را وادار کرد تا رفتار فردی خود را در جمع کنار بگذارند و به صورت یک هستی واحد جلوه‌گر شوند. همه این آزمایش‌ها ـ از چگالیده بوز ـ اینشتین و یونِ گربهٔ شرودینگرِ بریلیوم گرفته تا ذرات درهم‌تنیده EPR و آزمایش دو شکاف یانگ ـ به اشکال مختلف این موضوع را نشان می‌دهند که چگونه تنها یک حالت کوانتومی می‌تواند فرمانروای مطلق ناحیهٔ گسترده‌ای از فضا باشد. همه آن‌چه که نام برده شدند مثال‌هایی بودند از سیمای ناکلاسیکیِ مکانیک کوانتومی. شاید ناجایگزیدگی هرگز آن‌گونه که یک فیزیکدان کلاسیکیِ دوآتشه دوست دارد، به طور مستقیم دیده نشود، اما پیامدهای آن گریزناپذیر است. آزمایش‌های انجام شده در چند سال گذشته، در پس همه تردیدهای موجود نشان داده است که مکانیک کوانتومی در عین متفاوت بودن، بسیار عجیب است.

پی‌نوشت:

1- Spin/ 2- Boson/ 3- Fermion

۴ـ این اصل به افتخار ولفگانگ پاؤلی، فیزیکدان اتریشی، به این نام خوانده می‌شود. او با کشف این اصل در سال ۱۹۲۵ میلادی، جایزه نوبل فیزیک سال ۱۹۴۵ را از آن خود کرد ـ م.



توان موازی

حالت‌های کوانتومی، با ویژگی‌های چندگانه‌شان، می‌توانند قلب یک رایانه موازی حجیم را تشکیل دهند

اگر با گربه شرودینگر از میان چگالیده بوز ـ اینشتین گذر کنید، چه چیزی به دست خواهید آورد؟ یک گربه بزرگ و سرد؟ یا رشته‌ای از بچه گربه‌های یک‌شکل اما نامشخص؟! در واقع هیچ‌کدام، زیرا شما به یک رایانه کوانتومی دست یافته‌اید! اکنون بیایید این مسئله را دقیق‌تر بررسی کنیم.

یک رایانه معمولی، یک ماشین صددرصد کلاسیکی است. این نوع رایانه، براساس جریان‌های الکتریکی به صورت "صفر"ها و "یک"های یک دستگاه ریاضی دوتایی کار می‌کند. اگر این صفرها و یک‌ها بخواهند هر نوع محاسبه و عملیات پیچیده‌ای را انجام دهند، باید به صورت‌هایی کاملا قابل پیش‌بینی و قابل اعتماد بر هم تاثیر بگذارند. اگر بعضی از این صفرها و یک‌ها به صورتی نامعین و احتمالی رفتار کنند، آن‌چه که شما خواهید داشت، قاعدتا رایانه‌ای خواهد بود که مرتکب اشتباهات کتره‌ای می‌شود.

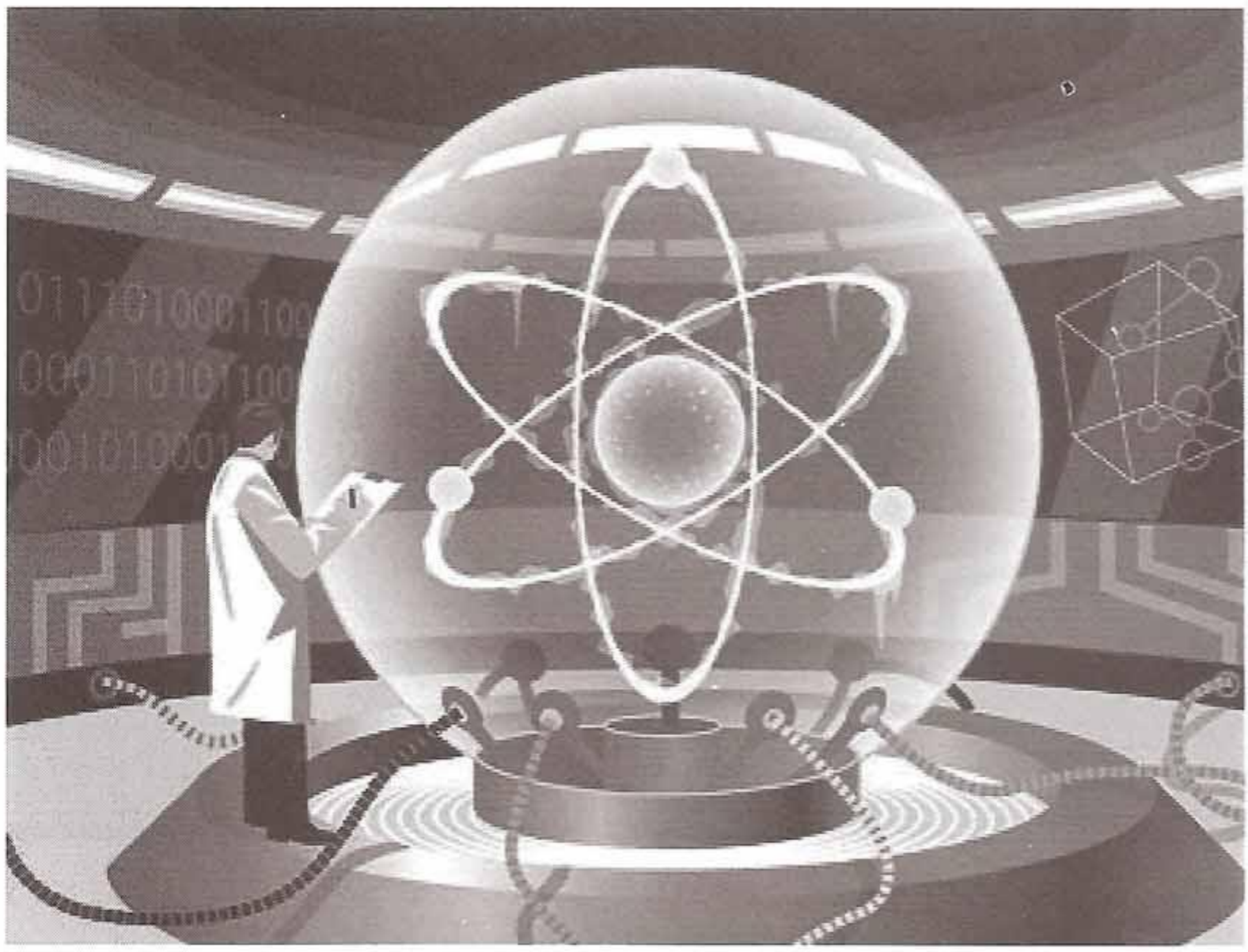
اما نظریه کوانتومی یک نظریه کاملا کتره‌ای نیست، و مسلما از یک مجموعه قوانین مربوط به خود پیروی می‌کند. وقتی که حالات کوانتومی با یکدیگر برهم‌کنش می‌کنند، این کار را به شکلی کاملا قابل پیش‌بینی انجام می‌دهند. تنها در پیامد یک اندازه‌گیری است که غیر قابل پیش‌بینی بودن پدیدار می‌شود. یک رایانه کوانتومی را تصور کنید که در آن، محاسبات و عملیات از طریق مجموعه‌ای از برهم‌کنش‌های کاملا قابل پیش‌بینی حالات کوانتومی ـ نه کلاسیکی ـ انجام می‌شود. اگر هیچ‌یک از اندازه‌گیری‌ها در سیستم ایجاد اختلال نکند، هیچ چیز غیرقابل پیش‌بینی روی نخواهد داد؛ اما برقراری این شرایط بسیار دشوار است، زیرا هر نوع اختلال کتره‌ای و کنترل‌نشده به معنای اندازه‌گیری است. در صورت برقراری شرط فوق، رایانه کوانتومی می‌تواند محاسبات را به صورتی قابل اطمینان ـ دقیقا همانند یک رایانه کلاسیکی ـ انجام دهد.

احتمالا رایانه‌های کوانتومی، در مورد بعضی از انواع محاسبات بهتر از رایانه‌های دیگر عمل می‌کنند

به جای حالات بالا و پایین معینی که یک رایانه کلاسیکی استفاده می‌کند، عناصر منطقی یک رایانه کوانتومی می‌توانند (به عنوان مثال) حالت گربه شرودینگر "نیمی بالا ـ نیمی پایین" باشند. در این صورت، این رایانه شبیه چگالیده بوز ـ اینشتین خواهد بود، چون شما به تعداد بسیار زیادی از این حالت‌های کوانتومی ـ که باید به طور منسجم رفتار کنند ـ نیاز خواهید داشت تا بتوانید هر نوع محاسبه مفید یا شگفت‌انگیزی

را انجام دهید.

شاید سوال شود که چه نیازی است که این همه مشکل برای خود درست کنیم؟ پاسخ، آن‌گونه که "دیوید دویچ" از دانشگاه آکسفورد در اواسط دهه ۱۹۸۰ بیان کرد، این است که محاسبه کوانتومی اجازه استفاده از نوعی "محاسبات موازی" را می‌دهد که امید انجام آن از یک رایانه کلاسیکی نمی‌رود. در محاسبه استاندارد، هربخش از منطقی درونی ـ چه صفر باشد چه یک، و یا رشته‌ای از این "بیت"[1]ها ـ حالت عددی خاصی را نمایش می‌دهد. اما در محاسبه کوانتومی، اسپین یک الکترون یا



قطبش یک فوتون (که "کوبیت"[2]، یعنی "بیت کوانتومی" نامیده می‌شود) می‌تواند هر دو حالت را هم‌زمان نمایش دهد. حالت "نیمی بالا ـ نیمی پایین"، هم‌زمان هم صفر است و هم یک. علاوه بر این، وقتی که این حالت با سایر حالت‌ها برهم‌کنش می‌کند، هر دو بخش با هویتِ دوگانهٔ آن در برهم‌کنش شرکت می‌کنند. محاسبه کوانتومی، به صفر و یک اجازه می‌دهد تا همراه هم و هم‌زمان در برهم‌کنش شرکت کنند.

محاسبه کوانتومی، به صفر و یک اجازه می‌دهد تا همراه هم و هم‌زمان در برهم‌کنش شرکت کنند

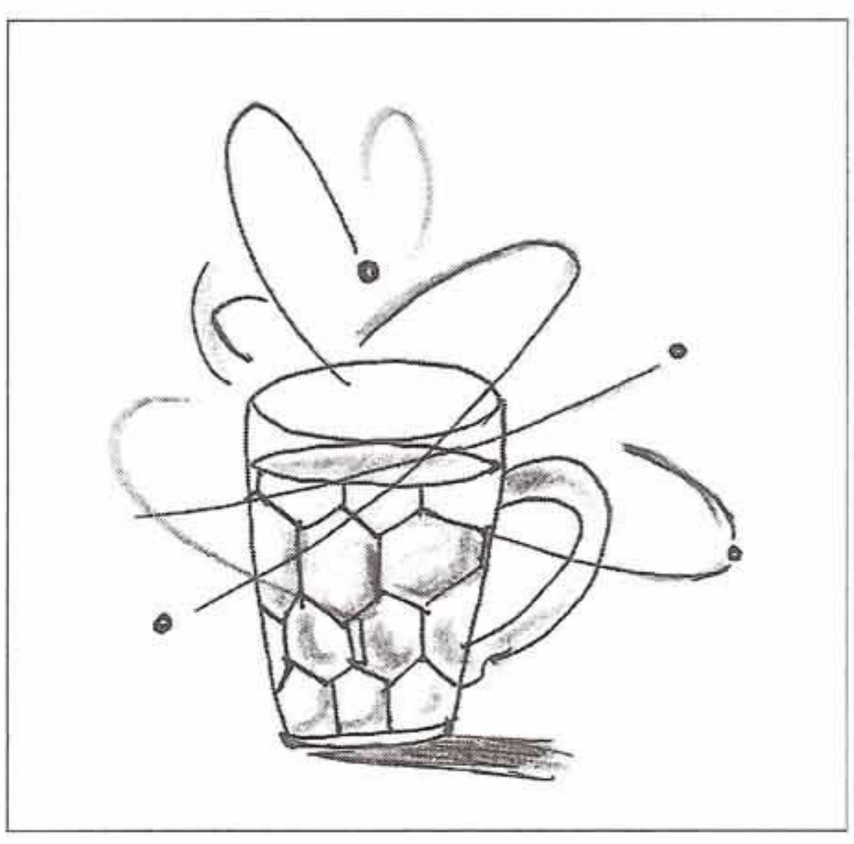
به عنوان مثال، با دو اسپین الکترونی "نیمی بالا ـ نیمی پایین"، می‌توان چهار حالت مختلف داشت؛ که ۰۰، ۰۱، ۱۰ و ۱۱ را نشان می‌دهند. به طور مشابه، با رشته‌ای از ده حالت، می‌توان تمامی اعدادِ از صفر تا ۱۰۲۴ (۲ به توان ۱۰) را هم‌زمان نمایش داد. سپس دو تا از این حالت‌ها می‌توانند به‌گونه‌ای با یکدیگر برهم‌کنش کنند که حالت نهایی بسیار پیچیده‌تری را تولید کنند؛ که این حالت ـ باز هم به صورت هم‌زمان ـ نمایش تمامی اعداد موجود در یک جدول ضرب ۱۰۲۴ ×۱۰۲۴ را در خود خواهد داشت.

یک رایانه معمولی مجبور است بیش از یک میلیون محاسبه جداگانه را برای به دست آوردن تمامی اعداد موجود در این جدول انجام دهد. به دلیل این‌که یک رایانه کوانتومی همه احتمالات را هم‌زمان بررسی می‌کند، بدون دردسر و تنها در یک گام به همین نتیجه دست خواهد یافت.

به این ترتیب، رایانه‌های کوانتومی می‌توانند بسیار قدرتمند باشند. اما در استفاده از ظرفیت و قابلیت آنها برای انجام محاسبات موازی حجیم، دو مشکل وجود دارد. نخستین مشکل، غلبه‌کردن بر جداسازی است. ساختن چگالیده‌های بوز ـ اینشتین و حالات اتمی گربه شرودینگر در آزمایشگاه، به دقت و تلاش بسیار زیادی نیاز دارد. هر گونه اختلال یا برهم‌کنش کتره‌ای، نظم و ترتیب ارتباطِ بسیار حساسِ حالات کوانتومی همزی (قرار گرفته در کنار هم) را به‌هم خواهد زد؛ و این عمل باعث خواهد شد که به جای آن‌چه که مورد نظر ماست، یک حالت کلاسیکی ظاهر شود. به این ترتیب، حفظ یکپارچگی یک رایانه کوانتومی بی‌نهایت دشوار خواهد بود. مجموعه کاملی از حالت‌های مرکب و متفاوت ـ که متفاوت بودن آنها از اهمیت زیادی برخوردار است ـ باید ساخته، حفظ، و وادار به برهم‌کنش از پیش تعیین شده شوند (برعکس، در چگالیده بوز ـ اینشتین تمامی حالت‌ها یکسانند؛ که چنین چیزی مثل داشتن یک رایانه کوانتومی است که تمامی بیت‌های آن همیشه صفرند).

مشکل دوم، ظریف‌تر از اولی است. چگونه می‌توان نتیجه یک محاسبه را از یک رایانه کوانتومی استخراج کرد؟ همین که یک اندازه‌گیری ـ به عنوان مثال روی حالت "جدول ضرب" کوانتومی ـ انجام شود، رایانه تنها یک پاسخ از میان ۱۰۲۴×۱۰۲۴ پاسخ ممکن را به ما خواهد داد، و همه پاسخ‌های دیگر ناپدید خواهند شد. به نظر می‌رسد که این مسئله باعث خواهد شد که به هدف مورد نظرمان، یعنی انجام محاسبات کوانتومی هم‌زمان، نرسیم.

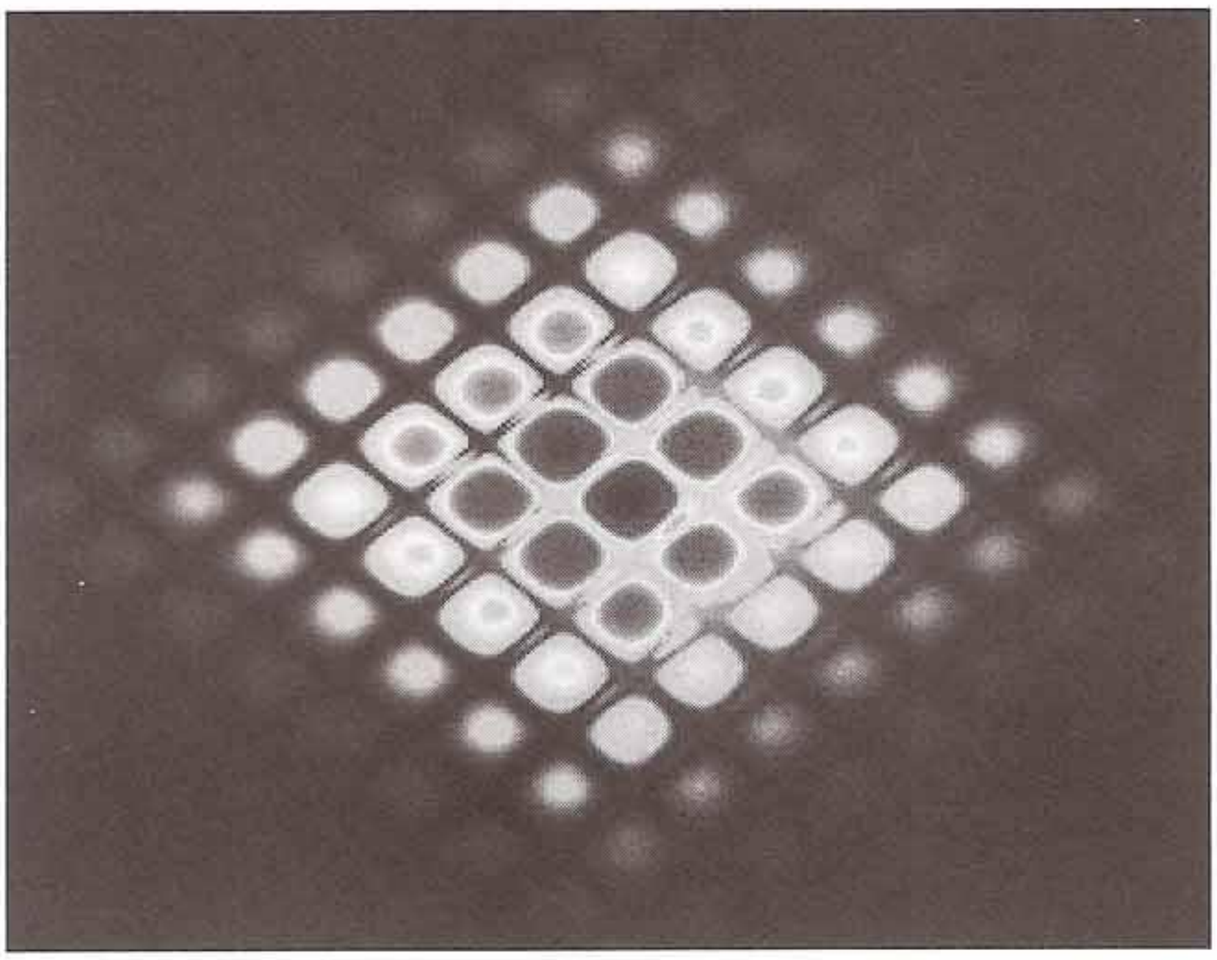
در واقع، آن‌چه که این مسئله به ما نشان می‌دهد این است که احتمالا رایانه‌های کوانتومی، در مورد بعضی از



انواع محاسبات بهتر از رایانه‌های دیگر عمل می‌کنند. به عنوان مثال، مسئله یافتن عامل‌های اول یک عدد بزرگ، اهمیت قابل توجهی در زمینه رمزنویسی و رمزگشایی دارد. امنیت بسیاری از سیستم‌های رمزنویسی، به این مسئله وابسته است که یافتن عوامل اول توسط یک رایانه معمولی بسیار دشوار است. رایانه باید تمامی احتمالات را با زحمت و مشقت بسیار بررسی کند تا به ترکیب صحیح دست یابد. اما بنابر اصول فیزیکی، یک رایانه کوانتومی می‌تواند تمامی احتمالات را هم‌زمان بررسی کند. علاوه بر این، هدف اصلی در مسئله رمزگشایی، یافتن یک پاسخ از میان تمامی پاسخ‌های محتمل (اما غلط) دیگر است؛ و این چیزی است که با انجام اندازه‌گیری روی حالت مورد نظر (در صورتی که به طور مناسب تعریف شده باشد)، قابل دسترسی است.

"لُو گروور" از آزمایشگاه بل، با روشی مشابه آن‌چه که گفته شد، الگوریتمی را طراحی کرده است که یک مورد خواسته‌شده را از میان فهرستی شامل چندین مورد درهم‌ریخته بیرون می‌کشد (به عنوان مثال، یک واژه را از میان واژه‌های درهم ریخته‌یک فرهنگ لغت بیرون می‌کشد)، و این کار را در مدت زمانی که متناسب با ریشه دوم تعداد موارد موجود در فهرست است، انجام می‌دهد. جست‌وجوهای سنّتی، به زمانی متناسب با تعداد موارد موجود در فهرست نیاز دارد.

اما واقعا به چه شکل می‌توان یک رایانه کوانتومی ساخت؟ تعدادی از محققان پیشنهاد کرده‌اند که از



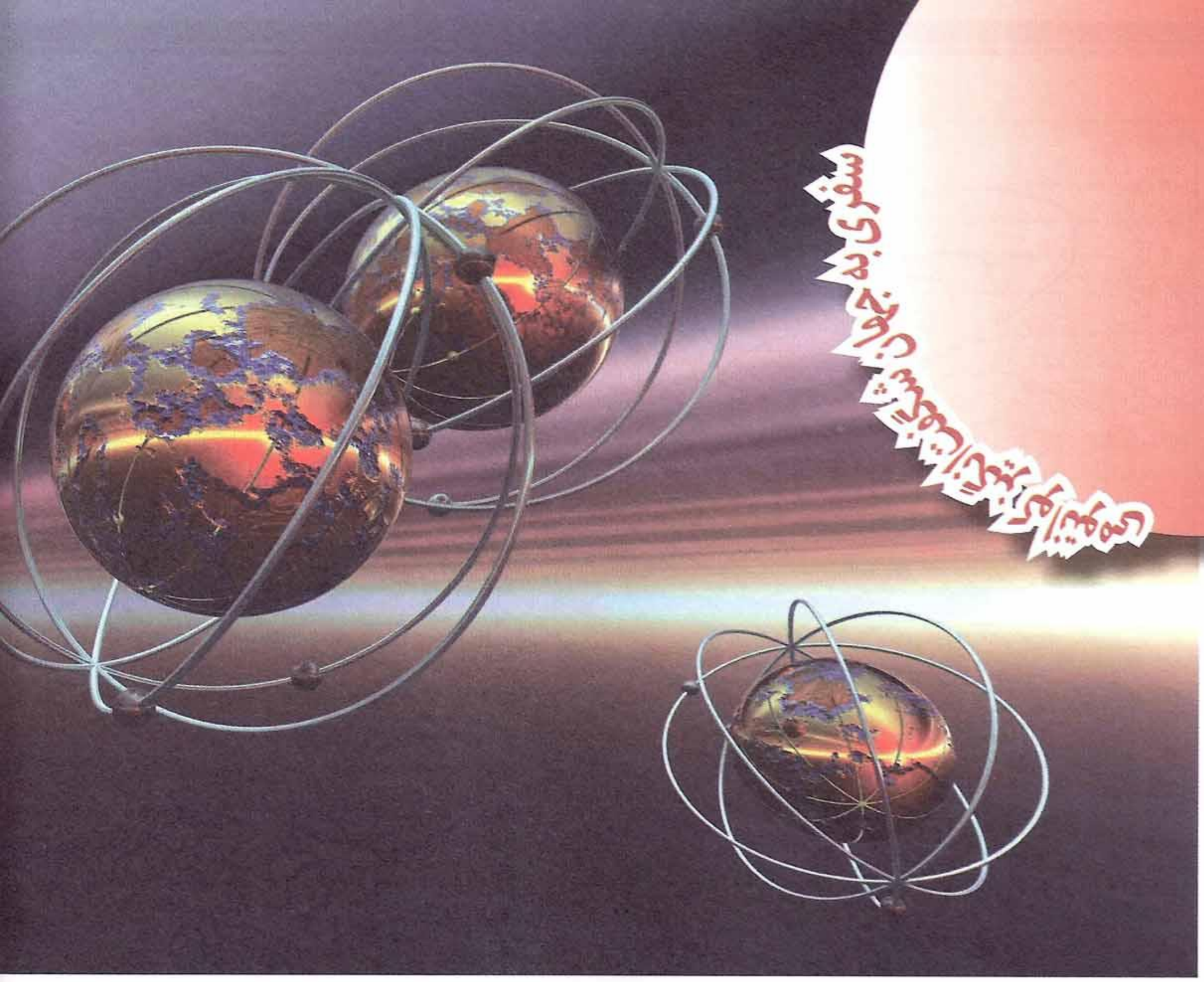
حالت‌های اسپین اتمی جداگانه موجود در مولکول‌ها استفاده شود. تک پروتون‌ها (هسته اتم‌های هیدروژن)، اسپین‌هایی دارند که بسته به اسپین برخی دیگر از هسته‌های موجود در مولکول، می‌توانند به سمت بالا یا پایین سمت‌گیری کنند. تَپ‌های امواج رادیویی، در صورتی که بسامد (فرکانس) مناسب داشته باشند، می‌توانند این اسپین‌ها را به صورت بالا و پایین درآورند؛

و اسپین هسته‌های مختلف در یک مولکول، به اشکال قابل پیش‌بینی برهم‌کنش می‌کنند. چنین چیزی می‌تواند اساس یک رایانه کوانتومی را تشکیل دهد: اسپین‌ها اطلاعات را ذخیره می‌کنند، و امواج رادیویی آنها را وادار می‌کنند تا بنابر طرح از پیش تعیین‌شده، تغییر جهت داده و به این ترتیب محاسبات مورد نظر را انجام دهند.

برخی از فناوری‌های مورد نیاز برای انجام چنین کاری را هم‌اکنون در اختیار داریم. تصویربرداری به روش تشدید مغناطیسی هسته‌ای[3]، که در حال حاضر استفاده از آن در پزشکی معمول است، موقعیت اتم‌ها را با اندازه‌گیری اسپین آنها تعیین می‌کند. می‌توان تصور کرد که پردازنده مرکزی یک رایانه کوانتومی، چیزی بیش از یک ظرف محتوی چند آبگون (مایع) مناسب نخواهد بود؛ آبگون‌هایی که مولکول‌هایشان شامل انواع گوناگونی از حالت‌های اسپینی اتمی هستند و به گونه‌ای انتخاب شده‌اند که بتوانند یک کار معین را انجام دهند. کار دیگری که می‌توان انجام داد، استفاده از یک تراشه سیلیکونی با نقوش نقطه‌نقطه است که تحت تاثیر اتم‌هایی قرار دارد که اسپین‌های آنها، کوبیت‌های رایانه را تشکیل خواهند داد. هیچ‌گونه جریان الکتریکی در این تراشه وجود ندارد. به جای آن، اسپین‌ها با ضربه زدن، نقطه به نقطه پیش می‌روند، و در امتداد پیامشان بنابر دستورات منطق کوانتومی حرکت خواهند کرد.

پی‌نوشت:

1- Bit/ 2- Qubit (Quantum bit)/ 3- Nuclear Magnetic Resonance Imaging (Nuclear MRI)



ریسمان‌ها و تکینگی‌ها

برای دیدن آن‌چه که در پشت غبار مِه‌بانگ روی داد، باید با چند بی‌نهایتِ آزاردهنده دست و پنجه نرم کرد

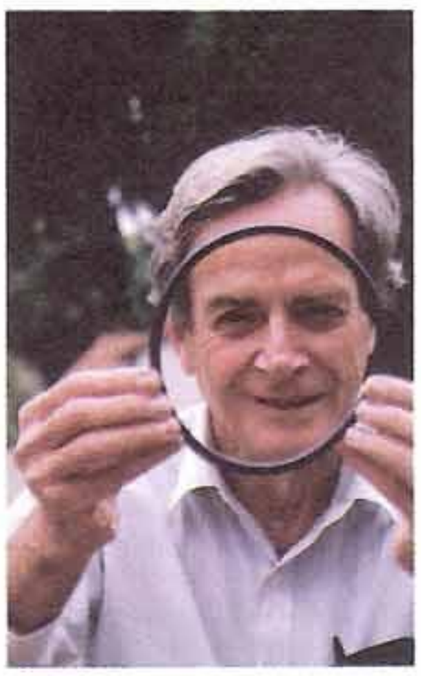
ترفندها و ظرافت‌های نظریه کوانتومی، در اغلب موارد نتایج عملی چندانی در کیهان‌شناسی ندارند. گرانش است که انبساط جهان، شکل‌گیری کهکشان‌ها و متراکم شدن مواد به صورت سیارات را پیش می‌برد. گرانش، آن‌گونه که در نظر نسبیت عام اینشتین بیان شد، یک فیزیکِ کلاسیکیِ تمام عیار است. نسبیت فرض می‌کند که جرم و انرژی را می‌توان بی‌نهایت بار تقسیم کرد؛ و هندسهٔ فضا و زمان ـ حتی در کوچک‌ترین مقیاس‌ها ـ هموار و پیوسته است. اما لحظه‌ای وجود دارد که در آن، نمی‌توان نظریه کوانتومی را نادیده گرفت: لحظه آغاز جهان، یعنی مه‌بانگ (انفجار بزرگ)[1].

این موضوع، به دلیل مشکلی است که در توضیح کلاسیکی انفجار بزرگ پیش می‌آید. آن‌چه که از نسبیت عام نتیجه می‌شود، این است که مه‌بانگ یک "تکینگی"[2] بوده است. به بیان دیگر، لحظه‌ای بی‌نهایت کوتاه، که در آن، انرژی با چگالی بی‌نهایت، حجم بی‌نهایت کوچکی از فضا را اشغال کرده بود.

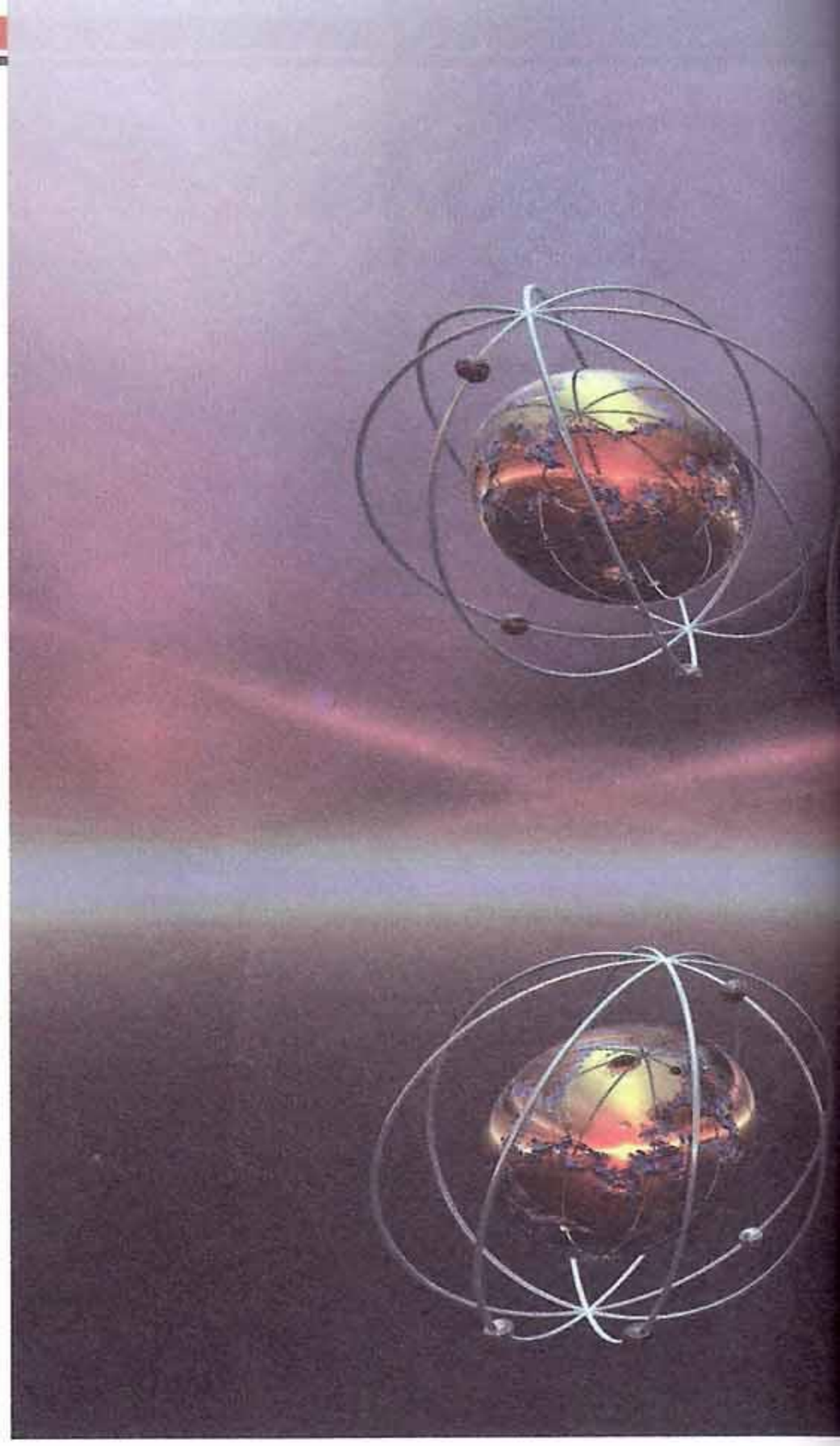
تکینگی‌ها نگران‌کننده‌اند، زیرا با معادلات ریاضیِ توصیف‌کنندهٔ خود ناسازگارند. اما خبر خوب این‌که چنین به نظر می‌رسد که نظریه کوانتومی وجود تکنیگی‌ای مثل مه‌بانگ را نمی‌پذیرد، اما کسی نمی‌داند که این نظریه چه چیزی را به جای آن قرار خواهد داد.

نظریه کوانتومی با تکینگی‌های کلاسیکی، به هر شکل که پدیدار شوند، مخالف است. به عنوان مثال، نظریه کلاسیکی ذرات بنیادی را به عنوان هستی‌هاییِ دارای جرم و بار در نظر می‌گیرد که در یک نقطهٔ ریاضیِ بی‌بُعد متمرکز شده‌اند. اما نظریه کوانتومی اندازه مشخصی به آنها می‌دهد، زیرا ذرات کوانتومی می‌توانند به عنوان موج ـ با طول موج وابسته به خود ـ نیز در نظر گرفته شوند.

یکی از نتایج مهم این نگرش، چیزی بود که "استفن هاوکینگ" در سال ۱۹۷۴ کشف کرد. او به این نتیجه رسید که سیاه‌چاله‌ها کاملا "سیاه" نیستند. بنابر نظریه



"ریچارد فاینمن" و همکارانش راهی را برای گریز از "بی‌نهایت‌ها" یافتند



آیا فضا ـ زمان در حقیقت از واحدهای کوانتومی کوچکی تشکیل شده است که بنا بر قوانین خود به یکدیگر وصل‌اند، ولی ابعاد به ظاهر پیوسته‌ای را که ما با آن آشنا هستیم تولید می‌کنند؟

نسبیت، یک سیاه‌چاله ناحیه‌ای از فضاست که گرانش آن‌چنان پرقدرتی دارد که هیچ چیز ـ حتی نور ـ نمی‌تواند از آن بگریزد. اما این فکر به ذهن هاوکینگ خطور کرد که اگر بخواهیم ببینیم آیا یک ذره کوانتومی در درون سیاه‌چاله است و یا بیرون از آن، اصل عدم قطعیت مشکل‌آفرین خواهد بود. به بیان ساده، او نشان داد که سیاه‌چاله می‌تواند ذرات با طول موج کوانتومی تقریبا برابر شعاع خود را به بیرون بفرستد که این پدیده به "تابش هاوکینگ" معروف است.

از لحاظ عملی، تابش هاوکینگ اثر چندانی در

"استفن هاوکینگ" با استفاده از نظریه کوانتومی به این نتیجه رسید که سیاه‌چاله‌ها کاملا سیاه نیستند

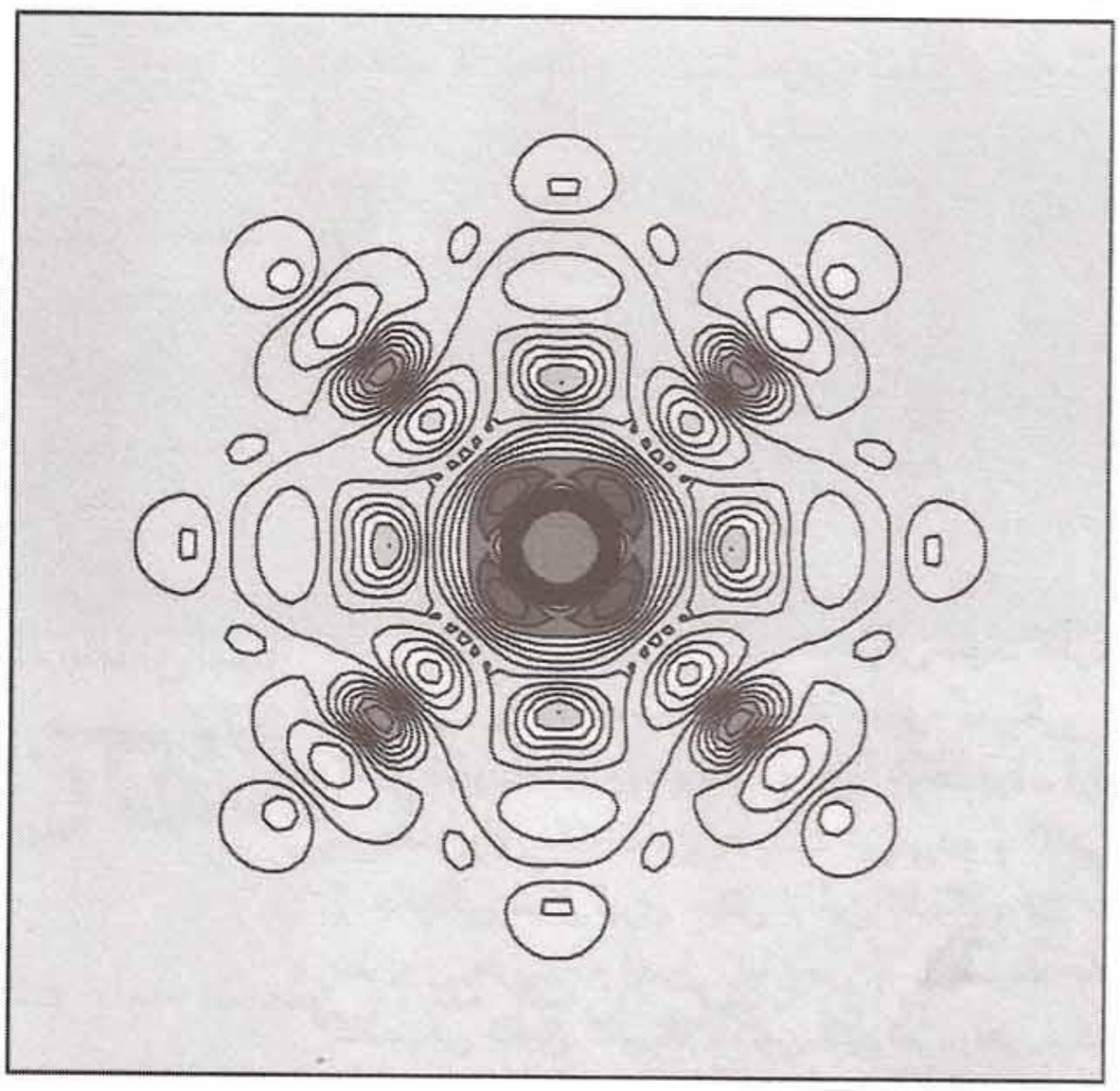
محاسبات اخترفیزیکدان‌ها ندارد: سیاه‌چاله‌ای با جرم خورشید، در حدود یک کیلومتر قطر خواهد داشت و ذرات را با دمایی کمتر از یک میلیونیوم درجه به خارج خواهد فرستاد. کار دستاورد هاوکینگ در فیزیک این بود که مانع مطلق و غیر قابل نفوذی را که نسبیت به دور سیاه‌چاله کشیده بود، تبدیل به یک مانع کوانتومی متخلخل و مبهم ساخت.

به همین صورت، نظریه کوانتومی باید تکینگی به وضوح تعریف شدهٔ مه‌بانگ را با یک گوی مبهم جایگزین کند. اگر ساعت کیهان‌شناختی را به عقب بکشید، به لحظه‌ای می‌رسید که در آن، نظریه کلاسیکی از ذرات می‌خواهد تا در فضایی کوچک‌تر از آن‌چه که اصل عدم قطعیت اجازه می‌دهد، محبوس شوند. نظریه کوانتومی، پرده ساده محافظی را در مقابل "تکینگی" ـ که در صورت عدم جود پرده، "عریان" خواهد بود ـ قرار می‌دهد. برای نگاه کردن به پشت این پرده، و آگاهی از چگونگی شکل‌گیری جهان از این تکینگی، نیاز به نظریه‌ای داریم که اصول کوانتومی را با نسبیت عام کلاسیکی تلفیق کند. اما تاکنون هیچ‌کس راهی برای انجام این کار نیافته است.

مشکلی که در این راه قرار دارد، "بی‌نهایت‌ها" هستند. در دهه ۱۹۴۰، فیزیکدان‌ها در حالی که سعی در بسط نظریه الکترودینامیک کوانتومی (نسخه کوانتومی نظریه الکترومغناطیس کلاسیک ماکسول) داشتند، به مانع ظاهرا مشکل‌آفرینی برخورد کردند. از لحاظ کلاسیکی، محاسبه نیروی موجود بین دو ذره باردار آسان است: تنها کافی است مقدار دو بار و فاصله بین ذرات را در یک رابطه ساده قرار دهیم و پاسخ را به دست آوریم. اما نسخه کوانتومی این محاسبه مشکل‌ساز می‌نماید؛ زیرا فضای بین دو ذره باردار دیگر کاملا خالی نیست. دیگر نمی‌توان یک خلأ کامل داشت، چون انرژی و ذرات می‌توانند به درون ابهام تحمیل شده از اصل عدم قطعیت رفت و آمد کنند.

این رفت و آمدهای زیاد، چند پیامد مهم دارد. به عنوان مثال، میدان الکتریکی اطراف یک الکترون، روی ذراتی که در خلأ کوانتومی در حال حرکتند تاثیر می‌گذارد، به این صورت که ذرات مثبت را جذب و ذرات منفی را دفع می‌کند. در حقیقت، خلأ از بار الکترون "محافظت"

می‌کند؛ متاسفانه به نظر می‌رسد که این محافظت نیاز به این دارد که بار الکترون بی‌نهایت مرتبه تصحیح شود. سه فیزیکدان به نام‌های "یولیان شوینگر"، "سین ـ ایتیرو توموناگا"، و "ریچارد فاینمن"، در سال ۱۹۴۸ راهی برای حل این مشکل یافتند که می‌توان گفت کشفی با اهمیت و یا ترفندی ساده بود. کار را با یک بار نامعلومِ "عریان" شروع می‌کنیم، و بی‌نهایت بار آن را تصحیح کرده تا سرانجام به مقدار معلوم (و متناهی) بار الکترون دست یابیم، و سپس کار را به صورتی ادامه می‌دهیم که انگار همه‌چیز از آغاز درست بوده است. آنها نشان دادند که تنها یک تفریق دنباله‌دار، برای تصحیح مسئله به صورتی که پاسخ تمامی محاسبات بعدی درست باشد، کافی است. این فرایند، "بازبهنجارش"[3] خوانده می‌شود.



اما این روش در مورد گرانش عمل نمی‌کند. اگر سعی کنید یک نظریه کوانتومی از گرانش ابداع کنید، خواهید دید که بی‌نهایت‌های صرف‌نظر شده از سوی خلأ کوانتومی، از بین نمی‌روند. از آنجا که انرژی و جرم هم‌ارزند، انرژیِ جاذبهٔ گرانشی، تولید گرانش می‌کند. به این ترتیب، در هر مرحله از محاسبه گرانشی کوانتومی، بی‌نهایت‌ها با هم جمع می‌شوند و خنثی نخواهند شد. یک تفریق تنها نمی‌تواند کاری از پیش ببرد. در هر مرحله از کار باید از دست بی‌نهایت‌های جدید خلاص شد، و به این ترتیب نمی‌توان در پایان به یک پاسخ قابل قبول دست یافت. این‌که این عدم تطابق بین نظریه کوانتومی و گرانش چگونه برطرف خواهد شد، چیزی است که هنوز کسی نمی‌داند. نظریه‌ای که این روزها در این باره رایج است، "نظریه ابرریسمان"[4] است. این نظریه می‌گوید که در اصل هیچ ذره‌ای وجود ندارد؛ بلکه به جای آن، حلقه‌های جنبندهٔ کوچکی از انرژی وجود دارند که معادل خطهای ریاضی (به جای نقطه‌های ریاضی) هستند. ذراتی که ما

نظریه کوانتومی با تکینگی‌های کلاسیکی، به هر شکل که پدیدار شوند، مخالف است

مشاهده می‌کنیم (یعنی کوارک‌ها، فوتون‌ها، الکترون‌ها و تمامی ذرات دیگر)، در واقع به منزله نوسان‌های متفاوتی از حلقه‌های ریسمانند.

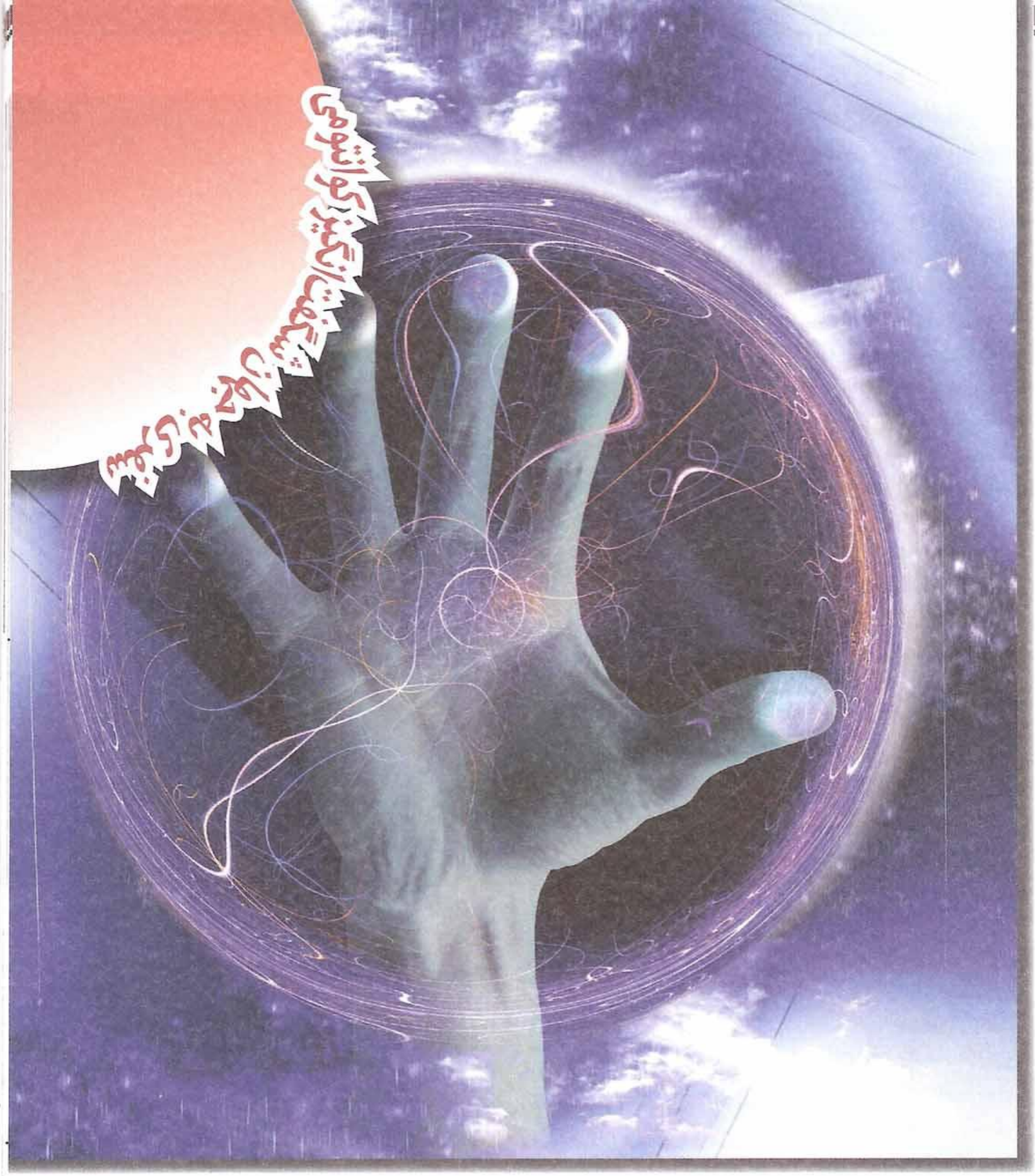
جایگزین کردن حلقه‌ها به جای ذرات، ما را از هر بازبهنجارشی بی‌نیاز می‌کند. در واقع، ماهیت نقطه‌ای الکترون است که الکترودینامیک کوانتومی را تا این حد مشکل آفرین می‌کند. اگر نقطه را با نوسان‌های یک خط جایگزین کنید، خواهید دید که بی‌نهایت‌ها به وجود نمی‌آیند. علاوه بر این، نظریه ابرریسمان دارای یک نوسان حلقه‌ای است که شبیه "گراویتون"[5] به نظر می‌رسد (گراویتون یک ذره کوانتومی فرضی است که نسبت به میدان گرانشی، همان رابطه‌ای را دارد که فوتون نسبت به میدان الکترومغناطیسی).

با این حال چند مشکل نسبتا بزرگ باقی می‌ماند. برای تازه‌کارها، جهان ابرریسمان‌ها ۱۰ بعد دارد، و تنها راهی که این نظریه می‌تواند جهان چهار بعدیی را که ما در آن زندگی می‌کنیم (سه بعد فضایی و یک بعد زمان) توضیح دهد، این است که شش بعد از این ده بعد را چنان محکم در هم بپیچد که ما آنها را نبینیم. مشکل اینجاست که این ابعاد به دست خودشان در هم نمی‌پیچند؛ بلکه برای این کار، زدن تلنگری از طرف یک فیزیکدان نظری لازم است.

علاوه بر این، اگر چه نظریه ابرریسمان بر اساس ذرات و برهم‌کنش‌های آنها با یکدیگر بنا شده است، اما نسبیت عام در اصل نظریه‌ای درباره هندسه و توپولوژی است. در نهایت، نظریه کوانتومی گرانش باید مستقیما با این عدم تطابق مقابله کند. آیا فضا ـ زمان در حقیقت از واحدهای کوانتومی کوچکی تشکیل شده است که بنابر قوانین خود به یکدیگر وصل‌اند، ولی ابعاد به ظاهر پیوسته‌ای را که ما با آن آشنا هستیم تولید می‌کنند؟ فضا و زمان، در این سطح بنیادی و ناپیوسته، چه معنایی خواهند داشت؟ به سوال اصلی بازگردیم: مه‌بانگ از کجا آمده است؟ خلأ شلوغ کوانتومی، احتمالا فعالیت گرانشی را نیز در خود دارد ـ شاید فضا و زمان، همانند کف بر روی یک دریای طوفانی، مرتبا شکل می‌گیرد و یا شاید این فعالیت از سوی همتای کوانتومی سیاه‌چاله‌ها انجام می‌شود، که آن‌قدر سریع به وجود می‌آید و نابود می‌شود که نمی‌توان آن را ردیابی کرد. در این صورت، آیا امکان ندارد که تمام جهان ما در نهایت چند نوسان کوانتومی کاملا معمولی و کوچک باشد که تنها کمی بزرگ‌تر از نوسان‌های دیگر بود و توانست خود را کنترل کند؟ برای تمامی این سوال‌ها، هیچ‌کس هنوز پاسخی نیافته است.

پی‌نوشت:

1- Big Bang/ 2- Singularity/ 3- Renormalisation (or Renormalization)/ 4- Superstring Theory/ 5- Graviton



...و جهان کلاسیکی شد!

چگونه جهانی که در میان عدم قطعیت کوانتومی متولد شده بود، این‌چنین کلاسیکی شد؟

به‌نظر می‌رسد که جهان در یک رویداد کوانتومی متولد شده است. سوالی که به ذهن می‌رسد این است که پس چرا جهان اکنون این‌چنین پابرجا و منطقی به نظر می‌رسد؟ به خاطر بیاورید که چگونه رایانه کوانتومی می‌تواند حالت کوانتومی درونی‌اش را حفظ کند، در حالی که روی محاسبه‌ای کار می‌کند که در پاسخ به یک اندازه‌گیریِ به درستی طراحی شده، تنها به یک پاسخ معین می‌رسد. هر فرایند فیزیکی در جهان، همین کار را در مقیاس بزرگ‌تر انجام می‌دهد: هستی‌های بنیادی، بنابر قوانین نظریه کوانتومی با یکدیگر برهم‌کنش می‌کنند، و تنها هنگامی قابل تشخیص می‌شوند که اندازه‌گیری و یا مشاهده‌ای صورت گیرد. هر پدیده کلاسیکی که در جهان اطراف ما قرار دارد، در حقیقت نتیجه یک محاسبه کوانتومی است که به این سوال پاسخ می‌دهد: "من چه چیز کلاسیکی‌ای هستم؟"

همین اصل در مورد توپ‌های بیلیاردِ برخوردکننده، موج‌های غلطان بر روی اقیانوس، صفحات قاره‌ای در حال حرکت بر سطح زمین، و حتی نور خورشیدی که چهار میلیارد سال پیش به سطح سیاره ما برخورد کرد و به‌موجب آن حیات اولیه شکل گرفت نیز وجود دارد. در یک سطح بنیادی، همه چیز از مولفه‌های کوانتومی ساخته شده است؛ اما در عین حال، تمام چیزهایی که زمانی کافی در کنار ما می‌مانند تا به آنها توجه کنیم، کلاسیکی هستند. این مطلب در مورد کل جهان نیز صادق است. بدون یک نظریه کوانتومی از گرانش، ما دقیقا نمی‌دانیم جهانی که در اطراف خود می‌بینیم چگونه از مه‌بانگ به وجود آمده است، پس سوال پیش می‌آید که چه کسی یا چه چیزی بعدا معانی کلاسیکی را از ریشه‌های کوانتومی استخراج کرد؟

بنابر سنتی که نیلز بور وضع کرد، مباحث مربوط به ماهیت اندازه‌گیری در نظریه کوانتومی، تفاوت آشکاری را میان سیستم کوانتومی که اندازه‌گیری می‌شود و سیستم کلاسیکی جداگانه‌ای که اندازه‌گیری را انجام می‌دهد، در نظر می‌گیرند. در یک سو، این عقیده وجود دارد که اندازه‌گیری‌ها تنها زمانی به واقعیت در می‌آیند که انسان مشاهده‌گر هوشمندی برای دیدن آنها وجود داشته باشد. چنین چیزی به این معناست که اگر بازوی مکانیکی یک روبات، جعبه حاوی گربه "نیمه مرده ـ نیمه زنده" شرودینگر را باز کند، قادر نخواهد بود این موجود نگون‌بخت را از تنگنایی که در آن قرار گرفته برهاند. به جای آن، روبات باید گربه را در برابر یک انسان مشاهده‌گر قرار دهد تا حالت آن تعیین شود.

اگر این نوع نگرش در مورد کل جهان اعمال شود، باعث بروز مشکلاتی می‌شود. ستارگان، سیارات و کهکشان‌ها ـ همانند همهٔ چیزهای دیگر ـ هر کدام یک سیستم کوانتومی هستند. اما آیا ما باید تصور کنیم که تمامی جهان تا زمانی که هوش در نوع بشر تکامل نیافته بود، در حالتی از ابهام کوانتومیِ کیهانی باقی ماند؟ در چه موقع از دوره‌ای که هوش انسانی در حال پدیدار شدن بود، جهان مجبور شد لباس ابهام کوانتومی خود را از تن درآورد و به شکل پایدار کنونی درآید؟ اگر به همین ترتیب ادامه دهید، می‌بینید که عقیده لزوم وجود یک انسان مشاهده‌گرِ هوشمند احمقانه به نظر می‌رسد؛ اما از طرف دیگر، اگر جهان پیش از ورود ما پایداری کلاسیکی خود را پیدا کرده باشد، چه نوع اندازه‌گیری و یا مشاهده‌ای باعث این تغییر حالت شده است؟

آیا "جدایی" می‌تواند پاسخ این معما باشد؟ اگر ویژگی‌های کلاسیکی می‌توانند از دل سیستم‌های کوانتومی بیرون آیند (تنها به این دلیل که بر هم‌کنش‌های کتره‌ای و غیر قابل کنترل، پیوستگی لازم برای رفتار کوانتومی صحیح را از بین می‌برند)؛ آیا رفتار کلاسیکی نیز می‌توانست با تکامل جهان، به صورتی ممانعت‌ناپذیر پدیدار شود؟ این نگرش به نظر معنی‌دار می‌آید. تصور کنید واقعا چقدر ناممکن است که بتوان چیزی به بزرگی جهان ما را، حتی برای کسر کوچکی از ثانیه، در یک حالت کوانتومی صحیح نگه داشت. بنابراین آیا جدایی باعث می‌شود که جهان و همه‌چیزهای درون آن، برای ما پابرجا و معین به نظر برسد؟

شاید این تصویر جالب باشد، اما نمی‌تواند همه ماجرا را بیان کند. هنگامی که دو توپ بیلیارد به هم برخورد می‌کنند، ریاضیات مربوط به جدایی تنها در حالتی می‌تواند اعمال شود که هر کدام از توپ‌ها، یک سیستم کوانتومی مستقل و جدا باشد. اما اگر از پیش یک ارتباط کوانتومی بین آنها وجود داشته باشد (مثلا یک توطئه کوانتومی)، در آن صورت جدایی از کار می‌افتد.

جهان ـ که از یک رویداد کوانتومی متولد شد ـ در یک سطح بنیادی، یک سیستم کوانتومی به هم پیوسته است. هیچ بخش کاملا مستقلی از این سیستم وجود ندارد و بنابراین، هیچ برهم‌کنش کتره‌ای و غیر قابل کنترلی نیز وجود ندارد که پایداری کلاسیکی را برگردباد کوانتومی تحمیل کند. وقتی سیستم کوانتومی شد، همواره کوانتومی خواهد ماند.

اگر جدایی به تنهایی نمی‌تواند پیدایش جهان ما را توضیح دهد، پس چه چیز دیگری مورد نیاز است؟ یک پاسخ محتمل، اما ناقص، برای این سوال وجود

آیا ما باید تصور کنیم که تمامی جهان تا زمانی که هوش در نوع بشر تکامل نیافته بود، در حالتی از ابهام کوانتومیِ کیهانی باقی ماند؟

دارد. ایده موجود در آن بسیار ساده است، و به این بستگی دارد که ویژگی‌های همگانی پایدار، تمایل دارند که به صورت طبیعی از دل هر سیستم مرکبی بیرون بیایند. به عنوان مثال، راجع به رودخانه‌ای فکر کنید که در یک بستر پرپیچ و خم جریان دارد. آب در اصل مجموعه بزرگی از مولکول‌هاست، اما اگر سعی کنید حرکت رودخانه را با توجه به مولکول‌ها تحلیل کنید، نمی‌توانید به سرعت به پاسخ برسید. به جای این کار، شما توجه‌تان را به فشارها و سرعت‌های جریان، و نیز آشفتگی‌ها و گرداب‌ها معطوف می‌کنید. اگر چه این ویژگی‌های همگانی از رفتار تمامی مولکول‌ها و اتم‌های موجود در رودخانه به وجود می‌آیند، اما بهتر است که خود آنها را به عنوان خواص اساسی جریان سیال در نظر بگیریم.

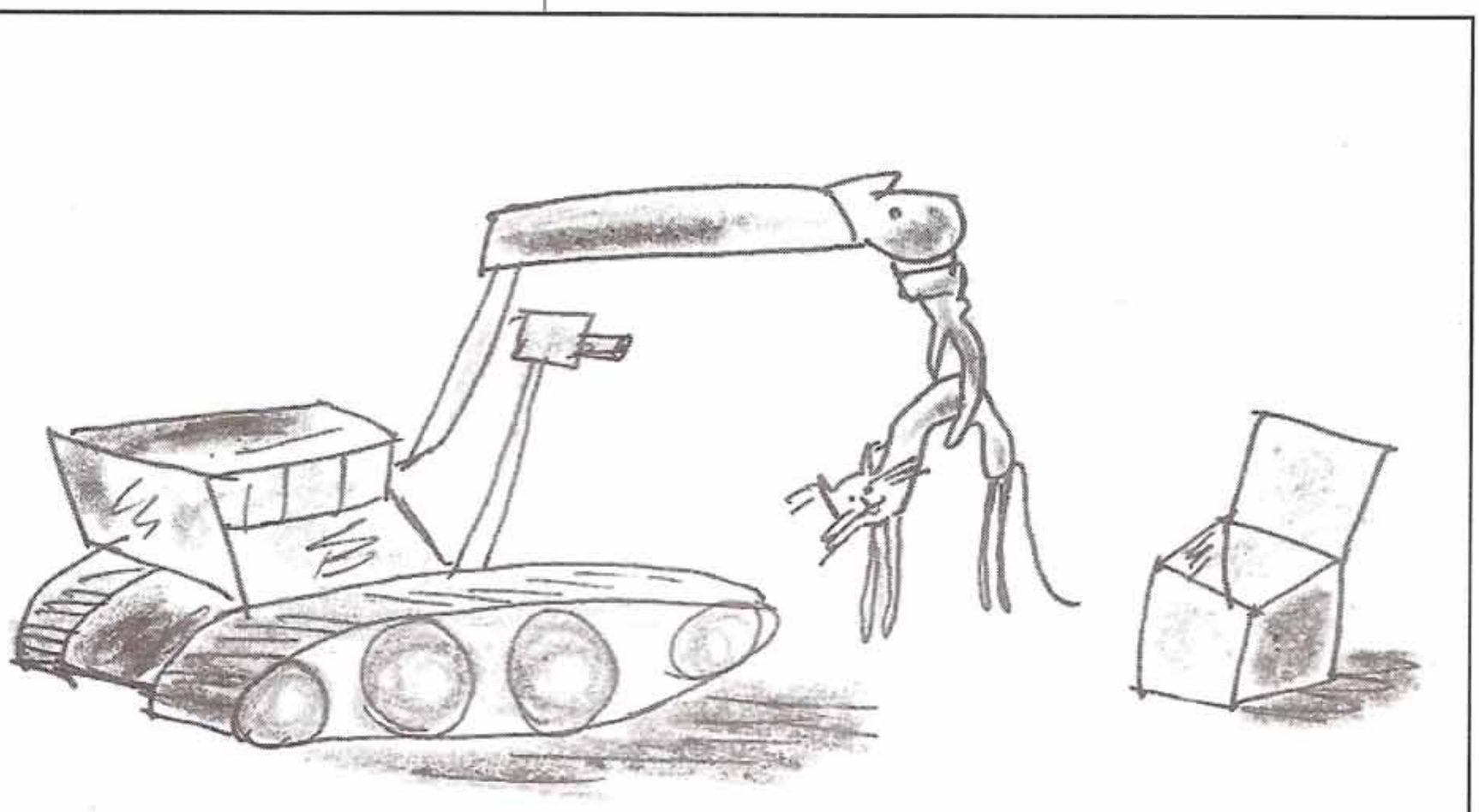
به طور مشابه، ممکن است شما انتظار داشته باشید که ویژگی‌های همگانی خاصی به طور طبیعی از دل یک سیستم کوانتومی مرکب بیرون بیایند. آیا این موضوع می‌تواند نظم جهان ما را توصیف کند؟ نظری که وجود دارد این است که ویژگی‌های همگانی می‌توانند با استقلال کافی (برای اعمال جدایی بر آنها) پایدار شوند؛ که این مطلب، مستقل در نظر گرفتن آنها را در آغاز توجیه می‌کند.

به دلیل وجود چنین حالتی، این یک تعریفِ دور و تسلسلی جالب است؛ چرا که به ویژگی‌های کلاسیکی پایدار اجازه می‌دهد تا از دل یک سیستم کوانتومی به گونه‌ای بیرون بیایند که نیاز به معرفی هیچ اصل فیزیکی جدیدی نباشد. مشخص کردن این‌که چه نوع از ویژگی‌های همگانی به عنوان خواص کلاسیکی معرفی خواهند شد، کار مشکلی نیست. به عنوان مثال، حتی در زمانی که سیستم کوانتومی اصلی در اغتشاشی دائمی از تغییر تدریجی به سر می‌برد، آنها باید یک معنی پایدار داشته باشند. علاوه بر این، آنها نیاز دارند از قوانین منطق سنتی و علت و معلول کلاسیکی پیروی کنند (حداقل تا حدی که هرگونه سرپیچی از آن قوانین کاملا نامحتمل باشد).

یکی از توصیف‌های موفقیت‌آمیزی که در مورد تکامل جهان، با استفاده از مجموعه‌ای از ویژگی‌های تعریف‌شده به صورت بالا صورت گرفته است، "تاریخچه سازگار"[1] نام دارد. با وجود استفاده وسیع از "تفکر ترفندی" و تحلیل قوی ریاضی در مورد تاریخچه سازگار، در حال حاضر در مورد وجود تاریخچه‌های سازگار چیز زیادی نمی‌توان گفت. حداقل می‌دانیم که توصیف جهان کلاسیکی، بدون ایجاد تناقض با نظریه کوانتومی و یا نیاز به یک فیزیک جدید، امکان‌پذیر است. این دستاورد کم‌اهمیتی نیست، چرا که حتما به یاد دارید که بحث در مورد مرده یا زنده بودن گربه، دهه‌های متمادی به طول انجامید.

در حالی که این نظریه‌ها دلگرم‌کننده به نظر می‌رسند، اما به یک نظریه خاص، که توضیح دهد چرا جهان ما به این صورتی که هست دیده می‌شود، نزدیک نشده‌اند. اما این مسئله منحصر به نظریه کوانتومی نیست. در حالی که نظریه‌های ناکامل به راه خود ادامه می‌دهند، ایده "تاریخچه‌های خودسازگار"[2] برتر از همه به نظر می‌رسد. نیوتن فهمید که نظریه کاملا جدید او در مورد گرانش، راجع به شکل جهان حرف‌هایی برای گفتن دارد؛ اما علاوه بر آن او می‌دانست که در نظریه‌اش هیچ‌چیزی در مورد چگونگی آغاز جهان یافت نمی‌شود. از طرفی، اینشتین از خود می‌پرسید که آیا قوانین فیزیک به خداوند اجازه انتخاب در خلق جهان را داده است یا خیر. تاکنون به نظر می‌رسد که تعداد این انتخاب‌ها بی‌شمار بوده است. اصل عدم قطعیت، که اینشتین هرگز آن را دوست نداشت، می‌گوید که شما نمی‌توانید همواره آن چه را که دوست دارید به دست آورید. شاید در گسترده‌ترین حالت ممکن، این اصل در مورد محدودیت‌های دانش ما در مورد جهانی که خودمان را در آن یافته‌ایم نیز صادق باشد. ما همیشه می‌توانیم سوال کنیم، اما شاید همیشه حق دانستن پاسخ را نداشته باشیم.

هر پدیده کلاسیکی که در جهان اطراف ما قرار دارد، در حقیقت نتیجه یک محاسبه کوانتومی است که به این سوال پاسخ می‌دهد: "من چه چیز کلاسیکی‌ای هستم؟"



پی‌نوشت:

1- Consistent histony/ 2- Self – consistent histories