تا اواخر قرن نوزدهم میلادی، دانش فیزیک شامل شاخه‌هایی مثل مکانیک نیوتونی، الکترومغناطیس، ترمودینامیک و ... بود. این شاخه‌های فیزیک که آن‌ها را به عنوان **فیزیک کلاسیک** می‌شناسیم به خوبی از عهدهٔ توضیح و توجیه علت پدیده‌هایی که تا آن زمان مورد مشاهده و بررسی فیزیک‌دانان قرار گرفته بود، برمی‌آمدند. در اواخر قرن ۱۹ میلادی دانشمندان پدیده‌هایی در طبیعت و آزمایشگاه مشاهده کردند که به کمک فیزیک کلاسیک نمی‌توانستند علت رخ‌دادن آن‌ها را به خوبی توضیح دهند. این‌جا بود که داستان فیزیک جدید آغاز شد. فیزیک‌دان‌ها مجبور شدند که در برخی از فرضیه‌های علمی آن روزگار، بازنگری اساسی کنند. این اتفاق باعثِ تحولی اساسی، در برخی از نظریات فیزیک کلاسیک شد.

به این ترتیب شاخه‌های جدیدی به فیزیک اضافه شد که آن‌ها را به عنوان **فیزیک جدید** می‌شناسیم. شاخه‌هایی مانند: نسبیت خاص، نسبیت عام، مکانیک کوانتومی، فیزیک هسته‌ای و ... از جمله شاخه‌های فیزیک جدید هستند که در ۱۲۰ سال اخیر به وجود آمده‌اند و گسترش پیدا کرده‌اند.

با این مقدمه می‌خواهیم به برخی از پدیده‌هایی بپردازیم که باعث تولد فیزیک جدید شدند!!

پدیدهٔ اول: اثر فوتوالکتریک

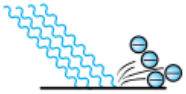
شرح پدیده: اگر به کلاهک یک برق‌نما (الکتروسکوپ) که دارای بار منفی است، نور مرئی بتابانیم، اتفاقی نمی‌افتد. حتی اگر شدت نور را بیشتر کنیم باز هم اتفاقی رخ نمی‌دهد. اما اگر پرتو فرابنفش که بسامد آن از نور مرئی بیشتر است به آن بتابانیم، از سطح کلاهک الکتروسکوپ الکترون‌هایی جدا می‌شوند و به این ترتیب، بار کلاهک کاهش یافته و انحراف ورقه‌ها کم‌تر می‌شود.

هیچ اتفاقی نمی‌افتد.

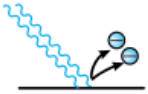
همچنان هیچ اتفاقی نمی‌افتد.

ورقه‌های الکتروسکوپ به تدریج بسته می‌شوند.

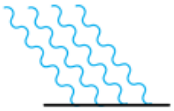
اگر نوری با بسامد مناسب (مانند پرتو فرابنفش)، به سطح یک فلز بتابد الکترون‌های فلز، انرژی نور فرودی را جذب می‌کنند و از سطح فلز خارج می‌شوند. این پدیده را **فوتوالکتریک** و الکترون‌هایی که به این روش از سطح فلز جدا می‌شوند را **فوتوالکترون** می‌نامیم.


نور شدید با بسامد کافی

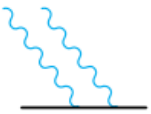
فوتوالکتریک با شدت بیشتری رخ می‌دهد.


نور ضعیف با بسامد کافی

فوتوالکتریک رخ می‌دهد.

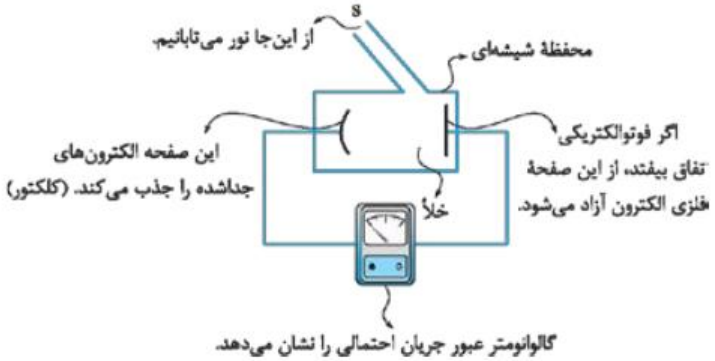

نور شدید با بسامد ناکافی

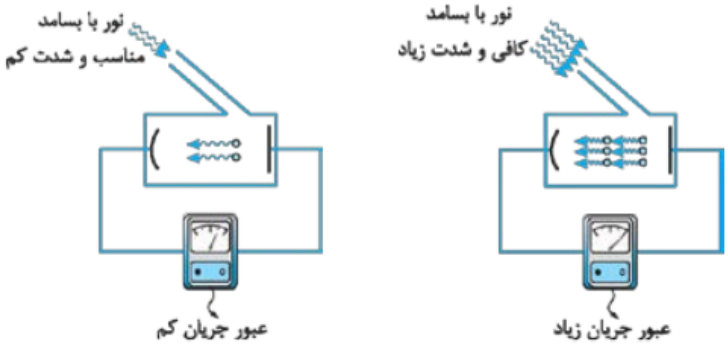
فوتوالکتریک رخ نمی‌دهد.


نور ضعیف با بسامد ناکافی

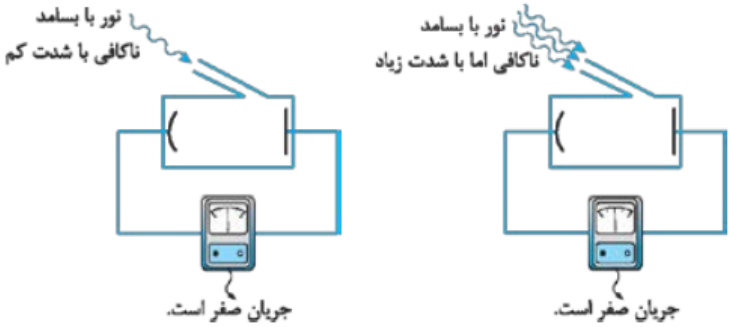
فوتوالکتریک رخ نمی‌دهد.

ابزار آزمایش: دستگاهی مطابق شکل روبه‌رو را در نظر بگیرید. از روزنهٔ S نور تکفام *(یا همون تک‌بسامد خودمون!)* را به صفحهٔ فلزی هدف می‌تابانیم. اگر فوتوالکتریک اتفاق بیفتد، الکترون‌ها از سطح صفحهٔ فلزی، آزاد می‌شوند. فوتوالکترون‌های گسیل‌شده توسط صفحهٔ جمع‌کننده (کلکتور) جذب شده و از طریق سیم به گالوانومتر (آمپرسنج عقربه‌ای حساس) منتقل می‌شود. بنابراین گالوانومتر عبور جریان الکتریکی را نشان می‌دهد. هر چه تعداد فوتوالکترون‌ها بیشتر باشد، گالوانومتر عدد بزرگ‌تری را نشان می‌دهد.





مشاهدات آزمایش: اگر نوری با بسامد کافی به صفحهٔ فلزی بتابانیم، گالوانومتر عبور جریان را نشان می دهد و هر چه شدت نور تابانده شده بیشتر باشد، تعداد فوتوالکترون‌های کَنده‌شده از صفحهٔ فلزی و در نتیجه جریان نشان داده شده توسط گالوانومتر بیشتر می‌شود.



حالا بسامد نور فرودی را به تدریج کاهش می‌دهیم. وقتی بسامد نور از حد معینی کم‌تر شد، هیچ الکترونی از سطح فلز گسیل نمی‌شود. اگر شدت نور تابیده‌شده هم افزایش یابد، باز هم هیچ الکترونی از سطح فلز گسیل نمی‌شود و عقربهٔ گالوانومتر منحرف نمی‌شود.

نتیجهٔ آزمایش: جداشدن الکترون‌ها از سطح یک فلز در اثر تاباندن نور به آن به **بسامد نور** فرودی بستگی دارد و به **شدت نور**، وابسته نیست. پس برای رخ‌دادن پدیدهٔ فوتوالکتریک آن‌چه مهم است، **بسامد** نور فرودی است.

نکته اگر فوتوالکتریک رخ دهد (تأکید می‌کنیم که اگر فوتوالکتریک رخ دهد)، افزایش شدت باعث افزایش فوتوالکترون‌های کنده‌شده و در نتیجه افزایش جریان می‌شود، اما اگر به علت کافی‌نبودن بسامد، فوتوالکتریک رخ ندهد، افزایش شدت نور تابیده‌شده هیچ تأثیری ندارد.

ناتوانی فیزیک کلاسیک در توجیه اثر فوتوالکتریک

در واقع فیزیک کلاسیک برای توضیح اثر فوتوالکتریک، با دو اشکال عمده روبه‌رو بود:

۱) طبق نظریات فیزیک کلاسیک، نور موج الکترومغناطیسی است و از میدان‌های الکتریکی و مغناطیسی تشکیل شده است؛ بنابراین پس از برخورد نور با سطح فلز، میدان الکتریکی آن بر الکترون‌های فلز نیروی $\vec{F} = -e\vec{E}$ وارد می‌کند و این نیرو با افزایش انرژی جنبشی الکترون‌ها موجب جداشدن آن‌ها از سطح فلز می‌شود. پس طبق این دیدگاه پدیدهٔ فوتوالکتریک باید در هر بسامدی اتفاق بیفتد. در حالی‌که دیدیم فوتوالکتریک فقط با بسامد معینی رخ می‌دهد.

۲) طبق نظریات الکترومغناطیس در فیزیک کلاسیک، شدت نور با مربع دامنهٔ میدان الکتریکی آن متناسب است؛ پس اگر شدت نور فرودی زیاد شود به معنای افزایش دامنهٔ میدان الکتریکی است. در این صورت باید نیروی وارد بر الکترون‌های سطح فلز و در نتیجه انرژی جنبشی آن‌ها هنگام خروج از فلز بیشتر شود، در صورتی‌که دیدیم اگر بسامد نور فرودی کافی نباشد، افزایش شدت نور تاثیری در اثر فوتوالکتریک ندارد.

اینشتین به منظور توضیح اثر فوتوالکتریک، برای نور خاصیت ذره‌ای در نظر گرفت و فرض کرد که نور، مجموعه‌ای از بسته‌های انرژی است که امروزه این بسته‌های انرژی را «**فوتون**» می‌نامیم. اینشتین فرض کرد که انرژی هر فوتون نور با بسامد f از رابطهٔ مقابل به دست می‌آید:

$$E = hf$$

در رابطهٔ بالا f بسامد نور برحسب هرتز (Hz) و h «ثابت پلانک» است، که مقدار آن برابر است با: $h = 6/63 \times 10^{-34}\ J.s$

رابطهٔ $E = hf$ به این معنا است که هر چه بسامد نور تابیده‌شده بیشتر باشد، فوتون‌های آن پرانرژی‌تر است.

مثال **فرکانس نور زردی $520\ THz$ است. انرژی هر فوتون این نور، چند ژول است؟**

الکترون‌ولت: یک الکترون‌ولت برابر است با مقدارِ تغییرِ انرژیِ یک الکترون وقتی بین دو نقطه با اختلاف پتانسیل یک ولت، جابه‌جا می‌شود.

طبق رابطه‌ای که در فیزیک سال یازدهم آموختیم، داریم:

$$|\Delta U| = |q|\Delta V \Rightarrow \Delta U = (۱/۶\times۱۰^{-۱۹}\,C)\times(۱\,V) = ۱/۶\times۱۰^{-۱۹}\,J \Rightarrow \boxed{۱\,eV = ۱/۶\times۱۰^{-۱۹}\,J}$$

نمونه اگر بخواهیم یکای ثابت پلانک را که برحسب $J.s$ است، برحسب $eV.s$ بنویسیم، داریم:

$$h = ۶/۶۳\times۱۰^{-۳۴}\,J.s\times\frac{۱\,eV}{۱/۶۰\times۱۰^{-۱۹}\,J} = ۴/۱\times۱۰^{-۱۵}\,eV.s \Rightarrow \boxed{h = ۶/۶۳\times۱۰^{-۳۴}\,J.s = ۴/۱\times۱۰^{-۱۵}\,eV.s}$$

رابطهٔ انرژی فوتون با طول موج

در فصل سوم دیدیم که رابطهٔ بسامد و طول موج به صورت $f = \frac{v}{\lambda}$ است. در مورد امواج الکترومغناطیس $v = c = ۳\times۱۰^{۸}\,m/s$ است؛ بنابراین داریم:

$$E = hf = \frac{hc}{\lambda} \Rightarrow \boxed{E = \frac{hc}{\lambda}}$$

h (ثابت پلانک) و c (سرعت نور در خلأ)، هر دو اعداد ثابتی هستند؛ بنابراین حاصل‌ضرب آن‌ها نیز همواره عددی ثابت است. بیایید مقدار آن را در حالت کلی محاسبه کنیم:

$$hc = (۶/۶۳\times۱۰^{-۳۴}\,J.s)(۳\times۱۰^{۸}\,m/s) = ۱۹/۹\times۱۰^{-۲۶}\,J.m$$

این عدد خیلی کوچک است. اگر موافقید؛ چون انرژی فوتون‌ها در حد الکترون‌ولت و طول موج آن‌ها در حد نانومتر (nm) است، hc را به جای $J.m$ برحسب $eV.nm$ به دست آوریم:

$$hc = ۱۹/۹\times۱۰^{-۲۶}\,J.m\times\frac{۱\,eV}{۱/۶\times۱۰^{-۱۹}\,J}\times\frac{۱\,nm}{۱۰^{-۹}\,m} = ۱/۲۴\times۱۰^{۳}\,eV.nm = ۱۲۴۰\,eV.nm$$

تذکر **در کتاب درسی، توصیه شده این مقدار یعنی $۱۲۴۰\,eV.nm$ را برای hc حفظ باشید؛** پس لطفاً این کار را انجام بدهید.

مثال **یک لامپ (W) ۶۰ با نور قرمز $(\lambda_{Red} = ۷۰۰\,nm)$ روشن می‌شود.**

الف) انرژی هر فوتون را برحسب eV به دست آورید.

ب) تعداد فوتون‌هایی که در هر ثانیه از لامپ گسیل می‌شود را محاسبه نمایید.

وقتی نوری با بسامد مشخص به سطح فلزی بتابد، هر الکترون یک فوتون از نور را جذب می‌کند و نه بیشتر! **اگر این فوتون انرژی لازم برای جداکردن الکترون را داشته باشد،** بخشی از انرژی آن صرف انجام کار (W) برای جداکردن الکترون از سطح فلز شده و باقی‌ماندهٔ آن به انرژی جنبشی الکترون (K) تبدیل می‌شود. بنابراین طبق قانون پایستگی انرژی داریم:

انرژی فوتون $(E = hf)$ ← انرژی جنبشی الکترون پس از جداشدن (K) + انجام کار برای جداکردن الکترون (W)

$$\Rightarrow E = W + K \Rightarrow \boxed{hf = W + K}$$

مثال **یک فوتون فرابنفش با بسامد $۶\times۱۰^{۱۶}\,Hz$ به سطح ورقه‌ای از طلا می‌تابد. اگر فوتوالکترون‌ها با انرژی جنبشی $۲۳۰\,eV$ از سطح ورقه گسیل شوند، کار لازم برای جداکردن الکترون چند الکترون‌ولت است؟ $(h = ۴/۱۰\times۱۰^{-۱۵}\,eV.s)$**

تابع کار

گفتیم برای جداکردن الکترون از سطح فلز، باید کار انجام بدهیم؛ ولی مقدار این کار برای همهٔ الکترون‌ها ثابت نیست. در واقع برای جداکردن برخی از الکترون‌ها از سطح یک فلز خاص به کار کم‌تر نیاز داریم، این دسته از الکترون‌ها کم‌تر به فلز مقید هستند. برای برخی دیگر که مقیدتر هستند، به کار بیشتر نیاز داریم. **به حداقل کار لازم برای جداکردن الکترون از سطح فلز «تابع کار» آن فلز می‌گوییم** و آن را با نماد $W_{\circ}$ نشان می‌دهیم. تابع کار هر فلز به **جنس** آن فلز بستگی دارد. جدول روبه‌رو تابع کار چند فلز را نشان می‌دهد:

فلز	$W_{\circ}(eV)$
طلا	۵/۲۰
مس	۴/۷۰
نقره	۴/۶۴
آهن	۴/۵۰
روی	۴/۳۱

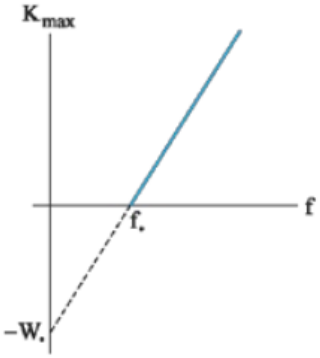
به بیان دیگر، اگر یک فوتون با سست‌ترین الکترون سطح فلز برخورد کند، انرژی مورد نیاز برای جداشدن آن از سایر الکترون‌ها کم‌تر و برابر تابع کار فلز است؛ بنابراین باقی‌ماندهٔ انرژی فوتون که به انرژی جنبشی این الکترون تبدیل می‌شود، بیشترین مقدار خواهد بود؛ پس بیشترین انرژی جنبشی الکترون‌های گسیل‌شده از سطح یک فلز برابر است با:

$$hf = K_{max} + W_{\circ} \Rightarrow \boxed{K_{max} = hf - W_{\circ}}$$ (معادلهٔ فوتوالکتریک)

مثال **نوری تکفام به طول موج ۲۴۰ nm به صفحه‌ای فلزی می‌تابانیم. اگر بیشترین انرژی جنبشی فوتوالکترون‌های گسیل‌شده از صفحه ۱/۲۲ eV باشد، تابع کار فلز را محاسبه کنید.** $hc = ۱/۲۴ \times ۱۰^{۳}\ eV.nm$

نکته اگر انرژی فوتون فرودی کم‌تر از تابع کار باشد $(hf < W_{\circ})$، پدیدهٔ فوتوالکتریک رخ نمی‌دهد.

نمودار انرژی جنبشی بیشینه برحسب بسامد



$$K_{max} = hf - W_0 \quad (y = ax + b)$$

اگر معادلهٔ فوتوالکتریک را به صورت زیر بنویسیم، متوجه شباهت آن با معادلهٔ خط راست می‌شویم. با توجه به این شباهت، نمودار انرژی جنبشی بیشینه (K_{max}) برحسب بسامد (f)، خط راستی با شیب h و عرض از مبدأ $-W_0$ است. اگر محل تقاطع این خط را با محور افقی f_0 در نظر بگیریم، نمودار به صورت روبه‌رو می‌شود:

اما از این نمودار چه چیزهایی می‌فهمیم:

۱) به ازای $f = f_0$ انرژی جنبشی بیشینهٔ الکترون، صفر است؛ یعنی اگر بسامد نور فرودی f_0 باشد، همهٔ انرژی فوتون صرف جداکردن آن از سطح فلز می‌شود و چیزی برای انرژی جنبشی الکترون باقی نمی‌ماند.

به عبارت دیگر، اگر بسامد فوتون نور فرودی کم‌تر از f_0 باشد، انرژی آن فوتون حتی برای جداکردن سست‌ترین الکترون‌ها از سطح فلز، کافی نیست؛ بنابراین شرط آن‌که نور فرودی بتواند الکترونی را از سطح فلز جدا کند، این است که بسامد آن از f_0 بزرگ‌تر یا دست‌کم با آن مساوی باشد.

شرط رخ‌دادن پدیدهٔ فوتوالکتریک $\Rightarrow f \geq f_0$

f_0 را «**بسامد آستانه**» یا بسامد قطع می‌نامیم و از رابطهٔ زیر می‌توانیم آن را برای هر فلز، محاسبه کنیم:

$$K_{max} = hf - W_0 \Rightarrow 0 = hf_0 - W_0 \Rightarrow hf_0 = W_0 \Rightarrow \boxed{f_0 = \frac{W_0}{h}}$$

بنابراین **بسامد آستانه، کم‌ترین بسامد نور فرودی برای جداکردن الکترون از سطح فلز است.** بسامد آستانهٔ هر فلز با فلز دیگر متفاوت است و به تابع کار آن فلز بستگی دارد. هر چه تابع کار فلزی بزرگ‌تر باشد، بسامد آستانه برای آن فلز نیز بزرگ‌تر است.

نکته می‌دانیم که طول موج با بسامد رابطه عکس دارد؛ پس بیشترین طول موج نور فرودی که می‌تواند الکترون از سطح فلز جدا کند را طول موج آستانه (λ_0) می‌نامیم و آن را از رابطهٔ زیر به دست می‌آوریم:

$$f_0 = \frac{W_0}{h} \Rightarrow \frac{c}{\lambda_0} = \frac{W_0}{h} \Rightarrow \boxed{\lambda_0 = \frac{hc}{W_0}}$$

با توجه به رابطهٔ بالا شرط رخ‌دادن اثر فوتوالکتریک آن است که $\lambda \leq \lambda_0$ باشد.

نکته با توجه به محاسبات بالا می‌فهمیم که تابع کار برابر با $W_0 = hf_0$ و یا $W_0 = \frac{hc}{\lambda_0}$ است.

بیایید بحث بسامد آستانه را با یک جمع‌بندی تمام کنیم:

اگر: انرژی فوتون $(hf) < W_0 \Rightarrow f < f_0 \Rightarrow$ فوتوالکتریک رخ نمی‌دهد.

اگر: انرژی فوتون $(hf) = W_0 \Rightarrow f = f_0 \Rightarrow$ فوتوالکتریک رخ می‌دهد، اما انرژی جنبشی فوتوالکترون‌ها صفر است.

اگر: انرژی فوتون $(hf) > W_0 \Rightarrow f > f_0 \Rightarrow$ فوتوالکتریک رخ می‌دهد و بیشینهٔ انرژی جنبشی فوتوالکترون‌ها برابر است با: $K = hf - W_0$

مثال **فرض کنید $f > f_0$ و فوتوالکتریک رخ می‌دهد.**

الف) افزایش بسامد

ب) افزایش شدت نور چه تغییری در فوتوالکترون‌ها ایجاد می‌کند؟

۲ شیب نمودار K_{max} برحسب بسامد، برابر با ثابت پلانک است؛ بنابراین اگر نمودار K_{max} برحسب بسامد را برای فلزات مختلف رسم کنیم، شیب همهٔ آن‌ها برابر است و در نتیجه نمودارهای همهٔ فلزات با هم موازی خواهند بود.

نمونه برای فلزاتی که تابع کار آن‌ها در جدول صفحهٔ قبل آمده است، بسامد آستانه را محاسبه کرده و نمودار انرژی جنبشی بیشینه، برحسب بسامد را برای آن‌ها رسم می‌کنیم:

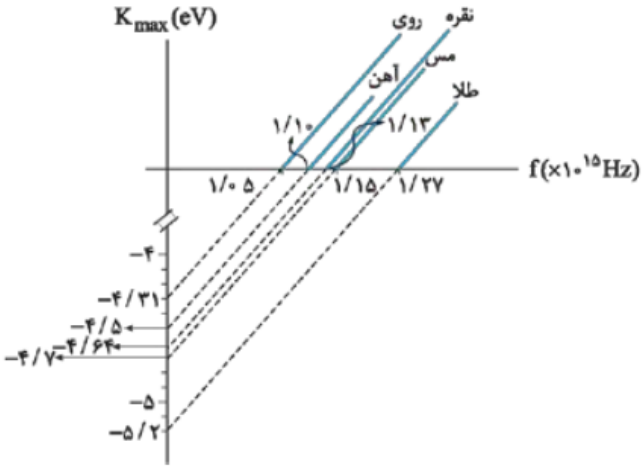
$$f_{\circ طلا} = \frac{W_{\circ طلا}}{h} = \frac{۵/۲\ eV}{۴/۱\times۱۰^{-۱۵}\ eV.s} = ۱/۲۷\times۱۰^{۱۵}\ Hz$$

$$f_{\circ مس} = \frac{W_{\circ مس}}{h} = \frac{۴/۷\ eV}{۴/۱\times۱۰^{-۱۵}\ eV.s} = ۱/۱۵\times۱۰^{۱۵}\ Hz$$

$$f_{\circ نقره} = \frac{W_{\circ نقره}}{h} = \frac{۴/۶۴\ eV}{۴/۱\times۱۰^{-۱۵}\ eV.s} = ۱/۱۳\times۱۰^{۱۵}\ Hz$$

$$f_{\circ آهن} = \frac{W_{\circ آهن}}{h} = \frac{۴/۵\ eV}{۴/۱\times۱۰^{-۱۵}\ eV.s} = ۱/۱\times۱۰^{۱۵}\ Hz$$

$$f_{\circ روی} = \frac{W_{\circ روی}}{h} = \frac{۴/۳۱\ eV}{۴/۱\times۱۰^{-۱۵}\ eV.s} = ۱/۰۵\times۱۰^{۱۵}\ Hz$$



همان‌طور که می‌بینید، همهٔ خط‌ها با هم موازی هستند.

مثال **طول موج آستانه برای آهن ۲۷۵ nm است.**

الف) تابع کار آهن را محاسبه کنید.

ب) اگر نوری با طول موج ۱۵۰ nm به ورقه‌ای از آهن بتابد، حداکثر تندی فوتوالکترون‌های گسیل‌شده را برحسب متر بر ثانیه به دست آورید.

پ) آیا نوری با بسامد $۸/۵\times۱۰^{۱۴}\ Hz$ می‌تواند از سطح ورقهٔ آهن الکترون گسیل کند؟

$(m_e = ۹/۱۱\times۱۰^{-۳۱}\ kg, h = ۴/۱\times۱۰^{-۱۵}\ eV.s, c = ۳\times۱۰^{۸}\ m/s)$

نکته در فصل قبل و در قسمت آزمایش یانگ به سرشت موجی نور پی بردید. این‌جا هم به سرشت ذره‌ای نور پی بردید؛ پس نور در بعضی پدیده‌ها رفتار موجی و در بعضی پدیده‌ها رفتار ذره‌ای از خود نشان می‌دهد.

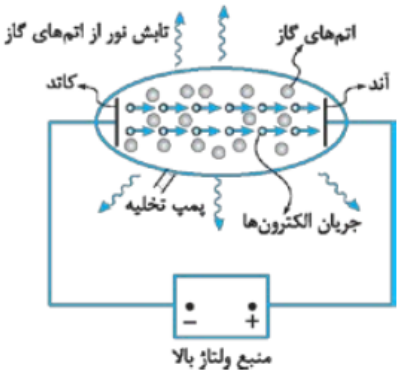
دومین پدیده‌ای که فیزیک کلاسیک را به چالش کشید، مشاهدهٔ طیف‌های گسیلی خطی بود. همان‌طور که می‌دانید، همه اجسام در هر دمایی از خود امواج الکترومغناطیس گسیل می‌کنند. از طرفی در فصل ۳ دیدیم که طیف امواج الکترومغناطیس شامل گسترهٔ وسیعی از طول موج‌هاست (از مرتبهٔ 10^{-13} m برای اشعه گاما گرفته تا مرتبه 10^{3} متر برای امواج رادیویی).

اما آیا همهٔ مواد همهٔ طول موج‌های امواج الکترومغناطیس را تابش می‌کنند؟ برای پاسخ به این سؤال ابتدا باید طیف گسیلی مواد مختلف را بررسی کنیم. **طیف گسیلی هر ماده مجموعهٔ طول موج‌هایی است که آن ماده تابش می‌کند.** در بررسی طیف‌های گسیلی مواد مختلف متوجه می‌شویم که:

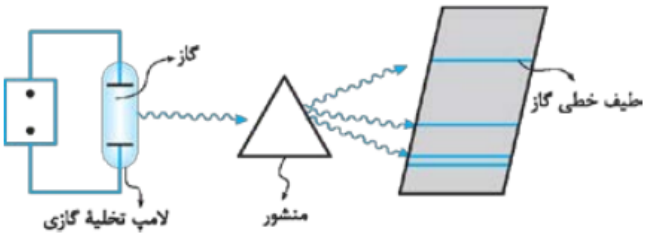
۱ برخی مواد همه طول موج‌های الکترومغناطیس را گسیل می‌کنند؛ بنابراین طیف این‌گونه مواد را «**طیف گسیلی پیوسته**» می‌نامیم. طیف گسیلی اغلب جامدات به علت برهم‌کنش قوی بین اتم‌های آن‌ها پیوسته است.

۲ برخی مواد تنها بعضی از طول موج‌های الکترومغناطیس را گسیل می‌کنند؛ بنابراین طیف این‌گونه مواد را «**طیف گسیلی گسسته**» یا «**طیف خطی**» می‌نامیم. طیف گسیلی اغلب گازها به علت برهم‌کنش ضعیف بین اتم‌های آن‌ها گسسته است.

بررسی طیف خطی گازهای رقیق



برای بررسی طیف خطی گازهای رقیق و کم‌فشار باید از یک «**لامپ تخلیهٔ گازی**» استفاده کنیم. این لامپ از دو الکترود به نام‌های کاتد و آند تشکیل شده است. این دو الکترود به ترتیب به پایانه‌های منفی و مثبت یک منبع تغذیه با ولتاژ زیاد وصل می‌شوند. درون لامپ از گازی کم‌فشار مثل هیدروژن، یا بخار رقیق‌شدهٔ عناصری مانند جیوه یا سدیم پر می‌شود. اختلاف پتانسیل بالا بین کاتد و آند باعث ایجاد جریانی از الکترون‌ها از کاتد به آند می‌شود. عبور الکترون‌ها از گاز درون لامپ، اتم‌های گاز را تحریک کرده و اتم‌های گاز شروع به تابش نور می‌کنند. رنگ نور گسیل‌شده از لامپ به **جنس** گاز درون آن بستگی دارد.



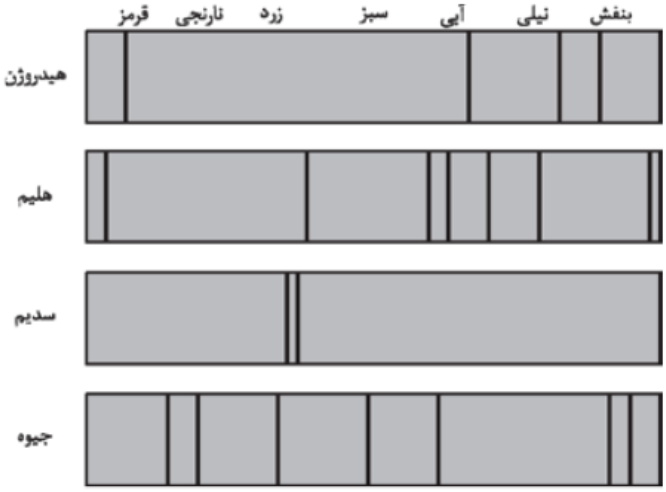
اگر نور تابش‌شده از لامپ را از یک منشور عبور دهیم، طیف گسیلی خطی آن گاز در محدودهٔ نور مرئی تشکیل می‌شود.

با بررسی طیف خطی عناصر مختلف می‌فهمیم که طیف خطی هیچ دو عنصری مشابه هم نیست. به عبارت دیگر، هر عنصر طول موج‌هایی را گسیل می‌کند که منحصر به خودش است (*درست مثل اثر انگشت آدم‌ها!*) به همین دلیل «**طیف‌سنجی**»، یعنی مطالعهٔ طیف خطی مواد مختلف، یکی از فعالیت‌های مهم فیزیک‌دانان است.

نکته اگر با تغییر ولتاژ دو سر لامپ تخلیهٔ گازی، دمای گاز درون لامپ را تغییر دهیم، ممکن است شدت نورهای گسیل‌شده توسط آن گاز تغییر کند، اما طیف خطی عنصر تغییری نمی‌کند. به عبارت بهتر:

این‌که هر ماده‌ای چه طول موج‌هایی را تابش می‌کند، فقط به جنس ماده بستگی دارد، اما این‌که کدام طول موج را با شدت بیشتری تابش می‌کند، به دمای جسم وابسته است.

در شکل زیر طیف نور حاصل از گازهای هیدروژن، هلیم و نئون و هم‌چنین بخار جیوه و سدیم را مشاهده می‌کنید.



طیف گسیلی هیدروژن

حالا می‌خواهیم به طور خاص طیف گسیلی اتم هیدروژن را دقیق‌تر بررسی کنیم. طیف گسیلی هیدروژن، مانند سایر گازها طیفی گسسته و خطی است. دانشمندان زیادی سعی کردند روابط تجربی را پیدا کنند که با آن رابطه بتوانند طول موج‌های مربوط به طیف هیدروژن را به دست آورند. یکی از اولین افرادی که به چنین رابطه‌ای دست یافت، بالمر بود.

معادلهٔ بالمر

یوهان بالمر رابطه‌ای را به دست آورد که با آن می‌توانیم عمدتاً طول موج‌های ناحیهٔ مرئی طیف گسیلی هیدروژن را به دست آوریم. رابطهٔ بالمر به شکل روبه‌رو است:

$$\lambda = (۳۶۴/۵۶\ \text{nm})\frac{n^۲}{n^۲ - ۲^۲}\ ,\ n \geq ۳$$

نمونه بیایید با قراردادن اعداد ۳، ۴، ۵ و ... در رابطهٔ بالمر ببینیم چه طول موج‌هایی در طیف اتم هیدروژن وجود دارد.

$$n=۳ \Rightarrow \lambda=(۳۶۴/۵۶\ nm)\ \frac{۳^۲}{۳^۲-۲^۲}=۶۵۶/۲۰\ nm$$ (طول موج نور قرمز)

$$n=۴ \Rightarrow \lambda=(۳۶۴/۵۶\ nm)\ \frac{۴^۲}{۴^۲-۲^۲}=۴۸۶/۰۸\ nm$$ (طول موج نور نیلی)

$$n=۵ \Rightarrow \lambda=(۳۶۴/۵۶\ nm)\ \frac{۵^۲}{۵^۲-۲^۲}=۴۳۴/۰۰\ nm$$ (طول موج نور آبی)

$$n=۶ \Rightarrow \lambda=(۳۶۴/۵۶\ nm)\ \frac{۶^۲}{۶^۲-۲^۲}=۴۱۰/۱۳\ nm$$ (طول موج نور بنفش)

با قراردادن اعداد بزرگ‌تر از ۶ به جای n در رابطهٔ بالمر طول موج‌های دیگری در محدودهٔ فرابنفش به دست می‌آید که هر چند تا زمان بالمر شناخته نشد، اما او وجود چنین طول موج‌هایی در طیف خطی هیدروژن را پیش‌بینی کرد. در حقیقت بالمر می‌دانست که اتم هیدروژن به‌جز طول موج‌های ناحیهٔ مرئی طول موج‌های دیگری را هم تابش می‌کند که مرئی نیستند، اما رابطه‌ای که او پیشنهاد کرده بود، برای محاسبهٔ همهٔ آن‌ها کافی نبود. این بار نوبت **ریدبرگ** بود تا رابطه‌ای را پیشنهاد کند که به وسیلهٔ آن علاوه بر طول موج‌های رشتهٔ بالمر می‌توانیم دامنهٔ وسیع‌تری از طول موج‌های طیف خطی هیدروژن را به دست آوریم.

معادلهٔ بالمر–ریدبرگ

ریدبرگ با بررسی بیشتر معادلهٔ بالمر معادلهٔ جدیدی را ارائه کرد که از معادلهٔ بالمر کامل‌تر بود.

این معادله که آن را معادلهٔ بالمر ـ ریدبرگ می‌نامیم، به شکل زیر است:

$$\frac{۱}{\lambda}=R\left(\frac{۱}{n'^۲}-\frac{۱}{n^۲}\right)\quad ,\quad n>n'$$

در معادلهٔ بالمر ـ ریدبرگ، R ثابت ریدبرگ است که تقریباً برابر است با $R=۰/۰۱۱\frac{۱}{nm}$ و n و n' نیز اعداد طبیعی هستند که همواره n از n' بزرگ‌تر است. اگر $n'=۲$ فرض شود، به ازای مقادیر $n=۳,۴,۵,\ldots$ همان طول موج‌های رشتهٔ بالمر به دست می‌آید. اما به ازای مقادیر دیگر n' چه طول موج‌هایی به دست می‌آید؟

رشته‌های طیف گسیلی اتم هیدروژن

بعدها با پیشرفت ابزارهای طیف‌سنجی، طول موج‌های دیگری از طیف گسیلی هیدروژن کشف و شناخته شد که رابطهٔ بالمر ـ ریدبرگ وجود آن‌ها را از قبل پیش‌بینی کرده بود. این طول موج‌ها را می‌توانیم با قراردادن مقادیر مختلف به جای n' و n در معادلهٔ بالا به دست آوریم. به ازای هر مقدار n' مجموعه‌ای از طول موج‌ها به دست می‌آید که به هر دسته از این طول موج‌ها یک **رشته** می‌گوییم. هر کدام از این رشته‌ها به نام کاشف آن رشته نام‌گذاری شده است. بیایید با این رشته طول موج‌ها بیشتر آشنا شویم.

۱ **رشتهٔ لیمان**: به ازای $n'=1$ و $n=2,3,4,\ldots$ در معادله، بالمر ـ ریدبرگ طول موج‌هایی به دست می‌آید که در محدودهٔ فرابنفش قرار دارد. این سری از طول موج‌ها را به افتخار تئودور لیمان، رشتهٔ لیمان می‌نامیم.

۲ **رشتهٔ بالمر**: همان‌طور که کمی قبل‌تر گفتیم، به ازای $n'=2$ و $n=3,4,5,\ldots$ در معادلهٔ بالمر ـ ریدبرگ طول موج‌های رشتهٔ بالمر به دست می‌آید که چهارتای این طول موج‌ها در ناحیهٔ مرئی و بقیه آن‌ها در ناحیهٔ فرابنفش قرار دارد.

۳ **رشتهٔ پاشِن**: به ازای $n'=3$ و $n=4,5,6,\ldots$ در معادلهٔ بالمر ـ ریدبرگ طول موج‌هایی به دست می‌آید که در محدودهٔ فروسرخ قرار دارند. این مجموعهٔ طول موج‌ها را به افتخار فردریش پاشِن، رشتهٔ پاشِن می‌نامیم.

۴ **رشتهٔ براکت**: به ازای $n'=4$ و $n=5,6,7,\ldots$ در معادلهٔ بالمر ـ ریدبرگ طول موج‌هایی به دست می‌آید که آن‌ها هم متعلق به محدودهٔ فروسرخ هستند. به افتخار فردریک براکت این مجموعهٔ طول موج‌ها را رشتهٔ براکت می‌نامیم.

۵ **رشتهٔ پفوند**: به ازای $n'=5$ و $n=6,7,8,\ldots$ هم طول موج‌هایی از طیف گسیلی هیدروژن به دست می‌آید که باز هم در ناحیهٔ فروسرخ قرار دارند. این رشتهٔ طول موج‌ها را نیز به افتخار کاشف آن‌ها آگِست هرمان پفوند، رشتهٔ پفوند می‌نامیم.

جدول زیر خلاصه‌ای از رشتهٔ طول موج‌های مربوط به طیف گسیلی اتم هیدروژن را بیان می‌کند.

(رشته‌های طیف گسیلی اتم هیدروژن)

رشته	n'	n	جای‌گذاری در معادلهٔ بالمر ـ ریدبرگ	مقدار تقریبی طول موج (nm)	محدودهٔ طول موج
لیمان	۱	۲	$\frac{1}{\lambda}=R(\frac{1}{1}-\frac{1}{4})$	۱۲۱	فرابنفش
		۳	$\frac{1}{\lambda}=R(\frac{1}{1}-\frac{1}{9})$	۱۰۲	
		۴	$\frac{1}{\lambda}=R(\frac{1}{1}-\frac{1}{16})$	۹۷	
		۵	$\frac{1}{\lambda}=R(\frac{1}{1}-\frac{1}{25})$	۹۵	
		۶	$\frac{1}{\lambda}=R(\frac{1}{1}-\frac{1}{36})$	۹۳/۵	
		⋮	⋮	⋮	
		∞	$\frac{1}{\lambda}=R(\frac{1}{1}-\frac{1}{\infty})$	۹۰/۹	

		۳	$\frac{۱}{\lambda}=R(\frac{۱}{۴}-\frac{۱}{۹})$	۶۵۵	مرئی رنگ قرمز
		۴	$\frac{۱}{\lambda}=R(\frac{۱}{۴}-\frac{۱}{۱۶})$	۴۸۵	مرئی رنگ نیلی
		۵	$\frac{۱}{\lambda}=R(\frac{۱}{۴}-\frac{۱}{۲۵})$	۴۳۳	مرئی رنگ آبی
بالمر	۲	۶	$\frac{۱}{\lambda}=R(\frac{۱}{۴}-\frac{۱}{۳۶})$	۴۰۹	مرئی رنگ بنفش
		۷	$\frac{۱}{\lambda}=R(\frac{۱}{۴}-\frac{۱}{۴۹})$	۳۹۶	فرابنفش
		⋮	⋮	⋮	⋮
		∞	$\frac{۱}{\lambda}=R(\frac{۱}{۴}-\frac{۱}{\infty})$	۳۶۳	فرابنفش

رشته	n′	n	جای‌گذاری در معادلهٔ بالمر ـ ریدبرگ	مقدار تقریبی طول موج (nm)	محدودهٔ طول موج
براکت	۴	۵	$\frac{۱}{\lambda}=R(\frac{۱}{۱۶}-\frac{۱}{۲۵})$	۴۰۴۰	فروسرخ
		۶	$\frac{۱}{\lambda}=R(\frac{۱}{۱۶}-\frac{۱}{۳۶})$	۲۶۲۰	
		۷	$\frac{۱}{\lambda}=R(\frac{۱}{۱۶}-\frac{۱}{۴۹})$	۲۱۶۰	
		۸	$\frac{۱}{\lambda}=R(\frac{۱}{۱۶}-\frac{۱}{۶۴})$	۱۹۴۰	
		۹	$\frac{۱}{\lambda}=R(\frac{۱}{۱۶}-\frac{۱}{۸۱})$	۱۸۱۲	
		⋮	⋮	⋮	
		∞	$\frac{۱}{\lambda}=R(\frac{۱}{۱۶}-\frac{۱}{\infty})$	۱۴۵۴	

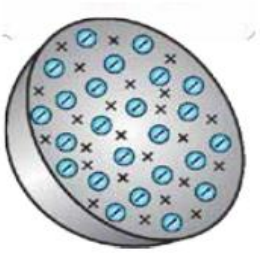
		۶	$\frac{۱}{\lambda}=R(\frac{۱}{۲۵}-\frac{۱}{۳۶})$	۷۴۳۸	فروسرخ
		۷	$\frac{۱}{\lambda}=R(\frac{۱}{۲۵}-\frac{۱}{۴۹})$	۴۶۴۰	
		۸	$\frac{۱}{\lambda}=R(\frac{۱}{۲۵}-\frac{۱}{۶۴})$	۳۷۳۰	
پفوند	۵	۹	$\frac{۱}{\lambda}=R(\frac{۱}{۲۵}-\frac{۱}{۸۱})$	۳۲۸۷	
		۱۰	$\frac{۱}{\lambda}=R(\frac{۱}{۲۵}-\frac{۱}{۱۰۰})$	۳۰۳۰	
		⋮	⋮	⋮	
		∞	$\frac{۱}{\lambda}=R(\frac{۱}{۲۵}-\frac{۱}{\infty})$	۲۲۷۲	

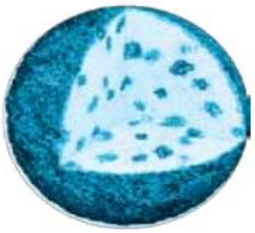
نکته در جدول فوق مشاهده می‌کنیم که در هر رشته به ازای nهای بزرگ‌تر طول موج‌های کوچک‌تر آن رشته به دست می‌آید و برعکس. بنابراین به ازای $n=\infty$ کوچک‌ترین طول موج هر رشته به دست می‌آید و به ازای کم‌ترین مقدار ممکن برای n، بزرگ‌ترین طول موج آن رشته به دست می‌آید.

گسترهٔ طول موج‌های یک رشته: به اختلاف کوتاه‌ترین و بلندترین طول موج در هر رشته، **گسترهٔ طول موج** آن رشته می‌گوییم.

مثال **کوچک‌ترین و بزرگ‌ترین طول موج مربوط به رشتهٔ پاشن را به دست آورید و گسترهٔ طول موج‌های این رشته را تعیین کنید.**

مدل اتمی تامسون





ژوزف تامسون ابتدا الکترون را کشف کرد و سپس مدلی برای اتم ارائه داد. تامسون چنین فرض کرد که اتم ناحیه‌ای است که بار مثبت به طور یکنواخت در فضای آن توزیع شده است و الکترون‌ها که بار منفی و جرم بسیار ناچیز دارند در فضای اتم پراکنده شده‌اند، درست مانند کشمش‌های وسط کیک کشمشی!! به همین دلیل مدل اتمی تامسون به **مدل کیک کشمشی** نیز معروف است.

براساس این مدل، الکترون‌ها *(یا همان کشمش‌ها!)* با بسامدهای معینی در اطراف وضع تعادل خود ارتعاش می‌کنند و این ارتعاش باعث می‌شود که اتم‌ها امواج الکترومغناطیس گسیل کنند.

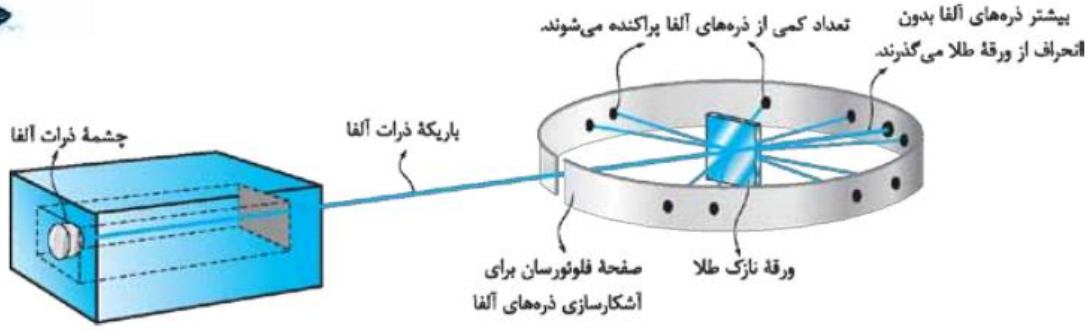
اشکالات مدل اتمی تامسون

۱ بسامدهای امواج الکترومغناطیس ناشی از تابش‌های اتمی که از طریق تجربه و آزمایش به دست آمده بود با آن‌چه از مدل اتمی تامسون برداشت می‌شد، مطابقت نداشت؛ یعنی مدل اتمی تامسون نمی‌توانست توضیح دهد که چرا فقط بسامدهای معینی از هر اتم تابش می‌شود.

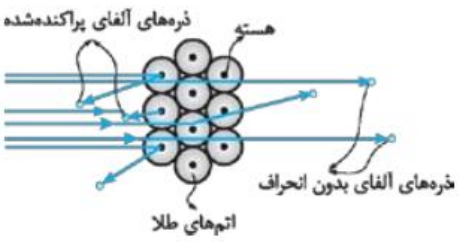
۲ نتایج آزمایش‌های رادرفورد که وجود هسته در اتم را تأیید می‌کرد با مدل کیک کشمشی آقای تامسون هم‌خوانی نداشت و همین موضوع باعث شد که مدل اتمی تامسون خیلی زود کنار گذاشته شود.

مدل اتمی رادرفورد

ارنست رادرفورد ذرات α (آلفا) را که از جنس هستهٔ هلیم هستند (یعنی بار مثبت دارند) ورقهٔ نازکی از طلا تاباند و در اطراف ورقهٔ طلا صفحه‌ای فلوئورسان قرار داد. ذرات آلفا بعد از تماس با ورقهٔ طلا به صفحه فلوئورسان برخورد می‌کردند و موجب ایجاد جرقه‌های کوچک می‌شدند و به این ترتیب مسیر حرکت ذرات α آشکار می‌شد.



مشاهدات رادرفورد این بود: ۱ بیشتر ذرات آلفا بدون انحراف یا با انحراف اندک از ورقهٔ طلا عبور می‌کردند. ۲ برخی از ذرات آلفا با زاویهٔ انحراف زیاد از ورقهٔ طلا رد می‌شدند. ۳ تعداد کمی از ذرات α پس از برخورد به ورقه طلا کاملاً تغییر جهت داده و به عقب برمی‌گشتند.



رادرفورد براساس مشاهدات خود این‌گونه استدلال کرد:

۱) بیشتر ذرات α بدون انحراف از ورقهٔ طلا عبور می‌کنند، پس این ذره‌ها تحت اثر میدان الکتریکی ذرهٔ باردار دیگری نیستند و احتمالاً از فضایی خالی رد می‌شوند.

۲) از آن‌جا که تعداد بسیار کمی از ذرات آلفا به عقب برمی‌گردند؛ پس این ذرات مستقیماً به ناحیه‌ای بسیار کم‌حجم اما پرجرم با بار مثبت برخورد کرده و تحت اثر نیروی دافعهٔ الکتریکی قوی بین ذرات α و بار مثبت متمرکز در این ناحیه به عقب برمی‌گردند.

بر این اساس رادرفورد الگوی اتمی خود را که به **مدل هسته‌ای اتم** معروف است، به صورت زیر بیان کرد:

اتم از یک هستهٔ مرکزی بسیار کوچک و در عین‌حال چگال (یعنی با چگالی خیلی زیاد) تشکیل شده است، که بار مثبت اتم در آن متمرکز است. الکترون‌ها نیز که جرم بسیار کمی دارند در اطراف هسته پراکنده‌اند و فضای بین الکترون‌ها و هسته که قسمت بزرگی از حجم اتم را تشکیل می‌دهد، خالی است.

اشکالات مدل اتمی رادرفورد

هر چند تصویری که رادرفورد از اتم به ما نشان داد، پاسخگوی بسیاری از سؤالات دربارهٔ ساختار اتم بود، اما این مدل هنوز دربارهٔ توجیه دو چیز موفق نبود:

۱) پایداری اتم

۲) طیف خطی اتم‌ها

در مدل اتمی رادرفورد اگر فرض کنیم که الکترون‌های اطراف هسته ساکن هستند، باید بپذیریم که نیروی جاذبهٔ بین بارهای ناهم‌نام الکترون‌ها و هسته باعث سقوط الکترون‌ها بر روی هسته می‌شود و اتم فرو می‌ریزد و با این فرض پایداری اتم‌ها زیر سؤال می‌رود.

حالا بیایید فرض کنیم که الکترون‌ها به دور هسته در حال گردش‌اند. در این صورت بنابر فیزیک کلاسیک، حرکت شتاب‌دار چرخشی آن‌ها باعث می‌شود تا امواج الکترومغناطیس گسیل کنند که بسامد آن با بسامد چرخش آن‌ها به دور هسته برابر است. با این فرض با دو مشکل مواجه می‌شویم:

اولاً: انرژی الکترون در اثر تابش امواج الکترومغناطیس کاهش می‌یابد. بنابراین به تدریج شعاع حرکت الکترون کوچک‌تر و بسامد چرخش آن بیشتر می‌شود. با ادامهٔ این روند شعاع حرکت الکترون به دور هسته دائماً کاهش می‌یابد تا در نهایت الکترون روی هسته سقوط می‌کند. پس باز هم پایداری اتم زیر سؤال می‌رود.

ثانیاً: اگر بپذیریم که شعاع حرکت الکترون به تدریج کاهش و بسامد چرخش آن به تدریج زیاد شود، الکترون می‌تواند هر شعاع و هر بسامد چرخشی داشته باشد؛ پس اتم باید بتواند همهٔ بسامدها و طول موج‌ها را تابش کند در حالی‌که می‌دانیم طیف بسیاری از مواد، خطی و شامل طول موج‌های معین و محدودی است.

به این ترتیب این الگوی اتمی هم که براساس فیزیک کلاسیک بنا شده بود، از توضیح طیف خطی و گسسته برخی مواد عاجز می‌ماند. دقیقاً این‌جا بود که فیزیک‌دانان فهمیدند باید بی‌خیال گذشته شوند و با یک ایدهٔ جدید و انقلابی، راه را برای حل مشکلات فیزیک کلاسیک باز کنند. این ایده توسط نیلز بور دانشمند دانمارکی بیان شد.

نیلز بور برای هیدروژن مدل اتمی ارائه کرد که در برخی موارد با مدل اتمی رادرفورد هم‌خوانی دارد؛ اما او برخی اصول فیزیک کلاسیک را کنار گذاشت و نشان داد که در ابعاد اتمی، برخی از کمیت‌ها که تا آن روز تصور می‌شد، کمیت‌هایی پیوسته هستند، در واقع هر مقداری نمی‌توانند داشته باشند و کوانتیده هستند. با این فرض، مدل اتمی بور هم توانست مشکل توضیح پایداری اتم را حل کند و هم طیف خطی اتم هیدروژن و رابطهٔ ریدبرگ را به خوبی توجیه کند.

اصول مدل اتمی بور

۱) «مدارها و انرژی الکترون‌ها در اتم فقط می‌توانند مقادیر مجاز و معینی داشته باشند.»

۲) اگر الکترونی روی یکی از مدارهای مجاز قرار داشته باشد، هیچ تابش الکترومغناطیسی نخواهد داشت. در این حالت می‌گوییم الکترون در مدار یا حالت مانا قرار دارد.

۳) الکترون می‌تواند از یک مدار مانا به یک مدار مانای دیگر برود. اگر الکترون از یک مدار مانا با انرژی بیشتر (E_U) به یک مدار مانا با انرژی کم‌تر (E_L) منتقل شود، فوتونی گسیل می‌کند که انرژی آن برابر با اختلاف انرژی دو مدار مانا است؛ یعنی:

$$E_{\text{فوتون}} = E_U - E_L \Rightarrow \boxed{hf = E_U - E_L}$$

نکته هر چه اختلاف انرژی دو مدار مانا، بیشتر باشد، الکترون در گذار از مدار بالاتر به مدار پائین‌تر فوتونی با بسامد بیشتر و طول موج کم‌تر گسیل می‌کند.

انرژی و شعاع مدارهای اتم هیدروژن

در اتم هیدروژن شعاع مدارها و انرژی‌های مجاز برای الکترون از روابط زیر به دست می‌آید:

$$E_n = \frac{-۱۳/۶\ eV}{n^۲} \qquad r_n = a_۰ n^۲$$

در روابط بالا n را **عدد کوانتومی** می‌نامیم که نشان‌دهندهٔ شماره مدار مجاز الکترون به دور هسته است.

$a_۰$ نیز کوچک‌ترین شعاع مجاز و یا شعاع اولین مدار مجاز در اتم هیدروژن است، که آن را **شعاع بور** برای اتم هیدروژن می‌نامیم. مقدار شعاع بور برای اتم هیدروژن برابر است با: $a_۰ = ۵/۲۹ \times ۱۰^{-۱۱}\ m$

نمونه شعاع مدارهای مجاز اول تا چهارم و هم‌چنین انرژی مجاز الکترون‌ها بر روی این مدارها را به دست می‌آوریم:

$$n = ۱ \Rightarrow \begin{cases} r_۱ = a_۰ (۱)^۲ \Rightarrow r_۱ = ۵/۲۹ \times ۱۰^{-۱۱}\ m \\ E_۱ = \dfrac{-۱۳/۶\ eV}{۱^۲} = -۱۳/۶\ eV \end{cases}$$

نکته اندازهٔ انرژی الکترون در مدار اول را «**یک ریدبرگ**» می‌نامیم و با نماد E_R نشان می‌دهیم، یعنی:

$$\text{یک ریدبرگ} = E_R = |E_1| = 13/6\ eV$$

حالا به سراغ مدارهای مجاز دوم، سوم و چهارم می‌رویم:

$$n=2 \Rightarrow \begin{cases} r_2 = a_0(2)^2 \Rightarrow r_2 = 4r_1 = 21/2\times10^{-11}\ m \\ E_2 = \dfrac{-13/6\ eV}{2^2} \Rightarrow E_2 = \dfrac{E_1}{4} = -3/4\ eV \end{cases}$$

$$n=3 \Rightarrow \begin{cases} r_3 = a_0(3)^2 \Rightarrow r_3 = 9r_1 = 47/6\times10^{-11}\ m \\ E_3 = \dfrac{-13/6\ eV}{3^2} \Rightarrow E_3 = \dfrac{E_1}{9} = -1/5\ eV \end{cases}$$

$$n=4 \Rightarrow \begin{cases} r_4 = a_0(4)^2 \Rightarrow r_4 = 16r_1 = 84/6\times10^{-11}\ m \\ E_4 = \dfrac{-13/6\ eV}{4^2} \Rightarrow E_4 = \dfrac{E_1}{16} = -0/85\ eV \end{cases}$$

نمونه با استفاده از اعدادی که در نمونهٔ قبل به دست آوردیم، می‌خواهیم ببینیم اگر الکترونی از مدار سوم به مدار اول گذار کند، بسامد فوتونی که تابش می‌کند، چند هرتز است. انرژی الکترون در مدار اول و سوم به ترتیب برابر است با $E_1 = -13/6\ eV$ و $E_3 = -1/5\ eV$؛ بنابراین:

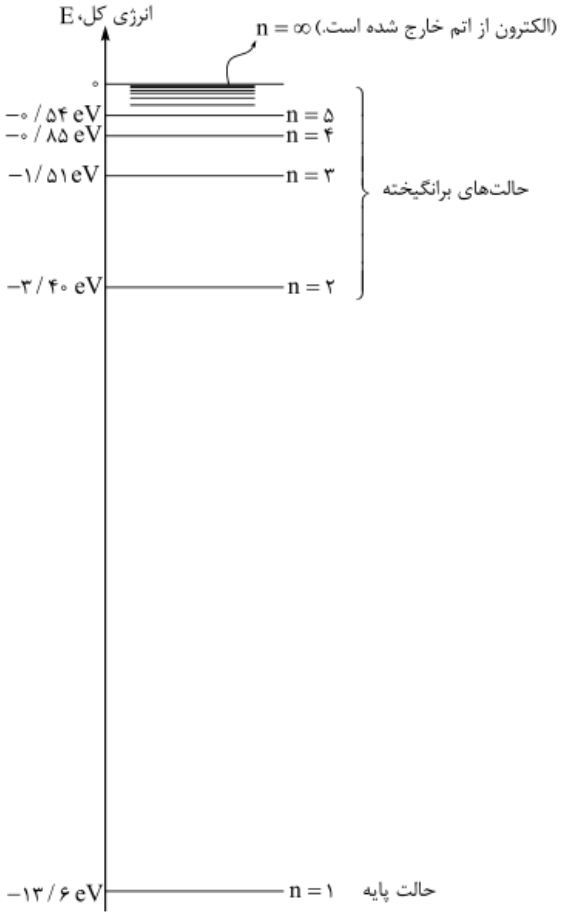
$$hf = E_3 - E_1 \Rightarrow f = \frac{E_3 - E_1}{h} = \frac{(-1/5\ eV) - (-13/6\ eV)}{4/10\times10^{-15}\ eV.s} = \frac{12/1\ eV}{4/10\times10^{-15}\ eV.s} \Rightarrow f = 2/95\times10^{15}\ Hz$$

مثال **الکترونی در مدار $n = 4$ قرار دارد. کوتاه‌ترین و بلندترین طول موجی که این الکترون می‌تواند تابش کند را به دست آورید.**

$(hc = 1240\ eV.nm)$

مفهوم ترازهای انرژی در اتم هیدروژن

مقدارهای انرژی مجاز مربوط به مدارهای مختلف اتم هیدروژن را که قبلاً به دست آوردیم بر روی نموداری به نام نمودار تراز انرژی نشان می‌دهیم.



از این نمودار چه چیزهایی باید بفهمیم؟

۱ انرژی هر تراز به معنای مقدار انرژی است که الکترون با آن مقدار انرژی به هسته مقید است؛ یعنی برای جداکردن الکترون از اتم هیدروژن و تشکیل یون H^+ باید به اندازهٔ انرژی آن تراز به الکترون انرژی بدهیم تا از قید هسته رها شود. علامت منفی در هر تراز انرژی نیز به همین دلیل است.

۲ هر چه الکترون در تراز انرژی بالاتری قرار گیرد، انرژی بیشتری دارد.

۳ هر چه به ترازهای بالاتر می‌رویم، فاصلهٔ بین ترازهای انرژی کم‌تر می‌شود. یعنی هر چه از هسته دورتر شویم، برای انتقال الکترون بین دو تراز انرژی متوالی به انرژی کم‌تری نیاز داریم.

۴ پایین‌ترین تراز انرژی مربوط به $n=1$ و مدار اول است. این حالت را **حالت پایه** می‌نامیم.

۵ ترازهای بالاتر از حالت پایه را که مربوط به $n=2,3,\cdots,\infty$ است، **حالت‌های برانگیخته** می‌نامیم. الکترون می‌تواند با دریافت اختلاف انرژی تراز انرژی اول با سایر ترازهای انرژی (ΔE)، از حالت پایه به حالت برانگیخته منتقل شود.

۶ بالاترین تراز انرژی مربوط به $n=\infty$ است. در این تراز، اگر الکترون در حالت سکون باشد، انرژی‌اش صفر است. در این حالت الکترون از اتم خارج شده است.

۷ اگر بخواهیم الکترونی را از حالت پایه به بالاترین حالت برانگیخته $(n=\infty)$ ببریم، یعنی الکترون را از اتم خارج کنیم، باید حداقل به اندازهٔ اختلاف انرژی دو تراز $(E_\infty - E_1 = 0-(-13/6\ eV) = 13/6\ eV)$ به آن انرژی بدهیم. **به کم‌ترین انرژی لازم برای خارج‌کردن الکترون از اتم در حالت پایه «انرژی یونش» می‌گوییم.**

اثبات معادلهٔ بالمر ـ ریدبرگ با استفاده از مدل بور:

با توجه به مدل اتمی بور، می‌دانیم وقتی الکترون از تراز با انرژی بیشتر (E_U) به تراز با انرژی کم‌تر (E_L) برود، فوتونی گسیل می‌کند که انرژی آن از رابطهٔ زیر به دست می‌آید:

$$E_{\text{فوتون}} = E_U - E_L \Rightarrow hf = E_U - E_L \Rightarrow \frac{hc}{\lambda} = E_U - E_L \xrightarrow{E_n = \frac{-E_R}{n^2}} \frac{1}{\lambda} = \frac{1}{hc}\left[\frac{-E_R}{n_U^2} - \left(\frac{-E_R}{n_L^2}\right)\right]$$

$$\Rightarrow \frac{1}{\lambda} = \frac{E_R}{hc}\left(\frac{1}{n_L^2} - \frac{1}{n_U^2}\right)$$

مقدار نسبت $\frac{E_R}{hc}$ که عدد ثابتی است را به دست می‌آوریم:

$$\frac{E_R}{hc} = \frac{13/6\ eV}{1240\ eV.nm} = 0/0109\ \frac{1}{nm}$$

این عدد همان ثابت ریدبرگ (R) است که قبلاً با آن آشنا شدیم، حالا با قراردادن R به جای $\frac{E_R}{hc}$ داریم:

$$\frac{1}{\lambda} = R\left(\frac{1}{n_L^2} - \frac{1}{n_U^2}\right)$$

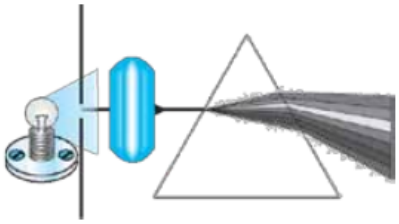
و این همان معادلهٔ بالمر ـ ریدبرگ است!

طیف جذبی

اگر نور خورشید را از یک منشور عبور داده و طیف آن را تشکیل دهیم، متوجه می‌شویم که خط‌های تاریکی در طیف پیوستهٔ نور خورشید وجود دارد. به عبارتی برخی طول موج‌ها از طیف نور خورشید حذف شده است. علت وجود این خط‌های تاریک این است که برخی از طول موج‌های نور خورشید، توسط گازهای موجود در جو خورشید و برخی دیگر توسط جو زمین جذب شده است؛ یعنی عناصر موجود در مسیر نور خورشید، برخی از طول موج‌های معین و خاص را جذب کرده و سایر طول موج‌ها از آن‌ها عبور کرده‌اند.

طیف جذبی: طول موج‌هایی از نور سفید را که توسط بخارات یک عنصر جذب می‌شود، **طیف جذبی** آن عنصر می‌نامیم؛ بنابراین طیف جذبی یک عنصر، همان خط‌های تیره‌ای است که به صورت گسسته در میان طیف نور سفید دیده می‌شود.

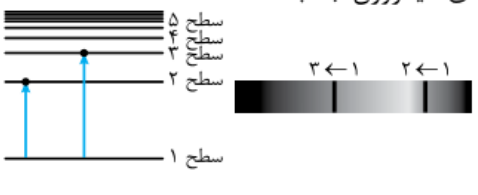
تشکیل طیف جذبی



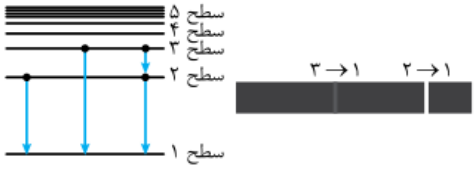
با یک آزمایش ساده می‌توانیم طیف جذبی هیدروژن را تشکیل دهیم. اگر نور سفید یک لامپ را از محفظه‌ای حاوی هیدروژن رقیق‌شده و سپس از یک منشور عبور دهیم، طیف جذبی هیدروژن ایجاد می‌شود. در طیف جذبی هیدروژن همهٔ طول موج‌ها به‌جز برخی طول موج‌های معین وجود دارد که این طول موج‌های معین به صورت خط‌های تاریک در طیف پیوستهٔ نور سفید مشخص است.

اگر طیف جذبی و گسیلی اتم هیدروژن را با هم مقایسه کنیم، نتیجه شگفت‌انگیز است. دقیقاً همان طول موج‌هایی که در طیف گسیلی وجود دارد در طیف جذبی حذف شده است! اما چگونه چنین چیزی ممکن است؟ توضیح این موضوع با استفاده از مدل اتمی بور اصلاً سخت نیست! در طیف جذبی پدیده‌ای برعکس گسیل فوتون اتفاق می‌افتد که به آن «**جذب فوتون**» می‌گوییم.

در جذب فوتون، الکترون اتم هیدروژن فوتون‌هایی را جذب می‌کند که انرژی آن دقیقاً به اندازهٔ اختلاف انرژی دو تراز انرژی در اتم هیدروژن باشد. با این اتفاق الکترون از تراز پایین‌تر به تراز بالاتر می‌رود؛ به همین خاطر است که طول موج‌های متناظر با اختلاف انرژی دو تراز هیدروژن در طیف جذبی هیدروژن دیده نمی‌شوند، چون این فوتون‌ها توسط الکترون‌های اتم‌های هیدروژن جذب شده‌اند.



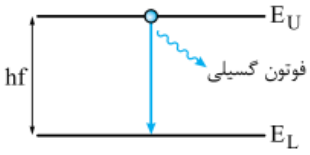
(طیف جذبی)



(طیف گسیلی)

با توجه به توضیحات بالا می‌فهمیم که رابطهٔ $hf = E_U - E_L$ را برای جذب فوتون هم می‌توانیم به کار ببریم.

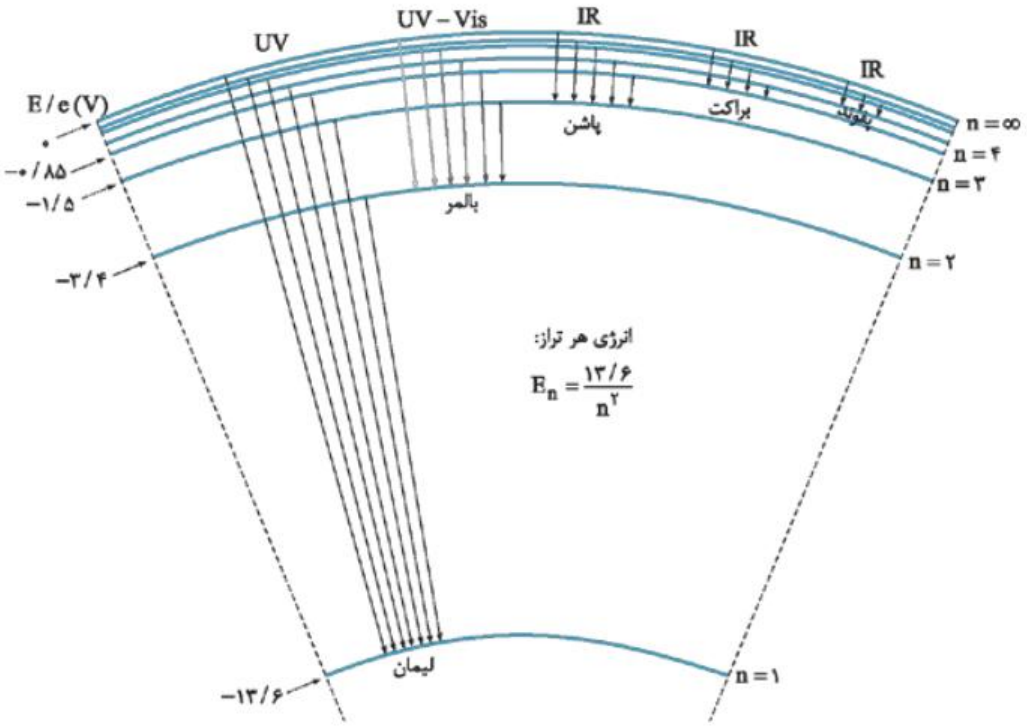
جذب فوتون



گسیل فوتون

طبق الگوی اتمی آقای بور، الکترون‌ها فقط می‌توانند تغییر انرژی‌های معینی داشته باشند؛ بنابراین انرژی و در نتیجه بسامد و طول موج فوتونی که گسیل و یا جذب می‌کنند فقط می‌توانند مقادیر خاصی داشته باشند. همان مقادیر خاصی که از رابطهٔ بالمر ـ ریدبرگ به دست می‌آید و در رشته طول موج‌های لیمان، بالمر، پاشن، براکت و پفوند وجود دارند.

شکل روبه‌رو به خوبی نشان می‌دهد که هر طول موج از هر رشتهٔ طیف اتمی هیدروژن به خاطر جابه‌جایی الکترون بین کدام دو مدار مانای اتم هیدروژن گسیل و یا جذب می‌شود.



سخن آخر در مورد مدل اتمی بور!

مدلی که بور برای اتم هیدروژن پیشنهاد کرد، علاوه بر اتم هیدروژن، رفتار **اتم‌های هیدروژن‌گونه** را نیز به خوبی توصیف می‌کند. اتم هیدروژن‌گونه به اتمی می‌گوییم که مثل هیدروژن فقط یک الکترون داشته باشد. برای مثال He^+ یا $Li^{۲+}$ اتم‌های هیدروژن‌گونه هستند؛ زیرا هلیم با از دست‌دادن یک الکترون و لیتیم با از دست‌دادن دو الکترون، تنها یک الکترون خواهند داشت. مدل اتمی بور، مانند سایر مدل‌های اتمی دارای موفقیت‌ها و اشکالاتی است که به طور خلاصه عبارت‌اند از:

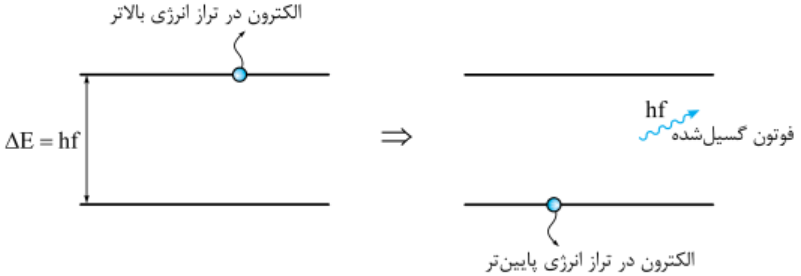
موفقیت‌ها: ۱ توضیح چگونگی پایداری اتم ۲ توجیه طیف گسیلی و جذبی هیدروژن ۳ محاسبهٔ انرژی یونش اتم هیدروژن و اتم‌های هیدروژن‌گونه

اشکالات: ۱ فقط برای اتم هیدروژن یا اتم‌های هیدروژن‌گونه کاربرد دارد. یعنی برای اتم‌هایی که در آن‌ها بیش از یک الکترون به دور هسته می‌چرخد، کاربرد ندارد. این موضوع به این خاطر است که در این مدل نیروی الکتروستاتیکی که یک الکترون به یک الکترون دیگر وارد می‌کند، در نظر گرفته نشده است. ۲ علت تفاوت شدت خط‌های طیف گسیلی هیدروژن را توضیح نمی‌دهد؛ برای مثال این مدل نمی‌تواند توضیح دهد که چرا شدت خط قرمز با شدت خط آبی در طیف گسیلی هیدروژن با یکدیگر متفاوت است.

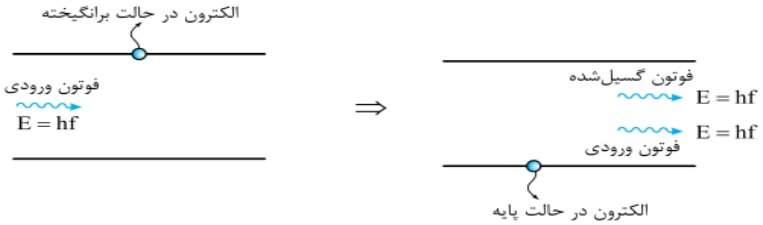
امروزه لیزر در زندگی ما کاربردهای فراوانی دارد. لیزرها در چاپگرها، خواندن لوح‌های فشرده، برش فلزات، عمل‌های جراحی و ... به طور وسیع مورد استفاده قرار می‌گیرد.

اما نور لیزر چگونه تولید می‌شود؟ برای پاسخ به این سؤال ابتدا باید دو نوع گسیل فوتون را بشناسیم.

۱ **گسیل خودبه‌خودی:** آن‌چه تا حالا دربارهٔ گسیل فوتون گفتیم گسیل خودبه‌خودی است. در گسیل خودبه‌خودی یک الکترون از تراز انرژی بالاتر به تراز انرژی پایین‌تر می‌آید و از خود فوتونی گسیل می‌کند که انرژی آن دقیقاً برابر با اختلاف انرژی الکترون در دو تراز است. فوتون‌های تولیدشده در گسیل خودبه‌خودی به صورت تصادفی در جهت‌های مختلف تابش می‌شوند.



۲ گسیل القایی: در این نوع گسیل ابتدا یک فوتون، الکترون برانگیخته‌ای را که در تراز بالاتر قرار دارد، تحریک می‌کند تا با گسیل یک فوتون به تراز انرژی پایین‌تر بیاید. در گسیل القایی انرژی فوتون ورودی باید دقیقاً با اختلاف انرژی دو تراز برابر باشد. به این ترتیب، دو فوتون هم‌انرژی خواهیم داشت که هر یک می‌توانند الکترون‌های دیگری را برای گسیل فوتون‌های بعدی تحریک کنند.

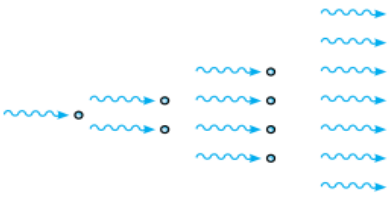


گسیل القایی سه ویژگی خوب دارد:

۱ فوتون‌ها به صورت زنجیره‌ای زیاد می‌شوند و نور را تقویت می‌کنند.

۲ جهت فوتون‌های ورودی و فوتون‌های گسیل‌شده یکسان است.

۳ فوتون‌هایی که در گسیل القایی تابش می‌شوند، هم‌بسامد و هم‌فاز هستند.



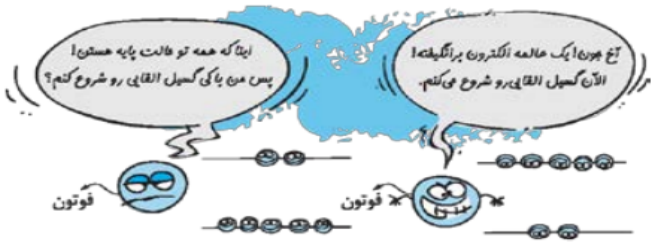
در واقع این فوتون‌های هم‌بسامد، هم‌فاز و هم‌جهت، لیزر را تشکیل می‌دهند.

در گسیل القایی فوتون‌های هم‌انرژی، هم‌بسامد، هم‌فاز و هم‌جهت به طور زنجیره‌ای زیاد می‌شوند.

وارونی جمعیت: برای شروع گسیل القایی یک مشکل وجود دارد. فوتون ورودی باید الکترون‌های برانگیخته را برای رفتن به ترازهای انرژی پایین‌تر تحریک کند، در حالی‌که در شرایط عادی و دمای اتاق، اکثر الکترون‌ها در حالت پایه (یعنی پایین‌ترین تراز انرژی) قرار دارند.

بنابراین ابتدا باید تعداد الکترون‌های برانگیخته افزایش یابد. برای این کار به وسیلهٔ یک چشمهٔ انرژی مناسب به الکترون‌ها انرژی داده می‌شود، که به ترازهای بالاتر بروند. با این کار تعداد الکترون‌های برانگیخته به شدت زیاد شده و حتی از تعداد الکترون‌های پایه، بیشتر می‌شود. به این پدیده «**وارونی جمعیت**» می‌گوییم.

با ایجاد حالت وارونی جمعیت مدت زمان استقرار الکترون‌ها در حالت برانگیخته هم به اندازهٔ کافی زیاد می‌شود، تا سایر الکترون‌ها هم بتوانند به تدریج برانگیخته شوند.



شکل زیر به طور ساده اتفاقاتی که در طی تولید نور لیزر هلیم ـ نئون رخ می‌دهد را نشان می‌دهد.