

آشنایی با فیزیک اتمی و هسته‌ای



چاقوی گاما (جراحی مغز بدون چاقو) جایگزینی مناسب برای جراحی‌های سنتی و یا روش‌هایی است که در آن کل مغز در معرض تابش قرار می‌گیرد. از این روش در علم روانپزشکی نیز برای درمان وسواس، افسردگی اساسی و اختلالات شدید اضطرابی استفاده می‌شود. این کار چگونه انجام می‌شود؟

بخش‌ها

- ۱-۴ اثر فوتوالکتریک و فوتون
- ۲-۴ طیف خطی
- ۳-۴ مدل اتم رادرفورد - بور
- ۴-۴ لیزر
- ۵-۴ ساختار هسته
- ۶-۴ پرتوزایی طبیعی و نیمه عمر

تا دهه‌های پایانی قرن نوزدهم، بیشتر حوزه‌های فیزیک، از جمله مکانیک نیوتونی، ترمودینامیک و نظریه الکترومغناطیس ماکسول که امروزه با نام فیزیک کلاسیک از آنها یاد می‌شود به صورت بندی نهایی خود رسیده بود و به نظر می‌رسید که در توصیف گستره وسیعی از پدیده‌های فیزیکی کاملاً موفق‌اند. با این حال در آن سال‌ها، پدیده‌هایی مشاهده و آزمایش‌هایی انجام شد که تبیین کامل و درست آنها با نظریه‌های فیزیک کلاسیک ممکن نبود و سبب تغییرات بنیادی در دیدگاه فیزیک‌دانان نسبت به توضیح رفتار برخی از پدیده‌های فیزیکی شد. به طوری که در سه دهه آغازین قرن بیستم، نتایج این تلاش‌ها به نظریه نسبیت خاص (مربوط به مطالعه پدیده‌ها در تندی‌های بسیار زیاد و قابل مقایسه با تندی نور)، نظریه نسبیت عام (مربوط به مطالعه هندسه فضا - زمان و گرانش) و نظریه کوانتومی (مربوط به مطالعه پدیده‌ها در مقیاس‌های بسیار کوچک، مانند اتم‌ها و ذره‌های سازنده آنها) منجر شد که امروزه به آن فیزیک جدید می‌گویند. اندکی پس از ظهور این نظریه‌ها، شاخه‌های دیگری مانند فیزیک هسته‌ای، فیزیک ذرات بنیادی و کیهان‌شناسی به تدریج به وجود آمدند.

در فیزیک هسته‌ای با ساختار، برهم‌کنش‌ها و واپاشی هسته‌های اتمی سروکار داریم. بخش عمده‌ای از پیشرفت فیزیک هسته‌ای، مدیون تحلیل نتایج آزمایش‌ها و اندازه‌گیری‌هایی است که طی قرن گذشته توسط دانشمندانی از حوزه‌های فیزیک و شیمی انجام شده است. آنچه بیش از همه منجر به گسترش فیزیک هسته‌ای شد، به تحولاتی مربوط است که با ساخت شتاب‌دهنده‌های ذرات در سال ۱۹۳۲ میلادی آغاز شد.

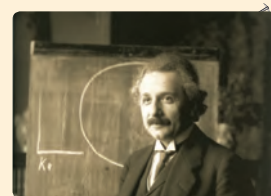
در این فصل ضمن معرفی و بررسی برخی از پدیده‌ها مانند اثر فوتوالکتریک و طیف خطی گسیلی و جذبی از گازهای اتمی که با فیزیک کلاسیک قابل توجیه نبودند، به معرفی الگوهای اتمی می‌پردازیم و سپس نگاهی به مبانی فیزیکی لیزر خواهیم داشت. پس از آن با ساختار هسته و پرتوزایی طبیعی آشنا می‌شویم.

۱-۴ اثر فوتوالکتریک و فوتون

اگر بر کلاهک برق‌نمایی با بار منفی، نور فرابنفشی تابیده شود، مشاهده می‌شود که انحراف ورقه‌های آن کاهش می‌یابد (شکل ۱-۴ الف) در حالی که با تابش نور مرئی، تغییری در انحراف ورقه‌های برق‌نما رخ نمی‌دهد (شکل ۱-۴ ب). چرا این پدیده اتفاق می‌افتد؟ آزمایش نشان می‌دهد وقتی نوری با بسامد

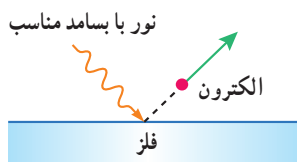


شکل ۱-۴ الف برهم‌کنش نور فرودی فرابنفش با کلاهک برق‌نما سبب می‌شود تا ورقه‌های آن به سرعت به هم نزدیک شوند. **ب** در حالی که برهم‌کنش نور مرئی گسیل شده از یک لامپ رشته‌ای تغییری در انحراف ورقه‌های برق‌نما به وجود نمی‌آورد.



آلبرت اینشتین (۱۸۷۹-۱۹۵۵ م.)

تا ۱۷ سالگی در آلمان تحصیل کرد ولی با ناتمام گذاشتن سال آخر تحصیل خود، آلمان را ترک کرد و به سوئیس رفت. نظام آموزشی انعطاف‌پذیر سوئیس تحولی شگرف در اینشتین ایجاد کرد و توانست پس از پایان دبیرستان، در سال ۱۹۰۲ از پلی تکنیک زوریخ، لیسانس فیزیک خود را دریافت کند. در سال ۱۹۰۵ چندین مقاله مهم منتشر کرد. بعدها یکی از این مقاله‌ها که در آن به توضیح اثر فوتوالکتریک می‌پرداخت، جایزه نوبل فیزیک را در سال ۱۹۲۱ برای او به ارمغان آورد. یکی دیگر از مقاله‌های او در سال ۱۹۰۵، ارائه نظریه نسبیت خاص بود که دربرگیرنده اندیشه‌ای نو و انقلابی درباره ماهیت فضا و زمان بود. اینشتین همچنین در سال ۱۹۱۵ مقاله‌ای درباره نظریه نسبیت عام منتشر کرد. او در این مقاله نظریه جدیدی درباره گرانش ارائه کرد که نظریه نیوتون را به عنوان حالتی خاص دربرمی‌گرفت.



شکل ۴-۲ الکترون‌ها، انرژی نور فرودی را جذب می‌کنند و از سطح فلز خارج می‌شوند.

مناسب مانند نور فرابنفش به سطحی فلزی بتابد الکترون‌هایی از آن گسیل می‌شوند (شکل ۴-۲). این پدیده فیزیکی را، **اثر فوتوالکتریک** و الکترون‌های جدا شده از سطح فلز را **فوتوالکترون** می‌نامند.

همان‌طور که در فصل ۳ دیدیم نور، موجی الکترومغناطیسی است. بنابراین می‌توان انتظار داشت هنگام برهم‌کنش موج الکترومغناطیسی (نور فرودی) با سطح فلز، میدان الکتریکی این موج، نیروی $\vec{F} = -e\vec{E}$ به الکترون‌های فلز وارد کند و آنها را به نوسان وادارد. به این ترتیب، وقتی دامنه نوسان برخی از الکترون‌ها به قدر کافی بزرگ شود انرژی جنبشی لازم را برای جدا شدن از سطح فلز پیدا می‌کنند. بنا به این دیدگاه کلاسیکی، این پدیده باید با هر بسامدی رخ دهد در حالی که این نتیجه با تجربه سازگار نیست.

یکی دیگر از پیامدهای نظریه الکترومغناطیسی ماکسول این است که شدت نور با مربع دامنه میدان الکتریکی موج الکترومغناطیسی متناسب است ($I \propto E^2$). به این ترتیب انتظار می‌رود به ازای یک بسامد معین، اگر شدت نور فرودی بر سطح فلز را افزایش دهیم باید الکترون‌ها با انرژی جنبشی بیشتری از فلز خارج شوند، نتیجه‌ای که تجربه آن را تأیید نمی‌کند.

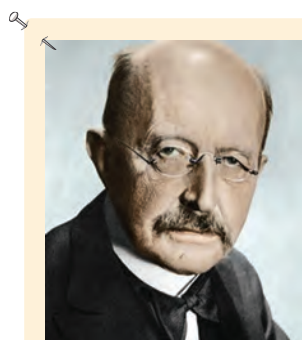
پس از نزدیک به ۲۰ سال که تلاش بسیاری از دانشمندان برای توجیه اثر فوتوالکتریک به کمک مفاهیم و قانون‌های فیزیک کلاسیک به نتیجه نرسیده بود در سال ۱۹۰۵ اینشتین توضیحی قانع‌کننده در مورد این اثر ارائه داد و جایزه نوبل فیزیک سال ۱۹۲۱ میلادی را به خاطر تبیین آن دریافت کرد. اینشتین در نظریه فوتوالکتریک خود با توجه به کارهای قبلی پلانک در زمینه تابش گرمایی اجسام، فرض کرد که نور با بسامد f را می‌توان به صورت مجموعه‌ای از بسته‌های انرژی در نظر گرفت. هر بسته انرژی، که بعدها **فوتون**^۱ نامیده شد، دارای انرژی‌ای است که از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$E = hf \quad (\text{انرژی فوتون}) \quad (۴-۱)$$

در این رابطه h **ثابت پلانک** نامیده می‌شود و به طور تجربی معلوم شده است که مقدار آن $h = 6.63 \times 10^{-34} \text{ J.s}$ است.

بنا بر نظر اینشتین، وقتی نوری تکفام بر سطح فلزی می‌تابد، هر فوتون صرفاً با یکی از الکترون‌های فلز برهم‌کنش می‌کند. اگر فوتون انرژی کافی داشته باشد تا فرایند خارج کردن الکترون از فلز را انجام دهد، الکترون به طور آنی از آن گسیل می‌شود. در این صورت بخشی از انرژی فوتون صرف جدا کردن الکترون از فلز می‌شود و مابقی آن به انرژی جنبشی الکترون خارج شده تبدیل می‌شود.

اگر بسامد نور تابیده شده بر سطح فلز از بسامدی موسوم به بسامد آستانه (که به جنس فلز بستگی دارد) کمتر باشد، فوتون‌ها، حداقل انرژی لازم برای خارج کردن الکترون از فلز را ندارند و پدیده فوتوالکتریک رخ نمی‌دهد. همچنین برای نوری که فوتون‌های آن دارای حداقل انرژی لازم برای وقوع پدیده فوتوالکتریک هستند، افزایش شدت نور (با ثابت ماندن بسامد) فقط سبب افزایش تعداد فوتون‌ها و در نتیجه افزایش تعداد فوتوالکترون‌ها می‌شود، در حالی که انرژی جنبشی فوتوالکترون‌ها بدون تغییر می‌ماند.



ماکس پلانک (۱۸۵۸-۱۹۴۷ م.)

در سال ۱۸۸۵ دانشیار فیزیک نظری در دانشگاه کیل شد و علاوه بر تدریس، مقاله‌های مهمی درباره ترمودینامیک منتشر کرد. از کارهای او در زمینه توزیع طیف تابشی، که به نظریه کوانتومی انجامید، با اهدای جایزه نوبل سال ۱۹۱۸ تقدیر شد. در سال‌های بعد، نوشته‌های پلانک بیشتر در زمینه موضوع‌های مذهبی و فلسفی بود. درست در آستانه دورانی که پلانک از نظر حرفه‌ای مورد تحسین همگان قرار گرفته بود، متأسفانه زندگی شخصی وی با ترازوی آمیخته شد، به طوری که طی سال‌های ۱۹۰۹ تا ۱۹۱۹ همسر، پسر بزرگ و دخترهای دوقلویش به دلایل متفاوتی از دنیا رفتند. پلانک در سال ۱۹۲۷، پس از حدود چهل سال سابقه دانشگاهی، از دانشگاه برلین بازنشسته شد.

۱- این نام را شیمی‌دان آمریکایی، گیلبرت لوئیس، در سال ۱۹۲۶ میلادی برای نخستین بار پیشنهاد کرد.

توجه: در فیزیک اتمی و فیزیک هسته‌ای، یکای ژول برای بیان انرژی فوتون‌ها و ذرات، یکای بسیار بزرگی است. به همین دلیل از یکایی به نام الکترون ولت (eV) استفاده می‌کنیم. برای آشنایی با این یکای غیر SI، فرض کنید الکترونی با بار $q = -e = -1/60 \times 10^{-19} \text{C}$ ، بین دو نقطه با اختلاف پتانسیل ۱V حرکت کند. در این صورت بنا به رابطه $\Delta U = q\Delta V$ که در فیزیک ۲ با آن آشنا شدید، اندازه تغییر در انرژی پتانسیل الکتریکی الکترون برابر است با:

$$|\Delta U| = |q\Delta V| = |(-1/60 \times 10^{-19} \text{C})(1 \text{V})| = 1/60 \times 10^{-19} \text{J}$$

این مقدار انرژی را بنا به تعریف، یک الکترون ولت ($1 \text{eV} = 1/60 \times 10^{-19} \text{J}$) می‌نامند. مضرب‌های دیگری از این یکا به صورت keV (کیلو الکترون ولت) و MeV (مگا الکترون ولت) اغلب به کار می‌رود.

به این ترتیب یکای ثابت پلانک را به جای J.s می‌توان برحسب یکای eV.s نیز بیان کرد:

$$h = (6/63 \times 10^{-34} \text{J.s}) \left(\frac{1 \text{eV}}{1/60 \times 10^{-19} \text{J}} \right) = 4/14 \times 10^{-15} \text{eV.s}$$

● مثال ۱-۴

یک چشمه نور مرئی با توان 100W ، فوتون‌هایی با طول موج $\lambda = 550 \text{nm}$ گسیل می‌کند.

الف) انرژی هر فوتون را برحسب الکترون ولت محاسبه کنید.

ب) چه تعداد فوتون در هر ثانیه از این چشمه نور گسیل می‌شود؟

پاسخ: الف) از رابطه ۱-۴ انرژی هر فوتون برابر است با:

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

ابتدا مقدار hc را حساب می‌کنیم:

$$hc = (6/63 \times 10^{-34} \text{J.s})(3/00 \times 10^8 \text{m/s}) = 19/9 \times 10^{-26} \text{J.m}$$

اگر J را برحسب eV و m را برحسب nm بنویسیم، خواهیم داشت:

$$hc = (19/9 \times 10^{-26} \text{J.m}) \left(\frac{1 \text{eV}}{1/60 \times 10^{-19} \text{J}} \right) \left(\frac{1 \text{nm}}{10^{-9} \text{m}} \right) = 1/24 \times 10^3 \text{eV.nm}$$

بنابراین در حل مسائل می‌توانیم مقدار hc را برابر 1240eV.nm اختیار کنیم. خوب است این مقدار و یکای آن را به خاطر

بسپارید تا در صورت نیاز از آن استفاده کنید. به این ترتیب داریم:

$$E = \frac{1/24 \times 10^3 \text{eV.nm}}{550 \text{nm}} = 2/25 \text{eV}$$

ب) ابتدا انرژی تابش شده توسط لامپ را در هر ثانیه به دست می‌آوریم:

$$E = pt = (100 \text{W})(1 \text{s}) = 100 \text{J} = (100 \text{J}) \left(\frac{1 \text{eV}}{1/60 \times 10^{-19} \text{J}} \right) = 6/25 \times 10^{20} \text{eV}$$

نسبت این انرژی به انرژی هر فوتون که در قسمت الف پیدا کردیم، شمار فوتون‌های گسیل شده از این چشمه را در هر ثانیه

به دست می‌دهد. به این ترتیب داریم:

$$n = \frac{6/25 \times 10^{20} \text{eV}}{2/25 \text{eV}} = 2/77 \times 10^{20}$$

این شمار زیاد فوتون، که در هر ثانیه از یک چشمه معمولی نور در فضای پیرامون آن گسیل می‌شود حاکی از آن است که در

زندگی روزمره آثار ناشی از این شمار بسیار زیاد فوتون برای ما ملموس نیست.

تمرین ۴-۱

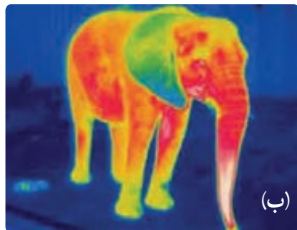
نوری با طول موج 240 nm به سطحی از جنس فلز تنگستن می‌تابد و سبب گسیل فوتوالکترون‌ها از آن می‌شود. الف) بسامد نور فرودی را پیدا کنید.

ب) اگر توان چشمه نور فرودی 5 W باشد، در هر دقیقه چه تعداد فوتون از این چشمه گسیل می‌شود؟

پ) اگر توان و در نتیجه شدت چشمه نور فرودی به نصف کاهش پیدا کند، شمار فوتون‌های گسیل شده از چشمه در هر دقیقه چه تغییری می‌کند؟



(الف)



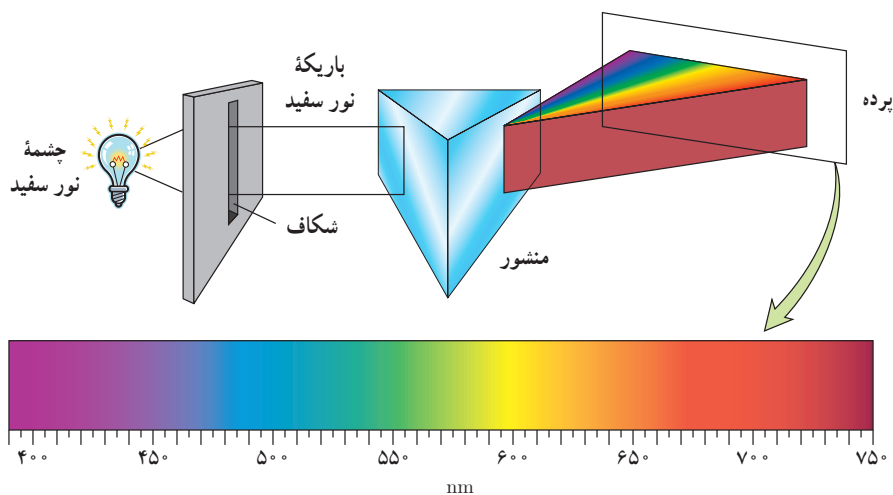
(ب)

شکل ۴-۳ الف) اجسام در دماهای بالا از سطح خود نور مرئی گسیل می‌کنند. ب) در دماهای معمولی، بیشتر تابش گسیل‌شده از سطح اجسام در ناحیه فروسرخ طیف قرار دارد.

شکست مدل موج الکترومغناطیسی در توضیح برخی پدیده‌ها مانند اثر فوتوالکتریک به این معنی نیست که مدل موجی نور باید کنار گذاشته شود. ولی، باید متوجه باشیم که مدل موجی، تمام ویژگی‌های نور را دربر ندارد و به همین دلیل قادر نیست توجیه درستی از تمامی پدیده‌های فیزیکی مرتبط با برهم‌کنش نور با ماده را ارائه کند.

۴-۲ طیف خطی

در فیزیک ۱ دیدیم که همه اجسام در هر دمایی که باشند، از خود امواج الکترومغناطیسی گسیل (نشر) می‌کنند که به آن **تابش گرمایی** گفته می‌شود (شکل ۴-۳). برای یک جسم جامد، نظیر رشته داغ یک لامپ روشن، این امواج شامل گستره پیوسته‌ای از طول موج‌هاست. به همین دلیل طیف ایجادشده در این شرایط را **طیف گسیلی پیوسته** یا به اختصار **طیف پیوسته** می‌نامند. بخشی از این طیف که در گستره مرئی طول موج‌ها واقع است در شکل ۴-۴ نشان داده شده است. تشکیل طیف پیوسته توسط جسم جامد، ناشی از برهم‌کنش قوی بین اتم‌های سازنده آن است. حال آنکه گازهای کم‌فشار و رقیق، که اتم‌های منفرد آنها از برهم‌کنش‌های قوی موجود در جسم جامد آزادند به جای طیف پیوسته، طیفی گسسته را گسیل می‌کنند که شامل طول موج‌های معینی است. این طیف گسسته را، معمولاً **طیف گسیلی خطی** یا به اختصار **طیف خطی** می‌نامند و طول موج‌های ایجادشده در آن، برای اتم‌های هر گاز منحصر



شکل ۴-۴ طیف گسیلی پیوسته نور سفید از رشته داغ یک لامپ روشن. در این شکل تنها بخش مرئی طیف نشان داده شده است که گستره طول موج آن از حدود 400 nm (نور بنفش) تا حدود 750 nm (نور قرمز) است.

به فرد هستند و سرنخ‌های مهمی را درباره نوع و ساختار اتم‌های آن گاز به دست می‌دهند. دو نمونه آشنا از گازهای کم فشار و رقیق، در لامپ‌های نئون و لامپ‌های جیوه‌ای وجود دارد. شکل ۴-۵ قسمت‌های مرئی طیف‌های خطی این دو گاز را نشان می‌دهد. طول موج‌های مرئی خاصی که اتم‌های این گازها گسیل می‌کنند به تابلوهای نئونی و لامپ‌های جیوه‌ای رنگ‌های مشخصی می‌دهند.



شکل ۴-۵ طیف‌های گسیلی خطی برای نئون و جیوه

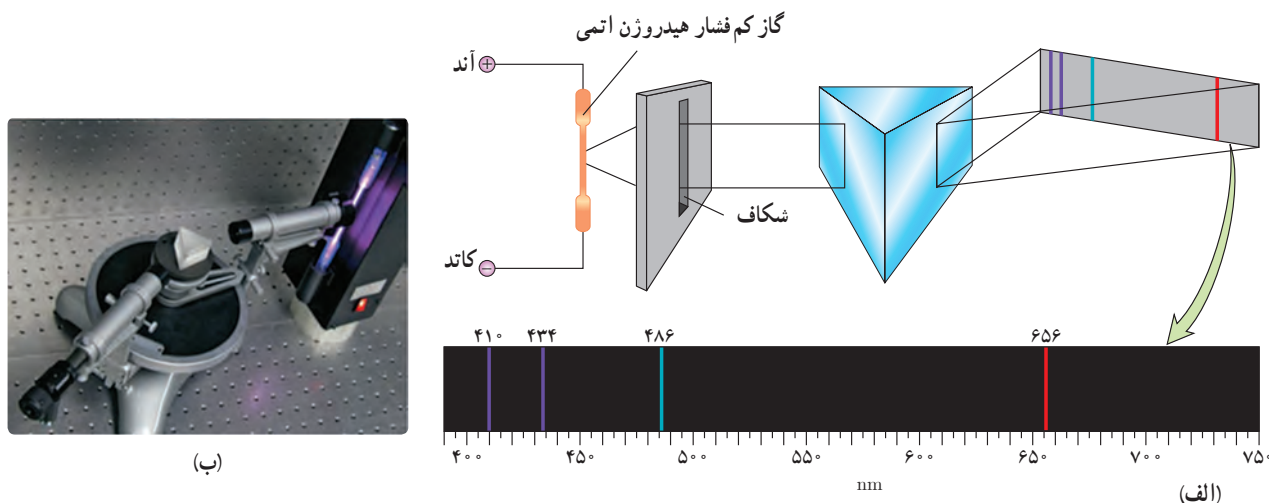


ژاکوب بالمر (۱۸۲۵-۱۸۹۸ م.)

ریاضی‌دان و فیزیک‌دان سوئیسی، در سال ۱۸۴۹ دوره دکتري خود را در حوزه ریاضیات در دانشگاه بازل به پایان رسانید. وی پس از پایان تحصیلات، در یک مدرسه دخترانه و همچنین دانشگاه بازل مشغول به تدریس شد. مشهورترین کار بالمر در خصوص مطالعه طیف اتمی گازها بود، به طوری که وی در سال ۱۸۸۵ و در سن ۶۰ سالگی موفق شد رابطه‌ای تجربی برای طیف گسیلی خطی اتم‌های هیدروژن ارائه دهد. این رابطه امروزه به نام وی معروف است. بالمر برای ارائه این رابطه از داده‌های آنگستروم، فیزیک‌دان سوئدی، در خصوص اندازه‌گیری طول موج‌های طیف خطی هیدروژن اتمی در ناحیه مرئی بهره گرفت.

برای تشکیل طیف گسیلی خطی اتم‌های هر گاز نظیر هیدروژن، هلیوم، جیوه، سدیم و نئون معمولاً از یک لامپ باریک و بلند شیشه‌ای که حاوی مقداری گاز رقیق و کم فشار است استفاده می‌شود. دو الکتروود به نام‌های آند و کاتد در دو طرف این لامپ قرار دارد که به ترتیب به پایانه‌های مثبت و منفی یک منبع تغذیه با ولتاژ بالا وصل‌اند. این ولتاژ بالا، سبب تخلیه الکتریکی در گاز می‌شود و اتم‌های گاز درون لامپ شروع به گسیل نور می‌کنند. آزمایش نشان می‌دهد که طیف خطی ایجاد شده و همچنین رنگ نور گسیل شده، به نوع گاز درون لامپ بستگی دارد. در میان طیف گسیلی گازهای مختلف، طیف خطی هیدروژن اتمی هم از جنبه تاریخی و هم از جنبه نظری اهمیت خاصی دارد. طیف خطی این گاز در ناحیه مرئی، شامل یک رشته منظم از خط‌هایی است که محل آنها در شکل ۴-۶ نشان داده شده است. در سال ۱۸۸۵ میلادی، بالمر، ریاضی‌دان سوئیسی، رابطه‌ای ساده پیشنهاد کرد که طول موج هر یک از خط‌های شناخته شده مربوط به طیف گسیلی خطی هیدروژن اتمی را به دست می‌داد. این رابطه عبارت است از:

$$\lambda = (364 / 5 \text{ nm}) \frac{n^2}{n^2 - 2^2} \quad (4-2) \quad (\text{معادله بالمر})$$



شکل ۴-۶ الف) به کمک منشور، طول موج‌های گسیلی از گاز، از یکدیگر جدا و طیف خطی آن تشکیل شده است. ب) اسباب آزمایش تشکیل و مشاهده طیف گسیلی گازها



یوهانس رابرت ریذبرگ (۱۸۵۴-۱۹۱۹ م.)

فیزیک‌دان و متخصص طیف‌سنجی، در سوئد به دنیا آمد. هنگامی که ۴ ساله بود پدرش از دنیا رفت و خانواده وی مجبور شدند با درآمد اندکی زندگی خود را سپری کنند. در سال ۱۸۷۳ دوره دبیرستان را با نمرات ممتاز در فیزیک و ریاضی به پایان رسانید و در همان سال در دانشگاه لاند ثبت نام کرد. وی در سال ۱۸۷۹ دوره دکترای خود را به پایان رساند. پس از آن به تدریس ریاضیات و فیزیک مشغول شد و در همین دوران بود که به مطالعه وزن استاندارد اتمی عناصر در جدول تناوبی مندلیف پرداخت. کار بعدی وی پژوهش درباره طیف اتمی گازها بود که به ارائه رابطه‌ای برای اصلاح معادله تجربی بالمر در خصوص طیف گسیلی خطی هیدروژن اتمی منجر شد. این رابطه امروزه به نام وی شناخته می‌شود. ریذبرگ در سال ۱۹۱۳ شدیداً بیمار شد و پس از یک دوره طولانی بیماری، در سال ۱۹۱۹ درگذشت.

که در آن $n \geq 3$ و همواره عددی صحیح است. با قرار دادن $n = 3, 4, 5, 6$ در معادله بالمر، طول موج خط‌های طیف گسیلی اتم هیدروژن در ناحیه مرئی به صورت زیر به دست می‌آید:

$$n = 3 \rightarrow \lambda_1 = 656/20 \text{ nm} \quad (\text{خط قرمز}) \quad \lambda_4 = 486/0 \text{ nm} \quad (\text{خط آبی})$$

$$n = 5 \rightarrow \lambda_5 = 434/00 \text{ nm} \quad (\text{خط نیلی}) \quad n = 6 \rightarrow \lambda_6 = 410/13 \text{ nm} \quad (\text{خط بنفش})$$

بالمر با تأمل بیشتر روی رابطه ۲-۴، پیشنهاد کرد که ممکن است رشته‌های دیگری از خط‌هایی که تا آن زمان در طیف هیدروژن دیده نشده‌اند وجود داشته باشند. ریذبرگ، فیزیک‌دان سوئدی، در راستای همین موضوع تلاش فراوانی برای کامل‌تر کردن طیف گسیلی خطی هیدروژن انجام داد و در سال ۱۸۸۸ میلادی معادله بالمر را به صورت زیر اصلاح و بازنویسی کرد:

$$\frac{1}{\lambda} = R \left(\frac{1}{n'^2} - \frac{1}{n^2} \right) \quad n > n' \quad (\text{معادله ریذبرگ}) \quad (3-4)$$

که در آن R ثابت ریذبرگ و مقدار آن برابر $(\text{nm})^{-1} \times 10^9 \times 10973731$ است و برای سادگی در محاسبات، مقدار آن را می‌توان $(\text{nm})^{-1} \times 11$ در نظر گرفت. همچنین n' عدد صحیح مثبتی است که به ازای $n' = 2$ رابطه ۲-۴ مربوط به رشته بالمر به دست می‌آید که در ناحیه مرئی طیف قرار دارد. چندین سال پس از درگذشت بالمر و با اصلاح ابزارها و روش‌های طیف‌سنجی، امکان کشف گستره طول موج‌های دیگری در طیف گسیلی گاز هیدروژن به وجود آمد و مشخص شد که به جز رشته بالمر رشته‌های دیگری در طیف گاز هیدروژن اتمی وجود دارد^۱. در جدول ۱-۴ نام این رشته‌ها، که به ازای مقادیر متفاوت n' آمده‌اند درج شده است.

جدول ۱-۴ رشته خط‌های طیف گسیلی هیدروژن اتمی

نام طیف	تاریخ کشف	مقدار n'	رابطه ریذبرگ مربوط به رشته	مقدارهای n	ناحیه طیف
لیمان	۱۹۰۶ - ۱۹۱۴	۱	$\frac{1}{\lambda} = R \left(\frac{1}{1^2} - \frac{1}{n^2} \right)$	۲, ۳, ۴, ...	فرا بنفش
بالمر	۱۸۸۵	۲	$\frac{1}{\lambda} = R \left(\frac{1}{2^2} - \frac{1}{n^2} \right)$	۳, ۴, ۵, ...	فرا بنفش و مرئی
پاشن	۱۹۰۸	۳	$\frac{1}{\lambda} = R \left(\frac{1}{3^2} - \frac{1}{n^2} \right)$	۴, ۵, ۶, ...	فروسرخ
براکت	۱۹۲۲	۴	$\frac{1}{\lambda} = R \left(\frac{1}{4^2} - \frac{1}{n^2} \right)$	۵, ۶, ۷, ...	فروسرخ
پفوند	۱۹۲۴	۵	$\frac{1}{\lambda} = R \left(\frac{1}{5^2} - \frac{1}{n^2} \right)$	۶, ۷, ۸, ...	فروسرخ

۱- زمانی که مدل اتمی بور در سال ۱۹۱۳ میلادی مطرح شد، خط‌های گسیلی برای گاز هیدروژن اتمی فقط در رشته بالمر، رشته پاشن و تعدادی از خط‌های رشته لیمان به طور قطعی معلوم شده بودند. این مدل که با پیش‌بینی بالمر توافق خوبی داشت منجر به پژوهش‌هایی برای یافتن این رشته‌ها شد، به طوری که سرانجام خط‌های رشته‌های براکت و پفوند و همچنین خط‌های باقی‌مانده رشته لیمان به تدریج کشف شدند.

مثال ۲-۴

طول موج‌های اولین و دومین خط‌های طیفی اتم هیدروژن در رشته براکت ($n'=4$) را به دست آورید و تعیین کنید که این خط‌ها در کدام گستره طول موج‌های الکترومغناطیسی واقع اند^۱.

پاسخ: در رشته براکت ($n'=4$) و برای اولین و دومین خط طیفی به ترتیب $n=5$ و $n=6$ است. در این صورت با استفاده از رابطه ۲-۴ داریم:

$$\frac{1}{\lambda} = R \left(\frac{1}{4^2} - \frac{1}{5^2} \right) = R (2/25 \times 10^{-2}) \Rightarrow \lambda = 4077 \text{ nm}$$

$$\frac{1}{\lambda} = R \left(\frac{1}{4^2} - \frac{1}{6^2} \right) = R (3/472 \times 10^{-2}) \Rightarrow \lambda = 2642 \text{ nm}$$

با مراجعه به طیف موج‌های الکترومغناطیسی در فصل ۳، مشاهده می‌کنیم که این خط‌های طیفی در ناحیه فروسرخ قرار دارند.

مثال ۳-۴

کوتاه‌ترین و بلندترین طول موج در رشته پفوند ($n'=5$) هیدروژن اتمی را به دست آورید.

پاسخ: کوتاه‌ترین طول موج، با $n=\infty$ متناظر است. در این صورت با استفاده از رابطه ۲-۴ داریم:

$$\frac{1}{\lambda} = R \left(\frac{1}{5^2} - \frac{1}{\infty} \right) = \frac{R}{25} \Rightarrow \lambda = 2273 \text{ nm}$$

همچنین بلندترین طول موج این رشته، متناظر با $n=6$ است. در این صورت داریم:

$$\frac{1}{\lambda} = R \left(\frac{1}{5^2} - \frac{1}{6^2} \right) = \frac{11R}{900} \Rightarrow \lambda = 7438 \text{ nm}$$

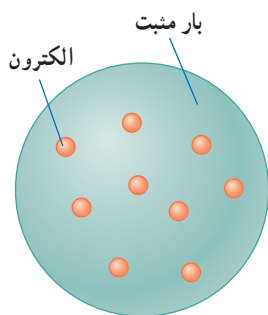
تمرین ۲-۴

طول موج‌های اولین و دومین خط‌های طیفی اتم هیدروژن در رشته پاشن ($n'=3$) را به دست آورید و تعیین کنید که این خط‌ها در کدام گستره طول موج‌های الکترومغناطیسی واقع اند.

معادله ریدبرگ که برگرفته از داده‌های تجربی است، طول موج‌هایی را به دست می‌دهد که هیدروژن اتمی در طیف الکترومغناطیسی گسیل می‌کند. ولی مدل‌های اتمی رایج آن زمان در خصوص اینکه چرا تنها طول موج‌های معینی توسط هیدروژن اتمی تابش می‌شود، پاسخی نداشتند. نیلز بور، فیزیک‌دان دانمارکی (۱۹۶۲-۱۸۸۵ م.) با اصلاح مدل اتمی رادرفورد، برای نخستین بار توانست توضیح مناسبی برای طول موج‌های گسیسته تابش شده توسط گاز هیدروژن اتمی ارائه دهد. در واقع مدل بور، آغاز راهی برای درک این موضوع بود که چگونه ساختار اتم، طول موج‌های تابش شده را به مقدارهای معینی محدود می‌کند.

۱- مشابه این مثال و مثال‌های دیگر، باید مقدار n' مربوط به هر رشته هنگام ارزشیابی داده شود و لازم نیست دانش‌آموزان n' مربوط به رشته‌های مختلف را حفظ کنند.

۴-۳ مدل اتم رادرفورد - بور



شکل ۴-۷ در مدل تامسون، بار الکتریکی مثبت به طور همگن در کره‌ای توزیع شده است و الکترون‌ها مانند کشمش‌های کیک در نقاط مختلف آن قرار دارند.

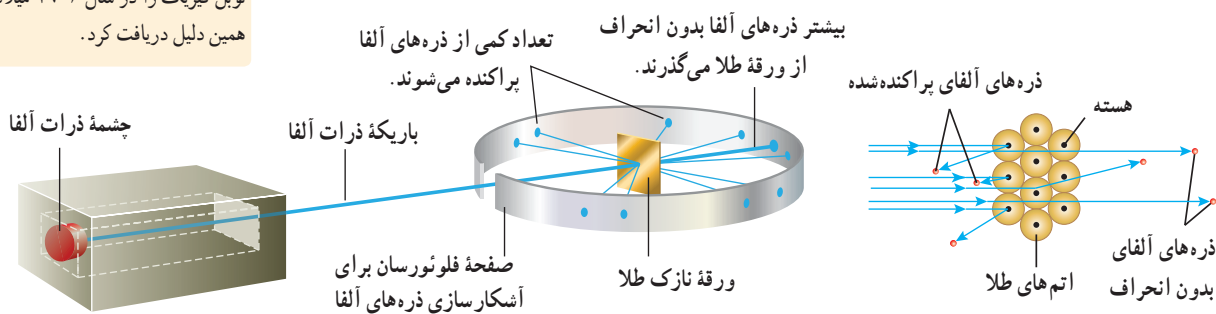


جوزف تامسون (۱۸۵۶-۱۹۴۰ م.)

یکی از فیزیک‌دانان بزرگ انگلیسی و استاد دانشگاه کمبریج بود. تامسون پس از کشف الکترون، مدیر آزمایشگاه کاوندیش شد؛ جایی که یکی از شاگردانش در آنجا ارنست رادرفورد بود. تامسون پس از چندین سال کار روی مدل اتمی، که برخی از ویژگی‌های شناخته‌شده اتم از جمله اندازه شعاع، جرم و خنثایی الکتریکی اتم را شامل می‌شد، مدلی موسوم به کیک کشمش را در اوایل قرن بیستم ارائه داد که برای چندین سال مورد پذیرش عموم دانشمندان قرار گرفت. تامسون همچنین روی ویژگی‌های رسانش الکتریکی گازها نیز کار می‌کرد و جایزه نوبل فیزیک را در سال ۱۹۰۶ میلادی به همین دلیل دریافت کرد.

جوزف تامسون فیزیک‌دان انگلیسی، در سال ۱۸۹۶ میلادی موفق به کشف الکترون و اندازه‌گیری نسبت بار به جرم e/m آن شد. کشف الکترون، تامسون را ترغیب کرد تا مدلی برای اتم ارائه دهد. این مدل سرانجام در سال ۱۹۰۴ میلادی ارائه شد. بنا بر مدل تامسون، اتم همچون کره‌ای است که بار مثبت به طور همگن در سرتاسر آن گسترده شده است و الکترون‌ها که سهم ناچیزی در جرم اتم دارند در جاهای مختلف آن پراکنده شده‌اند. این مدل را گاهی مدل کیک کشمش هم می‌گویند، زیرا الکترون‌ها مانند دانه‌های کشمش در آن پخش شده‌اند (شکل ۴-۷).

در مدل اتمی تامسون، وقتی الکترون‌ها با بسامدهای معینی حول وضع تعادلشان نوسان می‌کنند این نوسان سبب تابش امواج الکترومغناطیسی از اتم می‌شود. یکی از ناکامی‌های مدل تامسون این بود که بسامدهای تابش گسیل شده از اتم، که این مدل پیش‌بینی می‌کرد، با نتایج تجربی سازگار نبود. وقتی ارنست رادرفورد در سال ۱۹۱۱ میلادی نتایج آزمایش‌هایی را انتشار داد که مدل تامسون نمی‌توانست آنها را توضیح دهد، این مدل کنار گذاشته شد. رادرفورد و همکارانش باریکه‌ای از ذره‌های دارای بار مثبت را (از جنس هسته اتم هلیوم که به آن ذره آلفا گفته می‌شود) بر سطح ورقه‌ای نازک از جنس طلا فرو تاباندند (شکل ۴-۸). رادرفورد بنابر مدل تامسون انتظار داشت که تمامی ذره‌های آلفا، با انحراف بسیار اندکی از ورقه طلا بگذرند. در عمل نیز بیشترین ذره‌ها بدون انحراف یا با انحراف اندکی از ورقه طلا می‌گذشتند و در برخورد با صفحه فلورسان، در پشت آن، جرقه‌های نورانی تولید می‌کردند. با وجود این، برخی از ذره‌های آلفا در هنگام خروج از ورقه نازک طلا، در زاویه‌های بزرگ منحرف و پراکنده می‌شدند و حتی تعدادی از آنها نیز به عقب برمی‌گشتند! رادرفورد پس از انجام این آزمایش و بر اساس مدل تامسون و شناختی که از باریکه ذرات آلفا داشت، گفت: «مثل آن بود که گلوله توپی را به ورقه نازکی از کاغذ شلیک کنید و با شگفتی مشاهده کنید که پس از برخورد گلوله توپ با سطح کاغذ، گلوله بازگردد.» این ذره‌ها باید با چیز پرجرمی برخورد کرده باشد؛ اما با چه چیزی؟ رادرفورد استدلال کرد که ذره‌های بدون انحراف باید از قسمت‌هایی از ورقه گذشته باشند که تهی بوده باشد، در حالی که ذره‌های با انحراف شدید از مرکزهایی بسیار چگال و دارای بار مثبت منحرف شده‌اند. وی سرانجام نتیجه گرفت باید هسته‌ای چگال و دارای بار مثبت در مرکز هر اتم باشد که با مدل اتمی تامسون به طور آشکار مغایرت داشت.



شکل ۴-۸ آزمایش پراکندگی رادرفورد که در آن ذرات α از یک ورقه نازک طلا پراکنده

شده‌اند. تمام وسیله در یک اتاقک خلأ قرار دارد که در این شکل نشان داده نشده است.

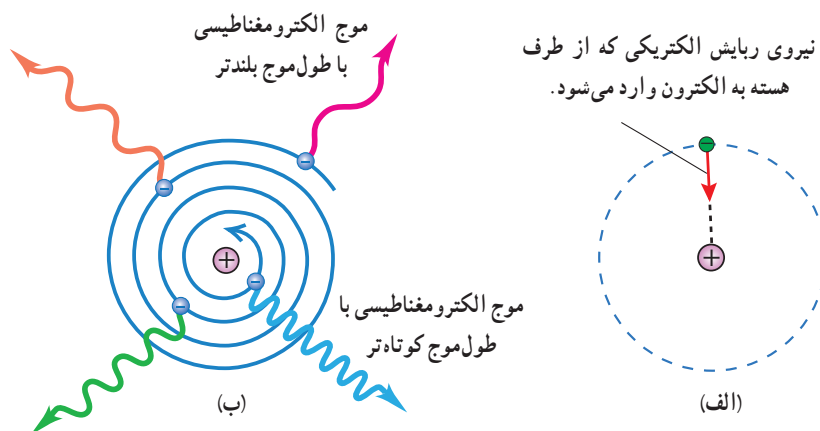


ارنست رادرفورد (۱۸۷۱-۱۹۴۷ م.)

در نیوزلند متولد شد و بیشتر تحصیلات خود را در همان جا به انجام رساند. در ۲۴ سالگی به کمبریج رفت و کار خود را در آزمایشگاه کاوندیش زیر نظر تامسون آغاز کرد. سپس به دانشگاهی در کانادا رفت و پس از بازگشت وارد دانشگاه منچستر شد. رادرفورد در آزمایش‌هایی که به کمک پروتوهای آلفا انجام داد ضمن کشف هسته در مرکز اتم، آرایش کلی الکترون‌ها را در اتم مشخص کرد ولی نتوانست جزئیات حرکت آنها را تبیین کند. رادرفورد همچنین با تبدیل عناصر بر اثر واپاشی پرتوزا، فیزیک هسته‌ای را بنیانگذاری و اولین واکنش هسته‌ای مصنوعی را ایجاد کرد. وی در سال ۱۹۰۸ موفق به دریافت جایزه نوبل شیمی شد. رادرفورد در سال ۱۹۱۱ در آزمایش‌هایی که در آنها نیتروژن با ذرات آلفا بمباران می‌شد با ذرات باردار مثبتی روبه‌رو شد و آن را به عنوان هسته هیدروژن شناسایی کرد. تا سال ۱۹۲۰، او به این نتیجه رسیده بود که این ذره، باید ذره‌ای بنیادی باشد و با توجه به این که واژه *proton* در زبان یونانی به معنای نخستین است، آن را پروتون نامید تا موقعیت اولیه درخور اهمیت آن را در میان هسته‌های اتمی عناصر نشان دهد.

بنا بر مدل رادرفورد، اتم دارای یک هسته بسیار چگال و کوچک ($m \cdot 10^{-15} \approx$ شعاع) و با بار مثبت است که با تعدادی الکترون در فاصله‌هایی به نسبت دور احاطه شده است. در حالت طبیعی، اتم از نظر الکتریکی خنثاست؛ زیرا بار مثبت هسته، درست مساوی مجموع بار منفی الکترون‌هایی است که هسته را دربر گرفته‌اند. مدل اتمی رادرفورد که آن را **مدل اتم هسته‌ای** یا **مدل هسته‌ای اتم** می‌نامند، در مواردی با موفقیت همراه بود، ولی با چالش‌های تازه‌ای نیز مواجه شد. این چالش‌ها برای خود رادرفورد نیز مطرح شده بود، ولی به طور صریح می‌گفت که: «نباید از مدلی که بر اساس بعضی نتایج تجربی ساخته شده است انتظار داشته باشیم که به تمامی چالش‌ها پاسخ دهد».

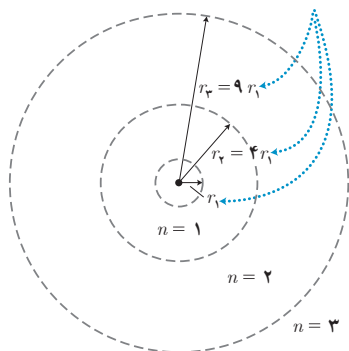
اگر الکترون‌ها را نسبت به هسته ساکن فرض کنیم، مطابق شکل ۴-۹ الف، باید تحت تأثیر نیروی ربایشی الکتریکی بین هسته و الکترون، روی هسته سقوط کنند و در نتیجه اتم باید ناپایدار باشد؛ چیزی که با واقعیت جور در نمی‌آید. همچنین اگر الکترون‌ها، مانند سیاره‌های منظومه خورشیدی که دور خورشید می‌چرخند، به دور هسته در گردش باشند، باز هم این حرکت پایدار نمی‌ماند. زیرا حرکت مداری الکترون به دور هسته، شتابدار است. بنا بر فیزیک کلاسیک، این حرکت شتابدار الکترون سبب تابش امواج الکترومغناطیسی می‌شود که بسامد آن، با بسامد حرکت مداری الکترون برابر است. با تابش موج الکترومغناطیسی توسط الکترون، از انرژی آن کاسته می‌شود. این کاهش انرژی باعث می‌شود که شعاع مدار الکترون به دور هسته به تدریج کوچک‌تر و بسامد حرکت آن به تدریج بیشتر شود. این افزایش تدریجی بسامد حرکت مداری الکترون‌ها، سبب می‌شود تا بسامد موج الکترومغناطیسی گسیل شده نیز به تدریج زیاد شود. به این ترتیب باید طیف امواج الکترومغناطیسی گسیل شده از اتم، پیوسته باشد و الکترون پس از گسیل بی‌درپی امواج الکترومغناطیسی روی هسته فرو افتد (شکل ۴-۹ ب). این نتیجه افزون بر اینکه با واقعیت ناسازگار است با طیف خطی گسیل شده توسط اتم‌ها نیز جور در نمی‌آید.



شکل ۴-۹ ناتوانی مدل اتم هسته‌ای رادرفورد در تبیین پایداری اتم. الف) اگر الکترون

نسبت به هسته ساکن فرض شود بر اثر نیروی ربایش الکتریکی، روی هسته سقوط می‌کند. ب) اگر الکترون دور هسته بچرخد، طیفی پیوسته گسیل می‌کند و سرانجام روی هسته فرو می‌افتد.

شعاع مدارها با n^2 متناسب است.



شکل ۴-۱۰ اولین مدار بور در اتم هیدروژن دارای انرژی E_1 است. مدارهای دوم و سوم بور به ترتیب دارای انرژی‌های $E_2 = E_1/4$ و $E_3 = E_1/9$ هستند.

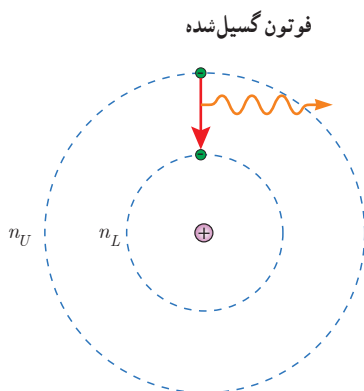
در سال ۱۹۱۳ میلادی، بور مدلی را برای اتم هیدروژن ارائه کرد. این مدل افزون بر آنکه مسئله ناپایداری اتم را در مدل رادرفورد حل می‌کرد معادلهٔ ریدبرگ برای طیف خطی اتم هیدروژن را نیز نتیجه می‌داد. نظریهٔ بور با مدل اتم هسته‌ای رادرفورد، شروع می‌شد. بور با این پیشنهاد که «در مقیاس اتمی، قوانین مکانیک کلاسیک و الکترومغناطیس باید توسط قوانین دیگری جایگزین یا تکمیل شود» گامی بزرگ و جسورانه برای رفع مشکلات مدل رادرفورد برداشت. در ادامه با برخی از اصول و مفروضات مدل بور آشنا می‌شویم.

۱- مدارها و انرژی‌های الکترون‌ها در هر اتم کوانتیده‌اند؛ یعنی فقط مدارها و انرژی‌های گسسته معینی مجاز هستند.

بور پس از محاسبات نسبتاً ساده‌ای نشان داد که شعاع این مدارها و انرژی الکترون برای اتم هیدروژن از رابطه‌های زیر به دست می‌آید:

$$(4-4) \quad r_n = a_0 n^2 \quad (\text{شعاع مدارهای الکترون برای اتم هیدروژن})$$

$$(4-5) \quad E_n = \frac{-13.6 \text{ eV}}{n^2} \quad (\text{ترازهای انرژی الکترون در اتم هیدروژن})$$



شکل ۴-۱۱ بنا به مدل بور، وقتی الکترونی از مداری با انرژی بیشتر به مداری با انرژی کمتر جهش می‌کند یک فوتون گسیل می‌شود.

در این روابط n عدد کوانتومی نامیده می‌شود ($n = 1, 2, 3, \dots$) که مدار الکترون را دور هسته مشخص می‌شود. همچنین شعاع کوچک‌ترین مدار در اتم هیدروژن (به‌ازای $n = 1$) و مقدار آن برابر $a_0 = r_1 = 5.29 \times 10^{-11} \text{ m}$ است. این مقدار خاص، شعاع بور برای اتم هیدروژن نامیده می‌شود. همچنین انرژی الکترون در $n = 1$ برابر $E_1 = -13.6 \text{ eV}$ است که اندازهٔ آن را معمولاً یک ریدبرگ می‌نامند و با نماد E_R نشان می‌دهند ($E_R = 13.6 \text{ eV}$). شکل ۴-۱۰ سه مدار اول بور را برای اتم هیدروژن نشان می‌دهد.

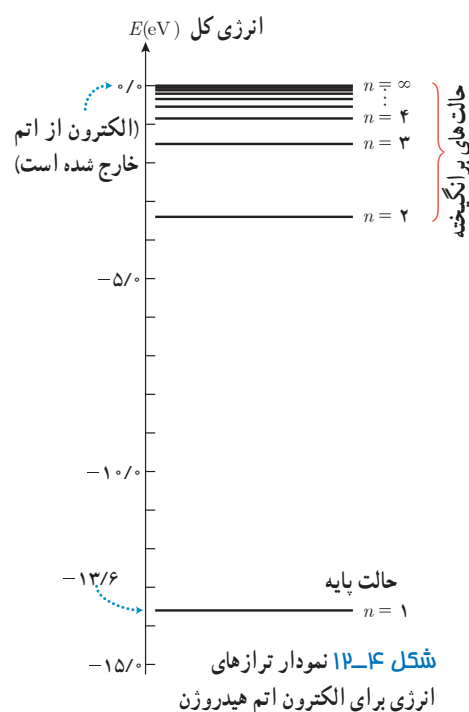
۲- وقتی یک الکترون در یکی از مدارهای مجاز است، هیچ نوع تابش الکترومغناطیسی گسیل نمی‌شود. از این رو گفته می‌شود الکترون در مدار مانا یا حالت مانا قرار دارد.

۳- الکترون می‌تواند از یک حالت مانا به حالت مانای دیگر برود. هنگام گذار الکترون از یک حالت مانا با انرژی بیشتر E_U به یک حالت مانا با انرژی کمتر E_L ، یک فوتون تابش می‌شود^۱ (شکل ۴-۱۱). در این صورت انرژی فوتون تابش شده برابر اختلاف انرژی بین دو مدار اولیه و مدار نهایی است، یعنی:

$$(4-6) \quad E_U - E_L = hf \quad (\text{معادلهٔ گسیل فوتون از اتم})$$

۱- زیر نویس U از سرحرف واژهٔ Up به معنای بالا و زیر نویس L از سرحرف واژهٔ Low به معنای پایین گرفته شده است.

نمودار ترازهای انرژی الکترون برای اتم هیدروژن: مفید است که مقادیر انرژی داده شده در معادله ۴-۵ را مانند شکل ۴-۱۲ روی نمودار تراز انرژی نمایش دهیم. در این نمودار، که برای اتم هیدروژن رسم شده است بالاترین تراز انرژی به $n=\infty$ در معادله ۴-۵ مربوط است و دارای انرژی 0 eV است. برعکس، پایین ترین تراز انرژی مربوط به $n=1$ است و دارای مقدار $-13/6\text{ eV}$ است. پایین ترین تراز انرژی، **حالت پایه** نامیده می شود تا از ترازهای بالاتر که **حالت های برانگیخته** نامیده می شوند متمایز باشد. توجه کنید که با افزایش n چگونه انرژی های حالت های برانگیخته به هم نزدیک و نزدیک تر می شوند.



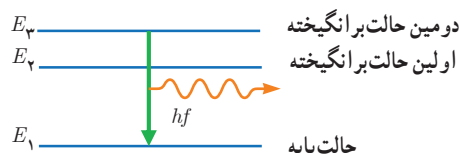
در اتم هیدروژن و در دمای اتاق، الکترون اغلب در حالت پایه قرار دارد. برای بالا بردن الکترون از حالت پایه ($n=1$) به بالاترین حالت برانگیخته ممکن ($n=\infty$) مقدار $13/6\text{ eV}$ انرژی باید صرف شود. صرف این مقدار انرژی، الکترون را از اتم خارج می کند و یون مثبت هیدروژن H^+ ایجاد می شود. این کمترین انرژی لازم برای خارج کردن الکترون از حالت پایه، **انرژی یونش الکترون** نامیده می شود. مقدار پیش بینی شده توسط مدل بور برای انرژی یونش اتم هیدروژن، توافق بسیار خوبی با مقدار تجربی دارد.

مثال ۴-۴

الکترونی در دومین حالت برانگیخته اتم هیدروژن قرار دارد. الف) انرژی الکترون را در این حالت پیدا کنید. ب) وقتی الکترون از این حالت برانگیخته به حالت پایه جهش می کند نمودار تراز انرژی آن را رسم کنید. پ) طول موج فوتون گسیل شده را حساب کنید.

پاسخ: الف) در دومین حالت برانگیخته، عدد کوانتومی $n=3$ است. به این ترتیب از رابطه ۴-۵ داریم:

$$E_3 = \frac{-13/6\text{ eV}}{3^2} = -1/51\text{ eV}$$



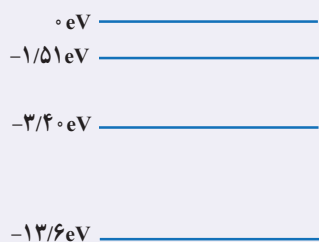
ب) شکل مقابل نمودار ترازهای انرژی را برای الکترون اتم هیدروژن نشان می دهد که با گسیل فوتون، از دومین حالت برانگیخته به حالت پایه جهش کرده است.

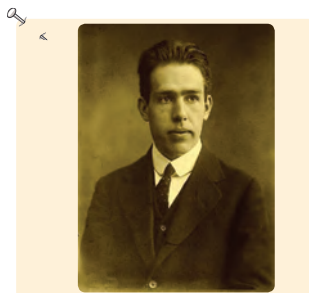
پ) انرژی الکترون در حالت پایه $E_1 = -13/6\text{ eV}$ است. به این ترتیب انرژی فوتون گسیل شده برابر $E_3 - E_1$ است. از رابطه ۴-۶ داریم:

$$E_3 - E_1 = hf = \frac{hc}{\lambda} \Rightarrow \lambda = \frac{hc}{E_3 - E_1} = \frac{1240\text{ eV} \cdot \text{nm}}{-1/51\text{ eV} - (-13/6\text{ eV})} = 102\text{ nm}$$

تمرین ۳-۴

- شکل مقابل تعدادی از ترازهای انرژی اتم هیدروژن را نشان می دهد.
- الف) کمترین طول موج فوتونی را پیدا کنید که با گذار بین این ترازها به دست می آید.
- ب) اگر الکترون از تراز انرژی $-1/51\text{ eV}$ به تراز پایه جهش کند طول موج فوتون گسیلی را پیدا کنید.
- پ) کدام گذار بین دو تراز می تواند به گسیل فوتونی با طول موج 660 nm منجر شود؟ توجه کنید که این طول موج ها در گستره مرئی است.





نیلز بور (۱۸۸۵-۱۹۶۲ م.) در کپنهاگ دانمارک به دنیا آمد و در همان‌جا به تحصیلات خود ادامه داد. بور در سال ۱۹۱۱ دکترای فیزیک خود را از دانشگاه کپنهاگ دریافت کرد. وی در سال ۱۹۱۲ میلادی پس از مدتی کار با تامسون، از کمبریج به منچستر رفت و در آزمایشگاه رادرفورد که مرکزی پژوهشی دربارهٔ مواد پرتوزا و ساختار اتم بود مشغول به کار شد. در آنجا بود که مدل اتمی خود را در خصوص اتم هیدروژن تدوین و ارائه کرد. پس از آن در توسعهٔ نظریه مکانیک کوانتومی نقش عمده‌ای داشت. بور در سال ۱۹۲۲ جایزهٔ نوبل فیزیک را برای درک ساختار اتمی و نظریهٔ کوانتومی دریافت کرد. مؤسسهٔ فیزیک نظری که وی در سال ۱۹۲۱ میلادی در کپنهاگ بنیان نهاد نزدیک به یک سده است که دانشمندان را از سراسر جهان به سوی خود جذب می‌کند.

استخراج معادلهٔ ریبرگ برای اتم هیدروژن از مدل بور: همان‌طور که در ابتدای این بخش نیز اشاره کردیم یکی از موفقیت‌های مدل بور نتیجه‌گیری معادلهٔ ریبرگ برای طیف خطی گاز هیدروژن اتمی است. برای بررسی بیشتر این موضوع فرض کنید الکترون اتم هیدروژن در یکی از حالت‌های برانگیخته باشد و بخواهد به حالتی با انرژی کمتر جهش کند. به عبارت دیگر الکترون از مدار مانای n_U به مدار مانای n_L می‌رود و فوتونی را گسیل می‌کند. با توجه به روابط ۴-۵ و ۴-۶، بسامد فوتون گسیل شده برابر است با:

$$f = \frac{1}{h}(E_U - E_L) = \frac{E_R}{h} \left(\frac{1}{n_L^2} - \frac{1}{n_U^2} \right)$$

با استفاده از رابطهٔ $f = c/\lambda$ طول موج فوتون گسیل شده را پیدا می‌کنیم.

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

از سوی دیگر داریم:

$$\frac{E_R}{hc} = \frac{13.6 \text{ eV}}{1240 \text{ eV} \cdot \text{nm}} = 0.0109 \text{ (nm)}^{-1}$$

که این مقدار، با تقریب بسیار خوبی همان ثابت ریبرگ R است که پیش از این با آن آشنا شدیم. به این ترتیب داریم:

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

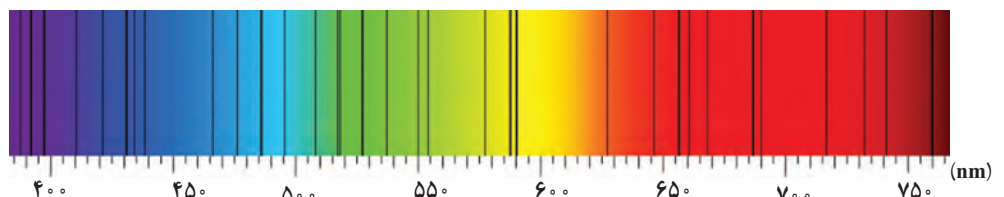
این رابطه همان معادلهٔ ۴-۳ است که با اصلاح و بازنویسی معادلهٔ بالمر برای طیف گسیلی خطی هیدروژن توسط ریبرگ به دست آمد. در نتیجه به کمک مدل بور می‌توانیم رابطهٔ تجربی ریبرگ را به دست آوریم و طیف خطی هیدروژن اتمی را توجیه کنیم. وقتی الکترون برای مثال از مدار $n_U = 3$ به مدار $n_L = 2$ می‌رود، طول موج فوتون گسیل شده برابر است با:

$$\frac{1}{\lambda} = R \left(\frac{1}{n_L^2} - \frac{1}{n_U^2} \right) = 0.0109 \text{ (nm)}^{-1} \left(\frac{1}{2^2} - \frac{1}{3^2} \right) \Rightarrow \lambda = 660 \text{ nm}$$

مقدار به دست آمده به نحو چشمگیری به طول موج خط قرمز در رشتهٔ بالمر که از تجربه حاصل شده، نزدیک است.

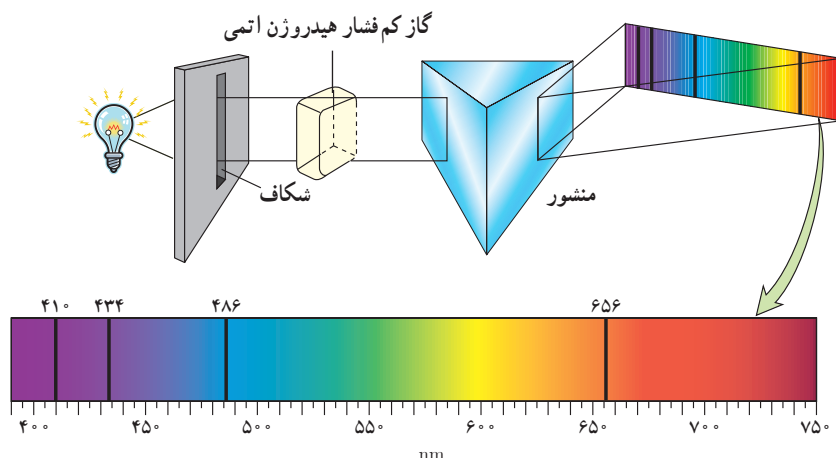
طیف جذبی گاز هیدروژن اتمی و مدل بور: در سال ۱۸۱۴ میلادی فرانhofer، با مشاهدهٔ دقیق طیف خورشید، خط‌های تاریک نازکی را در آن کشف کرد^۱ (شکل ۴-۱۳). این تجربه نشان می‌داد در تابشی که از خورشید گسیل می‌شود و به زمین می‌رسد بعضی از طول موج‌ها وجود ندارند. امروزه می‌دانیم بسیاری از خط‌های تاریکی که فرانhofer در طیف خورشید کشف کرد، ناشی از جذب طول موج‌های مربوط به این خط‌ها توسط گازهای جو خورشید است. خط‌های دیگر به سبب جذب نور در گازهای جو زمین پدید می‌آیند.

شکل ۴-۱۳ خط‌های تاریکی که در طیف خورشید دیده می‌شود، به افتخار کشف‌کنندهٔ آن، خط‌های فرانhofer نامیده می‌شوند.



۱- از ویلیام ولاستون به عنوان نخستین کاشف این خط‌های تاریک نام می‌برند، ولی جوزف فرانhofer بود که این خط‌ها را به تفصیل مورد مطالعه قرار داد.

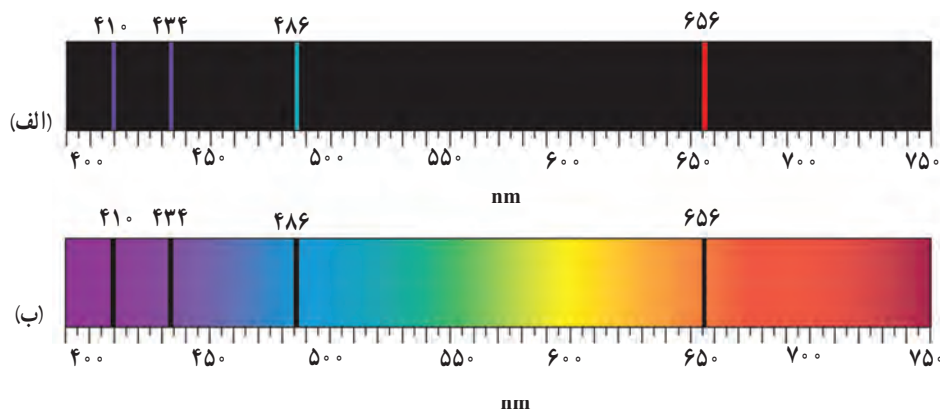
شکل ۴-۱۴ اسباب آزمایشی را به صورت طرح وار نشان می‌دهد که در آن باریکه نور سفید قبل از عبور از منشور، از گاز کم فشار هیدروژن می‌گذرد. با انجام این آزمایش پی می‌بریم یک طیف پیوسته (مشابه طیف رنگین کمان) با خط‌هایی تاریک درون آن مشاهده می‌شود که در آن بعضی از طول موج‌ها از نور سفید جذب شده‌اند.



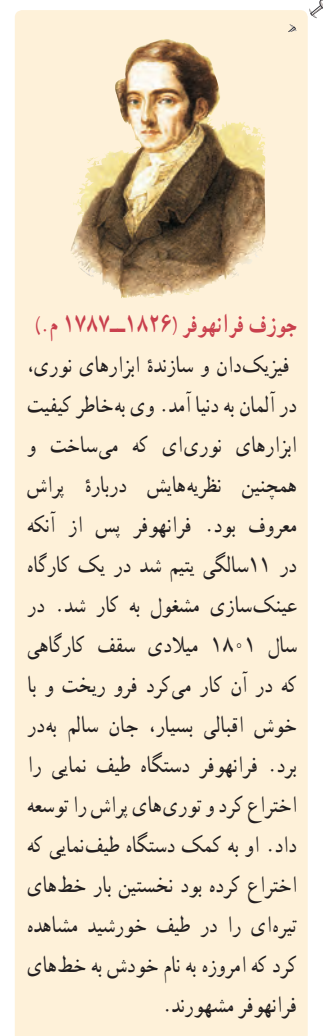
شکل ۴-۱۴ روشی برای مشاهده طیف‌های جذبی. یک چشمه نور سفید که گستره‌ای پیوسته از طول موج‌ها را تولید می‌کند، از ظرفی حاوی گاز کم فشار هیدروژن اتمی می‌گذرد و توسط منشور پاشیده می‌شود و طیف آن روی پرده تشکیل می‌شود. خط‌های تاریک روی طیف، به طول موج‌هایی از نور سفید مربوط است که توسط اتم‌های گاز جذب شده‌اند.

در اواسط قرن نوزدهم، آزمایش‌هایی مشابه آنچه بیان کردیم برای گازهای عناصر مختلف انجام شد. این آزمایش‌ها نشان می‌داد که اگر نور سفید از داخل گاز عنصری عبور کند و سپس طیف آن تشکیل شود، در طیف آن، خط‌های تاریکی ظاهر می‌شود. این خط‌ها (طول موج‌ها) توسط اتم‌های گاز عنصر جذب شده‌اند. شکل ۴-۱۵، طیف گسیلی و طیف جذبی گاز هیدروژن اتمی را در کنار یکدیگر نشان می‌دهد. مطالعه و مقایسه این دو طیف و همچنین طیف‌های گسیلی و جذبی عنصرهای مختلف نشان می‌دهد که:

- هم در طیف گسیلی و هم در طیف جذبی اتم‌های گاز هر عنصر، طول موج‌های معینی وجود دارد که از مشخصه‌های آن عنصر است. یعنی طیف گسیلی و طیف جذبی هیچ دو گازی همانند یکدیگر نیست.
- اتم‌های هر گاز دقیقاً همان طول موج‌هایی را از نور سفید جذب می‌کنند که اگر دمای آنها به اندازه کافی بالا رود و یا به هر صورت دیگر برانگیخته شوند، آنها را تابش می‌کنند.

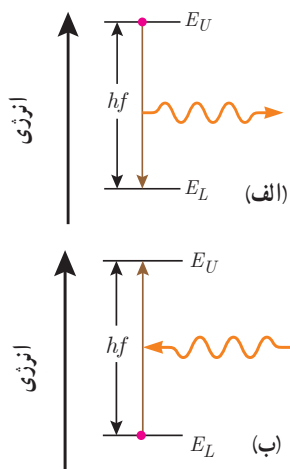


شکل ۴-۱۵ طیف گسیلی و جذبی گاز هیدروژن اتمی. الف) خط‌های روشن در طیف گسیلی معرف طول موج‌های گسیل شده و ب) خط‌های تاریک در زمینه طیف، معرف طول موج‌های جذب شده توسط اتم‌های گاز هستند.



جوزف فرانوفر (۱۸۲۶-۱۷۸۷ م.)

فیزیک‌دان و سازنده ابزارهای نوری، در آلمان به دنیا آمد. وی به‌خاطر کیفیت ابزارهای نوری‌ای که می‌ساخت و همچنین نظریه‌هایش درباره پراش معروف بود. فرانوفر پس از آنکه در ۱۱ سالگی یتیم شد در یک کارگاه عینک‌سازی مشغول به کار شد. در سال ۱۸۰۱ میلادی سقف کارگاهی که در آن کار می‌کرد فرو ریخت و با خوش اقبالی بسیار، جان سالم به‌در برد. فرانوفر دستگاه طیف‌نمایی را اختراع کرد و توری‌های پراش را توسعه داد. او به کمک دستگاه طیف‌نمایی که اختراع کرده بود نخستین بار خط‌های تیره‌ای را در طیف خورشید مشاهده کرد که امروزه به نام خودش به خط‌های فرانوفر مشهورند.



شکل ۴-۱۶ الف) فرایند گسیل فوتون
و ب) فرایند جذب فوتون توسط اتم



علی جوان (۱۹۲۶-۲۰۱۶ م.) از پدر و مادری تبریزی، در تهران به دنیا آمد. از دبیرستان البرز دیپلم گرفت و پس از آن به مدت یک سال در دانشکده علوم دانشگاه تهران به تحصیل پرداخت. در سال ۱۹۴۸ میلادی به نیویورک رفت و چندین دوره درسی را در دانشگاه کلمبیا گذراند. علی جوان بدون داشتن مدرک لیسانس یا فوق لیسانس، موفق شد در سال ۱۹۵۴ دکترای خود را زیر نظر چارلز تاولتز، فیزیکدان و مخترع بزرگ آمریکایی و برنده جایزه نوبل فیزیک ۱۹۶۴، دریافت کند. در سال ۱۹۵۵ دوره پسادکتر را در آزمایشگاه تابش^۱ و با تحقیق روی ساعت اتمی دنبال کرد. در سال ۱۹۵۸ به آزمایشگاه‌های تلفن بل^۲ پیوست و مدتی بعد در همانجا ایده اولیه لیزرهای گازی را ارائه کرد. وی پس از یک سال تلاش و با همکاری دو فیزیکدان دیگر به نام‌های ویلیام بنت و دونالد هریوت، موفق به ساخت اولین نمونه لیزر گازی هلیوم-نئون در سال ۱۹۶۰ شد.

اینکه چرا هر عنصر تنها طول موج‌های خاصی را که مشخصه آن عنصر است جذب یا گسیل می‌کند چالشی بود که برای چندین دهه فیزیکدانان را به خود مشغول کرده بود و تا پیش از ارائه مدل بور، نظریه قابل قبولی برای توضیح آن وجود نداشت. اکنون براساس مدل بور می‌دانیم که خط‌های گوناگون در طیف گسیلی گاز هیدروژن اتمی وقتی به وجود می‌آیند که الکترون‌های اتم‌های هیدروژن، که به هر دلیلی برانگیخته شده‌اند، از تراز انرژی بالاتر به تراز انرژی پایین‌تر جهش کنند و فوتون‌هایی را گسیل کنند (شکل ۴-۱۶ الف). همچنین الکترون‌ها می‌توانند در جهت عکس گذار کنند، یعنی در فرایندی که **جذب فوتون** خوانده می‌شود از ترازهای انرژی پایین‌تر به ترازهای انرژی بالاتر بروند (شکل ۴-۱۶ ب). در این حالت، اتم، فوتونی را که دقیقاً انرژی لازم برای گذار را دارد جذب می‌کند. به این ترتیب اگر فوتون‌هایی با گستره پیوسته‌ای از طول موج‌ها مطابق آزمایش شکل ۴-۱۴ از گاز بگذرند و سپس طیف آنها تشکیل شود، یک دسته خط‌های جذبی تاریک در طیف پیوسته مشاهده خواهند شد. خط‌های تاریک، طول موج‌هایی را مشخص می‌کنند که با فرایند جذب فوتون برداشته شده‌اند.

پوشش ۴-۱

آیا معادله ۴-۶ برای فرایند جذب فوتون نیز برقرار است؟

موفقیت‌ها و نارسایی‌های مدل بور: مدل بور تصویری از چگونگی حرکت الکترون‌ها به دور هسته ارائه می‌کند. این مدل در تبیین پایداری اتم، طیف گسیلی و جذبی گاز هیدروژن اتمی و محاسبه انرژی یونش اتم هیدروژن با موفقیت همراه است. افزون بر این، مدل بور را برای اتم‌های هیدروژن گونه نیز می‌توان به کار برد. **اتم هیدروژن گونه** به اتم‌هایی گفته می‌شود که تنها یک الکترون دارند. برای مثال، اتم لیتیم که در حالت خنثی سه الکترون دارد اگر دو الکترون خود را از دست داده باشد، یک اتم هیدروژن گونه است. مدل بور می‌تواند انرژی یونش و همچنین طول موج‌های طیف خطی اتم‌های هیدروژن گونه مانند لیتیم دو بار یونیده (Li^{2+}) را پیش‌بینی کند که با تجربه سازگاری خوبی دارد.

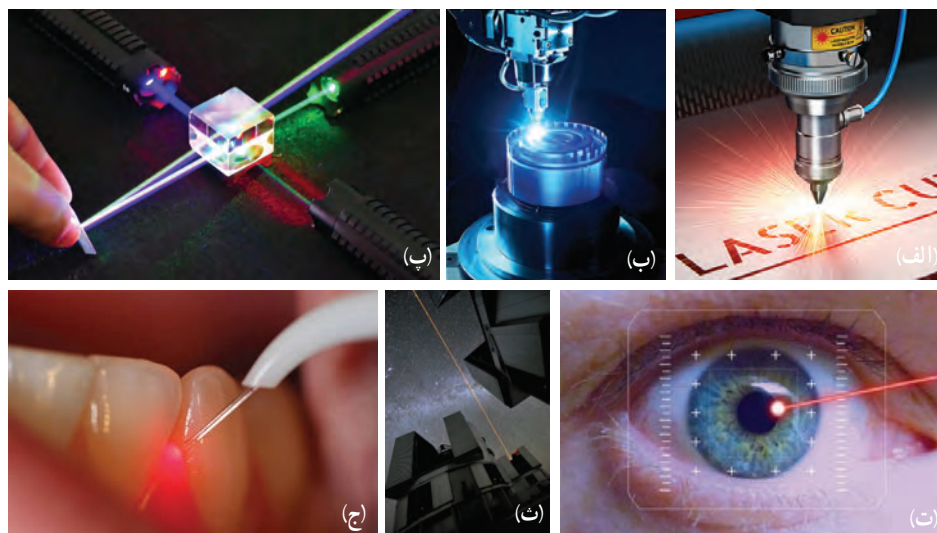
مدل بور به‌رغم موفقیت‌هایی که اشاره شد، نارسایی‌هایی نیز دارد که تنها به دو مورد از آنها اشاره می‌کنیم. این مدل برای وقتی که بیش از یک الکترون به دور هسته می‌گردد به کار نمی‌رود، زیرا در مدل بور، نیروی الکتریکی که یک الکترون بر الکترون دیگر وارد می‌کند به حساب نیامده است. همچنین این مدل نمی‌تواند متفاوت بودن شدت خط‌های طیف گسیلی را توضیح دهد. برای مثال مدل بور نمی‌تواند توضیح دهد که چرا شدت خط قرمز با شدت خط آبی در طیف گسیلی گاز هیدروژن اتمی با یکدیگر متفاوت است.

^۱ Radiation Laboratory

^۲ Bell Telephone Laboratories

۴-۴ لیزر

لیزر یکی از مفیدترین اختراعات قرن بیستم است که کاربرد زیادی در زندگی، فناوری و صنعت دارد. لیزر امروزه در چاپگرها، در نگاشتن اطلاعات روی CD و DVDها و خواندن آنها، شبکه‌های کابل نوری، اندازه‌گیری دقیق طول، دستگاه‌های جوشکاری و برش فلزات، پژوهش‌های علمی، سرگرمی و ... به کار می‌رود. همچنین در حرفه پزشکی برای جراحی، برداشتن لکه‌های پوستی، اصلاح دید چشم و دندانپزشکی و ... از لیزر استفاده می‌شود (شکل ۴-۱۷).



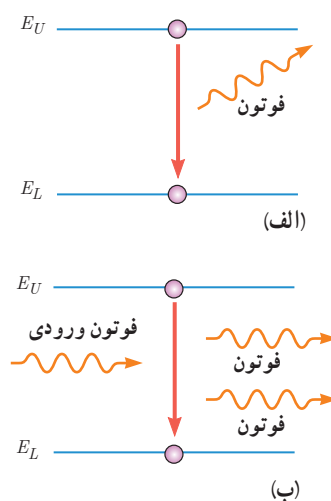
شکل ۴-۱۷ برخی از کاربردهای لیزر:

(الف) در جوشکاری، (ب) در جوشکاری، (پ) در آزمایش‌های فیزیک و پژوهش‌های علمی، (ت) در چشم پزشکی، (ث) در نجوم، (ج) در دندانپزشکی

نخستین لیزر، موسوم به لیزر یاقوتی، را تنودور مایمن (۲۰۰۷-۱۹۲۷ م.) در سال ۱۹۶۰ میلادی ساخت. مدتی پس از آن و در همان سال، علی جوان و همکارانش موفق به ساخت نخستین لیزر گازی هلیوم نتون شدند.

مطابق مدل اتمی بور وقتی یک الکترون از تراز انرژی بالاتر به تراز انرژی پایین‌تر جهش می‌کند یک فوتون گسیل می‌شود. فرایند گسیل می‌تواند به صورت **گسیل خودبه‌خود** و یا **گسیل القایی** باشد. در گسیل خودبه‌خود (شکل ۴-۱۸ الف) فوتون در جهتی کاتوره‌ای گسیل می‌شود. در حالی که در گسیل القایی (شکل ۴-۱۸ ب) که برای نخستین بار در سال ۱۹۱۷ میلادی توسط اینشتین مطرح شد، یک فوتون ورودی، الکترون برانگیخته را تحریک (یا القا) می‌کند تا تراز انرژی خود را تغییر دهد و به تراز پایین‌تر برود. برای گسیل القایی، انرژی فوتون ورودی باید دقیقاً با اختلاف انرژی‌های دو تراز یعنی $E_U - E_L$ یکسان باشد.

گسیل القایی سه ویژگی عمده دارد. اول اینکه یک فوتون وارد و دو فوتون خارج می‌شود (شکل ۴-۱۸ ب). به این ترتیب این فرایند تعداد فوتون‌ها را افزایش می‌دهد و نور را تقویت می‌کند.^۱ دوم اینکه فوتون گسیل شده، در همان جهت فوتون ورودی حرکت می‌کند. سوم اینکه فوتون گسیل شده



شکل ۴-۱۸ الف) گسیل خودبه‌خود
ب) گسیل القایی

۱- واژه laser برگرفته از سرواژه‌های عبارت (light amplification by the stimulated emission of radiation) به معنای تقویت نور توسط گسیل القایی تابش است.

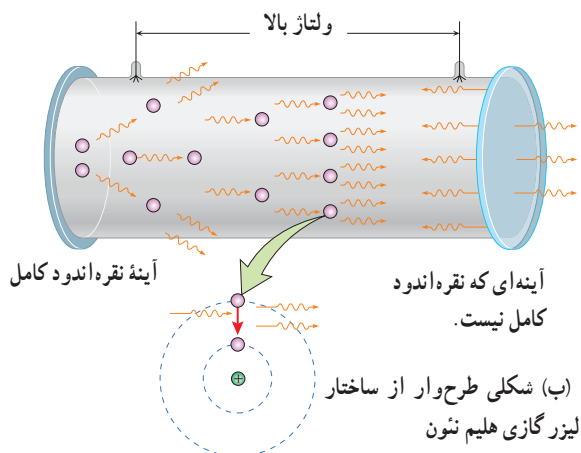
با فوتون ورودی همگام یا دارای همان فاز است. به این ترتیب فوتون‌هایی که باریکه لیزری را ایجاد می‌کنند هم بسامد، هم جهت و هم فاز هستند.

در گسیل القایی یک چشمه انرژی خارجی مناسب باید وجود داشته باشد تا الکترون‌ها را به ترازهای انرژی بالاتر برانگیخته کند. این انرژی می‌تواند به روش‌های متعددی از جمله درخش‌های شدید نور معمولی و یا تخلیه‌های ولتاژ بالا فراهم شود. اگر انرژی کافی به اتم‌ها داده شود، الکترون‌های بیشتری به تراز انرژی بالاتر برانگیخته خواهند شد، شرطی که به **وارونی جمعیت** معروف است (شکل ۴-۱۹).

وارونی جمعیت الکترون‌ها در یک محیط لیزری، مربوط به وضعیتی است که تعداد الکترون‌ها در ترازهایی موسوم به **ترازهای شبه پایدار**^۱ نسبت به تراز پایین‌تر بسیار بیشتر باشند. در این ترازها، الکترون‌ها مدت زمان بسیار طولانی‌تری (10^{-3} s) نسبت به حالت برانگیخته معمولی (10^{-8} s) باقی می‌مانند. این زمان طولانی‌تر، فرصت بیشتری برای افزایش وارونی جمعیت و در نتیجه تقویت نور لیزر فراهم می‌کند.

لیزر گازی هلیوم نئون (He — Ne)

شکل الف، یک لیزر هلیوم نئون و شکل ب، طرحی ساده از سازوکار ایجاد باریکه لیزر را درون این لیزرها نشان می‌دهد. گاز کم‌فشاری شامل ۱۵٪ هلیوم و ۸۵٪ نئون درون لوله شیشه‌ای قرار دارد. برای ایجاد وارونی جمعیت، از تخلیه الکتریکی با ولتاژ بالا درون مخلوط گازی استفاده می‌شود. وقتی یک اتم با گسیل خودبه‌خود، فوتونی موازی با محور لوله گسیل کند، فرایند ایجاد باریکه لیزر شروع می‌شود. این فوتون با گسیل القایی باعث می‌شود تا اتم دیگری دو فوتون موازی با محور لوله گسیل کند. این دو فوتون با گسیل القایی، چهار فوتون ایجاد می‌کنند. از چهار فوتون، هشت فوتون حاصل می‌شود و به همین ترتیب نوعی بهمن فوتونی به وجود می‌آید. برای اینکه فوتون‌های بیشتر و بیشتری با گسیل القایی به وجود آیند دو انتهای لوله آینه‌هایی قرار می‌دهند تا فوتون‌ها را در داخل مخلوطی از گازهای هلیوم و نئون به جلو و عقب بازتاب دهند. از آنجا که یکی از آینه‌ها بازتاب‌دهنده کامل نیست بخشی از فوتون‌ها از لوله خارج می‌شوند و باریکه لیزر را تشکیل دهند. بازده لیزرهای هلیوم نئون بسیار کم و در حدود ۱٪ تا ۱/۱ درصد است، ولی به دلیل کیفیت خوب باریکه لیزر ایجادشده، کاربرد زیادی در صنعت و فعالیت‌های علمی و آزمایشگاهی دارند.



(الف) تصویری از لیزر گازی هلیوم نئون

^۱ — Metastable