

آشنایی با فیزیک اتمی



فصل

آشنایی با فیزیک اتمی

نگاهی به فصل: پیش از این در درس فیزیک با بسیاری از قانون‌های فیزیک آشنا شده‌ایم و دریافته‌ایم که چگونه با استفاده از این قانون‌ها می‌توان بسیاری از پدیده‌های طبیعی را تجزیه و تحلیل کرد. از جمله دیدیم که به کمک قانون‌های نیوتون می‌توان حرکت هر جسم را تحت تأثیر نیروهای وارد بر آن پیش‌بینی کرد، و یا با استفاده از قانون گرانش، نیروی گرانشی بین جرم‌های مختلف را مشخص نمود، و یا با استفاده از قانون کولن، نیروی الکتریکی بین بارهای الکتریکی را به دست آورد و بالاخره با استفاده از قانون فارادی، می‌توان اثرهای مغناطیسی جریان‌های الکتریکی را توجیه کرد. شما می‌توانید با مراجعه به کتاب‌های فیزیک خود که تاکنون خوانده‌اید، قانون‌های دیگری را که فرا گرفته‌اید، به این فهرست بیفزایید.

فیزیک‌دانان تا آخر سده نوزدهم میلادی توانسته بودند برای بسیاری از پدیده‌های طبیعی توجیه‌های قانع‌کننده‌ای ارائه کنند. مجموعه آن قانون‌ها و نظریه‌ها را «فیزیک کلاسیک» می‌نامند که امروز هم در حل بسیاری از مسائل فیزیک و توجیه پدیده‌های طبیعی مورد استفاده قرار می‌گیرد. اما در سال‌های پایانی سده نوزدهم میلادی دانشمندان پدیده‌هایی را مشاهده کردند که دیگر با فیزیک کلاسیک قابل توجیه نبودند. امروزه به مجموعه نظریه‌ها و قانون‌هایی که به توجیه این پدیده‌ها می‌پردازد، فیزیک جدید (یا نوین) می‌گویند.

شالوده فیزیک جدید را نظریه‌های «نسبیت» و «کوانتومی» تشکیل می‌دهد. نظریه نسبیت مربوط به مطالعه پدیده‌ها در سرعت‌های بسیار زیاد و نزدیک به سرعت نور است. نظریه کوانتومی نیز به مطالعه پدیده‌ها در مقیاس‌های بسیار کوچک، مانند مولکول‌ها، اتم‌ها و ذره‌های ریزی که اتم‌ها را می‌سازند، می‌پردازد. ذره‌هایی که اتم‌ها را می‌سازند، ذره‌های زیر- اتمی نامیده می‌شوند. این نام اشاره بر آن دارد که این ذره‌ها اجزای اتم‌ها هستند و از اتم‌ها کوچک‌ترند.

نظریه‌های نسبیت و کوانتومی هر دو طی بیست و پنج سال اول سده بیستم مطرح شدند. نظریه نسبیت را برای نخستین بار آلبرت اینشتین عرضه کرد. نظریه کوانتومی نیز نتیجه پژوهش‌های فیزیک‌دانان بسیاری از جمله ماکس پلانک، آلبرت اینشتین، نیلس بور، اروین شرودینگر، ورنر هایزنبرگ، پل دیراک، ولف گانگ پائولی، ماکس بورن و ... بوده است.

در این فصل ضمن معرفی و بررسی برخی از پدیده‌هایی که با فیزیک کلاسیک قابل توجیه نبودند،

به معرفی مفهوم برخی از نظریه‌های ساده‌تر که در فیزیک کوانتومی مطرح است می‌پردازیم. بررسی دقیق‌تر و مشروح این نظریه‌ها و قانون‌های مربوط به آنها کاری تخصصی و فراتر از سطح این کتاب است.

۱-۷- نظریه کوانتومی

آیا تاکنون به نوری که از زغال افروخته و با فلز گداخته‌ای گسیل می‌شود توجه کرده‌اید؟ این پدیده نشان می‌دهد که اجسام در دماهای بالا از سطح خود نور مرئی گسیل می‌کنند. آزمایش‌های دقیق فیزیکی نشان می‌دهد که: از سطح همه اجسام در هر دمایی تابش‌های الکترومغناطیسی گسیل می‌شود.

گسیل تابش‌های الکترومغناطیسی از سطح جسم‌ها را تابش گرمایی نیز می‌نامند. در کتاب فیزیک ۱ و آزمایشگاه دیدیم که چگونه می‌توان با عبور یک نور سفید از منشور، آن را به رنگ‌های مختلف (که در نتیجه طول موج‌های مختلف دارند) تجزیه کرد و طیف آن را به دست آورد. اگر بین طول موج‌هایی که در یک طیف وجود دارد فاصله‌ای نباشد، آن طیف را طیف پیوسته می‌گوییم.

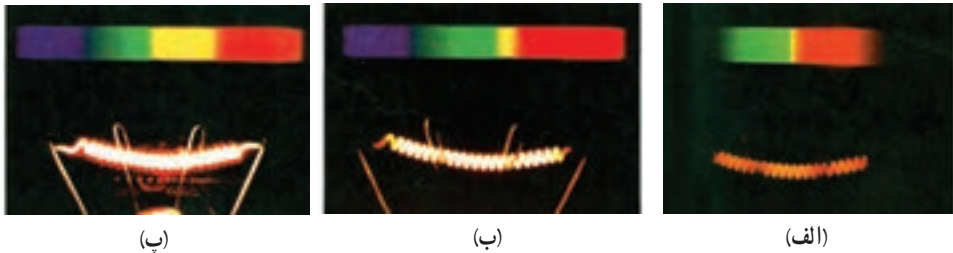
آزمایش نشان می‌دهد که تابش گسیل شده از هر جسم به دمای آن و برخی از خصوصیت‌های سطح آن بستگی دارد و در آن همه طول موج‌ها از فرسرخ، مرئی و فرابنفش به صورت یک طیف پیوسته وجود دارد.

در دمای پایین، مثلاً در دمای اتاق یا کمی بالاتر، بیشترین تابش گسیل شده دارای طول موج‌هایی در ناحیه فرسرخ است، به همین دلیل ما نمی‌توانیم با چشم خود وجود این تابش را تشخیص دهیم و فقط گرمای آن را حس می‌کنیم. هرچه دمای جسم بالاتر رود، طول موج‌هایی که بیش از همه تابش می‌شود، به تدریج از طول موج‌های بلند به سمت طول موج‌های کوتاه‌تر و به طرف نور مرئی نزدیک می‌شوند. وقتی دمای جسم به اندازه کافی بالا رود، از آن نور قرمزرنگی گسیل می‌شود، (شکل ۱-۷).



شکل ۱-۷

در دماهای باز هم بالاتر، اجسامی مانند رشته تنگستن داغ درون لامپ روشنایی، نور سفید (یعنی نوری با طیف پیوسته که همه طول موج‌های نور مرئی را در طیف خود دارد) گسیل می‌کنند (شکل ۲-۷).



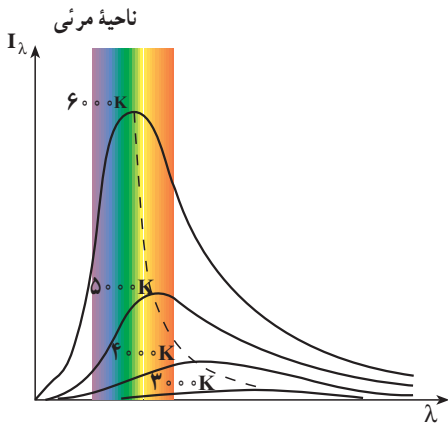
شکل ۲-۷ رشته داغ تنگستن و طیفی که از آن گسیل می‌شود. با افزایش دما از (الف) به (ب) و سپس به (پ) طیف گسیل شده تغییر می‌کند و نور گسیل شده از قرمز به سفید تغییر رنگ می‌دهد.

پرسش ۱-۷

آیا می‌توانید بگویید در جایی که نشسته‌اید تابش گسیل شده از چه اجسامی بر شما می‌تابد (فرود می‌آید)؟ آیا از خود شما نیز در این حال تابش گسیل می‌شود؟

شدت تابشی: دیدیم که هر جسم همواره در حال گسیل تابش است و طول موج و انرژی تابش گسیل شده از آن، هم به دما و هم به ویژگی‌های سطح آن جسم بستگی دارد. بنا به تعریف، شدت تابشی، یک جسم برابر است با مقدار کل انرژی تابش‌های الکترومغناطیسی‌ای که در بازه زمانی یک ثانیه از واحد سطح آن جسم گسیل می‌شود.

مقدار تابش گسیل شده را با کمیتی به نام تابندگی مشخص می‌کنند. تابندگی یک جسم در هر طول موج برابر است با مقدار انرژی تابش‌های الکترومغناطیسی با طول موج‌های بین λ و $\lambda + \Delta\lambda$ که در واحد زمان از واحد سطح جسم بر یکای گستره طول موج گسیل می‌شود. اگر یکای طول موج را میکرون (μm) و یکای سطح را سانتی متر مربع (cm^2) اختیار کنیم، یکای تابندگی $\mu\text{m}^2/\text{cm}^2 \cdot \text{W}$ خواهد شد.



شکل ۳-۷- نمودار تقریبی تابندگی پرتوی گسیل شده از جسم بر حسب طول موج

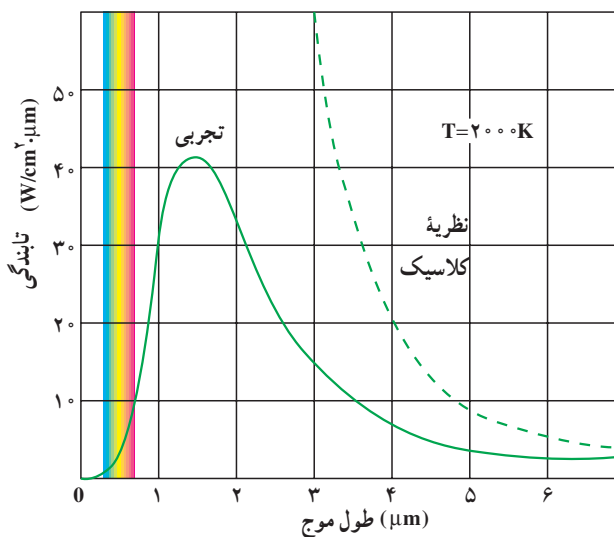
تابندگی یک جسم (I_λ) در طول موج‌ها و دماهای مختلف اندازه‌گیری شده و نتیجه آن در شکل ۳-۷ برای چهار دمای مختلف با تقریب رسم شده است. گستره طول موج‌های مرئی نیز در این شکل مشخص شده است. سطح زیر نمودار تابندگی بر حسب طول موج برابر با شدت تابشی جسم است. همان‌طور که از شکل پیداست با افزایش دما سطح زیر منحنی بیشتر می‌شود.

فعالیت ۱-۷

با بررسی شکل ۳-۷ در گروه خود، الف) تابندگی جسم را برای یک طول موج معین، در دماهای مختلف، با یکدیگر مقایسه کنید. ب) مشخص کنید که آیا در یک دمای معین همه طول موج‌ها با تابندگی یکسان تابش می‌شوند یا نه؟ پ) اگر نتیجه دیگری از این بررسی به دست آورده‌اید به کلاس گزارش کنید.

همان‌طور که در شکل ۳-۷ می‌بینید، هرچه دمای جسم بیشتر باشد، بیشینه منحنی، یعنی طول موجی که با بیشترین تابندگی گسیل می‌شود، به طرف طول موج‌های کوتاه‌تر می‌رود، علاوه بر این، شدت تابشی کل گسیل شده نیز با افزایش دما بیشتر می‌شود.

ناتوانی فیزیک کلاسیک در توجیه نظری تابش جسم: در فصل موج‌های الکترومغناطیسی دیدیم که چگونه حرکت شتاب‌دار ذره‌های باردار در آنتن منجر به گسیل موج الکترومغناطیسی در فضا می‌شود. بنا به نظریه فیزیک کلاسیک تابش گرمایی که از سطح یک جسم گسیل می‌شود نیز از نوسان‌های ذره‌های باردار که درون جسم و در نزدیکی سطح آن، واقع‌اند سرچشمه می‌گیرد.



شکل ۴-۷

تا ابتدای سده بیستم میلادی، فیزیک دانان نتوانسته بودند با به کار بردن قانون‌ها و مفهومی‌های فیزیک کلاسیک، از جمله موج‌های الکترومغناطیسی گسیل شده از سطح یک جسم، منحنی‌های تجربی شکل ۳-۷ را توجیه کنند. به عبارت دیگر از محاسبات‌های آنان نتیجه شد که تابندگی با توان چهارم طول موج نسبت عکس دارد. این موضوع سبب می‌شود که در طول موج‌های کوتاه تابندگی جسم به سمت بی‌نهایت میل کند که با نتیجه‌های تجربی شکل ۳-۷ سازگاری نداشت. در شکل ۴-۷ منحنی حاصل از محاسبات‌های نظری براساس فیزیک کلاسیک (خط چین) همراه با یک منحنی تجربی برای دمای ۲۰۰۰ کلوین نشان داده شده است.

فعالیت ۲-۷

در گروه خود دو منحنی شکل ۴-۷ را مورد بحث قرار دهید و موارد ناسازگاری بین آن دو را مشخص کنید.

همان‌طور که در شکل ۴-۷ پیداست و پیش از این نیز توضیح داده شد، هر چه دمای جسم بالاتر باشد، λ_m یعنی طول موجی که تابندگی با آن طول موج بیشینه است، کوچک‌تر خواهد بود. آزمایش نشان می‌دهد که میان λ_m و دمای مطلق جسم، رابطه زیر برقرار است که قانون جابه‌جایی وین نام دارد.

$$\lambda_m T = \text{مقدار ثابت} = 2/9 \times 10^{-3} \text{ m} \cdot \text{K} \quad (۱-۷)$$

واژه جابه‌جایی در این قانون، مربوط به چگونگی حرکت یا جابه‌جایی بیشینه تابندگی با تغییر دمای جسم است.

دمای بدن انسان 37°C است با محاسبه نشان دهید پیشینه تابندگی بدن انسان در چه ناحیه‌ای از طیف موج‌های الکترومغناطیسی است.

پاسخ

$$\lambda_m T = 2/9 \times 10^{-3} \text{ m} \cdot \text{K}$$

$$\lambda_m = \frac{2/9 \times 10^{-3}}{273 + 37}$$

$$\Rightarrow \lambda_m \approx 9/35 \times 10^{-6} \text{ m}$$

با استفاده از شکل ۶-۹، این طول موج در محدودهٔ فروسرخ است.

یکی از ناسازگاری‌های بین نتایج محاسبات مبتنی بر فیزیک کلاسیک و نتیجه‌های تجربی، آن است که محاسبه‌های کلاسیکی پیش‌بینی می‌کنند که مقدار انرژی تابشی گسیل شده با طول موج بسیار کوتاه باید نامتناهی باشد. اما همان‌طور که در نمودار تجربی می‌بینید مقدار این انرژی بسیار کوچک است.

در سال ۱۹۰۰ میلادی پلانک با ارائهٔ نظریهٔ کوانتومی خود دربارهٔ تابش توانست نتیجه‌های تجربی به دست آمده را توجیه کند. اساس نظریهٔ پلانک بر این فرض استوار بود که انرژی تابشی جسم کوانتومی است. در ادامه، نخست واژهٔ کوانتوم و مفهوم کمیت کوانتومی را معرفی می‌کنیم. سپس سعی می‌کنیم با بیان بسیار ساده شده‌ای به شرح نظریهٔ پلانک بپردازیم.

کمیت کوانتومی: ما در زندگی روزمره با کمیت‌های متفاوتی سروکار داریم که برخی از آنها مقدارهای پیوسته و برخی دیگر مقدارهای گسسته اختیار می‌کنند؛ برای مثال، طول یک پارچه، مساحت یک زمین و یا حجم یک ظرف کمیت‌های پیوسته‌اند و هر مقداری را می‌توانند اختیار کنند. می‌توانیم ۲ متر یا ۲/۲ متر و یا ۲/۲۵ متر و ... پارچه داشته باشیم. از سوی دیگر، کمیت‌هایی مانند تعداد دانش‌آموزان یک کلاس و یا تعداد سکه‌های موجود در صندوق یک دستگاه تلفن سکه‌ای کمیت‌هایی گسسته‌اند و تنها می‌توانند مقدارهای خاصی اختیار کنند؛ برای مثال، ما نمی‌توانیم ۲۴/۳ دانش‌آموز در یک کلاس و یا ۹۲/۵ عدد سکه در یک مجموعه از سکه‌ها داشته باشیم. در فیزیک کمیت‌های گسسته را «کوانتومی» می‌نامند. کمترین مقدار یک کمیت کوانتومی را مقدار پایه یا «کوانتوم» آن کمیت می‌خوانند.

برای مثال، در مبحث الکتريسيته ديده ايم كه مقدار بار الكتريكي موجود در يك جسم باردار مضرب درستي از بار يك الكترون ($e = 1/6 \times 10^{-19}C$) است. به اين ترتيب مي گوييم كه بار الكتريكي هر جسم باردار يك كميت كوانتومي است و هر كوانتوم آن برابر بار الكتريكي يك الكترون است. در فصل ۵ همين كتاب نيز ديديم كه بسامد حاصل از موج ايستاده در طنابي كه دو سر آن ثابت شده است به صورت $f_n = nf_1$ و در واقع مضرب صحيحي از مقدار پايه آن، يعني بسامد هماهنگ اول است و بنا بر اين بسامد امواج ايستاده تشكيل شده در طناب نيز كميتي گسسته است.

نظريه پلانك درباره تابش: بنا بر نظريه پلانك مقدار انرژي اي كه جسم به صورت تابش هاي الكترومغناطيسي گسيل مي كند همواره مضرب درستي از يك مقدار پايه است و اين مقدار پايه به بسامد موج الكترومغناطيسي بستگي دارد. به اين ترتيب داريم:

$$E = nhf \quad (2-7)$$

در اين رابطه n يك عدد صحيح مثبت است و ضريب h مقدار ثابتي است كه ثابت پلانك نام دارد. نخستين برآورد اين ثابت توسط پلانك به كمك تطبيق نتيجه محاسبه با منحنی های تجربي مربوط به تابش جسم صورت گرفت. هم اكنون مقدار پذيرفته شده براي اين ثابت برابر با $h = 6/63 \times 10^{-34}Js$ است.

hf كوانتوم انرژي تابشي گسيل شده با بسامد f است و n كه تعداد كوانتوم ها را مشخص مي كند، عدد كوانتومي نام دارد.

در رابطه ۲-۷ اگر ثابت پلانك را برحسب ژول ثانيه قرار دهيم، انرژي برحسب ژول به دست مي آيد؛ ولي در بحث درباره اجزای سازنده اتم ها، ژول به دليل آنكه يكای بزرگی است مناسب نیست و معمولاً از يكای ديگري براي انرژي به نام الكترون ولت (eV) استفاده مي شود. يك الكترون ولت برابر مقدار انرژي موردنياز براي عبور يك الكترون از اختلاف پتانسيل ۱ ولت در خلا است. درحالی كه يك ژول برابر با مقدار انرژي بار الكتريكي برابر يك كولن در عبور از اختلاف پتانسيل يك ولت است. در نتيجه رابطه بين الكترون ولت و ژول به صورت زير است:

$$1eV = 1/6 \times 10^{-19}J = (1/6 \times 10^{-19}C) \times (1V)$$

پتانسيل يك ولت

تمرین ۱-۷

ثابت پلانك را برحسب eV.s به دست آوريد.

تمرین ۲-۷

نور زرد با بسامد تقریبی $6 \times 10^{14} \text{ Hz}$ ، بسامد اصلی نور خورشید را تشکیل می‌دهد. انرژی‌ای که هر کوانتوم این نور (فوتون) حمل می‌کند برحسب eV چه مقدار است؟

تمرین ۳-۷

انرژی یک کوانتوم رنگ معینی از نور مرئی، برابر $10^{-19} \text{ J} \times 5$ است. رنگ این نور را مشخص کنید.

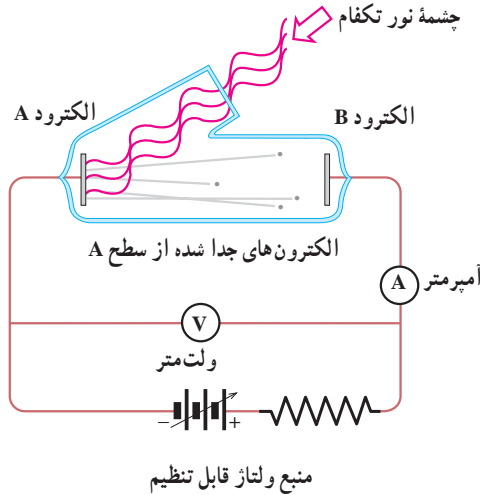
تمرین ۴-۷

بیشترین طول موج گسیلی که از بدن انسان تابش می‌شود برابر $940 \mu\text{m}$ است. الف) بسامد این تابش چه مقدار است؟ ب) نوع این تابش در چه گستره‌ای از طیف موج‌های الکترومغناطیسی قرار دارد؟ پ) انرژی‌ای که توسط هر کوانتوم این تابش الکترومغناطیسی حمل می‌شود برحسب eV چه مقدار است؟

۲-۷- فوتون و پدیده فوتوالکتریک

در سال ۱۸۸۷ میلادی، هانریش هرتز دانشمند آلمانی، مشاهده کرد که وقتی نوری با طول موج بسیار کوتاه – مانند نور فرابنفش – به کلاهک فلزی یک الکتروسکوپ (برق‌نما) باردار منفی می‌تابد، باعث تخلیه الکتروسکوپ (برق‌نما) می‌شود. آزمایش‌های دیگر نشان دادند که این تخلیه الکتریکی، به دلیل جدا شدن الکترون‌ها از سطح کلاهک فلزی روی داده است. این پدیده، یعنی جدا کردن الکترون‌ها از سطح یک فلز توسط تاباندن نور بر آن را پدیده فوتوالکتریک و الکترون‌های گسیل شده از سطح فلز را فوتوالکترون می‌نامند.

برای بررسی پدیده فوتوالکتریک از دستگاهی مطابق شکل ۵-۷ استفاده می‌کنیم. در این دستگاه دو الکتروود فلزی A و B در یک محفظه‌ی خلأ قرار دارند و از بیرون به یک منبع ولتاژ قابل تنظیم متصل شده‌اند. الکتروود A در مقابل یک چشمه نور تکفام (تک بسامد) قرار دارد.



شکل ۵-۷

آزمایش نشان می‌دهد که اگر نوری بر الکتروود A تابد هر قدر هم که ولتاژ بالا باشد، جریانی در مدار مشاهده نمی‌شود. ولی هنگامی که نوری با بسامد مناسب به الکتروود A بتابد جریان در مدار برقرار می‌شود. وجود این جریان را می‌توانیم به این صورت تفسیر کنیم که تاباندن نور باعث جدا شدن فوتوالکترون‌ها از سطح الکتروود A و گسیل آنها شده است. بر اساس قوانین فیزیک کلاسیک، اگر شدت نور برای گسیل فوتوالکترون‌ها از الکتروود A کافی باشد، اثر فوتوالکتریک باید در هر بسامدی رخ دهد. در حالی که آزمایش نشان می‌دهد، اگر بسامد نوری که بر A فرود می‌آید کمتر از بسامد معینی (موسوم به بسامد قطع) باشد، اثر فوتوالکتریک رخ نمی‌دهد. برای توجیه پدیده فوتوالکتریک باید به تفسیر کوانتومی آن پردازیم. پیش از این دیدیم که بنا بر فرضیه پلانک انرژی تابشی یک موج الکترومغناطیسی گسیل شده با بسامد f ، تنها می‌تواند مضرب درستی از یک مقدار پایه به نام کوانتوم انرژی (hf) باشد. اینشتین در سال ۱۹۰۵ میلادی برای تفسیر پدیده فوتوالکتریک، با استفاده از فرضیه پلانک فرض کرد که هر موج الکترومغناطیسی با بسامد f از بسته‌های متمرکز یا کوانتوم‌های انرژی تشکیل شده است که آنها را فوتون می‌نامند.

فوتون‌های نور با رنگ‌های مختلف انرژی یکسان ندارند. فوتون بنفش انرژی بیشتر و فوتون

فرمز انرژی کمتری دارد. اگر بسامد یک موج الکترومغناطیسی برابر f باشد، انرژی فوتون آن برابر خواهد بود با

$$E = hf \quad (3-7)$$

براساس پیشنهاد اینستین انرژی یک موج الکترومغناطیسی با بسامد f تنها می‌تواند مضرب درستی از انرژی یک فوتون باشد؛ یعنی:

$$E = nhf \quad (4-7)$$

در این صورت می‌گوییم این موج از n فوتون تشکیل شده است.

مثال ۷-۲

الف) انرژی فوتون نور زرد با طول موج میانگین 589nm را برحسب الکترون‌ولت به دست آورید. ثابت پلانک برابر است با $h = 4/14 \times 10^{-15} \text{eVs}$.
ب) تعداد فوتون‌هایی را که در یک ثانیه از یک لامپ زرد 60 واتی گسیل می‌شوند، محاسبه کنید.

پاسخ

الف) موج‌های الکترومغناطیسی با سرعت نور حرکت می‌کنند؛ از این رو داریم:

$$\lambda f = c$$

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

$$= \frac{4/14 \times 10^{-15} \times 3 \times 10^8}{589 \times 10^{-9}}$$

$$= 2/11 \text{ eV}$$

ب)

$$E_T = Pt = 60 \times 1 = 60 \text{ J} = 37/5 \times 10^{11} \text{ eV}$$

$$E_T = nhf = nE$$

$$37/5 \times 10^{11} = n \times 2/11$$

$$n = 1/8 \times 10^{20}$$

یعنی در هر ثانیه $1/8 \times 10^{20}$ فوتون از این لامپ گسیل می‌شود که عدد بسیار بزرگی است.

اینشتین همچنین فرض کرد که در پدیده فوتوالکتریک، هر فوتون (با انرژی hf) صرفاً با یک الکترون برهم کنش می‌کند؛ به طوری که اگر انرژی فوتون به قدر کافی بزرگ باشد، بخشی از آن صرف جدا کردن الکترون از فلز می‌شود و مابقی آن به انرژی جنبشی الکترون جدا شده تبدیل می‌شود. این فرض اینشتین را می‌توان به کمک قانون پایستگی انرژی، به صورت زیر نوشت:

$$hf = W + K \quad (5-7)$$

که در آن W انرژی لازم برای جدا کردن الکترون از سطح فلز و K انرژی جنبشی الکترون جدا شده است. برخی از الکترون‌ها در فلز کمتر مقیداند و برای خارج کردن آنها از فلز کار کمتری لازم است. اگر حداقل کار لازم برای خارج کردن الکترون‌ها از یک فلز خاص برابر W_0 باشد، انرژی جنبشی سریع‌ترین فوتوالکترون‌های گسیل شده از آن برابر خواهد بود با:

$$K_{\text{بیشینه}} = hf - W_0 \quad (6-7)$$

W_0 را تابع کار فلز می‌نامند و همان‌گونه که گفتیم حداقل کار لازم برای خارج کردن یک الکترون از فلز است.

در رابطه ۶-۷ اگر hf از W_0 کوچک‌تر باشد، هیچ الکترونی از فلز کنده نمی‌شود. در نتیجه hf باید حداقل برابر W_0 باشد. به این ترتیب، بسامد قطع از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$f_0 = \frac{W_0}{h} \quad (7-7)$$

مثال ۳-۷

تابع کار تنگستن 4.52 eV است.

الف) بسامد و طول موج قطع تنگستن را حساب کنید.

ب) بیشینه انرژی جنبشی الکترون‌ها را هنگامی که طول موج 198 nm به کار

می‌رود، حساب کنید.

پاسخ

الف) بسامد قطع برابر است با

$$\begin{aligned} f_0 &= \frac{W_0}{h} = \frac{4.52 \times 1.6 \times 10^{-19} \text{ J}}{6.63 \times 10^{-34} \text{ J}\cdot\text{s}} \\ &= 1.09 \times 10^{15} \text{ s}^{-1} \end{aligned}$$

با توجه به رابطه $\lambda_0 = \frac{c}{f}$ ، طول موج قطع برابر است با

$$\lambda_0 = \frac{3 \times 10^8}{1.09 \times 10^{15}} = 2.7 \times 10^{-7} \text{ m}$$

$$= 270 \text{ nm}$$

$$K_{\text{بیشینه}} = hf - W_0 \quad (\text{ب})$$

$$= \frac{hc}{\lambda} - W_0$$

$$= \frac{1240 \text{ eV} \cdot \text{nm}}{198 \text{ nm}} - 4.52 \text{ eV}$$

$$= 1.74 \text{ eV} \approx 2.7 \times 10^{-19} \text{ J}$$

تمرین ۷ - ۵

طول موج قطع برای اثر فوتوالکتریک در یک فلز معین برابر ۲۵۴ nm است.
الف) تابع کار این فلز بر حسب الکترون-ولت چه مقدار است؟
ب) آیا اثر فوتوالکتریک به ازای $\lambda > 254 \text{ nm}$ مشاهده خواهد شد یا به ازای $\lambda < 254 \text{ nm}$ ؟ چرا؟

تمرین ۷ - ۶

تابع کار فلز روی ۴/۳۱ eV است. هرگاه نور بر سطحی از جنس روی بتابد و فوتوالکترن‌ها مشاهده شوند،
الف) بلندترین طول موجی که سبب گسیل فوتوالکترن‌ها می‌شود چه مقدار است؟
ب) وقتی نور به طول موج ۲۲۰ nm به کار گرفته شود، انرژی جنبشی بیشینه فوتوالکترن‌ها چقدر می‌شود؟

۳-۷- طیف اتمی

علاوه بر آنچه تا اینجا به آنها اشاره کردیم، پدیده‌های دیگری نیز هستند که فیزیک کلاسیک قادر به تفسیر آنها نبود. لذا فیزیک دانان با فرض‌های غیر کلاسیکی – مانند فرضیه‌های پلانک و اینشتین که قبلاً به آنها اشاره شد – توانستند این پدیده‌ها را به خوبی تفسیر کنند. توصیف این پدیده‌ها فراتر از سطح این کتاب است و ما در اینجا تنها به عنوان نمونه طیف گسیل شده از اتم‌ها را که بر مبنای فیزیک کلاسیک قابل تفسیر نیست، ذکر می‌کنیم.

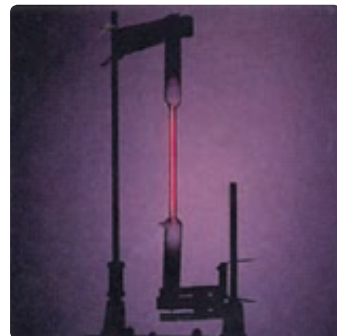
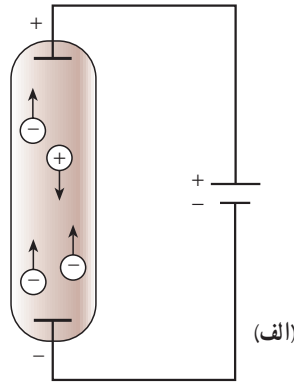
در کتاب فیزیک (۱) و آزمایشگاه با پاشیدگی نور در منشور آشنا شدید و دیدید که نیوتون برای نخستین بار با گذراندن نور خورشید از منشور «طیف نور سفید» را تشکیل داد. نیوتون نشان داد که نور سفید آمیزه‌ای از رنگ‌های مختلف است. اکنون می‌دانیم نور سفید از طول موج‌های مختلفی، از نور بنفش با طول موج حدود 400 nm تا نور قرمز با طول موج حدود 700 nm ، تشکیل شده است. طیف نور سفید که یک طیف پیوسته است در شکل ۶-۷ نشان داده شده است.



شکل ۶-۷

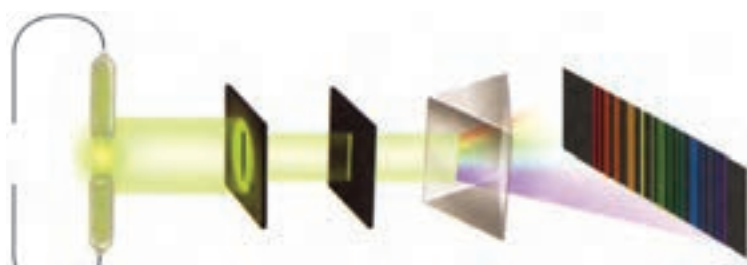
به همین ترتیب می توان طیف هر نوری را که از رنگ های مختلف تشکیل شده باشد، توسط پاشیدگی در منشور شناسایی کرد. پیش از این با تابش گرمایی که از سطح جسم های جامد گسیل می شود، آشنا شدیم و دیدیم که این تابش دارای طیف پیوسته است.

اکنون به بررسی نوع دیگری از تابش می پردازیم. این تابش توسط لامپ های حاوی بخار بسیار رقیق عنصرها گسیل می شود. این لامپ ها مطابق شکل ۷-۷ الف به صورت لوله های باریک شیشه ای هستند که درون آنها یک گاز رقیق در فشار کم وجود دارد. دو الکترود به نام های کاتد و آند در دو انتهای لوله قرار دارند. اگر بین این دو الکترود ولتاژ بالایی برقرار شود، اتم های گاز درون لامپ مطابق شکل ۷-۷ ب و پ شروع به گسیل نور می کنند. نوری که از لامپ های حاوی بخار عنصرهای متفاوت گسیل می شود، با یکدیگر تفاوت دارد. برای مثال نوری که اتم های بخار جیوه گسیل می کنند، همان گونه که در شکل ۷-۷ نشان داده شده است به رنگ نیلی - آبی است. اگر این نور را مطابق شکل ۷-۷ از منشور بگذرانیم و طیف آن را تشکیل دهیم، می بینیم که این طیف پیوسته نیست، بلکه تنها از چند خط رنگی جدا از هم با طول موج های معین تشکیل شده است.

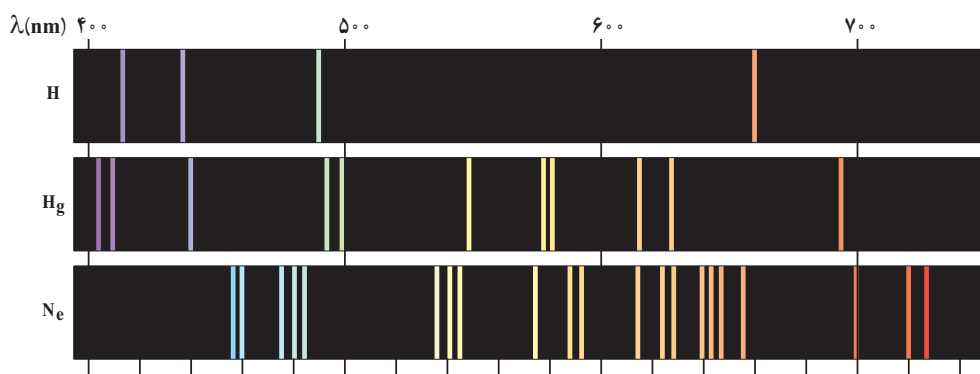


شکل ۷-۷

اگر درون لامپ به جای بخار جیوه، بخار عنصر دیگری باشد، باز هم در طیف حاصل خط‌های رنگی جدا از هم دیده می‌شود، ولی این خط‌ها هم از نظر تعداد و هم از نظر طول موج با خط‌های طیف حاصل از لامپ بخار جیوه تفاوت دارد. طیف نور گسیل شده از بخار هر عنصر را **طیف اتمی** آن عنصر می‌نامند. پس می‌توان گفت که طیف اتمی عنصرهای مختلف باهم تفاوت دارد. طیف اتمی چند عنصر در شکل ۸-۷ نشان داده شده است. طیف اتمی حاصل از نور گسیل شده از بخار عنصرها را طیف گسیلی (یا نشری) آن اتم‌ها می‌نامند.



شکل ۸-۷



شکل ۹-۷

طیف اتمی جیوه، خط‌هایی در ناحیهٔ فرابنفش دارد؛ یعنی، یک لامپ بخار جیوه مقدار زیادی نور فرابنفش نیز گسیل می‌کند. چون تابش فرابنفش برای انسان مضر است، نباید به‌طور مستقیم در معرض نور گسیل شده از لامپ بخار جیوه قرار گرفت.

درون لامپ‌های فلورسان نیز بخار جیوه وجود دارد، اما دیوارهٔ درونی این لامپ‌ها با پوشش نازکی از یک مادهٔ شیری رنگ (مخلوطی از بورات کادمیوم، سیلیکات روی و تنگستات کلسیم) پوشانده

شده است. این ماده دارای این ویژگی است که اگر نور تکفام در ناحیهٔ فرابنفش بر آن بتابد، از خود نور سفید گسیل می‌کند. پس نوری که از لامپ فلورسان گسیل می‌شود، نور سفید است. در کاربردهای متداول، از لامپ بخار جیوه بدون پوشش فلورسان به عنوان لامپ روشنایی استفاده نمی‌شود.

طیف جذبی: در سال ۱۸۱۴ میلادی فرانیهوفر، فیزیک‌دان آلمانی، کشف کرد که اگر به دقت به طیف خورشید بنگریم، خط‌های تاریکی در طیف پیوستهٔ آن مشاهده خواهیم کرد (شکل ۷-۱). این مطلب نشان می‌دهد که بعضی از طول موج‌ها در نوری که از خورشید به زمین می‌رسد، وجود ندارد و به جای آنها، در طیف پیوستهٔ خورشید خط‌های تاریک (یا سیاه) دیده می‌شود.

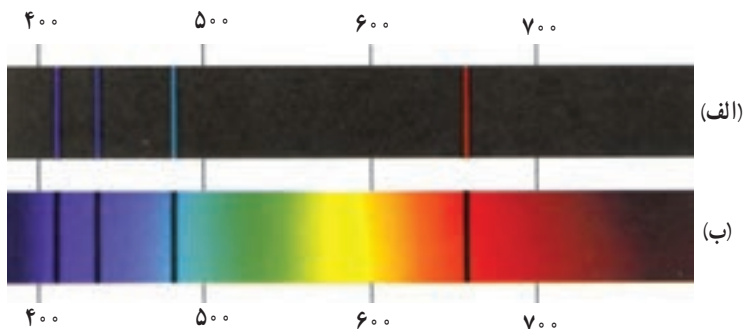
اکنون می‌دانیم که گازهای عنصرهای موجود در جو خورشید، بعضی از طول موج‌های گسیل‌شده از خورشید را جذب می‌کنند و نبود آنها در طیف پیوستهٔ خورشید به صورت خط‌های تاریک ظاهر می‌شود. طیف نور سفیدی را که بعضی از خط‌ها با طول موج‌های آن جذب شده باشد، **طیف جذبی** می‌نامیم. در اواسط سدهٔ نوزدهم، معلوم شد که اگر نور سفید از داخل بخار عنصری عبور کند و سپس طیف آن تشکیل شود، در طیف آن، خط‌های تاریکی ظاهر می‌شود. این خط‌ها (طول موج‌ها) توسط اتم‌های بخار عنصر جذب شده‌اند. مطالعهٔ طیف‌های گسیلی و جذبی عنصرهای مختلف نشان می‌دهد که:

۱- در طیف گسیلی و در طیف جذبی اتم‌های هر عنصر طول موج‌های معینی وجود دارد که از ویژگی‌های مشخصهٔ آن عنصر است؛ یعنی، طیف‌های گسیلی و جذبی هیچ دو عنصری مثل هم نیست.

۲- اتم هر عنصر دقیقاً همان طول موج‌هایی را از نور سفید جذب می‌کند که اگر دمای آن به اندازهٔ کافی بالا رود و یا به هر صورت دیگر برانگیخته شود، آنها را تابش می‌کند.

شکل ۷-۱- خط‌های تاریکی که در طیف خورشید دیده می‌شود، خط‌های فرانیهوفر نام دارد. طول موج‌های مربوط توسط جو خورشید از نور تابشی خورشید حذف شده است.

طیف های گسیلی (نثری) و جذبی اتم هیدروژن در شکل ۷-۱۱ نشان داده شده اند.



شکل ۷-۱۱

(الف) طیف گسیلی، خط های روشن معرف طول موج های گسیلی هستند.
 (ب) طیف جذبی، خط های تاریک در زمینه روشن معرف طول موج های جذب شده هستند.

از آنچه گفته شد، نتیجه می گیریم که طیف اتمی هر عنصر خط ها یا طول موج های ویژه خود را دارد، و طیف های گسیلی و جذبی هر عنصر مانند اثر انگشت افراد می تواند برای شناسایی اتم ها از یکدیگر به کار رود.

فعالیت ۷-۳

با بحث در گروه خود مشخص کنید که چگونه می توان با استفاده از طیف جذبی خورشید به وجود عنصر های مختلف در جو خورشید پی برد؟

تهیه و بررسی طیف های گسیلی و جذبی را **طیف نمایی** می نامند. طیف نمایی ابزار توانمندی برای شناسایی عنصر هاست. در سال های پایانی سده نوزدهم میلادی چند عنصر ناشناخته، تنها به کمک طیف نمایی کشف شد، ولی علی رغم این کاربردهای موفق تجربی، در قرن نوزدهم نظریه قابل قبولی برای تفسیر طیف اتمی وجود نداشت. به عبارت دیگر، این که چرا هر عنصر طیف مخصوص به خود را دارد، سوالی بود که در فیزیک کلاسیک پاسخی برای آن یافت نمی شد.

درک ساز و کار جذب و گسیل نور به وسیلهٔ اتم‌ها از دیدگاه فیزیک کلاسیک آسان است؛ زیرا بنا بر نظریه‌های کلاسیکی یک اتم در صورتی نورگسیل می‌کند که به طریقی — مانند برخورد با سایر اتم‌ها یا توسط میدان‌های الکتریکی — به الکترون‌های آن انرژی داده شود؛ در نتیجه الکترون‌ها با به‌دست آوردن انرژی ارتعاش می‌کنند و موج‌های الکترومغناطیسی به‌وجود می‌آورند؛ یعنی، نور گسیل می‌کنند. اما این که چرا اتم‌های همهٔ عناصرها موج‌های الکترومغناطیسی با طول موج‌های یکسان گسیل نمی‌کنند و این که چرا هر عنصر طول موج خاص خود را دارد از دیدگاه فیزیک کلاسیک قابل توجیه نیست.

در مورد جذب نور هم، از دیدگاه فیزیک کلاسیک، می‌توان گفت که وقتی نور به یک اتم می‌تابد، نوسان میدان الکتریکی ناشی از نور فرودی، باعث می‌شود که الکترون‌های اتم شروع به ارتعاش کنند و نور فرودی را جذب کنند. ولی باز هم در این دیدگاه هیچ توجیه قانع‌کننده‌ای برای این که «چرا هر عنصر تنها طول موج‌های خاصی را که مشخصهٔ آن عنصر است جذب می‌کند و بقیهٔ طول موج‌ها را جذب نمی‌کند؟» وجود ندارد.

نیلس بور، فیزیک‌دان دانمارکی، در سال ۱۹۱۳ میلادی با بیان فرضیه‌هایی دربارهٔ اتم‌ها، طیف اتمی را توجیه کرد و بار دیگر نشان داد که تجدید نظر اساسی در فیزیک کلاسیک ضروری است. **رابطهٔ ریذبرگ — بالمر**: اتم هیدروژن ساده‌ترین اتم‌هاست و طیف آن اولین طیفی بود که به‌طور کامل مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت. آنگستروم تا سال ۱۸۸۵ میلادی طول موج چهارخط از طیف اتم هیدروژن را با دقت زیاد اندازه گرفت. این طول موج‌ها در شکل ۷-۱۱ نشان داده شده‌اند. بالمر که یک معلم سوئسی بود، این اندازه‌گیری‌ها را مطالعه کرد و نشان داد که طول موج خط‌های این طیف را می‌توان با دقت بسیار زیاد از رابطهٔ زیر به‌دست آورد:

$$\lambda = 364 / 56 \frac{n^2}{n^2 - 4} \quad (8-7)$$

که در آن λ طول موج خط‌های طیف برحسب نانومتر (nm) و n یکی از عددهای صحیح زیر است:

$$n = 3, 4, 5, 6$$

گفتنی است که بالمر این رابطه را صرفاً با بررسی رابطه‌های ریاضی مختلف و بدون هیچ‌گونه تجربهٔ فیزیکی به‌دست آورد.

طول موج خط‌های طیفی شکل ۷-۱۱ را به کمک رابطه‌ی بالمر به دست آورید.

پاسخ

$$\lambda = 364 / 56 \frac{n^2}{n^2 - 4} \quad \text{داریم:}$$

برای $n = 3$ به دست می‌آوریم.

$$\lambda_1 = 364 / 56 \frac{9}{9 - 4} = 656 / 2 \text{ nm}$$

برای $n = 4$ داریم:

$$\lambda_2 = 364 / 56 \frac{16}{16 - 4} = 486 / 0 \text{ nm}$$

و به همین ترتیب

$$n = 5 \Rightarrow \lambda_3 = 434 / 0 \text{ nm}$$

$$n = 6 \Rightarrow \lambda_4 = 410 / 13 \text{ nm}$$

کار عمده در زمینه‌ی جست‌وجو برای طیف کامل اتم هیدروژن توسط ریذبرگ در حدود سال ۱۸۹۰ میلادی انجام شد. ریذبرگ کار کردن با عکس طول موج را مناسب‌تر تشخیص داد؛ لذا رابطه‌ی بالمر (معادله‌ی ۷-۸) را به صورت زیر نوشت:

$$\frac{1}{\lambda} = R_H \left(\frac{1}{4^2} - \frac{1}{n^2} \right) \quad (7-9)$$

که در آن R_H ثابت ریذبرگ برای اتم هیدروژن نامیده می‌شود و مقدار آن برابر است با:

$$R_H = 109678 \text{ (nm)}^{-1}$$

طول موج تمامی خط‌های طیف اتم هیدروژن را می‌توان از رابطه‌ی زیر که به رابطه‌ی ریذبرگ معروف است به دست آورد.

$$\frac{1}{\lambda} = R_H \left(\frac{1}{n'^2} - \frac{1}{n^2} \right) \quad n > n' \quad (7-10)$$

با قرار دادن $n' = 2$ رابطه‌ی بالمر (۷-۹) به دست می‌آید. خط‌های طیف مربوط به $n' = 2$ را «رشته‌ی بالمر» می‌نامند.

خط‌های دیگر طیف اتم هیدروژن، با قرار دادن عددهای صحیح دیگر به جای n' به شرح زیر به دست می‌آیند.

به ازای $n'=1$ داریم:

$$\frac{1}{\lambda} = R_H \left(\frac{1}{1^2} - \frac{1}{n^2} \right) \quad n = 2, 3, 4, \dots$$

این رشته را «رشته لیمان» می‌نامند.

همچنین به ازای $n'=3$ داریم:

$$\frac{1}{\lambda} = R_H \left(\frac{1}{3^2} - \frac{1}{n^2} \right) \quad n = 4, 5, 6, \dots$$

این رشته را نیز «رشته پاشن» می‌نامند. در جدول ۷-۱ رشته‌های طیف اتم هیدروژن داده شده‌اند.

جدول ۷-۱

نام رشته	مقدار n'	رابطه ریذبرگ مربوط	مقدارهای n	گستره طول موج
لیمان	۱	$\frac{1}{\lambda} = R_H \left(\frac{1}{1^2} - \frac{1}{n^2} \right)$	$n = 2, 3, 4, \dots$	فرابنفش
بالمر	۲	$\frac{1}{\lambda} = R_H \left(\frac{1}{2^2} - \frac{1}{n^2} \right)$	$n = 3, 4, 5, \dots$	فرابنفش و مرئی
پاشن	۳	$\frac{1}{\lambda} = R_H \left(\frac{1}{3^2} - \frac{1}{n^2} \right)$	$n = 4, 5, 6, \dots$	فروسرخ
براکت	۴	$\frac{1}{\lambda} = R_H \left(\frac{1}{4^2} - \frac{1}{n^2} \right)$	$n = 5, 6, 7, \dots$	فروسرخ
پفوند	۵	$\frac{1}{\lambda} = R_H \left(\frac{1}{5^2} - \frac{1}{n^2} \right)$	$n = 6, 7, 8, \dots$	فروسرخ

طول موج اولین خط طیفی اتم هیدروژن در رشته لیمان را که برای آن $n' = 1$ و $n = 2$ است به دست آورید و تعیین کنید که این خط در کدام گستره موج‌های الکترومغناطیسی واقع است.

پاسخ

برای $n' = 1$ و $n = 2$ طبق رابطه ریذبرگ داریم:

$$\frac{1}{\lambda} = R_H \left(\frac{1}{1} - \frac{1}{4} \right) = \frac{3}{4} R_H$$

در نتیجه طول موج این خط برابر است با:

$$\lambda = \frac{4}{3R_H} = \frac{4}{3 \times 0.0109 \text{ (nm)}^{-1}} = 121 \text{ nm}$$

با مراجعه به طیف موج‌های الکترومغناطیسی در فصل ۲ مشاهده می‌کنیم که این خط طیفی در ناحیه فرابنفش واقع است.

وجود خط‌های طیفی متفاوت برای اتم‌ها و رابطه ساده و دقیقی مثل رابطه ریذبرگ برای طیف اتم هیدروژن، لزوم داشتن الگویی برای اتم را نشان می‌داد. الگویی که بتوان به کمک آن این نتیجه‌های تجربی را توجیه کرد.

۷-۴- الگوهای اتمی

الگوی اتمی تامسون: تامسون، دانشمند انگلیسی که با آزمایش‌هایی موفق به کشف الکترون در سال ۱۸۹۶ میلادی شده بود، نخستین الگوی اتمی را در سال ۱۸۹۹ میلادی ارائه داد. در این الگو، اتم به صورت توزیع کروی یکنواختی از جرم و بار مثبت در نظر گرفته شد که الکترون‌ها (بارهای منفی) مانند کشمش‌های درون یک کیک کشمش‌ی درون آن قرار دارند.

اگر چه تامسون بر اساس الگوی کیک کشمش‌ی توانست برخی از ویژگی‌های اتم‌ها را توجیه کند، ولی رادرفورد با آزمایش‌هایی که به منظور تأیید و تکمیل الگوی کیک کشمش‌ی تامسون انجام داد، به نتیجه‌هایی دست یافت که با چنین الگویی سازگار نبود. آزمایش‌های وی نشان دادند که بار مثبت اتم

باید در بخش کوچکی در مرکز اتم متمرکز باشد. رادرفورد براساس این نتیجه‌ها در سال ۱۹۱۲ میلادی الگوی دیگری برای ساختار اتم ارائه کرد.

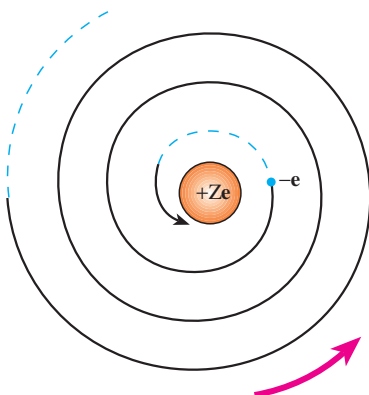
الگوی اتمی رادرفورد: در الگوی اتمی رادرفورد همه بار مثبت اتم در یک ناحیه مرکزی با حجم بسیار کوچکی به نام هسته متمرکز شده است و اطراف آن را الکترون‌ها با بار منفی، در فاصله‌ای زیاد احاطه کرده‌اند، به گونه‌ای که می‌توان گفت فضای بین هسته و الکترون‌ها خالی است. رادرفورد در الگویی که برای اتم ارائه کرد به این که الکترون‌ها در اتم چگونه حرکت می‌کنند اشاره‌ای نکرد. اشکال اساسی این الگو آن است که اگر آن الکترون‌ها را نسبت به هسته ساکن فرض کنیم، باید تحت تأثیر نیروی ربایشی الکتریکی بین هسته و الکترون، روی هسته سقوط کنند و در نتیجه اتم ناپایدار باشد؛ یعنی ساختار داخلی آن در هم فرو ریزد که این موضوع کاملاً خلاف چیزی است که در عمل وجود دارد.

اگر هم فرض کنیم که الکترون‌ها - مانند سیاره‌های منظومه خورشیدی که به دور خورشید در حرکت‌اند - به دور هسته در گردش باشند، باز هم این حرکت به دلیل زیر پایدار نمی‌ماند.

در فصل قبل در قسمت تولید موج‌های الکترومغناطیسی دیدیم، حرکت شتابدار بارهای الکتریکی در آنتن موج الکترومغناطیسی تولید می‌کند. حرکت الکترون به دور هسته نیز یک حرکت شتابدار است، از این رو، بنابر نظریه الکترومغناطیسی کلاسیک باید این الکترون، موج الکترومغناطیسی گسیل کند و بسامد موج گسیل شده با بسامد حرکت مداری الکترون برابر است. در نتیجه با گسیل موج الکترومغناطیسی، از انرژی الکترون کاسته می‌شود که این کاهش انرژی با توجه به آنچه در مبحث حرکت دایره‌ای دیدیم، باعث می‌شود که شعاع مدار الکترون به دور هسته کوچک‌تر و بسامد حرکت آن بیشتر شود. تغییر بسامد مداری به معنای تغییر بسامد موج الکترومغناطیسی است که گسیل می‌شود. بنابراین الکترون‌ها به تدریج انرژی خود را از دست می‌دهند و بسامد حرکت آنها به تدریج افزایش می‌یابد، بسامد موج الکترومغناطیسی گسیل

شده نیز به تدریج زیاد می‌شود. به این ترتیب باید طیف موج الکترومغناطیسی گسیل شده از اتم، پیوسته باشد و الکترون پس از گسیل‌های متوالی موج‌های الکترومغناطیسی روی هسته بیفتد (شکل ۷-۱۲).

بدین ترتیب الگوی رادرفورد برای اتم، با تجربه سازگار نیست؛ زیرا اولاً، نمی‌تواند پایداری حرکت الکترون‌ها در مدارهای اتمی و در نتیجه پایداری اتم‌ها را توضیح دهد و ثانیاً، قادر به توجیه طیف گسسته اتمی نیست.



شکل ۷-۱۲

الگوی اتمی بور : نیلس بور، فیزیکدان دانمارکی، در سال ۱۹۱۳ میلادی برای حل مشکل ناپایداری الگوی اتمی رادرفورد و با توجه به طیف گسسته تابش گسیل شده از اتم‌ها و رابطه تجربی ریبرگ – المبر برای طیف اتم هیدروژن، با الهام گرفتن از نظریه‌های کوانتومی پلانک و اینشتین الگویی برای اتم هیدروژن که یک الکترون دارد ارائه کرد. در این الگو، بور پیشنهاد کرد که قانون‌های مکانیک و قانون‌های الکترومغناطیسی کلاسیک، در مقیاس‌های اتمی باید همراه با فرضیه‌هایی در نظر گرفته شوند. این فرضیه‌ها را می‌توان به صورت ساده در چهار اصل زیر بیان کرد :

۱- الکترون، تنها روی مدارهای دایره‌ای با شعاع‌های معینی حرکت

می‌کند، این مدارها «مدارهای مانا» نامیده می‌شوند.

حرکت الکترون با جرم m و بار $-e$ روی یک مدار دایره‌ای به شعاع r به مرکز هسته با بار $+e$ در شکل ۷-۱۳ نشان داده شده است. نیروی مرکزگرا این حرکت از ربایش الکتریکی بین الکترون و هسته است و برابر است با $\frac{ke^2}{r^2}$ ($k = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} = 9 \times 10^9 \text{ N.m}^2/\text{C}^2$). شتاب حرکت الکترون همان‌گونه که در مبحث حرکت دایره‌ای دیدیم برابر است با $\frac{v^2}{r}$ که در آن v سرعت حرکت الکترون روی مسیر دایره‌ای است؛ در نتیجه با استفاده از قانون دوم نیوتون داریم :

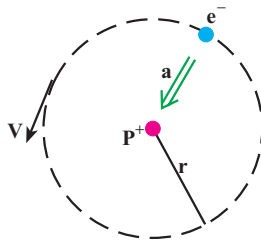
$$\frac{ke^2}{r^2} = \frac{mv^2}{r} \quad (7-11)$$

از آنجا که انرژی پتانسیل الکترون در میدان الکتریکی هسته برابر $\frac{-ke^2}{r}$ است در نتیجه انرژی کل (پتانسیل + جنبشی) الکترون در این مدار برابر است با :

$$E = K + U = \frac{1}{2}mv^2 - \frac{ke^2}{r} \quad (7-12)$$

با استفاده از رابطه ۷-۱۱ به دست می‌آوریم :

$$K = \frac{1}{2}mv^2 = + \frac{ke^2}{2r} \quad (7-13)$$



شکل ۷-۱۳

در نتیجه انرژی کل الکترون روی یک مدار مانا با شعاع r برابر است با:

$$E = -\frac{ke^2}{2r} \quad (14-7)$$

۲- الکترون در حین حرکت روی یک مدار مانا، برخلاف نظریه الکترومغناطیسی کلاسیک، تابشی گسیل نمی‌کند. در این وضعیت می‌گوییم الکترون در یک «حالت مانا» است.

۳- شعاع مدارهای مانا مقدارهای مشخص گسسته‌ای می‌توانند داشته باشند؛ اگر شعاع اولین مدار را برابر a_0 بگیریم شعاع‌های مجاز از رابطه زیر به دست می‌آیند.

$$r_n = a_0 n^2 \quad n = 1, 2, 3, \dots \quad (15-7)$$

که در آن n یک عدد صحیح است.

علاوه بر این بور برای کوچک‌ترین شعاع مدار الکترون در اتم هیدروژن، یعنی a_0 که آن را شعاع اتم بور نیز می‌نامند، مقدار زیر را به دست آورد:

$$a_0 = \frac{h^2}{4\pi^2 m k e^2} \quad (16-7)$$

که در آن h ثابت پلانک، k ثابت کولن، e بار الکترون و m جرم الکترون است.

مثال ۷-۷

شعاع اتم بور را محاسبه کنید.

$$a_0 = \frac{h^2}{4\pi^2 m k e^2}$$

پاسخ

$$\begin{aligned} &= \frac{(6.63 \times 10^{-34} \text{ J}\cdot\text{s})^2}{4(3/14)^2 (9 \times 10^{-31} \text{ kg})(9 \times 10^9 \text{ N}\cdot\text{m}^2/\text{C}^2)(1/6 \times 10^{-19} \text{ C})^2} \\ &= 0.529 \times 10^{-10} \text{ m} = 0.529 \text{ nm} \end{aligned}$$

اکنون اگر به کمک رابطه ۱۴-۷ مقدار انرژی الکترون در مدار مجاز n ام را محاسبه کنیم، به دست می‌آوریم:

$$E_n = -\frac{2\pi^2 m k^2 e^4}{h^2} \times \frac{1}{n^2} \quad n = 1, 2, \dots \quad (17-7)$$

بدین ترتیب الکترون تنها مجاز است انرژی ای برابر با یکی از مقدارهایی که از رابطه ۱۷-۷ به دست می آید داشته باشد. هر یک از این مقدارهای مجاز را یک *تراز انرژی* می نامند.

۴- الکترون تنها هنگامی می تواند تابش الکترومغناطیسی گسیل کند که از یک حالت مانا با انرژی E_{n_1} به حالت مانای دیگری با انرژی کمتر E_{n_2} ($n_2 < n_1$) برود، یا به عبارت دیگر از یک تراز انرژی بالاتر به یک تراز انرژی پایین تر برود. در این صورت، انرژی فوتون موج الکترومغناطیسی گسیل شده برابر اختلاف انرژی بین دو تراز است؛ یعنی:

$$hf = E_{n_1} - E_{n_2} \quad (18-7)$$

رابطه ۱۷-۷ را می توانیم به صورت زیر بنویسیم:

$$E_n = -\frac{E_R}{n^2} \quad (19-7)$$

که در آن با استفاده از مقدار کمیت های ثابت h و e ، m ، k داریم:

$$E_R = \frac{2\pi^2 k^2 m e^4}{h^2} = 2/17 \times 10^{-18} \text{ J} = 13/6 \text{ eV}$$

این مقدار انرژی را یک *ریدبرگ* می نامند. یک ریدبرگ برابر $13/6$ الکترون ولت یا $2/17 \times 10^{-18}$ ژول است.

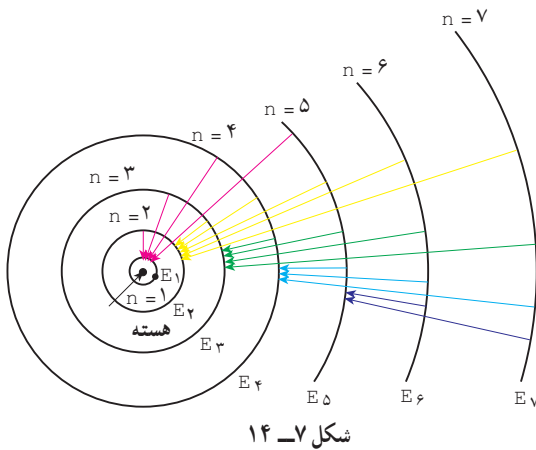
اگر الکترون اتم هیدروژن، در مدار اول ($n = 1$) باشد، می گوئیم در حالت پایه قرار دارد. مدارهای با انرژی بالاتر از E_1 را حالت های برانگیخته می خوانند. انرژی این حالت ها از رابطه (۱۹-۷) به ازای $n = 2, 3, \dots$ به دست می آید:

$$n = 2 \Rightarrow E_2 = -\frac{E_R}{4} = -3/4 \text{ eV} = -\frac{1}{4} \text{ ریدبرگ}$$

و

$$n = 3 \Rightarrow E_3 = -\frac{E_R}{9} = -1/5 \text{ eV} = -\frac{1}{9} \text{ ریدبرگ}$$

و به همین ترتیب برای بقیه مقدارهای n . این مقدارها، مقدارهای مجاز انرژی الکترون در اتم هیدروژن اند. هر مقدار مجاز انرژی را یک تراز انرژی الکترون در اتم هیدروژن می نامیم.



مدارهای الکترون در الگوی بور

برای اتم هیدروژن در شکل ۷-۱۴ نشان داده شده است.

الگوی بور برای اتم هیدروژن نه تنها مشکل ناپایداری الگوی اتمی را در فرورد را نداشت، بلکه به کمک این الگو طیف گسسته اتم هیدروژن و رابطه تجربی ریذبرگ - بالمر نیز به درستی توضیح داده شد.

مثال ۷-۷

هنگامی که الکترون در اتم هیدروژن از مدار n_1 به مدار n_2 ($n_1 > n_2$) می‌رود. الف) بسامد فوتون موج الکترومغناطیسی گسیل شده را به دست آورید. ب) طول موج این فوتون را محاسبه و نتیجه را با رابطه ریذبرگ مقایسه کنید.

پاسخ

الف) با استفاده از رابطه‌های ۷-۱۸ و ۷-۱۹ داریم:

$$f = \frac{E_{n_1} - E_{n_2}}{h} = \frac{E_R}{h} \left(\frac{1}{n_2^2} - \frac{1}{n_1^2} \right)$$

ب) داریم:

$$f = \frac{c}{\lambda}$$

که در آن c سرعت نور است؛ در نتیجه:

$$\frac{c}{\lambda} = \frac{E_R}{h} \left(\frac{1}{n_2^2} - \frac{1}{n_1^2} \right)$$

از این رابطه نتیجه می‌گیریم:

$$\frac{1}{\lambda} = \frac{E_R}{hc} \left(\frac{1}{n_2^2} - \frac{1}{n_1^2} \right)$$

از سوی دیگر داریم:

$$\frac{E_R}{hc} = \frac{2/17 \times 10^{-18}}{6/63 \times 10^{-34} \times 3 \times 10^8} = 1/0.9 \times 10^7 \text{ m}^{-1} = 0/0.109 (\text{nm})^{-1}$$

که همان ثابت ریذبرگ است.

در نتیجه با فرضیه‌های بور می‌توانیم رابطه تجربی ریدبرگ را به دست آوریم و طیف اتمی هیدروژن را توجیه کنیم. به این ترتیب وقتی الکترون از یکی از مدارهای با $n_1 > 2$ به مدار $n_2 = 2$ می‌رود، یکی از خط‌های رشته بالمر را گسیل می‌کند.

تمرین ۷-۷

مشخص کنید که برای خط‌های هر یک از رشته‌های دیگر طیف اتم هیدروژن الکترون باید از چه مدارهایی به چه مدارهایی برود؟

جذب تابش الکترومغناطیسی و وجود خط‌های جذبی در طیف اتمی اتم هیدروژن را نیز می‌توان به کمک الگوی بور برای اتم هیدروژن به صورت زیر توضیح داد. برای آن که الکترونی را از تراز انرژی n_1 به تراز انرژی n_2 ($n_2 > n_1$) منتقل کنیم، باید به آن مقداری انرژی درست برابر اختلاف انرژی دو تراز بدهیم. هر چه اختلاف n_2 با n_1 بیشتر باشد، انرژی داده شده به الکترون نیز باید بیشتر باشد. این مقدار انرژی را الکترون با جذب فوتونی که درست همین مقدار انرژی دارد به دست می‌آورد.

فعالیت ۷-۱۴

موضوع زیر را در گروه خود به بحث گذاشته و نتیجه را به کلاس ارائه دهید.
به کمک الگوی اتمی بور برای اتم هیدروژن، نشان دهید که طول موج خط‌های طیف جذبی و طیف گسیلی اتم هیدروژن با یکدیگر برابرند.

انرژی بستگی الکترون: اگر انرژی الکترون را در حالتی که کاملاً از قید هسته رها شده است برابر با صفر بگیریم، انرژی آن روی مدارها که مقدار کمتری دارد باید منفی باشد، علامت منفی در رابطه ۷-۱۷ نیز به همین معناست.

انرژی الکترون در مدار اول بور برابر $E_1 = -13.6\text{eV}$ است؛ و این بدان معناست که برای آنکه الکترونی را که در حالت پایه اتم هیدروژن است کاملاً از قید هسته رها کنیم، باید به آن 13.6eV انرژی

بدهیم. این مقدار انرژی را انرژی بستگی الکترون در تراز اول اتم هیدروژن می‌نامیم. این مقدار با تجربه به خوبی سازگار است.

تمرین ۷-۸

انرژی بستگی الکترون را در هر یک از حالت‌های برانگیخته E_2 و E_3 اتم هیدروژن به دست آورید.

نظریه بور برای اتم هیدروژن را می‌توان برای هر اتم تک الکترونی دیگر به کار برد، هر چند که بار هسته‌ای آن بیشتر از $+e$ باشد.

الگوی اتمی بور برای اتم هیدروژن، بسامد خط‌های طیف اتم هیدروژن و نیز یون‌هایی را که یک الکترون دارند به درستی توجیه کرد؛ ولی این الگو هیچ اطلاعی درباره تعداد فوتون‌هایی که با یک بسامد معین گسیل می‌شوند نمی‌دهد. علاوه بر این برای اتم‌های با تعداد الکترون‌های بیشتر نیز پاسخی ندارد. البته این مسئله توسط مکانیک کوانتومی، با استفاده از الگوی ابر الکترونی یا الگوی اوربیتالی که در کتاب‌های شیمی خود با آن آشنا شده‌اید حل شده است. در این الگو نیز الکترون‌ها حالت‌های کوانتومی خاصی دارند که هر یک با یک مقدار معین انرژی و یا یک تراز معین انرژی مشخص می‌شود و الکترون تنها با تغییر دادن تراز انرژی خود می‌تواند فوتون گسیل یا جذب کند. در ادامه به توصیف چگونگی عملکرد لیزر به طور ساده می‌پردازیم که اساس سازوکار آن بر همین توانایی اتم‌ها برای گسیل فوتون‌ها قرار دارد.

۷-۵- آشنایی با لیزر

بیش از نیم قرن از ساخت نخستین لیزر^۱ یا قوتی توسط مایمن^۲ و نخستین لیزر گازی هلیم – نئون توسط علی جوان دانشمند ایرانی در سال ۱۹۶۰ میلادی می‌گذرد، هر چند مبانی نظری لیزر سال‌ها پیش از آن توسط اینشتین در سال ۱۹۱۷ میلادی مطرح شده بود، ولی سال‌های نسبتاً زیادی طول کشید تا صنعت

۱- کلمه لیزر از سر حرف واژه‌های انگلیسی در عبارت زیر گرفته شده و به معنای «تقویت نور به روش گسیل القایی تابش» است.

Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation (LASER)

۲- T. H. Maiman

و فناوری امکان ساخت اولین لیزر را فراهم کند. از آن پس کاربرد لیزر در زمینه‌های مختلف به سرعت افزایش یافت به طوری که هم‌اکنون در بسیاری از وسیله‌های مورد استفاده ما در زندگی و صنعت، از قبیل دستگاه‌های بازخوانی اطلاعات از روی لوح‌های فشرده، چاپگرها، شبکه‌های مخابرات کابل نوری، دستگاه‌های یرش فلزات (شکل ۷-۱۵-الف) و ... کاربرد زیادی پیدا کرده است. در حرفه پزشکی نیز جهت انجام پاره‌ای امور هم چون جراحی، بخیه بافت‌های بدن، اصلاح دید چشم (شکل ۷-۱۵-ب) و ... کاربرد زیادی دارد.



(ب)



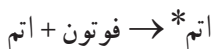
(الف)

شکل ۷-۱۵

فعالیت ۷-۵

به اتفاق دیگر اعضای گروه خود، فهرستی دیگر از کاربردهای لیزر در زندگی، صنعت و فناوری تهیه کنید و به کلاس درس ارائه دهید.

در بخش‌های قبل دیدیم که هرگاه در یک اتم الکترون‌ها روی مدارهای مانا حرکت کنند، تابشی از آن اتم گسیل نمی‌شود. همچنین دیدیم برای آنکه الکترونی را از حالت n_1 به حالت n_2 ($n_2 > n_1$) منتقل کنیم، باید به آن مقدار معینی انرژی بدهیم، که در این صورت گفته می‌شود، اتم به حالت برانگیخته رفته است و آن را به صورت زیر نمایش می‌دهیم:



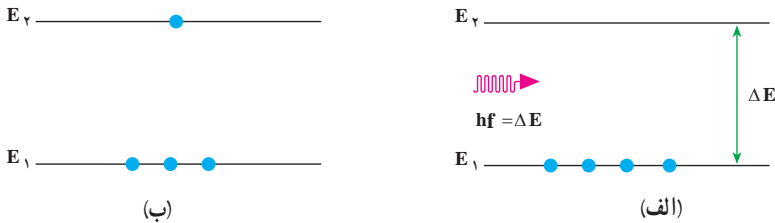
علامت ستاره حاکی از حالت برانگیخته است. برهم کنش فوتون با اتم را جذب می‌نامیم که در نمودارهای شکل ۷-۱۶ نشان داده شده است. شکل ۷-۱۶-الف اتم را قبل از دریافت تابش و شکل

۱۶-۷- ب اتم را پس از دریافت تابش نشان می دهد. همان طور که می بینید یکی از الکترون هایی که در تراز E_1 قرار دارد با جذب انرژی hf به تراز E_2 می رود؛ به عبارت دیگر:

$$E_1 + hf = E_2$$

یا

$$\Delta E = E_2 - E_1 = hf$$

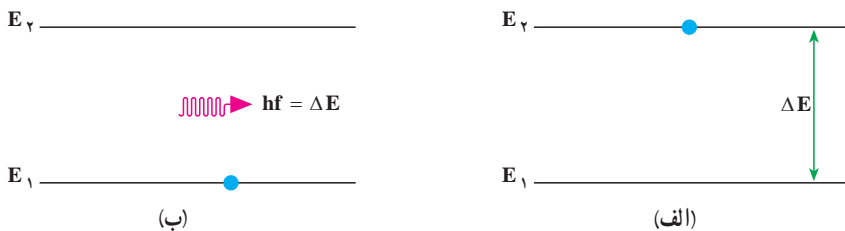


لازم به ذکر است که اتم تنها فوتون هایی را جذب می کند که انرژی آنها، hf ، با اختلاف انرژی بین ترازهای اتمی، ΔE ، برابر باشد. همچنین دیدیم که هرگاه اتم در حالت برانگیخته باشد با گسیل فوتون به حالت پایین تر می رود. این برهم کنش خودبه خود نامیده می شود و آن را به صورت زیر نمایش می دهیم:

$$\text{فوتون} + \text{اتم} \rightarrow \text{اتم}^*$$

این برهم کنش در نمودارهای شکل ۱۷-۷ نشان داده شده است. شکل ۱۷-۷- الف اتم را در حالت برانگیخته و شکل ۱۷-۷- ب اتم را در حالت پایه نشان می دهد. توجه کنید الکترون با گسیل تابش از حالت برانگیخته به حالت پایه می رود. در این مورد نیز انرژی فوتون گسیل شده برابر اختلاف انرژی بین دو تراز اتمی است؛ یعنی:

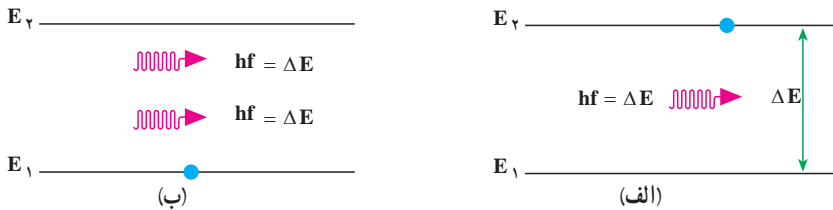
$$hf = E_2 - E_1 = \Delta E$$



نوع دیگری از برهم کنش فوتون با اتم، که اساس کار لیزر به شمار می‌آید، گسیل القایی (یا تحریک شده) است. در این برهم کنش، اتم ابتدا در حالت برانگیخته است. آنگاه یک فوتون با انرژی hf که برابر اختلاف انرژی دو تراز اتم است، اتم برانگیخته را وادار می‌دارد تا با گسیل یک فوتون دیگر با همین بسامد، به حالت پایین‌تر یا حالت پایه برود. این برهم کنش را به صورت زیر نمایش می‌دهیم:

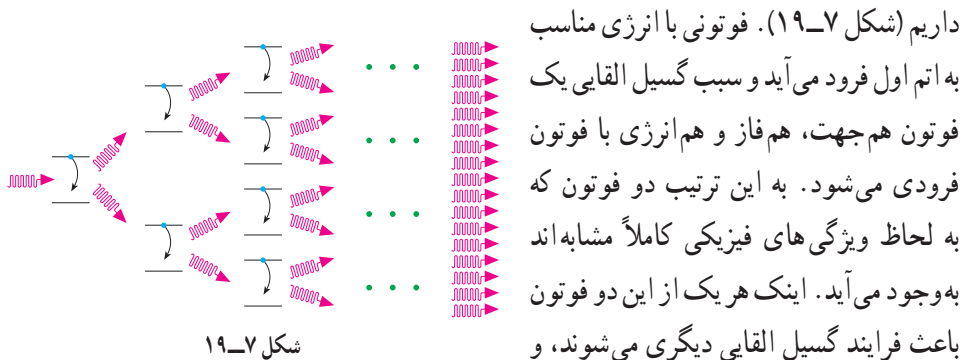


این برهم کنش در نمودارهای شکل ۷-۱۸ نشان داده شده است. شکل ۷-۱۸ الف اتم را در حالت برانگیخته و شکل ۷-۱۸ ب اتم را در حالت پایه نشان می‌دهد. توجه به این نکته ضروری است که اگر اتم در حالتی که در شکل ۷-۱۸ الف نشان داده شده است به حال خود هم گذاشته می‌شد، سرانجام الکترون با تابش یک فوتون به حالت پایین‌تر یا پایه می‌رفت، در حالی که با تابش یک فوتون به آن، نه تنها این فرایند سریع‌تر انجام می‌شود، بلکه همان‌طور که در شکل ۷-۱۸ ب نیز دیده می‌شود، فوتون گسیل شده از اتم، با فوتون فرودی هم جهت، هم فاز و هم انرژی است.



شکل ۷-۱۸

اکنون فرض کنید مجموعه‌ای از اتم‌های یکسان که همگی در یک حالت برانگیخته‌اند، در اختیار



شکل ۷-۱۹

داریم (شکل ۷-۱۹). فوتونی با انرژی مناسب به اتم اول فرود می‌آید و سبب گسیل القایی یک فوتون هم جهت، هم فاز و هم انرژی با فوتون فرودی می‌شود. به این ترتیب دو فوتون که به لحاظ ویژگی‌های فیزیکی کاملاً مشابه‌اند به وجود می‌آید. اینک هر یک از این دو فوتون باعث فرایند گسیل القایی دیگری می‌شوند، و

به این ترتیب چهار فوتون هم جهت، هم فاز و هم انرژی تولید می‌شود. این فرایند، یعنی دو برابر شدن تعداد فوتون‌ها در هر مرحله ادامه می‌یابد تا باریکه‌ی شدیدی از فوتون‌ها که همگی هم جهت، هم فاز و هم انرژی‌اند، ایجاد شود. این باریکه را یک باریکه‌ی لیزری می‌نامند. این پدیده که به ساده‌ترین شکل بیان شد، اساس کار لیزر را تشکیل می‌دهد. توجه داشته باشید که شکل ۷-۱۹ صرفاً طرح واره‌ای از فرایند گسیل القایی را نشان می‌دهد.

تمرین‌های فصل هفتم

- ۱- چند پدیده را نام ببرید که فیزیک کلاسیک قادر به توجیه آن نیست.
- ۲- دمای یک تکه زغال فروخته $T = 900 \text{ K}$ است. طول موجی را که با بیشترین تابندگی گسیل می‌شود، حساب کنید.
- ۳- یکی از سازوکارهای تعیین وضعیت یک ماهواره، مبتنی بر آشکارسازی امواج گسیل شده از سطح زمین است. اگر دمای سطح زمین را 27°C فرض کنیم، طول موج دریافتی توسط این آشکارساز چه مقدار و در چه محدوده‌ای از طیف موج الکترومغناطیسی خواهد بود؟
- ۴- حداقل انرژی لازم برای جدا کردن یک الکترون از سطح فلز سدیم برابر با $2/28 \text{ eV}$ است. الف) آیا فوتون‌هایی با طول موج 680 nm قادر به جدا کردن الکترون از سطح این فلز هستند؟ ب) طول موج قطع برای گسیل فوتوالکترون از سطح فلز سدیم چه قدر است و این طول موج مربوط به چه رنگی است؟
- ۵- در چه مواردی یک جسم، طیف پیوسته یا ناپیوسته گسیل می‌کند؟
- ۶- آیا ممکن است به کمک طیف گسیلی پیوسته یک جسم، به جنس آن پی برد؟ به کمک چه طیفی می‌توان این کار را انجام داد؟
- ۷- آیا ممکن است به کمک طیف خورشید، عناصر موجود در خورشید را شناسایی کرد؟ توضیح دهید.
- ۸- ضعف مدل اتمی رادرفورد را در مورد پایداری اتم توضیح دهید. بور چگونه پایداری اتم هیدروژن را توضیح داد؟
- ۹- ناپیوسته بودن طیف گسیلی اتم هیدروژن را براساس مدل اتمی بور توضیح دهید.
- ۱۰- در پدیده شفق قطبی مولکول‌های اکسیژن و نیتروژن جو در اثر برخورد با زبانه‌های خورشیدی یونیده یا برانگیخته می‌شوند. اتم‌های برانگیخته در بازگشت به حالت پایه خود، فوتون‌هایی

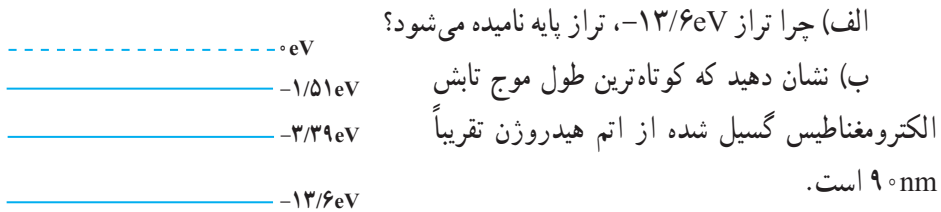
گسیل می کنند که برخی از رنگ های شفق قطبی ناشی از چنین گسیل هایی است. در گسیل فوتون از اتم نیتروژن، طول موج فوتون ها 63°nm است. رنگ و انرژی این فوتون ها را تعیین کنید.

۱۱- طول موج رشته لیمان مربوط به اتم هیدروژن را با استفاده از رابطه ریدبرگ حساب کنید. مکان این خطوط را در طیف موج های الکترومغناطیسی مشخص کنید.

۱۲- چه جنبه هایی از مدل بور در مورد اتم هیدروژن (الف) کلاسیکی، و (ب) غیر کلاسیکی است؟

۱۳- اگر الکترون در اتم هیدروژن در تراز $n = 4$ باشد، چه طول موج هایی را می تواند تابش کند؟

۱۴- شکل ۷-۲ تعدادی از ترازهای انرژی اتم هیدروژن را نشان می دهد.



شکل ۷-۲

ب) کدام گذار (بین دو تراز) می تواند به گسیل

فوتونی با طول موج 66°nm منجر شود؟

۱۵- یک لامپ بخار سدیم، فوتون هایی با طول موج 589nm گسیل می کند؛ اگر توان تابشی

لامپ 6W باشد، در هر ثانیه چند فوتون از این لامپ گسیل می شود؟

۱۶- طول موج فوتون های گسیلی از یک لامپ نارنجی رنگ برابر 60°nm است. بسامد و

انرژی فوتون های گسیلی را حساب کنید. انرژی را بر حسب ژول و همچنین الکترون-ولت بیان کنید.

۱۷- انرژی یونش، انرژی لازم برای خارج کردن یک الکترون از اتم است. انرژی یونش را

در موارد زیر حساب کنید.

الف) حالت پایه اتم هیدروژن ($n = 1$)

ب) تراز $n = 3$ اتم هیدروژن

۱۸- با استفاده از رابطه بور اختلاف انرژی $E_{n_1} - E_{n_2} = \Delta E(n_1 \rightarrow n_2)$ را حساب کنید و

نشان دهید که :

$$\Delta E(4 \rightarrow 2) = \Delta E(4 \rightarrow 3) + \Delta E(3 \rightarrow 2) \quad \text{الف)}$$

$$\Delta E(4 \rightarrow 1) = \Delta E(4 \rightarrow 2) + \Delta E(2 \rightarrow 1) \quad \text{ب)}$$

۱۹- یک اتم هیدروژن در حالت $n = 6$ قرار دارد،

الف) با در نظر گرفتن تمام گذارهای ممکن، اگر این اتم به حالت پایه برود، چند نوع فوتون با انرژی مختلف گسیل می‌شود؟

ب) فرض کنید فقط گذارهای $\Delta n = 1$ مجاز باشند، در این صورت چند نوع فوتون با انرژی مختلف گسیل خواهد شد؟

۲۰- یکی از مشکلاتی که نازک شدن لایه اوزن به همراه دارد عبور پرتوهای فرابنفش از جو زمین است. توضیح دهید چرا پرتوهای فرابنفش موجب سوختگی پوست می‌شوند، در حالی که پرتوهای نور مرئی این مشکل را به وجود نمی‌آورند؟

۲۱- توان باریکه نور خروجی از یک لیزر گازی هلیم نئون برابر $5/0$ میلی وات است. اگر توان ورودی این لیزر 50 W باشد،

الف) بازده این لیزر را حساب کنید.

ب) اگر طول موج باریکه نور خروجی 633 nm باشد، در هر ثانیه چند فوتون از این لیزر گسیل می‌شود؟

۲۲- پایین ترین بسامد رایج موج‌های الکترومغناطیسی، بسامد خطوط انتقال نیروست و مقدار آن برابر 60 Hz است. بالاترین بسامدها مربوط به پرتوهای گاما است و مقدار تقریبی آنها $10^{21} \times 10^0\text{ Hz}$ است. بسامدهای پایین تر و بالاتر نیز وجود دارند. اما نسبتاً کمیاب اند.

الف) انرژی یک فوتون را در هر یک از این بسامدها برحسب الکترون ولت حساب کنید.

ب) برای آسیب رساندن به یک مولکول DNA چه تعداد از فوتون‌های کم بسامد لازم است؟ (برای آسیب رساندن به مولکول DNA تقریباً 1 eV انرژی لازم است.)

پ) چند مولکول DNA توسط یکی از فوتون‌های پرتو گاما منهدم می‌شوند؟