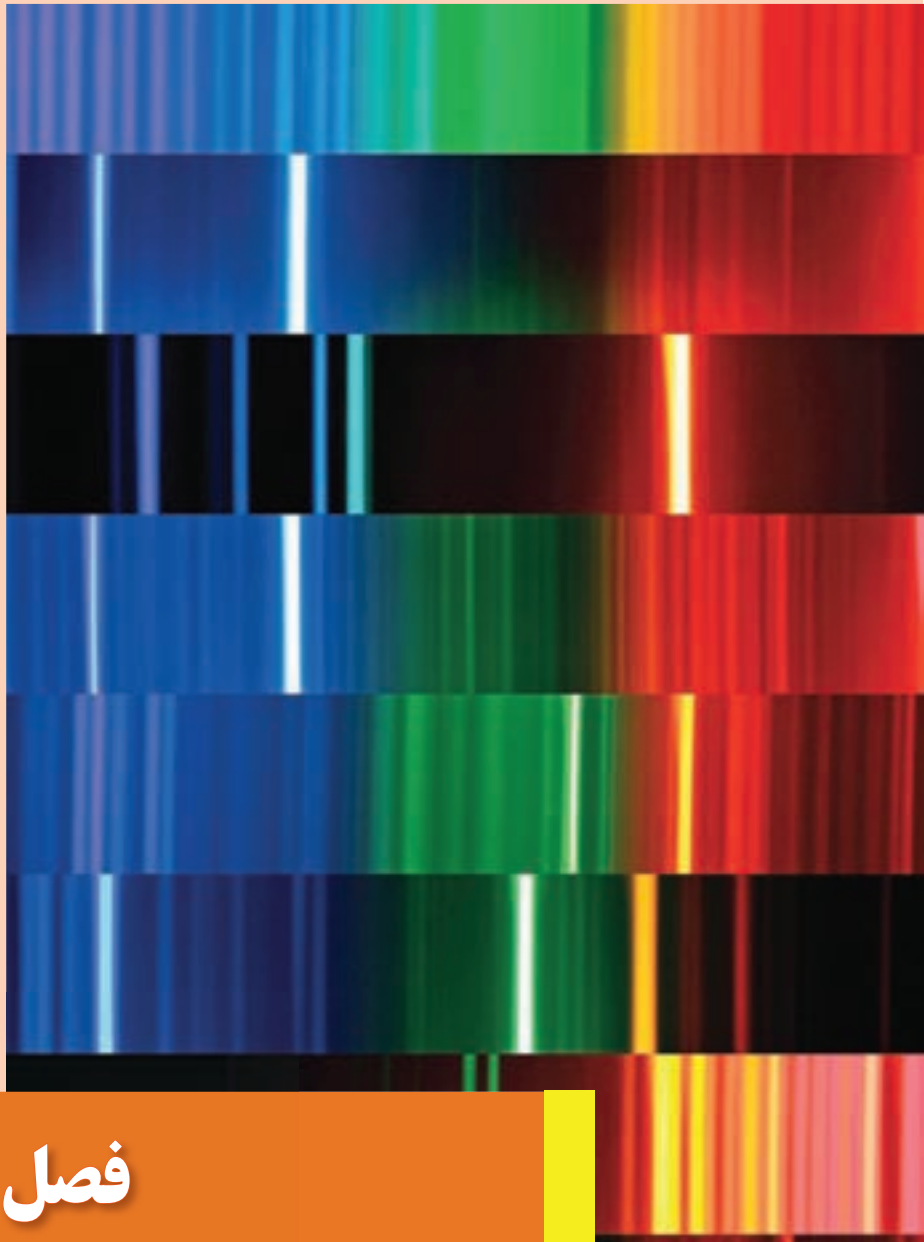
آشنایی با فیزیک اتمی



فصل ۷

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. ازجمله دیدیم که به کمک قانون‌های نیوتون می‌توان حرکت هر جسم را تحت تأثیر نیروهای وارد برآن 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 به‌دست 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 سدهٔ نوزدهم میلادی توانسته بودند برای بسیاری از پدیده‌های طبیعی توجیه‌های قانع‌کننده‌ای ارائه کنند. مجموعهٔ 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 سدهٔ نوزدهم میلادی دانشمندان پدیده‌هایی را مشاهده کردند که دیگر با فیزیک کلاسیک قابل توجیه نبودند. امروزه به مجموعهٔ نظریه‌ها و قانون‌هایی که به توجیه این پدیده‌ها می‌پردازد، فیزیک جدید (یا نوین) می‌گویند.

شالودهٔ فیزیک جدید را نظریه‌های «نسبیت» و «کوانتومی» تشکیل می‌دهد. نظریهٔ نسبیت مربوط به مطالعهٔ پدیده‌ها در سرعت‌های بسیار زیاد و نزدیک به سرعت نور است. نظریهٔ کوانتومی نیز به مطالعهٔ پدیده‌ها در مقیاس‌های بسیار کوچک،مانند مولکول‌ها، اتم‌ها و ذرّه‌های ریزی که اتم‌ها را می‌سازند، می‌پردازد. ذرّه‌هایی که اتم‌ها را می‌سازند، ذرّه‌های زیرــ اتمی نامیده می‌شوند. این نام اشاره بر آن دارد که این ذرّه‌ها اجزای اتم‌ها هستند و از اتم‌ها کوچک‌ترند.

نظریه‌های نسبیت و کوانتومی هر دو طی بیست و پنج سال اول سدهٔ بیستم مطرح شدند. نظریهٔ نسبیت را برای نخستین بار آلبرت اینشتین عرضه کرد. نظریهٔ کوانتومی نیز نتیجهٔ 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 ازسطح این کتاب است.

۷ــ۱ــ نظریهٔ کوانتومی

آیا تاکنون به نوری که از زغال‌افروخته و یا 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 همهٔ اجسام در **هر دمایی** تابش‌های الکترومغناطیسی گسیل می‌شود.

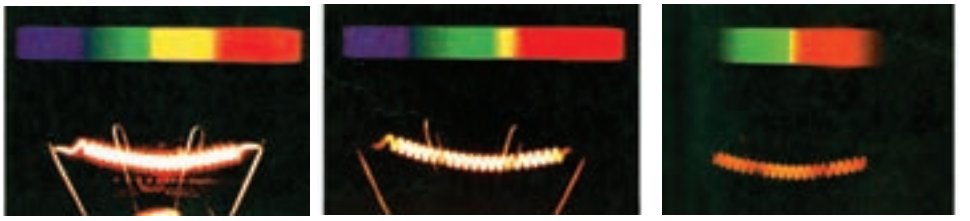
گسیل تابش‌های الکترومغناطیسی از سطح جسم‌ها را **تابش گرمایی** نیز می‌نامند. در کتاب فیزیک۱ و آزمایشگاه دیدیم که چگونه می‌توان با عبور یک نور سفید از منشور، آن را به رنگ‌های مختلف (که در نتیجه طول موج‌های مختلف دارند) تجزیه کرد و طیف آن را به‌دست آورد. اگر بین طول موج‌هایی که در یک طیف وجود دارد فاصله‌ای 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 همهٔ طول موج‌ها از فروسرخ، مرئی و فرابنفش به‌صورت یک طیف پیوسته وجود دارد.

در دمای پایین، مثلاً در دمای اتاق یا کمی بالاتر، بیشترین تابش گسیل شده دارای طول موج‌هایی در ناحیهٔ فروسرخ 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، به‌تدریج از طول موج‌های بلند به سمت طول موج‌های کوتاه‌تر و به طرف نور مرئی نزدیک می‌شوند. وقتی دمای جسم به اندازهٔ کافی بالا رود، از آن نور قرمزرنگی گسیل می‌شود، (شکل۷ــ۱).

شکل ۷ــ۱

در دماهای باز هم بالاتر، اجسامی مانند رشتهٔ تنگستن داغ درون لامپ روشنایی، نور سفید (یعنی نوری با طیف پیوسته که همهٔ طول موج‌های نور مرئی را در طیف خود دارد) گسیل می‌کنند(شکل ۷ــ۲).



(الف) (ب) (پ)

شکل ۷ــ۲ــ رشتهٔ 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.

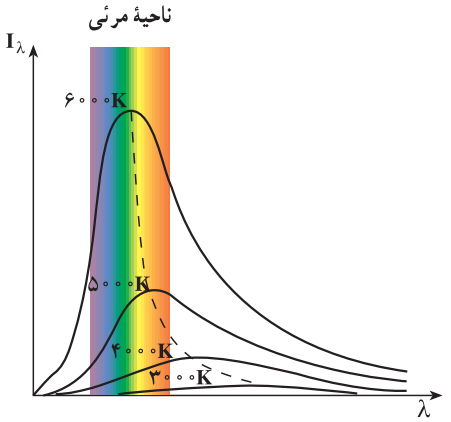
پرسش ۷ـ۱

آیا می‌توانید بگویید در جایی که نشسته‌اید تابش گسیل شده از چه اجسامی برشما 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 گسیل‌شده از آن، هم به دما و هم به ویژگی‌های سطح آن جسم بستگی دارد. **بنابه تعریف، شدت تابشی، یک جسم برابر است با مقدار کل انرژی تابش‌های الکترومغناطیسی‌ای که در بازهٔ 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 گسترهٔ طول موج گسیل می‌شود. اگر یکای طول موج را میکرون (μm) و یکای سطح را سانتی‌مترمربع (cm^2) اختیار کنیم، یکای تابندگی $W/cm^2.\mu m$ خواهد شد.**

تابندگی یک جسم (I_λ) در طول موج‌ها و دماهای مختلف اندازه‌گیری شده و نتیجهٔ آن در شکل ۷ــ۳ برای چهار دمای مختلف با تقریب رسم شده است. گسترهٔ طول موج‌های مرئی نیز در این شکل مشخص شده است. سطح زیر نمودار تابندگی برحسب طول موج برابر با شدت تابشی جسم است. همان‌طور که از شکل پیداست با افزایش دما سطح زیر منحنی بیشتر می‌شود.



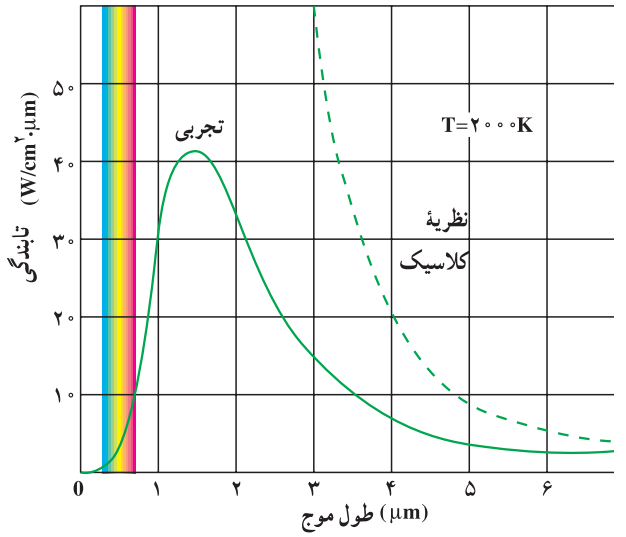
شکل ۷ــ۳ــ نمودار تقریبی تابندگی پرتوی گسیل‌شده از جسم بر حسب طول‌موج

فعالیت ۷ـ۱

با بررسی شکل ۷ــ۳ 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 همهٔ طول موج‌ها با تابندگی یکسان تابش می‌شوند یا نه؟ پ) اگر نتیجهٔ دیگری از این بررسی به‌دست آورده‌اید به کلاس گزارش کنید.

همان‌طور که در شکل ۷ــ۳ می‌بینید، ***هرچه دمای جسم بیشتر باشد، بیشینهٔ 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 درفضا می‌شود. بنا به نظریهٔ فیزیک کلاسیک تابش گرمایی که از سطح یک جسم گسیل می‌شود نیز از نوسان‌های ذره‌های بارداری که درون جسم و در نزدیکی سطح آن، واقع‌اند سرچشمه می‌گیرد.



شکل ۷ــ۴

تا ابتدای سدهٔ بیستم میلادی، فیزیک‌دانان نتوانسته بودند با به‌کار بردن قانون‌ها و مفهوم‌های فیزیک کلاسیک، از جمله موج‌های الکترومغناطیسی گسیل شده از سطح یک جسم، منحنی های تجربی شکل ۷ــ۳ را توجیه کنند. به‌عبارت دیگر از محاسبه‌های آنان نتیجه شد که تابندگی با توان چهارم طول موج نسبت عکس دارد. این موضوع سبب می‌شود که در طول موج های کوتاه تابندگی جسم به سمت بی‌نهایت میل کند که با نتیجه‌های تجربی شکل ۷ــ۳ سازگاری نداشت. در شکل ۷ــ۴ منحنی حاصل از محاسبه‌های نظری براساس فیزیک کلاسیک (خط‌چین) همراه با یک منحنی تجربی برای دمای ۲۰۰۰ کلوین نشان داده شده است.

فعالیت ۷ــ۲

در گروه خود دو منحنی شکل ۷ــ۴ را مورد بحث قرار دهید و موارد ناسازگاری بین آن دو را مشخص کنید.

همان‌طور که در شکل ۷ــ۴ 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، رابطهٔ زیر برقرار است که **قانون جابه‌جایی وین** نام دارد.

$$\lambda_m T = \text{مقدار ثابت} = ۲/۹ \times ۱۰^{-۳} m.K \qquad (۱ــ۷)$$

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

مثال ۷ـ۱

دمای بدن انسان $37^{\circ}C$ است با محاسبه نشان دهید بیشینهٔ تابندگی بدن انسان در چه ناحیه‌ای از طیف موج‌های الکترومغناطیسی است.

پاسخ

$$\lambda_m T = ۲/۹ \times ۱۰^{-۳} m.K$$

$$\lambda_m = \frac{۲/۹ \times ۱۰^{-۳}}{۲۷۳ + ۳۷}$$

$$\Rightarrow \lambda_m \simeq ۹/۳۵ \times ۱۰^{-۶} m$$

با استفاده از شکل ۶ـ۹، 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 گسیل‌شده 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.

کمیّت 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 هرمقداری 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 کمّیت‌هایی 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 کمیّت‌های گسسته را «کوانتومی» می‌نامند. کمترین مقدار یک کمّیّت کوانتومی را مقدار پایه یا «کوانتوم» آن کمّیّت می‌خوانند.

برای مثال، در مبحث الکتریسیته دیده‌ایم که مقدار بار الکتریکی موجود در یک جسم باردار

مضرب درستی از بار یک الکترون ($e = 1/6 \times 10^{-19} C$) است. به این ترتیب می‌گوییم که بار الکتریکی هر جسم باردار یک کمیّت کوانتومی است و هر کوانتوم آن برابر بار الکتریکی یک الکترون است.

در فصل ۵ همین کتاب نیز دیدیم که بسامد حاصل از موج ایستاده در طنابی که دو سر آن ثابت شده است به‌صورت $f_n = nf_1$ و درواقع مضرب صحیحی از مقدار پایهٔ آن، یعنی بسامد هماهنگ اول است و بنابراین بسامد امواج ایستاده تشکیل شده در طناب نیز کمیتی گسسته است.

نظریهٔ پلانک دربارهٔ تابش : بنابر نظریهٔ پلانک مقدار انرژی‌ای که جسم به‌صورت تابش‌های الکترومغناطیسی گسیل می‌کند همواره مضرب درستی از یک مقدار پایه است و این مقدار پایه به بسامد موج الکترومغناطیسی بستگی دارد. به این ترتیب داریم :

$$E = nhf \qquad (۲ــ۷)$$

در این رابطه n یک عدد صحیح مثبت است و ضریب h مقدار ثابتی است که ثابت پلانک نام دارد. نخستین برآورد این ثابت توسط پلانک به‌کمک تطبیق نتیجهٔ محاسبه با منحنی‌های تجربی مربوط به تابش جسم صورت گرفت. هم‌اکنون مقدار پذیرفته شده برای این ثابت برابر با $h = 6/63 \times 10^{-34} Js$ است.

hf *کوانتوم انرژی* تابشی گسیل شده با بسامد f است و nکه تعداد کوانتوم‌ها را مشخص می‌کند، عدد کوانتومی نام دارد.

در رابطهٔ ۷ــ۲ اگر ثابت پلانک را برحسب ژول ثانیه قرار دهیم، انرژی برحسب ژول به‌دست می‌آید؛ ولی در بحث دربارهٔ اجزای سازندهٔ اتم‌ها، ژول به دلیل آنکه یکای بزرگی است مناسب نیست و معمولاً از یکای دیگری برای انرژی به نام الکترون ولت (eV) استفاده می‌شود. **یک الکترون ولت برابر مقدار انرژی موردنیاز برای عبور یک الکترون از اختلاف پتانسیل ۱ ولت در خلأ است.** درحالی که یک ژول برابر است با مقدار انرژی بار الکتریکی برابر یک کولن در عبور از اختلاف پتانسیل یک ولت است. در نتیجه رابطهٔ بین الکترون ولت و ژول به‌صورت زیر است :

$1eV = 1/6 \times 10^{-19} J = (1/6 \times 10^{-19} C) \times (1V)$ = انرژی یک الکترون در عبور از اختلاف پتانسیل یک ولت

تمرین ۷ــ۱

ثابت پلانک را برحسب eV.s به‌دست آورید.

تمرین ۷ـ۲

نور زرد با بسامد تقریبی $۶ \times ۱۰^{۱۴} Hz$، بسامد اصلی نور خورشید را تشکیل می‌دهد. انرژی‌ای که هر کوانتوم این نور (فوتون) حمل می‌کند برحسب eV چه‌مقدار است؟

تمرین ۷ـ۳

انرژی یک کوانتوم رنگ معینی از نور مرئی، برابر $۵ \times ۱۰^{-۱۹} J$ است. رنگ این نور را مشخص کنید.

تمرین ۷ـ۴

بیشترین طول موج گسیلی که از بدن انسان تابش می‌شود برابر $\lambda = ۹۴۰ \mu m$ است.

الف) بسامد این تابش چه‌مقدار است؟

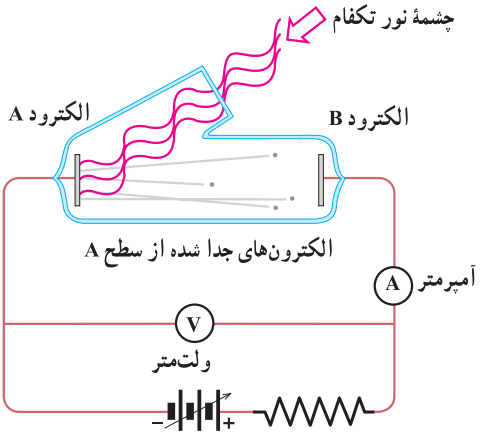
ب) نوع این تابش در چه گستره‌ای از طیف موج‌های الکترومغناطیسی قرار دارد؟

پ) انرژی‌ای که توسط هر کوانتوم این تابش الکترومغناطیسی حمل می‌شود برحسب eV چه‌مقدار است؟

۷ـ۲ـ فوتون و پدیدهٔ فوتوالکتریک

در سال ۱۸۸۷ میلادی، هانریش هرتزدانشمند آلمانی، مشاهده کرد که وقتی نوری با طول موج بسیار کوتاه ــ مانند نور فرابنفش ــ به کلاهک فلزی یک برق‌نمای باردار منفی می‌تابد، باعث تخلیهٔ برق‌نما می‌شود. آزمایش‌های دیگر نشان دادند که این تخلیهٔ 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 پدیدهٔ **فوتوالکتریک** و الکترون‌های گسیل شده از سطح فلز را **فوتوالکترون** می‌نامند.

برای بررسی پدیدهٔ فوتوالکتریک از دستگاهی مطابق شکل ۷ــ۵ استفاده می‌کنیم. در این دستگاه دو الکترود فلزی A و B در یک محفظهٔ خلأ قرار دارند و از بیرون به یک منبع ولتاژ قابل تنظیم متصل شده‌اند. الکترود A در مقابل یک چشمهٔ نور تکفام (تک بسامد) قرار دارد.



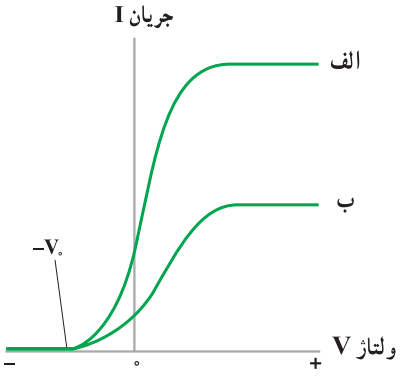
شکل ۷ــ۵

آزمایش نشان می‌دهد که اگر نوری بر الکترود A نتابد هر قدر هم که ولتاژ بالا باشد، جریانی در مدار مشاهده نمی‌شود. ولی هنگامی که نوری با بسامد مناسب به الکترود 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 الکترود A و گسیل آنها شده است. اگر این الکترون‌ها انرژی جنبشی کافی داشته باشند، به الکترود B می‌رسند و جریان برقرار می‌شود.

با تغییر دادن ولتاژ V می‌توانیم منحنی تغییرات جریان I را برحسب V به‌دست آوریم.

در شکل ۷ــ۶ منحنی تغییرات جریان برحسب ولتاژ برای دو مقدار مختلف شدت نور فرودی بر الکترود A نشان داده شده است. بسامد نور فرودی در هر دو حالت، یکسان است. مقدارهای مثبت V مربوط به شرایطی است که الکترود B به پایانهٔ مثبت منبع ولتاژ متصل است.



شکل ۷ــ۶

شکل ۷ــ۷

همان‌گونه که منحنی (الف) نشان می‌دهد برای مقدارهای مثبت V، با افزایش ولتاژ V، نخست جریان افزایش می‌یابد و سپس به یک مقدار ثابت می‌رسد که افزایش ولتاژ V دیگر اثری بر مقدار آن ندارد.

این موضوع را می‌توان به این صورت توضیح داد که ولتاژ V مثبت باعث می‌شود که فوتوالکترون‌ها به سمت الکترود B کشیده شوند و با افزایش ولتاژ V تعداد بیشتری از فوتوالکترون‌ها به‌سمت B کشیده می‌شوند و جریان زیاد می‌شود. ولی پس از آن که ولتاژ V به‌حدی رسید که الکترود B بتواند تمام فوتوالکترون‌ها را جمع کند، دیگر با افزایش ولتاژ V، جریان زیاد نمی‌شود.

نکتهٔ جالب توجه دیگری که در این منحنی دیده می‌شود آن است که برای مقدارهای منفی V (یعنی وقتی که الکترود B به پایانهٔ منفی منبع ولتاژ متصل شده است) جهت جریان عوض نمی‌شود. با کاهش ولتاژ V، جریان (مثبت) کاهش می‌یابد، تا این‌که به‌ازای یک ولتاژ $_{\circ}V-$ که ***ولتاژ متوقف‌کننده*** نامیده می‌شود، جریان صفر می‌شود و به‌ازای مقدارهای کمتر از $_{\circ}V-$ جریان هم‌چنان صفر می‌ماند.

برای بیان این وضعیت می‌توان گفت که برای مقدارهای منفی V، الکترود A، که اکنون به پایانهٔ مثبت متصل است، فوتوالکترون‌ها را به‌سوی خود می‌کشد و از انرژی جنبشی آنها می‌کاهد. در نتیجه تعداد کمتری از آنها می‌توانند به B برسند. در ولتاژ $_{\circ}V-$ هیچ فوتوالکترونی به B نمی‌رسد.

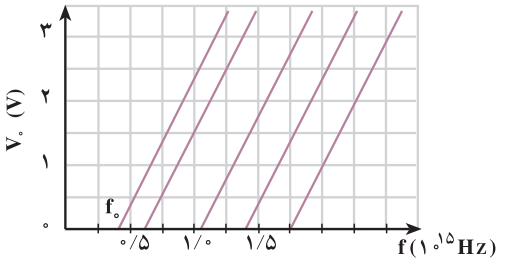
منحنی (ب) مربوط به آزمایشی است که در آن شدت نور فرودی را نصف کرده‌ایم (بسامد نور همان مقدار قبل را دارد). همان‌گونه که از منحنی پیداست مقدار $_{\circ}V$ برای هر دو منحنی یکی است یعنی،

مقدار ولتاژ متوقف کننده به‌شدت پرتوی فرودی بستگی ندارد.

اگر این آزمایش را با نور تکفام با بسامد دیگری تکرار کنیم، منحنی‌های تغییرات جریان برحسب ولتاژ را به همان صورت منحنی‌های شکل ۷ــ۶ به‌دست می‌آوریم تنها با این تفاوت که ولتاژ متوقف‌کننده مقدار دیگری خواهد داشت؛ یعنی، ***مقدار ولتاژ متوقف‌کننده به بسامد نور فرودی*** بستگی دارد.

اگر در دستگاه شکل ۷ــ۵ جنس الکترود فلزی A را تغییر دهیم، بازهم همین نتیجه‌ها را به‌دست می‌آوریم، ولی در این مورد نیز مقدار ولتاژ متوقف‌کننده تغییر می‌کند، به عبارت دیگر **مقدار ولتاژ متوقف‌کننده به جنس الکترود فلزی A بستگی دارد.**

رابرت میلیکان با آزمایش‌های دقیقی که در طول ۱۰ سال انجام داد مقدار ولتاژ متوقف‌کننده را برای فلزهای متفاوت و برای بسامدهای متفاوت پرتوی فرودی اندازه گرفت.



شکل ۷ــ۸

درشکل ۷ــ۸ منحنی تغییرات ولتاژ متوقف‌کننده برحسب بسامد پرتوی نور فرودی، برای چند فلز مختلف، نشان داده شده است. این منحنی‌ها نشان می‌دهند که هرقدر بسامد پرتوی فرودی برالکترود A کمتر باشد، ولتاژ قطع‌کننده نیز کمتر خواهد بود. مقدارهای ولتاژ قطع‌کننده برای هر فلز بر روی یک خط‌راست قرار دارد. همان‌گونه که در شکل می‌بینید هر خط، محور بسامد را، در بسامد معینی کـه آن را با f_0 نشان می‌دهیم قطع می‌کند. تجربه نشان می‌دهد که اگر بسامد پرتوی تابیده بر الکترود فلزی A از f_0 مربوط به آن فلز کمتر باشد، پدیدهٔ فوتوالکتریک رخ نمی‌دهد. از این رو f_0 را بسامد قطع می‌نامند.

ناتوانی فیزیک کلاسیک در تفسیر پدیدهٔ فوتوالکتریک : این پدیده که تاباندن نور بر یک فلز باعث جدا شدن الکترون‌های آن می‌شود، با برداشت‌های فیزیک کلاسیک کاملاً قابل قبول است؛ زیرا با توجه به آن که نور نیز از جنس موج‌های الکترومغناطیسی است، می‌توان نتیجه گرفت که میدان الکتریکی آن موج‌ها، بر الکترون نیروی $-e\vec{E}$ وارد می‌کند؛ در نتیجه الکترون‌ها شتاب پیدا می‌کنند و انرژی جنبشی آنها افزایش می‌یابد و تعدادی از آنها که انرژی کافی کسب می‌کنند می‌توانند از فلز خارج شوند. حال اگر انرژی جنبشی فوتوالکترون به هنگام خروج از سطح الکترود A برابر K_A و به‌هنگام رسیدن به الکترود B برابر K_B باشد، و بین دو الکترود ولتاژ V برقرار باشد، بنابر قضیهٔ کار ــ انرژی داریم :

$$eV = K_B - K_A \qquad (۳ــ۷)$$

که در آن eV کار نیروی وارد بر الکترون از سوی میدان الکتریکی بین الکترودها در تغییر مکان از A به B است. اگر ولتاژ V منفی باشد (یعنی الکترود B به پایانهٔ منفی منبع ولتاژ متصل شده باشد) K_B کمتر از K_A خواهد بود.

اگر این ولتاژ منفی برابر ولتاژ متوقف‌کننده باشد ($V = -V_0$)، تنها آن الکترون‌هایی که بیشترین انرژی جنبشی را دارند می‌توانند تا نزدیکی الکترود B برسند. برای این الکترون‌ها داریم $K_A = K_{\text{بیشینه}}$، این الکترون‌ها جذب الکترود B نمی‌شوند و برمی‌گردند؛ لذا برای آنها داریم $K_B = 0$ در نتیجه از رابطهٔ ۷ــ۳ داریم :

$$-eV_{\circ} = -K_{\text{بیشینه}} \Longrightarrow eV_{\circ} = K_{\text{بیشینه}} \qquad (۴_۷)$$

بنابراین با داشتن ولتاژ متوقف کننده، بیشینهٔ انرژی جنبشی فوتوالکترون‌ها به هنگام خروج از الکترود A مشخص می‌شود.

فیزیک کلاسیک در تفسیر نتیجه‌های تجربی مربوط به پدیدهٔ فوتوالکتریک با دو مشکل روبه‌رو شد.

۱ــ بنابر قانون‌های فیزیک کلاسیک، با افزایش شدت نور فرودی بر الکترود A، و در نتیجه افزایش میدان الکتریکی مربوط به موج الکترومغناطیسی، می‌توانیم $K_{\text{بیشینه}}$ را افزایش دهیم؛ درحالی که در منحنی شکل ۷ــ۶ دیدیم که $V_{\circ}$ و در نتیجه $K_{\text{بیشینه}}$ مستقل از شدت نوری است که بر الکترود A می‌تابد.

۲ــ اگر شدت نور برای گسیل فوتوالکترون‌ها از الکترود A کافی باشد، اثر فوتوالکتریک باید در هر بسامدی رخ دهد؛ در حالی که دیدیم اگر بسامد نوری که بر A فرود می‌آید کمتر از بسامد قطع باشد، اثر فوتوالکتریک رخ نمی‌دهد.

تفسیر کوانتومی پدیدهٔ فوتوالکتریک : پیش از این دیدیم که بنابر فرضیهٔ 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 پدیدهٔ فوتوالکتریک، با استفاده از فرضیهٔ 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 قرمز انرژی کمتری دارد. اگر بسامد یک موج الکترومغناطیسی برابر f باشد، انرژی فوتون آن برابر خواهد بود با

$$E = hf \qquad (۵_۷)$$

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

$$E = nhf \qquad (۶_۷)$$

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

مثال ۷ـ۲

الف) انرژی فوتون نور زرد با طول موج میانگین ۵۸۹nm را برحسب الکترون‌ولت به‌دست آورید. ثابت پلانک برابر است با $h = ۴/۱۴ \times ۱۰^{-۱۵} eVs$.

ب) تعداد فوتون‌هایی را که در یک ثانیه از یک لامپ زرد ۶۰ واتی گسیل می‌شوند، محاسبه کنید.

پاسخ

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

$$\lambda f = c$$

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

$$= \frac{۴/۱۴ \times ۱۰^{-۱۵} \times ۳ \times ۱۰^{۸}}{۵۸۹ \times ۱۰^{-۹}}$$

$$= ۲/۱۱ \text{ eV}$$

ب)

$$E_T = Pt = ۶۰ \times ۱ = ۶۰J = ۳۷/۵ \times ۱۰^{۱۹} eV$$

$$E_T = nhf = nE$$

$$۳۷/۵ \times ۱۰^{۱۹} = n \times ۲/۱۱$$

$$n \simeq ۱/۸ \times ۱۰^{۲۰}$$

یعنی در هر ثانیه $۱/۸ \times ۱۰^{۲۰}$ فوتون از این لامپ گسیل می‌شود که عدد بسیار بزرگی است.

اینشتین همچنین فرض کرد که در اثر فوتوالکتریک، یک فوتون (با انرژی hf) به‌طور کامل توسط الکترون جذب می‌شود و انرژی خود را به الکترون می‌دهد. در نتیجه انرژی جنبشی فوتوالکترون گسیل‌شده به هنگام خروج از سطح فلز برابر است با :

$$K = hf - W \qquad (۷ـ۷)$$

که در آن W برابر است با کار لازم برای غلبه بر نیروهای داخلی وارد بر الکترون در فلز. 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 گسیل‌شده از آن برابر خواهد بود با :

$$K_{\text{بیشینه}} = hf - W_0 \qquad (۸ــ۷)$$

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

با استفاده از رابطهٔ **۴ــ۷** می‌توانیم رابطهٔ **۸ــ۷** را به‌صورت زیر بنویسیم :

$$eV_0 = hf - W_0 \qquad (۹ــ۷)$$

فعالیت ۳ــ۷

با بحث و بررسی در گروه خود، نشان دهید که دو مشکلی که در تفسیر کلاسیکی نتیجه‌های تجربی پدیدهٔ فوتوالکتریک وجود داشت در رابطهٔ **۹ــ۷** وجود ندارد.

رابطهٔ **۹ــ۷**، بین ولتاژ متوقف کنندهٔ V_0 و بسامد فوتون فرودی بر الکترود A ،یک رابطهٔ خطی است و منحنی آن یک خط راست است که کاملاً با منحنی‌های تجربی در شکل **۹ــ۷** سازگار است.

فعالیت ۴ــ۷

منحنی تغییرات V_0 بر حسب بسامد f را با استفاده از رابطهٔ **۹ــ۷** رسم کنید. با بحث و بررسی درگروه خود مشخص کنید که شیب این خط و طول از مبدأ آن، هر یک چه کمیت‌هایی را مشخص می‌کنند؟

در رابطهٔ **۹ــ۷** اگر hf از W_0 کوچک‌تر باشد، هیچ الکترونی از فلز خارج نمی‌شود. در نتیجه hf حداقل می‌تواند برابر W_0 باشد. به این ترتیب، بسامد قطع از رابطهٔ زیر به‌دست می‌آید :

$$f_0 = \frac{W_0}{h} \qquad (۱۰ــ۷)$$

مثال ۷ـ۳

تابع کار تنگستن ۴/۵۲eV است.

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

ب) بیشینه انرژی جنبشی الکترون‌ها را هنگامی که طول موج ۱۹۸nm به‌کار می‌رود، حساب کنید. ولتاژ متوقف‌کننده در این حالت چه‌مقدار است؟

پاسخ

الف) بسامد قطع برابر است با

$$f_{\circ} = \frac{W_{\circ}}{h} = \frac{۴/۵۲ \times ۱/۶ \times ۱۰^{-۱۹} J}{۶/۶۳ \times ۱۰^{-۳۴} J.s}$$

$$= ۱/۰۹ \times ۱۰^{۱۵} s^{-۱}$$

با توجه به رابطهٔ $\lambda_{\circ} = \frac{c}{f_{\circ}}$، طول موج قطع برابر است با

$$\lambda_{\circ} = \frac{۳ \times ۱۰^{۸}}{۱/۰۹ \times ۱۰^{۱۵}} = ۲/۷ \times ۱۰^{-۷} m$$

$$= ۲۷۰ nm$$

ب)

$$K_{\text{بیشینه}} = hf - W_{\circ}$$

$$= \frac{hc}{\lambda} - W_{\circ}$$

$$= \frac{۱۲۴۰ eV.nm}{۱۹۸ nm} - ۴/۵۲ eV$$

$$= ۱/۷۴ eV \simeq ۲/۷ \times ۱۰^{-۱۹} J$$

ولتاژ متوقف‌کننده متناظر با $K_{\text{بیشینه}}$ است؛ بنابراین :

$$V_{\circ} = \frac{K_{\text{بیشینه}}}{e} = \frac{۱/۷۴ eV}{e} = ۱/۷۴ V$$

تمرین ۷ـ۵

طول موج قطع برای اثر فوتوالکتریک در یک فلز معین برابر ۲۵۴nm است.

الف) تابع کار این فلز برحسب الکترون ـ ولت چه‌مقدار است؟

ب) آیا اثر فوتوالکتریک به ازای $\lambda > 254nm$ مشاهده خواهد شد یا به ازای $\lambda < 254nm$؟ چرا؟

تمرین ۷ـ۶

تابع کار فلز روی ۴/۳۱eV است. هرگاه نور بر سطحی از جنس روی بتابد و فوتوالکترون‌ها مشاهده شوند،

الف) بلندترین طول موجی که سبب گسیل فوتوالکترون‌ها می‌شود چه‌مقدار است؟

ب) وقتی نور به طول موج ۲۲۰nm به‌کار گرفته شود ولتاژ متوقف‌کننده چه‌مقدار است؟

۷ـ۳ـ طیف اتمی

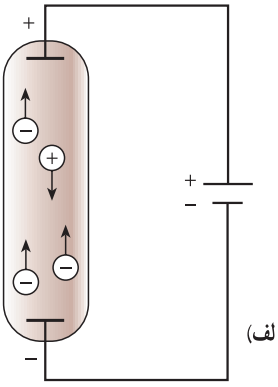
علاوه‌بر آنچه تا اینجا به آنها اشاره کردیم، پدیده‌های دیگری نیز هستند که فیزیک کلاسیک قادر به تفسیر آنها نبود. لذا فیزیک‌دانان با فرض‌های غیرکلاسیکی ـ مانند فرضیه‌های پلانک و اینشتین که قبلاً به آنها اشاره شد ـ توانستند این پدیده‌ها را به‌خوبی تفسیر کنند. توصیف این پدیده‌ها فراتر ازسطح این کتاب است و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

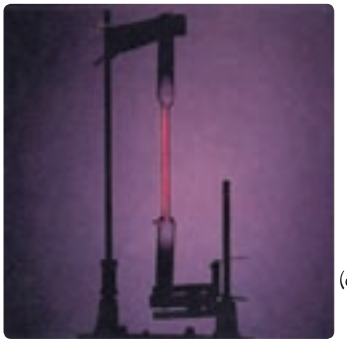
شکل ۷ـ۹

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 ۰/۴μm تا نور قرمز با طول موج حدود ۰/۷μm، تشکیل شده است. طیف نور سفید که یک طیف پیوسته است در شکل ۷ـ۹ نشان داده شده است.

به همین ترتیب می‌توان طیف هر نوری را که از رنگ‌های مختلف تشکیل شده باشد، توسط پاشیدگی در منشور شناسایی کرد. پیش از این با تابش گرمایی که از سطح جسم‌های جامد گسیل می‌شود، آشنا شدیم و دیدیم که این تابش دارای طیف پیوسته است.

اکنون به بررسی نوع دیگری از تابش می‌پردازیم. این تابش توسط لامپ‌های حاوی بخار بسیار رقیق عنصرها گسیل می‌شود. این لامپ‌ها مطابق شکل ۷ــ۱۰ــ الف به‌صورت لوله‌های باریک شیشه‌ای هستند که درون آنها یک گاز رقیق در فشار کم وجود دارد. دو الکترود به نام‌های کاتد و آند در دو انتهای لوله قرار دارند. اگر بین این دو الکترود ولتاژ بالایی برقرارشود، اتم‌های گاز درون لامپ مطابق شکل ۷ــ۱۰ــ ب و پ شروع به گسیل نور می‌کنند. نوری که از لامپ‌های حاوی بخارعنصرهای متفاوت گسیل می‌شود، با یکدیگر تفاوت دارد. برای مثال نوری که اتم‌های بخار جیوه گسیل می‌کنند، همان‌گونه که در شکل ۷ــ۱۰ نشان داده شده است به رنگ نیلی ــ آبی است. اگر این نور را مطابق شکل۷ــ۱۰ از منشور بگذرانیم و طیف آن را تشکیل دهیم، می‌بینیم که این طیف پیوسته نیست، بلکه تنها از چند خط رنگی جدا ازهم با طول موج‌های معین تشکیل شده است.

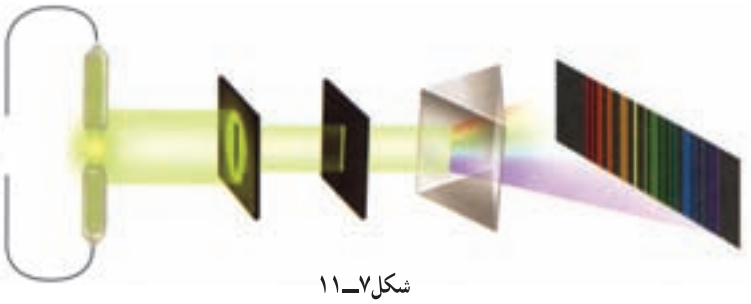



(ب)

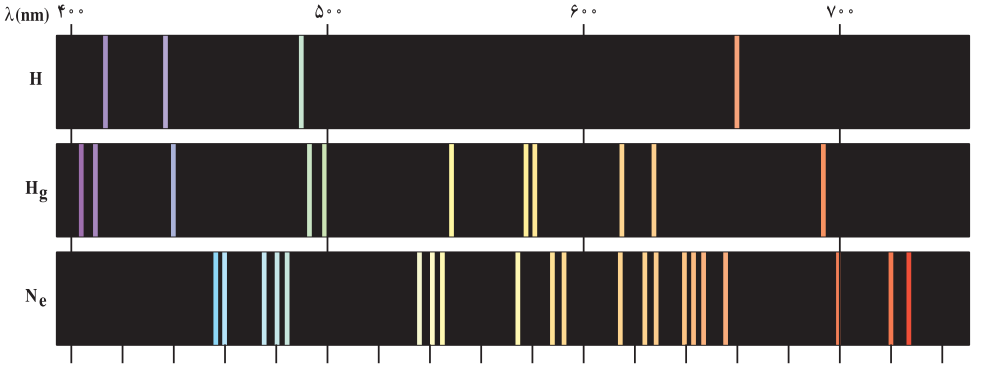
(پ)

شکل۷ــ۱۰

اگر درون لامپ به جای بخار جیوه، بخار عنصر دیگری باشد، بازهم در طیف حاصل خط‌های رنگی جدا ازهم دیده می‌شود، ولی این خط‌ها هم ازنظر تعداد و هم ازنظر طول موج با خط‌های طیف حاصل از لامپ بخار جیوه تفاوت دارد. طیف نور گسیل شده از بخار هر عنصر را ***طیف اتمی*** آن‌عنصر می‌نامند. پس می‌توان گفت که طیف اتمی عنصرهای مختلف باهم تفاوت دارد. طیف اتمی چند عنصر در شکل ۷ــ۱۱نشان داده شده است. طیف اتمی حاصل از نور گسیل شده از بخار عنصرها را طیف گسیلی (یا نشری) آن اتم‌ها می‌نامند.



شکل۷ــ۱۱



شکل۷ــ۱۲

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 به‌طورمستقیم در معرض نور گسیل شده از لامپ بخار جیوه قرار گرفت.

درون لامپ‌های فلورسان نیز بخار جیوه وجود دارد، امّا 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 جیوهٔ بدون پوشش فلورسان به‌عنوان لامپ روشنایی استفاده نمی‌شود.

طیف جذبی : در سال ۱۸۱۴ میلادی فرانهوفر، فیزیک‌دان آلمانی، کشف کرد که اگر به‌دقت به طیف خورشید بنگریم، خط‌های تاریکی در طیف پیوستهٔ آن مشاهده خواهیم کرد (شکل ۷ــ۱۳). این مطلب نشان می‌دهد که بعضی از طول موج‌ها در نوری که از خورشید به‌زمین می‌رسد، وجود ندارد و به‌جای آنها، در طیف پیوستهٔ خورشید خط‌های تاریک (یا سیاه) دیده می‌شود.

اکنون می‌دانیم که گازهای عنصرهای موجود در جوّ خورشید، بعضی از طول موج‌های گسیل‌شده از خورشید را جذب می‌کنند و نبود آنها در طیف پیوستهٔ خورشید به‌صورت خط‌های تاریک ظاهر می‌شود. طیف نور سفیدی را که بعضی از خط‌ها با طول موج‌های آن جذب شده باشد، **طیف‌جذبی** می‌نامیم.

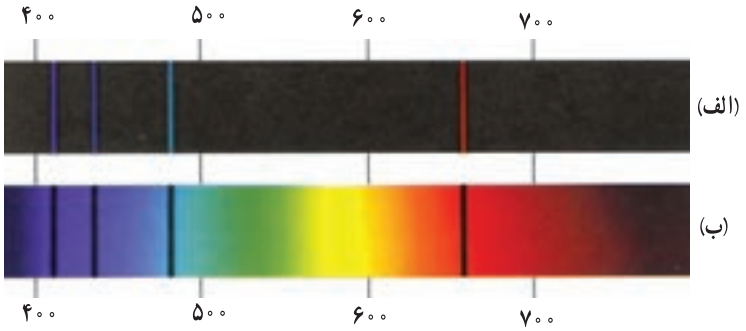
در اواسط سدهٔ نوزدهم، معلوم شد که اگر نور سفید از داخل بخار عنصری عبور کند و سپس طیف آن تشکیل شود، در طیف آن، خط‌های تاریکی ظاهر می‌شود. این خط‌ها (طول موج‌ها) توسط اتم‌های بخار عنصر جذب شده‌اند. مطالعهٔ طیف‌های گسیلی و جذبی عنصرهای مختلف نشان می‌دهد که :

۱ــ 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.

۲ــ اتم هر عنصر دقیقاً همان‌طول موج‌هایی را از نور سفید جذب می‌کند که اگر دمای آن به‌اندازهٔ کافی بالا رود و یا به هرصورت دیگر برانگیخته شود، آنها را تابش می‌کند.

شکل ۷ــ۱۳ــ خط‌های تاریکی که در طیف خورشید دیده می‌شود، خط‌های فرانهوفر نام دارد. طول موج‌های مربوط توسط جو خورشید از نور تابشی خورشید حذف شده است.

طیف‌های گسیلی (نشری) و جذبی اتم هیدروژن در شکل ۷ــ۱۴ نشان داده شده‌اند.



شکل ۷ــ۱۴

الف) طیف گسیلی، خط‌های روشن معرف طول موج‌های گسیلی هستند.

ب) طیف جذبی، خط‌های تاریک در زمینهٔ روشن معرف طول موج‌های جذب شده هستند.

از آنچه گفته شد، نتیجه می‌گیریم که طیف اتمی هر عنصر خط‌ها یا طول موج‌های ویژهٔ خود را دارد، و طیف‌های گسیلی و جذبی هر عنصر مانند اثرانگشت افراد می‌تواند برای شناسایی اتم‌ها از یکدیگر به‌کار رود.

فعالیت ۷ـ۵

با بحث در گروه خود مشخص کنید که چگونه می‌توان با استفاده از طیف جذبی خورشید به وجود عنصرهای مختلف در جو خورشید پی‌برد؟

تهیه و بررسی طیف‌های گسیلی و جذبی را ***طیف نمایی*** می‌نامند. طیف نمایی ابزار توانمندی برای شناسایی عنصرهاست. در سال‌های پایانی سدهٔ نوزدهم میلادی چند عنصر ناشناخته، تنها به‌کمک طیف‌نمایی کشف شد، ولی علی‌رغم این کاربردهای موفق تجربی، در قرن نوزدهم نظریهٔ قابل‌قبولی برای تفسیر طیف اتمی وجود نداشت. به‌عبارت دیگر، این که چرا هر عنصر طیف مخصوص به خود را دارد، سؤالی بود که در فیزیک کلاسیک پاسخی برای آن یافت نمی‌شد.

درک ساز و کار جذب و گسیل نور به وسیلهٔ اتم‌ها از دیدگاه فیزیک کلاسیک آسان است؛ زیرا بنابر نظریه‌های کلاسیکی یک اتم در صورتی ***نور گسیل*** می‌کند که به طریقی ــ مانند برخورد با سایر اتم‌ها یا توسط میدان‌های الکتریکی ــ 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 عنصرها 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.

درمورد 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 این‌که «***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 ۱۹۱۳میلادی 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 ریدبرگ ــ بالمر : اتم هیدروژن ساده‌ترین اتم‌هاست و طیف آن اولین طیفی بود که به‌طور کامل مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت. آنگستروم تا سال ۱۸۸۵میلادی طول موج چهارخط از طیف اتم هیدروژن را با دقت زیاد اندازه گرفت. این طول موج‌ها در شکل ۷ــ۱۴ نشان داده شده‌اند. بالمر که یک معلم سوئیسی 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 :

$$\lambda = ۳۶۴/۵۶\frac{n^۲}{n^۲ - ۴} \qquad (۷ــ۱۱)$$

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

$$n = ۳,۴,۵,۶$$

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

مثال ۷ـ۴

طول موج خط‌های طیفی شکل ۷ـ۱۴ را به کمک رابطهٔ بالمر به‌دست آورید.

پاسخ

داریم : $\lambda = ۳۶۴/۵۶\frac{n^۲}{n^۲-۴}$

برای $n = ۳$ به‌دست می‌آوریم.

$$\lambda_۱ = ۳۶۴/۵۶\frac{۹}{۹-۴} = ۶۵۶/۲\text{nm}$$

برای $n = ۴$ داریم :

$$\lambda_۲ = ۳۶۴/۵۶\frac{۱۶}{۱۶-۴} = ۴۸۶/۰\text{nm}$$

و به همین ترتیب

$$n = ۵ \Longrightarrow \lambda_۳ = ۴۳۴/۰\text{nm}$$

$$n = ۶ \Longrightarrow \lambda_۴ = ۴۱۰/۱۳\text{nm}$$

کار عمده در زمینهٔ جست‌وجو برای طیف کامل اتم هیدروژن توسط ریدبرگ در حدود سال ۱۸۹۰میلادی انجام شد. ریدبرگ کار کردن با عکس طول موج را مناسب‌تر تشخیص داد؛ لذا رابطهٔ بالمر (معادلهٔ۷ـ۱۱) را به صورت زیر نوشت :

$$\frac{۱}{\lambda} = R_H(\frac{۱}{۲^۲} - \frac{۱}{n^۲}) \qquad (۱۲ـ۷)$$

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

$$R_H = ۰/۰۱۰۹(\text{nm})^{-۱}$$

طول موج تمامی خط‌های طیف اتم هیدروژن را می‌توان از رابطهٔ زیر که به رابطهٔ ریدبرگ معروف است به‌دست آورد.

$$\frac{۱}{\lambda} = R_H(\frac{۱}{n'^۲} - \frac{۱}{n^۲}) \quad n > n' \qquad (۱۳ـ۷)$$

با قرار دادن $n' = ۲$ رابطهٔ بالمر (۷ـ۱۲) به‌دست می‌آید. خط‌های طیف مربوط به $n' = ۲$ را «رشتهٔ بالمر» می‌نامند.

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

به ازای $n'=1$ داریم :

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

این رشته را «رشتهٔ لیمان» می‌نامند.

همچنین به ازای $n'=3$ داریم :

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

این رشته را نیز «رشتهٔ پاشن» می‌نامند. در جدول ۷ــ۱رشته‌های طیف اتم هیدروژن داده شده‌اند.

جدول ۷ــ۱

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

مثال ۷ـ۵

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

پاسخ

برای $n'=1$ و $n=2$ طبق رابطهٔ ریدبرگ داریم :

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

در نتیجه طول موج این خط برابر است با :

$$\lambda=\frac{4}{3R_H}=\frac{4}{3\times 0/0109(nm)^{-1}}=121nm$$

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

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

۷ـ۴ـ 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.

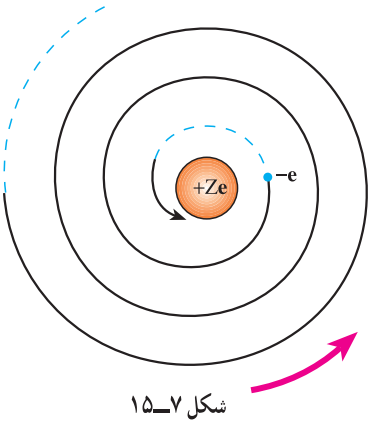
اگر چه تامسون براساس الگوی کیک کشمشی توانست برخی از ویژگی‌های اتم‌ها را توجیه کند، ولی رادرفورد با آزمایش‌هایی که به منظور تأیید و تکمیل الگوی کیک کشمشی تامسون انجام داد، به نتیجه‌هایی دست یافت که با چنین الگویی سازگار نبود. آزمایش‌های وی نشان دادند که بار مثبت اتم

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 همهٔ بار مثبت اتم در یک ناحیهٔ مرکزی با حجم بسیار کوچکی به نام هسته متمرکز شده است و اطراف آن را الکترون‌ها با بار منفی، در فاصله‌ای زیاد احاطه کرده‌اند، به‌گونه‌ای 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 درهم فرو ریزد که این موضوع کاملاً خلاف چیزی است که در عمل وجود دارد.

اگر هم فرض کنیم که الکترون‌ها ــ مانند سیاره‌های منظومهٔ خورشیدی که به دور خورشید در حرکت‌اند ــ 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 این‌رو، بنابر نظریهٔ 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 ۷ــ۱۵).



شکل ۷ــ۱۵

بدین‌ترتیب 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 گسستهٔ اتمی نیست.

الگوی اتمی بور : نیلس‌بور، فیزیکدان دانمارکی، در سال ۱۹۱۳میلادی برای حل مشکل ناپایداری الگوی اتمی رادرفورد و با توجه به طیف گسستهٔ تابش گسیل شده از اتم‌ها و رابطهٔ تجربی ریدبرگ ــ بالمر 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 :

۱ــ 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 هستهٔ با بار $+e$ در شکل ۱۶ــ۷ نشان داده شده است. نیروی مرکزگرا این حرکت از ربایش الکتریکی بین الکترون و هسته است و برابر است با $\frac{ke^2}{r^2}$ ($k=\frac{1}{4\pi\varepsilon_0}=9\times10^9\ N.m^2/C^2$). 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 :

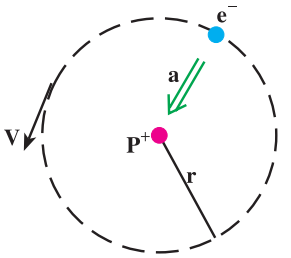
$$\frac{ke^2}{r^2}=\frac{mv^2}{r} \qquad (۱۴ــ۷)$$

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 :

$$E=K+U=\frac{1}{2}mv^2-\frac{ke^2}{r} \qquad (۱۵ــ۷)$$

با استفاده از رابطهٔ ۱۴ــ۷ به‌دست می‌آوریم :

$$K=\frac{1}{2}mv^2=+\frac{ke^2}{2r} \qquad (۱۶ــ۷)$$



شکل ۱۶ــ۷

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

$$E = -\frac{ke^2}{2r} \qquad (۷ـ۱۷)$$

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

۳ــ شعاع مدارهای مانا مقدارهای مشخص گسسته‌ای می‌توانند داشته باشند؛ اگر شعاع اولین مدار را برابر a_0 بگیریم شعاع‌های مجاز از رابطهٔ زیر به‌دست می‌آیند.

$$r_n = a_0 n^2 \qquad n = 1,2,3,\ldots \qquad (۷ـ۱۸)$$

که در آن n یک عدد صحیح است.

علاوه براین بور برای کوچک‌ترین شعاع مدار الکترون در اتم هیدروژن، یعنی a_0 که آن را شعاع اتم بور نیز می‌نامند، مقدار زیر را به‌دست آورد :

$$a_0 = \frac{h^2}{4\pi^2 mke^2} \qquad (۷ـ۱۹)$$

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

مثال ۷ـ۶

شعاع اتم بور را محاسبه کنید.

پاسخ

$$a_0 = \frac{h^2}{4\pi^2 mke^2}$$

$$= \frac{(6/63\times10^{-34}\,J.s)^2}{4(3/14)^2(9\times10^{-31}kg)(9\times10^{9}\,N.m^2/C^2)(1/6\times10^{-19}C)^2}$$

$$= 0/0529\times10^{-10}m = 0/0529nm$$

اکنون اگر به کمک رابطهٔ ۷ـ۱۷ مقدار انرژی الکترون در مدار مجاز nام را محاسبه کنیم، به‌دست می‌آوریم :

$$E_n = -\frac{2\pi^2 mk^2 e^4}{h^2} \times \frac{1}{n^2} \qquad n = 1,2,... \qquad (۷ـ۲۰)$$

بدین ترتیب الکترون تنها مجاز است انرژی‌ای برابر با یکی از مقدارهایی که از رابطهٔ ۷ـ۲۰ به‌دست می‌آید داشته باشد. هر یک از این مقدارهای مجاز را یک ***تراز انرژی*** می‌نامند.

۴ـ الکترون تنها هنگامی می‌تواند 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 پایین‌تر برود. در این صورت، انرژی فوتون موج الکترومغناطیسی گسیل شده برابر اختلاف انرژی بین دو تراز است؛ یعنی:

$$hf = E_{n_1} - E_{n_2} \qquad (۷ـ۲۱)$$

رابطهٔ ۷ـ۲۰ را می‌توانیم به صورت زیر بنویسیم:

$$E_n = -\frac{E_R}{n^2} \qquad (۷ـ۲۲)$$

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

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

این مقدار انرژی را **یک ریدبرگ** می‌نامند. یک ریدبرگ برابر ۱۳/۶ الکترون ولت یا $2/17 \times 10^{-18}$ ژول است.

اگر الکترون اتم هیدروژن، در مدار اول (n = ۱) باشد، می‌گوییم در ***حالت پایه*** قرار دارد. مدارهای با انرژی بالاتر از E_1 را ***حالت‌های برانگیخته*** می‌خوانند. انرژی این حالت‌ها از رابطهٔ (۷ـ۲۷) به‌ازای $n = 2,3,....$ به‌دست می‌آید:

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

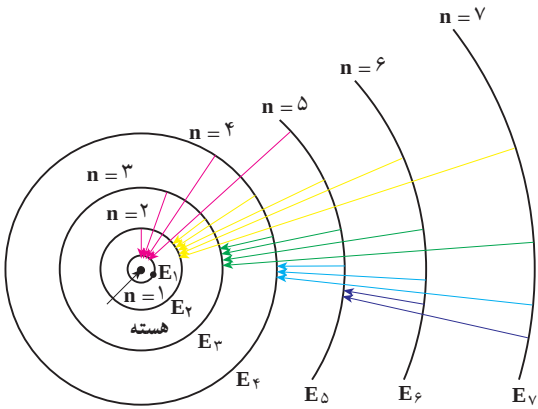
و

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

و به همین ترتیب برای بقیهٔ مقدارهای n. این مقدارها، مقدارهای مجاز انرژی الکترون در اتم هیدروژن‌اند. هر مقدار مجاز انرژی را یک تراز انرژی الکترون در اتم هیدروژن می‌نامیم.

مدارهای الکترون در الگوی بور برای اتم هیدروژن در شکل ۷ــ۱۷ نشان داده شده است.

الگوی بور برای اتم هیدروژن نه تنها مشکل ناپایداری الگوی اتمی رادرفورد را نداشت، بلکه به کمک این الگو طیف گسیلی اتم هیدروژن و رابطهٔ تجربی ریدبرگ ــ بالمر نیز به‌درستی توضیح داده شد.



شکل ۷ــ۱۷

مثال ۷ـ۷

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 به‌دست آورید.

ب) طول موج این فوتون را محاسبه و نتیجه را با رابطهٔ ریدبرگ مقایسه کنید.

پاسخ

الف) با استفاده از رابطه‌های ۷ــ۲۱ و ۷ــ۲۲ 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 :

$$\frac{E_R}{hc} = \frac{2/17 \times 10^{-18}}{6/63 \times 10^{-34} \times 3 \times 10^8} = 1/09 \times 10^7 \, m^{-1} = 0/0109 (nm)^{-1}$$

که همان ثابت ریدبرگ است.

در نتیجه با فرضیه‌های بور می‌توانیم رابطهٔ تجربی ریدبرگ را به‌دست 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 رشتهٔ بالمر را گسیل می‌کند.

تمرین ۷ـ۷

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 آن‌که 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_1 با n_2 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 به‌دست می‌آورد.

فعالیت ۷ـ۶

موضوع زیر را در گروه خود به بحث گذاشته و نتیجه را به کلاس ارائه دهید.
به‌کمک 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 رابطهٔ ۷ـ۲۰ نیز به همین معناست.

انرژی الکترون در مدار اول بور برابر $E_1 = -13/6\,eV$ است؛ و این بدان معناست که برای آنکه الکترونی را که در حالت پایهٔ اتم هیدروژن است کاملاً از قید هسته رها کنیم، باید به آن ۱۳/۶eV انرژی

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

تمرین ۷ـ۸

انرژی بستگی الکترون را در هر یک از حالت‌های برانگیختهٔ E_2 و E_3 اتم هیدروژن به‌دست آورید.

نظریهٔ 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 دربارهٔ 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.

۷ـ۵ـ آشنایی با لیزر

بیش از ۴۰ سال از ساخت نخستین لیزر[۱] یاقوتی توسط مایمن[۲] و نخستین لیزر گازی هلیم‌ـنئون 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

۱ـ کلمهٔ لیزر از سر حرف واژه‌های انگلیسی درعبارت زیر گرفته شده و به معنای «تقویت نور به روش گسیل القایی تابش» است.
Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation (LASER)

۲ـ T.H.Maiman

صنعت و فنّاوری امکان ساخت اولین لیزر را فراهم کند. از آن پس کاربرد لیزر در زمینه‌های مختلف به سرعت افزایش یافت به‌طوری که هم‌اکنون در بسیاری از وسیله‌های مورد استفادهٔ ما در زندگی و صنعت، از قبیل دستگاه‌های بازخوانی اطلاعات از روی لوح‌های فشرده، چاپگرها، شبکه‌های مخابرات کابل نوری، دستگاه‌های برش فلزات (شکل ۷ــ۱۸ــ الف) و ... کاربرد زیادی پیدا کرده است. در حرفهٔ پزشکی نیز جهت انجام پاره‌ای امور هم‌چون جراحی، بخیهٔ بافت‌های بدن، اصلاح دید چشم (شکل ۷ــ۱۸ــ ب) و ... کاربرد زیادی دارد.

(الف)

(ب)

شکل ۷ــ۱۸

فعالیت ۷ـ۷

به اتفاق دیگر اعضای گروه خود، فهرستی دیگر از کاربردهای لیزر در زندگی، صنعت و فنّاوری 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 به‌حالت برانگیخته رفته است و آن را به صورت زیر نمایش می‌دهیم :

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

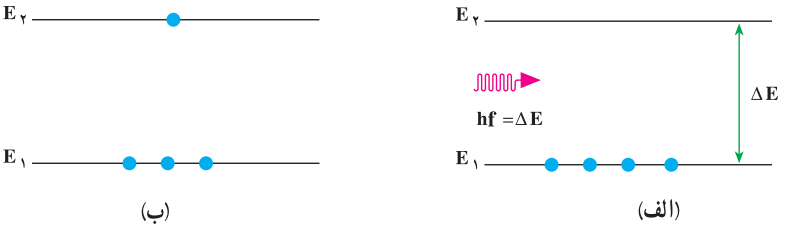
علامت ستاره حاکی از حالت برانگیخته است. بر هم کنش فوتون با اتم را جذب می‌نامیم که در نمودارهای شکل ۷ــ۱۹ نشان داده شده است. شکل ۷ــ۱۹ــ الف اتم را قبل از دریافت تابش و شکل

۷ــ۱۹ــ ب اتم را پس از دریافت تابش نشان می‌دهد. همان‌طور که می‌بینید یکی از الکترون‌هایی که در تراز E_1 قرار دارد با جذب انرژی hf به تراز E_2 می‌رود؛ به‌عبارت دیگر :

$$E_1 + hf = E_2$$

یا

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



شکل ۷ــ۱۹

لازم به ذکر است که اتم تنها فوتون‌هایی را جذب می‌کند که انرژی آنها، hf، با اختلاف انرژی بین ترازهای اتمی، ΔE، برابر باشد. همچنین دیدیم که هرگاه اتم در حالت برانگیخته باشد با گسیل یک فوتون به حالت پایین‌تر می‌رود. این برهم کنش **گسیل خودبه‌خود** نامیده می‌شود و آن‌را به صورت زیر نمایش می‌دهیم :

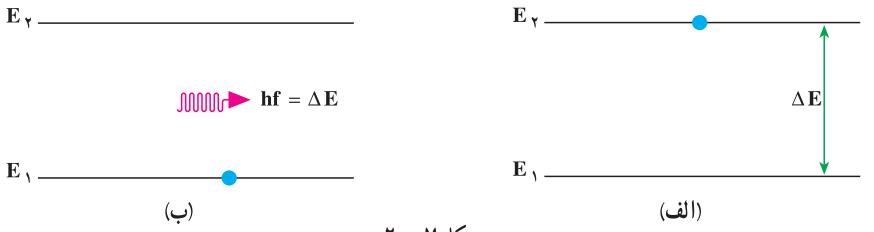
$$\text{فوتون} + \text{اتم} \longrightarrow \text{اتم}^*$$

این برهم کنش در نمودارهای شکل ۷ــ۲۰ نشان داده شده است. شکل ۷ــ۲۰ــ الف اتم را در حالت برانگیخته و شکل ۷ــ۲۰ــ ب اتم را در حالت پایه نشان می‌دهد. توجه کنید الکترون با گسیل تابش از حالت برانگیخته به حالت پایه می‌رود. در این مورد نیز انرژی فوتون گسیل شده برابر اختلاف انرژی بین دو تراز اتمی است؛یعنی :

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

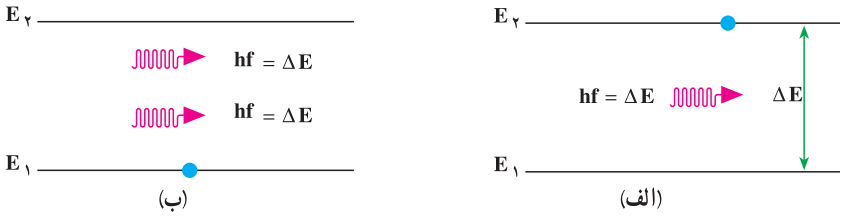
نوع دیگری از برهم کنش فوتون با اتم، که اساس کار لیزر به‌شمار می‌آید، **گسیل القایی** (یا تحریک شده) است. در این برهم کنش، اتم ابتدا درحالت برانگیخته است. آنگاه یک فوتون با انرژی hf که برابر اختلاف انرژی دو تراز اتم است، اتم برانگیخته را وا می‌دارد تا با گسیل یک فوتون دیگر با همین بسامد، به حالت پایین‌تر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

$$\text{۲ فوتون} + \text{اتم} \longrightarrow \text{فوتون} + \text{اتم}^*$$



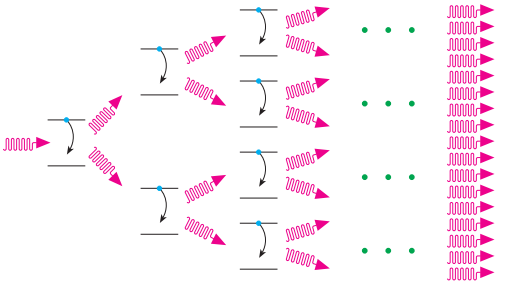
شکل ۷ــ۲۰

این برهم کنش در نمودارهای شکل ۷ــ۲۱ نشان داده شده است. شکل ۷ــ۲۱ــ الف اتم را در حالت برانگیخته و شکل ۷ــ۲۱ــ ب اتم را در حالت پایه نشان می‌دهد. توجه به این نکته ضروری است که اگر اتم در حالتی که در شکل ۷ــ۲۱ــ 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 ۷ــ۲۱ــ ب نیز دیده می‌شود، فوتون گسیل شده از اتم، با فوتون فرودی هم‌جهت، هم‌فاز و هم‌انرژی است.



شکل ۷ــ۲۱

اکنون فرض کنید مجموعه‌ای از اتم‌های یکسان که همگی در یک حالت برانگیخته‌اند، در اختیار داریم (شکل ۷ــ۲۲). فوتونی با انرژی مناسب به اتم اول فرود می‌آید و سبب گسیل القایی یک فوتون هم‌جهت، هم‌فاز و هم‌انرژی با فوتون فرودی می‌شود. به این ترتیب دو فوتون که به لحاظ ویژگی‌های فیزیکی کاملاً مشابه‌اند به‌وجود می‌آید. اینک هر یک از این دو فوتون باعث فرایند گسیل القایی دیگری می‌شوند، و



شکل ۷ــ۲۲

به این ترتیب چهار فوتون هم‌جهت، هم‌فاز و هم‌انرژی تولید می‌شود. این فرایند، یعنی دو برابر شدن تعداد فوتون‌ها در هر مرحله ادامه می‌یابد تا باریکهٔ شدیدی از فوتون‌ها که همگی هم‌جهت، هم‌فاز و هم‌انرژی‌اند، ایجاد شود. این باریکه را یک **باریکهٔ لیزری** می‌نامند. این پدیده که به ساده‌ترین شکل بیان شد، اساس‌کار لیزر را تشکیل می‌دهد. توجه داشته باشید که شکل ۷ــ۲۲ صرفاً طرح‌واره‌ای از فرایند گسیل القایی را نشان می‌دهد.

تمرین‌های فصل هفتم

۱ــ چند پدیده را نام ببرید که فیزیک کلاسیک قادر به توجیه آن نیست.

۲ــ دمای یک تکه زغال افروخته $T = ۹۰۰K$ است. طول موجی را که با بیشترین تابندگی گسیل می‌شود، حساب کنید.

۳ــ یکی از سازوکارهای تعیین وضعیت یک ماهواره، مبتنی بر آشکارسازی امواج گسیل‌شده از سطح زمین است. اگر دمای سطح زمین را $۲۷^{\circ}C$ فرض کنیم، طول‌موج دریافتی توسط این آشکارساز چه‌مقدار و در چه محدوده‌ای از طیف موج الکترومغناطیسی خواهد بود؟

۴ــ طول موج قطع فوتوالکتریک یک سطح فلزی برابر ۳۲۵/۶nm است. به ازای چه طول موجی، ولتاژ متوقف کننده برابر ۰/۹۷V است؟

۵ــ فوتون‌هایی به سطح یک قطعه سدیم که تابع کار آن ۲/۲eV است فرود می‌آید و موجب گسیل فوتوالکترون‌هایی از سطح این فلز می‌شود. هرگاه ولتاژ متوقف کننده‌ای برابر ۵V اعمال شود، جریان ناشی از فوتوالکترون‌ها قطع می‌شود. طول موج فوتون‌های فرودی چه‌قدر است؟

۶ــ حداقل انرژی لازم برای جداکردن یک الکترون از سطح فلز سدیم برابر با ۲/۲۸eV است.

الف) آیا فوتون‌هایی با طول موج ۶۸۰nm قادر به جداکردن الکترون از سطح این فلز هستند؟

ب) طول موج قطع برای گسیل فوتوالکترون از سطح فلز سدیم چه‌قدر است و این طول موج مربوط به چه رنگی است؟

۷ــ در چه مواردی یک جسم، طیف پیوسته یا ناپیوسته گسیل می‌کند؟

۸ــ آیا ممکن است به کمک طیف گسیلی پیوستهٔ یک جسم، به جنس آن پی برد؟ به کمک چه طیفی می‌توان این کار را انجام داد؟

۹ــ آیا ممکن است به کمک طیف خورشید، عناصر موجود در خورشید را شناسایی کرد؟ توضیح دهید.

۱۰ــ ضعف مدل اتمی رادرفورد را در مورد پایداری اتم توضیح دهید. بور چگونه پایداری اتم هیدروژن را توضیح داد؟

۱۱ــ ناپیوسته بودن طیف گسیلی اتم هیدروژن را براساس مدل اتمی بور توضیح دهید.

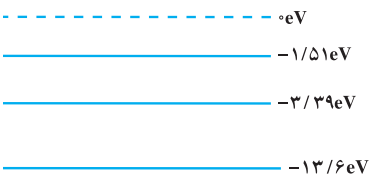
۱۲ــ در پدیدهٔ شفق قطبی مولکول‌های اکسیژن و نیتروژنِ‌جو در اثر برخورد با زبانه‌های خورشیدی یونیده یا برانگیخته می‌شوند. اتم‌های برانگیخته در بازگشت به حالت پایهٔ خود، فوتون‌هایی گسیل می‌کنند که برخی از رنگ‌های شفق قطبی ناشی از چنین گسیل‌هایی است. در گسیل فوتون از اتم نیتروژن، طول‌موج فوتون‌ها ۶۳۰nm است. رنگ و انرژی این فوتون‌ها را تعیین کنید.

۱۳ــ طول موج رشتهٔ لیمان مربوط به اتم هیدروژن را با استفاده از رابطهٔ ریدبرگ حساب کنید. مکان این خطوط را در طیف موج‌های الکترومغناطیسی مشخص کنید.

۱۴ــ چه جنبه‌هایی از مدل بور در مورد اتم هیدروژن الف) کلاسیکی، و ب) غیرکلاسیکی است؟

۱۵ــ اگر الکترون در اتم هیدروژن در تراز $n = 4$ باشد، چه طول موج‌هایی را می‌تواند تابش کند؟

۱۶ــ شکل ۷ــ۲۳ تعدادی از ترازهای انرژی اتم هیدروژن را نشان می‌دهد.



شکل ۷ــ۲۳

الف) چرا تراز ۱۳/۶eV–، تراز پایه نامیده می‌شود؟

ب) نشان دهید که کمترین طول موج تابش الکترومغناطیس گسیل شده از اتم هیدروژن تقریباً ۹۰nm است.

پ) کدام گذار (بین دو تراز) می‌تواند به گسیل فوتونی با طول موج ۶۶۰nm منجر شود؟

۱۷ــ یک لامپ بخار سدیم، فوتون‌هایی با طول موج ۵۸۹nm گسیل می‌کند؛ اگر توان تابشی لامپ ۶W باشد، در هر ثانیه چند فوتون از این لامپ گسیل می‌شود؟

۱۸ــ طول موج فوتون‌های گسیلی از یک لامپ نارنجی رنگ برابر ۶۰۰nm است. بسامد و انرژی فوتون‌های گسیلی را حساب کنید. انرژی را بر حسب ژول و همچنین الکترون ــ ولت بیان کنید.

۱۹ــ انرژی یونش، انرژی لازم برای خارج کردن یک الکترون از اتم است. انرژی یونش را در موارد زیر حساب کنید.

الف) حالت پایهٔ اتم هیدروژن ($n = ۱$)

ب) تراز $n = ۳$ اتم هیدروژن

۲۰ــ با استفاده از رابطهٔ بور اختلاف انرژی $\Delta E(n_1 \rightarrow n_2) = E_{n_1} - E_{n_2}$ را حساب کنید و نشان دهید که :

الف) $\Delta E\ (۴ \rightarrow ۲) = \Delta E\ (۴ \rightarrow ۳) + \Delta E\ (۳ \rightarrow ۲)$

ب) $\Delta E\ (۴ \rightarrow ۱) = \Delta E\ (۴ \rightarrow ۲) + \Delta E\ (۲ \rightarrow ۱)$

۲۱ــ یک اتم هیدروژن درحالت $n = ۶$ 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 $\Delta n = ۱$ مجاز باشند، در این‌صورت چند نوع فوتون با انرژی مختلف گسیل خواهد شد؟

۲۲ــ یکی از مشکلاتی که نازک شدن لایهٔ 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؟

۲۳ــ توان باریکهٔ نور خروجی از یک لیزر گازی هلیم نئون برابر ۰/۵ میلی‌وات است. اگر توان ورودی این لیزر ۵۰W باشد،

الف) بازده این لیزر را حساب کنید.

ب) اگر طول موج باریکهٔ نورخروجی ۶۳۳nm باشد، در هر ثانیه چند فوتون از این لیزر گسیل می‌شود؟

۲۴ــ پایین‌ترین بسامد رایج موج‌های الکترومغناطیسی، بسامد خطوط انتقال نیروست و مقدار آن برابر ۶۰Hz است. بالاترین بسامدها مربوط به پرتوهای گاماست و مقدار تقریبی آنها $۱/۰ \times ۱۰^{۲۱}$Hz است. بسامدهای پایین‌تر و بالاتر نیز وجود دارند. اما نسبتاً کمیاب‌اند.

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

ب) برای آسیب رساندن به یک مولکول DNA چه تعداد از فوتون‌های کم بسامد لازم است؟ (برای آسیب‌رساندن به مولکول DNA تقریباً ۱eV انرژی لازم است.)

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