

# آشنایی با فیزیک اتمی



## فصل

[www.ShimiPedia.ir](http://www.ShimiPedia.ir)

## 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.

فیزیک دانان 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 فروخته 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 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.

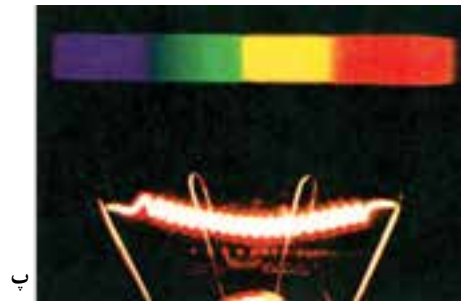
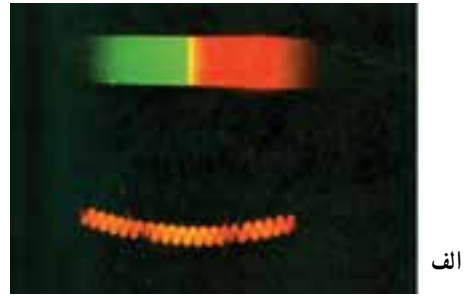
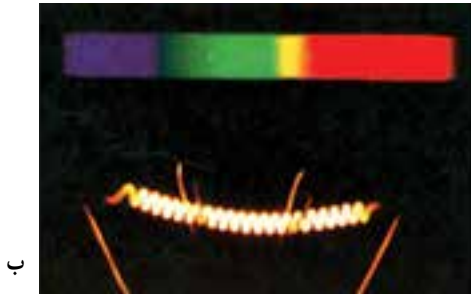
آزمایش نشان می‌دهد که تابش گسیل شده از هر جسم به دمای آن و برخی از خصوصیت‌های سطح آن بستگی دارد و در آن همه طول موج‌ها از فرسرخ، مرئی و فرابنفش به صورت یک طیف پیوسته وجود دارد.

در دمای پایین، مثلاً در دمای اتاق یا کمی بالاتر، بیشتر 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 قرمز رنگی گسیل

می‌شود، (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 ۱-۷



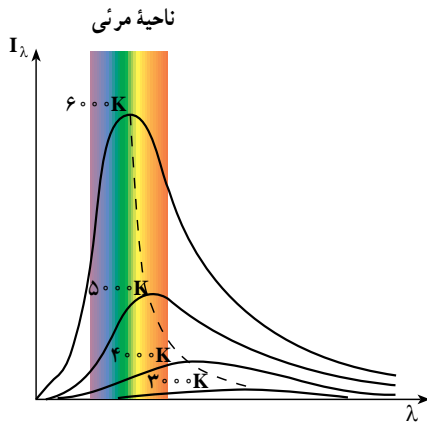
شکل ۷-۲- رشته‌داغ تنگستن و طیفی که از آن گسیل می‌شود. با افزایش دما از (الف) به (ب) و سپس به (پ) طیف گسیل شده تغییر می‌کند و نور گسیل شده از قرمز به سفید تغییر رنگ می‌دهد.

## پرسش ۷-۱

آیا می‌توانید بگویید در جایی که نشست‌اید 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 بازه‌ی 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  $\lambda$  و  $\lambda + \Delta\lambda$  که در واحد زمان از واحد سطح جسم بر یکای گستره‌ی طول موج گسیل می‌شود. اگر یکای طول موج را میکرون ( $\mu\text{m}$ ) و یکای سطح را سانتی‌متر مربع ( $\text{cm}^2$ ) اختیار کنیم، یکای تابندگی  $\text{W/cm}^2 \cdot \mu\text{m}$  خواهد شد.



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

تابندگی یک جسم ( $I_\lambda$ ) 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.

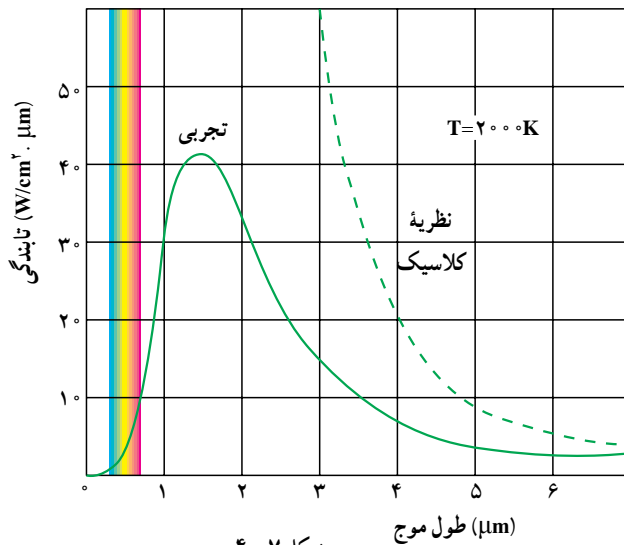
## فعالیت ۱-۷

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.

تا ابتدای سده بیستم میلادی، فیزیک‌دانان نتوانسته بودند با به‌کار بردن قانون‌ها و مفهومی فیزیک کلاسیک، از جمله موج‌های الکترومغناطیسی گسیل شده از سطح یک جسم، منحنی‌های تجربی شکل ۳-۷ را توجیه کنند. به‌عبارت دیگر از محاسبات 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



شکل ۷-۴

میل کند که با نتیجه‌های تجربی شکل ۷-۳ سازگاری نداشت. در شکل ۷-۴ منحنی حاصل از محاسبه‌های نظری براساس فیزیک کلاسیک (خط چین) همراه با یک منحنی تجربی برای دمای ۲۰۰۰ کلوین نشان داده شده است.

## فعالیت ۷-۲

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

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

$$\lambda_m T = 2.9 \times 10^{-3} \text{ m.K} \quad (1-7)$$

واژه‌ی جابه‌جایی در این قانون به چگونگی حرکت یا جابه‌جایی بیشینه‌ی تابندگی با تغییر دمای جسم سیاه مربوط است.

## مثال ۷-۱

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

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

$$\lambda_m = \frac{2/9 \times 10^{-3}}{273 + 27}$$

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

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 الکتریسیته دیده‌ایم که مقدار بار الکتریکی موجود در یک جسم باردار مضرب درستی از بار یک الکترون ( $e = 1/6 \times 10^{-19} \text{ C}$ ) است. به این ترتیب می‌گوییم که بار الکتریکی هر جسم باردار یک کمیت 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 به صورت  $f_n = n f_1$  و در واقع مضرب صحیحی از مقدار پایهٔ آن، یعنی بسامد هماهنگ اول

است و بنابراین بسامد امواج ایستاده تشکیل شده در طناب نیز کمیته گسسته است.  
 نظریه پلانک درباره تابش: بنا بر نظریه پلانک مقدار انرژی ای که جسم به صورت تابش  
 الکترومغناطیسی گسیل می کند همواره مضرب درستی از یک مقدار پایه است و این مقدار پایه به بسامد  
 تابش الکترومغناطیسی بستگی دارد. به این ترتیب داریم:

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

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 به کمک تطبیق نتیجه محاسبه با منحنی های تجربی مربوط به تابش  
 جسم صورت گرفت. هم اکنون مقدار پذیرفته شده برای این ثابت برابر با  $6.63 \times 10^{-34} \text{ Js}$  است.  
 $hf$  کوانتوم انرژی تابشی گسیل شده با بسامد  $f$  است و  $n$  که تعداد کوانتومها را مشخص  
 می کند، عدد کوانتومی نام دارد.

در رابطه ۲-۷ اگر ثابت پلانک را برحسب ژول ثانیه قرار دهیم، انرژی برحسب ژول به دست  
 می آید. ولی در بحث درباره اجزای سازنده اتمها، ژول به دلیل آنکه یکای بزرگی است مناسب نیست  
 و معمولاً از یکای دیگری برای انرژی به نام الکترون ولت (eV) استفاده می شود. الکترون ولت برابر  
 مقدار انرژی مورد نیاز برای عبور یک الکترون از اختلاف پتانسیل ۱ ولت در خلأ است. درحالی  
 که یک ژول برابر با مقدار انرژی لازم برای عبور بار الکتریکی برابر یک کولن در عبور از اختلاف  
 پتانسیل یک ولت از خلأ است. در نتیجه، رابطه بین الکترون ولت و ژول به صورت زیر است:

$$1 \text{ eV} = 1.6 \times 10^{-19} \text{ J} \quad (1 \text{ V}) \times (1.6 \times 10^{-19} \text{ C}) \quad \text{انرژی یک الکترون ولت}$$

### تمرین ۱-۷

ثابت پلانک را برحسب eV.s به دست آورید.

### تمرین ۲-۷

نور زرد با بسامد تقریبی  $5.0 \times 10^{14} \text{ Hz}$ ، بسامد اصلی نور خورشید را تشکیل می دهد.  
 انرژی ای که هر کوانتوم این نور (فوتون) حمل می کند برحسب eV چقدر است؟



### تمرین ۳-۷

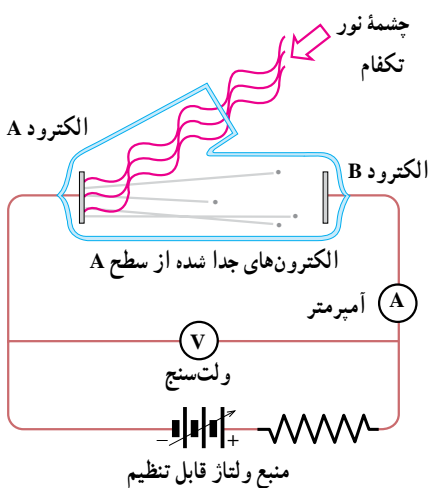
انرژی یک کوانتوم رنگ معینی از نور مرئی، برابر  $10^4 \times 5$  است. رنگ این نور را مشخص کنید.

### تمرین ۴-۷

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

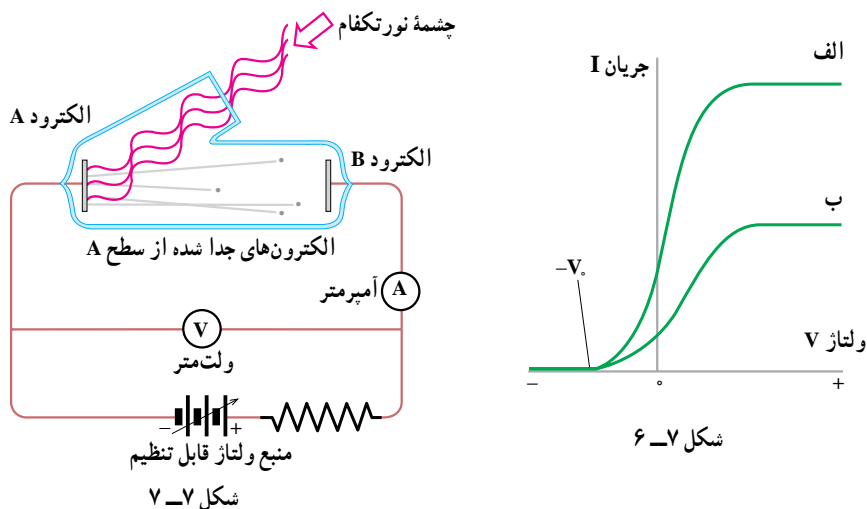


برای بررسی پدیده فوتوالکتریک از دستگاهی مطابق شکل ۵-۷ استفاده می‌کنیم. در این دستگاه دو الکتروود فلزی A و B در یک محفظه خلأ قرار دارند و از بیرون به یک منبع ولتاژ قابل تنظیم متصل شده‌اند. الکتروود A در مقابل یک چشمه نور تکفام (تک بسامد) قرار دارد.

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. اگر این الکترون‌ها انرژی جنبشی کافی داشته باشند، به الکتروود B می‌رسند و جریان برقرار می‌شود.

با تغییر دادن ولتاژ  $V$  می‌توانیم منحنی تغییرات جریان  $I$  را بر حسب  $V$  به دست آوریم. در شکل ۶-۷ منحنی تغییرات جریان بر حسب ولتاژ برای دو مقدار مختلف شدت نور فرودی بر الکتروود A نشان داده شده است. بسامد نور فرودی در هر دو حالت یکسان است. مقدارهای مثبت  $V$  مربوط به شرایطی است که الکتروود B به پایانه مثبت ولتاژ متصل است.



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.

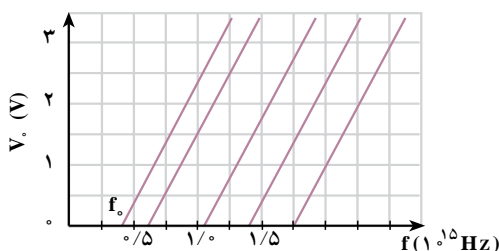
این موضوع را می‌توان به این صورت توضیح داد که ولتاژ  $V$  مثبت باعث می‌شود که فوتوالکترون‌ها به سمت الکتروود B کشیده شوند و با افزایش ولتاژ  $V$  تعداد بیشتری از فوتوالکترون‌ها به سمت B کشیده می‌شوند و جریان زیاد می‌شود. ولی پس از آنکه ولتاژ  $V$  به حدی رسید که الکتروود B بتواند تمام فوتوالکترون‌ها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

نکته جالب توجه دیگری که در این منحنی دیده می‌شود آن است که برای مقدارهای منفی  $V$  (یعنی وقتی که الکتروود B مانند شکل ۷-۷ به پایانه منفی منبع ولتاژ متصل شده است) جهت جریان عوض نمی‌شود. با کاهش ولتاژ  $V$ ، جریان (مثبت) کاهش می‌یابد، تا اینکه به ازای یک ولتاژ  $V_0$  که ولتاژ متوقف‌کننده نامیده می‌شود، جریان صفر می‌شود و به ازای مقدارهای کمتر از  $V_0$  جریان همچنان صفر می‌ماند. برای بیان این وضعیت می‌توان گفت که برای مقدارهای منفی  $V$ ، الکتروود A، که اکنون به پایانه مثبت متصل است، فوتوالکترون‌ها را به سوی خود می‌کشد و از انرژی جنبشی آنها می‌کاهد. در نتیجه تعداد کمتری از آنها می‌توانند به B برسند. در ولتاژ  $V_0$  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  $V_0$  برای هر دو منحنی یکی است یعنی، مقدار ولتاژ متوقف‌کننده به شدت 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 ۷-۶ به دست 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 ۷-۵ جنس الکتروود فلزی A را تغییر دهیم، باز هم همین نتیجه‌ها را به دست می‌آوریم ولی در این مورد نیز مقدار ولتاژ متوقف‌کننده تغییر می‌کند، به عبارت دیگر مقدار ولتاژ متوقف‌کننده به جنس الکتروود 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.

در شکل ۷-۸ منحنی تغییرات ولتاژ متوقف‌کننده برحسب بسامد پرتوی نور فرودی، برای چند فلز مختلف، نشان داده شده است. این منحنی‌ها نشان می‌دهند که هر قدر بسامد پرتوی فرودی بر الکتروود A کمتر باشد، ولتاژ قطع‌کننده نیز کمتر خواهد بود. مقدارهای ولتاژ قطع‌کننده برای هر فلز بر روی یک خط راست قرار دارد. همان‌گونه که در شکل می‌بینید هر خط،



محور بسامد را، در بسامد معینی که آن را با  $f_0$  نشان می‌دهیم قطع می‌کند. تجربه نشان می‌دهد که اگر بسامد پرتوی تابیده بر الکتروود فلزی A از  $f_0$  مربوط به آن فلز کمتر باشد، پدیده فوتوالکتریک رخ نمی‌دهد. از این رو  $f_0$  را بسامد قطع می‌نامند.

ناتوانی فیزیک کلاسیک در تفسیر پدیده 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 آنکه 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 الکتروود  $A$  برابر  $K_A$  و به هنگام رسیدن به الکتروود  $B$  برابر  $K_B$  باشد و بین دو الکتروود ولتاژ  $V$  برقرار باشد، بنابر قضیه کار-انرژی داریم:

$$eV = K_B - K_A \quad (3-7)$$

که در آن  $eV$  کار نیروی وارد بر الکترون از سوی میدان الکتریکی بین الکتروودها در تغییر مکان از  $A$  به  $B$  است. اگر ولتاژ  $V$  منفی باشد (یعنی الکتروود  $B$  به پایانه 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 الکتروود  $B$  برسند. برای این الکترون‌ها داریم:

$$K_A = K_{\text{بیشینه}}$$

این الکترون‌ها جذب الکتروود  $B$  نمی‌شوند و برمی‌گردند. لذا برای آنها داریم:  $K_B = 0$ ، و در نتیجه از رابطه  $3-7$  داریم:

$$eV_0 = K_{\text{بیشینه}} \quad (4-7)$$

بنابراین با داشتن ولتاژ متوقف‌کننده، بیشینه انرژی جنبشی فوتوالکترون‌ها به هنگام خروج از الکتروود  $A$  مشخص می‌شود.

فیزیک کلاسیک در تفسیر نتیجه‌های تجربی مربوط به پدیده فوتوالکتریک با دو مشکل روبه‌رو شد.  
 ۱- بنابر قانون‌های فیزیک کلاسیک، با افزایش شدت نور فرودی بر الکتروود  $A$  و در نتیجه افزایش میدان الکتریکی مربوط به موج الکترومغناطیسی، می‌توانیم بیشینه  $K$  را افزایش دهیم. در حالی که در منحنی شکل ۳-۸ دیدیم که  $V_0$  در نتیجه بیشینه  $K$  مستقل از شدت نوری است که بر الکتروود  $A$  می‌تابد.  
 ۲- اگر شدت نور برای گسیل فوتوالکترون‌ها از الکتروود  $A$  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 پدیده فوتوالکتریک : پیش از این دیدیم که بنابر 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 قرمز انرژی کمتری دارد. اگر بسامد یک موج الکترومغناطیسی برابر  $f$  باشد، انرژی فوتون آن برابر خواهد بود با

$$E = hf \quad (5-7)$$

بر اساس پیشنهاد اینشتین انرژی یک موج الکترومغناطیسی با بسامد  $f$  تنها می‌تواند مضرب درستی از انرژی یک فوتون باشد، یعنی :

$$E = nhf \quad (6-7)$$

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

## مثال ۲-۷

الف) انرژی فوتون نور زرد با طول موج میانگین  $589\text{nm}$  را برحسب الکترون ولت به دست آورید. ثابت پلانک برابر است با  $4.14 \times 10^{-15} \text{ eVs}$ .  $h$   
 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 :

$$\lambda f = c$$

و در نتیجه رابطه  $E = hf$  چنین به دست می‌دهد :

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

$$= \frac{4.14 \times 10^{-15} \times 3 \times 10^8}{589 \times 10^{-9}} = 2.11 \text{ eV}$$

(ب)

$$E_{pt} = 60 \times 10^6 \text{ J} = 37/5 \times 10^{19} \text{ eV}$$

$$E_{nhf} = nE$$

$$37/5 \times 10^{19} = n \times 2/11$$

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

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 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 گسیل شده به هنگام خروج از سطح فلز برابر است با:

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

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 باشد، انرژی جنبشی سریع‌ترین فوتوالکترون‌های گسیل‌شده از آن برابر خواهد بود با:

$$K_{\text{پیشینه}} = hf - W \quad (8-7)$$

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

با استفاده از رابطه 7-4 می‌توانیم رابطه 7-8 را به‌صورت زیر بنویسیم:

$$eV = hf - W \quad (9-7)$$

### فعالیت 7-3

با بحث و بررسی در گروه خود، نشان دهید که دو مشکلی که در تفسیر کلاسیکی نتیجه‌های تجربی پدیده فوتوالکتریک وجود داشت در رابطه 7-9 وجود ندارد.

رابطه ۹-۷، بین ولتاژ متوقف کننده  $V_0$  و بسامد فوتون فرودی بر الکتروود A، یک رابطه خطی است و منحنی آن یک خط راست است که کاملاً با منحنی‌های تجربی در شکل ۸-۷ سازگار است.

### فعالیت ۴-۷

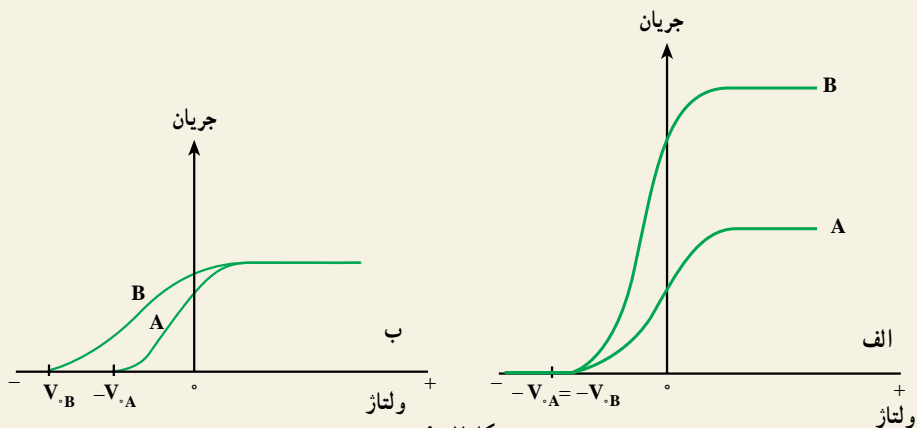
منحنی تغییرات  $V_0$  بر حسب بسامد  $f$  را با استفاده از رابطه ۹-۷ رسم کنید. با بحث و بررسی در گروه خود مشخص کنید که شیب این خط و طول از مبدأ آن، هر یک چه کمیت‌هایی را مشخص می‌کنند؟

در رابطه ۹-۷ 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 رابطه زیر به دست می‌آید:

$$f_0 = \frac{W_0}{h} \quad (۱۰-۷)$$

### مثال ۳-۷

شکل‌های ۹-۷ الف و ب به ترتیب منحنی تغییرات جریان بر حسب ولتاژ را برای دو شدت مختلف و همچنین دو باریکه نور فرودی با تعداد فوتون‌های یکسان در واحد زمان در پدیده فوتوالکتربیک نشان می‌دهد. توضیح دهید هر یک از این منحنی‌ها در چه شرایطی می‌توانند برقرار باشند.



شکل ۹-۷

پاسخ:

با توجه به اینکه در منحنی (الف) شدت نور فرودی متفاوت و ولتاژ متوقف کننده برای هر دو حالت یکسان است، نتیجه می گیریم که بسامد پرتوهای فرودی یکسان است. در صورتی که در منحنی (ب) تعداد فوتون های باریکه های نور فرودی در واحد زمان برای هر دو حالت یکسان است و ولتاژ متوقف کننده متفاوت است؛ بنابراین، بسامد پرتوهای فرودی متفاوت است. به این ترتیب این منحنی می تواند برای دو باریکه فرودی با تعداد فوتون های یکسان در پدیده فوتو الکتریک برقرار باشد. علاوه بر این منحنی (ب) نشان می دهد که  $V_{0B} > V_{0A}$ ؛ این، یعنی بسامد پرتوهای فرودی B بزرگ تر از بسامد پرتوهای فرودی A است (چرا؟).

### مثال ۷-۴

تابع کار تنگستن  $4.52\text{eV}$  است.

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

(ب) بیشینه انرژی جنبشی الکترون ها را هنگامی که طول موج  $198\text{nm}$  به کار می رود، حساب کنید. ولتاژ متوقف کننده در این حالت چقدر است؟

پاسخ

(الف) بسامد قطع برابر است با

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

با توجه به رابطه  $\lambda_0 = \frac{c}{f_0}$ ، طول موج قطع برابر است با

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

$$270 \text{ nm}$$

(ب)  $hf - W_0$  بیشینه K

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



$$= \frac{1240 \text{ eV} \cdot \text{nm}}{198 \text{ nm}} = 4/52 \text{ eV}$$

$$1/74 \text{ eV} \approx 2/7 \times 10^{-19} \text{ J}$$

ولتاژ متوقف کننده، متناظر با بیشینه K است. بنابراین

$$V_0 = \frac{K_{\text{بیشینه}}}{e} = \frac{1/74 \text{ eV}}{e} = 1/74 \text{ V}$$

### تمرین ۵-۷

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

### تمرین ۶-۷

تابع کار فلز روی  $4/31 \text{ eV}$  است. هرگاه نور بر سطحی از جنس روی بتابد و فوتوالکترونها مشاهده شوند،  
 الف) بلندترین طول موجی که سبب گسیل فوتوالکترونها می شود چقدر است؟  
 ب) وقتی نور به طول موج  $220 \text{ nm}$  به کار گرفته شود ولتاژ متوقف کننده چقدر است؟

### ۳-۷ - طیف اتمی

علاوه بر آنچه تا اینجا به آنها اشاره کردیم، پدیده های دیگری نیز هستند که فیزیک کلاسیک قادر به تفسیر آنها نبود. لذا فیزیکدانان با فرض های غیر کلاسیکی - مانند فرضیه های پلانک و اینشتین که در بالا به آنها اشاره شد - توانستند این پدیده ها را به خوبی تفسیر کنند. توصیف این پدیده ها فراتر



شکل ۷-۱۰

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 حدود  $400\text{nm}$  تا نور قرمز با طول حدود  $700\text{nm}$ ، تشکیل

شده است. طیف نور سفید که یک طیف پیوسته است در شکل ۷-۱۰ 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.

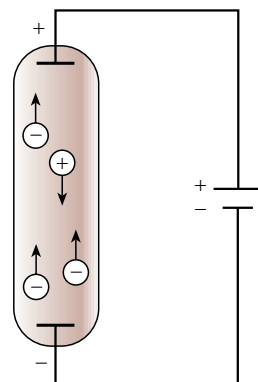
اکنون به بررسی نوع دیگری از تابش می‌پردازیم. این تابش توسط لامپ‌های حاوی بخار بسیار رقیق عنصرها گسیل می‌شود. این لامپ‌ها مطابق شکل ۷-۱۱ الف به صورت لوله‌های باریک شیشه‌ای هستند که درون آنها یک گاز رقیق در فشار کم وجود دارد. دو الکترود به نام‌های کاتد و آند در دو



پ



ب

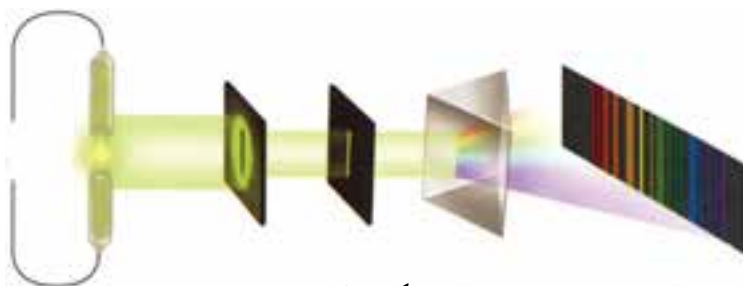


الف

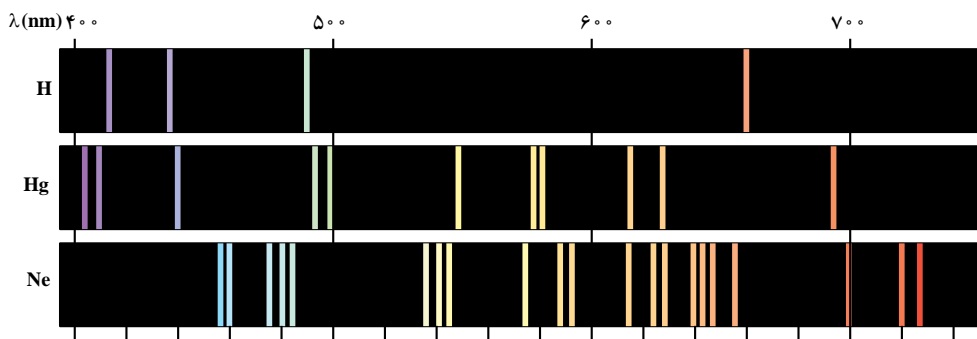
شکل ۷-۱۱

انتهای لوله قرار دارند. اگر بین این دو الکتروود ولتاژ بالایی برقرار شود، اتم‌های گاز درون لامپ مطابق شکل ۷-۱۱ ب و پ شروع به گسیل نور می‌کنند. نوری که از لامپ‌های حاوی بخار عنصرهای متفاوت گسیل می‌شود، با یکدیگر تفاوت دارد. برای مثال نوری که اتم‌های بخار جیوه گسیل می‌کنند، همان‌گونه که در شکل ۷-۱۱ نشان داده شده است به رنگ نیلی - آبی است. اگر این نور را مطابق شکل ۷-۱۲ از منشور بگذرانیم و طیف آن را تشکیل دهیم، می‌بینیم که این طیف پیوسته نیست، بلکه تنها از چند خط رنگی جدا از هم با طول موج‌های معین تشکیل شده است.

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 با هم تفاوت دارد. طیف اتمی چند عنصر در شکل ۷-۱۳ نشان داده شده است. طیف اتمی حاصل از نور گسیل شده از بخار عنصرها را طیف گسیلی (یا نشری) آن اتم‌ها می‌نامند.



شکل ۷-۱۲



شکل ۷-۱۳

طیف اتمی جیوه، خط‌هایی در ناحیه 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 دیواره درونی این لامپ‌ها با پوشش نازکی از یک ماده شیرین رنگ (مخلوطی از بورات کادمیوم، سیلیکات روی و تنگستات کلسیم) پوشانده شده است. این ماده دارای این ویژگی است که اگر نور تکفام در ناحیه 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 به‌عنوان لامپ روشنایی استفاده نمی‌شود.

**طیف جذبی:** در سال ۱۸۱۴ میلادی فرانیهوفر، فیزیکدان آلمانی، کشف کرد که اگر به‌دقت به طیف خورشید بنگریم، خط‌های تاریکی در طیف پیوسته آن مشاهده خواهیم کرد (شکل ۷-۱۴). این مطلب نشان می‌دهد که بعضی از طول موج‌ها در نوری که از خورشید به زمین می‌رسد، وجود ندارد و به‌جای آنها، در طیف پیوسته خورشید خط‌های تاریک (یا سیاه) دیده می‌شود.

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

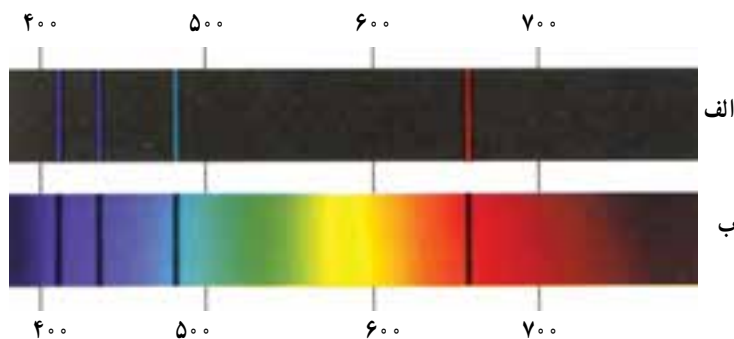
در اواسط سده نوزدهم، معلوم شد که اگر نور سفید از داخل بخار عنصری عبور کند و سپس طیف آن تشکیل شود، در طیف آن، خط‌های تاریکی ظاهر می‌شود. این خط‌ها (طول موج‌ها) توسط اتم‌های بخار عنصر جذب شده‌اند. مطالعه طیف‌های گسیلی و جذبی عنصرهای مختلف نشان می‌دهد که:

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

شکل ۷-۱۴- 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.

۲- اتم هر عنصر دقیقاً همان طول موج‌هایی را از نور سفید جذب می‌کند که اگر دمای آن به اندازه کافی بالا رود و یا به هر صورت دیگر برانگیخته شود، آنها را تابش می‌کند. طیف‌های گسیلی (نثری) و جذبی اتم هیدروژن در شکل ۱۵-۷ نشان داده شده‌اند.



الف - طیف گسیلی، خط‌های روشن معرف طول موج‌های گسیلی هستند.  
ب - طیف جذبی، خط‌های تاریک در زمینه روشن معرف طول موج‌های جذب شده هستند.

شکل ۱۵-۷

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

## فعالیت ۵-۷

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

تهیه و بررسی طیف‌های گسیلی و جذبی را طیف‌نمایی می‌نامند. طیف‌نمایی ابزار توانمندی برای شناسایی عنصرهاست. در سال‌های پایانی سده نوزدهم میلادی چند عنصر ناشناخته، تنها به کمک طیف‌نمایی کشف شد. ولی علیرغم این کاربردهای موفق تجربی، در قرن نوزدهم نظریه قابل قبولی برای تفسیر طیف اتمی وجود نداشت. به عبارت دیگر، اینکه چرا هر عنصر طیف مخصوص به خود را دارد، سؤال بود که در فیزیک کلاسیک پاسخی برای آن یافت نمی‌شد.

درک ساز و کار جذب و گسیل نور به وسیله اتم‌ها از دیدگاه فیزیک کلاسیک آسان است. زیرا بنابر نظریه‌های کلاسیکی یک اتم در صورتی نور گسیل می‌کند که به طریقی – مانند برخورد با سایر اتم‌ها یا توسط میدان‌های الکتریکی – به الکترون‌های آن انرژی داده شود. در نتیجه الکترون‌ها با به دست آوردن انرژی ارتعاش می‌کنند و موج‌های الکترومغناطیسی به وجود می‌آورند؛ یعنی نور گسیل می‌کنند. اما اینکه چرا اتم‌های همه عناصر موج‌های الکترومغناطیسی با طول موج‌های یکسان گسیل نمی‌کنند و اینکه 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 اینکه «چرا هر عنصر تنها طول موج‌های خاصی را که مشخصه آن عنصر است جذب می‌کند و بقیه طول موج‌ها را جذب نمی‌کند؟» وجود ندارد.

نیلس بور، فیزیکدان دانمارکی، در سال ۱۹۱۳ میلادی با بیان فرضیه‌هایی درباره اتم‌ها، طیف اتمی را توجیه کرد و بار دیگر نشان داد که تجدید نظر اساسی در فیزیک کلاسیک ضروری است. رابطه ریذبرگ – بالمر: اتم هیدروژن ساده‌ترین اتم‌هاست و طیف آن اولین طیفی بود که به طور کامل مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت. آنگستروم تا سال ۱۸۸۵ میلادی طول موج چهار خط از طیف اتم هیدروژن را با دقت زیاد اندازه گرفت. این طول موج‌ها در شکل ۷-۱۵ نشان داده شده‌اند. بالمر که یک معلم سوئیسی بود، این اندازه‌گیری‌ها را مطالعه کرد و نشان داد که طول موج‌های این طیف را می‌توان با دقت بسیار زیاد از رابطه زیر به دست آورد:

$$\lambda = 364.56 \frac{n^2}{n^2 - 4} \quad (7-11)$$

که در آن  $\lambda$  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 تجربه فیزیکی به دست آورد.

## مثال ۷-۵

طول موج خط‌های طیفی شکل ۷-۱۴ را به کمک رابطه‌ی بالمر به دست آورید.

پاسخ

داریم:

$$\lambda = 364 / 56 \frac{n^2}{n^2 - 4}$$

برای ۳ n به دست می‌آوریم.

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

برای ۴ n 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 جستجوی طیف کامل اتم هیدروژن توسط ری‌دبرگ در حدود سال ۱۸۹۰ میلادی انجام شد. ری‌دبرگ کار کردن با عکس طول موج را مناسب‌تر تشخیص داد، لذا رابطه‌ی بالمر (معادله‌ی ۷-۱۱) را به صورت زیر نوشت:

$$\frac{1}{\lambda} = R_H \left( \frac{1}{n_1^2} - \frac{1}{n_2^2} \right) \quad (7-12)$$

که در آن  $R_H$  ثابت ری‌دبرگ برای اتم هیدروژن نامیده می‌شود و مقدار آن برابر است با  $R_H = 109677 \text{ cm}^{-1}$ .

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

$$\frac{1}{\lambda} = R_H \left( \frac{1}{n'^2} - \frac{1}{n^2} \right) \quad n > n' \quad (7-13)$$

با قرار دادن  $n'$  رابطه‌ی بالمر (۷-۱۲) 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 ۱ n' 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 ۳ n' 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 ۱-۷ رشته‌های طیف اتم هیدروژن داده شده‌اند.

جدول ۱-۷

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,	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 ۶-۷

طول موج اولین خط طیفی اتم هیدروژن در رشته لیمان را که برای آن ۱ n' و ۲ n است به دست آورید و تعیین کنید که این خط در کدام گستره موج‌های الکترومغناطیسی واقع است.

پاسخ

برای ۱ n' و ۲ n طبق رابطه ریذبرگ داریم:

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



در نتیجه طول موج این خط برابر است با :

$$\lambda = \frac{4}{3R_H} = \frac{4}{3 \times 0.109(\text{nm})^{-1}} = 121 \text{ nm}$$

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 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.

## ۴-۷- الگوهای اتمی

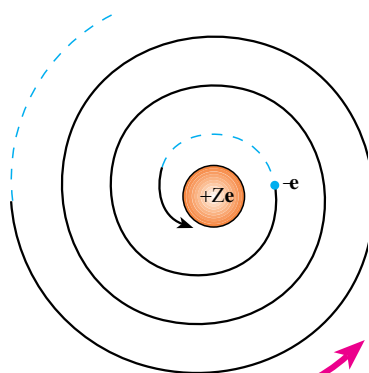
الگوی اتمی تامسون : تامسون، دانشمند انگلیسی که با آزمایش‌هایی موفق به کشف الکترون در سال ۱۸۹۶ میلادی شده بود، نخستین الگوی اتمی را در سال ۱۸۹۹ میلادی ارائه داد. در این الگو، اتم به صورت توزیع کروی یکنواختی از جرم و بار مثبت در نظر گرفته شد که الکترون‌ها (بارهای منفی) مانند کشمش‌های درون یک کیک کشمش‌ی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

اگرچه 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 بر اساس 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 اینکه 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 الکترونیکی 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 - مانند سیاره‌های منظومه خورشیدی که به دور خورشید در حرکت اند - 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 بنا بر 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



شکل ۷-۱۶

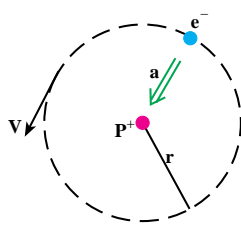
به معنای تغییر بسامد موج الکترومغناطیسی است که گسیل می‌شود. بنابراین الکترون‌ها به تدریج انرژی خود را از دست می‌دهند و بسامد حرکت آنها به تدریج افزایش می‌یابد، بسامد موج الکترومغناطیسی گسیل شده نیز به تدریج زیاد می‌شود. به این ترتیب باید طیف موج الکترومغناطیسی گسیل شده از اتم، پیوسته باشد و الکترون پس از گسیل‌های متوالی موج‌های الکترومغناطیسی روی هسته بیفتد (شکل ۷-۱۶).

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. 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 ریدبرگ - بالمر برای طیف اتم هیدروژن، با الهام گرفتن از نظریه‌های کوانتومی پلانک و اینشتین الگوی 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.



شکل ۷-۱۷

حرکت الکترون با جرم  $m$  و بار  $e$  روی یک مدار دایره‌ای به شعاع  $r$  به مرکز هسته با بار  $e$  در شکل ۷-۱۷ نشان داده شده است. نیروی مرکز‌گرای این حرکت از ربایش الکتریکی بین الکترون و هسته است، و برابر است با  $\frac{ke^2}{r^2}$  (که در آن  $k = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} = 9 \times 10^9 \text{ N.m}^2 / \text{C}^2$ ) . 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 :

$$\frac{ke^2}{r^2} = \frac{mv^2}{r} \quad (۷-۱۴)$$

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 :

$$E = K + U = \frac{1}{2}mv^2 - \frac{ke^2}{r} \quad (۷-۱۵)$$

با استفاده از رابطه ۷-۱۴ به دست می‌آوریم :

$$K = \frac{1}{2}mv^2 = + \frac{ke^2}{2r} \quad (۷-۱۶)$$

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

$$E = -\frac{ke^2}{2r} \quad (۷-۱۷)$$

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  $a$  بگیریم، شعاع‌های مجاز از رابطه زیر به دست می‌آیند

$$r_n = a \cdot n^2 \quad n = ۲, ۳, \dots \quad (۷-۱۸)$$

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:

$$a_0 = \frac{h^2}{4\pi^2 m k e^2} \quad (19-7)$$

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.

پاسخ

$$\begin{aligned} a_0 &= \frac{h^2}{4\pi^2 m k e^2} \\ &= \frac{(6.63 \times 10^{-34} \text{ J}\cdot\text{s})^2}{4 \times (3/14)^2 \times (9 \times 10^{-31} \text{ kg}) \times (9 \times 10^9 \text{ N}\cdot\text{m}^2/\text{C}^2) (1/6 \times 10^{-19} \text{ C})^2} \\ &= 0.529 \times 10^{-10} \text{ m} = 0.529 \text{ nm} \end{aligned}$$

اکنون اگر به کمک رابطه ۷-۱۷ مقدار انرژی الکترون در مدار مجاز  $n$ ام را محاسبه کنیم، به دست می‌آوریم:

$$E_n = -\frac{2\pi^2 m k^2 e^4}{h^2} \times \frac{1}{n^2} \quad n = 1, 2, \dots \quad (20-7)$$

بدین ترتیب الکترون تنها مجاز است انرژی‌ای برابر با یکی از مقدارهایی که از رابطه ۷-۲۰ به دست می‌آید داشته باشد. هر یک از این مقدارهای مجاز را یک تراز انرژی می‌نامند.

۴- 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:

$$hf = E_{n_1} - E_{n_2} \quad (21-7)$$

رابطه ۷-۲۱ را می‌توانیم به صورت زیر بنویسیم :

$$E_n = -\frac{E_R}{n^2} \quad (22-7)$$

که در آن با استفاده از مقدار کمیت‌های 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 ریذبرگ می‌نامند. یک ریذبرگ برابر  $13/6$  الکترون‌ولت و  $2/17 \times 10^{-18}$  ژول است.

اگر الکترون اتم هیدروژن، در مدار اول ( $n = 1$ ) باشد، می‌گوییم در حالت پایه قرار دارد. مدارهای با انرژی بالاتر از  $E_1$  را حالت‌های برانگیخته می‌خوانند. انرژی این حالت‌ها از رابطه (۲۲-۷) به‌ازای  $n = 2, 3, \dots$  به‌دست می‌آید.

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

و

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

و به همین ترتیب برای بقیه مقدارهای  $n$ . این مقادارها، مقادارهای 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 ۷-۱۸ نشان داده شده است.

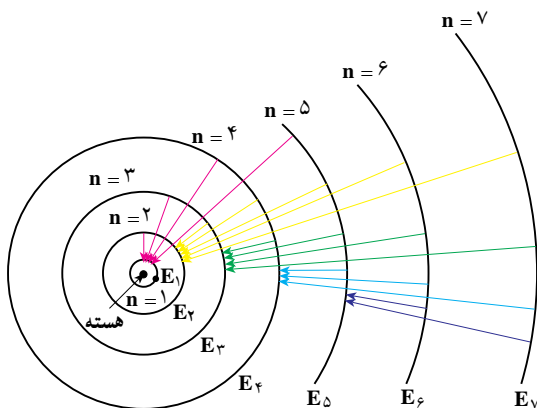
الگوی بور برای اتم هیدروژن نه تنها

مشکل ناپایداری الگوی اتمی رادرفورد را

نداشت بلکه به کمک این الگو طیف گسیلی

اتم هیدروژن و رابطه تجربی ریذبرگ - بالمر

نیز به‌درستی توضیح داده شد.



شکل ۷-۱۸

## مثال ۷-۸

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 ریدبرگ مقایسه کنید.

پاسخ

الف) با استفاده از رابطه‌های ۷-۲۱ و ۷-۲۲ داریم:

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

$$f = \frac{c}{\lambda} \quad \text{ب) داریم:}$$

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:

$$\frac{E_R}{hc} = \frac{2/17 \times 10^{-18}}{6/63 \times 10^{-34} \times 3 \times 10^8} = 1/09 \times 10^9 \text{ m}^{-1} = 0/0109 (\text{nm})^{-1}$$

که همان ثابت ریدبرگ 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 رشته‌بالمرا 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 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  $n_2$  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 ۶-۷

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  $۷-۲^\circ$  نیز به همین معناست.

انرژی الکترون در مدار اول بور برابر  $۱۳/۶\text{eV}$  است؛ و این بدان معنی است که برای آنکه الکترونی را که در حالت پایه اتم هیدروژن است کاملاً از قید هسته رها کنیم، باید به آن  $۱۳/۶\text{eV}$  انرژی بدهیم. این مقدار انرژی را **انرژی بستگی الکترون** در تراز اول اتم هیدروژن می‌نامیم. این مقدار با تجربه به خوبی سازگار است.

## تمرین ۸-۷

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 می‌کند. 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 سال از ساخت نخستین لیزر یا فوتی توسط مایمن<sup>۱</sup> و نخستین لیزر گازی هلیوم-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 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 برش فلزات (شکل ۷-۱۹-الف) و ... کاربرد زیادی پیدا کرده است. در حرفه پزشکی نیز جهت انجام پاره‌ای امور همچون جراحی، بخیه بافت‌های بدن، اصلاح دید چشم (شکل ۷-۱۹-ب) و ... کاربرد زیادی دارد.



ب



الف

شکل ۷-۱۹



## فعالیت ۷-۷

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:

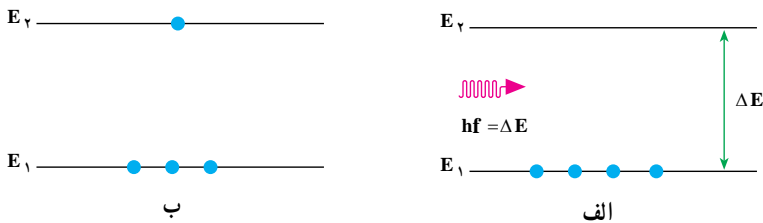
اتم\*  $\rightarrow$  فوتون اتم

علامت ستاره حاکی از حالت برانگیخته است. برهم کنش فوتون با اتم را جذب می‌نامیم که در نمودارهای شکل ۷-۲۰ نشان داده شده است. شکل ۷-۲۰ الف اتم را قبل از دریافت تابش و شکل ۷-۲۰ 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. به عبارت دیگر:

$$E_2 = hf + E_1$$

یا

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



شکل ۷-۲۰

لازم به ذکر است که، اتم تنها فوتون‌هایی را جذب می‌کند که انرژی آنها،  $hf$ ، با اختلاف انرژی بین ترازهای اتمی،  $\Delta E$ ، 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 آن را به صورت زیر نمایش می‌دهیم:

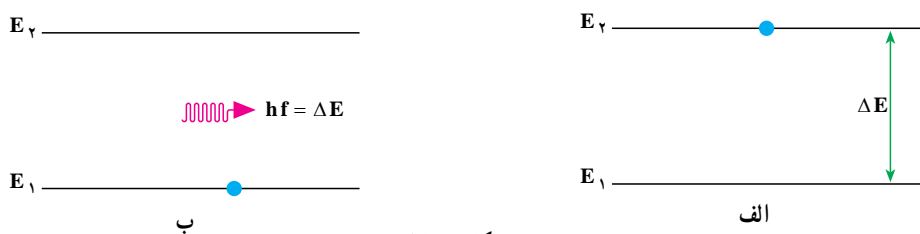
فوتون اتم  $\rightarrow$  اتم\*

این برهم کنش در نمودارهای شکل ۲۱-۷ نشان داده شده است. شکل ۲۱-۷ الف اتم را در حالت برانگیخته و شکل ۲۱-۷ 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:

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

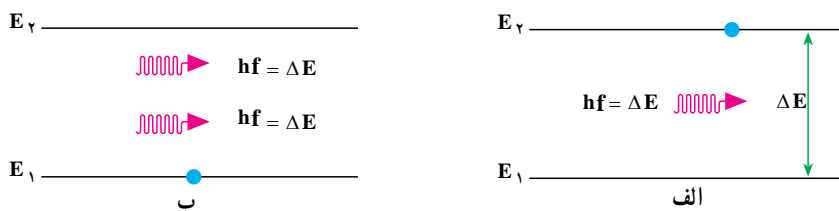
نوع دیگری از برهم کنش فوتون با اتم، که اساس کار لیزر به‌شمار می‌آید، گسیل القایی (یا تحریک شده) است. در این برهم کنش، اتم ابتدا در حالت برانگیخته است. آنگاه یک فوتون با انرژی  $hf$  که برابر اختلاف انرژی دو تراز اتمی است، اتم برانگیخته را وامی‌دارد تا با گسیل یک فوتون دیگر با همین بسامد، به حالت پایین‌تر،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

۲ فوتون اتم → فوتون اتم\*



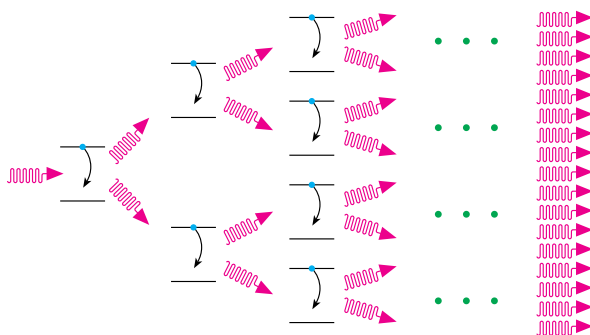
شکل ۲۱-۷

این برهم کنش در نمودارهای شکل ۲۲-۷ نشان داده شده است. شکل ۲۲-۷ الف اتم را در حالت برانگیخته و شکل ۲۲-۷ ب اتم را در حالت پایه نشان می‌دهد. توجه به این نکته ضروری است که اگر اتم در حالتی که در شکل ۲۲-۷ الف نشان داده شده است به حال خود هم گذاشته می‌شود، سرانجام الکترون با تابش یک فوتون به حالت پایین‌تر یا پایه می‌رود، در حالی که با تابش یک فوتون به آن، نه تنها این فرایند سریع‌تر انجام می‌شود بلکه همان‌طور که در شکل ۲۲-۷ ب نیز دیده می‌شود، فوتون گسیل شده از اتم، با فوتون فرودی هم‌جهت، هم‌فاز و هم‌انرژی است.



شکل ۲۲-۷

اکنون فرض کنید مجموعه‌ای از اتم‌های یکسان، که همگی در یک حالت برانگیخته‌اند، در اختیار داریم (شکل ۷-۲۳). 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 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 باریکه‌ی شدیدی از فوتون‌ها که همگی هم‌جهت، هم‌فاز و هم‌انرژی‌اند، ایجاد شود. این باریکه را یک باریکه‌ی لیزری می‌نامند. این پدیده که به ساده‌ترین شکل بیان شد، اساس کار لیزر<sup>۱</sup> را تشکیل می‌دهد. توجه داشته باشید که شکل ۷-۲۳ صرفاً طرح‌واره‌ای از فرایند گسیل القایی را نشان می‌دهد.



شکل ۷-۲۳

## تمرین‌های فصل هفتم

- ۱- چند پدیده را نام ببرید که فیزیک کلاسیک قادر به توجیه آن نیست.
  - ۲- دمای سطح خورشید حدود  $6000\text{ K}$  است.
- الف) بیشینه تابندگی خورشید در چه طول موجی است؟
- ب) انرژی هر فوتون در این طول موج چند الکترون‌ولت است؟
- پ) این طول موج در چه ناحیه‌ای از طیف موج‌های الکترومغناطیسی است؟

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

۳- یکی از سازوکارهای تعیین وضعیت یک ماهواره، مبتنی بر آشکارسازی امواج گسیل شده از سطح زمین است. اگر دمای سطح زمین را  $27^{\circ}\text{C}$  فرض کنیم، طول موج دریافتی توسط این آشکارساز چه مقدار و در چه محدوده‌ای از طیف موج‌های الکترومغناطیسی خواهد بود؟

۴- توضیح دهید تغییر هر یک از کمیت‌های زیر چه تأثیری در نتیجه پدیده فوتوالکتریک دارد.

الف) دو برابر کردن بسامد نور فرودی

ب) دو برابر کردن طول موج نور فرودی

پ) دو برابر کردن شدت نور فرودی در یک بسامد معین

۵- طول موج قطع فوتوالکتریک یک سطح فلزی برابر  $325/6 \text{ nm}$  است. به ازای چه طول

موجی، ولتاژ متوقف کننده برابر  $0.97 \text{ V}$  است؟

۶- فوتون‌هایی به سطح یک قطعه سدیم که تابع کار آن  $2/2 \text{ eV}$  است فرود می‌آید و موجب گسیل فوتوالکترون‌هایی از سطح این فلز می‌شود. هرگاه ولتاژ متوقف کننده‌ای برابر  $5 \text{ V}$  اعمال شود، جریان ناشی از فوتوالکترون‌ها قطع می‌شود. طول موج فوتون‌های فرودی چقدر است؟

۷- انرژی لازم برای جدا کردن یک الکترون از سطح فلز سدیم برابر با  $2/28 \text{ eV}$  است.

الف) آیا فوتون‌هایی با طول موج  $680 \text{ nm}$  قادر به جدا کردن الکترون از سطح این فلز هستند؟

ب) طول موج قطع برای گسیل فوتوالکترون از سطح فلز سدیم چقدر است و این طول موج

مربوط به چه رنگی است؟

۸- در چه مواردی یک جسم، طیف پیوسته یا ناپیوسته گسیل می‌کند؟

۹- 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؟

۱۰- آیا ممکن است به کمک طیف خورشید، عناصر موجود در خورشید را شناسایی کرد؟

توضیح دهید.

۱۱- ضعف مدل اتمی رادرفورد را در مورد پایداری اتم توضیح دهید. بور چگونه پایداری

اتم هیدروژن را توضیح داد؟

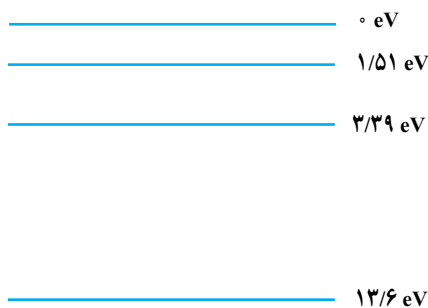
۱۲- ناپیوسته بودن طیف گسیلی اتم هیدروژن را براساس مدل اتمی بور توضیح دهید.

۱۳- 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 می‌کنند که برخی از رنگ‌های شفق قطبی ناشی از چنین گسیل‌هایی است. در گسیل فوتون از

- اتم نیتروژن، طول موج فوتون‌ها  $630\text{ nm}$  است. رنگ و انرژی این فوتون‌ها را تعیین کنید.
- ۱۴- طول موج رشته لیمان مربوط به اتم هیدروژن را با استفاده از رابطه ریدبرگ حساب کنید. مکان این خطوط را در طیف موج‌های الکترومغناطیسی مشخص کنید.
- ۱۵- چه جنبه‌هایی از مدل بور در مورد اتم هیدروژن الف) کلاسیکی، و ب) غیر کلاسیکی است؟
- ۱۶- شکل ۷-۲۴ تعدادی از ترازهای انرژی اتم هیدروژن را نشان می‌دهد.



شکل ۷-۲۴

- الف) چرا تراز  $13/6\text{ eV}$ ، تراز پایه نامیده می‌شود.
- ب) نشان دهید که کمترین طول موج تابش الکترومغناطیسی گسیل شده از اتم هیدروژن تقریباً  $90\text{ nm}$  است.
- پ) کدام گذار (بین دو تراز) می‌تواند به گسیل فوتونی با طول موج  $660\text{ nm}$  منجر شود؟
- ۱۷- اگر الکترون در اتم هیدروژن در تراز  $n = 4$  باشد چه طول موج‌هایی را می‌تواند تابش کند؟
- ۱۸- یک لامپ بخار سدیم، فوتون‌هایی با طول موج  $589\text{ nm}$  گسیل می‌کند. اگر توان تابشی لامپ  $6\text{ W}$  باشد در هر ثانیه چند فوتون از این لامپ گسیل می‌شود؟
- ۱۹- طول موج فوتون‌های گسیلی از یک لامپ نارنجی رنگ برابر  $600\text{ nm}$  است. بسامد و انرژی فوتون‌های گسیلی را حساب کنید. انرژی را بر حسب ژول و همچنین الکترون-ولت بیان کنید.
- ۲۰- 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.

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

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

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

۲۲- 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؟

۲۳- 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؟

۲۴- توان باریکهٔ نور خروجی از یک لیزر گازی هلیم نئون برابر  $5/^\circ$  میلی‌وات است. اگر توان ورودی این لیزر  $5^\circ W$  باشد،

الف) بازده این لیزر را حساب کنید.

ب) اگر طول موج باریکهٔ نور خروجی  $633\text{nm}$  باشد، در هر ثانیه چند فوتون از این لیزر گسیل می‌شود؟