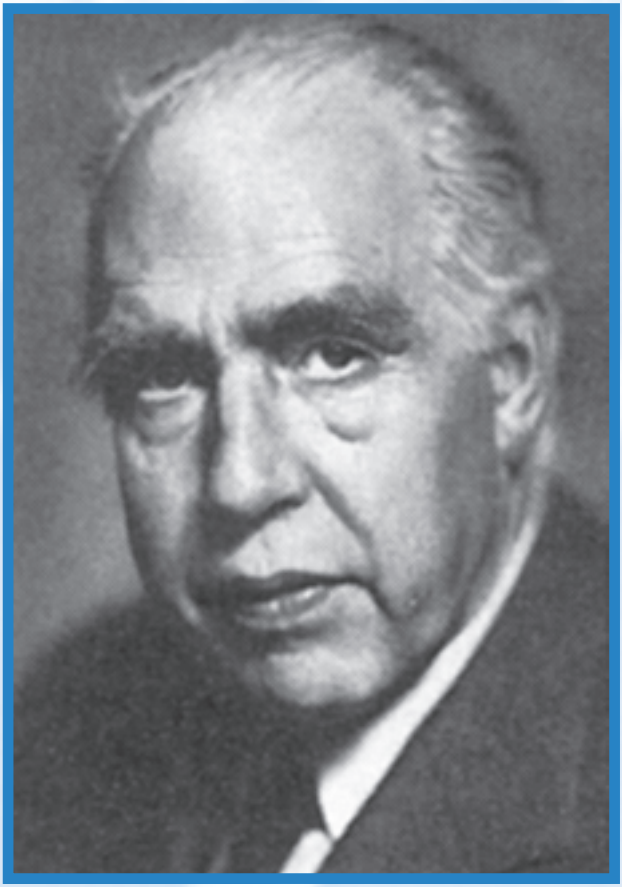
۳

آشنایی با فیزیک اتمی



نیلس بور
(۱۹۶۲ـ۱۸۸۵م)

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 سده‌ی نوزدهم میلادی توانسته بودند برای بسیاری از پدیده‌های طبیعی توجیه‌های قانع‌کننده‌ای ارائه کنند. مجموعه‌ی 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 سده‌ی نوزدهم میلادی دانشمندان پدیده‌هایی را مشاهده کردند که دیگر با فیزیک کلاسیک قابل توجیه نبودند. امروزه به مجموعه‌ی نظریه‌ها و قانون‌هایی که به توجیه این پدیده‌ها می‌پردازد، فیزیک جدید (یا نوین) می‌گویند.

شالوده‌ی فیزیک جدید را نظریه‌های «نسبیت» و «کوانتومی» تشکیل می‌دهد. نظریه‌ی نسبیت مربوط به مطالعه‌ی پدیده‌ها در سرعت‌های بسیار زیاد و نزدیک به سرعت نور است. نظریه‌ی کوانتومی نیز به مطالعه‌ی پدیده‌ها در مقیاس‌های بسیار کوچک، مانند مولکول‌ها، اتم‌ها و ذرّه‌های ریزی که اتم‌ها را می‌سازند، می‌پردازد. ذرّه‌هایی که اتم‌ها را می‌سازند، ذرّه‌های زیر ــ 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 سده‌ی بیستم مطرح شدند. نظریه‌ی نسبیت را برای نخستین بار آلبرت اینشتین عرضه کرد. نظریه‌ی کوانتومی نیز نتیجه‌ی 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.

۳ــ۱ــ نظریه‌ی کوانتومی

در سال ۱۹۰۰میلادی، پنج سال قبل از آن که اینشتین نظریه‌ی نسبیت را پیشنهاد کند، ماکس پلانک نظریه‌ای ارائه داد که در آن زمان تأثیر شگرف آن بر تحولات بعدی چندان آشکار نبود. نظریه‌ی کوانتومی که توسط پلانک ارائه شد، نخستین نظریه از زنجیره‌ی نظریه‌هایی است که مبانی مکانیک کوانتومی را تشکیل می‌دهد. پلانک نظریه‌ی خود را برای توجیه نتیجه‌های تجربی مربوط به تابش موج‌های الکترومغناطیسی از اجسام ارائه داد. شایان ذکر است که این نتیجه‌ها قابل توجیه با قانون‌های فیزیک کلاسیک نبود. در ادامه به توصیف پدیده‌ی تابش می‌پردازیم.

تابش از سطح اجسام: 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 همه‌ی اجسام در ***هر دمایی*** موج‌های الکترومغناطیسی گسیل می‌شود.

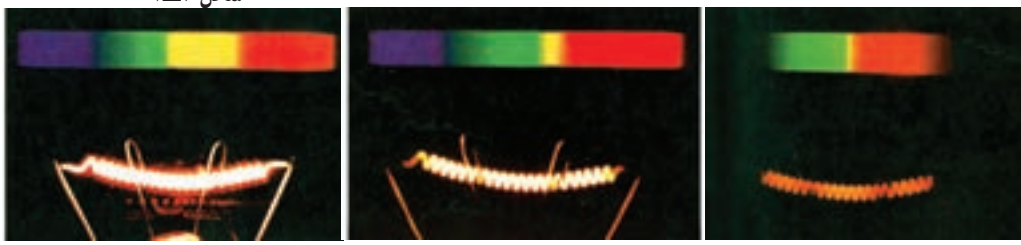
گسیل موج‌های الکترومغناطیسی از سطح جسم‌ها را ***تابش گرمایی*** نیز می‌نامند. در کتاب فیزیک ۱ و آزمایشگاه دیدیم که چگونه می‌توان با عبور یک نور سفید از منشور، آن را به رنگ‌های مختلف (که در نتیجه طول موج‌های مختلف دارند) تجزیه کرد و طیف آن را به‌دست آورد. اگر بین طول موج‌هایی که در یک طیف وجود دارد فاصله‌ای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

در دمای پایین، مثلاً در دمای اتاق یا کمی بالاتر، بیش‌تر تابش گسیل شده دارای طول موج‌هایی در ناحیه‌ی 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 اندازه‌ی کافی بالا رود، از آن نور قرمزرنگی گسیل می‌شود، (شکل ۳ــ۱).

در دماهای باز هم بالاتر، اجسامی ــ مانند رشته‌ی تنگستن داغ درون لامپ روشنایی ــ نور سفید (یعنی نوری با طیف پیوسته که همه‌ی طول موج‌های نور مرئی را در طیف خود دارد) گسیل می‌کنند(شکل ۳ــ۲).

شکل ۳ــ۱



الف ب پ

شکل ۳ــ۲ــ رشته‌ی 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 ۳ــ۱

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

همان‌گونه که گفتیم از سطح هر جسمی همواره انرژی تابشی گسیل می‌شود و اجسام دیگری که در اطراف آن هستند این تابش را دریافت می‌کنند. هر جسم بخشی از انرژی تابشی فرودی بر سطح خود را جذب می‌کند و بقیه را یا بازمی‌تاباند و یا از خود عبور می‌دهد.

ضریب جذب: نسبت مقدار انرژی تابشی جذب شده توسط هر جسم به انرژی تابش فرودی را ضریب جذب آن جسم می‌نامند و آن را با a نشان می‌دهند.

ضریب جذب هر جسم به ویژگی‌های سطح آن جسم بستگی دارد و مقدار آن برای طول موج‌های متفاوت یکسان نیست. به‌عبارت دیگر یک جسم برای هر طول موج ضریب جذب خاصی دارد.

$$a_\lambda = \frac{\text{انرژی تابشی جذب شده با طول موج } \lambda}{\text{انرژی تابشی فرودی با طول موج } \lambda} \qquad (۱ــ۳)$$

پیداست که a_λ نمی‌تواند بزرگ‌تر از یک باشد. امّا هر قدر جسم انرژی تابشی بیش‌تری را جذب کند، ضریب جذب آن بالاتر و به یک نزدیک‌تر است. بهترین جذب‌کننده‌ها جسمی است که تمام تابش فرودی را جذب کند، که در آن‌صورت برای آن $a_\lambda = ۱$ است.

جسم سیاه: جسمی که بتواند همه‌ی طول موج‌های تابش فرودی را به‌طور کامل جذب کند، یعنی برای آن داشته باشیم :

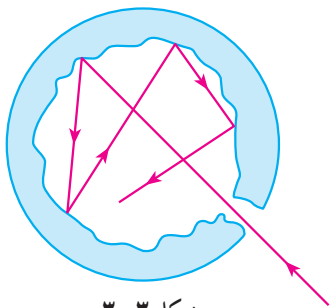
برای همه‌ی طول موج‌ها $a_\lambda = ۱$

جسم سیاه نام دارد. این نام را به این دلیل برگزیده‌اند که جسم‌های به‌رنگ سیاه همه‌ی نور مرئی‌ای را که بر آن‌ها می‌تابد، جذب می‌کنند. توجه داشته باشید که هر جسم سیاه‌رنگ الزاماً جسم سیاه نیست، زیرا ممکن است ضریب جذب آن برای طول موج‌های غیرمرئی کمتر از یک باشد.

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 موج‌های الکترومغناطیسی‌ای که در بازه‌ی زمانی یک ثانیه از واحد سطح آن جسم گسیل می‌شود.**

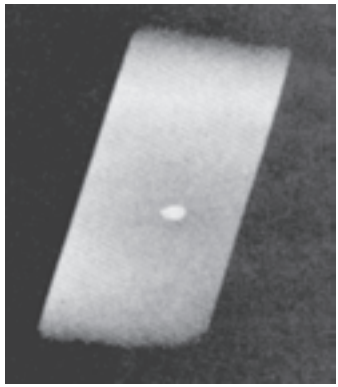
آزمایش‌ها نشان داده‌اند که هرچه ضریب جذب یک جسم بالاتر باشد، شدت تابشی آن نیز بیش‌تر خواهد بود. به این ترتیب جسم سیاه دارای بالاترین شدت تابشی در هر دمایی است. به‌عبارت دیگر در یک دمای معین جسم سیاه بیش از هر جسم دیگر تابش الکترومغناطیسی گسیل می‌کند. پس می‌توان گفت :**جسم سیاه بهترین گسیلنده‌ی موج‌های الکترومغناطیسی و بهترین جذب‌کننده‌ی این موج‌هاست.**

اکنون این سؤال پیش می‌آید که در عمل چه جسمی را می‌توان جسم سیاه دانست؟ فیزیک‌دان‌ها جسم سیاه را به این ترتیب به‌دست می‌آورند که در سطح یک جسم توخالی مانند شکل ۳ــ۳ سوراخ ریزی ایجاد می‌کنند. سطح این سوراخ با تقریب بسیار خوبی ویژگی جسم سیاه را دارد ؛ یعنی همه‌ی تابش فرودی را جذب می‌کند. به این صورت که همه‌ی تابشی که بر سطح سوراخ فرود می‌آید به درون کاواک (فضای درونی جسم تو خالی) وارد می‌شود و در هر فرود بر دیوارهای درونی کاواک بخشی از انرژی خود را از دست می‌دهد (به جسم می‌دهد). در نتیجه پس از فرودهای مکرر بدون آن‌که از کاواک خارج شود کاملاً جذب می‌شود. به این ترتیب، ضریب جذب این سوراخ برای تمام طول موج‌های فرودی برابر یک



شکل ۳ــ۳

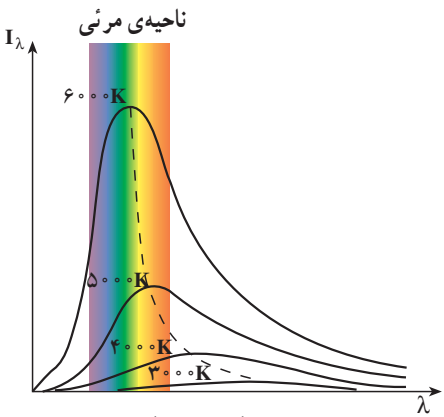
است. حال، از چنین سوراخی می‌توان به عنوان یک جسم سیاه استفاده کرد. شکل ۳ــ۴ این را به‌خوبی نشان می‌دهد. در این شکل، سوراخ بسیار ریزی که در جدار یک لوله‌ی توخالی از جنس تنگستن ایجاد شده نشان داده شده است. این لوله آن‌قدر گرم شده است که از خود نور مرئی گسیل می‌کند. تفاوت بین شدت تابشی سوراخ و شدت تابشی گسیل‌شده از بقیه‌ی قسمت‌های سطح در شکل به‌خوبی مشخص شده است.



شکل ۳ــ۴

مقدار تابش گسیل شده را با کمیتی به نام **تابندگی** مشخص می‌کنند. **تابندگی یک جسم در هر طول موج برابر است با مقدار انرژی موج‌های الکترومغناطیسی با طول موج‌های بین λ و $\lambda+\Delta\lambda$ که در واحد زمان از واحد سطح جسم گسیل می‌شود.**

تابندگی جسم سیاه (I_λ) در طول موج‌ها و دماهای مختلف به‌دقت اندازه‌گیری شده و نتیجه‌ی آن در شکل ۳ــ۵ برای چهار دمای مختلف رسم شده است. گستره‌ی طول موج‌های مرئی نیز در این شکل مشخص شده است.



شکل ۳ــ۵ــ تابندگی پرتوی گسیل شده از جسم سیاه برحسب طول موج

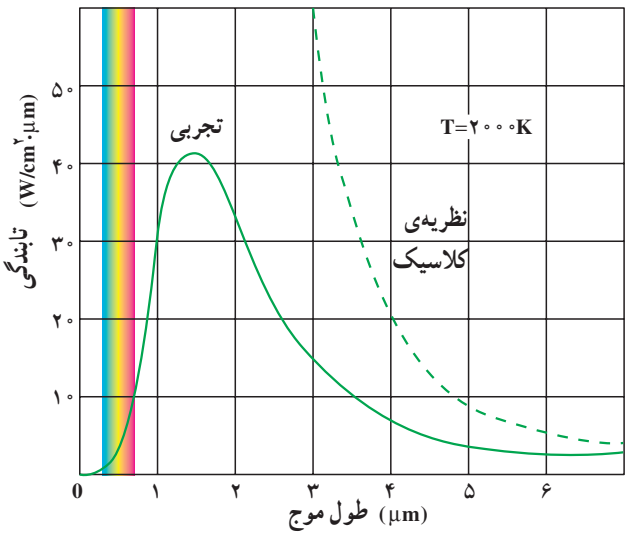
فعالیت ۳ــ۱

با بررسی شکل ۳ــ۵ در گروه خود، الف: تابندگی جسم سیاه را برای یک طول موج معین، در دماهای مختلف، با یک‌دیگر مقایسه کنید. ب: مشخص کنید که آیا در یک دمای معین همه‌ی طول موج‌ها با تابندگی یکسان تابش می‌شوند یا نه؟ پ: اگر نتیجه‌ی دیگری از این بررسی به‌دست آورده‌اید به کلاس گزارش کنید.

همان‌طور که در شکل ۳ــ۵ می‌بینید، ***هرچه دمای جسم سیاه بیش‌تر باشد، بیشینه‌ی 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. 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.

تا ابتدای سده‌ی بیستم میلادی، فیزیک‌دانان نتوانسته بودند با به‌کار بردن قانون‌ها و مفهوم‌های فیزیک کلاسیک، از جمله موج‌های الکترومغناطیسی گسیل شده از سطح یک جسم منحنی‌های تجربی شکل ۳ــ۵ را توجیه کنند. به‌عبارت دیگر از محاسبه‌های آنان منحنی‌هایی به‌دست می‌آمد که با نتیجه‌های تجربی شکل ۳ــ۵ سازگاری نداشت. در شکل ۳ــ۶ منحنی حاصل از محاسبه‌های نظری براساس فیزیک کلاسیک (خط چین) همراه با یک منحنی تجربی برای دمای ۲۰۰۰ کلوین نشان داده شده است.



شکل ۳ــ۶

فعالیت ۳ــ۲

در گروه خود دو منحنی شکل ۳ــ۶ را مورد بحث قرار دهید و موارد ناسازگاری بین آن دو را مشخص کنید.

همان‌طور که در شکل ۳ــ۶ پیداست و پیش از این نیز توضیح داده شد، هر چه دمای جسم سیاه 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 سیاه، رابطه‌ی زیر برقرار است که **قانون جابه‌جایی وین** نام دارد.

$$\lambda_m T = \text{مقدار ثابت} = ۲/۹ \times ۱۰^{-۳}\ m.K \qquad (۲ــ۳)$$

واژه‌ی جابه‌جایی در این قانون، مربوط به چگونگی حرکت یا جابه‌جایی بیشینه‌ی تابندگی با

تغییر دمای جسم سیاه است.

مثال ۳ــ۱

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

پاسخ

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

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

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

با استفاده از شکل ۲ــ۹، این طول موج در محدوده‌ی 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 ارائه‌ی نظریه‌ی کوانتومی خود درباره‌ی تابش توانست نتیجه‌های تجربی به دست آمده را توجیه کند. اساس نظریه‌ی پلانک بر این فرض استوار بود که ***انرژی تابشی جسم کوانتومی*** است. در ادامه، نخست واژه‌ی کوانتوم و مفهوم کمیت کوانتومی را معرفی می‌کنیم. سپس سعی می‌کنیم با بیان بسیار ساده شده‌ای به شرح نظریه‌ی 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 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 کمیّت‌هایی 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 کمیّت کوانتومی را مقدار پایه یا

«کوانتوم» آن کمیّت می‌خوانند.

برای مثال، در مبحث الکتریسیته دیده‌ایم که مقدار بار الکتریکی موجود در یک جسم باردار مضرب درستی از بار یک الکترون ($e = ۱/۶ \times ۱۰^{-۱۹} C$) 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.

نظریه‌ی پلانک درباره‌ی تابش: بنابر نظریه‌ی پلانک مقدار انرژی‌ای که جسم به‌صورت موج‌های الکترومغناطیسی گسیل می‌کند همواره مضرب درستی از یک مقدار پایه است و این مقدار پایه به بسامد موج الکترومغناطیسی بستگی دارد. مطابق این نظریه، انرژی یک موج الکترومغناطیسی با بسامد f برابر است با :

$$E = nhf \qquad (۳_۳)$$

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 نتیجه‌ی محاسبه با منحنی‌های تجربی مربوط به تابش جسم سیاه صورت گرفت. هم‌اکنون مقدار پذیرفته شده برای این ثابت برابر با $h = ۶/۶۳ \times ۱۰^{-۳۴} Js$ است.

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

در رابطه‌ی ۳ــ۳ اگر ثابت پلانک را برحسب ژول ثانیه قرار دهیم، انرژی برحسب ژول به‌دست می‌آید ؛ ولی در بحث درباره‌ی اجزای سازنده‌ی 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 بنابه تعریف برابر تغییر مقدار انرژی یک الکترون تحت ولتاژ یک ولت است.** درحالی که یک ژول برابر است با مقدار انرژی بار الکتریکی برابر یک کولن تحت ولتاژ یک ولت است. در نتیجه رابطه‌ی بین الکترون ولت و ژول به‌صورت زیر است :

$$۱eV = ۱/۶ \times ۱۰^{-۱۹} J = (۱/۶ \times ۱۰^{-۱۹} C) \times (۱V) = \text{انرژی یک الکترون تحت ولتاژ یک ولت}$$

تمرین ۳ــ۱

ثابت پلانک را برحسب eVs به‌دست آورید.

تمرین ۳ــ۲

نور زرد با بسامد تقریبی $۶\times۱۰^{۱۴}\,Hz$، بسامد اصلی نور خورشید را تشکیل می‌دهد. انرژی‌ای که هر کوانتوم این نور (فوتون) حمل می‌کند برحسب eV چه‌مقدار است؟

تمرین ۳ــ۳

انرژی یک کوانتوم رنگ معینی از نور مرئی، برابر $۵\times۱۰^{-۱۹}\,J$ است. رنگ این نور را مشخص کنید.

تمرین ۳ــ۴

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

الف : بسامد این تابش چه‌مقدار است؟

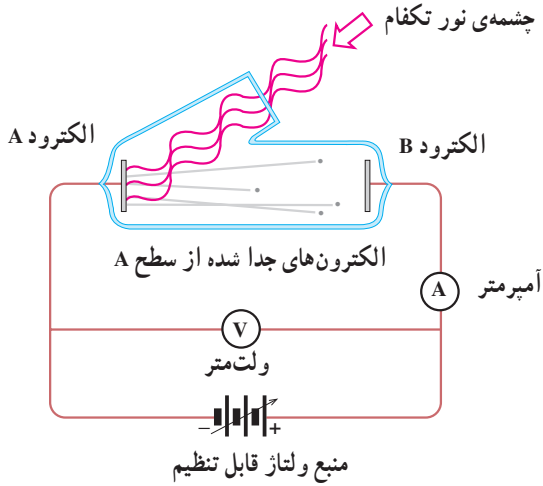
ب : نوع موج الکترومغناطیسی را تعیین کنید.

پ : انرژی‌ای که توسط هر کوانتوم این موج الکترومغناطیسی حمل می‌شود برحسب eV چه‌مقدار است؟

۳ــ۲ــ فوتون و پدیده‌ی فوتوالکتریک

در سال ۱۸۸۷ میلادی، هانریش هرتز دانشمند 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 تخلیه‌ی برق‌نما می‌شود. آزمایش‌های دیگر نشان دادند که این تخلیه‌ی 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 پدیده‌ی **فوتوالکتریک** و الکترون‌های گسیل شده از سطح فلز را **فوتوالکترون** می‌نامند.

برای بررسی پدیده‌ی فوتوالکتریک از دستگاهی مطابق شکل ۳ــ۷ استفاده می‌کنیم. در این دستگاه دو الکترود فلزی A و B در یک محفظه‌ی خلأ قرار دارند و از بیرون به یک منبع ولتاژ قابل تنظیم متصل شده‌اند. الکترود A در مقابل یک چشمه‌ی نور تکفام (تک بسامد) قرار دارد.



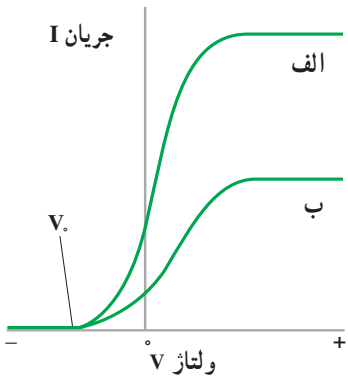
شکل ۳ــ۷

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 ۳ــ۸ 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 پایانه‌ی مثبت منبع ولتاژ متصل است.



شکل ۳ــ۸

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 به سمت 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.

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

برای بیان این وضعیت می‌توان گفت که برای مقدارهای منفی V، الکترود A، که اکنون به پایانه‌ی 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 $V_{\circ}-$ هیچ فوتوالکترونی به B نمی‌رسد.

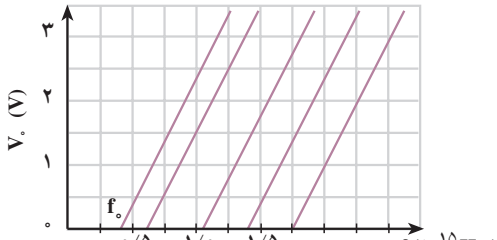
منحنی (ب) مربوط به آزمایشی است که در آن شدت نور فرودی را نصف کرده‌ایم (بسامد نور همان مقدار قبل را دارد). همان‌گونه که از منحنی پیداست مقدار $V_{\circ}$ برای هر دو منحنی یکی است یعنی،

مقدار ولتاژ متوقف کننده 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 ۳ــ۸ به‌دست می‌آوریم تنها با این تفاوت که ولتاژ متوقف کننده مقدار دیگری خواهد داشت؛ یعنی، ***مقدار ولتاژ متوقف‌کننده به بسامد نور فرودی*** بستگی دارد.

اگر در دستگاه شکل ۳ــ۷ جنس الکترود فلزی A را تغییر دهیم، بازهم همین نتیجه‌ها را به‌دست می‌آوریم، ولی در این مورد نیز مقدار ولتاژ متوقف کننده 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 ۳ــ۹

درشکل ۳ــ۹ 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 بر الکترود 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 الکترود فلزی A از f_0 مربوط به آن فلز کم‌تر باشد، پدیده‌ی فوتوالکتریک رخ نمی‌دهد. از این رو f_0 را بسامد قطع می‌نامند.

ناتوانی فیزیک کلاسیک در تفسیر پدیده‌ی 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 قضیه‌ی کار ــ انرژی داریم:

$$eV = K_B - K_A \qquad (۴ــ۳)$$

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 پایانه‌ی 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 رابطه‌ی ۳ــ۴ داریم:

$$-eV_{\circ} = K_{\text{بیشینه}} \Rightarrow eV_{\circ} = K_{\text{بیشینه}} \qquad (۵_۳)$$

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

فیزیک کلاسیک در تفسیر نتیجه‌های تجربی مربوط به پدیده‌ی 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 ۳ــ۸ 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 پدیده‌ی فوتوالکتریک: پیش از این دیدیم که بنابر فرضیه‌ی پلانک انرژی تابشی یک موج الکترومغناطیسی گسیل شده با بسامدf، تنها می‌تواند مضرب درستی از یک مقدار پایه به نام کوانتوم انرژی (hf) باشد. اینشتین در سال ۱۹۰۵ میلادی برای تفسیر پدیده‌ی فوتوالکتریک، با استفاده از فرضیه‌ی 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

$$E = hf \qquad (۶_۳)$$

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

$$E = nhf \qquad (۷_۳)$$

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

مثال ۳ــ۲

الف : انرژی فوتون نور زرد با طول موج ۵۸۹ nm را برحسب الکترون ولت 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 :

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

$$E_T = nhf = nE$$

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

$$n \simeq ۱/۸ \times ۱۰^{۲۰}$$

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

$$K = hf - W \qquad (۸ــ۳)$$

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 :

$$K_{\text{بیشینه}} = hf - W_0 \qquad (۹ـ۳)$$

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 رابطه‌ی ۳ـ۵ می‌توانیم رابطه‌ی ۳ـ ۹ را به‌صورت زیر بنویسیم :

$$eV_0 = hf - W_0 \qquad (۱۰ـ۳)$$

فعالیت ۳ـ۳

با بحث و بررسی در گروه خود، نشان دهید که دو مشکلی که در تفسیر کلاسیکی نتیجه‌های تجربی پدیده‌ی فوتوالکتریک وجود داشت در رابطه‌ی۳ـ۱۰ وجود ندارد.

رابطه‌ی۳ـ۱۰، بین ولتاژ متوقف کننده‌ی V_0 و بسامد فوتون فرودی بر الکترود A ،یک رابطه‌ی خطی است و منحنی آن یک خط راست است که کاملاً با منحنی‌های تجربی در شکل۳ـ۹ سازگار است.

فعالیت ۳ـ ۴

منحنی تغییرات V_0 بر حسب بسامد f را با استفاده از رابطه‌ی ۳ـ۱۰ 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 رابطه‌ی۳ـ۱۰ 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 رابطه‌ی زیر به‌دست می‌آید :

$$f_0 = \frac{W_0}{h} \qquad (۱۱ـ۳)$$

مثال ۳ــ۳

تابع کار تنگستن $۴/۵۲\,eV$ است.

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

ب : بیشینه انرژی جنبشی الکترون‌ها را هنگامی که طول موج $۱۹۸\,nm$ 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 رابطه‌ی $\lambda_{\circ} = \frac{c}{f_{\circ}}$ ، 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 بیشینه K است ؛ بنابراین :

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

تمرین ۳ــ ۵

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

الف : تابع کار این فلز برحسب الکترون ــ ولت چه‌مقدار است؟

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

تمرین ۳ــ۶

تابع کار فلز روی $4/31\,eV$ 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 $220\,nm$ به‌کار گرفته شود ولتاژ متوقف‌کننده چه‌مقدار است؟

۳ــ۳ــ طیف اتمی

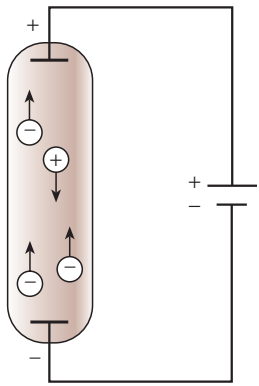
علاوه‌بر آن‌چه تا این‌جا به آن‌ها اشاره کردیم، پدیده‌های دیگری نیز هستند که فیزیک کلاسیک قادر به تفسیر آن‌ها نبود. لذا فیزیک‌دانان با فرض‌های غیرکلاسیکی ــ مانند فرضیه‌های پلانک و اینشتین که در بالا به آن‌ها اشاره شد ــ توانستند این پدیده‌ها را به‌خوبی تفسیر کنند. توصیف این پدیده‌ها فراتر از سطح این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

در کتاب فیزیک (۱) و آزمایشگاه با پاشیدگی نور در منشور آشنا شدید و دیدید که نیوتون برای نخستین بار با گذراندن نور خورشید از منشور «طیف نور سفید» را تشکیل داد. نیوتون نشان داد که نور سفید آمیزه‌ای از رنگ‌های مختلف است. اکنون می‌دانیم نور سفید از طول موج‌های مختلفی، از نور بنفش با طول موج حدود $0/4\,\mu m$ تا نور قرمز با طول موج حدود $0/7\,\mu m$، تشکیل شده است. طیف نور سفید که یک طیف پیوسته است در شکل ۳ــ۱۰ نشان داده شده است.

شکل ۳ــ۱۰

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 ۳ــ۱۱ــ 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 برقرار شود، اتم‌های گاز درون لامپ مطابق شکل ۳ــ۱۱ــ ب و پ شروع به گسیل نور می‌کنند. نوری که از لامپ‌های حاوی بخارعنصرهای متفاوت گسیل می‌شود، با یک دیگر تفاوت دارد. برای مثال نوری که اتم‌های بخار جیوه گسیل می‌کنند، همان‌گونه که در شکل ۳ــ۱۱ نشان داده شده است به رنگ نیلی ــ آبی است. اگر این نور را مطابق شکل۳ــ۱۲ 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.



الف

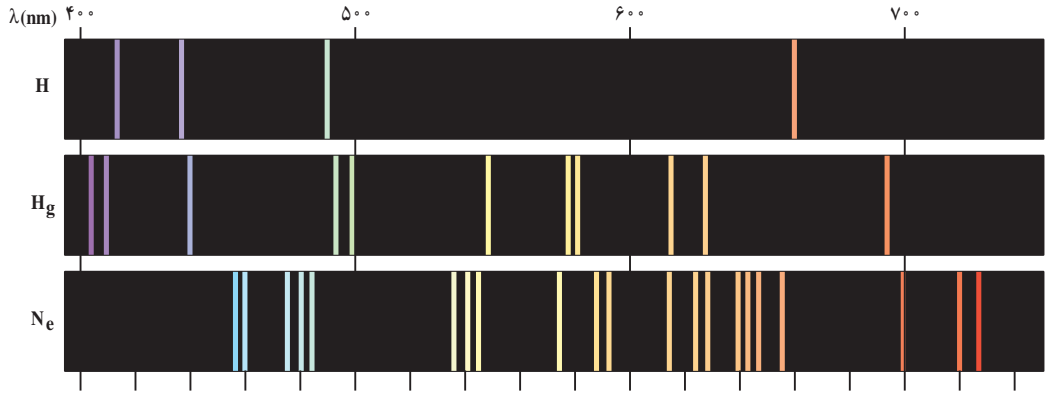
ب

پ

شکل۳ــ۱۱

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 از نظر تعداد و هم از نظر طول موج با خط‌های طیف حاصل از لامپ بخار جیوه تفاوت دارد. طیف نور گسیل شده از بخار هر عنصر را ***طیف اتمی*** آن عنصر می‌نامند. پس می‌توان گفت که طیف اتمی عنصرهای مختلف باهم تفاوت دارد. طیف اتمی چند عنصر در شکل ۳ــ۱۳نشان داده شده است. طیف اتمی حاصل از نور گسیل شده از بخار عنصرها را طیف گسیلی (یا نشری) آن اتم‌ها می‌نامند.

شکل۳ــ۱۲



شکل۳ــ۱۳

طیف اتمی جیوه، خط‌هایی در ناحیه‌ی 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 دیواره‌ی درونی این لامپ‌ها با پوشش نازکی از یک ماده‌ی 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 ناحیه‌ی 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 جیوه‌ی 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، خط های تاریکی در طیف پیوسته‌ی آن مشاهده خواهیم کرد (شکل ۳ــ۱۴). این مطلب نشان می‌دهد که بعضی از طول موج‌ها در نوری که از خورشید به‌زمین می‌رسد، وجود ندارد و به‌جای آن‌ها، در طیف پیوسته‌ی 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 پیوسته‌ی خورشید به‌صورت خط‌های تاریک ظاهر می‌شود. طیف نور سفیدی را که بعضی از خط‌ها با طول موج‌های آن جذب شده باشد، **طیف جذبی** می‌نامیم.

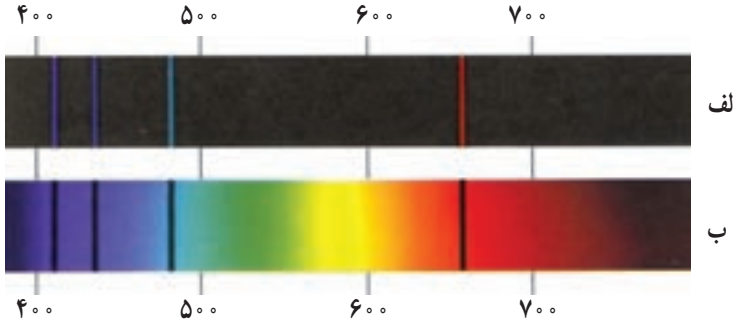
در اواسط سده‌ی نوزدهم، معلوم شد که اگر نور سفید از داخل بخار عنصری عبور کند و سپس طیف آن تشکیل شود، در طیف آن، خط‌های تاریکی ظاهر می‌شود. این خط‌ها (طول موج‌ها) توسط اتم‌های بخار عنصر جذب شده‌اند. مطالعه‌ی طیف‌های گسیلی و جذبی عنصرهای مختلف نشان می‌دهد که :

۱ــ در طیف گسیلی و هم در طیف جذبی هر عنصر طول موج‌های معینی وجود دارد که از ویژگی‌های مشخصه‌ی 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 به‌اندازه‌ی کافی بالا رود و یا به هرصورت دیگر برانگیخته شود، آن‌ها را تابش می‌کند.

شکل ۳ــ۱۴ــ 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 ۳ــ۱۵ نشان داده شده‌اند.



شکل ۳ــ۱۵

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

ب ــ طیف جذبی، خط‌های تاریک در زمینه‌ی روشن معرف طول موج‌های جذب شده هستند.

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

فعالیت ۳ــ ۵

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 ***طیف نمایی*** می‌نامند. طیف نمایی ابزار توانمندی برای شناسایی عنصرهاست. در سال‌های پایانی سده‌ی نوزدهم میلادی چند عنصر ناشناخته، تنها به کمک طیف‌نمایی کشف شد، ولی علی‌رغم این کاربردهای موفق تجربی، در قرن نوزدهم نظریه‌ی 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 وسیله‌ی 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 همه‌ی 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 این که «***چرا هر عنصر تنها طول موج‌های خاصی را که مشخصه‌ی آن عنصر است جذب می‌کند و بقیه‌ی طول موج‌ها را جذب نمی‌کند؟***» وجود ندارد.

نیلس بور، فیزیک‌دان دانمارکی، در سال ۱۹۱۳میلادی با بیان فرضیه‌هایی درباره‌ی اتم‌ها، طیف اتمی را توجیه کرد و بار دیگر نشان داد که تجدید نظر اساسی در فیزیک کلاسیک ضروری است.

رابطه‌ی 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 ۳ــ۱۵ 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 رابطه‌ی زیر به‌دست آورد :

$$\lambda = ۳۶۴/۵۶ \frac{n^۲}{n^۲ - ۴} \qquad (۱۲ــ۳)$$

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 تجربه‌ی فیزیکی به‌دست آورد.

مثال ۳ــ۴

طول موج خط‌های طیفی شکل ۳ــ۱۵ را به کمک رابطه‌ی 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

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

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

توفیق بالمر درخصوص یافتن رابطه‌ای برای خط‌های طیف اتم هیدروژن در ناحیه‌ی مرئی موجب شد که تلاش‌های بیش‌تری در جهت یافتن خط‌های دیگر طیف اتم هیدروژن صورت گیرد. بالمر پیش‌گویی کرد که اتم هیدروژن ممکن است دارای خط‌های طیفی دیگری نیز باشد که از رابطه‌هایی به صورت زیر به‌دست می‌آیند :

$$\lambda = ۳۶۴/۵۶ \frac{n^۲}{n^۲ - ۹} \qquad (۱۳_۳)$$

و یا

$$\lambda = ۳۶۴/۵۶ \frac{n^۲}{n^۲ - ۱۶} \qquad (۱۴_۳)$$

کار عمده در زمینه‌ی جست‌وجو برای طیف کامل اتم هیدروژن توسط ریدبرگ در حدود سال ۱۸۹۰میلادی انجام شد. وی توانست برخی از خط‌های مربوط به رابطه‌های (۳ــ۱۱و۳ــ۱۲) را نیز مشاهده کند. ریدبرگ کار کردن با عکس طول موج را مناسب‌تر تشخیص داد ؛ لذا رابطه‌ی بالمر (معادله‌ی۳ــ۱۲) را به صورت زیر نوشت :

$$\frac{۱}{\lambda} = R_H \left(\frac{۱}{۲^۲} - \frac{۱}{n^۲} \right) \qquad (۱۵_۳)$$

که در آن R_H ثابت ریدبرگ برای اتم هیدروژن نامیده می‌شود و مقدار آن برابر است با $R_H = ۰/۰۱۰۹(nm)^{-۱}$.

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

$$\frac{۱}{\lambda} = R_H\left(\frac{۱}{n'^{۲}} - \frac{۱}{n^{۲}}\right) \quad n > n' \qquad (۱۶_۳)$$

با قرار دادن $n' = ۲$ رابطه‌ی بالمر (۳ــ۱۵) به‌دست می‌آید. خط‌های طیف مربوط به $n' = ۲$ را «رشته‌ی بالمر» می‌نامند.

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

به ازای $n' = ۱$ داریم :

$$\frac{۱}{\lambda} = R_H\left(\frac{۱}{۱^{۲}} - \frac{۱}{n^{۲}}\right) \quad n = ۲,۳,۴,\ldots$$

این رشته را «رشته‌ی لیمان» می‌نامند.

همچنین به ازای $n' = ۳$ داریم :

$$\frac{۱}{\lambda} = R_H\left(\frac{۱}{۳^{۲}} - \frac{۱}{n^{۲}}\right) \quad n = ۴,۵,۶,\ldots$$

این رشته را نیز «رشته‌ی پاشن» می‌نامند. در جدول ۳ــ۱ رشته‌های طیف اتم هیدروژن داده شده‌اند.

جدول ۳ــ۱

نام رشته	مقدار n'	رابطه‌ی ریدبرگ مربوط	مقدارهای n	گستره‌ی طول موج
لیمان	۱	$\frac{۱}{\lambda} = R_H\left(\frac{۱}{۱^{۲}} - \frac{۱}{n^{۲}}\right)$	$n = ۲,۳,۴,\ldots$	فرابنفش
بالمر	۲	$\frac{۱}{\lambda} = R_H\left(\frac{۱}{۲^{۲}} - \frac{۱}{n^{۲}}\right)$	$n = ۳,۴,۵,\ldots$	فرابنفش و مرئی
پاشن	۳	$\frac{۱}{\lambda} = R_H\left(\frac{۱}{۳^{۲}} - \frac{۱}{n^{۲}}\right)$	$n = ۴,۵,۶,..$	فروسرخ
براکت	۴	$\frac{۱}{\lambda} = R_H\left(\frac{۱}{۴^{۲}} - \frac{۱}{n^{۲}}\right)$	$n = ۵,۶,۷,\ldots$	فروسرخ
پفوند	۵	$\frac{۱}{\lambda} = R_H\left(\frac{۱}{۵^{۲}} - \frac{۱}{n^{۲}}\right)$	$n = ۶,۷,۸,\ldots$	فروسرخ

مثال ۳ــ۵

طول موج اولین خط طیفی اتم هیدروژن در رشته‌ی لیمان را که برای آن $n' = ۱$ و $n = ۲$ است به‌دست آورید و تعیین کنید که این خط در کدام گستره‌ی موج‌های الکترومغناطیسی واقع است.

پاسخ

برای $n' = ۱$ و $n = ۲$ طبق رابطه‌ی ریدبرگ داریم :

$$\frac{۱}{\lambda} = R_H\left(\frac{۱}{۱} - \frac{۱}{۴}\right) = \frac{۳}{۴}R_H$$

در نتیجه طول موج این خط برابر است با :

$$\lambda = \frac{۴}{۳R_H} = \frac{۴}{۳\times ۰/۰۱۰۹(nm)^{-۱}} = ۱۲۱nm$$

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

وجود خط‌های طیفی متفاوت برای اتم‌ها و رابطه‌ی ساده و دقیقی مثل رابطه‌ی 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.

۳ــ۴ــ الگوهای اتمی

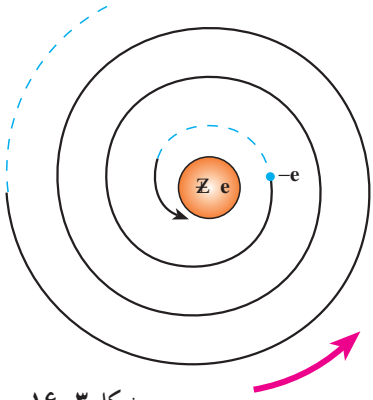
الگوی اتمی تامسون: تامسون، دانشمند انگلیسی که با آزمایش‌هایی موفق به کشف الکترون در سال ۱۸۹۶ میلادی شده بود، نخستین الگوی اتمی را در سال ۱۸۹۹ میلادی ارائه داد. در این الگو، اتم به صورت توزیع کروی یکنواختی از جرم و بار مثبت در نظر گرفته شد که الکترون‌ها (بارهای منفی) مانند کشمش‌های درون یک کیک کشمشی درون 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 ۱۹۱۲میلادی الگوی دیگری برای ساختار اتم ارائه کرد.

الگوی اتمی رادرفورد: در الگوی اتمی رادرفورد همه‌ی بار مثبت اتم در یک ناحیه‌ی 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 منظومه‌ی 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 نظریه‌ی 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 ۳ــ۱۶).



شکل ۳ــ۱۶

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 گسسته‌ی اتمی نیست.

الگوی اتمی بور: نیلس‌بور، فیزیکدان دانمارکی، در سال ۱۹۱۳ میلادی برای حل مشکل ناپایداری الگوی

اتمی رادرفورد و با توجه به طیف گسسته‌ی تابش گسیل شده از اتم‌ها و رابطه‌ی 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 هسته‌ی با بار $+e$ در شکل ۳ــ۱۷ 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 :

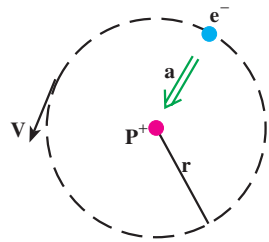
$$\frac{ke^2}{r^2}=\frac{mv^2}{r} \qquad (۳ــ۱۷)$$

از آن جا 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 :

$$E=K+U=\frac{1}{2}mv^2-\frac{ke^2}{r} \qquad (۳ــ۱۸)$$

با استفاده از رابطه‌ی ۳ــ۱۷ به‌دست می‌آوریم :

$$K=\frac{1}{2}mv^2=\frac{ke^2}{2r} \qquad (۳ــ۱۹)$$



شکل ۳ــ۱۷

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

$$E = -\frac{ke^2}{2r} \qquad (۲۰_۳)$$

۲ــ الکترون در حین حرکت روی یک مدار مانا، برخلاف نظریه‌ی 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 رابطه‌ی زیر به‌دست می‌آیند.

$$r_n = a_0 n^2 \qquad n = 1, 2, 3, \ldots \qquad (۲۱_۳)$$

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 به‌دست آورد :

$$a_0 = \frac{h^2}{4\pi^2 mke^2} \qquad (۲۲_۳)$$

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

مثال ۳ــ۶

شعاع اتم بور را محاسبه کنید.

پاسخ

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

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

$$= 0/529\times10^{-10}\,m = 0/0529\,nm$$

اکنون اگر به کمک رابطه‌ی ۳ــ۲۰ مقدار انرژی الکترون در مدار مجاز nام را محاسبه کنیم، به‌دست می‌آوریم :

$$E_n = \frac{2\pi^2 mk^2 e^4}{h^2} \times \frac{1}{n^2} \qquad n = 1, 2, \ldots \qquad (۲۳_۳)$$

بدین ترتیب الکترون تنها مجاز است انرژی‌ای برابر با یکی از مقدارهایی که از رابطه‌ی ۲۳_۳ به‌دست می‌آید داشته باشد. هر یک از این مقدارهای مجاز را یک ***تراز انرژی*** می‌نامند.

۴ــ 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 $(n_2 < n_1)E_{n_2}$ برود، یا به عبارت دیگر از یک ترازانرژی بالاتر به یک تراز انرژی پایین‌تر برود. در این صورت، انرژی فوتون موج الکترومغناطیسی گسیل شده برابراختلاف انرژی بین دو تراز است؛ یعنی:

$$hf = E_{n_1} - E_{n_2} \qquad (۲۴_۳)$$

رابطه‌ی ۲۳_۳ را می‌توانیم به صورت زیر بنویسیم :

$$E_n = \frac{E_R}{n^2} \qquad (۲۵_۳)$$

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 ($n = 1$) باشد، می‌گوییم در ***حالت پایه*** قرار دارد. مدارهای با انرژی بالاتر از E_1 را ***حالت‌های برانگیخته*** می‌خوانند. انرژی این حالت‌ها از رابطه‌ی ۲۵_۳ به‌ازای $n = 2, 3, \ldots$ به‌دست می‌آید :

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

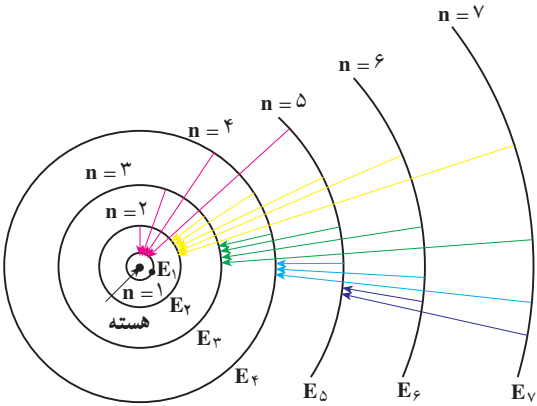
و

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

و به همین ترتیب برای بقیه‌ی 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 ۳ــ۱۸ 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 رابطه‌ی تجربی ریدبرگ ــ بالمر نیز به‌درستی توضیح داده شد.



شکل ۳ــ۱۸

مثال ۳ــ۷

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 رابطه‌ی ریدبرگ مقایسه کنید.

پاسخ

الف : با استفاده از رابطه‌های ۳ــ۲۴ و ۳ــ۲۵ 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 رابطه‌ی 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 رشته‌ی بالمر را گسیل می‌کند.

تمرین ۳ــ۷

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 ۳ــ۶

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 رابطه‌ی ۳ــ۲۳ نیز به همین معناست.

انرژی الکترون در مدار اول بور برابر $E_1 = -13/6\,eV$ است؛ و این بدان معناست که برای آن که الکترونی را که در حالت پایه‌ی اتم هیدروژن است کاملاً از قید هسته رها کنیم، باید به آن $13/6\,eV$ انرژی بدهیم. این مقدار انرژی را ***انرژی بستگی*** الکترون در تراز اول اتم هیدروژن

می‌نامیم. این مقدار با تجربه به خوبی سازگار است.

تمرین ۳ــ۸

انرژی بستگی الکترون را در هر یک از حالت‌های برانگیخته‌ی $E_۲$ و $E_۳$ اتم هیدروژن به‌دست آورید.

نظریه‌ی 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 ؛ مثلاً، می‌توانیم ترازهای انرژی هلیم یک بار یونیده (هلیمی که یک الکترون از دست داده باشد)، لیتیم دوبار یونیده، و الی آخر را محاسبه کنیم. در این صورت انرژی‌های مجاز از رابطه‌ی ۳ــ ۲۶ به‌دست می‌آید.

$$E_n = E_R \frac{Z^۲}{n^۲} \qquad (۲۶_۳)$$

که در آن Z تعداد پروتون‌های هسته‌ی اتم می‌باشد.

مثال ۳ــ۸

دو تا از بلندترین طول موج‌های رشته‌ی بالمر بریلیم سه بار یونیده $(Z = ۴)$ را محاسبه کنید.

پاسخ

چون تابش‌های رشته‌ی بالمر به تراز $n = ۲$ ختم می‌شوند، دو تا از بلندترین طول موج‌ها عبارت‌اند از : تابش‌های متناظر با $n = ۳ \to n = ۲$ و $n = ۴ \to n = ۲$.
انرژی این تابش‌ها و طول موج‌های متناظر با آن‌ها عبارت‌اند از :

$$E_۳ - E_۲ = (۱۳/۶\text{eV})(۴^۲)(\frac{۱}{۹} - \frac{۱}{۴}) = ۳۰/۲\text{eV}$$

$$\lambda = \frac{hc}{E} = \frac{۱۲۴۰\text{eV.nm}}{۳۰/۲\text{eV}} = ۴۱\ \text{nm}$$

$$E_۴ - E_۲ = (۱۳/۶\text{eV})(۴^۲)(\frac{۱}{۱۶} - \frac{۱}{۴}) = ۴۰/۸\text{eV}$$

$$\lambda = \frac{hc}{E} = \frac{۱۲۴۰\text{eV.nm}}{۴۰/۸\text{eV}} = ۳۰/۴\ \text{nm}$$

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 درباره‌ی 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.

۳ــ۵ــ آشنایی با لیزر

بیش از ۴۰ سال از ساخت نخستین لیزر[1] یاقوتی توسط مایمن[2] و نخستین لیزر گازی هلیم ــ 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 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 استفاده‌ی ما در زندگی و صنعت، از قبیل دستگاه‌های بازخوانی اطلاعات از روی لوح‌های فشرده، چاپگرها، شبکه‌های مخابرات کابل نوری، دستگاه‌های برش فلزات (شکل ۳ــ۱۹ــ الف) و ... کاربرد زیادی پیدا کرده است. در حرفه‌ی پزشکی نیز جهت انجام پاره‌ای امور هم‌چون جراحی، بخیه‌ی بافت‌های بدن، اصلاح دید چشم (شکل ۳ــ۱۹ــ ب) و ... کاربرد زیادی دارد.

الف

ب

شکل ۳ــ۱۹

۱ــ کلمه‌ی لیزر از سر حرف واژه‌های انگلیسی درعبارت زیر گرفته شده و به معنای «تقویت نور به روش گسیل القایی تابش» است.

Light **A**mplification by **S**timulated **E**mission of **R**adiation (**LASER**)

۲ــ T.H.Maiman

فعالیت ۳ــ ۷

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 به حالت برانگیخته رفته است و آن را به صورت زیر نمایش می‌دهیم :

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

علامت ستاره حاکی از حالت برانگیخته است. بر هم کنش فوتون با اتم را جذب می‌نامیم که در نمودارهای شکل ۳ــ۲۰ نشان داده شده است. شکل ۳ــ۲۰ــ الف اتم را قبل از دریافت تابش و شکل ۳ــ۲۰ــ 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 ۳ــ۲۰

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 :

فوتون + اتم $\longrightarrow$ اتم*

این برهم کنش در نمودارهای شکل ۳ــ۲۱ نشان داده شده است. شکل ۳ــ۲۱ــ الف اتم را در حالت برانگیخته و شکل ۳ــ۲۱ــ 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 :

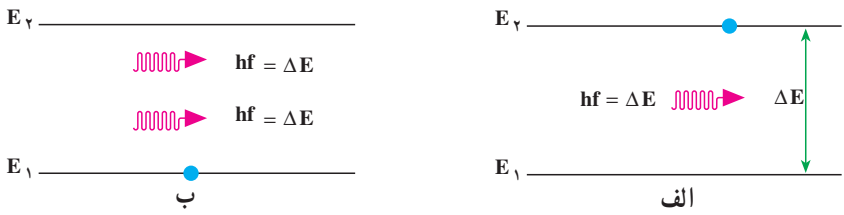
$$hf = E_2 - E_1 = \Delta E$$

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 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 $\longrightarrow$ فوتون + اتم*

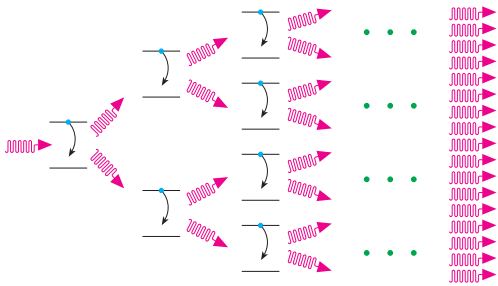
شکل ۳ــ۲۱

این برهم کنش در نمودارهای شکل ۳ــ۲۲ نشان داده شده است. شکل ۳ــ۲۲ــ الف اتم را در حالت برانگیخته و شکل ۳ــ۲۲ــ ب اتم را در حالت پایه نشان می‌دهد. توجه به این نکته ضروری است که اگر اتم در حالتی که در شکل ۳ــ۲۲ــ 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 ۳ــ۲۲ــ ب نیز دیده می‌شود، فوتون گسیل شده از اتم، با فوتون فرودی هم‌جهت، هم‌فاز و هم‌انرژی است.



شکل ۳ــ۲۲

اکنون فرض کنید مجموعه‌ای از اتم‌های یکسان که همگی در یک حالت برانگیخته‌اند، در اختیار داریم (شکل ۳ــ۲۳). 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، اساس‌کار لیزر را تشکیل می‌دهد. توجه داشته باشید که شکل ۳ــ۲۳ صرفاً طرح‌واره‌ای از فرایند گسیل القایی را نشان می‌دهد.



شکل ۳ــ۲۳

تمرین‌های فصل سوم

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

۴ــ 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؟

۵ــ حداقل انرژی لازم برای جدا کردن یک الکترون از سطح فلز سدیم برابر با ۲/۲۸eV است.

الف : آیا فوتون‌هایی با طول موج ۶۸۰nm قادر به جدا کردن 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؟

۶ــ در چه مواردی یک جسم، طیف پیوسته یا ناپیوسته گسیل می‌کند؟

۷ــ آیا ممکن است به کمک طیف گسیلی پیوسته‌ی یک جسم، به جنس آن پی برد؟ به کمک چه طیفی می‌توان این کار را انجام داد؟

۸ــ آیا ممکن است به کمک طیف خورشید، عناصر موجود در خورشید را شناسایی کرد؟ توضیح دهید.

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

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

۱۱ــ طول موج رشته‌ی لیمان مربوط به اتم هیدروژن را با استفاده از رابطه‌ی ریدبرگ حساب کنید. مکان این خطوط را در طیف موج‌های الکترومغناطیسی مشخص کنید.

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

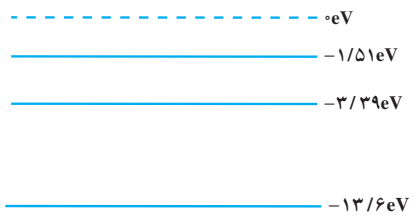
۱۳ــ اگر الکترون در اتم هیدروژن در تراز $n = ۴$ باشد، چه طول موج‌هایی را می‌تواند تابش کند؟

۱۴ــ شکل ۳ــ۲۴ تعدادی از ترازهای انرژی اتم هیدروژن را نشان می‌دهد.

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؟



شکل ۳ــ۲۴

۱۵ــ 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؟

۱۶ــ 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.

۱۷ــ انرژی یونش، انرژی لازم برای خارج کردن یک الکترون از اتم است. انرژی یونش را در موارد زیر حساب کنید.

الف : حالت پایه‌ی اتم هیدروژن $(n = ۱)$

ب : تراز $n = ۳$ اتم هیدروژن.

۱۸ــ با استفاده از رابطه‌ی بور اختلاف انرژی $\Delta E(n_۱ \to n_۲) = E_{n۱} - E_{n_۲}$ را حساب کنید و نشان دهید که :

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

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

۱۹ــ 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؟

۲۰ــ یکی از مشکلاتی که نازک شدن لایه‌ی 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؟

۲۱ــ توان باریکه‌ی 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 باریکه‌ی نورخروجی ۶۳۳nm باشد، در هر ثانیه چند فوتون از این لیزر گسیل می‌شود؟

۲۲ــ کوتاه‌ترین و بلندترین طول موج‌های سری لیمان هلیم یک مرتبه یونیده را حساب کنید.

۲۳ــ انرژی حالت پایه‌ی لیتیم دو مرتبه یونیده $(Z = ۳)$ را حساب کنید.

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؟