۷ــ۴ــ الگوهای اتمی

نگاهی دوباره به مفهوم*

نظم موجود در سری خط‌های طیفی اتم باید ناشی از وجود نظم در ساختار اتم باشد. می‌توان هر اتم را مانند یک آلت موسیقی مانند فلوت در نظر گرفت. اتم می‌تواند فقط مجموعهٔ گسسته‌ای از خط‌های طیفی گسیل کند، همان‌طور که فلوت نیز یک مجموعهٔ گسسته طنین تولید می‌کند که در مجموع مقیاس موسیقی تشکیل می‌دهند. نظم موجود در فاصلهٔ میان طنین‌ها در این مقیاس موسیقی، ناشی از نظم موجود در ساختار فلوت است؛ در لولهٔ فلوت تعدادی سوراخ با فاصلهٔ منظم وجود دارد که نوع امواج ایستادهٔ داخل لوله و همچنین نوع امواج تابشی را تعیین می‌کنند.

جی.جی. تامسون، کاشف الکترون، یکی از اولین کسانی بود که کوشید گسیل نور را برحسب ساختار اتم توضیح دهد. تامسون، با اثبات این نکته که الکترون‌ها جزئی از ماده‌اند که همه جا حضور دارند، تصویر زیر را برای اتم پیشنهاد کرد. هر اتم از تعدادی الکترون، مثلاً Z الکترون تشکیل شده است که در ابری از بار مثبت قرار دارند. این ابر سنگین تقریباً حامل همهٔ جرم اتم است. بار مثبت در ابر برابر $+Ze$ است و بنابراین بار منفی $-Ze$ الکترون‌ها را دقیقاً خنثی می‌کند. در اتمی که مختل نشده است، الکترون‌ها در مکان‌های تعادل خود قرار دارند، که در آن اثر جاذبهٔ ابر بر الکترون‌ها با دافعهٔ متقابل آنها متوازن می‌شود (شکل۲۵) اما اگر الکترون‌ها، مثلاً براثر برخورد، مختل شوند، حول مکان تعادل خود به ارتعاش درمی‌آیند، و حرکت شتابدار آنها باعث گسیل تابش الکترومغناطیسی، یعنی گسیل نور می‌شود. این مدل اتم، که مدل «باسلُقی» نامیده می‌شود، بسامد ارتعاش الکترون‌ها را در برابر بسامد نور به‌دست می‌دهد، اما سری طیفی مشاهده شده را توجیه نمی‌کند؛ به عنوان مثال، براساس این مدل، هیدروژن باید فقط یک تک‌خط طیفی، در فرابنفش دور، داشته باشد. در سال ۱۹۱۰، در آزمایش‌های ارنست رادرفورد و همکارانش به‌طور قطع ثابت شدکه بیشتر جرم اتم در داخل یک ابر پراکنده نیست، بلکه در مغز یا هستهٔ کوچکی در مرکز اتم متمرکز است.

در نتیجه طول موج این خط برابر است با :

$$\lambda = \frac{۴}{۳R_H} = \frac{۴}{۳\times ۰/۰۱۰۹(nm)^{-1}} = ۱۲۱nm$$

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

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

۷ــ۴ــ 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.

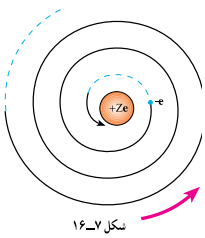
اگرچه تامسون براساس الگوی کیک کشمشی توانست برخی از ویژگی‌های اتم‌ها را توجیه کند، ولی رادرفورد با آزمایش‌هایی که به منظور تأیید و تکمیل الگوی کیک کشمشی تامسون انجام داد، به نتیجه‌هایی دست یافت که با چنین الگویی سازگار نبود. آزمایش‌های وی نشان دادند که بار مثبت اتم باید در بخش کوچکی در مرکز اتم متمرکز باشد. رادرفورد بر اساس این نتیجه‌ها در سال ۱۹۱۲میلادی الگوی دیگری برای ساختار اتم ارائه کرد.

الگوی اتمی رادرفورد : در الگوی اتمی رادرفورد همهٔ بار مثبت اتم در یک ناحیهٔ مرکزی با حجم بسیار کوچکی به نام هسته متمرکز شده است و اطراف آن را الکترون‌ها با بار منفی، در فاصله‌ای زیاد احاطه کرده‌اند، به‌گونه‌ای که می‌توان گفت فضای بین هسته و الکترون‌ها خالی است. رادرفورد در الگویی که برای اتم ارائه کرد به 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 الکتریکی بین هسته و الکترون، روی هسته سقوط کنند و در نتیجه اتم ناپایدار باشد، یعنی ساختار داخلی

آن درهم فرو ریزد که این موضوع کاملاً خلاف چیزی است که در عمل وجود دارد.

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

در فصل قبل در قسمت تولید موج‌های الکترومغناطیسی دیدیم، حرکت شتابدار بارهای الکتریکی در آنتن موج الکترومغناطیسی تولید می‌کند. حرکت الکترون به دور هسته نیز یک حرکت شتابدار است، از این‌رو بنابر نظریهٔ الکترومغناطیسی کلاسیک باید این الکترون، موج الکترومغناطیسی گسیل کند و بسامد موج گسیل شده با بسامد حرکت مداری الکترون برابر است. در نتیجه با گسیل موج الکترومغناطیسی، از انرژی الکترون کاسته می‌شود که این کاهش انرژی با توجه به آنچه در مبحث حرکت دایره‌ای دیدیم، باعث می‌شود که شعاع مدار الکترون به دور هسته کوچک‌تر و بسامد حرکت آن بیشتر شود. تغییر بسامد مداری به معنای تغییر بسامد موج الکترومغناطیسی است که گسیل می‌شود. بنابراین الکترون‌ها به تدریج انرژی خود را از دست می‌دهند و بسامد حرکت آنها به تدریج افزایش می‌یابد، بسامد موج الکترومغناطیسی گسیل شده نیز به تدریج زیاد می‌شود. به این ترتیب باید طیف موج الکترومغناطیسی گسیل شده از اتم، پیوسته باشد و الکترون پس از گسیل‌های متوالی موج‌های الکترومغناطیسی روی هسته بیفتد (شکل۷ــ۱۶).



شکل۷ــ۱۶

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

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

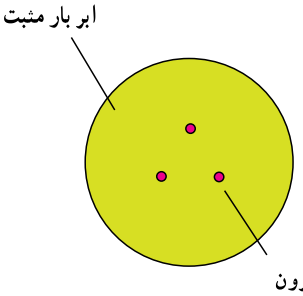
۱ــ الکترون، تنها روی مدارهای دایره‌ای با شعاع‌های معینی حرکت می‌کند، این مدارها «مدارهای مانا» نامیده می‌شوند.

* دانش‌آموزان در درس شیمی ۲، بخش ۱، با ساختار اتم و مدل‌های اتمی مختلف آشنا شده‌اند.

شکل ۲۴ــ سر ارنست رادرفورد، ۱۸۷۱ــ۱۹۳۷، فیزیکدان تجربی انگلیسی و مدیر آزمایشگاه کاوندیش در کمبریج. رادرفورد پرتوهای آلفا و بتا را شناسایی کرد. او با کشف هسته و تبدیل عناصر هسته‌ای بر اثر واپاشی پرتوزا، فیزیک هسته‌ای را بنیانگذاری و اولین واکنش هسته‌ای مصنوعی را نیز تولید کرد. وی در سال ۱۹۰۸ جایزهٔ نوبل شیمی گرفت.

رادرفورد، گسیل ذرات آلفا از مواد پرتوزا را مطالعه می‌کرد. بار ذرات آلفا برابر $2e+$ و جرم آنها تقریباً چهاربرابر جرم پروتون است (ساختار ذرات آلفا مانند ساختار هسته‌های اتم هلیم است؛ بعضی ذرات پرتوزا همانند پولونیم و بیسموت پرتوزا خود به‌خود ذرات آلفای با انرژی چندین میلیون الکترون ولت گسیل می‌کنند.) این ذرات پرانرژی به راحتی از ورق‌های نازک فلز، شیشه‌های نازک و سایر مواد می‌گذرند.

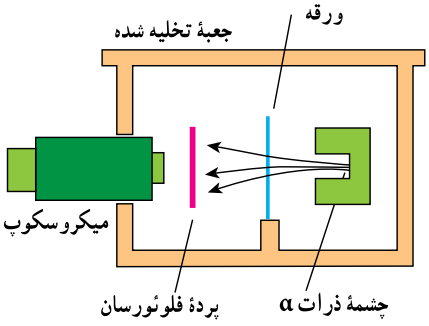
رادرفورد به شدت تحت تأثیر قدرت نفوذ این ذرات قرار گرفت و متوجه شد که **از یک باریکهٔ این ذرات می‌توان به عنوان کاوه برای «کاوش» درون اتم استفاده کرد.** وقتی یک باریکه از ذرات آلفا با یک ورق فلزی برخورد می‌کند، این ذرات به داخل اتم‌ها نفوذ می‌کنند و بر اثر برخورد با ساختار زیراتمی منحرف می‌شوند؛ بزرگی این انحراف‌ها سرنخی دربارهٔ ساختارهای زیراتمی به‌دست می‌دهد. به‌عنوان مثال، اگر ساختار داخل اتم همان ساختار «باسلُقی» پیشنهادی جی. جی. تامسون



شکل ۲۵ــ اتم لیتیم طبق مدل «باسلُقی»،

باشد، ذرات آلفا خیلی کم منحرف می‌شوند، زیرا نه الکترون‌ها، با آن جرم اندکشان و نه ابر پخشیدهٔ بار مثبت، می‌تواند حرکت ذرات سنگین و پرانرژی آلفا را مختل کنند.

آزمایش‌های تعیین کننده را اچ، گایگروای. مارسدن، که زیرنظر رادرفورد کار می‌کردند انجام دادند. آن‌ها از ورقه‌های نازک طلا و نقره به عنوان هدف استفاده کردند و یک باریکه ذرات آلفا از یک چشمهٔ پرتوزا را به آنها تاباندند. ذرات، بعد از عبور از ورقهٔ طلا یا نقره، با یک پردهٔ سولفیدروی برخورد می‌کردند و این پرده با سوسوزنی ضعیف محل برخورد هر ذره را آشکار می‌کرد (شکل ۲۶) رادرفورد، با کمال تعجب، متوجه شد که انحراف بعضی ذرات به‌قدری زیاد است که به عقب برمی‌گردند. رادرفورد خود در این‌باره چنین گفته است : «این باورنکردنی ترین رویدادی بود که در تمام عمر من اتفاق افتاده است. این رویداد تقریباً همان اندازه باورنکردنی بود که کسی یک گلولهٔ ۱۵ اینچی به یک صفحهٔ کاغذ شلیک کند و گلولهٔ توپ براثر برخورد با کاغذ به عقب برگردد و به خود شلیک کننده بخورد.»

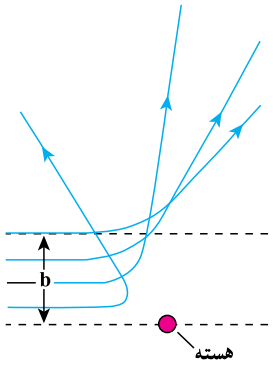


شکل ۲۶ــ دستگاه رادرفورد

رادرفورد بلافاصله متوجه شد که این انحراف خیلی زیاد ذرات باید ناشی از برخورد ذرات آلفا و یک هستهٔ بسیار سنگین اما کوچک در داخل اتم باشد. بنابراین تصویر زیر را پیشنهاد کرد : **هر اتم متشکل است از یک هستهٔ کوچک با بار $+Ze$ که تقریباً همهٔ جرم اتم در آن متمرکز است؛ این هسته را تعدادی الکترون با بار $-Ze$ احاطه کرده‌اند.** از این‌رو، اتم مانند یک منظومهٔ شمسی است که در آن هسته نقش خورشید و الکترون‌ها نقش سیارات را بازی می‌کنند.

رادرفورد، براساس این مدل، محاسبه کرد که چه کسری

از باریکهٔ ذرات آلفا باید در چه زاویه‌ای منحرف شود. اگر ذرهٔ آلفا از نزدیکی هسته عبور کند نیروی دافعهٔ الکتریکی زیادی برآن وارد و بنابراین در زاویهٔ بزرگی منحرف می‌شود؛ و اگر با فاصلهٔ زیاد از هسته عبور کند زاویهٔ انحراف آن خیلی کوچک خواهد بود. شکل ۲۷ مسیر چندین ذرهٔ آلفا را که به یک هسته نزدیک می‌شوند، نشان می‌دهد؛ این مسیرها هذلولی‌اند. فاصلهٔ عمودی میان هسته و مسیر اصلی (منحرف‌نشدهٔ) حرکت را پارامتر برخورد می‌گویند. برای اینکه انحراف ذرهٔ آلفا خیلی بزرگ باشد، باید با پارامتر برخورد خیلی کوچکی، در حدود $10^{-13}m$ یا کمتر، با هسته برخورد کند؛ چون ذرات آلفای موجود در باریکه به‌طور کاتوره‌ای با ورقهٔ فلز برخورد می‌کنند، فقط تعداد خیلی کمی از آنها تا این حد به هسته نزدیک و در نتیجه تعداد خیلی کمی از آنها در زاویهٔ بزرگ منحرف می‌شوند.



شکل ۲۷ــ چهار مسیر هذلولی پارامترهای برخورد مختلف فاصلهٔ b پارامتر برخورد یکی از این مسیرهاست.

دانستنی ۷ــ۳

در این دانستنی، مروری تاریخی بر مدل‌های اتمی از ۲۰۰۰ سال پیش تاکنون صورت می‌گیرد.

مثال پیشنهادی

براساس فیزیک کلاسیک، وقتی الکترون به دور هسته در اتم می‌چرخد، به علت شتابدار بودن حرکتش، موج الکترومغناطیسی گسیل می‌کند و از انرژی الکترون کاسته می‌شود. نشان دهید که در این صورت شعاع مداری آن کم و بسامد آن افزایش می‌یابد.

پاسخ : برای سادگی در پاسخ دادن، اتم را مانند شکل ۷ــ۱۷ درنظر می‌گیریم که یک الکترون تحت تأثیر هسته با بار الکتریکی $+Ze$ قرار دارد. اگر الکترون در فاصلهٔ r ازهسته باشد، نیروی الکتریکی $F = k\frac{Ze^2}{r^2}$ بر آن وارد می‌شود و این نیرو سبب چرخش الکترون به دور هسته می‌گردد :

$$F = m\frac{v^2}{r} \Rightarrow k\frac{Ze^2}{r^2} = m\frac{v^2}{r} \Rightarrow \frac{1}{2}mv^2 = \frac{kZe^2}{2r}$$

و انرژی الکترون از رابطهٔ زیر محاسبه می‌شود :

$$E = K + U = \frac{kZe^2}{2r} + (-\frac{kZe^2}{r}) = -\frac{kZe^2}{2r}$$

در رابطهٔ $E = -\frac{kZe^2}{2r}$ ، وقتی الکترون انرژی از دست می‌دهد، E کاهش می‌یابد (ازنظر اندازه افزایش می‌یابد) پس r یعنی شعاع مداری کم می‌شود.

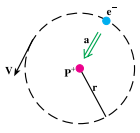
با توجه به رابطهٔ

$$F = mr\omega^2 \Rightarrow \frac{kZe^2}{r^2} = mr(2\pi f)^2$$

$$f = \sqrt{\frac{kZe^2}{4\pi^2 mr^3}} = \frac{e}{2\pi r}\sqrt{\frac{kZ}{mr}}$$

با کاهش r ، f افزایش می‌یابد.

حرکت الکترون با جرم m و بار e− روی یک مدار دایره‌ای به شعاع r به مرکز هستهٔ با بار e+ در شکل ۷ــ۱۷ 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 $k=\frac{1}{4\pi\varepsilon_0}=9\times10^9\ N.m^2/C^2$). 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 :



شکل ۷ــ۱۷

$$\frac{ke^2}{r^2}=\frac{mv^2}{r} \qquad (۷ــ۱۴)$$

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

$$E=K+U=\frac{1}{2}mv^2-\frac{ke^2}{r} \qquad (۷ــ۱۵)$$

با استفاده از رابطهٔ ۷ــ۱۴ به‌دست می‌آوریم :

$$K=\frac{1}{2}mv^2=+\frac{ke^2}{2r} \qquad (۷ــ۱۶)$$

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

$$E=-\frac{ke^2}{2r} \qquad (۷ــ۱۷)$$

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

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

$$r_n=a_0n^2 \qquad n=1,2,3,\ldots \qquad (۷ــ۱۸)$$

که در آن n یک عدد صحیح است.

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

$$a_0=\frac{h^2}{4\pi^2mke^2} \qquad (۷ــ۱۹)$$

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

مثال ۷ــ۷

شعاع اتم بور را محاسبه کنید.

پاسخ

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

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

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

اکنون اگر به کمک رابطهٔ ۷ــ۱۷ مقدار انرژی الکترون در مدار مجاز n‌اُم را محاسبه کنیم، به‌دست می‌آوریم :

$$E_n=-\frac{2\pi^2mk^2e^4}{h^2}\times\frac{1}{n^2} \qquad n=1,2,\ldots \qquad (۷ــ۲۰)$$

بدین ترتیب الکترون تنها مجاز است انرژی‌ای برابر با یکی از مقدارهایی که از رابطهٔ ۷ــ۲۰ به‌دست می‌آید داشته باشد. هر یک از این مقدارهای مجاز را یک **تراز انرژی** می‌نامند.

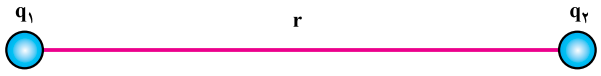
۴ــ الکترون تنها هنگامی می‌تواند تابش الکترومغناطیسی گسیل کند که از یک حالت مانا با انرژی E_{n_1} به حالت مانای دیگری با انرژی کمتر $(n_2<n_1)$ E_{n_2} برود، یا به عبارت دیگر از یک ترازانرژی بالاتر به یک تراز انرژی پایین‌تر برود. در این صورت انرژی فوتون موج الکترومغناطیسی گسیل شده برابراختلاف انرژی بین دو تراز است، یعنی :

$$hf=E_{n_1}-E_{n_2} \qquad (۷ــ۲۱)$$

توجه : دانش‌آموزان با رابطهٔ انرژی پتانسیل الکتریکی آشنا نیستند. قبل از حل این مسئله گفتن مطلب زیر به دانش‌آموزان کمک می‌کند.

وقتی بار الکتریکی نقطه‌ای q_2 را در فاصلهٔ r از بار نقطه‌ای q_1 قرار می‌دهیم، کار انجام شده به‌صورت انرژی پتانسیل الکتریکی در دستگاه q_1 و q_2 ذخیره می‌شود که از رابطهٔ زیر به‌دست می‌آید :

$$U=k\frac{q_1q_2}{r}$$



شکل ۲۸

(به‌دست آوردن این رابطه فراتر از سطح دانش پایهٔ ریاضی دانش‌آموزان است)

الگوی اتمی بور

رادرفورد متوجه شد که هسته بخش سنگین ولی کوچک اتم را تشکیل داده است که الکترون‌ها با بار منفی دور آن می‌گردند. اما این مدل، یک مشکل بزرگ داشت، اگر الکترون بخواهد دور هسته در شعاع ثابت بگردد، حرکتش شتاب‌دار می‌شود و با توجه به روابط الکترومغناطیسی، موج الکترومغناطیس گسیل می‌کند، در این صورت انرژی از دست می‌دهد و باید شعاع آن دائماً کم شود تا به هسته برخورد کند. با حل معادلات مربوط به آن، زمان لازم برای رسیدن الکترون به هسته و از بین رفتن اتم محاسبه می‌شود و عددی از مرتبهٔ نانوثانیه به‌دست می‌آید. پس قطعاً چنین اتفاقی رخ نمی‌دهد و الکترون در حال گردش انرژی از دست نمی‌دهد.

بر پایهٔ این آزمایش‌ها و مشاهدات فراوان، نیلزبور الگویی را برای حرکت الکترون پیشنهاد کرد. مطابق نظریهٔ او، باید قوانین کلاسیک مکانیک و الکترومغناطیس را در ابعاد بسیار کوچک اتم، با فرض‌های دیگری در نظر بگیریم. پایه‌ای‌ترین فرضیه، این بود که الکترون، تنها روی مدارهای معینی حرکت می‌کند که «مدارهای مانا» نام دارد و در نتیجه الکترون در این وضعیت برخلاف نظریهٔ کلاسیک الکترومغناطیس، تابش نمی‌کند و انرژی

از دست نمی‌دهد.

در اتمی که هستهٔ آن Z پروتون دارد، برای الکترونی که در شعاع r با سرعت v حرکت می‌کند، با صرف‌نظر از اثر سایر الکترون‌ها داریم :

$$E = K + U = \frac{1}{2}mv^2 - \frac{kZe^2}{r}$$ انرژی کل

که $U = \frac{-kZe^2}{r}$ انرژی پتانسیل الکتریکی الکترون است.

از طرفی با توجه به ثابت بودن شعاع حرکت الکترون، رابطهٔ $\frac{mv^2}{r} = \frac{kZe^2}{r^2}$ نیز برقرار است که $\frac{kZe^2}{r^2}$ نیروی الکتریکی وارد بر الکترون می باشد. بنابراین انرژی جنبشی الکترون $K = \frac{1}{2}mv^2 = \frac{kZe^2}{2r}$ به‌دست می‌آید. از این‌رو انرژی کل الکترون برابر است با :

$$E = \frac{-kZe^2}{2r}$$

بور با بررسی‌های فراوان، به این نتیجه رسید که شعاع الکترون هر مقداری نمی‌تواند باشد. اگر شعاع‌های مجاز الکترون، r_n، و شعاع کوچک‌ترین مدار، r_1، باشد، او فرضیهٔ دیگری بدین صورت ارائه کرد :

$$r_n = n^2 r_1$$

و شعاع کوچک‌ترین مدار برابر است با :

$$r_1 = \frac{h^2}{4\pi^2 mkZe^2}$$

که به آن شعاع اتم بور می‌گویند. در این صورت انرژی الکترون در لایهٔ nام برابر است با :

$$E_n = \frac{2\pi^2 mk^2 Z^2 e^4}{h^2}\frac{1}{n^2} = -E_R\frac{Z^2}{n^2}$$

که $E_R = \frac{2\pi^2 mk^2 e^4}{h^2}$ را یک ریدبرگ می خوانند و مقدار عددی آن برابر است با $E_R = 2/17 \times 10^{-18}J$. همچنین به هریک از این مدارهای مجاز انرژی، یک تراز انرژی می‌گویند.

بور نظریهٔ خود را اینگونه کامل کرد : یک الکترون می‌تواند بین ترازهای انرژی جابه‌جا شود و از یک تراز به تراز دیگر برود، ولی باید همان مقدار انرژی را آزاد یا دریافت کند. اگر الکترون از تراز انرژی n به تراز بالاتر m برود، باید مقداری انرژی دریافت کند که برابر است با :

$$\Delta E = E_m - E_n = E_R Z^2(\frac{1}{n^2} - \frac{1}{m^2})$$

یک راه جذب این مقدار انرژی، از طریق نور و امواج الکترومغناطیس است. از سوی دیگر، برپایهٔ نظریهٔ پلانک، انرژی امواج الکترومغناطیس هر مقداری نمی‌تواند باشد و برای موجی با بسامد v، باید انرژی آن مضربی از hf باشد که در آن، h ثابت پلانک و برابر $6/63 \times 10^{-34}Js$ است. برهمین اساس، انیشتین فرضیه‌ای ارائه داد که برپایهٔ آن، هر موج الکترومغناطیس با بسامد f از بسته‌های متمرکز انرژی به نام فوتون تشکیل شده است که انرژی هر فوتون برابر است با hf . از این‌رو اگر یک موج الکترومغناطیسی به یک اتم بتابانیم و در نتیجهٔ آن یک الکترون از تراز n به تراز m برود، تغییر انرژی الکترون برابر می‌شود با :

$$\Delta E = E_R Z^2(\frac{1}{n^2} - \frac{1}{m^2}) = hf$$

در این صورت تنها یک فوتون با بسامد $f = \frac{E_R Z^2}{h}(\frac{1}{n^2} - \frac{1}{m^2})$ به‌وسیلهٔ اتم جذب می‌شود. درحالت کلی، $n,m = 1,2,3,\ldots$ و در نتیجه ΔE مقادیر گسسته‌ای اختیار می‌کند. بنابراین موج‌های الکترومغناطیس با بسامدهای مختلف و گسسته به‌وسیلهٔ اتم جذب می‌شود و البته این مقدارها، خاص هر اتم است و برای اتم‌های مختلف متفاوت خواهد بود (چرا؟) با توجه به رابطهٔ $f = \frac{C}{\lambda}$ مقدار λ (طول موج پرتو) به‌دست می‌آید.

$$\frac{1}{\lambda} = \frac{E_R Z^2}{ch}(\frac{1}{n^2} - \frac{1}{m^2}) = R_H Z^2(\frac{1}{n^2} - \frac{1}{m^2})$$

در این رابطه که به رابطهٔ بالمر ــ ریدبرگ مشهور است، RH ثابت ریدبرگ نام دارد. همچنین برای نورهای مرئی، λ از $0/4\mu m$ (آبی) تا $0/7\mu m$ (قرمز) تغییر می‌کند.

به‌طور مشابه، اگر به‌نحوی بتوانیم الکترون‌ها را از حالت پایه (کمترین انرژی) به لایه‌های بالاتر ببریم (برانگیخته کنیم)، هنگامی که الکترون به لایهٔ پایین‌تر برمی گردد، مقدار مشخصی انرژی به‌صورت یک فوتون گسیل می‌کند. اگر الکترون از تراز n به m برود $(m < n)$، انرژی فوتون آزاد شده برابر خواهد بود

با :

$$\Delta E = E_n - E_m = E_R Z^2 \left(\frac{1}{m^2} - \frac{1}{n^2}\right) = hf$$

توجه : اگر روابط محاسبه شده را برای خود اتم هیدروژن بخواهیم، با توجه به این که عدد اتمی هیدروژن یک است، کافی است در کلیهٔ روابط قبلی به‌جای Z، عدد ۱ را قرار دهیم. که از اینجا بسامد فوتون گسیل شده به‌دست می‌آید. در اینجا نیز دیده می‌شود که بسامد موج ایجاد شده هر مقداری نمی‌تواند باشد.

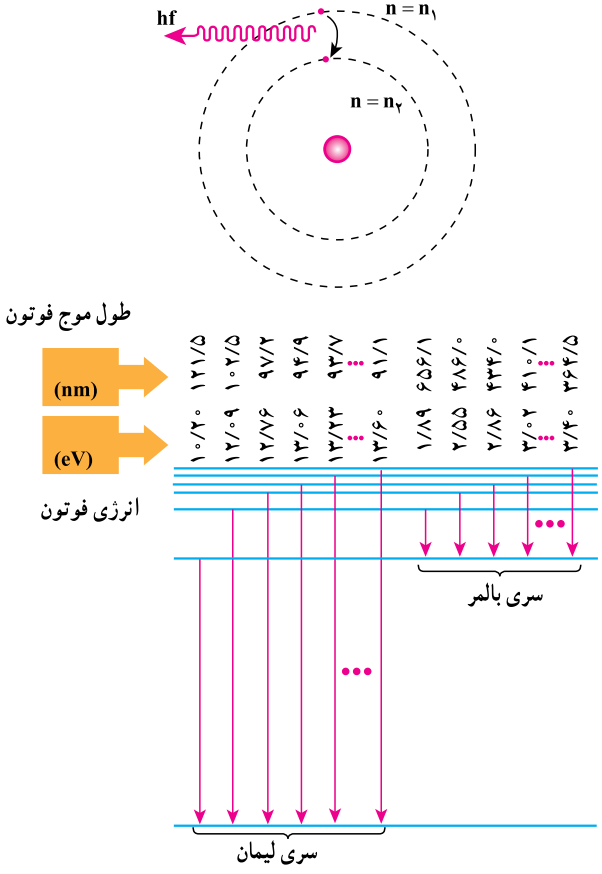
برای مشاهدهٔ این پدیده‌ها، لازم است در ابتدا اتم‌های یک عنصر خاص به‌گونه‌ای باشند که اتم‌های آن روی هم اثری نگذارند تا روابط بالا برقرار شوند. بنابراین باید گاز بسیار رقیق از آن عنصر بگیریم.

با تاباندن پرتوی که شامل همهٔ بسامدها باشد و عبور آن از این گاز، بسامدهای خاصی از پرتو جذب می‌شود و پس از خروج آن از گاز، این بسامدها از پرتو حذف شده‌اند. اگر یک صفحهٔ کدر با یک شکاف نازک در مسیر پرتوهای خروجی قرار دهیم، یک باریکه از آن خارج می‌شود. با عبور دادن این باریکه از یک منشور، طیف بسامد این پرتو قابل مشاهده خواهد بود. در این حالت، در بسامدهایی که توسط گاز جذب می‌شود، یک نوار باریک سیاه در طیف ایجاد شده است (طیف جذبی).

برای مشاهدهٔ فوتون‌های گسیل شده از اتم‌های برانگیخته، باید به‌نحوی اتم‌های گاز موردنظر را برانگیخته کنیم. برای این کار، دوسر محفظه‌ای که گاز درون آن است دو الکترود قرار می‌دهیم. با اعمال ولتاژ زیاد به الکترودها، اتم‌های گاز برانگیخته می‌شوند و با بازگشت الکترون‌ها به لایه‌های پایین‌تر، فوتون گسیل می‌کنند (مشابه اتفاقی که درون لامپ‌های فلوئورسان رخ می‌دهد). برای دیدن طیف آن، دوباره از یک صفحهٔ کدر با شکاف نازک و یک منشور استفاده می‌کنیم. در این صورت، خط‌های باریک گسسته‌ای دیده می‌شود که مربوط به همان پرتوهای گسیل شده از اتم است. (طیف نشری یا گسیلی). همان‌طور که انتظار می‌رود، بسامدهایی که در طیف جذبی حذف شده‌اند، در طیف نشری به‌چشم می‌خورند.

این طیف گسسته، برای اتم‌های یک عنصر است که هیچ برهم‌کنشی باهم ندارند. هنگامی که برهم‌کنش بین اتم‌ها نیز اضافه شود و با مولکول‌ها سروکار داشته باشیم، عملاً یک طیف پیوسته ایجاد می‌شود. یعنی در طیف آن، همهٔ بسامدها دیده می‌شود. البته بخشی از این بسامدها خارج از محدودهٔ مرئی‌اند، با چشم دیده نمی‌شوند و برای دیدنشان به ابزارهای اندازه‌گیری پیشرفته‌تر نیازمندیم.

شکل انرژی‌های کوانتیده را در یک نمودار تراز انرژی نشان می‌دهد. هر خط افقی نشان دهندهٔ یکی از انرژی‌هایی است که از معادلهٔ ۷ــ۲۲ به‌دست می‌آید. طبق اصل موضوع بور هنگامی که الکترون با یک پرش کوانتومی از یک حالت مانا به حالت مانای دیگر می‌رود یک فوتون گسیل می‌کند. هر پرش کوانتومی با یک پیکان در شکل مشخص شده است. حالت مانای با کمترین انرژی را حالت پایه می‌گویند؛ حالت بعدی را



شکل ۲۹ــ نمودار تراز انرژی اتم هیدروژن پیکان‌های تیره و روشن پرش‌های کوانتومی ممکن الکترون را نشان می‌دهند. توجه کنید که در این نمودار، انرژی‌ها نسبت به حالت پایه، که با انرژی صفر مشخص شده است، داده شده‌اند.

اولین حالت برانگیخته می‌نامند و به همین ترتیب، معمولاً الکترون اتم هیدروژن در حالت پایه است، یعنی در مداری دایره‌ای به شعاع a_0 و با انرژی $-13/6eV$ حرکت می‌کند. این پیکربندی با کمترین انرژی است و در آن اتم، در صورتی که اختلالی در آن ایجاد نشود، به حالت تعادل باقی می‌ماند. تا زمانی که اتم در حالت پایه است، نور گسیل نمی‌کند. برای این که اتم نور گسیل کند، ما باید الکترون را به یکی از حالت‌های برانگیخته، یعنی یک مدار دایره‌ای که شعاع آن بزرگتر و انرژی آن بیشتر است، ببریم. این کار را می‌توان با گرم کردن یک نمونه از اتم‌ها، یا با عبور جریان الکتریکی از آنها انجام داد. در این حالت برخوردهای میان اتم‌ها حرکت الکترون‌ها را مختل می‌کند و گاهی یکی از آنها را به مدار بالاتر می‌راند. این الکترون خودبه‌خود به یک مدار کوچکتر می‌رود و یک کوانتوم نور گسیل می‌کند. توجه کنید که پرش‌های کوانتومی که با پیکان‌های تیره و روشن در شکل مشخص شده‌اند، چندین سری تشکیل می‌دهند؛ یک سری شامل تمامی پرش‌هایی (با پیکان روشن) است که به حالت پایه می‌رسند، سری دیگر شامل تمامی پرش‌هایی (با پیکان تیره) است که به اولین حالت برانگیخته می‌روند، و به همین ترتیب، این سری پرش‌ها سری خطوط طیفی را تولید می‌کنند : سری لیمان، سری بالمر و مانند آنها.

دانستنی ۷ــ۴

نظریهٔ اتمی

در این دانستنی نظریهٔ بور و فرضیاتش به‌طور جامع مورد بررسی قرار می‌گیرد و فرض کوانتیده بودن تکانهٔ زاویه‌ای، مطرح می‌شود.

مثال پیشنهادی

مثال پیشنهادی :اگر الکترون در اتم هیدروژن در تراز برانگیختهٔ $n=2$ باشد و از این تراز به تراز پایه $(n=1)$ برود، فوتون گسیل شده دارای چه بسامد و طول موجی است و گسترهٔ طول موج آن کدام است؟ $(h=4/14\times10^{-15}ev.s)$

پاسخ :

$$hf=E_{n2}-E_{n1}\Rightarrow f=\frac{E_{n2}-E_{n1}}{h}$$

$$E_n=\frac{-E_R}{n^2}\Rightarrow E_2=\frac{-13/6eV}{2^2}=-3/4eV,\ E_1=\frac{-16/6eV}{1^2}=-12/6eV$$

$$f=\frac{E_2-E_1}{h}=\frac{-3/4-(-13/6)}{4/14\times10^{-15}}=2/46\times10^{15}Hz$$

$$\lambda=\frac{c}{f}\Rightarrow\lambda=\frac{3\times10^8}{2/46\times10^{15}}=1/21\times10^{-7}m=121nm$$

با توجه به جدول طیف امواج الکترومغناطیسی، این فرمول در محدودهٔ فرابنفش قرار دارد.

مثال پیشنهادی

الف) انرژی الکترون در اتم هیدروژن را در مدارهای ۱و۲و۳ به‌دست آورید.

ب) در گذار الکترون از مدار ۳ به ۲، بسامد و طول موج گسیل شده، چقدر است.

پاسخ : الف) به ازای ۳، ۲، ۱ = n، در رابطهٔ $E_n = \frac{-13/6eV}{n^2}$ داریم :

$$E_1 = -13/6eV \quad , \quad E_2 = -3/4eV \quad , \quad E_3 = -1/5eV$$

ب)
$$f = \frac{E_3 - E_2}{h} = \frac{-1/5 - (-3/4)}{4/14 \times 10^{-15}} = 4/6 \times 10^{14} Hz$$

مثال پیشنهادی

مثال پیشنهادی : انرژی جنبشی و پتانسیل الکترون در اتم هیدروژن را به‌صورت کوانتومی بنویسید و اندازهٔ آنها را در مدار سوم به‌دست آورید.

پاسخ : اندازهٔ انرژی جنبشی و پتانسیل و انرژی کل به ترتیب برابر است با :

$$K = \frac{1}{2}mv^2 = +\frac{ke^2}{2r} \quad , \quad U = -\frac{ke^2}{r} \quad , \quad E = -\frac{ke^2}{2r}$$

$$\frac{K}{E} = \frac{\frac{ke^2}{2r}}{\frac{-ke^2}{2r}} = -1 \quad , \quad E_n = -\frac{E_R}{n^2} \Rightarrow K_n = \frac{+E_R}{n^2}$$

$$K_3 = \frac{+E_R}{4^2} = \frac{+13/6eV}{9} = +1/5eV \qquad U_3 = \frac{-2E_R}{3^2} = \frac{-2 \times 13/6eV}{9} = -3/0eV$$

$$\frac{U}{E} = \frac{\frac{-ke^2}{r}}{\frac{-ke^2}{2r}} = +2 \quad , \quad E_n = -\frac{E_R}{n^2} \Rightarrow U_n = \frac{-2E_R}{n^2}$$

مثال پیشنهادی

طول موج نور گسیل شده در گذار الکترون از مدار مانای ۵ به ۲ را در اتم هیدروژن به‌دست آورید. این گذار مربوط به کدام رشته است؟

$$(c = 3 \times 10^8 m/s \quad , \quad E_R = 13/6eV \quad , \quad h = 4/14 \times 10^{-15} eV.s)$$

پاسخ :
$$\frac{1}{\lambda} = \frac{E_R}{hc}\left(\frac{1}{n_2^2} - \frac{1}{n_1^2}\right) \Rightarrow \frac{1}{\lambda} = \frac{13/6}{4/14 \times 10^{-15} \times 3 \times 10^8}\left(\frac{1}{2^2} - \frac{1}{5^2}\right)$$

$$\frac{1}{\lambda} = 0/0109\left(\frac{25-4}{100}\right) \Rightarrow \lambda = 436/87nm$$

با توجه به این که این گذار به مدار n = ۲ ختم می‌شود، بنابراین مربوط به رشتهٔ بالمر است.

رابطهٔ ۷ـ۲۱ را می‌توانیم به صورت زیر بنویسیم :

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

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

$$E_R = \frac{2\pi^2 k^2 m e^4}{h^2} = 2/17\times10^{-18}\,J = 13/6\,eV$$

این مقدار انرژی را **یک ریدبرگ** می‌نامند. یک ریدبرگ برابر ۱۳/۶ الکترون ولت و $2/17\times10^{-18}$ ژول است.

اگر الکترون اتم هیدروژن، در مدار اول (n = ۱) باشد، می‌گوییم در **حالت پایه** قرار دارد. مدارهای با انرژی بالاتر از E_1 را **حالت‌های برانگیخته** می‌خوانند. انرژی این حالت‌ها از رابطهٔ (۷ـ۲۲) به‌ازای n = ۲, ۳, ... به‌دست می‌آید.

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

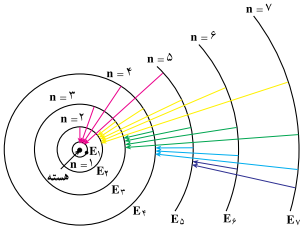
و

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

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

مدارهای الکترون در الگوی بور برای اتم هیدروژن در شکل ۷ـ۱۸ نشان داده شده است.

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



شکل ۷ـ۱۸

مثال ۷ـ۸

هنگامی که الکترون در اتم هیدروژن از مدار n_1 به مدار n_2 $(n_1 > n_2)$ می‌رود.

الف) بسامد فوتون موج الکترومغناطیسی گسیل شده را به‌دست آورید.

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

پاسخ

الف) با استفاده از رابطه‌های ۷ـ۲۱ و ۷ـ۲۲ 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 :

$$\frac{E_R}{hc} = \frac{2/17\times10^{-18}}{6/63\times10^{-34}\times3\times10^{8}} = 1/09\times10^{7}\,m^{-1} = 0/0109\,(nm)^{-1}$$

که همان ثابت ریدبرگ است.

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

تمرین ۷ـ۷

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

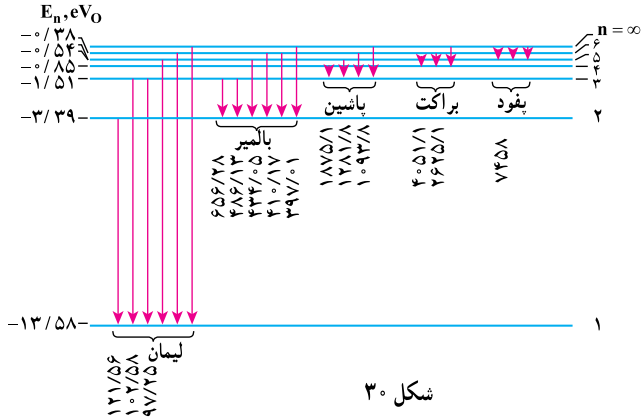
پرسش پیشنهادی

مشخص کنید که برای خط‌های هریک از رشته‌های لیمان، بالمر، پاشن و ... طیف اتم هیدروژن الکترون باید از چه مدارهایی به چه مدارهایی برود؟

تمرین ۷ـ۷

کلیهٔ گذاره‌های الکترونی که از مدارهای $n > 1$ به مدار $n' = 1$ انجام می‌شود، فوتون‌هایی را گسیل می‌کند که طول موج آنها مربوط به رشتهٔ لیمان است.

کلیهٔ گذار های الکترونی که از مدارهای $n > 2$ به مدار $n' = 2$ انجام می‌شود، فوتون‌هایی را گسیل می‌کند که طول موج آنها مربوط به رشتهٔ بالمر است. و ...



شکل ۳۰

مثال پیشنهادی

اگر الکترون در اتم هیدروژن، در تراز n = ۳ باشد، چه گذارهای الکترونی را می‌تواند انجام دهد و طول موج‌های هریک از این گزارها، کدام است؟ $E_R / hc = ۰/۰۱(nm)$

پاسخ : اگر الکترونی در تراز ۳ باشد، می‌تواند به تراز ۲ آمده و سپس از تراز ۲ به ۱ بیاید یا مستقیماً از تراز ۳ به ۱ بیاید (مانند شکل)

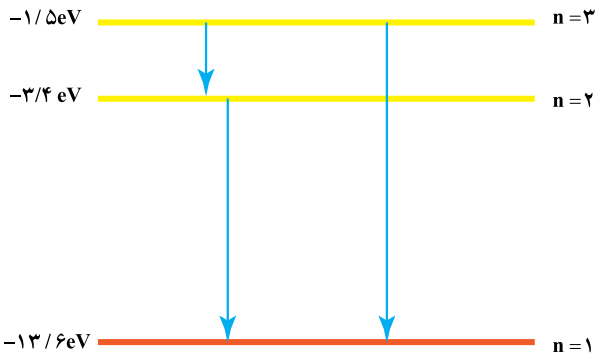
بنابراین سه نوع فوتون می‌تواند گسیل کند.

$$n_۱ \to n_۲ : \frac{۱}{\lambda} = \frac{E_R}{h_C}\left(\frac{۱}{n_۲^۲} - \frac{۱}{n_۱^۲}\right)$$

$$۳ \to ۲ : \frac{۱}{\lambda} = ۰/۰۱\left(\frac{۱}{۲^۲} - \frac{۱}{۳^۲}\right) \Rightarrow \lambda = ۷۲۰/۰ \, nm$$

$$۲ \to ۱ : \frac{۱}{\lambda} = ۰/۰۱\left(\frac{۱}{۱^۲} - \frac{۱}{۲^۲}\right) \Rightarrow \lambda = ۱۳۳/۲ \, nm$$

$$۳ \to ۱ : \frac{۱}{\lambda} = ۰/۰۱\left(\frac{۱}{۱^۲} - \frac{۱}{۳^۲}\right) \Rightarrow \lambda = ۱۱۲/۵ \, nm$$



شکل ۳۱

مثال پیشنهادی

کوتاه ترین و بلندترین طول موج سری بالمر اتم هیدروژن را حساب کنید.

$(R_H = ۰/۰۱(nm)^{-۱})$

پاسخ : در سری بالمر، کلیه گذارها به n = ۲ ختم می‌شود. در گذار ۳ به ۲ (۳ ← ۲)، فوتون گسیل شده دارای کم‌ترین انرژی، کم‌ترین بسامد و بلندترین طول موج است و در گذار بی‌نهایت به ۲ (∞ ← ۲)، فوتون گسیل شده دارای بیشترین انرژی، بیشترین بسامد و کوتاه‌ترین طول موج است. بنابراین می‌توانیم بنویسیم

$$۳ \to ۲ : \frac{۱}{\lambda_{max}} = ۰/۰۱\left(\frac{۱}{۲^۲} - \frac{۱}{۳^۲}\right) \Rightarrow \lambda_{max} = ۱۱۲/۵ nm$$

$$\infty \to ۲ : \frac{۱}{\lambda_{min}} = ۰/۰۱\left(\frac{۱}{۲^۲} - \frac{۱}{\infty^۲}\right) \Rightarrow \lambda_{min} = ۴۰۰ nm$$

تمرین ۷-۸

$$\text{انرژی بستگی الکترون در تراز ۲} = |E_۲| = \left|\frac{-E_R}{۲^۲}\right| = +۳/۴ eV$$

$$\text{انرژی بستگی الکترون در تراز ۳} = |E_۳| = \left|\frac{-E_R}{۳^۲}\right| = +۱/۵ eV$$

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 ۷ــ۶

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

انرژی بستگی الکترون : اگر انرژی الکترون را در حالتی که کاملاً از قید هسته رها شده است برابر با صفر بگیریم، انرژی آن روی مدارها که مقدار کمتری دارد باید منفی باشد، علامت منفی در رابطهٔ ۷ــ۲۰ نیز به همین معناست.

انرژی الکترون در مدار اول بور برابر $E_1 = -13/6eV$ است؛ و این بدان معنی است که برای آنکه الکترونی را که در حالت پایهٔ اتم هیدروژن است کاملاً از قید هسته رها کنیم، باید به آن ۱۳/۶eV انرژی بدهیم. این مقدار انرژی را **انرژی بستگی** الکترون در تراز اول اتم هیدروژن می‌نامیم. این مقدار با تجربه به خوبی سازگار است.

تمرین ۷ــ۸

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

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

الگوی اتمی بور برای اتم هیدروژن، بسامد خط‌های طیف اتم هیدروژن و نیز یون‌هایی را که

۲۰۸

دانستنی ۷ــ۵

فلوئورسانی

در این دانستنی به کاربرد مفاهیم آموخته شده از کوانتوم مکانیک را در پدیده‌های فلوئورسانی، لامپ‌های فلوئورسان و پدیدهٔ فسفرسانی، می‌بینید.

دانستنی ۷ــ۶

طیف ستارگان

در این دانستنی؛ در مورد طیف ستارگان، حرکت ستارگان، پدیدهٔ انتقال به سرخ، انتقال به آبی، قانون هابل و منشأ جهان مطالبی آورده شده است.

پرسش‌ها و تمرین‌های پیشنهادی بخش ۷ـ۴

۱ــ طول موج‌های بلندترین خط طول موج‌های رشته‌های بالمر و پاشن کدام‌اند؟ کوتاه‌ترین طول موج این رشته‌ها را تعیین کنید.

(**پاسخ** : بالمر : ۶۵۶/۳nm, ۳۶۴/۶nm، پاشن : ۸۲۰/۴nm, ۱۸۷۵nm)

۲ــ بلندترین طول موج خطوط سری لیمان، بالمر و پفوند را در اتم هیدروژن، به‌دست آورید.

۳ــ نوری به طول موج ۱۰۹۱nm به جهت تخلیهٔ الکتریکی هیدروژن گسیل می‌شود. گذاری را مشخص کنید که این گسیل ناشی از آن است.

۴ــ انرژی پتانسیل الکترون در تراز ناپایدار $n = ۴$ را برای اتم هیدروژن به‌دست آورید.

۵ــ الکترونی در حالت $n = ۵$ هیدروژن قرار دارد. گذار این الکترون به کدام حالت‌ها ممکن است و انرژی تابش‌های گسیلیده چیست؟

۶ــ برای حالت $n = ۴$ در هیدروژن، سرعت الکترون، انرژی جنبشی و انرژی پتانسیل را بیابید.

۷ــ به مجموعه‌ای از اتم‌های هیدروژن در حالت پایه، نور فرابنفش به طول موج ۵۹/۵nm می‌تابانیم و انرژی جنبشی الکترون‌های گسیلیده را بیابید.

۸ ــ انرژی یونش، انرژی لازم برای خارج کردن یک الکترون از اتم است انرژی یونش هیدروژن را در موارد زیر بیابید :

الف) تراز $n = ۱$

ب) تراز $n = ۲$

پ) تراز $n = ۳$

۹ــ انرژی بستگی الکترون را در هریک ازحالت‌های برانگیختهٔ $E_۴$ و $E_۵$ اتم هیدروژن به‌دست آورید.

۱۰ــ نورفرابنفش به طول موج $۸۰۰A^{\circ}$ بر هیدروژن موجود در یک لولهٔ کوارتز فرود می‌آید. انرژی جنبشی الکترون‌ها را هنگام خارج شدن از اتم‌های هیدروژن محاسبه کنید. ($h \cong ۴ \times ۱۰^{-۱۵} ev.s$ و $E_R = ۱۳/۶ev$)

(توجه : برای ۴ تراز اول، انرژی جنبشی را محاسبه کنید)

۷ــ۵ــ آشنایی با لیزر

نگاهی دوباره به مفهوم

گرچه اولین لیزر در سال ۱۹۵۸ اختراع شد، اما مفهوم گسیل برانگیخته در آلبرت اینشتین در سال ۱۹۱۷ پیش‌بینی کرده بود. برای درک چگونگی طرز کار لیزر، باید ابتدا دربارهٔ نور همدوس بحث کنیم.

نوری که لامپ معمولی گسیل می‌کند ناهمدوس است؛ یعنی فوتون‌هایی با بسامدها و فازهای مختلف ارتعاش گسیل می‌دارد. این نور همان‌قدر ناهمدوس است که گام‌های گروهی از مردم که در محلی بی‌هدف این طرف و آن طرف می‌روند. نور ناهمدوس آشفته است. باریکهٔ نور ناهمدوس پس از طی مسافتی کوتاه پخش می‌شود، و با افزایش فاصله پهن و پهن‌تر شده و شدت آن کاهش می‌یابد.

شکل ۳۲ــ نور سفید ناهمدوس حاوی امواج با بسامدها (و طول موج‌های) مختلف و ناهمفاز با یکدیگر است.

یک الکترون دارند به درستی توجیه می‌کند. ولی این الگو هیچ اطلاعی دربارهٔ تعداد فوتون‌هایی که با یک بسامد معین گسیل می‌شوند نمی‌دهد. علاوه بر این برای اتم‌های با تعداد الکترون‌های بیشتر نیز پاسخی ندارد. البته این مسئله توسط مکانیک کوانتومی، با استفاده از الگوی ابر الکترونی یا الگوی اوربیتالی، که در کتاب‌های شیمی خود با آن آشنا شده‌اید حل شده است. در این الگو نیز الکترون‌ها **حالت‌های کوانتومی** خاصی دارند که هر یک با یک مقدار معین انرژی و یا یک **تراز معین** انرژی مشخص می‌شود و الکترون تنها با تغییر دادن تراز انرژی خود می‌تواند فوتون گسیل یا جذب کند.

در ادامه به توصیف چگونگی عملکرد لیزر به طور ساده می‌پردازیم که اساس سازوکار آن بر همین توانایی اتم‌ها برای گسیل فوتون‌ها قرار دارد.

۷ــ۵ــ آشنایی با لیزر

بیش از نیم قرن سال از ساخت نخستین لیزر یاقوتی توسط مایمن[1] و نخستین لیزر گازی هلیم‌ــ‌نئون 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 استفادهٔ ما در زندگی و صنعت، از قبیل دستگاه‌های بازخوانی اطلاعات از روی لوح‌های فشرده، چاپگرها، شبکه‌های مخابرات کابل نوری، دستگاه‌های برش فلزات (شکل ۷ــ۱۹ــ الف) و ... کاربرد زیادی پیدا کرده است. در حرفهٔ پزشکی نیز جهت انجام پاره‌ای امور همچون جراحی، بخیهٔ بافت‌های بدن، اصلاح دید چشم (شکل ۷ــ۱۹ــ ب) و ... کاربرد زیادی دارد.

الف ب

شکل ۷ــ۱۹

۱ــ T.H.Maiman

حتی اگر این باریکه را طوری از صافی عبور دهیم که فقط حاوی امواج تک بسامد (نور تکفام) شود، هنوز ناهمدوس است، زیرا امواج با یکدیگر ناهمفازند. با افزایش فاصله باریکه پخش و ضعیف‌تر می‌شود.

شکل ۳۳ــ نور بایک بسامد و طول موج هنوز حاوی مخلوطی از فازهاست.

باریکه‌ای از فوتون‌ها با بسامد، فاز، و جهت یکسان ــ یعنی باریکهٔ فوتون‌هایی که کاملاً همانند باشند ــ را همدوس می‌نامند. باریکهٔ نور همدوس بسیار کم پخش و ضعیف می‌شود[1].

لیزر وسیله‌ای است که باریکهٔ نور همدوس تولید می‌کند. هر لیزر دارای چشمه‌ای از اتم‌هاست که محیط فعال نامیده می‌شود، و می‌تواند به صورت گاز، مایع، یا جامد باشد (اولین لیزر بلوریاقوت بود). اتم‌های محیط به حالت‌های شبه پایدار برانگیخته می‌شوند. وقتی بیشتر اتم‌های محیط برانگیخته شدند تک‌فوتون ناشی از اتمی که وا ــ انگیخته شده می‌تواند آغازگر واکنشی زنجیره‌ای باشد. این فوتون به اتمی دیگر برخورد می‌کند، باعث گسیل فوتون از آن می‌شود، و به همین ترتیب نور همدوس تولید می‌کند. بخش اعظم این نور ابتدا در جهت‌های کاتوره‌ای حرکت می‌کند. با وجود این، نوری که در امتداد محور لیزر درحرکت است از آینه‌هایی باز می‌تابد که برای بازتاب نور با طول موج گزینشی مطلوب پوشش مناسبی دارند. یکی از آینه‌ها کاملاً بازتابنده، و آینهٔ دیگر تا اندازه‌ای بازتابنده است. امواج بازتابیده پس از هر رفت و برگشت بین آینه‌ها یکدیگر را تقویت می‌کنند، در نتیجه وضعیت تشدید رفت و برگشتی را به‌وجود می‌آورند که در آن شدت نور به‌طور قابل ملاحظه‌ای افزایش می‌یابد. نوری که از آن سر لیزر فرار می‌کند که آینهٔ شفاف‌تری دارد باریکهٔ لیزر را تشکیل می‌دهد.

۱ــ باریک بودن باریکهٔ لیزر وقتی نمایان می‌شود که می‌بینید یک سخنران به کمک «نشانگر» لیزری نقطهٔ بسیار کوچکی روی پرده می‌اندازد و یا لیزری با شدت زیاد که به‌سوی ماه نشانه‌گیری شده بود پس از بازتاب به زمین برگشت و آشکارسازی شد.

فعالیت ۷ــ۷

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

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

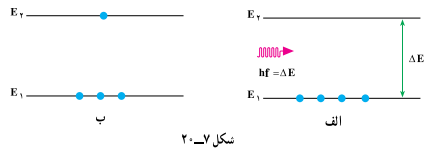
اتم* ← فوتون + اتم

علامت ستاره حاکی از حالت برانگیخته است. بر هم کنش فوتون با اتم را جذب می‌نامیم که در نمودارهای شکل ۷ــ۲۰ نشان داده شده است. شکل ۷ــ۲۰ــ الف اتم را قبل از دریافت تابش و شکل ۷ــ۲۰ــ 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 ۷ــ۲۰

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 :

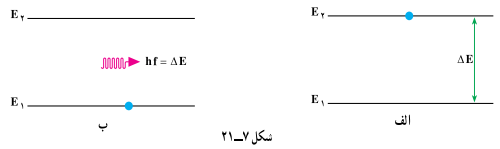
فوتون + اتم ← اتم*

این برهم کنش در نمودارهای شکل ۷ــ۲۱ نشان داده شده است. شکل ۷ــ۲۱ــ الف اتم را در حالت برانگیخته و شکل ۷ــ۲۱ــ ب اتم را در حالت پایه نشان می‌دهد. توجه 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 :

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

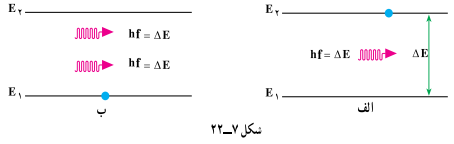
نوع دیگری از برهم کنش فوتون با اتم، که اساس کار لیزر بشمار می‌آید، **گسیل القایی** (یا تحریک شده) است. در این برهم کنش، اتم ابتدا درحالت برانگیخته است. آنگاه یک فوتون با انرژی hf که برابر اختلاف انرژی دو تراز اتم است، اتم برانگیخته را وامی‌دارد تا با گسیل یک فوتون دیگر با همین بسامد، به حالت پایین‌تر،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

۲ فوتون + اتم → فوتون + اتم*



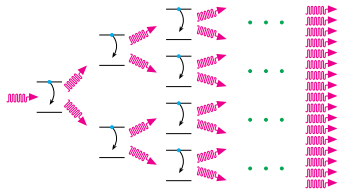
شکل ۷ــ۲۱

این برهم کنش در نمودارهای شکل ۷ــ۲۲ نشان داده شده است. شکل ۷ــ۲۲ــ الف اتم را در حالت برانگیخته و شکل ۷ــ۲۲ــ ب اتم را در حالت پایه نشان می‌دهد. توجه به این نکته ضروری است که اگر اتم در حالتی که در شکل ۷ــ۲۲ــ 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 ۷ــ۲۲ــ ب نیز دیده می‌شود، فوتون گسیل شده از اتم، با فوتون فرودی هم‌جهت، همفاز و هم‌انرژی است.



شکل ۷ــ۲۲

اکنون فرض کنید مجموعه‌ای از اتم‌های یکسان، که همگی در یک حالت برانگیخته‌اند، در اختیار داریم (شکل ۷ــ۲۳). 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 بوجود 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 باریکهٔ شدیدی از فوتون‌ها که همگی هم‌جهت، همفاز و هم‌انرژی‌اند، ایجاد شود. این باریکه را یک **باریکهٔ لیزری** می‌نامند. این پدیده که به ساده‌ترین شکل بیان شد، اساس‌کار لیزر[1] را تشکیل می‌دهد. توجه داشته باشید که شکل ۷ــ۲۳ صرفاً طرح‌واره‌ای از فرایند گسیل القایی را نشان می‌دهد.



شکل ۷ــ۲۳

تمرین‌های فصل هفتم

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

۲ــ دمای سطح خورشید حدود ۶۰۰۰K است.

الف) پیشینهٔ تابندگی خورشید در چه طول موجی است؟

ب) انرژی هر فوتون در این طول موج چند الکترون ولت است؟

پ) این طول موج در چه ناحیه‌ای از طیف موج‌های الکترومغناطیسی است؟

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

Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation (**LASER**)

شکل ۳۴ــ نور همدوس : تمام امواج همانند و همفازند.

علاوه بر لیزرهای گازی و بلوری، لیزرهای دیگری چون : شیشه‌ای، شیمیایی، مایع و نیمرسانا، نیز به خانوادهٔ لیزر پیوسته‌اند. لیزرهای فعلی باریکه‌هایی تولید می‌کنند که در گسترهٔ فروسرخ تا فرابنفش قرار دارند. بعضی مدل‌ها را می‌توان برای گسترهٔ بسامدهای مختلف تنظیم کرد. جالب‌تر از همه چشم‌انداز باریکهٔ لیزر پرتو X است.

لیزر چشمهٔ انرژی نیست. بلکه صرفاً مبدل انرژی‌ای است که با بهره‌گیری از فرایند گسیل برانگیخته بخش معینی از انرژی خود (معمولاً ۱٪) را به انرژی تابشی در تک‌بسامدی متمرکز می‌سازد که فقط در یک جهت حرکت می‌کند. مثل همهٔ وسیله‌ها، انرژی خروجی لیزر نمی‌تواند از آنچه وارد آن می‌شود بیشتر باشد.

لیزرها کاربرد گسترده‌ای در جراحی دارند. آن‌ها به راحتی می‌بُرند. نور لیزر می‌تواند به اندازه‌ای متمرکز و شدید باشد که امکان «جوش دادن شبکیهٔ پاره شده را بدون برش به جراح چشم بدهد. کافی است نور در ناحیه‌ای متمرکز گردد که باید جوش داده شود.

در حالی که گسترهٔ طول موج امواج رادیویی صدها متر و امواج تلویزیونی چندین سانتی‌متر را دربرمی‌گیرد، طول موج‌های نور لیزر با دقت میلیونیم سانتی‌متر اندازه‌گیری می‌شود. به همین نسبت، بسامدهای نور لیزر بسیار بیشتر از بسامدهای امواج رادیویی و تلویزیونی است. در نتیجه، نور لیزر می‌تواند حامل تعداد بسیار زیادی پیام باشد که در نوار بسامد بسیار باریکی جمع شده‌اند. ارتباطات را می‌توان با باریکه‌ای از نور لیزر انجام داد که در فضا، در جو، یا در تارهای نوری هدایت می‌شوند که می‌توان آنها را مثل کابل‌ها خم کرد.

شکل ۳۵ــ لیزر هلیم ــ نئون

توجه : باریکهٔ لیزر فقط وقتی از روی چیزی در هوا پراکنده گردد دیده می‌شود. مثل باریکه‌های نور خورشید و ماه، که آنچه مشاهده می کنید ذرات موجود در محیط اند نه خود باریکه. وقتی باریکه به سطح پخشی برخورد کند، بخشی از آن به صورت نقطه به طرف چشم شما پراکنده می‌شود.

در صندوق سوپرمارکت ها، که دستگاه‌های بارکُدخوان نماد شناسهٔ جهانی محصول[1] (UPC) را روی بسته‌بندی‌ها و پشت جلد این کتاب می‌روبند، لیزرها کاربرد دارند (شکل ۳۶). نور لیزری که از خط‌ها و فاصلهٔ بین آنها بازمی‌تابد با روبش نماد به سیگنالی الکتریکی تبدیل می‌شود. سیگنال در بازتاب از فضای

ISBN 978-0-471-75801-3
90000
9 780471 758013

شکل ۳۶ــ شناسهٔ منحصر به فرد کتاب‌ها در رمز میله‌ای پشت جلدشان نهفته است.

روشن به مقدار زیادی افزایش می‌یابد و در بازتاب از خط تاریک مقدار کمی فرومی‌افتد. اطلاعات مربوط به ضخامت و فاصلهٔ خط‌ها به صورت «دیجیتالی» (به یک‌ها و صفرهای رمز دوتایی تبدیل می‌شود) و با یک رایانه پردازش می‌شود.

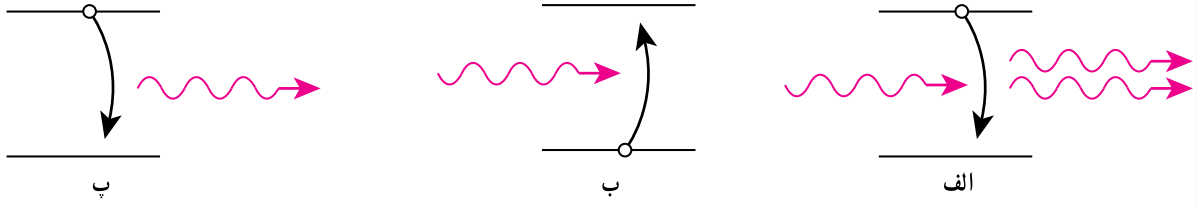
نقشه‌برداران از نور بازتابیدهٔ لیزر برای اندازه‌گیری فاصله‌ها استفاده می‌کنند، و نجاران و کسانی که کارهای تفننی انجام می‌دهند لیزر را برای تراز کردن به‌کار می‌گیرند. دانشمندان محیط زیست از لیزر برای اندازه‌گیری و آشکارسازی گازهای خروجی آلاینده استفاده می‌کنند. گازهای مختلف طول موج‌های مشخص نور را جذب می‌کنند و در باریکهٔ لیزر بازتابیده «اثر انگشت» خود را به جا می‌گذارند. طول موج و مقدار نور جذب شده را رایانه تحلیل و بی‌درنگ جدولی از آلاینده‌ها تهیه می‌کند.

لیزرها فناوری کاملاً جدیدی به‌وجود آورده‌اند که از ثمرات آن همواره استفاده می‌کنیم. آیندهٔ کاربردهای لیزر نامحدود به‌نظر می‌رسد.

پرسش پیشنهادی

در شکل ۳۷، کدام شکل گسیل خودبه‌خود، کدام شکل گسیل القایی و کدام شکل جذب را نشان می‌دهد؟

پاسخ : الف) گسیل القایی ب) جذب ج) گسیل خود به خود



شکل ۳۷

۱ــ universal product code

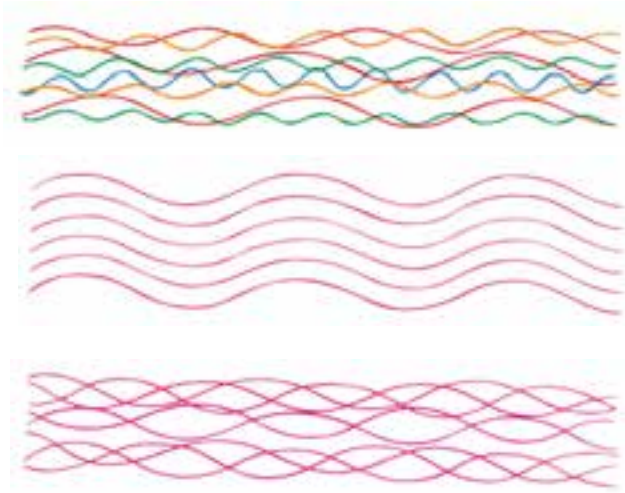
پرسش پیشنهادی

در شکل ۳۸، سه باریکه نور با ویژگی‌های متفاوت نشان داده شده است. الف) کدام شکل یک باریکه غیرهم جهت، غیرهم‌فاز و با بسامدهای مختلف را نشان می‌دهد؟

ب) کدام شکل یک باریکه هم‌جهت و هم‌بسامد را نشان می‌دهد؟

پ) کدام شکل یک باریکه هم‌جهت، هم‌بسامد و هم‌فاز را نشان می‌دهد؟

ت) کدام باریکه توسط لیزر تولید شده است؟



شکل ۳۸

پرسش‌ها و تمرین‌های پیشنهادی بخش ۷ـ۵

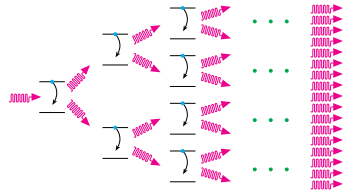
۱ــ لیزر یا هر دستگاه دیگری نمی‌تواند انرژی‌ای بیش از آنچه به آن داده شد، تولید کند. با این حال می‌تواند تپ‌های نوری با توان خروجی بیش از توان لازم برای به‌کار انداختن آن تولید کند، توضیح دهید.

۲ــ یک باریکهٔ لیزری چه فرقی با یک چشمهٔ نقطه‌ای نور دارد؟ تغییر شدت باریکه بر حسب فاصله از چشمه را برای لیزر و چشمهٔ نقطه‌ای باهم مقایسه کنید.

۳ــ یک لیزر کوچک هلیم ــ نئون باریکه‌ای با توان میانگین ۳/۵mW تولید می‌کند. اگر طول موج باریکهٔ نور خروجی ۶۳۲/۸nm باشد، در هر ثانیه چند فوتون گسیل می‌شود؟ اگر قطر باریکه ۲/۴mm باشد، شدت نور لیزر چه مقدار است؟

۴ــ لیزر کوچکی تپ‌های تابشی به طول موج ۶۴۲nm گسیل می‌کند، هر تپ به مدت ۱۰ms دوام دارد، و لیزر در هر ثانیه یک تپ گسیل می‌کند. اگر انرژی خروجی متوسط این لیزر ۵/۰mW باشد، توانی که در مدت هر تپ می‌تابد، چقدر است؟ در هر تپ چند فوتون آزاد می‌شود؟

اکنون فرض کنید مجموعه‌ای از اتم‌های یکسان، که همگی در یک حالت برانگیخته‌اند، در اختیار داریم (شکل ۷ــ۲۳). 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 باریکهٔ شدیدی از فوتون‌ها که همگی هم‌جهت، همفاز و هم‌انرژی‌اند، ایجاد شود. این باریکه را با یک **باریکهٔ لیزری** می‌نامند. این پدیده که به ساده‌ترین شکل بیان شد، اساس‌کار لیزر[1] را تشکیل می‌دهد. توجه داشته باشید که شکل ۷ــ۲۳ صرفاً طرح‌واره‌ای از فرایند گسیل القایی را نشان می‌دهد.



شکل ۷ــ۲۳

تمرین‌های فصل هفتم

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

۲ــ دمای سطح خورشید حدود ۶۰۰۰K است.

الف) بیشینهٔ تابندگی خورشید در چه طول موجی است؟

ب) انرژی هر فوتون در این طول موج چند الکترون ولت است؟

پ) این طول موج در چه ناحیه‌ای از طیف موج‌های الکترومغناطیسی است؟

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

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

۴ــ توضیح دهید تغییر هر یک از کمیت‌های زیر چه تأثیری در نتیجهٔ پدیدهٔ فوتوالکتریک دارد.

الف) دو برابر کردن بسامد نور فرودی

ب) دو برابر کردن طول موج نور فرودی

پ) دو برابرکردن شدت نور فرودی در یک بسامد معین

۵ــ طول موج قطع فوتوالکتریک یک سطح فلزی برابر ۳۲۵/۶ nm است. به ازای چه طول موجی، ولتاژ متوقف کننده برابر ۰/۹۷V است؟

۶ــ 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 چقدر است؟

۷ــ انرژی لازم برای جداکردن یک الکترون از سطح فلز سدیم برابر با ۲/۲۸ eV است.

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

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

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

۹ــ آیا ممکن است به کمک طیف گسیلی پیوستهٔ یک جسم، به جنس آن پی برد؟ به کمک چه طیفی می‌توان این کار را انجام داد؟

۱۰ــ آیا ممکن است به کمک طیف خورشید، عناصر موجود در خورشید را شناسایی کرد؟ توضیح دهید.

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

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

۱۳ــ در پدیدهٔ شفق قطبی مولکول‌های اکسیژن و نیتروژنِ جو در اثر برخورد با زبانه‌های خورشیدی، یونیده یا برانگیخته می‌شوند. اتم‌های برانگیخته در بازگشت به حالت پایهٔ خود، فوتون‌هایی گسیل می‌کنند که برخی از رنگ‌های شفق قطبی ناشی از چنین گسیل‌هایی است. در گسیل فوتون از

۱ــ نمودار تابندگی جسم سیاه برحسب طول موج، پدیدهٔ فوتوالکتریک، توجیه طیف گسستهٔ اتمی عناصر و طیف جذبی خورشید، پایداری اتم‌ها در مدل رادفورد و ...

۲ــ الف)

$$\lambda_m T = ۲/۹\times۱۰^{-۳}\ m.K$$

$$\lambda_m = \frac{۲/۹\times۱۰^{-۳}\ m.K}{۶۰۰۰k} = ۴/۸\times۱۰^{-۷}\ m = ۰/۴۸\mu m$$

ب)
$$E = hf = h\frac{c}{\lambda} = ۴/۱۴\times۱۰^{-۱۵}\ ev.s\frac{۳\times۱۰^{۸}\ m/s}{۴/۸\times۱۰^{-۷}\ m} \approx ۲/۶eV$$

پ) $۰/۴۸\mu m$ در محدودهٔ مرئی طیف امواج الکترومغناطیسی قرار دارد

۳ــ
$$\lambda_m = \frac{۲/۹\times۱۰^{-۳}\ m.K}{T} = \frac{۲/۹\times۱۰^{-۳}\ m.K}{(۲۷۳+۲۷)K} = ۹/۷\times۱۰^{-۶}\ m = ۹/۷\mu m$$

در محدودهٔ فروسرخ طیف امواج الکترومغناطیسی قرار دارد.

۴ــ الف) افزایش ولتاژ متوقف کننده و افزایش انرژی جنبشی فوتوالکترون گسیل شده

ب) اگر طول موج دو برابر شود، بسامد و انرژی فوتون‌ها نصف می‌گردد و ممکن است پدیدهٔ فوتوالکتریک متوقف شود. اگر پدیده همچنان مشاهده شود، ولتاژ متوقف کننده و انرژی جنبشی فوتوالکترون‌ها، کاهش می‌یابد.

پ) دو برابر کردن شدت نور فرودی در یک بسامد معین، سبب افزایش جریان در مدار پدیدهٔ فوتوالکتریک می‌شود. اما ولتاژ متوقف‌کننده و انرژی جنبشی شیشه فوتوالکترون‌ها تغییر نمی‌کند.

۵ــ با استفاده از رابطهٔ (۳ــ۱۰) می‌توانیم بنویسیم :

$$eV_{\circ} = hf - W_{\circ}$$

$$eV_{\circ} = h\frac{c}{\lambda} - h\frac{c}{\lambda_{\circ}} = hc(\frac{1}{\lambda} - \frac{1}{\lambda_{\circ}})$$

$$1\times0/97V = 4/14\times10^{-15}eV.s\times3\times10^{8}m/s(\frac{1}{\lambda} - \frac{1}{325/6\times10^{-9}})$$

$$\lambda = 210nm$$

۶ــ

$$eV_{\circ} = hf - W_{\circ}$$

$$1\times5V = 4/14\times10^{-15}f - 2/2eV$$

$$f = 6/76\times10^{14}Hz$$

$$\lambda = \frac{c}{f} = \frac{3\times10^{8}m/s}{6/76\times10^{14}Hz} = 4/44\times10^{-7}m$$

۷ــ الف) انرژی فوتون‌هایی با طول موج ۶۸۰nm برابر است با :

$$E = hf = h\frac{c}{\lambda} = 4/14\times10^{-15}eV.s\frac{3\times10^{8}m/s}{680\times10^{-9}m} = 1/83eV$$

چون $E<W_{\circ}$ است، پس پدیدهٔ فوتوالکتریک مشاهده نمی‌شود.

ب)

$$hf_{\circ} = W_{\circ} \Rightarrow h\frac{c}{\lambda_{\circ}} = W_{\circ} \Rightarrow \lambda_{\circ} = \frac{hc}{W_{\circ}}$$

$$\lambda_{\circ} = \frac{4/14\times10^{-15}eV.s\times3\times10^{8}m/s}{2/28eV} = 5/44\times10^{-7}m$$

۸ــ وقتی جسم به‌صورت مایع یا جامد باشد، طیف آن پیوسته است. امّا وقتی به‌صورت گاز رقیق است، طیف آن به‌صورت گسسته است.

۹ــ میزان تابندگی طیف گسیلی اجسام جامد یا مایع به دمای آن‌ها وابسته است و از روی آنها نمی‌توان پی به جنس آنها برد. امّا به کمک طیف اتمی عناصر که طیف گسسته می‌باشد. می‌توان پی به جنس عنصر برد.

۱۰ــ در متن کتاب راهنمای معلم توضیح داده شده است.

۱۱ــ در الگوی اتمی رادفورد، اگر الکترون را نسبت به هسته ساکن فرض کنیم، باید تحت تأثیر نیروی ربایشی الکتریکی بین هسته و الکترون، روی هسته سقوط کند و در نتیجه اتم ناپایدار باشد. اگر فرض کنیم الکترون‌ها مانند سیاره‌های منظومهٔ خورشیدی به دور هسته در گردش باشند، چون حرکت الکترون شتابدار است، پس الکترون طبق نظریهٔ فیزیک کلاسیک باید موج الکترومغناطیس گسیل کند و در اثر گسیل انرژی الکترون کاسته شده و شعاع مدار الکترون به دور هسته کوچک و بسامد آن افزایش می‌یابد. بنابراین باید طبق موج الکترومغناطیسی گسیل شده پیوسته

باشد و الکترون پس از گسیل‌های متوالی روی هسته بیفتد فرض‌های ۱ و ۲ بیان شده در کتاب، مشکل اتم رادفورد را حل می‌کند و فرض‌های ۳ و ۴ گسسته بودن طیف اتمی را توضیح می‌دهد.

۱۲ــ در مدل اتمی بور، الکترون در مدارهای شخصی و با انرژی‌های معلوم ($E_n = -\frac{E_R}{n^2}$) فرض می‌شود. اگر الکترون از مدار مانای بالا به یک مدار مانای پایین‌تر برود، اختلاف انرژی دو تراز به صورت فوتون موج الکترومغناطیس گسیل می‌شود. چون این اختلاف انرژی‌ها مشخص هستند، پس انرژی، بسامد و طول موج‌های مشخصی در اثر این گذارها، گسیل می‌شوند و طیف حاصل گسسته است.

۱۳ــ طول موج ۶۳۰ nm مربوط به رنگ نارنجی است.

$$E = h\frac{c}{\lambda} = \frac{۴/۱۴\times۱۰^{-۱۵}\times۳\times۱۰^{۸}}{۶۳۰\times۱۰^{-۹}} = ۱/۹۷eV$$

۱۴ــ

$$\frac{۱}{\lambda} = R_H\left(\frac{۱}{n'^{۲}} - \frac{۱}{n^{۲}}\right),\ n'=۱,\ n=۲,۳,....,\ R_H \approx ۰/۰۱(nm)^{-۱}$$

$$n=۲: \frac{۱}{\lambda} = ۰/۰۱\left(\frac{۱}{۱^{۲}} - \frac{۱}{۲^{۲}}\right) = ۰/۰۱\left(\frac{۴-۱}{۴}\right)$$

در محدودهٔ فرابنفش $\lambda = \frac{۴۰۰}{۳}nm = ۱۳۳/۳nm$

$$n=۳: \frac{۱}{\lambda} = ۰/۰۱\left(\frac{۱}{۱^{۲}} - \frac{۱}{۳^{۲}}\right) = ۰/۰۱\left(\frac{۹-۱}{۹}\right)$$

در محدودهٔ فرابنفش $\lambda = \frac{۹۰۰}{۸}nm = ۱۱۲/۵nm$

$$n=۴: \frac{۱}{\lambda} = ۰/۰۱\left(\frac{۱}{۱^{۲}} - \frac{۱}{۴^{۲}}\right) = ۰/۰۱\left(\frac{۱۶-۱}{۱۶}\right)$$

در محدودهٔ فرابنفش $\lambda = ۱۰۶/۷nm$

۱۵ــ فرض اول و محاسبهٔ شتاب توسط نیروی الکتریکی محاسبهٔ انرژی مکانیکی تا رابطهٔ $E = \frac{ke^{۲}}{۲r}$ کلاسیکی است. فرض‌های ۲ و ۳ و ۴ غیرکلاسیکی است.

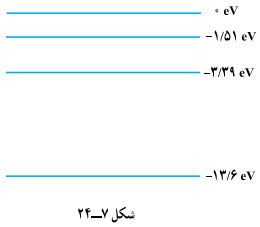
۱۶ــ الف) پایین‌ترین تراز در یک اتم، تراز پایه نامیده می‌شود و انرژی ۱۳/۶eV–معادل ــــ = ــــ است که پایین‌ترین تراز اتم هیدروژن می‌باشد.

اتم نیتروژن، طول موج فوتون‌ها ۶۳۰nm است. رنگ و انرژی این فوتون‌ها را تعیین کنید.

۱۴ــ طول موج رشتهٔ لیمان مربوط به اتم هیدروژن را با استفاده از رابطهٔ ریدبرگ حساب کنید. مکان این خطوط را در طیف موج‌های الکترومغناطیسی مشخص کنید.

۱۵ــ چه جنبه‌هایی از مدل بور در مورد اتم هیدروژن الف) کلاسیکی، و ب) غیرکلاسیکی است؟

۱۶ــ شکل ۷ــ۲۴ تعدادی از ترازهای انرژی اتم هیدروژن را نشان می‌دهد.



شکل ۷ــ۲۴

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

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

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

۱۷ــ اگر الکترون در اتم هیدروژن در تراز n = ۴ باشد چه طول موج‌هایی را می‌تواند تابش کند؟

۱۸ــ 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؟

۱۹ــ 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.

۲۰ــ انرژی یونش، انرژی لازم برای خارج کردن یک الکترون از اتم است. انرژی یونش را در موارد زیر حساب کنید.

الف) حالت پایهٔ اتم هیدروژن (n = ۱)

ب) تراز n = ۳ اتم هیدروژن.

۲۱۴

ب) کمترین طول موج مربوط به گذار $n=\infty$ با انرژی ۰eV به $n=۱$ با انرژی ۱۳/۶eV– است.

پس می‌توانیم بنویسیم :

$$\Delta E = hf = h\frac{c}{\lambda}$$

$$۰-(-۱۳/۶) = ۴/۱۴\times۱۰^{-۱۵}\frac{۳\times۱۰^{۸}}{\lambda}$$

$$\lambda = \frac{۱۲/۵}{۱۳/۶}\times۱۰^{-۷}\,m = ۹/۱۹\times۱۰^{-۶}\,m = ۹/۱۹\mu m$$

پ)

$$\Delta E = h\frac{c}{\lambda} = ۴/۱۴\times۱۰^{-۱۵}\frac{۳\times۱۰^{۸}}{۶۶۰\times۱۰^{-۹}} = ۱/۸۸eV$$

با توجه به اعداد کنار ترازهای انرژی این عدد نزدیک به تفاضل اعداد ۱/۵eV– و ۳/۳۹eV– است. پس گذار $۱ \leftarrow ۳$ پاسخ مسئله می تواند باشد.

۱۷ــ طول موج‌های مربوط به گذارهای؛

$$۴\to۱\ ,\ ۴\to۲\ ,\ ۴\to۳\ ,\ ۳\to۲\ ,\ ۳\to۱\ ,\ ۲\to۱$$

$$۴\to۱:\ \frac{۱}{\lambda} = ۰/۰۱(\frac{۱}{۱^{۲}}-\frac{۱}{۴^{۲}}) \Rightarrow \lambda = \frac{۱۶۰۰}{۱۵}nm \approx ۱۰۶/۷nm$$

$$۴\to۲:\ \frac{۱}{\lambda} = ۰/۰۱(\frac{۱}{۲^{۲}}-\frac{۱}{۴^{۲}}) \Rightarrow \lambda = \frac{۱۶۰۰}{۱۲}nm \approx ۱۳۳/۳nm$$

۱۸ــ

$$E = p.t\ ,\ E = nhf = nh\frac{c}{\lambda}$$

$$۶W\times۱s = n۶/۶۳\times۱۰^{-۳۴}J.s\frac{۳\times۱۰^{۸}m/s}{۵۸۹\times۱۰^{-۹}m}$$

$$n = \frac{۲\times۵۸۹}{۶/۶۳}\times۱۰^{۱۷} \approx ۱/۷۸\times۱۰^{۱۹}$$

۱۹ــ

$$\Delta E = hf = h\frac{c}{\lambda}$$

$$\Delta E = ۴/۱۴\times۱۰^{-۱۵}eV.s\frac{۳\times۱۰^{۸}m/s}{۶۰۰\times۱۰^{-۹}m} = ۲/۰۷eV$$

۲۱ــ با استفاده از رابطهٔ بور اختلاف انرژی $\Delta E(n_۱\to n_۲) = E_{n_۱} - E_{n_۲}$ را حساب کنید و نشان دهید که :

الف) $\Delta E(۴\to۲) = \Delta E(۴\to۳) + \Delta E(۳\to۲)$

ب) $\Delta E(۴\to۱) = \Delta E(۴\to۲) + \Delta E(۲\to۱)$

۲۲ــ 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؟

۲۳ــ 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؟

۲۴ــ توان باریکهٔ نور خروجی از یک لیزر گازی هلیم نئون برابر ۰/۵میلی‌وات است. اگر توان ورودی این لیزر ۵۰W باشد،

الف) بازده این لیزر را حساب کنید.

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

$$\Delta E = ۶/۶۳\times ۱۰^{-۳۴}\,J.s\,\frac{۳\times ۱۰^{۸}\,m/s}{۶۰۰\times ۱۰^{-۹}\,m} = ۳/۳۱\times ۱۰^{-۱۹}\,J$$

$$\Delta E = hf \Rightarrow ۲/۰۷eV = ۴/۱۴\times ۱۰^{-۱۵}\,eV.s\times f$$

$$f = \frac{۲/۰۷eV}{۴/۱۴\times ۱۰^{-۱۵}\,eV.s} = ۵\times ۱۰^{۱۴}\,HZ$$

۲۰ــ الف) $|E_۱| = \left|\frac{-E_R}{۱^۲}\right| = ۱۳/۶eV$ = انرژی یونش در حالت پایه

ب) $|E_۳| = \left|\frac{-E_R}{۳^۲}\right| = ۱/۵۱eV$ = انرژی یونش در تراز ۳

۲۱ــ $\Delta E(n_۱ \to n_۲) = E_{n_۱} - E_{n_۲} \quad , \quad E_n = -\frac{E_R}{n^۲}$

$$= -\frac{E_R}{n_۱^۲} - (-\frac{E_R}{n_۲^۲}) = E_R(\frac{۱}{n_۲^۲} - \frac{۱}{n_۱^۲})$$

الف)

$$\Delta E(۴ \to ۲) = E_R(\frac{۱}{۲^۲} - \frac{۱}{۴^۲})$$

$$\Delta E(۴ \to ۳) = E_R(\frac{۱}{۳^۲} - \frac{۱}{۴^۲})$$

$$\Delta E(۳ \to ۲) = E_R(\frac{۱}{۲^۲} - \frac{۱}{۳^۲})$$

$$\Delta E(۴ \to ۳) + \Delta E(۳ \to ۲) = E_R(\frac{۱}{۳^۲} - \frac{۱}{۴^۲}) + E_R(\frac{۱}{۲^۲} - \frac{۱}{۳^۲})$$

$$= -E_R(\frac{۱}{۴^۲} + \frac{۱}{۲^۲}) = E_R(\frac{۱}{۲^۲} - \frac{۱}{۴^۲}) = \Delta E(۴ \to ۲)$$

ب)

$$\Delta E(۴ \to ۱) = E_R(\frac{۱}{۱^۲} - \frac{۱}{۴^۲})$$

$$\Delta E(۴ \to ۲) + \Delta E(۲ \to ۱) = E_R(\frac{۱}{۲^۲} - \frac{۱}{۴^۲}) + E_R(\frac{۱}{۱^۲} - \frac{۱}{۲^۲})$$

$$= -E_R(\frac{۱}{۴^۲} + \frac{۱}{۲^۲}) = E_R(\frac{۱}{۱^۲} - \frac{۱}{۴^۲}) = \Delta E(۴ \to ۲)$$

۲۲ــ الف) $۶ \to ۵ , ۶ \to ۴ , ۶ \to ۳ , ۶ \to ۲ , ۶ \to ۱ , ۵ \to ۴ , ۵ \to ۳ , ۵ \to ۲ ,$
$۵ \to ۱ , ۴ \to ۳ , ۴ \to ۲ , ۴ \to ۱ , ۳ \to ۲ , ۳ \to ۱ , ۲ \to ۱$

با توجه به گذاری‌های فوق ۱۵ گذار مختلف و بنابراین ۱۵ نوع فوتون داریم :

(تعداد فوتون‌های ممکن $= \frac{n(n-۱)}{۲}$)

ب) برای $\Delta n = ۱$ فقط گذارهای زیر ممکن هستند :

$۶ \to ۵ , ۵ \to ۴ , ۴ \to ۳ , ۳ \to ۲ , ۲ \to ۱$

یعنی ۵ نوع فوتون

۲۳ــ بسامد پرتوهای فرابنفش بیشتر از بسامد نور مرئی است. پس فوتون‌های فرابنفش از فوتون‌های نور مرئی بیشتر هستند (مرئی $hf <$ فرابنفش $hf \Rightarrow$ مرئی $f <$ فرابنفش f). بنابراین قدرت نفوذ فوتون‌های فرابنفش در سلول‌های

پوست بیشتر از نور مرئی است و همین امر سبب سوختگی و در شرایط خطرناک منجر به سرطان پوست می‌شود.

۲۴ــ الف)

$$\text{بازده} = \frac{\text{انرژی مفید}}{\text{انرژی ورودی}}$$

$$R_a = \frac{P'.t}{P.t} = \frac{P'}{P} = \frac{۰/۵\times۱۰^{-۳}\,W}{۵۰W} = ۱۰^{-۵}$$

این عدد معادل ۰/۰۰۱ درصد است.

ب)

$$E' = P'.t = nh\frac{C}{\lambda}$$

$$۰/۵\times۱۰^{-۳}\times۱ = n\times۶/۶۳\times۱۰^{-۳۴}\,\frac{۳\times۱۰^{۸}}{۶۳۳\times۱۰^{-۹}}$$

$$n = \frac{۶۳۳\times۰/۵\times۱۰^{-۱۲}}{۶/۶۳\times۱۰^{-۲۶}} =$$

برای دیدن نمونه دانستنی‌های ضروری آزمون تشریحی و چهارگزینه‌ای فصل به سایت گروه فیزیک یا CD همراه کتاب راهنما معلم مراجعه کنید.