

فیزیک جدید

# آشنایی با ماهیت اتم

جان کاتنل، کنت جانسون

ترجمه و متناسب سازی:  
روح الله خلیلی بروجنی، ناصر مقبلی

## آشنایی با ماهیت اتم



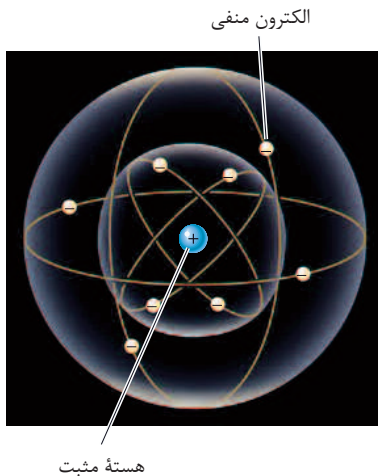
رویش CAT (برش‌نگاری رایانه‌ای یا سی‌تی‌اسکن) روشی مهم و غیرمتداول است که در آن از پرتوهای X برای ایجاد تصویر «برش‌های» داخل بدن انسان استفاده می‌شود. این تصویر سه بعدی رنگی، سی‌تی‌اسکن فک و بخشی از کاسه سر است که سطح جزئیات قابل دسترس را با توجه به فناوری امروز نشان می‌دهد. یک رایانه با نرم‌افزار تصویربرداری مناسب چنین تصاویر سه بعدی از برش‌ها را گردآوری می‌کند. جراحان حتی می‌توانند با استفاده از پویانمایی سریع با داده‌های CAT، اطراف بدن را جستجو کنند. تولید پرتوهای X به ساختار اتم ارتباط دارد و این ساختار موضوع اصلی این فصل است.



## ۱. پراکندگی رادرفورد و اتم هسته‌ای

اتم دارای یک هسته کوچک باردار مثبت است ( $m \approx 10^{-15}$  شعاع) که مطابق شکل ۱ با تعدادی الکترون در فاصله‌هایی به نسبت دور احاطه شده است (شکل به مقیاس نیست). در حالت طبیعی، اتم از نظر الکتریکی خنثاست زیرا هسته شامل تعدادی پروتون است (هر یک با بار  $+e$ ) که مساوی تعداد الکترون‌هاست (هر یک با بار  $-e$ ). این مدل اتمی اکنون به طور جهانی پذیرفته شده است و اتم هسته‌ای نامیده می‌شود.

اتم هسته‌ای، ایده نسبتاً جدیدی است. در اوایل قرن بیستم مدلی که پذیرش عمومی داشت توسط جوزف تامسون (۱۸۵۶-۱۹۴۰) ارائه شده بود که شکل بسیار متفاوتی از اتم بود. در دیدگاه تامسون در مرکز اتم، هسته‌ای وجود نداشت. در عوض فرض بر این بود که بار مثبت در تمام اتم گسترده شده است و نوعی خمیر یا کیک تشکیل می‌شود که الکترون‌های منفی نظیر دانه‌های کشمش در آن قرار دارند.



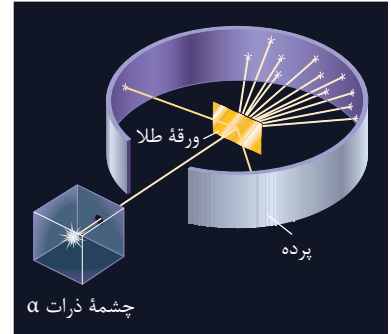
**شکل ۱** در اتم هسته‌ای هسته کوچک با بار مثبت با تعدادی الکترون در فاصله‌های به نسبت دور احاطه شده است. شکل به مقیاس نیست.

مدل «کیک کشمش» وقتی فیزیک‌دان نیوزیلندی ارنست رادرفورد (۱۸۷۱-۱۹۳۷) در سال ۱۹۱۱ نتایجی تجربی را انتشار داد که این مدل نمی‌توانست آن‌ها را توضیح دهد کنار گذاشته شد. همان‌طور که شکل ۲ نشان می‌دهد، رادرفورد و همکارانش باریکه‌ای از ذرات آلفا ( $\alpha$ ) را به ورقه فلزی نازکی که از طلا ساخته شده بود تاباندند. ذرات آلفا باردار مثبت هستند (هسته اتم‌های هلیوم، اگرچه در آن موقع شناخته نشده بود) که از بعضی مواد پرتوزا گسیل می‌شوند. اگر مدل کیک-کشمشی درست بود، باید انتظار داشته باشیم که ذرات  $\alpha$  تقریباً به طور مستقیم از ورقه بگذرند. با این همه، چیزی در این مدل وجود ندارد که ذرات به نسبت سنگین  $\alpha$  را منحرف کنند، زیرا الکترون‌ها در مقایسه جرم کوچکی دارند و بار مثبت در کیک «سست شده» گسترده شده است.

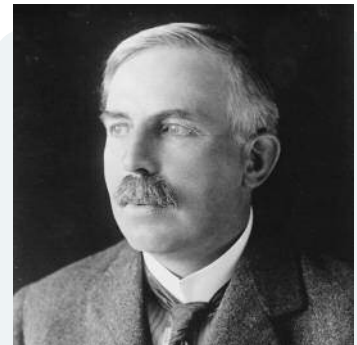
با استفاده از یک ورقه سولفید روی، که با برخورد یک ذره آلفا مختصری می‌درخشد، رادرفورد و همکارانش توانستند معین کنند که همه ذرات  $\alpha$  به طور مستقیم از ورقه نمی‌گذرند، بلکه بعضی از آن‌ها با زاویه‌های بزرگ و حتی به طرف عقب منحرف می‌شوند. خود رادرفورد می‌گوید «باور کردنی نبود که شما یک گلوله ۱۵ اینچی را به تکه‌ای دستمال کاغذی شلیک کنید و گلوله برگردد و به شما بخورد». رادرفورد نتیجه گرفت به جای اینکه بار مثبت با ظرافت و به طور یکنواخت در سراسر اتم توزیع شده باشد، در ناحیه کوچکی به نام هسته متمرکز شده است. ولی الکترون‌ها در یک اتم هسته‌ای چگونه می‌توانند از هسته باردار مثبت جدا بمانند؟ اگر الکترون‌ها ساکن بودند، با نیروی الکتریکی ربایشی بار هسته‌ای به داخل کشیده می‌شدند. بنابراین، الکترون‌ها باید نظیر سیاره‌هایی که به دور خورشید می‌گردند به دور هسته در حرکت باشند. در واقع، مدل هسته‌ای اتم گاهی مدل «سیاره‌ای» نامیده می‌شود. ولی، ابعاد اتم چنان است که به طوری که در مثال مفهومی ۱ بحث شده از منظومه شمسی ما بخش فضای خالی بزرگ‌تری دارد.

### مثال مفهومی ۱ آیا بیشتر فضای اتم‌ها خالی است؟

در مدل سیاره‌ای اتم، شعاع هسته ( $m \approx 1 \times 10^{-15}$ ) قابل قیاس با شعاع خورشید است ( $m \approx 7 \times 10^8$ ). الکترون در فاصله شعاعی ( $m \approx 1 \times 10^{-10}$ ) به دور هسته



**شکل ۲** آزمایش پراکندگی رادرفورد که در آن ذرات  $\alpha$  از یک ورقه نازک طلا پراکنده شده‌اند. تمام وسیله در یک اتاقک خلاء قرار دارد (نشان داده نشده است).



رادرفورد، ارنست

(انگلستان ۱۹۳۷-۱۸۷۱)

ارنست که یکی از دوازده فرزند خانواده بود از همان سال‌های نوجوانی به سخت کوشی و صرفه‌جویی خو کرد، و این‌ها خصیصه‌هایی شد که تا آخر عمر برایش باقی ماند. با برخورداری از کمک هزینه تحصیلی به کالج نلسون رفت، که دبیرستانی با معیارهای کیفی عالی در نزدیکی محل اقامتش بود.

رادرفورد در سال ۱۸۹۲ درجه کارشناسی گرفت و یک سال بعد به دریافت





درجه کارشناسی ارشد نایل شد. او که ستاره در حال ظهوری تلقی می‌شد، بورسی برای تحصیل در خارج گرفت و آزمایشگاه کاوندیش در دانشگاه کمبریج را برای این کار انتخاب کرد. علت این انتخاب آن بود که مدیر این آزمایشگاه در آن زمان، جوزف جان تامسون، در زمینه پدیده‌های الکترومغناطیسی به عنوان مرجعی جهانی شناخته می‌شد.

رادفورد در سال ۱۸۹۵ اولین «دانشجوی پژوهشی» در آزمایشگاه کاوندیش شد. ابتدا کار روی آشکارساز موج بی‌سیم را که ساخته بود ادامه داد، و گستره طول موج‌های آن را زیاده کرد. تامسون به قدری تحت تأثیر قرار گرفت که به زودی از او درخواست کرد که در پژوهش پرتو X، که در آن زمان تازه کشف شده بود، کمکش کند. کار با پرتو X زمینه‌ای فراهم آورد که رادفورد بتواند اثرات انواع دیگر تابش، به ویژه تابش ناشی از اورانیوم، را مورد بررسی قرار دهد. او همچنین با استفاده از برگه‌ای جذب کننده نشان داد که پرتوهای «بتا» می‌توانند از ضخامت چندین برگه عبور کنند، اما پرتوهای «آلفا» به سرعت در مانع متوقف می‌شوند.

در سال ۱۸۹۸ رادفورد پیشنهاد سمت استادی کامل دانشگاه مک‌گیل را پذیرفت. چیزی از ورودش به مونترال نگذشته بود که یک محصول پرتوزای گازی که از توریم گسیل می‌شد، پیدا کرد و اسمش را «گاز



می‌گردد که قابل قیاس با فاصله شعاعی است ( $m \approx 1/5 \times 10^{11}$ ) که زمین به دور خورشید می‌گردد. فرض کنید که ابعاد خورشید و زمین همان ویژگی‌هایی را دارند که هسته اتمی و مدار الکترون دارند. در این صورت برای فاصله بین زمین و خورشید کدام درست است؟ (الف) خیلی بزرگ‌تر از آنی می‌بود که واقعاً هست. (ب) خیلی کوچک‌تر از آنی می‌بود که واقعاً هست. (پ) تقریباً همانی بود که واقعاً هست. **استدلال:** شعاع مدار الکترون یکصد هزار برابر بزرگ‌تر از شعاع هسته است:

$$10^5 = (1 \times 10^{-15} \text{ m}) / (1 \times 10^{-15} \text{ m})$$

استفاده از این عامل با شعاع خورشید پاسخ درست را آشکار می‌کند.

**پاسخ‌های (ب) و (پ) نادرست‌اند.** فرض کنید که شعاع مدار زمین به دور خورشید  $10^5$  برابر شعاع خورشید بود. آن‌گاه، فاصله زمین و خورشید  $m = 7 \times 10^{13} \times 10^5 = 7 \times 10^{18}$  می‌بود که نه کوچک‌تر و نه تقریباً مساوی با فاصله واقعی است.

**پاسخ (الف) درست است.** اگر شعاع مدار زمین به دور خورشید  $10^5$  برابر شعاع خورشید می‌بود، فاصله بین زمین و خورشید برابر  $m = 7 \times 10^{13} \times 10^5 = 7 \times 10^{18}$  بود که بیش از چهارصد برابر شعاع مدار واقعی  $m \approx 1/5 \times 10^{11}$  بزرگ‌تر است. در واقع، زمین ده برابر دورتر از خورشید است تا از پلوتو، که دارای شعاع مداری  $m = 6 \times 10^{11}$  است. پس، اتم دارای بخش بسیار بزرگ‌تری از فضای خالی نسبت به منظومه شمسی است.

### تکلیف مربوط به مسئله ۳

اگرچه تجسم مدل سیاره‌ای اتم خیلی ساده است ولی اشکال‌های زیادی در بر دارد. مثلاً وقتی الکترون روی مسیری با انحنای حرکت می‌کند، شتاب مرکزگرایی دارد. و همان‌طور که می‌دانیم وقتی الکترون شتاب داشته باشد، امواج الکترومغناطیسی تابش می‌کند. این امواج حامل انرژی هستند. این انرژی به طور دائم تحلیل می‌رود و الکترون به طور مارپیج به طرف داخل می‌رود و سرانجام روی هسته فرو می‌افتد. چون ماده پایدار است، این فرو افتادن اتفاق نمی‌افتد. پس، مدل سیاره‌ای، اگرچه نسبت به مدل «کیک کشمش» تصویر واقعی‌تری به دست می‌دهد، ولی فقط بخشی

از داستان را حکایت می‌کند. داستان کامل ساختار اتمی مجذوب‌کننده است و بخش بعد جنبه دیگری از آن را بیان می‌کند.

### ۲. طیف خطی

می‌دانیم که تمام اجسام امواج الکترومغناطیسی گسیل می‌کنند، و در بخش بعدی خواهیم دید که این تابش چگونه پدید می‌آید. برای یک جسم جامد نظیر رشته داغ یک لامپ روشن، این امواج گستره‌ای پیوسته از طول موج‌ها را دارند که بعضی از آن‌ها در گستره مرئی طیف واقع‌اند. گستره پیوسته طول موج‌ها ویژگی تمامی مجموعه اتم‌هایی است که جامد را به وجود می‌آورند. برعکس، اتم‌های منفرد، که از برهم‌کنش‌های قوی موجود در جامد آزادند به جای گستره پیوسته فقط طول موج‌های معین خاصی را گسیل می‌کنند. این طول موج‌ها مشخصه اتم هستند و سرنخ‌های مهمی را در مورد ساختار اتم به دست می‌دهند. برای بررسی رفتار اتم‌های منفرد، گازهای کم‌فشار مورد استفاده قرار می‌گیرند که در آن‌ها اتم‌ها به نسبت از هم خیلی فاصله دارند.

گاز کم‌فشار در یک لامپ درزگیری شده با برقراری اختلاف پتانسیل بقدر کافی بزرگی بین دو الکتروود واقع در لامپ می‌تواند امواج الکترومغناطیسی گسیل کند. با طیف‌نمای توری طول موج‌های منفرد گسیل شده از گاز را می‌توان جدا کرد و به صورت یک دسته فریزهای روشن به شناسایی آن‌ها پرداخت. این دسته فریزها طیف خطی نامیده می‌شوند زیرا هر فریز روشن به صورت مستطیل نازکی ظاهر می‌شود (یک «خط») که از تعداد زیادی شکاف‌های موازی و کم‌فاصله در توری طیف‌نما حاصل شده‌اند.



پرتوزا» گذاشت (که امروز تورون نامیده می‌شود). همچنین متوجه شد که بعضی محصولات با گذشت زمان فعالیت‌شان کم می‌شود.

رادرفورد در سال ۱۹۰۷ سیمت استادی دانشگاه منچستر را، که بعد از کمبریج بهترین دانشگاه بریتانیا محسوب می‌شد، پذیرفت. وی به لطف دستاوردهای آزمایشگاهی‌اش به جوایز متعددی دست یافت، که یکی از آن‌ها جایزه نوبل شیمی در سال ۱۹۰۸ بود.

مشهورترین کشف رادرفورد، کشف هسته اتم بود. در سال ۱۹۰۹ یک دانشجوی دوره کارشناسی، به نام ارنست مارسدن، را موظف کرد که ذرات آلفای گسیل شده از چشمه پرتوزا را به یک برگه هدف بتاباند، و تعداد ذراتی را که در زاویه‌های مختلفی نسبت به خط مرکزی منحرف می‌شوند اندازه بگیرد. بیشتر این ذرات البته یا بدون انحراف عبور می‌کردند یا خیلی کم منحرف می‌شدند، اما بعضی از آن‌ها در زاویه‌های بزرگ کاملاً چشم‌گیری که در مواردی به بیش از ۹۰ درصد هم می‌رسید، در واقع از هدف برگشت داده می‌شدند. واکنش رادرفورد



نتون (Ne)

جیوه (Hg)

شکل ۳ طیف‌های خطی برای نتون و جیوه



(که بسیار بازگویی شده) معروف است: «این مشاهدات تقریباً همان قدر باورنکردنی بود که کسی گلوله توپ پانزده اینچی را به تکه‌ای دستمال کاغذی شلیک کند و گلوله از کاغذ برگردد و به خودش بخورد.»

در سال ۱۹۱۱، رادرفورد مدعی شد که می‌تواند این‌گونه پراکندگی را توضیح بدهد. رادرفورد اظهار کرد که اتم بیشترش فضای تهی است که الکترون‌ها در قلمرو آن پرتاب می‌زنند. اما جرم اتم تقریباً به تمامی در ناحیه بسیار کوچکی، به نام هسته متمرکز شده است. چون بار اتم هم (غیر از بار الکترون‌ها) در هسته متمرکز شده است، ذرات آلفایی که به قدر کافی به هسته نزدیک می‌شوند قویاً تحت تأثیر دافعه الکتروستاتیکی متقابل‌شان قرار می‌گیرند. مفهوم اتم هسته‌ای در ابتدا چندان مورد توجه قرار نگرفت. اما نیلز بور در سال ۱۹۱۳، با در نظر گرفتن ملاحظات کوانتومی، توانست آن را برای توضیح داده‌های شیمیایی، پرتوزایی، و طیف‌نمایی به کار بگیرد.

رویداد بزرگ دیگر در سال ۱۹۳۲ کشف نوترون توسط چادویک بود. طولی نکشید که معلوم شد نوترون‌ها، که رادرفورد در سال ۱۹۲۰ وجودشان را پیش بینی کرده بود، همراه با پروتون‌ها اجزای سازنده هسته هستند.

**شکل ۱۴** طیف خطی هیدروژن اتمی. فقط سری بالمر در ناحیه مرئی طیف الکترومغناطیسی قرار دارد.

### ■ فیزیک تابله‌های نئون و بخار جیوه لامپ‌های خیابان

دو نمونه آشنا از گازهای کم‌فشار عبارت‌اند از نئون در تابله‌های نئون و جیوه در لامپ‌های جیوه‌ای خیابان. شکل ۳ قسمت‌های مرئی طیف‌های خطی برای این دو اتم را نشان می‌دهد. طول موج‌های مرئی خاصی که اتم‌ها گسیل می‌کنند به تابله‌های نئونی و بخار جیوه لامپ‌های خیابان رنگ‌های مشخصی می‌دهند.

ساده‌ترین طیف خطی، طیف هیدروژن اتمی است و بیشترین کوشش برای درک نقش طول موج‌های موجود در آن انجام گرفته است. شکل ۴ طرحی از بعضی گروه‌ها یا دسته‌های خط‌ها در طیف هیدروژن اتمی است.

فقط یک گروه در ناحیه مرئی طیف الکترومغناطیسی است که برای تقدیر از یوهان بالمر (۱۸۹۸ - ۱۸۲۵)، **سری بالمر** نامیده شده است. این معادله همراه با معادله‌های مشابهی برای **سری لیمان** در طول موج‌های کوتاه‌تر و **سری پاشن** برای طول موج‌های بزرگ‌تر در شکل داده شده‌اند:

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

$$\frac{1}{\lambda} = R \left( \frac{1}{2^2} - \frac{1}{n^2} \right) \quad n = 3, 4, 5, \dots \quad (2) \quad \text{سری بالمر}$$

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

در این معادله‌ها جمله ثابت  $R$  دارای مقدار  $R = 1/0.97 \times 10^8 \text{ m}^{-1}$  است و **ثابت ریدبرگ** نامیده می‌شود. یک ویژگی اساسی هر گروه از این خط‌ها این است که حدود طول موجی بلند و کوتاهی وجود دارد که به طور افزاینده‌ای به طرف حد طول موجی کوتاه جمع می‌شوند. شکل ۴ همچنین این حدود را برای هر سری به دست می‌دهد، و مثال ۲ آن‌ها را برای سری بالمر معین می‌کند.

