

فصل اول

ساختار اتم



واحد یادگیری ۱

روش تدریس پیشنهادی

همکار گرامی، توصیه می‌شود متن داستان زیر را تکثیر کرده و در اختیار گروه‌ها قرار دهید و از آنها بخواهید با مطالعه آن نظر خود را درباره پیام داستان بیان کنند.

داستان پسرک هوشیار

در زمان‌های قدیم، مردی با الاغ خود، باری را برای فروش به شهری دیگر می‌برد. اما از بد حادثه و پس از عبور از یک مزرعه، الاغ خود را گم کرد. او به دنبال الاغ خود می‌گشت. برای همین از پسری در آن حوالی پرسید: «آیا تو الاغ مرا دیده‌ای؟»

پسر گفت: همان الاغی که چشم چپش کور بود!!

همان الاغی که پای چپش می‌لنگید!!!

همان الاغی که بار گندم داشت!!

آن مرد خوشحال شد و گفت آری خودش است. حال بیا برویم و آن را به من تحویل بده.

پسرک گفت: من آن را ندیده‌ام.

مرد تعجب کرد و گفت: دروغ می‌گویی، تو دزد الاغ من هستی.

مرد دست پسر را گرفت و او را نزد قاضی برد. قاضی بعد از شنیدن ماجرا رو به پسرک کرد و گفت: شواهد نشان می‌دهد که تو الاغ را دیده‌ای و باید آن را تحویل بدهی، مگر این که جواب قانع‌کننده‌ای داشته باشی.

پسرک هوشیار در پاسخ قاضی گفت: آقای قاضی من با چشم‌های خودم الاغ را ندیده‌ام اما با توجه به شواهد زیر نتیجه‌گیری کردم و ویژگی‌های الاغ را پیش‌بینی کردم.

شاهد (۱): در مسیر مزرعه دیدم که کمی از علف‌های سمت راست جاده خورده شده؛ ولی علف‌های سمت چپ جاده دست‌نخورده مانده است.
شاهد (۲): در مسیر مشاهده کردم که اثر پای چپ الاغ عمیق‌تر است.
شاهد (۳): دیدم که در کنار مسیر حرکت الاغ، گندم روی زمین ریخته شده است.

هدف‌های آموزشی

- ۱- انتظار می‌رود دانش آموز در پایان این واحد یادگیری:
 - ۱- با ماهیت علم تجربی آشنا شود.
 - ۲- روش مشاهده مستقیم و غیرمستقیم را بشناسد.
 - ۳- با مدل اتمی دالتون آشنا شود.

ارزشیابی تشخیصی

- ۱- منظور از مشاهده غیرمستقیم چیست؟
- ۲- عنصر چیست؟

شما معلم گرامی پس از شنیدن نظر گروه‌ها، مفهوم مشاهده مستقیم و غیرمستقیم را توضیح دهید و بیان کنید که هر دو به عنوان ابزار شناسایی به کار می‌روند و روش مشاهده غیرمستقیم یک روش بسیار مفید و ارزشمند در علوم تجربی، به‌ویژه برای مطالعه ساختار اتم است. در ادامه از دانش‌آموزان بخواهید صفحه ۲ و ۳ را از روی کتاب در گروه خود روخوانی و درباره جمله‌های زیر بحث و گفت‌وگو کنند.

(۱) تمام مواد در طبیعت به صورت عنصر یافت می‌شوند.

(۲) اتم‌ها کوچک‌ترین ذره‌های سازنده موادند.

(۳) عنصرها ساده‌ترین اجسام اند و نمی‌توان آنها را به مواد ساده‌تر تبدیل کرد.

(۴) در مولکول آب (H_2O) همواره نسبت اتم‌های H به O ثابت و به صورت ۲ به ۱ است.

(۵) اتم اکسیژن با نسبت‌های مختلف با اتم هیدروژن ترکیب می‌شود، برای نمونه

H_2O (آب)، H_2O_2 (آب اکسیژنه).

در ادامه از یکی از گروه‌ها بخواهید تا نظر خود را درباره جمله‌های بالا به کلاس ارائه دهند و گروه‌های دیگر درباره درستی یا نادرستی آن اظهار نظر کنند. سپس موضوع را جمع‌بندی کنید و درباره آزمایش فارادی و الکتریسیته ساکن به روش سخنرانی توضیح کامل ارائه دهید.

بر دانش خود بیفزایید

قبل از دالتون

اتم از واژه یونانی «atomos» به معنی تقسیم‌ناپذیر گرفته شده است. دموکریتوس^۱ (۴۶۰ تا ۳۷۰ ق م) اولین کسی بود که دیدگاهی اتمی از ماده ارائه داد. در نظریه او ماده با تقسیم پی‌درپی در نهایت به ذره‌های تقسیم‌ناپذیری به نام اتم می‌رسد که در بین آنها چیزی به جز فضای خالی وجود ندارد. با این حال، ارسطو^۲ (۳۸۴ تا ۳۲۲ ق م) که به عنصرهای چهارگانه (آب، باد، خاک و آتش) اعتقاد داشت، به طور جدی با این نظریه مخالف بود. او می‌گفت که چیزی به نام «هیچ» (همان فضای خالی نظریه دموکریتوس) وجود ندارد. نظریه اتمی تحت تأثیر این مخالفت ارسطو ۲۰۰۰ سال مسکوت ماند.

در قرن ۱۷ رابرت بویل^۳ دانشمند انگلیسی اظهار داشت که هر عنصر از ذره‌های ساده‌ای تشکیل شده است که همه از یک نوع‌اند. این ذره‌ها باهم ذره‌های مرکب را می‌سازند. همچنین از تجزیه ذره‌های مرکب نیز ذره‌های ساده تولید می‌شوند. در این دیدگاه، ذره‌های ساده نقش همان اتم‌ها را دارند. این نظر، مقدمه مشاهده و کشف‌های شگفت‌انگیزی شد.

۱ – Democritus





۲ – Aristotle

۳ – R. Boyle

بیان بویل از عنصر، در قرن بعد توسط آنتوان لاوازیه اثبات شد. لاوازیه ماده‌ای را عنصر می‌دانست که قابل تجزیه به مواد ساده‌تر نباشد. او همچنین نشان داد که یک ماده مرکب از ترکیب شدن عناصرها تشکیل می‌شود. لاوازیه ۲۳ عنصر را به درستی شناسایی کرد. البته لاوازیه به غلط، نور، گرما و چند ترکیب ساده را نیز در فهرست خود آورده بود. در قرن ۱۸، مطالعات دیگری انجام گرفت که به قوانینی برای سنجش جرم نسبی موادی منجر شد که با هم واکنش می‌دهند. ترکیب‌ها موادی هستند که از دو یا چند عنصر به نسبت‌های ثابت تشکیل شده‌اند. قانون نسبت‌های معین نخستین بار توسط ژوزف پروست در ۱۷۹۹ ارائه شد. این قانون بیان می‌کند که یک ترکیب خالص همیشه شامل عنصرهای معینی با نسبت جرمی ثابت است. به عنوان نمونه، آب همیشه از عنصرهای هیدروژن و اکسیژن با نسبت ۱۱/۱۹ درصد جرمی هیدروژن و ۸۸/۸۱ درصد جرمی اکسیژن تشکیل می‌شود. سپس در اوایل قرن ۱۹ جان دالتون (۱۸۴۴-۱۷۶۶) مدل اتمی‌ای ارائه داد که با توضیح این قوانین، مقدمه پیشرفت سریع علم شیمی شد. البته مشاهدات بعدی قرن ۱۹، لزوم اصلاح مدل اتمی دالتون را مطرح کرد. پس از مشاهدات دقیق‌تری که در اوایل قرن بیستم اتفاق افتاد، مدلی مطرح شد که امروزه برای اتم‌ها پذیرفته شده است.

نظریه اتمی دالتون^۱

در اوایل دهه ۱۸۰۰، قانون پایستگی جرم و قانون نسبت‌های ثابت به صورت توصیف‌هایی کلی از رفتار مواد پذیرفته شد. جان دالتون که معلم دبیرستان بود، تلاش کرد توجیهی برای این قوانین بیابد. در سال ۱۸۰۸ مطالعات دالتون به مدلی منجر شد که امروزه به نام نظریه اتمی دالتون شناخته شده است. اصول موضوعه نظریه اتمی دالتون را می‌توان به صورت زیر خلاصه کرد (شکل ۱).

 <p>یک عنصر از اتم‌های یکسان تشکیل شده است.</p>	 <p>اتم‌ها تجزیه نشده، از بین نمی‌روند و پدید نمی‌آیند.</p>
 <p>همه اتم‌های یک عنصر جرم یکسانی داشته و اتم‌های دو عنصر متفاوت، جرم متفاوتی دارند.</p>	 <p>اتم‌های عناصرها ممکن است در نسبت‌های کوچک و صحیح با یکدیگر ترکیب شوند.</p>

شکل ۱. نظریه اتمی دالتون

دالتون جنبه‌های کمی نظریه خود را از دو قانون مربوط به تغییر شیمیایی پیش از واکنش به دست آورد. این دو قانون به صورت زیر بیان می‌شوند.

۱- قانون پایستگی جرم: در یک واکنش شیمیایی تغییر قابل اندازه‌گیری‌ای در

جرم به وجود نمی‌آید. به عبارتی دیگر جرم کل مواد در یک واکنش شیمیایی پیش از واکنش با جرم کل مواد پس از واکنش برابر است و یا جرم مواد برای یک واکنش شیمیایی که در ظرف بسته‌ای انجام می‌شود، ثابت است. زیرا در این فرایندها اتم‌ها نه به وجود می‌آیند، نه از بین می‌روند و جرم همه اتم‌های وارد شده در یک واکنش شیمیایی صرف نظر از شیوه گروه‌بندی آنها، ثابت است.

۲- قانون نسبت‌های معین: یک ترکیب خالص همیشه شامل عنصرهای یکسان با

نسبت جرمی یکسان است. از آن جا که یک ماده معین نتیجه ترکیب دو یا چند عنصر با نسبت‌های ثابت است، نسبت جرمی عنصرهای موجود در آن ماده ثابت است.

براساس این نظریه، دالتون توانست قانون سوم ترکیب شیمیایی یعنی قانون نسبت‌های چندگانه^۱ را بیان کند. به عنوان نمونه، کربن و اکسیژن دو ترکیب شیمیایی کربن دی‌اکسید و کربن مونواکسید را تشکیل می‌دهند.

با استفاده از درصد جرمی اکسیژن و کربن در CO و CO_۲ جرم هر کدام از این عنصرها در ۱۰۰ گرم CO و CO_۲ به دست می‌آید.

جرم عنصرهای سازنده	کربن مونواکسید	کربن دی‌اکسید
گرم اکسیژن در ۱۰۰ گرم ترکیب	۵۷/۱	۷۲/۷
گرم کربن در ۱۰۰ گرم ترکیب	۴۲/۹	۲۷/۳
نسبت جرمی اکسیژن به کربن	$\frac{۵۷/۱}{۴۲/۹} = ۱/۳۳$	$\frac{۷۲/۷}{۲۷/۳} = ۲/۶۶$

در صورتی که ۲/۶۶ را بر ۱/۳۳ تقسیم کنیم خواهیم داشت:

$$\frac{\frac{۲/۶۶}{\text{گرم کربن}}}{\frac{۱/۳۳}{\text{گرم کربن}}} = \frac{۲}{۱}$$

گرم اکسیژن در کربن دی‌اکسید

گرم اکسیژن در کربن مونواکسید



این روند نشان می‌دهد که کسر جرمی یک عنصر نسبت به عنصر دیگر براساس نسبت‌هایی از این اعداد تغییر می‌کند. برای مثال بالا این نسبت ۲ به ۱ است، یعنی مقدار اکسیژن در CO_2 همواره ۲ برابر مقدار اکسیژن در CO است (شکل ۲). بررسی تجربی قانون نسبت‌های چندگانه، تأییدکننده نظریه دالتون بود.

شکل ۲. قانون نسبت‌های چندگانه برای کربن مونواکسید و کربن دی اکسید

باید توجه داشت، گرچه CO و CO_2 از اکسیژن و کربن تشکیل شده‌اند اما خواص متفاوتی دارند. به عنوان مثال، در شرایط فیزیکی یکسان، چگالی کربن مونواکسید $1/25 \text{ g/L}$ و کربن دی اکسید $1/98 \text{ g/L}$ است. کربن مونواکسید، سمی و قابل اشتعال است اما کربن دی اکسید چنین نیست.

ذره‌های زیر اتمی

براساس نظریه اتمی دالتون، یک اتم واحد اصلی سازنده یک عنصر تعریف شده که می‌تواند در ترکیب شیمیایی وارد شود. دالتون اتم را بسیار کوچک و تجزیه‌ناپذیر فرض کرد. با این حال، مجموعه مطالعاتی که در دهه ۱۸۵۰ آغاز شد و تا قرن بیستم ادامه یافت، به روشنی نشان داد که اتم‌ها خود در واقع دارای ساختار درونی هستند، به این معنی که از ذره‌های بنیادی کوچک‌تری به نام ذره‌های زیر اتمی تشکیل شده‌اند. این پژوهش‌ها به کشف سه ذره بنیادی به نام الکترون، پروتون و نوترون منجر شد.

واحد یادگیری ۲

بر دانش خود بیفزایید

کشف الکترون‌ها

در اوایل دهه ۱۸۰۰، هامفری دیوی (۱۷۷۸-۱۸۲۹) شیمی‌دان انگلیسی، درباره ساختار اتم شواهدی فراهم آورده بود. او مشاهده کرد هنگام عبور جریان الکتریکی از برخی مواد، این مواد تجزیه می‌شوند. دیوی پنج عنصر (سدیم، پتاسیم، کلسیم، استرانسیم و باریم) را با استفاده از عبور جریان الکتریسیته، هنگام تجزیه مواد کشف کرد. در نتیجه، او به این فرضیه رسید که عنصرهای سازنده یک ترکیب شیمیایی با نیروهای الکتریکی در کنار یکدیگر نگه داشته شده‌اند. در سال‌های ۱۸۳۲ تا ۱۸۳۳، مایکل فارادی^۱ (۱۷۹۱-۱۸۶۷) که دانشجوی دیوی^۲ بود، رابطه‌ای کمی بین مقدار الکتریسیته مورد استفاده در برقکافت و میزان پیشرفت واکنش شیمیایی برقرار کرد. جورج استونی^۳ (۱۸۲۶-۱۹۱۱) با پیگیری بررسی‌های فارادی، در سال ۱۸۷۴ به این نتیجه رسید که واحدهای بار الکتریکی با اتم‌ها مرتبط‌اند. در سال ۱۸۹۱، او نام **الکترون** را برای این واحدها پیشنهاد کرد.

محکم‌ترین شواهد برای وجود الکترون از آزمایش‌های لوله پرتو کاتدی (شکل ۳) به دست آمده است. در این آزمایش، دو الکتروود در لوله شیشه‌ای بسته‌ای قرار دارد و از گازی با فشار بسیار پایین پر شده است. با اعمال یک ولتاژ قوی، جریان برقرار و پرتوهایی از کاتد (الکتروود منفی) خارج می‌شود. این پرتوها روی خطوطی مستقیم حرکت می‌کنند و لکه‌ای روشن بر دیواره روبه‌روی کاتد ایجاد می‌کنند. اگر جسمی در مسیر پرتو کاتدی قرار داده شود، بر صفحه‌ی روی سولفید قرار داده شده در نزدیکی آند سایه می‌اندازد. این سایه نشان می‌دهد که پرتوها از کاتد نشر می‌شوند. افزون بر آن، این پرتوها در حضور میدان‌های الکتریکی و مغناطیسی در جهت مورد انتظار برای ذره‌ها با بار منفی، منحرف می‌شوند. همچنین پرتوهای کاتدی جرم دارند؛ زیرا می‌توانند چرخ پره‌دار کوچکی را که در مسیر آنها قرار داده شده، بچرخانند. به شکل‌های ۳(آ) تا ۳(ت) توجه کنید.

۱ - M. Faraday

۲ - H. Davy

۳ - George Stoney

عامل شارش بار الکتریکی، پتانسیل الکتریکی نام دارد. بنابراین، اختلاف پتانسیل الکتریکی عاملی برای جابه‌جایی الکترون‌ها از نقطه‌ای به نقطه‌ی دیگر است. اگر مسیر شارش بار میان دو نقطه فراهم شود، مانند وجود داشتن فلزها، گرافیت، محلول‌های یونی و یا گازهای رقیق، شارش رخ خواهد داد.

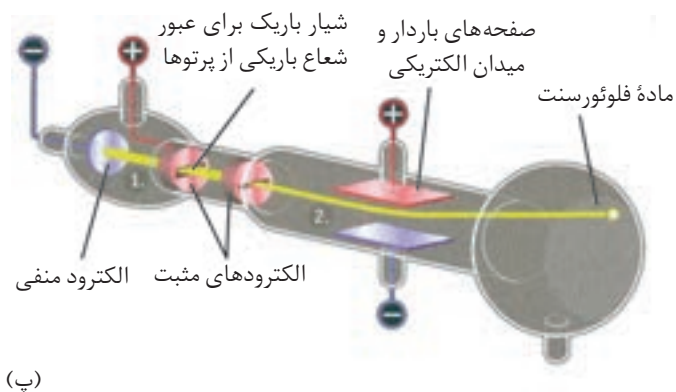
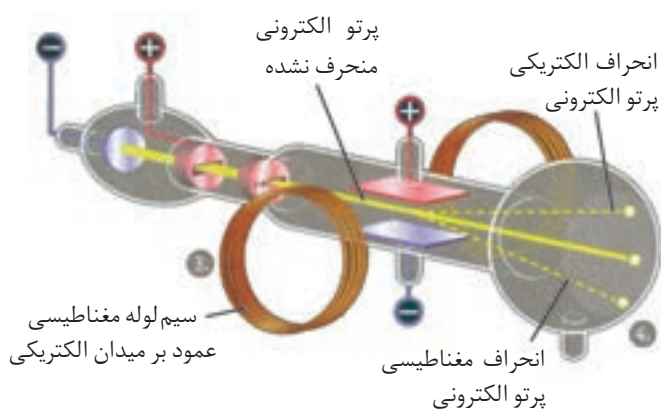
درخشندگی گاز درون لوله‌ی پرتو کاتدی به فشار آن بستگی دارد. باید توجه داشت که در فشارهای پایین رنگ درخشش لوله‌ی پرتو کاتدی به نوع گاز وابسته است (این درخشندگی به دلیل برانگیختگی ذره‌های گاز و نشر فوتون، هنگام برگشت به حالت پایه است).



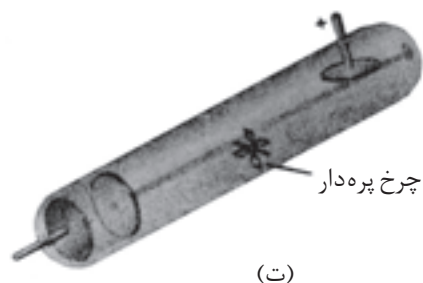
(آ)



(ب) اثر میدان مغناطیسی روی پرتو کاتدی

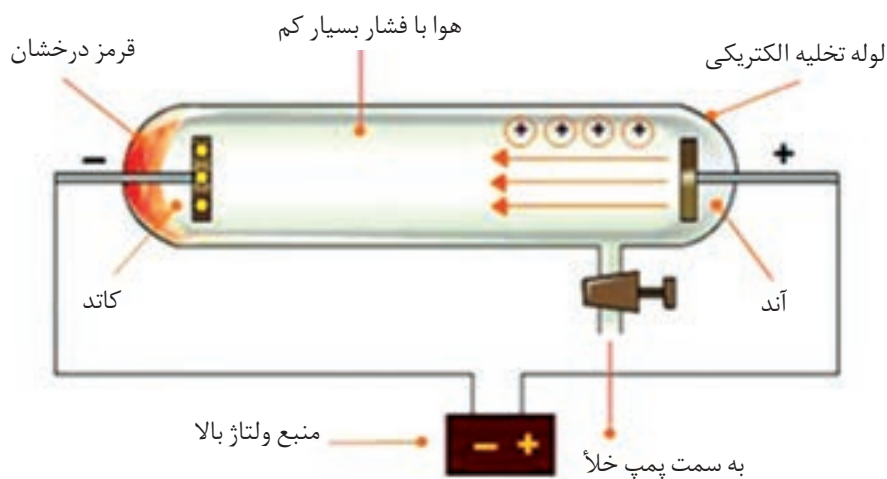


(پ)



شکل ۳. برخی از آزمایش‌های مربوط به لوله پرتو کاتدی که ماهیت پرتوهای کاتدی را نشان می‌دهد.

در آزمایش‌های دقیق انجام شده با استفاده از کاتدهای روزنه دار نوع جدیدی از پرتوها، معروف به پرتوهای آندی (کانالی) نیز شناخته شد. این پرتوها از آند به سوی کاتد حرکت کرده و از میان روزنه‌های موجود در سطح کاتد عبور می‌کردند. پرتوهای آندی بار مثبت دارند و بنابراین به پرتوهای مثبت نیز معروف‌اند. این پرتوها ذره‌هایی با بار مثبت را حمل می‌کنند و نسبت e/m آنها از گازی به گاز دیگر متغیر است؛ در حالی که ذره‌های تشکیل دهنده پرتوهای کاتدی نسبت e/m ثابت دارند. در واقع این ذره‌های مثبت تشکیل دهنده پرتوهای آندی، چیزی جز اتم‌های گاز نیستند که پس از جدا شدن یک یا چند الکترون، برجای مانده‌اند. این پرتوها نخستین بار در آزمایش‌های انجام شده توسط دانشمند آلمانی، اوژن گلدشتاین در ۱۸۸۶ مشاهده شد. بررسی‌های بعدی ویلهلم وین و جی. جی. تامسون^۱ بر روی پرتوهای آندی به پیدایش طیف‌سنجی جرمی منجر شد. گلدشتاین^۲ در آزمایش‌های خود از یک کاتد



شکل ۴. تولید پرتوهای آندی. در لوله پرتو کاتدی گاز نئون، رنگ قرمز، بخار سدیم رنگ زرد و بخار جیوه رنگ آبی مایل به سبز دارد.

۱- J.J. Thomson

۲- Goldstein

روزنه دار در یک لوله تخلیه الکتریکی استفاده کرد که فشار هوای درون آن بسیار کم و تنها در حدود 10^{-10} میلی متر جیوه بود. هنگام اعمال ولتاژ قوی در حدود 10^5 ولت به درون لوله تخلیه الکتریکی، پرتو نوری ضعیفی در پشت کاتد روزنه دار مشاهده شد. این پرتوها هنگام برخورد با دیواره های لوله تخلیه، در پشت کاتد، نوری همانند شکل ۴ تولید می کردند.

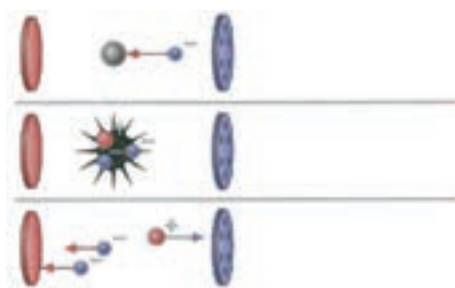
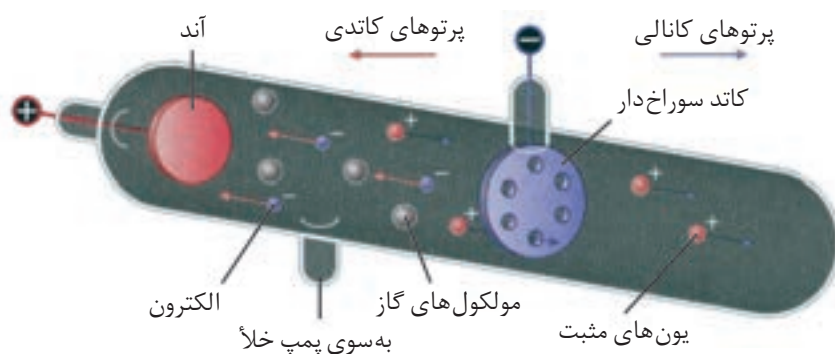
هیدروژن سبک ترین عنصر است و کوچک ترین ذره های مثبت را تولید می کند که به پروتون مشهورند. بار حمل شده به وسیله یک پروتون یا یک الکترون منفرد، کوچک ترین باری است که هر ذره ای حمل می کند. به همین دلیل بار یک پروتون، بار مثبت واحد و بار یک الکترون، بار منفی واحد نامیده می شود. پرتو آندی دارای ویژگی های زیر است (شکل ۵):

آ) حرکت در مسیر مستقیم و تولید سایه برای اجسامی که در مسیر آنها قرار دارد.

ب) تولید اثر مکانیکی؛ به صورت چرخاندن چرخ پره دار موجود در مسیر آنها

پ) بار مثبت؛ انحراف به سمت صفحه منفی میدان الکتریکی اعمال شده در مسیر آنها

ت) وابستگی ماهیت پرتوها به گاز مورد استفاده در لوله تخلیه الکتریکی؛ گازهای مختلف انواع مختلفی از پرتوهای کانالی تولید می کنند که محتوی ذره هایی با جرم ها و بارهای مختلف اند. بنابراین، نسبت e/m برای ذره های پرتو مثبت حاصل از گازهای مختلف ثابت نیست.



شکل ۵. خواص پرتو آندی یا کانالی

آزمایش تامسون

در سال ۱۸۹۷، جوزف جان تامسون (۱۹۴۰-۱۸۵۶) این ذره‌های با بار منفی را با دقت بیشتری بررسی کرد. او برای این ذره‌ها از نام الکترون (که پیش‌تر استونی پیشنهاد کرده بود) استفاده کرد. تامسون با مطالعهٔ میزان انحراف پرتوهای کاتدی در میدان‌های الکتریکی و مغناطیسی مختلف، نسبت بار الکترون (e) به جرم آن (m) را به‌دست آورد.

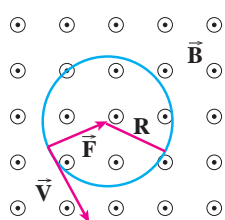
الکترون یک واژهٔ یونانی هم‌ارز با کهرباست.

با استفاده از یک جفت سیم‌پیچ هلمهولتز^۱، می‌توان یک میدان مغناطیسی عمود بر محور لوله اعمال کرد. هر سیم‌پیچ از N دور سیم مسی تشکیل شده که با استفاده از منبع تغذیه‌ای با ولتاژ پایین، جریان I از آنها عبور داده می‌شود. هنگامی که سیم‌پیچ‌ها به درستی متصل و در محل مناسبی قرار داده شوند، القای مغناطیسی B در مرکز لوله برابر است با:

$$B = \frac{\mu_0 NI}{a} \quad (۱)$$

که در آن a، شعاع سیم‌پیچ و μ_0 ، ثابت نفوذپذیری مغناطیسی است و مقدار آن

در SI برابر با $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{ Tm/A}$ است. نیروی F وارد بر الکترون در این میدان، نیروی لورنتس^۲ نام دارد که بر بردار سرعت الکترون و میدان مغناطیسی، عمود و اندازهٔ آن عبارت است از (شکل ۶):



T، نماد یکای میدان مغناطیسی به نام تسلا است.

شکل ۶. مسیر الکترون در یک

میدان مغناطیسی عمودی

$$F = Bev \quad (۲)$$

e مقدار بار الکترون و v سرعت آن است. هنگامی که میدان مغناطیسی اعمال می‌شود، الکترون در مسیری دایره‌ای قرار می‌گیرد. روشن است، ذره‌ای که در مداری دایره‌ای حرکت می‌کند، شتابی به بزرگی v^2/R و در جهت مرکز دایره دارد. بنابراین، نیروی عمل‌کننده بر الکترونی با جرم m در مداری به شعاع R برابر است با:

$$F = \frac{mv^2}{R} \quad (۳)$$

با استفاده از قانون دوم نیوتن^۳ (تساوی معادله‌های ۲ و ۳) می‌توان نتیجه گرفت که

^۱ - Helmholtz

^۲ - Lorentz force

^۳ - I. Newton

نسبت بار به جرم (e/m) برای الکترون برابر است با:

$$\frac{e}{m} = \frac{v}{BR} \quad (4)$$

با استفاده از قانون پایستگی انرژی می‌توان سرعت الکترون‌ها را در پرتو کاتدی محاسبه کرد. ولتاژی بالای V که به آند لوله پرتو کاتدی وارد می‌شود، به صورت زیر با سرعت آن ارتباط دارد:

$$eV = \frac{1}{2}mv^2 \quad (5)$$

بنابراین

$$v = \sqrt{\frac{2eV}{m}} \quad (6)$$

در نهایت، با قرار دادن معادله (۶) در رابطه (۴) به دست می‌آوریم:

$$\frac{e}{m} = \frac{2V}{B^2 R^2} \quad (7)$$

همه کمیت‌های سمت راست این معادله را می‌توان اندازه‌گیری کرد.

مقداری که اکنون برای این نسبت پذیرفته شده، عبارت است از:

$$e/m = 1.75882 \times 10^{11} \text{ C/kg}$$

این مقدار مستقل از نوع گاز درون لوله، جنس الکترودها و ماهیت منبع تغذیه الکتریکی است. مفهوم روشنی که از مطالعه آزمایش تامسون استنباط می‌شود آن است که الکترون‌ها ذره‌هایی بنیادی‌اند که در همه اتم‌ها وجود دارند. امروزه می‌دانیم که این نتیجه‌گیری درست است و همه اتم‌ها، تعداد صحیحی الکترون دارند.

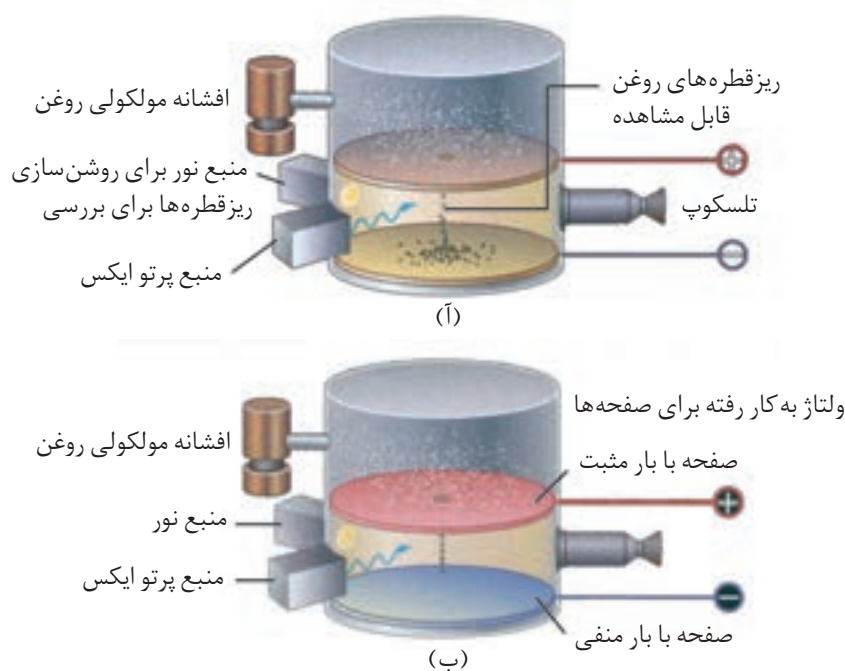
آزمایش میلیکان

با مشخص شدن نسبت بار به جرم الکترون، به آزمایش دیگری برای تعیین یکی از دو کمیت بار یا جرم الکترون نیاز است تا کمیت دیگر نیز با استفاده از نسبت آن دو به دست آید. در سال ۱۹۰۹، رابرت اندروز میلیکان^۱ (۱۸۶۸-۱۹۵۳) این مشکل را با آزمایش معروف قطره روغن حل کرد.

میلیکان با استفاده از دستگاهی که در شکل ۷ نشان داده شده است، بار الکترون را تعیین کرد. این دستگاه دو صفحه فلزی موازی دارد که مانند صفحه‌های یک خازن عمل می‌کنند. قطره‌های کروی بسیار کوچک روغن با یک افشانه تولید می‌شوند. تعداد

^۱ - R. Millikan

کمی از قطره‌ها از منفذی که در صفحه بالایی قرار دارد، پایین می‌افتند. در بین دو صفحه یک باریکه افقی پرتو X و میکروسکوپی برای مشاهده قطره‌ها قرار دارد. قطره‌های روغن درون این میکروسکوپ به صورت ستاره‌های کوچک دیده می‌شوند. با استفاده از این میکروسکوپ می‌توان موقعیت عمودی قطره را به دقت اندازه‌گیری و سرعت آن را تعیین کرد. برخی از قطره‌های روغن، الکترون‌هایی را که در اثر برخورد پرتوهای ایکس به مولکول‌های هوا آزاد شده‌اند، جذب می‌کنند و دارای بار منفی می‌شوند. هنگامی که ولتاژی بین صفحه‌ها برقرار نباشد، قطره‌ها در اثر نیروی جاذبه به سمت پایین حرکت می‌کنند. با اعمال ولتاژ به صفحه‌ها، قطره روغن در اثر نیروی جاذبه صفحه (مثبت) بالایی به سمت بالا حرکت می‌کند. با اندازه‌گیری سرعت حرکت قطره به سمت پایین یا بالا، می‌توان بار آن را به دست آورد.



شکل ۷. آزمایش قطره روغن میلیکان. (آ) در غیاب میدان الکتریکی، (ب) در حضور میدان الکتریکی

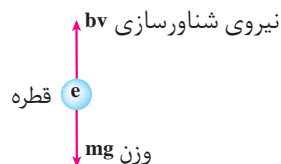
با بررسی نیروهای عمل کننده بر قطره روغن می‌توان آزمایش میلیکان را به صورت کمی بررسی کرد. در نبود میدان الکتریکی، نیروی جاذبه mg به سمت پایین و نیروی اصطکاک bv به سمت بالا به قطره وارد می‌شود. معادله حرکت قطره عبارت است از:

$$mg - bv = m \frac{dv}{dt} \quad (۸)$$

b از قانون استوکس به دست می‌آید:

$$b = 6\pi\eta a \quad (۹)$$

که در آن η گرانی هوا و a شعاع قطره است. سرعت حدی (مربوط به موازنه شدن نیروها یا حرکت بدون شتاب) برای سقوط قطره برابر است با: (شکل ۸ را ببینید)



شکل ۸. یک قطره روغن با بار e که با سرعت حدی در حال سقوط است ($mg=bv$).

$$v_f = \frac{mg}{b} \quad (10)$$

هنگامی که میدان الکتریکی E اعمال می‌شود، حرکت روبه‌بالای بار q_n از معادله زیر پیروی می‌کند:

$$q_n E - mg - bv = m \frac{dv}{dt} \quad (11)$$

بنابراین، سرعت حدی صعود قطره در حضور میدان الکتریکی برابر است با:

$$v_r = \frac{q_n E - mg}{b} \quad (12)$$

با این شرایط قطره‌ها خیلی سریع به سرعت حدی می‌رسند که در این حالت قطره روغن، فاصله L را با سرعت ثابتی به سمت بالا یا پایین طی می‌کند. با ترکیب معادلات (۱۰) و (۱۲) خواهیم داشت:

$$q_n = \frac{mg}{Ev_f} (v_f + v_r) = \frac{mgT_f}{E} \left[\frac{1}{T_f} + \frac{1}{T_r} \right] \quad (13)$$

که $T_f = L/v_f$ زمان سقوط و $T_r = L/v_r$ زمان صعود است.

جرم قطره کروی را می‌توان از حجم آن [(که با محاسبه شعاع قطره با استفاده از معادلات (۹) و (۱۰) به دست می‌آید)] و چگالی روغن محاسبه کرد. مزیت استفاده از روغن بر مایع‌های دیگر آن است که قطره روغن تبخیر نمی‌شود و بنابراین جرم آن تغییر نمی‌کند.

میلیکان این آزمایش را برای هزاران قطره با بارهای مختلف انجام داد. برخی از بارهای الکتریکی به دست آمده برای قطره‌ها عبارت‌اند از: $4/8 \times 10^{-19} \text{C}$ ، $8/1 \times 10^{-19} \text{C}$ ، $10/214 \times 10^{-19} \text{C}$ و ... تمام این بارها مضرب صحیحی از یک عدد ثابت بودند که او این عدد را بار یک الکترون در نظر گرفت. این مقدار ثابت برابر با $1/6 \times 10^{-19} \text{C}$ است. اینک با

استفاده از نسبت بار به جرم، مقدار زیر برای جرم یک الکترون به دست می آید:

$$m = \frac{1 \text{ g}}{1/75882 \times 10^8 \text{ C}} \times 1/60218 \times 10^{-19} \text{ C} = 9/10940 \times 10^{-28} \text{ g}$$

این مقدار ۱۸۳۶ بار کوچک تر از جرم اتم هیدروژن (سبک ترین اتم) است. میلیکان اولین فردی بود که این حقیقت شناخته شده را اثبات کرد: «همه اتم ها تعداد صحیحی الکترون دارند». مقادیر به دست آمده برای e/m توسط تامسون همچنین e و m توسط میلیکان اندکی با مقادیر داده شده در بالا تفاوت دارد؛ زیرا با ابزارهای موجود در آن زمان امکان اندازه گیری دقیق فراهم نبوده است.



واحد یادگیری ۳

روش تدریس پیشنهادی: پرسش و پاسخ

مدل اتمی تامسون، درست یا نادرست؟!؟

شما همکار گرامی با توجه به مطالب جلسه قبل، مدل اتمی تامسون را روی تابلو رسم کنید و توضیح دهید که دانشمندی به نام رادرفورد برای بررسی درستی مدل اتمی تامسون ورقه‌ای از طلا به ضخامت نازک‌ترین لایه پیاپی تهیه کرد و آن را در مقابل تابش α قرار داد. فکر می‌کنید رادرفورد چه انتظاری از این آزمایش داشت؟

پیش‌بینی شما درباره هریک از موارد زیر چیست؟

۱- آیا همه پرتوها از این ورقه نازک عبور می‌کنند؟

۲- آیا امکان دارد پرتوهای α از ورقه عبور نکنند یا منحرف شوند؟

به دانش‌آموزان فرصت کافی بدهید تا درباره پرسش‌ها، بحث و گفت‌وگو کنند. پاسخ‌های آنان را بشنوید اما درباره آنها قضاوتی نکنید.

اکنون از دانش‌آموزان بخواهید به شکل ۲ صفحه ۹ کتاب درسی دقت کنند و توضیح دهید که رادرفورد یک حلقه را با ماده فلئورسنت پوشش داد و آن را اطراف ورقه طلا قرار داد. پس از تاباندن پرتو α به ورقه طلا بر روی ماده فلئورسنت نقاطی نورانی مشاهده کرد. می‌دانید که در اثر برخورد پرتو α با ماده فلئورسنت نور تولید می‌شود.

۱- تشکیل این نقاط نورانی به چه معناست؟

۲- آیا اندازه نقاط نورانی برابر است؟

۳- چرا اندازه این نقاط نورانی باهم تفاوت دارد؟

۴- از اینکه بیشتر پرتوها بدون انحراف عبور کرده‌اند، چه نتیجه‌ای می‌گیرید؟

۵- با توجه به این آزمایش، پاسخ‌های مرحله قبل خود را مرور کنید و هر جا لازم است

پاسخ‌های خود را اصلاح نمایید. به دانش‌آموزان فرصت کافی بدهید و سپس پاسخ‌های آنها را بشنوید. اما درباره درستی یا نادرستی آنها قضاوت نکنید.

اکنون از دانش‌آموزان بخواهید تا برای آزمایشی که انجام می‌دهید، یک مدل اتمی

پیشنهاد دهند.

هدف‌های آموزشی

انتظار می‌رود دانش‌آموز در پایان این واحد یادگیری:

۱- با آزمایش رادرفورد آشنا شود.

۲- به درستی یا نادرستی مدل اتمی تامسون پی‌ببرد.

۳- با مدل اتم هسته‌دار آشنا شود.

۴- مهارت مقایسه مشاهده‌ها را در خود تقویت کند.

۵- به ماهیت تکامل‌پذیری علم تجربی و نظریه‌های علمی پی‌ببرد.

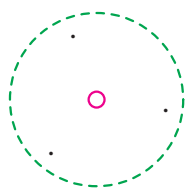
۶- مهارت مدل‌سازی را در خود تقویت کند.

ارزشیابی تشخیصی

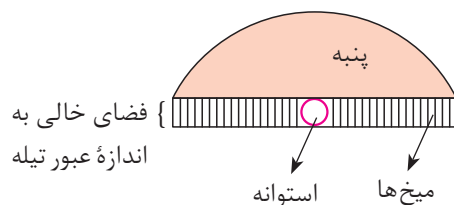
۱- اگر یک توپ در حال حرکت به یک جسم سنگین و ساکن برخورد کند، چه اتفاقی می‌افتد؟

۲- اگر یک توپ در حال حرکت به یک جسم سبک‌تر برخورد کند، مسیر حرکت توپ چه تغییری می‌کند؟

۳- هرگاه قطب N یک آهن‌ربا را از کنار قطب N یک آهن‌ربای قوی دیگر با سرعت عبور دهید، چه اتفاقی می‌افتد؟



شکل ۹



شکل ۱۰

شرح آزمایش: روی یک مقوا، استوانه‌ای کوچک

بچسبانید. سطح مقطع این استوانه را مرکز یک دایره قرار دهید و با شعاع مشخصی اطراف آن یک دایره بزرگ رسم کنید. روی این دایره بزرگ ۳ عدد میخ بزنید و یک تکه مقوای دایره‌ای شکل را روی این میخ‌ها بچسبانید.

روی این مقوا را با پنبه بپوشانید و اطراف آن را نیز با پنبه پوشش دهید؛ به طوری که خالی بودن زیر مقوا قابل رؤیت نباشد و دانش‌آموزان گمان کنند که یک نیم‌کره پنبه‌ای را می‌بینند. اکنون تعدادی از تپله‌ها را رها کنید تا از زیر پنبه‌ها عبور کنند.

چرا تپله‌ها عبور کردند؟!

این کار را چندبار تکرار کنید تا چند تپله به استوانه وسط برخورد کنند و منحرف

شوند یا بازگردند. سپس دلیل این امر را جویا شوید.

حتماً دانش‌آموزان از عبور تپله‌ها تعجب می‌کنند و هنگامی که تپله‌ها منحرف شده

یا برمی‌گردند دنبال پاسخی برای این پدیده خواهند بود.

به دانش‌آموزان فرصت کافی دهید تا درباره آنچه دیده‌اند، بحث کنند و خود را در

شرایط رادرفورد ببینند و مدل اتمی ارائه دهند. پاسخ‌ها را بشنوید و آنها را راهنمایی کنید

که وقتی مدل اتمی خود را ارائه می‌دهند، توانایی توجیه هرآنچه را مشاهده کرده‌اند،

داشته باشند. در پایان معلم مدل‌ها را بررسی و مطالب را جمع‌بندی می‌کند.

ارزشیابی پایانی: از دانش‌آموزان بخواهید تا «فکر کنید» صفحه ۹ را پاسخ دهند.

بر دانش خود بیفزایید

پرتوزایی

در سال ۱۸۹۵، ویلهلم کُنراد رونتگن (۱۸۴۵-۱۹۲۳)، فیزیک‌دان آلمانی، دریافت

که شیشه و فلزها در اثر برخورد پرتوهای کاتدی، تابش‌های غیرعادی نشر می‌کنند. این

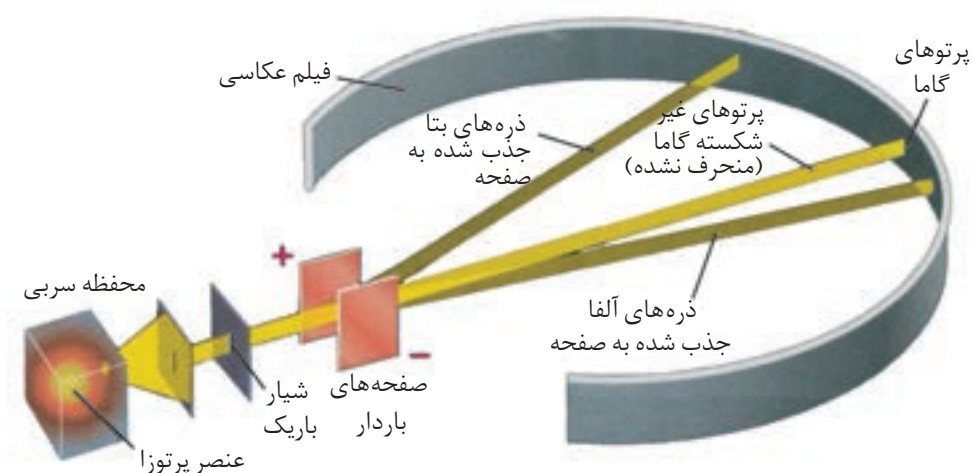
تابش‌های پرتوزایی قادر به نفوذ در مواد و سیاه کردن صفحه عکاسی پوشش‌دار بودند و در

بسیاری از مواد باعث ایجاد فلورئوسانس می‌شدند. از آن‌جا که این پرتوها در میدان‌های

مغناطیسی منحرف نمی‌شدند، نتیجه گرفته شد که برخلاف پرتوهای کاتدی باردار

نیستند. رونتگن نام این پرتوها را پرتو ایکس (X) نهاد؛ زیرا ماهیت آنها روشن نبود.

به فاصله کمی پس از کشف رونتگن^۱، آنتوان هنری بکرل^۲ (۱۸۵۲-۱۹۰۸)، فیزیک‌دان فرانسوی، که مطالعه خواص فلئوئورسانس مواد را آغاز کرده بود، به صورت کاملاً تصادفی دریافت که با قرار دادن صفحه عکاسی با پوشش ضخیم در معرض ترکیب‌های معینی از اورانیم، این صفحه کدر می‌شود. برخی از پرتوهای حاصل از ترکیب‌های اورانیم مانند پرتوهای ایکس، پرنرژی بوده و در میدان‌های مغناطیسی منحرف نمی‌شدند، اما برخلاف پرتوهای ایکس، به صورت خودبه‌خود و بدون نیاز به تحریک به وسیله پرتوهای کاندی، نشر می‌شدند. ماری کوری^۳ (۱۸۶۷-۱۹۳۴) برای توضیح این نشر خودبه‌خود ذره‌ها و انرژی، از واژه پرتوزایی (رادیواکتیویته) استفاده کرد. از آن زمان، هر عنصری که قادر به نشر خود به خودی تابش باشد، پرتوزا نامیده می‌شود.



شکل ۱۱. سه نوع پرتو نشر شده از عناصر پرتوزا

در اثر تلاشی برخی مواد پرتوزا، سه نوع پرتو تولید می‌شود که دو نوع از آنها، به‌سوی صفحه‌های فلزی که بار مخالف دارند، منحرف می‌شوند (شکل ۱۱). پرتوهای آلفا (α) از ذره‌هایی با بار مثبت، تشکیل شده‌اند و بنابراین با صفحه‌هایی با بار مثبت منحرف می‌شوند. پرتوهای بتا (β) همان الکترون‌ها هستند و با صفحه‌هایی با بار منفی منحرف می‌شوند. نوع سوم تابش پرتوزا از پرتوهای پرنرژی به نام پرتوهای گاما (γ) تشکیل شده است که مانند پرتوهای X بدون بارند و در حضور میدان‌های خارجی منحرف نمی‌شوند. خواص این پرتوها در جدول ۱ آمده است.

۱- Roentgen

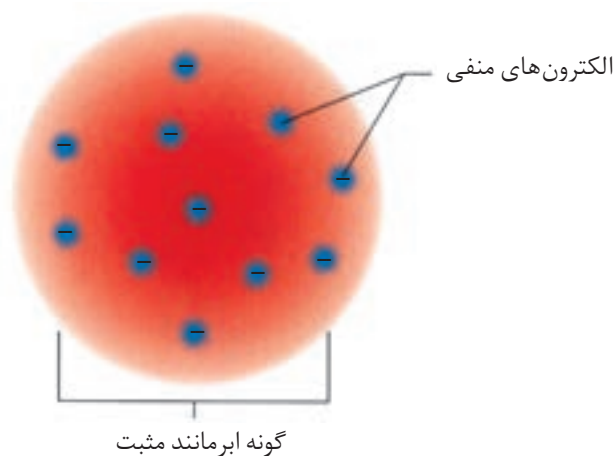
۲- H. Becquerel

۳ - M. Curie

جدول ۱. خواص پرتوهای نشر شده از عنصرهای پرتوزا

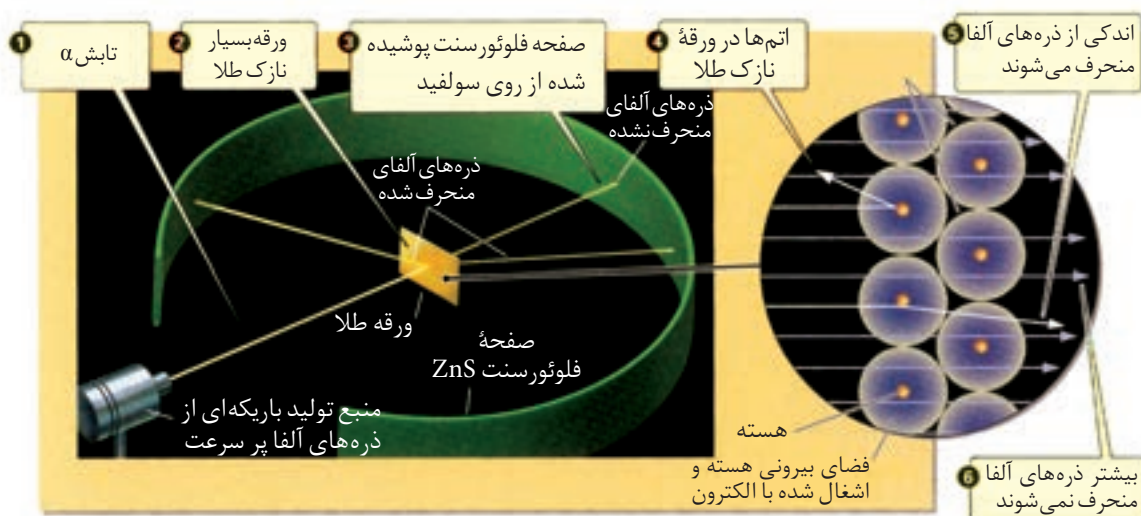
نوع تابش نشر شده و علامت	ماهیت تابش	نماد هسته‌ای پرتو	قدرت نفوذ و آنچه مانع نفوذ آن می‌شود. (هرچه چگالی ماده بیشتر باشد، تابش بیشتر یا بار کمتری جذب شده و قدرت نفوذ بیشتر می‌شود)	قدرت یونندگی (قابلیت جدا کردن الکترون‌ها از اتم‌ها برای تشکیل یون‌های مثبت)
α آلفا	یک هسته هلیوم با ۲ پروتون و ۲ نوترون جرم ۴، بار ۲+	${}^4_2\text{He}^{2+}$	نفوذ کم، بیشترین جرم و بار، با چند سانتی‌متر هوا یا تکه کاغذی نازک متوقف می‌شود.	قدرت یونندگی بسیار بالا، بیشترین جرم و بار در میان سه تابش
β بتا	الکترون‌هایی با انرژی جنبشی بالا، جرم $\frac{1}{1837}$ ، بار ۱-	${}^0_{-1}e$	نفوذ متوسط، جرم ناچیز ولی بار الکتریکی دارند، با چند mm از فلزهایی مانند آلومینیم بیشتر آن متوقف می‌شود.	قدرت یونندگی متوسط، با جرم و بار کمتر از ذره آلفا
γ گاما	تابش الکترومغناطیسی با فرکانس بسیار زیاد، جرم ۰، بار ۰ =	γ	نفوذ بسیار بالا، جرم و باری نداشته، با لایه ضخیمی از فولاد یا بتن بیشتر آن متوقف می‌شود، حتی چند cm از سرب با چگالی بالا تمام آن را متوقف نمی‌کند.	کمترین قدرت یونندگی در میان سه تابش، تابش گاما هیچ بار الکتریکی حمل نمی‌کند و تقریباً هیچ جرمی ندارد.

تامسون در لوله پرتو کاتدی جریانی از الکترون‌ها را بررسی کرد؛ درحالی که در تابش مواد پرتوزا افزون بر جریانی از الکترون‌ها (پرتو β)، جریانی از یون‌های مثبت (پرتو α) به همراه تابش پرنرژی گاما نیز تشکیل می‌شود. به همین دلیل رادرفورد^۱ به درستی مدل تامسون تردید داشت.



شکل ۱۲. مدل کیک کشمش‌ی تامسون برای اتم

۱- E. Rutherford

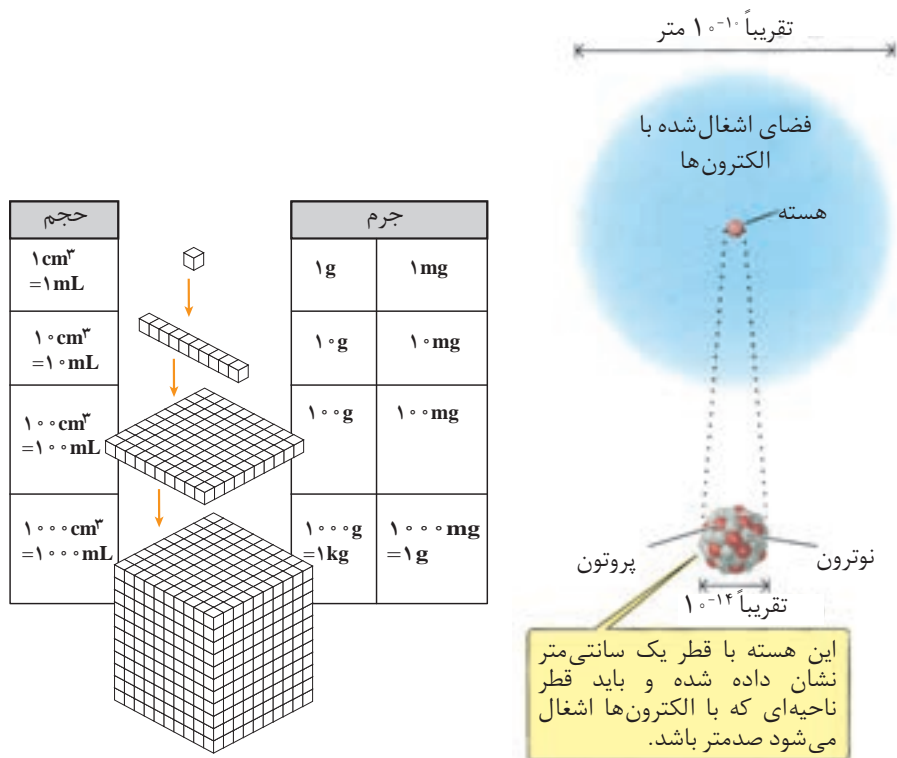


شکل ۱۳. طرح آزمایش رادرفورد برای اندازه‌گیری پراکندگی ذره α با تکه‌ای از ورقه طلا

در سال ۱۹۱۰، فیزیک‌دانی از زلاندنو به نام ارنست رادرفورد (۱۸۷۱-۱۹۳۷) تصمیم گرفت که برای بررسی ساختار اتم‌ها، از ذره‌های α استفاده کند. رادرفورد به همراه همکارش، هانس گایگر (۱۸۸۲ - ۱۹۴۵) و ارنست مارسدن (۱۸۸۹-۱۹۷۰) دانشجوی دوره کارشناسی، مجموعه آزمایش‌هایی را انجام دادند که در آنها ورقه‌های بسیار نازک طلا و فلزهای دیگر با پرتوهای آلفای حاصل از منبعی پرتوزا بمباران می‌شد (شکل ۱۳). آنها مشاهده کردند بیشتر ذره‌ها در برخورد با ورقه طلا بدون انحراف از آن عبور می‌کردند یا انحراف بسیار کوچکی در مسیر آنها ایجاد می‌شد. اما، گاهی نیز یک ذره α با زاویه‌ای بزرگ پراکنده یا منحرف می‌شد. حتی، در مواردی ذره‌های آلفا کاملاً در جهت مخالف جهت اولیه خود برمی‌گشتند. این مشاهده برای آنها غافلگیر کننده بود، زیرا براساس مدل تامسون، بار مثبت یک اتم درون آن پخش شده است و نمی‌تواند چنین انحرافی در مسیر ذره‌های α ایجاد کند و باید بدون هیچ انحرافی همه ذره‌های آلفا از درون آن عبور کنند. رادرفورد در واکنش به این کشف ابراز داشت: «این همان قدر باورنکردنی است که گلوله‌ای سربی را به سمت یک تکه دستمال کاغذی شلیک کنید و آن گلوله برگردد و به خودتان برخورد کند».

رادرفورد بعدها توانست نتایج آزمایش پراکندگی α را برحسب یک مدل اتمی جدید توضیح دهد. براساس مدل رادرفورد، بیشتر حجم اتم فضای خالی است (به همین دلیل بیشتر ذره‌های α بدون انحراف از ورقه طلا عبور می‌کنند). همچنین بار مثبت اتم کاملاً در هسته، متمرکز شده است. هنگامی که ذره α از نزدیکی هسته می‌گذرد، نیروی دافعه بزرگی بر آن وارد می‌شود و انحراف بزرگی در مسیر آن ایجاد می‌کند. افزون بر آن، ذره‌هایی که مستقیماً به هسته برخورد می‌کنند، کاملاً دفع می‌شوند و جهت حرکت آنها معکوس می‌شود.

ذره‌های با بار مثبت در هسته، **پروتون** نامیده می‌شوند. در آزمایش‌های جداگانه‌ای مشخص شد که هر پروتون مقدار باری برابر با بار الکترون داشته اما جرم آن نیز ۱۸۳۷ برابر جرم یک الکترون است. در این مرحله تصویری که دانشمندان از اتم داشتند، به این صورت بود که جرم یک هسته تقریباً همهٔ جرم کل اتم را تشکیل می‌دهد، اما هسته تنها در حدود $\frac{1}{10^{13}}$ حجم اتم را اشغال می‌کند. اگر برای بیان ابعاد اتمی و مولکولی از واحد پیکومتر (pm) استفاده کنیم، ($1 \text{ pm} = 1 \times 10^{-12} \text{ m}$) در آن صورت، شعاع اتم در حدود ۱۰۰ pm است، در حالی که شعاع هستهٔ اتم حدود $5 \times 10^{-3} \text{ pm}$ است.



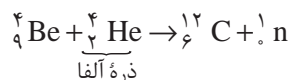
شکل ۱۴. پروتون‌ها و نوترون‌های یک اتم در یک هستهٔ بی‌نهایت کوچک، انباشته شده‌اند. الکترون‌ها به صورت یک ابر اطراف هسته نشان داده شده‌اند.

پاسخ «فکر کنید» صفحه ۷

- ۱- فیلم عکاسی که درون پوششی محافظ جای داشت و در معرض تابش نور مرئی نبود، لکه‌های سیاه بر روی آن ظاهر شده بود که دور از انتظار بکریل بود و پنداشت که با پدیده‌ای نوروبه‌رو است.
- ۲- خیر بلکه باید در شرایط معین و تعریف شدهٔ دیگری با همین ویژگی‌ها آزمایش خود را تکرار کند.
- ۳- پیشنهاد ما این است که تکه‌های گوناگونی از سنگ‌های اورانیم‌دار را روی فیلم‌های عکاسی دارای پوشش با اندازه متفاوت در اتاق تاریک قرار داده و فرضیه خود را تعمیم دهد.

نوترون‌ها

مدل اتمی رادرفورد مشکل مهمی را حل نشده باقی گذاشت. در آن زمان، روشن بود که اتم هیدروژن (ساده‌ترین اتم) تنها یک پروتون و اتم هلیوم دو پروتون دارد. بنابراین، نسبت جرم یک اتم هلیوم به جرم یک اتم هیدروژن باید دو به یک باشد (به سبب جرم بسیار کوچک الکترون‌ها از جرم آنها صرف نظر می‌شود). با این حال، در واقعیت این نسبت چهار به یک بود. رادرفورد و دیگران فرض کردند که باید نوع دیگری از ذره‌های زیراتمی نیز در هسته اتم وجود داشته باشد. در سال ۱۹۳۲، این فرضیه را جیمز چادویک^۱ (۱۸۹۱-۱۹۷۲)، فیزیک‌دان انگلیسی، اثبات کرد. هنگامی که چادویک ورقه نازکی از بریلیم را با ذره‌های α بمباران کرد، تابش بسیار پرانرژی‌ای مشابه پرتوهای γ از فلز نشر شد.



آزمایش‌های بعدی نشان داد که این پرتوها در واقع متشکل از نوع سوم ذره‌های زیراتمی‌اند. چادویک این ذره‌ها را نوترون نامید. این ذره‌ها از نظر الکتریکی خنثی و جرم آنها کمی بزرگتر از جرم پروتون است.

با این یافته جدید، امکان کشف راز نسبت جرمی هلیوم و هیدروژن فراهم شد. در هسته اتم هلیوم دو پروتون و دو نوترون، اما در هسته اتم هیدروژن تنها یک پروتون وجود دارد. به همین دلیل نسبت جرمی آنها چهار به یک است.

شکل ۱۴ موقعیت ذره‌های بنیادی (پروتون‌ها، نوترون‌ها و الکترون‌ها) را در یک اتم نشان می‌دهد. ذره‌های زیر اتمی دیگری نیز وجود دارند. اما این سه ذره، اجزای اصلی سازنده اتم بوده که در شیمی اهمیت دارند.

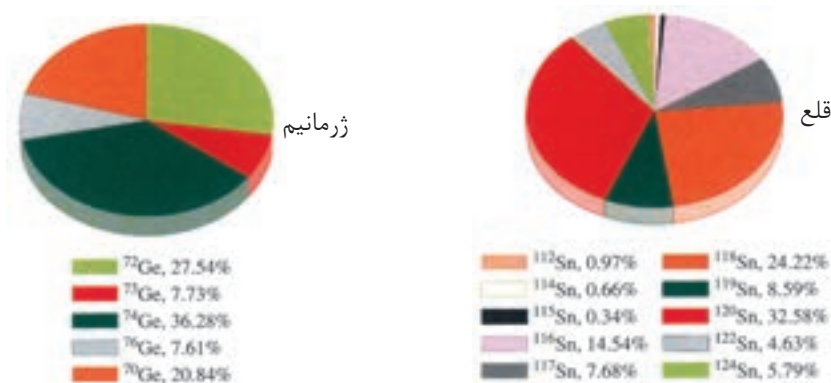
ایزوتوپ‌ها

گاهی همه اتم‌های یک عنصر معین، جرم یکسانی ندارند؛ زیرا بیشتر عنصرها دو یا چند ایزوتوپ دارند (شکل ۱۵). ایزوتوپ‌ها اتم‌هایی با عدد اتمی یکسان و عدد جرمی متفاوت‌اند. مثلاً، هیدروژن سه ایزوتوپ دارد. ایزوتوپ نخست که از آن با عنوان هیدروژن یا پروتیم یاد می‌شود، تنها یک پروتون داشته و نوترون ندارد. دومین ایزوتوپ، دوتریم، یک پروتون و یک نوترون دارد و تریتیم ایزوتوپی با یک پروتون و دو نوترون است.



شکل ۱۵. ایزوتوپ‌های برخی از عنصرها

^۱ - J. Chadwich



ادامه شکل ۱۵. ایزوتوپ‌های برخی از عناصرها

پاسخ «فکر کنید» صفحه ۱۴

۱- برای عنصرهایی که دارای دو یا چند ایزوتوپ پایدار با فراوانی ثابت و معین در طبیعت هستند، جرم اتمی میانگین براساس رابطه زیر گزارش می شود:

$$\text{جرم اتمی میانگین عنصر} = \frac{(\text{فراوانی آن} \times \text{جرم اتمی ایزوتوپ ۱}) + (\text{فراوانی آن} \times \text{جرم اتمی ایزوتوپ ۲}) + \dots}{\text{فراوانی کل}}$$

$$\text{جرم اتمی میانگین بور} = \frac{(10 \times 6) + (11 \times 24)}{6 + 24} = \frac{60 + 264}{30} = \frac{324}{30} = 10.8$$

۲- برای پاسخ به این پرسش نخست اتم مرکزی در مولکول آب را اتم $^{16}_8\text{O}$ ، در نظر بگیرید سپس دو اتم هیدروژن را از میان اتم‌های H، D و T انتخاب کنید. در این شرایط ۶ نوع مولکول آب از لحاظ جرمی خواهیم داشت. با داشتن سه نوع اتم مرکزی (سه ایزوتوپ اکسیژن) ۱۸ نوع مولکول آب خواهیم داشت.

اتم مرکزی	مولکول‌های آب و جرم مولکولی آن‌ها
^{16}O	$\text{H}_2\text{O}(18)$ ، $\text{D}_2\text{O}(20)$ ، $\text{T}_2\text{O}(22)$ ، $\text{DHO}(19)$ ، $\text{THO}(20)$ و $\text{TDO}(21)$
^{17}O	$\text{H}_2\text{O}(19)$ ، $\text{D}_2\text{O}(21)$ ، $\text{T}_2\text{O}(23)$ ، $\text{DHO}(20)$ ، $\text{THO}(21)$ و $\text{TDO}(22)$
^{18}O	$\text{H}_2\text{O}(20)$ ، $\text{D}_2\text{O}(22)$ ، $\text{T}_2\text{O}(24)$ ، $\text{DHO}(21)$ ، $\text{THO}(22)$ و $\text{TDO}(23)$

۳- چگالی $\text{H}_2\text{O}(s)$ کمتر از $\text{H}_2\text{O}(l)$ و چگالی $\text{D}_2\text{O}(s)$ کمتر از $\text{D}_2\text{O}(l)$ است. پس هر نوع یخ بر سطح همان نوع آب شناور می ماند. شکل و داده‌های تجربی نشان می دهند که چگالی $\text{D}_2\text{O}(s)$ بیشتر از $\text{H}_2\text{O}(l)$ است، به همین دلیل $\text{D}_2\text{O}(s)$ به آرامی در آب فرو رفته و در ته ظرف آن شناور می شود.