

به نام خداوند جان و خرد



دانشگاه صنعتی امیر کبیر
(پلی تکنیک تهران)

هدف آزمایش :

اندازه‌گیری بار الکتریکی الکترون

به روش قطره روغن میلکان

تهیه و تنظیم گزارش :

امیررضا حکیمی ۴۰۳۱۱۴۰۲

شکوه شریعتمداریان ۴۰۳۱۱۰۲۵

امیرمحمد عبدالله پور ۴۰۳۱۱۰۳۲

مقدمه :

در اواخر قرن نوزدهم میلادی، بسیاری از دانشمندان بر این باور بودند که اتم کوچکترین جزء ماده و غیرقابل تقسیم است. با این حال، پیشرفت آزمایش‌های مربوط به تخلیه الکتریکی در گازها به تدریج این دیدگاه را تغییر داد. یکی از مهم‌ترین پژوهش‌هایی که نقش اساسی در شناخت ساختار اتم داشت، آزمایش‌های مربوط به اشعه کاندی بود. در سال 1897 فیزیکدان انگلیسی J. J. Thomson با بررسی رفتار اشعه کاندی مشاهده کرد که این اشعه در میدان الکتریکی به سمت قطب مثبت منحرف می‌شود و از قطب منفی دور می‌گردد. او نتیجه گرفت که اشعه کاندی از ذراتی با بار منفی تشکیل شده است که جرم آن‌ها بسیار کمتر از جرم اتم هیدروژن است. بدین ترتیب الکترون کشف شد و مشخص گردید که اتم ساختاری مرکب دارد و از ذرات بنیادی کوچکتری تشکیل شده است.

تامسون توانست نسبت بار الکترون به جرم آن e/m را اندازه‌گیری کند، اما اندازه‌گیری مستقل بار الکترون هنوز امکان‌پذیر نبود. این مسئله چند سال بعد توسط Robert Millikan و همکارش Harvey Fletcher حل شد. آن‌ها در سال 1909 آزمایش معروف قطره روغن را طراحی کردند و با استفاده از آن موفق شدند مقدار بار الکتریکی الکترون را اندازه‌گیری کنند.

در این آزمایش، قطرات بسیار ریز روغن در فضای بین دو صفحه فلزی باردار قرار می‌گرفتند. با اعمال میدان الکتریکی مناسب، امکان کنترل حرکت قطرات فراهم می‌شد و حتی می‌توانستند در حالت تعادل باقی بمانند. میلیکان با اندازه‌گیری دقیق نیروهای وارد بر قطرات و تکرار آزمایش برای تعداد زیادی از آن‌ها نشان داد که بار الکتریکی قطرات همواره مضربی صحیح از یک مقدار ثابت است. این مقدار همان بار بنیادی الکترون بود :

$$e = 1.602 \times 10^{-19} \text{ C}$$

نتایج این آزمایش نشان داد که بار الکتریکی ماهیتی گسسته و ناپیوسته دارد؛ یعنی بار الکتریکی نمی‌تواند هر مقدار دلخواهی اختیار کند و همواره مضربی صحیح از بار بنیادی است. آزمایش میلیکان یکی از مهم‌ترین آزمایش‌های تاریخ فیزیک محسوب می‌شود، زیرا علاوه بر تعیین مقدار بار الکترون، نقش مهمی در اثبات ساختار ذره‌ای الکترونیسته و توسعه فیزیک اتمی و کوانتومی داشت. به دلیل اهمیت این تحقیقات، میلیکان در سال 1923 موفق به دریافت جایزه نوبل فیزیک شد.

تئوری آزمایش :

اساس آزمایش میلیکان بر بررسی نیروهای وارد بر قطرات بسیار ریز روغن است که در فضای بین دو صفحه خازن قرار می گیرند. این قطرات تحت تأثیر نیروی وزن، نیروی شناوری هوا، نیروی الکتریکی و نیروی اصطکاک ناشی از ویسکوزیته هوا حرکت می کنند.

اگر جرم قطره برابر m باشد، نیروی وزن وارد بر آن از رابطه زیر به دست می آید:

$$F_g = mg$$

از آنجا که قطره تقریباً کروی است، حجم آن برابر خواهد بود با :

$$V = \frac{4}{3} \pi r^3$$

و جرم قطره نیز از رابطه زیر بدست می آید:

$$m = \rho_{oil} V$$

بنابراین نیروی وزن قطره به صورت زیر نوشته می شود:

$$F_g = \frac{4}{3} \pi r^3 \rho_{oil} g$$

هوا نیز مطابق اصل ارشمیدس به قطره نیروی شناوری وارد می کند که برابر است با :

$$F_b = \frac{4}{3} \pi r^3 \rho_{air} g$$

علاوه بر این، هنگام حرکت قطره در هوا، نیروی مقاومتی ناشی از ویسکوزیته هوا به آن وارد می شود. طبق قانون استوکس، این نیرو برابر است با :

$$F_s = 6\pi r \eta v$$

که در آن :

$$\left. \begin{array}{l} \eta : \text{ضریب ویسکوزیته هوا} \\ r : \text{شعاع قطره} \\ v : \text{سرعت حرکت قطره} \end{array} \right\}$$

اگر قطره دارای بار الکتریکی q باشد و در میدان الکتریکی E قرار گیرد ، نیروی الکتریکی وارد بر آن از رابطه زیر به دست می‌آید :

$$F_e = q E$$

شدت میدان الکتریکی بین صفحات خازن نیز برابر است با :

$$E = \frac{V}{d}$$

که در آن V اختلاف پتانسیل بین صفحات و d فاصله صفحات خازن است . بنابراین نیروی الکتریکی به صورت زیر نوشته می‌شود :

$$F_e = q \frac{V}{d}$$

در مرحله اول آزمایش ، میدان الکتریکی قطع می‌شود تا قطره فقط تحت تأثیر وزن ، شناوری و اصطکاک سقوط کند . پس از مدت کوتاهی قطره به سرعت نهایی v_f می‌رسد و شتاب آن صفر می‌شود . در این حالت مجموع نیروها برابر صفر است :

$$F_g - F_b - F_s = 0 \Rightarrow \begin{cases} F_g = \frac{4}{3} \pi r^3 \rho_{oil} g \\ F_b = \frac{4}{3} \pi r^3 \rho_{air} g \\ F_s = 6 \pi r \eta v \end{cases} \Rightarrow \frac{4}{3} \pi r^3 \rho_{oil} g - \frac{4}{3} \pi r^3 \rho_{air} g = 6 \pi r \eta v$$

با ساده‌سازی این رابطه، شعاع قطره به صورت زیر بدست می‌آید:

$$r = \left(\frac{9 \eta v_f}{2 g (\rho_{oil} - \rho_{air})} \right)^{\frac{1}{2}}$$

پس از تعیین شعاع قطره، میدان الکتریکی اعمال می‌شود. اگر نیروی الکتریکی از وزن مؤثر قطره بیشتر باشد، قطره به سمت بالا حرکت می‌کند. در این حالت تعادل نیروها به صورت زیر خواهد بود:

$$F_e - F_g + F_b - F_s = 0 \Rightarrow \begin{cases} F_g = \frac{4}{3}\pi r^3 \rho_{oil} g \\ F_b = \frac{4}{3}\pi r^3 \rho_{air} g \\ F_s = 6\pi r \eta v \\ F_e = qE \end{cases} \Rightarrow qE - \frac{4}{3}\pi r^3 \rho_{oil} g + \frac{4}{3}\pi r^3 \rho_{air} g = 6\pi r \eta v_r$$

که در آن v_r سرعت صعود قطره است. با استفاده از رابطه حالت سقوط، عبارت وزن مؤثر قطره را جایگذاری می‌کنیم:

$$qE = 6\pi r \eta (v_f + v_r)$$

در نهایت بار قطره از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$q = \frac{6\pi r \eta (v_f + v_r)}{E}$$

و با جایگذاری $E = \frac{V}{d}$ در فرمول بالا داریم :

$$q = \frac{6\pi r \eta d (v_f + v_r)}{V}$$

این رابطه، فرمول اصلی آزمایش میلیکان برای تعیین بار الکتریکی قطره می‌باشد.

شرح آزمایش :

ابتدا دستگاه میلیکان روشن می شود و میکروسکوپ آن به گونه ای تنظیم می گردد که خطوط مدرج به وضوح دیده شوند . سپس اختلاف پتانسیل بین صفحات خازن در محدوده 300 تا 500 ولت تنظیم شد تا میدان الکتریکی مناسبی ایجاد شود.

پس از آماده سازی دستگاه ، به کمک افشانه مخصوص ، قطرات بسیار ریز روغن وارد محفظه بین صفحات خازن می شوند. این قطرات در اثر اصطکاک هنگام پاشش، دارای بار الکتریکی می شوند و تحت تابش نور به صورت نقاط نورانی در میدان دید میکروسکوپ مشاهده می گردند.

در ادامه، یک قطره مناسب انتخاب می شود . قطره انتخابی نباید بیش از حد سریع یا بسیار کند حرکت کند ، زیرا در این صورت اندازه گیری با خطای زیادی همراه می شود . سپس میدان الکتریکی قطع می شود و زمان سقوط قطره در فاصله مشخص بین خطوط میکرومتر اندازه گیری می گردد. پس از آن میدان الکتریکی اعمال شود و با استفاده از کلید تغییر قطبیت ، قطره به سمت بالا حرکت داده می شود . زمان صعود قطره نیز توسط کرومومتر ثبت می گردد.

سرعت سقوط و صعود قطره از رابطه زیر محاسبه می شود :

$$v = x / t$$

پس از محاسبه سرعت ها، ابتدا شعاع قطره از رابطه مربوط به سقوط و سپس بار الکتریکی آن از فرمول اصلی آزمایش محاسبه می شود.

سوالات :

قطرات روغن چگونه باردار میشوند.

در آزمایش میلیکان قطرات روغن به وسیله ی یک افشانه به صورت ذرات بسیار ریز در هوا پخش می شوند. هنگام پاشیده شدن، این قطرات با نازل دستگاه و مولکول های هوا برخورد و اصطکاک پیدا می کنند. در اثر این برخوردها تعدادی الکترون میان قطرات روغن و محیط اطراف جابه جا می شود ؛ به همین دلیل بعضی قطرات الکترون اضافه دریافت می کنند و دارای بار منفی می شوند و بعضی دیگر الکترون از دست داده و بار مثبت پیدا می کنند . در برخی حالت ها نیز برای افزایش تعداد قطرات باردار، از پرتو X یا مواد یونیزه کننده استفاده می شود تا هوای داخل دستگاه یونیزه گردد و انتقال الکترون ها آسان تر انجام شود. به این ترتیب قطرات روغن باردار می شوند و می توان حرکت آن ها را در میدان الکتریکی بررسی کرد.

در مورد مهمترین خطاهای موجود در آزمایش بحث کنید

در آزمایش میلیکان چند منبع خطا وجود دارد که می‌تواند دقت اندازه‌گیری بار الکترون را تحت تأثیر قرار دهد. مهم‌ترین آن‌ها عبارت‌اند از:

یکی از خطاهای اصلی مربوط به مشاهده و اندازه‌گیری حرکت قطرات است. قطرات بسیار ریز هستند و حرکت آن‌ها در میدان دید میکروسکوپ به راحتی قابل دنبال کردن نیست. بنابراین خطای انسانی در زمان‌سنجی یا تعیین سرعت سقوط و صعود قطره‌ها می‌تواند نتایج را تغییر دهد.

خطای مهم دیگر به اندازه‌گیری شعاع قطرات روغن مربوط می‌شود. محاسبه بار الکتریکی قطره به شدت به اندازه دقیق شعاع آن وابسته است، اما قطرات کاملاً کروی و یکنواخت نیستند و تبخیر جزئی یا تغییر شکل آن‌ها می‌تواند خطا ایجاد کند.

همچنین اثر جریان‌های هوا در داخل محفظه یکی دیگر از منابع خطا است. اگر هوا کاملاً ساکن نباشد، نیروی اضافی به قطرات وارد می‌شود و تعادل بین نیروی وزن، مقاومت هوا و نیروی الکتریکی به هم می‌خورد. از طرف دیگر، فرض‌های ساده‌سازی شده مانند ثابت بودن ویسکوزیته هوا یا اعمال دقیق قانون استوکس نیز همیشه کاملاً دقیق نیستند و باعث خطاهای سیستماتیک می‌شوند.

به چه روش‌های دیگر میتوان بار الکتریکی الکترون را اندازه گیری کرد.

برای اندازه‌گیری بار الکترون غیر از آزمایش میلیکان روش‌های دیگری هم وجود دارد که مستقیم یا غیرمستقیم مقدار آن را به دست می‌آورند. مهم‌ترین آن‌ها عبارت‌اند از:

در روش پرتو کاتدی، با استفاده از انحراف الکترون‌ها در میدان‌های الکتریکی و مغناطیسی، نسبت بار به جرم الکترون (e/m) اندازه‌گیری می‌شود و اگر جرم الکترون از قبل معلوم باشد، می‌توان بار آن را به دست آورد.

در روش الکترولیز و قانون فاراده نیز از رابطه بین مقدار بار عبوری از محلول و مقدار ماده آزادشده استفاده می‌شود. با ترکیب ثابت فاراده و عدد آووگادرو، مقدار بار هر الکترون قابل محاسبه است.

در فیزیک مدرن نیز از اثرات کوانتومی مانند اثر هال کوانتومی استفاده می‌شود که در آن مقدار بار الکترون از روابط دقیق بین ثابت‌های بنیادی به دست می‌آید.

همچنین در برخی روش‌های بسیار دقیق امروزی مانند تونل‌زنی تک‌الکترونی (Single-electron devices)، می‌توان عبور تک‌تک الکترون‌ها را شمارش کرد و بار آن‌ها را به طور مستقیم تعیین نمود.

داده های آزمایش :

number	voltage (volt)	X_1 (0.35 mm)	X_2 (0.35 mm)	t (s)	V(m/s)	q (C)	n	error
1	260	7	9	1.1	6.45E-04	1.72182E-18	10.24893	2.49E-01
2	90	7	9	3.8	1.87E-04	7.74698E-19	4.611296	-3.89E-01
3	45	7.5	9.5	3.5	2.03E-04	1.75281E-18	10.43341	4.33E-01
4	23	7	9	3.4	2.09E-04	3.58182E-18	21.32037	3.20E-01
5	64	7	9	5.6	1.27E-04	6.08959E-19	3.624757	-3.75E-01
6	95	7	9	5.1	1.39E-04	4.72032E-19	2.809713	-1.90E-01
7	40	7	9	6.4	1.11E-04	7.97481E-19	4.746909	-2.53E-01
8	50	7	9	3.4	2.09E-04	1.64764E-18	9.807369	-1.93E-01
9	65	7	9	1.3	5.46E-04	5.3607E-18	31.90895	-9.11E-02
10	145	7	9	1.6	4.44E-04	1.75996E-18	10.47594	4.76E-01
11	54	7	9	2.6	2.73E-04	2.28137E-18	13.5796	-4.20E-01
12	51	7.5	9.5	2.5	2.84E-04	2.56195E-18	15.24968	2.50E-01
13	145	7	9	3	2.37E-04	6.85489E-19	4.08029	8.03E-02
14	255	7	9	1.6	4.44E-04	1.00076E-18	5.956906	-4.31E-02
15	310	7	9	3.8	1.87E-04	2.24912E-19	1.338763	3.39E-01