

به نام خداوند جان و خرد



دانشگاه صنعتی امیرکبیر
(پلی تکنیک تهران)

عنوان آزمایش :

فرانک - هرتز

تهیه و تنظیم گزارش :

* امیررضا حکیمی ۴۰۳۱۱۴۰۲

شکوه شریعتمداریان ۴۰۳۱۱۰۲۵

امیرمحمد عبدالله پور ۴۰۳۱۱۰۳۲

مقدمه :

در اوایل قرن بیستم، مدل‌های کلاسیکی اتم قادر به توضیح پایداری اتم و طیف‌های خطی مشاهده شده نبودند. نیلز بوهر در سال 1913 مدلی ارائه داد که در آن فرض شد الکترون‌ها تنها در مدارهایی مشخص با انرژی‌های گسسته می‌توانند به دور هسته حرکت کنند. این فرض با اصول کلاسیکی سازگار نبود، اما توانست طیف هیدروژن را به درستی توجیه کند.

در مدل بوهر، شرط کوانتیده بودن تکانه زاویه‌ای به صورت زیر بیان می‌شود:

$$mvr = n\hbar$$

که در آن (m) جرم الکترون، (v) سرعت آن، (r) شعاع مدار، (n) عدد کوانتومی اصلی و ($\hbar = \frac{h}{2\pi}$) است. از طرف دیگر، نیروی نگهدارنده الکترون در مدار، نیروی کولنی بین هسته و الکترون است که نقش نیروی مرکز گرا را ایفا می‌کند. بنابراین:

$$\left\{ \begin{array}{l} F_C = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{Ze^2}{r^2} \\ F = \frac{mv^2}{r} \end{array} \right. \Rightarrow F_C = F \Rightarrow \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{Ze^2}{r^2} = \frac{mv^2}{r}$$

با استفاده از رابطه کوانتیده بودن تکانه زاویه‌ای، سرعت را می‌توان نوشت :

$$v = \frac{n\hbar}{mr}$$

با جایگذاری در معادله تعادل نیرو که در بالا بدست آوردیم و با ساده‌سازی آن شعاع مدارهای مجاز به صورت زیر به دست می‌آید :

$$r_n = \frac{4\pi\epsilon_0 n^2 \hbar^2}{mZe^2}$$

اکنون انرژی کل الکترون را محاسبه می‌کنیم. انرژی کل برابر مجموع انرژی جنبشی و پتانسیل است:

$$E = K + U$$

فرمول انرژی جنبشی به صورت مقابل می باشد :

$$K = \frac{1}{2}mv^2$$

و فرمول انرژی پتانسیل کولنی نیز به صورت مقابل می باشد :

$$U = -\frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{Ze^2}{r}$$

با استفاده از رابطه تعادل نیرو، می توان نشان داد که :

$$K = -\frac{1}{2} \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{Ze^2}{r}$$

در نتیجه با جایگذاری (r_n) داریم :

$$\left\{ \begin{array}{l} K = -\frac{1}{2} \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{Ze^2}{r} \\ U = -\frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{Ze^2}{r} \\ E = K + U \end{array} \right. \Rightarrow E_n = -\frac{mZ^2e^4}{8\epsilon_0^2h^2n^2}$$

مثلا برای هیدروژن داریم :

$$E_n = -\frac{13.6}{n^2} eV$$

این نتیجه نشان می دهد که انرژی الکترون در اتم فقط مقادیر گسسته می پذیرد و نمی تواند به طور پیوسته تغییر کند. آزمایش فرانک-هرتز دقیقاً برای بررسی تجربی همین ویژگی طراحی شده است .

تئوری آزمایش :

در این آزمایش ، الکترون ها توسط اختلاف پتانسیل (U) شتاب می گیرند و انرژی جنبشی آنها برابر است با :

$$E_e = eU$$

این الکترون ها وارد محیطی حاوی گاز رقیق می شوند و با اتم های آن برخورد می کنند . اگر انرژی الکترون کمتر از اختلاف انرژی بین حالت پایه و اولین حالت برانگیخته اتم باشد، برخوردها الاستیک خواهند بود . در این حالت الکترون تقریباً تمام انرژی خود را حفظ می کند و می تواند به آند برسد، بنابراین جریان افزایش می یابد .

اما هنگامی که انرژی الکترون دقیقاً برابر اختلاف انرژی بین دو تراز شود :

$$eU = E_2 - E_1$$

برخورد غیرالاستیک رخ می دهد. در این حالت الکترون انرژی خود را به اتم منتقل کرده و اتم را برانگیخته می کند . در نتیجه انرژی جنبشی الکترون به طور ناگهانی کاهش می یابد.

بین شبکه دوم و آند یک پتانسیل بازدارنده وجود دارد. اگر الکترون پس از برخورد غیرالاستیک انرژی کافی برای غلبه بر این پتانسیل را نداشته باشد ، به آند نمی رسد و جریان کاهش می یابد . به همین دلیل در نمودار جریان بر حسب ولتاژ شتاب دهنده، افت ناگهانی جریان مشاهده می شود .

با افزایش بیشتر ولتاژ ، الکترون ها می توانند چندین بار فرآیند برانگیختگی را تکرار کنند . بنابراین افت های جریان به صورت دوره های و در ولتاژهای مقابل رخ می دهد :

$$U_n = \frac{n(E_2 - E_1)}{e}$$

اختلاف بین مینیمم های متوالی برابر است با :

$$\Delta U = \frac{E_{exc}}{e}$$

در نتیجه :

$$E_{exc} = e \Delta U$$

این رابطه اساس تعیین انرژی اولین تراز برانگیخته در این آزمایش است.

شرح آزمایش :

در این آزمایش از لامپ فرانک-هرتز استفاده می‌شود که درون آن مقدار کمی گاز نجیب مانند نئون یا آرگون قرار دارد. این لامپ شامل یک کاتد گرم‌شونده، دو شبکه توری شکل و یک آند یا جمع‌کننده است.

ابتدا کاتد توسط فیلامان گرم می‌شود. در اثر گرم شدن، الکترون‌ها از سطح کاتد جدا می‌شوند. این پدیده گسیل گرمایونی نام دارد. الکترون‌های آزاد شده تحت تأثیر میدان الکتریکی ایجاد شده بین کاتد و شبکه اول شتاب می‌گیرند.

بین کاتد و شبکه اول اختلاف پتانسیلی اعمال می‌شود تا الکترون‌ها با سرعت اولیه مناسب وارد ناحیه برخورد شوند. سپس بین کاتد و شبکه دوم یک ولتاژ شتاب‌دهنده اعمال می‌شود که باعث افزایش انرژی جنبشی الکترون‌ها می‌شود.

الکترون‌ها در مسیر حرکت خود با اتم‌های گاز داخل لامپ برخورد می‌کنند. اگر انرژی آن‌ها کمتر از انرژی برانگیختگی اتم باشد، برخوردها الاستیک خواهند بود و الکترون‌ها تقریباً بدون کاهش انرژی به حرکت ادامه می‌دهند. در نتیجه تعداد زیادی از آن‌ها از شبکه دوم عبور کرده و به آند می‌رسند و جریان قابل اندازه‌گیری ایجاد می‌شود.

اما زمانی که انرژی الکترون‌ها به مقدار لازم برای برانگیختن اتم برسد، برخورد غیرالاستیک رخ می‌دهد. در این حالت الکترون انرژی خود را به اتم منتقل می‌کند و انرژی جنبشی آن کاهش می‌یابد. به همین دلیل بسیاری از الکترون‌ها دیگر توان عبور از پتانسیل بازدارنده بین شبکه دوم و آند را ندارند و به آند نمی‌رسند. در نتیجه جریان اندازه‌گیری شده کاهش پیدا می‌کند.

در این آزمایش ابتدا دستگاه روشن شده و حدود چند دقیقه صبر می‌شود تا فیلامان و لامپ به حالت پایدار برسند. سپس ولتاژ فیلامان روی حدود ۴ ولت تنظیم می‌شود. بعد از آن ولتاژ بازدارنده و ولتاژ شبکه‌ها طبق تنظیمات دستگاه تنظیم می‌شوند.

در مرحله بعد ولتاژ شتاب‌دهنده به صورت تدریجی از صفر تا حدود ۱۰۰ ولت افزایش داده می‌شود. در هر مقدار ولتاژ، مقدار جریان الکترونی توسط آمپر متر اندازه‌گیری و ثبت می‌شود.

با رسم نمودار جریان بر حسب ولتاژ شتاب‌دهنده، یک منحنی نوسانی مشاهده می‌شود که شامل چندین قله و دره است. فاصله بین دره‌های متوالی نشان‌دهنده انرژی لازم برای برانگیختن اتم گاز داخل لامپ است.

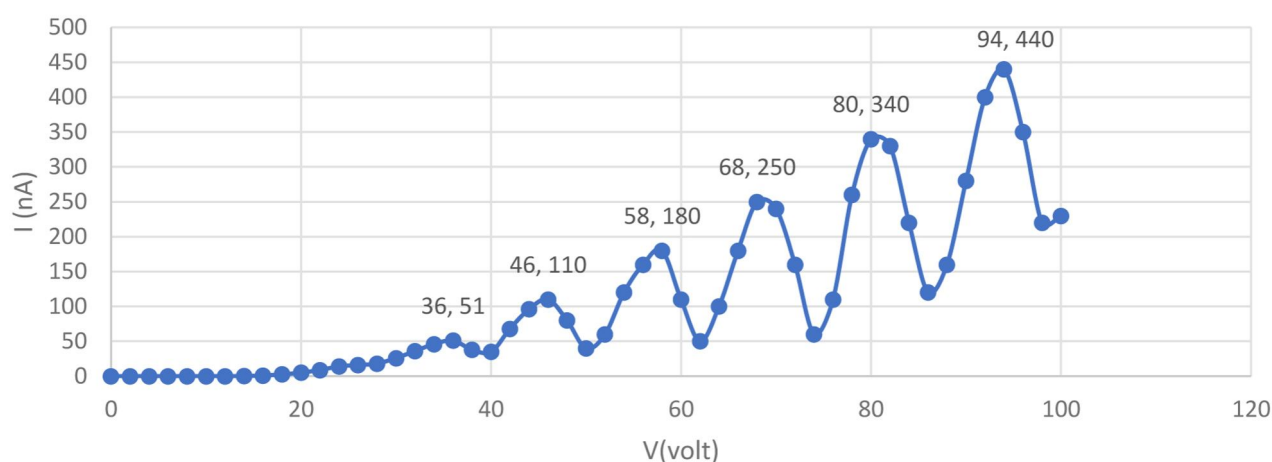
در حالت دیگر دستگاه می‌توان از اسیلوسکوپ استفاده کرد. در این حالت خروجی ولتاژ به محور افقی و جریان به محور عمودی اسیلوسکوپ متصل می‌شود و منحنی جریان-ولتاژ به طور مستقیم روی صفحه اسیلوسکوپ مشاهده می‌شود. با اندازه‌گیری فاصله بین قله‌های منحنی و ضرب آن در مقیاس ولتاژ صفحه اسیلوسکوپ، مقدار انرژی اولین تراز برانگیخته اتم به دست می‌آید.

نتیجه این آزمایش نشان می‌دهد که اتم‌ها تنها مقادیر مشخصی از انرژی را جذب می‌کنند و این موضوع تأییدی تجربی بر کوانتیده بودن ترازهای انرژی در مدل اتمی بوهر است.

V(volt)	I (10 ⁻⁹ Exp))	Exp	I (nA)
0	0	-9	0
2	0.04	-9	0.04
4	0.06	-9	0.06
6	0.07	-9	0.07
8	0.08	-9	0.08
10	0.09	-9	0.09
12	0.04	-9	0.04
14	0.2	-9	0.2
16	1	-9	1
18	2.6	-9	2.6
20	5.1	-9	5.1
22	8.8	-9	8.8
24	1.4	-8	14
26	1.6	-8	16
28	1.8	-8	18
30	2.6	-8	26
32	3.6	-8	36
34	4.6	-8	46
36	5.1	-8	51
38	3.8	-8	38
40	3.6	-8	35
42	6.8	-8	68
44	9.6	-8	96
46	1.1	-7	110
48	0.8	-7	80
50	0.4	-7	40
52	0.6	-7	60
54	1.2	-7	120

V(volt)	I (I ^{-Exp})	Exp	I (nA)
56	1.6	-7	160
58	1.8	-7	180
60	1.1	-7	110
62	0.5	-7	50
64	1	-7	100
66	1.8	-7	180
68	2.5	-7	250
70	2.4	-7	240
72	1.6	-7	160
74	0.6	-7	60
76	1.1	-7	110
78	2.6	-7	260
80	3.4	-7	340
82	3.3	-7	330
84	2.2	-7	220
86	1.2	-7	120
88	1.6	-7	160
90	2.8	-7	280
92	4	-7	400
94	4.4	-7	440
96	3.5	-7	350
98	2.2	-7	220
100	2.3	-7	230

Franck-Hertz experiment graph



به نظر شما چرا این آزمایش را با اتم هیدروژن انجام ندادیم؟

آزمایش فرانک-هرتز معمولاً با اتم هیدروژن انجام نمی‌شود زیرا انرژی لازم برای برانگیختن اتم هیدروژن نسبتاً زیاد است. اختلاف انرژی بین حالت پایه و اولین حالت برانگیخته در هیدروژن حدود (10.2 eV) است، در حالی که انرژی یونش آن (13.6 eV) می‌باشد. نزدیک بودن این دو مقدار باعث می‌شود که با افزایش انرژی الکترون‌ها به جای برانگیختگی، یونش اتم نیز رخ دهد و نتایج آزمایش به خوبی قابل مشاهده نباشد. علاوه بر این، کار با هیدروژن از نظر عملی دشوارتر است، به همین دلیل در این آزمایش معمولاً از گازهایی مانند جیوه یا نئون استفاده می‌شود که انرژی برانگیختگی کمتری دارند و نتایج واضح‌تری ایجاد می‌کنند.

اگر آزمایش را با اتم جیوه انجام دهیم چه تغییراتی باید در انجام آزمایش ایجاد کنیم و چرا؟

اگر آزمایش فرانک-هرتز با اتم جیوه انجام شود، باید لامپ آزمایش تا دمای مشخصی گرم شود تا مقداری از جیوه تبخیر شده و بخار جیوه در داخل لامپ ایجاد شود. وجود بخار جیوه ضروری است زیرا الکترون‌ها باید در مسیر حرکت خود با اتم‌های جیوه برخورد کنند تا فرآیند برانگیختگی رخ دهد. همچنین فشار بخار باید در مقدار مناسبی تنظیم شود تا فاصله‌ی میانگین بین برخوردها مناسب باشد و الکترون‌ها بتوانند انرژی لازم برای برانگیختگی اتم‌ها را به دست آورند. به همین دلیل در آزمایش با جیوه علاوه بر ولتاژهای اعمالی، دمای لامپ نیز کنترل می‌شود.

حالت های کوانتایی قبل و بعد از تحریک اتم جیوه را مشخص کنید.

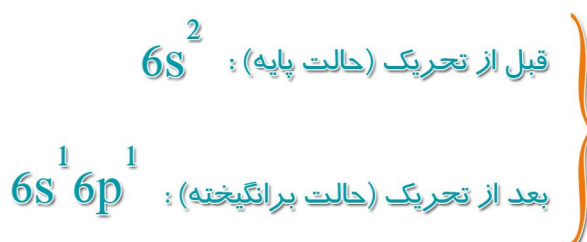
در آزمایش فرانک - هرتز، اتم های جیوه در ابتدا در حالت پایه قرار دارند . آرایش الکترونی حالت پایه جیوه به صورت زیر است :



در این حالت هر دو الکترون لایه ی (6s) در پایین ترین تراز انرژی قرار دارند.

وقتی الکترون های شتاب گرفته با انرژی کافی با اتم های جیوه برخورد غیرالاستیک انجام می دهند ، مقداری از انرژی خود را به اتم منتقل می کنند . در نتیجه یکی از الکترون های تراز (6s) به تراز بالاتر یعنی (6p) منتقل می شود و اتم به حالت برانگیخته می رود .

بنابراین:



در این حالت اتم جیوه ناپایدار است و پس از مدت کوتاهی الکترون برانگیخته دوباره به تراز پایین تر بازمی گردد و انرژی اضافی به صورت فوتون نور* آزاد می شود. این فرآیند نشان دهنده ی گسسته بودن ترازهای انرژی در اتم است.

اهمیت آزمایش فرانک هرتز را بیان کنید؟

اهمیت آزمایش فرانک-هرتز در تاریخ فیزیک به دلایل زیر بسیار حیاتی است و می توانید آن ها را به این صورت در گزارش خود بنویسید :

اولین تأیید تجربی و مستقیم مدل بوهر: تا پیش از این آزمایش ، کوانتیده بودن انرژی اتم ها فقط از طریق مطالعه طیف های نوری (مشاهدات غیرمستقیم) پیشنهاد شده بود. این آزمایش برای اولین بار به صورت مکانیکی و مستقیم نشان داد که اتم ها واقعاً ترازهای انرژی گسسته دارند.

حالت های کوانتایی قبل و بعد از تحریک اتم جیوه را مشخص کنید.

اثبات کوانتیده بودن تبادل انرژی: این آزمایش ثابت کرد که اتم ها نمی توانند هر مقدار دلخواهی از انرژی را جذب کنند ، بلکه انرژی را فقط در بسته های مشخصی به نام کوانتا دریافت می کنند . این موضوع خط بطلانی بر نظریات فیزیک کلاسیک در مقیاس اتمی بود.

پیوند بین مکانیک و نور: فرانک و هرتز نشان دادند که انرژی جذب شده توسط اتم در اثر برخورد الکترون (انرژی مکانیکی)، دقیقاً برابر با انرژی نوری است که اتم هنگام بازگشت به حالت پایه از خود گسیل می کند.

تغییر پارادایم فیزیک : این آزمایش یکی از ستون های اصلی فیزیک کوانتوم است که باعث شد جامعه علمی بپذیرد قوانین فیزیک در سطح اتمی با فیزیک کلاسیک (نیوتنی) متفاوت است. به همین دلیل، جیمز فرانک و گوستاو هرتز در سال 1925 میلادی جایزه نوبل فیزیک را دریافت کردند.

چرا نمودار روی یک خط صعودی سوار است؟

این یکی از نکات بسیار دقیق در تحلیل نمودار آزمایش فرانک-هرتز است. دلیل اینکه نوسانات (قله ها و دره ها) روی یک خط با (شیب صعودی) قرار دارند، به چند عامل فیزیکی زیر مربوط می شود:

اثر بار فضایی (Space Charge Effect) :

در ولتاژهای پایین، ابری از الکترون ها اطراف کاتد تشکیل می شود که مانع از حرکت راحت بقیه الکترون ها به سمت آنند می شود . با افزایش ولتاژ شتاب دهنده ، این میدان الکتریکی قوی تر شده و الکترون های بیشتری را از این ابر به سمت شبکه و آنند می کشد . بنابراین ، پتانسیل بیشتر باعث گسیل و عبور جریان بیشتری از کاتد می شود که باعث صعودی شدن روند کلی نمودار می گردد.

افزایش بازدهی جمع آوری الکترون ها :

با افزایش ولتاژ، میدان الکتریکی بین کاتد و شبکه قوی تر می شود . این میدان قوی باعث می شود الکترون هایی که به دلیل برخورد با اتم ها تغییر مسیر داده اند (پراکنده شده اند) ، دوباره در مسیر مستقیم به سمت آنند هدایت شوند . در واقع در ولتاژهای بالاتر، احتمال اینکه الکترون ها پس از برخورد همچنان به سمت آنند کشیده شوند بیشتر است ، که این امر جریان کل را بالا می برد.

هنگامی که ولتاژ بسیار زیاد است ، حتی اگر الکترون یک برخورد غیرالاستیک انجام دهد و بخشی از انرژی خود را از دست بدهد، باز هم به دلیل ولتاژ بالای محیط ، انرژی جنبشی باقی مانده اش آنقدر زیاد هست که بتواند از پتانسیل بازدارنده عبور کرده و به آنند برسد. بنابراین در ولتاژهای بالا، دره ها (مینیمم ها) هرگز به صفر نمی رسند و سطح جریان کلی بالاتر می رود.

افزایش سرعت نفوذ :

هرچه ولتاژ بالاتر رود، سرعت میانگین الکترون‌ها بیشتر شده و زمان گذار آن‌ها (زمانی که طول می‌کشد از کاتد به آند برسند) کمتر می‌شود. این موضوع باعث افزایش نرخ رسیدن بار به آند و در نتیجه باعث افزایش شدت جریان می‌شود.