

فرانک - هرتز

پارسا رنگریز

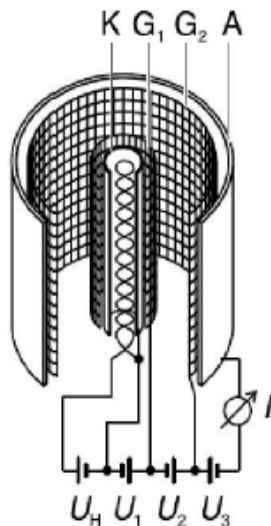
آزمایشگاه فیزیک ۴، دانشکده فیزیک، دانشگاه صنعتی شریف

۱ مقدمه

در سال ۱۹۱۳ نیلز بور مدل اتمی خود را بر پایه کوانتومی بودن مدارهای دایره‌ای حرکت الکترون توصیف کرد که طبق آن شعاع مدار الکترون و انرژی آن محدود به بعضی مقادیر مجاز است. یک سال بعد، فرانک و هرتز با عبور دادن الکترون از بخار جیوه و بررسی شدت جریان الکترونی، متوجه انتقال انرژی با گام‌های مجزا برای الکترون‌های عبوری شدند. ابتدا تصور می‌کردند که این انتقال انرژی صرف یونیزاسیون اتم‌های جیوه شده است و در گزارشات اولیه خود مقدار کاهش انرژی را بعنوان انرژی یونیزاسیون جیوه ثبت کردند؛ اما بعد با مشاهده تابش گسیلی آن ($\lambda = 254nm$) متوجه برانگیختگی اتم‌های جیوه به تراز بالاتر و همچنین صحت مدل اتمی بور شدند.

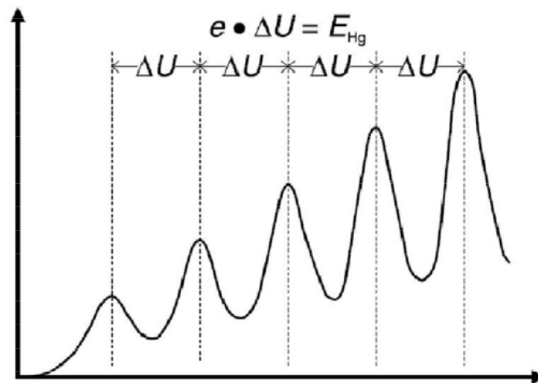
اساس آزمایش فرانک - هرتز بر پایه برخورد کشسان و غیرکشسان الکترون‌های عبوری از بخار جیوه است. برای این مشاهدات، با ثابت نگه داشتن دما، جیوه بخار شده و در یک فشار بخار ثابت درون لامپ شیشه‌ای نگاه داشته می‌شوند. لامپ شیشه‌ای با تقارن استوانه‌ای (شکل ۱) شامل چهار الکتروود است؛ کاتد K ، الکتروود کنترل از نوع شبکه‌ای G_1 در فاصله چند سانتی متری از کاتد، یک شبکه شتاب‌دهنده G_2 در فاصله بیشتر و الکتروود جمع‌کننده A .

الکترون‌ها از الکتروود گرم گسیل شده و با یک پتانسیل پیش‌ران U_1 بین کاتد و شبکه G_1 سرعت داده می‌شوند. در فاصله بین



شکل ۱: شماتیک لامپ شیشه‌ای آزمایش فرانک - هرتز

دو شبکه G_1 و G_2 ، ولتاژ شتاب‌دهنده U_2 به این الکترون‌ها انرژی و شتاب می‌دهد. یک ولتاژ متوقف کننده U_3 بین شبکه G_2



شکل ۲: شماتیک جریان الکترون رسیده به جمع کننده به عنوان تابعی از ولتاژ شتاب

و جمع کننده A وجود دارد. فقط الکترونی هایی با انرژی جنبشی کافی می توانند به جمع کننده برسند و در جریان جمع کننده سهیم باشند.

در این آزمایش ولتاژ شتاب دهنده U_2 از صفر تا 30 ولت افزایش می یابد، در حالی که U_1 و U_3 ثابت نگاه داشته می شوند و جریان متناظر جمع کننده I_A اندازه گیری می شود. شکل ۲ شماتیکی از جریان جمع کننده را نشان می دهد. با افزایش پتانسیل شتاب دهنده U_2 ، جریان ابتدا افزایش می یابد و برخورد الکترون ها با اتم های جیوه کاملاً کشسان و بدون انتقال انرژی است؛ اما زمانی که انرژی جنبشی الکترون ها به میزان مورد نیاز برای تحریک اتم جیوه ($4.9eV E_{Hg}$) برسد، برخورد غیرکشسان رخ می دهد. بعد از برخورد، الکترون ها قادر به غلبه بر ولتاژ متوقف کننده U_3 نیستند و در نتیجه جریان جمع کننده شدیداً افت می کند. در ولتاژهای بالا نیز، جریان جمع کننده دوباره افزایش می یابد تا جایی که انرژی الکترون ها به انرژی لازم برای برانگیختگی دو اتم جیوه می رسد و مجدداً برخورد غیرکشسان رخ می دهد.

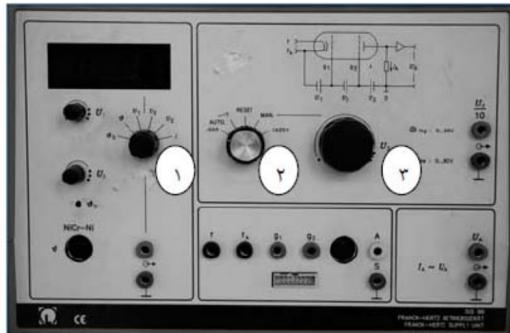
۲ وسایل آزمایش

- (۱) کوره
- (۲) لامپ با مشخصاتی که در مقدمه بیان شد
- (۳) دستگاه تامل کننده ولتاژها
- (۴) مولتی متر
- (۵) اسیلوسکوپ
- (۶) مجموعه منابع ولتاژها و نمایش مقادیر آنها که در یک دستگاه است (مطابق شکل ۳)

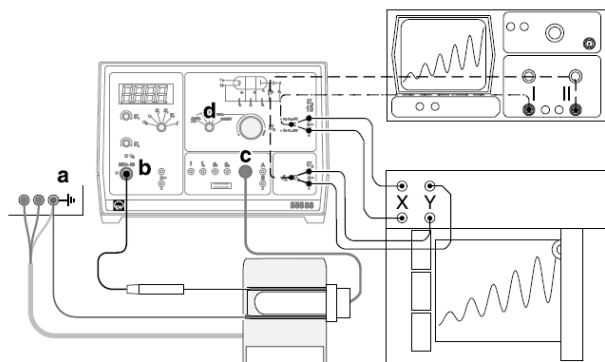
۳ شرح آزمایش

در دستگاه منابع ولتاژ، سه کلید وجود دارد که روی شکل شماره گذاری شده است. شماره ۱ مربوط به نمایش ولتاژها، جریان و دمای لحظه ای و پیشینه دما است. شماره ۳ تغییرات دستی پتانسیل شتاب دهنده را ممکن می سازد و تنها در صورتی تغییر آن ممکن است که کلید تنظیم شماره ۲ را روی حالت Manual قرار داده باشیم. این کار را در آزمایش ۲ انجام می دهیم که جریان یا ولتاژ جمع کننده را با استفاده از یک مولتی متر می خوانیم؛ اما در آزمایش اول که نمایش کلی را در اسیلوسکوپ مشاهده می کنیم، کلید تنظیم شماره ۲ را در حالت موج دندانه ای قرار می دهیم.

باید توجه کرد که در حین کار لامپ را جابجا نمی کنیم و به نور ایجاد شده در لامپ مستقیم نگاه نمی کنیم. شکل ۴ به طور کامل نحوه اتصال دستگاه ها به یکدیگر را نشان داده است. مطابق همین شکل، کوره را به برق شکل و ترموکوپل را نیز به دستگاه اصلی آزمایش وصل می کنیم. سپس کوره را روشن کرده و منتظر می شویم تا دما به تعادل 170 درجه ای برسد. در این شرایط است که فشار بخار جیوه درون لامپ ثابت خواهد بود.



شکل ۳: مجموعه دستگاه آزمایش فرانک هرتر



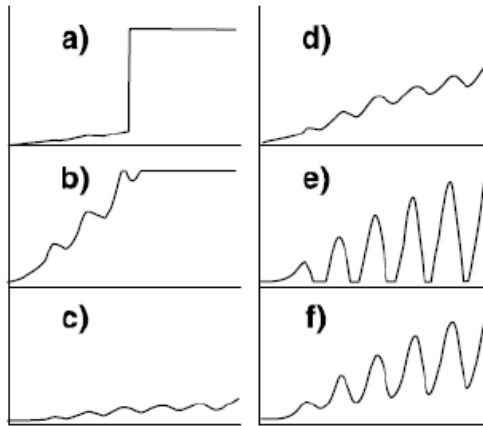
شکل ۴: مجموعه وسایل و چیدمان آزمایش و نحوه اتصال آنها

۱.۳ آزمایش اول

در آزمایش اول از اسیلوسکوپ برای نمایش کلی جریان جمع‌کننده با افزایش ولتاژ شتاب‌دهنده استفاده می‌کنیم. کلید وضعیت ۲ (شکل ۳) را که مربوط به کنترل U_2 است را در حالت دندان‌اره ای قرار می‌دهیم. برای نمایش جریان بر حسب ولتاژ U_2 ، مطابق شکل ۴ خروجی U_A را به کانال ۱ ($2V/DIV$) و $(U_2/10)$ را به کانال ۲ ($0.5V/DIV$) اسیلوسکوپ وصل می‌کنیم و آن را روی حالت XY قرار می‌دهیم. ابتدا U_1 و U_3 را روی 1.5 ولت تنظیم می‌کنیم. وقتی که دما به ۱۷۰ رسید آزمایش را شروع می‌نماییم. با تغییر U_1 و U_3 مقادیر بهینه آنها را برای مشاهده بهترین نمودار پیدا می‌کنیم. طرح‌هایی مختلفی که ممکن است مشاهده شود در شکل ۵ قابل مشاهده است.

۲.۳ آزمایش دوم

در این آزمایش کلید وضعیت شماره ۲ را در حالت manual قرار داده و U_A را از اسیلوسکوپ جدا می‌نماییم و به ولت‌متر وصل می‌کنیم. از مقادیر بدست آمده و بهینه U_1 و U_3 که در آزمایش ۱ به دست آورده‌ایم، استفاده می‌کنیم. آنگاه با تغییر U_2 از صفر تا سی ولت، خروجی U_A توسط ولت‌متر که متناسب با I_A است اندازه می‌گیریم و در جدول ۱ گزارش می‌کنیم. همین کار را برای دو مقدار دیگر ($U_1 = 2.0$) کمتر و بیشتر از مقدار بهینه) انجام می‌دهیم و نتایج آن را در جدول یک گزارش می‌نماییم.



شکل ۵: طرح‌های مختلفی که ممکن است در اسیلوسکوپ مشاهده شود

۴ هدف آزمایش

در این آزمایش با اندازه‌گیری پتانسیل U بر حسب U_2 به دنبال یافتن فواصل قله‌هاییم. چرا که این قله‌ها دقیقاً همان‌جایی هستند که برخورد کشسان رخ می‌دهد و می‌توان با یافتن فاصله هر دو قله، انرژی مورد نیاز برای تحریک اتم جیوه را بیابیم.

۵ جدول داده‌ها^۱

جدول ۱: تغییرات U نسبت به تغییرات U_2 برای مقدار ثانویه U_1 و مقدار بهینه U_3 بدست آمده از آزمایش اول

$U_2(V)$	$U(V)$	$U_2(V)$	$U(V)$	$U_2(V)$	$U(V)$	$U_2(V)$	$U(V)$
0	0.04	6.5	0.04	13	0.04	19.5	0.27
0.5	0.04	7	0.04	13.5	0.03	20	0.66
1	0.04	7.5	0.03	14	0.01	20.5	1.07
1.5	0.04	8	0.03	14.5	0.08	21	1.04
2	0.04	8.5	0.03	15	0.49	21.5	0.82
2.5	0.03	9	0.03	15.5	0.77	22	0.65
3	0.04	9.5	0.2	16	0.37	22.5	0.44
3.5	0.03	10	0.41	16.5	0.13	23	0.32
4	0.03	10.5	0.37	17	0.03	23.5	0.16
4.5	0.04	11	0.13	17.5	0.02	24	0.27
5	0.04	11.5	0.01	18	0.01	24.5	0.51
5.5	0.07	12	0.03	18.5	0.03	25	0.88
6	0.04	12.5	0.04	19	0.02	25.5	1.25

داده‌های بالا در حالت $U_1 = 1.09V$ و $U_3 = 1.17V$ اندازه‌گیری شده است.

جدول ۲: تغییرات U نسبت به تغییرات U_2 برای مقدار ثانویه U_1 و مقدار بهینه U_3 بدست آمده از آزمایش اول

$U_2(V)$	$U(V)$	$U_2(V)$	$U(V)$	$U_2(V)$	$U(V)$	$U_2(V)$	$U(V)$
0	0.01	6.5	0.00	13	0.02	19.5	0.78
0.5	0.01	7	0.00	13.5	0.06	20	1.21
1	0.00	7.5	0.01	14	0.27	20.5	1.44
1.5	0.01	8	0.01	14.5	0.68	21	1.51
2	0.00	8.5	0.06	15	0.95	21.5	1.25
2.5	0.01	9	0.23	15.5	1.23	22	1.05
3	0.00	9.5	0.47	16	1.11	22.5	0.78
3.5	0.01	10	0.74	16.5	0.53	23	0.69
4	0.04	10.5	0.82	17	0.35	23.5	0.62
4.5	0.12	11	0.41	17.5	0.20	24	0.69
5	0.31	11.5	0.08	18	0.16	24.5	1.21
5.5	0.27	12	0.02	18.5	0.45	25	1.35
6	0.06	12.5	0.01	19	0.84	25.5	1.66

داده‌های بالا در حالت $U_1 = 1.31V$ و $U_3 = 1.17V$ اندازه‌گیری شده است.

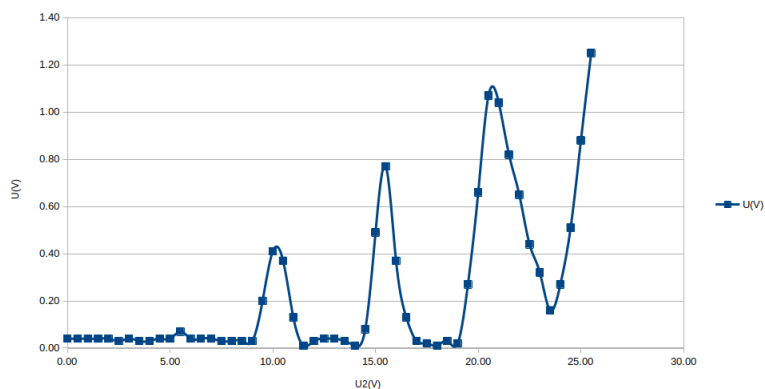
^۱ داده‌های این آزمایش از خانم ستاره فروزان دریافت شده است

جدول ۳: تغییرات U نسبت به تغییرات U_2 برای مقدار ثانویه U_1 و مقدار بهینه U_3 بدست آمده از آزمایش اول

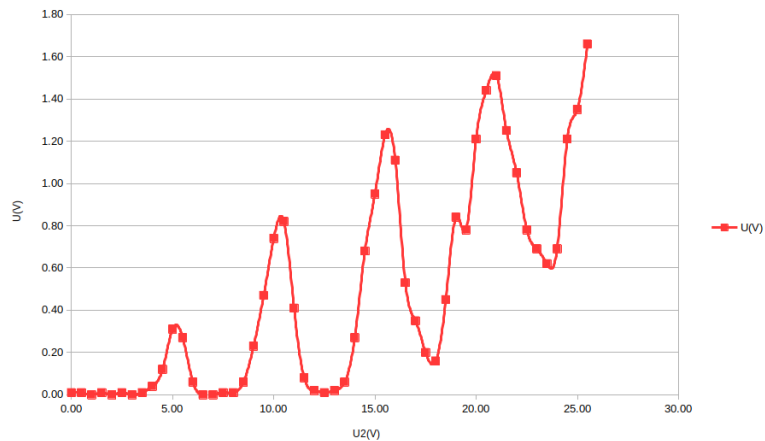
$U_2(V)$	$U(V)$	$U_2(V)$	$U(V)$	$U_2(V)$	$U(V)$	$U_2(V)$	$U(V)$
0	0.01	6.5	0.03	13	0.01	19.5	1.02
0.5	0.02	7	0.03	13.5	0.01	20	2.00
1	0.02	7.5	0.03	14	0.00	20.5	2.30
1.5	0.03	8	0.03	14.5	1.05	21	2.25
2	0.03	8.5	0.03	15	1.59	21.5	2.00
2.5	0.03	9	0.11	15.5	1.57	22	1.54
3	0.02	9.5	0.64	16	1.17	22.5	1.31
3.5	0.01	10	0.98	16.5	0.52	23	1.00
4	0.02	10.5	0.78	17	0.33	23.5	0.97
4.5	0.16	11	0.23	17.5	0.22	24	1.13
5	0.23	11.5	0.03	18	0.16	24.5	1.60
5.5	0.03	12	0.03	18.5	0.23	25	2.25
6	0.03	12.5	0.03	19	0.68	25.5	3.01

داده‌های بالا در حالت $U_1 = 1.31V$ و $U_3 = 1.17V$ اندازه‌گیری شده است.

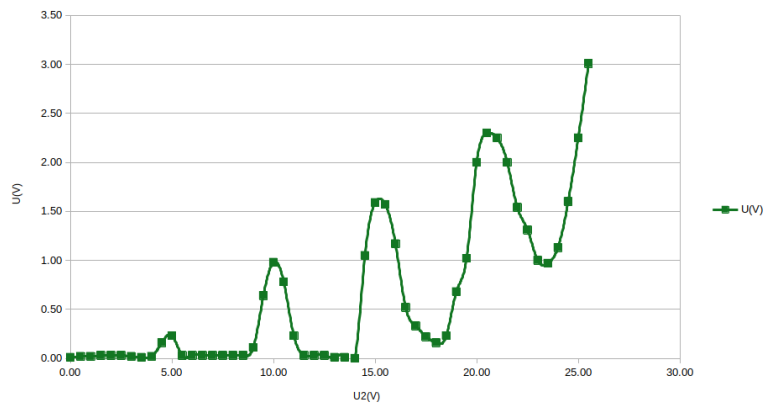
۶ نمودار داده‌ها



شکل ۶: نمودار U بر حسب U_2 برای جدول ۱



شکل ۷: نمودار U بر حسب U_2 برای جدول ۲



شکل ۸: نمودار U بر حسب U_2 برای جدول ۳

۷ خطا

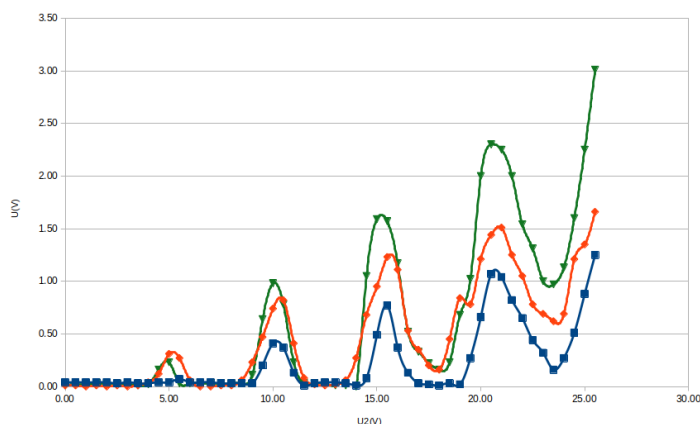
از عوامل خطای این آزمایش می‌توان به موارد زیر اشاره کرد:

- (۱) خطای سیستماتیک دستگاه‌های اندازه‌گیری
- (۲) خطای موجود در پتانسیل‌های بالا برای اسیلوسکوپ
- (۳) پتانسیل اولیه موجود در الکترودها که در نتیجه‌گیری به آن پرداخته شده است.

۸ نتیجه‌گیری

(۱) تغییرات ولتاژ U نسبت به U_2 برای سه مقدار مختلف U_1 در اشکال ۶، ۷ و ۸ قابل مشاهده است. در هر یک از این نمودارها هنگامی که پتانسیل صفر است، در واقع برخوردهای کشسان رخ داده است و بدون انتقال انرژی است و جریان همچنان افزایش می‌یابد؛ اما هنگامی که انرژی الکترون‌ها به انرژی تحریک می‌رسد برخورد ناکشسان شده و بعد از برخورد ولتاژ متوقف‌کننده توانایی جمع‌آوری این‌ها را ندارد و بنابراین جریان افت کرده و پتانسیل نیز افت می‌کند. دوباره با افزایش ولتاژ، برخوردها کشسان می‌شود ولی وقتی بار دیگر به انرژی لازم برانگیختگی می‌رسد برخورد ناکشسان شده و همانند استدلال قبل، دوباره جریان افت

می‌کند و این موضوع چندین بار رخ می‌دهد که در نمودارها واضح است. اگر بخواهیم این نمودارها را با یکدیگر مقایسه کنیم، شکل ۹ گویای این تفاوت‌هاست. در نمودار آبی که حالت بهینه است، کمترین حساسیت به تغییرات قابل مشاهده است در صورتی که اگر کمی از حالت بهینه پتانسیل متوقف‌کننده دور می‌شویم تا جای ممکن این جریان افزایش پیدا می‌کند. (۲) فاصله بین دو قله به ما انرژی لازم برای برانگیختگی اتم جیوه را می‌دهد. با توجه به نمودار جدول ۱ (شکل ۶)، داریم:



شکل ۹: نمودار U بر حسب U_2 برای تمامی جداول

$$\Delta E_1 = 5.5 \pm 0.1 eV \quad (1)$$

$$\Delta E_1 = 5.0 \pm 0.1 eV \quad (2)$$

با میانگین‌گیری از دو فاصله بالا، مقدار بهینه‌تر انرژی لازم بدست خواهد آمد:

$$E_{Hg} = 5.3 \pm 0.1 eV \quad (3)$$

که مقدار دقیق‌تر آن طبق داده‌های دانسته از قبل برابر با $4.9 eV$ است بنابراین ۸ درصد خطا داریم. (۳) نور گسیل شده از گاز ناشی از تحریک اتم‌های جیوه مشخصات زیر را داراست:

$$\lambda = \frac{hc}{E} = 234 \pm 4 nm \quad (4)$$

بنابراین نور گسیلی از این گاز در محدوده فرابنفش قرار دارد. (۴) برانگیختگی‌های مرتبه بالاتر زمانی رخ می‌دهد که تمامی الکترون‌های پایه به اولین مرتبه برانگیختگی یعنی $n = 2$ بروند و در آن صورت اگر انرژی گذار از برانگیختگی اول به دوم را دریافت کنند به لایه $n = 3$ خواهند رفت. اما با توجه به این آزمایش چنین اتفاقی رخ نمی‌دهد.

(۵) مکان اولین بیشینه در پتانسیل مورد انتظار نیست و کمی از فواصل قله‌های بعدی بیشتر است، دلیل آن نیز وجود یک پتانسیل الکتروستاتیکی است در ابتدا میان الکترودها وجود دارد. به این دلیل اولین جهش کمی تحت تاثیر این خطا قرار می‌گیرد اما همان که پتانسیل افزایش پیدا می‌کند این خطای سیستماتیک رفع می‌گردد و قابل اغماض می‌شود.

(۶) نمودارهای جداول سه‌گانه بر روی یک خط صعودی سوار است چرا که با افزایش پتانسیل U_2 و در نتیجه افزایش U توانایی جمع کردن الکترون‌ها توسط U_3 کاهش می‌یابد. وقتی به پتانسیل‌های بحرانی می‌رسیم، الکترودها جمع‌کننده زور بیشتری پیدا می‌کند تا بعد از برخورد کشسان، آنها را جمع کند؛ اما باز هم با افزایش بیشتر پتانسیل شتاب‌دهنده این توانایی کم و کم‌تر می‌شود. (۷) اهمیت U_3 در نمایش آن قله‌هاست. چرا که اگر U_3 وجود نداشت، بعد از برخورد کشسان، الکترودها جمع‌کننده‌ای بر الکترون‌ها

اثر نمی‌کود تا پتانسیل را کاهش دهد و در این صورت قله‌ای بوجود نمی‌آید و یافتن پتانسیل‌های بحرانی ممکن نبود. (۸) اهمیت آزمایش فرانک در نشان دادن کوانتومی بودن ترازهای الکترونی است. در حقیقت با مشخص شدن این قله‌ها و نیز رخ دادن برخوردهای ناکشسان و سپس جمع شدن آنها، وجود یک انرژی گسسته‌ای پدیدار می‌شود که در فیزیک کلاسیک (پیوسته) قابل توصیف نیست و اینجاست که برتری مدل‌های کوانتومی من جمله مدل اتمی بور آشکار می‌شود. (۹) با افزایش چگالی احتمال رسیدن الکترون‌ها به نقطه انتهایی افزایش می‌یابد؛ چرا که تعداد الکترون‌های بیشتری در معرض پتانسیل الکترودها قرار می‌گیرند و جریان نیز به تبع آن افزایش می‌یافت. بنابراین نمودار شیب بیشتری می‌گرفت. (همانند افزایش شیب و تیز شدن نمودار در جداول ۲ و ۳)

(۱۰) مزیت استفاده از عنصر جیوه، مایع بودن آن در دمای اتاق است و می‌توان به راحتی بخاری از آن داشت. از طرفی اختلاف انرژی ترازهای جیوه کم است و این باعث می‌شود قله‌های بیشتری در آزمایش قابل مشاهده باشد. از لحاظ نظری بهتر بود از گازهای نجیب مانند هلیوم و آرگون استفاده کنیم چون پیوندهای مولکولی تشکیل نمی‌دهند؛ اما چون برای ایجاد اولین قله نیازمند اعمال پتانسیل بیشتری هستیم.

(۱۱)

