

# بسم الله الرحمن الرحيم

گزارش آزمایشگاه فیزیک ۴ – دکتر ایرجی زاد

گروه اول – چهارشنبه از ساعت ۱۰:۰۰ الی ۱۴:۰۰

آزمایش سوم

آزمایش فرانک هرتز

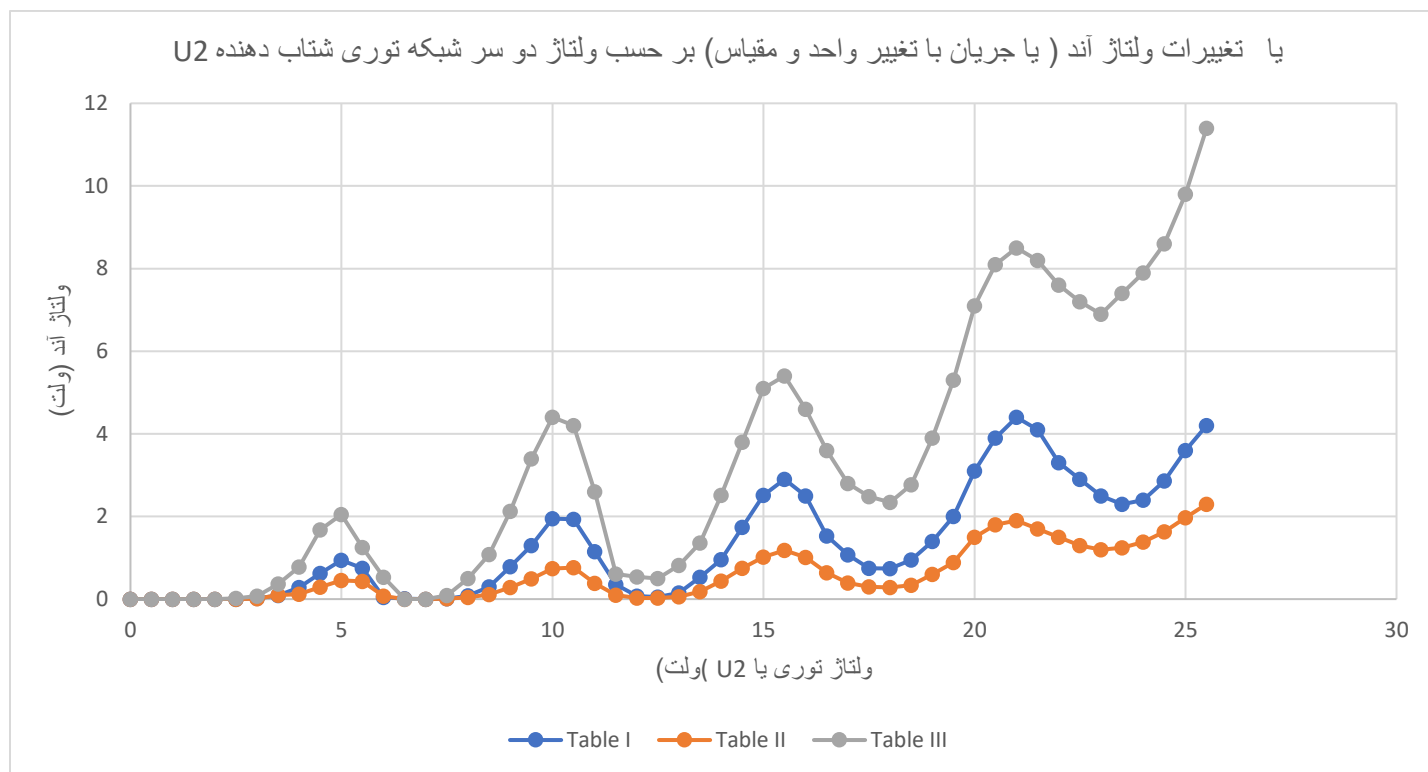
حسین محمدی

۹۶۱۰۱۰۳۵

در این آزمایش گسستگی تراز های انرژی اتم جیوه را با آزمایشی که فرانک هرتز طراحی کرد دیدیم، و به بررسی یک سری از مسائل در این آزمایش پرداختیم؛ با نمودار ها شروع می کنیم:

در این جا از آوردن جدول داده ها خودداری می کنم و فقط نمودار و تحلیل داده را می آورم.

در ابتدا نموداری که جریان آند بر حسب ولتاژ  $U_2$  بود را می آوریم:



نمودار ۱: ولتاژ آند بر حسب ولتاژ  $U_2$  (یعنی ولتاژ شبکه توری) در آزمایش فرانک هرتز

این شکل تاییدی است بر گسستگی ترازهای اتمی، هر چند خود هرتز اول تصور کرد که لابد این انرژی ها نشانگر یونش اتم جیوه هستند ولی بعدا با مقایسه با نمودار تابش جیوه، و با مقایسه محدوده انرژی ها به این نتیجه رسید که بایستی این گذارها مربوط به گذار الکترون بین ترازهای اتمی باشد و لاجرم تایید می شود بر نظریه ای که بور ارائه داده بود.

و این مقادیر برای انرژی گذار الکترون در اتم جیوه حاصل شد:

جدول ۱: انرژی گذار الکترون در اتم جیوه که از روی نمودار ۱ خوانده شده است.

جدول ۱	جدول ۲	جدول ۳
۵	۵,۵	۵
۵,۵	۵	۵,۵
۵,۵	۵,۵	۵,۵
۵,۵	۵,۵	۵,۷۵
۵,۵	۵,۷۵	۵,۵
۵,۵	۵	۵

۵,۲۵	۵,۲۵	۵,۲۵
۵,۳۳	۵,۳۳	۵,۳۳
۵,۵	۵,۲۵	۵,۵
۵,۵	۵,۶۲۵	۵,۶۲۵
۵,۵	۵,۴۲	۵,۴۲
۵,۵	۵,۳۷۵	۵,۲۵

و در نهایت برای مقدار میانگین و انحراف معیار، به جدول زیر می‌رسیم:

جدول ۲: میانگین و خطای انرژی گذار الکترون در اتم جیوه

میانگین	۵,۴۲۳۳۳۳	۵,۳۷۵	۵,۳۸۵۴۱۷
انحراف معیار	۰,۱۵۰۲۴۱	۰,۲۱۷۲۸۴	۰,۲۲۰۰۱۴

پرسش‌ها:

۱. تغییرات  $U_1$  چه تغییری در منحنی جریان بر حسب  $U_2$  اعمال می‌کند؟ صفر  $U_1$  کردن چه اثری دارد؟

این پتانسیل در حقیقت انرژی اولیه ای را به الکترون‌ها می‌دهد تا وارد محفظه توری شوند.

همچنین با زیاد کردن  $U_1$ ، چون تعداد الکترون‌هایی که از طرح کاتد کنده می‌شود افزایش می‌یابد، پس لاجرم جریانی که در آمپرسنج مشاهده می‌شود هم زیاد می‌شود، و علی‌الاصول بایستی به ازای  $U_1$ ‌های بیشتر، پتانسیل زودتر به مقدار ماکسیمم برسد چرا که انرژی الکترون‌های ورودی به محفظه توری‌ها بیشتر است و احتمال زیادتری دارد که به آن‌د برسند.

صفر کردن آن باعث می‌شود که کنده شدن الکترون از کاتد کمی سخت‌تر شود ولی علی‌الاصول مدار همچنان جریان دارد و اتفاقی نمی‌افتد.

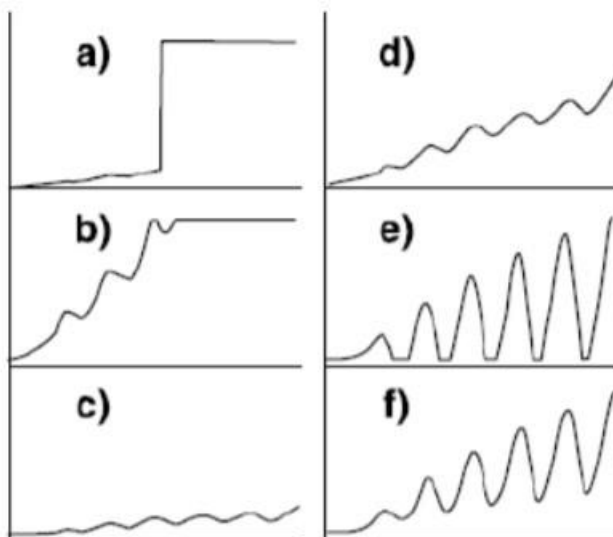
۲. تغییرات  $U_3$  چه تغییری در منحنی جریان بر حسب  $U_2$  اعمال می‌کند؟ صفر  $U_3$  کردن چه اثری دارد؟

اما می‌شود گفت که در حقیقت ولتاژ  $U_3$  یکی از مهمترین ولتاژهایی است که در این آزمایش اثر دارد، این ولتاژ در حقیقت برای این تعبیه شده است که کار جمع کردن الکترون‌هایی که برخورد غیر کشسان انجام داده‌اند را انجام دهد (یا اگر ولتاژ  $U_3$  کم باشد، این الکترون‌ها بسیار کند می‌شوند)؛ چرا که هدف ما از این آزمایش

فهمیدن یک معیاری است که این الکترون های کنده شده دارای چه انرژی ای بودند که با استفاده از آن بتوانیم به طیف اتم جیوه پی ببریم.

توجه کنید که صفر کردن این ولتاژ، اشتباه است چرا که باعث می شود تمامی الکترون ها در آند جمع شوند، چه آنهایی که انرژی از دست نداده اند و چه آنهایی که برخورد غیر کشسان داشته اند (یعنی انرژی شان را به الکترون در اتم جیوه دادند). در نهایت جمع کردن همه ی این الکترون ها به ما نمی گوید که دقیقا انرژی ها چگونه از دست رفته اند و هدف ما برای شناخت طیف اتم جیوه محقق نمی شود.

۳. کدامیک از طرح های موجود در شکل زیر مناسب است؟ چرا؟ چه ایرادی به طرح های دیگر وارد است؟



شکل ۱: شکل های مختلف مشاهده شده در اسیلوسکوپ برای آزمایش فرانک هرتز

قطعا بهترین شکلی که ما قصد داریم به آن برسیم، شکل f است. حال باید دانه به دانه ایرادهای سایر اشکال را بیان کنیم:

- در نمودار e می بینیم که کمینه های نمودار به شکل کاملا صاف در آمده اند، یعنی که با تغییر ولتاژ همچنان ممکن است جریان صفر بماند؛ این اشکال به این علت رخ داده است که ولتاژ بازدارنده را بسیار زیاد اعمال کرده ایم؛ همچنین از فاصله ی بین مینیمم ها و ماکسیمم های متوالی معلوم است که ولتاژ بازدارنده زیاد است. یک علت احتمالی دیگر این می تواند باشد که دمای کوره زیاد است پس در نتیجه غلظت بخار جیوه بالا می رود و این باعث می شود که در ولتاژ مینیمم، تمامی الکترون ها، انرژی خود را از دست بدهند و به خاطر ولتاژ بازدارنده به آند نمی رسند.

- در نمودار  $d$  فاصله ی بین قله ها و دره ها بسیار کم است و نشان از این دارد که ولتاژ بازدارنده به حدی قوی نیست که تفکیک بین الکترون هایی که انرژی از دست داده اند و الکترون هایی که انرژی شان را حفظ کرده اند، انجام دهند.
- در نمودار  $c$  جریان زیاد نیست و این نشان از این است که به تعداد کافی الکترون به سیستم تزریق نشده است و پیشنهادی که می شود داد این است که دمای فیلامان را بالا برد یا کاتد را گرم تر کرد تا الکترون های بیشتری کنده شوند تا این مشکل مرتفع شود.
- در نمودار  $a$  و  $b$  تصور من این است که دستگاه به خوبی ست نشده است؛ حدس من این است که محدوده تغییرات ولتاژ  $U_2$  آن قدر زیاد است که تمامی الکترون ها به انرژی های بالاتر از انرژی لازم برای گذار بین ترازهای در اتم جیوه می رسند و این یعنی که تقریباً تمامی الکترون ها در آند جمع می شوند و یعنی جریان به مقدار اشباعی می رسد.  
توجه کنید که شاید سوال کنید که مگر جریان با ولتاژ رابطه خطی ندارد؟ پس چرا جریان اشباع می شود؟ پاسخ این است که تعداد الکترون های تزریقی در سیستم ثابت است و با دمای فیلامان کنترل می شود، پس افزایش ولتاژ  $U_2$  واقعاً تاثیری در تعداد الکترون های تزریقی در سیستم ندارد و وقتی که تمامی الکترون ها به آند برسند، جریان اشباع می شود ( صرفنظر از ولتاژ  $U_2$  )  
توجه شود که اگر ولتاژ بازدارنده صفر بود، از همان ابتدای نمودار باید جریان بیشینه می بود، در حالی که از ابتدا، جریان صفر یا دارای مقدار غیر اشباع است، و این یعنی که ولتاژ بازدارنده نمی تواند صفر باشد.

#### ۴. چه مقادیر بهینه ای برای $U_1$ و $U_3$ به دست آوردید؟

راستش در آزمایشگاه نبوده ام ولی مقادیری که به دست آمده و در فایل آمده بود به شرح زیر است:

$$U_1 = 1.1 \text{ V}$$

$$U_3 = 1.91 \text{ V}$$

#### سوالات:

۱. تغییرات ولتاژ  $U$  بر حسب ولتاژ  $U_2$  را برای سه مقدار مختلف  $U_1$  در یک نمودار رسم کنید و ضمن مقایسه، آن ها را تفسیر کنید.

شکل رسم شده همان نمودار یک است و می بینید که برای مقادیر مختلف  $U_1$  نمودارهای مختلفی به دست می آید و توجه شود که :

$$U_1(\text{Table ۱}) = ۱.۱$$

$$U_1(\text{Table ۲}) = ۰.۹$$

$$U_1(\text{Table ۳}) = ۱.۳$$

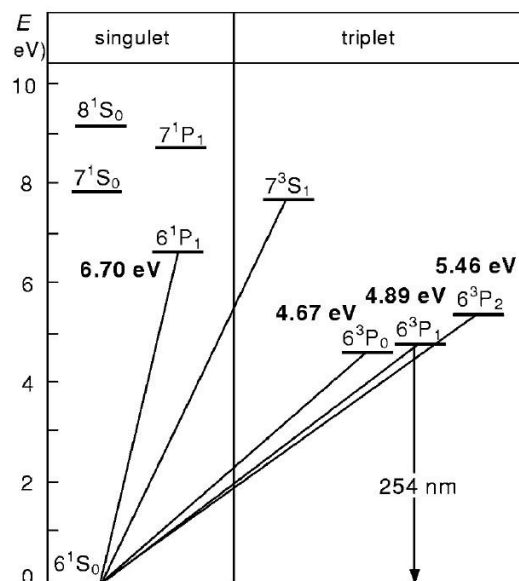
می بینیم که این انرژی اولیه باعث می شود که ماکسیمم های نمودار های مختلف تغییر کند، داده های جدول شماره ۱ که برای مقادیر بهینه هستند را در نظر بگیرید، مشاهده می شود که داده های جدول ۳ در بالای این داده های جدول ۱ و داده های جدول ۲ در پایین داده های جدول ۱ هستند و این به این دلیل است که انرژی اولیه الکترون ها باعث شده که در نهایت تعداد الکترون های اولی بتوانند از ولتاژ بازدارنده به سلامت عبور کنند و جریان را بیشتر نشان دهند.

۲. انرژی برانگیختگی اتم جیوه چقدر است؟ از جدول ۱ و منحنی ۱ سوال به دست آورید و با مقدار دقیق آن مقایسه کنید.

آنچه که از جدول و نمودار شماره یک به دست می آید؛ مقدار انرژی برانگیختگی اتم جیوه را برابر با

$$\Delta E_{Hg} = ۰.۳۸ \pm ۰.۱۹ \text{ eV}$$

به دست می دهد که محاسبات آن در فایل اکسل آمده است ولی مقدار دقیق آن را می توان از جایی جستجو کرد و دید:



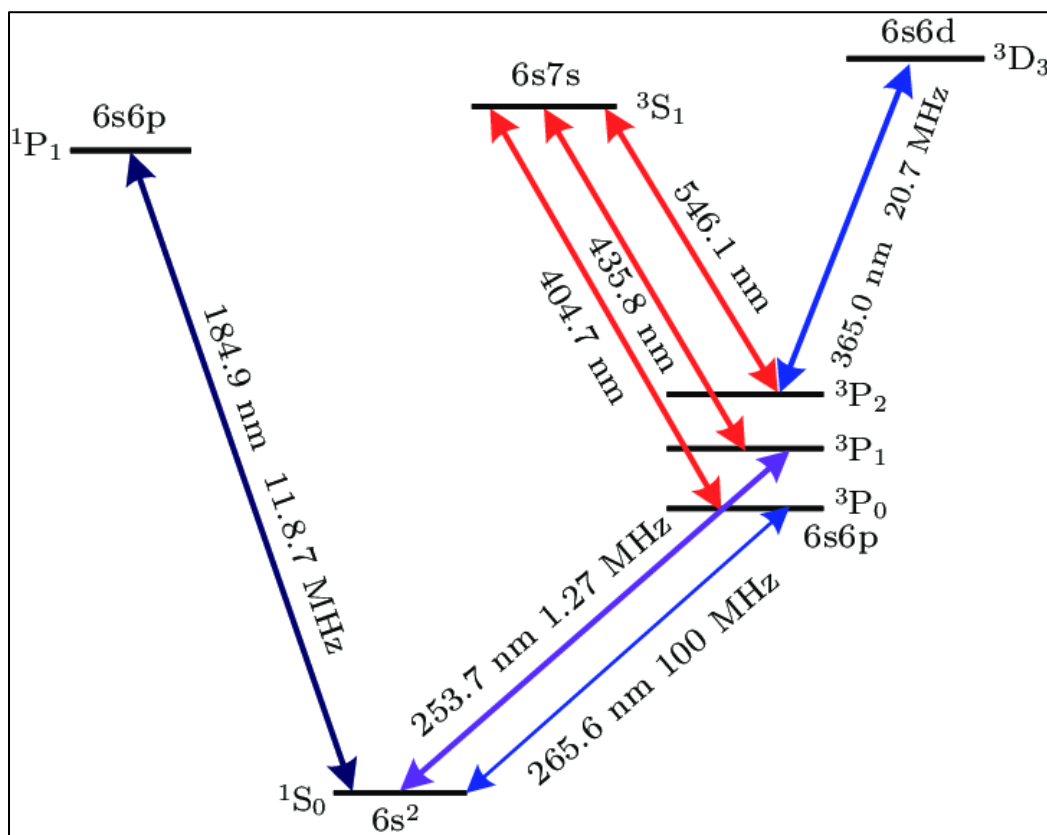
شکل ۲: گذارهای مختلف اتم جیوه بین ترازهای اتمی و انرژی متناظر هر گذار در پایین ترین مراتب گذار

می دانیم که احتمال گذار برای خط های طیفی شکل ۲ برای گذارهای  $6p$  به  $6s$  بیشینه است ولی به طور دقیق نمی توان گفت که کدام یک از این ۴ خط گذار رخ داده است؛ بلکه مخلوطی وزن دار از این گذارها در نمونه رخ داده است و در مجموعه به ما انرژی داده شده را در بالا داده است. (متداول ترین گذار برای اتم جیوه همان گذار دارای انرژی ۴.۹ الکترون ولت است) و همچنین به این نتایج باید این را افزود که خطاهای دستگاه و فرآیندهای دیگری که موجب از دست رفتن انرژی الکترون می شوند (تابش ترمزی) را هم باید لحاظ کرد.

به طور خلاصه، مقدار بدست آمده در مقایسه با مقدار ۴.۹ الکترون ولت بیشتر است و این خطا نیست بلکه معنای آن این است که ما با مخلوط خاصی از گذارها آزمایش را انجام داده ایم که این خود باعث بالا رفتن انرژی می شود.

### ۳. نور گسیل شده از گاز ناشی از تحریک اتم های جیوه چه طول موجی دارد و در چه ناحیه ای قرار دارد؟

همانطور که در نمودار بالا می بینید دارای طول موج حدودا ۲۵۰ نانومتری است و قطعا در ناحیه فرابنفش است و اگر بخواهیم به طور دقیق تر به طیف اتم جیوه نگاه کنیم:



شکل ۳: گذارهای مختلف اتم جیوه بین ترازهای اتمی و طول موج متناظر هر تراز

#### ۴. در ولتاژهای بالا آیا می توان قله ای مربوط به برانگیختگی مرتبه دوم یا بالاتر مشاهده کرد؟

دیدیم که وقتی ولتاژ شتاب دهنده بین توری ها را تا ۲۰ ولت تغییر می دهیم، علی الاصول این گذارها رخ می دهند، اما مسئله ای که مطرح است این است که احتمال تمامی این گذارها یکسان نیست (و اتفاقاً احتمال گذار به ترازهای بالاتر از  $6^3P_1$  بسیار کمتر است)، پس در جواب این سوال باید اشاره کنم که اگر چه این گذارها رخ می دهند ولی احتمال آن ها کم است و آن ها را در نتایج نهایی مشاهده نمی کنیم. هر چقدر هم ولتاژ را بالا ببریم، گذارهای مرتبه پایین رخ می دهند و تعداد نسبی گذارهای مرتبه دوم افزایش نمی یابد.

در مورد این که احتمال گذار ها را چطور باید حساب کرد به این مقاله<sup>۱</sup> رجوع بفرمایید.

متأسفانه زمان تحویل گزارش کار کم است و به من این اجازه را نمی دهد که این مقاله را به صورت خلاصه بنویسم و به آوردن یک جدول اکتفا می کنم.

جدول ۳: مقادیر احتمال گذار برای ترازهای مختلف در اتم جیوه در مقاله ارجاع داده شده

Table 2. The transition probability in units of  $10^8 \text{ sec}^{-1}$  for transitions from the reference levels.

$\lambda_{\text{nm}}$	Lower Level	A-Values (this paper) [ $10^8 \text{ sec}^{-1}$ ]	NBS Mono. 53 (Ref. 4) as pub.	renor- malized	Jean et al. (Ref. 1)	Pilz & Seehawer (Ref. 2)
Upper level $7^3S_1$ (62350), $g_u = 3$ , $1/\tau = \Sigma A = 1.205$						
404.7	$6^3P_0$	$0.186 \pm 0.005^*$	12.0	0.21	0.24	0.17
435.8	$6^3P_1$	$0.424 \pm 0.009^*$	28.7	0.50	0.49	0.43
546.1	$6^3P_2$	$0.592 \pm 0.009^*$	28.7	0.50	0.52	0.62
1207.2	$6^1P_1$	$0.003 \pm 0.001$		~0		
		$\Sigma A = 1.205$	69.34	1.21		
Upper level $7^1S_0$ (63928), $g_u = 1$ , $1/\tau = \Sigma A = 0.326$						
407.8	$6^3P_1$	0.043	2.6	0.045		
1014.0	$6^1P_1$	0.283				
		$\Sigma A = 0.326$				
Upper level $8^1S_0$ (74405), $g_u = 1$ , $1/\tau = \Sigma A = 0.136$						
285.7	$6^3P_1$	0.0111				
491.6	$6^1P_1$	0.127				0.048
		$\Sigma A = 0.1381$				

\*Standard deviation for eight independent measurements at four different gas densities and two different discharge currents.



## ۵. چرا مکان اولین بیشینه در پتانسیل مورد انتظار نیست؟

اولا وقتی که الکترون از کاتد جدا می شود، انرژی اولیه آن صفر نیست و ثانيا وقتی پیش از ورود الکترون ها به محفظه توری ها، به آن ها ولتاژ  $U_1$  را اعمال می کنیم و به آن ها انرژی اضافه می دهیم؛ این خود باعث می شود که مقدار انرژی اولین قله، به اندازه ای با انرژی اولین گذار متفاوت شود. به همین دلیل است که ما در این آزمایش به اختلاف قله یا دره ها علاقه مند بودیم و به مقدار اصلی آن کاری نداشتیم.

## ۶. چرا نمودار روی یک خط صعودی سوار است؟

اگر غلظت گاز جیوه کم باشد، تمامی الکترون ها برخورد غیر کشسان ندارند و الکترون هایی باقی می ماند که انرژی عبور از پتانسیل بازدارنده را دارند و می توانند در مدار جریان ایجاد کننده و در آمپرسنج رویت شوند، ولی اگر غلظت گاز جیوه بسیار زیاد باشد، تمامی الکترون های گسیلی از سمت کاتد، انرژی خود را به الکترون موجود در لایه آخر اتم جیوه می دهند، و این باعث می شود که الکترون ها نتوانند از پتانسیل بازدارنده عبور کنند و در نتیجه جریان عبوری از آمپرسنج صفر می شود. (اشکال e و f در شکل شماره ۱)

و اما علت این که چرا این خط صعودی است؟

استدلال را با مثال توضیح می دهیم: فرض کنید که الکترون ها در توری از ۰ تا ۲۰ الکترون ولت انرژی می گیرد و فرض کنید که اتم جیوه در ۵ الکترون ولت گذار انجام دهد؛

پس از رسیدن الکترون ها به جایی که انرژی شان ۵ الکترون ولت شد؛ تعدادی از این الکترون ها انرژی از دست می دهند و به الکترون موجود در اتم جیوه می دهند (توجه کنید که تعدادی از آن ها انرژی از دست می دهند چرا که احتمال گذار یک نیست و در این آزمایش غلظت اتم های جیوه هم کم است)

حالا الکترون هایی که انرژی از دست نداده اند، قطعا در طرف دیگر آند جمع می شوند چون که در طی باقی مسیر اتم های جیوه نمی توانند انرژی از آن ها بگیرند و آن ها به راه خود ادامه می دهند تا در آند جمع شوند.

حالا سراغ فاز بعدی می رویم؛ جایی که الکترون های کند شده باز به انرژی ۵ الکترون ولت برسند؛ باز هم تعدادی از آن ها (بنابه احتمال گذار کوانتومی) انرژی خود را در فرایند برخورد غیر کشسان از دست می دهند ...

همین فرایند را می توان برای مرحله های بعدی هم تکرار کرد؛ لب کلام این است که در هر مرحله، تعداد کم و کمتری از الکترون ها انرژی خود را از دست می دهند، و این یعنی که تعداد بیشتری از الکترون ها تحت میدان

شتاب می گیرند و به آند یا جمع کننده می رسند؛ پس بدیهی است که هر چه تعداد این مرحله ( یعنی ولتاژ  $U_2$  ) بیشتر باشد، بایستی مقدار جریان مینیمم بیشتر شود، و این همان روند صعودی نمودار است.

## ۷. اهمیت $U_3$ چیست و آیا بدون اعمال این ولتاژ، آزمایش قابل انجام است؟

ولتاژ  $U_3$  یکی از مهمترین ولتاژهایی است که در این آزمایش اثر دارد، این ولتاژ در حقیقت برای این تعبیه شده است که کار جمع کردن الکترون هایی که برخورد غیر کشسان انجام داده اند را انجام دهد (یا اگر ولتاژ  $U_3$  کم باشد، این الکترون ها بسیار کند می شوند) ؛ چرا که هدف ما از این آزمایش فهمیدن یک معیاری است که این الکترون های کنده شده دارای چه انرژی ای بودند که با استفاده از آن بتوانیم به طیف اتم جیوه پی ببریم.

## ۸. اهمیت آزمایش فرانک هرتز را بیان کنید.

این اولین آزمایشی بود که گسسته بودن ترازهای انرژی اتمی را نشان می داد؛ و این در نوع خود اولین آزمایش برای تایید کوانتوم است (نه نظریه کوانتوم استاندارد بلکه ایده بور) و همچنین تئوری بور را که ترازهای اتمی را گسسته توصیف می کرد هم تایید می نمود.

## ۹. چگالی گاز جیوه چه اثری بر روی منحنی $I - V$ دارد؟ اگر فشار جیوه بیشتر شود چه اثری بر منحنی دارد؟

خب در بررسی شکل ۱ دیدیم که هر چه غلظت (یا همان تعداد بر واحد حجم که معادل با چگالی است) جیوه بیشتر باشد، مقدار مینیمم های نمودار  $I - V$  کمتر می شود چرا که الکترون های بیشتری برخورد غیر کشسان انجام می دهند و در دام پتانسیل بازدارنده گیر می افتند. و با کم کردن چگالی جیوه نمودار این اثر به خوبی مشاهده نمی شود، چون تعداد الکترون هایی که برخورد غیر کشسان انجام می دهند کم می شود و این باعث می شود که فاصله ی بین قله ها و دره ها کم شود و نمودار تقریباً پهن شود. (تقریباً مشابه نمودار C)

## ۱۰. مزیت استفاده از عنصر جیوه چیست؟ اگر مثلاً از گاز هلیوم استفاده کنیم نتیجه چه خواهد بود؟

فلزی است تک اتمی که تشکیل مولکول نمی دهد و مشکلات مدهای ارتعاشی و مدهای چرخشی را ندارد (چون این مدها عموماً کم انرژی هستند، ردیابی و کشف آن ها بسیار دشوارتر است) و علی الاصول می توانستیم از هر اتمی که تشکیل مولکول ندهد استفاده کنیم. ولی استفاده از اتم هلیوم یک دشواری دیگر دارد و آن این است که تنظیم ورود آن به محفظه کمی دشوار است، ولی برای تنظیم غلظت جیوه کافی است که دمای کوره را عوض کنیم تا غلظت گاز جیوه در محفظه تنظیم شود.

البته طیف انرژی هلیوم از ۲۰ الکترون ولت شروع می شود و برای مشاهده قله های متوالی بایستی  $U_2$  را خیلی زیاد کنیم مثلاً برای مشاهده ۴ تا قله بایستی حداقل تا ۸۰ ولت اختلاف پتانسیل را تغییر دهیم.

و این که در مصارف آزمایشگاهی امروز بیشتر از گازهای نجیب استفاده می شود و با جستجو در اینترنت یک نمونه از دستور کار آزمایش فرانک هرتز با اتم هلیوم را هم پیدا کردم.<sup>۲</sup>

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

با توجه به نکاتی که در حل سوال قبل گفتم، نمی توان گفت که دقیقاً اتم جیوه به کدام ترازها گذار کرده است ولی می توان گفت که قبل از گسیل الکترون ها به سمت اتم های جیوه، الکترون های اتم جیوه در تراز  $6s$  قرار دارند ولی پس از برخورد غیر کشسان، الکترون های اتم جیوه در تراز  $6p$  یافت می شوند. حالت الکترون لایه آخر قبل از برخورد:

$$(n, l, m_l) = (6, 0, 0)$$

حالت الکترون لایه آخر بعد از برخورد:

$$(n, l, m_l) = (6, 1, -1)$$

$$(n, l, m_l) = (6, 1, 0)$$

$$(n, l, m_l) = (6, 1, 1)$$

$$(n, l, m_l) = (7, 0, 0)$$

یا به طور بسیار خلاصه تر:

$$1s^2 / 2s^2 / \dots / 6s^2 \text{ : قبل از برخورد}$$

$$1s^2 / 2s^2 / \dots / 6s^1 6p^1 \text{ : بعد از برخورد}$$

<sup>۲</sup> [http://www1.phys.vt.edu/~labs/phys3450/fall07/ph3450\\_franckhertz\\_writeup.pdf](http://www1.phys.vt.edu/~labs/phys3450/fall07/ph3450_franckhertz_writeup.pdf)