دانشگاه الزهرا

آزمایشگاه فیزیک پایه ۴

دانشکده فیزیک

مینائی فرد

مهرماه ۱۴۰۱

فهرست:

انحراف پرتو کاتودیک در میدان مغناطیسی و میدان الکتریکی ۲
موجی بودن پرتو کاتودیک ۹
پدیده‌ی فتوالکتریک ۱۵
اندازه‌گیری e/m بطور دقیق..... ۲۲
مشاهده یونیزاسیون گاز هلیوم در لامپ سه قطبی گازی ۲۶
آزمایش فرانک هرتز با لامپ سه قطبی گازی..... ۳۰
آزمایش فرانک هرتز با لامپ چهار قطبی جیوه..... ۳۴
آزمایش تابش جسم سیاه..... ۴۱
قانون کیرشهف ۵۱
بررسی سری بالمر در اتم هیدروژن ۵۴
اثر زیمان..... ۶۴
آزمایش قطره روغن میلیکان..... ۷۴
تخلیه الکتریکی گازها..... ۸۱
مشاهده‌ی فلوئورسانس و فسفرسانس تحت تابش اشعه‌ی ماورابنفش و لامپ صلیبی..... ۸۴

آزمایش ۱

انحراف پرتو کاتودیک در میدان مغناطیسی و میدان الکتریکی

هدف آزمایش:

اندازه‌گیری سرعت حرکت الکترون، اندازه‌گیری مقدار e/m با استفاده از میدان مغناطیسی

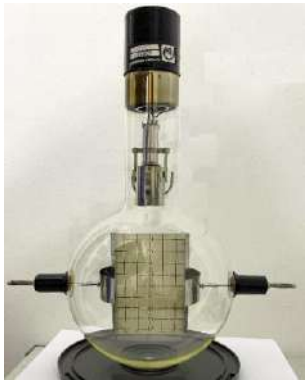
وسایل مورد نیاز:

لامپ کاتودی مخصوص آزمایش انحراف و پایه‌ی نگهدارنده‌ی آن، یک ترانسفورمر ۶ ولت و ۱/۵ آمپری برای روشن کردن فیلامان، ۲ منبع تغذیه‌ی DC ولتاژ بالا، سیم‌پیچ‌های هلمهولتز، منبع DC مخصوص سیم‌پیچ هلمهولتز، آمپرمتر، ۲ عدد کیلوولتمتر

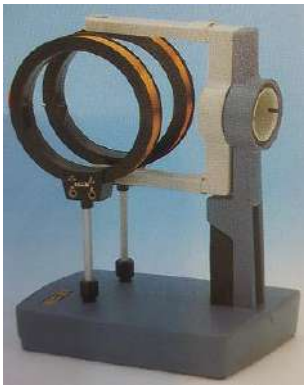
تئوری آزمایش:

برای اولین بار تامسون در سال ۱۸۹۷ مقدار $\frac{e}{m}$ را اندازه‌گیری نمود. سیستم مورد استفاده‌ی او تشکیل شده بود از یک لامپ خلأ که در آن دو الکترود کاتد و آند قرار دارد. الکترون‌های ایجاد شده از کاتد بوسیله‌ی اعمال یک ولتاژ بالا به آند شتاب یافته و بر روی پرده‌ی فلوئورسانی که در مقابل آن بود، در نقطه‌ی O اثر می‌گذاشت (شکل ۱-۳).

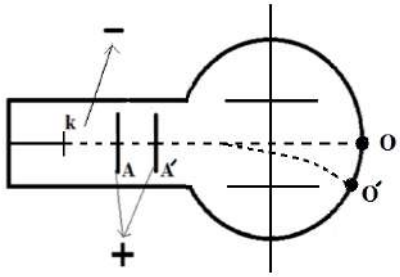
همانطور که در شکل ۱-۱ پیداست، در مسیر حرکت پرتو ۲ صفحه‌ی موازی خازن P_1 و P_2 قرار گرفته بطوریکه وقتی اختلاف پتانسیل U_p بین صفحات اعمال می‌گردد، میدان الکتریکی یکنواخت ایجاد شده بین این دو صفحه باعث انحراف پرتو شده و پرتو روی صفحه‌ی فلوئورسان در نقطه‌ی O' اثر می‌گذارد.



شکل۱-۱: لامپ کاتودی



شکل۱-۲: سیم‌پیچ‌های هلمهولتز، لامپ در فضای بین این دو سیم‌پیچ‌ها قرار می‌گیرد.



شکل۱-۳: انحراف پرتو کاتودیک در میدان الکترواستاتیکی

با استفاده از یک سیم‌پیچ هلمهولتز (شکل۱-۲) میدان مغناطیسی یکنواختی در فضای بین صفحات خازن ایجاد می‌گردد که این میدان عمود بر راستای حرکت پرتو و همچنین عمود بر راستای میدان الکتریکی است. از آنجاییکه میدان مغناطیسی خود باعث انحراف پرتو می‌شود، پرتو به مکان اولیه‌ی خود (یعنی نقطه‌ی O برمی‌گردد. در این حالت شدت میدان الکتریکی E و شدت میدان مغناطیسی B اندازه‌گیری می‌شود. نیروی وارده بر بارها در میدان الکتریکی برابر eE است که با نیروی وارد شده بر بار در میدان مغناطیسی ($F = BeV$) که در خلاف جهت آن می‌باشد، برابر است. از تساوی این دو رابطه نتیجه می‌شود که:

$$eE = BeV \qquad \Longrightarrow \qquad V = \frac{E}{B} \qquad (۱)$$

به این صورت سرعت حرکت الکترون محاسبه می‌شود.

با بررسی انحراف OO' در میدان الکترواستاتیکی، می‌توان مقدار $\frac{e}{m}$ را با داشتن سرعت V مربوط به الکترون بدست آورد. به این طریق که اگر ولتاژ صفحات خازن را با U_P و فاصله‌ی آن‌ها را با d نشان دهیم، این بارها با سرعت V در یک میدان الکتریکی یکنواخت ($E = \frac{U_P}{d}$) روی مسیر دایره‌ای به شعاع r حرکت می‌نماید و به اندازه‌ی y از مسیر اولیه‌ی خود منحرف می‌شوند. این انحراف در نتیجه‌ی یک شتاب عمودی (a_V) ثابت در میدان الکتریکی E تحت اثر نیروی ($F = eE$) بر این بارهاست که مقدار این شتاب برابر است با : $a_V = \frac{eE}{m}$

از آنجاییکه حرکت در راستای افقی یکنواخت است، زمان انتقال بار برابر است با: $t = \frac{X}{V}$

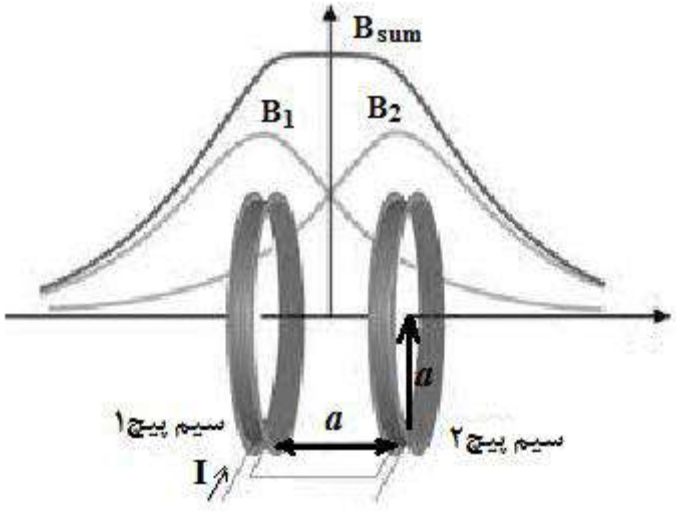
که در این رابطه V سرعت حرکت الکترون‌هاست. بنابراین می‌توان با داشتن شتاب a_V و زمان t مقدار انحراف y را بدست آورد.

$$y = \frac{1}{2}at^2 = \frac{1}{2}(\frac{eE}{m})(\frac{x}{V})^2$$

$$y = \frac{1}{2}\frac{e}{m}\frac{E}{V^2}x^2 \qquad (۲)$$

سیم‌پیچ‌های هلمهولتز و اندازه‌گیری مقدار H

به منظور ایجاد میدان مغناطیسی یکنواخت از دو سیم‌پیچ هلمهولتز استفاده می‌شود که دو سیم‌پیچ کاملاً مشابه یکدیگرند. صفحه‌ی حلقه‌های آنها به موازات هم بوده و کاملاً روبروی یکدیگر قرار دارند. در ضمن فاصله‌ی حلقه‌ها از یکدیگر درست برابر شعاع حلقه‌هاست و هنگامیکه از سیم‌پیچ‌ها جریان الکتریکی می‌گذرد، میدان مغناطیسی ایجاد می‌شود. در میان سیم‌پیچ‌ها (شکل ۲) میدان مغناطیسی، حاصل مجموع دو میدان مغناطیسی مربوط به دو سیم‌پیچ است. هر سیم‌پیچ، میدان مغناطیسی‌ای ایجاد می‌کند که مقدار آن در وسط حلقه بیشترین است و هرچه روی محور آن از سطح سیم‌پیچ دور می‌شویم از مقدار آن کاسته می‌شود ولی این کاهش توسط میدان مغناطیسی سیم‌پیچ دیگر جبران می‌شود. به این ترتیب در فضای بین دو حلقه‌ی سیم‌پیچ، میدان مغناطیسیِ یکنواختی ایجاد می‌گردد. در شکل (۲) منحنی‌های رسم شده تغییرات القای مغناطیسی مربوط به هر یک از سیم‌پیچ‌ها را نشان می‌دهد و حاصل جمع القای دو میدان مغناطیسی، میدان یکنواخت را ایجاد می‌کند.



شکل (۲) : شدت میدان مغناطیسی در فضای بین دو سیم‌پیچ تقریبا یکنواخت است.

با استفاده از رابطه‌ی بیوساوار می‌توان شدت میدان مغناطیسی تقریباً یکنواخت H را برای یک جفت سیم‌پیچ هلمهولتز از رابطه‌ی زیر تعیین نمود.

$$H = \frac{nR^2 I}{(R^2 + a^2)^{\frac{3}{2}}} \qquad (۳)$$

$n = 320$ تعداد حلقه‌های هر سیم‌پیچ

$R = 6.8 \ \ cm$ شعاع سیم‌پیچ

$a = 3.4 \ \ cm$ نصف میانگین فاصله‌ی دو سیم‌پیچ

با قراردادن مقادیر فوق در رابطه (۳)، H برابر می‌شود با:

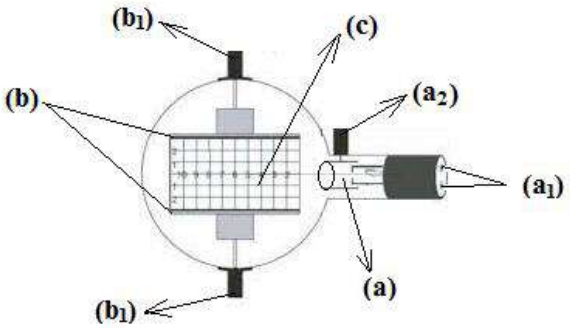
$$H = 33.8 \times 10^2 \times I \qquad (۴)$$

با اندازه‌گیری I که جریان عبوری از هر سیم‌پیچ است، مقدار H معین می‌شود. برای تعیین I در مدار باید دقت کنید که سیم‌پیچ‌ها در مدار بصورت سری به هم متصل شده‌اند یا موازی.

دو سر سیم‌پیچ به پریزهایی که بر روی حلقه‌ی سیم‌پیچ قرار دارند، وصل شده‌اند. این پریزها با علامت‌های (**O** و **II**) به ترتیب برای اتصال سری و موازی می‌باشند. با اتصال دو سیم‌پیچ به یک منبع DC و قرار دادن یک آمپرمتر در مدار (شکل ۶) می‌توان جریان عبوری از سیم‌پیچ را اندازه گرفت. اگر سیم‌پیچ‌ها بصورت سری باشند، مقدار I شدت جریان در رابطه (۴) همان مقداری است که آمپرمتر نشان می‌دهد. ولی چنانچه بصورت موازی بسته شده باشند، مقدار I نصف مقداری است که آمپرمتر نشان می‌دهد.

لامپ منحرف کننده‌ی پرتو الکترونی:

بوسیله‌ی این لامپ می‌توان رفتار اشعه‌ی کاتودیک را در دو میدان الکتریکی و مغناطیسی تحقیق نمود و با آزمایشاتی که در آن الکترون در میدان مغناطیسی یا میدان الکترواستاتیکی منحرف می‌شود، می‌توان بار ویژه‌ی الکترون ($\frac{e}{m}$) و سرعت الکترون را بدست آورد. برای مشاهده‌ی انحراف پرتو کاتودیک در میدان الکتریکی از دو صفحه‌ی خازن استفاده شده است که درون لامپ قرار داده شده است. برای تولید یک میدان مغناطیسی تقریباً همگن از یک جفت سیم‌پیچ هلمهولتز استفاده می‌شود که می‌توان انحراف پرتو را در این میدان مشاهده نمود. قسمت‌های مختلف این لامپ به قرار زیر است. (شکل ۳)



شکل (۳): Electron-beam deflection tube

a) یک تفنگ الکترونی که تشکیل شده از یک کاتد و یک فیلامان از جنس تنگستن که به حالت التهاب درمی‌آید و یک کاتد که به شکل استوانه می باشد.

a_1) یک جفت مادگی که به کاتد گرم شونده متصل می‌گردد (دوسر فیلامان).

a_2) شاخه‌ای که به آند استوانه‌ای شکل متصل می‌شود.

b) صفحات خازن برای انحراف در میدان الکتریکی

b_1) شاخه‌هایی که به صفحات خازن متصل می‌شود.

c) پرده‌ی فلوئورسانی که صفحه‌ی آن برحسب سانتی‌متر مدرج شده‌است.

نکته: ولتاژ فیلامان لامپ ۶ ولت است که می‌توان آن را بوسیله‌ی یک ترانسفورماتور $6V$ تأمین نمود. ولتاژ آند بین یک تا پنج کیلوولت است که می‌توان آن را به منبع تغذیه قدرت بالا وصل نمود. ولتاژ صفحات خازن بین یک تا یک‌ونیم کیلوولت است.

انحراف پرتو کاتودیک در میدان مغناطیسی

یک الکترون با جرم m و بار e که بطور عمود بر میدان مغناطیسی ($B = \mu_0 H$) حرکت می‌کند، بر اثر نیروی ($F = BeV$) از مسیر اولیه‌ی خود منحرف شده و تحت اثر نیروی جانب مرکز ($F = \frac{mV^2}{r}$) که از این میدان کسب می‌نماید، روی محیط یک دایره به شعاع r حرکت می‌کند که V در این رابطه سرعت الکترون است که این سرعت بوسیله‌ی ولتاژ آند (U_A) معین می‌شود. از تساوی دو رابطه‌ی نیرو داریم:

$$\mu_0 HeV = \frac{mV^2}{r} \qquad (۵)$$

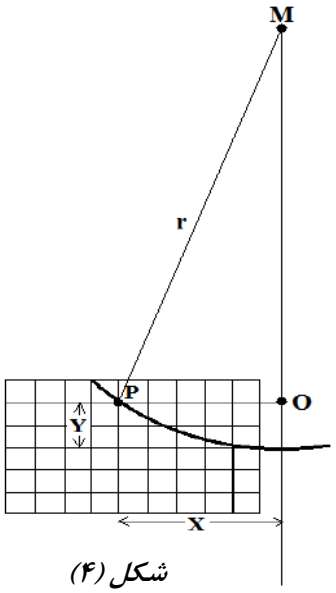
و همچنین برای تعیین سرعت حرکت الکترون داریم:

$$\frac{1}{2}mV^2 = eU_A \quad \Rightarrow \quad V = \sqrt{2\frac{e}{m}U_A} \qquad (۶)$$

از حذف V بین دو رابطه‌ی ۵ و۶ می‌توان مقدار $\frac{e}{m}$ را تعیین نمود.

$$\frac{e}{m} = \frac{2U_A}{\mu_0^2 H^2 r^2} \qquad (۷)$$

مقدار U_A بطور مستقیم بوسیله‌ی ولتمتر الکترواستاتیک اندازه‌گیری می‌شود و شدت میدان H را از رابطه‌ی (۴) محاسبه می‌کنیم. مقدار r را نیز در این رابطه به شرح زیر می‌توان بدست آورد:



شکل (۴)

اندازه‌گیری مقدار شعاع مسیر حرکت الکترون در میدان مغناطیسی (r)

به شکل (۴) توجه کنید. از روی مثلث MOP مقدار r بدست می‌آید که برابر است با:

$$r^2 = x^2 + (r - y)^2$$

که از این رابطه نتیجه می‌شود:

$$y = \frac{x^2 + y^2}{2r} \qquad (۸)$$

که با رسم نمودار ($x^2 + y^2$) برحسب y مقدار r از روی شیب منحنی بدست می‌آید.

روش انجام آزمایش:

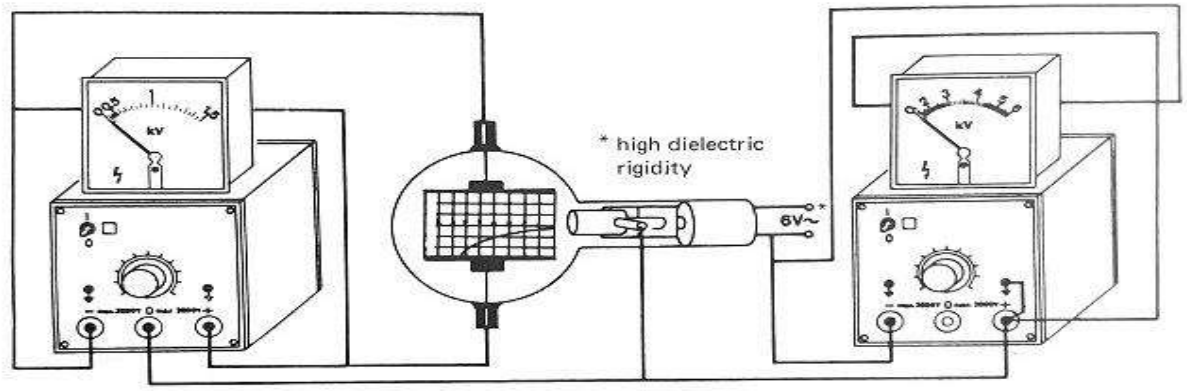
آزمایش ۱- اندازه‌گیری سرعت الکترون

روش اول: اندازه‌گیری سرعت الکترون به روش انحراف در میدان الکتریکی

مدار را مطابق شکل ۵ ببندید. کلید پله‌ای ولتاژ منبع تغذیه‌ی (A) را تا ۲ کیلوولت بالا ببرید. سپس بوسیله‌ی کلید پله‌ای ولتاژ منبع تغذیه‌ی (B) را که اختلاف پتانسیل صفحات خازن را تأمین می‌کند، ۱/۴ کیلوولت انتخاب کنید. دقت کنید که این ولتاژ از ۱/۵ کیلوولت بیشتر نشود. مقادیر x و y را از روی صفحه‌ی مدرج در جدولی یادداشت کنید.

(فاصله‌ی صفحات خازن $d=5.4\ cm$ است.)

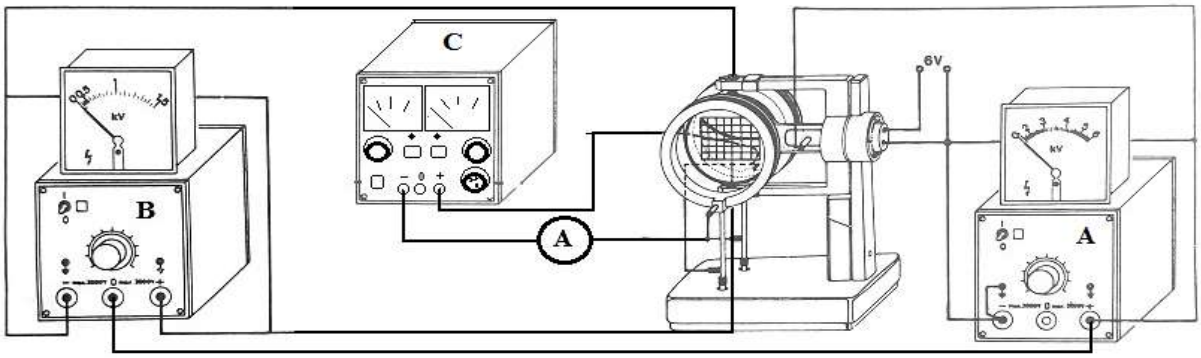
با استفاده از رابطه‌ی ۲ سرعت الکترون را تعیین کنید. ($V=\sqrt{\frac{1}{2}\frac{e}{m}\frac{Ex^2}{y}}$)



شکل (۵): مدار مربوط به روش اول از آزمایش ۱

روش دوم: اندازه‌گیری سرعت الکترون به روش تامسون

در این روش با استفاده از میدان مغناطیسی انحراف ناشی از میدان الکتریکی را که در آزمایش قبل ایجاد شده بود، خنثی می‌نماییم طوری‌که مسیر پرتو به خط راست تبدیل گردد. پس مدار را مطابق شکل (۶) ببندید و جریان گذرنده از سیم‌پیچ‌های هلمهولتز را توسط منبع C بالا ببرید تا جایی‌که مسیر الکترون دوباره خط راست شده و روی محور افقی قرار بگیرد. جریان سیم‌پیچ‌های هلمهولتز (I) را از روی آمپرمتر یادداشت نمایید و مقدار B را بدست آورید و مقدار سرعت (V) را با کمک رابطه‌ی (۱) ($V=\frac{E}{B}$) تعیین کنید و مقادیر سرعت‌های بدست آمده بوسیله‌ی هر دو روش را با یکدیگر مقایسه نمایید.



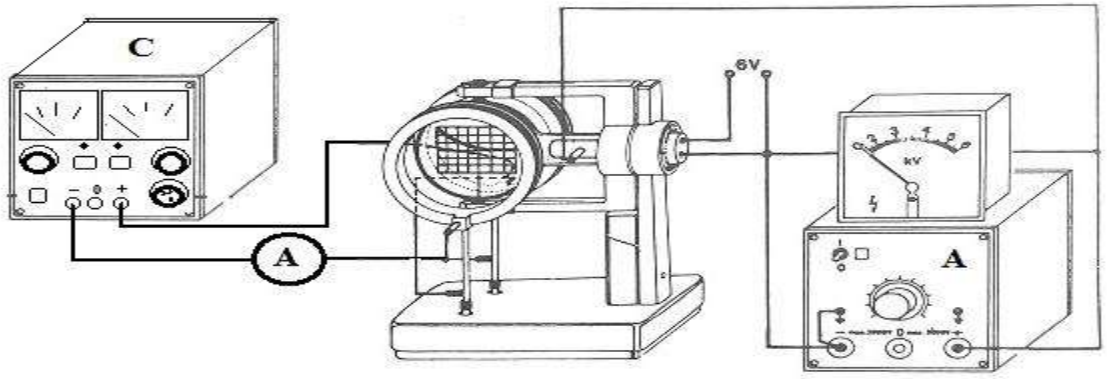
شکل (۶): مدار مربوط به روش تامسون در اندازه‌گیری سرعت الکترون

آزمایش ۲: اندازه‌گیری ثابت $\frac{e}{m}$ برای الکترون

مدار را مطابق شکل (۷) ببندید. (دقت کنید که مدار شامل دو قسمت است. قسمتی که شتاب لازم را به الکترون‌های جدا شده از کاتد می‌دهد و دیگری مداری که میدان مغناطیسی یکنواخت را ایجاد می‌نماید.)

دقت کنید:

۱) در هنگام بستن مدار از وارد آوردن هرگونه فشار اضافی به کلاهک بالای لامپ جلوگیری شود.
۲) قبل از اتصال به برق شهر کلید منبع تغذیه‌ی ولتاژ بالا روی صفر باشد.
۳) شاخه‌های b_1 و a_2 بوسیله‌ی پوششهای عایق مخصوص پوشانده شود تا از هرگونه تماس احتمالی جلوگیری شود.
۴) هنگامی که فیلامان کاتد روشن است، از هرگونه تکان دادن لامپ جلوگیری گردد.
۵) برای جلوگیری از فشار اضافی به لامپ، کابل‌هایی را که به لامپ متصل است از آن جدا نکنید.



شکل (۷): مدار مربوط به آزمایش ۲ ، اندازه‌گیری ثابت $\frac{e}{m}$ برای الکترون

بعد از بستن مدار و رعایت نکات فوق کلید منبع تغذیه را روشن نموده و کلید پله‌ای آن را تا ۳ کیلوولت بالا ببرید. بر روی صفحه‌ی مدرج خط بنفش رنگی ظاهر می‌گردد. با زیاد کردن جریان گذرنده از سیم‌پیچ‌ها، شدت میدان مغناطیسی را افزایش دهید. با زیاد شدن شدت میدان مغناطیسی، پرتو الکترونی منحرف می‌شود. مقادیر x و y را که در اثر انحراف پرتو بر روی صفحه‌ی فلوئورسان مشاهده می‌نمایید در جدول (۱) یادداشت کنید و مقادیر I و U_A را در این حالت در جدول ۲ بنویسید. (I شدت جریان عبوری از سیم‌پیچ‌های هلمهولتز است.)

آزمایش فوق را برای ولتاژ ۴ کیلوولت آند تکرار کنید و جدول (۱) و (۲) را کامل نمایید.

جدول(۱):

x	cm					
y	cm					
$x^2 + y^2$	cm					

جدول(۲):

U_A	(V)	۳	۴
I	(A)		
H	$\frac{A}{m}$		
$\frac{e}{m}$	$\frac{C}{Kg}$		

پرسش‌ها و بررسی نتایج:

۱) در آزمایش ۱ چرا آند را به صفر منبع تغذیه‌ی تأمین کننده اختلاف پتانسیل بین کاتد و آند وصل می‌کنیم؟ (شکل۵و۶)

۲) چرا صفحه‌ی فلوئورسان در لامپ به صورت مورب ساخته شده است؟

۳) با استفاده از مقادیر بدست آمده از روش اول (استفاده از میدان الکتریکی) و روش دوم (تامسون) برای محاسبه سرعت، سرعت‌های بدست آمده برای الکترون را با هم مقایسه کنید.

۴) در آزمایش ۲ ، با استفاده از جدول (۱) منحنی تغییرات y را برحسب $x^2 + y^2$ را رسم کنید.

۵) شیب این خط را بدست آورده و از روی آن مقدار r (شعاع انحراف پرتو) را محاسبه کنید.

۶) با توجه به جدول(۲) مقادیر $\frac{e}{m}$ را بدست آورده و میانگین آنها را با مقدار واقعی $\frac{e}{m}$ مقایسه نمایید.

$$(\frac{e}{m} = 1.7589 \times 10^{11} \quad \frac{C}{Kg})$$

آزمایش ۲

موجی بودن پرتو کاتودیک

وسایل مورد نیاز:

لامپ پراش، ترانسفورماتور ۶ ولتی برای گرم کردن فیلامان با جریان متناوب ۰,۳ آمپر، منبع تغذیه برای ولتاژ شتاب دهنده آند تا ۵ کیلوولت مستقیم با جریان خروجی ۳۰۰میکروآمپر، رئوستای ۱۱ اهم، کیلوولتمتر، آمپرمتر، میکروآمپرمتر حساس برای کنترل جریان کاتودیک، سیم‌های رابط.

تئوری آزمایش:

زمانی‌که با پدیده‌هایی چون پراش و تداخل برای نور سروکار داریم، مجبوریم نور را همچون امواجی بدانیم که کلیه‌ی خصوصیات آن توسط معادلات ماکسول بیان شده است و هنگامی که با پدیده‌هایی چون فتوالکتریک روبرو هستیم ناگزیریم که نور را حرکت ذرات فوتون بدانیم. این تناقض ظاهری در مورد ماهیت نور بدین ترتیب برطرف شد که ماهیت نور را دوگانه فرض کردیم. لوئی دوبروی در سال ۱۹۲۴ در رساله‌ی دکترای خود نظریه‌ی جالبی را ارائه داد و وجود امواج مادی را پیشنهاد نمود. فرضیه‌ی دوبروی این بود که رفتار دوگانه‌ی موجی- ذره‌ای در مورد ماده نیز به همان خوبی نور کاربرد دارد. درست همان‌طور که فوتون حاویِ موجِ نوریِ همبسته‌ای است که رفتار آن را مشخص می‌کند، به همان ترتیب ذره‌ی مادی مثلاً الکترون نیز یک موج مادی همبسته دارد که بر حرکت آن حاکم است. چون جهان تماماً از ماده تشکیل می‌شود. پیشنهاد دوبروی اساساً بیانی است وجود تقارن بزرگ در طبیعت. در حقیقت او پیشنهاد کرد که ارتباط بین وجوه موجی و ذره‌ای ماده دقیقاً به همان صورت کمی است که در مورد تابش وجود دارد. بنابر نظر دوبروی انرژی کل E هر چیز اعم از ماده یا تابش توسط معادله‌ی پلانک:

$$E = h\nu \qquad (۱)$$

به فرکانس ν موج همبسته با حرکت آن مربوط می‌شود و اندازه‌حرکت P آن توسط معادله‌ی:

$$P = \frac{h}{\lambda} \qquad (۲)$$

به طول موج λ موج همبسته مربوط می‌شود. در اینجا مفاهیم ذره‌ای یعنی انرژی E و اندازه‌حرکت P از طریق ثابت پلانک h به مفاهیم موجی، یعنی فرکانس ν و طول موج λ مربوط می‌شوند. رابطه‌ی (۲) وقتی بصورت $\lambda = \frac{h}{P}$ نوشته می‌شود به رابطه‌ی دوبروی معروف است. این معادله، طول‌موج دوبروی λ برای موج مادیی را پیشگویی می‌کند که با حرکت یک ذره‌ی مادی، دارای اندازه حرکت P همبسته است.

نظریه‌ی دوبروی در ابتدا با بدبینی و تردید زیادی روبرو شد و اولین اشکالی که فوراً به نظر می‌رسید این بود که اگر الکترون نیز مانند نور خاصیت موجی دارد باید هنگامی که از یک توری عبور می‌کند مانند نور طرح پراشی پدید آورد و چون این پدیده مشاهده نشده بود به نظریه‌ی دوبروی چندان اهمیتی داده نشد. تا اینکه نظر وی با آزمایشاتی که دیویسون و جرمر (Germer) انجام دادند، تأیید گردید و معلوم شد که الکترون نیز مانند نور و هر ذره‌ی دیگر خاصیت دوگانه دارد و در شرایط مناسب می‌توان طرح پراشی بوجود آورد. این بود که دوبروی بعد از پنج سال از عنوان کردن رساله‌ی خود جایزه‌ی نوبل را در فیزیک دریافت کرد.

آزمایشاتی که پدیده‌ی پراش الکترون را نشان می‌دهد بدین صورت است که الکترون‌های تولید شده از کاتد یک لامپ توسط اختلاف پتانسیل متغییر U شتاب می‌گیرند. این الکترون‌ها با انرژی جنبشی eu به تک بلوری برخورد نموده و پراکنده می‌شوند. این

الکترون‌های پراکنده شده با یکدیگر تداخل نموده، طرح پراش را تولید می‌نمایند. در این حالت می‌توان فرمول دوبروی را برای طول موج الکترون با قراردادن ($P = mv$) در رابطه‌ی دوبروی (رابطه ۲) به صورت زیر تعیین نمود.

$$\lambda = \frac{h}{mv} \qquad (۳)$$

برای الکترون‌ها با توجه به سرعت حرکت الکترون‌ها و پتانسیل U رابطه‌ی (۴) را می‌توان نوشت.

$$\frac{1}{2}mv^2 = eU \qquad (۴)$$

از ترکیب دو رابطه ی (۳) و (۴) نتیجه می‌شود که:

$$\lambda = \frac{h}{\sqrt{2emU}} \qquad (۵)$$

که در این رابطه e و m به ترتیب بار و جرم الکترون و h ثابت پلانک است و مقادیر آنها برابر است با:

$$m = 9.1091 \times 10^{-31} \quad (Kg)$$

$$e = 1.6021 \times 10^{-19} \quad (C)$$

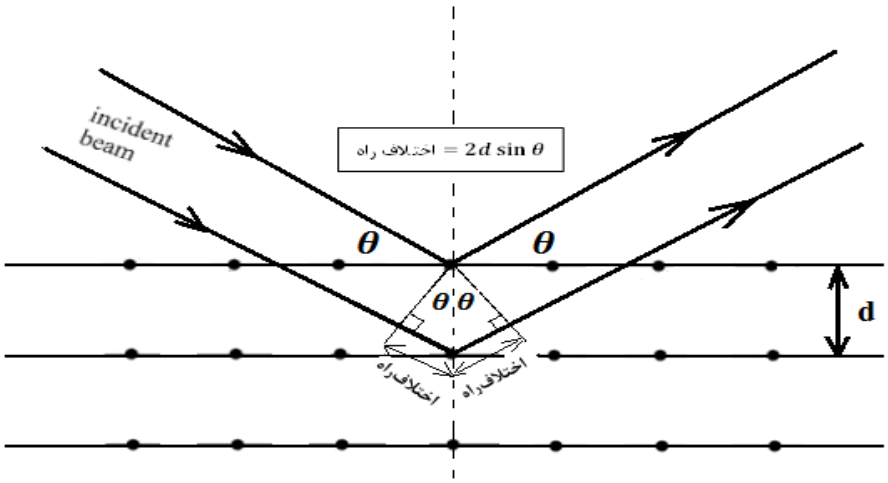
$$h = 6.6256 \times 10^{-34} \quad (J.S)$$

با قراردادن مقادیر فوق در رابطه‌ی (۵) می‌توان طول موج (λ) این پرتو را برحسب پتانسیل شتاب دهنده‌ی آند بدست آورد.

از طرفی طبق رابطه‌ی براگ برای پراش یک پرتو بر اثر برخورد با اتم‌های یک کریستال داریم:

$$2d \sin\theta = n\lambda \qquad (۶)$$

که در آن طول موج (λ) برای موج پراش یافته و θ زاویه‌ی پراش و d فاصله‌ی صفحات شبکه‌ای کریستال است که در پراش مرتبه‌ی nام شرکت دارند. (شکل ۱)



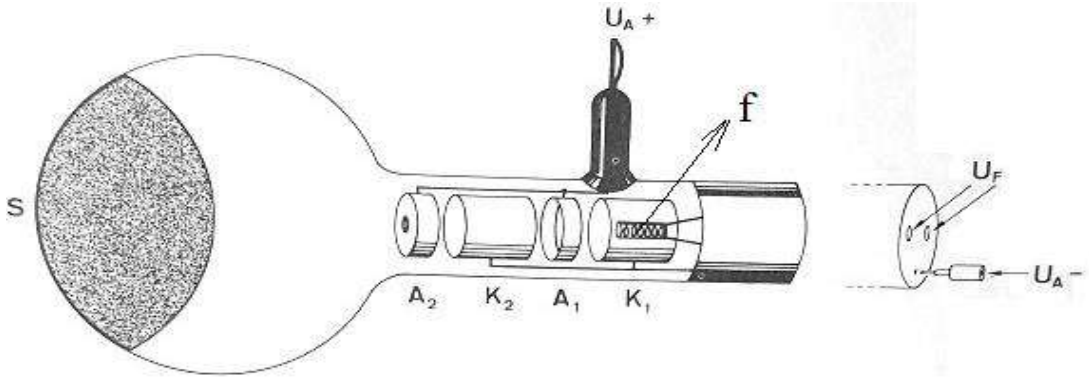
شکل (۱)

بنابراین با داشتن مقدار λ می‌توان مقدار d (فاصله‌ی شبکه‌ای کریستال) را بدست آورد.

شرح وسایل:

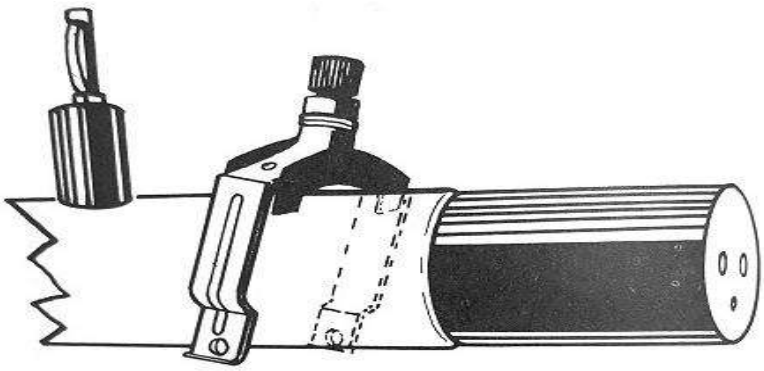
۱) لامپ پراش:

قسمت‌های فعال لامپ شامل کاتد، آند و کریستال گرافیت است و بخش‌های غیرفعال، شامل جداره و شیشه‌ی محافظ است که قسمتی از آن فلوئورسان می‌باشد تا دایره‌های تداخل را نمایش دهد. الکترودهای لامپ شامل چهار قسمت استوانه‌ای شکل می‌باشد که در شکل ۲ نشان داده شده است.



شکل (۲)

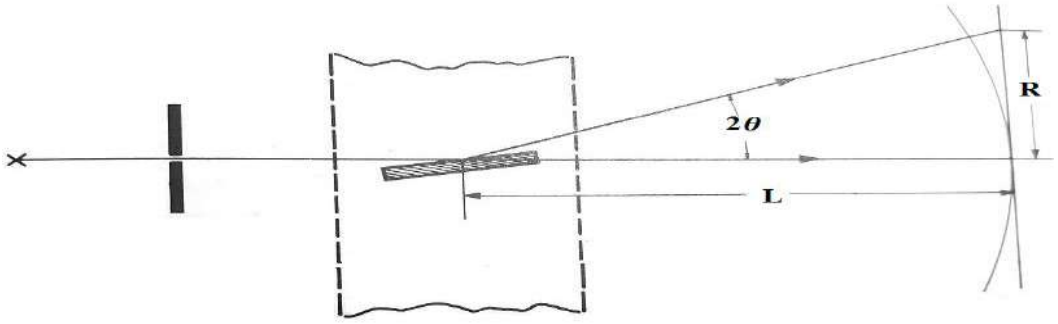
فیلامان f در داخل کاتد k_1 قرار گرفته است که در اثر گرم شدن، k_1 را گرم می‌کند و از آن الکترون بیرون می‌آید. A_1 و A_2 آند هستند که به قطب مثبت منبع متصل می‌شوند که این دو الکترود همراه با الکترود k_2 کار یک عدسی همگرا را انجام می‌دهند تا الکترون‌هایی را که از کاتد خارج می‌شوند در یک نقطه جمع نمایند، کریستال گرافیت بصورت پودر در داخل الکترود A_2 قرار دارد که کریستال‌های نامنظم آن مانند توری پدیده‌ی پراش پرتو را موجب می‌شوند. S ماده‌ی فلوئورسانی است که در اثر برخورد الکترون‌ها با آن نور سبزرنگی ظاهر می‌شود و می‌توان تداخل پرتوهای پراش یافته را بر روی آن مشاهده نمود. به همراه لامپ یک گیره‌ی مغناطیسی وجود دارد که با سوار کردن آن به گلوی لامپ مطابق شکل (۳) می‌توان محل برخورد پرتو همگرای کاتودیک را با صفحه‌ی ذغالی تنظیم یا جابجا نمود. در عبور پرتو از صفحه‌ی ذغالی آن قسمت که پراش نیافته، ایجاد لکه‌ی نورانی مرکزی و بخش پراش یافته دوایر تاریک و روشن اطراف آن را در روی صفحه‌ی فلوئورسان تشکیل می‌دهند. در این لامپ فاصله‌ی صفحه‌ی گرافیت تا صفحه‌ی فلوئورسان $L = 13.5\ (cm)$ است و فاصله‌ی صفحات شبکه‌ای ذغال برای حلقه‌های اول و دوم $d_1 = 2.13 \times 10^{-10}\ (m)$ و $d_2 = 1.23 \times 10^{-10}\ (m)$ می باشد.



شکل (۳)

هنگامی که الکترون‌ها به شبکه‌های بلور گرافیت برخورد می‌کنند، برای پراش الکترون‌ها از روی آنها باید رابطه‌ی براگ را بکار برد، پرتوهایی که در این رابطه صدق می‌کنند، روی یک مخروط قرار می‌گیرند و تقاطع این مخروط با صفحه‌ی فلوئورسانس به شکل دایروی می‌باشد که همان طرح پراش است. از روی مخروط ایجاد شده مطابق شکل (۴) می‌توان چنین نتیجه گرفت:

$$\tan 2\theta = \frac{R}{L}$$



شکل (۴)

چون θ بسیار کوچک است داریم:

$$\tan 2\theta \cong \sin 2\theta \cong 2\sin\theta = \frac{R}{L} \qquad (۷)$$

از ترکیب روابط (۶) و (۷) نتیجه می‌شود که:

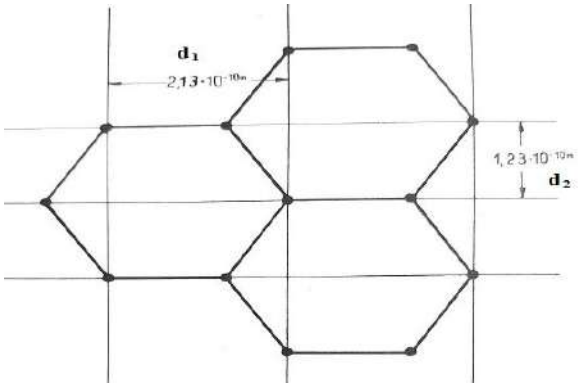
$$\frac{R}{L} = \frac{n\lambda}{d} \qquad (۸)$$

برای اولین دایره $n=1$ است، بنابراین داریم:

$$\lambda = \frac{R_1}{L} d_1 \qquad (۹)$$

$$\lambda = \frac{R_2}{L} d_2 \qquad (۱۰)$$

با استفاده از رابطه‌ی(۵) می‌توان طول موج الکترون (λ) را بدست آورد و با استفاده از رابطه‌های (۹) و (۱۰) فاصله‌ی شبکه‌های بلور قابل اندازه‌گیری است. شکل (۵) طرز قرار گرفتن اتم‌های گرافیت در بلور و در فاصله‌ای که پراش الکترون از روی آنها انجام گرفته است را نشان می‌دهد.



شکل (۵)

روش انجام آزمایش:

با رعایت نکاتی که در ادامه به آنها اشاره می‌شود، مدار شکل (۶) را سوار کنید.

۱) شاخه‌ی a متصل به ولتاژ بالا را پوششهای عایق دوطرفه‌ی مخصوص که وجود دارد بپوشانند تا از هرگونه تماس احتمالی جلوگیری شود.

۲) ترانسفورماتور را از پرتو کاتودیک فاصله دهید تا القای مغناطیسی بر آن نداشته باشد.

۳) دستگاه قدرت بالا را قبل از اتصال کامل مدار خاموش نگهدارید و به هنگام کامل شدن آن قبل از اتصال سیم‌ها به برق شهر کنترل کنید که دگمه‌ی آن و همچنین پیچ انتخاب ولتاژ آن روی صفر باشد.

۴) وقتی سیم‌های اصلی را به برق شهر وصل کردید، توسط رئوستا ولتاژ گرمایی لازم را به کاتد بدهید. دقت کنید که جریان فیلامان نباید بیش از ۰/۳ آمپر گردد.

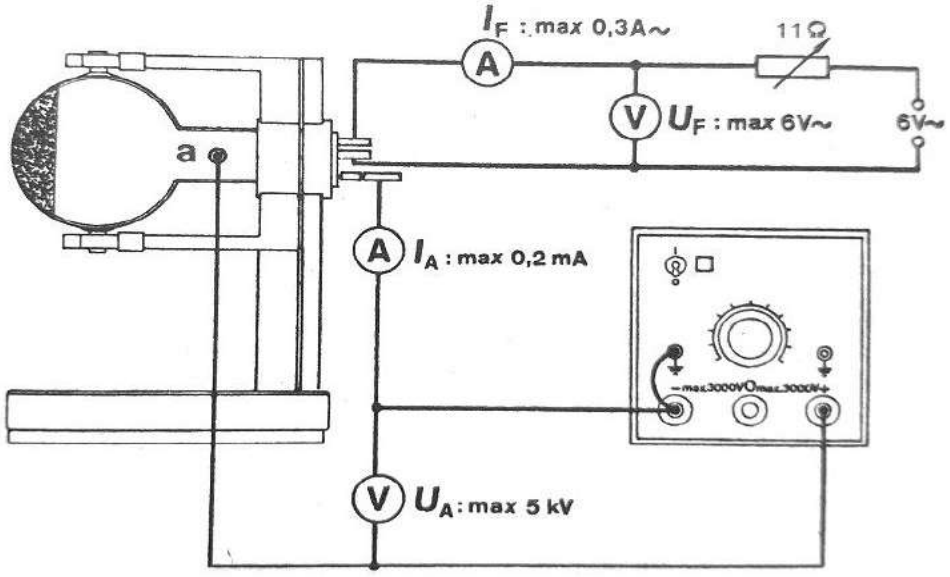
۵) ولتاژ آند را به آهستگی توسط کلید پله‌ای منبع تغذیه افزایش دهید و ولتاژ آن را ۳ کیلوولت انتخاب کنید. حلقه‌های پراش بر روی صفحه‌ی فلوئورسانس نمایان می‌شود.

۶) قطر حلقه‌های حاصل از پراش را اندازه‌گیری کنید. برای این منظور لبه‌ی یک کاغذ سفید را در امتداد قطر دایره‌ها قرار دهید و با مداد کناره‌های آن را علامت بگذارید و سپس کاغذ را برداشته و قطر دایره‌ها را اندازه بگیرید و مقادیر بدست آمده را در جدول (۱) یادداشت کنید.

۷) آزمایش فوق را برای ولتاژهای ۴ و ۵ کیلوولت تکرار کنید و جدول (۱) را کامل کنید.

۸) اگر جریان آند از ۰/۲ میلی‌آمپر بیشتر شد و یا ناگهان صفحه‌ی گرافیت شعله‌ور گشت. فوراً منبع تغذیه را توسط کلیدش خاموش کنید و ولتاژ آن را روی صفر قرار دهید و با اتصال کوتاه آن را شارژ کنید و توسط حلقه‌ی مغناطیسی که بر گردن لامپ متصل است، جای برخورد الکترون به صفحه‌ی گرافیت را عوض کنید. سپس آزمایش را دوباره آغاز کنید.

۹) بعد از اتمام آزمایش ترانسفورماتور و منبع تغذیه را خاموش نمایید (کلید پله‌ای آن را صفر کرده و کلید خاموش و روشن آن را روی صفر قرار دهید.)



شکل (۵): مدار آزمایش

جدول (۱):

ولتاژ شتاب دهنده	U	KV	۳	۴	۵
شعاع دایره‌ی اول	R_1	m			
شعاع دایره‌ی دوم	R_2	m			

جدول (۲):

U	KV	۳	۴	۵
λ	m			
d_1				
d_2				

پرسش‌ها و بررسی نتایج:

۱) طرح پراش چیست؟ تئوری فیزیکی آن را بیان کنید.

۲) در این آزمایش، مدار فیلامان از چه قسمت‌هایی تشکیل شده است؟

۳) علت وجود رئوستا در مدار فیلامان چیست؟

۴) نقش گیره‌ی مغناطیسی در گلوی لامپ چیست؟

۵) چرا در این آزمایش طرح پراش به شکل دایره است؟

۶) لکه‌ی مرکزی و نوارهای تاریک و روشن و هاله‌ی اطراف لکه‌ی مرکزی چه اختلافی با هم دارند؟

۷) چرا در این آزمایش فقط دو دایره روشن روی صفحه‌ی فلوئورسان ایجاد می‌شود؟ آیا می‌توان با تغییری در لامپ تعداد دایره‌ها را افزایش داد؟ آن چه تغییری می‌تواند باشد.

۸) با استفاده از روابط ۸ و ۹ ، فاصله‌های شبکه‌ای گرافیت را برای طول‌موج‌های بدست آمده در ولتاژهای خواسته شده در جدول (۲) محاسبه نموده و جدول را کامل کنید.

۹) بین مقادیر بدست آمده برای d_1 و d_2 هایی که در ولتاژهای مختلف محاسبه نموده‌اید، میانگین‌گیری نمایید و با مقایسه این مقادیر با مقادیر واقعیِ d_1 و d_2 ،درصد خطای نسبی را محاسبه نمایید.

۱۰) دو آمپرمتری که در مدار قرار دارند چه جریان‌هایی را کنترل می‌نمایند و چرا؟

آزمایش ۳

پدیده‌ی فتوالکتریک

هدف آزمایش:

۱) مطالعه‌ی پدیده‌ی فتوالکتریک و مشاهده‌ی طرز کار سلول فتوالکتریک
۲) تعیین ثابت پلانک (h) و تعیین تابع کار کاتد سلول فتوالکتریک (W)

وسایل مورد نیاز:

لامپ جیوه، توانساز مخصوص لامپ جیوه، باطری ۶ ولتی، تقویت کننده‌ی جریان همراه با آمپرمتر حساس، رئوستا و ولتمتر، سیستم نوری درون محفظه‌ی سیاه.

تئوری آزمایش:

هرتز در سال ۱۸۸۷ کشف کرد هنگامی‌که نور با طول‌موج کوتاه (حدود مرئی یا فرابنفش) به سطح فلز بتابد از آن سطح ذرات با بار منفی منتشر می‌شود. در سال ۱۸۹۸ تامسون نشان داد که مقدار $\frac{e}{m}$ این ذرات برابر مقداری است که برای اشعه‌ی کاتدیک بدست می‌آید. به این ترتیب ثابت شد که مقدار $\frac{e}{m}$ این ذرات الکترون می‌باشند. مهمترین نتایج تجربی پدیده‌ی فتوالکتریک به شرح زیر بود.

۱) برای هر فلز یک فرکانس آستانه‌ی (می‌نیمم) ν_0 وجود دارد بطوری‌که نور با فرکانس کمتر از آن نمی‌تواند از سطح فلز، الکترون آزاد کند. مشاهده شد که زیاد کردن شدت نور و زمان تابش نیز تأثیری در افزایش جریان ندارد.
۲) نور با فرکانس بیشتر از آستانه بلافاصله باعث تشعشع الکترون می‌شود و فاصله‌ی زمانی بین تابش نور و ظهور الکترون‌ها بیش از 3×10^{-9} ثانیه نیست.
۳) چنانچه نوری با فرکانس معلوم بتواند از سطح فلزی، الکترون خارج کند در آن صورت تعداد الکترون‌ها متناسب با شدت نور خواهد بود.
۴) ماکزیمم انرژی جنبشی الکترون‌های تشعشع شده یا مقدار پتانسیل بازدارنده‌ی V با فرکانس نور یک رابطه‌ی خطی دارد و مستقل از شدت آن می‌باشد.

نتایج ۱ و ۲ و۴ با تئوری الکترومغناطیسی نور قابل توجیه نبودند، چرا که در فلزات الکترون‌های لایه‌ی آخر با انرژی بستگی مشخصی به هسته‌ی اتم خود وابسته‌اند. انرژی بستگی آخرین الکترون و یا حداقل انرژی لازم برای آزاد کردن یک الکترونِ فلز را تابع کار W می‌نامیم که برای هر فلز مقدار ثابت و مشخصی است. بنابر تئوری کلاسیک هرگاه اتم فلز انرژیی معادل W یا بیشتر دریافت کند بایستی یک الکترون خود را از دست بدهد. بنابراین اگر نوری با فرکانس معلوم نتوانست الکترون‌های فلز را آزاد کند، با افزایش شدت نور بایستی این پدیده ممکن گردد. ولی مشاهده گردید که ماکزیمم انرژی الکترون‌های پرتاب شده با فرکانس بطور خطی افزایش پیدا می‌کند ولی مستقل از شدت نور است.

در سال ۱۹۰۰ پلانک در تابش جسم سیاه، ضریب h (ثابت پلانک) و در واقع فرضیه‌ی کوانتایی بودن انرژی نوری را بطور ضمنی مطرح می‌کند. اما در آن زمان کسی آن را باور نمی‌کند.

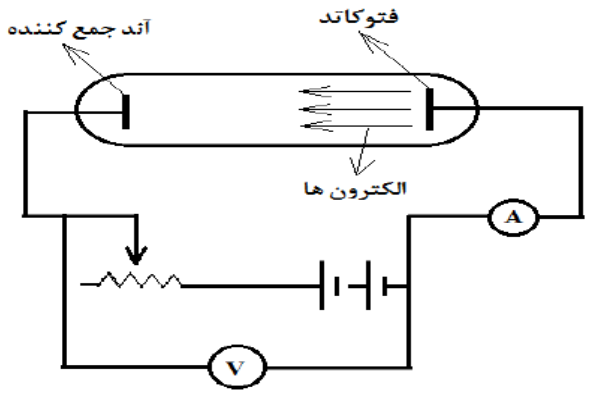
در سال ۱۹۰۵ انیشتین بر اساس تئوری پلانک نظریه‌ای را برای این پدیده پیشنهاد کرد که در سال‌های بعد بطور تجربی به ثبوت رسید و جایزه‌ی نوبل را به‌خاطر آن در سال ۱۹۲۱ به خود متعلق ساخت. در این هنگام اهمیت کار پلانک بر همه معلوم گشت،

بطوری‌که در سال ۱۹۲۳ جایزه‌ی نوبل را به او اهدا کردند. رابطه‌ی پیشنهاد شده توسط انشتین برای پدیده فتوالکتریک بصورت زیر است.

$$h\nu = \frac{1}{2}mv^2 + W \qquad (۱)$$

که در آن $h\nu$ انرژی فوتون تابیده شده به فلز و $\frac{1}{2}mv^2$ انرژی جنبشی الکترون جدا شده از فلز و W تابع کار فلز می‌باشد. طبق نظریه‌ی انیشتین نور شامل ذراتی با انرژی $h\nu$ است که در فضا با سرعت نور حرکت می‌کند. این فرضیه بطور کلی مغایر تئوری موجی نور است. ولی پدیده‌ی فتوالکتریک را کاملاً توجیه می‌کند. به سادگی دیده می‌شود که معادله‌ی فوق با نتایج تجربی مطابقت دارد. اگر فرکانس آنقدر کم باشد که $h\nu < W$ ، هیچ الکترونی نمی‌تواند از سطح فلز آزاد شود. یعنی برای هر فلز، فرکانس دارای یک مقدار آستانه است که با ν_0 نشان داده می‌شود که به ازای فرکانس‌های کمتر از آن پدیده‌ی فتوالکتریک رخ نمی‌دهد. انرژی الکترون‌ها با فرکانس نور بطور خطی تغییر می‌کند و مستقل از شدت نور است. اگر فرکانس بیشتر از مقدار آستانه باشد هر کوانتوم نور که به سطح فلز می‌رسد و قسمت دیگر انرژی جنبشی الکترون‌ها است که باعث خروج الکترون از سطح فلز می‌گردد. تعداد الکترون‌های پرتاب شده با تعداد ذرات نور و بنابراین با شدت نوری که به سطح فلز می‌تابد متناسب است.

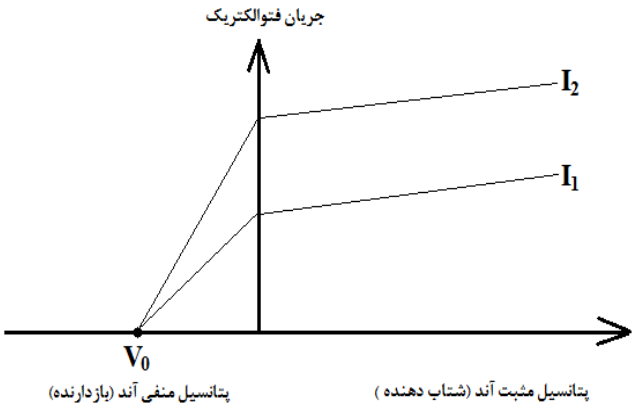
در سال ۱۹۱۶ میلیکان آزمایش‌های دقیقی را برای صحت رابطه‌ی انیشتین انجام داد. به این طریق که اثر نور با فرکانس‌های مختلف را بر روی فلز سدیم و پتاسیم و لیتیم مطالعه کرد. اساس دستگاه میلیکان در شکل (۱) نشان داده شده است.



شکل (۱): اساس دستگاه میلیکان

فتوکاتد از جنس یکی از فلزات قلیایی است. چنانچه فرکانس نور تابیده از فرکانس ν_0 بیشتر باشد، الکترون‌ها به طرف آند پرتاب می‌شوند و آنهایی که انرژی کافی دارند به آند می‌رسند و جریان برقرار شده توسط آمپرمتر اندازه‌گیری می‌شود. بقیه‌ی الکترون‌های کنده شده در اطراف کاتد جمع می‌شوند. (اصطلاحاً به آنها بار فضایی یا ابرالکترونی گفته می‌شود.)

آزمایش میلیکان در دو مرحله انجام می‌شود. اگر پتانسیل آند مثبت باشد ($V > 0$) الکترون‌ها به سمت آند سرعت می‌گیرند. اگر پتانسیل مثبت آند کم باشد بار فضایی اطراف کاتد از عبور سایر الکترون‌ها جلوگیری می‌کند. با افزایش پتانسیل مثبت بار فضایی از بین می‌رود و تمام الکترون‌های کنده شده انرژی کافی بدست آورده و به آند می‌رسند و جریان به حد اشباع می‌رسد. اگر شدت نور تابیده مثلاً از I_1 به I_2 افزایش یابد و آزمایش تکرار گردد، جریان فتوالکتریک افزایش می‌یابد (شکل ۲). اگر پتانسیل آند منفی باشد جریان فتوالکتریک کم می‌گردد تا در پتانسیل منفی V_0(پتانسیل قطع) جریان به صفر می‌رسد و همانگونه که در شکل (۲) مشاهده می‌کنید، پتانسیل V_0 به شدت نور بستگی ندارد.



شکل (۲): نمودار تغییرات جریان فتوالکتریک برحسب پتانسیل V برای یک فلز مشخص برای نور با فرکانس ν با شدت های I_1 و I_2 .

پتانسیل منفی اعمال شده به آند را پتانسیل بازدارنده می‌نامیم. به علت این پتانسیل جریان فتوالکتریک کاهش پیدا می‌کند. این جریان کم به علت این است که فتوالکترون‌های تابش شده دارای انرژی‌های متفاوتی هستند و الکترون‌های تابشی با انرژی جنبشی ماکزیمم می‌توانند در این سد پتانسیل نفوذ کنند و برای اینکه جریان به صفر برسد باید پتانسیل منفی را افزایش داد. در این شرایط رابطه‌ی بین پتانسیل V و انرژی جنبشی ماکزیمم الکترون‌ها چنین است:

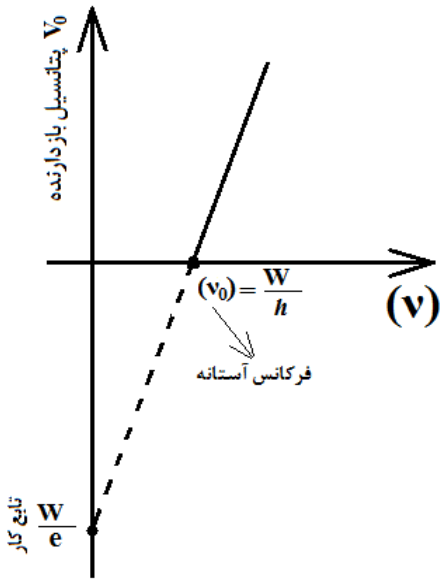
$$\frac{1}{2}m_e v_{max}^2 = eV \qquad (۲)$$

با ترکیب رابطه‌ی (۱) و (۲) چنین بدست می‌آید:

$$eV = h\nu - W$$

$$V = \frac{h}{e}\nu - \frac{W}{e} \qquad (۳)$$

طبق رابطه‌ی (۳) تغییرات پتانسیل V برحسب فرکانس نور خطی است و شیب آن $\frac{h}{e}$ می‌باشد. (شکل ۳) از آنجاییکه مقدار e قبلاً بوسیله‌ی آزمایش اندازه گرفته شده بود، با استفاده از نمودار شکل ۳ می‌توان h را بدست آورد.

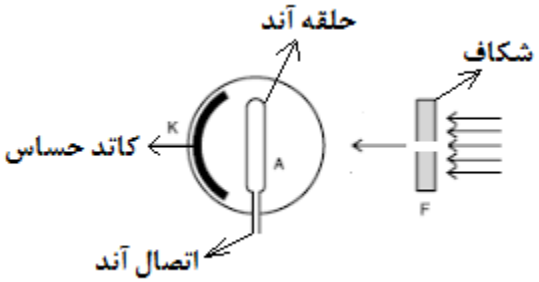


شکل (۳): نمودار پتانسیل بازدارنده برحسب فرکانس نور تابیده شده

شرح وسایل آزمایش:

الف: سلول فتوالکتریک:

سلول فتوالکتریک یک لامپ خالی از هواست که دارای یک صفحه‌ی پوشیده از فلز پتاسیم است که این صفحه، کاتد سلول را تشکیل می‌دهد. در فاصله‌ی کمی از این صفحه و موازی آن حلقه‌ای از جنس پلاتین قرار گرفته که آند سلول می‌باشد. این مجموعه در یک محفظه‌ی شیشه‌ای قرار دارد که دو سر آند از آن خارج می‌شود و آند توسط یک سیم هم‌محور برای جلوگیری از فرار الکترون‌ها به تقویت کننده‌ی جریان متصل می‌شود. (شکل۴)



شکل (۴): سلول فتوالکتریک

ب: لامپ جیوه:

برای تحقیق پدیده‌ی فتوالکتریک به نور تکفام نیاز است. چشمه‌ی نورانی یک لامپ بخار جیوه با فشار زیاد است که از طریق یک منبع تغذیه‌ی مخصوص به برق شهر متصل می‌گردد. لامپ جیوه‌ای که در دسترس ماست دارای خطوط زیر می‌باشد.

جدول (۱):

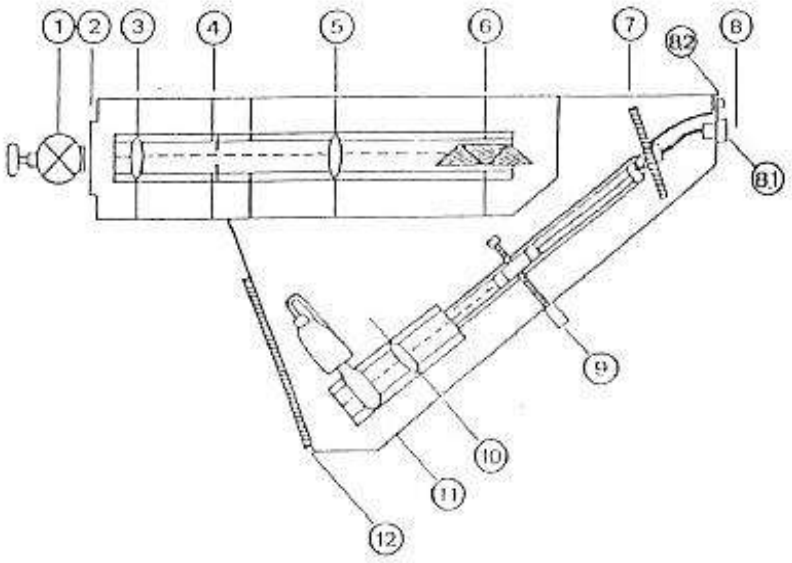
رنگ	زرد	سبز	آبی- سبز	آبی	بنفش
طول‌موج (A)	۵۷۸۰	۵۴۶۰	۴۹۱۶	۴۳۵۸	۴۰۵۰
فرکانس $\times 10^{14}\ Hz$	۵/۱۹	۵/۴۹	۶/۰۸	۶/۸۸	۷/۴۱

توجه:

دقت کنید هنگامیکه لامپ روشن است به داخل آن دست نزنید و یا مدت طولانی به آن نگاه نکنید و فاصله‌ی طبیعی خود را با آن حفظ کنید و برای روشن و خاموش کردن لامپ فقط از کلید مخصوص منبع تغذیه استفاده کنید.

ج: سیستم نوری:

این سیستم شامل محفظه‌ی سیاهی است که در آن نور لامپ جیوه با عبور از دیافراگم و منشور و عدسی عبور می‌نماید. برای آنکه مجموعه در حجم کمتری جا بگیرد در مقابل چشمه‌ی نورانی یک آینه قرار داده‌اند که نور بعد از برخورد به آینه منعکس شده و به فتوسل می‌تابد. محفظه‌ی سیاه از اثرات نور خارجی در آزمایش می‌کاهد. بوسیله‌ی پیچ (۹) در شکل (۵) می‌توان شکاف مقابل فتوسل را جابجا نمود و نور با طول‌موج دلخواه را بر سطح فتوسل تاباند.



شکل (۵): سیستم نوری درون محفظه‌ی سیاه

روش کار:

مدار را مطابق شکل (۶) ببندید

۱) قبل از روشن کردن لامپ جیوه و پیش از وصل کردن سیم باطری، تقویت‌کننده را روشن کنید و ۱۰ دقیقه صبر کنید تا گرم شود.

۲) کلید گردان تقویت‌کننده را در مقابل 3×10^{-11} یعنی حساس‌ترین وضعیت خود قرار دهید.

۳) پیچ بهره تقویت آن را در حداکثر قرار داده و با دگمه‌ی تنظیم صفر آن عقربه آمپرمتر را روی صفر قرار دهید و در این شرایط باید درب محفظه‌ی سیاه و درب کشویی مقابل لامپ جیوه کاملاً بسته باشد. در این حالت باید از پله‌ی **300μA** آمپرمتر استفاده کرد.

۴) خط سفید فیش اتصال به زمینِ تقویت‌کننده در سمت چپ را بطور قائم قرار دهید و سپس به وضعیت افقی برگردانید.

۵) پس از گرم شدن تقویت‌کننده، لامپ جیوه را بوسیله‌ی منبع تغذیه‌ی مخصوص آن روشن کنید و چند دقیقه صبر کنید تا لامپ گرم شود و طیف‌های لامپ بر روی شکاف ظاهر شود.

۶) طیف‌های نور بر روی آینه می‌تابد و بعد از انعکاس بر روی شکاف مقابل فتوسل متمرکز می‌گردد. با چرخاندن پیچ کناری محفظه‌ی سیاه (۹) می‌توان مکان شکاف را تغییر داد بطوری که فقط یکی از طیف‌ها از آن عبور نموده و بر فتوسل بتابد. با پیچ تنظیم شکاف را طوری تنظیم کنید که نور بنفش به فتوسل بتابد.

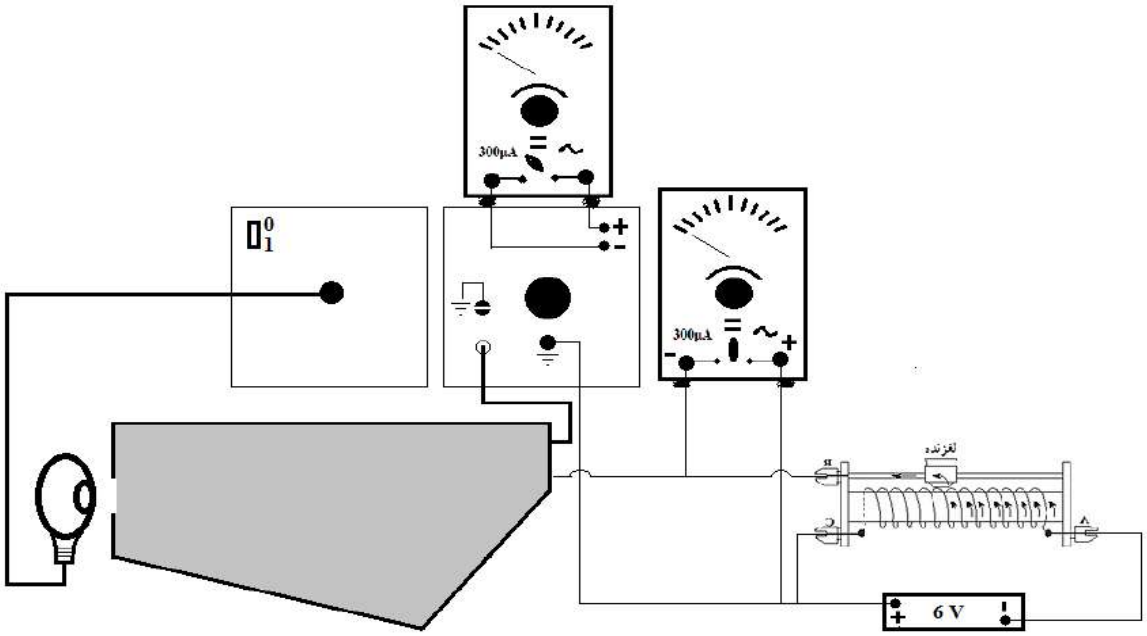
۷) در حالتی‌که ولتاژ آند منفی است، بوسیله‌ی رئوستا ولتاژ را به تدریج زیاد کنید. بهتر است تغییرات ولتاژ حدود یک دهم ولت باشد. با افزایش ولتاژ جریان فتوالکتریک کاهش می‌یابد. تغییرات ولتاژ را تا جایی ادامه دهید تا جریان به صفر برسد. ولتاژی که در آن جریان برای نور بنفش صفر شد را ولتاژ بازدارنده برای نور بنفش می‌نامیم. این مقدار را در جدول (۲) یادداشت کنید.

۸) حالا همینطور که نور بنفش به فتوسل می‌تابد، پتانسیل آند را با عوض کردن جای قطب مثبت و منفی باتری، مثبت کنید (پتانسیل شتاب‌دهنده) توجه کنید که بایستی جای دو اتصال ولت‌متر را هم عوض کنید. تغییرات ولتاژ را با پله‌های نیم ولتی ادامه دهید و تا ولتاژ ۳ ولت، ولتاژ را بالا ببرید و جریان را در ولتاژ برای نور بنفش در جدول (۳) یادداشت کنید.

توجه: درصورتی‌که عقربه‌ی آمپرمتر از رِنج خارج شد، پیچ تقویت مربوط به تقویت‌کننده را در حالت 3×10^{-10} قرار دهید.

۹) مراحل ۶ و ۷ و ۸ را برای طیف‌های دیگر لامپ جیوه تکرار کنید و جدول (۲) و (۳) را کامل کنید.

۱۰) بعد از اتمام آزمایش لامپ جیوه را بوسیله‌ی کلید مخصوص و تقویت‌کننده را خاموش کنید و بهره‌ی تقویت آن را روی صفر برگردانید و باتری را از مدار خارج کنید.



شکل (۶): شکل مدار

جدول (۲):

پتانسیل بازدارنده‌ی آند (V)	$I \times 10^{-11}\ (A)$				
	زرد	سبز	آبی سبز	آبی	بنفش

جدول (۳):

پتانسیل شتاب‌دهنده‌ی آند (V)	$I \times 10^{-11}\ (A)$				
	زرد	سبز	آبی سبز	آبی	بنفش
۰/۵					
۱					
۱/۵					
۲					
۲/۵					
۳					

پرسش‌ها و بررسی نتایج :

۱) با استفاده از جدول (۱) مقادیر V_0 (پتانسیل بازدارنده) را برای فرکانس‌های مختلف تعیین نموده و در جدول (۴) بنویسید.

جدول (۴):

رنگ	**زرد**	**سبز**	**آبی- سبز**	**آبی**	**بنفش**
فرکانس $\times 10^{14}\ Hz$	**۵/۱۹**	**۵/۴۹**	**۶/۰۸**	**۶/۸۸**	**۷/۴۱**
پتانسیل بازدارنده (V_0) (V)					

۲) با استفاده از این جدول منحنی تغییرات پتانسیل بازدارنده (V_0) را برحسب فرکانس رسم کنید.

۳) با استفاده از این منحنی شیب خط را بدست آورید و از روی آن ثابت پلانک (h) را بدست آورید.

۴) تفاوت h با مقدار واقعی از کجا ناشی می‌شود. درصد خطای آزمایش چقدر است؟

$$e = 1.6 \times 10^{-19} \ (C) \qquad \text{و} \qquad h = 6.63 \times 10^{-34} \ (jS)$$

۵) با استفاده از نمودار فرکانس آستانه مربوط ماده‌ی حساس کاتد سلول فتوالکتریک (ν_0) را بدست آورید. این فرکانس در چه ناحیه‌ای از امواج الکترومغناطیس واقع است؟

۶) تابع کار مربوط ماده‌ی حساس کاتد سلول فتوالکتریک (W) را نیز با استفاده از نمودار بدست آورید.

۷) با استفاده از جدول (۲) و (۳) منحنی تغییرات جریان فتوالکتریک برحسب ولتاژ را برای تمام نورها روی کاغذ میلی‌متری رسم کنید.

۸) چرا پدیده‌ی فتوالکتریک با طول‌موج کمتر بهتر رخ می‌دهد.

۹) مواردی از کاربرد خاصیت فتوالکتریک و سلول آن را در صنعت نام ببرید.

آزمایش ۴

اندازه‌گیری $\frac{e}{m}$ بطور دقیق

هدف آزمایش:

اندازه‌گیری $\frac{e}{m}$ برای الکترون، بطور دقیق توسط لامپ تک پرتو گازی

وسایل مورد نیاز:

منبع تغذیه‌ی DC تا ولتاژ ۳۰۰ ولت، سیم‌پیچ‌های هلمهولتز همراه منبع تغذیه‌ی DC مخصوص، لامپ تک پرتو گازی، دو مولتی‌متر، سیمهای رابط

تئوری آزمایش:

یکی دیگر از روش‌های اندازه‌گیری $\frac{e}{m}$ استفاده از لامپ تک پرتو گازی است. در این آزمایش نیز الکترون‌های جدا شده از اتم تحت تأثیر میدان مغناطیسی یکنواخت قرار می‌گیرند و از مسیر خود منحرف شده و بر روی مسیر دایره‌ای قرار می‌گیرند. تنها نیروی مؤثر بر ذره‌ی باردار همان نیروی لورنتس ($F = evB$) می‌باشد که به آن نیروی جانب مرکز ($F = \frac{mv^2}{r}$) را می‌دهد. از برابری این دو نیرو نتیجه می‌شود:

$$evB = \frac{mv^2}{r} \qquad (۱)$$

در این رابطه v سرعت حرکت الکترون‌هاست که از پتانسیل U آند کسب نموده است. بنابراین می‌توان رابطه‌ی (۲) را برای آن نوشت:

$$eU = \frac{1}{2}mv^2 \qquad (۲)$$

از ترکیب (۱) و (۲) می‌توان مقدار $\frac{e}{m}$ را بدست آورد.

$$\frac{e}{m} = \frac{2U}{B^2r^2} \qquad (۳)$$

شرح وسایل آزمایش:

لامپ تک پرتو گازی:

قسمت‌های مختلف این لامپ به قرار زیر است:

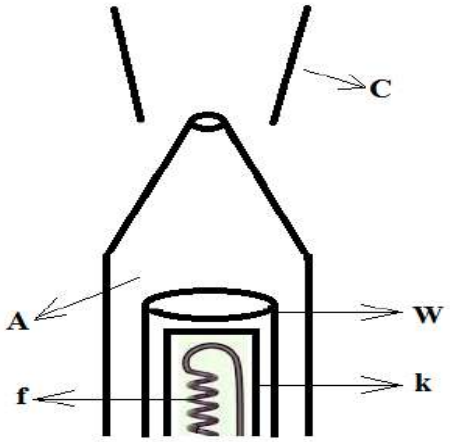
۱) شیشه‌ی محتوی گاز ئیدروژن با فشار 1.33×10^{-5} (bar)

۲) سیستم تولید کننده‌ی الکترون آن مطابق شکل (۱) از قسمت‌های زیر تشکیل شده است:

f) فیلامان- رشته‌ایست که با ولتاژ ۶/۳ ولت و جریان ۱ آمپر گرم می‌شود و کاتد را گرم می‌کند.

k) کاتد است که در اثر گرم شدن، الکترون می‌دهد و به قطب منفی منبع تغذیه بسته می‌شود.

w) استوانه‌ی ونل است که عمل کانونی کردن الکترون‌ها را انجام می‌دهد و ولتاژ ماکزیمم آن ۱۰ولت است.



شکل (۱)

C) دو صفحه‌ی خازن مانند است که می‌توان انحراف الکترون‌ها را در میدان الکتریکی توسط آن مطالعه نمود که ولتاژ آن U_P بین ۵۰ تا ۱۰۰ ولت مستقیم است که البته در این آزمایش از آن استفاده نمی‌شود.

A) آند مخروطی شکل است که الکترون‌ها را شتاب می‌دهد و به قطب مثبت توانساز وصل می‌شود. ولتاژ آن بین ۱۵۰ تا ۳۰۰ ولت مستقیم است. الکترون‌هایی که از کاتد خارج می‌شوند در این ولتاژ به طرف آند سرعت می‌گیرند و بعضی از آن‌ها از سوراخ نوک آند مخروطی خارج می‌شوند. الکترونهای خارج شده، ئیدروژن سر راه خود را تحریک می‌کنند و به این ترتیب مسیر الکترون‌ها با نور بنفش ئیدروژن مشخص می‌شود.

سیم‌پیچ‌های هلمهولتز:

بوسیله‌ی این سیم‌پیچ‌ها می‌توان میدان مغناطیسی یکنواختی ایجاد نمود که مقدار القای مغناطیسی کل در میان دو سیم‌پیچ هلمهولتز را با استفاده از رابطه‌ی بیوساوار به‌صورت رابطه‌ی (۴) تعیین می‌شود.

$$B = \mu_0 (\frac{4}{5})^{\frac{3}{2}} \frac{nI_s}{R} \qquad (۴)$$

که در این رابطه n تعداد دورهای سیم‌پیچ است. R شعاع سیم‌پیچ و I_s جریانی است که از سیم‌پیچ‌ها می‌گذرد که مقدار ماکزیمم آن ۲ آمپر است. مقدار عددی n و R و μ_0 به قرار زیر است:

$R = 150 \quad mm$

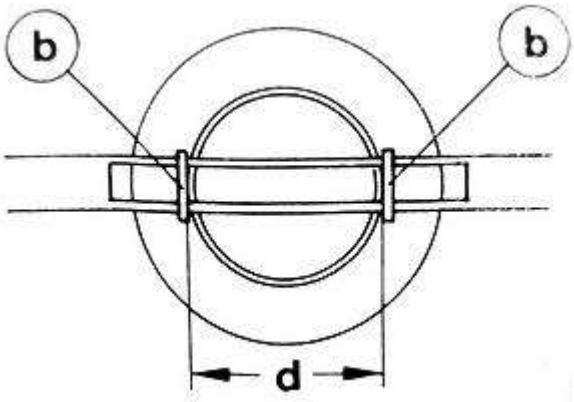
$n = 130 \quad$ دور

$\mu_0 = 1.26 \times 10^{-6} \quad \frac{web}{Am}$

فاصله‌ی این دو سیم‌پیچ از یکدیگر ۱۵۰ میلی‌متر است.

سیستم اندازه‌گیری قطر پرتو:

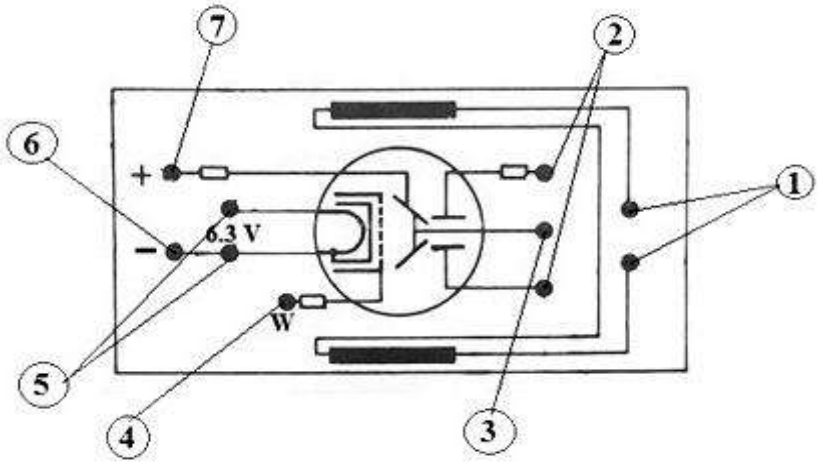
به منظور اندازه‌گیری قطر پرتو بر روی سیم‌پیچ‌های هلمهولتز دو نوار نصب شده است که روی یکی از آن‌ها آیینه‌ای قرار داده شده و روی نوار دیگر دو زبانه‌ی متحرک قرار دارد. (زبانه‌های b در شکل ۲) از روی تصویر پرتو در آینه می‌توان فاصله‌ی این دو زبانه را تنظیم نمود و قطر آن را اندازه‌گیری کرد.



شکل (۲)

جایگاه پریز:

روی پایه‌ی نگهدارنده‌ی لامپ جایگاه پریزی است که رابط بین منبع تغذیه و دستگاه‌های اندازه‌گیری با لامپ و سیم‌پیچ‌های هلمهولتز می‌باشد که پریزهای آن به شرح زیر می‌باشد.



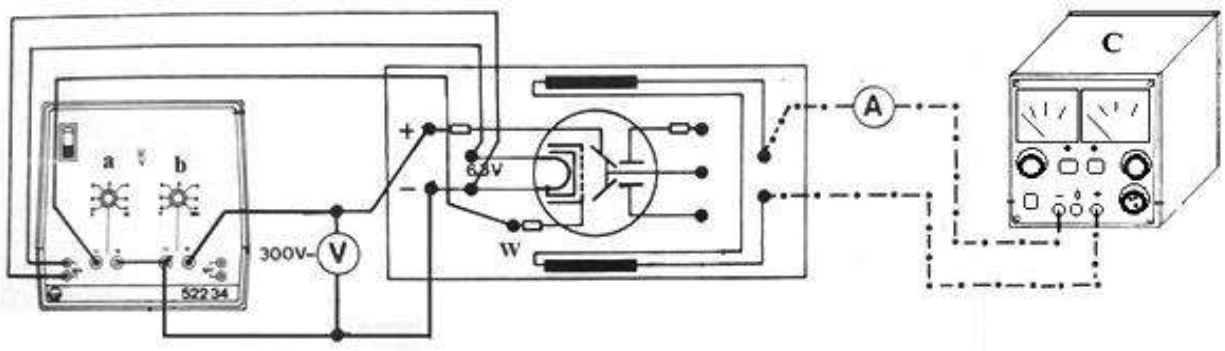
شکل (۳): جایگاه پریزها روی پایه نگهدارنده لامپ

۱) پریزی که به سیم‌پیچ‌های هلمهولتز متصل می‌گردد.
۲) پریزی که به صفحات خازن متصل می‌گردد. (در این آزمایش خازن به منبع متصل نیست و کاربردی ندارد.)
۳) پریزی که به آند متصل است. (در این آزمایش از این اتصال نیز استفاده نمی‌شود.)
۴) پریز متصل به استوانه‌ی ونل
۵) پریز متصل به فیلامان گرم کننده‌ی کاتد که به ولتاژ ۶/۳ ولت با جریان ۱ آمپر وصل می‌شود.
۶) پریز متصل به کاتد که به قطب منفی منبع تغذیه وصل می‌شود.
۷) پریز متصل به آند که به قطب مثبت منبع تغذیه اتصال داده می‌شود.

روش انجام آزمایش:

مدار را مطابق شکل ۴ ببندید. مدار شامل دو قسمت است.

۱) مداری که میدان مغناطیسی یکنواخت را ایجاد می‌کند که در شکل بصورت خط-نقطه نشان داده شده است. میدان مغناطیسی یکنواخت توسط سیم‌پیچ‌های هلمهولتز درست می‌شود.
۲) مداری که الکترون تولید نموده و به آن شتاب لازم را می‌دهد که بصورت خط پُر نمایش داده شده است.



شکل (۴): مدار آزمایش

توجه: دقت نمایید هنگام بستن مدار هیچگونه ضربه‌ای به لامپ وارد نشود.

۱) قبل از روشن کردن دستگاه‌ها مدار را به مسئول آزمایشگاه نشان دهید. وسایل اندازه‌گیری را حتی‌الامکان از بوبین‌ها دور نگهدارید.

۲) قبل از روشن کردن منبع تغذیه دقت کنید که پیچ‌های تنظیم ولتاژ (پیچ‌های **a** و **b**) روی صفر باشد.

۳) کلید منبع تغذیه را روشن کنید. مشاهده می‌شود که فیلامان گرم کننده‌ی کاتد روشن می‌گردد. حالا توسط کلید **b** ولتاژ منبع را تا جایی افزایش دهید که خط بنفش رنگی ظاهر گردد.

۴) وقتی خط بنفش رنگ که در واقع مسیر پرتو الکترونی است ظاهر شد، ولتاژ آن را روی ۱۵۰ ولت ثابت کنید. منبع متصل به سیم‌پیچ‌های هلمهولتز را روشن کرده و بوسیله‌ی پیچ جریان، جریان گذرنده از سیم‌پیچ را افزایش دهید تا مسیر پرتو دایره‌ی کامل گردد. در این وضعیت شدت جریان گذرنده از سیم‌پیچ (I_s) را از روی آمپرمتر که در مدار سیم‌پیچ‌های هلمهولتز قرار دارد، خوانده و در جدول (۱) یادداشت کنید و بوسیله‌ی آیینه و زبانه‌ای که به سیم‌پیچ‌ها متصل است، قطر مسیر دایره‌ی مسیر پرتو را در این ولتاژ خاص اندازه‌گیری کرده و در جدول (۱) ثبت کنید.

۵) همین عمل را برای ولتاژهای ۲۰۰ و ۲۵۰ و ۳۰۰ ولت آند تکرار کنید و جدول (۱) را کامل کنید.

۶) بعد از اتمام آزمایش کلید **b** منبع تغذیه را روی صفر برگردانید و آن را خاموش کنید. سیم‌های رابط را از باطری جدا کنید.

جدول (۱):

U ولتاژ آند	(**V**)	۱۵۰	۲۰۰	۲۵۰	۳۰۰
(I_s) جریان سیم‌پیچ هلمهولتز	(**A**)				
r شعاع دایره‌ی مسیر	(**m**)				
B	(**T**)				
$\frac{e}{m}$	$(\frac{\mathbf{C}}{\mathbf{Kg}})$				

پرسش‌ها و بررسی نتایج:

۱) نقش دریچه‌ی ونل را در این آزمایش ذکر کنید.

۲) از چه ولتاژی پرتو از دهانه‌ی مخروطی آند خارج می‌گردد.

۳) نقش میدان مغناطیسیِ زمین را در اندازه‌گیری $\frac{e}{m}$ بنویسید.

۴) با استفاده از روابط (۳) و (۴) و مقادیر اندازه‌گیری شده‌ی جدول(۱)، مقدار شدت میدان مغناطیسی (B) و بار ویژه‌ی الکترون ($\frac{e}{m}$) را محاسبه نمایید.

۵) میانگین $\frac{e}{m}$های بدست آمده را تعیین کنید و در مقایسه آن با مقدار استاندارد ($1.7589 \times 10^{11}\ {}^{C}/_{Kg}$) درصد خطای نسبی آزمایش را بدست آورید.

۶) سیم‌پیچ‌های هلمهولتز در این آزمایش به چه صورت اتصال دارند؟

۷) چرا مسیر پرتو را به صورت دایره‌های آبی رنگ می‌بینید؟

۸) اختلاف پتانسیل لازم برای اینکه الکترون به سرعت نور ($3 \times 10^8\ {}^{m}/_{S}$) برسد، چقدر است؟

آزمایش ۵

مشاهده یونیزاسیون گاز هلیوم در لامپ سه قطبی گازی

هدف آزمایش:

۱) بررسی ساختمان لامپ سه قطبی
۲) مشاهده‌ی پدیده‌ی یونیزاسیون گاز هلیوم در لامپ سه قطبی گازی
۳) تعیین پتانسیل یونیزاسیون برای گاز هلیوم

وسایل مورد نیاز:

لامپ سه قطبی گازی همراه با پایه‌ی مخصوص آن، منبع تغذیه‌ی DC ولتاژ بالا، آمپرمتر ۲ دستگاه، سیم‌های رابط

تئوری آزمایش:

خواص لامپ‌های الکترونی بستگی مستقیمی به طریقه‌ی حرکت الکتریسیته و یا الکترون‌ها در فضای بین دو الکترود لامپ دارد. در سال ۱۸۸۱ توماس ادیسون برحسب تصادف موفق به کشف صدور الکترون از اجسام گداخته گردید که بعدها پایه و راهنمای لامپ‌های الکترونی گردید. او هنگامی‌که بر روی لامپ‌های روشنایی مشغول آزمایش بود، مشاهده نمود که هنگامی‌که یک تکه فلز در حباب خلأی قرار می‌گیرد و گرم می‌شود، از سطح آن الکترون بیرون می‌آید و به همین علت است که این پدیده به نام ادیسون نیز نامیده می‌شود. در حقیقت هنگامی‌که فلزی گرم می‌شود، الکترون‌ها جنبش بیشتری پیدا می‌کنند و در صورتی‌که وابستگی آنها به اتم سست باشد، می‌توانند پیوند خود را با اتم گسسته و از سطح فلز بیرون بیایند و ابری از الکترون در اطراف فلز پدید آورند.
برای تشکیل ابر الکترونی در اطراف فلز باید دمای آن به اندازه‌ی کافی بالا باشد تا بیرون آمدن الکترون‌ها از سطح فلز عملی گردد. در آغاز کشف لامپ الکترونی، مناسب‌ترین فلز برای این منظور تنگستن بود که آن را در حباب شیشه‌ای خالی از هوا تا دمای حدود ۲۲۰۰ درجه‌ی سانتیگراد گرم می‌کردند. این گرمای زیاد باعث خروج الکترون از فلز می‌گشت، ولی عملاً عمر فلز به زمان کوتاهی محدود می‌شود. امروزه به جای اینکه فلزی که نقش کاتد را دارد مستقیماً گرم کنند، کاتد را به شکل استوانه ساخته و در میان آن سیمِ مارپیچی را به نام رشته‌ی فیلامان قرار می‌دهند و آن را گرم می‌کنند تا گرم شدن رشته‌ی فیلامان باعث گرم شدن کاتد گردد. با این کار امکان استفاده از جریان برق متناوب که معمولاً بیشتر در دسترس است نیز امکان‌پذیر می‌گردد. از آن گذشته در دمای ۷۰۰ درجه سانتیگراد نیز خروج الکترون انجام می‌گیرد. از آنجایی‌که هر ذره‌ی الکترون حاوی بار الکتریکی است، میدان‌های الکتریکی و مغناطیسی می‌توانند بر ابر الکترونیِ اطراف کاتدِ گداخته تأثیر کرده و آن را جذب و دفع نمایند. شالوده‌ی ساختمان لامپ‌های الکترونی بر این موضوع یعنی چگونگی اثر میدان‌های نام برده پی‌ریزی شده است.
در سال ۱۹۰۲ یک دانشمند انگلیسی به نام فلمینگ موفق به ساخت لامپ دو قطبی شد. به این طریق که در یک حباب خلأ که کاتد گداخته در آن قرار دارد، یک صفحه‌ی فلزی در برابر کاتد قرار داد و آن را به قطب مثبت یک باتری بست و به آن نام آند نهاد. الکترون‌ها جذب آند شده و با وجود آن‌که هیچگونه اتصالی میان کاتد و آند وجود ندارد، با این‌حال آمپرمتر عبور جریانی را در مدار نشان می‌دهد. آشکار است که در حالت سردی کاتد این جریان وجود ندارد و تنها پس از گرم شدن کاتد و یا فیلامان بوجود می‌آید.
در سال ۱۹۰۷ یک مخترع آمریکایی به نام لیدوفارست یک پنجره و یا یک شبکه‌ی فلزی در سر راه جریان الکترون‌ها میان کاتد و آند قرار داد و آن را به یک ولتاژ معین بست. آشکار است تا هنگامی‌که ولتاژ شبکه صفر باشد، چون سطح شبکه بسیار کوچک است تقریباً تمام الکترون‌ها از درون آن گذشته به آند می‌رسد و لامپ همچون یک دوقطبی کار می‌کند ولی اگر شبکه به ولتاژ منفی بسته شود، الکترون‌ها پس زده می‌شوند و مقدار کمتری الکترون به آند می‌رسد. برعکس چنانچه ولتاژ شبکه مثبت باشد، الکترون‌ها سرعت بیشتری گرفته و در ضمن تعداد الکترون‌هایی که به آند می‌رسند نیز بیشتر می‌شود و در نتیجه جریان آند بیشتر می‌شود. چون با بستن ولتاژ مناسب به شبکه می‌توان به جریان آند فرمان داد. از این‌رو به آن شبکه‌ی فرمان نیز می‌گویند.

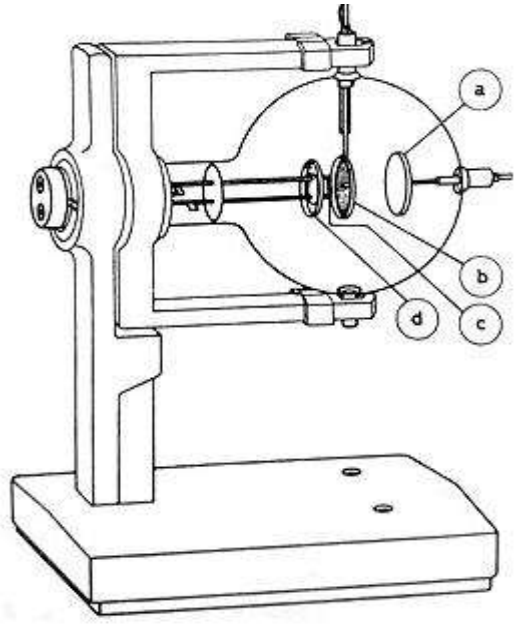
اختراع لامپ سه قطبی یکی از ارزنده‌ترین کشفیات بشر از نظر تکنولوژی در قرن بیستم به شمار می‌رود. این لامپ در مطالعات اتمی نقش اساسی را به عهده دارد. (به عنوان مثال آزمایش فرانک هرتز) و بسیاری از کشفیات اتمی توسط آن‌صورت گرفته است.
در ساختمان لامپ‌های سه قطبی تا آنجایی‌که ممکن است هوای داخل آن‌را خالی می‌کنند تا یونیزاسیون گاز داخل آن عمل کنترل جریان را مختل ننماید و یکی از مشخصات اساسی لامپ‌های سه قطبی این است که به علت وجود شبکه با ایجاد میدان الکترواستاتیکیِ مناسب به خوبی می‌توان جریان حرکت الکترون‌های آزاد را کنترل نمود. ولی در لامپ‌های سه قطبی گازی وجود گاز یونیده شده مزاحم عمل کنترل شده و از آن نمی‌توان به عنوان یک تقویت کننده استفاده نمود. در مواردی‌که کنترل کردن اهمیت کمتری دارد و نیاز به جریان بیشتری در یک لامپ است، از گازهایی چون نیتروژن، هلیوم، نئون و آرگون یا بخار جیوه در ساختمان لامپ استفاده می‌شود. یونیزاسیون گاز زمانی اتفاق می‌افتد که الکترون‌ها از کاتد به سمت آند حرکت نموده و با مولکولهای گاز برخورد نمایند و یا هنگامی‌که مولکول‌های گاز با دیگر مولکول‌ها برخورد نمایند. در این حالت الکترون‌های دیگری که تولید می‌گردند خود باعث افزایش بیشتر الکترون‌ها شده و در نتیجه به‌طور ناگهانی به میزان زیادی الکترون به طرف آند جریان می‌یابد و در همین زمان یون‌های مثبت گاز به طرف کاتد حرکت نموده و با الکترون‌هایی که از کاتد خارج می‌شوند، برخورد نموده و به‌صورت مولکول گاز تبدیل می‌گردند. انرژی لازم برای ایجاد یونیزاسیون در مولکول‌های گاز بوسیله‌ی الکترون‌های با سرعت زیاد توسط پتانسیل بین آند و کاتد تأمین می‌شود. به‌ازای یک ولتاژ معین برای هر یک از انواع گازها این یونیزاسیون به‌طور ناگهانی اتفاق می‌افتد و باعث افزایش سریع در جریان آند می‌گردد. قبل از این‌که این مسئله به‌وقوع بپیوندد، جریان آند در حدود همان جریانی است که لامپ خلأ در همان ولتاژ دارد. ولی هنگامی‌که یونیزاسیون انجام می‌گیرد، جریان آند به‌طور ناگهانی به میزان زیادی افزایش پیدا نموده و در همین حال ولتاژ بین کاتد و آند به مقدار پایین‌تری افت پیدا می‌کند و مقدار کمتری را نسبت به حالت قبل می‌یابد.
ولتاژی را که در آن یونیزاسیون ایجاد می‌شود، پتانسیل یونیزاسیون (*Ionization Potential*) نامیده می‌شود. به محض این‌که یونیزاسیون ایجاد می‌شود به علت واکنش‌هایی که در لامپ ایجاد می‌شود، ولتاژ بین کاتد و آند از ولتاژ یونیزاسیون کمتر می‌شود که این ولتاژ را ولتاژ خاموش کننده (*Extinction Potential*) گویند. در این پتانسیل گاز دوباره به شکل اولیه‌ی خود تبدیل شده و جریان آند قطع می‌شود.

شرح وسایل آزمایش:

لامپ سه قطبی گازی:

این لامپ که ساخت کارخانه‌ی لیبولد آلمان است، با شماره‌ی *5516* با گاز هلیوم با فشار *0.65* پاسکال پرشده است و می‌تواند رفتارهای کیفی و کمی آزمایشات بسیاری را مورد بررسی قرار دهد. مثل هدایت الکتریکی در گازها در فشارهای کم یا چگونگی برخورد غیرالاستیک اتم هلیوم با الکترون‌های آزاد نمونه‌ی ساده شده‌ای از آزمایش فرانک هرتز است. معرفی کاربردهای صنعتی لامپ سه قطبیِ گازی با نام *Thratron* که معمولاً به عنوان یکسوساز یا ایجاد توقف در نوسان‌ها بکار برده می‌شود. مشخصات این لامپ مطابق شکل (۱) به قرار زیر است:

a) آند لامپ
b) شبکه‌ی لامپ
c) فیلامان مارپیچیِ کاتد که از دقیقاً جلوی کاتد قرار دارد.
d) حلقه‌ای است که میدان الکتریکیِ یکنواختی را در فضای بین کاتد و آند ایجاد می‌کند.



شکل (۱): لامپ سه قطبی روی پایه نگهدارنده

توجه:

ولتاژ فیلامان این لامپ بین ۵ تا ۶ ولت باید باشد و ماکزیمم جریانی که می‌تواند از آن عبور نماید، ۳/۵ آمپر می‌باشد.
ماکزیمم ولتاژ آند ۶۰۰ ولت و ماکزیمم جریان مجاز آن ۵۰ میکروآمپر است.
قطر تقریبی لامپ حدود ۱۳ سانتی‌متر است.
بهترین نتایج آزمایش در حالت گرمی کاتد وقتی حاصل می‌شود که، اگر ولتاژ آند بین ۲۵۰ تا ۳۰۰ ولت باشد، جریان آند حدود ۴۰ تا ۵۰ میلی‌آمپر گردد.

روش انجام آزمایش:

- برای مشاهده لومینسانس گاز بهتر است آزمایش در اتاقی تاریک انجام گیرد.
- رِنج مناسب برای ولت‌متر را ۳۰۰ ولت انتخاب نمایید.
- قبل از بستن مدار دقت کنید که منبع تغذیه خاموش بوده و پیچ تنظیم آن روی صفر باشد.
- مدار را مطابق شکل (۲) بسته و حتماً قبل از روشن کردن دستگاه، مدار را به مسئول آزمایشگاه نشان دهید و وقتی از درست بودن مدار مطمئن شدید، منبع را روشن کنید.
- قبل از روشن کردن فیلامان، دقت کنید که پیچ تنظیم ولتاژ حتماً روی صفر باشد.
- بعد از رعایت نکات فوق منبع تغذیه را روشن کنید. بلافاصله فیلامان روشن می‌شود و نور زرد آن قابل مشاهده است.
- ولتاژ آند را به تدریج از صفر تا ۲۵۰ تغییر دهید. در ابتدا تغییرات بین صفر تا ۵۰ ولت را با قدم‌های ۱۰ ولتی و سپس در ولتاژهای بیش از ۵۰ ولت با قدم‌های ۵۰ ولتی انجام دهید.
- در تمام ولتاژهای خواسته شده جریان آند را از روی آمپرمتر بخوانید. دقت کنید که در ابتدا لازم است آمپرمتر را روی حساس‌ترین حالت (۳۰۰ میکروآمپر) و سپس با افزایش ناگهانی جریان و خارج شدن آمپرمتر از رنج آن را در حالت ۳۰میلی‌آمپر تنظیم نمایید.
- نتایج آزمایش را در جدول(۱) ثبت نمایید.
- در طول تمام مراحل آزمایش، به ایجاد رنگ آبی در لامپ، گسترش این رنگ و همچنین تغییر رنگ با افزایش ولتاژ توجه نمایید. مشاهدات خود را در گزارشگار بنویسید.

جدول (۱):

ولتاژ آند V (v)	۱۰	۲۰	۳۰	۴۰	۵۰	۱۰۰	۱۵۰	۲۰۰	۲۵۰
جریان آند I (A)									

پرسش‌ها و بررسی نتایج :

۱) لومینسانس یعنی چه؟ فسفرسانس و فلوئورسانس چه اختلافی با هم دارند؟
۲) با استفاده از جدول (۱) نمودار تغییرات جریان را برحسب ولتاژ رسم کنید.
۳) از روی این نمودار پتانسیل یونیزاسیون را برای گاز هلیوم تعیین نمایید.
۴) علت تغییر ناگهانی جریان در آزمایش را توضیح دهید.
۵) قبل از تغییر ناگهانی جریان، مقدار جریانی که آمپرمتر نشان می‌دهد از کجا ناشی می‌شود؟
۶) در این آزمایش شبکه چه نقشی در مدار دارد؟
۷) چرا کاتد را در آزمایش به منفی منبع تغذیه وصل می‌کنیم؟

۸) علت ایجاد رنگ آبی در لامپ چیست؟

۹) چرا در ولتاژهای پایین رنگ آبی، بین شبکه و کاتد ایجاد می‌شود و با افزایش ولتاژ چرا رنگ تغییر می‌کند؟

۱۰) رنگ ایجاد شده در گلوی لامپ در ولتاژهای بالا به علت چیست؟

آزمایش ۶

آزمایش فرانک هرتز با لامپ سه قطبی گازی

هدف آزمایش:

۱) انجام آزمایش فرانک هرتز و تحقیق منفصل بودن انرژی الکترون‌ها در مدار اتم

۲) اندازه‌گیری انرژی تحریک اتم هلیوم

وسایل مورد نیاز:

لامپ سه قطبی گازی همراه با پایه‌ی مخصوص آن، منبع تغذیه‌ی DC ولتاژ بالا، آمپرمتر ۲ دستگاه، باتری ۶ ولتی، مقاومت‌های ۱۰ کیلوولت، سیم‌های رابط

تئوری آزمایش:

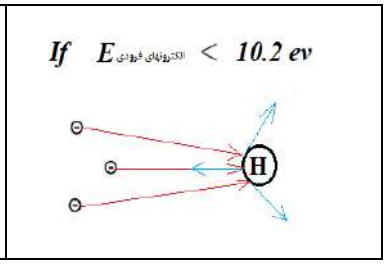
دستگاه‌های اتمی (مانند اتم هیدروژن) کوانتیده‌اند و انرژی‌های مجاز گسسته‌اند. در نتیجه یک فوتون درصورتی می‌تواند دُرآشامیده شود که انرژی آن (انرژی یک فوتون با فرکانس ν برابر است با $h\nu$) با اختلاف انرژی بین دو حالت مجاز ($E_f - E_i$) جور باشد. برای مثال فقط فوتون‌های با انرژی $10.2\ eV$ باعث خواهند شد که اتم‌های هیدروژنی که در حالت پایه قراردارند به اولین برانگیختگی برسند.

ممکن است این سؤال مطرح شود که آیا انرژی یک دستگاه کوانتیده می‌تواند، نه فقط از طریق برخورد با فوتون‌ها، بلکه از طریق برخورد با ذرات دارای جرم سکون غیر صفر (مانند الکترون) نیز تغییر کند؟ برای نخستین بار در سال ۱۹۱۴ آزمایش فرانک هرتز نشان داد که برانگیختگی اتم‌ها توسط بمباران ذره‌ای امکان‌پذیر است و کوانتش انرژی بر این فرآیند نیز حاکم است.

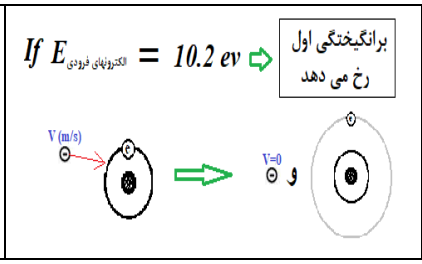
نخست هیدروژن اتمی را در نظر می‌گیریم. فرض کنید که اتم‌های هیدروژن در حالت پایه توسط یک باریکه‌ی تک انرژی از الکترون‌ها که انرژی جنبشیِ آن الکترون‌ها از $10.2\ eV$ (انرژی اولین برانگیختگی اتم هیدروژن) کمتر است، بمباران شوند. چون اتم هیدروژن در حالت پایه نمی‌تواند انرژی خود را کمتر از این مقدار افزایش دهد، الکترون‌ها با اتم‌های هیدروژن به‌طور کاملاً کشسان برخورد می‌کنند و انرژی جنبشی کل ذرات خروجی در این برخورد با انرژی کل ذرات ورودی کاملاً برابر است. (شکل ۱)

اگر الکترون‌های تک انرژی که انرژی جنبشی آن‌ها دقیقاً برابر $10.2\ eV$ است با اتم‌های هیدروژن در حالت پایه برخورد کنند، این برخورد می‌تواند غیرکشسان باشد. در این حالت با تبدیل انرژی جنبشی اولیه‌ی الکترون به انرژی داخلی اتم هیدروژن این اتم یک گذار به سوی بالا (از حالت پایه به اولین برانگیختگی) انجام می‌دهند. این اتم‌های برانگیخته با گسیل یک فوتون با انرژی $10.2\ eV$ به حالت پایه واپاشیده می‌شوند. (شکل ۲)

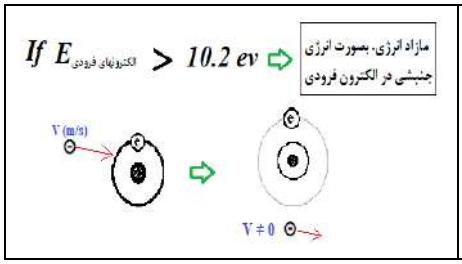
هنگامی‌که الکترون‌های بمباران کننده دارای انرژی جنبشی بیش از $10.2\ eV$ باشند نیز برخورد غیرکشسان خواهد بود، فقط مقدار $10.2\ eV$ به انرژی داخلی برانگیختگی اتمیِ اتم هیدروژن تبدیل خواهد شد و انرژی جنبشی باقی‌مانده نمی‌تواند توسط این اتم هیدروژن درآشامیده شود و الزاماً به‌صورت انرژی جنبشی الکترون خروجی (و تا حد کمتری به‌صورت انرژی جنبشی اتمی که مورد اصابت قرار گرفته) ظاهر می‌شود. (شکل ۳)



شکل (۱)



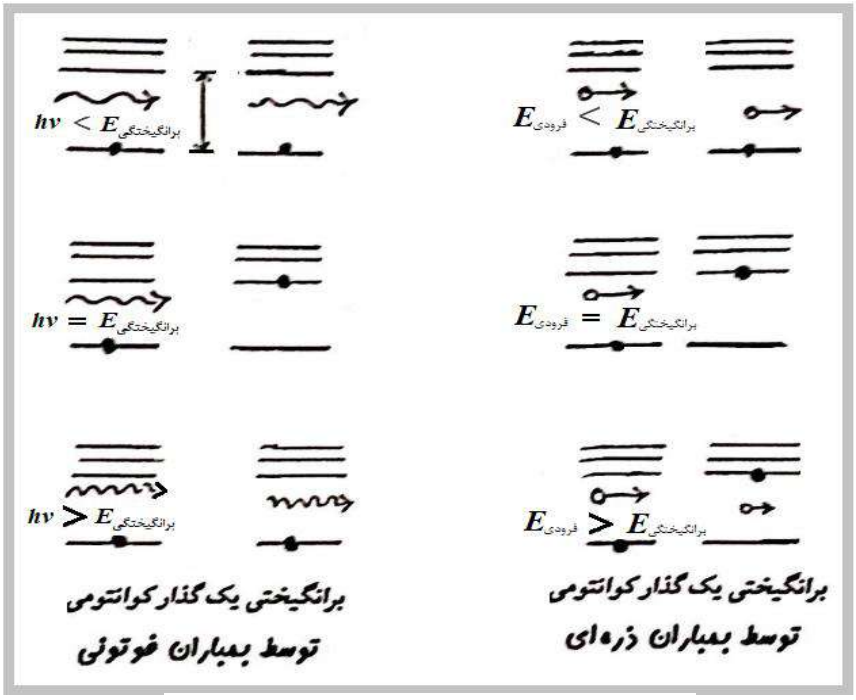
شکل (۲)



شکل (۳)

البته شایان ذکر است که در آزمایش اولیه‌ی فرانک هرتز، الکترون‌ها وادار به برخورد با اتم‌های بخار جیوه شدند. طول موج تابش متناظر با گذار بین حالت پایه و اولین حالت برانگیخته‌ی جیوه برابر با ۲۵۳۶ انگستروم است. انرژی فوتون معادل با آن برابر با انرژی برانگیختگی $4.88\ eV$ است.

اهمیت تاریخی آزمایش فرانک هرتز در این است که در این آزمایش نشان داده شد که دستگاه‌های اتمی کوانتیده‌اند و این موضوع نه فقط در درآشامی و گسیل فوتون بلکه در بمباران ذره‌ای نیز نمایان شد. (شکل ۴) طرح ویژه‌ای که با همکاری دو دانشمند، جیمز فرانک و گوستاو هرتز برای تحقیق این موضوع ریخته شد، جایزه‌ی نوبل سال ۱۹۲۵ را به خود اختصاص داد.

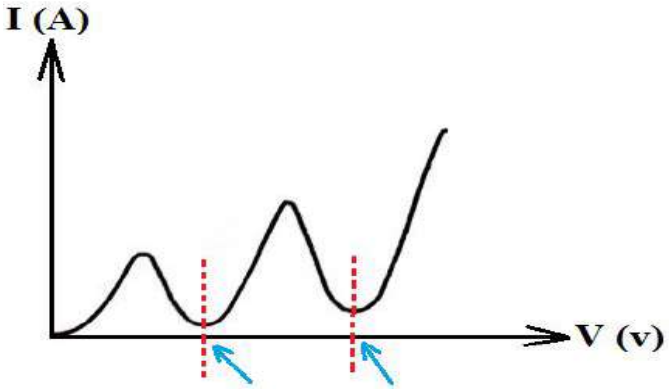


شکل (۴)

در این آزمایش ما از یک لامپ سه قطبی که ساخت کارخانه‌ی لیبولد آلمان است، با شماره‌ی 5516 که با گاز هلیوم با فشار 0.65 پاسکال پرشده است استفاده می‌کنیم. در این لامپ محیط گازی شکل درون لامپ در فشاری ثابت است و با دما تغییر نمی‌کند. شبکه‌ی موجود درون این لامپ هم نقش هدایت‌کننده‌ی الکترونی و هم نقش شتاب‌دهنده را دارد.

به این ترتیب الکترون‌هایی که در اثر گرم شدن کاتد از آن جدا شده‌اند، در اثر پتانسیل مثبت شبکه سرعت گرفته و به سمت آند حرکت می‌کنند. تا زمانیکه انرژی الکترون‌ها کمتر از انرژی اولین برانگیختگی اتم هلیوم است، تمام برخوردها کشسان بوده و فقط باعث تغییر مسیر الکترون‌ها و اتم‌های هلیوم شده و در نهایت الکترون‌ها به آند رسیده و از آن خارج می‌شوند (شکل ۱) و یک جریان ضعیف میکروآمپری را می‌سازند که مقدار آن را در میکروآمپرمتر می‌توانیم بخوانیم. با زیاد شدن پتانسیل آند رفته رفته انرژی الکترون‌ها بیشتر شده و تعداد الکترون‌هایی که به آند می‌رسند بیشتر شده و میکروآمپرمتر افزایش جریان یکنواختی را نشان می‌دهد. این روند تا زمانی ادامه دارد که بالاخره انرژی الکترون‌ها برابر با انرژی لازم برای اولین برانگیختگی اتم هلیوم می‌شود. در اینحالت برخوردها غیرکشسان شده و الکترون‌ها تمام انرژی خود را به اتم هلیوم منتقل کرده و اتم را برانگیخته می‌نماید (شکل ۲). به این ترتیب الکترون انرژی لازم برای رسیدن به آند را ندارد و جریان کاهش می‌یابد. با افزایش پتانسیل آند حالا انرژی الکترون‌ها در حدی است که یک اتم هلیوم را برانگیخته کنند و متوقف نشده و خود را به آند می‌رسانند (شکل ۳). دوباره جریان خروجی شروع به افزایش کرده و در نمودار جریان- ولتاژ (شکل ۴) یک مینیمم ظاهر می‌شود. با زیاد شدن هر چه بیشتر پتانسیل آند بالاخره انرژی الکترون‌هایی که یک برخورد غیرکشسان را پشت‌سر گذاشته‌اند مجدداً به حدی می‌رسد که می‌توانند یک اتم هلیوم دیگر را نیز برانگیخته کرده و

خودشان متوقف شوند. پس دوباره جریان خروجی از آند کاهش می‌یابد. به این ترتیب مینیمم دوم در نمودار جریان- ولتاژ ظاهر می‌شود (شکل ۵).

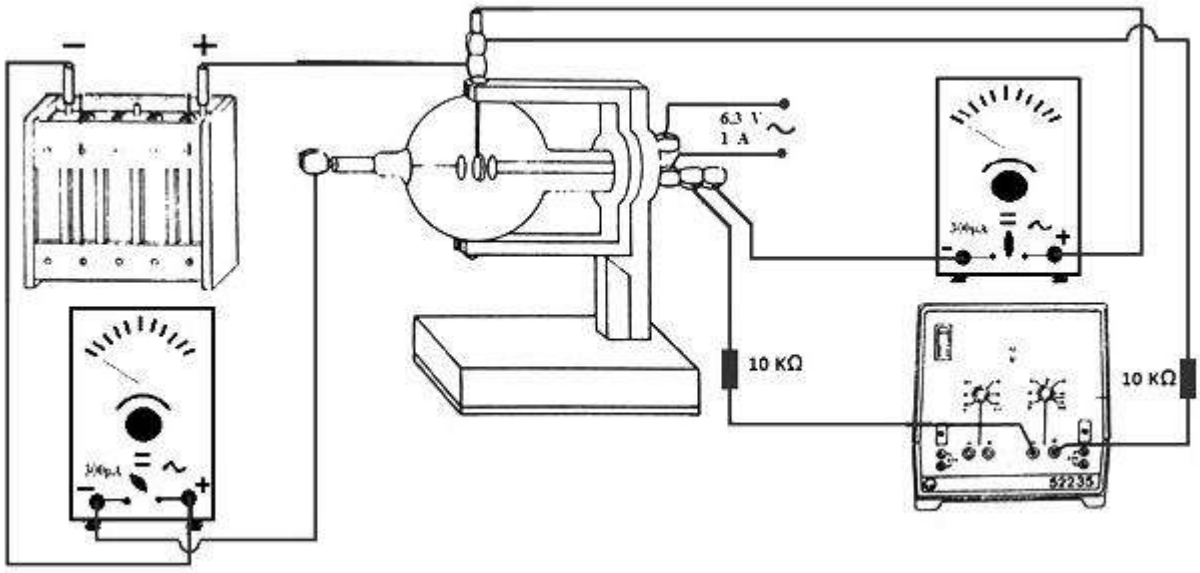


شکل (۵) : نمودار جریان خروجی برحسب پتانسل آند

روش انجام آزمایش:

مدار را مطبق شکل (۶) ببندید. قبل از بستن مدار مطمئن شوید که منبع خاموش بوده و پیچ تنظیم ولتاژ روی صفر باشد. محدوده‌ی مناسب برای ولتمتر ۱۰۰ ولت و برای آمپرمتر ۳۰۰ میکروآمپر (حساس‌ترین حالت آمپرمتر) می‌باشد.

قبل از روشن کردن فیلامان، مدار را به مسئول آزمایشگاه نشان دهید تا از درست بودن مدار مطمئن شوید. دقت کنید که پیچ تنظیم ولتاژ روی صفر باشد. حالا فیلامان را روشن کنید و چند لحظه صبر کنید تا فیلامان کاملاً گرم شود. اتصالات باتری را وصل کنید. توسط پیچ تنظیم ولتاژ، پتانسیل آند را طبق مقادیر خواسته شده در جدول تنظیم کرده و در هر یک از این مقادیر جریان را بخوانید و در جدول (۱) یادداشت کنید. توجه کنید که تغییرات ولتاژ تا ۱۵ ولت بصورت قدم‌های ۳ولتی و بعد از ۱۵ ولت، با قدم‌های ۱ ولتی باشد. بعد از اتمام اندازه‌گیری‌ها اتصالات باتری را قطع نمایید.



شکل (۶): مدار آزمایش

جدول (۱):

پتانسیل آند U_A	
جریان خروجی I_A	

پرسش‌ها و بررسی نتایج:

۱) منحنی تغییرات جریان برحسب ولتاژ را رسم کنید.

۲) فاصله‌ی مینیمم‌ها در این آزمایش چقدر است؟ میانگین مقادیر بدست آورده را محاسبه کنید.

۳) انرژی تحریک اتم هلیوم را با استفاده از نمودار رسم شده محاسبه کنید.

۴) فرکانس و طول‌موج کوانتای صادره از اتم هلیوم تحریک شده بعد از برگشتن به حالت پایه را حساب کنید.

۵) چرا در این آزمایش آند را به قطب منفی باتری وصل می‌کنیم؟

آزمایش ۷

آزمایش فرانک هرتز با لامپ چهار قطبی جیوه

هدف آزمایش:

تحقیق منفصل بودن انرژی الکترون‌ها در مدار اتم به کمک انتقال غیرپیوسته‌ی انرژی توسط الکترون‌های آزاد به اتم‌های جیوه مطابق روش آزمایشی فرانک هرتز

وسایل مورد نیاز:

لامپ چهار قطبی فرانک هرتز همراه نگهدارنده، کوره برقی همراه منبع جریان بالا، منبع تغذیه، ۴ دستگاه مولتی‌متر، باتری ۱/۵ ولتی، تقویت کننده‌ی جریان، مقاومت ۱۰ کیلواهم

تئوری آزمایش:

دستگاه‌های اتمی (مانند اتم هیدروژن) کوانتیده‌اند و انرژی‌های مجاز گسسته‌اند. در نتیجه یک فوتون درصورتی می‌تواند دُرآشامیده شود که انرژی آن (انرژی یک فوتون با فرکانس ν برابر است با $h\nu$) با اختلاف انرژی بین دو حالت مجاز ($E_f - E_i$) جور باشد. برای مثال فقط فوتون‌های با انرژی $10.2\ eV$ باعث خواهند شد که اتم‌های هیدروژنی که در حالت پایه قراردارند به اولین برانگیختگی برسند.

ممکن است این سؤال مطرح شود که آیا انرژی یک دستگاه کوانتیده می‌تواند، نه فقط از طریق برخورد با فوتون‌ها، بلکه از طریق برخورد با ذرات دارای جرم سکون غیر صفر (مانند الکترون) نیز تغییر کند؟ برای نخستین بار در سال ۱۹۱۴ آزمایش فرانک هرتز نشان داد که برانگیختگی اتم‌ها توسط بمباران ذره‌ای امکان‌پذیر است و کوانتش انرژی بر این فرآیند نیز حاکم است.

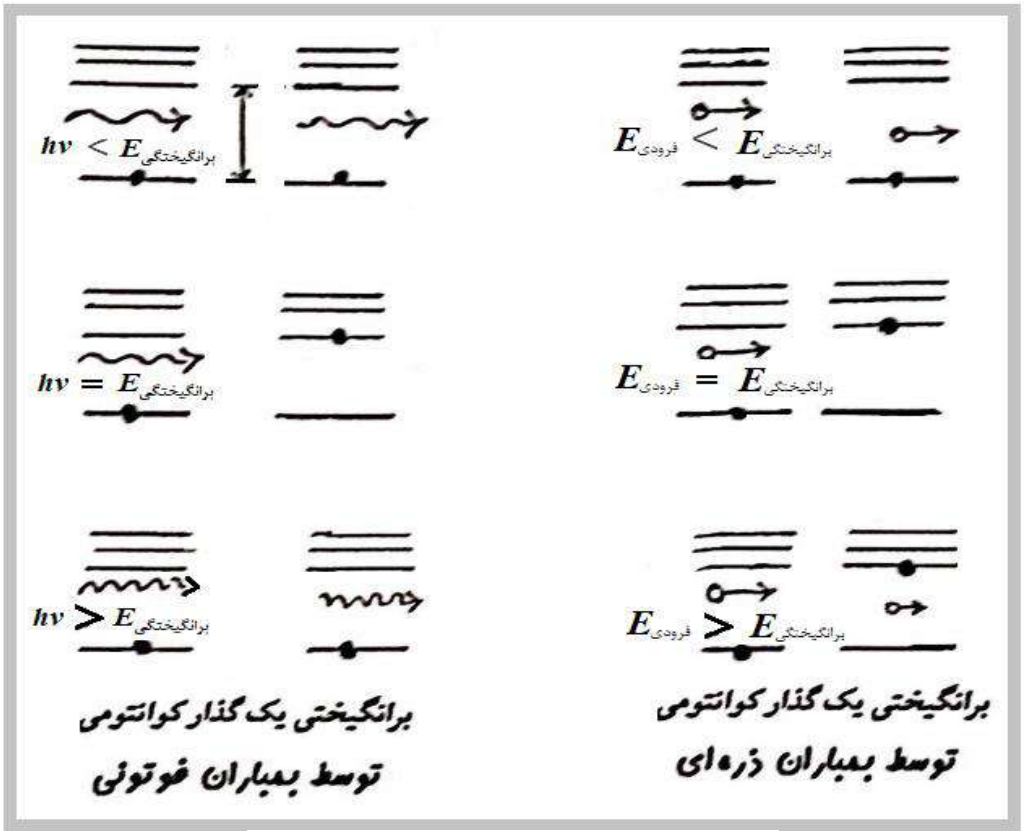
نخست هیدروژن اتمی را در نظر می‌گیریم. فرض کنید که اتم‌های هیدروژن در حالت پایه توسط یک باریکه‌ی تک انرژی از الکترون‌ها که انرژی جنبشیِ آن الکترون‌ها از $10.2\ eV$ (انرژی اولین برانگیختگی اتم هیدروژن) کمتر است، بمباران شوند. چون اتم هیدروژن در حالت پایه نمی‌تواند انرژی خود را کمتر از این مقدار افزایش دهد، الکترون‌ها با اتم‌های هیدروژن به‌طور کاملاً کشسان برخورد می‌کنند و انرژی جنبشی کل ذرات خروجی در این برخورد با انرژی کل ذرات ورودی کاملاً برابر است.

اگر الکترون‌های تک انرژی که انرژی جنبشی آن‌ها دقیقاً برابر $10.2\ eV$ است با اتم‌های هیدروژن در حالت پایه برخورد کنند، این برخورد می‌تواند غیرکشسان باشد. در این حالت با تبدیل انرژی جنبشی اولیه‌ی الکترون به انرژی داخلی اتم هیدروژن این اتم یک گذار به سوی بالا (از حالت پایه به اولین برانگیختگی) انجام می‌دهند. این اتم‌های برانگیخته با گسیل یک فوتون با انرژی $10.2\ eV$ به حالت پایه واپاشیده می‌شوند.

هنگامی‌که الکترون‌های بمباران کننده دارای انرژی جنبشی بیش از $10.2\ eV$ باشند نیز برخورد غیرکشسان خواهد بود، فقط مقدار $10.2\ eV$ به انرژی داخلی برانگیختگی اتمیِ اتم هیدروژن تبدیل خواهد شد و انرژی جنبشی باقی‌مانده نمی‌تواند توسط این اتم هیدروژن درآشامیده شود و الزاماً به‌صورت انرژی جنبشی الکترون خروجی (و تا حد کمتری به‌صورت انرژی جنبشی اتمی که مورد اصابت قرار گرفته) ظاهر می‌شود. با افزایش بازهم بیشترِ انرژی ذرات بمباران کننده، اتم‌ها می‌توانند به دومین حالت برانگیخته و به حالت‌های بالاتر برسند.

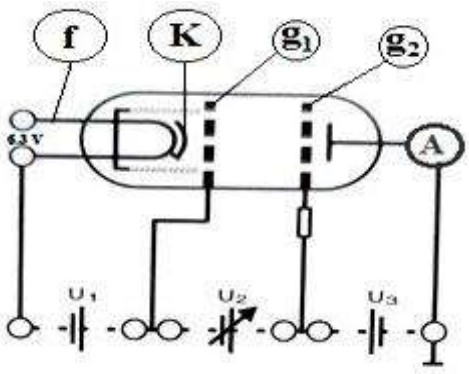
در آزمایش اولیه‌ی فرانک هرتز الکترون‌ها وادار به برخورد با اتم‌های بخار جیوه می‌شدند. طول‌موج تابش متناظر با گذار بین حالت پایه و اولین حالت برانگیخته‌ی جیوه برابر با ۲۵۳۶ انگستروم است. انرژی فوتون معادل با آن برابر با انرژی برانگیختگی $4.88\ eV$ است.

فرانک و هرتز دریافتند که الکترون‌هایی با این حداقل انرژی جنبشی برای تولید برانگیختگی در اتم‌های جیوه مورد نیازند. این مطلب از این حقیقت استباط شد که وقتی انرژی الکترون‌ها از $4.88\ eV$ کمتر بود، تعدادی برخورد غیرکشسان رخ می‌داد. در همان زمان معلوم شد که اگر و فقط اگر الکترون‌هایی با حداقل انرژی برانگیختگی $4.88\ eV$ با اتم‌های جیوه برخورد کنند، اتم‌های جیوه تابش با طول‌موج $2536\ A^{\circ}$ گسیل می‌کنند.



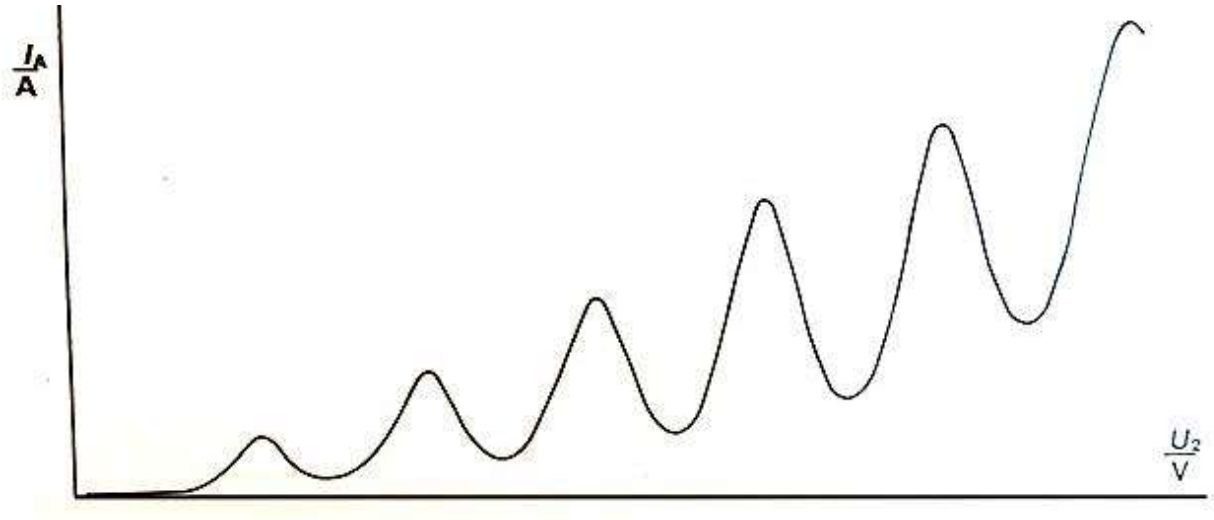
شکل (۱)

اهمیت تاریخی آزمایش فرانک هرتز در این است که در این آزمایش نشان داده شد که دستگاه‌های اتمی کوانتیده‌اند و این موضوع نه فقط در دُرآشامی و گسیل فوتون بلکه در بمباران ذره‌ای نیز نمایان شد. (شکل ۲) طرح ویژه‌ای که با همکاری دو دانشمند، جیمز فرانک و گوستاو هرتز برای تحقیق این موضوع ریخته شد، جایزه‌ی نوبل سال ۱۹۲۵ را به خود اختصاص داد.



شکل (۲) : طرح آزمایش فرانک هرتز

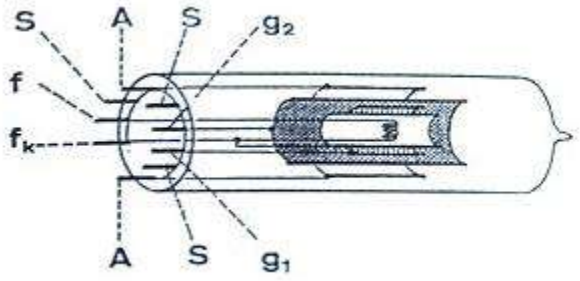
طرح آزمایش فرانک هرتز به این شکل است که درون یک لامپ مانند شکل (۲) از هوا خالی شده و یک قطره جیوه در آن قرار گرفته است. داخل لامپ قطب‌های معینی قرار دارد. (f) رشته‌ایست که بوسیله‌ی جریان برق گرم شده و کاتد K را نیز گرم می‌کنند. گرم شدن کاتد سبب می‌شود که بعضی از الکترون‌های آن به اندازه‌ی کافی انرژی پیدا کرده و از سطح آن خارج شوند. شبکه‌ی g_1 که در مقابل کاتد قرار دارد و (U_1 ولتاژ کنترل است.) الکترون‌هایی که از g_1 خارج می‌شوند، بین g_1 و g_2 توسط پتانسیل شتاب‌دهنده‌ی به آن شتاب می‌گیرند و (U_2 ولتاژ شتاب‌دهنده است.) الکترون‌ها بعد از عبور از شبکه‌ی g_2 به جمع کننده‌ی A (آند) می‌رسند که به پتانسیل منفی متصل است. لامپ فرانک هرتز درون یک کوره‌ی الکتریکی قرار می‌گیرد و به این ترتیب بخار جیوه درون لامپ تشکیل می‌گردد. در آزمایش می‌توان برخوردهای غیرکشسان الکترون‌ها را از طریق اندازه‌گیری جریان الکتریکی ناشی از حرکت الکترون‌ها در یک گاز مولکولی مشاهده کرد. هرچه اختلاف پتانسیل بین کاتد و شبکه زیادتر شود جریان مدار خروجی بیشتر می‌شود. اگر انرژی الکترون‌های سرعت گرفته به اندازه‌ی تفاوت انرژی دو مدار مجاور مجاز اتم جیوه باشد (این انرژی برای اتم جیوه $4.88\ eV$ است.) می‌توانند انرژی خود را در برخورد با اتم جیوه به الکترون مدار آن اتم داده و آن را به مدار بالاتر بفرستند و چون انرژی خودشان را از دست می‌دهند به جمع‌کننده‌ی A نخواهند رسید و جریان کم می‌شود ولی اگر این انرژی به اندازه‌ی کافی نباشد، الکترون‌ها در برخورد با اتم جیوه انرژی از دست نداده در نتیجه جریان مدار خارجی کاهش نمی‌یابد. اگر اختلاف پتانسیل بین g_1 و g_2 و در نتیجه انرژی الکترون‌ها را به تدریج زیاد کنیم، جریان مدار خارجی نیز همراه آن زیاد می‌شود تا جایی که الکترون‌ها انرژی کافی بدست آورده و به اتم جیوه می‌دهند. در این موقع مقدار جریان کاهش می‌یابد تا به مینیمم می‌رسد. در حالت مینیمم جریان، الکترون‌های زیادتری دارای انرژی معین $4.88\ eV$ هستند که در برخورد با اتم جیوه از دست می‌دهند. اگر باز هم اختلاف پتانسیل را زیادتر کنیم، مقدار انرژی الکترون‌ها از مقدار لازم برای یک بار برخورد زیادتر می‌شود و با ادامه‌ی افزایش این مقدار انرژی به دو برابر $4.88\ eV$ می‌رسد. در این حالت الکترون که در نیمه‌ی اول راه دارای انرژی $4.88\ eV$ شده، در برخورد با یک اتم جیوه انرژی خود را به آن اتم داده و در نیمه‌ی دوم راه بار دیگر همین مقدار انرژی را کسب کرده و در برخورد دیگری از دست می‌دهد و به این ترتیب بار دوم جریان به مینیمم می‌رسد. هرگاه اختلاف پتانسیل را زیادتر کنیم به ترتیب به مینیمم‌های سوم و چهارم و ... خواهیم رسید که در این‌حالت‌ها الکترون ۳ و ۴ و ... بار با اتم جیوه برخورد نموده و انرژی خود را به اتم داده است. نمودار جریان مدار خارجی نسبت به اختلاف پتانسیل مانند شکل (۳) خواهد بود.



شکل (۳) : نمودار تغییرات جریان نسبت به اختلاف پتانسیل

مشخصات لامپ چهار قطبی فرانک هرتز :

لامپ فرانک هرتزی که در اختیار دارید لامپی است که در یک طرفش ۸ شاخک دارد و در جایگاهی که به این منظور ساخته شده قرار می‌گیرد. بیرون لامپ از خارج به داخل مطابق شکل (۴) است. آند A، شبکه‌ی شتاب‌دهنده (g_2)، شبکه‌ی(g_1)، کاتد (K) و رشته‌ی گرم کننده‌ی (f) و علاوه بر این‌ها یک شاخک سوزن مانند بین سیم‌هایی که به (A) و (g_2) وصل می‌شود، قرار دارد که هنگام کار لامپ بایستی به زمین تقویت کننده متصل شود. داخل لامپ یک قطره جیوه می‌باشد که با قرار دادن لامپ در یک کوره‌ی الکتریکی تا حدود ۱۸۰ درجه سانتیگراد گرم می‌شود، بطوری‌که فشار بخار جیوه حدود (torr ۱۵) گردد. (شرایط مناسب دما برای رسیدن به فشار لازم برای انجام آزمایش در این آزمایشگاه بطور دقیق‌تر بین ۱۶۵ تا ۱۷۰ درجه سانتیگراد است.)

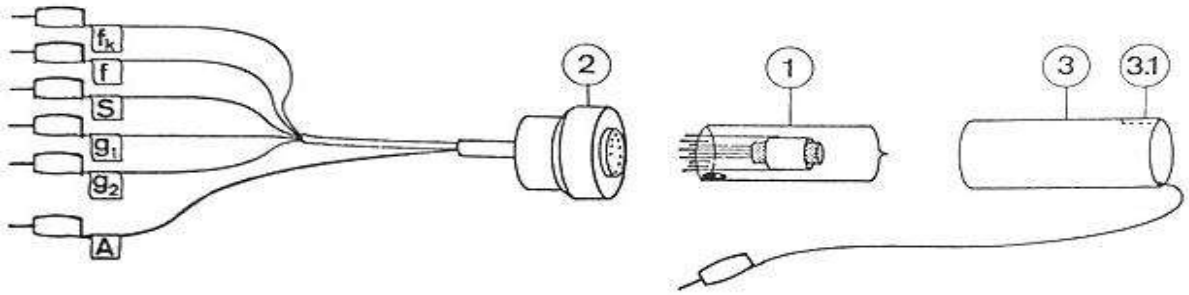


شکل (۴) : برش عرضی لامپ فرانک هرتز

از جایگاه لامپ دو رشته سیم که دارای حفاظ هستند، خارج شده است. یکی از این رشته‌ها دارای پنج سیم و دیگری دارای یک سیم است. بر روی هریک از فیش‌ها علامت ویژه‌ای نصب شده است و نیز هر یک از سیم‌ها برای مشخص بودن رنگ خاصی دارد که در جدول (۱) نشان داده شده است(شکل۵).

جدول (۱):

آند	شاخک اتصال به زمین	شبکه‌ی دوم	شبکه‌ی اول	کاتد	فیلامان	قطب
جدا از سیم‌های دیگر	خاکستری	زرد	سفید	قهوه‌ای	سبز	رنگ سیم
A	**S**	**g_2**	**g_1**	**f_K**	**f**	علامت متصل به سیم



شکل (۵) : فیش‌های متصل به لامپ جیوه

روش انجام آزمایش:

دستگاه آزمایش را مطابق شکل زیر سوار کنید. توجه کنید که لامپ فرانک-هرتز و تقویت کننده‌ای که بکار می‌برید و شرایط آزمایش بسیار حساس است. مدار آزمایش از دو قسمت تشکیل می‌شود.

الف: مدار کوره‌ی الکتریکی

ب: مدار لامپ فرانک-هرتز

الف مدار کوره‌ی الکتریکی: کوره‌ی الکتریکی بوسیله‌ی یک ترانسفورماتور متغییر 25-0 ولت که به یک ولت‌متر متصل است، گرم می‌شود. برای گرم کردن کوره لامپ فرانک-هرتز را از داخل جایگاه آن در کوره خارج کنید و ترانسفورماتور را روشن کنید. ولتاژ ترانسفورماتور را روی ۱۱۰ولت قرار دهید و مدت یک ساعت صبر کنید تا به دمای حدود ۱۶۰ درجه سانتیگراد برسد. (برای اینکه سریعتر به دمای موردنظر برسید، ترانسفورماتور را به مدت ۷ دقیقه روی ولتاژ ۲۲۰ ولت قرار دهید.) بعد از رسیدن به این دما لامپ فرانک-هرتز را داخل جایگاه آن در کوره قرار دهید. در این مرحله دما معمولاً به دلیل تبادل حرارتی افت می‌کند. ولتاژ ترانسفورماتور را بعد از ۲ دقیقه روی ۹۰ ولت برگردانید. دمای لامپ فرانک-هرتز در طول آزمایش می‌بایستی بین ۱۶۵ تا ۱۷۰ درجه سانتیگراد باشد. درصورتی‌که دمای کوره از ۱۸۰ درجه سانتیگراد بیشتر شد، سریعاً لامپ را از درون کوره خارج کنید. در غیر این‌صورت لامپ آسیب می‌بیند.

ب: مدار لامپ فرانک-هرتز:

۱) در مدتی که کوره به دمای موردنظر می‌رسد، مدار لامپ را متصل کنید(مطابق شکل ۶). محدوده‌ی جریان تقویت‌کننده را 10^{-9} اختیار کنید. سپس آن را روشن کرده و مدت ۱۰ دقیقه صبر کنید تا گرم شود.

۲) وقتی که درجه‌ی حرارت کوره به حدود ۱۶۰ درجه سانتیگراد رسید، لامپ جیوه را داخل آن قرار دهید و ۵ دقیقه صبر کنید تا جیوه‌ی داخل لامپ بخار شود و در عین حال دمای آن به ۱۶۵ تا ۱۷۰ برسد.

۳) در صورتی‌که پیچ تنظیم ولتاژ روی صفر است، آن را روشن کنید. در این‌حالت فقط فیلامان لامپ روشن و گرم می‌شود. یک دقیقه صبر کنید، فیلامان گرم شود.

۴) حال اگر درجه‌ی حرارت لامپ به مقدار گفته شده رسیده باشد، ولتاژ $\mathbf{g_2}$ را توسط کلید a از منبع تغذیه به حدود ۳۰ ولت برسانید.

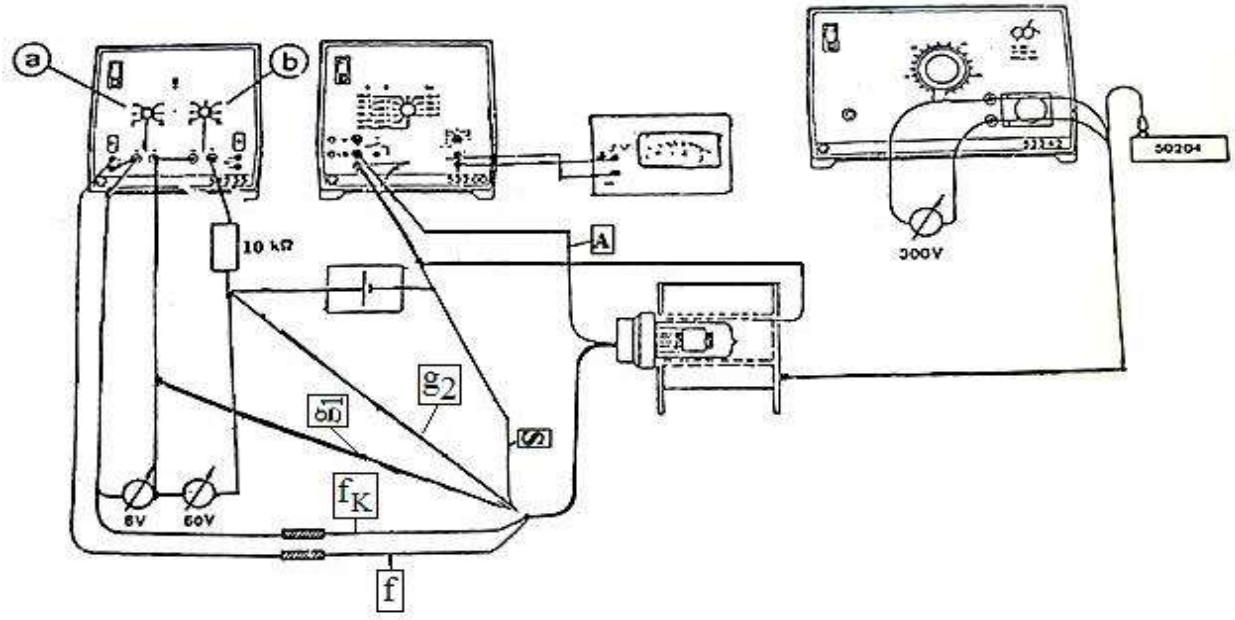
۵) ولتاژ $\mathbf{g_1}$ را توسط کلید b از منبع تغذیه به حدود ۱ ولت برسانید و تغییرات جریان را که نماینده‌ی حرارت لامپ است از روی آمپرمتر حساس متصل به تقویت کننده، مشاهده کنید. در صورتی‌که عقربه‌ی آمپرمتر در وسط صفحه‌ی مدرج قرار گرفته باشد، درجه‌ی حرات لامپ برای انجام آزمایش مطلوب است. توجه کنید که در این آزمایش سه پارامتر ۱- دمای اجاق، ۲- ولتاژ کنترل کننده‌ی $\mathbf{g_1}$ و ۳- ولتاژ شتاب‌دهنده‌ی $\mathbf{g_2}$ می‌بایستی با یکدیگر سازگار باشند تا در نهایت جواب مناسب حاصل گردد.

۶) ولتاژ $\mathbf{g_2}$ را سریعاً بوسیله‌ی پیچ a روی صفر برگردانید.

۷) در حالی‌که ولتاژ کنترل $\mathbf{g_1}$ روی ۱ ولت است، ولتاژ شتاب‌دهنده‌ی $\mathbf{g_2}$ را بطور پیوسته تغییر دهید و جریان آمپرمتر را یادداشت کنید. تغییرات ۱ ولت باشد و تا ۳۰ ولت ادامه دهید و جدول (۲) را کامل کنید. در طول آزمایش اگر عقربه‌ی آمپرمتر از صفحه خارج شد، محدوده‌ی تقویت کننده را تغییر دهید.

۸) آزمایش را برای حالتی‌که $\mathbf{g_2}$ روی ۲ ولت باشد، مجدداً تکرار کنید و جدول (۳) را کامل کنید.

توجه کنید: اگر جریان آمپرمتر خیلی سریع افزایش یابد، ولتاژ $\mathbf{g_2}$ را بلافاصله صفر کنید. زیرا در این شرایط به دلیل سرد بودن بیش از حد لامپ، تخلیه‌ی الکتریکی در گاز اتفاق افتاده است. در این شرایط بعد از صفر کردن و خاموش کردن منبع تغذیه‌ی ولتاژ اجاق را حدود ۵ ولت افزایش دهید تا لامپ به دمای مورد نظر برسد.



شکل (۶) : مدار آزمایش

جدول (۲): ($\mathbf{g_1 = 1\ V}$)

g_2	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	۱۰	۱۱	۱۲	۱۳	۱۴	۱۵
I															
g_2	۱۶	۱۷	۱۸	۱۹	۲۰	۲۱	۲۲	۲۳	۲۴	۲۵	۲۶	۲۷	۲۸	۲۹	۳۰
I															

جدول(۳): ($\mathbf{g_1 = 2\ V}$)

g_2	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	۱۰	۱۱	۱۲	۱۳	۱۴	۱۵
I															
g_2	۱۶	۱۷	۱۸	۱۹	۲۰	۲۱	۲۲	۲۳	۲۴	۲۵	۲۶	۲۷	۲۸	۲۹	۳۰
I															

پرسش‌ها و بررسی نتایج:

۱) منحنی تغییرات جریان را برحسب ولتاژ g_2 برای g_1 های مختلف از روی جدول (۲) و (۳) روی یک کاغذ میلی‌متری رسم کنید و تفاوت این منحنی‌ها را یادداشت کنید.

۲) انرژی تحریک اتم جیوه مطابق این منحنی‌ها چقدر است؟

۳) فرکانس و طول‌موج کوانتای صادره از اتم تحریک شده‌ی جیوه را حساب کنید.

۴) چرا جریان آند بوسیله‌ی یک کابل کواکسیال (هم محور) به آمپلی‌فایر بسته شده است؟

۵) چرا افزایش ولتاژ g_2 باعث خرابی لامپ می‌شود؟

۶) چرا در این آزمایش از بخار جیوه استفاده می‌شود؟

۷) چرا هنگامی‌که الکترون‌ها انرژی خود را به اتم جیوه می‌دهند. شدت جریان می‌نیمم می‌شود و صفر نمی‌شود.

آزمایش ۸

آزمایش تابش جسم سیاه

هدف آزمایش:

مطالعه قانون استفان بولتزمن، مطالعه قانون کسینوس لامبرت و تحقیق قانون عکس مجذور فاصله در تابش جسم سیاه

وسایل آزمایش:

ریل اپتیکی ۲ عدد، گیره مدرج، ترمومتر الکتریکی، کوره و منبع تغذیه آن، میکروولتمتر، ترموپیل همراه دریچه شیشه‌ای، دیافراگم متغییر، دیافراگم سرد کننده، سیم‌های رابط

تئوری آزمایش:

در آزمایش قوانین کیرشهف متوجه شدیم: تابش گرمایی[۱] که از جسم داغ گسیل می شود، فقط به دمای جسم وابسته نبوده بلکه به جنس، شکل و ماهیت سطح آن جسم نیز وابسته است. برای برآمدن از عهده‌ی پیچیدگیِ مسئله‌ی تابش، مفهوم تابشگر ایده‌آل به کار گرفته شد. در یک تابشگر ایده‌آل طیف تابش گرمایی گسیل شده از سطح آن فقط به دمای تابشگر بستگی داشته و به عوامل دیگر وابسته نیست. جسم سیاه، یک تابشگر ایده‌آل است[۲].

جسم سیاه به جسمی گفته می‌شود که جذب آن کامل بوده و بتواند کلیه تابش‌های الکترومغناطیسی با هر فرکانسی را بطور کامل و بدون هیچ بازتابی جذب نماید. همچنین جسم سیاه قادر است در اثر گرم شدن، تابش الکترومغناطیسی با همه فرکانس‌ها را تابش نماید[۳].

علت نامگذاری چنین جسمی به نام "جسم سیاه" این است که پرتو نوری را که بر آن تابیده شده است، کامل جذب کرده و بازتاب نمی‌کند، بنابراین سیاه به نظر می‌رسد. البته ذکر این نکته ضروری است که انتخاب کلمه سیاه مناسب به نظر نمی‌رسد، زیرا درست است که در دمای عادی اجسامی که جذب کننده‌ی خوبی هستند سیاه به نظر می‌رسند؛ اما از ترمودینامیک می‌دانیم که چنین جسمی در یک دمای مشخص، در عین حال از هر جسم دیگری، تابش کننده بهتری خواهد بود[۴].

پس به این ترتیب جسمی که بتواند همه انرژی‌های تابیده شده بر آن را جذب کند، ناشر یا تابش کننده‌ی ایده‌آل نیز هست. اگر همین جسم سیاه را گرم کنیم، ابتدا نور قرمز و بالاخره نور سفید از آن به خارج تابش می‌کند بنابراین سیاه بودن، این نوع اجسام را بطور کامل توصیف نمی‌کند.

یک مثال مناسب برای جسم سیاه "کاواک" است. یک جسم میان تهی را در نظر بگیرید که مطابق شکل(۱) فقط یک حفره‌ی کوچک روی آن تعبیه شده است. هر تابشی که از طریق این حفره به درون جسم وارد شود توسط دیواره‌های داخلی جسم مکرراً بازتاب داخلی می‌یابد تا بالاخره جذب می‌شود.

---

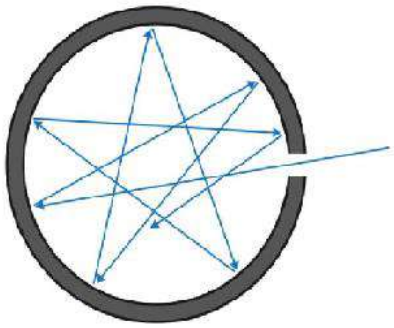
[۱] تابش گرمایی، تابش الکترومغناطیسی است که از سطح اجسام با دمای بالای صفر کلوین به اطراف ساطع می‌شود.

[۲] فیزیک هالیدی- جلد چهارم

[۳] مبانی فیزیک نوین- سلز و وایدنر

[۴] مکانیک کوانتومی-جلد اول- دکتر سرکرده‌ای

اگر ابعاد حفره نسبت به جسم کوچک باشد، تابشی که از طریق این حفره وارد جسم شده، شانس بسیار کمی برای خارج شدن از داخل جسم را دارد. به این ترتیب این حفره، حکم جسم سیاه را دارد (دقت کنید که جسم سیاه همین حفره است نه خود جسم میان تهی[۵].



شکل(۱): کاواک

لذا می‌توان در آزمایشگاه از چنین دهانه‌ای به عنوان جسم سیاه مطلق استفاده کرد. همانطور که قبلاً گفته شد، اهمیت جسم سیاه به عنوان یک تابشگر ایده‌آل در این است که خواص تابشی آن فقط تابع دما بوده و به جنس جسم بستگی ندارد.

توان تابشی (جذب) اجسام که به آن تابندگی کل نیز گفته می‌شود، برابر با مقدار انرژی حرارتی است که از واحد سطح این اجسام در واحد زمان و به ازای تمام فرکانس‌ها تابش یا جذب می‌گردد. آزمایش‌های تجربی نشان داده است که توان تابشی بستگی به درجه حرارت مطلق و نوع سطح و رنگ آن‌ها دارد. بستگی تابش‌های حرارتی به نوع سطح، هنوز در چارچوب یک قانون فرموله نشده است، اما بستگی آن به دما در فیزیک کلاسیک توسط قانون تجربی استفان- بولتزمن با تقریب خوبی بیان می‌شود.

براساس این قانون، توان تابشیِ کل تابیده شده از سطح در دمای T (کلوین) که در اینجا با $R(T)$ نشان می‌دهیم، نسبت مستقیم با توانِ چهار دما دارد (رابطه ۱) که ثابت تناسب در این رابطه $\epsilon\sigma$ است.

$$R(T) = \epsilon\sigma T^4 \qquad (۱)$$

σ ثابت استفان- بولتزمن نامیده می‌شود و مقدار آن برابر است با:

$$\sigma = 5.67 \times 10^{-8} \qquad ({}^{W}/_{m^2K^4})$$

ϵ در رابطه‌ی (۱) کمیت بدون بعدی است که گسیلندگیِ سطح یا گسیلان نامیده می‌شود. این ضریب بستگیِ $R(T)$ به نوع سطح جسم تابان را نشان می‌دهد. البته ϵ به طور غیرمستقیم به دما نیز بستگی دارد. مقدار ϵ در اجسام مختلف بین صفر و یک تغییر می‌کند. به عنوان مثال تجربه ثابت کرده است که گسیلانِ یک جسم زبر، بیش از گسیلان یک جسم صیقلی است. مقدار این کمیت برای یک جسم سیاه (تابشگر ایده‌آل) برابر یک و برای اجسام غیر سیاه همیشه کوچکتر از یک است. به این ترتیب قانون استفان- بولتزمن برای یک جسم سیاه به صورت رابطه (۲) خواهد بود[۶].

$$R(T) = \sigma T^4 \qquad (۲)$$

هرگاه تابش گرمایی که از یک جسم (مثلاً یک جسم سیاه) با دمای T تابیده شده است را به طیف آن تجزیه کنیم و ترموکوپل حساس را در هر یک از خطوط طیف به طول موج λ قرار دهیم، متوجه می‌شویم که ترموکوپل مقداری متفاوت از طول موج‌های دیگر طیف نشان می‌دهد. نکته مهم این است که توان تابش در یک دمای ثابت T، برای یکی از این خطوطِ طیفِ تجزیه‌شده که طول موج آن را با λ_{max} نشان می‌دهیم، بیشتر از بقیه طول‌موج‌ها است. حال اگر دمای جسم تابش کننده را افزایش دهیم، این توان تابشیِ بیشینه در طول‌موج کوچکتری بدست می‌آید. یعنی λ_{max} برای دمای جدید با λ_{max} برای دمای قبلی متفاوت است. برای توصیف بهتر این مشاهده کمیتی به نام گسیلندگی طیفی را تعریف می‌کنیم.

---

[۵] فیزیک جدید-کرین

[۶] فیزیک هالیدی-جلد چهارم

گسیلندگی طیفی که در اینجا با $R(\lambda)$ نشان می‌دهیم، چگونگی تغییرات توان تابشی جسم در دمای ثابت T را برحسب فرکانس توصیف می‌کند. این کمیت طوری تعریف شده است که حاصلضرب $R(\lambda).d\lambda$ عبارت است از توان تابشی جسم در واحد سطح و دمای ثابت T ، در محدوده طول‌موج‌های λ تا $\lambda+d\lambda$ ، بر اساس این تعریف برای محاسبه توان تابش کل یا تابندگیِ کل $(R(T))$ می‌توان به ترتیب زیر عمل کرد:

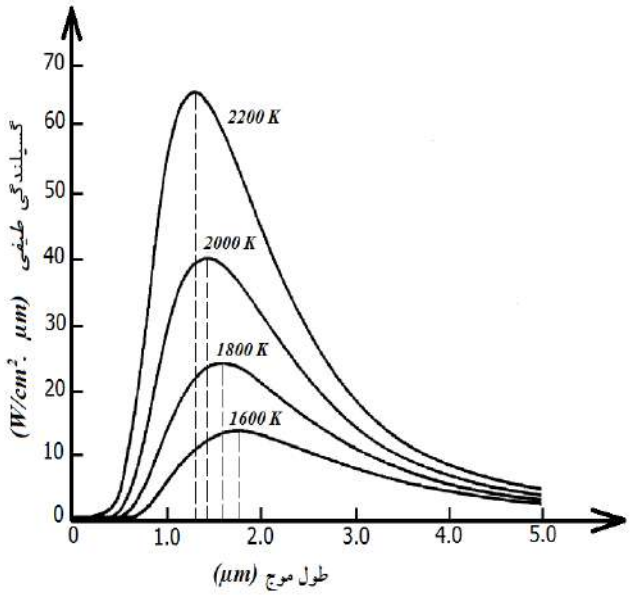
$$R(T) = \int_0^{\infty} R(\lambda)d\lambda \qquad (T = const) \qquad (۳)$$

چنانچه واحد طول‌موج میکرومتر باشد، واحد $R(\lambda)$ $(W/_{m^2\mu m})$ خواهد بود.

شکل(۲) گسیلندگی طیفی یک کاواک در ۴ دمای مختلف را نشان می‌دهد. این شکل نشان می‌دهد که λ_{max} یعنی طول‌موجی که در آن گسیلندگی طیفی کاواک بیشینه است، با افزایش دما کاهش پیدا می‌کند. ویلهم وین نشان داد که حاصلضرب طول‌موج بیشینه در دمای جسم برحسب کلوین $(\lambda_{max}T)$ مقداری ثابت است. مقداری که برای این ثابت به شیوه‌ی تجربی اندازه‌گیری شده برابر است با:

$$\lambda_{\max T} = 2.89 \times 10^{-3} \quad (m\,K) \qquad (۴)$$

این نتیجه را قانون جابجایی وین می‌گویند. واژه جابجایی، اشـــاره به چگونگی حرکت یا جابجایی قله در منحنی‌های رسم شده برحسب λ با تغییر دما است[۷]. (شکل۲)



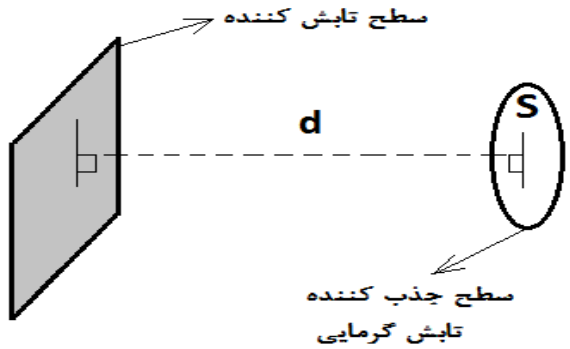
شکل(۲): منحنی‌های گسیلندگیِ طیفی برای تابش کاواک در ۴ دمای مختلف.

یکی از نکات قابل توجه در تابش از سطح اجسام، تأثیر فاصله تا منبع تشعشع می‌باشد. طبق قانون عکس مجذور فاصله، شار تابشی که بطور عمودی از سطح معینی عبور می کند، با عکس مجذور فا صله آن سطح تا منبع تابش متنا سب ا ست. یعنی اگر سطح S مانند شکل (۳) عمود بر امتداد تابش و به فاصله d از منبع تابش قرار گرفته باشد، آنگاه:

($\varphi(T)$ شار عبوری از صفحه S است.)

$$\varphi(T) \propto \frac{1}{d^2} \qquad (۵)$$

[۷] فیزیک هالیدی-جلد چهارم

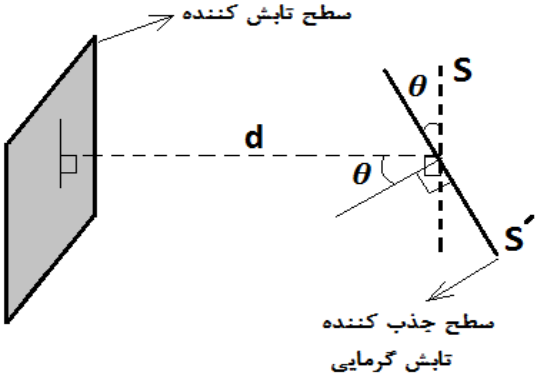


شکل(۳): شار تابشی عبوری از سطح S که عمود بر راستای تابش قرار گرفته، متناسب با عکس مجذور فاصله است.

چنانچه گیرنده‌ی انرژی، صفحه S' باشد که با صفحه S زاویه θ ساخته باشد (شکل۴)، میزان شار عبوری از S' متناسب با کسینوس زاویه θ است. یعنی:

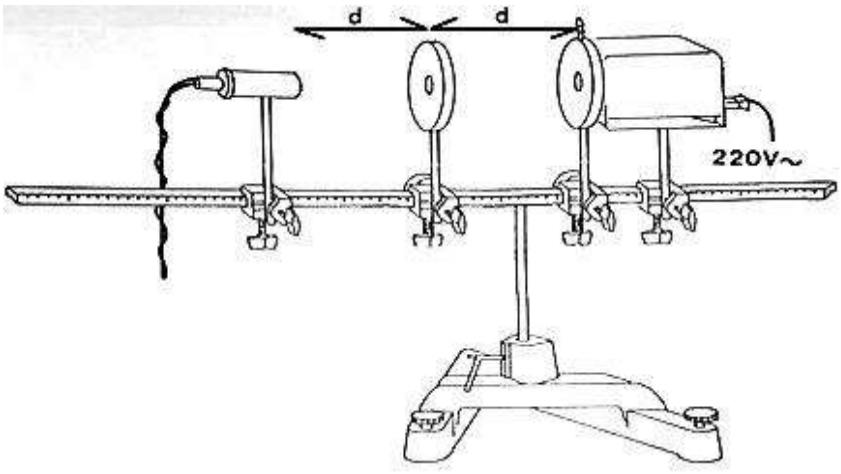
$$\varphi(T) \propto \cos\theta \qquad (۶)$$

رابطه (۶) به قانون کسینوس لامبرت موسوم است[۸].



شکل(۴): شار تابشی عبوری از سطح S' که با راستای تابش زاویه θ ساخته است.

روش انجام آزمایش:



شکل(۵): چینش وسایل روی ریل اپتیکی

پایه کوره الکتریکی را به کمک گیره چند منظوره به ریل اپتیکی ببندید و کوره (شکل ۳-۷) را روی پایه سوار کنید. در فاصله‌ای حدود ۱۰ سانتی‌متر از کوره دیافراگم متغییر (شکل ۷-۷) را به کمک گیره چند منظوره به ریل اپتیکی ببندید و در فاصله ۱۰ سانتی‌متر از دیافراگم، ترموپیل (شکل ۴-۷) را توسط گیره چند منظوره طوری به

[۸] آشنایی با اپتیک - پدروتی

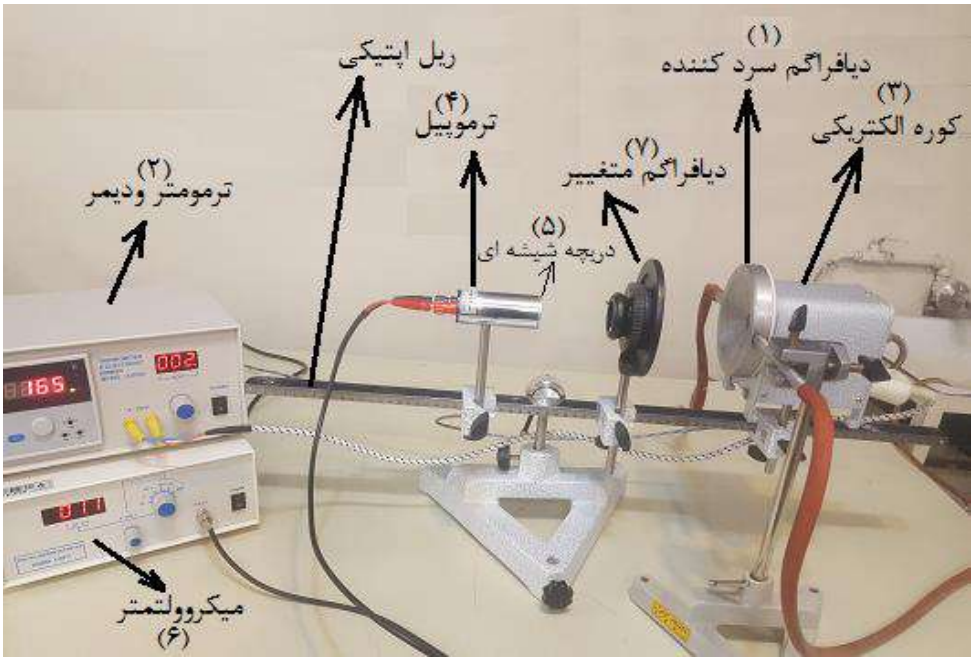
ریل اپتیکی ببندید که اولاً : مرکز سوراخ کوره، مرکز دیافراگم و مرکز ترموپیل در یک راستا و یک ارتفاع از ریل قرار گیرند. ثانیاً: فاصله لبه ترموپیل از دیافراگم متغییر با فاصله لبه کوره از دیافراگم مساوی ۱۰ سانتی‌متر (d=10 cm) باشد (شکل۵).

شکل(۶): محل قرار گرفتن سنسور ترموکوپل

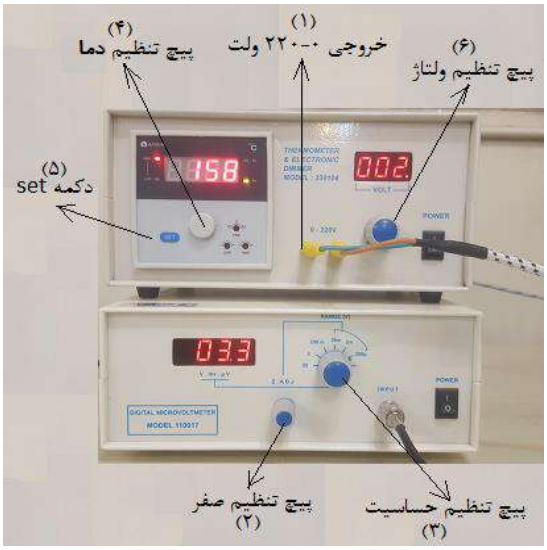
جسم سیاه درون حفره‌ی کوره طوری قرار می‌گیرد که طرف خالی آن به سمت بیرون باشد. در انتهای جسم سیاه سوراخ کوچکی وجود دارد که محل قرارگرفتن حس‌گر ترموکوپل است (شکل ۶). این سوراخ در مقابل سوراخِ پشت کوره قرار می‌گیرد تا بتوان ترموکوپل را در تماس با جسم سیاه قرار داد و دمای آن را اندازه‌گیری کرد.

دیافراگم سردکننده (شکل۱-۷) جداگانه روی یک پایه ثابت شده است. آن را به گونه‌ای جلوی کوره قرار دهید که اولاً: بطور کامل به کوره بچسبد و ثانیاً: محل سوراخِ روی دیافراگم سردکننده، دقیقاً در امتداد دهانه جسم سیاه، دهانه‌ی روی دیافراگم متغییر و دهانه‌ی ترموپیل باشد.

نقش دیافراگم سردکننده این است که از تابش‌های اضافی به جز تابش جسم سیاه و فقط به اندازه دهانه‌ی دیافراگم جلوگیری کند. برای این منظور در دو طرف دیافراگم، دو لوله به قطر یک سانتی‌متر تعبیه شده که به کمک آن‌ها جریان آب درون دیافراگم به گردش درمی‌آید و در طول آزمایش دیافراگم خنک می‌ماند. یک لوله لاستیکی را که به شیر آب متصل است، به یکی از لوله‌های دیافراگم و صل می‌کنیم و لوله لاستیکیِ دیگری را به لوله‌ی طرف دیگر دیافراگم متصل می‌کنیم و درون سینک قرار می‌دهیم. در طی آزمایش شیر آب را کمی باز می‌کنیم تا در تمام طول آزمایش آب از یکی از لوله‌ها به دیافراگم وارد و از لوله‌ی طرف مقابل به سمت سینک هدایت شود. به این ترتیب بدنه‌ی دیافراگم، در تمام مدت آزمایش خنک بوده و توسط حرارت کوره داغ نمی‌شود.



شکل(۷): چینش وسایل روی ریل اپتیکی در آزمایش اول



شکل(۸): دیمر و ترمومتر الکتریکی در یک قاب جمع شده اند.

حس‌گر ترموکوپل را از سوراخ انتهای کوره و جسم سیاه که در امتداد هم قرار گرفته‌اند، درون جسم سیاه قرار دهید. سر دیگر ترموکوپل به پشت ترمومتر الکتریکی (شکل۲-۷) متصل است. کابل برق کوره (شکل۳-۷) به خروجی ۰-۲۲۰ ولتِ دیمر شکل (۸-۱) متصل می‌شود. (دیمر و ترمومتر الکتریکی هر دو در یک قاب قرارداده شده‌اند شکل(۲-۷)). خروجی ترموپیل (شکل۴-۷) را که انتهای آن واقع شده، توسط کابلِ یک سر BNC به ورودی میکروولتمتر (شکل۶-۷) متصل کنید. در دهانه ورودی ترموپیل یک دریچه شیشه‌ای نصب شده است که قابل برداشتن می‌باشد (شکل۵-۷). این دریچه ضمن اینکه مانع ورود اشعه فروسرخ به درون ترموپیل می‌شود، از ورود گرد و غبار به داخل آن نیز ممانعت می‌کند. میکروولتمتر را روشن کرده و در بیشترین حساسیت (۲۰۰ میکروولت) قرار می‌دهیم (شکل۳-۸). چند دقیقه صبر می‌کنیم تا ثابت شود. حالا توسط پیچ Zero ADJ (شکل۲-۸) میکروولتمتر را روی صفر تنظیم می‌کنیم. دقت کنید که در این بازه دریچه شیشه‌ای روی دهانه ترموپیل باشد.

مجموعه‌ی ترمومتر الکتریک و دیمر را روشن کنید و مطمئن شوید که ولتاژ کوره روی صفر باشد. سپس دمای محیط را (دمایی که ترمومتر قبل از روشن کردن کوره و شروع آزمایش نشان می‌دهد.) از روی ترمومتر الکتریکی بخوانید و یادداشت کنید.

آزمایش اول: تحقیق قانون استفان- بولتزمن:

می‌خواهیم دمای کوره را تا ^{oC} ۳۵۰ بالا ببریم. برای این منظور باید ترمومتر الکتریکی را تنظیم کنید؛ به گونه‌ای که وقتی کوره به دمای ^{oC} ۳۵۰ رسید، ولتاژ را قطع کند. به این ترتیب عمل کنید:

دکمه‌ی set روی ترمومتر (شکل۵-۸) را بفشارید و بوسیله‌ی پیچ سفید روی ترمومتر (شکل۴-۸)، دمای مورد نظر (°c ۳۵۰) را انتخاب کنید. یعنی پیچ سفید را آن‌قدر بپیچانید که عدد ۳۵۰ نشان داده شود. حال دوباره دکمه‌ی set را بفشارید. همانطور که ملاحظه می‌کنید، دوباره روی صفحه‌ی نمایشگر دمای محیط نمایش داده می‌شود. در ادامه بوسیله‌ی پیچ تنظیم ولتاژ (شکل ۶-۸)، ولتاژ را تا ۱۲۰ ولت بالا ببرید. دمای کوره شروع به افزایش کرده و هرچه زمان می‌گذرد، دما سریعتر بالا می‌رود. وقتی دمای کوره به ۳۵۰ درجه سانتیگراد رسید، ترمومتر خودبخود ولتاژ را قطع می‌کند اما دمای کوره تا بازه‌ی زمانی کوتاهی باز هم بالا خواهد رفت و سپس شروع به کاهش خواهد کرد.

وقتی دمای کوره شروع به کاهش کرد، در اولین دمای خواسته شده در جدول شماره (۱) در یک لحظه دریچه شیشه‌ای ترموپیل را بردارید تا ترموپیل انرژی حرارتی را دریافت و میکروولتمتر ولتاژ خروجی را نمایش دهد. چند لحظه صبر کنید، وقتی که میکروولتمتر تقریباً ثابت شد، ولتاژ را یادداشت کنید و بلافاصله دریچه را در جای خود قرار دهید. دقت کنید بازه صبر کردن اینقدر طولانی نبا شد که دما تغییر کند. به ازای تمام دماهای خواسته شده در جدول (۱) این کار را تکرار کرده و نتایج را در جدول (۱) ثبت کنید. (توجه کنید بعد از هر بار اندازه‌گیری ولتاژ، دریچه شیشه‌ای ترموپیل را ببندید و منتظر بمانید تا دما به مقدار دلخواه برسد.)

جدول(۱): آزمایش اول

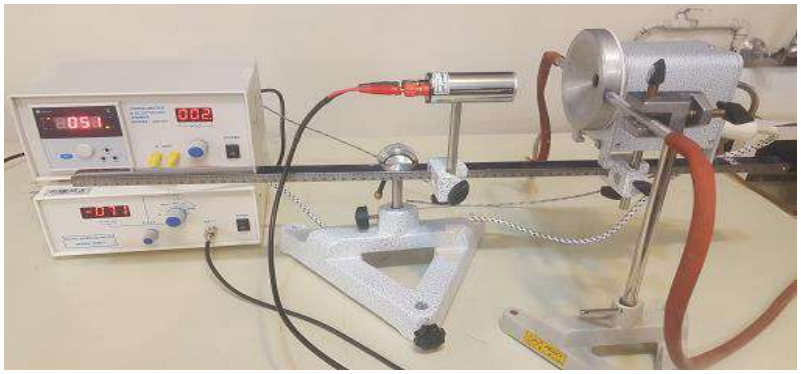
$T\ ^{o}C$	$T\ ^{o}K$	T^4 $(^{o}K^4)$	V (μv)
۳۲۷			
۳۱۷			
۳۰۷			
۲۹۷			
۲۸۷			
۲۷۷			
۲۶۷			
۲۵۷			
۲۴۷			
۲۳۷			

۱) منحنی تغییرات V برحسب T^4 را رسم کنید و قانون استفان- بولتزمن را تحقیق کنید.

۲) چرا نمودار رسم شده بر خلاف انتظار از مرکز مختصات عبور نمی‌کند؟

۳) آیا می‌توان با استفاده از این نمودار ثابت استفان- بولتزمن (σ) را محاسبه کرد؟ چرا؟

آزمایش دوم: تحقیق قانون عکس مجذور فاصله



شکل(۹): چینش وسایل روی ریل اپتیکی در آزمایش دوم

در ادامه بخش قبل پیش از آن که دمای کوره به پایین‌تر از ^{oc} ۲۰۰ برسد، تنظیم ترمومتر را تغییر دهید و به همان شیوه که در آزمایش اول توضیح داده شد، مقدار دما را روی ^{oc} ۲۰۰ تنظیم نمایید. دیافراگم متغییر را از روی ریل اپتیکی باز کرده و ترموپیل را در فاصله d=10 cm از کوره روی ریل ثابت کنید (شکل۹).

وقتی دما به ^{oc} ۲۰۰ رسید، دریچه شیشه‌ای ترموپیل را بردارید و ولتاژ را اندازه‌گیری نمایید. دریچه را در جای خود گذاشته و ترموپیل را ۱۰ سانتی‌متر روی ریل به عقب بکشید طوری که فاصله ترموپیل از دهانه‌ی کوره d=۲۰ cm شود. دوباره دریچه شیشه‌ای را برداشته و مقدار ولتاژ را اندازه‌گیری کنید. به همین ترتیب جدول (۲) را کامل نمایید.

توجه کنید که هر پنج اندازه‌گیری باید در دمای ^{oc} ۲۰۰ **T=** باشد. بنابراین اندازه‌گیری را با سرعت اما دقیق انجام دهید.

جدول(۲): آزمایش دوم

d (cm)	$\frac{\mathbf{1}}{\boldsymbol{d^2}}$ $(\frac{1}{cm^2})$	**T** ^{oK}	V (μv)
۱۰		۲۰۰	
۲۰		۲۰۰	
۳۰		۲۰۰	
۴۰		۲۰۰	
۵۰		۲۰۰	

۱) منحنی تغییرات **V** برحسب $\frac{\mathbf{1}}{\boldsymbol{d^2}}$ را رسم کنید و درستی قانون عکس مجذور فاصله را در تابش گرمایی جسم سیاه تحقیق کنید.

آزمایش سوم: تحقیق قانون کسینوس لامبرت

شکل(۱۰): چینش وسایل روی ریل اپتیکی در آزمایش سوم

دو ریل اپتیکی را به دو طرف گیره‌ی مدرج ببندید، به گونه‌ای که گیره در محل اتصال آنها قرار بگیرد تا بتوان با جابجا کردن یکی از ریل‌ها، زاویه‌ی بین ریل‌ها را تغییر داد. توجه کنید وقتی ریل‌ها در امتداد هم هستند صفحه‌ی مدرج و عقربه روی آن طوری قرار بگیرد که عقربه عدد ۹۰ را نشان بدهد. به این ترتیب تنظیمِ تغییرات زاویه ساده‌تر خواهد بود (شکل ۱۰).

کوره را یک سمت گیره مدرج روی ریل و دیافراگم سردکننده را جلوی کوره و چسبیده به آن قرار دهید. توجه کنید که ترمومتر الکتریکی همچنان روی ^{oc} ۲۰۰ و ولتاژ دیمر هم روی ۱۲۰ ولت تنظیم شده باشد.

ترموپیل را در راستای تابش جسم سیاه (روبروی سوراخ دیافراگم سرد کننده) و در فاصله‌ی cm ۲۰ از آن قرار دهید (شکل۱۱) (دقت کنید که جریان آب سرد در دیافراگم برقرار باشد).

هنگامی که عقربه گیره مدرج عدد ۹۰ را نشان می‌دهد، زاویه‌ی تابش پرتوهای گرمایی که از جسم سیاه ساطع می‌شود، با نرمال بر سطح دهانه‌ی ورودی ترموپیل صفر درجه است (شکل۱۱). در این وضعیت دریچه شیشه‌ای ترموپیل را بردارید و عددی که میکروولتمتر نشان می‌دهد یادداشت کنید. دریچه را در جای خود قرار داده و ریلی که ترموپیل روی آن سوار شده است را به اندازه‌ی $^{\circ}$۱۰ (درجه) بچرخانید. در این حالت راستای پرتوهای تابشی با نرمال سطح ترموپیل ($\theta = 10°$) می‌باشد (شکل ۱۲). دریچه را بردارید و ولتاژ را از روی میکروولتمتر بخوانید. این کار را به ازای هر ۱۰ درجه تا زاویه‌ی ۸۰ درجه تکرار کرده و جدول(۳) را کامل کنید.

شکل(۱۲): ($\theta \neq 0°$) θ زاویه بین راستای تابش با نرمال بر سطح گیرنده تابش (در اینجا دهانه‌ی ورودی ترموپیل)

شکل(۱۱): ($\theta = 0°$) θ زاویه بین راستای تابش با نرمال بر سطح گیرنده تابش (در اینجا دهانه‌ی ورودی ترموپیل)

جدول(۳): آزمایش سوم

θ°	cosθ	T °C	V (μv)	θ°	cosθ	T °C	V (μv)
۱۰		۲۰۰		۵۰		۲۰۰	
۲۰		۲۰۰		۶۰		۲۰۰	
۳۰		۲۰۰		۷۰		۲۰۰	
۴۰		۲۰۰		۸۰		۲۰۰	

۲) منحنی تغییرات **V** برحسب **cosθ** را رسم کرده و قانون کسینوس لامبرت را تحقیق کنید.

آزمایش ۹

قانون کیرشهف

هدف آزمایش:

مشاهده‌ی نشر یک تابش کننده‌ی حرارتی در دمای ثابت به صورت تابعی از مشخصات سطح خارجی آن

وسایل آزمایش:

مکعب لسلی همراه همزن، موتور برقی، ترموپیل، جک بالابر، میکروولتمتر، تقویت کننده جریان، دماسنج الکلی، سیم‌های رابط

تئوری آزمایش:

تابش گرمایی تابشی است که از یک جسم جامد، مایع یا گاز به سبب دمای آن گسیل می‌شود. اتلاف انرژی ناشی از گسیل حرارتی می‌تواند بوسیله‌ی جذب تابش از اجسامی که جسم مورد نظر را احاطه نموده است، جبران گردد. وقتی آهنگ گسیل انرژی تابشی برابر با آهنگ جذب آن باشد، انرژی داخلی جسم ثابت خواهد ماند. آزمایش نشان می‌دهد که آهنگ گسیل تابش گرمایی یک جسم بستگی به دما و ماهیت آن دارد. توان تابشی کل گسیل شده از واحد سطح تابش خروجی جسم خوانده می‌شود. وقتی تابش گرمایی بطور مساوی از تمام جهات بر روی جسمی فرود آید، (تابش همسانگرد) مقداری از آن ممکن است جذب شود. بخشی بازتابیده شود و مقداری عبور کند. بطور کلی کسری از تابش همسانگرد فرودی با هر طول موجی که جذب می‌شود، بستگی به دما و ماهیت سطح جسمِ دُرآشام دارد. این کسر، درآشامندگی[9] نامیده می‌شود.

درآشامندگی بعضی مواد مانند دوده‌ی چراغ تقریباً برابر واحد است. از لحاظ نظری مفید است که ماده‌ی ایده‌آلی را تصور کنیم که قادر باشد تمام تابش گرمایی را جذب کند. چنین ماده‌ای را جسم سیاه می‌نامند. (ارجاع به تئوری آزمایش تابش جسم سیاه)

یک تقریب خوب برای جسم سیاه در عمل کاواکی است که دیواره‌های داخل آن در دمای یکنواختی نگه‌داشته شوند و با خارج به واسطه‌ی سوراخی که قطر آن نسبت به ابعاد کاواک کوچک است، ارتباط داشته باشد. بخشی از تابشی که از سوراخ وارد کاواک می شود، جذب می شود و بخش دیگر بطور پراکنده به دفعات زیاد در دیواره‌های داخلی بازتاب پیدا می‌کند و فقط کسر ناچیزی از آن نهایتاً راه خروجی را پیدا می‌کند و از کاواک خارج می‌شود. این امر همواره صادق است و مستقل از ماده‌ای است که دیواره‌های داخلی را می‌سازد. تابش گسیل شده از دیواره‌های داخلی نیز به طریق مشابهی جذب می‌شود و بطور پراکنده و به دفعات زیاد بازتاب می‌یابد بطوری که کاواک پر از تابش همسانگرد می‌شود. انرژی تابشی درون کاواک را که در واحد زمان به واحد مساحت هر سطحی در داخل جعبه می‌تابد به عنوان تابندگی داخل کاواک تعریف می‌کنیم. اگر جسم سیاهی که دمای آن با دمای دیوارهای داخل کاواک برابر است، داخل کاواک کنیم، چنانچه تابندگی را با H نشان دهیم، میزان جذب و گسیل انرژی باید مساوی باشد.

$$H = R_B \qquad (۱)$$

تابش خروجی یک جسم غیر سیاه بنا به قانون ساده‌ای که ذیلاً بدست می‌آید به همان اندازه که تابع دماست، به جنس سطح نیز بستگی دارد. فرض کنید که یک جسم غیرسیاه واقع در دمای θ با تابش خروجی R و درآشامندگی α وارد کاواکی شود که دیواره‌های داخلی آن در دمای مشابهی قرار دارند و تابندگی آن H است. پس αH توان تابشیِ جذب شده در واحد سطح آن می‌باشد و R توان تابش گسیل یافته از واحد سطح است. چون این جسم غیرسیاه در حال تعادل است، داریم:

$$R = \alpha H \qquad (۲)$$

[9] absorbance

ولیکن در مورد یک جسم سیاه، α برابر با یک است. پس در مورد جسم سیاه رابطه‌ی (۱) برقرار است.
یعنی تابش خروجی جسم در هر دمایی برابر است با کسری از تابش خروجی یک جسم سیاه در همام دما که این کسر دُرآشامندگی در آن دما است. معادله‌ی (۲) به قانون کیرشهف معروف است و نشان می‌دهد که درآشامندگی یک جسم را می‌توان بطور تجربی با اندازه‌گیری تابش حرارتی خروجی جسم و تقسیم آن بر تابش خروجی جسم سیاه در همان دما بدست آورد.

شرح وسایل آزمایش:

مکعب لسلی: مکعبی است به ضلع ۱۰ سانتی‌متر که از آلیاژ مس و روی ساخته شده و توخالی می‌باشد. دو سوراخ در سطح بالایی آن قرار دارد، یکی برای ریختن آب جوش در داخل مکعب و قرار دادن همزن در آن، دیگری برای قراردادن دماسنج و تعیین درجه‌ی حرارت محیط داخل مکعب. چهار وجه جانبی مکعب لسلی به ترتیب زیر، صیقلی، سیاه و سفید می‌باشد.

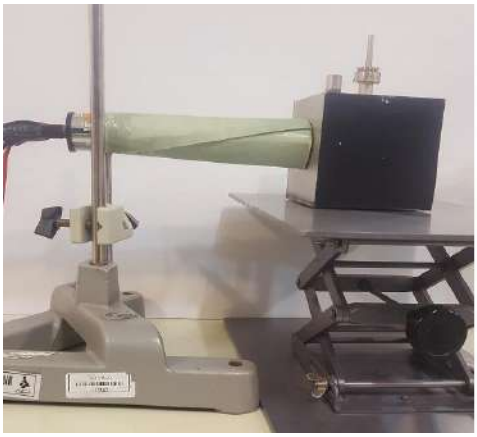
پیل ترموکوپلِ مول: این وسیله برای اندازه‌گیری انرژی حرارتی تابش شده از جسم بکار می‌رود. این ترموپیل از ۱۶ ترموکوپل که بطور سری به هم وصل شده، ساخته شده است. هنگامی‌که پرتو حرارتی وارد ترموپیل می‌شود به یکی از دو صفحه غیر همجنس متصل به هم می‌تابد و آن را نسبت به صفحه دیگر گرم‌تر می‌کند. در اثر این اختلافِ گرما، بین دو صفحه اختلاف پتانسیلی ایجاد می‌شود که قابل اندازه‌گیری است.

شکل (۱): مکعب لسلی همراه همزن

شکل (۲): ترموپیل

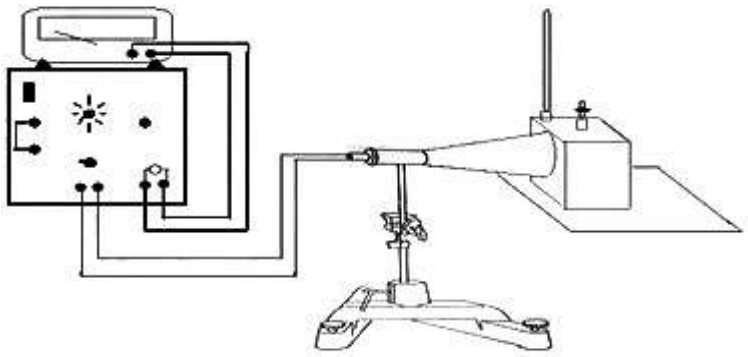
شرح آزمایش:

مکعب لسلی را با آب جوش پر می‌کنیم و با استفاده از همزن مطمئن می‌شویم که دمای سطح در همه‌ی نقاط یکسان است. مکعب لسلی را باید به طریقی آماده نمود که هر یک از چهار سطح آن را که مورد برر سی قرار می‌دهیم بتواند در مقابل ترموکوپل بچرخد. ترموکوپل بطور مستقیم در وسط یکی از وجوه مکعب قرار داده می‌شود و هدف این است که تنها شار حرارتی را که بطور عمودی از این سطح بیرون می‌آید، اندازه بگیرد. تابش‌هایی را که منحرف شده و خارج می‌گردند را می‌توان بوسیله‌ی یک لوله از مقوایی نازک که به شکل شیپور ساخته می شود (شکل ۳) مهار نمود و همچنین با این عمل از اثرات خارجی بر نتایج آزمایش کاست.



شکل (۳): بوسیله‌ی لوله مقوایی، تنها شار حرارتی عمود را به سمت ترموپیل هدایت می‌کنیم.

مدار را مطابق شکل (۴) ببندید. بعد از ریختن آب جوش در مکعب لسلی، قیف را برداشته و دماسنج را داخل مکعب قرار دهید و یکی از وجوه مکعب را به لوله‌ی شیپوری مانند (شکل ۴) بچسبانید و تقویت کننده‌ی ولتاژ را از حالت اتصال به زمین خارج کنید. (دقت کنید که قبل از شروع آزمایش می‌بایستی تقویت کننده را صفر نمایید.) و ولتاژ تقویت کننده را بخوانید. این عمل را برای سه وجه دیگر هم انجام دهید. توجه داشته باشید که هنگام اندازه‌گیری می‌بایستی دمای چهار سطح ثابت بماند و برای رسیدن به این مقصود باید اندازه‌گیری بدون تأخیر و با سرعت انجام بگیرد.



شکل (۴): شکل مدار آزمایش.

این آزمایش را در چهار نوبت دیگر انجام دهید؛ به این ترتیب که صبر کنید تا دمای آب در مکعب لسلی ۵ درجه افت کند و مجدداً تابش حرارتی چهار وجه را در دمای ثابت بخوانید و جدول (۱) را کامل کنید. بعد از اتمام آزمایش، آب درون مکعب لسلی را به داخل بطری برگردانید و دستگاه تقویت‌کننده‌ی ولتاژ را در حالت اتصال به زمین قرار دهید.

توجه کنید: در هنگام چرخاندن مکعب لسلی در مقابل ترموکوپل، دماسنج با کش رابط همزن برخورد نکند که موجب سقوط مکعب لسلی گردد. بهتر است قبل از شروع آزمایش ۴ سطح جانبی مکعب لسلی با یک پارچه‌ی نخی پاک و خشک شود.

جدول (۱):

دما $(^{\circ}C)$	V (mv) سطح سفید	V (mv) سطح سیاه	V (mv) سطح صیقلی	V (mv) سطح مات

پرسش‌ها و نتایج آزمایش:

۱) تفاوت سطح صیقل و سفید چیست؟

۲) چرا صفحات سیاه و سفید تقریباً مانند هم تابش می‌کنند؟

۳) تبادل انرژی یک جسم را در حالت‌های سردتر، گرم‌تر و هم‌دمای محیط شرح دهید.

۴) تبادل دما در چه شرایطی ممکن است؟

۵) شما در خانه‌ی خود چه دستگاه‌هایی می‌شناسید که از انتقال گرما (سرما) جلوگیری کند؟

آزمایش ۱۰

بررسی سری بالمر در اتم هیدروژن

هدف آزمایش:

مطالعه طیف اتم هیدروژن و اندازه‌گیری طول‌موج‌های آن، تعیین ثابت ریدبرگ

وسایل آزمایش:

پایه نگهدارنده لامپ، لامپ طیفی هیدروژن، منبع تغذیه DC (۵۰۰۰-۰ ولت)، دستگاه طیف‌سنج، توری پراش ۶۰۰ شکاف در میلی‌متر، سیم‌های رابط

تئوری آزمایش:

در نیمه دوم قرن نوزدهم برای تعیین طیف‌های گسیلی و جذبی عناصر مختلف کارهای زیادی با طیف‌سنج[۱۰] انجام شد. هیدروژن به دلیل ساده‌تر بودن (اتم هیدروژن تنها از یک الکترون و یک پروتون تشکیل شده است.) از نظر تجربی و نظری بطور وسیع مورد بررسی قرار گرفته و اطلاعات حاصل از این بررسی‌ها، راهنمای مطالعه‌ی عناصر پیچیده‌تر شد.

طیف تابیده شده از اتم هیدروژن برانگیخته، یک سری خطوط طیفی در ناحیه‌ی مرئی دارد که بسیار مورد توجه دانشمندان بود. بالمر از جمله کسانی بود که این خطوط طیفی را مورد مطالعه قرار داده و طول‌موج این خطوط را به صورت تجربی اندازه‌گیری کرد. وی در سال ۱۸۸۵ با ارائه‌ی یک فرمول تجربی توانست طول‌موج خطوط شناخته شده برای اتم هیدروژن، تا آن زمان را با تقریب خوبی پیشگویی کند. این معادله عبارت بود از[۱۱]:

$$\lambda = 911.76\ A^{\circ} \times \frac{4n^2}{n^2-4} \qquad (۱)$$

که در این رابطه λ طول‌موج خط گسیلی و ... و ۵ و ۴ و ۳ = n است. طبق این رابطه وقتی n خیلی بزرگ می‌شود ($n \to \infty$)، طول‌موج به مقدار مجانبیِ $\lambda = 3647\ A^{\circ}$ نزدیک می‌شود که به این مقدار حد سری برای سری بالمر گفته می‌شود. بالمر پی برد که فرمولش به گونه‌ای قابل تعمیم است و پیشنهاد کرد که در طیف اتم هیدروژن ممکن است سری‌های طیفیِ دیگری هم وجود داشته باشند. چند سال پس از آنکه بالمر این سری‌ها را پیشنهاد کرد، توسط دانشمندان دیگر کشف شدند که جلوتر در مورد آن‌ها صحبت خواهیم کرد.

این کشف بالمر آغازگر جستجو برای فرمول‌های مشابهی شد که هر یک در مورد رشته خطوط معینی کاربرد پیدا می‌کردند. بخش اعظم این کار در سال ۱۸۹۰ توسط ریدبرگ انجام شد. ریدبرگ کارکردن با عکس طول‌موجِ خطوط را از کارکردن با طول موج آن‌ها مناسب‌تر یافت. (یادآور می‌شویم که $\frac{2\pi}{\lambda}$ را اصطلاحاً عدد موج گویند.)

رابطه‌ای که ریدبرگ به شکل تجربی ارائه داد به شکل زیر بود[۱۲]:

$$\frac{1}{\lambda} = R_H\left(\frac{1}{n^2} - \frac{1}{m^2}\right) \qquad (۲)$$

که در این رابطه R_H به ثابت ریدبرگ برای اتم هیدروژن موسوم است و مقدار آن برابر است با:

---

۱۰ Spectrometer

۱۱ فیزیک نوین-هانس.سی.اوهانیان

۱۲ فیزیک نوین-هانس.سی.اوهانیان

$$R_H = 109667.56 \qquad (\frac{1}{cm})$$

n و m هم اعداد طبیعی هستند.

روابط فوق هیچگونه توصیفی درخصوص مکانیسم اتمی‌ای که عامل ایجاد خطوط طیفی است، ارائه نمی‌کند بلکه صرفاً روابطی توصیفی یا پدیده شناختی هستند.

تاکنون نظریه‌های مختلفی در توصیف ساختار اتم مطرح شده که ابتدایی‌ترین مدل، مدل کیک کشمشی تامسون بود که در سال ۱۹۰۴ توسط فیزیکدان انگلیسی، سرجوزف تامسون، مطرح شد. در سال ۱۹۱۰ در آزمایش‌های رادرفورد و همکارانش، شواهدی تجربی برعیله مدل تامسون به دست آمد.

رادرفورد برای توصیف ساختار اتم، مدل سیاره‌ای را مطرح کرد. در این مدل، اتم متشکل است از یک هسته‌ی بسیار کوچک به بار $+Ze$ که تقریباً تمامی جرم اتم را شامل می‌شود و تعداد Z الکترون با بار منفی در مدارهایی به شکل دایره گرد این هسته‌ی مرکزی حرکت می‌کنند؛ همانطور که سیاره‌ها در منظومه‌ی شمسی به گرد خورشید می‌چرخند. اما بنابر نظریه‌ی الکترومغناطیس، الکترون‌هایی که به دور هسته می‌گردند از آنجا که حرکت شتابدار دارند، باید تابش کنند طوری‌که فرکانس این تابش با فرکانس گردش الکترون به دور هسته برابر باشد. به علت تابش انرژی توسط الکترون‌ها، انرژی آن‌ها باید کاهش یافته و مدار حرکتشان کوچکتر شده و رفته رفته به هسته نزدیک شود. تغییر مدار به معنای تغییر فرکانس تابش است. پس اگر رفتار الکترون‌ها واقعاً اینچنین بود، باید طیف الکترومغناطیس گسیلی از اتم، طیفی پیوسته باشد و الکترون نیز پس از گسیل‌های متوالیِ امواج الکترومغناطیس، روی هسته بیفتد. به این ترتیب به دو دلیل مدل رادرفورد برای اتم با تجربه سازگار نیست. اولاً نمی‌تواند پایداری مدار حرکت الکترون‌ها را توضیح دهد. ثانیاً طیف‌های گسسته مشاهده شده را توضیح نمی‌دهد.

در سال ۱۹۱۳، نیلز بور[۱۳] گام جسورانه‌ای در حل این مشکل برداشت. وی پیشنهاد کرد که مدارها و انرژی‌های اتم هیدروژن کوانتیده‌اند. یعنی فقط مدارها و انرژی‌های گسسته‌ی معینی مجاز هستند. این کوانتش حاکی از آن است که قوانین مکانیک کلاسیک و الکترومغناطیس کلاسیک در مقیاس و سطح اتمی، غیرقابل کاربردند و قوانین نوینی باید جایگزین آن‌ها بشوند و یا تکمیل‌شان کنند.

مدل اتمی بور، برای اینکه ساختار اتمی به سادگی برحسب مدل ذره‌ای تجسم شود، خصوصیات کلاسیکی را به اندازه‌ی کافی حفظ می‌کند و برای ارائه‌ی توصیف نسبتاً دقیق از طیف اتمی هیدروژن، خصوصیات کوانتومی را نیز به اندازه‌ی کافی دخالت می‌دهد. بنابراین نظریه‌ی بور یک نظریه واسطه بین مکانیک کلاسیک و مکانیک موجی است[۱۴].

بور با نگاه به مدل اتمی رادرفورد، مدلی سیاره‌ای بناکرد و برای اینکه مدلش با داده‌های طیف‌سنجی که در معادله‌ی بالمر خلاصه شده‌اند سازگار باشد، در سه نکته از فیزیک کلاسیک فاصله گرفت. این سه نکته عبارتند از:

۱- برالکترون‌های بارداری که پیرامون یک هسته‌ی باردار می‌چرخند، شتابی وارد می‌شود که بنابر فرمول‌بندی الکترومغناطیسِ ماکسول، از این الکترون‌ها باید نور گسیل شود. اما بور فرض کرد یک الکترون در یک مدار دایره‌ای می‌تواند بدون تابش حرکت خود را تحت تأثیر نیروی کولنی حفظ کند. (البته فقط مدارهای کوانتیده‌ی مجاز)

اتم هیدروژن که دستگاهی متشکل از دو ذره‌ی الکترون و پروتون است را درنظر بگیرید. هسته‌ای ساکن با بار $+e$ و یک الکترون با بار $-e$ و جرم m_e در دایره‌ای به شعاع r با سرعت v (غیرنسبیتی) حول هسته می‌گردد.

---

[۱۳] Niels Bohr

[۱۴] نظریه مکانیک موجی در دهه‌ی ۱۹۲۰ تکامل یافت.

نیروی کولنی بین الکترون و هسته ($F = \frac{-1}{4\pi\varepsilon_0}\frac{e^2}{r^2}$)، نیروی جانب مرکزی که الکترون را در حال چرخش با سرعت v روی دایره‌ای به شعاع r و به مرکزیت هسته نگه‌می‌دارد ($F = -\frac{m_e v^2}{r}$)، را تأمین می‌کند:

$$-\frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\frac{e^2}{r^2} = -\frac{m_e\, v^2}{r}$$

$$\Longrightarrow \qquad m_e v^2 = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\frac{e^2}{r} \qquad \xrightarrow{\frac{1}{4\pi\varepsilon_0}=k} \qquad m_e v^2 = k\frac{e^2}{r} \qquad (۳)$$

انرژی کل (E) دستگاه دو ذره‌ای اتم هیدروژن، برابر مجموع انرژی جنبشی E_k الکترون و انرژی پتانسیل الکتریکی E_p بین الکترون و پروتون است. برای محاسبه‌ی انرژی کل فرض می‌کنیم که:

انرژی پتانسیل دستگاه هسته-الکترون، انرژی پتانسیل کولنی است.

$$E_p = -\frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\frac{e^2}{r} = -\frac{ke^2}{r}$$

چون الکترون با سرعت v در حال چرخش در مدار می‌باشد، پس انرژی جنبشی آن برابر است با E_k :

$$E_k = \frac{1}{2}\, m_e v^2$$

بنابراین انرژی کل E برابر است با:

$$E = E_p + E_k = \frac{1}{2}\, m_e\, v^2 - \frac{ke^2}{r} \qquad (۴)$$

با جایگزینی $m_e v^2$ از رابطه‌ی (۳) خواهیم داشت:

$$E = -\frac{ke^2}{2r} \qquad (۵)$$

۲- تکانه‌ی زاویه‌ای الکترون در یک مدار مجاز پایدار به شعاع r با مضرب صحیحی از $\hbar$ داده می‌شود[۱۵]:

$$L = m_e v r = n\hbar \qquad (۶)$$

($\hbar$ ثابت پلانک تعمیم یافته است که برابر است با: $\hbar = \frac{h}{2\pi}$ و $n = ۱و۲و۳$ ... که به آن عدد کوانتومی یا به بیان دقیق‌تر عدد کوانتومیِ تکانه زاویه‌ای می‌گویند.)

با قراردادن مقدار v از رابطه‌ی (۶) ($v = \frac{n\hbar}{m_e r}$) در رابطه‌ی (۳) شعاع مداری که الکترون روی آن حول هسته می‌چرخد، بدست می‌آید:

$$r = \frac{n^2\hbar^2}{k m_e v^2} \qquad (۷)$$

چنانچه مقدار شعاع (رابطه‌ی ۷) را در رابطه‌ی (۵) جایگزین کنیم، انرژی الکترون روی مدار nام به شعاع r، خواهد شد:

$$E = -\frac{mk^2e^4}{2n^2\hbar^2} \qquad (۸)$$

---

[۱۵] مبانی فیزیک نوین- وایدنر. سلز

با قراردادن $n = ۱$ در رابطه‌ی (۷) کوچکترین شعاع مجاز برای اتم هیدروژن که به شعاع اولین مدار بور موسوم است، بدست می‌آید.

$$r_1 = \frac{\hbar^2}{km_e e^2} = 0.528 \quad A°$$

(شعاع اولین مدار بور را در بعضی از کتاب‌ها با a_0 نشان می‌دهند.)

با توجه به رابطه‌ی (۷) شعاع مدارهای مجاز بعدی برابر است با:

$$r_n = n^2 r_1$$

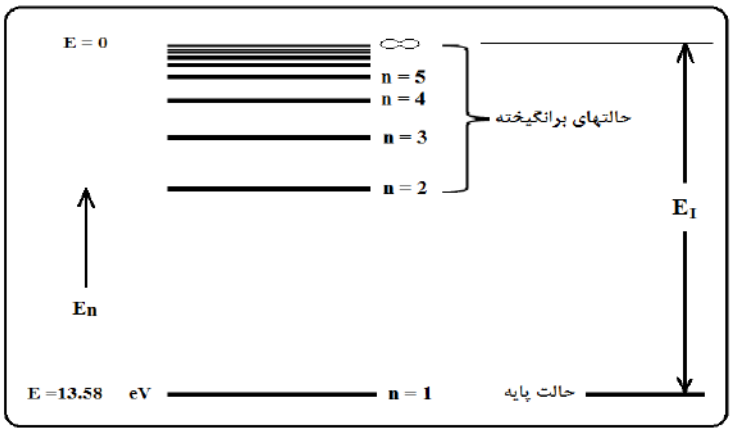
همچنین با قراردادن $n = ۱$ در رابطه‌ی (۸) انرژی حالت پایه برای اتم هیدروژن (E_1) بدست خواهد آمد[۱۶].

$$E_1 = -13.58 \quad eV$$

و با توجه به رابطه‌ی (۸) انرژی تراز nام برابر است با:

$$E_n = \frac{E_1}{n^2} \qquad (۹)$$

۳- هر یک از انرژی‌های مجاز که در شکل (۱) نشان داده شده، مربوط به یک مدار مجاز در اتم هیدروژن است که الکترون می‌تواند بدون تابش در آن مدار قرار بگیرد. تمام حالت‌های مجاز بالاتر از حالت پایه ($n=$ ۲و۳و...) حالت‌های برانگیخته نام دارند و الکترون در هر یک از این مدارها قرار بگیرد تمایل دارد تا هر چه سریعتر به مدار مجاز پایین‌تر گذار کند. وقتی چنین گذاری از مدارهای مجازِ بالاتر از حالت پایه به مدارهای پایین‌تر رخ می‌دهد، اتم مقدار $E_i - E_f$ انرژی از دست می‌دهد. بور فرض کرد که در چنین گذاری فوتونی با انرژی $h\nu$ توسط اتم گسیل می‌شود که با درنظر گرفتن بقای انرژی[۱۷]:



شکل(۱): نمودار ترازهای انرژی در اتم هیدروژن

$$h\nu = E_i - E_f \qquad (۱۰)$$

(ν فرکانس فوتون گسیل شده و h ثابت پلانک[۱۸]است.)

اگر در رابطه‌ی (۱۰) مقادیر E_i و E_f را با توجه به رابطه‌ی (۹) جایگزین کنیم، خواهیم داشت:

$$h\nu = \frac{E_1}{n_i^2} - \frac{E_1}{n_f^2}$$

$$\nu = \frac{E_1}{h}\left(\frac{1}{n_i^2} - \frac{1}{n_f^2}\right) \qquad (۱۱)$$

چنانچه رابطه‌ی(۱۱) را برحسب عدد موج ($\frac{2\pi}{\lambda}$) بنویسیم، این رابطه به شکل زیر خواهد شد:

---

[۱۶] E_1 دقیقاً برابر است با مقدار انرژی لازم برای یونش اتم هیدروژن که آن را با E_I نشان می‌دهند. (مبانی فیزیک نوین- وایدنر . سلز)

[۱۷] مبانی فیزیک نوین- وایدنر . سلز

[۱۸] $h = 6.6256 \times 10^{-34} \ J.S$

$$\nu = \frac{C}{\lambda} \quad \rightarrow \quad \frac{1}{\lambda} = \frac{E_1}{hc}\left(\frac{1}{n_i^2} - \frac{1}{n_f^2}\right) \qquad (۱۲)$$

رابطه‌ی (۱۲) همان رابطه‌ی (۲) که به رابطه‌ی ریدبرگ موسوم است، می‌باشد.

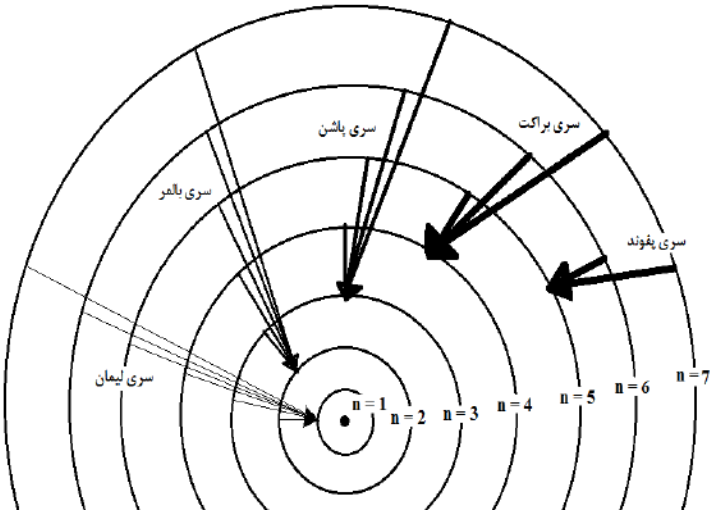
پرسش: با محاسبه‌ی ضریب پرانتز در رابطه‌ی ۱۲ ، ($\frac{E_1}{hc}$) و با توجه به اینکه ($E_1 = 13.58 \quad eV$) نشان دهید که این مقدار همان ضریب ریدبرگ است؟

در این مدل ساده‌ی اتم هیدروژن، هسته در مرکز اتم قرار می‌گیرد درحالیکه الکترون ممکن است در هریک از مدارهای دایره‌ای که با اعداد کوانتومی ... و۳و۲و۱ = n مشخص می‌شوند، جای گیرد. تا زمانی‌که الکترون در مدار خودش بماند، هیچ‌گونه انرژی تابش نمی‌شود اما اگر الکترونی از یک مدار با n بزرگتر به مداری با n کوچکتر جهش کند، اختلاف انرژی بصورت یک فوتون به محیط ساطع می‌شود (رابطه‌ی ۱۰).

به شکل (۱) دقت کنید؛ اختلاف انرژی بین ترازها یکسان نیست. پس بسته به اینکه الکترون بین کدام مدارها جهش داشته باشد، انرژی فوتون ساطع شده و پیرو آن فرکانس موج تابش شده به محیط، متفاوت خواهد بود.

همانطور که پیش‌تر ذکر شد، یک سری از این تابش‌ها، امواجی هستند که در اثر گذار الکترون‌ها از مدارهایی با $n > 2$ به مدار با $n = 2$ تابیده شده‌اند. این سری از تابش‌ها که سری بالمر نامیده می‌شوند، به دلیل اینکه در ناحیه نور مرئی از امواج الکترومغناطیس واقع شده‌اند، زودتر از مابقی سری‌ها توسط دانشمندان مشاهده و بررسی شدند. اما هیدروژن علاوه بر سری بالمر در ناحیه‌ی مرئی، یک سری تابش در ناحیه فرابنفش و چند سری تابش در ناحیه‌ی فروسرخ نیز دارد. شکل (۲) بصورت شماتیک نشان می‌دهد که هر سری از تابش‌های اتم هیدروژن، در اثر گذار بین کدام ترازهای انرژی رخ داده‌اند.

فرکانس امواج موجود در هر کدام از این سری‌ها (بطور کلی تمام خطوط طیف هیدروژن) را می‌توان با فرمول ریدبرگ (رابطه ۲) محاسبه کرد. به این ترتیب که:



شکل(۲): جهش‌های کوانتومی بوجودآورنده‌ی سری های گوناگون در اتم هیدروژن

$n = ۱$ و $m = ۲,۳,۴,...$ ⟵ سری لیمان است که در ناحیه فرابنفش قرار دارد.

$n = ۲$ و $m = ۳,۴,۵,...$ ⟵ سری بالمر است که در ناحیه نور مرئی قرار دارد.

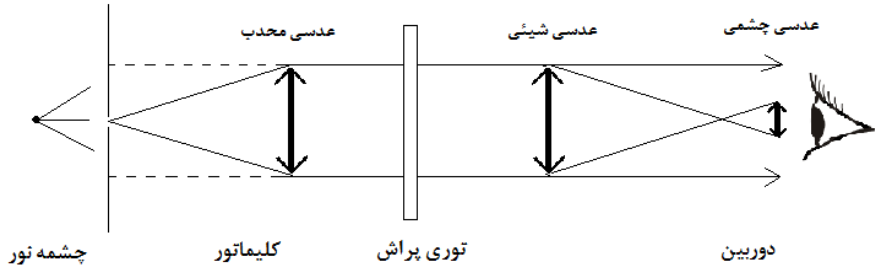
$n = ۳$ و $m = ۴,۵,۶,...$ ⟵ سری پاشن است که در ناحیه فروسرخ قرار دارد.

$n = ۴$ و $m = ۵,۶,۷,...$ ⟵ سری براکت است که در ناحیه فروسرخ قرار دارد.

$n = ۵$ و $m = ۶,۷,۸,...$ ⟵ سری پفوند است که در ناحیه فروسرخ قرار دارد.

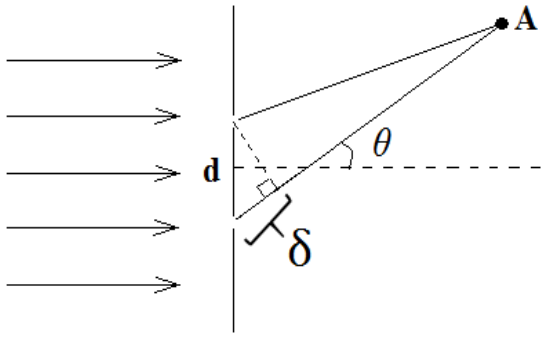
در روابط فوق گسیل از یک اتم هیدروژن بررسی شد. هر اتم در هر زمان می‌تواند فقط در یکی از حالت‌های انرژی کوانتیده‌ی خود باشد و وقتی از حالتی به حالت پایین‌تر گذار انجام می‌دهد، تنها یک فوتون گسیل می‌شود. بنابراین برای مشاهده‌ی تمامی طیف گسیلی، باید مجموعه‌ای از تعداد زیادی اتم هیدروژن را با قرار دادن در معرض یک آشفتگی خارجی مثل گرما یا اختلاف پتانسیل الکتریکی به حالت برانگیخته راند. الکترون‌های اتم هیدروژنِ برانگیخته، گذارهایی به حالت برانگیخته‌ی پایین‌تر یا به حالت پایه انجام داده و به این ترتیب تمامی طیف گسیلی مربوط به اتم هیدروژن در طیف‌سنج مشاهده می‌شود.

در آزمایشگاه برای ایجاد طیف هیدروژن، لامپ هیدروژن (لامپی که از گاز هیدروژن با فشار خاصی پر شده) را به یک منبع ولتاژ بالا (حدود ۵ kV) وصل می‌کنیم. این ولتاژ بالا باعث برانگیختگی اتم هیدروژن می‌شود و این اتم‌های برانگیخته به سرعت با آزاد کردن انرژی به شکل فوتون (با فرکانس‌های متفاوت) به حالت پایه برمی‌گردند. نور مرئی که از لامپ ساطع می‌شود، مربوط به سری بالمر می‌باشد. برای جدا کردن طول‌موج‌های مختلف از طیف ساطع شده، ابتدا نور لامپ را از کُلیماتور (شکل ۲-۵) عبور می‌دهیم و تابش موازی شده‌ای که از کلیماتور خارج می‌شود را به توری پراش می‌تابانیم (شکل۳). توری پراشی که ما در آزمایشگاه استفاده می‌کنیم، یک توری با ۶۰۰ شکاف در میلی‌متر می‌باشد.



شکل(۳): مسیر حرکت نور از لامپ تا چشم

توری پراش به روش روبرو طول‌موج‌ها را تجزیه می‌کند. به شکل (۴) توجه کنید. پرتوها بعد از موازی شدن در کلیماتور از شکاف‌های توری پراش عبور کرده و تغییر مسیر می‌دهند. بعضی از این پرتوها بعد از گذشتن از توری و تغییر مسیر در جایی به هم برخورد می‌کنند. در شکل (۴) دو پرتو که از دوشکاف متوالی عبور می‌کنند را نشان داده است. این دو پرتو برای رسیدن به نقطه‌ی تلاقی A مسیرهایی با طول‌های متفاوتی را طی کرده‌اند. این اختلاف راه منجر به اختلاف فاز می‌شود. چنانچه اختلاف فاز دو پرتو مضرب صحیحی



شکل(۴): پراشیده شدن پرتوهای موازی توسط توری پراش

از 2π باشد، تداخل سازنده رخ داده و رنگ مورد نظر در نقطه‌ی A ظاهر می‌شود.

اگر اختلاف راه دو پرتو را با δ نشان دهیم، طبق شکل (۴) خواهیم داشت:

$$\delta = d \sin\theta$$

اختلاف فاز مربوط به دو پرتو همدوس که اختلاف راه δ دارند، برابر است با عدد موج در اختلاف راه δ :

$$\Delta\phi = \frac{2\pi}{\lambda}\delta = \frac{2\pi}{\lambda} d \sin\theta$$

وقتی تداخل سازنده است که $\Delta\phi$ مضرب صحیحی از 2π باشد:

$$\frac{2\pi}{\lambda} d \sin\theta = n\, 2\pi \qquad n = 0\,.\,1\,.\,...$$

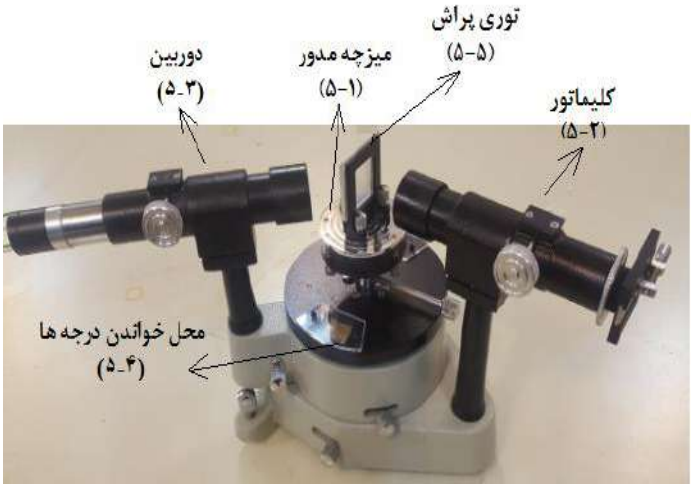
که برای پراش مرتبه اول[۱۹] $n = ۱$ است.

$$\lambda = d \sin\theta \qquad (۱۳)$$

طبق این رابطه چنانچه در نقطه‌ی A یک پرتو تک‌رنگ را مشاهده کردیم، با اندازه‌گیری زاویه‌ی θ (شکل۴) و دانستن فاصله‌ی شکاف‌ها در توری پراش (d) می‌توانیم طول‌موج رنگ مورد نظر را پیدا کنیم.

روش انجام آزمایش:

هدف اصلی این آزمایش مشاهده‌ی گسستگی انرژی در اتم می‌باشد. برای تحقق این هدف نیاز به مشاهده‌ی طیف اتم منزوی است. برای این منظور از مشاهده‌ی طیف اتم‌های منزوی هیدروژن اتمیِ گازی در طیف‌سنج استفاده کردیم، زیرا در این حالت اتم‌ها آنقدر از هم دور هستند که هر اتم می‌تواند مانند یک دستگاه منزوی رفتار کند.



شکل(۵): طیف‌سنج

بنابراین چشمه‌ی نور در این آزمایش یک لامپ هیدروژنی است. همانطور که در بخش تئوری مشاهده شد، تعدادی از طول‌موج‌هایی که طی برانگیختگی اتم هیدروژن ساطع می‌شود، در محدوده‌ی نور مرئی است (سری بالمر) و هر کدام از این طول‌موج‌ها رنگ مختص خود را دارند که ترکیب این رنگ‌ها، نور صورتی کم‌رنگ (نزدیک به سفید) را می‌سازد. برای روشن کردن این لامپ از یک منبع DC ولتاژ بالا استفاده می‌شود (شکل۲-۶) و همچنین برای جداسازی این رنگ‌ها از توری پراش که در دستگاه طیف‌سنج جاسازی شده است، استفاده می‌کنیم.

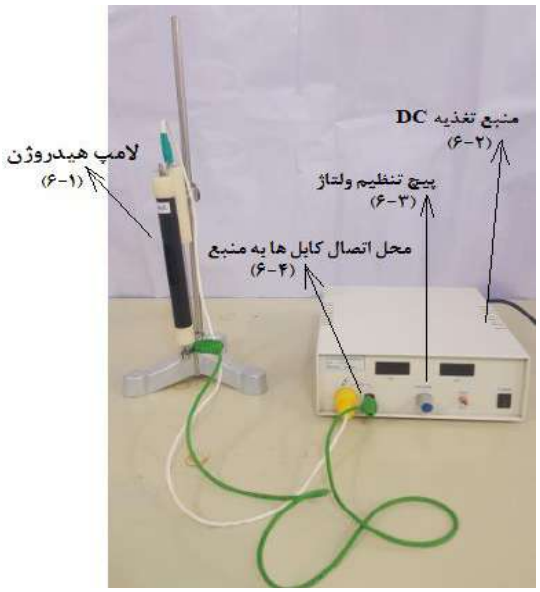
طیف‌سنج از سه قسمت اصلی تشکیل شده است:

- کلیماتور، که نور چشمه (لامپ هیدروژن) از طریق شکاف قابل تنظیم که در ابتدای آن واقع شده است، وارد شده و به واسطه عدسی‌هایی که درون آن قرار دارد به صورت پرتوهای موازی از سر دیگر خارج می‌شوند(شکل ۲-۵).

[۱۹] طیف مرتبه اول، طیفی است که هر خط آن برای اولین بار بلافاصله پس از خط مرکزی (خطی که رنگ چشمه است) دیده می‌شود.

- میزچه‌ی طیف‌سنج، صفحه مدوری است که پایه‌ی نگهدارنده‌ی توری پراش[۲۰] بر روی آن نصب شده است. این میزچه، متحرک بوده و می‌تواند حول مرکزش دوران کند. البته با پیچ بلندی که کنار این میزچه واقع شده می‌توان میزچه و توری پراش را ثابت کرد (شکل ۱-۵).
- دوربین طیف‌سنج، که توسط آن می‌توان طیف را واضح مشاهده کرده و اندازه‌گیری‌های لازم را انجام داد. در چشمی دوربینِ طیف‌سنج یک جفت تار عمود برهمِ بسیار ظریف واقع شده که هنگام اندازه‌گیری به عنوان نشانه، مورد استفاده قرار می‌گیرد. پیچ تنظیمی هم کنار دوربین واقع شده که توسط آن می‌توان وضوح تصویر را بالاتر برد (شکل ۳-۵).

برای شروع کار لامپ هیدروژن را که روی پایه‌ی مخصوص متصل است (شکل ۱-۶)، جلوی شکاف متغییر کلیماتور قرار دهید. پایه نگهدارنده‌ی لامپ توسط کابل مخصوص به منبع DC ولتاژ بالا متصل است (شکل ۲-۶).



شکل(۶): لامپ هیدروژنی متصل به منبع تغذیه DC ولتاژ بالا

منبع را روشن کرده و ولتاژ را توسط پیچ تنظیم ولتاژ (شکل ۳-۶) آنقدر بالا ببرید که لامپ روشن شود. دقت کنید ولتاژ باید روی مقداری باشد که لامپ، نوری یکنواخت و بدون لرزشی تولید کند. وقتی لامپ کاملاً گرم شود، رنگ لامپ صورتی کم‌رنگ خواهد بود.

توجه کنید که توری پراش در طی آزمایش، طوری روی میزچه مدور قرار بگیرد که کاملاً بر راستای پرتوهای موازی عمود باشد تا بتوان جواب‌های قابل اعتمادی بدست آورد. برای اطمینان از عمود بودن این دو راستا به روش زیر عمل کنید:

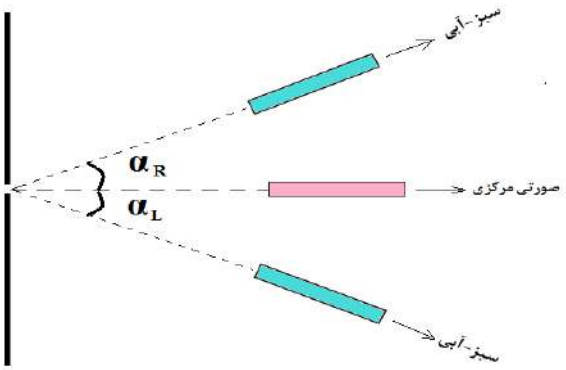
با چرخاندن میزچه‌ی طیف‌سنج، توری پراش را عمود بر راستای کلیماتور قرار دهید و توسط پیچ مخصوص میزچه را ثابت کنید. حالا دوربین را در راستای کلیماتور قرار دهید و از چشمی دوربین نگاه کنید. خط صورتی (به رنگ نور لامپ) دیده می‌شود. سعی کنید با پیچ روی دوربین، تصویر خط را در واضح‌ترین حالت قرار دهید. با جابجا کردن دوربین به راست یا چپ سعی کنید خط عمودی نشانه را روی خط صورتی قرار داده و دوربین را ثابت کنید. حالا توسط درجه‌بندی که روی پایه طیف‌سنج قرار دارد (شکل ۴-۵)، زاویه‌ی α_0 را بخوانید. دوباره دوربین را آزاد کنید. همانطور که در چشمی نگاه می‌کنید، دوربین را آهسته به سمت راست بچرخانید تا خطوط رنگی طیف ظاهر شود. خط عمود نشانگر را روی رنگ آبی-سبز قرار دهید و مجدداً زاویه را بخوانید (α_1). حالا دوربین را به چپ برگردانید تا خط مرکزی صورتی ظاهر شود. به چرخاندن دوربین به سمت چپ ادامه دهید تا دوباره خطوط رنگی طیف ظاهر شوند. خط عمود نشانگر را روی رنگ آبی-سبز ثابت کنید و زاویه را بخوانید (α_2).

$$\alpha_R = \alpha_1 - \alpha_0$$
$$\alpha_L = \alpha_2 - \alpha_0$$

[۲۰] توری پراش از تعداد زیادی شکاف همسان و موازی با پهنای یکسان و فواصل مساوی درست شده است. فاصله‌ی شکاف‌ها از هم مساوی و برابر d است. (درآمدی بر نورشناخت نوین- گرانت.ر.فولز)

طبق شکل (۷) اگر توریِ پراش کاملاً بر راستای خطوط موازی عمود باشد، دو زاویه‌ی α_R و α_L باید برابر باشند.

چنانچه این دو زاویه متفاوت هستند، به این معنی است که توری پراش کاملاً بر راستای پرتوها عمود نیست. پس با چرخاندن میزچه به مقدار خیلی کم، زاویه‌ی راستای کلیماتور با توری پراش را کمی تغییر دهید و تمام مراحل فوق را تکرار کنید. این کار را تا جایی تکرار کنید که بالاخره دو زاویه‌ی α_R و α_L برابر شوند. به این ترتیب توری پراش بر راستای کلیماتور عمود خواهد شد. در این وضعیت، دستگاه آماده‌ی اندازه‌گیری است. دقت کنید که پیچ میزچه را کاملاً محکم کنید که راستا تغییر نکند.



شکل(۷): عمودسازی راستای کلیماتور بر سطح توری پراش

روش خواندن زاویه:

به بخش مدرجی که روی پایه قرار گرفته دقت کنید. صفحه‌ی پایینی برحسب درجه تا ۳۶۰ درجه قوسی، بصورت نیم درجه، درجه بندی شده است. صفحه‌ی بالایی (ورنیه) به ۳۰ قسمت مساوی تقسیم شده که هر قسمت، یک دقیقه‌ی قوسی را نشان می‌دهد. روش خواندن شباهت زیادی به میکرومتر دارد. یعنی ابتدا دقت می‌کنید که صفر ورنیه از چه درجه‌ای رد شده است، (به نیم درجه‌ها نیز دقت کنید!) آن را یادداشت کنید. در ادامه به ورنیه دقت کنید. حتماً یکی از خطوط ورنیه بر یکی از خطوط صفحه‌ی مدرج منطبق است. شماره‌ی آن خط (که عددی کوچکتر از ۳۰ خواهد بود.) بخش کوچکتر از درجه‌ی زاویه خواهد بود (برحسب دقیقه). این مقدار را با درجه‌ای که خوانده بودید جمع کنید. به این ترتیب اندازه‌ی زاویه تا دقت یک دقیقه بدست می‌آید.

بعد از تنظیم اولیه‌ی دستگاه و اطمینان از عمود بودن راستای کلیماتور بر سطح توری، میزچه‌ی طیف‌سنج را توسط پیچ تنظیمش محکم کنید تا حین آزمایش جابجا نشود. همانطور که در چشمی دوربین نگاه می‌کنید، دوربین را بچرخانید تا خط نشانگر روی چشمیِ دوربین بر خط مرکزیِ صورتی منطبق شود. در اینحالت با دقت زاویه را از روی درجه‌بندی بخوانید (θ_0). دوربین را در جهتی که خطوط طیف واضح‌تر بود بچرخانید و سعی کنید خط عمودیِ نشانگرِ چشمی را روی اولین خط رنگی (بنفش)، منطبق کنید و مجدداً درجه را با دقت بخوانید (θ_1). اختلاف دو زاویه‌ی فوق ($\theta_1 - \theta_0$) زاویه‌ی مربوط به رنگ بنفش است. این مقادیر را در جدول (۱) وارد کنید. در همین جهت و به همین ترتیب زاویه‌ی رنگ‌های آبی، آبی-سبز و قرمز را اندازه‌گیری کرده و در جدول(۱) ثبت کنید. توجه کنید که اندازه‌گیری‌ها را برای پراش مرتبه‌ی اول (ارجاع به پی‌نوشت ۱۰) انجام دهید.

پرسش‌ها و بررسی نتایج:

۱) با توجه به اینکه توری پراشی که در آزمایش از آن استفاده می‌کنیم، ۶۰۰ شکاف در هر میلی‌متر دارد، فاصله‌ی شکاف‌ها (d) را محاسبه کنید.

۲) طول‌موج (λ) و فرکانس (ν) را برای هر یک از رنگ‌های خواسته شده در جدول که زاویه را برایش اندازه‌گیری نموده‌اید، محاسبه و در جدول (۱) ثبت کنید.

۳) همانطور که شرح داده شد، خطوط رنگی مربوط به سری بالمر از اتم هیدروژن است. رابطه‌ی ریدبرگ (رابطه‌ی ۱۲) برای سری بالمر به چه شکلی است؟

۴) با توجه به پاسخ سؤال (۳) و داده‌های جدول(۱)، نمودار فرکانس هر رنگ برحسب $\frac{1}{n^2}$ همان رنگ ($\nu - \frac{1}{n^2}$) را در کاغذ میلی‌متری رسم کنید.

۵) با استفاده از نمودار رسم شده در سؤال قبل، ثابت ریدبرگ را بیابید و با مقدار واقعی مقایسه کنید. (محاسبه‌ی درصد خطای نسبی)

۶) در جدول (۱) برای هر رنگ، یک n متناظر شده است. این n شماره‌ی تراز برانگیختگی الکترون است که الکترون با گذار از آن تراز به اولین برانگیختگی (n = ۲) فوتونی با طول موج رنگ مورد نظر ساطع کرده است. با کمک شکل (۳)، شرح دهید که چرا این تناظر بین nها و رنگ‌ها صحیح است؟

۷) در بخش تئوری متوجه شدیم که در طیف هیدروژن علاوه بر سری بالمر که خطوط طیف آن را طی آزمایش بررسی کردیم، سری‌های دیگری نیز موجود بودند. با کامل کردن جدول (۲) و مشخص کردن محدوده‌ی فرکانس و طول موج (فاصله‌ی مینیمم طول موج و فرکانس تا ماکزیمم آن‌ها) مربوط به سایر سری‌ها، علت عدم مشاهده آن‌ها در طیف‌سنج را توضیح دهید.

جدول(۱):

رنگ طیفی	n	$\theta = \theta_1 - \theta_0$	λ	$\nu = \frac{C}{\lambda}$
بنفش	۶			
نیلی	۵			
آبی-سبز	۴			
قرمز	۳			

جدول(۲):

سری	λ_{max}	λ_{min}	ν_{max}	ν_{min}
لیمان				
بالمر				
پاشن				
براکت				
پفوند				

آزمایش ۱۱

اثر زیمان

هدف آزمایش:

۱) مشاهده‌ی شکافتگی خط قرمز کادمیوم در اثر میدان مغناطیسی خارجی
۲) مطالعه‌ی اثر زیمان بهنجار
۳) تعیین $\frac{e}{m}$ الکترون با اندازه‌گیری شکافتگی طیف کادمیوم در میدان مغناطیسی خارجی

وسایل مورد نیاز:

سیستم نوری برای مشاهده‌ی پدیده‌ی زیمان، صفحه‌ی لومر (Lummer Gehreke) با قدرت تفکیک بالا، لامپ کادمیوم به همراه منبع تغذیه‌ی مخصوص ۲۲۰ ولت و ۱ آمپر، آهنربای الکتریکی (الکترومگنت) مخصوص پدیده‌ی زیمان، منبع جریان ۲۰-۰ آمپر، آمپرمتر مخصوص خوانش جریان‌های بالا.

تئوری آزمایش:

در مدل سیاره‌ای کلاسیک، انرژی کل، بزرگی اندازه‌ی حرکت زاویه‌ای مداری و مؤلفه‌ی اندازه حرکت زاویه‌ایِ مداری، در امتداد هر راستایی از فضا، ثابت حرکت‌اند. در مکانیک موجی انرژی یک اتم تک الکترونی، کوانتیده است و با عدد کوانتومی اصلی n مشخص می‌شود. اندازه حرکت زاویه‌ای مداری این اتم و همچنین سومین ثابت کلاسیک حرکت یعنی مؤلفه اندازه حرکت زاویه‌ای مداری، در امتداد یک راستای ثابت از فضا کوانتیده می‌باشند و مقادیر آنها به ترتیب با اعداد کوانتومی l و m مشخص می‌شود. این کوانتش که آن‌را می‌توان به طور صوری در مکانیک موجی بدست آورد، رابطه‌ی نزدیکی با اثرهای مغناطیسی در اتم‌ها دارد.
اثرهای مغناطیسی مربوط به یک الکترون در حال دوران را درنظر می‌گیریم. یک بارِ الکتریکیِ منفی در حال چرخش، حلقه‌ی جریانی به بزرگی i را تشکیل می‌دهد (رابطه‌ی ۱) که در آن T زمان طی یک چرخه‌ی کامل به دور مدار می‌باشد.

$$i = \frac{e}{T} = \frac{ev}{2\pi r} \qquad (۱)$$

به این حلقه‌ی جریان الکتریکی، یک میدان مغناطیسی وابسته است که پیکربندی میدان مغناطیسی مانند پیکربندی یک آهن‌ربای دائمی کوچک است و می‌توان به الکترونِ در حال چرخش یک گشتاور دوقطبی مغناطیسی $\vec{\mu}$ نسبت داد. جهت $\vec{\mu}$ بر صفحه‌ی حلقه‌ی الکترون عمود است و از طریق قاعده‌ی پیچ دست راست به جهت حرکت بار مثبت چرخان مربوط می‌شود. بنابراین بردار اندازه حرکت زاویه ای L یک ذره با بار منفی و گشتاور مغناطیسی $\vec{\mu}$ آن در دو جهت مخالف قرار دارند.
چنانچه این گشتاور مغناطیسی $\vec{\mu}$ در یک میدان مغناطیسی خارجی $\vec{B}$ قرار گیرد، در نظریه‌ی مقدماتی الکترومغناطیس نشان داده می‌شود که به دوقطبی، گشتاور نیروی $\vec{\tau}$ که می‌خواهد $\vec{\mu}$ را در امتداد $\vec{B}$ قرار دهد و در رابطه (۲) صدق می‌کند، وارد می شود.

$$\vec{\tau} = \vec{\mu} \times \vec{B} \qquad (۲)$$

همچنین در ارتباط با این گشتاور نیرو، تغییری در انرژی پتانسیل مغناطیسی دوقطبی (E_m) در میدان مغناطیسی به صورت زیر بوجود خواهد آمد (رابطه ۳).

$$\Delta E_m = -\vec{\mu} \cdot \vec{B} \qquad (۳)$$

و از نظر فیزیک کلاسیک تغییر در انرژی پتانسیلِ یک اتم می‌تواند شامل تمامی انرژی‌های بین $-\mu B$ تا $+\mu B$ باشد.

می‌خواهیم ثابت تناسب بین بزرگی‌های L و μ را پیدا کنیم. بزرگیِ گشتاور مغناطیسی یک جریان الکتریکی i که در حلقه‌ای به مساحت A جریان دارد، برابر است با:

$$\mu = iA = \frac{ev}{2\pi r}A = \frac{ev}{2\pi r}\pi r^2$$

$$\mu = \frac{evr}{2} \qquad (۴)$$

که r شعاع حلقه و v سرعت الکترون می باشد. از طرفی بزرگیِ اندازه حرکت زاویه‌ای مداری، L نسبت به مرکز نیرو، برای ذره‌ای به جرم m تحت تأثیر یک نیروی مرکزی توسط رابطه‌ی زیر داده می‌شود:

$$L = mvr \qquad (۵)$$

از روابط (۴) و (۵) نتیجه می‌شود:

$$\mu = -\frac{e}{2m}L \qquad (۶)$$

در اینجا علامت منفی به دلیل مختلف‌الجهت بودن بردارهای گشتاور مغناطیسی و اندازه‌ی حرکت زاویه‌ای است. ثابت تناسب $(-\frac{e}{2m})$ معمولاً به نسبت ژیرومغناطیسی موسوم است. مکانیک موجی نیز دقیقاً همین رابطه‌ی فیزیک کلاسیک را برای نسبت ژیرومغناطیسی یک الکترون در یک اتم با اندازه حرکت زاویه‌ای مداری $(L = \sqrt{l(l+1)}\ \hbar)$ بدست می‌دهد[۲۱] . چون L به عدد کوانتومی اندازه حرکت زاویه‌ای مداری (l) بستگی دارد، پس گشتاور مغناطیسی μ نیز باید به l بستگی داشته باشد.

$$\mu = \frac{e}{2m}\sqrt{l(l+1)}\ \ \hbar \qquad (۷)$$

$$\Delta E_m = \frac{e\hbar}{2m}\sqrt{l(l+1)}\ \ B\cos\theta \qquad (۸)$$

θ زاویه‌ی بین L و B می‌باشد و $(\frac{e}{2m}\sqrt{l(l+1)}\ \ \hbar\cos\theta)$ مؤلفه‌ی اندازه حرکت زاویه‌ای مداری در جهت میدان مغناطیسی است. اگر هیچ قاعده‌ی محدود کننده‌ای همچون کوانتش مقادیر L در جهت میدان وجود نداشت، پیوستاری از انرژی‌های ممکن بین مثبت و منفی $(\pm\frac{e\hbar}{2m}\sqrt{l(l+1)}\ \ B)$ وجود می‌داشت و همچنین انتظار می‌رفت خطوط گسیلی اتم‌هایی با گشتاور مغناطیسی μ در میدان‌های مغناطیسی به طورپیوسته پهن شوند.

در سال ۱۸۹۶ خطوط گسیلی از اتم‌ها در یک میدان مغناطیسی خارجی قوی به کمک یک دستگاه با توان تفکیک بالا توسط زیمان مورد مطالعه قرار گرفت. او دریافت با اعمال میدان مغناطیسی، خطوط گسیلی به دو یا چند خط تیز نزدیک به هم شکافته می‌شوند که این شکافتگی خط طیفی توسط یک میدان مغناطیسی خارجی به اثر بهنجار زیمان معروف است.

در مکانیک موجی مؤلفه‌ی بردار اندازه حرکت زاویه‌ای مداری L در هر جهتی مضرب درستی از $\hbar$ می‌باشد. حال چنانچه جهت میدان مغناطیسی را هم‌جهت با Z اختیار کنیم، خواهیم داشت:

$$\Delta E_m = \frac{e}{2m}L\cdot B = \frac{e}{2m}BL$$

$$L = m_l\hbar \qquad (۹)$$

که در آن m_l به ازای یک مقدار مفروض از l مقادیر درست

$$m_l = -l.-(l-1).\ldots.(l-1).-l$$

---

[۲۱] $\hbar$ $(\hbar = \frac{h}{2\pi})$ را ثابت پلانک کاهش یافته گویند.

را اختیار می‌کند و بنابراین از کوانتیده بودن L برای هر مقدار l، تعداد $2l+1$ حالت کوانتومیِ مجزا وجود دارد و انرژی پتانسیل مغناطیسی ΔE_m نیز در این حالت کوانتیده است و برای حالتی با اعداد کوانتومی l و m_l داریم.

$$\Delta E_m = m_l \frac{e\hbar}{2m} B \qquad (۱۰)$$

و به ازای هر مقدار از l مؤلفه های زیمان $2l+1$ است که اختلاف انرژی بین این زیرترازهای مغناطیسی ($\frac{e\hbar}{2m}B$)، مستقل از مقدار l است و کمیت $\frac{e\hbar}{2m}$ برای اندازه گیری گشتاور دوقطبی مغناطیسی اتمی یک واحد طبیعی محسوب می شود و به مگنتون بوهر موسوم است.

$$\mu_B = \frac{e\hbar}{2m} = 0.9273 \times 10^{-23} \ \ (J/T) \qquad (۱۱)$$

اگر اتم‌های مثلاً هیدروژن، در برخورد با الکترون‌های پرانرژی در یک لامپ تخلیه‌ی الکتریکی گاز به ترازهای انرژی متوالیاً پایین‌تر خودبخود گذار می‌کنند، در هر گذار بین دو تراز، فوتونی گسیل می‌یابد که بسامدش برابر است با اختلاف انرژی دو تراز تقسیم بر ثابت پلانک. بسامدهای گسسته‌ی گسیلی در تمام گذارهایی که روی می‌دهند، خطوط طیف را می‌سازند. ولی اندازه‌گیری‌ها نشان می‌دهند که تمام گذارهای قابل تصور روی نمی‌دهند. فوتون‌ها تنها با بسامدهای معینی مشاهده می‌شوند. این بسامدها به گذار بین ترازهایی مربوط‌اند که اعداد کوانتومی‌شان در قواعد گزینش زیر صدق می‌کنند:

$$\Delta l = \pm 1$$

$$\Delta m_l = 0 \ \text{یا} \ \pm 1$$

یعنی طبق قاعده‌ی گزینش برای گذارهای بین زیرترازهای مغناطیسی، تنها آن گذارهایی مجازند که در آن‌ها عدد کوانتومی m_l یا تغییر نمی‌کند و یا به اندازه‌ی واحد تغییر می‌کند. به عنوان مثال طیف خطوط گسیل شده از اتم‌های برانگیخته در گذارهای بین حالت های D و P را در حضور یک میدان مغناطیسی درنظر می‌گیریم. وقتی که B صفر است، انرژی حالت D برابر E_D (برای هر پنج مقدار m_l) و انرژی حالت P مقدار E_P (برای تمام سه حالت m_l) است و فوتون‌هایی که دارای تک بسامد ν هستند، طبق رابطه ی ($h\nu = E_D - E_P$) گسیل می‌شوند. وقتی میدان برقرار می‌شود، حالت D به پنج زیرتراز مغناطیسی هم‌فاصله و حالت P به سه زیرتراز مغناطیسی هم‌فاصله تجزیه می‌شوند و اختلاف در انرژی بین هر دو زیرتراز مغناطیسی مجاور $(\frac{e\hbar}{2m})B$ است و گذار بین حالت‌هایی که در آن ها $\Delta m_l = 0$ یا ± 1 باشد، می‌تواند رخ دهد.

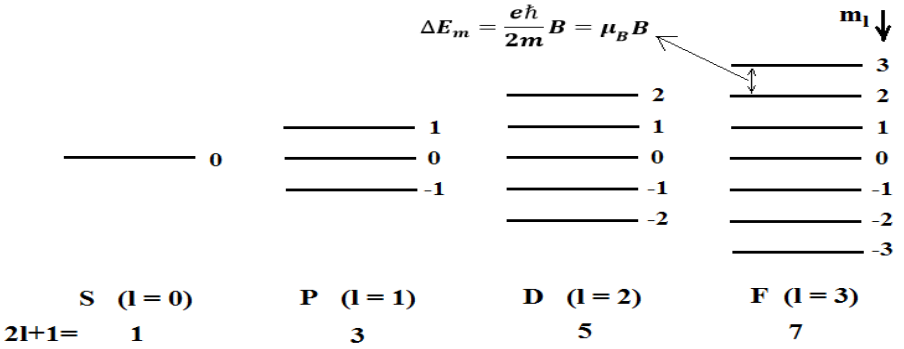
می‌توان مشاهده کرد که در این صورت $h\nu$ برای گذارهای مجاز، یکی از سه مقدار ممکن زیر را اختیار می کند.

$$\left.\begin{aligned} \Delta m_l = +1 \quad &\rightarrow \quad h\nu = h\nu + \frac{e\hbar}{2m} B \\ \Delta m_l = 0 \quad &\rightarrow \quad h\nu = h\nu \\ \Delta m_l = -1 \quad &\rightarrow \quad h\nu = h\nu - \frac{e\hbar}{2m} B \end{aligned}\right\} \qquad (۱۲)$$

از تقسیم طرفین بر h، بسامدهای تابش گسیل شده به دست می آیند.

$$\left.\begin{aligned} \Delta m_l = +1 \quad &\rightarrow \quad \nu = \nu + \frac{e}{4\pi m} B \\ \Delta m_l = 0 \quad &\rightarrow \quad \nu = \nu \\ \Delta m_l = -1 \quad &\rightarrow \quad \nu = \nu - \frac{e}{4\pi m} B \end{aligned}\right\} \qquad (۱۳)$$

از این رو هر خط در طیف، توسط یک میدان مغناطیسی خارجی به سه مؤلفه‌ی هم‌فاصله شکافته می‌شود. با توجه به شکل (۳) تمامی گذارهایی که برای آن‌ها Δl برابر ± 1 است منجر به اثر زیمان یکسان خواهند شد، یعنی سه خط مؤلفه‌ای هم‌فاصله‌ی زیمان. این بیان را اثر بهنجار زیمان می‌گویند.



شکل(۱): شکافتگی انرژی حالت‌های S ، P ، D ، F *اتم در میدان مغناطیسی*

گاهی در طیف‌های گسیلی و درآشامی (جذبی)، بدون اعمال میدان مغناطیسی خارجی برای هر گذری چند خط مشخص و مجزا وجود دارد که طول‌موج‌های آن‌ها بیش از چند انگستروم اختلاف ندارند و این همان ساختار ریز بی‌هنجار است. چنین اثری مستلزم حضور یک میدان مغناطیسی اتمی داخلی و چشمه‌ی جدیدی از گشتاور مغناطیسی و اندازه حرکت زاویه‌ای در داخل اتم است. با شواهدی از فیزیک کوانتومی چنین فرض شد که الکترون گشتاور دوقطبی مغناطیسی ذاتی داشته باشد و این گشتاور از این واقعیت ناشی شده باشد که الکترون دارای اندازه حرکت زاویه‌ای ذاتی S موسوم به اسپین است بطوریکه می‌توان الکترون را به عنوان جسمی که در فضا دارای گسترش است و بطور پیوسته حول یک محور به دور خود می‌چرخد؛ فرض کرد. همچنین فرض می‌کنیم که بزرگی و مؤلفه‌ی Z اندازه حرکت زاویه‌ای اسپینی S بوده و این S از طریق روابط یکسان با روابط کوانتومی اندازه حرکت زاویه‌ای مداری به دو عدد کوانتومی S و m_S مربوط باشند، یعنی:

$$S = \sqrt{S(S+1)}\,\hbar \qquad (۱۴)$$
$$S = m_S\,\hbar$$

علاوه بر این فرض می‌کنیم که رابطه‌ی بین گشتاور دوقطبی مغناطیسی اسپینی و اندازه حرکت زاویه‌ای اسپینی به همان صورت رابطه‌ی مربوط به مورد اندازه حرکت مداری باشد، یعنی:

$$\mu_S = -\frac{g\mu_B}{\eta} S \qquad (۱۵)$$

کمیت g در حالت مداری برابر یک بود به همین دلیل کمیت g ظاهر نشد اما شواهد تجربی نشان می‌دهند در حالت اسپینی مقدار $g = 2$ می‌باشد.

میدان مغناطیسی داخلی اتمی می‌تواند بر یک الکترون با اندازه حرکت زاویه‌ای اسپینی S و گشتاور مغناطیسی اسپینی μ_S اثر کند. منشاء این میدان را می‌توان به شرح زیر تصویر کرد:

اگر یک الکترون چرخان، هسته‌ای را دور بزند، به نظرِ ناظر ثابت نسبت به الکترون، هسته به دور الکترون می‌چرخد. دوران این بار مثبت، یک میدان مغناطیسی در محل الکترون تولید می‌کند که بزرگی و جهت اندازه حرکت زاویه‌ای مداری الکترون بستگی دارد. این میدان، بر گشتاور مغناطیسی اسپینی μ_S اثر می‌کند. برهمکنش بین اسپین الکترون و اندازه حرکت زاویه‌ای مداری را بطور

مناسب برهمکنش اسپین-مدار می‌نامند (این برهمکنش در تمامی حالت‌ها به جز $l = 0$ وجود دارد). در این حالت نیز مثل اثر بهنجار زیمان حالتی که دارای عدد کوانتومی اندازه حرکت زاویه‌ای اسپینی S است، تحت تأثیر میدان مغناطیسی داخلی، به $2S + 1$ مؤلفه شکافته می‌شود و چون تعداد مؤلفه‌های همه‌ی حالت‌های ساختار ریز با $l = 0$ همواره برابر ۲ است. بنابراین:

$$2S + 1 = 2$$

$$S = \frac{1}{2} \qquad (۱۶)$$

پس در یک اتم دو سهم در اندازه حرکت زاویه‌ای کل وجود دارد: یکی اندازه حرکت زاویه‌ای مداری و دیگری اندازه حرکت زاویه‌ای اسپین الکترون. نظریه‌ی کوانتومی پیشگویی می‌کند که اندازه حرکت زاویه‌ای کل (L_j) یک اتم با یک الکترون ظرفیت با عدد کوانتومی اندازه حرکت زاویه‌ای کل j مشخص می‌شود و بزرگی آن از رابطه‌ی

$$L_j = \sqrt{j(j+1)}\,\hbar \qquad (۱۷)$$

بدست می‌آید. عدد j هریک از دو مقدار $l + S$ و $l - S$ را می‌تواند بپذیرد که در آن l و S اعداد کوانتومی مداری و اسپینی‌اند.

در میدان خارجی اندازه حرکت زاویه‌ای کل L_j در جهت میدان کوانتیده‌ی فضایی است (میدان را در جهت Z انتخاب می‌کنیم) و $2j + 1$ مؤلفه‌ی مجاز L_j وجود دارد.

$$L_j = m_j \hbar \qquad (۱۸)$$

$$m_j = -j. -(j-1). \ldots . (j-1). j$$

این مطلب اساس اثر بی‌هنجار زیمان است که همراه با برهمکنش اسپین-مدار پدید می‌آید. تمامی الکترون‌های داخل پوسته‌ی بسته‌ی یک اتم آنچنان مرتب شده‌اند که اندازه حرکت زاویه‌ایِ کل و گشتاور مغناطیسی کل پوسته‌ی بسته صفر است. محاسبه‌ی شکافتگی بی‌هنجار زیمان مستلزم اطلاعاتی درباره‌ی اندازه حرکت زاویه‌ای کل L_j است که با افزایش تعداد الکترون‌های ظرفیت تحلیل ساختار اتم‌ها بسیار پیچیده شده، چرا که بایستی بردارهای اندازه حرکت زاویه‌ای اسپینی و مداری مربوط به دو یا چند الکترون را ترکیب نمود.

عموماً پدید آمدن اثر بهنجار زیمان مستلزم آن است که اندازه حرکت زاویه‌ای اسپینی کل اتم صفر باشد که گفته می‌شود اتم دارای تعداد زوجی از الکترون‌هایی است که بصورت زوج‌های با اسپین ناهم‌ردیف گروه‌بندی شده‌اند.

تئوری سیستم مورد آزمایش:

خط طیفی قرمز کادمیوم با طول موج $\lambda_b = 643.8$ (نانومتر) در میدان مغناطیسی B به چندین مؤلفه تجزیه می‌شود. اگر مشاهده در راستای میدان باشد، تعداد مؤلفه‌ها ۲ و اگر مشاهده عمود بر راستای میدان صورت بگیرد، تعداد مؤلفه ها ۳ خواهد بود (حالت اخیر در این آزمایش انجام می‌شود.) خط طیفی قرمز مربوط به انتقال یکی از دو الکترون لایه‌ی پنجم از تراز بالایی با عدد کوانتومی مداریِ $l = 2$ به تراز $l = 1$ می‌باشد. در هر دو تراز اسپین کل برابر صفر می‌باشد. ($S = 0$) بنابراین اندازه حرکت زاویه‌ای کل L_j برابر اندازه حرکت زاویه‌ای مداری L می‌باشد که مقدار آن برابر است با:

$$L_j = \sqrt{l(l+1)}\ \hbar$$

بطوری که گشتاور مغناطیسی مربوط به آن برابر است با:

$$\mu_j = \frac{e}{2m} L_j \qquad (۱۹)$$

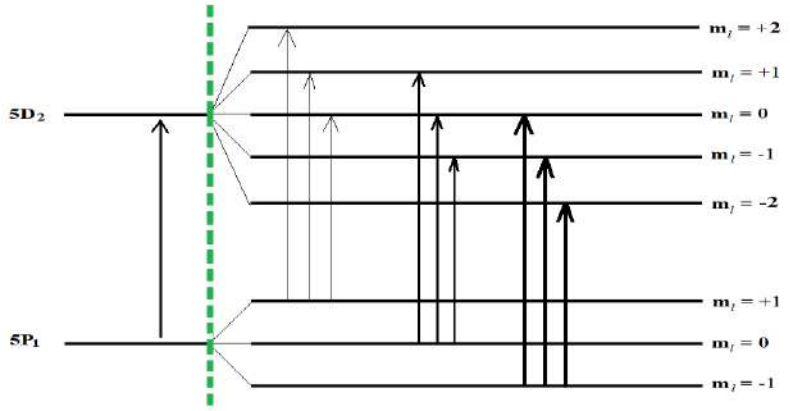
در میدان مغناطیسی خارجی B در راستای Z و با درنظر گرفتن قواعد گزینش ($\Delta m_j = 0 \, . \pm 1$) سه خط طیفی بدست می‌آید که یکی از آن‌ها انتقال نمی‌یابد ($\Delta m_j = 0$) و دو خط طیفی دیگر ($\Delta m_j = \pm 1$) با توجه به رابطه‌ی (۱۳) به اندازه‌ی مقدار زیر جابجا می‌شوند:

$$\Delta \nu = \pm \frac{e}{4\pi m} B$$

که در این رابطه $\Delta \nu$ را فرکانس لارمور ($Larmor$) می‌گویند.

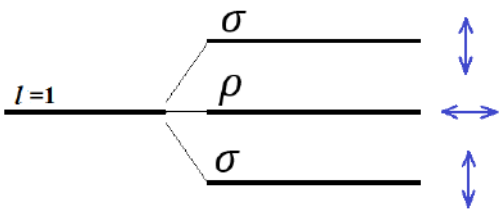
برای مدت‌های مدیدی تجزیه‌ی خطوط قرمز کادمیوم یک مثال ساده برای نشان دادن پدیده‌ی بهنجار زیمان بیان می‌گردید. در این مورد فرض می‌شد که فقط انتقال از $5P_1 - 5D_2$ طیف قرمز را بوجود می‌آورد. در صورتیکه امروزه می‌دانیم که طیف قرمز حاصل از دیگر گذارهایی که دارای همان اختلاف انرژی دو تراز باشد هم وجود دارد.

در شکل (۲) شمایی از دیاگرام طیف قرمز کادمیوم با طول‌موج ($\lambda = 643.8 \ nm$) را مشاهده می‌کنید. طیف قرمز در مجاورت میدان مغناطیسی به دو ترکیب خارجی σ و یک ترکیب داخلی ρ تجزیه می‌گردد. یک چنین طیفی را می‌توان در شرایطی که مشاهده‌ی L عمود بر میدان مغناطیسی خارجی است.

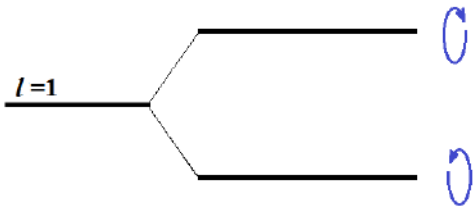


شکل(۲): گذارهای مجازی که منجر به طیف قرمز در کادمیوم می‌شوند.

هرسه مؤلفه‌ی طیف سه‌گانه لورنتس بطور خطی پلاریزه شده‌اند. یعنی خط مرکزی که مربوط به خط طیفی چشمه‌ی نورانی بدون میدان مغناطیسی خارجی است و در جهت میدان مغناطیسی است و دو خط دیگر عمود بر جهت میدان مغناطیسی است. وقتی که در جهت طولی یعنی در جهت میدان مغناطیسی خارجی به خطوط نگاه می‌کنیم. دو خط طیفی قابل تشخیص می‌باشند و خط مرکزی در این شرایط مشاهده نمی‌گردد و دو خط طیفی در خلاف جهت یکدیگر پلاریزه شده‌اند. (شکل ۳)

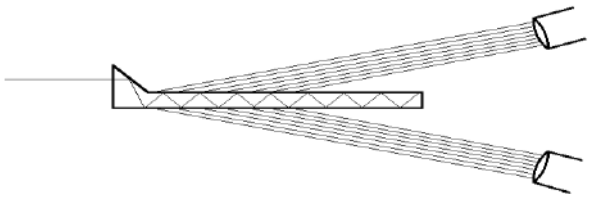


شکل ۳-a : حالت پلاریزه سه‌گانه



شکل ۳-b : حالت پلاریزه دوگانه

برای مشاهده‌ی مؤلفه‌های تجزیه شده‌ی طیف نیازمند یک اسپکتروسکوپ با قدرت تفکیک بالا می‌باشیم. در آزمایش از صفحه‌ی لومر استفاده می‌کنیم که قدرت تفکیک آن حدود $\frac{\lambda}{\Delta\lambda} = 500000$ است. (شکل ۴)



شکل(۴): صفحه لومر در سیستم نوری مورد استفاده در آزمایش

در جابجایی خطوط طیف تغییری قابل اندازه‌گیری در طول‌موج و یا فرکانس رخ می‌دهد. دو ترکیب و یا سه مؤلفه‌ی این طیف جابجا می‌شوند و بطور مثال به فرکانس $\nu + \Delta\nu$ و یا $\nu - \Delta\nu$ انتقال می‌یابند. این مقدار جابجایی برابر است با:

$$\Delta\nu = \pm\frac{1}{4\pi}\frac{e}{m}B$$

چون در این آزمایش می‌خواهیم مقدار $\frac{e}{m}$ را برای الکترون محاسبه کنیم، رابطه فوق را به شکل زیر دوباره‌نویسی می‌کنیم:

$$\frac{e}{m} = \frac{4\pi}{B}\Delta\nu \qquad (۲۰)$$

که در آن B شدت میدان مغناطیسی برحسب تسلا و $\Delta\nu$ تغییر فرکانس می‌باشد.

مقدار $\Delta\nu$ را می‌توان از قدرت تفکیک صفحه‌ی لومر و جابجایی طول‌موج در اثر میدان مغناطیسی با شدت B معین بدست آورد.

برطبق رابطه‌ی *Kohlraush* مقدار اختلاف طول‌موج مشاهده شده در صفحه‌ی لومر چنین بدست می‌آید:

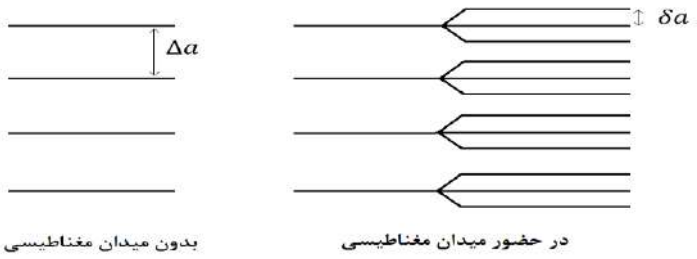
$$\Delta\lambda = \frac{\delta a}{\Delta a}\ \frac{\lambda^2\sqrt{n^2-1}}{2d(n^2-1-n\lambda)}$$

در این محاسبه جمله‌ی $n\lambda\frac{\delta n}{\delta\lambda}$ را می‌توان نادیده گفت. در نتیجه داریم:

$$\Delta\lambda = \frac{\delta a}{\Delta a}\ \frac{\lambda^2\sqrt{n^2-1}}{2d(n^2-1)} \qquad (۲۱)$$

بطوری‌که:

فاصله‌ی بین دو خط طیف با حضور میدان مغناطیسی (شکل ۵)	δa
فاصله‌ی بین دو خط طیف بدون میدان مغناطیسی (شکل ۵)	Δa
طول‌موج طیف قرمز کادمیوم که برابر است	$\lambda = 6438 \quad A°$
ضریب شکست شیشه‌ی کوارتز صفحه‌ی لومر	$n = 1.4567$
ضخامت صفحه‌ی لومر	$d = 4.04\ mm$
سرعت نور	C



شکل(۵): شکافتگی خطوط طیف قرمز کادمیوم در حضور میدان و بدون حضور میدان

برای نشان دادن بار ویژه‌ی الکترون‌های اپتیکی می‌بایستی جابجایی فرکانس را از روی جابجایی طول‌موج بدست آوریم و در این حالت می‌بایستی از رابطه‌ی بین فرکانس و طول‌موج استفاده کنیم. $c = \lambda\nu$

با دیفرانسیل‌گیری از این رابطه خواهیم داشت:

$$\frac{\delta C^2}{dl \cdot dn} = \lambda\,\delta\nu + \nu\,\delta\lambda$$

$$\lambda\,\delta\nu + \nu\,\delta\lambda = 0$$

چون C مقداری ثابت است پس داریم:

با تبدیل $\delta \longrightarrow \Delta$ و جایگزینی $\nu = \frac{C}{\lambda}$ خواهیم داشت:

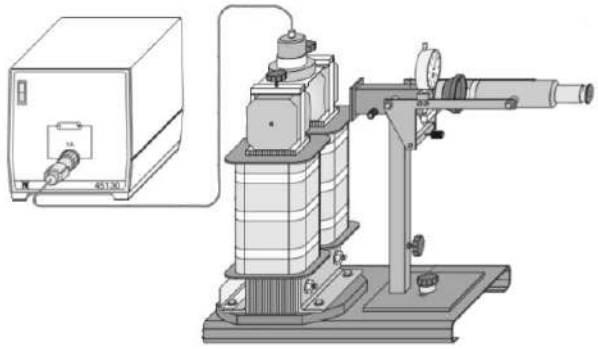
$$\lambda\,\delta\nu + \frac{C}{\lambda}\,\Delta\lambda = 0$$

$$\Delta\nu = \frac{-C\,\Delta\lambda}{\lambda^2} \quad \Longrightarrow \quad \Delta\nu = \pm\frac{C}{\lambda^2}\,\Delta\lambda \qquad (۲۲)$$

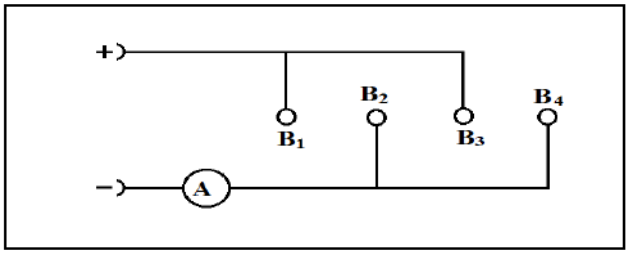
جابجایی فرکانس می‌تواند مثبت یا منفی باشد.

تنظیم دستگاه:

دستگاه آزمایش را مطابق شکل (۶) سوار کنید. آهنربای الکتریکی بوسیله‌ی پیچ‌هایی با کلاهک شش‌گوش بر روی صفحه‌ی مبنای سیستم نوری نصب شده‌است. پایه‌ی سیستم نوری هم بر روی صفحه‌ی مبنا پیچ شده‌است. لامپ کادمیوم را به منبع تغذیه‌ی مخصوص خود وصل کنید و بوسیله‌ی نگهدارنده‌ی لامپ در فضای بین لبه‌های بیرونی هسته‌ی U شکل در یک سطح قرار دهید. دهانه‌ی نگهدارنده‌ی لامپ می‌بایست در جهت اتصالات الکتریکی آهنربای الکتریکی واقع شود. پیچ‌های روی نگهدارنده‌ی لامپ طیفی را روی کفش قطب‌ها محکم کنید طوری‌که انتهای صاف کفش قطب‌ها با لبه‌های بیرونی هسته‌ی U شکل در یک سطح قرار گیرند. مدار آزمایش را مطابق



شکل(۶): دستگاه آزمایش زیمان



شکل(۷): مدار آزمایش زیمان

شکل(۷) ببندید اما پیش از برقرار نمودن جریان مغناطیس کننده اطمینان حاصل کنید که کفش قطب‌های آهنربا بطور محکم پیچ شده‌اند، در غیر اینصورت ممکن است بعد از برقراری جریان مغناطیس کننده، قطب‌ها حرکت نموده و باعث شکستن لامپ کادمیوم گردند. بعد از برقراری میدان مغناطیسی هیچ جسم فرومغناطیسی را به لامپ نزدیک ننمایید.

تنظیم سیستم نوری:

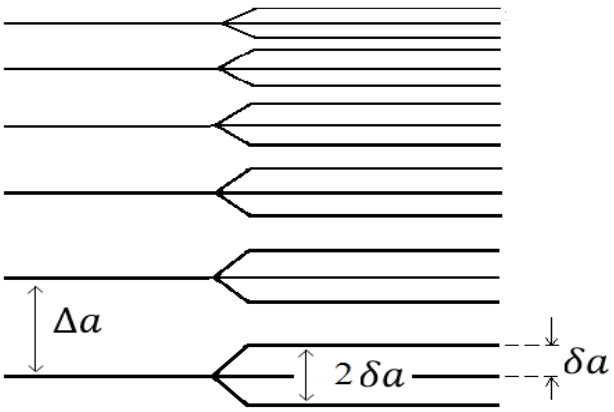
کلاهک سرپوش را برداشته و صفحه‌ی لومر را بصورت افقی در مقابل پنجره‌ای که نور از آن وارد می‌شود قرار دهید و فیلتر را که یک عدسی همگرا به آن چسبیده است در مقابل سوراخ ورودی کلاهک قرار داده و کلاهک سرپوش را در جای خود قرار دهید. ارتفاع صفحه‌ی لومر را به نحوی تنظیم کنید که با لامپ کادمیوم هم‌ارتفاع شود. برای این منظور می‌توانید از پیچی که در انتهای ستون نوری می‌باشد، استفاده کنید. با عدسی چشمی می‌توانید خط طیفی را متمرکز کنید. مقیاس‌بندی میکرومتر جهت اندازه‌گیری شکافتگی خطوط در نگهدارنده‌ی سمت چپ صفحه‌ی لومر قرار دارد.

اندازه‌گیری Δa در حالت فقدان میدان مغناطیسی:

علامت (+) اوکولر عدسی چشمی و خطی را که می‌خواهید اندازه بگیرید، بر هم منطبق نموده و ساعت میکرومتر را روی صفر بیاورید. با چرخاندن پیچ واقع در انتهای زیرین ساعت میکرومتر علامت (+) را با خط بعدی منطبق نموده و آنگاه مسافت Δa را از روی ساعت میکرومتر قرائت کنید. برای اندازه‌گیری بهتر است که از خطوط میانی استفاده کنید.

اندازه‌گیری شکافتگی طیفی زیمان(δa):

δa فاصله‌ی بین دو خط مجاور یک انشعاب سه‌تایی را با برقرار کردن میدان مغناطیسی در جریان ($I = 20\ A$) مشاهده نمایید. خط میانی را که موقعیت آن مستقل از میدان است به کمک فیلتر پولاریزاسیون حذف کنید. بدین منظور پولاروید را بچرخانید.



شکل (۸): مقادیر δa و Δa

از آنجا که مجموعه‌ی خطوط تولید شده توسط صفحه‌ی لومر هم فاصله نمی‌باشند، مقادیر δa و Δa را می‌بایست حتماً به ازای یک انشعاب سه‌گانه‌ی واحد اندازه گرفت (شکل۸). علامت (+) عدسی چشمی را بر روی مؤلفه‌ی پایینی انشعاب منطبق سازید. ساعت میکرومتر را صفر کرده و فاصله‌ی $2\ \delta a$ را که مستقل از میدان است، اندازه بگیرید.

مقادیر δa و Δa را برای جریان‌های خواسته شده در جدول (۱) اندازه‌گیری کرده و در جدول (۱) ثبت کنید. با توجه به اینکه مقدار میدان مغناطیسی (B) را فقط برای جریان ۲۰ آمپر می‌دانیم (در جریان ۲۰ آمپر میدان برابر است با $B = 0.5\ T$) مقدار $\frac{e}{m}$ را با استفاده از روابط داده شده محاسبه می‌کنیم.

جدول (۱):

$I\ (A)$	Δa	δa
۱۶		
۱۸		
۲۰		

جدول(۲):

دفعات اندازه‌گیری	$I\ (A)$	Δa	δa	$\frac{e}{m}$
۱	*20*			
۲	*20*			
۳	*20*			

پرسش‌ها:

۱) با توجه به جدول (۱) رابطه‌ی بین شکافتگی خطوط طیف و شدت میدان مغناطیسی چگونه است؟

۲) مقدار میانگین $\frac{e}{m}$ را بدست آورده و مقدار آن را با $\frac{e}{m}$ واقعی مقایسه کنید.

۳) عدد لانده ($Lande$) چیست؟ در این آزمایش مقدار آن چقدر است و چرا؟

۴) جفت شدگی $L.S$ را شرح دهید.

آزمایش ۱۲

آزمایش قطره روغن میلیکان

هدف آزمایش:

مطالعه کوانتیده (گسسته) بودن بار الکتریکی، اندازه‌گیری بار پایه (بار الکترون) **(e)**

وسایل آزمایش:

دستگاه آزمایش میلیکان (millikan apparatus)، واحد تأمین کننده الکتریکی (millikan supply unit)، زمان‌سنج دیجیتال، دماسنج، سیم‌های رابط

تئوری آزمایش:

ایده‌ی وجود یک واحد بار بنیادی برای الکتریسیته در اواخر قرن نوزدهم توسط بعضی از دانشمندان مطرح و در سال ۱۸۹۱ نام الکترون برای بار بنیادی توسط فیزیکدان ایرلندی، جورج استونی، ابداع گردید. اما آزمایش‌های تامسون[۲۲] بر روی اشعه کاتودی در سال ۱۸۹۷ نتایج جالب و تعیین کننده‌ای به همراه داشت. آزمایش‌های وی نشان داد که اشعه کاتودی جریانی از ذرات کوچک با بار منفی است که جرمی هزاران برابر کوچکتر از اتم هیدروژن دارند. به این ترتیب کشف شد که اتم‌ها، ذرات بنیادی نیستند بلکه از ذرات کوچکتری تشکیل شده‌اند.

تامسون طی آزمایش‌های مختلف نسبت بار به جرم ($\frac{q}{m}$) را برای این ذرات اندازه‌گیری کرد که در تمام ین آزمایش‌ها مقدار ($\frac{q}{m}$) یکسان بودند. برابر بودن مقدار ($\frac{q}{m}$) برای این ذرات منفی که از منابع مختلف بدست آمده بود، این نتیجه را داد که تمام بارها مربوط به یک ذره‌ی مشخص هستند. اما وی طی آزمایش‌های خود نتوانست بار و جرم را به شکل مجزا اندازه‌گیری کند.

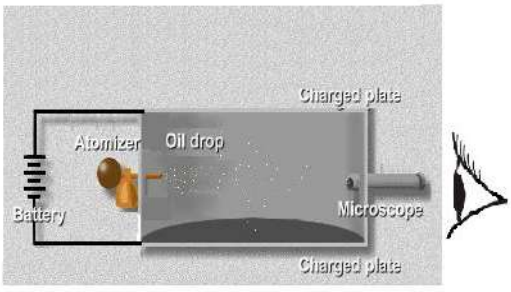
در سال ۱۹۰۹ رابرت میلیکان و هاروی فلچر، یک روش عملی برای اندازه‌گیری بار ذرات باردار گزارش کردند. آن‌ها با بررسی حرکت قطره‌های روغنِ باردار[۲۳] در میدان الکتریکی و یا سقوط آزاد آن‌ها در عدم حضور میدان الکتریکی توانستند اندازه بار الکتریکی این قطره‌ها را اندازه‌گیری کنند. آن‌ها متوجه شدند بار قطره‌های روغن همواره مضرب صحیحی از یک مقدار مشخص است که نتیجه گرفتند این مقدارِ مشخص، همان بار الکترون می‌باشد. مقدار اولیه‌ای که میلیکان در آزمایش‌های خود برای بار بنیادی بدست آورد 1.592×10^{-19} کولن بود که کمتر از 0.6% با مقدار دقیق آن (1.602×10^{-19}) اختلاف داشت.

---

[۲۲] سرجوزف جان جی.جی. تامسون (تامسون پدر)

[۲۳] معمولاً به دو روش ذرات روغن را باردار می‌کنند. روش اول قرار دادن یک چشمه‌ی ذرات آلفا (هیلیوم دو بار یونیده) که باعث یونش مولکول‌های هوا می‌شوند که در اثر برخورد قطره‌های روغن را باردار می‌کنند. و روش دوم با استفاده از همان اختلاف پتانسیل اعمال شده به دو الکترود. در روش دوم وجود بار فضایی (الکترون‌ها و یون‌های آزاد که در دمای محیط تولید و بازترکیب می‌شوند، ولی در اثر میدان الکتریکی اعمالی زمان واهلش یا بازترکیب آنها افزایش می‌یابد) که بر اثر برخورد به قطره‌های روغن آنها را باردار می‌کنند.

میلیکان برای بررسی حرکت قطره‌های باردار روغن آن‌ها را بین دو صفحه موازی خازن گونه، اسپری کرد و حرکت قطره‌های روغن را با سیستم نوری مشاهده و اندازه‌گیری نمود.
وقتی صفحات خازن باردار نشده باشند، قطره‌های باردار روغن بدون حضور میدان الکتریکی تحت تأثیر نیروی وزنِشان شروع به سقوط آزاد در هوا می‌کنند.



شکل ۱

در طی سقوط آزاد، هر قطره تحت تأثیر ۳ نیروی مختلف خواهد بود:

نیروی گرانش (وزن قطره) در جهت حرکت که برابر است با: $m_o g$

نیروی ارشمیدس[۲۴] خلاف جهت حرکت که برابر است با: $m_f g$

نیروی استوک[۲۵] خلاف جهت حرکت که برابر است با: $6\pi r\eta v$

که در این روابط: r شعاع قطره‌ی روغنِ در حالت سقوط، m_o جرم قطره روغن، m_f جرم هوای هم حجم قطره، g شتاب گرانش، η ضریب چسبندگی هوا[۲۶] و v سرعت سقوط قطره در هوا است.
قطره پس از طی مسافت کوتاهی در محفظه، به سرعت حدی (v_1) رسیده و شتاب حرکتش صفر می‌شود. در این وضعیت برآیند نیروهای وارد بر قطره صفر خواهد شد.

$$m_o g - m_f g - 6\pi r\eta v_1 = 0 \qquad (۱)$$

قطره روغن را کره‌ای به جرم r در نظر می‌گیریم و در رابطه (۱) جرم‌ها را با توجه به رابطه چگالی، با حجم ضربدر چگالی جایگزین می‌کنیم: $m_o = \frac{4}{3}\pi r^3 \rho_o$ (ρ_o چگالی روغن است.)

همچنین با توجه به تعریف نیروی ارشمیدس می‌دانیم که m_f جرم هوای هم حجم قطره روغن است.
بنابراین: $m_f = \frac{4}{3}\pi r^3 \rho_f$ (ρ_f چگالی هوا است.)

با جایگزینی مقادیر جرم در رابطه (۱)، رابطه به شکل رابطه‌ی (۲) خواهد شد:

$$\frac{4}{3}\pi r^3 \rho_o g - \frac{4}{3}\pi r^3 \rho_f g - 6\pi r\eta v_1 = 0 \qquad (۲)$$

با استفاده از رابطه (۲)، شعاع قطره (r) را محاسبه می‌کنیم:

$$r = \left[\frac{9\eta v_1}{2(\rho_o - \rho_f)g}\right]^{1/2} \qquad (۳)$$

به این ترتیب جرم قطره روغن (m_o) و هوای هم حجم آن (m_f) از رابطه‌های زیر بدست می‌آید:

---

[۲۴] فیزیک هالیدی - جلد اول- ویرایش دهم
[۲۵] مکانیک سیالات مهندسی – مفید گرجی (Stok's friction)
[۲۶] مکانیک سیالات مهندسی – مفید گرجی (Viscosity)

$$m_o = \frac{4}{3}\pi r^3 \rho_o = \frac{4}{3}\pi \rho_o \left[\frac{9\eta v_1}{2(\rho_o - \rho_f)g}\right]^{3/2} \quad (۴)$$

$$m_f = \frac{4}{3}\pi r^3 \rho_f = \frac{4}{3}\pi \rho_f \left[\frac{9\eta v_1}{2(\rho_o - \rho_f)g}\right]^{3/2} \quad (۵)$$

حال به محاسبه بار الکتریکی قطره روغن می‌پردازیم. برای اندازه‌گیری بار الکتریکی قطره، به دو صفحه خازن اختلاف پتانسیل U اعمال می‌کنیم. قطره به دلیل باردار بودن، تحت تأثیر میدان الکتریکیِ یکنواخت بین دو صفحه‌ی خازن، قرار گرفته و نیروی الکتریکی برابر qE به قطره وارد می‌شود. می‌توانیم اختلاف پتانسیل بین دو صفحه را طوری تنظیم کنیم که نیروی حاصل از میدان الکتریکی، نیروهای قبلی وارد بر قطره را خنثی کرده و قطره بدون حرکت در جای خود معلق بماند. از طرفی می‌دانیم اگر قطره بی‌حرکت باشد، نیروی اِستوک به آن وارد نخواهد شد. پس در حالت سکون نیروهای وارد بر قطره به شکل زیر خواهند بود:

نیروی گرانش رو به پایین $m_o g$

نیروی ارشمیدس رو به بالا $m_f g$

نیروی الکتریکی رو به بالا qE

در حالت سکون برآیند تمام نیروها صفر است.

$$m_o g - m_f g - qE = 0$$

میدان الکتریکی E توسط دو خازن که به فاصله‌ی d و اختلاف پتانسیل U از هم واقعند، ساخته شده پس میدان E برابر است با:

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

$$m_o g - m_f g - q\frac{U}{d} = 0 \quad (۶)$$

با جایگزاری روابط (۴) و (۵) در رابطه (۶) بار الکتریکی قطره روغن (q) بدست می‌آید:

$$q = \frac{4\pi d g(\rho_o - \rho_f)}{3U}\left[\frac{9\eta v_1}{2(\rho_o - \rho_f)g}\right]^{3/2} \quad (۷)$$

نکته: ضریب چسبندگی یا ویسکوزیتی سیالات (η) کمیتی است که به دما (T) و فشار (P) سیال وابسته است و از رابطه زیر تبعیت می‌کند:

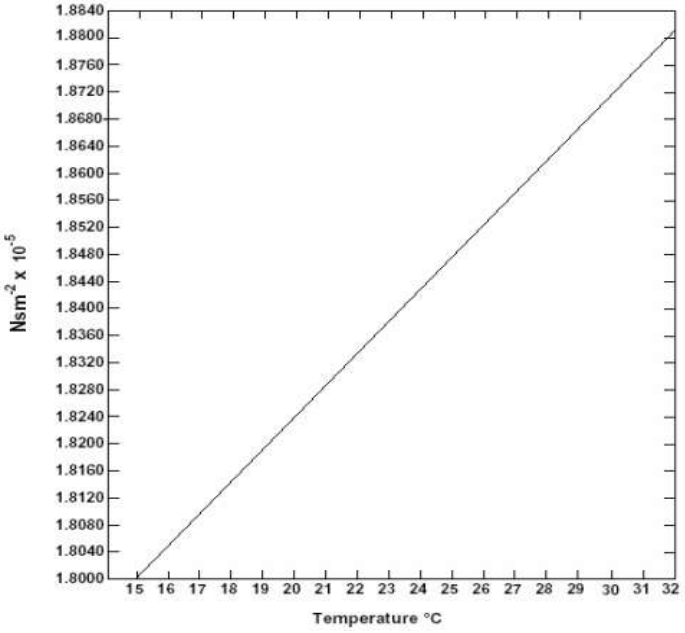
$$\eta'(P.T) = \eta(T)\left[1 + \frac{b}{rP}\right]^{-1} \quad (۸)$$

b ضریب ثابتی است با مقدار b=6.17×10^{-4} cm.cmHg و r شعاع قطره و P فشار هوا در آزمایشگاه می‌باشد.

در رابطه (۸) بخش وابسته به دما ($\eta(T)$) است که مقدار آن را در دمای آزمایشگاه از نمودار شکل (۲) بدست می‌آوریم.

بخش وابسته به فشار ($\left[1 + \frac{b}{rP}\right]^{-1}$) نیز با توجه به فشار آزمایشگاه محاسبه و جایگزین می‌شود.

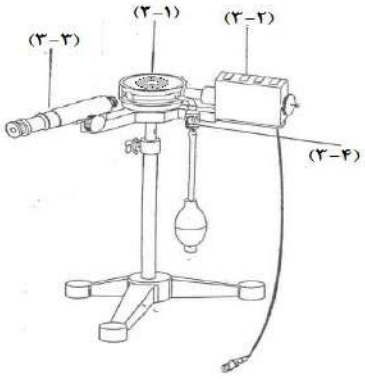
تذکر این نکته ضروری است که اگر شعاع قطره روغن کوچکتر از میانگین پویش آزاد[۲۷]اتم‌های هوا باشد، نیازی به تصحیح (رابطه۸) برای ضریب چسبندگی (η) نیست و فقط با توجه به دما از نمودار شکل (۲) مقدار $\eta(T)$ را خوانده و در رابطه (۷) جایگزین می‌کنیم. اما چنانچه شعاع قطره به اندازه میانگین پویش آزاد مولکول‌های هوا رسیده و یا بزرگتر از آن باشد، باید این تصحیح را اعمال کنیم. یعنی به جای η در رابطه(۷)، η' را از رابطه(۸) قرار می‌دهیم. در روش آزمایش توضیح داده شده که چگونه قطره‌ای مناسب انتخاب کنیم که این تصیح را نیاز نداشته باشد.



شکل ۲: ضریب چسبندگی هوا بر اساس دما

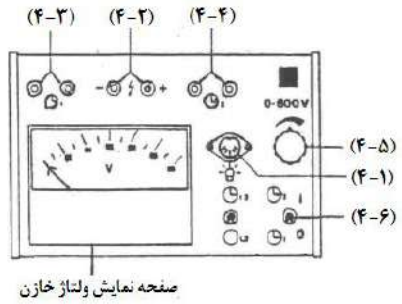
روش انجام آزمایش:

با استفاده از ترازی که روی محفظه خازن قرار گرفته، اطمینان حاصل کنید که دستگاه آزمایش قطره میلیکان (شکل۳) کاملاً در حالت افقی قرار گرفته است. به این ترتیب میدان الکتریکی که بعد از اتصال منبع تغذیه به صفحات خازن بین دو صفحه تشکیل می‌شود کاملاً قائم خواهد بود.



شکل۳: دستگاه آزمایش قطره میلیکان

یک (Power Supply Unit) واحد تأمین کننده‌ی الکتریکی (شکل۴) در اختیار دارید. روی این دستگاه خروجی‌های متعددی وجود دارد. یکی از این خروجی‌ها (شکل ۱-۴) محل اتصال کابل نورافکنی است که روی دستگاه آزمایش میلیکان (شکل ۲-۳) قرار دارد و روشنایی بین صفحات خازن را در حین آزمایش تأمین می‌کند.



شکل۴: واحد تأمین کننده الکتریکی

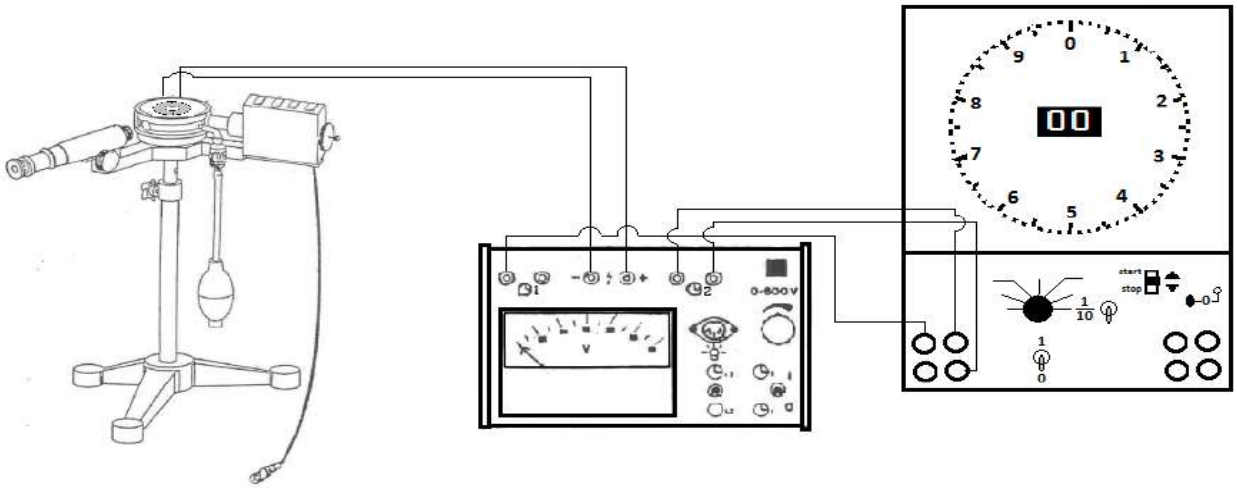
روی این واحد دو خروجی مربوط به منبع تغذیه‌ی تأمین کننده ولتاژ صفحات خازن وجود دارد (شکل ۲-۴). توسط دو سیم رابط دو سر منبع تغذیه DC را به صفحات خازن وصل کنید. توجه کنید که قطب منفی منبع به صفحه پایینی خازن و قطب مثبت آن به صفحه بالایی آن متصل شود. در اینصورت جهت میدان الکتریکی قائم رو به پایین خواهد بود و نیروی وارد بر بارهای منفی به سمت بالا خواهد بود.

دو جفت خروجی دیگر (۳-۴) و (۴-۴) محل اتصال زمان‌سنج‌ها است. دقت کنید که خروجی منبع تغذیه به اشتباه به زمان‌سنج‌ها متصل نشود. وقتی مطمئن شدید واحد تأمین کننده خاموش است و پیچ تنظیم ولتاژ (شکل ۵-۴) روی صفر است، مدار را مطابق شکل (۵) ببندید. پس از اطمینان از اینکه مدار صحیح بسته شده، واحد تأمین کننده‌ی الکتریکی را روشن کنید تا نورافکن روشن شود. حال از چشمی میکروسکوپ (شکل ۳-۳) به داخل دستگاه نگاه کنید. محور قائم مدرجی در چشمی قابل مشاهده است

[۲۷] فیزیک هالیدی - جلد اول- ویرایش دهم

که بوسیله‌ی آن مسافت طی شده توسط قطره‌ها را اندازه‌گیری می‌کنیم. فاصله خطوط در این محور مدرج برابر $\frac{1}{18.75}$ میلی‌متر است (کمی بیشتر از ۰/۰۵ میلی متر).

یک محفظه کوچک روغن در کنار محفظه خازن نصب شده که به یک تلمبه متصل است (شکل ۴-۳). این محفظه روغن در کنار ۲ سوراخ ریزی که روی محفظه‌ی خازن تعبیه شده، قرار دارد. با فشردن تلمبه، قطره‌های بسیار ریز روغن از راه این دو سوراخ کوچک وارد فضای بین دو خازن می‌شوند و چون این فضا توسط نورافکن روشن شده است، می‌توانید قطره‌های روغن را در چشمیِ میکروسکوپ مشاهده کنید.



شکل۵: طریقه صحیح بستن مدار

نکته قابل توجه اینجاست که این قطره‌های بسیار کوچک روغن هنگام اسپری شدن در اثر برخورد با الکترون‌ها و یون‌های آزاد موجود در فضای بین دو صفحه‌ی خازن باردار می‌شوند (ارجاع به پی‌نوشت ۲) که این بارها می‌توانند مثبت یا منفی و کم یا زیاد باشند.

وقتی پیچ ولتاژ روی صفر است و در واقع میدان الکتریکی وجود ندارد، قطره‌های روغن را مشاهده می‌کنید که در اثر نیروی وزنِشان در حال سقوط هستند (البته از آنجائیکه در چشمیِ میکروسکوپ همه چیز وارونه نمایش داده می‌شود، شما قطره‌های روغن را در حال بالا رفتن می‌بینید). در همین حال پیچ ولتاژ را بچرخانید و ولتاژی حدود ۲۰۰ ولت اعمال کنید. مشاهده می‌کنید که بعضی از قطره‌ها با سرعت بیشتری بالا می‌روند. این قطره‌ها دارای بار مثبت هستند و در جهت میدان سرعت می‌گیرند و با سرعت بیشتری سقوط می‌کنند. اما بعضی از قطره‌ها حرکتشان معکوس شده و شروع به پایین آمدن در چشمی می‌کنند که در واقع این قطره‌ها در حال صعود هستند. این قطره‌ها دارای بار منفی بوده و نیرویی خلاف جهت میدان الکتریکی به آنها وارد می‌شود. تعدادی از قطره‌ها هم در حالت معلق در فضا می‌مانند. برآیند نیروهای وارد بر این قطره‌ها در اثر اعمال نیروی الکتریکی از طرف میدان صفر شده و شناور بین دو صفحه مانده‌اند.

نکته: قطره‌هایی برای انجام آزمایش مناسب‌تر هستند که دارای بار کم بوده و تعداد انگشت‌شماری الکترون داشته باشند. لذا قطره‌هایی را انتخاب کنید که:

- در عدم وجود ولتاژ بسیار آهسته سقوط کنند (چون میکروسکوپ صحنه را معکوس نشان می‌دهد، حرکت قطره‌های سقوط کننده در چشمیِ میکروسکوپ در حال حرکت به سمت بالا دیده می‌شود).
- با اعمال ولتاژ زیاد (حدود ۴۰۰ ولت و بالاتر) بسیار آهسته صعود کنند (در چشمی میکروسکوپ به آهستگی به سمت پایین حرکت کنند).

پس از انتخاب قطره‌ی مناسب به ترتیب زیر آزمایش را انجام و داده‌های بدست آمده را یادداشت کنید:

ابتدا با تغییر ولتاژ بین صفحات خازن، قطره انتخاب شده را روی درجه مناسبی متوقف کرده و معلق نگهدارید. در این حالت محل قطره (x_1) و ولتاژی که قطره را معلق کرده (U) را یادداشت کنید. قبل از انجام مراحل بعدی یکبار زمان‌سنج را reset کنید تا مطمئن باشید زمان‌سنج عدد صفر را نشان می‌دهد. در حالی که از چشمی میکروسکوپ قطره مذکور را مشاهده می‌کنید، توسط کلیدِ روی واحد تأمین کننده (شکل ۶-۴) که ولتاژ را قطع و همزمان زمان‌سنج را به راه می‌اندازد، ولتاژ را قطع کنید و زمان‌سنج را به کار بیاندازید. چون ولتاژ قطع شده است، قطره شروع به سقوط می‌کند (در چشمی بالا می‌رود.). قطره را دنبال کنید تا به درجه مناسب دیگری برسد. در این لحظه کلید (۴-۶) را به حالت اولیه برگردانید تا قطره دوباره در مکان جدید ساکن شود. محل جدید قطره (x_2) و زمانی که زمان‌سنج نشان می‌دهد را یادداشت کنید. به این ترتیب با اطلاعاتی که در این قسمت بدست آورده‌اید (x_1 و x_2 و t) می‌توانید سرعت سقوط قطره را بدست آورید.

$$x = \frac{x_1 - x_2}{18.75} \times 10^{-3} \qquad (m)$$

($x_1 - x_2$) تعداد درجه‌هایی است که قطره روی محور قائم مدرج در چشمیِ میکروسکوپ طی کرده و x مسافت طی شده توسط قطره است.

به این ترتیب سرعت ذره (v_1) برابر است با: $v_1 = \frac{x}{t} \qquad (m/s)$

اطلاعات این قطره را در جدول (۱) ثبت کنید. قطره مناسب دیگری را انتخاب و همه مراحل را دوباره تکرار کرده و در جدول (۱) ثبت کنید. چنانچه در چشمی قطره روغن مشاهده نمی‌کنید، دوباره تلمبه روغن‌پاش را فشار دهید تا قطره‌های جدیدی داخل محفظه خازن پاشیده شوند و از بین قطره‌های روغن، دوباره قطره مناسب را انتخاب کنید.

برای تکمیل آزمایش حداقل ۱۰ قطره را مورد آزمایش قرار داده و جدول (۱) را کامل کنید.

جدول (۱):

$x_1 - x_2$ (m)	x (m)	t (S)	U (v)	v_1 (m/s)	r (m)	q (C)	n

۱) دمای محیط آزمایشگاه را توسط دماسنجی که در اختیار دارید، اندازه گرفته و با استفاده از نمودار شکل(۲)، ضریب چسبندگی مولکول‌های هوا ($\eta(T)$) را برای دمای آزمایشگاه پیدا کنید. این مقدار چقدر است؟

۲) با استفاده از مقدار η که در سؤال قبل پیدا کرده‌اید و بدون در نظر گرفتن تقریب رابطه (۸)، شعاع قطره‌ها را محاسبه کنید. آیا قطر قطره‌های روغن که برای اندازه‌گیری انتخاب کرده‌اید کوچکتر از پویش آزاد میانگین مولکول‌های هوا هستند؟

۳) با استفاده از مقادیر اندازه‌گیری شده جدول (۱)، سرعت قطره‌های روغن و بارالکتریکی آن‌ها را محاسبه کرده و در جدول(۱) ثبت کنید.

۴) با توجه به اینکه مقدار واقعی بار بنیادی را می‌دانیم ($e = 1.6 \times 10^{-19}\ \ (c)$) حساب کنید که روی هر قطره چه تعداد بار بنیادی وجود داشته؛ سپس جدولی تهیه کنید و میانگین بار الکتریکی گروهی از قطره‌ها که تعداد بار بنیادی آن‌ها (n) یکسان است را در یک ستون و تعداد آن گروه (تعداد قطره‌هایی که n یکسان داشتند) را در ستون دوم جدول وارد کنید.

جدول (۲):

n' تعداد قطره‌هایی که n یکسان دارند.	$\overline{q}$ میانگین بار الکتریکی قطره‌هایی که n یکسان دارند.	e اندازه بار بنیادی برای گروهی از قطره ها که n یکسان دارند.

۵) با رسم نمودار ستونی $\overline{q}$ بر حسب n، کوانتایی بودن بار قطره‌ها را نشان دهید.

۶) با استفاده از داده‌های جدول (۲) چگونه می‌توانید بار بنیادی (e) را اندازه‌گیری کنید؟

۷) برای هر گروه در جدول (۲) اندازه بار بنیادی را پیدا کرده و میانگین مقادیر e یافته شده را با مقدار واقعی آن مقایسه کنید. (محاسبه درصد خطای نسبی)

۸) علل اصلی وجود خطای نسبی در آزمایش چه بود؟

آزمایش ۱۳

تخلیه الکتریکی گازها

هدف آزمایش:

بررسی تخلیه الکتریکی هوا در لوله‌های تخلیه در فشارهای پایین

وسایل مورد نیاز:

لامپ تخلیه کروکس، پمپ تخلیه هوا، منبع تغذیه ولتاژ بالا، گیج خلأ و صلیب چهارراه، شیر فلکه‌ی ساچمه‌ای، سوپاپ ورودی هوا، گیره حلقه‌ای، واشر-گریس فشرده

تئوری آزمایش:

می‌دانیم که گازها در شرایط عادی معمولاً عایق هستند. جریان الکتریسیته با ولتاژ معمولی از گازها عبور نمی‌کند و حتی با ولتاژ خیلی زیاد هم وقتی که فاصله الکترودها زیاد باشد، از هوا یا گازهای دیگر عبور نخواهد کرد. در فشار معمولی برای عبور جریان الکتریسیته از گازی مانند هوا، ولتازی در حدود۳۰ هزارولت به ازای هر سانتی‌متر فاصله‌ی الکترودها لازم است ولی هرگاه فشار گاز درون لوله را کاهش دهیم تا به حدود ۰/۰۱ اتمسفر برسد، جریان الکتریسیته عبور خواهد کرد و بسته به نوع گاز رنگ خاصی نیز تولید می‌شود.

برای دانشمندان قرن هجدهم روشن شده بود که جرقه‌ی حاصل از یک ماشین الکتریکی با کاهش هوای احاطه کننده‌ی آن به نور ضعیفی در لوله منتهی می‌شود. یکی از مأمورین تحقیق این پدیده ویلیام داتسن بود که در سال ۱۷۵۰ یک تخلیه‌ی الکتریکی لومینسانس را بین دو میله‌ی برنجی که در دو انتهای یک لوله‌ی شیشه‌ای با طولی در حدود یک متر ایجاد نمود. در حدود اواسط قرن نوزدهم (۱۸۳۳) یک شیشه‌گر آلمانی بنام گیسلر توانست لامپ‌های تخلیه‌ی الکتریکی زیبایی را با استفاده از دیگر گازها غیر از هوا مثل آرگون و نئون بسازد. این لامپ‌ها در اشکال متنوع و رنگ‌های مختلف جهت تابلوها و اعلانات در تبلیغ بکار گرفته می‌شد.

لامپ گیسلر از یک لوله‌ی شیشه‌ای استوانه‌ای شکل به قطر ۴ تا ۵ سانتی‌متر و طول ۷۰ سانتی‌متر ساخته شده است. در وسط لامپ راهی برای تخلیه‌ی هوا یا گاز در نظر گرفته شده است. دو سر این لامپ بسته و دو الکترود دایره‌ای شکل از جنس آلومینیوم که به فاصله‌ی ۴۰ سانتی‌متر از یکدیگر قرار دارند، وجود دارد. این دو الکترود آند و کاتد لامپ هستند. حال اگر دو قطب لامپ را به یک ولتاژ چند هزار ولتی متصل کنیم، مشاهده می‌کنیم تا وقتی که فشار هوای داخل لامپ در حدود فشار جو است، تخلیه‌ی الکتریکی رخ نمی‌دهد. با کم کردن فشار هوای داخل لامپ به کمک یک پمپ تخلیه‌ی هوا در رساندن آن به ۴۰ میلی‌متر جیوه، باریکه‌ی نورانی کم‌رنگی (بنفش) در سراسر لامپ بوجود می‌آید که اگر تخلیه‌ی هوای داخل لامپ را ادامه دهیم، این باریکه‌ی بنفش‌رنگ پهن‌تر شده و کم‌کم به رنگ سرخ درمی‌آید. این ناحیه را ستون مثبت گوییم. همزمان مشاهده می‌شود که ستون مثبت مستقیم به آند ختم می‌شود. در حالیکه جلوی کاتد، فضای تاریکی و در روی خود کاتد یک لکه‌ی کوچک آبی‌رنگ تشکیل می‌شود. این لکه‌ی آبی‌رنگ به ترتیب بزرگتر شده و در فشاری برابر ۴ میلی‌مترجیوه تقریباً تمام سطح کاتد را با لایه‌ی نازکی می‌پوشاند. ستون مثبت تمام فضای داخل لامپ را اشغال می‌کند و فضای تاریک بین کاتد و ستون مثبت که آن‌را فضای تاریک فارادی می‌نامیم، هم عریض‌تر می‌شود. در فشاری برابر یک میلی‌مترجیوه رنگ ستون مثبت کم‌رنگ و پریده می‌شود. این ستون به لایه‌های قارچ مانند تاریک و روشن تبدیل می‌شود. فضای تاریک فارادی پهن‌تر شده و لایه‌ی آبی رنگ تمام سطح کاتد را می‌پوشاند و اگر بیشتر دقت کنیم، مشاهده می‌کنیم که بین این ستون منفی و کاتد فضای تاریک دیگری به نام فضای تاریک کروکس بوجود می‌آید. اگر فشار هوای

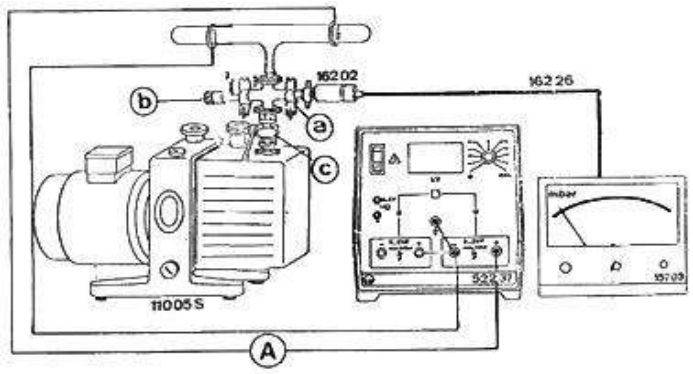
داخل لامپ را باز هم کمتر کنیم، در فشاری حدود ۰/۵ میلی‌متر جیوه ستون منفی در فضای تاریک فارادی نفوذ می‌کند در حالی‌که طول ستون مثبت لایه‌لایه کوچکتر و فاصله‌های لایه‌های تاریک و روشن بیشتر می‌شود و در روی کاتد، یک لایه‌ی نازک قرمز رنگ و در روی آند یک لایه‌ی نورانی ضعیف پدید می‌آید. با ادامه‌ی تخلیه‌ی ستون مثبت لایه‌دار به کلی ناپدید شده و ستون منفی جلوی کاتد تقریباً در تمام فضای داخل لامپ نفوذ می‌کند. در فشاری حدود ۰/۰۲ میلی‌مترجیوه این ستون هم به کلی ناپدید شده و فضای داخل لامپ تاریک می‌شود و در عوض جداره‌های لامپ و تمام فضای داخلی لامپ، مخصوصاً نزدیک کاتد با نور سبزرنگی تابش می‌کنند. نور سبزرنگ مرحله‌ی انتهایی نتیجه‌ی خاصیت فسفرسانسی شیشه و حاصل از تابش نامرئی کاتد است که توسط هیتروف و کروکس کشف گردید و به نام اشعه‌ی کاتدیک معروف است.

جدول (۱):

وضعیت لامپ	ولتاژ *(KV)*	فشار *(mbar)*
بدون تخلیه	۵	۱۰۱۳
برقراری رشته‌ی درخشان آبی- قرمز از کاتد تا آند	۲/۷	۳۰
رشته‌ی درخشان ضخیم‌تر شده (ستون مثبت) لکه‌ی نورانی ارغوانی کوچک روی کاتد ایجاد شده، یک ناحیه‌ی کوچک تاریک در روی کاتد بوجود آمده	۱/۱	۷
کاتد با پوششی نورانی کاملاً پوشده شده است. فضای تاریک بین کاتد و ستون مثبت از لحاظ اندازه افزایش می‌یابد.	۰/۷	۰/۸
ستون مثبت پریده رنگ می‌شود، مناطق روشن و لایه‌ها به طرف تاریکی می‌روند.	۰/۷	۰/۳۵
فضای تاریک بزرگ شده، نور در کاتد انتشار یافته، لایه‌های ستون مثبت افزایش یافته و از هم جدا می‌شوند.	۰/۷	۰/۲
اشکال قارچ مانند بوجود می‌آید، فضای تاریک افزایش می‌یابد.	۰/۸	۰/۱
ستون مثبت ناپدید می‌شود. نور تابان در کاتد انبساط می‌یابد.	۱/۹	۰/۰۶
نور تابان ناپدید می‌شود، پدیده‌ی فلورسانس در دو انتهای لامپ ایجاد می‌شود.	۵	۰/۰۳۵

نصب دستگاه:

دستگاه را همانطور که در شکل (۲) نشان داده است، نصب کنید. تمام رابط‌های مکانیکی لازم برای دستگاه تخلیه‌ی هوا (پمپ) را با یک قشر نازکی از گریس فشرده گریس‌کاری کنید. بدون فشار اضافی لامپ را روی پایه اتصال فشار دهید. سوپاپ ورودی هوا (a) و شیر سوپاپ (b) را ببندید.



شکل۱: اجزای آزمایش و طریقه صحیح بستن مدار

روش انجام آزمایش:

آزمایش را در اتاق تاریک انجام دهید. دستگاه تولید ولتاژ را روشن کنید و ولتاژ را روی ۵ کیلوولت قرار دهید. پمپ تخلیه را روشن کنید و شیر فلکه را باز کنید. در مدت زمانی که فشار در حال کاهش یافتن است، مراحل تخلیه‌ی الکتریکی را مشاهده کنید. روند این مراحل را می‌توانید با باز و بسته نمودن توسط سوپاپ (a) به ترتیب تند و کند کنید.

در هر مرحله از فشار گاز ولتاژ را یادداشت کنید و رنگ و شکل تغییرات داخل لامپ را توضیح دهید. آزمایش را در چند مرحله تکرار نمایید و یادداشت‌های خود را کامل کنید. پس از اتمام آزمایش شیر فلکه را ببندید و سوپاپ ورودی هوا را باز کنید تا لامپ تهویه شده و خلأ از بین برود. سپس پمپ را خاموش و شیر فلکه را باز کنید.

پرسش‌ها و نتایج:

۱) چه عاملی در شروع تخلیه‌ی الکتریکی موجب یونیزه شدن هوای درون لامپ می‌شود.

۲) علت پدیدار شدن فضای تاریک فارادی چیست؟

۳) ستون روشن منفی چیست و رنگ آن چگونه است؟

۴) ستون مثبت چیست؟ علت بوجود آمدن آن را توضیح دهید.

۵) علت تاریک و روشن شدن نواحی قارچ مانند چیست؟

۶) فضای تاریک کروکس چرا بوجود می‌آید؟

۷) تئوری فیزیکی لومینسانس چیست و علت لومینسانس شیشه در انتهای آزمایش را توضیح دهید.

آزمایش ۱۴

مشاهده‌ی فلوئورسانس و فسفرسانس تحت تابش اشعه‌ی ماورابنفش و لامپ صلیبی

هدف آزمایش:

تابش اشعه‌ی فرابنفش به ورقه فسفرسانس و فلوئورسانس و مشاهده‌ی اثر نیروی تابندگی، اثر اشعه‌ی مادون قرمز روی فسفرسانس

وسایل مورد نیاز:

لامپ لومینسانس، لامپ جیوه به همراه منبع تغذیه مخصوص، فیلتر اشعه‌ی فرابنفش، لامپ ۶ولتی به همراه ترانزیستور

تئوری آزمایش:

درون حباب لامپ لومینسانس سه نوع صفحه‌ی مختلف وجود دارد که با سه نوع لومینوفر[۲۸] پوشیده شده است (شکل۱). در این آزمایش اثر اشعه‌ی فرابنفش را بر لومینسانس مورد آزمایش قرار می‌دهیم.

- اگر تابش نورانی با قطع اشعه‌ی فرابنفش قطع گردد فلوئورسانس نامیده می‌شود.
- اگر با قطع اشعه‌ی فرابنفش (UV) تابش ادامه یابد، تابش را فسفرسانس می‌گوییم.

(a) تفنگ الکترونی: شامل کاتد از جنس تنگستن و آند استوانه‌ای

(a_1) محل اتصال فیلامان به منبع تغذیه

(a_2) فیش اتصال آند به منبع تغذیه

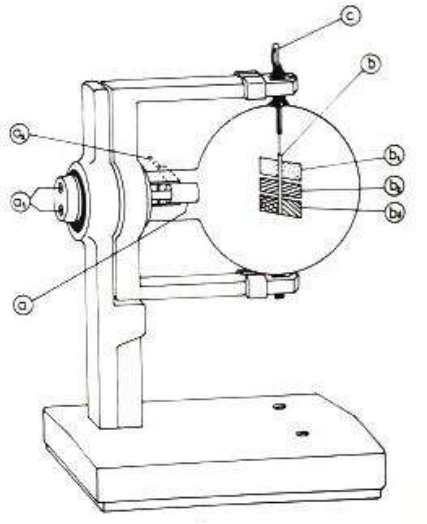
(b) صفحات پوشیده شده با لومینوفرهای مختلف

(b_1) فلوئورسانس آبی

(b_2) فسفرسانس قرمز

(b_3) فسفرسانس زرد-آبی (قسمت پشت نیمی از این صفحه توسط لایه‌ای از میکای تیره پوشیده شده است که مانع رسیدن تابش گرمایی به این قسمت از صفحه می‌شود.)

(C) فیش متصل به صفحات قسمت b

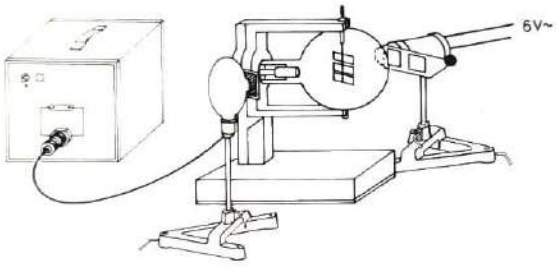


شکل۱: لامپ لومینسانس

روش آزمایش ۱:

وسایل را مطابق شکل (۲) نصب نموده و تنظیم کنید. (آزمایش را در اتاق تاریک انجام دهید.)

- ابتدا لامپ جیوه را که ناشر اشعه‌ی فرابنفش است، بوسیله‌ی کلید مخصوص منبع تغذیه روشن نمایید و اثر اشعه‌ی فرابنفش را روی صفحه‌ی شماره‌ی ۱ و ۲ و ۳ مشاهده نمایید.



شکل۲: چینش وسایل در آزمایش اول

[2] Luminophor

- لامپ جیوه را خاموش کنید و اثر آن را روی صفحات مشاهده کرده و مشاهدات خود را یادداشت کنید.
- مجدداً صفحه لومینسانس را با اشعه‌ی فرابنفش روشن کنید. بلافاصله لامپ روشنایی را طوری روشن کنید که نور آن به پشت پرده‌ی لومینسانس بتابد و رفتار صفحات فسفرسانس را مشاهده نموده و یادداشت کنید.
- لامپ روشنایی و لامپ جیوه را بطور همزمان خاموش کنید و تأثیر تابش حرارتی را روی صفحات فسفرسانس بطور همزمان مطالعه کنید.
- مرحله‌ی ۱ آزمایش را با قرار دادن فیلترها فرابنفش تکرار کنید و نتایج را مقایسه کنید.

پرسش‌ها و نتایج:

۱) با تاباندن اشعه‌ی فرابنفش بر لامپ لومینسانس رنگ صفحات ۱ و ۲ و ۳ را به ترتیب یادداشت کنید.

۲) پس از خاموش کردن لامپ جیوه، صفحات ۱ و ۲ و ۳ به چه صورت دیده می‌شوند با تعریفی که از فسفرسانس و فلوئورسانس داشتیم، توضیح دهید که کدام صفحه فسفرسانس و کدامیک فلوئورسانس است.

۳) اگر لامپ جیوه و لامپ روشنایی بطور همزمان بر پرده بتابند چه تغییر رنگی بر روی صفحات مشاهده می‌کنید.

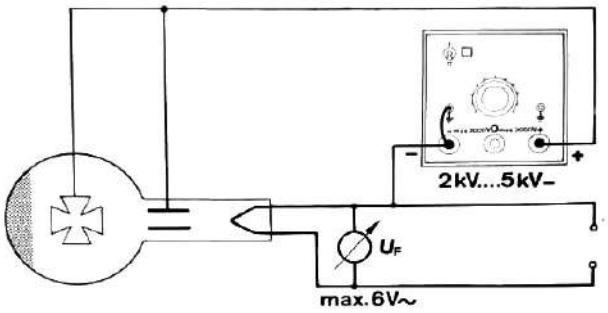
۴) بعد از خاموش نمودن لامپ جیوه و لامپ روشنایی چه تغییری در صفحات ایجاد می‌شود. نتایج این مرحله را با نتایج مرحله‌ی دوم مقایسه کنید و نتیجه‌گیری نمایید.

۵) با قراردادن فیلتر فرابنفش چه تغییر شکلی در پرده ظاهر می‌شود. علت را توضیح دهید.

۶) از نقطه‌نظر ساختمان اتمی در پدیده‌ی فلوئورسانس و فسفرسانس چه تغییری در ساختمان اتمی رخ می‌دهد؟

لامپ صلیبی:

لامپ صلیبی برای نشان دادن رفتار حرکت مستقیم‌الخط الکترون ساخته شده است. این لامپ تشکیل شده از یک تفنگ الکترونی است و یک پرده‌ی فلوئورسانس که می‌تواند وجود الکترون را نشان دهد و یک صفحه‌ی آلومینیومی صلیب‌گونه که بین تفنگ الکترونی و پرده‌ی فلوئورسانس قرار گرفته است.



شکل۳: چینش وسایل در آزمایش دوم

روش آزمایش۲: (بخش اول)

مدار آزمایش را مطابق شکل (۳) ببندید. توجه داشته باشید که می‌بایستی آند و صفحه‌ی صلیبی هم‌ولتاژ باشند. منبع مربوط به فیلامان را روشن کنید. سایه‌ی صفحه‌ی صلیبی را بر روی پرده‌ی فلوئورسانس مشاهده می‌کنید.

حالا منبع تغذیه‌ی ولتاژ بالا را روشن کنید و ولتاژ آند را افزایش دهید. مشاهده خواهید نمود که سایه‌ای مشابه سایه‌ای که نور مرئی ایجاد می‌کند توسط ذرات باردار بر روی پرده ظاهر می‌گردد. اطراف این سایه، اثر فلوئورسانسِ صفحه که در اثر برخورد الکترون‌ها به آن است مشاهده می‌شود.

روش آزمایش۲: (بخش دوم)

در حالی که هم فیلامان و هم منبع تغذیه روشن است و هر دو سایه منطبق برهم دیده می‌شود، با نزدیک کردن یک آهنربا به لامپ صلیبی اثر میدان مغناطیسی را بر سایه ایجاد شده ببندید. این اثر را می‌توانید بوسیله‌ی سیم‌پیچ‌های هلمهولتز که میدان مغناطیسی یکنواخت ایجاد می‌نمایند هم مشاهده کنید.

پرسش‌ها و نتایج:

۱) آیا تغییر مکانی که در سایه اتفاق می‌افتد، هم‌جهت با تغییر مکان آهنرباست؟

۲) از روی تغییر مکان سایه و با استفاده از قاعده‌ی دست راست چه نتیجه‌ای می‌گیرید؟

۳) مشاهدات خود را در این دو آزمایش بطور دقیق در گزارشکار بنویسید.