

فیزیک جدید آزمایش شماره ۲: اثرزیمان

تئوری:

اگر اتمی را در یک میدان مغناطیسی خارجی قرار دهیم، برهم کنش بین گشتاور مغناطیسی اتم و میدان مغناطیسی، ترازهای انرژی اتم را جابجا می‌کند و می‌شکافد. این امر به شکافتگی متناظر خطوط طیفی نور گسیلنده به وسیله‌ی اتم می‌انجامد. تمام خطوط طیفی به چند سایی‌ها شکافته می‌شود به این ترتیب علاوه بر ساختار تولید شده به وسیله‌ی میدان مغناطیسی داخلی اتم، اکنون به ساختار دیگری که میدان مغناطیسی خارجی اعمال شده بر اتم آن را ایجاد کرده است دست می‌یابیم به بیان دیگر:

«شکافتگی خطوط طیفی ناشی از اثر میدان مغناطیسی خارجی را اثرزیمان می‌گویند».

الکترون گردان در یک میدان مغناطیسی، یک حلقه‌ی جریان الکتریکی را تشکیل می‌دهد و می‌توان به آن یک گشتاور مغناطیسی μ نسبت داد.

گشتاور مغناطیسی μ در میدان مغناطیسی خارجی B را می‌توان با روابط زیر تعریف کرد:

$$\tau = \mu \times B, \Delta E_m = -\mu \cdot B$$

که در آن τ گشتاور نیروی مغناطیسی است که می‌خواهد μ را در امتداد میدان B قرار دهد و ΔE_m تغییر در انرژی پتانسیل مغناطیسی دوقطبی در میدان خارجی است.

$$\Delta E_m = -\mu B \cos \theta \quad \text{اگر زاویه بین } \mu \text{ و } B \text{ را } \theta \text{ در نظر بگیریم، داریم:}$$

وقتی که دوقطبی در امتداد میدان خارجی قرار دارد و θ صفر است، ΔE_m برابر یا $-\mu B$ است و Min مقدار را دارد و وقتی روی دو قطبی کار انجام می‌شود و آن را طوری می‌چرخانند که در خلاف جهت B واقع شود و $\theta = 180^\circ$ شود برای ΔE_m داریم μB و Max مقدار را دارد، و می‌دانیم در فیزیک کلاسیک کلیه‌ی جهت‌های دو قطبی بین 0° تا 180° قرار دارند و بنابراین تمام انرژی‌های بین $-\mu B$ و μB مجازند. بزرگی گشتاور نیروی مغناطیسی یک جریان الکتریکی I که در محیط یک حلقه در صفحه‌ای به مساحت A جریان دارد با رابطه زیر داده می‌شود:

$$\vec{\mu} = I\vec{A} \quad (1)$$

از طرفی داریم:

$$I = \frac{e}{T} = \frac{e}{\frac{2\pi r}{V}} = \frac{eV}{2\pi r} \quad (2)$$

$$\vec{\mu} = \frac{ev}{2\pi r} \vec{A} = \pi r^2 \frac{ev}{2\pi r} = \frac{evr}{2} = \frac{e}{2m} \vec{L} \quad (3)$$

T پریود حرکت مداری الکترون و v سرعت خطی دوران و r شعاع مدار می‌باشد.

$$l = \sqrt{l(l+1)}h \quad \text{و} \quad \cos \theta = \frac{ml}{\sqrt{l(l+1)}} \quad \text{و} \quad L_z = L \cos \theta \quad (4)$$

$$\mu_l = \frac{eh}{2m} \sqrt{l(l+1)} \quad \text{و} \quad L_z = m_l \hbar \quad (5)$$

و لذا برای ΔE_m بدست می آید:

$$\Delta E_m = \frac{eh}{2m} \sqrt{l(l+1)} B \cos \theta \quad (6)$$

$$\Delta E_m = m_l \frac{eh}{2m} B = m_l \mu_B B \quad (7)$$

و می دانیم که $\mu_B = \frac{eh}{2m}$ و مگنتون بوهر می باشد.

ΔE_m مستقل از l است.

با توجه به این رابطه متوجه می شویم که انرژی نمی تواند مقادیر پیوسته بگیرد (به دلیل وجود l) و این با کلاسیک ناسازگار است و در این رابطه θ زاویه بین L و B می باشد، از این رو هنگامی که اتم در میدان مغناطیسی خارجی قرار بگیرد، انرژی آن با زاویه θ بین L و B بستگی دارد. اگر هیچ محدودیتی برای زاویه θ وجود نمی داشت، در این صورت مولفه اندازه حرکت زاویه ای مداری، در جهت میدان مغناطیسی می توانست هر مقداری را بین مثبت و منفی $\sqrt{l(l+1)}h$ بگیرد

و لذا ΔE_m می توانست هر مقداری را بین مثبت و منفی $\frac{eh}{2m} \sqrt{l(l+1)} B$ بگیرد.

برای انرژی رابطه ای بدست آوردیم که عبارت است از:

$$\begin{aligned} \Delta E_m &= m_l \mu_B B \\ \Rightarrow E &= E_0 + m_l \mu_B B \end{aligned} \quad (8)$$

که در آن E_0 انرژی در حالت غیاب میدان مغناطیسی می باشد.

مثلاً اگر اتم در حالت P باشد ($l=1$)، این تراز اصلی با اعمال میدان مغناطیسی به ۳ زیر تراز هم فاصله تجزیه می شود و اختلاف در انرژی بین هر دو تراز میدان مغناطیسی مجاور برابر است با

$$\frac{eh}{2m} B \quad \text{به مطالب داخل پرانتز توجه کنید:}$$

(گذارهایی که برای آنها Δl برابر با $+1$ یا -1 است گذارهای مجاز نامیده می شوند.

پس قاعده گزینش برای گذارهای مجاز چنین است: $\Delta l = \pm 1$

تمامی دیگر گذارها، به گذارهای ممنوع موسوم اند. گذارهای ممنوع مطلقاً غیر ممکن نیستند بلکه احتمال وقوع آنها حداقل یک میلیون بار از احتمال متناظر در گذارهای مجاز، کوچکتر است).

$$\Delta m_l = \begin{cases} +1 \\ 0 \\ -1 \end{cases} \quad \text{چون } \Delta l = \pm 1 \text{ است لذا } \Delta m_l \text{ می باشد و داریم:}$$

برای انرژی‌های مجاز داریم:

$$\begin{aligned} E_0^{P+} - E_0^S &= \Delta E_0 + \frac{eh}{2m} B = \Delta E_0 + \frac{eh}{4\pi m} B \\ E_0^P - E_0^S &= \Delta E_0 \\ E_0^{P-} - E_0^S &= \Delta E_0 - \frac{eh}{2m} B = \Delta E_0 - \frac{eh}{4\pi m} B \end{aligned} \quad \hbar = \frac{h}{2\pi} \quad (9)$$

$$E = h\nu \rightarrow \text{و } E_0 = h\nu_0 \text{ می‌دانیم}$$

$$\begin{aligned} h\nu &= h\nu_0 + \frac{eh}{2m} B \quad \Rightarrow \quad \nu = \nu_0 + \frac{e}{4\pi m} B \\ h\nu &= h\nu_0 \quad \Rightarrow \quad \nu = \nu_0 \\ h\nu &= h\nu_0 - \frac{eh}{2m} B \quad \Rightarrow \quad \nu = \nu_0 - \frac{e}{4\pi m} B \end{aligned} \quad (10)$$

هدف ما در این آزمایش بدست آوردن $\frac{e}{m}$ می‌باشد و می‌توان از رابطه‌های زیر برای این کار استفاده کرد.

$$\begin{aligned} \Delta E &= h\Delta\nu, \quad \Delta w = 2\pi\hbar\Delta\nu \Rightarrow \Delta E = 2\pi\hbar\Delta\nu \\ \Delta\nu &= \frac{e}{m} \frac{B}{4\pi} \Rightarrow \frac{\Delta E}{2\pi\hbar} = \frac{e}{m} \frac{B}{4\pi} \end{aligned}$$

لذا داریم:

$$\frac{e}{m} = \frac{2\Delta E}{\hbar B} \quad (11)$$

روش دوم (روش آزمایشگاه):

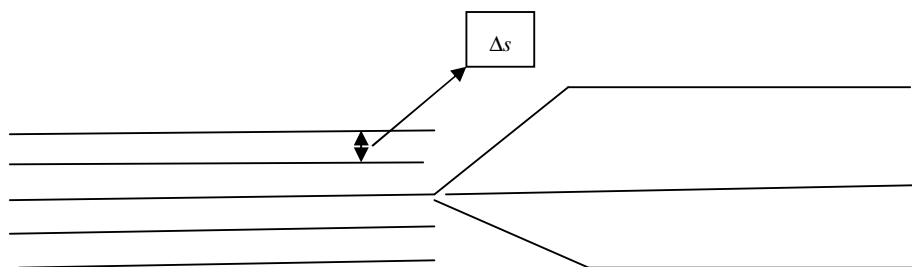
در این روش ابتدا تغییر طول موج اندازه‌گیری و سپس $\Delta\nu$ محاسبه می‌گردد و بعد از رابطه‌ی زیر، $\frac{e}{m}$ بدست می‌آید.

$$\Delta\nu = \frac{e}{m} \frac{B}{4\pi} \quad (12)$$

$$\Delta\lambda = \frac{\lambda^2}{2d} \frac{\sqrt{n^2 - 1}}{n^2 - 1} \cong \frac{2\lambda}{2d} \frac{\sqrt{n^2 - 1}}{n^2 - 1} \quad (13)$$

λ : طول موج نور قرمز کادمیم

در صورتی که تغییرات کوچکتر باشد در این صورت داریم:



$$d\lambda = \frac{ds}{\Delta s} \Delta\lambda$$

$$d\lambda = \frac{ds}{\Delta s} = \frac{\lambda^2 \sqrt{n^2 - 1}}{2d(n^2 - 1)} \quad (14)$$

n : ضریب شکست ورقه لومرگرکه

d : ضخامت ورقه لومرگرکه

Δs : فاصله‌ی بین دو خط تداخلی متوالی (بدون میدان)

ds : فاصله‌ی دو خط متوالی شکافته شده بعد از اعمال میدان مغناطیسی

ds و Δs توسط عدسی چشمی تلسکوپ تعیین می‌شود و مقادیر اینها را توسط ساعت میکرومتر قرائت می‌کنیم.

$$C = \lambda v \rightarrow \Delta C = \lambda \Delta v + v \Delta \lambda$$

$$\Delta v = -v \frac{\Delta \lambda}{\lambda} \rightarrow \Delta v = \left| \frac{c}{\lambda^2} \Delta \lambda \right|$$

$$\frac{e}{m} = \frac{4\pi}{B} \Delta v = \frac{4\pi}{B} \frac{c}{\lambda^2} \Delta \lambda \quad (15)$$

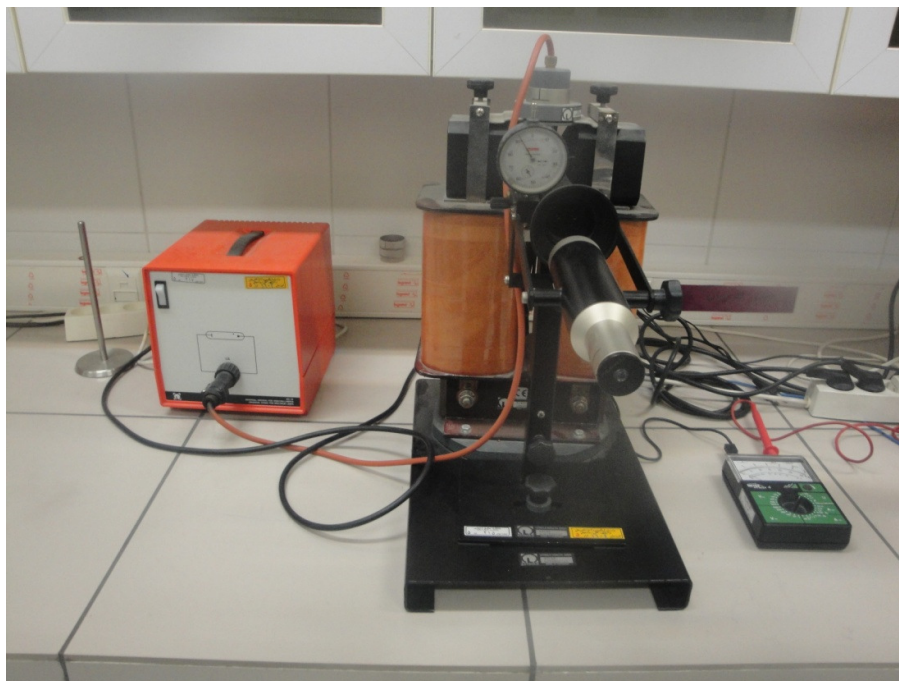
لذا برای $\frac{e}{m}$ بدست می‌آید:

$$\frac{e}{m} = \frac{4\pi c}{2d} \frac{\sqrt{n^2 - 1}}{n^2 - 1} \frac{1}{B} \frac{ds}{\Delta s}$$

$$A = \frac{4\pi c}{2d} \frac{\sqrt{n^2 - 1}}{n^2 - 1} = 4/41 \times 10^{11} \text{ ثابت}$$

در آخر داریم:

$$\frac{e}{m} = 4/41 \times 10^{11} \frac{1}{b} \frac{ds}{\Delta s} \quad (16)$$



وسایل لازم:

- ۱- صفحه‌ی لومرگرکه: تداخل سنجی است که در آن نور طی عبورش از تیغه متوازی السطوحی ضخیم دچار بازتابهای متعدد می‌شود از تداخل همین بازتاب‌های متعدد، آثار تداخلی به ظهور می‌رسد. این وسیله قدرت تفکیک بالایی در حدود 10^6 دارد.
- ۲- لامپ کادمیم: طراحی خاصی برای نشان دادن اثرزیمان دارد.
- ۳- آهن ربای الکتریکی برای نشان دادن اثرزیمان: شامل قطب‌ها و گیره است با هسته‌های آهنی که تا کناره‌های لامپ پیش آمده اند (جریان به کار رفته $20A$ می‌باشد).
- ۴- سیستم نوردهی برای مشاهده اثرزیمان: مرکب از یک صفحه لومرگرکه، نگهدارنده، تلسکوپ مشاهده و صفحه‌ی فلزی با پایه قابل گردش برای آهنربای الکتریکی است.
- ۵- تسلا متر: از دو قسمت متصل به هم به نام‌های Tangential-Probe و Compensation تشکیل شده است. در زمان اتصال این دو قسمت بهم و در پی تغییرات پی در پی میدان مغناطیسی که این تغییرات بین $0.1mT$ و $2T$ می‌باشد، یک سری اطلاعات عددی به ما می‌دهد. این دستگاه می‌تواند با جریان dc و هم با جریان AC کار کند. از این دستگاه می‌توان به عنوان یک خروجی تا $27(2)$ ولتاژ استفاده کرد.
- ۶- مولتی متر

۷- منبع تغذیه $12V/20A$: قدرت رساندن دستگاه از ۰ تا $12V$ می باشد و جریان به کار گرفته شده $20A$ است این منبع تغذیه می تواند به جای مخزن برق استفاده شود. برای مثال در آزمایش اثر هال برای میدان مغناطیسی قوی یا در ناحیه ی نیروی الکتریکی به کار می رود.

روش انجام آزمایش:

- ۱- دیافراگم را در جلوی دستگاه نوری قرار می دهیم و تلسکوپ را میزان می کنیم تا نورهای سبز آبی و قرمز به طور واضح در چشمی دیده شوند در این صورت خطوط پرنور سبز آبی جیوه همراه با آبی و سرخ جیوه در چشمه تلسکوپ ظاهر می شود.
- ۲- فیلتر سرخ را وارد کرده و محل صفحه لومرگرکه و تلسکوپ را طوری میزان می کنیم که نوارهای تداخلی سرخ به طور واضح مشاهده شوند. (توجه: در هر یک از موارد نباید صفحه ی لومرگرکه در داخل دستگاه نوری تکان بخورد زیرا در غیر این صورت به شدت صدمه خواهد دید و از عمل درست بازخواهد ماند) در هر بار کانونی کردن دقیق تنها برای سطح محدودی از نوار بینایی میسر می باشد و میزان کردن عدسی چشمی مرحله بینایی این کار است، وقتی تلسکوپ به سوی انتهای صفحه لومرگرکه متوجه است نوارهای نورانی به طور متقارن در بالای صفحه توزیع می شود و می تواند مطابق شکل آنها را از بالا به پایین این صفحه مشاهده کرد.

بدست آوردیم که:

$$d\lambda = \frac{ds}{\Delta s} = \frac{\lambda^2 \sqrt{n^2 - 1}}{2d(n^2 - 1)} \quad (14)$$

ds فاصله یکی از خطوط شکافته از موضع اولیه خطوط داخلی (با میدان) و Δs ، فاصله بین دو خط تداخلی (بدون میدان) باید توجه داشت که بعد از اینکه مقادیر B و I را مشخص کردیم، جریان سیم پیچ را قطع کنید لامپ کادمیم را در نگهدارنده آن قرار داده و روشن کنید. تقریباً پنج دقیقه صبر کنید تا خط طیفی قرمز کادمیم با شدت کافی تشعشع کند.

اندازه گیری الگوی خطی در حالت فقدان میدان مغناطیسی (ΔS):

تار ورتیکول (+) عدسی چشمی را روی خط دلخواهی منطبق کنید. ابتدا با جلو و عقب بردن تلسکوپ و با تنظیم چشمی آن خطوط افقی قرمز رنگ در میدان دید را به باریکترین حالت ممکن در آورید. سپس ساعت میکرومتر روی صفر تنظیم کنید (با چرخاندن پیچ واقع در انتهای زیرین

ساعت) سپس با چرخاندن پیچ واقع در انتهای زیرین ساعت میکرومتر، تار ورتیکول راروی خط بعدی منطبق کنید و آنگاه فاصله ی ΔS را از روی ساعت یادداشت کنید. این عمل را حداقل برای ۶ جفت خط تکرار کنید. برای اندازه گیری بهتر است که از خطوط میانی استفاده کنید.

حال برای اندازه گیری ds بعد از اعمال میدان مغناطیسی، یک خط را به دلخواه انتخاب کرده و پهنای آن را اندازه گیری کنید (توسط ساعت میکرومتر) سپس این اندازه را بر ۲ تقسیم کنید، عدد بدست آمده، ds می باشد. این عمل را حداقل برای ۶ خط طیفی تکرار کنید

حال به کمک رابطه ی گفته شده، $\frac{e}{m}$ را بدست آورید.

میدان مغناطیسی را تغییر داده و در هر بار تغییر، توسط سنسور، این میدان را اندازه گیری کنید و سپس جریان I را توسط آمپرسنج اندازه گیری کنید و اعداد را در جدول زیر یادداشت کنید:

ds	B	I	e/m

در مشاهده با تلسکوپ، شکافتگی خطوط تداخلی سرخ در $3A$ شروع به واضح شدن می کند مشاهده ابتدا بدون فیلتر قطبش و فقط به کمک دیافراگم صورت می گیرد شکافتگی خطوط با افزایش جریان افزایش می یابد.

$$\lambda = 643/\text{nm}$$

$$n = 1/4567$$

$$d = 4/04 \text{ mm}$$

$$c = 3 \times 10^8 \text{ m/s}$$

سوالات:

- ۱- رابطه بین شکافتگی خطوط طیفی و چگالی شار مغناطیسی چیست؟
- ۲- مقدار $\frac{e}{m}$ تجربی را با مقدار تئوری آن مقایسه کنید.
- ۳- اگر به جای میدان مغناطیسی از میدان الکتریکی استفاده کنیم چه روی می دهد؟
- ۴- مشاهده می شود که لامپ استفاده شده در آزمایش به رنگ آبی فیروزه ای می باشد اما در محاسبات در مورد طیف قرمز می باشد در این باره توضیح دهید.