

آزمایش ۴ فیزیک جدید: تشدید اسپین الکترون

تئوری:

دو دانشمند به نام‌های گود اسمیت و اوهلن بک اظهار داشتند که یک اندازه حرکت زاویه‌ای ذاتی، کاملاً مستقل از حرکت مداری، به هر الکترون وابسته است، این اندازه حرکت ذاتی، اسپین الکترون نامیده می‌شود، زیرا می‌توان آن را با اندازه حرکت ذاتی که هر جسم گسترده براساس دوران یا اسپین حول مرکز خود دارد. یادآور می‌شویم که یک جسم چرخان متقارن دارای اندازه حرکت زاویه‌ای اسپینی است، که در محاسبات مربوط به اندازه حرکت زاویه‌ای، مستقل از انتخاب محور است، به بیان دیگر اندازه حرکت زاویه‌ای یک جسم چرخان خاصیت ذاتی جسم است.

بهتر است الکترون را به عنوان جسمی که در فضا دارای گسترش است و به طور پیوسته حول یک محور به دور خود می‌چرخد فرض کنیم. در نتیجه اسپین الکترون، اندازه حرکت زاویه‌ای ذاتی L_s است که از دوران ابربار حول یک محور دوران ثابت (نسبت به الکترون) ناشی می‌شود. به علاوه، چون بار الکتریکی منفی در حال دوران فرض می‌شود، یک میدان مغناطیسی توسط الکترون چرخان تولید خواهد شد (یک گشتاور مغناطیسی μ_s را که در جهت خلاف اندازه حرکت زاویه‌ای اسپینی L_s است، می‌توان با اسپین الکترون نسبت داد.

میدان مغناطیسی داخلی اتم، میدانی است که ناشی از حرکت الکترون در روی مدار و به دور هسته است و این میدان است که باعث شکافتگی ترازهای اتمی در غیاب میدان مغناطیسی خارجی می‌شود (همان که از آن به عنوان اثر نابهنجار زیاد، داخلی زیمن یاد کردیم).

میدان مغناطیسی داخلی اتمی می‌تواند بر یک الکترون با اندازه حرکت زاویه‌ای اسپینی L_s و گشتاور مغناطیسی اسپینی μ_s اثر کند. گردش الکترون به دور هسته، میدان مغناطیسی داخلی را ایجاد می‌کند که بزرگی و جهت این میدان، به بزرگی و جهت اندازه حرکت زاویه‌ای مداری الکترون بستگی دارد. برهم کنش بین اسپین الکترون و اندازه حرکت زاویه‌ای مداری را، برهم کنش اسپین - مدار می‌نامند.

شکافتگی ساختار ریز ترازهای انرژی، که از برهم کنش اسپین - مدار ناشی می‌شود، باعث هدایت تجربی ساختار ریز در خطوط طیفی توافق کامل دارد. بنابراین در یک اتم دو سهم در اندازه حرکت زاویه‌ای کل وجود دارد. یکی اندازه حرکت زاویه‌ای مداری و دیگری اندازه حرکت زاویه‌ای اسپینی الکترون. نظریه کوانتومی که به درستی 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 $L_j = \sqrt{j(j+1)}\hbar$ به دست می‌آید. عدد j هریک از مقدار l یا s را می‌تواند بپذیرد که در آن l و s اعداد کوانتومی مداری و اسپینی‌اند.

مطالعه‌ی مفصل اثر زیمان برای اتم‌هایی که دارای ساختار ریرند و نیز تحلیل نظری نشان می‌دهد که نسبت ژيرو مغناطیسی وابسته به اسپین الکترون از رابطه‌ی زیر بدست می‌آید:

$$\frac{\mu_s}{L_s} = 2(1/0.01159615) \frac{e}{2m} = g_s \frac{e}{2m}$$

که در آن e بار و m جرم الکترون، g_s نسبت ژيرو مغناطیسی هستند. نسبت ژيرو مغناطیسی اسپین الکترون خیلی نزدیک به دو برابر نسبت ژيرو مغناطیسی متناظر حرکت مداری الکترون است که آن برابر بود با:

$$\frac{\mu}{L} = \frac{e}{2m}$$

یعنی برای یک اندازه حرکت زاویه‌ای معلوم، اثرهای مغناطیسی الکترون چرخان دو برابر اثرهای مغناطیسی الکترون مداری است.

تغییر انرژی پتانسیل مغناطیسی ΔE_s ، گشتاور مغناطیسی اسپین الکترون در میدان مغناطیسی B از

$$\Delta E_s = m_s \left(\frac{eh}{2m} \right) B \quad \text{رابطه‌ی مقابل بدست می‌آید:}$$

که در آن ΔE اختلاف انرژی بین دو حالت از رابطه‌ی زیر بدست می‌آید:

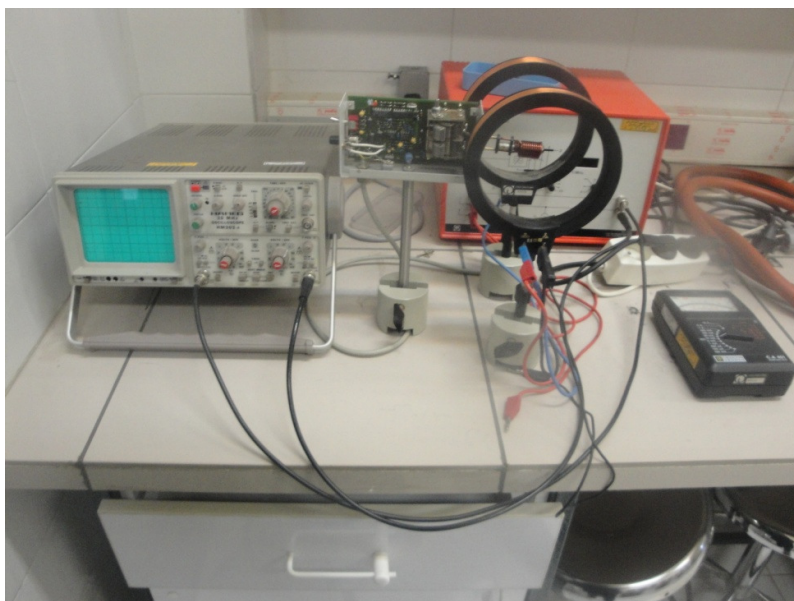
$$\Delta E = \hbar e \frac{\Delta \lambda}{\lambda} = 2\mu_B m_s B$$

که خیلی شبیه به رابطه‌ی تغییر انرژی برای حرکت مداری است.

کمیت $\frac{eh}{2m}$ دارای یکایک گشتاور مغناطیسی است این کمیت مگنتون بوهر β نامیده می‌شود، زیرا β گشتاور مغناطیسی یک الکترون کلاسیک است، که با شعاع اولین مدار بوهر به دور هسته‌ی هیدروژن دوران می‌کند.

$$\mu_\beta = \frac{eh}{2m} = 0.9273 \times 10^{-23} \text{ J/T}$$

برای اولین بار آقای رابی برای اندازه گیری گشتاور مغناطیسی هسته‌ای روش تشدید اسپین را ابداع کرد. طرحی از این آزمایش در شکل (۱) آمده است.



شکل (۱)

با استفاده از بسامد میدان نوسانی (بسامد تشدید) که منجر به کمینه‌ای در شدت باریکه‌ای رسیده به آشکارساز می‌شود، می‌توان گشتاور مغناطیسی ذرات را محاسبه کرد.

در یک سیستم اسپین الکترونی پارامغناطیس (نمونه‌ای از جنس DPPH) در سیم پیچ مدار تشدید فرکانس بالایی (در حین تشدید) به انرژی فرکانس بالا را در یک میدان DC جذب می‌کند، این پدیده به یک تغییر قابل اندازه‌گیری در امپدانس (مقاومت ظاهری) مدار تشدید منجر می‌گردد، با این روش تشدید می‌توان برخی مطالب را پیرامون اندازه حرکت زاویه ذاتی الکترون (اسپین)، گشتاور مغناطیسی، احتمالات تنظیم کمی اسپین (هم راستایی) در میدان مغناطیسی خارجی و تراز انرژی مربوطه بررسی نمود. به این منظور پلهایی بین ترازهای انرژی در میدانهای جریان متناوب با فرکانس بالا متناظر با دو حالت محتمل چرخش پایدار در میدان مغناطیسی خارجی برقرار می‌شوند. سپس نمونه‌ای آزمایشی در یک میدان مغناطیسی DC که به آن یک میدان مغناطیسی AC با فرکانس بالا اضافه می‌شود، قرار می‌گیرد.

در حین روی دادن تشدید انرژی فوتونهای تابش شده برابر با اختلاف انرژی دو وضعیت چرخش پایدار می‌باشد. انرژی فرکانس بالا جذب می‌شود، این انرژی در تغییر امپدانس مدار تشدید بازتاب می‌یابد. از طریق تعدیل میدان مغناطیسی DC، تغییراتی در مقاومت به صورت تناوبی در حین تشدید روی می‌دهد، و از این رو قابل نمایش بر روی اسیلوسکوپ می‌باشد.

صفحه‌ی انحراف قائم: ولتاژ متناسب با دامنه فرکانس بالا است. و صفحه‌ی انحراف افقی: ولتاژ متناسب با میدان‌های بوبین‌های هلم هولتز است. فرکانس تشدید f تابعی از شدت میدان B است، این رابطه به طور تجربی اثبات شده و سپس با نتایج تئوری بدست آمده است.

حال به توضیحاتی در رابطه با پیچه‌های هلم هولتز می‌پردازیم:

این دستگاه از دو پیچه مستدیر با شعاع‌های مساوی و محور مشترک تشکیل شده است. فاصله‌ی میان دو صفحه‌ی پیچه‌ها طوری انتخاب شده که مشتق دوم B در نقطه‌ی واقع بر محور و به فاصله‌ی مساوی از پیچه‌ها صفر شود.

همان طور که می‌دانیم میدان مغناطیسی p نقطه P پیچه‌های هلم هولتز به صورت زیر است:

$$B(z) = \frac{N \mu_0 I a^2}{2} \left\{ \frac{1}{(z^2 + a^2)^{\frac{3}{2}}} + \frac{1}{[(2b - z)^2 + a^2]^{\frac{3}{2}}} \right\}$$

که در آن N تعداد دورها، I شدت جریان، a شعاع پیچه‌ها، b فاصله‌ی بین دو پیچه و z فاصله‌ی دو امتداد محور حلقه در نقطه‌ی محاسبه‌ی میدان است.

انتخاب مناسب برای b یعنی فاصله‌ی میان پیچه‌ها به صورت زیر است و a شعاع هریک از پیچه‌ها می‌باشد:

$$2b = a$$

یعنی فاصله‌ی میان دو پیچه باید برابر با شعاع باشد. با این فاصله، میدان در نقطه‌ی وسط برابر

$$B(z) = \frac{\mu_0 N I}{a} \frac{1}{\delta^{\frac{3}{2}}} \quad \text{است با:}$$

می‌دانیم رابطه‌ی بین L_S و گشتاور مغناطیسی μ_S الکترون به صورت زیر است:

$$\vec{\mu}_S = \frac{g_S \mu_B}{h} L_S \quad \text{که } \mu_B \text{ همان } \beta \text{ یعنی مگنتون بوهر می‌باشد و}$$

که مگنتون بوهر بیانگر واحد ساختاری گشتاور مغناطیسی اتمی می‌باشد.

g_S یک مشخصه‌ی کمی الکترون است و عبارتست از نسبت گشتاورهای مغناطیسی به تکانه‌ی

زاویه‌ای در واحدهای اتمی مربوطه است. و در واقع g_S ثابت ژيرو مغناطیسی می‌باشد و مقدار آن

$$g_S = 2.00232 \quad \text{برابر است با:}$$

$$g_S = \frac{\mu_S \mu_B^{-1}}{L_S h^{-1}}$$

و فاکتور g چرخش الکترونی نامیده می‌شود.

هدف ما در این آزمایش بدست آوردن ثابت ژیرومغناطیسی g_s برای ۳ سیم پیچ (با دوره‌های مختلف) و نیز بدست آوردن فرکانس تشدید است.

وسایل و دستگاه‌ها:

۱- واحد اصلی (ESR) مشخصات دستگاه:

الف- تولید قدرت 175ma-127

ب- تغییرات فرکانس هر سیم پیچ: تقریباً 30-13، تقریباً 75-30، تقریباً 130-75

۲- زوج حلقه‌های هلم هولتز: در تولید میدان‌های مغناطیسی ثابت مورد استفاده قرار می‌گیرد که انحراف الکترون‌ها را نشان می‌دهد. سیگنال حاصل از حلقه‌های هلم هولتز برای صفحه‌ی اسیلوسکوپ، سیگنال X است، که با تغییر مکان پیچه‌ها شکل آن قابل تغییر است. مشخصات حلقه‌ها به صورت زیر است:

الف) تعداد دوره‌های هر حلقه ۳۲۰ دور

ب) ماکزیمم تعداد جریان پیوسته ۱/۵ آمپر

ج) ماکزیمم مقدار جریان متغیر ۲ آمپر

د) قطر میانگین ۱۳/۵ سانتی متر

۳- اسیلوسکوپ دو کاناله: ۱ دستگاه

۴- کابل و سوکت (دو عدد) و سیم‌های رابط

۵- واحد کنترل (ESR)، یک دستگاه

فرکانس پالس‌های فرستاده شده از دستگاه واحد اصلی ESR به دستگاه واحد کنترل ESR به صورت عدد بر روی دستگاه واحد کنترل نشان داده می‌شود که سیگنال حاصل از این دستگاه به صورت عدد بر روی دستگاه واحد کنترل نشان داده می‌شود که سیگنال حاصل از این دستگاه بر روی اسیلوسکوپ g است. تغییرات فرکانس باعث تغییر این سیگنال می‌شود که در صفحه‌ی اسیلوسکوپ قابل مشاهده است.

مشخصات دستگاه:

الف) تولید قدرت برای منبع ولتاژ میدان مغناطیسی dc ۱۵-۰ ولت و ac ۵-۰ ولت

ب) ماکزیمم مقدار جریان ۳ آمپر (محافظت از دستگاه را فراموش نکنید).

ج) تغییر فاز ۹۰-۰

د) فرکانس نمایش داده شده بر روی واحد کنترل برحسب مگاهرتز می‌باشد.

۶- دستگاه‌های اندازه‌گیری D با محدوده اندازه‌گیری ۳ آمپر

۷- سیم‌های رابط ۵۰ و ۲۵ سانتی متر

۸- سیم پیچ با اتصال دوشاخه با دورهای متفاوت

۹- نمونه‌ای از جنس DPPH

ویژگی ساختاری DPPH:

توضیحات تکمیلی:

منبع اصلی، ۳ کار اساسی انجام می‌دهد:

۱- ایجاد جریان dc در پیچه‌های هلم هولتز

۲- تولید جریان AC در خازن و القاگر

۳- تقویت کردن موجی که از خازن و القاگر به این منبع برگشته و از آنجا به اسپلوسکوپ

می‌رود.

منبع اصلی جریان dc را در پیچه‌ها به وجود می‌آورد و می‌دانیم زمانی که جریان از سیم پیچ عبور کند، در آن میدان مغناطیسی تولید می‌شود. این جریان dc، ثابت بوده و لذا میدان مغناطیسی ثابتی را بین پیچه‌های هلم هولتز برقرار می‌کنند.

میدان مغناطیسی تولید شده در این پیچه‌ها هم جهت بوده و همدیگر را تقویت می‌کنند و چون این پیچه‌ها به طور موازی باهم بسته شده‌اند، لذا جریانی را که از آوومتر می‌خوانید (جریان I که dc بوده و ثابت می‌باشد) باید بر ۲ تقسیم کنید تا جریان یکی از پیچه‌ها بدست آید. از طرفی منبع اصلی جریانی را به خازن و القاگر هم می‌دهد و این جریان AC بوده و متغیر می‌باشد و لذا میدان مغناطیسی متغیری در خازن و القاگر به وجود می‌آید.

(جریان متغیر را با I' نشان می‌دهیم).

وقتی در یک محیط میدان مغناطیسی متغیر داشته باشیم، برای به وجود آوردن این میدان نیاز به یک جریان داریم، حال برای تولید جریان، نمی‌توان جریان را آفاً از صفر به جریان دلخواه I' رساند، بلکه جریان کم کم از صفر به I' می‌رسد. لذا I' متغیر می‌باشد. از طرفی می‌دانیم که جریان متغیر با زمان، میدان مغناطیسی متغیر با زمان تولید می‌کند و طبق رابطه $\phi = BA \cos \theta$ ، یعنی شار، در حال تغییر می‌باشد و می‌دانیم طبق قانون القای فاراده تغییرات شار سبب ایجاد نیروی محرکه در مدار می‌شود. حال برای مقابله با این نیروی محرکه، انرژی مصرف می‌شود و این انرژی در میدان مغناطیسی متغیر ذخیره می‌شود. (میدان ایجاد شده در خازن و القاگر). خازن و القاگر که خاصیت آنها ذخیره کردن انرژی است، این انرژی را از میدان مغناطیسی متغیر جذب می‌کنند و این انرژی ذخیره شده در خازن و القاگر متقابلاً روی الکترون‌های ماده داخل القاگر اثر می‌گذارد و در واقع انرژی به این ماده منتقل می‌شود. از طرفی مجموعه‌ی خازن و القاگر و ماده داخل القاگر، در یک

میدان dc ثابت حاصل از پیچ‌های هلم هولتز قرار دارند، لذا این مجموعه یعنی خازن و القاگر و ماده‌ی داخل آن، هم از میدان dc و هم از میدان متغیر خازن و القاگر، انرژی جذب می‌کنند. از طریق خازن و القاگر و مقاومت می‌توان فرکانس میدان مغناطیسی متغیر را تغییر داد. با تغییر این فرکانس، طی یک فرکانس خاصی (فرکانس تشدید)، ماده‌ی داخل القاگر (که دارای الکترون‌های آزاد بوده که پیوند ضعیفی با هسته دارند و یک ماده‌ی آلی می‌باشد) بیشینه انرژی را از میدان مغناطیسی ثابت و متغیر جذب می‌کند در این هنگام میدان مغناطیسی متغیر با وارد کردن گشتاور مغناطیسی τ ، سعی می‌کند تا گشتاور مغناطیسی μ الکترون‌ها را در امتداد میدان مغناطیسی متغیر قرار دهد و الکترون‌ها را وادار می‌کند تا همگی در یک راستا بچرخند و این نیرویی است که بر روی اسپین‌ها اثر می‌کند و باعث می‌شود که الکترون‌ها، بیشینه انرژی را از میدان بیرونی جذب کنند (در حالت تشدید) و حالت تشدید پیش می‌آید و یک هم راستایی برای گشتاور مغناطیسی الکترون‌ها و در واقع اسپین الکترون‌ها پدید می‌آید. پس می‌توان گفت که فرکانس تشدید، فرکانسی است که طی آن ماده‌ی داخل پیچه، بیشینه انرژی را از دو میدان AC و dc جذب می‌کند. پس از اینکه هم راستایی برای الکترون‌ها بوجود آمد در این صورت الکترون‌ها روی مدار خاصی به حرکت در می‌آیند (قبلاً روی مدارهای مختلف در حرکت بودند) و به چرخش پایدار می‌رسند.

تنظیم دستگاه آزمایش (روش کار)

ابتدا منبع اصلی را روشن می‌کنیم سپس ماده‌ی مغناطیسی (پارا مغناطیسی) را داخل یکی از سیم پیچ‌ها قرار داده و سیم پیچ را در جای مخصوص آن قرار می‌دهیم. سپس اسیلوسکوپ را روشن می‌کنیم و موج حاصل از نور منبع و موج حاصل از خازن و القاگر را روی آن مشاهده می‌کنیم (فاصله‌ی پیچ‌های هلم هولتز بهتر است به اندازه‌ی ۲ برابر شعاع آنها باشد). اما برای افزایش میدان dc میان پیچ‌های هلم هولتز، می‌توان فاصله‌ی آنها را از هم تغییر داد. با تنظیم صفحات خازن و تنظیم دامنه‌ی موج‌های اصلی و دامنه‌ی موج حاصل از خازن و القاگر و تغییر فاز، ۲ موج را روی هم منطبق می‌کنیم و در این حال فرکانس و جریان I را یادداشت کرده و میدان B را بدست می‌آوریم و سپس از طریق رابطه‌ی گفته شده در تئوری، g_s را بدست می‌آوریم. این کار را برای پیچه‌هایی با تعداد دورهای مختلف تکرار می‌کنیم و هربار g_s را بدست می‌آوریم. با افزایش تعداد دورهای سیم پیچ، چون L یعنی خودالقایی سیم پیچ در حال افزایش است لذا ω یعنی فرکانس تشدید در حال کاهش است (طبق رابطه‌ی $\omega = \frac{1}{\sqrt{LC}}$) و چون ω با فرکانس f ، رابطه‌ی مستقیم دارد که می‌دانیم $\omega = 2\pi f$ ، لذا f نیز کاهش می‌یابد. اما با افزایش تعداد دورهای

سیم پیچ، جریان I' افزایش می یابد چون B در حال افزایش است و می دانیم $B \times I'$ میدان AC مغناطیسی در هر فاز ۲ بار از حالت تشدید عبور می کند و نیز به همین دلیل بین ولتاژهایی که روی صفحه ی اسیلوسکوپ نشان داده می شوند، افت فاز وجود دارد.

روابط مورد نیاز برای این آزمایش:

$$B = \frac{N \mu_0 a^2 I}{2} \left\{ \frac{1}{(z^2 + a^2)^{\frac{3}{2}}} + \frac{1}{(z'^2 + a^2)^{\frac{3}{2}}} \right\}$$

z : فاصله ی نقطه مورد نظر که می خواهیم میدان پیچه ها را در آنجا محاسبه کنیم از مرکز پیچه اول.

z' : فاصله ی نقطه مورد نظر که می خواهیم میدان پیچه ها را در آنجا محاسبه کنیم از مرکز پیچه دوم. که در این آزمایش گفتیم که بهتر است z و z' هر دو برابر با a باشند.

$$B = \frac{N \mu_0 I a^2}{2} \left(\frac{1}{2^{\frac{3}{2}} a^3} \right) = \frac{N \mu_0 I}{\sqrt{(2)^3} a} \quad \text{لذا برای } B \text{ بدست می آید:}$$

$$B = \frac{N \mu_0 I}{\sqrt{(2)^3} a}$$

$$\mu_0 = 1/2566 \times 10^{-6}$$

$$a = 6/8 \text{ cm شعاع پیچه}$$

$$h = 6/63 \times 10^{-34} \text{ ثابت پلانک}$$

$$\mu_B = 9/274 \times 10^{-24} \text{ (ولت.ثانیه/آمپر) مگنتونبوهر}$$

$$N = 320 \text{ دور تعداد دورهای سیم پیچ}$$

$$F \text{ فرکانس تشدید}$$

$$g_s = \frac{hf}{\mu_B B}$$

$$g_s \pm \Delta g_s \text{ را برای هر سیم پیچ به طور جداگانه محاسبه کنید.}$$

سوالات:

- چرا در این آزمایش برای بدست آوردن فرکانس تشدید باید دو موج AC را که یکی مستقیماً از منبع اصلی به اسیلوسکوپ می رود و هیچ نقشی روی الکترون های ماده پارامغناطیس ندارد را روی موجی که از منبع به خازن والتاگر رفته و روی ماده اثر می گذارد و سپس به اسیلوسکوپ می رود، منطبق کنیم؟

- چرا در فرکانس تشدید بیشینه انرژی توسط ماده ی پارامغناطیس جذب می شود؟

۳- مقدار عددی g_s را محاسبه کنید.

۴- خطای مربوط به g_s را بدست آورید.

۵- جدول زیر را کامل کنید.

F فرکانس (Hz)	
I جریان (A)	
g_s	
B	