

فیزیک الکتریسیته و مغناطیس

فصل یازدهم: ویژگی های مغناطیسی مواد

حسین شناور

گروه فیزیک، دانشکده علوم



دانشگاه هرمزگان

- این مجموعه درس در ایام همه گیری کرونا در بهار سال ۱۴۰۰ و با سرعتی بیش از حد معمول تهیه شده است؛ بنابراین، امکان وجود اشتباهات در این ارائه وجود دارد.
- خواهشمندم هرگونه اشتباه نوشتاری، مفهومی و یا محاسباتی را به آدرس ایمیل من ارسال کنید تا در ویرایش های بعدی تصحیحات لازم اعمال شوند:

h.shenavar@gmail.com

فصل یازدهم: ویژگی های مغناطیسی مواد

- دوقطبی مغناطیسی و اثر میدان مغناطیسی بر آن
- مواد مغناطیسی

یادآوری قوانین ماکسول (در فضای تهی)

$$\oint_S \mathbf{E} \cdot d\mathbf{A} = \frac{Q}{\epsilon_0}$$

Gauss's law

$$\oint_S \mathbf{B} \cdot d\mathbf{A} = 0$$

Gauss's law in magnetism

$$\oint \mathbf{E} \cdot d\mathbf{s} = -\frac{d\Phi_B}{dt}$$

Faraday's law

$$\oint \mathbf{B} \cdot d\mathbf{s} = \mu_0 I + \epsilon_0 \mu_0 \frac{d\Phi_E}{dt}$$

Ampère–Maxwell law

شکل از مبانی فیزیک.

دسته معادلات بالا به قوانین الکترومغناطیس ماکسول مشهور هستند. این معادلات (به علاوه نیروی لورنتز و نسبیت خاص) اساس توصیف فرایندهای الکترومغناطیسی هستند و طیف بسیار گسترده ای از پدیده های را توصیف می کنند. در واقع معادلات ماکسول در توصیف تمام پدیده های روزمره، علمی و فنی (به جز گرانش) سهم دارند. این معادلات، در ریز مقیاس، فیزیک ذرات تشکیل دهنده ماده را به دقت پیش بینی کرده و در بزرگ مقیاس تابش زمینه کیهانی و توزیع ماده در جهان را به دست می دهند.

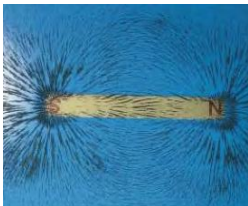
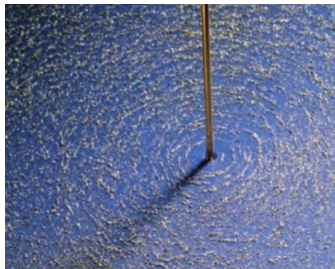
دو روش برای تولید میدان مغناطیسی وجود دارد.

جریان الکتریکی در اطراف خود میدان مغناطیسی به وجود می آورد. برای توضیحات مربوطه به فصل های هشت و نه رجوع کنید.

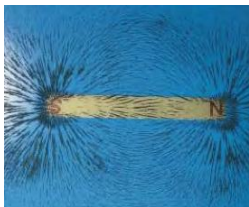
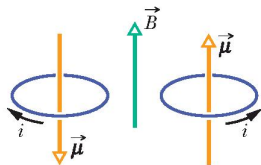
برخی مواد دارای خاصیت ذاتی (مربوط به ساختار اتمی-مولکولی خود) هستند و می توانند در اطراف خود میدان مغناطیسی ایجاد کنند. در این درس می خواهیم در این زمینه بیشتر بحث کنیم.

سوال امروز: مواد مغناطیسی کدام مواد هستند و چه ویژگی های دارند؟

شکل ها از مبانی فیزیک.



دوقطبی مغناطیسی



شکل از مبانی فیزیک هالیدی .

تک قطبی مغناطیسی (بار مغناطیسی) وجود ندارد. این نکته را از قانون گوس در مغناطیس فراگرفته ایم

$$\oint \vec{B} \cdot d\vec{A} = 0 \Rightarrow q_m = 0$$

حرکت بار الکتریکی باعث بوجود آمدن میدان مغناطیسی می شود (این نکته یکی از اصلی ترین نتایج نظریه نسبیت خاص اینشتین است).

برای توصیف پدیده های مغناطیسی می توانیم از مفهوم دوقطبی مغناطیسی استفاده کنیم: یک آهنربای میله ای که شامل دو قطب مغناطیسی است، و یا یک حلقه بسته جریان را، دو قطبی مغناطیسی می نامند. شکل های روبرو را ببینید.

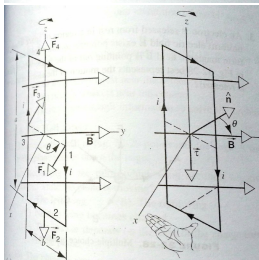
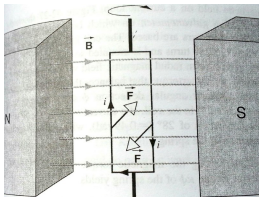
گشتاور (ممان) یک دو قطبی مغناطیسی را به صورت حاصلضرب جریان حلقه در مساحت آن تعریف می کنیم. اگر حلقه شامل N دور باشد، آنگاه گشتاور دوقطبی مغناطیسی N برابر می شود:

$$\vec{\mu} = Ni\vec{A}$$

بنابراین راستا و جهت بردار گشتاور دوقطبی مغناطیسی توسط بردار مساحت تعریف میشود (قانون دست راست). این نکته را در اسلایدهای بعد توضیح خواهیم داد.

برای درک چگونگی رفتار یک دوقطبی مغناطیسی در میدان خارجی، اثر میدان مغناطیسی خارجی بر یک حلقه جریان (ساده ترین نوع دوقطبی مغناطیسی) را از فصل هشت مرور میکنیم.

یادآوری از فصل هشتم: گشتاور وارد بر حلقه جریان به عنوان یک دوقطبی مغناطیسی



شکل ها از فیزیک هالیدی.

اعمال نیرو به قطعات یک حلقه می تواند باعث دوران حلقه شود. برای توصیف این دوران لازم است گشتاور وارد بر قطعات حلقه را حساب کنیم $\downarrow\downarrow\downarrow$.

یادآوری گشتاور (فصل ده فیزیک مکانیک): $\vec{\tau} = \vec{r} \times \vec{F}$

به قطعات ۲ و ۴ حلقه نیرویی برابر با

$$F_4 = F_2 = ibB \sin(\theta \pm \pi/2) = ibB \cos \theta$$

وارد می شود. هرچند، این قطعات هیچ سهمی در گشتاور ندارند زیرا نیروی وارده از طرف آنها به محور دوران وارد می شود.

به قطعات ۱ و ۳ حلقه نیرویی برابر با

$$F_1 = F_3 = iaB \sin \pi/2 = iaB$$

وارد می شود. گشتاور وارد بر این قطعات برابر است با

$$\tau_1 = \tau_3 = F_1 \frac{b}{2} \sin \theta$$

که البته هم جهت هم هستند. بنابراین گشتاور کل برابر است با

$$\tau = \tau_1 + \tau_3 = 2F_1 \frac{b}{2} \sin \theta = 2(ab) B \sin \theta$$

در حالت کلی، اگر مساحت حلقه بسته ای برابر A باشد و حلقه شامل N دور سیم باشد، آنگاه می توان ثابت کرد که گشتاور مغناطیسی وارد بر این حلقه برابر است با

$$\vec{\tau} = N i \vec{A} \times \vec{B}$$

یادآوری از فصل هشتم: گشتاور (ممان) دوقطبی مغناطیسی



Small bar magnet	5 J/T
Earth	8.0×10^{22} J/T
Proton	1.4×10^{-26} J/T
Electron	9.3×10^{-24} J/T

شکل از مبانی فیزیک هالیدی.

قرارداد مربوط به جهت بردار مساحت $\vec{A}$: راستای $\vec{A}$ عمود بر صفحه حلقه جریان است. برای تعیین جهت بردار $\vec{A}$ ، انگشتان دست راست را در جهت جریان قرار دهید؛ در این صورت جهت انگشت شست جهت بردار $\vec{A}$ را نشان می دهد.

گشتاور (ممان) دو قطبی مغناطیسی: کمیت

$$\vec{\mu} = Ni\vec{A}$$

در بسیاری از روابط مغناطیس وارد می شود. این کمیت را ممان دو قطبی مغناطیسی می نامند. ناگفته پیداست که $\vec{\mu}$ همجهت با $\vec{A}$ می باشد.

با استفاده از مفهوم ممان دو قطبی مغناطیسی، می توان گشتاور مغناطیسی وارد بر هر حلقه را به صورت

$$\vec{\tau} = \vec{\mu} \times \vec{B}$$

نوشت که جهت آن با استفاده از قاعده دست راست معلوم می شود.

می توان به حلقه درون میدان مغناطیسی یک انرژی پتانسیل وابسته کرد. با جمع بستن (انتگرال گیری) کارهای دیفرانسیلی وابسته به این حلقه در دوران آن، یعنی $dW = \vec{\tau} \cdot d\vec{\theta}$ ، انرژی پتانسیل کل به صورت

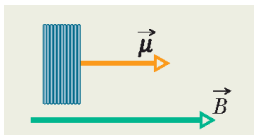
$$U(\theta) = -\vec{\mu} \cdot \vec{B}$$

به دست می آید. برای مرور مفاهیم کار، کار دیفرانسیلی، انرژی پتانسیل و ... به فصل های هفتم و هشتم فیزیک مکانیک مراجعه کنید. واحد گشتاور دو قطبی مغناطیسی در آحاد بین المللی J/T می باشد. مقادیر نوعی گشتاور دوقطبی مغناطیسی برای چند دوقطبی را در جدول مقابل ملاحظه می کنید.

به تناظر رابطه بالا و انرژی پتانسیل یک دوقطبی الکتریکی (فصل دوم) دقت کنید:

$$U(\theta) = -\vec{p} \cdot \vec{E}$$

مثال



شکل مقابل، مقطع جانبی یک سیم پیچ با 25° دور سیم و مساحتی برابر $A = 2.52 \times 10^{-4} m^2$ را نشان می دهد. جریانی برابر $i = 100 mA$ در سیم پیچ وجود دارد و سیم پیچ در حالت سکون است. همچنین میدان مغناطیسی خارجی $B = 0.85 T$ وجود داشته و در ابتدا جهت گشتاور دوقطبی مغناطیسی سیم پیچ هم جهت با میدان است. الف) جهت جریان درون سیم پیچ چگونه است؟ ب) یک نیروی خارجی چقدر گشتاور بر سیم پیچ باید وارد کند تا سیم پیچ 90° درجه بچرخد و دوباره به حالت سکون برسد؟

پاسخ الف) فرض کنید که سیم پیچ را با دست راست در دست گرفته اید به صورتی که جهت انگشت شست شما به سمت بردار μ می باشد. در این حالت واضح است که جهت انگشتان دیگر دست راست، جهت جریان را نشان می دهد. بنابراین جهت جریان در بالای سیم پیچ برون سوست و در پایین سیم پیچ درون سوست.

پاسخ ب) از آنجا که سیم پیچ در ابتدا و انتها در حال سکون است، از قضیه پایستگی انرژی نتیجه می گیریم که کار انجام شده توسط نیروی خارجی باید برابر با تغییر در انرژی پتانسیل سیم پیچ در میدان باشد:

$$\begin{aligned} W_{ext} &= E_2 - E_1 = \cancel{K_2} + U_2 - (\cancel{K_1} + U_1) = \\ &= U(\theta = \pi/2) - U(\theta = 0) = -\mu B \cos \pi/2 - (-\mu B \cos 0) = +\mu B \\ &= (NiA)B = (250)(100 \times 10^{-6} A)(2.52 \times 10^{-4} m^2)(0.85 T) = 5.4 \times 10^{-6} J \end{aligned}$$

بنابراین $5.4 \mu J$ انرژی لازم داریم تا این سیم پیچ را به اندازه 90° درجه بچرخانیم.

شکل از مبانی فیزیک هالیدی.

رفتار کلی میدان ناشی از یک دوقطبی



در فصل قبل، با استفاده از قانون بیو-ساوار نشان دادیم که میدان ناشی از یک حلقه سیم بر روی محور گذرنده از مرکز آن از رابطه

$$B(z) = \frac{\mu_0 i R^2}{2(R^2 + z^2)^{3/2}}$$

به دست می آید. در اینجا i جریان گذرنده از حلقه، R شعاع آن و z فاصله نقطه مشاهده نسبت به مرکز حلقه است. حلقه یک مثال از دو قطبی مغناطیسی است. در اینجا میبینیم که میدان مغناطیسی ناشی از این دوقطبی مغناطیسی در فواصل بسیار دور از حلقه، یعنی $z \gg R$ ، به صورت $B \propto 1/z^3$ تغییر می کند.

حتی اگر یک سیم پیچ با N دور داشته باشیم، می توان با جمع بندی به راحتی نشان داد که میدان مغناطیسی ناشی از سیم پیچ در فواصل بسیار دور از سیم پیچ، بر روی محور آن به صورت

$$B(z) = \frac{\mu_0 N i A}{2\pi z^3}$$

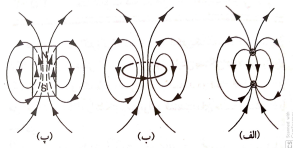
تغییر میکند. در اینجا A مساحت حلقه سیم پیچ می باشد. بنابراین، با توجه به تعریف گشتاور دوقطبی مغناطیسی داریم

$$\vec{B}(z) = \frac{\mu_0}{2\pi} \frac{\vec{\mu}}{z^3}$$

باز هم میبینیم که میدان مغناطیسی ناشی از این دوقطبی مغناطیسی در فواصل بسیار دور از حلقه به صورت $B \propto 1/z^3$ تغییر می کند.

می توان در حالت کلی اثبات کرد که میدان ناشی از دوقطبی های الکتریکی و مغناطیسی در نقاط دلخواه فضا به فاصله r از دوقطبی به صورت $\propto 1/r^3$ تغییر می کند.

جهت میدان ناشی از یک دوقطبی الکتریکی (الف) و دو نوع دوقطبی مغناطیسی - حلقه (ب) و آهنربای میله ای (پ) - را در شکل مقابل ملاحظه می کنید.



شکل ها از اوهانیان و از هالیدی .

خاصیت مغناطیسی اتم ها و هسته ها

خاصیت مغناطیسی در ساختار ریزمقیاس ماده به دو دلیل می تواند بروز کند. نخست، دوران الکترون ها (در اربیتال های اتم) نوعی جریان الکتریکی بوجود می آورد. اندازه این جریان نوعا به صورت زیر است:

$$i = \frac{T}{e} = \frac{\pi r v}{e}$$

شکل مقابل (بالا) را ببینید. این گشتاور دوقطبی مغناطیسی به صورت زیر برای اتم ایجاد می کند:

$$\mu_L = iA = \frac{\pi r^2 v}{e} = \frac{\pi r^2 v}{e}$$

در بررسی اتم ها معلوم می شود که تکانه زاویه ای $\vec{L} = m\vec{r} \times \vec{v}$ (رجوع کنید به فصل دهم فیزیک یک) از اهمیت ویژه ای برخوردار است زیرا این کمیت کوانتیزه (دانه دانه) است؛ بنابراین، گشتاور دوقطبی مغناطیسی را برحسب تکانه زاویه ای بازنویسی میکنیم:

$$\mu_L = \frac{erv}{2} = \frac{e}{2m} mrv = \frac{e}{2m} L$$

$$\vec{\mu}_L = -\frac{e}{2m} \vec{L}$$

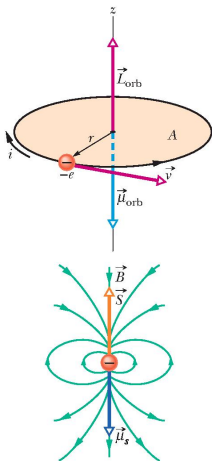
و یا علامت منفی به دلیل بار منفی الکترون وارد می شود. کمیت μ_L را گشتاور دوقطبی مغناطیسی مداری می نامند.

دومین دلیل برای بروز خاصیت مغناطیسی در ساختار ریزمقیاس ماده، یکی از ویژگی های ذاتی ذرات بنیادی به نام اسپین است. وجود اسپین، که می تواند به عنوان نوعی دوران ذاتی خود ذره (حول خودش) تعبیر شود، باعث بوجود آمدن یک گشتاور دوقطبی مغناطیسی اسپینی می شود:

$$\vec{\mu}_S = -\frac{e}{m} \vec{S}$$

شکل پایین را ببینید. این دو خاصیت ذرات زیر اتمی باعث بوجود آمدن پدیده های بسیار مهم مغناطیسی، در مقیاس بزرگ، می شوند.

بسیاری از مواد خاصیت مغناطیسی ندارند زیرا دوقطبی های مغناطیسی آنها کاملا به صورت تصادفی قرار گرفته و اثر همدیگر را خنثی می کنند. هرچند مواد دارای خاصیت مغناطیسی دائمی نیز وجود دارند. همچنین، بسیاری از مواد در حضور میدان مغناطیسی خارجی، رفتار مغناطیسی از خود نشان می دهند. درباره این دو مورد بسیار مهم در ادامه بحث خواهیم کرد.

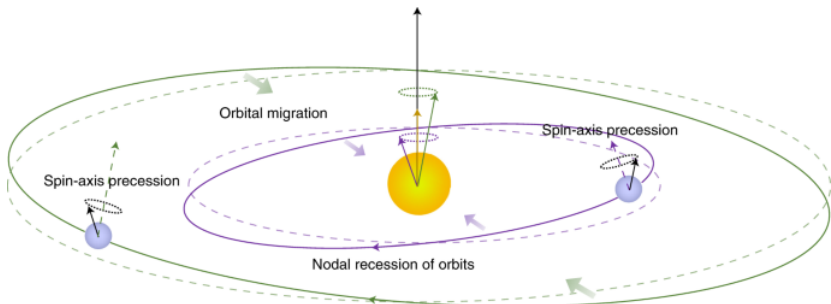


شکل ها از مبانی فیزیک هالیدی .

حرکت مداری و اسپینی در حرکت سیارات

برای درک حرکت مداری و اسپینی الکترون ها در اتم ها، به همتای کلاسیک آنها در حرکت سیارات توجه کنید.

شکل از نیچر: <https://doi.org/10.1038/s41550-019-0701-7>



مغناطیس هسته ای و MRI



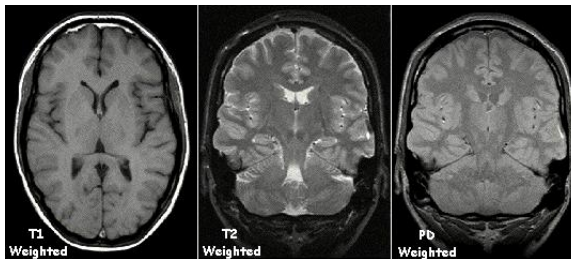
هسته ها نیز دارای گشتاورهای دوقطبی مغناطیسی مداری و اسپینی هستند؛ هرچند، با توجه به اینکه ذرات درون هسته (پروتون ها و نوترون ها) هزار برابر پرچم تر از الکترون هستند، گشتاور دوقطبی مغناطیسی هسته تقریباً ۰,۰۰۱٪ برابر گشتاور دوقطبی مغناطیسی الکترون است.

نکته: نوترون ذره ای بدون بار است ولی گشتاور دوقطبی مغناطیسی آن غیر صفر است. دلیل این پدیده این است که نوترون از سه کوارک تشکیل شده و گشتاور مغناطیسی این سه ذره غیر صفر است (هرچند بار مجموع شان صفر است!).

اثرات دوقطبی های مغناطیسی هسته ها را می توان با پدیده تشدید آشکار کرد. در واقع این اثر اساس روش "تصویربرداری به روش تشدید مغناطیسی"

MRI : magnetic resonance imaging

می باشد. شکل های مربوطه (از ویکی پدیا) را ببینید.



مغناطش

در فصل های قبل دریافتیم که اگر ماده دی الکتریکی را درون یک خازن با بار ثابت قرار دهیم، میدان الکتریکی باعث می شود که دوقطبی های الکتریکی با میدان خازن همراستا شده و در نتیجه میدان درون دی الکتریک به اندازه ثابت دی الکتریکی κ_e کاهش می یابد:

$$\vec{E} = \vec{E}_0 / \kappa_e$$

در اینجا $\vec{E}$ میدان درون دی الکتریک و $\vec{E}_0$ میدان الکتریکی خازن پیش از حضور دی الکتریک (میدان اولیه) است.

به همین صورت، وجود میدان مغناطیسی می تواند دوقطبی های مغناطیسی درون ماده را همسو کرده و باعث بوجود آمدن خاصیت مغناطیسی شود. برای بررسی این پدیده مفهوم مغناطش را معرفی می کنیم.

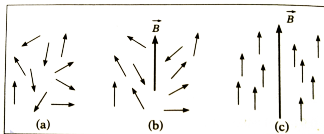
مغناطش: فرض کنید تعداد بسیار زیادی (N) دوقطبی مغناطیسی در یک ماده حضور دارند و گشتاور دوقطبی i ام را با μ_i نشان می دهیم. در این حالت، مغناطش به صورت گشتاور (میانگین) دوقطبی کل ماده بر واحد حجم V تعریف می شود:

$$\vec{M} = \frac{\sum_i^N \vec{\mu}_i}{V}$$

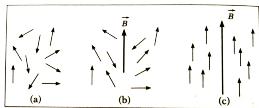
تعریف دقیق مغناطش در حد حجم های کوچک، یعنی $\lim_{V \rightarrow 0}$ ، نوشته می شود.

واضح است که هرچه مقدار مغناطش بزرگتر باشد، دوقطبی ها بیشتر همراستا بوده و خاصیت مغناطیسی قوی تر است. البته، در اکثر مواد، دوقطبی های مغناطیسی به صورت تصادفی قرار گرفته و بنابراین این دوقطبی ها اثر همدیگر را خنثی می کنند. در نتیجه، مغناطش این مواد برابر صفر است؛ هرچند موادی نیز وجود دارند که مغناطش آنها ذاتا غیر صفر است.

تجمع دوقطبی های مغناطیسی در مواد مختلف نسبت به میدان مغناطیسی خارجی رفتارهای متفاوتی از خود نشان می دهد. این گونه رفتارها را در سه دسته (پارامغناطیس، دیامغناطیس و فرومغناطیس) طبقه بندی کرده و در اسلایدهای بعدی توصیف می کنیم.



مغناطش



شکل از نت .

فرض کنید که ماده ای، شامل دوقطبی های مغناطیسی، را درون یک میدان مغناطیسی خارجی قرار داده ایم. دوقطبی ها در ابتدا به صورت تصادفی قرار گرفته اند (و بنابراین مغناطش ماده در ابتدا صفر است) ولی با اعمال میدان، دوقطبی ها همراستا شده و کم و بیش در جهت میدان قرار می گیرند. هرچه میدان قوی تر باشد، همراستا شدن دوقطبی ها بیشتر خواهد بود. شکل مقابل را ببینید.

همراستا شدن دوقطبی های مغناطیسی درون ماده باعث می شود که یک میدان مغناطیسی درون ماده ایجاد شود. اگر این میدان القا شده را $\vec{B}_M$ نامیده و میدان خارجی اولیه را نیز $\vec{B}_0$ بنامیم، آنگاه میدان مغناطیسی کل درون ماده به صورت زیر خواهد بود:

$$\vec{B} = \vec{B}_0 + \vec{B}_M$$

محاسبه میدان مغناطش $\vec{B}_M$ در حالت کلی کار بسیار پیچیده ای است؛ هرچند، اگر مغناطش ماده مورد نظر (یعنی $\vec{M}$) یکنواخت بوده و سیستم تقارن بالایی داشته باشد، آنگاه میدان ناشی از مغناطش و مغناطش با هم همراستا بوده و متناسبند:

$$\vec{B}_M = \mu_0 \vec{M}$$

در نتیجه میدان مغناطیسی کل درون ماده به صورت زیر خواهد بود

$$\vec{B} = \vec{B}_0 + \mu_0 \vec{M}$$

آزمایش ها نشان داده اند که در میدان های ضعیف خارجی، مغناطش به صورت خطی با اندازه میدان خارجی تغییر می کند. بنابراین، برای میدان های ضعیف خارجی، میدان داخل ماده به صورت زیر به میدان خارجی $\vec{B}_0$ مربوط است:

$$\vec{B} = \kappa_m \vec{B}_0$$

ضریب κ_m (بخوانید کاپا) را ثابت تراوایی مغناطیسی ماده می نامند (برای خلاء داریم $\kappa_m = 1$). در مواد فرومغناطیس، ضریب κ_m به میدان مغناطیسی خارجی (به صورت غیر خطی) مربوط است.

مغناطش؛ تفاوت مهم رفتار مواد در برابر الکتریکی و مغناطیسی

مغناطش اعمال شده در یک ماده به صورت زیر به میدان خارجی اعمالی مربوط می شود (باز هم در حد میدان های ضعیف!):

$$\mu_0 \vec{M} = (\kappa_m - 1) \vec{B}_0$$

کمیت $\chi = (\kappa_m - 1)$ (بخوانید کای) را پذیرفتاری مغناطیسی ماده می نامند. مقادیر نوعی این کمیت در دمای اتاق را در جدول زیر می بینید.

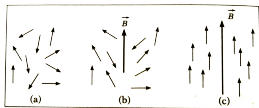
پذیرفتاری مغناطیسی ماده (در اکثر موارد) بسیار کوچک است؛ بنابراین، سهم دوقطبی های القایی در میدان مغناطیسی کل درون ماده بسیار کوچک تر از میدان خارجی است. این در حالی است که حضور میدان الکتریکی خارجی می تواند میدان الکتریکی بزرگی را در یک ماده دی الکتریک تولید کند زیرا ضریب κ_e نوعا می تواند بین ۳ تا ۱۰۰ باشد. در نتیجه، بزرگترین تفاوت در رفتار مواد در مقابل میدان های الکتریکی و مغناطیسی خارجی به صورت زیر جمع بندی می شود:

میدان الکتریکی خارجی می تواند دوقطبی های الکتریکی درون ماده را به شدت همراه کند در حالی که همراستا شدن دوقطبی های مغناطیسی درون ماده، در اثر میدان مغناطیسی خارجی، معمولا بسیار ضعیف است (فرومغناطیس ها استثنا هستند).

TABLE 30.2 Magnetic Susceptibilities of Some Paramagnetic and Diamagnetic Substances at 300 K

Paramagnetic Substance	χ	Diamagnetic Substance	χ
Aluminum	2.3×10^{-5}	Bismuth	-1.66×10^{-5}
Calcium	1.9×10^{-5}	Copper	-9.8×10^{-6}
Chromium	2.7×10^{-4}	Diamond	-2.2×10^{-5}
Lithium	2.1×10^{-5}	Gold	-3.6×10^{-5}
Magnesium	1.2×10^{-5}	Lead	-1.7×10^{-5}
Niobium	2.6×10^{-4}	Mercury	-2.9×10^{-5}
Oxygen	2.1×10^{-6}	Nitrogen	-5.0×10^{-9}
Platinum	2.9×10^{-4}	Silver	-2.6×10^{-5}
Tungsten	6.8×10^{-5}	Silicon	-4.2×10^{-6}

پارامغناطیس



در مواد پارامغناطیس، اتم ها دارای دوقطبی مغناطیسی دائمی هستند (در اثر دوقطبی های اسپینی و یا مداری)؛ هرچند در حالت معمول این دوقطبی ها به صورت تصادفی قرار گرفته و اثر مغناطیسی خاصی ندارند.

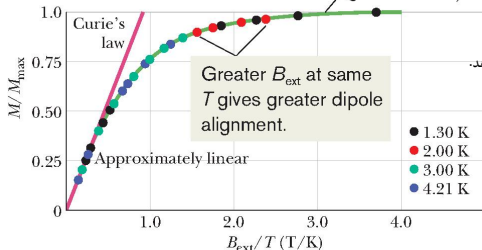
اگر ماده پارامغناطیس را درون یک میدان مغناطیسی قرار دهیم، دوقطبی های مغناطیسی با میدان همجهت می شوند؛ در نتیجه میدان کل درون ماده تقویت می شود. (به یاد آورید که دوقطبی های الکتریکی در خلاف جهت میدان الکتریکی قرار می گرفتند و بنابراین میدان درون ماده را کاهش می دادند.)

اگر دمای ماده افزایش یابد، انرژی جنبشی ذرات (اتم ها) افزایش می یابد. در نتیجه، همراستایی دوقطبی ها با افزایش دما کاهش یافته و مغناطش نیز کاهش می شود. در سال ۱۸۹۵ پیرکوری کشف کرد که دما و مغناطش در مواد پارامغناطیس با هم رابطه عکس دارند (در یک بازه دمایی خاص):

$$M = CB_o/T$$

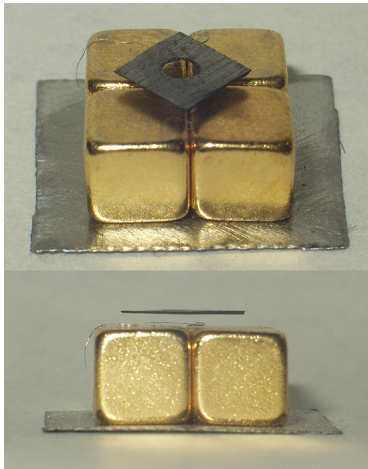
C ثابت کوری نامیده می شود. این رابطه فقط برای مقادیر بسیار کوچک B_o/T درست است. بعدها، لانژوین و بریلونن، رابطه اساسی تری (بر اساس مکانیک کوانتومی) را یافتند که رفتار ماده پارامغناطیس در کل بازه دمایی را توضیح می دهد.

شکل مقابل را ببینید.



اگر میدان مغناطیسی خارجی خاموش شود، ماده پارامغناطیس به سرعت مغناطش خود را از دست می دهد. شکل ها از نت و هالیدی.

دیامغناطیس



مواد دیامغناطیس، در اثر اعمال میدان مغناطیسی خارجی دفع می شوند؛ یعنی تراوایی نسبی این مواد منفی است (به جدول تراوایی نسبی در صفحات قبل مراجعه کنید).

مواد دیامغناطیس دوقطبی مغناطیسی دائمی ندارند (برعکس پارامغناطیس ها)؛ هرچند، به دلیل حضور میدان می توانند دوقطبی مغناطیسی القایی داشته باشند.

مغناطش در یک ماده دیامغناطیس همیشه در خلاف جهت میدان خارجی اعمال شده است.

شکل از ویکی پدیا.



فرومغناطیس



در مواد فرومغناطیس، مانند پارامغناطیس ها، اتم ها دارای دوقطبی مغناطیسی دائمی هستند. همچنین، در اثر اعمال میدان، این مواد دارای مغناطش می شوند؛ هرچند اگر میدان خاموش شود مواد فرومغناطیس هم چنان خاصیت مغناطیسی خود را حفظ می کنند (برعکس پارامغناطیس ها).

خاصیت حفظ ویژگی مغناطیسی به دلیل برهمکنش قوی اتم ها در مواد فرومغناطیس رخ می دهد. در دمای اتاق، آهن، کبالت و نیکل خاصیت مغناطیسی دارند. در دماهای پایین تر، عناصری مانند گادولینیوم نیز می توانند از خود خاصیت فرومغناطیس نشان دهند.

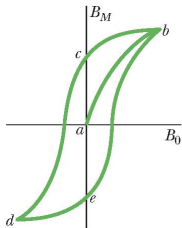
اگر دما به اندازه کافی افزایش یابد، ماده فرومغناطیس می تواند تبدیل به پارامغناطیس شود (زیرا دیگر برهمکنش قوی اتم ها ممکن نخواهد بود).

در اثر اعمال میدان مغناطیسی خارجی، مغناطش فرومغناطیس می تواند به شدت افزایش یابد (همانطور که قبلا اشاره شد، در مواد دیگر چنین موردی روی نخواهد داد).

مفهوم حوزه های مغناطیسی در مواد فرومغناطیس را در کتاب مطالعه کنید (شکل بالا).

نمودار تغییرات (غیر خطی) مغناطش نسبت به میدان مغناطیسی خارجی را در شکل پایین می بینید. همانطور که می بینیم، با کاهش و یا حتی تغییر جهت میدان، مغناطش از بین نمی رود (ماده فرومغناطیس تاریخچه اش را فراموش نمی کند!).

شکل ها از مبانی فیزیک هالیدی.



نکات مهم این درس

انتظار این است که در انتهای این درس شما بتوانید ویژگی های مهم خواص مغناطیسی مواد را بیان کنید. برای اینکار لازم است بتوانید به سوال های زیر پاسخ دهید:

۱. دو روش تولید میدان مغناطیسی را نام ببرید.
۲. آیا تک قطبی مغناطیسی وجود دارد؟ چرا؟
۳. دوقطبی مغناطیسی چیست؟ تعریف گشتاور دوقطبی مغناطیسی را بنویسید.
۴. رابطه بین انرژی پتانسیل، میدان مغناطیسی خارجی و گشتاور دوقطبی مغناطیسی را بنویسید.
۵. گشتاور دوقطبی مغناطیسی مداری و اسپینی در اتم ها را توضیح دهید. تناظر این دو با حرکت سیارات را توضیح دهید.
۶. تصویربرداری به روش تشدید مغناطیسی چگونه است؟
۷. مغناطش را تعریف کنید. رابطه بین مغناطش و میدان مغناطیسی خارجی چگونه است؟
۸. چرا میدان مغناطیسی القایی در مواد معمولاً کوچک است؟
۹. ویژگی های اصلی مواد پارامغناطیس را بیان کنید. چند نوع از این مواد را نام برده و ثابت تراوایی آنها را بنویسید.
۱۰. ویژگی های اصلی مواد دیامغناطیس را بیان کنید. چند نوع از این مواد را نام برده و ثابت تراوایی آنها را بنویسید.
۱۱. ویژگی های اصلی مواد فرومغناطیس را بیان کنید. چند نوع از این مواد را نام ببرید.

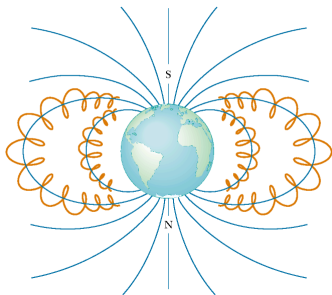
اگر درباره هر کدام از مفاهیم یاد شده بالا مشکلی احساس می کنید، لطفاً درس را یک بار دیگر مرور کنید.

فراموش نکنیم که بهترین راه برای جذب مفاهیم ریاضی و فیزیک، حل مساله است. به همین دلیل سعی کنید دانسته های خود را با حل سوال زیر محک زده و تقویت کنید.



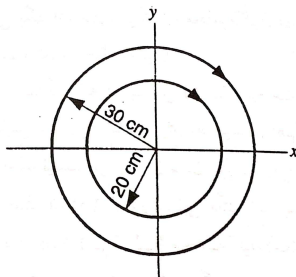
تمرین

گشتاور دوقطبی مغناطیسی زمین برابر $8 \times 10^{22} \text{ J/T}$ می باشد. اگر این گشتاور در اثر شارش بار در هسته مذاب خارجی زمین ایجاد شده باشد، و شعاع حرکت الکترون ها در این هسته 3500 کیلومتر باشد، جریان لازم برای تولید این گشتاور دوقطبی مغناطیسی را بیابید.



شکل از مبانی فیزیک هالیدی.

تمرین



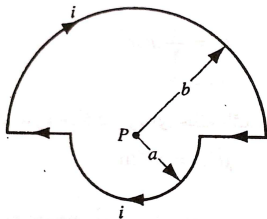
در شکل مقابل، دو حلقه دایره شکل به شعاع های 30° و 20° سانتی متر شامل جریان 10 آمپر هستند.
الف) اندازه و جهت گشتاور مغناطیسی کل دستگاه را بیابید.
ب) اگر جریان در حلقه داخلی معکوس شود، گشتاور مغناطیسی دستگاه چقدر خواهد بود. جهت بردار مورد نظر چگونه خواهد بود؟

Scanned with
CamScanner

شکل از فیزیک هالیدی.

تمرین

مدار شکل مقابل، به شعاع های a و b ، شامل جریان i می باشد. گشتاور دوقطبی مغناطیسی این مدار را بیابید.



Scanned with
CamScanner

شکل از فیزیک هالیدی.

تمرین

۱- یک حلقه سیم دایره شکل به شعاع 10 cm حامل جریان A ۲ می باشد.

الف) اندازه بردار گشتاور دوقطبی مغناطیسی این حلقه را بیابید.

ب) فرض کنید که این بردار گشتاور دوقطبی، موازی با بردار $(\hat{j} - \hat{i})/\sqrt{2}$ می باشد و حلقه در میدان مغناطیسی خارجی $\vec{B} = 3\hat{i} - 2\hat{j}$ بر حسب تسلاست. گشتاور وارد بر حلقه را بیابید.

پ) انرژی پتانسیل مغناطیسی حلقه را بیابید.

۲- یک حلقه به شعاع r و حامل بار q را در نظر بگیرید. بار مورد نظر، به صورت همگن روی حلقه پخش شده است. حلقه حول محور عمود گذرنده از مرکزش با سرعت زاویه ای ω می چرخد.

الف) اثبات کنید که اندازه بردار گشتاور دوقطبی مغناطیسی ناشی از این بارها برابر است با

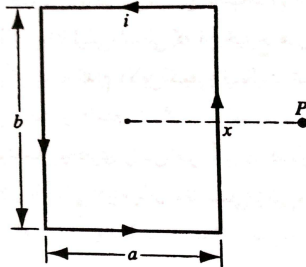
$$\mu = \frac{q\omega r^2}{2}$$

ب) اگر اندازه تکانه زاویه ای حلقه برابر L باشد، نشان دهید که

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

این مدل را در این درس، برای الکترون در یک اتم نوعی، استفاده کردیم.

تمرین

Scanned with
CamScanner

مدار مستطیل شکل مقابل، به عرض a و طول b ، شامل جریان i می باشد.
الف) میدان مغناطیسی ناشی از این مدار را در فاصله x از مرکز مدار، وقتی که $x \gg a$ و $y \gg a$ می باشد، بیابید.
ب) رابطه به دست آمده را بر حسب گشتاور دوقطبی مغناطیسی مدار بنویسید.

شکل از فیزیک هالیدی.

القاییدگی



القاگرها قطعاتی از مدار هستند که می توانند انرژی مغناطیسی را در خود ذخیره کنند (همانطور که خازن ها انرژی الکتریکی را در خود نگه می دارند). در دو جلسه آینده به فیزیک القاگرها، و مدارهای شامل القاگر، خواهیم پرداخت.

شکل از سرز و همکاران.

مراجع

- ❶ Halliday, D., R. Resnick, and K. S. Krane. "Physics, 5th edn." (2002).
- ❷ Halliday, David, Robert Resnick, and Jearl Walker; Fundamentals of physics, 10th edn. John Wiley & Sons, 2014.
- ❸ Ohanian, Hans C., and John T. Markert. Physics for engineers and scientists, 3th edn. 2007.
- ❹ Young, Hugh D., Roger A. Freedman, and Albert Lewis Ford. Sears and Zeman-sky's university physics, 13th edn. Pearson education, 2006.



با سپاس از توجه شما