

ӘЛ-ФАРАБИ АТЫНДАҒЫ ҚАЗАҚ ҰЛТТЫҚ УНИВЕРСИТЕТІ

Физика-техникалық факультеті

**Плазма физикасы, нанотехнология және компьютерлік физика
кафедрасы**

Туреханова К.М.

ЭЛЕКТР ЖӘНЕ МАГНЕТИЗМ

пәні бойынша дәрістер жинағы

«6B05306 Физика және астрономия» білім беру бағдарламасы
бойынша білім алушы студенттерге арналған

Алматы, 2025

Дәріскер: Туреханова К.М. turekhanova.kunduz@kaznu.kz



ЭЛЕКТР ЖӘНЕ МАГНЕТИЗМ



Дәріс 9.

Заттағы магнит өрісі. Магниттердің жіктелуі. Магниттер.

Дәрістің мақсаты: Заттағы магнит өрісінің ерекшеліктерін, магниттелу ұғымын, заттардың магниттік қасиеттеріне қарай (диамагнетик, парамагнетик, ферромагнетик) жіктелуін және тұрақты магниттердің физикалық негіздерін меңгерту.

Қарастырылатын мәселелер: Заттағы магнит өрісі және магниттелу ұғымы; Заттардың магниттік қасиеттері бойынша жіктелуі: диамагнетиктер, парамагнетиктер және ферромагнетиктер

Қысқаша конспект:

Магнетиктердің магниттелуін сан жағынан сипаттау үшін магниттелгіштік деген шама ендіріледі. Бұл шама магниттелген магнетиктің физикалық аз көлеміндегі молекулалардың магниттік моменттерінің геометриялық (векторлық) қосындысының осы көлемге қатынасымен анықталады.

$$\vec{I} = \frac{\sum_i \vec{P}_{mi}}{\Delta V}$$

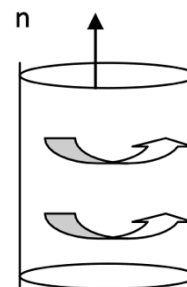
Осы көлемдегі магниттік момент: $d\vec{p}_m = \vec{I}dV$

Сонымен магнетиктердегі магнит өрісі өткізгіштік токтар тудыратын $\vec{B}_0$ өріс пен магнетиктердің магниттелуі кезінде туындайтын молекулалық токтар тудыратын $\vec{B}'$ өрістің қосындысымен анықталады: $\vec{B} = \vec{B}_0 + \vec{B}'$, немесе толық ток заңы бойынша

$$\text{rot}\vec{B} = \mu_0(\vec{j} + \vec{j}_m)$$

Магнетиктегі молекулалық токтар көлемдік сипатта болады. Осы кезде көлем ішінде өтетін токтар бір-бірін өзара теңгестіріп тұрады, ал теңгестірілмегендері беткі токтар болып табылады.

Мұндай цилиндрдің магниттік моменті $VI = J_m S$ болады. Осыдан магниттелгіштікті магниттелу токтары арқылы өрнектеуге болады.



$$I = J_m / L$$

Мұндағы L - цилиндр ұзындығы, ал $\frac{J_m}{L} = i_m$ беттік магниттелу тогы

$$J_m = \int_L \vec{I} d\vec{l} = \int \vec{i}_m d\vec{l}$$

Ротор түрінде теңдеуді жазатын болсақ:

$$\text{rot} \vec{B} = \mu_0 (\vec{j} + \text{rot} \vec{I})$$

Мұндағы $\vec{j}_m = \text{rot} \vec{I}$, сонда Стокс теоремасын қолдану арқылы

$$\int \vec{B} d\vec{l} = \mu_0 (J + \int \vec{I} d\vec{l}) \rightarrow \int (\vec{B} / \mu_0 - I) d\vec{l} = J$$



$$\vec{H} = \vec{B} / \mu_0 - \vec{I}$$

Сонымен магнетиктердегі магнит өрісін сипаттау үшін тек өткізгіштік токтармен анықталатын магнит өрісі кернеулігі $\vec{H}$ деген физикалық шама қолданылады.

Егер $\vec{I} = 0$ болса, онда $\vec{B} = \mu_0 \vec{H}$.

$$\int \vec{H} d\vec{l} = J; \quad \text{rot} \vec{H} = \vec{j}$$

Егер магнит өрісін сипаттайтын векторларды электр өрісін сипаттайтын вектормен салыстырсақ, магнит өрісінің кернеулігі $\vec{H}$ электр өрісі ығысу векторына $\vec{D}$, ал магнит өрісінің индукция векторы $\vec{B}$ электр өрісінің кернеулігіне $\vec{E}$ ұқсас шамалар.

Магнит өрісі векторларының екі магнетик шекарасындағы өзгеру заңдылығын анықтау үшін электр өрісі векторларының екі диэлектрик шекарасында өзгеруі секілді қарастыруға болады. Гаусс теоремасының дифференциалдық түрін қолданғанда

$$\int_S \vec{B} d\vec{S} = 0$$

интегралдау беті ретінде екі магнетик шекарасын кесіп өтетін физикалық аз көлемді цилиндрлік толық бетін алсақ, онда:

$$B_{n1}=B_{n2}$$

бір магнетиктен екінші магнетикке өткен кезде магнит өрісі индукциясы векторының нормаль құраушысы үзіліссіз өзгереді, бірақ тангенциал құраушысы үзілісті өзгереді. Кернеуліктің секірме өзгерісінің шамасы магнетиктер шекарасындағы беттік токтың сызықтық тығыздығына тең:

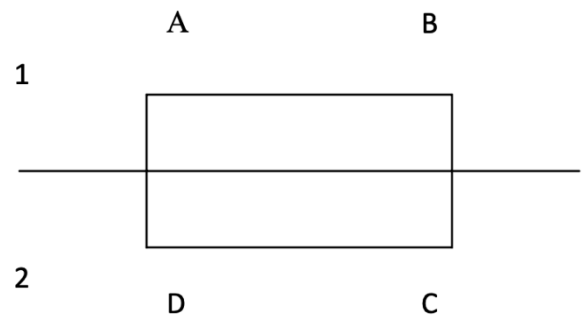
$$H_{t2} - H_{t1} = i$$

Егер екі магнетик шекарасында беттік ток $i=0$ болмаса, онда

$$H_{t1} = H_{t2}$$

Сонымен қатар, екі магнетик шекарасындағы магнит өрісі сызықтарының сыну заңын:

$$\frac{\operatorname{tg} \alpha_1}{\operatorname{tg} \alpha_2} = \frac{\mu_1}{\mu_2}$$



Магнетиктер деп сыртқы магнит өрісін өзгертсе, немесе өздігінен магнит өрісін тудыра алатын ортаны атайды. Магнетиктер негізінен үш топқа диа, пара, ферро магнетиктерге бөлінеді. Диамагнетиктерге сыртқы магнит өрісі жоқ кезінде атомдарының (молекулаларының) магниттік моменттері нөлге тең магнетиктер, ала парамагнетиктерде магнит өрісі жоқ кезінде атомдарының (молекулаларының) магниттік моменттері нөлге тең емес, бірақ физикалық аз көлемінің магниттік моменті нөлге тең магнетиктер жатады. Ферромагнетиктерге сыртқы магнит өрісі жоқ кезінде де макроскопиялық аудандарында (домендерінің) да магниттік моменттері нөлге тең емес, бірақ қалыпты жағдайда тұтас магниттелген күйде болмайтын магнетиктер жатады. Егер кез келген магнитті сыртқы магнит өрісіне орнаастырса, ол магниттеледі, яғни магнетик құрамына кіретін атомдардың (молекулалардың) магниттік моменттері қосылып, қосымша магнит өрісін тудырады.

Сыртқы магнит өрісінде орналасқан атомның электронына магнит өрісі тарапынан әсер ететін электрон орбитасын сыртқы магнит өрісіне перпендикуляр бағытта айналмалы қозғалысқа келтіреді, осы айналмалы қозғалысты лармор процессиясы деп аталады. Егер орбита бойымен қозғалып жүрген электрондар элементар ток ретінде қарастырсақ, оның магниттік моменті мен бұрыштық жылдамдығы:

$$\vec{P}_m = -\frac{|e|\hbar r^2}{2}\vec{\omega}; \quad \vec{\omega}_L = \frac{|e|\hbar \vec{B}}{2m}$$

Лармор процессиясы кезінде пайда болатын қосымша магниттік момент:

$$\Delta \vec{P}_m = -\frac{|e|\hbar r^2}{2}\vec{\omega}_L = -\frac{|e|\hbar \vec{B} r^2}{4m}$$

Айналмалы қозғалыс теңдеуін жазатын болсақ:

$$\frac{d\vec{L}}{dt} = [\vec{P}_m \vec{B}] = \frac{e}{2m} \vec{L} \times \vec{B} = -\frac{e}{2m} \vec{B} \times \vec{L} = -\vec{\omega}_L \times \vec{L}$$

Сыртқы магнит өрісінде қосымша магниттік момент қарама қарсы бағытталған, сондықтан магниттік момент тудыратын қосымша. Магнит өрісі де магниттеуші магнит өрісіне де қарама қарсы бағытталады. Сондықтан магниттелген диамагнетиктерде магнит өрісі әлсірейді. Осы құбылысты диамагнетизм деп аталады.

$$\vec{I} = \chi \vec{H}; \quad \chi_d = -\frac{e^2 \mu_0 N Z \langle R^2 \rangle}{6m}$$

мұнда байқағанымыздай диамагниттік өтімділік χ_d температураға тәуелді емес.

Парамагнетиктердің атомдарының (молекулаларының) магниттік моменттері нөлден өзге. Парамагнетикті сыртқы магнит өрісіне орналастырғанда оның молекулаларының магниттік моменттері қосымша энергия алады.

$$W = -\vec{P}_m \vec{B} \quad \langle P_{mz} \rangle = \left[\frac{P_m^2 \mu_0 H}{3k_B T} \right]$$

$$I = N \langle P_{mz} \rangle \quad \chi_p = P_m^2 N \mu_0 / 3k_B T$$

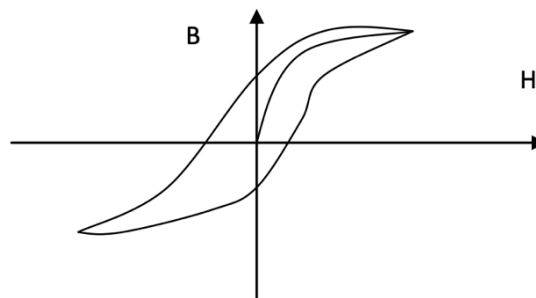
мұнда диамагниттік өтімділік χ_p температураға кері пропорционал екені

байқалады. Осы тәуелділік Кюри Вейс $\chi_p = c/(T - T_0)$ заңымен сипатталады.

Эйнштейн де Гааз тәжірибесі негізінде ферромагнетиктердің магниттелуі электрондардың меншікті магниттік моменттерінің (спинінің) болуымен байланысты екенін көрсетті. Сыртқы магнит өрісі жоқ кезде, электрондардың өзара әсері нәтижесінде олардың магниттік моменттері бір жаққа қарай бағытталуға тырысады. Сөйтіп ферромагнетик өздігінен

магниттелуі мүмкін. Бірақ тұтыс магниттелген күй энергетикалық тұрғыдан қолайлы болғандықтан, ферромагнетик магниттік моменттері әртүрлі жаққа қарай бағытталған макроскопиялық аумақтар домендерге бөлініп кетеді. Осы кездегі ферромагнетиктердің толық энергиясы мүмкін мәндерінің ең кішісіне тең болуы керек. Ферромагнетиктердің магниттелу механизмін тек кванттық теория негізінде ғана түсіндіруге болады, себебі спин электронның негізгі кванттық қасиеттерінің бір болып табылады. Кванттық теория бойынша электрондардың спиндерінің бір жаққа қарай бағытталуы өзара алмасу әсеріне байланысты. Электрондар Паули принципіне Ферми Дирак таралуына бағынатындықтан спиндері паралель электрондар спиндері қарама қарсы электрондарға қарағанда фазалық кеңістікте бір бірінен алыс. Орналасады деп есептеуге болады. Сондықтан, спиндері паралель электрондардың кулондық өзара әсерінің потенциалдық энергиясының кемуі, олардың кинетикалық энергиясының артуынан көп болғанда, электрондардың спиндері паралель күйге сәйкес толық энергия аз, яғни энергетикалық тұрғыдан қолайлы болады.

Ферромагнетиктердің магниттелгіштігі өріс кернеулігіне тәуелділігі сызықты болмайды. Магниттелгіштік кернеулік өскен сайын өседі және кернеуліктің белгілі бір мәнінде өзінің қанығу мәніне жетеді. Магнит өрісі индукциясының кернеулікке тәуелділігі магниттелу қисығы деп аталады. Егер алғашқы кезде магниттелмеген ферромагнетикті периодты магнит өрісіне орналастырса, магниттелу қисығының түрі тұзақ тәрісдес болды. Бұл тұзақты гистеризис тұзағы деп аталады.



$$\mu = 1 + \chi$$

Антиферромагнетиктерде электрондардың меншікті магниттік моменттері өздігінен бір біріне қарама қарсы бағытталады.

Бақылау сұрақтары:

1. Магнетиктерде өрістің пайда болуын түсіндіріңіз.
2. Магнит өрісі векторалы үшін шекаралық шарттарды түсіндіріңіз.
3. Диамагнетиктердің, парамагнетиктердің және ферромагнетиктердің магниттелу механизмін түсіндіріңіз
4. Гистеризес тұзағын нені білдіреді?

Пайдаланылған әдебиеттер:

1. Бәйімбетов Ф.Б., Рамазанов Т.С. Электр және магнетизм. – Алматы: Қазақ университеті, 2011. – 199 б.
2. Бәйімбетов Ф.Б., Аймауытов Д., Құрманбеков А. Физика есептері (Электр және магнетизм). – Алматы: Қазақ университеті, 2005. – 216 б.
3. Архипов Ю.В. Краткий конспект лекций по курсу "Электричество и магнетизм" : учеб.-методическое пособие КазНУ 2009
4. Габдуллина Г.Л., Қисан А., Абыканова Б.Т. Электр және магнетизм курсы бойынша қысқаша дәрістер мен есептер жинағы : оқу-әдістемелік құрал, Әл-Фараби атын. ҚазҰУ. - Алматы : Қазақ ун-ті, 2017. - 161 б.
5. Туреханова К.М. Электр және магнетизм курсы бойынша есептер жинағы/ Оқу құралы, әл-Фараби атын. ҚазҰУ. - Алматы : Қазақ ун-ті, 2017. – 191 б.
6. Raymond A. Serway, John W. Jewett, Physics for Scientists and Engineers with Modern Physics 9th ed. – Cengage Learning, 2014. – 1622 p.