

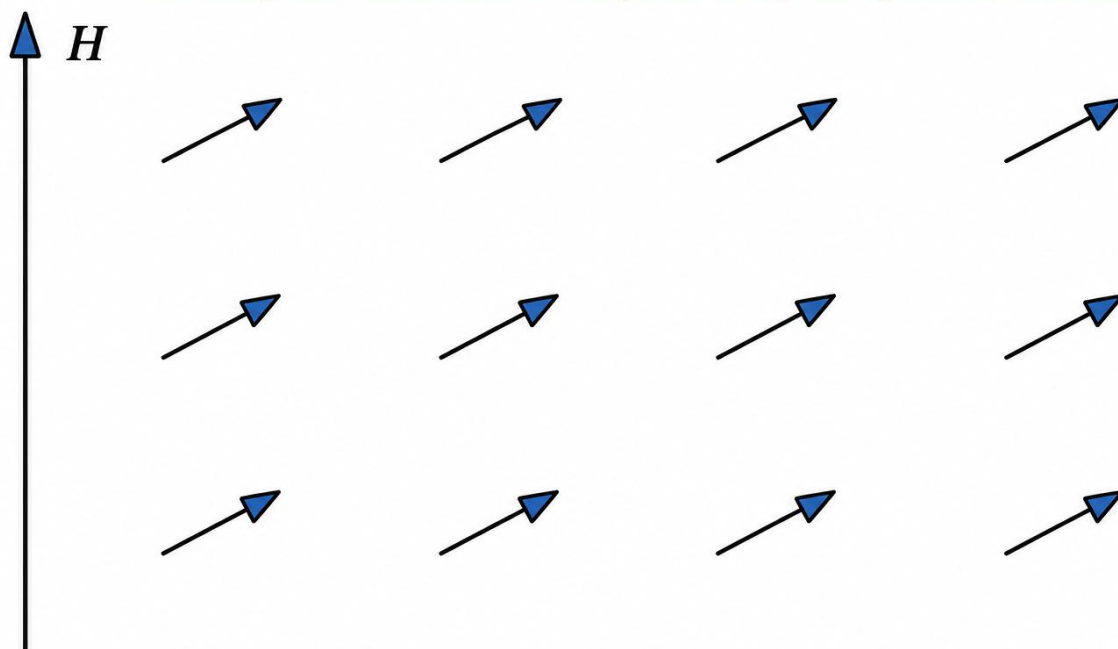
DIA- VA PARAMAGNETIKLAR. DIAMAGNETIZM VA PARAMAGNETIZMNING FIZIK MOHIYATI

Moddalarning magnit xususiyatlari atom va molekulalardagi elektronlarning orbital harakati, spin magnit momentlari hamda tashqi magnit maydon bilan o'zaro ta'siriga bog'liq. Diamagnetiklarda tashqi maydon mavjud magnit holatga qarshi yo'nalgan induksiyalangan magnit moment hosil qiladi. Paramagnetiklarda esa atom yoki ionlarning doimiy magnit momentlari mavjud bo'lib, tashqi maydon ularni maydon yo'nalishi bo'ylab qisman tartiblaydi. Issiqlik harakati bu tartiblanishga qarshilik ko'rsatadi.

Darsning maqsadi

Dia- va paramagnetizmning mikroskopik mexanizmlarini, magnitlanish M , magnit qabul qiluvchanlik χ_m va nisbiy magnit singdiruvchanlik μ_r orasidagi bog'lanishlarni, paramagnetiklar uchun Kyuri qonunini hamda bir jinsli bo'lmagan magnit maydondagi xatti-harakatni formulalar, grafiklar, jadvallar va yechilgan misollar orqali tushuntirish.

Paramagnit: momentlar maydon bo'ylab qisman tartiblanadi



Izoh: Tashqi magnit maydon $\vec{H}$ (yuqoriga yo'nalgan) ta'sirida paramagnit moddaning elementar magnit momentlari maydon yo'nalishi bo'ylab qisman tartiblanadi.

1-rasm. Paramagnit atom magnit momentlarining tashqi maydonda qisman orientatsiyalanishi

Kattalik	Belgi	SI
Magnitlanish	M	A/m
Maydon kuchlanganligi	H	A/m
Magnit qabul qiluvchanlik	χ_m	o'lchamsiz
Nisbiy magnit singdiruvchanlik	μ_r	o'lchamsiz
Magnit induksiya	B	T

1. Moddaning magnitlanishi va asosiy tenglamalar

Makroskopik magnitlanish vektori M birlik hajmdagi natijaviy magnit dipol momentini ifodalaydi. Agar ΔV hajmda m_i magnit momentlar mavjud bo'lsa:

$$M = (1/\Delta V) \sum m_i$$

Chiziqli, izotrop va kuchsiz maydon sharoitida ko'p dia- va paramagnetiklar uchun magnitlanish H ga proporsional:

$$M = \chi_m H$$

Muhitdagi magnit induksiya H va M ning yig'ma ta'siri bilan aniqlanadi:

$$B = \mu_0(H + M)$$

$M = \chi_m H$ ni qo'ysak:

$$B = \mu_0(1 + \chi_m)H = \mu_0 \mu_r H$$

$$\mu_r = 1 + \chi_m$$

Diamagnetiklarda $\chi_m < 0$ va $\mu_r < 1$; paramagnetiklarda $\chi_m > 0$ va $\mu_r > 1$. Har ikki holatda odatda $|\chi_m|$ juda kichik bo'lgani uchun μ_r birlikka juda yaqin.

1-misol

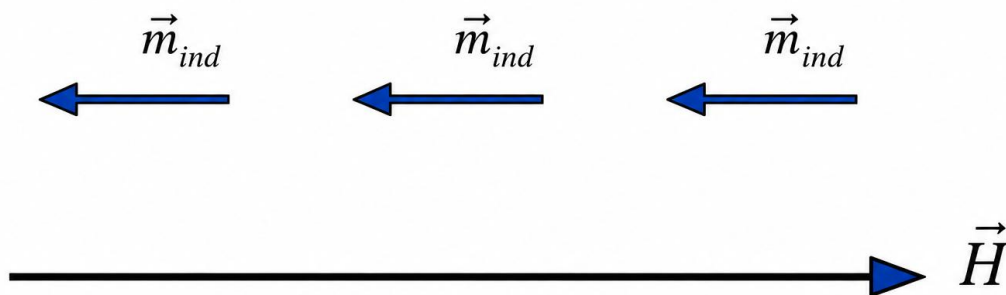
$\chi_m = 3.0 \times 10^{-4}$ va $H = 2.0 \times 10^5$ A/m bo'lgan paramagnetikda $M = \chi_m H = 60$ A/m. $B = \mu_0(H + M) \approx 0.2514$ T.

2-misol

$\chi_m = -1.0 \times 10^{-5}$ va $H = 2.0 \times 10^5$ A/m bo'lgan diamagnetikda $M = -2$ A/m. Magnitlanish H ga qarama-qarshi yo'nalgan.

2. Diamagnetizmning fizik tushuntirilishi

Diamagnetizm barcha moddalarda prinsipial ravishda mavjud bo'lgan kvant-elektromagnit hodisadir. Tashqi magnit maydon elektronlarning orbital harakatini o'zgartirib, Lents qonuniga mos ravishda tashqi maydonga qarshi yo'nalgan qo'shimcha magnit momentni yuzaga keltiradi. Atom yoki molekulaning natijaviy doimiy magnit momenti nol bo'lgan moddalarda aynan shu induksiyalangan javob asosiy magnit xususiyat sifatida namoyon bo'ladi.



Izoh: Tashqi magnit maydon $\vec{H}$ (o'ngga yo'nalgan) ta'sirida modda zarrachalarida induksiyalangan magnit momentlar $\vec{m}_{ind}$ maydonga qarshi yo'naladi (chapga).

2-rasm. Diamagnit javob: induksiyalangan magnit moment tashqi H maydoniga qarshi yo'naladi

Kuchsiz maydonlarda diamagnit javob taxminan chiziqli:

$$\mathbf{M} = \chi_d \mathbf{H}, \quad \chi_d < 0$$

Shuning uchun diamagnit jism bir jinsli bo'lmagan magnit maydonda kuchli maydon sohasidan kuchsiz maydon sohasiga siljishga intiladi. Ideal klassik muvozanat statistikasi diamagnetizmni to'liq tushuntira olmaydi; to'liq izoh kvant mexanik tavsifni talab qiladi.

Xususiyat	Diamagnetik
Atomning doimiy natijaviy momenti	Ko'pincha 0
Induksiyalangan $\mathbf{M}$ yo'nalishi	$\mathbf{H}$ ga qarshi
χ_m ishorasi	Manfiy
μ_r	1 dan biroz kichik
Temperaturaga bog'liqlik	Ko'pincha kuchsiz

3. Paramagnetizmning fizik tushuntirilishi

Paramagnetik atom, ion yoki molekulalarda juftlashmagan elektronlar sababli doimiy magnit momentlar mavjud. Tashqi maydon bo'lmaganda issiqlik harakati ularni tasodifiy orientatsiyalab, makroskopik $\mathbf{M}$ ni deyarli nol qiladi. $\mathbf{H}$ maydon qo'yilganda momentlarning energetik jihatdan qulay yo'nalishi maydon bo'ylab bo'ladi va statistik jihatdan qisman tartiblanish yuz beradi.

Magnit dipolning tashqi maydondagi potensial energiyasi:

$$U = -\mathbf{m} \cdot \mathbf{B} = -mB \cos\theta$$

$\theta=0$ da energiya minimal, shu sababli momentlar $\mathbf{B}$ bo'ylab orientatsiyalanishga moyil. Biroq $k_B T$ miqyosidagi issiqlik energiyasi tartiblanishga qarshi ishlaydi.

Kuchsiz maydon va yetarlicha yuqori temperaturada ideal paramagnit uchun Kyuri qonuni bajariladi:

$$\chi_p = C/T$$

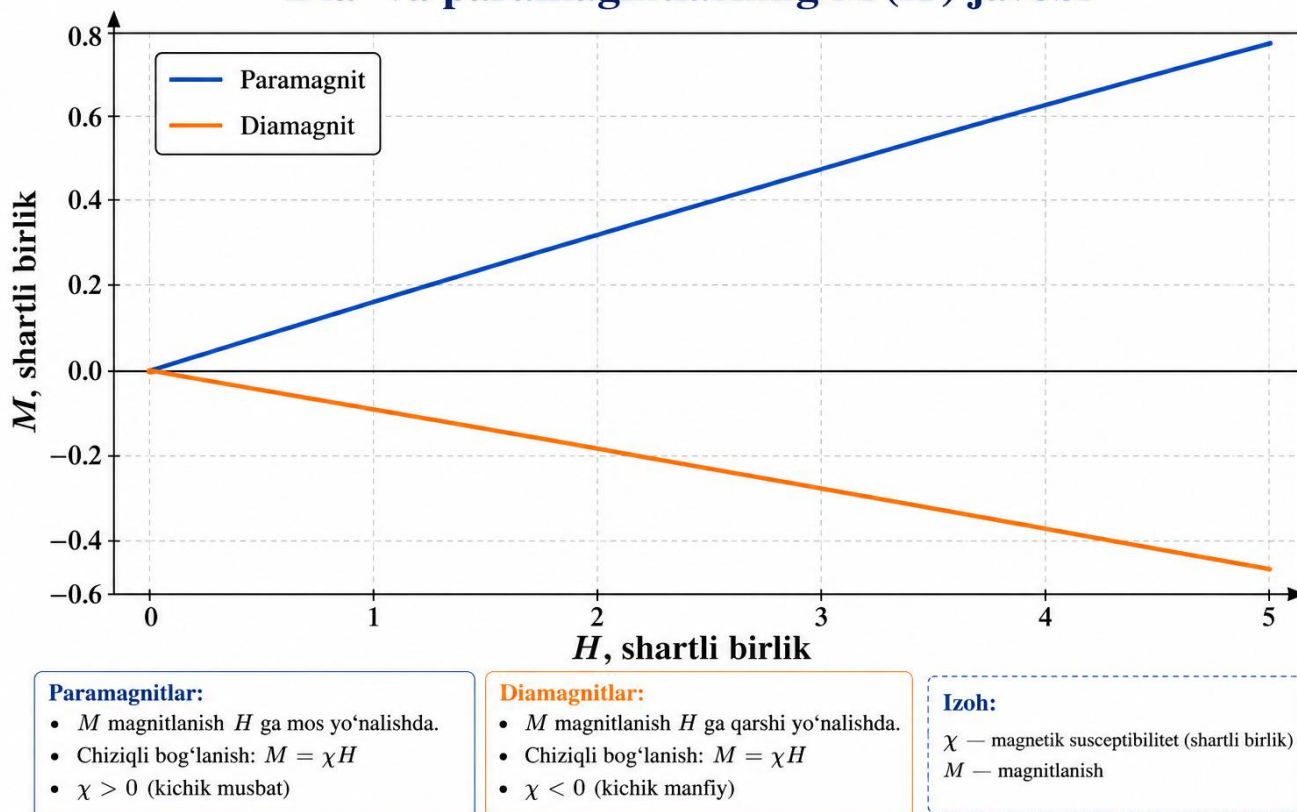
Demak, temperatura oshganda paramagnit qabul qiluvchanlik kamayadi.

3-misol

$C=0.030$ K bo'lgan ideal paramagnit uchun $T=300$ K da $\chi=1.0 \times 10^{-4}$. $T=600$ K ga oshirilsa $\chi=5.0 \times 10^{-5}$ bo'lib, ikki marta kamayadi.

4. Dia- va paramagnitlarning $M(H)$ bog'lanishi

Dia- va paramagnitlarning $M(H)$ javobi



3-rasm. Chiziqli sohada diamagnit uchun manfiy, paramagnit uchun musbat $M(H)$ qiyaligi

M - H grafikdagi qiyalik magnet qabul qiluvchanlik χ_m ga teng. Paramagnitda qiyalik musbat, diamagnitda manfiy. Kuchsiz maydonlarda ushbu bog'lanish chiziqli deb olinadi. Juda kuchli maydon va past temperaturada paramagnit momentlarning to'yingan orientatsiyasi sababli oddiy $M=\chi H$ modeli cheklanishi mumkin.

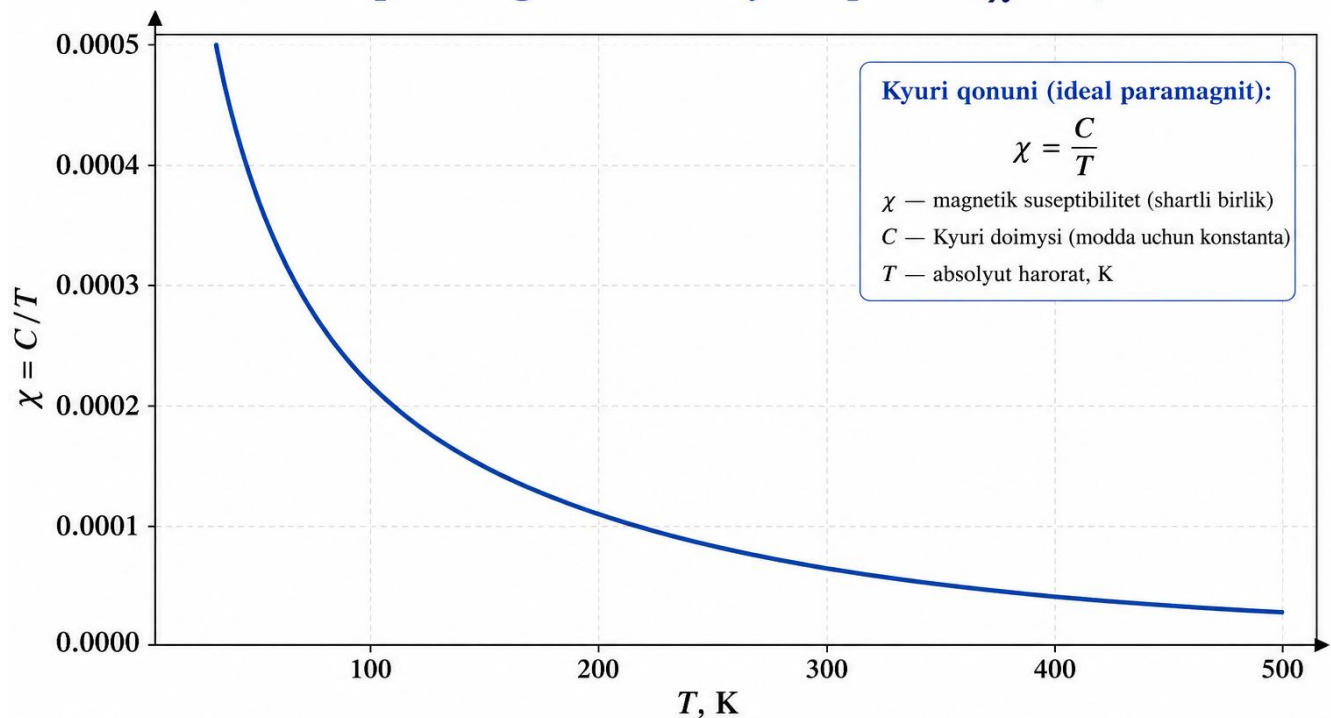
Belgi	Diamagnetizm	Paramagnetizm
χ_m	$\chi_m < 0$	$\chi_m > 0$
μ_r	< 1	> 1
M yo'nalishi	H ga qarshi	H bilan bir yo'nalishda
T ta'siri	odatda kichik	sezilarli, ko'pincha $\chi \propto 1/T$
Kuchli maydon tomonga tortilish	yo'q, itariladi	ha, tortiladi

4-misol

$H=5 \times 10^4$ A/m da diamagnit uchun $\chi=-2 \times 10^{-5}$ bo'lsa $M=-1$ A/m; paramagnit uchun $\chi=4 \times 10^{-4}$ bo'lsa $M=20$ A/m. Ikkala modda bir xil H da mutlaqo qarama-qarshi yo'nalishda magnitlanadi.

5. Kyuri qonuni va temperatura ta'siri

Ideal paramagnit uchun Kyuri qonuni: $\chi \propto 1/T$



Xulosa: Ideal paramagnitlarda magnetik suseptibilitet haroratga teskari proporsional: $\chi \propto 1/T$. Harorat oshishi bilan χ kamayadi.

4-rasm. Ideal paramagnit qabul qiluvchanligining temperaturaga teskari proporsional kamayishi

Kyuri qonuni $\chi=C/T$ paramagnetizmning issiqlik tabiatini yaqqol ko'rsatadi. Past T da tashqi maydonning orientatsiyalovchi ta'siri nisbatan kuchli, yuqori T da esa termik tartibsizlik ustunlashadi. Real moddalarda o'zaro ta'sirlar mavjud bo'lsa Kyuri-Veys qonuni $\chi=C/(T-\theta)$ ko'rinishi uchrashi mumkin, biroq oddiy paramagnitlarni tushuntirishda Kyuri qonuni asosiy boshlang'ich modeldir.

5-misol

Bir paramagnitning 250 K dagi qabul qiluvchanligi 8×10^{-4} bo'lsa, Kyuri qonuni bo'yicha $C=\chi T=0.20$ K. 400 K da $\chi=C/T=5 \times 10^{-4}$.

6-misol

Temperatura 200 K dan 500 K gacha oshsa, $\chi_{500}/\chi_{200}=200/500=0.4$. Demak, qabul qiluvchanlik dastlabki qiymatning 40 foizigacha kamayadi.

Diamagnit javob esa ko'pincha temperaturaga ancha kuchsiz bog'liq, chunki u doimiy momentlarning termik orientatsiyasidan emas, elektron orbital holatining induksiyalangan o'zgarishidan kelib chiqadi.

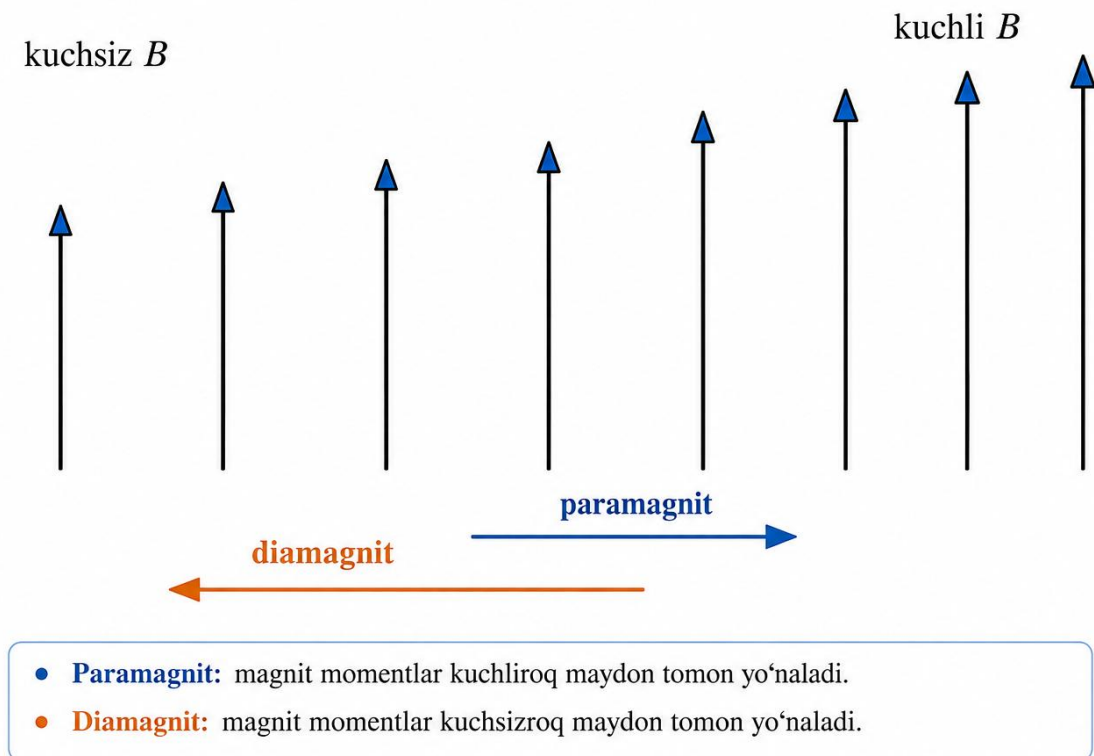
6. Bir jinsli bo'lmagan magnit maydondagi xatti-harakat

Bir jinsli maydonda kichik magnit jismga faqat orientatsiyalovchi moment ta'siri bo'lishi mumkin; translatsion natijaviy kuch uchun maydon gradienti zarur. Chiziqli muhitning kichik namunasi uchun kuch yo'nalishini sifat jihatdan B^2 gradienti bilan bog'lash mumkin:

$$\mathbf{F} \propto \chi_m \nabla(B^2)$$

Shuning uchun $\chi_m > 0$ paramagnitlar kuchli maydon tomonga, $\chi_m < 0$ diamagnitlar esa kuchsiz maydon tomonga siljishga intiladi.

Bir jinsli bo'lmagan magnit maydonda dia- va paramagnitlarning yo'nalishi



5-rasm. Bir jinsli bo'lmagan maydonda para- va diamagnit jismlarning qarama-qarshi yo'nalishdagi siljishi

7-misol

Bir xil geometrik namunalardan birining $\chi = +5 \times 10^{-4}$, ikkinchisining $\chi = -1 \times 10^{-5}$ bo'lsin. Bir xil $\nabla(B^2)$ da birinchi namuna kuchli maydon tomonga, ikkinchisi qarama-qarshi tomonga harakat qiladi; kuch moduli boshqa omillar teng bo'lsa $|\chi|$ bilan proporsional.

Bu hodisa magnit sezgirlikni tajribaviy aniqlash, materiallarni ajratish va kuchli diamagnit levitatsiya tajribalarining asosiy fizik g'oyalaridan biridir.

7. Mikroskopik va makroskopik tasvirning bog'lanishi

Makroskopik M vektori juda ko'p atomik magnit momentlarning statistik natijasidir. Paramagnetiklarda tashqi maydon mavjud doimiy momentlar orientatsiyasini o'zgartiradi. Diamagnetiklarda esa tashqi maydon elektron holatiga ta'sir qilib, qarshi yo'nalgan moment induksiyalaydi. Shu farq χ ning ishorasida namoyon bo'ladi.

$$M = N \langle m \rangle \quad (N - \text{birlik hajmdagi magnit zarrachalar soni})$$

Paramagnetik uchun $\langle m \rangle$ maydon va temperaturaga bog'liq. Kuchsiz maydonda orientatsion statistikadan $M \propto H/T$ kelib chiqadi va bu Kyuri qonunining fizik mazmunini beradi.

Diamagnetizmدا induksiyalangan moment tashqi maydon bilan deyarli chiziqli bo'lib, odatda temperatura bilan kuchsiz o'zgaradi. Kvant mexanikada yopiq elektron qobiqli atomlar tipik diamagnit javob beradi, juftlashmagan elektronli atom va ionlar esa ko'pincha paramagnitdir.

8-misol

Birlik hajmda $N=2 \times 10^{27} \text{ m}^{-3}$ magnit markaz bo'lib, har birining maydon yo'nalishidagi o'rtacha moment proyeksiyasi $\langle m_z \rangle = 3 \times 10^{-29} \text{ A} \cdot \text{m}^2$ bo'lsa, $M=N\langle m_z \rangle = 0.06 \text{ A/m}$.

Mikroskopik sabab	Makroskopik natija
Induksiyalangan qarshi moment	$\chi < 0$, diamagnetizm
Doimiy momentlarning qisman tartiblanishi	$\chi > 0$, paramagnetizm
Termik tartibsizlikning ortishi	Paramagnit χ kamayadi
Momentlar yig'indisi / hajm	M magnitlanish vektori

8. Darsni tashkil etish metodikasi

Bosqich	Faoliyat
1	Magnit maydonga turli moddalarning turlicha javobi haqidagi muammoli savol bilan kirish.
2	M, H, B, χ_m va μ_r tushunchalarini $B = \mu_0(H+M)$ orqali bog'lash.
3	Diamagnetizumni induksiyalangan qarshi moment va Lents qonuni bilan tushuntirish.
4	Paramagnetizumni doimiy atom momentlari va termik tartibsizlik raqobati orqali izohlash.
5	M(H) grafigida χ ishorasini qiyalik sifatida tahlil qilish.
6	Kyuri qonuni $\chi = C/T$ orqali temperatura ta'sirini hisoblash.
7	Bir jinsli bo'lmagan maydonda dia va paramagnitlarning harakat yo'nalishini qiyoslash.
8	Yechilgan misollar va mustaqil masalalar bilan mavzuni mustahkamlash.

Muammoli savollar

Nima uchun diamagnit moment tashqi maydonga qarshi yo'naladi? Nima uchun paramagnitning χ qiymati temperatura oshishi bilan kamayadi? χ ning ishorasi jismning maydon gradientidagi harakatini qanday belgilaydi? Nima sababdan μ_r dia- va paramagnetiklarda birlikka juda yaqin? Doimiy magnit moment mavjud bo'lmagan atom ham qanday qilib magnit javob bera oladi?

Ko'p uchraydigan xatolar

Diamagnetizumni magnit momentlarning shunchaki teskari burilishi deb tushuntirish; paramagnitda barcha momentlar to'liq bir yo'nalishga o'tadi deb hisoblash; χ va μ_r ni bir xil kattalik deb olish; $\chi = C/T$ qonunini diamagnetiklarga tatbiq etish; M, H va B birliklarini

aralashtirish; kuchsiz maydon uchun chiziqli modelni har qanday kuchli maydonda shartsiz qo'llash.

9. Asosiy formulalar, mustaqil topshiriqlar va xulosa

Formula	Mazmuni
$M=(1/\Delta V)\sum m_i$	Magnitlanish ta'rifi
$M=\chi_m H$	Chiziqli magnit javob
$B=\mu_0(H+M)$	Muhitdagi umumiy magnit induksiya
$\mu_r=1+\chi_m$	Singdiruvchanlik-qabul qiluvchanlik bog'lanishi
$U=-m \cdot B$	Magnit dipol energiyasi
$\chi_p=C/T$	Kyuri qonuni
$M=N\langle m \rangle$	Mikroskopik momentlardan makroskopik magnitlanish
$F \propto \chi_m \nabla(B^2)$	Maydon gradientidagi kuch yo'nalishi

Mustaqil topshiriqlar

1. $\chi=-1.5 \times 10^{-5}$ va $H=3 \times 10^5$ A/m bo'lgan diamagnit uchun M ni hisoblang.
2. $\chi=6 \times 10^{-4}$ va $H=8 \times 10^4$ A/m bo'lgan paramagnit uchun M va μ_r ni toping.
3. $C=0.12$ K bo'lgan ideal paramagnitning 300 K va 600 K dagi χ qiymatlarini taqqoslang.
4. Nima uchun diamagnit jism bir jinsli bo'lmagan maydonning kuchsiz qismiga intilishini izohlang.
5. Paramagnit atomning m momenti B bilan 60° burchak hosil qilsa, $U=-mB\cos\theta$ energiyani yozing va $\theta=0$ holat bilan taqqoslang.
6. Dia- va paramagnetizmni mikroskopik sabab, χ ishorasi, M yo'nalishi va temperatura ta'siri bo'yicha jadvalda qiyoslang.

Yakuniy xulosa

Diamagnetizm va paramagnetizm moddaning tashqi magnit maydonga ikki turdagi fundamental javobidir. Diamagnetizm elektron orbital holatining maydon ta'sirida o'zgarishi natijasida tashqi maydonga qarshi yo'nalgan induksiyalangan magnit moment hosil bo'lishi bilan tavsiflanadi; shu sababli $\chi_m < 0$. Paramagnetizm esa juftlashmagan elektronlar bilan bog'liq doimiy atomik magnit momentlarning tashqi maydon bo'ylab qisman orientatsiyalanishidan kelib chiqadi va $\chi_m > 0$ bo'ladi. Termik harakat paramagnit tartiblanishga qarshilik ko'rsatgani uchun ideal holatda $\chi=C/T$ Kyuri qonuni bajariladi. Makroskopik magnitlanish M , magnit maydon H va magnit induksiya B orasidagi $B=\mu_0(H+M)$ bog'lanish moddaning magnit javobini yagona nazariy tizimda ifodalaydi.

Tavsiya etiladigan adabiyotlar

1. Griffiths D. J. Introduction to Electrodynamics. Cambridge University Press.
2. Kittel C. Introduction to Solid State Physics. Wiley.
3. Halliday D., Resnick R., Walker J. Fundamentals of Physics. Wiley.
4. Young H. D., Freedman R. A. University Physics with Modern Physics. Pearson.