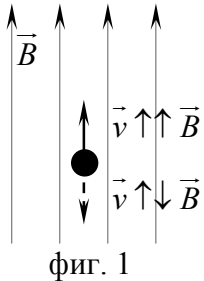


Движение на заредени частици в магнитно поле – частни случаи, приложение. Ефект на Хол

Движение на заредени частици в магнитно поле – частни случаи, приложение

Ще разгледаме по-подробно движението на заредени частици в еднородно магнитно поле, в зависимост от взаимната ориентация на скоростта \vec{v} на частиците и магнитната индукция \vec{B} на полето. Първо ще разгледаме два частни случая – когато направлението на векторите \vec{v} и \vec{B} са успоредни или перпендикулярни. Тогава частицата извършва възможно най-простите движения – равномерно праволинейно и равномерно по окръжност.



Ако $\vec{v} \uparrow \uparrow \vec{B}$ или $\vec{v} \uparrow \downarrow \vec{B}$ (фиг. 1), ъгълът между тях е $\alpha=0$ или $\alpha=\pi$ и $\sin\alpha=0$. Следователно в този случай големината на Лоренцовата сила (7 въпрос) е:

$$F_L = qvB \sin \alpha = 0,$$

т.е. ако зарядът q (независимо от неговия знак) се движи по направлението на магнитната индукция, на него не му действа никаква сила и съгласно първия принцип на Нютон (4 въпрос, Физика 1) ще продължи да се движи равномерно и праволинейно.

Нека сега зарядът q да навлиза в полето перпендикулярно на посоката на магнитната индукция ($\vec{v} \perp \vec{B}$, фиг. 2). Посоката на полето е към чертежа. В този случай силата на Лоренц има максимална големина $F_L=qvB$ (7 въпрос). Посоката на силата е перпендикулярна на посоката на скоростта \vec{v} и ще предизвика само промяна на посоката ѝ. Тъй като полето е еднородно ($B=\text{const}$) и скоростта не се променя по големина ($v=\text{const}$), силата също не се променя по големина и движението ще бъде с постоянно нормално ускорение $a_n=v^2/R=\text{const}$, откъдето следва, че и $R=\text{const}$ т.е. движението ще бъде равномерно по окръжност с радиус R . Като имаме предвид втория принцип на Нютон (4 въпрос, Физика 1), можем да определим радиуса R на тази окръжност:

$$a_n = \frac{v^2}{R} = \frac{F_L}{m} = \frac{qvB}{m},$$

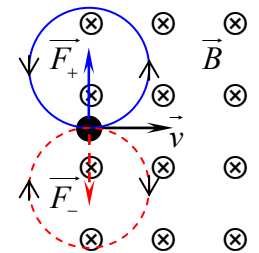
$$(1) R = \frac{mv}{qB}.$$

Виждаме, че колкото по-голяма е масата m на заредената частица при еднакви други условия, толкова по-голям е радиусът R на окръжността, по която се движи т.е. толкова по-слабо тя се отклонява от направлението си на движение. Тъй като движението е равномерно по окръжност, можем да определим и периода T на обикаляне по окръжността, като използваме определението за период (9 въпрос, Физика 1) и връзките между линейни и ъглови величини (10 въпрос, Физика 1):

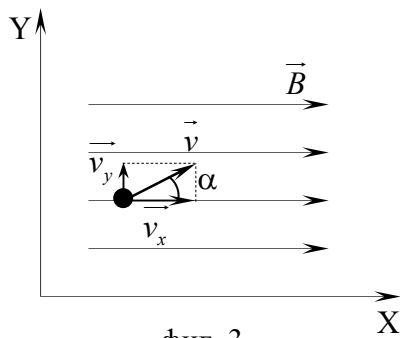
$$(2) T = \frac{2\pi}{\omega} = \frac{2\pi R}{v} = \frac{2\pi m}{qB},$$

който не зависи от скоростта, с която частицата навлиза в полето.

Посоката на Лоренцовата сила зависи и от знака на заряда (7 въпрос). Затова, при навлизане в магнитното поле, положителните и отрицателните заряди ще се отклоняват в противоположни посоки (на фиг. 2 – плътната окръжност за положителен заряд и пунктирната за отрицателен).



фиг. 2



фиг. 3

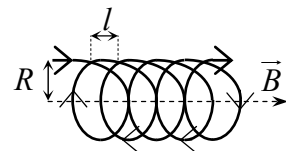
При навлизане на заредената частица в полето под произволен ъгъл α спрямо посоката на магнитната индукция (фиг. 3), движението ѝ може да се представи като суперпозиция от две движения (4 въпрос, Физика 1) – по направление на магнитната индукция \vec{B} със скорост $v_x=v\cos\alpha$ и перпендикулярно на полето със скорост $v_y=v\sin\alpha$. За тези две движения са в сила разсъжденията, които направихме досега. По посока на индукцията частицата ще се движи равномерно и праволинейно със скорост $v\cos\alpha$, като за време, равно на един период T (2), описва окръжност, в равнина перпендикулярна на \vec{B} , с радиус (1):

$$(3) R = \frac{mv_y}{qB} = \frac{mv \sin \alpha}{qB},$$

тъй като скоростта v в посока перпендикулярна на полето е $v\sin\alpha$. За това време частицата ще се премести по посока на индукцията на разстояние:

$$(4) l = v_x T = vT \cos \alpha = \frac{2\pi m v \cos \alpha}{qB}$$

Следователно в общия случай, когато частицата навлиза в полето под произволен ъгъл, тя извършва по-сложно движение, по т.нар. витлова линия (фиг. 4) със стъпка l (4) и радиус R (3).



фиг. 4

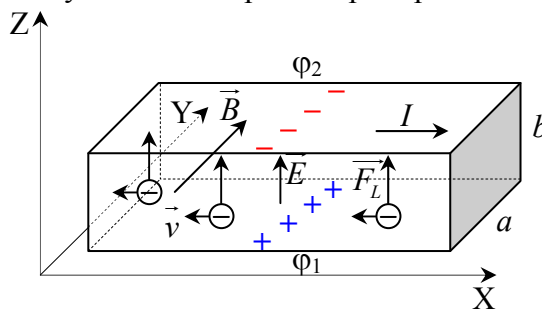
Движението на заредени частици в магнитно поле намира много широко приложение в науката и техниката. Може да бъде измерена масата на молекулите, след тяхното йонизиране, с маспектрометър, като се определи радиусът R на кривината (1) на траекторията им (колкото е по-голяма масата на получения йон, толкова по-голям ще бъде радиусът R). Може да се разделят снопове положително и отрицателно заредени частици (фиг. 2), които след това могат да бъдат ускорявани в ускорители за заредени частици.

Ефект на Хол

Лоренцовата сила, която действа на заредени частици, които се движат в магнитно поле, е отговорна за един интересен ефект, който също намира голямо приложение – ефектът на Хол. Нека вместо линеен проводник, да използваме метална пластинка с ширина a и височина b , по която тече постоянен ток I по избраната ос X (фиг. 5). Ако поставим пластинката в еднородно магнитно поле с индукция \vec{B} , перпендикулярна на посоката на тока по оста Y , между горната и долната стена (по оста Z на фиг. 5) на пластинката възниква потенциална разлика $\Delta\phi$. Хол е установил, че тази потенциална разлика е право пропорционална на големините на тока I и магнитната индукция B и обратно пропорционална на ширината на пластинката a :

$$(5) \Delta\phi = R \frac{IB}{a}$$

Коефициентът на пропорционалност R е наречен константа на Хол. Знакът на тази константа (в избрана координатна система) се определя от посоката на създаденото електрично поле. За случая, показан на фиг. 5 (метален проводник, в който токовете носители са електрони с отрицателен заряд), $R < 0$, защото $\phi_2 < \phi_1 \Rightarrow \Delta\phi = \phi_2 - \phi_1 < 0$ т.е. възникналото електрично поле е в положителната посока



фиг. 5

на оста Z . Тъй като ефектът на Хол се наблюдава и в полупроводници, по знака на R можем да определим знака на токовете носители в полупроводника, а оттам и типа проводимост – p - или n -тип.

Формула (5) може да бъде изведена на базата на прости разсъждения. На електроните в металния проводник действа сила на Лоренц, която в дадения случай действа нагоре. Тъй като скоростта на насочено движение на електроните $\vec{v} \perp \vec{B}$, силата е максимална – $F_L = qvB$ (7 въпрос). Следователно електроните ще започват да се натрупват в горния край на пластинката и той се зарежда отрицателно, което довежда до обедняване на електрони в долния край – той ефективно се зарежда положително. При това преразпределение на зарядите в пластинката се създава електрично поле, с интензитет \vec{E} насочен от долната към горната стена на пластинката т.е. електричната сила, с големина $F_e = qE$ (23 въпрос, Физика 1), действа на електроните в посока, обратна на Лоренцовата сила (зарядът на електроните е отрицателен и силата е в посока, обратна на интензитета на електричното поле). Когато двете сили се изравнят по големина настъпва равновесие и се установява постоянната потенциална разлика $\Delta\phi$ между горната и долната стена на пластинката (5), която можем да измерим:

$$(6) \Delta\phi = \frac{1}{nq} \frac{IB}{a} = R \frac{IB}{a}$$

Използвахме формулата за тока (29 въпрос, Физика 1) и връзката между интензитета и потенциала на електростатично поле (25 въпрос, Физика 1), като в случая интензитета е насочен по оста Z и затова $\Delta r = \Delta z = b$. От (6) можем да получим и стойността на константата на Хол:

$$R = \frac{1}{nq},$$

т.е. тя зависи само от концентрацията на токовите носители и заряда им. Това ни дава възможност освен да определяме заряда на токовите носители (от знака на R), ако знаем какви са носителите (напр. в металите знаем, че са електрони и знаем знака и големината на заряда) да определяме концентрацията им след като определим експериментално константата на Хол R . На основата на ефекта на Хол също така се изработват уреди за определяне на големина на тока и магнитна индукция.