

Сегодня нам совершенно ясно, что между магнетизмом и электричеством существует тесная связь, однако впервые ее обнаружили лишь в прошлом веке. История же магнетизма уходит корнями в глубокую древность, к античным цивилизациям Малой Азии. Именно на территории Малой Азии, в Магнезии, находили горную породу, образцы которой притягивали друг друга. По названию местности такие образцы и стали называть «магнитами».

28.1. Магниты и магнитные поля

Магнит притягивает скрепки, гвозди и другие железные предметы. Любой магнит в форме стержня или подковы имеет два торца, которые называют полюсами; именно в этом сильнее всего и проявляются его магнитные свойства. Если подвесить магнит на нитке, один полюс всегда будет указывать на север. Точно не известно, когда этот факт был впервые обнаружен, но китайские мореплаватели использовали его для целей навигации уже в XI в., а возможно, и раньше. Разумеется, на этом же принципе основан и компас. Стрелка компаса — это всего лишь магнит с точкой опоры в своем центре масс, так что он может свободно вращаться. Обращенный на север полюс свободно висящего магнита называют *северным полюсом* магнита (*N*). Противоположный полюс направлен на юг и называется *южным полюсом* (*S*).

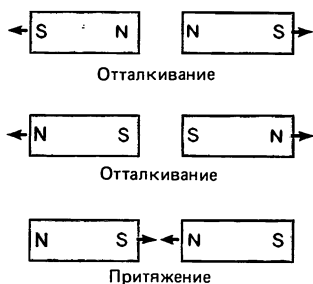
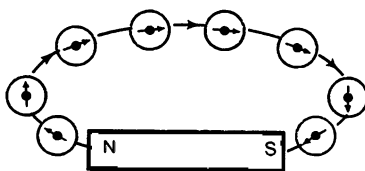


Рис. 28.1. Одноименные полюса магнитов отталкиваются, разноименные притягиваются.

Хорошо известно, что, если поднести два магнита друг к другу, между ними действует сила. Магниты либо притягивают друг друга, либо отталкиваются; их взаимодействие ощущается даже тогда, когда магниты не соприкасаются. Если к северному полюсу одного магнита поднести северный полюс другого, магниты будут отталкиваться; то же самое будет, если поднести магниты друг к другу южными полюсами. Но если к северному полюсу одного магнита поднести южный полюс другого, возникает притяжение (рис. 28.1). Это напоминает взаимодействие электрических зарядов: одноименные полюса отталкиваются, а разноименные притягиваются. Но не следует смешивать полюса магнитов и электрические заряды: это совсем разные вещи.

Рис. 28.2. Изображение силовой линии стержневого магнита с помощью магнитных стрелок.



Сильные магнитные свойства наблюдаются лишь у железа и некоторых других веществ, например кобальта, никеля, гадолиния. Эти вещества называют *ферромагнитными* (от латинского *ferrum* – железо). Все прочие вещества тоже обладают магнитными свойствами, но настолько слабыми, что их можно обнаружить лишь с помощью чувствительных приборов (подробнее об этом см. в гл. 29).

Мы уже видели, насколько полезной оказалась концепция электрического поля, окружающего электрический заряд. Аналогично представление о том, что вокруг магнита существует *магнитное поле*. Силу, с которой один магнит действует на другой, можно рассматривать как результат взаимодействия одного магнита с магнитным полем другого. И так же, как мы рисовали силовые линии электрического поля, можно изображать и силовые линии магнитного поля. Их проводят, как и в случае электрического поля, таким образом, чтобы 1) магнитное поле было направлено по касательной к силовой линии в любой точке и 2) число линий на единицу площади было пропорционально величине магнитного поля.

Направление магнитного поля в данной точке можно определить как направление, которое указывает северный полюс стрелки компаса, помещенной в эту точку. На рис. 28.2 показано, как с помощью стрелки компаса можно установить направление одной из силовых линий магнитного стержня, а на рис. 28.3 – силовые линии, построенные таким же способом для подковообразного магнита и магнитного стержня. Обратите внимание на то, что в соответствии с нашим определением силовые линии всегда направлены от северного полюса магнита к южному.

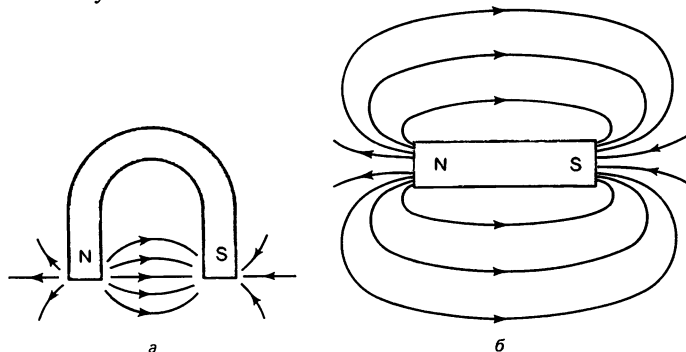
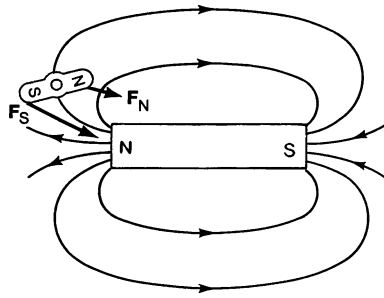


Рис. 28.3. Силовые линии подковообразного магнита (а) и магнитного стержня (б).

Рис. 28.4. В магнитном поле на стрелку компаса действует вращающий момент, стремящийся ориентировать ее параллельно силовым линиям магнитного поля. Момент равен нулю, когда стрелка параллельна направлению силовой линии в данной точке. (Показаны только силы притяжения; попытайтесь изобразить силы отталкивания и показать, что создаваемый ими момент действует аналогичным образом.)



Магнитное поле в любой точке можно определить как вектор \mathbf{B} , направление которого устанавливается описанным выше способом. Величину \mathbf{B} можно определить через вращающий момент, действующий на магнитную стрелку, когда она не ориентирована вдоль магнитной силовой линии (рис. 28.4). Чем больше момент, тем сильнее магнитное поле. Пока что мы можем пользоваться этим (не вполне строгим) определением; более точное определение будет дано в разд. 28.3. Вектор \mathbf{B} часто предпочитают называть не просто «магнитным полем», а «плотностью магнитного потока» или *магнитной индукцией*.

Магнитное поле Земли показано на рис. 28.5. Поскольку по определению северный полюс магнитной стрелки указывает на север, соответствующий магнитный полюс Земли оказывается южным магнитным полюсом (ведь северный полюс одного магнита притягивается к южному полюсу другого). А магнитный полюс Земли вблизи южного географического полюса является северным полюсом Земли-магнита. Магнитные полюса Земли не совпадают с положением географических полюсов, находящихся на оси вращения Земли. Южный магнитный полюс, например, расположен на севере Канады, в

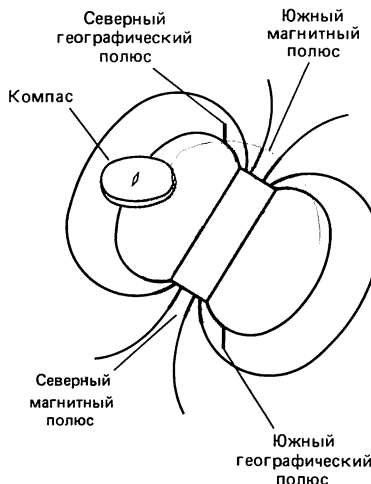


Рис. 28.5. Земля подобна огромному магниту, южный полюс которого находится вблизи северного географического полюса.

1500 км от северного географического полюса¹⁾. Это следует учитывать при пользовании магнитным компасом. Угол между направлением магнитной стрелки и истинным направлением на север называется магнитным склонением; на территории США магнитное склонение меняется в зависимости от места от 0 до примерно $25^{\circ 2)}$.

28.2. Магнитное поле, создаваемое электрическим током

На протяжении XVIII в. многие естествоиспытатели делали попытки установить связь между электричеством и магнетизмом. Первым, кому это удалось, был Ханс Кристиан Эрстед (1777–1851). Эрстед был всегда убежден в единстве природы. Интуитивно он чувствовал необходимость существования связи между электрическими и магнитными явлениями. Но стационарные электрические заряды не взаимодействовали с магнитом. В 1820 г. Эрстед обнаружил, что магнитная стрелка, расположенная рядом с электрическим проводником, отклоняется, когда проводник подключают к батарее и по нему течет электрический ток.

Магнитная стрелка, как известно, отклоняется магнитным полем. Таким образом, Эрстед обнаружил, что *электрический ток создает магнитное поле*, и установил существование связи между электричеством и магнетизмом.

Вблизи прямолинейного проводника с током магнитная стрелка устанавливается по касательной к окружности, очерченной вокруг проводника (рис. 28.6). Иными словами, силовые линии магнитного поля проводника с током имеют вид окружностей, в центре которых на-

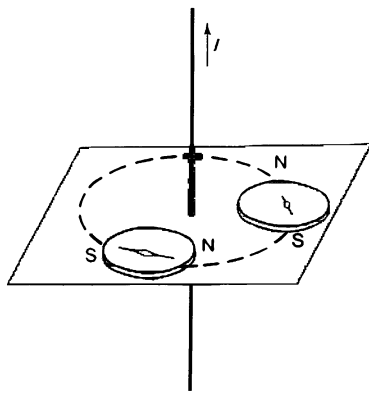
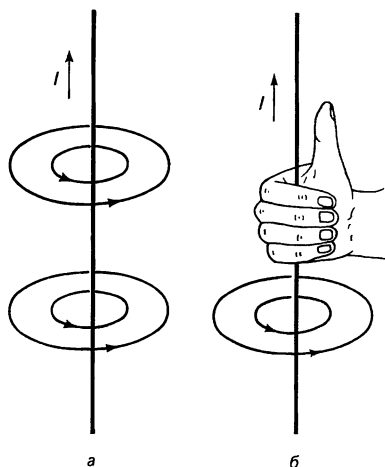


Рис. 28.6. Магнитная стрелка отклоняется вблизи проводника с током, что указывает на существование магнитного поля и позволяет определить направление силовых линий.

¹⁾ Координаты южного магнитного полюса $71,2^{\circ}$ с. ш. и $150,8^{\circ}$ в. д.; северного $-70,5^{\circ}$ ю. ш. и 96° з. д.— *Прим. перев.*

²⁾ Для Москвы магнитное склонение (восточное) составляет около $6,5^{\circ}$.— *Прим. перев.*

Рис. 28.7. *а* – силовые линии магнитного поля вокруг проводника с током; *б* – правило правой руки для определения направления силовых линий: если обхватить проводник правой рукой так, что большой палец указывает направление тока положительных зарядов, то остальные пальцы показывают направление силовых линий магнитного поля тока.

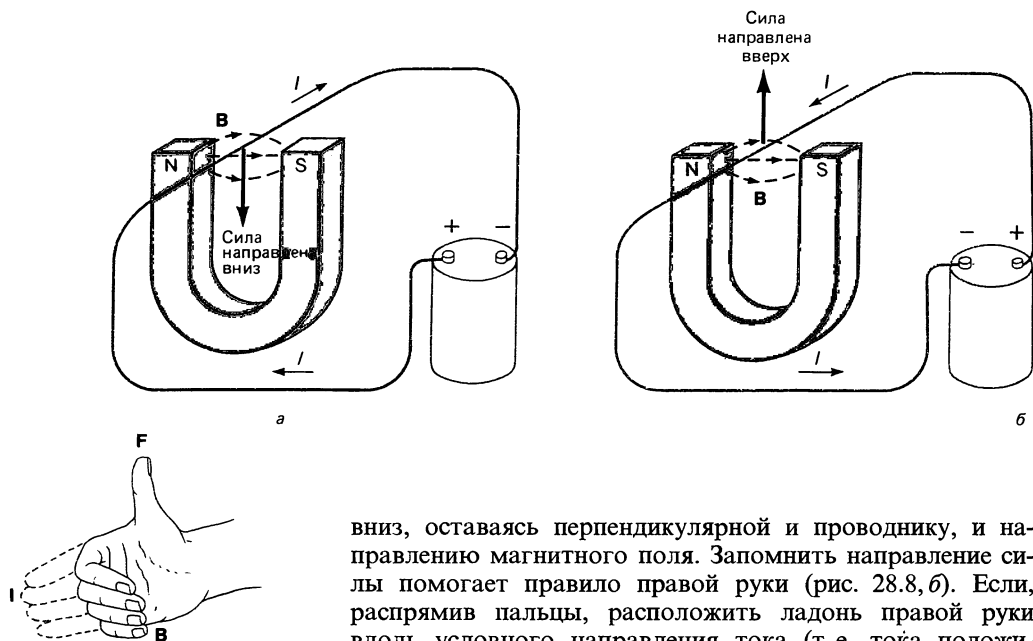


ходится проводник (рис. 28.7, *а*). Направление силовых линий указывается северным полюсом магнитной стрелки на рис. 28.6. Для определения направления силовых линий магнитного поля проводника с током служит *правило правой руки*: проводник мысленно обхватывается правой рукой так, чтобы большой палец указывал в направлении тока (положительных зарядов); тогда остальные пальцы окажутся загнуты в направлении силовых линий (рис. 28.7, *б*).

28.3. Сила, действующая на проводник с током в магнитном поле. Определение вектора магнитной индукции \mathbf{B}

Как было показано в предыдущем разделе, со стороны проводника с током на магнит (например, на магнитную стрелку) действует сила. В соответствии с третьим законом Ньютона следовало бы ожидать и обратного: магнит тоже должен создавать силу, действующую на проводник с током. Этот эффект действительно существует и также был обнаружен Эрстедом.

Рассмотрим более внимательно силу, действующую на проводник с током. Поместим прямолинейный проводник между полюсами подковообразного магнита (рис. 28.8). Когда по проводнику пропускают ток, на него действует сила; сила эта, однако, *не* направлена к одному из полюсов магнита. Она направлена *под прямым углом к направлению магнитного поля*. Если изменить направление тока на противоположное, сила будет действовать в противоположную сторону. Опыт показывает, что сила, действующая на проводник с током, всегда перпендикулярна и проводнику, и вектору магнитной индукции \mathbf{B} . В этом описании содержится неопределенность – на рис. 28.8, *а* сила может быть направлена либо вверх, либо



Правило правой руки

Рис. 28.8. Сила, действующая на проводник с током в магнитном поле с индукцией B .

вниз, оставаясь перпендикулярной и проводнику, и направлению магнитного поля. Запомнить направление силы помогает правило правой руки (рис. 28.8, б). Если, распрямив пальцы, расположить ладонь правой руки вдоль условного направления тока (т.е. тока положительных зарядов), а затем согнуть пальцы так, чтобы они совпали с направлением вектора магнитной индукции (если при этом придется повернуть кисть, то следите, чтобы выпрямленные пальцы всегда указывали направление тока), то отведенный вбок большой палец укажет направление силы, действующей на проводник с током.

Мы выяснили направление силы. А что можно сказать о ее величине? Экспериментально обнаружено, что величина силы прямо пропорциональна силе тока I в проводнике, длине l проводника в магнитном поле (которое предполагается однородным) и магнитной индукции B . Сила зависит также от угла θ между проводником и направлением магнитного поля. Когда проводник перпендикулярен силовым линиям магнитного поля, сила максимальна; когда проводник параллелен силовым линиям, сила обращается в нуль. В промежуточных положениях сила пропорциональна $\sin \theta$ (рис. 28.9). Таким образом,

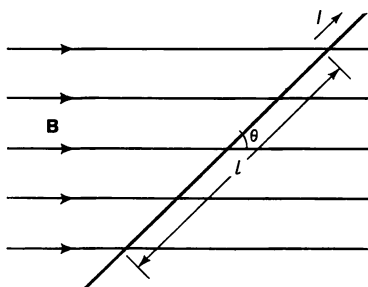
$$F \sim IlB \sin \theta.$$

Мы говорили, что величину индукции магнитного поля можно определить через вращающий момент, действующий со стороны поля на магнитную стрелку (см. рис. 28.4). Но мы не дали строгого определения индукции поля. В действительности магнитная индукция B определяется приведенным выражением, в котором коэффициент пропорциональности равен 1:

$$F = IlB \sin \theta. \quad (28.1)$$

Если проводник перпендикулярен направлению поля

Рис. 28.9. Токонесущий проводник в магнитном поле с индукцией \mathbf{B} .



($\theta = 90^\circ$), то

$$F_{\text{макс}} = IlB \quad [l \perp \mathbf{B}], \quad (28.2)$$

а если параллелен ($\theta = 0^\circ$), то сила равна нулю.

Подведем итог сказанному. Вектор магнитной индукции \mathbf{B} определяется следующим образом. Его направление совпадает с направлением прямолинейного проводника с током, когда действующая на проводник со стороны магнитного поля сила равна нулю [$\theta = 0$ в формуле (28.1)]. Абсолютная величина \mathbf{B} определяется из формулы (28.2):

$$B = \frac{F_{\text{макс}}}{Il},$$

где $F_{\text{макс}}$ – максимальное значение силы, действующей на прямолинейный отрезок l проводника, по которому течет ток силой I ($F_{\text{макс}}$ соответствует $\theta = 90^\circ$).

Связь между силой \mathbf{F} , действующей на проводник, по которому течет ток силой I , и вектором магнитной индукции \mathbf{B} может быть записана в векторной форме. Для этого достаточно вспомнить, что направление \mathbf{F} определяется правилом правой руки (рис. 28.8, б), а величина – формулой (28.1), что соответствует данному ранее определению векторного произведения (разд. 10.1), т. е.

$$\mathbf{F} = I\mathbf{l} \times \mathbf{B}, \quad (28.3)$$

где \mathbf{l} – вектор, равный по величине длине проводника и направленный вдоль проводника в сторону условного направления тока (т. е. тока положительных зарядов).

Эти рассуждения справедливы для случая однородного магнитного поля и прямолинейного проводника. Если же поле не однородно или проводник не везде составляет одинаковый угол с \mathbf{B} , то (28.3) можно записать в дифференциальной форме:

$$d\mathbf{F} = Id\mathbf{l} \times \mathbf{B}, \quad (28.4)$$

где $d\mathbf{F}$ – сила, действующая на элемент проводника длиной $d\mathbf{l}$. Полная сила, действующая на проводник, определяется интегрированием.

В системе СИ единицей магнитной индукции B является *тесла* (Тл). Из формул (28.1)–(28.4) ясно, что $1 \text{ Тл} = 1 \text{ Н}/(\text{А} \cdot \text{м})$; эта единица раньше называлась также «вебер на квадратный метр» ($1 \text{ Вб}/\text{м}^2 = 1 \text{ Тл}$). Часто маг-

нитную индукцию выражают и в единицах системы СГС *гауссах* (Гс); $1 \text{ Гс} = 10^{-4} \text{ Тл}$, но при расчетах с использованием единиц СИ гауссы необходимо переводить в теслы. Чтобы дать представление о масштабах этих единиц, укажем, что магнитное поле Земли у ее поверхности соответствует магнитной индукции порядка 0,5 Гс, или $0,5 \cdot 10^{-4} \text{ Тл}$. С другой стороны, мощные электромагниты способны создавать поля в 1–2 Тл, а сверхпроводящие электромагниты – свыше 10 Тл.

Пример 28.1. Прямоугольная проволочная рамка подвешена вертикально (рис. 28.10). Поле с магнитной индукцией \mathbf{B} направлено горизонтально, перпендикулярно плоскости рамки. Символ \odot , напоминающий наконечник стрелы, показывает, что вектор \mathbf{B} направлен «из страницы» навстречу читателю; векторы, направленные «в страницу», мы обозначаем знаком \times – как оперение улетающей стрелы. Магнитное поле практически однородно вдоль нижнего горизонтального участка рамки ab (длина $l = 10,0 \text{ см}$) в середине большого магнита, создающего поле. Магнит расположен симметрично, так что неоднородность \mathbf{B} одинакова для обоих вертикальных участков рамки; верхний горизонтальный участок рамки находится в области, где поле отсутствует. Рамка подвешена к динамометру, который показывает направленную вниз силу

$F = 3,48 \cdot 10^{-2} \text{ Н}$, когда по витку течет ток силой $I = 0,245 \text{ А}$. Чему равна магнитная индукция B в центре магнита?

Решение. Силы, действующие со стороны магнитного поля на вертикальные участки рамки, равны по величине и противоположны по направлению. Следовательно, регистрируемая динамометром магнитная сила действует на горизонтальную часть ab длиной $l = 0,100 \text{ м}$:

$$B = \frac{F}{Il} = \frac{3,48 \cdot 10^{-2} \text{ Н}}{(0,245 \text{ А})(0,100 \text{ м})} = 1,42 \text{ Тл}.$$

Кстати говоря, описанный метод позволяет очень точно измерять магнитную индукцию.

Пример 28.2. Жесткий проводник, по которому течет ток силой I , состоит из полуокружности радиусом R и двух прямолинейных участков (рис. 28.11). Проводник расположен перпендикулярно однородному полю с магнитной индукцией \mathbf{B} . Длина прямолинейных участков, на-

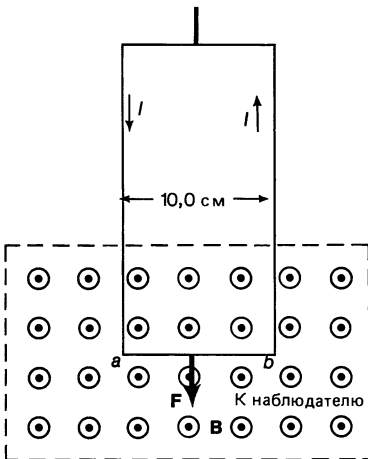


Рис. 28.10. Измерение индукции магнитного поля \mathbf{B} (пример 28.1).

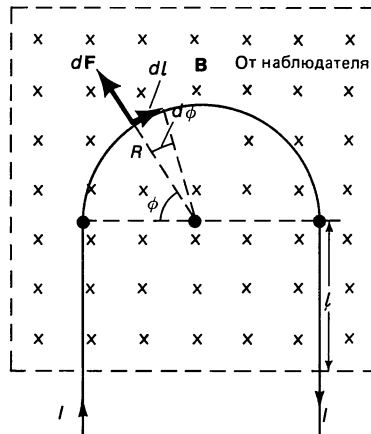


Рис. 28.11. К примеру 28.2.

ходящихся в магнитном поле, одинакова и равна l . Определите силу, действующую на проводник со стороны магнитного поля.

Решение. Силы, действующие на прямолинейные участки, одинаковы по величине ($= IlB$) и противоположны по направлению, так что они взаимно уравновешиваются. Поэтому результирующая сила, действующая на проводник, приходится на его дугообразную часть. Разобьем полуокружность на участки длиной $dl = Rd\phi$, как показано на рис. 28.11, и воспользуемся формулой (28.4):

$$dF = IBRd\phi,$$

где dF — сила, действующая на участок $dl = Rd\phi$, а угол между dl и \mathbf{B} равен 90° , так что в векторном произведении $\sin \theta = 1$. В силу симметрии силы, действующие в горизонтальном направлении на симметричные участки полуокружности, взаимно уравновешиваются, и нас интересуют поэтому только вертикальные компоненты $dF \sin \phi$. Полная сила, действующая на проводник, будет равна

$$\begin{aligned} F &= \int_0^\pi dF \sin \phi = IBR \int_0^\pi \sin \phi d\phi = \\ &= -IBR \cos \phi \Big|_0^\pi = 2IBR \end{aligned}$$

и направлена вертикально вверх.

28.4. Движение электрического заряда в магнитном поле

Итак, на проводник, по которому протекает электрический ток, в магнитном поле действует сила. Поскольку ток в проводнике представляет собой движение электрических зарядов, то следует ожидать, что и на заряды, свободно движущиеся в магнитном поле (вне проводника), со стороны магнитного поля будет действовать сила. Так оно и происходит.

Исходя из уже известных нам фактов, можно рассчитать силу, действующую на движущийся электрический заряд. Если через данную точку за время t проходит n частиц с зарядом q каждая, то они создают ток силой $I = nq/t$. Пусть t — время, за которое заряд q проходит расстояние l в поле с магнитной индукцией \mathbf{B} ; тогда $l = vt$, где v — скорость частицы. Согласно (28.3), сила, действующая на эти частицы, равна $\mathbf{F} = I\mathbf{l} \times \mathbf{B} = (nq/t)(vt) \times \mathbf{B} = nqv \times \mathbf{B}$. А сила, действующая на одну из этих n частиц, равна

$$\mathbf{F} = q\mathbf{v} \times \mathbf{B}. \quad (28.5)$$

Этот результат подтверждается экспериментом. Величина этой силы равна

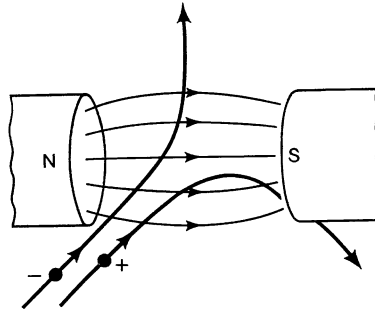
$$F = qvB \sin \theta. \quad (28.6)$$

Мы получили выражение для силы, действующей на частицу с зарядом q , которая движется со скоростью v в поле с магнитной индукцией \mathbf{B} ; угол между v и \mathbf{B} равен θ . Сила максимальна, когда частица движется перпендикулярно направлению \mathbf{B} ($\theta = 90^\circ$):

$$F = qvB \quad [v \perp B],$$

и равна нулю, когда частица движется вдоль силовых линий ($\theta = 0^\circ$). Направление силы перпендикулярно век-

Рис. 28.12. Сила, действующая на движущиеся заряженные частицы в магнитном поле.



тору магнитной индукции \mathbf{B} и скорости \mathbf{v} частицы и определяется по правилу правой руки: ладонь правой руки располагается так, чтобы выпрямленные пальцы указывали направление движения частицы (\mathbf{v}), а если их согнуть – направление \mathbf{B} ; тогда большой палец будет указывать направление силы. Это верно только для *положительно* заряженных частиц (на рис. 28.12 сила направлена вниз). Для отрицательно заряженных частиц направление силы будет противоположным (вверх на рис. 28.12).

Пример 28.3. Протон, движущийся вертикально вверх со скоростью $5,0 \cdot 10^6$ м/с в однородном магнитном поле, испытывает действие силы $8,0 \cdot 10^{-14}$ Н, направленной на запад. Когда протон движется горизонтально на север, сила равна нулю. Чему равны величина и направление вектора магнитной индукции в этой области?

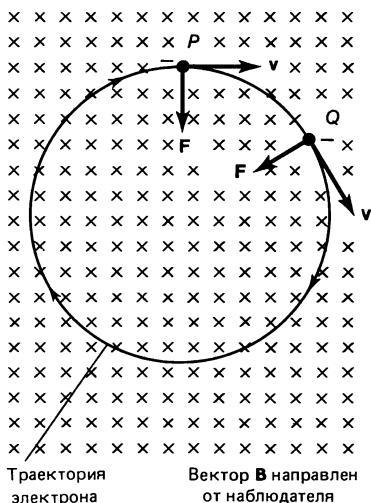
Решение. Поскольку действующая на протон сила равна нулю, когда он движется на север, силовые линии поля располагаются в направлении север–юг. Правило правой руки подсказывает, что

вектор \mathbf{B} должен быть направлен на север, чтобы при движении протона вверх сила была направлена к западу (большой палец указывает на запад, если выпрямленные пальцы направлены вверх, а сгибаются на север). Согласно формуле (28.6), при $\theta = 90^\circ$

$$B = \frac{F}{qv} = \frac{8,0 \cdot 10^{-14} \text{ Н}}{(1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл})(5,0 \cdot 10^6 \text{ м/с})} = 0,10 \text{ Тл.}$$

Траектория заряженной частицы, движущейся в плоскости, перпендикулярной силовым линиям однородного магнитного поля, представляет собой окружность (или дугу окружности, если частица покидает поле). Это видно из рис. 28.13. Здесь магнитное поле направлено *за* чертеж (на что указывают крестики). Электрон в точке P движется вправо, и на него действует сила, направленная вниз. Соответственно электрон отклоняется вниз. Когда электрон попадает, скажем, в точку Q , сила остается перпендикулярной скорости и направлена, как показано на чертеже. Поскольку сила всегда перпендикулярна \mathbf{v} , абсолютная величина скорости не изменяется, и частица движется по окружности. Действующая на частицу сила всегда направлена по радиусу к центру окружности. Обратите внимание на то, что электрон на рис. 28.13 дви-

Рис. 28.13. В однородном магнитном поле заряженная частица (электрон) движется по криволинейной траектории.



жется по часовой стрелке. На положительно заряженную частицу сила действовала бы в противоположном направлении, и она двигалась бы против часовой стрелки.

Пример 28.4. Электрон движется со скоростью $2,0 \cdot 10^7$ м/с в плоскости, перпендикулярной полю с магнитной индукцией 0,10 Тл. Опишите его траекторию.

Решение. Радиус кривизны траектории находим из второго закона Ньютона $F = ma$ с учетом того, что ускорение частицы при движении по окружности равно $a = v^2/r$;

$$F = ma,$$

$$qvB = \frac{mv^2}{r}.$$

Отсюда находим

$$r = \frac{mv}{qB}.$$

Так как F перпендикулярна v , величина скорости не изменяется. Из полученного равенства видно, что если $\mathbf{V} = \text{const}$, то и $r = \text{const}$, и траектория представляет собой окружность, о чем говорилось выше. Подставляя численные значения, находим

$$r = \frac{(9,1 \cdot 10^{-31} \text{ кг})(2,0 \cdot 10^7 \text{ м/с})}{(1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл})(0,10 \text{ Тл})} = 1,1 \cdot 10^{-3} \text{ м},$$

или 1,1 мм.

Время T , за которое частица с зарядом q , движущаяся с постоянной скоростью v в однородном магнитном поле ($\mathbf{B} \perp \mathbf{v}$), совершит один полный оборот, равно

$$T = \frac{2\pi r}{v},$$

где $2\pi r$ — длина круговой траектории. Из примера 28.4 $r = mv/qB$, и

$$T = \frac{2\pi m}{qB},$$

а частота обращения равна

$$f = \frac{1}{T} = \frac{qB}{2\pi m}. \quad (28.7)$$

Эту частоту часто называют *циклотронной частотой* частицы, движущейся в магнитном поле, поскольку именно с такой частотой происходит круговое движение частиц в циклотроне (разд. 28.8). Обратите внимание на то, что f не зависит от скорости v : при заданном значении B , чем больше v , тем больше r ($r = mv/qB$), но частота не зависит от v и r .

Если частица с зарядом q движется со скоростью v в области, где присутствуют и электрическое поле E , и магнитное поле с индукцией B , то на нее действует сила

$$F = q(E + v \times B) \quad (28.8)$$

[здесь мы воспользовались формулами (22.3) и (28.5)]. Это выражение определяет *силу Лоренца*. Убедитесь сами в том, что, когда E и B однородны и параллельны, заряженная частица будет двигаться по спирали.

28.5. Открытие электрона и его свойства

В современных представлениях об электричестве и магнетизме электрону отводится важнейшая роль. Однако первые предположения о его существовании относятся лишь к 90-м годам прошлого века. Рассказ об электроне вынесен в эту главу, поскольку магнитные поля сыграли ключевую роль в исследовании его свойств.

В конце прошлого века интенсивно изучался электрический разряд в разреженных газах. Один из разработанных для этого приборов (рис. 28.14) представлял собой стеклянную трубку с впаянными в нее электродами, откачанную до невысокого вакуума. Когда к электродам прикладывали высокое напряжение, пространство от катода до противоположного торца трубки казалось темным, но у противоположного торца трубки возникало свечение. Когда в трубку вводили одну или несколько перегородок с небольшим отверстием, свечение ограничивалось крошечным пятном в торце трубки. От катода к противоположному торцу трубки как будто шли какие-то лучи; эти лучи называли *катодными лучами*.

Природа катодных лучей вызвала много споров. Некоторые ученые считали, что они подобны свету. Но тот факт, что светлое пятно можно смещать под действием электрического или магнитного поля, наводил на мысль, что катодные лучи представляют собой заряженные час-

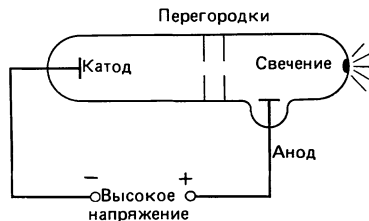


Рис. 28.14. Разрядная трубка. В некоторых конструкциях одна из перегородок одновременно служит анодом.

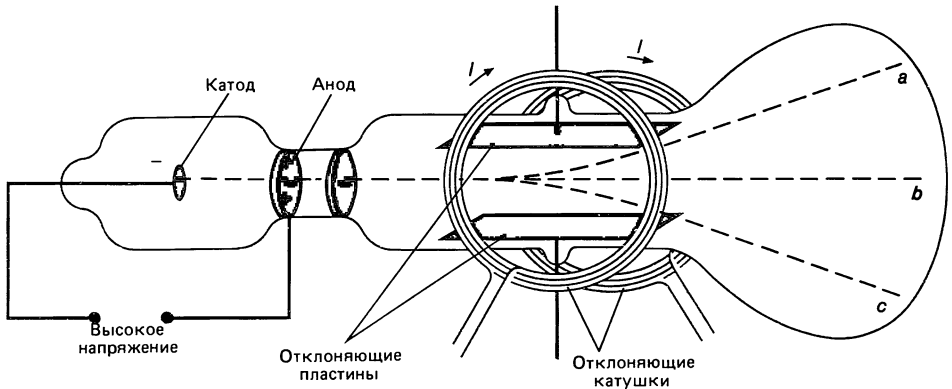


Рис. 28.15. Отклонение катодных лучей в электрическом и магнитном полях.

тыцы; направление отклонения соответствовало отрицательному заряду частиц. Кроме того, если трубка заполнялась определенными разреженными газами, вдоль траектории катодных лучей возникало слабое свечение.

Первые оценки заряда e предполагаемых частиц в катодных лучах, а также отношения заряда к массе e/m были сделаны в 1897 г.; в том же году Дж. Дж. Томсон (1856–1940) осуществил непосредственное измерение величины e/m , пользуясь прибором, показанным на рис. 28.15. Катодные лучи ускорялись большой разностью потенциалов и проходили между парой параллельных пластин, встроенных в трубку; приложенное к пластинам напряжение создавало между ними электрическое поле. Магнитное поле создавалось парой катушек. Когда включалось только электрическое поле (скажем, верхняя пластина положительна), катодные лучи отклонялись вверх (траектория a). Когда включалось только магнитное поле (направленное за чертеж), катодные лучи отклонялись вниз (траектория c). Так должны были вести себя отрицательно заряженные частицы. Сила, действующая на частицу катодных лучей со стороны магнитного поля, равна $F = evB$,

где e – заряд, а v – скорость частицы. В отсутствие электрического поля траектория катодных лучей искривляется, и, поскольку $F = ma$,

$$evB = \frac{mv^2}{r}$$

и

$$\frac{e}{m} = \frac{v}{Br}.$$

Значения r и B можно измерить. Скорость v можно определить, включая кроме магнитного электрическое поле. Напряженность поля E подбирается такой, чтобы компенсировалось отклонение катодных лучей (траекто-

рия b на рис. 28.15). В этом случае сила, действующая на частицы со стороны электрического поля, $F = eE$, в точности компенсируется силой, действующей со стороны магнитного поля, $F = evB$. Таким образом, $eE = evB$, и

$$v = \frac{E}{B}.$$

Объединяя это равенство с предыдущим, получаем

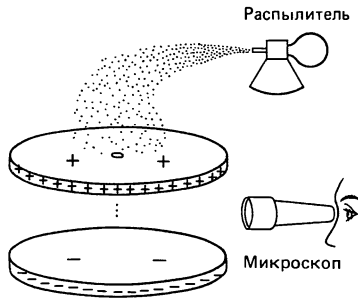
$$\frac{e}{m} = \frac{E}{B^2 r}. \quad (28.9)$$

Все величины в правой части можно измерить, и это позволяет определить отношение e/m (но не e и m по отдельности). Принятое сегодня значение отношения e/m равно $1,76 \cdot 10^{11}$ Кл/кг. Частицы катодных лучей стали называть **электронами**.

Следует заметить, что «открытие» электрона, как и многие другие открытия в науке, совсем не столь очевидно, как скажем, открытия месторождений золота или нефти. Следует ли считать первооткрывателем того, кто первым заметил свечение в трубке? Или того, кто назвал его катодными лучами? Наверное, ни того, ни другого, поскольку ни один из них не обладал представлением об электроны, характерным для наших дней. Обычно открытие электрона считают заслугой Дж. Дж. Томсона и вовсе не потому, что он первым наблюдал свечение в трубке. Представления Томсона оказались близки к современным: он не только полагал, что катодные лучи представляют собой крошечные отрицательно заряженные частицы, и провел тщательные измерения их свойств, но и утверждал, что эти частицы представляют собой составную часть атомов, а не являются атомами или ионами, как считали многие. Наконец, он разработал электронную теорию строения вещества. Вот почему ему приписывают это открытие. Заметьте, что ни он, ни кто-либо другой никогда не наблюдали электрона в буквальном смысле. Это краткое отступление должно служить иллюстрацией того, что в науке факт открытия не всегда очевиден. И вообще, некоторые науковеды считают, что слово «открытие» не всегда уместно, как, например, и в этом случае.

Томсон полагал, что электрон — это не атом, а его составная часть. Вскоре тому было получено и убедительное доказательство: удалось измерить по отдельности заряд и массу частиц катодных лучей. Ученик Томсона Дж. С. Таунсенд осуществил первые довольно грубые прямые измерения e в 1897 г. Но лишь изящный *опыт* Роберта Милликена (1868–1953) с *масляными каплями* позволил установить точное значение заряда электрона, а также показал, что электрический заряд существует в виде дискретных порций. В опыте Милликена крошечные капли минерального масла, несущие электрический заряд,

Рис. 28.16. Опыт Миллиkena.



опускались под действием силы тяжести в пространстве между двумя параллельными горизонтальными пластинами (рис. 28.16). Напряженность электрического поля E между пластинами подбирались такой, чтобы капля зависала в воздухе; сила тяжести mg , направленная вниз, компенсируется направленной вверх силой со стороны электрического поля. Тогда $qE = mg$ и заряд $q = mg/E$. Массу капли определяют, измеряя установившуюся скорость падения капли в воздухе в отсутствие поля с помощью формулы Стокса (разд. 13.7). (Капли слишком малы, чтобы их радиус можно было непосредственно измерить.) Одни капли оказывались заряженными положительно, другие — отрицательно; можно было предположить, что одни капли теряют электроны, другие — приобретают (по-видимому, в результате трения в распылителе). Кропотливые наблюдения Миллиkena и анализ полученных результатов предоставили убедительные доказательства того, что любой заряд является целым кратным некоторого минимального заряда $e = 1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл, который был приписан электрону. [По современным данным, как уже упоминалось в гл. 22, $e = (1,6021892 \pm \pm 0,0000046) \cdot 10^{-19}$ Кл, или округленно $1,602 \cdot 10^{-19}$ Кл.] Зная e и отношение e/m , можно определить и массу электрона: $(1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл}) / (1,76 \cdot 10^{11} \text{ Кл/кг}) = 9,1 \cdot 10^{-31} \text{ кг}$. Это более чем в тысячу раз меньше массы самого легкого атома, что подтверждает представление об электроне как о составной части атома. По современным данным, масса электрона равна

$$m_e = (9,109534 \pm 0,000047) \cdot 10^{-31} \text{ кг},$$

или округленно

$$m_e = 9,11 \cdot 10^{-31} \text{ кг}.$$

* 28.6. Термоэлектронная эмиссия. Электронно-лучевая трубка

В ходе своих опытов, связанных с разработкой электрической лампы, Томас Эдисон (1847–1931) сделал в 1883 г. интересное открытие. В откачанный баллон электрической лампы помимо нити накала он ввел дополнительный

электрод. Когда на этот электрод подавался положительный потенциал относительно нити накала, во внешней цепи шел ток, если нить накала была разогрета и светила (нить накала разогревалась током от отдельного источника). Если же на электрод подавался отрицательный потенциал, ток во внешней цепи отсутствовал. При холодной нити накала ток отсутствовал в любом случае. Это явление получило название *термоэлектронной эмиссии* (эффект Эдисона).

Эдисон не оценил всей важности своего открытия, приведшего в конце концов к созданию электронных вакуумных ламп. Объяснить это явление удалось лишь после того, как 10 лет спустя был открыт электрон.

В 1899 г. Дж. Дж. Томсон измерил e/m для носителей заряда в эффекте Эдисона; он получил то же значение, что и в случае катодных лучей в газоразрядной трубке при большой разности потенциалов (рис. 28.15). Это дало ему основание заключить, что в эффекте Эдисона нить накала испускает электроны – они как бы испаряются с раскаленной нити накала. Когда введенный в колбу электрод положителен, электроны притягиваются к нему, и идет ток; при подаче отрицательного потенциала электроны отталкиваются от электрода, и ток отсутствует.

«Испарение» электронов с горячей нити накала можно объяснить, рассматривая электроны подобно молекулам газа. Так можно поступать, если электроны перемещаются достаточно свободно; это согласуется с тем, что металлы являются хорошими проводниками. Однако электроны обычно не выходят за пределы проводника; существуют силы, препятствующие вылету электронов из металла. Действительно, если бы электроны срывались с поверхности проводника, поверхность приобретала бы положительный заряд, притягивающий электрон обратно. Чтобы покинуть металл, электрон должен обладать определенным минимумом кинетической энергии ($KЭ$) – точно так же, как молекулы в жидкости должны иметь определенную $KЭ$, чтобы «испариться» в газообразное состояние. Как говорилось в гл. 18, средняя кинетическая энергия $KЭ$ молекул газа пропорциональна абсолютной температуре T . Свободные электроны в металле тоже можно рассматривать (правда, в очень грубом приближении) как «электронный газ». Некоторые электроны обладают кинетической энергией выше средней, некоторые – ниже средней. При комнатной температуре лишь немногие электроны обладают кинетической энергией, достаточной для выхода из металла. При высоких температурах $KЭ$ возрастает, и металл покидает большее число электронов – это очень похоже на испарение жидкости, которое тем сильнее, чем выше температура. Таким образом, термоэлектронная эмиссия заметно проявляется только с ростом температуры. Теперь легко понять и результат Эдисона.

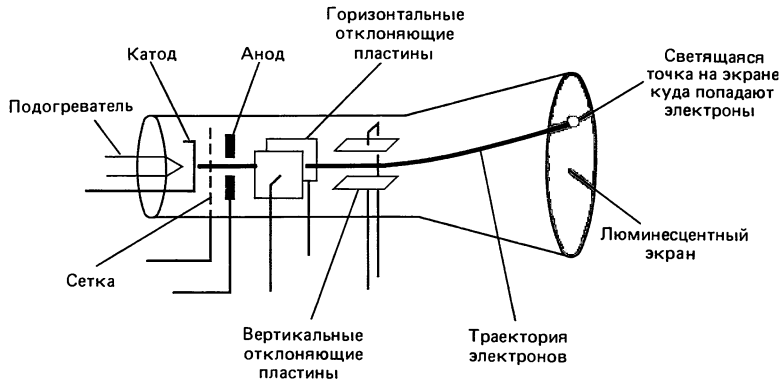
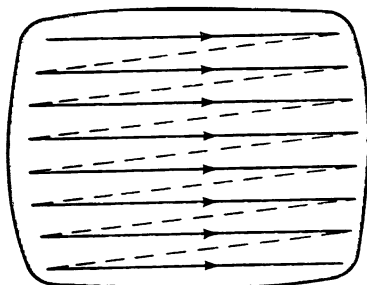


Рис. 28.17. Электронно-лучевая трубка. Вместо отклоняющих пластин нередко используются отклоняющие катушки.

Важным электронным прибором, действие которого основано на термоэлектронной эмиссии, является *электронно-лучевая трубка* (ЭЛТ). Она используется в телевизорах, осциллографах, дисплеях ЭВМ. Изображение в электронно-лучевой трубке создается «электронным лучом» внутри откачанной стеклянной колбы, который направляется на различные точки экрана. Устройство простой ЭЛТ показано на рис. 28.17. Электроны, испускаемые подогревным катодом, ускоряются высоким напряжением, приложенным между катодом и анодом (5000–50 000 В). Электроны выпускаются «электронной пушкой» через небольшое отверстие в аноде. Экран ЭЛТ покрыт изнутри люминофором, который светится под действием электронов. В том месте, где электронный пучок попадает на экран, появляется маленькая светящаяся точка. Электронный пучок отклоняется парой горизонтальных и парой вертикальных пластин, к которым прикладывается разность потенциалов: электроны притягиваются положительной пластиной. Изменяя напряжение на отклоняющих пластинах, можно создать светящееся пятно в любой точке экрана.

В кинескопах телевизоров вместо отклоняющих пластин обычно используют магнитные отклоняющие катушки. Электронный пучок обегает экран, как показано на рис. 28.18. В горизонтальном направлении электронный «луч» разворачивается пластинами или катушками горизонтального отклонения. Когда отклоняющее поле достигает максимума одной полярности, луч перемещается к краю экрана; когда поле уменьшается до нуля, луч попадает в центр; когда же поле достигает максимума другой полярности, луч перемещается к противоположному краю экрана. После того как луч пересекает экран в одном направлении, напряжение на отклоняющей системе скачком изменяется до первоначального значения, и электронный луч быстро возвращается назад. Одновременно катушки или пластины вертикального отклонения немного смещают электронный пучок вниз, и благодаря этому он вычерчивает на экране следующую строку. В США телевизионный стандарт соответствует разложению

Рис. 28.18. Ход луча в телевизионной развертке.



изображения на 525 строк по вертикали (в некоторых европейских системах телевидения «частота строк» почти вдвое больше, и изображение имеет более высокую четкость)¹⁾. Развертка всех 525 строк занимает $\frac{1}{30}$ с; на практике применяется так называемая чересстрочная развертка, в которой вначале (за $\frac{1}{60}$ с) развертываются все нечетные строки кадра, а затем за такое же время – все четные. Мы же видим цельную картину благодаря инерционности свечения люминофора и зрительного восприятия, составляющей около $\frac{1}{20}$ с. Изображение состоит на экране из светящихся точек различной яркости. Яркость зависит от напряжения на «сетке» ЭЛТ (управляющем электроде, который действительно может представлять собой проволочную сетку, через которую свободно пролетают электроны). Чем выше отрицательный потенциал сетки, тем меньше электронов проходит через нее. Потенциалом сетки управляет телевизионный (видео) сигнал, который передает телевизионная станция и принимает телевизор. Телевизионный сигнал содержит также импульсы синхронизации видеосигнала с горизонтальным и вертикальным отклонением электронного луча (строчной и кадровой развертки).

Осциллограф – прибор для усиления, измерения и визуального наблюдения электрических сигналов; он незаменим при исследовании процессов, быстро протекающих во времени: сигнал развертывается на экране ЭЛТ. Обычно осциллограф работает в режиме непрерывной развертки: электронный пучок отклоняется с постоянной частотой пластинами горизонтального отклонения, а на пластины вертикального отклонения подается усиленный исследуемый сигнал. На экране, таким образом, отображается зависимость напряжения сигнала (по вертикали) от времени (по горизонтали).

¹⁾ В СССР телевизионный стандарт предусматривает разложение изображения на 625 строк при 25 кадрах в секунду. – Прим. перев.

* 28.7. Масс-спектрометр

В начале нашего столетия был разработан ряд методов для определения массы атомов. Одним из наиболее точных приборов является *масс-спектрометр* (или масс-спектрограф) (рис. 28.19). Ионы исследуемого вещества образуются в источнике благодаря нагреву или электрическому разряду. Пройдя через щель S_1 , ионы попадают в скрещенные электрическое и магнитное поля (как в приборе Томсона). Только ионы, имеющие скорость $v = E/B$, пройдут эту область без отклонений и смогут попасть в щель S_2 . [Подобное устройство называется селектором скоростей; см. формулу (28.9) и пояснения перед ней.] В области за щелью S_2 существует только магнитное поле B' , и ионы движутся по дуге окружности. Радиус кривизны их траектории можно измерить, поставив на пути ионов фотографическую пластинку (фотопленку), которая засвечивается в тех местах, куда попадают ионы. Так как $qvB' = mv^2/r$ и $v = E/B$, получаем

$$m = \frac{qB'r}{v} = \frac{qBB'r}{E}.$$

Все величины в правой части могут быть измерены, и таким образом определена масса m . Для ионов с одинаковым зарядом масса пропорциональна радиусу их траектории.

Таким методом были измерены массы многих атомов. При исследовании химически чистых веществ иногда обнаруживались две или несколько близких линий на фотопленке. Неон, например, давал две линии, соответствующие радиусам кривизны для атомов с массами 20 и 22 а. е. м. Наличие примесей исключалось, и был сделан вывод, что существуют два вида атомов неона с различными массами. Различающиеся по массе атомы одного и того же химического вещества были названы *изотопами*. Вскоре выяснилось, что большинство элементов встречается в природе в виде смеси изотопов. Различие

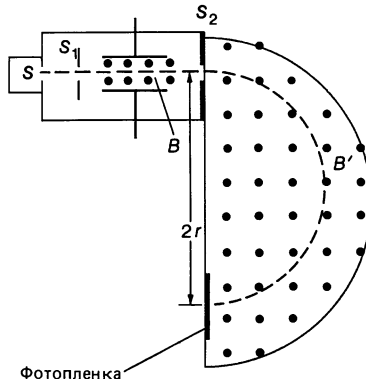


Рис. 28.19. Масс-спектрометр Бейнбриджа. Силовые линии B и B' направлены к читателю (и обозначены точками). Фотопленка

в массе, как мы увидим в гл. 42, обусловлено различием числа нейтронов.

Масс-спектрометры могут применяться для разделения не только различных химических элементов и их изотопов, но и молекул. Эти приборы используются в физических и химических, а также в биологических и биомедицинских исследованиях.

Пример 28.5. Обнаружено, что в исследуемом веществе атомы углерода с массой 12,0 а.е.м. смешаны с атомами неизвестного элемента. Радиус кривизны траектории углерода в масс-спектрометре равен 22,4 см, а для неизвестного элемента — 26,2 см. Какой элемент присутствует в образце? (Считайте, что ионы имеют одинаковый заряд.)

Решение. Поскольку масса пропорцио-

нальна радиусу кривизны траектории,

$$\frac{m_x}{m_c} = \frac{26,2 \text{ см}}{22,4 \text{ см}} = 1,17,$$

и $m_x = 1,17 \cdot 12,0 \text{ а.е.м.} = 14,0 \text{ а.е.м.}$ Неизвестным элементом является, по-видимому, азот (см. приложение Г). Им, однако, может быть также изотоп углерода или кислорода. Это можно установить лишь с помощью дополнительного физического или химического анализа.

* 28.8. Циклотрон и синхротрон

Циклотрон был разработан в 1932 г. Э.О. Лоуренсом (1901–1958) в Калифорнийском университете в Беркли для ускорения заряженных элементарных частиц типа протонов и ионов. Использование ускоренных до высоких энергий частиц в качестве «снарядов» для изучения столкновений ядерных частиц позволило получить богатую информацию об атомных ядрах и элементарных частицах (гл. 43). Магнитное поле циклотрона заставляет частицы двигаться по траекториям, близким к круговым. Заряженные частицы движутся внутри двух D-образных полых металлических электродов (дуантов) (рис. 28.20). Всякий раз, когда частицы попадают в промежуток между дуантами, к электродам прикладывается ускоряющее напряжение. Происходит увеличение скорости частиц, а следовательно, и радиуса их траектории (см. пример

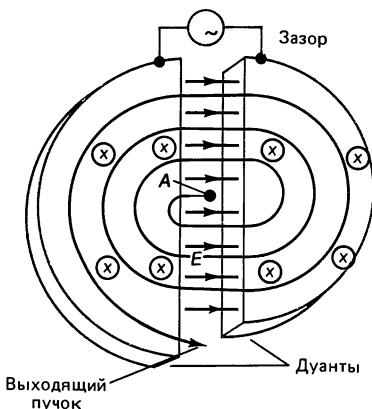


Рис. 28.20. Схема циклотрона. Магнитное поле, создаваемое большим электромагнитом, направлено от читателя. А — источник ионов. В зазоре показаны силовые линии электрического поля.

28.4, $r = mv/qB$). После большого числа оборотов протоны приобретают значительную кинетическую энергию и достигают периферии циклотрона. В конце концов они либо попадают на мишень, установленную внутри циклотрона, либо выводятся тщательно отъюстированным магнитом из циклотрона и направляются на внешнюю мишень.

Приложенное к дуантам ускоряющее напряжение должно быть переменным. Когда протоны движутся через промежуток вправо на рис. 28.20, правый дуант должен быть отрицательным, а левый – положительным. Спустя полпериода протоны будут пролетать промежуток влево, и левый дуант должен быть отрицательным, чтобы ускорить их. Частота приложенного напряжения должна быть равна частоте кругового движения протонов; это и есть циклотронная частота, введенная в разд. 28.4 [формула (28.7)].

Пример 28.6. В небольшом циклотроне с максимальным радиусом $R = 0,50$ м протоны ускоряются в магнитном поле $1,7$ Тл. Рассчитайте а) требуемую частоту ускоряющего напряжения; б) кинетическую энергию протонов, покидающих циклотрон.

Решение. а) Согласно (28.7),

$$f = \frac{qB}{2\pi m} = \frac{(1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл})(1,7 \text{ Тл})}{(6,28)(1,67 \cdot 10^{-27} \text{ кг})} = 2,6 \cdot 10^7 \text{ Гц.}$$

б) Протоны, покидающие циклотрон, движутся по дуге радиусом $r = R = 0,50$ м.

Поскольку $v = qBr/m$,

$$\begin{aligned} KЭ &= \frac{1}{2}mv^2 = \frac{1}{2}m \frac{q^2 B^2 R^2}{m^2} = \frac{q^2 B^2 R^2}{2m} = \\ &= \frac{(1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл})^2 (1,7 \text{ Тл})^2 (0,50 \text{ м})^2}{(2)(1,67 \cdot 10^{-27} \text{ кг})} = \\ &= 5,5 \cdot 10^{-12} \text{ Дж,} \end{aligned}$$

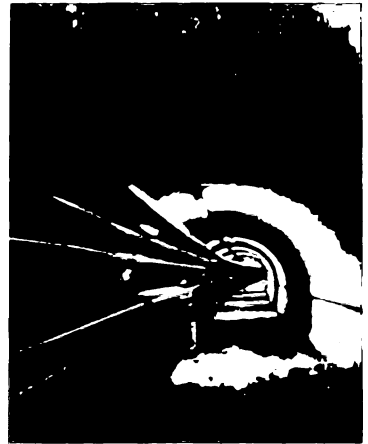
или 34 МэВ. Интересно, что величина напряжения, приложенного к дуантам, не влияет на конечную энергию протонов, но, чем выше напряжение, тем за меньшее число оборотов будет достигнута конечная энергия.

Важное свойство циклотрона состоит в независимости частоты ускоряющего напряжения, определяемой равенством (28.7), от радиуса орбиты r . Другими словами, не надо изменять частоту по мере того, как ионы движутся, ускоряясь от источника по орбитам возрастающего радиуса. К сожалению, это справедливо лишь до тех пор, пока скорость частиц мала по сравнению со скоростью света. При больших скоростях масса частицы возрастает (как мы увидим в гл. 39) в соответствии с формулой теории относительности Эйнштейна: $m = m_0/\sqrt{1 - v^2/c^2}$, где m_0 – масса покоя. Это изменение массы становится заметным уже для протонов с энергией 34 МэВ в примере 28.6, когда кинетическая энергия составляет около 3% массы. Как следует из формулы (28.7), увеличение массы должно сопровождаться уменьшением частоты ускоряющего напряжения. Поэтому для достижения высоких энергий необходимы сложные электронные устройства, уменьшающие частоту ускоряющего напряжения, по мере того

Рис. 28.21. *а*—вид с воздуха на кольцевой ускоритель в Батейвии, шт. Иллинойс. Диаметр кольца 2,0 км. *б*—участок кольца ускорителя внутри. Видны магниты, направляющие движение частиц по окружности. (С разрешения лаборатории Фермилаб.)



а



б

как скорость сгустка протонов нарастает и он выходит на орбиты со все возрастающим радиусом. Такой усовершенствованный циклотрон называется *синхроциклотроном* (или *фазотроном*).

Другой способ справиться с ростом массы по мере увеличения скорости основан на увеличении магнитной индукции B по мере ускорения частиц. Ускорители, основанные на этом принципе, называют *синхротронами*¹⁾; так действуют самые мощные гигантские ускорители. Синхротрон Национальной ускорительной лаборатории им. Э. Ферми (Фермилаб) в Батейвии, штат Иллинойс (США), имеет радиус 1,0 км (рис. 28.21), а ускоритель в ЦЕРНе (Европейском центре ядерных исследований в Женеве) — радиус 1,1 км. Протоны могут разгоняться этими ускорителями до энергии 500 ГэВ, а с установкой сверхпроводящих магнитов на ускорителе в Батейвии энергия протонов достигнет в недалеком будущем 1000 ГэВ. В подобных гигантских ускорителях обходятся, конечно, без магнитов, имеющих несколько километров в поперечнике, — используют небольшие магниты, которые образуют узкое кольцо и размещаются на одном и том же радиусе от центра окружности. Магниты разделены промежутками, в которых частицы ускоряются высоким напряжением. После «впрыскивания» (инъекции) частиц в ускоритель они должны двигаться по орбите постоянного радиуса. Поэтому частицы сначала значительно ускоряют в относительно небольшом ускорителе, а затем постепенно увеличивают магнитное поле по мере их дальнейшего ускорения в гигантском синхротроне. В гл. 43 мы обсудим многие из результатов, полученных на подобных установках в физике элементарных частиц.

¹⁾ Точнее синхрофазотронами. Термин «синхротрон» относится строго говоря, к ускорителям, у которых частота ускоряющего напряжения остается постоянной.— *Прим. ред.*

* 28.9. Эффект Холла

Если проводник, по которому течет ток, жестко закреплен в магнитном поле, это поле оказывает на заряды, движущиеся в проводнике, силу, направленную перпендикулярно их движению. Если, например, электроны движутся в прямоугольном проводнике на рис. 28.22, *a* вправо, то направленное в плоскость чертежа магнитное поле будет создавать силу, направленную вниз. В результате электроны будут двигаться в основном не вблизи поверхности *R*, а около поверхности *S*. Вследствие этого между поверхностями проводника *R* и *S* возникнет разность потенциалов. Она будет увеличиваться до тех пор, пока обусловленное ею электрическое поле не уравновесит силу, действующую на движущиеся заряды со стороны магнитного поля. Это явление называется *эффектом Холла* по имени Э. Г. Холла (1855–1938), открывшего его в 1879 г. Возникающую разность потенциалов называют *ЭДС Холла*.

В большинстве случаев ток отрицательных зарядов вправо эквивалентен току положительных зарядов влево. Однако эффект Холла позволяет различить эти два случая. Как видно из рис. 28.22, *б*, движущиеся влево положительные заряды будут отклоняться вниз, так что нижняя поверхность приобретает положительный потенциал по отношению к верхней (на рис. 28.22, *a* – наоборот). Именно по полярности ЭДС Холла впервые удалось установить, что в большинстве проводников носители имеют отрицательный заряд. Однако эффект Холла показал, что у некоторых полупроводников ток обусловлен движением положительных зарядов (подробнее об этом см. в гл. 41).

Величина ЭДС Холла пропорциональна силе тока и магнитной индукции. Поэтому эффект Холла может быть использован для измерения магнитных полей. Вначале проводник (*датчик Холла*) калибруется в известных магнитных полях. Если поддерживать силу тока в нем посто-

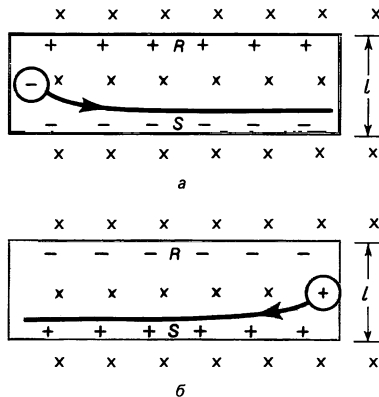


Рис. 28.22. Эффект Холла.

янной, то, измеряя ЭДС Холла, можно определять B . Датчики Холла очень удобны, они имеют малые размеры и обеспечивают высокую точность измерений.

* 28.10. Вращающий момент, действующий на виток с током. Магнитный дипольный момент

Если замкнутую проволочную петлю, по которой течет электрический ток, т. е. виток с током, поместить в магнитное поле (рис. 28.23), то со стороны магнитного поля на виток будет действовать вращающий момент. На этом явлении основан принцип действия ряда важных практических устройств: измерительных приборов, электродвигателей (в следующем разделе мы рассмотрим некоторые из них). Взаимодействие тока с магнитным полем играет важную роль в других областях, включая атомную физику.

Рассмотрим прямоугольный виток (рамку) (рис. 28.23) длиной a и шириной b . По рамке течет ток силой I ; рамка расположена в горизонтальном однородном магнитном поле, вектор магнитной индукции которого \mathbf{B} составляет угол θ с нормалью к плоскости рамки. Она может свободно вращаться относительно вертикальной оси. Токопроводящие провода расположены очень близко друг к другу и скручены, так что действующими на них со стороны магнитного поля силами можно пренебречь (сила тока, втекающего в рамку, и сила тока, вытекающего из рамки, равны по величине и противоположны по направлению; оба тока текут очень близко друг от друга). Магнитные силы, действующие на горизонтальные участки рамки (длиной b), равны по величине и противоположны по направлению (направлены вверх и вниз по

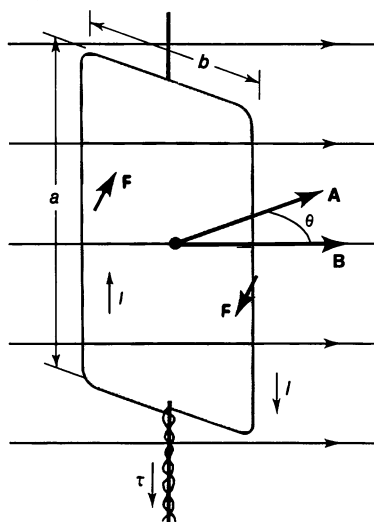


Рис. 28.23. К расчету вращающего момента, действующего на виток с током в магнитном поле с индукцией B .

вертикали); эти силы взаимно уравниваются и не создают ни результирующей силы, ни вращающего момента. Сила, действующая на каждый из вертикальных участков рамки длиной a , равна

$$F = IaB$$

[согласно (28.2)], поскольку эти участки перпендикулярны \mathbf{B} ; одна из сил направлена в плоскость чертежа, другая – из плоскости [по правилу правой руки; см. (28.3)], причем обе силы не лежат на одной прямой. Таким образом, эти силы создают вращающий момент. Плечо каждой из сил равно

$$\frac{b}{2} \sin \theta,$$

и результирующий вращающий момент

$$\tau = IaB \frac{b}{2} \sin \theta + IaB \frac{b}{2} \sin \theta = IAB \sin \theta,$$

где $A = ab$ – площадь рамки. Если рамка содержит N витков, то суммарный ток в каждом участке равен NI , и вращающий момент

$$\tau = NIAB \sin \theta. \quad (28.10)$$

Эта формула, полученная здесь для прямоугольной рамки, справедлива для любой плоской катушки. В данном случае вращающий момент (согласно правилу правой руки, $\tau = \mathbf{r} \times \mathbf{F}$) направлен вниз.

Произведение $NI\mathbf{A}$ называется *магнитным дипольным моментом* катушки с током и представляет собой вектор

$$\boldsymbol{\mu} = NI\mathbf{A}, \quad (28.11)$$

где вектор \mathbf{A} (и, следовательно, $\boldsymbol{\mu}$) направлен перпендикулярно плоскости катушки в соответствии с правилом правой руки (ладонь обхватывает катушку в направлении тока, и тогда большой палец указывает направление \mathbf{A} и $\boldsymbol{\mu}$). Пользуясь этим определением $\boldsymbol{\mu}$, формулу (28.10) можно переписать в векторной форме:

$$\tau = NI\mathbf{A} \times \mathbf{B},$$

или

$$\boldsymbol{\tau} = \boldsymbol{\mu} \times \mathbf{B}, \quad (28.12)$$

что дает правильную величину и направление τ .

Формула (28.12) совпадает по виду с (22.8) для электрического диполя с дипольным моментом \mathbf{p} в электрическом поле напряженностью \mathbf{E} : $\boldsymbol{\tau} = \mathbf{p} \times \mathbf{E}$. Подобно тому как электрический диполь в электрическом поле обладает потенциальной энергией $U = -\mathbf{p} \cdot \mathbf{E}$, магнитный диполь также должен обладать потенциальной энергией в магнитном поле. Чтобы повернуть виток с током (рис. 28.23) в сторону увеличения θ , необходимо совер-

шить работу против магнитной силы. Следовательно, потенциальная энергия зависит от угла θ :

$$U = \int \tau d\theta = \int NIAB \sin \theta d\theta = -\mu B \cos \theta + C.$$

Если принять $U = 0$ при $\theta = \pi/2$, то постоянная интегрирования C обратится в нуль, и потенциальная энергия равна

$$U = -\mu B \cos \theta = -\boldsymbol{\mu} \cdot \mathbf{B}, \quad (28.13)$$

как и следовало предполагать. Магнитные стержни, стрелки компаса, а также витки (катушки) с током являются примерами магнитных диполей.

Пример 28.7. Определить магнитный дипольный момент электрона, движущегося по круговой орбите радиусом $0,53 \cdot 10^{-10}$ м вокруг протона (боровская модель атома водорода). (Примечание: это очень приближенная картина строения атома; в настоящее время ею уже не пользуются, но тем не менее она дает верный результат – см. гл. 40 и 41.)

Решение. Согласно второму закону Ньютона, $F = ma$, и поскольку электрон удерживается на круговой орбите кулоновской силой,

$$\frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 r^2} = \frac{mv^2}{r},$$

откуда

$$\begin{aligned} v &= \sqrt{\frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 mr}} = \\ &= \sqrt{\frac{(9,0 \cdot 10^9 \text{ Н} \cdot \text{м}^2/\text{Кл}^2)(1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл})^2}{(9,1 \cdot 10^{-31} \text{ кг})(0,53 \cdot 10^{-10} \text{ м})}} = \\ &= 2,2 \cdot 10^6 \text{ м/с}. \end{aligned}$$

Так как сила электрического тока – это количество заряда, проходящего через данную точку в единицу времени, движущийся по орбите электрон будет эквивалентен току

$$I = \frac{e}{T} = \frac{ev}{2\pi r},$$

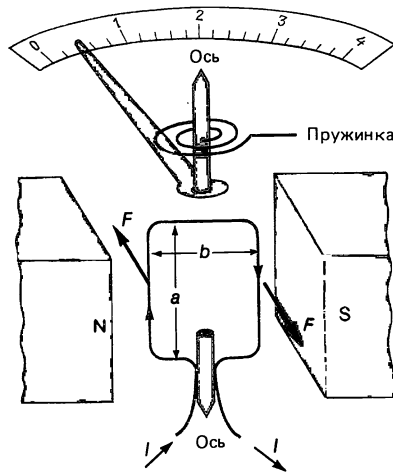
где $T = 2\pi r/v$ – время, за которое электрон совершает один оборот. Площадь орбиты электрона равна $A = \pi r^2$, и соответствующий магнитный дипольный момент

$$\begin{aligned} \mu &= IA = \left(\frac{ev}{2\pi r}\right)(\pi r^2) = \frac{evr}{2} = \\ &= 9,3 \cdot 10^{-24} \text{ А} \cdot \text{м}^2. \end{aligned}$$

* 28.11. Приложения: гальванометры, электродвигатели, громкоговорители

Главной частью большинства измерительных приборов (амперметров, вольтметров, омметров) является *гальванометр*. Мы уже познакомились с конструкцией этих приборов (разд. 27.6); теперь же посмотрим, как работает их основной элемент – гальванометр. Как видно из рис. 28.24, в гальванометре имеется проволочная катушка, подвешенная в поле постоянного магнита. Когда по катушке (обычно прямоугольной формы) протекает ток, в магнитном поле возникает вращающий момент $\tau = NIAB \sin \theta$ [см. уравнение (28.10)]. Этому моменту противодействует пружинка, создающая вращающий мо-

Рис. 28.24. Гальванометр.



мент τ_s , приблизительно пропорциональный углу ее закручивания ϕ (гл. 14). Иначе говоря,

$$\tau_s = k\phi,$$

где k — жесткость пружинки. Таким образом, катушка и прикрепленная к ней стрелка поворачиваются до тех пор, пока вращающий момент, создаваемый пружинкой, не уравнивает момент, создаваемый магнитными силами. Согласно (28.10), $k\phi = NIAB \sin \theta$, или

$$\phi = \frac{NIAB \sin \theta}{k}.$$

Мы видим, что угол отклонения стрелки ϕ прямо пропорционален силе тока I в катушке. Кроме того, однако, величина угла отклонения зависит и от угла θ , который катушка составляет с направлением магнитного поля. Для пользы дела надо, чтобы угол ϕ зависел только от I и не зависел от θ , но однородного магнитного поля B для этого недостаточно. Для решения этой проблемы полюсные наконечники магнита закругляют, а катушку гальванометра наматывают на цилиндрический железный сердечник (рис. 28.25). Силовые линии поля втягива-

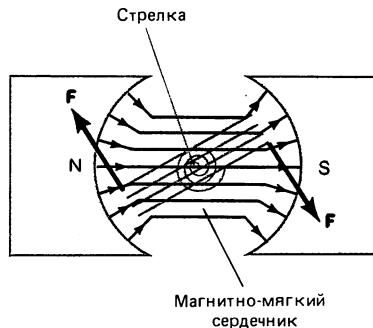
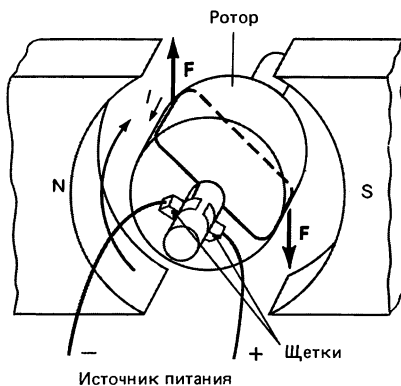


Рис. 28.25. Подвижная катушка гальванометра на железном сердечнике.

Рис. 28.26. Простой электродвигатель постоянного тока.



ются в сердечник, и поле B всегда направлено перпендикулярно торцу катушки. Поэтому сила всегда действует перпендикулярно торцу, и вращающий момент не зависит от угла отклонения стрелки. Угол отклонения ϕ , как и требовалось, будет пропорционален силе тока I .

Электродвигатель преобразует электрическую энергию в механическую (энергию вращательного движения). Электродвигатель постоянного тока основан на том же принципе действия, что и гальванометр, только катушка двигателя имеет большие размеры и наматывается на цилиндрический сердечник — ротор двигателя (рис. 28.26). Электродвигатель имеет обычно несколько таких обмоток, но на рисунке показана только одна из них. Ротор закреплен на валу; у некоторых электродвигателей вместо постоянного магнита используется электромагнит. В отличие от гальванометра ротор двигателя должен все время вращаться в одном направлении. Это создает проблему, так как, когда катушка, которая на рис. 28.26 вращается по часовой стрелке, пройдет вертикальное положение, магнитные силы будут стремиться вернуть ее в это положение. Чтобы ротор продолжал непрерывно вращаться по часовой стрелке, необходимо изменить направление тока. В двигателях постоянного тока это переключение осуществляется с помощью коллектора и щеток. Как видно на рис. 28.27, щетки — это неподвижные

Рис. 28.27. Щетки и коллектор двигателя постоянного тока обеспечивают смену полярности напряжения на обмотке, и вращение происходит все время в одну сторону. Коллектор закреплен на валу ротора и вращается вместе с ним; щетки остаются неподвижными.

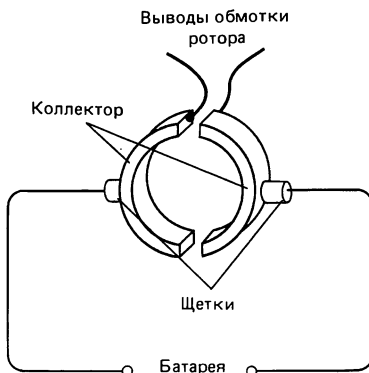


Рис. 28.28. Ротор электродвигателя с несколькими обмотками.

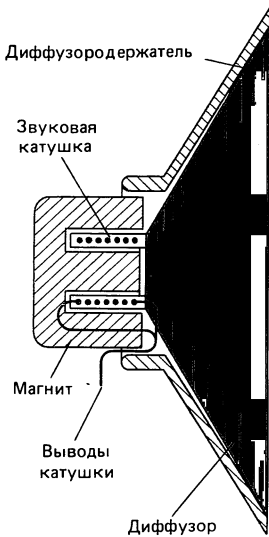
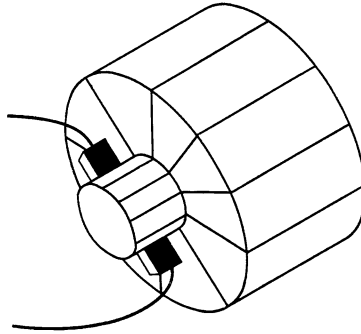


Рис. 28.29. Громкоговоритель.

контакты, которые скользят по пластинам коллектора, укрепленным на валу двигателя. Через каждые полоборота коллектор переключается на другую щетку. В результате этого через полоборота изменяется направление тока в катушке, и ротор постоянно вращается в одну сторону. Большинство электродвигателей имеет несколько обмоток, размещенных в различных секциях ротора (рис. 28.28). Ток в каждой из обмоток протекает лишь на протяжении малой доли оборота, лишь когда ее ориентация относительно магнитного поля обеспечивает максимальный вращающий момент. Благодаря этому вращающий момент на валу двигателя распределен во времени более равномерно, чем при наличии только одной обмотки. Конструкции большинства используемых на практике электродвигателей несколько сложнее описанной выше, но основные принципы остаются теми же.

Работа *громкоговорителя* тоже основана на взаимодействии токнесущего проводника с магнитом. Громкоговоритель подсоединяется на выходе радиоприемника или телевизора. Клеммы громкоговорителя внутренними проводами соединены с проволочной катушкой, прикрепленной к диффузору (рис. 28.29). Диффузор обычно изготовляется из жесткого картона и крепится с таким расчетом, чтобы имелась возможность его свободного перемещения. Соосно с катушкой крепится постоянный магнит. Когда в катушке протекает переменный ток звуковой частоты, на катушку и прикрепленный к ней диффузор действует сила, обусловленная взаимодействием с магнитным полем этого магнита. При изменении силы тока в катушке диффузор колеблется с частотой звукового сигнала, и в прилегающем к нему слое воздуха возникают сжатия и разрежения, т. е. появляются звуковые волны. Таким образом, громкоговоритель преобразует электрическую энергию в энергию звуковой волны, и частоты излучаемых им звуковых волн в точности воспроизводят входной электрический сигнал.

Заключение

Магнит имеет два полюса – северный и южный. Северным называется полюс, который при свободной подвеске магнита ориентируется на север. Разноименные полюса двух магнитов притягиваются, одноименные отталкиваются. Вокруг каждого магнита существует *магнитное поле*, и поэтому силу, с которой один магнит действует на другой, рассматривают как результат взаимодействия одного магнита с магнитным полем другого.

Магнитные поля создаются электрическим током. Например, силовые линии магнитного поля прямолинейного проводника с током имеют вид окружностей, в центре которых находится проводник; это поле воздействует на магнит, поднесенный к проводнику с током.

Магнитное поле действует на электрический ток. Сила, действующая на участок прямолинейного проводника длиной l , по которому течет ток силой I , равна $F = IlB \sin \theta$, где θ – угол между вектором магнитной индукции \mathbf{B} и проводником; сила направлена перпендикулярно проводнику и вектору магнитной индукции в соответствии с правилом правой руки. Приведенное соотношение служит определением магнитной индукции \mathbf{B} . Единицей магнитной индукции в системе СИ является тесла (Тл). В магнитном поле с индукцией \mathbf{B} на заряд q , движущийся со скоростью \mathbf{v} , действует сила $F = qvB \sin \theta$, где θ – угол между \mathbf{v} и \mathbf{B} ; в векторной записи $\mathbf{F} = q\mathbf{v} \times \mathbf{B}$. Траектория частицы, движущейся перпендикулярно силовым линиям однородного магнитного поля, представляет собой окружность. В общем случае, когда частица движется в области, где присутствуют и электрические, и магнитные поля,

$$\mathbf{F} = q\mathbf{E} + q\mathbf{v} \times \mathbf{B}.$$

С помощью магнитных и электрических полей было измерено отношение заряда электрона к его массе e/m . Заряд электрона e был впервые определен Милликеном в опытах с масляными каплями, а затем из измерений e/m была найдена масса электрона.

Вопросы

1. Стрелка компаса не всегда устанавливается параллельно поверхности земли: один ее конец может быть наклонен вниз. Почему?
2. Как, по-вашему, могли образоваться природные магниты, которые находили в Магнесии?
3. Почему немагнитный кусок железа притягивается к любому полюсу магнита?
4. Пусть у вас имеются три железных стержня, два из которых намагничены, а третий нет. Как определить, какие стержни являются магнита-

ми, не пользуясь никакими дополнительными предметами?

5. Два железных стержня притягивают друг друга, какими бы концами их ни сближали. Могут ли оба они быть магнитами?
6. Картина силовых линий магнитного стержня не отличается от картины электрического поля электрического диполя. Пользуясь этим, ответьте, как изменяется магнитное поле с расстоянием а) вблизи одного из полюсов очень длинного магнитного стержня; б) вдали от магнита как целого.
7. Изобразите силовые линии магнитного поля

горизонтального прямолинейного проводника, по которому ток течет влево.

8. Как направлены силовые линии магнитного поля прямолинейного проводника, по которому ток течет в направлении на вас?

9. Подковообразный магнит держат вертикально так, что его северный полюс находится слева, а южный – справа. По проводу, расположенному между полюсами магнита, течет ток в направлении от вас. В каком направлении действует на провод сила?

10. Заряженные частицы, приходящие на Землю из космоса (космические лучи), чаще достигают поверхности Земли вблизи полюсов, чем в более низких широтах. Почему? (См. рис. 28.5.)

11. Угол между какими векторами в формуле $\mathbf{F} = I \times \mathbf{B}$ всегда равен 90° ? Угол между какими векторами может быть другим?

12. Приведенное в этой главе правило правой руки придется заменить «правилом левой руки», если подразумевать движение отрицательно заряженных частиц, например электронов в проводнике. Покажите, что во всех случаях, рассмотренных в этой главе, правилу правой руки будет соответствовать применительно к движению отрицательных зарядов аналогичное правило левой руки.

13. Можно ли привести в движение покоящийся электрон с помощью магнитного поля? С помощью электрического поля?

14. Заряженная частица движется в однородном магнитном поле по окружности. Опишите траекторию частицы после того, как в дополнение к магнитному полю включается электрическое поле, направленное в ту же сторону.

15. Электромагнитный насос основан на том, что на частицу в магнитном поле действует сила. Электромагнитные насосы применяются для перекачки жидких металлов (например, расплавленного натрия), а в последнее время их используют для прокачивания крови в аппаратах искусственного кровообращения. Схема такого насоса показана на рис. 28.30. Электрическое поле приложено перпендикулярно кро-

веносному сосуду и магнитному полю. Объясните, что приводит ионы в движение. Будет ли сила действовать на положительные и отрицательные ионы в одном направлении?

16. Пучок электронов движется в направлении горизонтального проводника, по которому слева направо течет ток. В какую сторону отклонится пучок?

17. Какое поле или какие поля существуют в пространстве около движущегося электрического заряда?

18. Можно ли, вводя определение магнитной индукции, выбрать за направление вектора \mathbf{B} направление силы, действующей на движущийся заряд? Объясните.

19. Заряженная частица движется в некоторой области пространства по прямой. Может ли в этой области существовать отличное от нуля магнитное поле? Если да, приведите два примера.

20. Если движущаяся заряженная частица в некоторой области пространства испытывает боковое отклонение, то можно ли с уверенностью утверждать, что в этой области $\mathbf{B} \neq 0$?

21. В некоторой области пространства существует однородное магнитное поле с индукцией \mathbf{B} ; за пределами этой области $\mathbf{B} = 0$. Можно ли инжектировать электрон в поле так, чтобы он двигался в нем по замкнутой круговой траектории?

22. Как определить, отклоняются ли движущиеся электроны в определенной области пространства электрическим и магнитным полем (или и тем и другим)?

23. Если поднести магнит к экрану телевизора, изображение исказится. Почему? (С цветным телевизором этот опыт производить нельзя: кинескоп будет испорчен!)

* 24. Два иона имеют одинаковую массу, но один ионизован однократно, а другой двукратно. Как будут различаться их положения на фотопластинке в масс-спектрометре (рис. 28.19)?

* 25. Как изготовить компас, не используя железо или другой ферромагнитный материал?

* 26. Дуанты циклотрона – хороший проводник. Что можно сказать о действии на протоны внутри дуантов электрического поля, создаваемого переменным ускоряющим напряжением?

* 27. Чем ограничивается максимальная энергия протонов, достижимая в обычном циклотроне? Как преодолевается это ограничение в синхротроне?

* 28. Каким образом можно измерить дипольный момент магнитного стержня или стрелки?

* 29. В каком положении (если таковое существует) рамка с током, помещенная в однородное магнитное поле, будет находиться а) в устой-

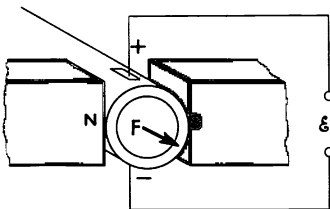


Рис. 28.30. Электромагнитный насос для прокачивания крови в сосуде.

чивом равновесии; б) в неустойчивом равновесии?

* 30. Какие факторы определяют чувствительность гальванометра?

Задачи

Раздел 28.3

1. (I) Чему равна сила, действующая на 1 м прямолинейного проводника с током 10,5 А в магнитном поле с индукцией 1,70 Тл, расположенного а) перпендикулярно вектору **B**; б) под углом 45° к направлению **B**?

2. (I) Максимальное значение силы, действующей на проводник с током 12,0 А между полюсами магнита, равно 8,16 Н. Чему примерно равна магнитная индукция, если диаметр каждого из полюсов магнита 15 см?

3. (I) Вычислите силу, действующую со стороны магнитного поля Земли ($B = 5,0 \cdot 10^{-5}$ Тл) на проводник длиной 240 м с током 150 А, который натянут между двумя опорами и составляет 60° с направлением магнитного поля.

4. (II) Предположим, что прямолинейные проводники, подсоединенные к проводнику в виде полуокружности на рис. 28.11, отогнуты у основания полуокружности и расположены горизонтально. Чему равна сила, действующая на весь проводник, если в поле с магнитной индукцией **B** находятся кроме полуокружности прямолинейные участки длиной *l* каждый?

5. (II) Проволочный виток радиусом *R*, по которому течет ток *I*, помещен в магнитное поле, прямолинейные силовые линии которого как бы расходятся из точки, находящейся на оси витка на расстоянии *d* от его центра. (Иначе говоря, вектор **B** составляет угол θ с любой точкой витка; рис. 28.31, где $\text{tg } \theta = R/d$.) Определите силу, действующую на виток.

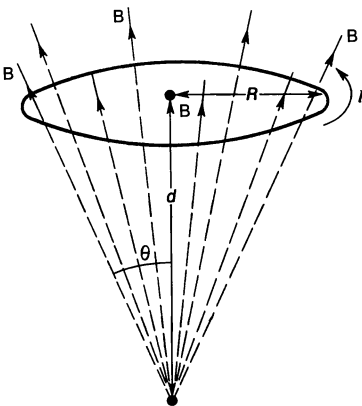


Рис. 28.31.

6. (II) На два жестких параллельных проводника, расположенных горизонтально на расстоянии *l* друг от друга, уложен, как на рельсы, перпендикулярно им легкий металлический стержень массой *m*. Эта система находится в однородном магнитном поле с индукцией **B**, направленном вертикально вверх. В момент $t = 0$ проводники-рельсы подключаются к источнику постоянного напряжения и через систему течет ток *I*. Определите скорость стержня как функцию времени, а) пренебрегая трением; б) считая коэффициент трения равным μ_k . в) В каком направлении (восточном или западном) движется стержень, если ток в нем течет на север?

7. (II) По криволинейному проводнику, соединяющему точки *a* и *b*, в плоскости, перпендикулярной однородному магнитному полю с индукцией **B**, течет ток *I*. Покажите, что сила, действующая со стороны магнитного поля на проводник, не зависит от его формы и равна силе, действующей на прямолинейный проводник, соединяющий точки *a* и *b*, по которому течет ток такой же силы *I*.

Раздел 28.4

8. (I) Определите величину и направление силы, действующей на электрон, движущийся горизонтально на восток со скоростью $8,7 \cdot 10^5$ м/с в магнитном поле с индукцией 0,75 Тл, направленном вертикально вверх.

9. (I) Опишите траекторию электрона, движущегося перпендикулярно направлению вектора магнитной индукции $|\mathbf{B}| = 0,012$ Тл со скоростью $8,1 \cdot 10^6$ м/с. Поле направлено на наблюдателя.

10. (I) Какая сила в магнитном поле Земли ($5,0 \cdot 10^{-5}$ Тл) действует на самолет, который приобрел электрический заряд 180 Кл и летит перпендикулярно силовым линиям магнитного поля со скоростью 280 м/с?

11. (I) Частица с зарядом *q* движется в однородном магнитном поле с индукцией **B** по окружности радиусом *r*. Покажите, что ее импульс есть $p = qBr$.

12. (II) Протон с кинетической энергией 50 МэВ попадает в магнитное поле 0,20 Тл. Чему равен радиус кривизны его траектории?

13. (II) Сила, действующая на электрон в магнитном поле, максимальна, когда он движется в западном направлении. Сила направлена вверх и равна $8,2 \cdot 10^{-13}$ Н при скорости электрона $3,9 \cdot 10^5$ м/с. Определите величину и направление вектора магнитной индукции **B**.

14. (II) Дважды ионизованный атом гелия с массой $6,7 \cdot 10^{-27}$ кг ускорится напряжением 2800 В. а) Чему равен радиус кривизны его траектории в однородном магнитном поле с

индукцией 0,240 Тл? б) За какое время будет совершаться полный оборот?

15. (II) Пуля массой 7,0 г движется со скоростью 300 м/с перпендикулярно магнитному полю Земли ($5,0 \cdot 10^{-5}$ Тл). Электрический заряд пули равен $3,5 \cdot 10^{-9}$ Кл. На какое расстояние отклонится пуля под действием магнитного поля Земли, пролетев 600 м?

16. (II) Пусть на экваторе индукция магнитного поля Земли равна $0,40 \cdot 10^{-4}$ Тл и вектор \mathbf{B} направлен на север. С какой скоростью должен двигаться однократно ионизованный атом урана ($m = 238$ а.е.м., $q = e$), чтобы облететь вокруг Земли на высоте 5 км над экватором?

17. (II) На электрон, движущийся в магнитном поле $\mathbf{B} = 0,72\mathbf{k}$ Тл, действует сила $\mathbf{F} = (3,2\mathbf{i} - 2,7\mathbf{j}) \cdot 10^{-13}$ Н. Чему равна скорость электрона?

18. (II) Электрон со скоростью $3,0 \cdot 10^7$ м/с влетает в однородное магнитное поле с $B = 0,23$ Тл под углом 45° к направлению \mathbf{B} . Определите радиус и шаг (расстояние между витками) спиральной траектории электрона.

19. (II) Выведенные из ускорителя протоны надо отклонить под прямым углом «отклоняющим магнитом», чтобы они не попали в защиту, находящуюся на их пути на расстоянии l от места вывода из ускорителя. Покажите, что магнитное поле отклоняющего магнита должно иметь индукцию $B \geq (2mK\varepsilon/e^2l^2)^{1/2}$, где m – масса протона, а $K\varepsilon$ – его кинетическая энергия.

20. (II) Прямолинейный отрезок медного провода диаметром 2,0 мм «парит» горизонтально в воздухе, удерживаемый магнитным полем Земли ($B = 5,0 \cdot 10^{-5}$ Тл), вектор \mathbf{B} индукции которого направлен горизонтально. Какой силы ток течет по проводу?

21. (III) *Эффект Зеемана*. В боровской модели атома водорода электрон удерживается на круговой орбите радиусом r около протона силой электростатического притяжения. Если атом поместить в слабое магнитное поле с индукцией \mathbf{B} , то частота обращения электрона в плоскости, перпендикулярной \mathbf{B} , изменится на величину

$$\Delta f = \pm \frac{eB}{4\pi m},$$

где e и m – соответственно заряд и масса электрона. а) Найдите этот результат, считая, что сила, обусловленная магнитным полем с индукцией \mathbf{B} , много меньше силы электростатического притяжения. б) Что означает стоящий перед формулой знак \pm ?

Раздел 28.5

22. (I) Чему равна скорость пучка электронов,

который не испытывает отклонения в скрещенных электрическом ($8,8 \cdot 10^3$ В/м) и магнитном ($3,5 \cdot 10^{-3}$ Тл) полях? По окружности какого радиуса будут двигаться электроны, если снять электрическое поле?

23. (I) Протоны движутся по окружности радиусом 8,10 см в магнитном поле с индукцией 0,58 Тл. Какое электрическое поле надо наложить, чтобы протоны двигались по прямой? Как должен быть направлен вектор \mathbf{E} ?

24. (I) Чему равно отношение e/m для частицы, которая движется по окружности радиусом 8,0 мм в магнитном поле с индукцией 0,46 Тл, если ее траектория становится прямолинейной при перпендикулярном включении электрического поля напряженностью 200 В/м?

25. (II) Капелька масла массой $3,3 \cdot 10^{-15}$ кг висит неподвижно между двумя большими горизонтальными пластинами, находящимися на расстоянии 1,0 см друг от друга, при разности потенциалов между пластинами 340 В. Сколько избыточных электронов имеется на этой капле?

26. (III) В опытах Милликена массу масляной капли определяют, измеряя установившуюся скорость v_T свободного падения капли в воздухе в отсутствие электрического поля. При падении с установившейся скоростью «эффективный вес» капли равен силе трения, которая определяется по формуле Стокса (разд. 13.7) $F = 6\pi\eta r v_T$, где η – вязкость воздуха, а r – радиус капли. В вес капли $mg = \frac{4}{3}\pi r^2 \rho g$ следует ввести поправку на подъемную силу в воздухе; для этого величину ρ заменяют на $(\rho - \rho_A)$, где ρ – плотность масла, а ρ_A – плотность воздуха. Покажите, что заряд капли равен

$$q = 18\pi \frac{d}{V} \sqrt{\frac{\eta^3 v_T^3}{2(\rho - \rho_A)g}},$$

где d – расстояние между пластинами (рис. 28.16), а V – напряжение, при котором капля задерживается между пластинами. Все величины в правой части либо известны, либо могут быть измерены. Установившуюся скорость падения капли v_T определяют, измеряя время, за которое капля падает на определенное расстояние (каплю при этом наблюдают с помощью небольшой зрительной трубы).

* Раздел 28.6

* 27. (I) В приближении идеального газа рассчитайте среднеквадратичную скорость свободного электрона в металле при 300 и при 2500 К (обычная температура катода в электронной лампе).

* 28. (II) Чему примерно равно максимальное отклонение электронного пучка в центре экрана кинескопа под действием магнитного поля Земли с индукцией $5,0 \cdot 10^{-5}$ Тл? Экран нахо-

дится на расстоянии 20 см от электронной пушки, ускоряющей электроны напряжением а) 2,0 кВ; б) 30 кВ. Заметим, что в цветных телевизорах луч, чтобы попасть на люминофор нужного цвета, должен направляться на экран с точностью не хуже 1 мм. Поскольку влияние магнитного поля Земли в этом случае оказывается существенным, в кинескопах используются защитные экраны из мю-металла.

* 29. (II) В ЭЛТ электроны ускоряются напряжением 10,0 кВ. Экран имеет ширину 24 см и находится на расстоянии 25 см от отклоняющих пластин длиной 2,8 см. В каких пределах должна изменяться напряженность электрического поля между отклоняющими пластинами, чтобы электронный пучок отклонялся на весь экран?

* 30. (II) В электронно-лучевой трубке электроны ускоряются в горизонтальном направлении напряжением 25 кВ. Затем пучок проходит 3,5 см в однородном магнитном поле с индукцией B , в результате чего он отклоняется вверх и достигает верхней границы экрана (на 11 см выше его центра), который находится на расстоянии 22 см от отклоняющей системы. Оцените величину магнитной индукции B .

* Раздел 28.7

* 31. (I) В масс-спектрометре атомы германия имеют радиусы кривизны траектории 21,0; 21,6; 21,9; 22,2 и 22,8 см. Наибольший радиус соответствует изотопу с массой 76 а.е.м. Каковы атомные массы остальных изотопов?

* 32. (II) В масс-спектрометре на рис. 28.19 применяются электрическое поле напряженностью $2,18 \cdot 10^4$ В/м и магнитное поле с индукцией $B = B' = 0,57$ Тл. Источник содержит изотопы бора с массами 10 и 11 а.е.м. (1 а.е.м. = $1,67 \cdot 10^{-27}$ кг). На каком расстоянии друг от друга расположатся на фотопластинке однократно ионизованные атомы этих изотопов?

* 33. (II) Масс-спектрометр используется для контроля загрязнений воздуха. Однако при разделении молекул с почти одинаковой массой, например CO (28,0106 а.е.м.) и N₂ (28,0134 а.е.м.), возникают затруднения. Какой радиус кривизны нужен, чтобы на пластинке эти молекулы отстояли друг от друга на 0,24 мм?

* 34. (II) В одном из масс-спектрометров ионы до входа в магнитное поле с индукцией B ускоряются разностью потенциалов V . Будем считать, что начальная скорость ионов (до ускорения) равна нулю. Покажите, что масса иона равна $m = qB^2R^2/2V$, где R – радиус кривизны траектории ионов в магнитном поле, а q – заряд иона.

* Раздел 28.8

35. (I) Чему равна индукция магнитного поля циклотрона, если протоны совершают в нем $2,1 \cdot 10^7$ оборотов в секунду?

* 36. (I) Какой должна быть частота ускоряющего напряжения на дуантах циклотрона из примера 28.6, если в нем ускоряются альфа-частицы?

* 37. (I) Какой максимальной кинетической энергии могут достичь альфа-частицы в циклотроне из примера 28.6? Чему будет равна их скорость?

* 38. (I) Амплитуда ускоряющего напряжения на дуантах циклотрона равна 60 кВ. Сколько оборотов должны совершить в нем протоны, чтобы приобрести кинетическую энергию 20 МэВ?

* 39. (II) Какую максимальную кинетическую энергию могут приобрести дейтроны (${}^2\text{H}$) в циклотроне из примера 28.6? А ионы лития ${}^7\text{Li}^{3+}$? Какой должна быть частота ускоряющего напряжения в каждом случае?

* 40. (II) В синхротрон Фермилаба, находящийся в Батейвии, с радиусом 1,0 км инжектируются протоны, ускоренные до энергии 8,0 ГэВ. На каждом обороте протоны ускоряются разностью потенциалов 2,5 МВ. Сколько времени потребуется, чтобы сообщить протонам энергию 400 ГэВ? Какой путь пройдут за это время протоны? (При таких энергиях скорость протонов близка к скорости света $3,0 \cdot 10^8$ м/с.)

Раздел 28.9

* 41. (II) а) Покажите, что ЭДС Холла дается формулой $\mathcal{E} = v_d B l$, где v_d – скорость дрейфа носителей заряда в плоском проводнике шириной l (рис. 28.22). б) Выразите \mathcal{E} через силу электрического тока в проводнике, пользуясь упрощенным микроскопическим представлением, данным в разд. 26.5. в) Определите плотность электронов n в проводнике, выразив ее через измеренные значения \mathcal{E} , B , I , силу тока I и площадь сечения проводника.

* 42. (II) Эффект Холла может быть использован для измерения скорости кровотока: кровь содержит ионы, создающие электрический ток. Соответствующий прибор напоминает электромагнитный насос (см. вопрос 15, рис. 28.30), только кровь течет в артерии сама по себе, и вместо источника внешнего напряжения к пластинам подключается потенциометр, измеряющий ЭДС Холла. а) Зависит ли ЭДС Холла от знака заряда ионов? б) Пользуясь решением предыдущей задачи, определите скорость кровотока в артерии диаметром 3,3 мм, если

магнитная индукция равна 0,070 Тл, а ЭДС Холла 0,10 мВ. (На практике в таких приборах используют не постоянные, а переменные магнитные поля.)

* Раздел 28.10

* 43. (I) Виток с током диаметром 10,0 см помещен в однородное магнитное поле между полюсами большого магнита так, что плоскость витка параллельна силовым линиям. Когда в витке течет ток силой 8,10 А, на него действует вращающий момент 0,116 Н·м. Чему равна индукция магнитного поля B ?

* 44. (I) Какую работу надо совершить, чтобы повернуть рамку с током (рис. 28.23) в однородном магнитном поле с индукцией B а) от $\theta = 0$ ($\mu \parallel B$) до $\theta = 180^\circ$; б) от $\theta = 90^\circ$ до $\theta = -90^\circ$?

* 45. (II) Покажите, что магнитный дипольный момент μ электрона, движущегося по орбите вокруг протона в атоме водорода, связан с орбитальным моментом электрона L соотношением

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

* 46. (II) Катушка диаметром 12,0 см, содержащая 8 витков провода, лежит плашмя на земле. Индукция магнитного поля Земли в этом месте равна $5,50 \cdot 10^{-5}$ Тл; вектор B направлен к Земле под углом $66,0^\circ$, вниз от направления на истинный север. В катушке по часовой стрелке протекает ток силой 6,10 А. а) Определите вращающий момент, действующий на катушку. б) Какая часть катушки будет подниматься вверх — северная, восточная, южная или западная?

* 47. (III) Имеется квадратная рамка из алюминиевой проволоки со стороной 22,5 см. По

ней должен протекать ток силой 12,0 А; при этом она будет вращаться в магнитном поле с индукцией 1,50 Тл. а) Каким должен быть минимальный диаметр проволоки, чтобы рамка не подверглась деформации растяжения или сдвига? Запас прочности примите равным 10 (табл. 11.2). б) Чему равно сопротивление одного витка такой проволоки?

* 48. (II) Покажите, что вращающий момент, действующий на плоский виток любой конфигурации, дается выражением (28.10). [Подсказка: представьте виток произвольной формы в виде комбинации очень узких прямоугольных витков и воспользуйтесь методом, ранее примененным для вычисления изменений энтропии (рис. 21.11).]

* 49. (III) Пусть непроводящий стержень длиной L обладает равномерно распределенным зарядом Q . Стержень вращается с угловой скоростью ω относительно перпендикулярной оси, проходящей через один из его концов. Покажите, что магнитный дипольный момент вращающегося стержня равен $\frac{1}{6} Q \omega L^2$. (Подсказка: рассмотрите движение каждого бесконечно малого участка стержня.)

* Раздел 28.11

* 50. (I) Стрелка гальванометра отклоняется на всю шкалу при силе тока 34,0 мкА. Какой будет сила тока полного отклонения этого гальванометра, если индукция магнитного поля уменьшится до 0,900 своего первоначального значения?

* 51. (I) Какой будет сила тока полного отклонения гальванометра, если жесткость возвратной пружинки ослабнет с годами на 12%, а вначале эта сила тока составляла 45,0 мкА?

* 52. (I) Во сколько раз уменьшится вращающий момент на валу двигателя, если силу тока в обмотке уменьшить на 20%?