

ЭЛЕКТРОМАГНЕТИЗМ

Тема: ЭЛЕКТРОМАГНЕТИЗМ

1. МАГНИТНОЕ ПОЛЕ

2. Сила Лоренца

3. Ускорители элементарных частиц

4. Сила Ампера

5. Магнитное поле постоянного тока.

Закон Био – Савара – Лапласа.

1. МАГНИТНОЕ ПОЛЕ

Существует еще один особый вид взаимодействия токов и тел – магнетизм, осуществляемый посредством магнитного поля. Термин «магнитное поле» введен в 1845 г. М. Фарадеем.

Между электрическими и магнитными полями нет полной симметрии.

Источниками электрического поля служат электрические заряды.

Магнитных зарядов до настоящего времени не обнаружено, хотя теория предсказывает их существование.

Источниками магнитного поля являются движущиеся электрические заряды, электрические токи.

Движение электронов и протонов создают орбитальные микротоки в атомах и ядрах.

Поэтому микрочастицы, наряду с собственным механическим моментом количества движения — спином, обладают и собственным магнитным моментом, определяющим их взаимодействие с внешним магнитным полем.

Поскольку электроны, протоны и нейтроны образуют атомные ядра, атомы, молекулы и все макроскопические тела, то в принципе все вещества обладают магнитными свойствами и подвержены влиянию магнитного поля. Все вещества являются магнетиками.

В естественных условиях встречается железная руда, которая обладает свойством притягивать к себе железные опилки. Руда представляет собой химическое соединение железа с кислородом Fe_3O_4 и называется магнитным железняком. Это слово произошло от названия древнего города Магнезия в Малой Азии, вблизи которого находили магнитную руду.

Первые письменные свидетельства о магнитных свойствах веществ и о магнетизме пришли из Китая и имеют двухтысячелетнюю давность.

В них упоминается об использовании постоянных магнитов в качестве компасов. Древнегреческие и римские ученые упоминают о притяжении и отталкивании магнитов и о намагничивании магнитом железных опилок.

В средние века в Европе широко применяется магнитный компас (с XII в. н.э.), предпринимались опыты по изучению свойств магнитов.

Результаты исследования магнетизма в эпоху Возрождения обобщены Гильбертом в трактате «О магните, магнитных телах и о большом магните – Земле» (1600 г).

В этом труде показано, что Земля – магнитный диполь, и доказана невозможность разъединения двух разноименных магнитных полюсов (рис. 1).

Основной характеристикой магнитного поля является вектор магнитной индукции **B**, который является силовой характеристикой поля, аналогичный напряжённости электрического поля **E**.

Для наглядного изображения магнитных полей пользуются **линиями магнитной индукции**. Касательная в каждой точке этой линии совпадает с направлением вектора магнитной индукции.

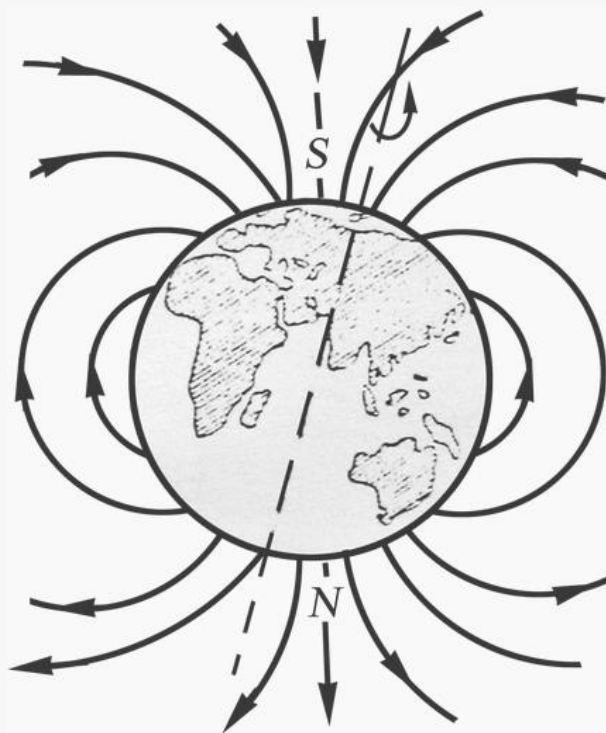


Рис. 1. Направление силовых линий магнитного поля Земли

Магнитным полюсом называется участок поверхности намагниченного образца – магнита, на котором нормальная составляющая силовых линий магнитного поля отлична от нуля.

Если изобразить графически силовые линии магнитного поля, то магнитный полюс соответствует месту пересечения поверхности образца этими линиями (рис. 2).

Участки поверхности, из которых выходят силовые линии, называются северным (N) или полюсом, а участки поверхности, в которые эти линии входят, называются южным (S).

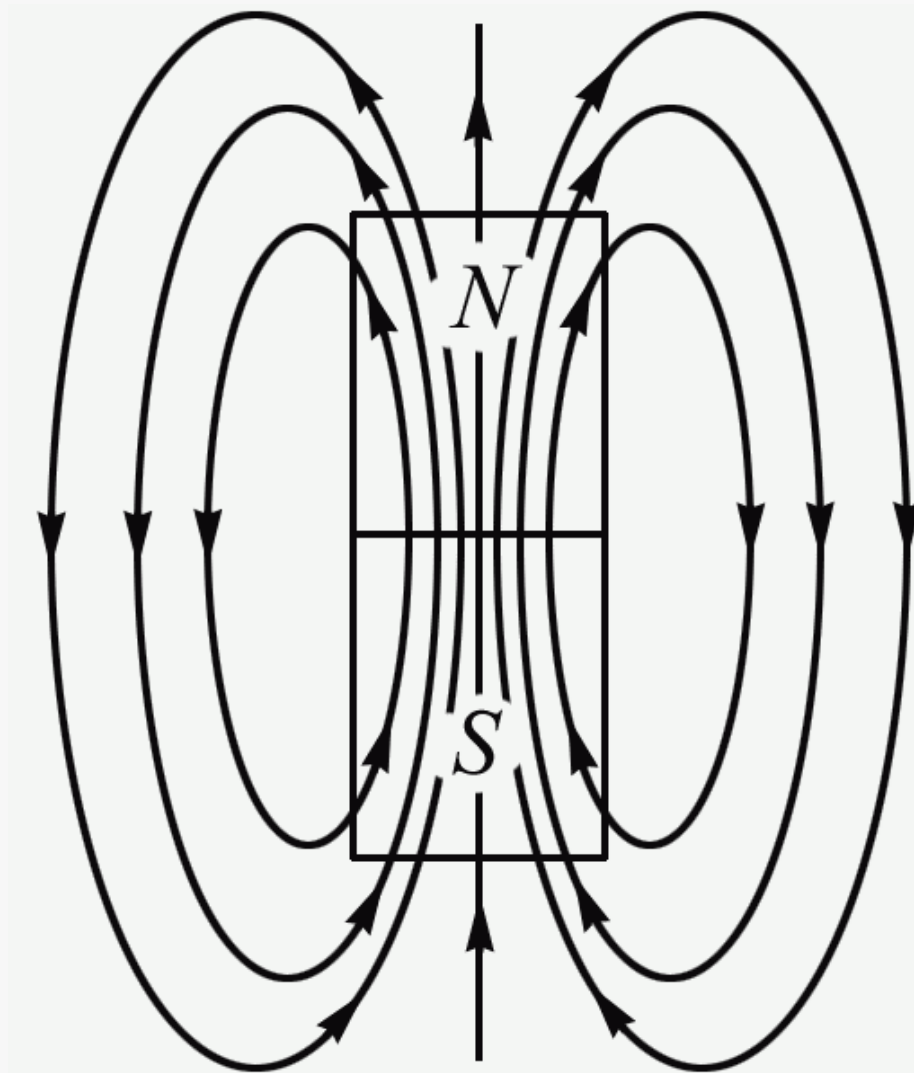


Рис. 2. Магнитное поле постоянного магнита в виде стержня.

Одноименные магнитные полюса отталкиваются, разноименные – притягиваются.

Отсутствие в природе свободных магнитных зарядов приводит к тому, что линии магнитной индукции не могут прерываться в образце, у магнитного тела, наряду с магнитным полюсом одной полярности, всегда существует магнитный полюс другой полярности.

Принципиально новый этап изучения магнитных явлений начинается в конце XVIII.

Кулон в 1785–1789 гг. показал, что взаимодействие точечных магнитных полюсов подчиняется закону обратных квадратов.

В 1820 г. Эрстед открыл магнитное поле электрического тока, Ампер установил законы магнитного взаимодействия токов и эквивалентность магнитного поля кругового тока магнитному полю тонкого плоского магнита.

Ампер объяснил магнетизм веществ существованием молекулярных токов.

Фарадей впервые ввел понятие о реальном электромагнитном поле и на этой основе дал последовательную трактовку магнитных явлений, в частности явлений электромагнитной индукции (1831 г.), была доказана взаимосвязь электрических и магнитных полей.

Вершиной развития классической электромагнитной теории явились труды Максвелла, опубликованные в 1872 г.

Магнетизм широко используется как средство изучения химических связей и структуры молекул.

Изучение процессов магнитного резонанса и релаксации позволяет понять кинетику многих физических и физико-химических процессов.

Интенсивно развиваются магнетобиология и применение магнетизма в медицине.

Проблемы технических применений магнетизма входят в число важнейших в электротехнике, приборостроении, вычислительной технике, автоматике и телемеханике.

Широко применяются магнитная дефектоскопия и иные методы контроля.

Важная роль отводится измерениям магнитных характеристик электротехнических и радиотехнических материалов, которые идут на изготовление магнитопроводов электрических генераторов, моторов, трансформаторов, реле, магнитных усилителей, элементов магнитной памяти, лент и дисков магнитной записи, стрелок магнитных компасов, магнитострикционных излучателей и приемников и пр.

2. Сила Лоренца

Действующая сила на электрический заряд q во внешнем электромагнитном поле зависит от напряженности электрического поля $\mathbf{E}(x,y,z)$ в этой точке, от скорости его движения \mathbf{v} и величины индукции магнитного поля $\mathbf{B}(x,y,z)$.

Выражение для этой силы было получено в конце XIX в. голландским физиком Лоренцем путем обобщения опытных данных

$$\mathbf{F} = q\mathbf{E} + kq[\mathbf{v}, \mathbf{B}],$$

Вектор \mathbf{B} , как уже отмечалось выше, является силовым вектором и не зависит от величины и движения заряда q , он характеризует только магнитное поле, в котором движется заряд q .

Первое слагаемое $q\mathbf{E} = \mathbf{F}_k$ в формуле Лоренца есть кулоновская сила.

Второе слагаемое

$$\mathbf{F}_m = kq[\mathbf{v}, \mathbf{B}]$$

– сила, действующая на движущийся заряд в магнитном поле (рис. 3).

Сила \mathbf{F}_m перпендикулярна вектору скорости \mathbf{v} и вектору индукции магнитного поля \mathbf{B} .

Выбор коэффициента k определяется выбором системы единиц. В системе СИ он равен единице ($k = 1$).

Единицей измерения магнитной индукции в СИ служит тесла [Тл].

Поскольку сила, действующая со стороны магнитного поля, перпендикулярна вектору скорости, то элементарная работа этой силы всегда равна нулю ($\mathbf{F}_m \perp \mathbf{v}$, рис. 3):

$$\delta A_m = (\mathbf{F}_m, d\mathbf{r}) = (\mathbf{F}_m, \mathbf{v}) dt = 0.$$

На рис. 3. показано действие магнитного поля с индукцией \mathbf{B} (направлено на нас из-за плоскости рисунка) на положительно заряженную частицу, движущуюся со скоростью \mathbf{v} .

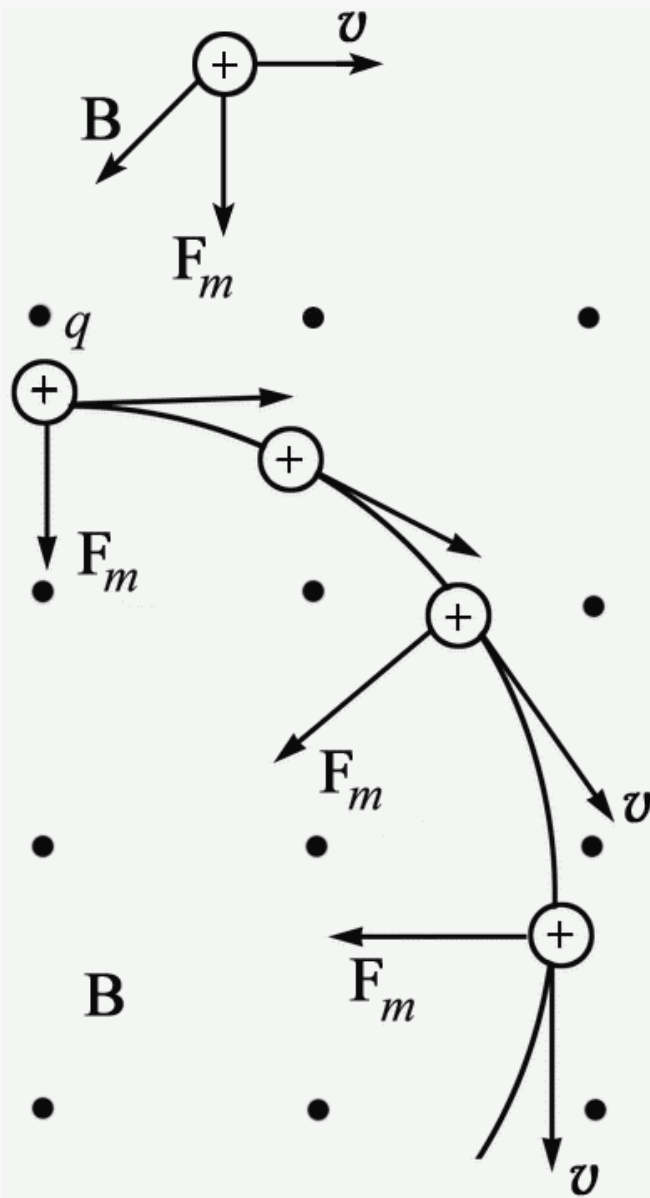


Рис. 3

Постоянное магнитное поле изменяет направление движения частицы, но не величину скорости. Магнитная часть силы Лоренца оставляет неизменной энергию заряда, а меняет лишь направление импульса.

Формула Лоренца является одним из важнейших соотношений электродинамики. Она позволяет связать уравнения электромагнитного поля с уравнениями движения заряженных частиц:

$$m \frac{d^2 \mathbf{r}}{dt^2} = q \mathbf{E} + q [\mathbf{v}, \mathbf{B}]$$

В вакууме, в постоянном однородном магнитном поле ($\mathbf{E} = 0$) заряженная частица будет двигаться по винтовой линии. Составляющая скорости вдоль линий поля $\mathbf{v}_{\parallel} \uparrow \uparrow \mathbf{B}$ обеспечивает равномерное движение заряда по направлению силовых линий магнитного поля

$$m \frac{d^2 \mathbf{r}}{dt^2} = q [\mathbf{v}_{\parallel}, \mathbf{B}] = 0, \quad v = v_{\parallel} = \text{const.}$$

Составляющая вектора скорости, перпендикулярная вектору $\mathbf{B} \perp \mathbf{v}_{\perp}$, обеспечивает равномерное вращение по окружности.

Радиус окружности определяется из условия

$$m \frac{v_{\perp}^2}{r} = q v_{\perp} B \quad r = \frac{m v_{\perp}}{q B}$$

Частота вращения частицы (циклотронная частота) равна

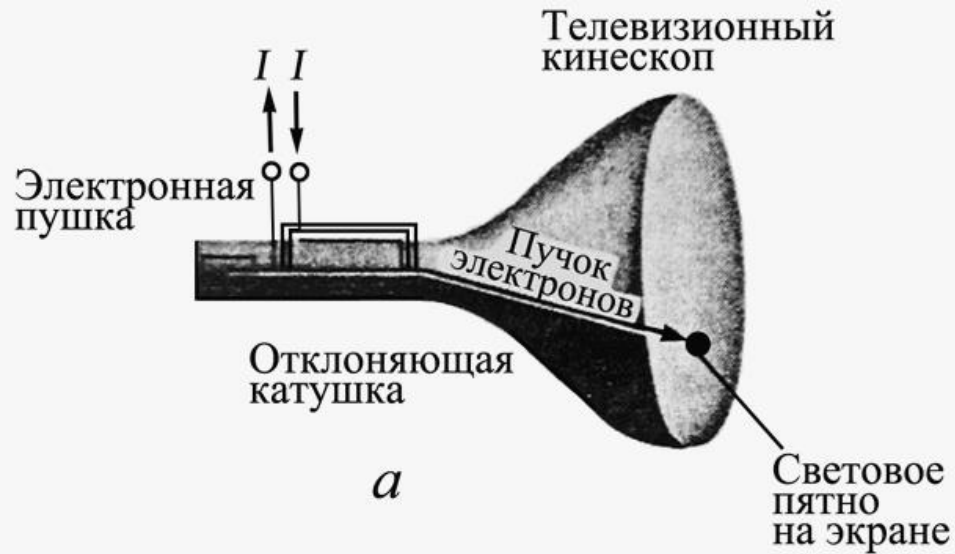
$$\omega = \frac{2\pi}{T} = \frac{qB}{m} \quad T = \frac{2\pi r}{v_{\perp}} = \frac{2\pi m}{qB}$$

– период обращения не зависит ни от r , ни от v .
Шаг винтовой линии равен Tv_{\parallel} .

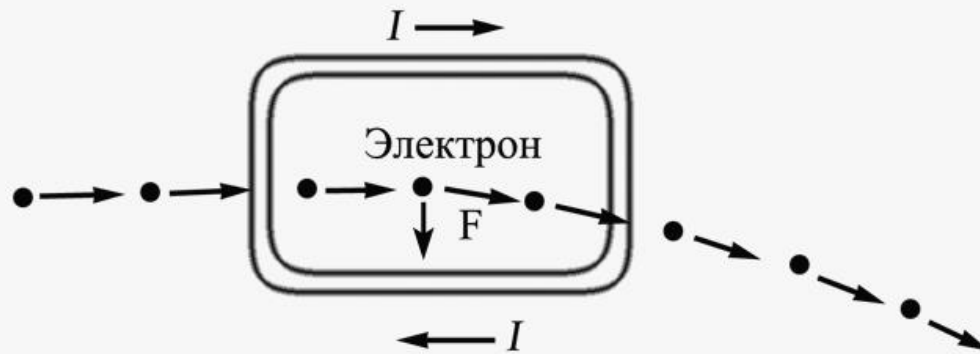
Повседневное действие магнитной силы на движущийся заряд мы наблюдаем на телевизионном экране.

Движение пучка электронов по плоскости экрана стимулируется магнитным полем отклоняющей катушки.

Если поднести постоянный магнит к плоскости экрана, то легко заметить его воздействие на электронный пучок по возникающим в изображении искажениям (рис. 4).



a



б

Рис. 4. Телевизионный кинескоп. Катушка, отклоняющая пучок в вертикальном направлении (а); один из витков отклоняющей катушки (б); между движущимся электроном и током, протекающим по нижней части витка, действует сила притяжения; между электроном и током, протекающим по верхней части витка, действует сила отталкивания.

3. Ускорители элементарных частиц

Рассмотрим ускоритель ионов, представляющий собой кольцевой магнит диаметром 2 км и создающий поле до 1,8 Тл.

Между полюсами этого магнита расположена тороидальная вакуумная камера.

Если смотреть на ускоритель сверху (рис. 5), то пучок протонов движется по часовой стрелке со скоростью v , очень близкой к скорости света.

Определим направление магнитного поля B и энергию протонов, когда B достигает значения 1,8 Т.

Направление магнитного поля может быть определено правилом левой руки: если ладонь левой руки расположить так, чтобы в нее входили силовые линии магнитного поля, а четыре пальца направить вдоль проводника по току, то отведенный большой палец укажет направление силы Лоренца (рис. 5).

Отсюда следует, что поле **B** направлено из плоскости чертежа.

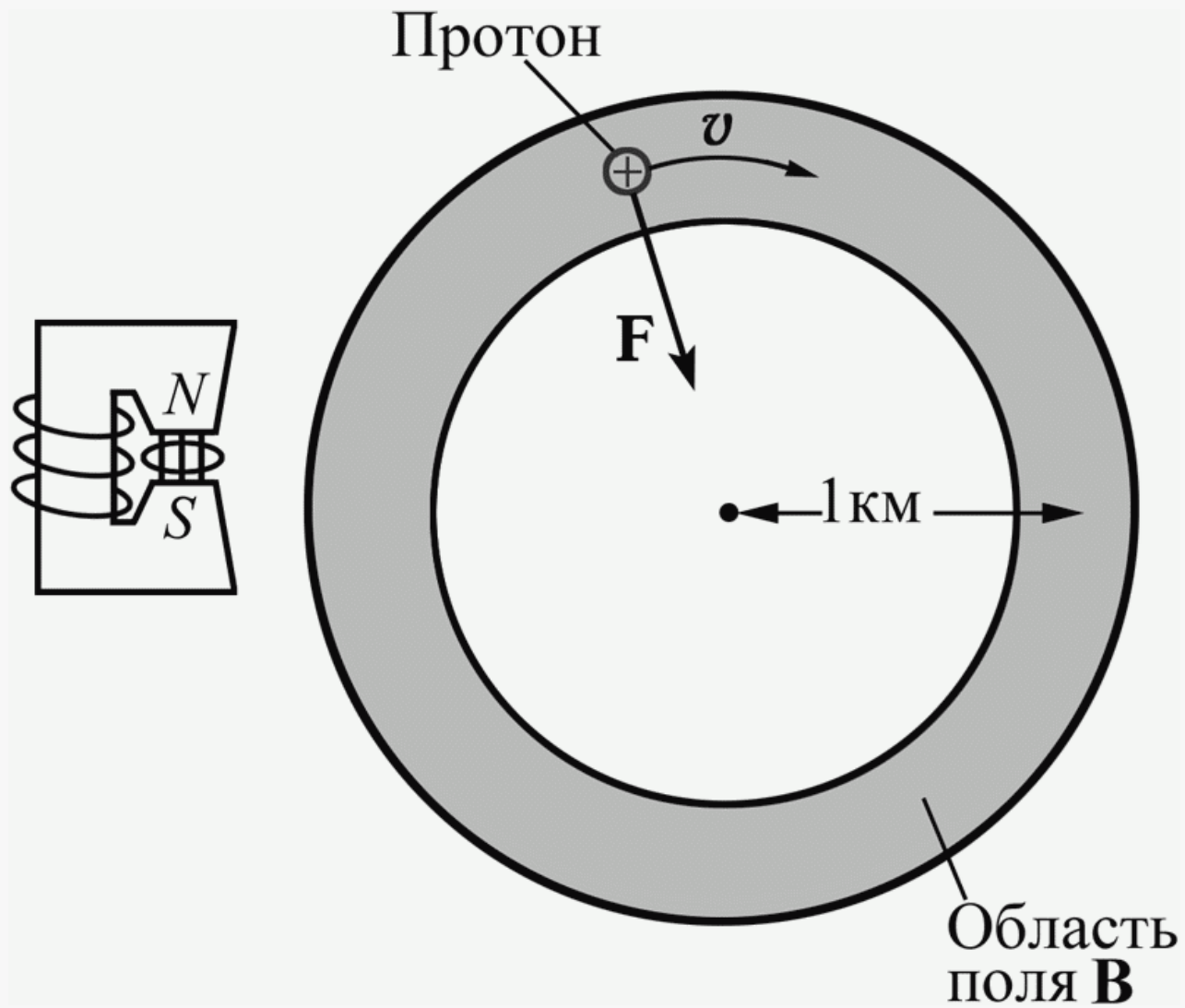


Рис. 5

Центростремительная сила равна $F_{\text{ц}} = mr(v^2/R)$, где mr – релятивистская масса протона.

Так как эта сила обусловлена действием магнитного поля, она равна (evB) . Таким образом,

$$m_r v^2 / R = evB.$$

Поскольку $v \approx c$, заменим скорость v на скорость света c :

$$m_r c^2 = ecBR.$$

Левая часть этого равенства представляет собой полную релятивистскую энергию E . Подставляя в правую часть численные значения, находим

$$E = (1,6 \cdot 10^{-19})(3 \cdot 10^8)(1,8)(10^3) \text{ Дж} = 8,64 \cdot 10^{-8} \text{ Дж} = 540 \text{ ГэВ}.$$

Заметим, что магнитное поле не меняет значений скорости или энергии частиц. Ускорение протонов осуществляется при каждом их обороте в кольце за счет электрического поля, которое действует на коротком участке кольца.

Если частота ускоряющего электрического поля и величина **B** магнитного поля не меняют своих значений, то такой ускоритель называется **циклотрон**.

Если частота ускоряющего электрического поля меняется, а величина **B** магнитного поля не меняют своих значений, то такой ускоритель называется **фазатрон**.

Если частота ускоряющего электрического поля и величина **B** магнитного поля меняют своих значения, то такой ускоритель называется **синхрофазатрон**.

4. Сила Ампера

Рассмотрим проводник с током, размещенный в магнитном поле.

Ток представляет совокупность зарядов q ,двигающихся направленно со скоростью v .

Концентрация зарядов равна n .

Плотность тока равна

$$\mathbf{j} = qv n.$$

На объем проводника dV со стороны магнитного поля действует сила, равная сумме магнитных составляющих сил Лоренца по всей совокупности зарядов ndV :

$$d\mathbf{F} = nq[\mathbf{v}, \mathbf{B}]dV = [\mathbf{j}, \mathbf{B}]dV.$$

Рассмотрим тонкий проводник площадью поперечного сечения S , длиной dl , объемом $dV = Sdl$.

В этом случае

$$d\mathbf{F} = [\mathbf{j}, \mathbf{B}] dl \cdot S = [\mathbf{j}Sdl, \mathbf{B}]$$

или

$$d\mathbf{F} = dV[\mathbf{j}, \mathbf{B}] = I[d\mathbf{l}, \mathbf{B}].$$

Здесь вектор $d\mathbf{l}$ задается равенством $\mathbf{j}Sdl = Id\mathbf{l}$ и по направлению совпадает с направлением тока.

Действие силы на бесконечно малый элемент проводника с током, помещенного в магнитное поле, была установлена Ампером. Эта сила носит название силы Ампера.

Сила Ампера направлена перпендикулярно векторам $d\mathbf{l}$ и \mathbf{B} и может определена следующим образом:

вращение векторов $d\mathbf{l}$ и \mathbf{B} на наименьший угол, наблюдаемое со стороны конца вектора $d\mathbf{F}$, происходит против часовой стрелки;

правилом левой руки: если ладонь левой руки расположить так, чтобы в нее входили силовые линии магнитного поля, а четыре пальца направить вдоль проводника по току, то отведенный большой палец укажет направление силы Ампера (рис. 6).

На провод конечной длины действует сила, определяемая геометрической суммой сил, действующих на все участки проводника:

$$\mathbf{F} = \int I [d\mathbf{l}, \mathbf{B}].$$

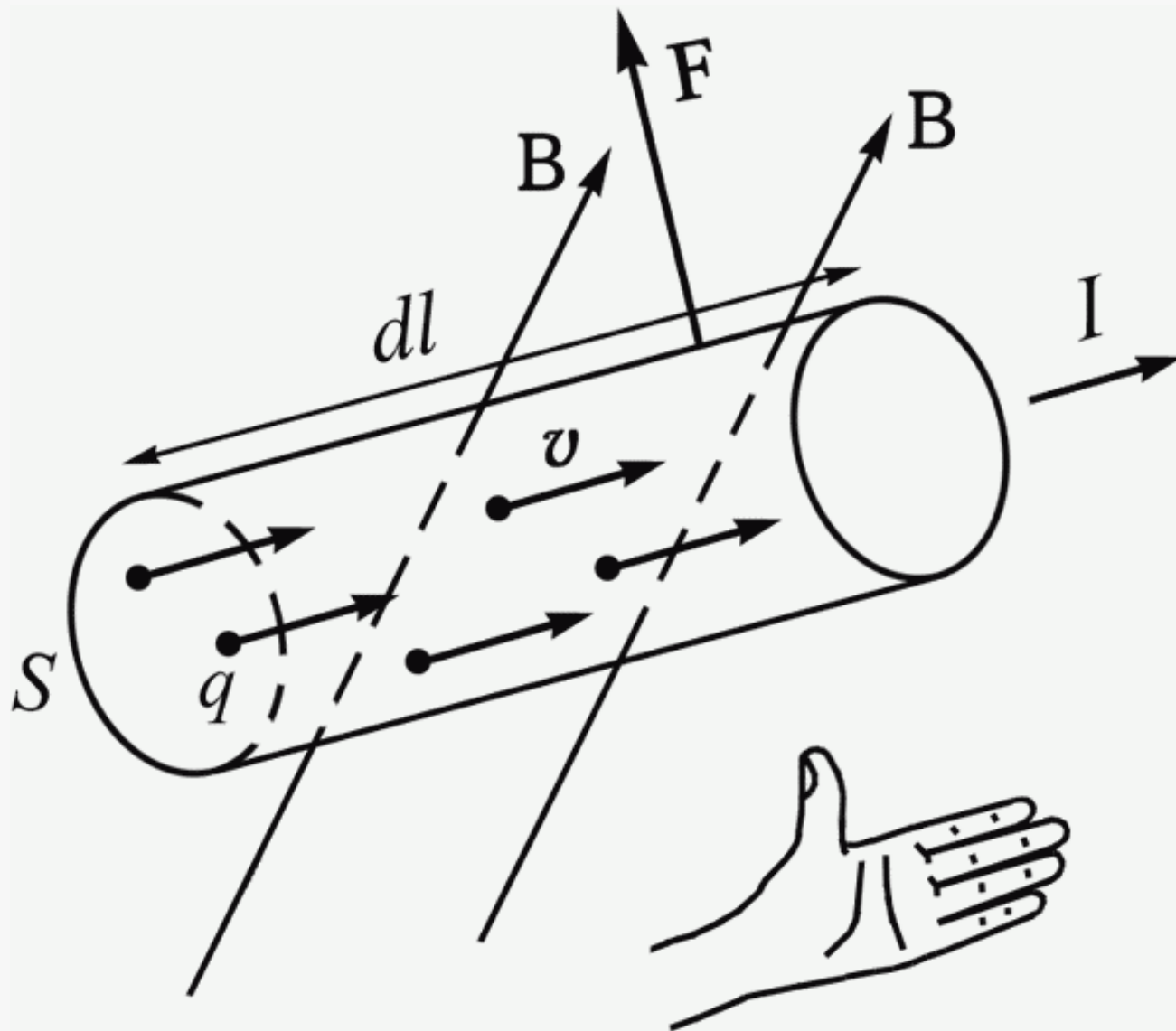
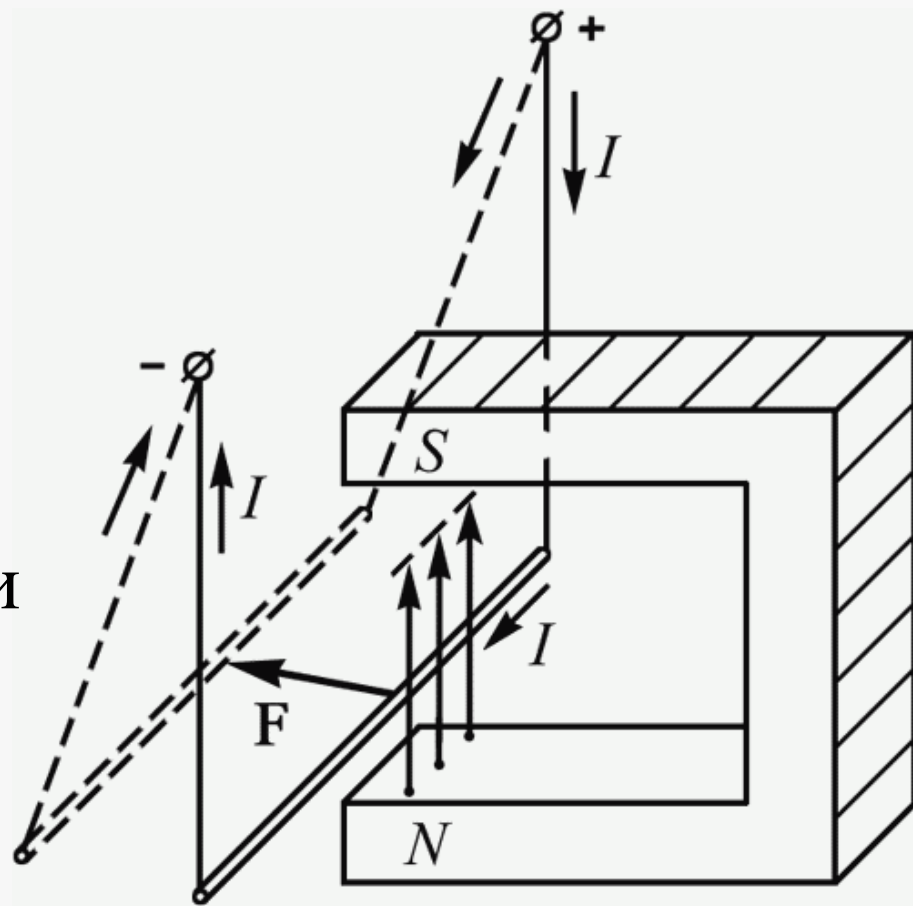


Рис. 6

Экспериментально действие силы Ампера можно наблюдать по отклонению проводника, расположенного между полюсами магнита при пропускании тока по проводнику.

Проводник втягивается или выталкивается из пространства между полюсами, в зависимости от направления тока, рис. 7.



Если провод отклоняется влево, то можно ожидать, поскольку действие равно противодействию, что сам магнит испытывает толчок вправо.

Иными словами, если по проволоке протекает ток, то возникает сила, действующая со стороны проволоки на магнит.

Это впервые обнаружил в своих опытах датский физик и философ Эрстед в 1820 г.

Эрстед обнаружил, что если вдоль способной свободно вращаться магнитной стрелки разместить проводник, то при прохождении тока по проводнику стрелка изменяет свою первоначальную ориентацию и устанавливается перпендикулярно проводу.

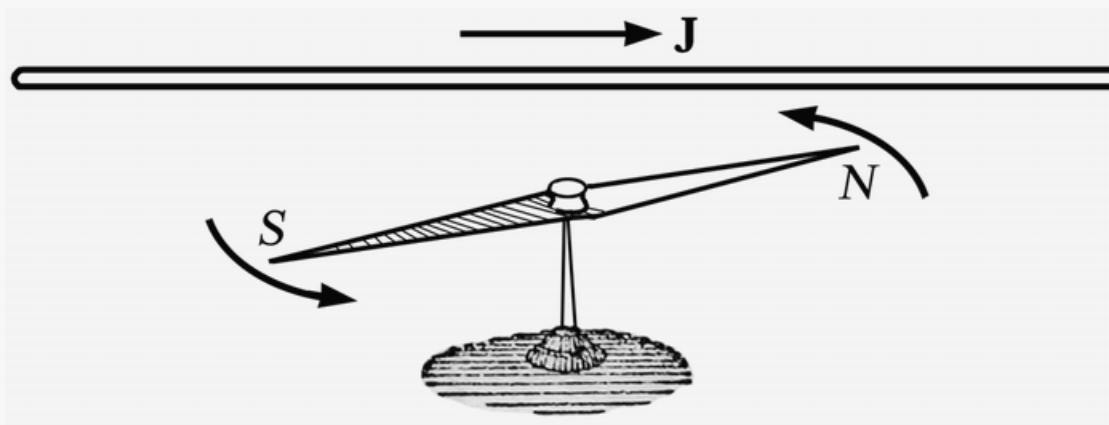


Рис. 8

При изменении направления тока стрелка разворачивается на 180°

То же происходит, если переместить проводник с током под стрелку.

В опытах Эрстеда была впервые установлена связь между электрическими и магнитными явлениями.

5. Магнитное поле постоянного тока. Закон Био – Савара – Лапласа

На основе своих опытов по действию тока на магнитную стрелку Эрстед пришел к правильному заключению, что это воздействие связано с возникновением в пространстве вокруг проводника с током вихревого магнитного поля.

Причиной возникновения магнитного поля являются в конечном итоге движущиеся заряды.

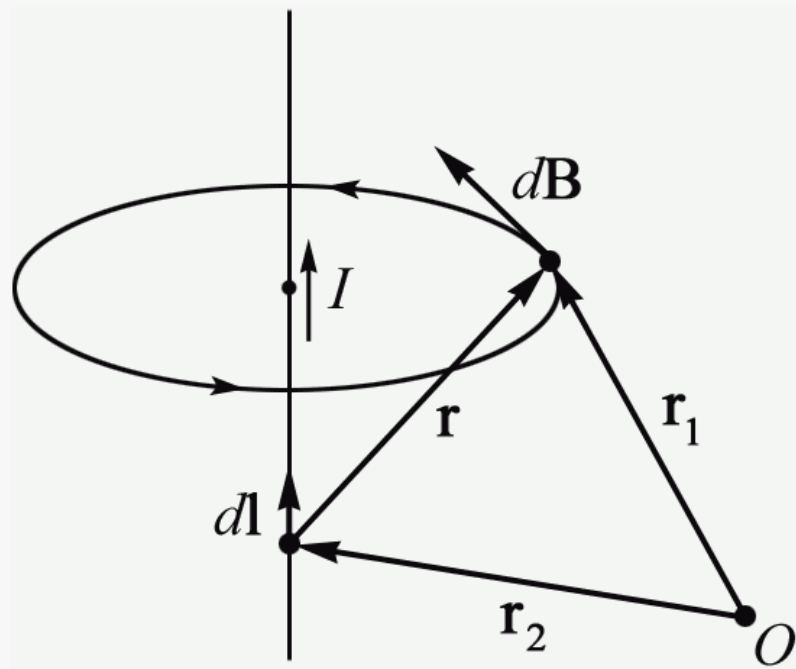
Экспериментально действие элемента тока на магнитный полюс было изучено Био и Саваром. Лаплас облек закон Био – Савара в математическую форму взаимодействия между элементом тока и намагниченной точкой.

Закон, определяющий индукцию магнитного поля $d\mathbf{B}$ элементарного отрезка тока $I d\mathbf{l}$ на расстоянии \mathbf{r} от него, называют законом Био – Савара – Лапласа:

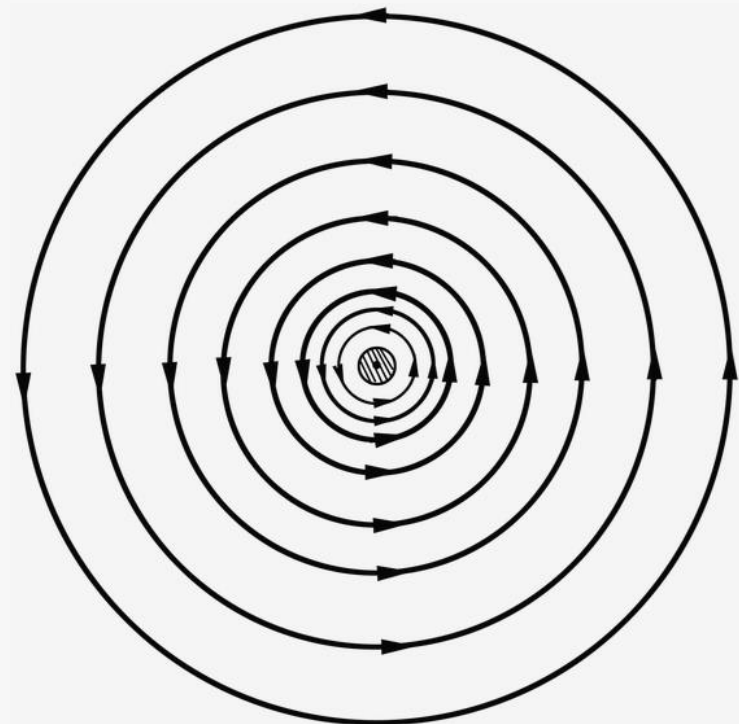
$$d\mathbf{B} = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{I [d\mathbf{l}, \mathbf{r}]}{r^3}$$

При удалении от элемента $I d\mathbf{l}$ вдоль прямой r , проведенной из этого элемента, напряженность его поля убывает $\sim r^{-2}$ (рис. 9).

Направление поля перпендикулярно плоскости, проведенной через векторы $d\mathbf{l}$ и \mathbf{r} , и имеет вид концентрических окружностей (рис. 9).



a)



б)

Рис. 9. Вычисление индукции магнитного поля $d\mathbf{B}$ от элемента с током Idl . Закон Био – Савара – Лапласа: $d\mathbf{B} \perp \mathbf{r}, d\mathbf{l}$ (а); силовые линии магнитного поля прямого тока (б) где μ_0 – постоянная, определяемая выбором системы единиц и равная в СИ $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ Гн/м} = 1,25663706144 \cdot 10^{-6} \text{ Гн/м}$.

Направление силовых линий магнитного поля определяется правилом правой руки. Это правило демонстрируется на рис. 10.

Большой палец правой руки ориентируют в направлении тока, тогда остальные пальцы в согнутом положении укажут направление силовых линий магнитного поля **B**.

Силовые линии магнитного поля представляют собой концентрические окружности, в центре которых находится проводник с током.

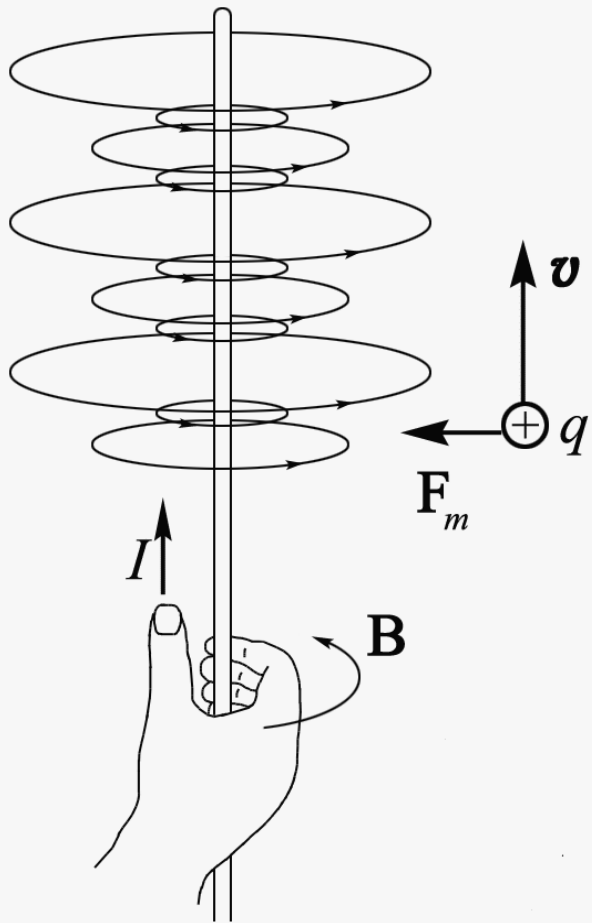
Из рис. 9, *a* видно, что поле \mathbf{B} в точке, в которой находится заряд q , направлено за плоскость чертежа, а векторное произведение $[\mathbf{v}, \mathbf{B}]$ направлено влево и указывает направление \mathbf{F}_m — магнитной составляющей силы Лоренца.

Для магнитного поля справедлив принцип суперпозиции — индукция магнитного поля в данной точке пространства равна геометрической сумме индукций полей от всех имеющихся источников.

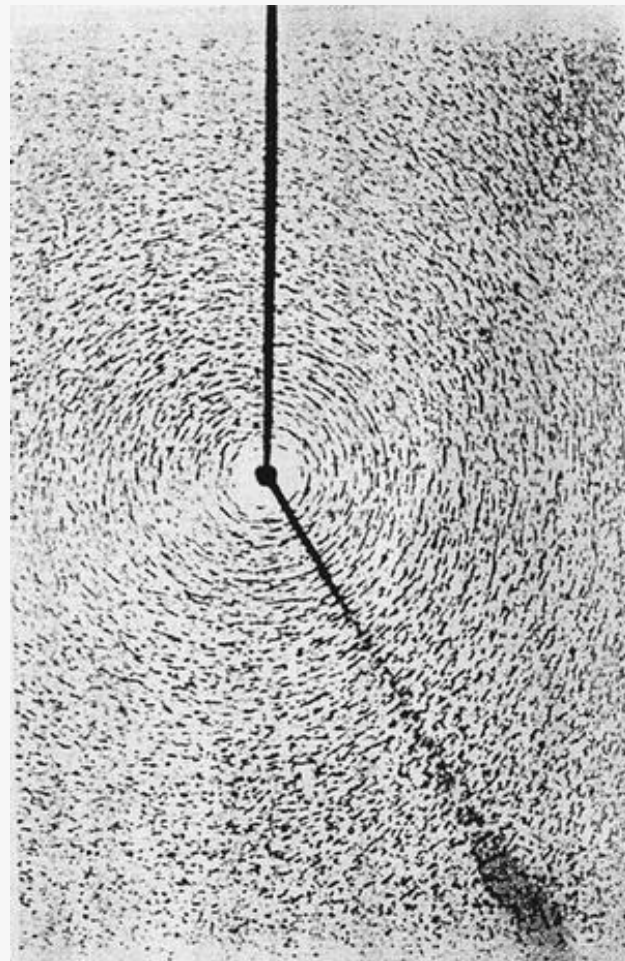
$$\mathbf{B} = \int_{(L)} d\mathbf{B}$$

Рис. 10. Иллюстрация правила правой руки (а); показаны силовые линии магнитного поля \mathbf{B} , создаваемого прямолинейным током; точечный заряд q , движущийся со скоростью \mathbf{v} параллельно проводу с током I , притягивается к нему;

фото железных опилок, рассыпанных вблизи длинного прямолинейного проводника с током; при включении тока железные опилки ведут себя подобно маленьким магнитикам, располагаясь вдоль силовых линий магнитного поля (б).



a)



б)

Рис. 10.

Закон Био – Савара – Лапласа удобен для расчета постоянных магнитных полей.

Пусть ток I течет по окружности радиусом R . В любой точке A , лежащей на оси окружности на расстоянии a от плоскости окружности, индукция магнитного поля равна (рис. 11)

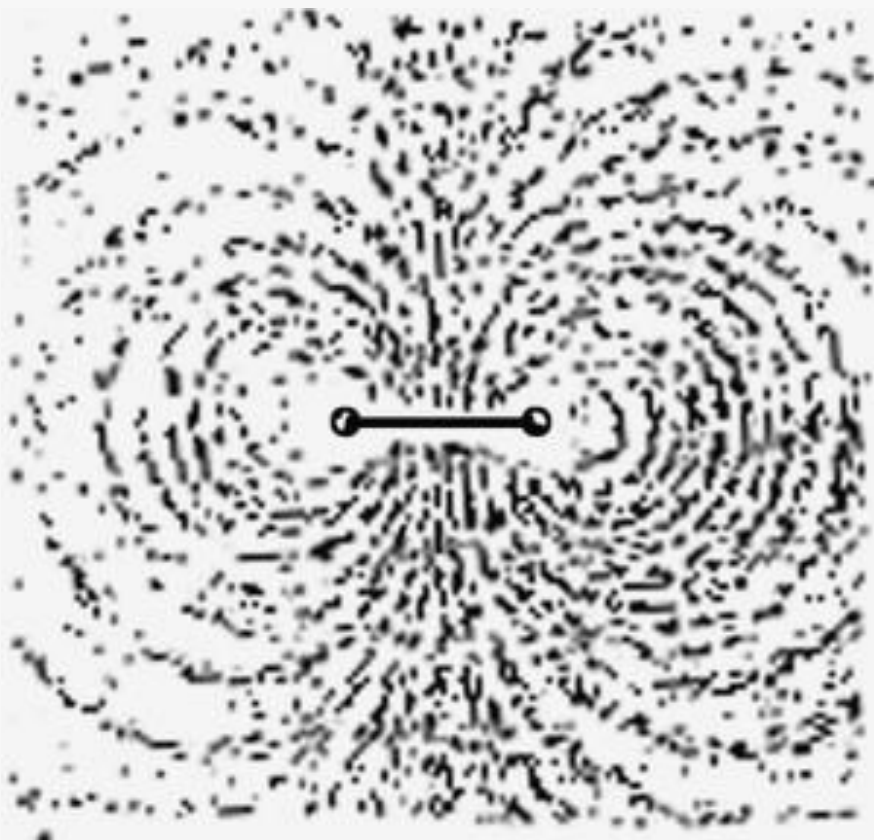
$$dB_y = dB \sin \theta = \frac{\mu_0 I \sqrt{a^2 + R^2} dl \sin(\pi/2)}{4\pi(a^2 + R^2)^{3/2}} \frac{R}{\sqrt{a^2 + R^2}}$$

$$dB_x = dB \cos \theta \cos \alpha.$$

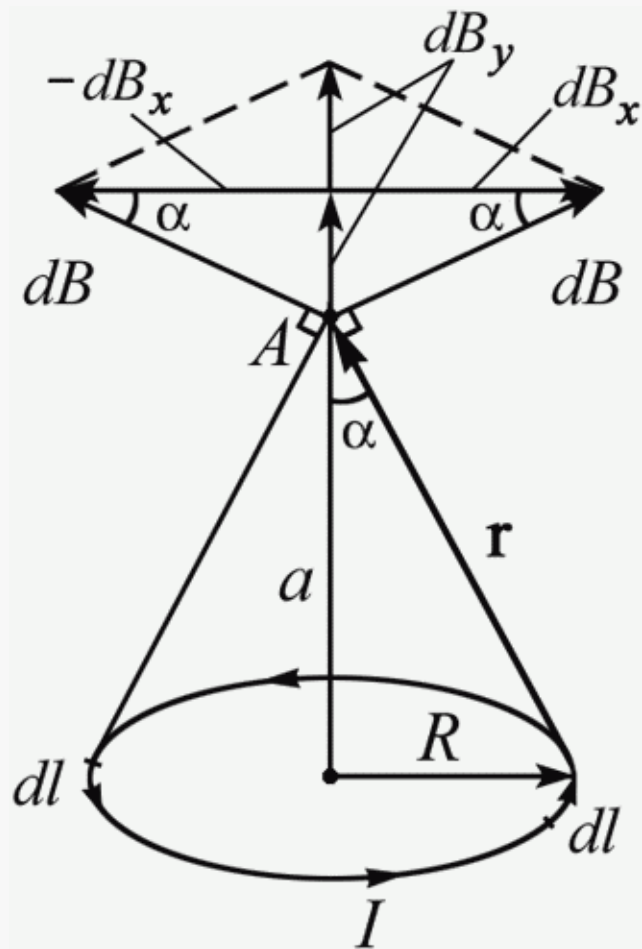
Интегрируя по всей окружности $\int_{(L)} dl = 2\pi R$,

находим составляющую вектора индукции, перпендикулярную плоскости кольца с током:

$$B_y = \frac{\mu_0 IR^2}{2(a^2 + R^2)^{3/2}}$$



а)



б)

Рис. 11. Силовые линии магнитного поля кругового тока – опыт с железными опилками (а); вычисление индукции магнитного поля на оси кольца с током. $d\mathbf{B} \perp \mathbf{r}$ (б)

В силу симметричного расположения элементов с током по кольцу сумма составляющих dB_x (параллельных плоскости кольца) равна нулю

$$\left(B \int_0^{2\pi} \cos \alpha d\alpha = 0 \right)$$

(рис. 12). Поэтому полная величина вектора \mathbf{B} на оси кольца совпадает с составляющей B_y . В центре кругового витка с током ($a = 0$)

$$B_y = \frac{\mu_0 I}{2R}$$

При больших расстояниях до кольца $a \gg R$, вектор индукции убывает пропорционально кубу расстояния

$$B = \frac{\mu_0 IR^2}{2a^3}$$

Магнитное поле Земли создается кольцевым током, текущим в плоскости экватора на расстоянии $R = 5000$ км от центра Земли. Определим величину этого тока, если вблизи магнитного полюса Земли $B \sim 1 \text{ Гс} \approx 10^{-4} \text{ Тл}$.

Для этого решим уравнение относительно I :
$$B = \frac{\mu_0 I R^2}{2r^3}$$

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

Расстояние от кольцевого тока до магнитного полюса равно $r = \sqrt{R^2 + a^2} = 8100$ км, где $a = R_3 = 6300$ км – радиус Земли и $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Н/А². Подставляя эти величины в приведенную выше формулу, получаем

$$I = \frac{2 \cdot (10^{-4}) (8,1 \cdot 10^6)^3}{4\pi (5 \cdot 10^6)^2 (10^{-7})} = 3,38 \cdot 10^9 \text{ А.}$$

Таким образом, в недрах Земли в плоскости экватора должен протекать ток, превышающий миллиард ампер. У геофизиков есть объяснение возможности существования такого тока.

Вычислим величину индукции магнитного поля прямолинейного проводника с током I длиной L в точке A , расположенной на расстоянии R от середины проводника.

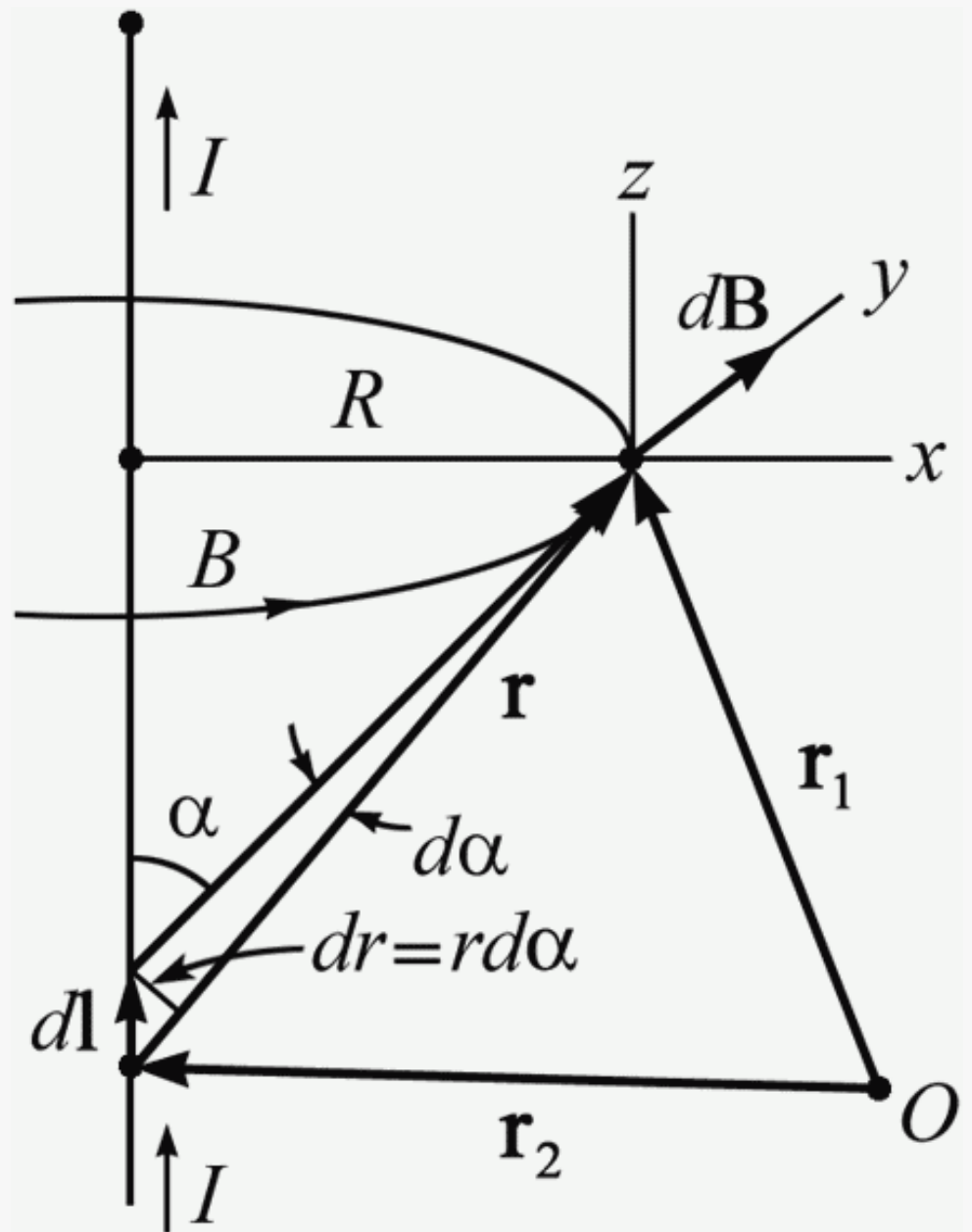
Вектор магнитной индукции $d\mathbf{B}$ от элемента с током $d\mathbf{l}$ имеет одну составляющую, перпендикулярную плоскости векторов \mathbf{r} и $d\mathbf{l}$ и направленную вдоль оси y (рис. 12):

$$d\mathbf{B} = dB_y = \frac{\mu_0 I [d\mathbf{l}, \mathbf{r}]}{4\pi r^3} = \frac{\mu_0 I dl \sin(d\mathbf{l}, \mathbf{r})}{4\pi r^2}$$

Рис. 12. Вычисление индукции магнитного поля \mathbf{B} для элемента $d\mathbf{l}$ прямолинейного проводника с током I . Ось y направлена перпендикулярно плоскости страницы.

$$\mathbf{r}_1 + \mathbf{r} = \mathbf{r}_2;$$

$$\mathbf{r} = \mathbf{r}_1 - \mathbf{r}_2$$



Поскольку $dr = r d\alpha$, $R/r = \sin\alpha$, $dr/dl = \sin\alpha$,
где $\alpha = (\mathbf{dl}, \mathbf{r})$, находим

$$\left(\cos\alpha_1 = \frac{L/2}{\sqrt{R^2 + L^2/4}}, \quad \alpha_2 = \pi - \alpha_1 \right)$$

$$\begin{aligned} B &= \int_{\alpha_1}^{\alpha_2} dB = \int_{\alpha_1}^{\alpha_2} \frac{\mu_0 I}{4\pi R} \sin\alpha d\alpha = \\ &= \frac{\mu_0 I}{4\pi R} (\cos\alpha_1 - \cos\alpha_2) = \frac{\mu_0 I}{2\pi R} \cos\alpha_1 \end{aligned}$$

Для бесконечно длинного проводника $\alpha_1 \rightarrow 0$, $\cos\alpha_1 \rightarrow 1$, индукция магнитного поля вблизи середины проводника $R \ll L/2$ равна

$$B = \frac{\mu_0 I}{2\pi R}$$

Основные выводы

Релятивистским следствием закона Кулона является наличие дополнительной силы к чисто кулоновскому взаимодействию $\mathbf{F}_E = q\mathbf{E}$, пропорциональной скорости движения заряда $q\mathbf{v}$, эту дополнительную силу \mathbf{F}_m можно записать в виде $\mathbf{F}_m = q[\mathbf{v}, \mathbf{B}]$. Вектор \mathbf{B} исторически получил название индукции магнитного поля.

Полная сила, действующая на заряд в электромагнитном поле, называется силой Лоренца:

$$\mathbf{F} = \mathbf{F}_E + \mathbf{F}_m = q\mathbf{E} + q[\mathbf{v}, \mathbf{B}].$$

Магнитная составляющая силы Лоренца перпендикулярна вектору скорости, и элементарная работа этой силы равна нулю:

$$\delta A_m = (\mathbf{F}_m, d\mathbf{r}) = (\mathbf{F}_m, \mathbf{v})dt = 0$$

—сила \mathbf{F}_m меняет направление движения, но не величину скорости.

Индукция магнитного поля \mathbf{B} измеряется в СИ в теслах (Тл). В поле с индукцией в 1 Тл на частицу с зарядом в $1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл будет действовать сила $1,6 \cdot 10^{-19}$ Н, если $\mathbf{v} \perp \mathbf{B}$ и $v = 1$ м/с.

На элемент $d\mathbf{l}$ проводника с током I в магнитном поле индукцией \mathbf{B} действует сила, определяемая законом Ампера:

$$d\mathbf{F} = I[d\mathbf{l}, \mathbf{B}].$$

Из опытов Эрстеда по действию тока на магнитную стрелку следует, что в пространстве вокруг проводника с током возникает вихревое магнитное поле.

Индукция магнитного поля $d\mathbf{B}$ элементарного отрезка $d\mathbf{l}$ с током I на расстоянии \mathbf{r} от него определяется законом Био – Савара – Лапласа (СИ):

$$d\mathbf{B} = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{I [d\mathbf{l}, \mathbf{r}]}{r^3}$$

где $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ Гн/м} = 1,25663706144 \cdot 10^{-6} \text{ Гн/м}$ (СИ) – магнитная постоянная, определяемая выбором системы единиц.

Для вектора индукции магнитного поля \mathbf{B} справедлив принцип суперпозиции – магнитная индукция результирующего поля равна геометрической сумме магнитных индукций \mathbf{B}_i складываемых полей

$$\mathbf{B} = \sum_{i=1}^n \mathbf{B}_i$$

или в случае непрерывного проводника

$$\mathbf{B} = \int_{(L)} d\mathbf{B}$$

Магнитная индукция в центре кругового витка с током радиусом R :

$$B = \frac{\mu_0 I}{2R}$$

Магнитная индукция от бесконечно длинного проводника с током на расстоянии R :

$$B = \frac{\mu_0 I}{2\pi R}$$