

26 - Магнитное поле. Сила Лоренца. Сила Ампера.

TL;DR

- Магнитные силы действуют только на движущиеся заряды
- Магнитное поле характеризуется вектором магнитной индукции \vec{B} , он подчиняется закону о суперпозиции полей, а направление определяется (традиционно) при помощи магнитных стрелок. Благодаря этому можно построить силовые линии поля и визуализировать это самое поле
- Сила Лоренца: $\vec{F}_M = q \cdot [\vec{v}, \vec{B}]$. Подчиняется правилу правого винта
- Так как сила Лоренца всегда перпендикулярна движению частицы, она является гироскопической и не совершает работы над зарядом: $\delta A = \vec{F}_M \cdot \vec{v} \cdot dt = 0$
- Если помимо магнитного поля есть еще и электрическое, то электрическое поле входит в состав силы Лоренца: $\vec{F}_L = \vec{F}_{эл} + \vec{F}_M = q\vec{E} + q[\vec{v}, \vec{B}]$
- Сила Ампера: $d\vec{F}_A = I[d\vec{l}, \vec{B}]$ или частенько встречается в другой форме: $F_A = IBl \cdot \sin(\alpha)$. По сути - совокупная оценка всех сил Лоренца
- Из-за составляющей вектора скорости, при приближении скоростей к световым ($\sim 10^8 \text{ м/с}$), магнитная составляющая начинает меняться, а вместе с ней меняется и электрическая. Поэтому разделение полной электромагнитной силы на магнитную F_M и электрическую $F_{эл}$ зависит от системы отсчета и без ее указания лишено смысла

Экспериментальные факты о магнетизме

Современная теория магнетизма опирается на экспериментальные факты, установленные в XIX веке:

- магнитное поле действует на движущиеся заряженные частицы
- движущиеся заряженные частицы создают магнитное поле.

Основные опыты

📌 Опыт Эрстеда ✓

Над магнитной стрелкой помещался прямолинейный металлический проводник, направленный параллельно стрелке. При пропускании через проводник электрического тока стрелка поворачивалась почти перпендикулярно проводнику. При изменении направления тока стрелка разворачивалась на 180° . Аналогичный разворот наблюдался, если проводник переносился на другую сторону,

располагаясь не над, а под стрелкой. Таким образом, впервые была установлена связь между явлениями электричества и магнетизма

📌 Опыт Ампера ▾

Учёный рассматривал взаимодействие параллельных проводников с током. Он выяснил, что если токи в проводниках текут в противоположных направлениях, то проводники отталкиваются друг от друга. Если токи имеют одинаковое направление, то проводники притягиваются. Амперу удалось показать, что сила, приходящаяся на единицу длины любого из проводников с током, прямо пропорциональна произведению обоих токов и обратно пропорциональна расстоянию между проводниками:

$$f \sim \frac{I_1 \cdot I_2}{d}$$

Были установлено также, что:

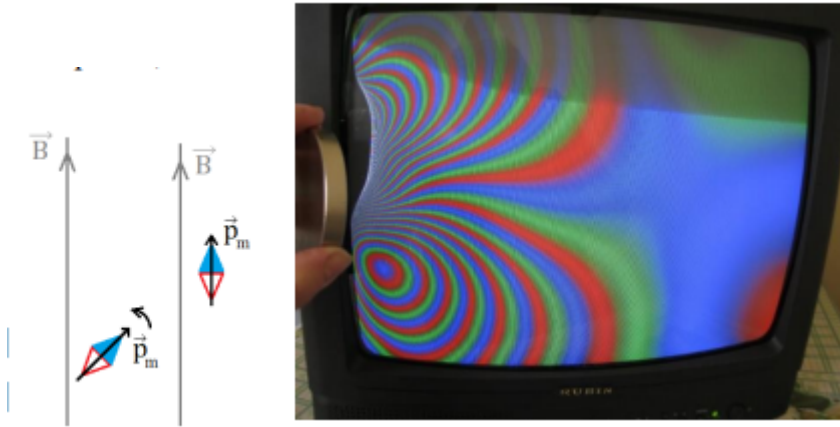
- На покоящиеся заряды магнитные поля не действуют
- Магнитное поле в точке равно векторной сумме всех магнитных полей создаваемых всеми источниками в этой точке

$$\vec{B}_{\text{системы}} = \sum_{i=1}^N \vec{B}_i$$

Магнитное поле

Для описания магнитного поля используется вектор магнитной индукции \vec{B} , а также \vec{H} как аналог вектора электростатической индукции \vec{D} . Направление вектора \vec{B} определяют при помощи магнитных стрелок.

Во внешнем магнитном поле на стрелку действует механический момент, который стремится повернуть её так, чтобы магнитный момент стрелки \vec{p}_m установился по направлению внешнего поля: $\vec{M} = [\vec{p}_m, \vec{B}]$.



Для визуализации магнитного поля по аналогии с электрическим полем, можно использовать силовые линии магнитного поля

Сила Лоренца

Это сила, действующая на движущийся заряд. Она перпендикулярна как вектору магнитной индукции \vec{B} , так и скорости частицы \vec{v} :

$$\vec{F}_m = q \cdot [\vec{v}, \vec{B}]$$

🔗 Определение направления силы

Известное мнемоническое правило «левой руки», позволяет определять направление магнитной силы так: если расположить ладонь левой руки так, чтобы линии индукции магнитного поля входили во внутреннюю сторону ладони, перпендикулярно к ней, а четыре пальца были направлены по скорости движения положительного заряда (по току), то отставленный на 90° большой палец укажет направление силы, действующей со стороны магнитного поля на положительный заряд (на проводник с током).

🔗 Полезные сведения >

Когда векторы v и \vec{B} коллинеарны ($\vec{v} \parallel \vec{B}$), сила F обращается в нуль. Выражение для магнитной силы справедливо не только для постоянных, но и для переменных магнитных полей, и для любых значений скорости v . На покоящийся заряд ($v = 0$) магнитное поле не действует, также, как и на нейтральные частицы ($q = 0$). Индикатором электрического поля служит покоящийся заряд (см. §1), индикатором магнитного поля – движущийся заряд.

Так как сила Лоренца всегда перпендикулярна вектору скорости, она не совершает работу над зарядом

Если рассмотреть очень малый объем dV , через который текут одинаковые заряды e , то магнитная составляющая переписывается как $\vec{F}_m = e[\vec{v}, \vec{B}]$. Группировка по скоростям разделит все молекула на следующие группы сил:

$$d\vec{F}(\vec{v}) = dN(\vec{v}) \cdot \vec{F}_m$$

А дальше происходят веселые математические преобразования, которые я приведу в первоначальном виде, поскольку если вы это хотите знать, то я вам не помощник:

$$\begin{aligned} d\vec{F}(\vec{v}) &= dN(\vec{v}) \cdot \vec{F}_m, & dN(\vec{v}) &= \text{число таких носителей,} \\ dN(\vec{v}) &= dn(\vec{v}) \cdot dV. \\ d\vec{F}(\vec{v}) &= dn(\vec{v}) \cdot dV \cdot e[\vec{v}, \vec{B}]. \end{aligned}$$

Магнитную силу $d\vec{F}$, действующую на весь объём dV , найдём как сумму всех $d\vec{F}(\vec{v})$. Как всегда в случае, когда складывается большое количество бесконечно малых величин, знак суммы может быть заменён на знак определённого интеграла:

$$d\vec{F} = \int_{\text{по всем значениям } \vec{v}} d\vec{F}(\vec{v}) = \int_{\text{по всем значениям } \vec{v}} dn(\vec{v}) \cdot dV \cdot e[\vec{v}, \vec{B}] = e \cdot dV \cdot \int_{\text{по всем значениям } \vec{v}} dn(\vec{v}) \cdot [\vec{v}, \vec{B}] =$$

Умножив и разделив выражение на n — концентрацию носителей тока, получим под интегралом относительную концентрацию носителей $\frac{dn(\vec{v})}{n}$, движущихся со скоростью \vec{v} . Поскольку концентрация есть величина пропорциональная числу частиц $n = \frac{N}{V}$, то относительная концентрация равна относительному числу, имеющих скорость \vec{v} :

$$\frac{dn(\vec{v})}{n} = \frac{dN(\vec{v})}{N}.$$

Тогда

$$= e \cdot n \cdot dV \cdot \int_{\text{по всем значениям } \vec{v}} \frac{dN(\vec{v})}{N} \cdot [\vec{v}, \vec{B}] =$$

Наш dV — объём проводящей среды мал, можно предположить, что магнитное поле внутри него не изменяется, т.е. в векторном произведении, стоящем под интегралом, второй множитель — const, следовательно можно поменять местами операции интегрирования (сложения) и векторного произведения:

$$= e \cdot n \cdot dV \cdot \left[\left(\int_{\text{по всем значениям } \vec{v}} \frac{dN(\vec{v})}{N} \cdot \vec{v} \right), \vec{B} \right] = e \cdot n \cdot dV \cdot [\langle \vec{v} \rangle, \vec{B}] = dV \cdot [e \cdot n \cdot \langle \vec{v} \rangle, \vec{B}] =$$

$$[\vec{a}_1, \vec{b}] + [\vec{a}_2, \vec{b}] + \dots + [\vec{a}_k, \vec{b}] = [(\vec{a}_1 + \vec{a}_2 + \dots + \vec{a}_k), \vec{b}] = \left[\left(\sum_i^k \vec{a}_i \right), \vec{b} \right]$$

$$= [e \cdot n \cdot \vec{u}, \vec{B}] \cdot dV = [\vec{j}, \vec{B}] \cdot dV,$$

мы учли, что среднее значение скорости носителей тока равно скорости их упорядоченного движения: $\langle \vec{v} \rangle = \vec{u}$, а также определение плотности тока: $\vec{j} = e \cdot n \cdot \vec{u}$.

Таким образом, сила, действующая в магнитном поле на объём проводящей среды с током, равна:

$$d\vec{F} = [\vec{j}, \vec{B}] \cdot dV.$$

Итого формула, полученная в результате этих преобразований такова:

$$d\vec{F} = [\vec{j}, \vec{B}] \cdot dV$$

Сила Ампера

Если заряды в проводнике движутся упорядочено, как при токе, то возможно взять бесконечно маленький вектор $d\vec{l}$, направленный по току, и преобразовать $dV = S \cdot dl$

$$d\vec{F} = [\vec{j}, \vec{B}] \cdot dV = [\vec{j}, \vec{B}] \cdot Sdl = [jS \cdot d\vec{l}, \vec{B}] = [I \cdot d\vec{l}, \vec{B}] = I[d\vec{l}, \vec{B}]$$

И того:

$$d\vec{F}_A = I[d\vec{l}, \vec{B}]$$

Дамы и господа, это и есть сила ампера, вернее ее дифференциал. Но очевидно ее можно поинтегрировать. В самом прекрасном случае, если не меняется векторное произведение между проводником и вектором магнитной индукции мы получим следующее:

$$\vec{F}_A = IBl \cdot \sin(\alpha)$$

Направление силы Ампера может быть определено по тем же двум правилам что и направление силы Лоренца: или по правилу «правого винта», или по правилу «левой руки».