

ЛЕКЦИЯ 5

12 марта 2013г.

Электромагнетизм

План лекции

1. Введение в магнитостатику. Сила Лоренца.
2. Взаимодействие токов. Физический смысл индукции магнитного поля.
3. Графическое изображение магнитного поля.
4. Закон Био – Савара - Лапласа.
5. Примеры расчета магнитных полей:
 - магнитное поле прямого тока;
 - магнитное поле равномерно движущегося заряда.

Введение в магнитостатику. Сила Лоренца

Электромагнитные силы - одни из наиболее важных в природе, поскольку они определяют существование атомов.

Магнитостатика - раздел физики, изучающий свойства постоянных магнитных полей.

Рассмотрим пространство, в котором находятся заряды. Выделим один из них, обозначим его q . На этот заряд действует сила со стороны всех остальных зарядов. Сила зависит от величин зарядов, от их расположения и скорости.

Из экспериментов: на заряд q действует сила:

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

\vec{v} - скорость заряда в рассматриваемой точке пространства.

Это выражение - **формула Лоренца**, а сила \vec{F} - **сила Лоренца**.

Введение в магнитостатику. Сила Лоренца

Рассмотрим пространство, в котором находятся заряды. На заряд q в этом пространстве действует сила со стороны остальных зарядов. Эта сила зависит от величин зарядов, от их взаимного расположения и от того, движутся или покоятся заряды.

Из экспериментов: на выделенный заряд действует сила:

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

\vec{v} - скорость заряда в рассматриваемой точке пространства.

Выражение называется **формулой Лоренца**, а сила \vec{F} - **силой Лоренца**.

Введение в магнитостатику. Сила Лоренца

В формуле Лоренца $\vec{F} = q\vec{E} + q[\vec{v}, \vec{B}]$ два слагаемых.

Первое слагаемое не зависит от скорости движения заряда, и определяет компоненту силы, которая действует как на движущийся, так и на неподвижный заряды. \vec{E} - это напряженность электрического поля, т.е. сила, действующая на неподвижный единичный заряд со стороны других зарядов.

Второе слагаемое определяет компоненту силы, которая возникает только тогда, когда выделенный заряд имеет отличную от нуля скорость. Вектор \vec{B} - индукция магнитного поля. Магнитное поле, в свою очередь, может быть создано в пространстве только при наличии движущихся зарядов.

Введение в магнитостатику. Сила Лоренца

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

Индукцию магнитного поля \vec{B} уже нельзя, как напряженность \vec{E} , определить через силу, действующую в рассматриваемой точке пространства на движущийся со скоростью \vec{v} заряд.

Эта сила, как следует из формулы Лоренца, зависит не только от модулей векторов \vec{B} и \vec{v} , но и от их взаимного расположения. Если $\vec{v} \parallel \vec{B}$, то $[\vec{v}, \vec{B}] = \vec{0}$, даже если $\vec{B} \neq \vec{0}$.

Итак, движущиеся заряды создают в окружающем их пространстве магнитное поле. Пример движущихся зарядов – протекание тока в проводниках. Стационарные электрические токи являются источниками *постоянного магнитного поля*. Такое магнитное поле можно рассматривать отдельно от электрического поля. Раздел физики - магнитостатика.

Взаимодействие токов. Физический смысл индукции магнитного поля

Два тонких проводника, по которым текут токи, притягивают друг друга, если токи в них имеют одинаковое направление, и отталкивают, если токи противоположны. Электрические токи создают в пространстве вокруг себя магнитное поле.

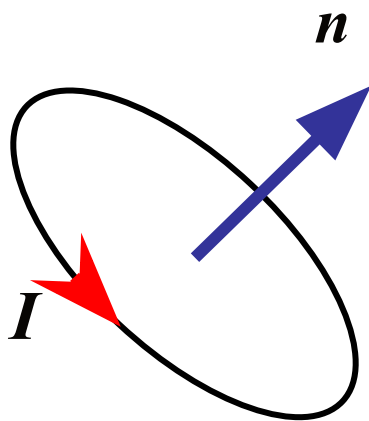
Как обнаружить магнитное поле ?

- а) по воздействию на стрелку компаса (постоянный магнит);
- б) по поведению в магнитном поле плоского замкнутого контура очень малых размеров с циркулирующим в нем пробным током.

Взаимодействие токов. Физический смысл индукции магнитного поля

Рассмотрим поведение в магнитном поле плоского замкнутого контура с током.

Ориентацию контура в пространстве характеризуют направлением нормали \mathbf{n} к контуру, которое связано с направлением тока \mathbf{I} в контуре правилом правого винта. Это **положительная** нормаль.



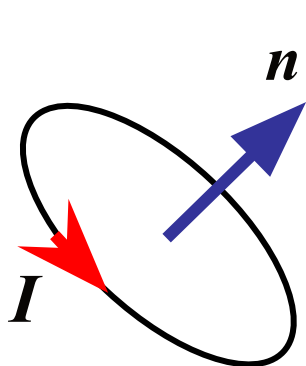
Магнитное поле устанавливает контур положительной нормалью по направлению поля.

При повороте контура возникает *вращающий момент*, стремящийся вернуть контур в равновесное положение.

Модуль момента зависит от угла α между нормалью и направлением поля.

При $\alpha = \pi/2$ модуль вращающего момента максимален (M_{max}).

Взаимодействие токов. Физический смысл индукции магнитного поля



Вращающий момент зависит от магнитного поля. В то же время он зависит и от свойств контура: площади S и тока в контуре. Поэтому он не может служить силовой характеристикой поля. Свойства контура учитываются через его *дипольный магнитный момент* :

$$\vec{p}_m = IS\vec{n}$$

Дипольный магнитный момент — это вектор, направление которого совпадает с направлением положительной нормали контура.

Итак, имеем два параметра контура в магнитном поле - *вращающий момент*, зависящий от \vec{B} , и *магнитный момент*, определяющий свойства контура.

При одинаковой ориентации разных пробных контуров ($\alpha = const$) для них оказывается одним и тем же отношение

$$M_{max} / p_m$$

Взаимодействие токов. Физический смысл индукции магнитного поля

Поэтому в качестве модуля магнитной индукции принимается величина, равная отношению :

$$B = \frac{M_{max}}{p_m}$$

Итак, **магнитная индукция** это векторная величина, модуль которой задается выражением $B = M_{max} / p_m$, а направление – равновесным положением положительной нормали к контуру с током.

Единица измерения магнитной индукции - *тесла* (Т).

1 тесла равна магнитной индукции однородного поля, в котором на плоский контур с током, имеющим магнитный момент $1 \text{ А} \cdot \text{м}^2$, действует максимальный вращающий момент, равный $1 \text{ Н} \cdot \text{м}$.

Взаимодействие токов. Физический смысл индукции магнитного поля

Для магнитного поля, как и для электрического, справедлив принцип суперпозиции:

Поле с магнитной индукцией \vec{B} , порождаемое несколькими движущимися зарядами (токами), равно векторной сумме полей \vec{B}_i , порождаемых каждым зарядом (током) в отдельности:

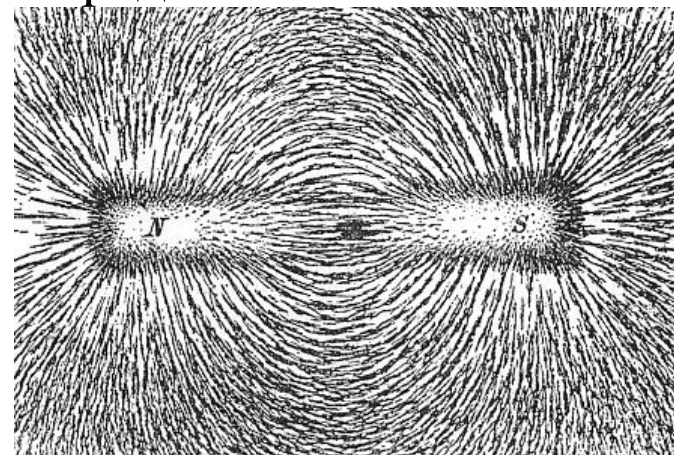
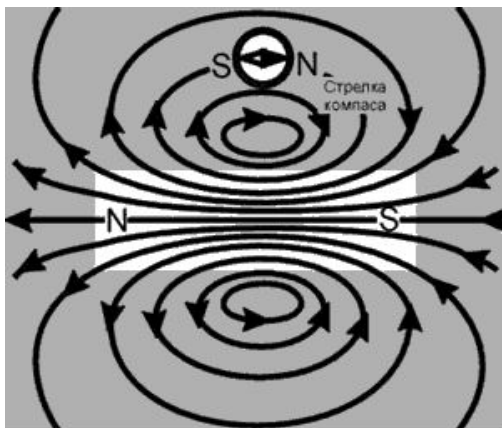
$$\vec{B} = \sum \vec{B}_i$$

Графическое изображение магнитного поля

Как и электрическое поле, магнитное поле изображается с помощью силовых линий (линий магнитной индукции).

Силовые линии магнитного поля это такие линии, касательные к которым в каждой точке совпадают по направлению с векторами магнитной индукции.

Силовые линии постоянного магнитного поля замкнуты, либо начинаются и оканчиваются в бесконечности. Магнитные поля изображаются так, чтобы картина поля давала направление и представление о величине магнитной индукции. Для этого в местах увеличения магнитной индукции силовые линии сгущаются, а в местах ослабления изображаются более редкими.



Закон Био – Савара – Лапласа

Токи, текущие по проводникам, создают в окружающем пространстве магнитное поле. **Как вычислить магнитное поле произвольного тока?** В электростатике: взаимодействие точечных зарядов, затем - принцип суперпозиции. В магнитостатике - тот же прием. Аналог точечных зарядов - малые прямолинейные участки проводников с током - *элементы тока*. **Важно знать закон, по которому вычисляется магнитное поле, созданное элементом тока.**

Для магнитной индукции поля, создаваемого элементом тока I длиной dl , справедлива формула

Это закон Био – Савара – Лапласа

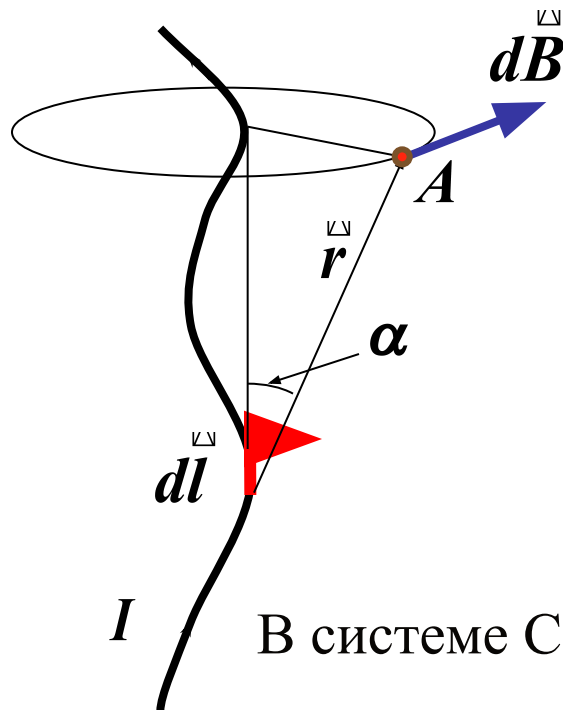
$$d\mathbf{B} = k' \frac{I [d\mathbf{l}, \mathbf{r}]}{r^3}$$

Закон Био – Савара – Лапласа

$$d\vec{B} = k' \frac{I [d\vec{l}, \vec{r}]}{r^3}$$

k' - коэффициент пропорциональности
 $d\vec{l}$ - вектор, совпадающий по модулю с размером элементарного участка тока и направленный в сторону протекания тока;
 \vec{r} - вектор, проведенный от элемента тока в точку A .

Направление $d\vec{B}$: перпендикулярно плоскости, в которой располагаются векторы $d\vec{l}$ и \vec{r} ; его направление совпадает с направлением правого винта, вращающегося по кратчайшему пути от $d\vec{l}$ к \vec{r} .



В системе СИ $k' = \frac{\mu_0}{4\pi}$, следовательно

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

Закон Био – Савара – Лапласа

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

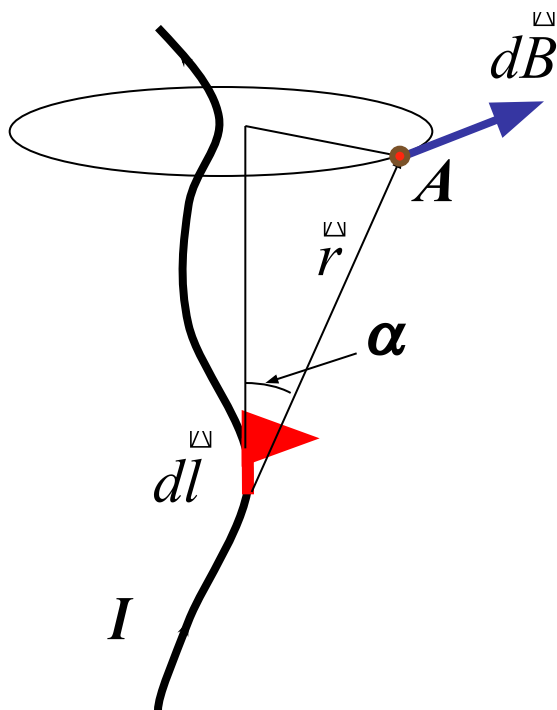
Магнитная индукция является силовой характеристикой магнитного поля.

$$[d\vec{l}, \vec{r}] = dl r \sin \alpha$$

Модуль dB определяется как

$$dB = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{I dl r \sin \alpha}{r^3} = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{I dl \sin \alpha}{r^2}$$

α - угол между векторами $d\vec{l}$ и \vec{r} .



Закон Био – Савара – Лапласа.

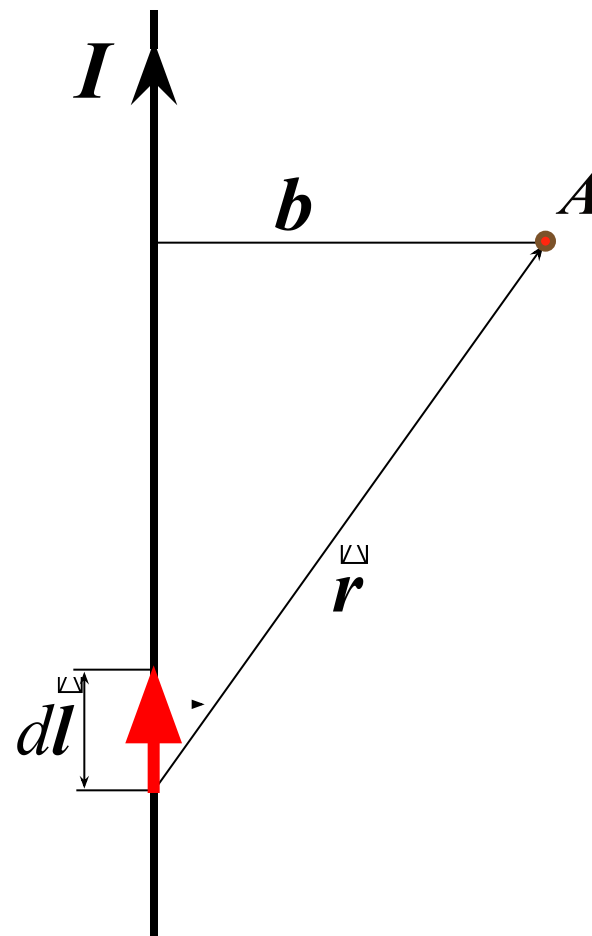
Примеры расчета магнитных полей

Поле прямого тока

Имеется тонкий, прямой, бесконечно протяженный проводник, по которому течет ток I .

Вычислим магнитную индукцию в точке A на расстоянии b от проводника.

Выделим элементарный участок тока dl , направим радиус-вектор r от элемента тока dl в точку A .



Закон Био – Савара – Лапласа.

Примеры расчета магнитных полей

Поле прямого тока

Элемент тока $d\vec{l}$ создает в точке A магнитное поле с индукцией $d\vec{B}$.

Положение $d\vec{l}$ на рисунке выбрано произвольно, вектор $d\vec{B}$ от любого другого $d\vec{l}$ в точке A будет иметь одно и то же направление – перпендикулярно плоскости чертежа.

Следовательно, сложение векторов $d\vec{B}$ можно заменить сложением их модулей.

