ЛЕКЦИЯ 1.

9 февраля 2004г.

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

Фундаментальные свойства частиц и тел:

- способность обладать *массой;*

- способность обладать *электрическим зарядом*.

<u>Электромагнитные силы</u> - одни из наиболее важных в природе, поскольку они определяют существование атомов

Электростатика изучает частный случай электромагнитного взаимодействия - взаимодействие между <u>неподвижными</u> электрическими зарядами, которое осуществляется посредством *электростатического поля.*

Раздел физики, изучающий свойства постоянных магнитных полей, называется *магнитостатикой*.

Введение в магнитостатику. Сила Лоренца

Рассмотрим пространство, в котором находятся заряды. Выделим один из них, обозначим его q. На этот заряд действует сила со стороны всех остальных зарядов. Эта сила зависит от величин зарядов, от их взаимного расположения и от того, движутся или покоятся заряды.

Экспериментами установлено, что на выделенный заряд в общем случае действует сила:

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

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

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

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.

Сила Лоренца

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

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 $\left[\vec{v}, \vec{B}\right] = 0$, даже если $\vec{B} \neq 0$.

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 ?

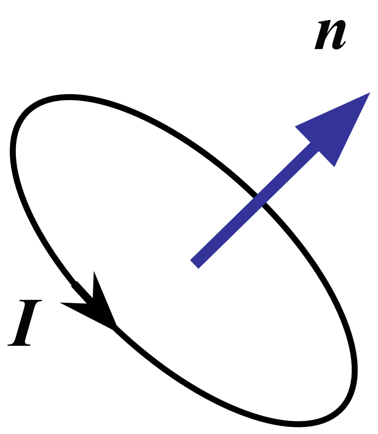
а) по воздействию на стрелку компаса (постоянный магнит)

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 подробнее поведение в магнитном поле плоского замкнутого контура с током.

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



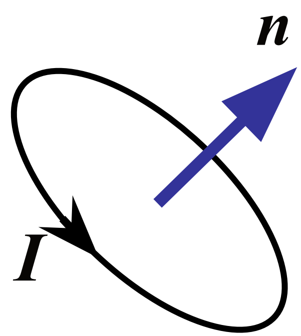
Магнитное поле устанавливает контур положительной нормалью по направлению поля.

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

Модуль момента зависит от угла $\boldsymbol{\alpha}$ 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 можно учесть через его *дипольный магнитный момент* :

$$\boxed{\vec{p}_m = IS\vec{n}_0}$$

<u>Дипольный магнитный момент</u> – 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 :

$$\boldsymbol{B} = \frac{\boldsymbol{M}_{max}}{\boldsymbol{p}_m}$$

Итак, ***магнитная индукция*** это векторная величина, модуль которой задается выражением $\boldsymbol{B} = \boldsymbol{M}_{max} / \boldsymbol{p}_m$, 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*** А·м^2, действует максимальный вращающий момент, равный ***1*** Н·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 любого постоянного магнитного поля являются замкнутыми, либо начинаются и оканчиваются на бесконечности. Магнитные поля нужно изображать так, чтобы картина поля давала кроме направления также 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**

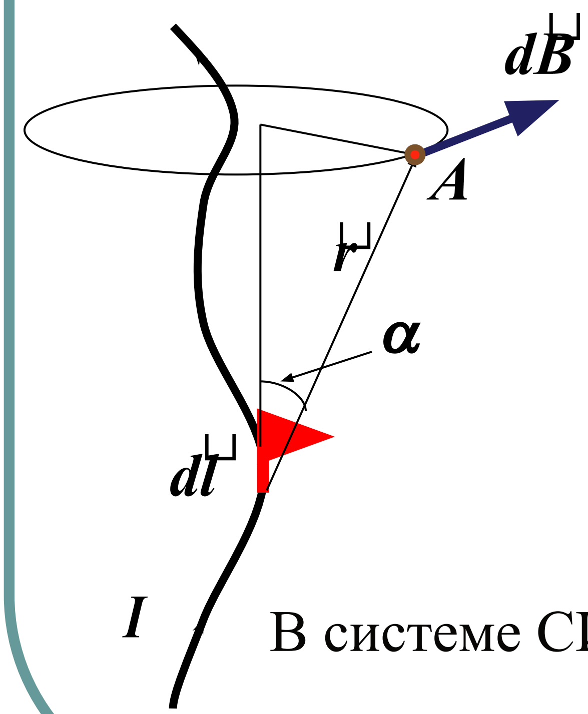
Для магнитной индукции поля, создаваемого элементом тока ***I*** длиной ***dl***, была получена формула

Это закон Био – Савара – Лапласа

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

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 с элементарным участком тока и направленный в ту сторону, в которую течет ток

$\vec{r}$ - 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 $\vec{r}$.

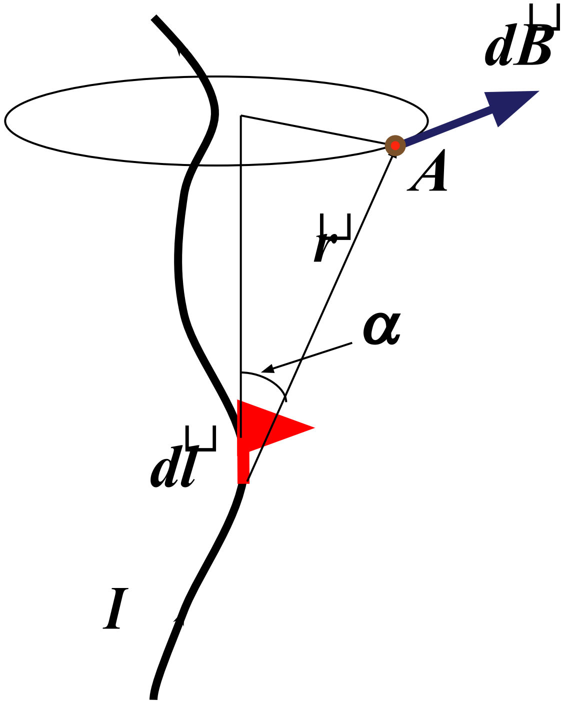
В системе СИ $k' = \frac{\mu_0}{4\pi}$, следовательно

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

Закон Био – Савара – Лапласа

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

Магнитная индукция является силовой характеристикой магнитного поля.



Модуль dB определяется как

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

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

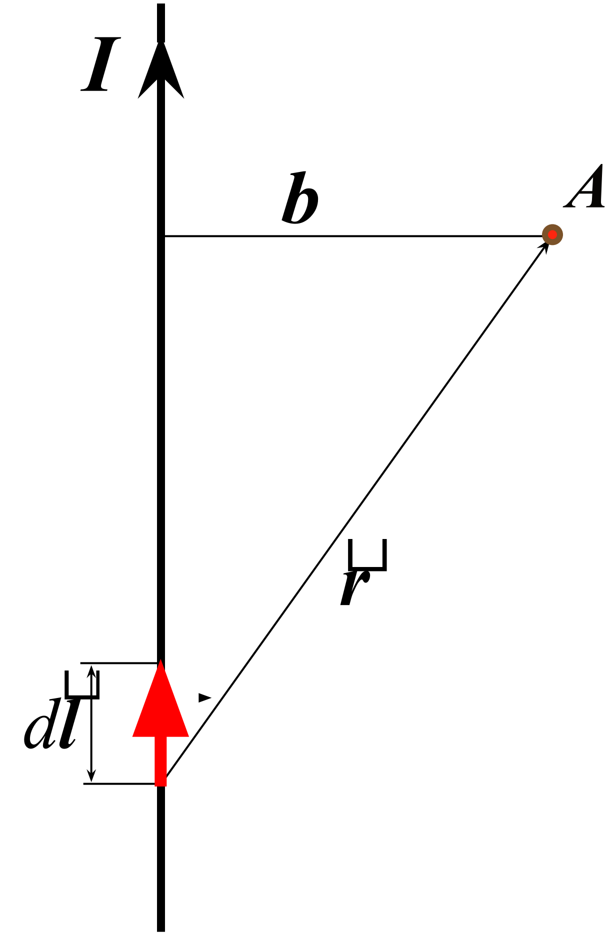
Закон Био – Савара – Лапласа.
Примеры расчета магнитных полей

Поле прямого тока

Имеется тонкий, прямой, бесконечно протяженный проводник, по которому течет ток $\boldsymbol{I}$.

Вычислим магнитную индукцию в точке $\boldsymbol{A}$ на расстоянии $\boldsymbol{b}$ от проводника.

Выделим элементарный участок тока $d\vec{l}$, направим радиус-вектор $\vec{r}$ от элемента тока $d\vec{l}$ в точку $\boldsymbol{A}$.

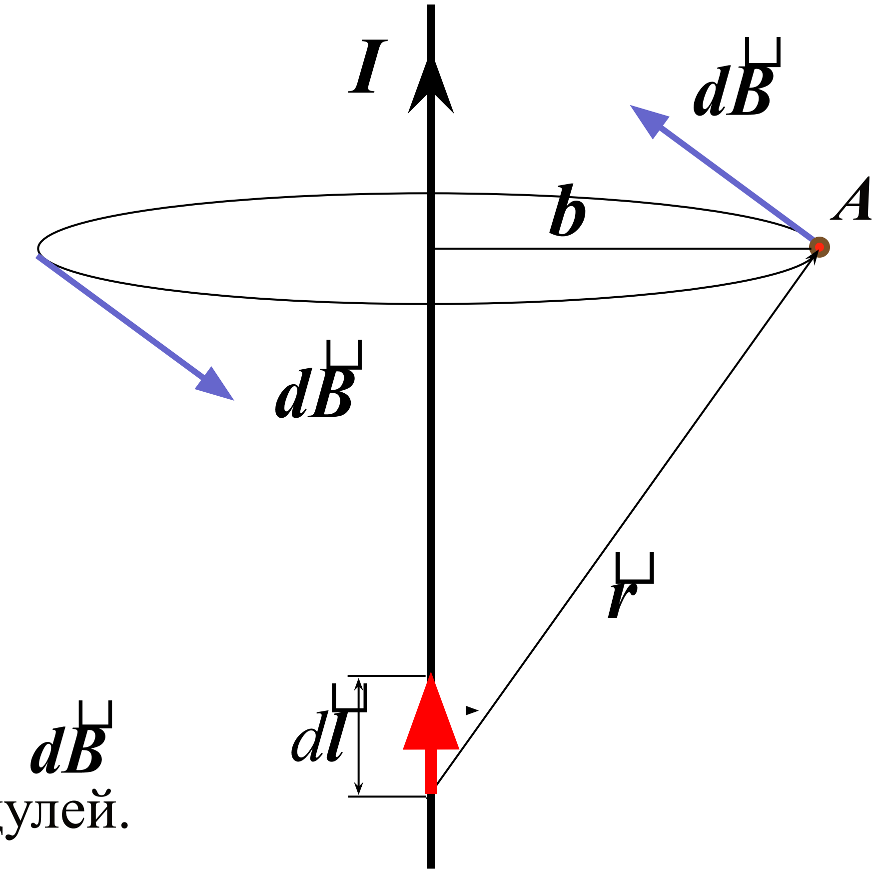


Закон Био – Савара – Лапласа.
Примеры расчета магнитных полей

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.

Закон Био – Савара – Лапласа.
Примеры расчета магнитных полей

Поле прямого тока

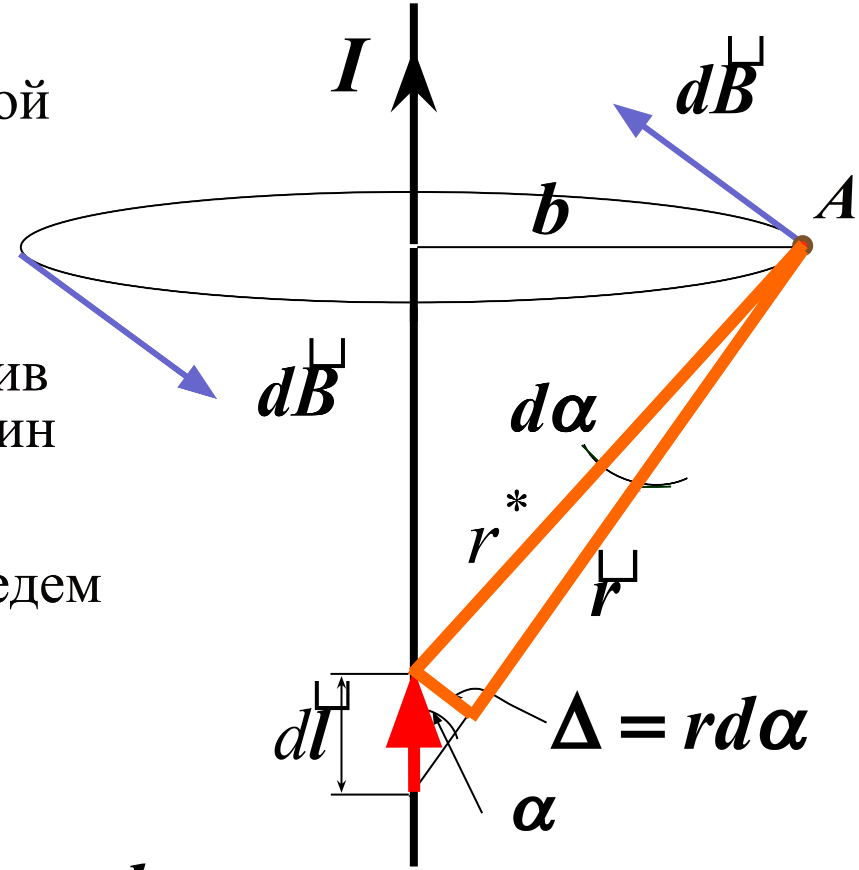
Модуль dB определяется формулой

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

Упростим формулу, выразив входящие в нее величины через один переменный параметр – угол α.

Для этого дополним рисунок и введем новые обозначения.

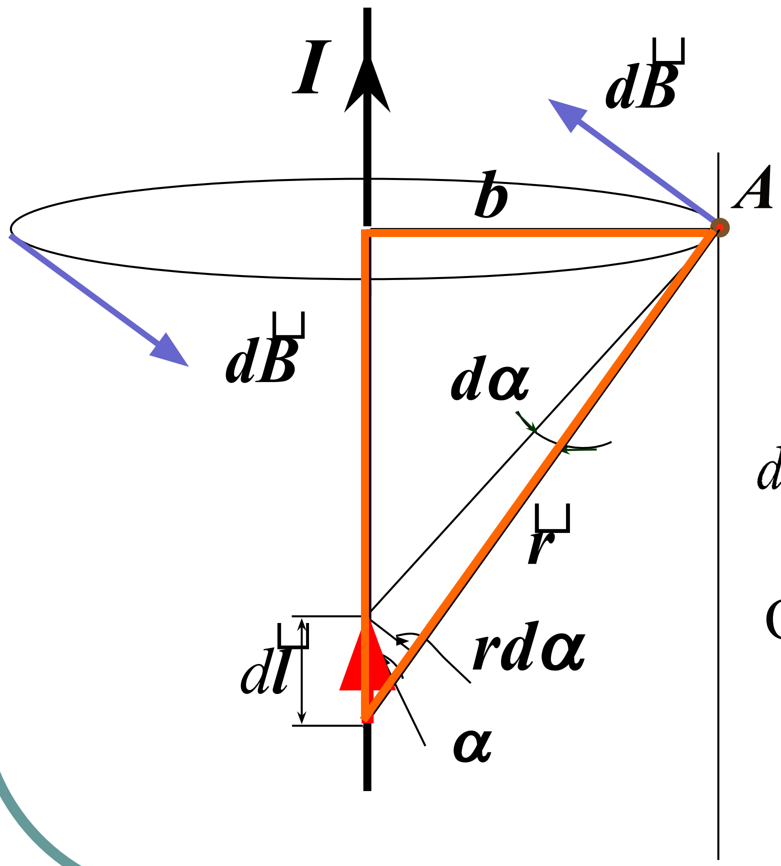
$$\frac{\Delta}{r^*} = \sin d\alpha \approx d\alpha$$



$$\Delta = r^* d\alpha \approx r d\alpha$$

Закон Био – Савара – Лапласа.
Примеры расчета магнитных полей

Поле прямого тока



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

$$r = \frac{b}{\sin\alpha}, \qquad dl = \frac{rd\alpha}{\sin\alpha} = \frac{bd\alpha}{\sin^2\alpha}$$

В итоге получим:

$$dB = \frac{\mu_0}{4\pi}\frac{I\,b\,d\alpha\,\sin\alpha\,\sin^2\alpha}{b^2\sin^2\alpha} = \frac{\mu_0}{4\pi}\frac{I\,\sin\alpha\,d\alpha}{b}$$

Окончательно получили выражение:

$$dB = \frac{\mu_0}{4\pi}\frac{I}{b}\sin\alpha\,d\alpha$$

Закон Био – Савара – Лапласа.
Примеры расчета магнитных полей

Поле прямого тока

$$dB = \frac{\mu_0}{4\pi}\frac{I}{b}\sin\alpha\, d\alpha$$

Для всех элементов тока угол α изменяется в пределах от 0 до π. Проинтегрируем в этих пределах полученное выражение:

$$B = \frac{\mu_0}{4\pi}\frac{I}{b}\int_0^{\pi}\sin\alpha\, d\alpha = \frac{\mu_0}{2\pi}\frac{I}{b}$$

Таким образом, магнитная индукция поля прямого тока определяется выражением:

$$\boxed{B = \frac{\mu_0}{2\pi}\frac{I}{b}}$$

Закон Био – Савара – Лапласа.
Примеры расчета магнитных полей

Магнитное поле равномерно движущегося заряда

Определим величину магнитного поля, создаваемого точечным зарядом q, движущимся с постоянной нерелятивистской скоростью $\vec{v}$

Движущиеся заряды создают ток, поэтому выражение для $\vec{B}$, которое создается движущимся зарядом, получим из формулы

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

Пусть имеются носители заряда e любого знака, которые движутся упорядоченно со скоростью $\vec{v}$.

Закон Био – Савара – Лапласа.
Примеры расчета магнитных полей

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

Магнитное поле равномерно движущегося заряда

Эти носители создают ток $I = jS = envS$,

где S - площадь поперечного сечения проводника, n - число носителей заряда в единице объема (концентрация).

Преобразуем числитель формулы

$$I\left[d\vec{l},\vec{r}\right] = \left[Id\vec{l},\vec{r}\right] = \left[enS\,dl\,\vec{v},\vec{r}\right] = enSdl\left[\vec{v},\vec{r}\right]$$

В итоге получим выражение вида

$$d\vec{B} = \frac{\mu_0}{4\pi}\frac{enS\,dl\left[\vec{v},\vec{r}\right]}{r^3}$$

Произведение Sdl это объем отрезка провода длиной dl, поэтому произведение $nSdl$ равно числу носителей тока в этом объеме

Закон Био – Савара – Лапласа.
Примеры расчета магнитных полей

Магнитное поле равномерно движущегося заряда

$$d\vec{B} = \frac{\mu_0}{4\pi}\frac{enS\,dl\,[\vec{v},\vec{r}]}{r^3}$$

Если полученное выражение разделить на $nSdl$, найдем магнитную индукцию поля, создаваемого одним носителем тока e, который движется со скоростью $\vec{v}$:

$$\boxed{d\vec{B} = \frac{\mu_0}{4\pi}\frac{e[\vec{v},\vec{r}]}{r^3}}$$

Установлено, что это выражение справедливо для любых точечных зарядов, размеры которых много меньше r.

Заменив e на q, окончательно получим

$$\boxed{\vec{B} = \frac{\mu_0}{4\pi}\frac{q[\vec{v},\vec{r}]}{r^3}}$$

Закон Био – Савара – Лапласа.
Примеры расчета магнитных полей

Магнитное поле равномерно движущегося заряда

$$\vec{B} = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{q[\vec{v}, \vec{r}]}{r^3}$$

В полученной формуле $\vec{r}$ - это радиус-вектор, проведенный от заряда q к точке наблюдения, r - его модуль

Конец $\vec{r}$ неподвижен в выбранной системе отсчета, а его начало движется со скоростью $\vec{v}$, поэтому вектор $\vec{B}$ зависит не только от положения точки наблюдения, но и от времени.

В соответствии с полученной формулой вектор $\vec{B}$ располагается перпендикулярно плоскости, в которой лежат векторы $\vec{v}$ и $\vec{r}$

Закон Био – Савара – Лапласа.
Примеры расчета магнитных полей

Магнитное поле равномерно движущегося заряда

$$\boxed{\vec{B} = \frac{\mu_0}{4\pi}\frac{q[\vec{v},\vec{r}]}{r^3}}$$

Направление вектора $\vec{B}$ определяется векторным произведением $[\vec{v},\vec{r}]$.