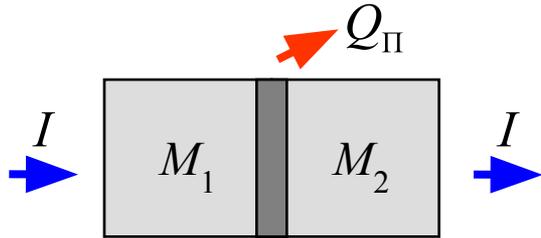


## Явление Пельтье



*Явление Пельтье* – при прохождении через контакт двух проводников электрического тока помимо джоулева тепла выделяется или поглощается (в зависимости от направления тока) дополнительное тепло  $Q_{\Pi}$  – тепло Пельтье.

$$Q_{\Pi} = \Pi q$$

$q$  – количество прошедшего электричества

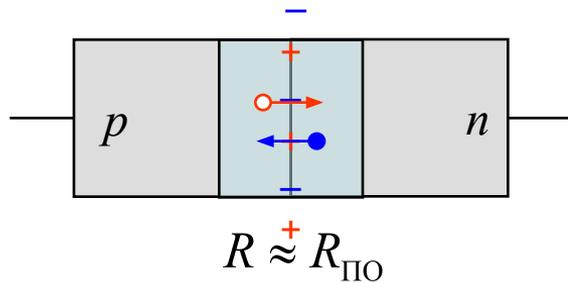
$\Pi$  – коэффициент Пельтье

### Причина явления Пельтье

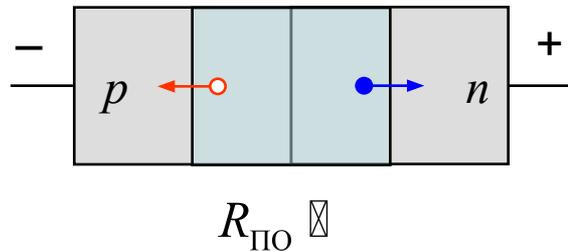
1. Наличие контактной разности потенциалов (электроны ускоряются или замедляются под действием контактной разности потенциалов );
2. Различие кинетической энергии теплового движения электронов, образующих ток, в разных металлах.

## Контакт двух полупроводников

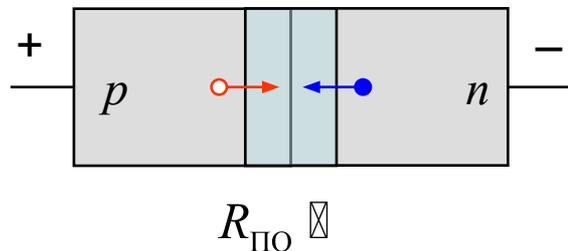
### Случай одинаковой основы полупроводников



При контакте произойдет диффузия электронов в  $p$  полупроводник и дырок в  $n$  полупроводник. Возникает приконтактная область (ПО), обедненная основными носителями тока.



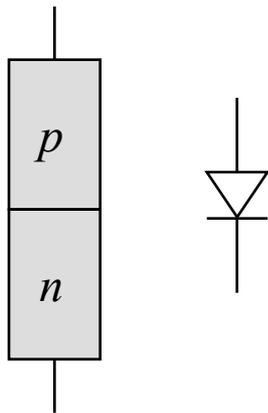
Поле вытягивает электроны и дырки из ПО. Ее размер и, следовательно, сопротивление увеличивается. Ток практически не идет.



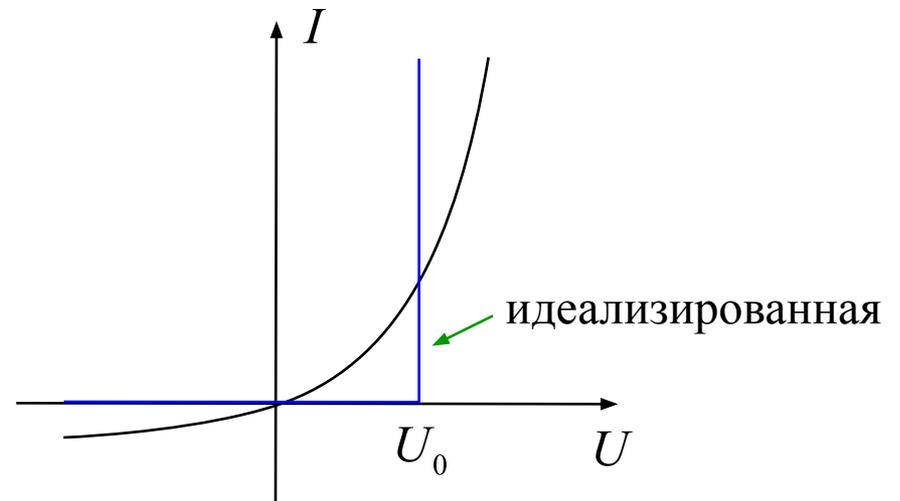
Поле насыщает ПО электронами и дырками. Ее размер и, следовательно, сопротивление уменьшается. Ток возрастает быстрее, чем приложенное напряжение.

## Контакт двух полупроводников

### Полупроводниковый диод



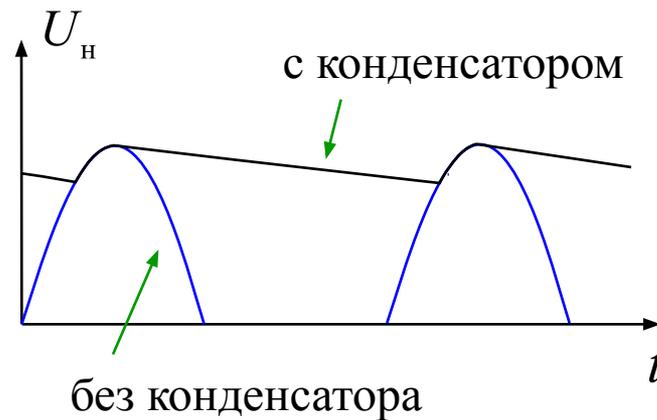
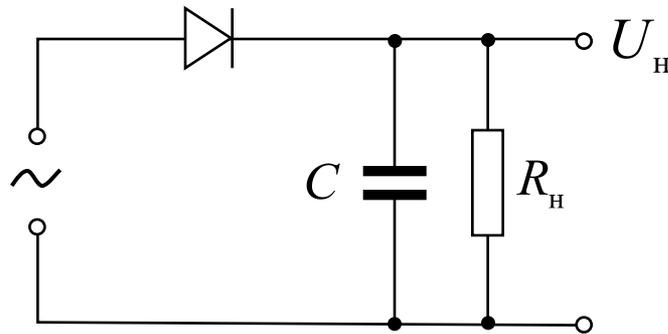
### Вольтамперная характеристика



$$U_0 \approx \begin{cases} 0.6 \text{ В для кремниевых диодов} \\ 0.3 \text{ В для германиевых диодов} \end{cases}$$

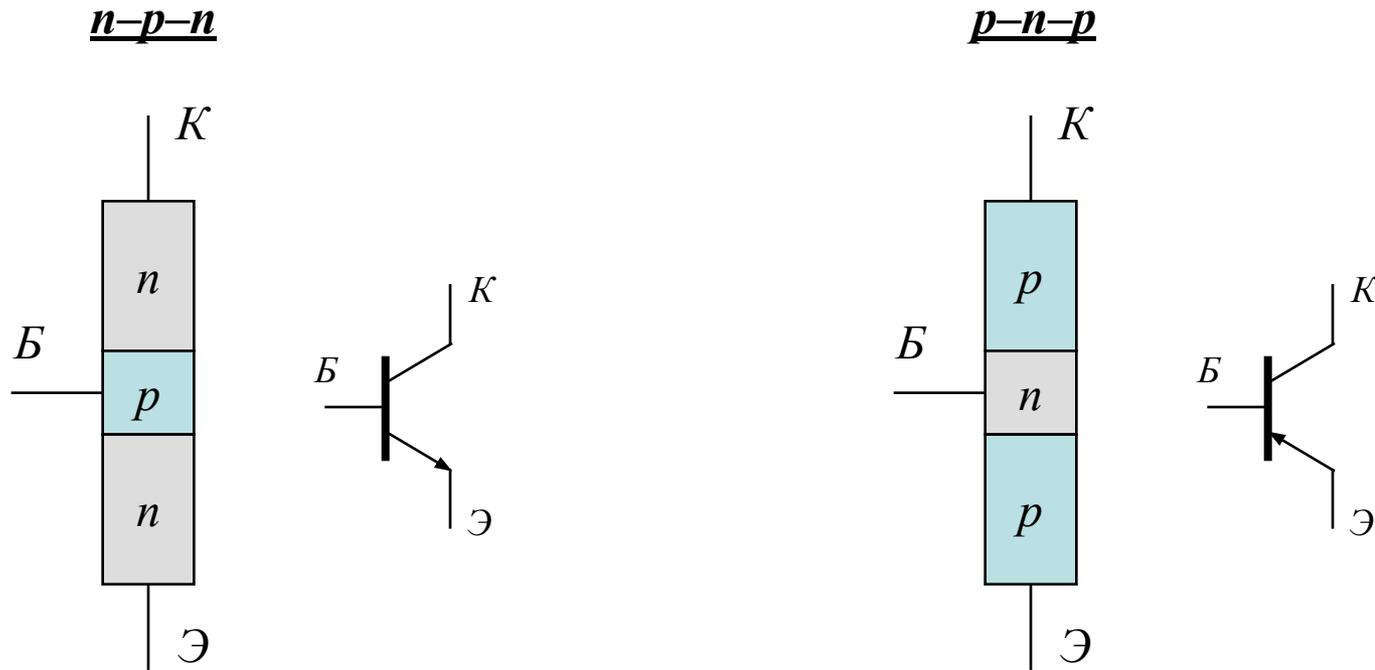
## Контакт двух полупроводников

### Схема выпрямителя на полупроводниковом диоде



## Контакт двух полупроводников

### Биполярные транзисторы



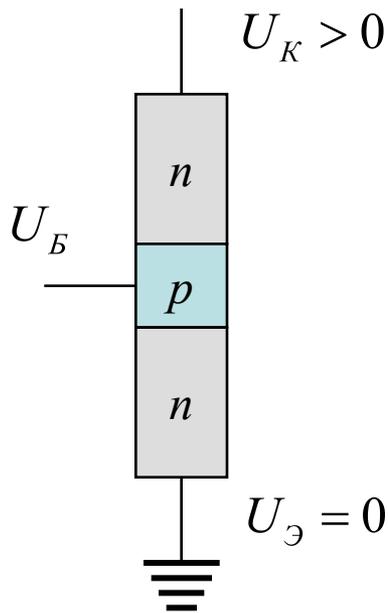
*K* – коллектор

*Э* – эмиттер

*Б* – база

## Контакт двух полупроводников

### Принцип работы БТ



1.  $U_{\text{Б}} < 0$   
 Оба  $p$ - $n$  перехода ( $БЭ$ ,  $БК$ ) закрыты,  $I_{\text{Б}}$ ,  $I_{\text{Э}}$ ,  $I_{\text{К}} \approx 0$ .  
 Транзистор закрыт.

2.  $U_{\text{Б}} > 0$  ( $U_{\text{Б}} < U_{\text{К}}$ )  
 $p$ - $n$  переход  $БЭ$  открыт,  $БК$  – закрыт.  
 Электроны из эмиттера инжектируются в базу.  
 $L_{\text{Д}}$  – длина диффузии (за время жизни) электронов в базе,  
 $l_{\text{Б}}$  – толщина базы.  
 Так как  $l_{\text{Б}} \ll L_{\text{Д}}$ , то большинство электронов достигают коллектора и переходят в него как основные носители.  
 Поэтому  $I_{\text{К}} \approx I_{\text{Э}}$  и  $I_{\text{Б}} \approx 0$ .

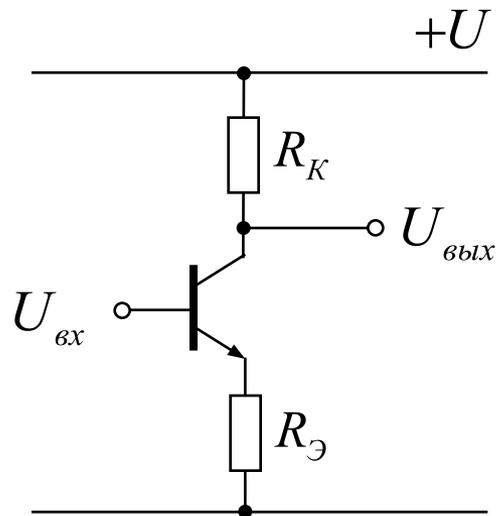
Таким образом,

$$I_{\text{К}} \approx I_{\text{Э}}(U_{\text{БЭ}})$$

как для диода

## Контакт двух полупроводников

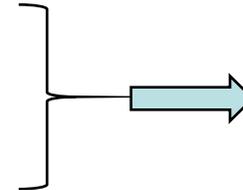
### Схема усилителя на БТ



При  $U_{вх} > 0.6$  В (кремниевые БТ) транзистор открыт и

$$U_{Э} = U_B - 0.6 \text{ В}$$

$$I_K = I_{Э}$$



$$K_U = \frac{\Delta U_K}{\Delta U_B} = -\frac{R_K}{R_Э}$$

– коэффициент усиления

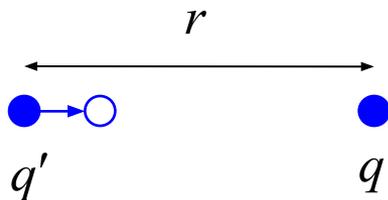
## Электромагнитное поле. Сила Лоренца и уравнения Максвелла

### Электростатика. Закон Кулона в полевой форме

$$\begin{cases} \mathbf{F} = q\mathbf{E} \\ \operatorname{div} \mathbf{E} = \rho/\epsilon_0 \\ \operatorname{rot} \mathbf{E} = 0 \end{cases}$$

Уравнения описывают взаимодействие неподвижных зарядов и не применимы в случае движущихся зарядов.

Пример:



Рассмотрим два неподвижных заряда. Один из них  $q'$  в некоторый момент времени пришел в движение.

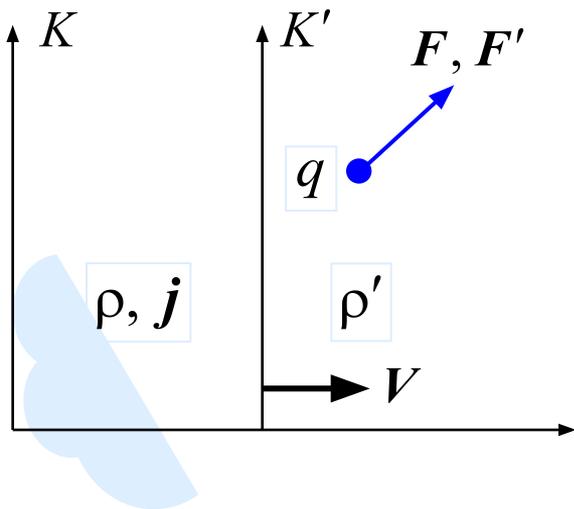
В силу конечности скорости распространения взаимодействия, заряд  $q$  “почувствует” движение заряда  $q'$  спустя время  $\Delta t = r/c$ , где  $c$  – скорость света.



**Закон Кулона в динамике не выполняется!**

## Электромагнитное поле. Сила Лоренца и уравнения Максвелла

### Обобщение закона Кулона



Рассмотрим две инерциальные системы  $K$  и  $K'$ .

1. В системе  $K'$  заряды  $\rho'$  неподвижны ( $\mathbf{j}' = 0$ ), в системе  $K$  они движутся с постоянной скоростью  $V$ .  
Причем, согласно СТО,  $\rho \neq \rho'$ .
2. Сила, действующая на заряд в системе  $K'$ , равна

$$F' = qE'$$

при любой скорости заряда  $q$   
(что является следствием отсутствия в природе магнитных зарядов).

## Электромагнитное поле. Сила Лоренца и уравнения Максвелла

3. В системе  $K$  сила, действующая на этот же заряд согласно СТО, равна

$$\mathbf{F} = \frac{d\mathbf{p}}{dt},$$

где  $\mathbf{p} = \gamma m \mathbf{v}$  – релятивистский импульс

$$\gamma = 1/\sqrt{1 - v^2/c^2}$$

по формулам  
преобразования  
силы

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

В свою очередь

$$\operatorname{div} \mathbf{E} = \rho/\epsilon_0$$

$$\operatorname{rot} \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t}$$

$$\operatorname{div} \mathbf{B} = 0$$

$$\operatorname{rot} \mathbf{B} = \mu_0 \mathbf{j} + \frac{1}{c^2} \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t}$$

где  $\mu_0 = \Gamma/\epsilon_0 c^2 = 4\pi \cdot 10^{-7}$

магнитная  
постоянная

## Электромагнитное поле. Сила Лоренца и уравнения Максвелла

Таким образом, переменное поле характеризуется двумя векторами  $\mathbf{E}$  и  $\mathbf{B}$ .

Вектор  $\mathbf{E}$  называется *напряженностью электрического поля*.

Вектор  $\mathbf{B}$  называется *индукцией магнитного поля*.

Само поле в этой связи называется *электромагнитным полем*.

Обобщая на произвольное движение зарядов, получаем уравнения:

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

$$\operatorname{div} \mathbf{E} = \rho / \varepsilon_0$$

$$\operatorname{rot} \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t}$$

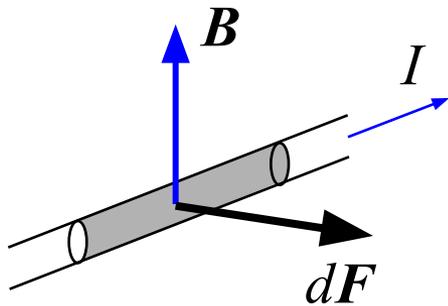
$$\operatorname{div} \mathbf{B} = 0$$

$$\operatorname{rot} \mathbf{B} = \mu_0 \mathbf{j} + \frac{1}{c^2} \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t}$$

— сила Лоренца

— уравнения Максвелла

## Сила Ампера



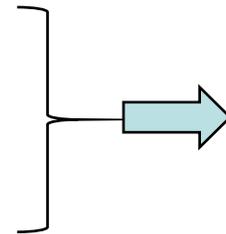
Магнитная составляющая силы Лоренца

$$\mathbf{F}_B = q\mathbf{v} \times \mathbf{B}$$

Сила передается проводнику

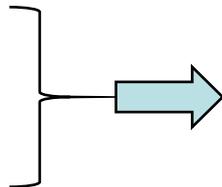
$$q \rightarrow \rho dV$$

$\mathbf{u}$  – скорость носителей заряда



$$d\mathbf{F} = \rho \mathbf{u} \times \mathbf{B} dV$$

$$\mathbf{j} = \rho \mathbf{u}$$



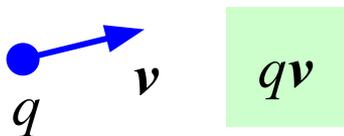
$$d\mathbf{F} = \begin{cases} \mathbf{j} \times \mathbf{B} dV \\ I d\mathbf{l} \times \mathbf{B} \end{cases}$$

– сила Ампера

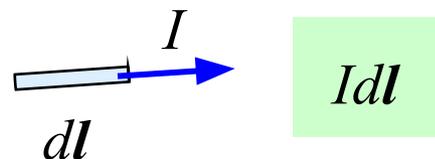
## Сила Ампера

### Формулы перехода

1) дискретный элемент тока

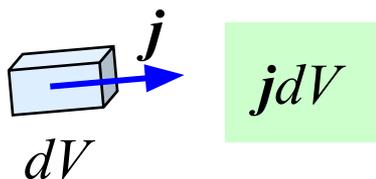


2) линейный элемент тока



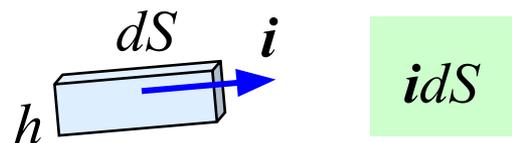
$$qv = (\rho S dl) \mathbf{u} = Idl$$

3) объемный элемент тока



$$qv = (\rho dV) \mathbf{u} = jdV$$

4) поверхностный элемент тока



$$qv = (\rho dSh) \mathbf{u} = idS$$

$$qv \leftrightarrow Idl \leftrightarrow jdV \rightarrow idS$$

## Закон Био–Савара

Уравнения Максвелла для стационарного электромагнитного поля

$\operatorname{div} \mathbf{E} = \rho / \varepsilon_0$ $\operatorname{rot} \mathbf{E} = 0$	$\left. \begin{array}{l} \text{---} \\ \text{---} \end{array} \right\}$ — уравнения магнитостатики
$\operatorname{div} \mathbf{B} = 0$ $\operatorname{rot} \mathbf{B} = \mu_0 \mathbf{j}$	

Согласно векторному анализу:

$$\mathbf{A} = \frac{1}{4\pi} \int \frac{(\operatorname{div} \mathbf{A}) \mathbf{r}}{r^3} dV + \frac{1}{4\pi} \int \frac{(\operatorname{rot} \mathbf{A}) \times \mathbf{r}}{r^3} dV \quad \Rightarrow$$

$$\mathbf{B} = \frac{\mu_0}{4\pi} \int \frac{\mathbf{j} \times \mathbf{r}}{r^3} dV$$

## Закон Био–Савара

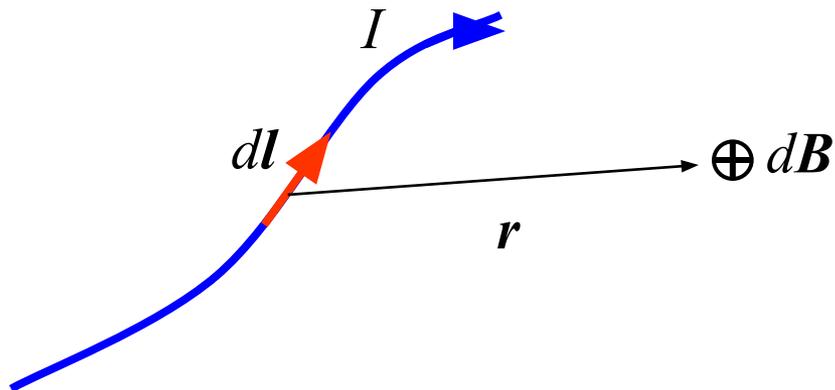
На основании принципа суперпозиции для магнитного поля

$$d\mathbf{B} = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{\mathbf{j} \times \mathbf{r}}{r^3} dV$$
$$d\mathbf{B} = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{I d\mathbf{l} \times \mathbf{r}}{r^3}$$

для объемного элемента тока

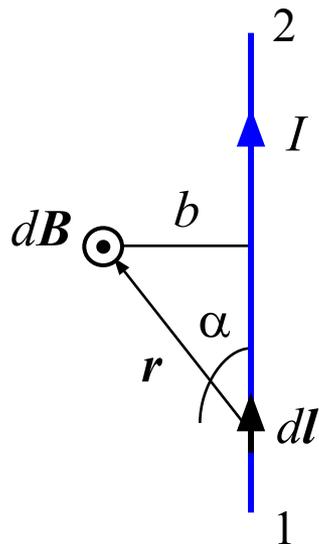
закон Био-Савара

для линейного элемента тока



## Магнитное поле прямого и кругового тока

### Прямой ток



$$dB = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{I dl \sin \alpha}{r^2}, \quad l = -b \operatorname{ctg} \alpha$$

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

$$r = \frac{b}{\sin \alpha}$$

$$dl = \frac{b}{\sin^2 \alpha} d\alpha$$

Так как вектора  $dB$  направлены одинаково, поэтому

$$B = \frac{\mu_0 I}{4\pi b} \int_1^2 \sin \alpha d\alpha = \frac{\mu_0 I}{4\pi b} (\cos \alpha_1 - \cos \alpha_2)$$

Переобозначая  $\alpha$  как угол между направлением на точку поля и проводником

$$B = \frac{\mu_0 I}{4\pi b} (\cos \alpha_1 + \cos \alpha_2)$$

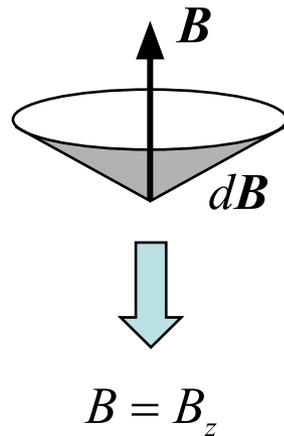
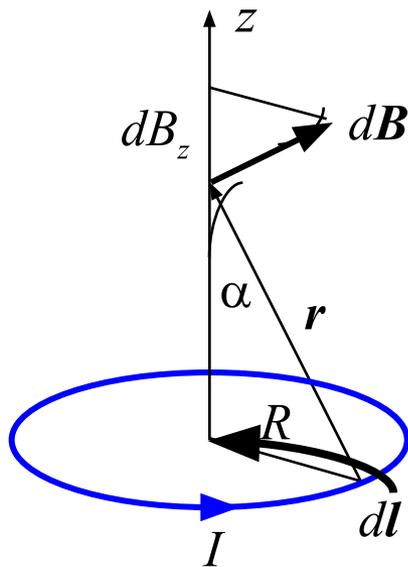


$$B = \frac{\mu_0 I}{2\pi b}$$

– бесконечный  
прямой ток

## Магнитное поле прямого и кругового тока

### Круговой ток



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

$$B = \int dB_z = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{I 2\pi R}{r^2} \sin \alpha$$

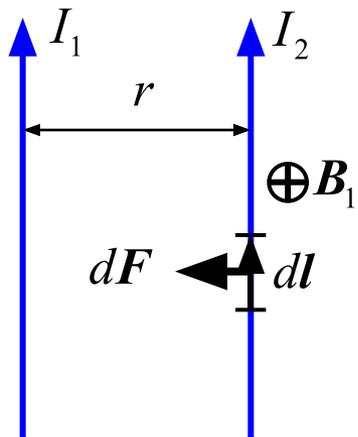
$$\sin \alpha = \frac{R}{r} = \frac{R}{\sqrt{R^2 + z^2}}$$

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

$$z = 0: B = \frac{\mu_0 I}{2R}, \quad z \gg R: B = \frac{\mu_0 I R^2}{2z^3}$$

## Магнитное поле прямого и кругового тока

### Взаимодействие параллельных проводников с током



$$\left. \begin{aligned} dF &= I_2 dl \times B_1 \\ dl &\perp B_1 \\ B_1 &= \frac{\mu_0 I_1}{2\pi r} \end{aligned} \right\} \rightarrow$$

$$dF = I_2 B_1 dl = \frac{\mu_0 I_1 I_2}{2\pi r} dl \rightarrow$$

$$\frac{dF}{dl} = \frac{\mu_0 I_1 I_2}{2\pi r}$$

$I_1 \uparrow \uparrow I_2$  – притяжение

$I_1 \uparrow \downarrow I_2$  – отталкивание