Электричество и магнетизм

Лекция 16
Движение заряженных частиц в электромагнитном поле. Плазма

15 декабря 2021 года

Лектор: доцент НИЯУ МИФИ,
Ольчак Андрей Станиславович

Энергия электро-магнитного поля

Плотность энергии электромагнитного поля

$$w = w_{\text{эл}} + w_{\text{маг}} = \frac{\vec{\mathbf{E}} \cdot \vec{\mathbf{D}}}{2} + \frac{\vec{\mathbf{B}} \cdot \vec{\mathbf{H}}}{2}$$

Энергия электромагнитного поля

$$W = \int_V w dV = \int_V \frac{\left(\vec{\mathbf{E}} \cdot \vec{\mathbf{D}}\right)}{2} dV + \int_V \frac{\left(\vec{\mathbf{B}} \cdot \vec{\mathbf{H}}\right)}{2} dV$$

Уравнения Максвелла

Дж.К. Максвелл в 1859 г. сформулировал систему уравнений, исчерпывающим образом описывающих электрическое и магнитное поля (а вернее – единое электро-магнитное поле.

Уравнения Максвелла в локальной и интегральной форме

$$\left[\nabla \times \mathbf{E}\right] = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \qquad \left(\nabla \cdot \mathbf{D}\right) = \rho_{\text{стор}}$$

$$\left[\nabla \times \mathbf{H}\right] = \mathbf{j}_{\text{пров}} + \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} \qquad \left(\nabla \cdot \mathbf{B}\right) = 0$$

J.C. Maxwell

$$\oint_{\Gamma} \mathbf{E} \cdot d\mathbf{l} = -\frac{d}{dt}\int_{S} \mathbf{B} \cdot d\mathbf{S} \qquad \oint_{S} \mathbf{D} \cdot d\mathbf{S} = \int_{V} \rho_{\text{стор}} dV$$

$$\oint_{S} \mathbf{B} \cdot d\mathbf{S} = 0 \qquad \oint_{\Gamma} \mathbf{H} \cdot d\mathbf{l} = \int_{S} \mathbf{j}_{\text{пров}} \cdot d\mathbf{S} + \frac{d}{dt}\int_{S} \mathbf{D} \cdot d\mathbf{S}$$

Свойства уравнений Максвелла

1. Уравнения выполняются ***во всех инерциальных системах отсчёта***. (являются релятивистски инвариантными).

2. Уравнения линейные –> отражение ***принципа суперпозиции*** для магнитных и электрических полей.

3.Уравнения содержат все известные законы электродинамики: ***закон Кулона, закон Био-Савара-Лапласа, уравнение непрерывности*** и т.п.

4. Уравнения ***не симметричны*** относительно векторов **E** и **B.**

5. Из уравнений Максвелла следует возможность ***существования и распространения электромагнитных волн в вакууме***.

Уравнения Максвелла

Уравнения Максвелла в среде без зарядов и токов

div $\boldsymbol{D}$ = div $\boldsymbol{E} = 0$ **rot** $\boldsymbol{E} = -\partial \boldsymbol{B}/\partial t$

div $\boldsymbol{B} = 0$ **rot** $\boldsymbol{H}$ = **rot** $\boldsymbol{B}/\mu_0\mu = -\partial \boldsymbol{D}/\partial t = -\varepsilon_0 \varepsilon \partial \boldsymbol{E}/\partial t \Rightarrow$

rot $\boldsymbol{B} = -\mu_0\mu\varepsilon_0\varepsilon\, \partial \boldsymbol{E}/\partial t \Rightarrow$

$-\partial(\mathbf{rot}\ \boldsymbol{B})/\partial t = \mu_0\mu\varepsilon_0\varepsilon\, \partial^2\boldsymbol{E}/\partial t^2 = \mathbf{rot\ rot}\ \boldsymbol{E} = \Delta \boldsymbol{E} \Rightarrow$

$$\partial^2\boldsymbol{E}/\partial t^2 = c^2\Delta\boldsymbol{E} \Rightarrow \partial^2\boldsymbol{B}/\partial t^2 = c^2\Delta\boldsymbol{B}$$

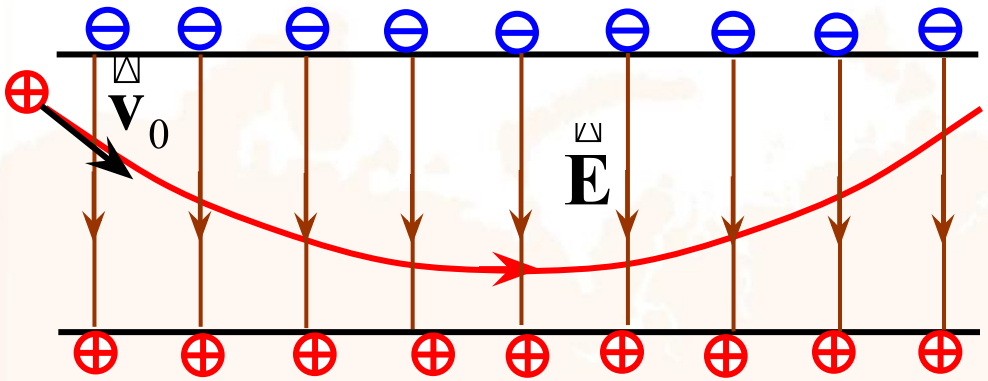
Решение: волна (например, $E = E_0 \cos(\omega(t-x/c))$) способная существовать и распространяться и в среде, и в пустоте, причем со скоростью света!!

$$c = 1/(\mu_0\mu\varepsilon_0\varepsilon)^{1/2} = c_0/(\mu\varepsilon)^{1/2} =\sim c_0/\sqrt{\varepsilon}$$

Подробнее об ЭМ-волнах – в следующем семестре

Движение зарядов в электромагнитном поле

Движение зарядов в однородных полях



Уравнение движения заряда:

$$m\frac{d\vec{\mathbf{v}}}{dt} = q\vec{\mathbf{E}}$$

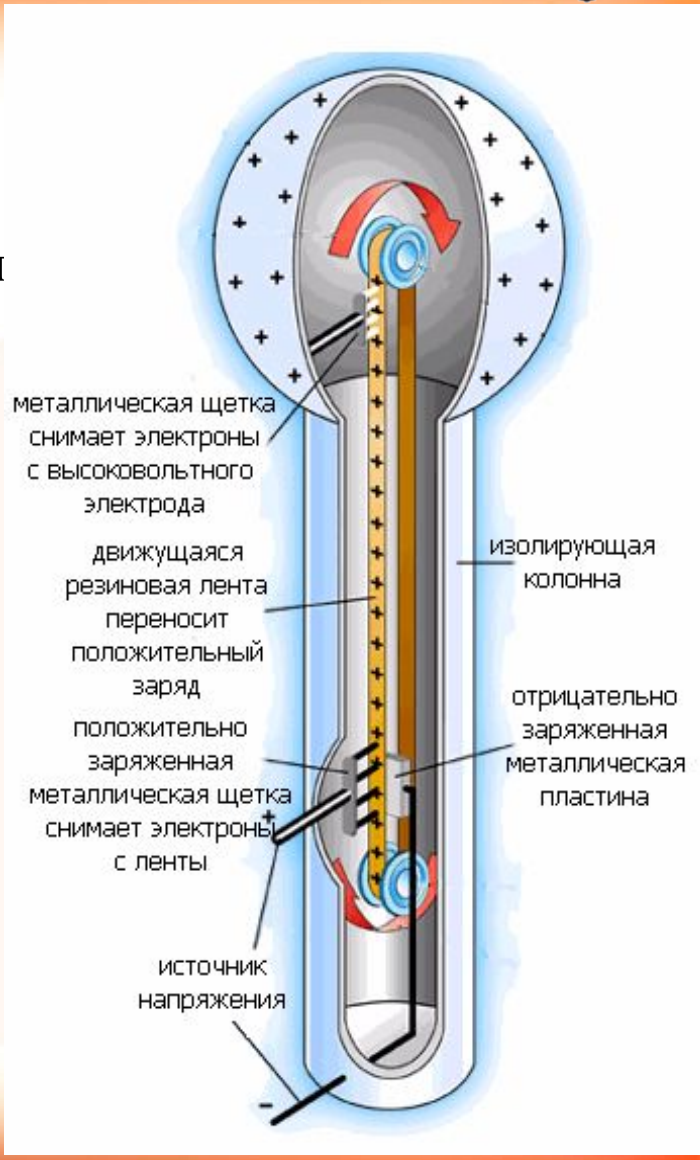
$$\Rightarrow \quad d\vec{\mathbf{v}} = \frac{q\vec{\mathbf{E}}}{m}dt, \qquad \vec{\mathbf{v}} = \vec{\mathbf{v}}_0 + \frac{q\vec{\mathbf{E}}}{m}t, \qquad \vec{\mathbf{r}} = \vec{\mathbf{r}}_0 + \vec{\mathbf{v}}_0 t + \frac{q\vec{\mathbf{E}}}{2m}t^2.$$

Траектория – парабола, лежащая в плоскости векторов $\mathbf{v}_0$ и $\mathbf{E}$. Очевидна аналогия с движением под действием ускорения свободного падения:

$$\vec{\mathbf{g}} \rightarrow q\vec{\mathbf{E}}/m.$$

Ускорители заряженных частиц

Разгон заряженных частиц электрическим полем до высоких энергий используют в т.н. ускорителях прямого действия. Пример: электростатический генератор Ван дер Граффа. Ток пучка на УВдГ может достигать нескольких миллиампер. Однако, в таких ускорителях трудно обеспечить энергию частиц больше 40-50 МэВ для протонов и для достижения ещё больших энергий используют линейные ускорители.



Большие энергии – другая механика!

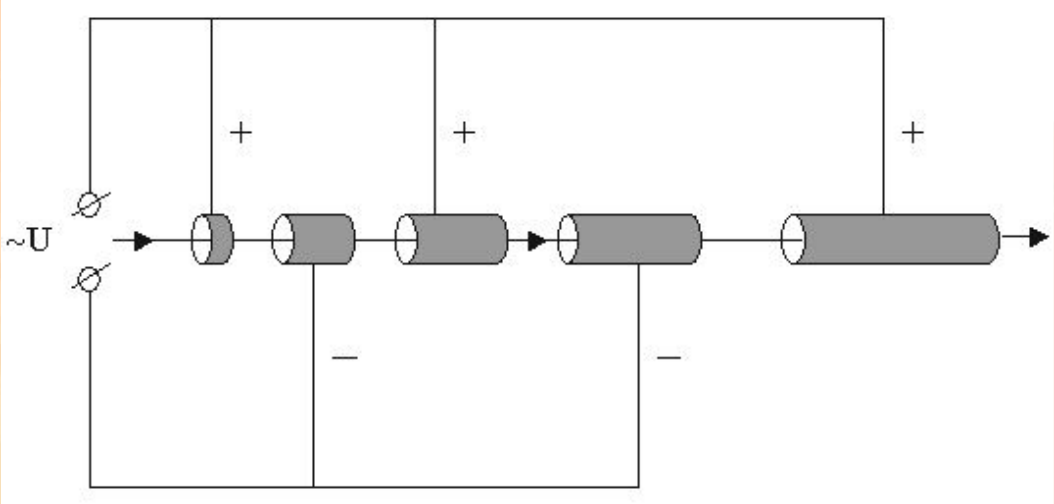
$dP/dt = eE = eU/L \quad P = mv\gamma = mv(1-v^2/c^2)^{-1/2}$

$P^2 = (eUt/L)^2 = E_r^2/c^2 - m^2c^2 \Rightarrow$

$E_r^2 \sim = m^2c^4 + (eU)^2$

Ускорители заряженных частиц

Схема линейного ускорителя



В линейных ускорителях частица подвергается многократному ускорению, пролетая сквозь ряд цилиндрических трубок, присоединенных к электрическому генератору высокой частоты.

Внутри каждой трубки электрическое поле равно нулю. Соседние трубки имеют противоположную полярность. Таким образом, ускорительное поле находится в зазорах между трубками. Частота генератора и размеры трубок подбираются так, чтобы сгусток ускоряемых частиц подходил к очередному зазору в тот момент, когда полярность трубок изменяется на противоположную.

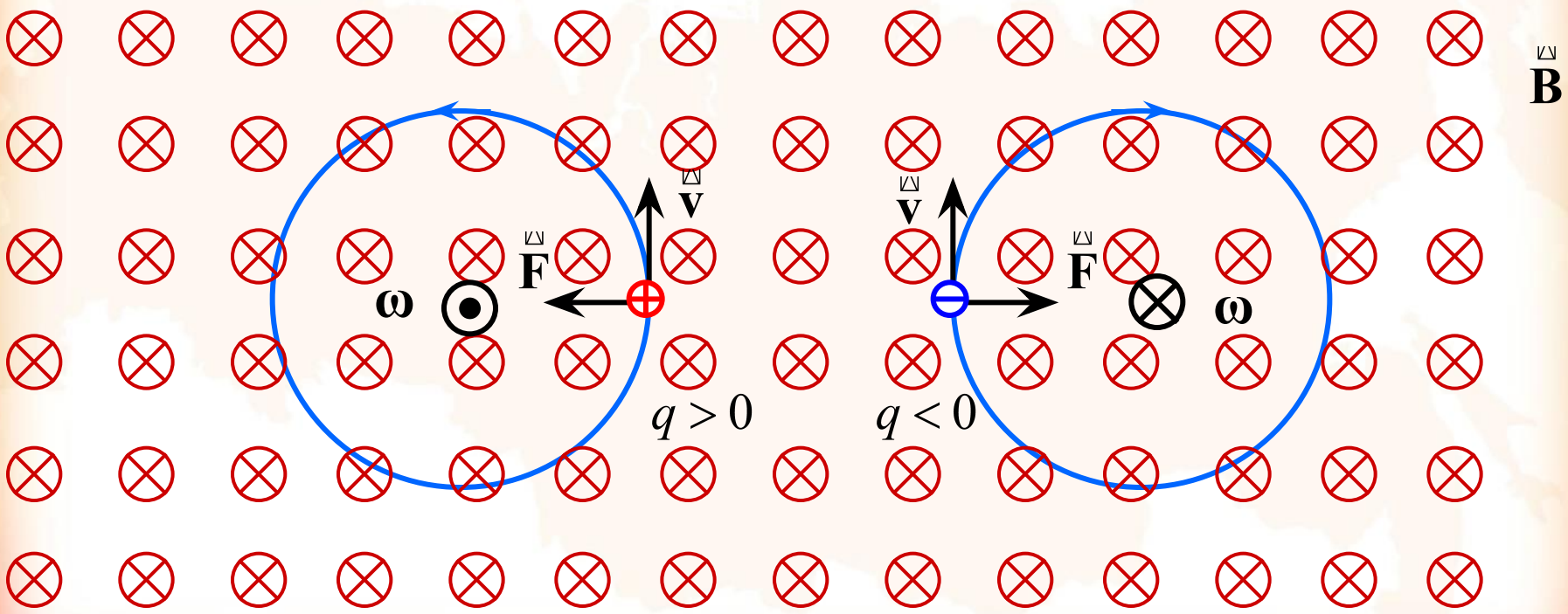
Ускорители заряженных частиц

Стэнфордский линейный ускоритель (SLAC.) Он работал в период 1989-1998 гг., имел длину около 3 км и ускорял как электроны, так и позитроны до энергии 50 ГэВ.

Движение зарядов в однородных полях

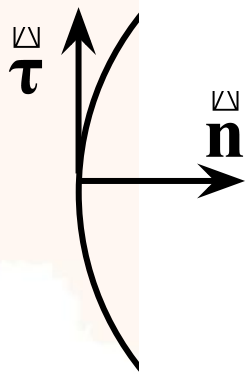
Магнитная сила $\vec{\mathbf{F}} = q\left[\vec{\mathbf{v}}, \vec{\mathbf{B}}\right]$ по определению перпендикулярна скорости частицы и поэтому не совершает работы. Следовательно v=const.

1). Скорость частицы перпендикулярна вектору индукции магнитного поля



Движение зарядов в однородных полях

Магнитная сила сообщает заряду только нормальное ускорение. Траектория движения окружность, лежащая в плоскости, перпендикулярной вектору **B**. Релятивистский импульс частицы направлен по касательной к траектории



$$\vec{\mathbf{p}} = m\mathrm{v}\gamma\vec{\mathbf{v}}, \qquad \vec{\ } = \vec{\ }/\mathrm{v}.$$

где $\gamma = \dfrac{1}{\sqrt{1-\mathrm{v}^2/c^2}}$ – Лоренц-фактор.

$$\vec{\mathbf{F}} = \frac{d\vec{\mathbf{p}}}{dt} = m\mathrm{v}\gamma\frac{d\vec{\ }}{dt}, \qquad \frac{d\vec{\boldsymbol{\tau}}}{dt} = \omega\vec{\mathbf{n}},$$

ω – угловая скорость, связанная с частотой вращения по окружности

Движение зарядов в однородных полях

$$\Rightarrow \quad q\left[\vec{\mathbf{v}},\vec{\mathbf{B}}\right] = m\mathrm{v}\gamma\omega\vec{\mathbf{n}}, \qquad \vec{\mathbf{n}}: \quad |q|\mathrm{v}B = m\mathrm{v}\gamma\omega,$$

$$\Rightarrow \quad \boxed{\vec{\boldsymbol{\omega}} = -\frac{q\vec{\mathbf{B}}}{m\gamma}}$$ – циклотронная частота. $$R = \frac{\mathrm{v}}{\omega} = \frac{m\mathrm{v}\gamma}{|q|B}$$

Если $\mathrm{v} \ll c \quad \Rightarrow \quad \gamma = 1$

В нерелятивистском пределе циклотронная частота не зависит от скорости частицы.

$$\vec{\boldsymbol{\omega}} = -\frac{q\vec{\mathbf{B}}}{m} \qquad R = \frac{m\mathrm{v}}{|q|B}$$

Циклотрон

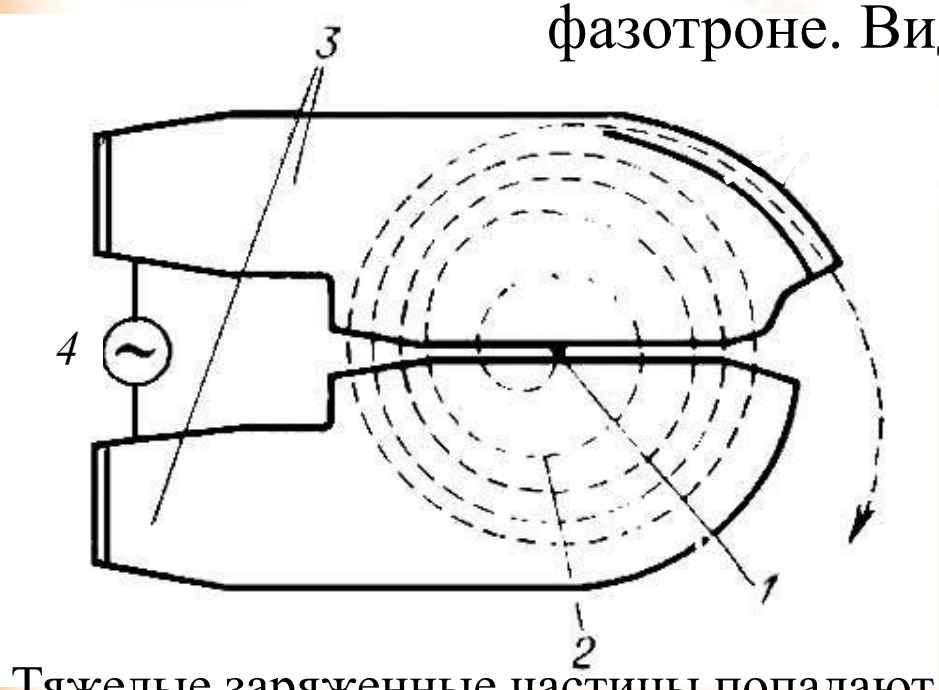
Это циклический резонансный ускоритель тяжёлых частиц (протонов, ионов).

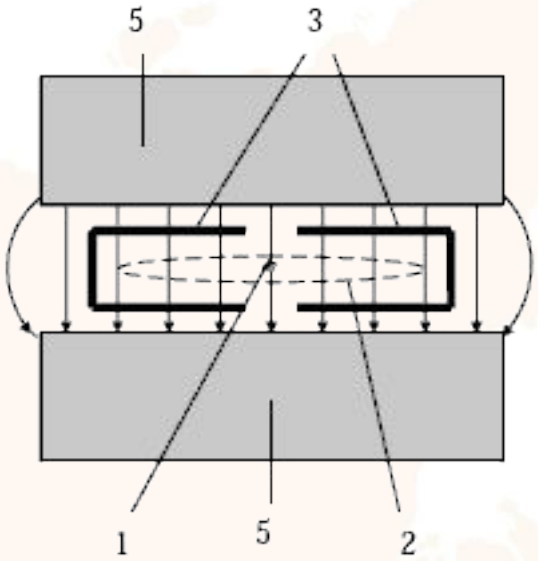
В 1930 году Э. Лоуренсом (США) был создан первый– *циклотрон* на энергию протонов 1 МэВ (его диаметр был 25 см).

Первая работающая модель циклотрона

Ускорители заряженных частиц

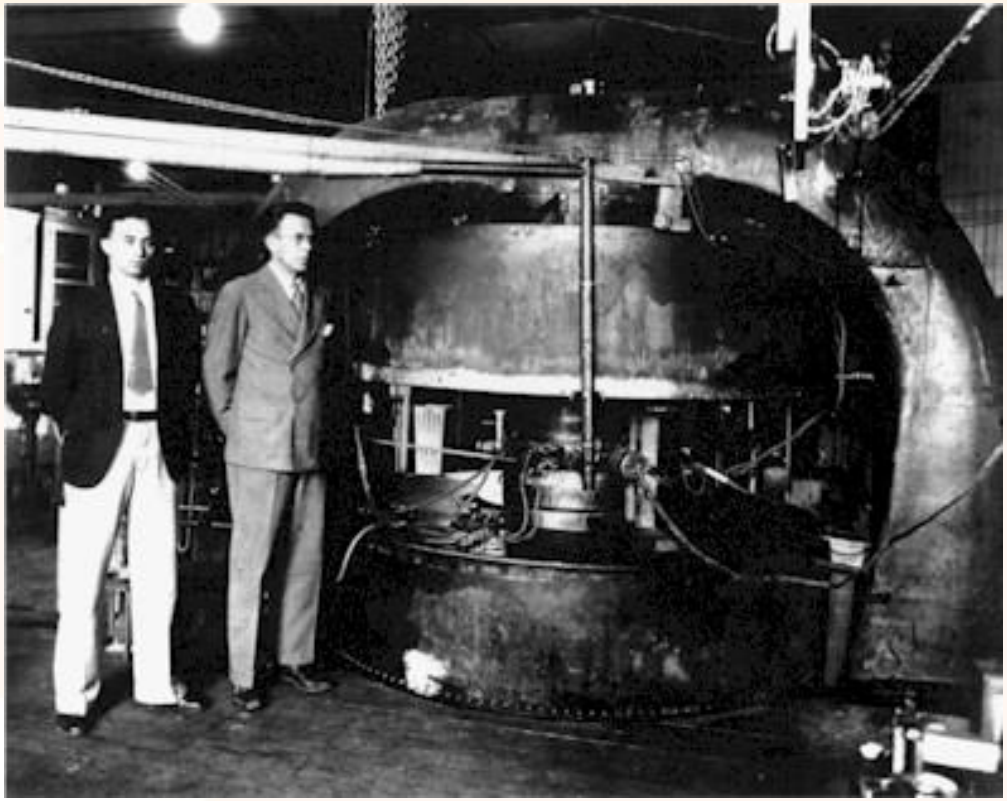
Схема движения частиц в циклотроне и фазотроне. Вид сверху и сбоку





Тяжелые заряженные частицы попадают в камеру из инжектора 1 вблизи центра камеры и движутся в постоянном магнитном поле, направленном перпендикулярно плоскости движения частиц, по раскручивающейся спирали 2. В зазоре между дуантами частицы ускоряются импульсным электрическим полем Частота изменения переменного напряжения 4, приложенного к дуантам 3 равно циклотронной частоте частиц.

Ускорители заряженных частиц



С. Ливингстоун и Э. Лоуренс у 27-дюймового циклотрона, который использовался в экспериментальных исследованиях ядерных реакций и искусственной радиоактивности

Бетатрон

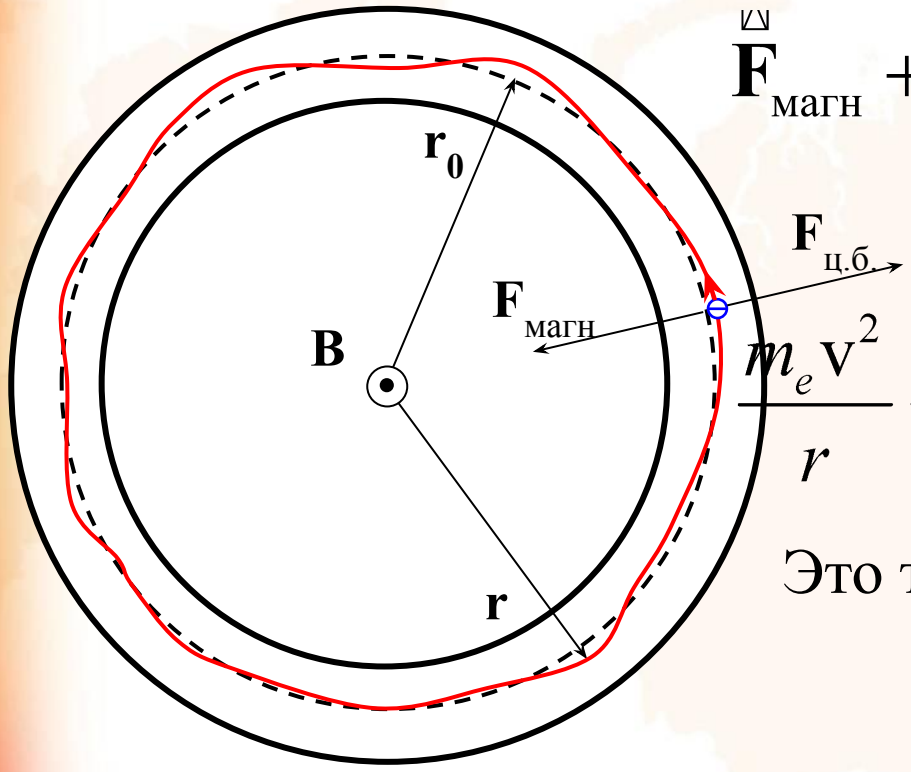
Бетатрон − это циклический ускоритель, в котором ускорение заряженных частиц производится вихревым электрическим полем, которое создаётся переменным магнитным полем. Ускоренные частицы движутся по кругу в специальных вакуумных камерах. Первый бетатрон создал Д.У. Керст в 1940 г.

Д. Керст возле своих бетатронов, маленький - на 2.3 МэВ, большой - на 25 МэВ

Ускорители заряженных частиц

Ускоритель заряженных частиц в Европейском Центре ядерных исследований (ЦЕРН).

Условия радиальной фокусировки



Условие равновесия частицы в неинерциальной СО

$$\vec{\mathbf{F}}_{\text{магн}} + \vec{\mathbf{F}}_{\text{ц.б.}} = 0 \qquad \frac{m_e \mathrm{v}^2}{r_0} = e\mathrm{v}B(r_0)$$

Если частица отклонилась то поле должно возвращать ее назад

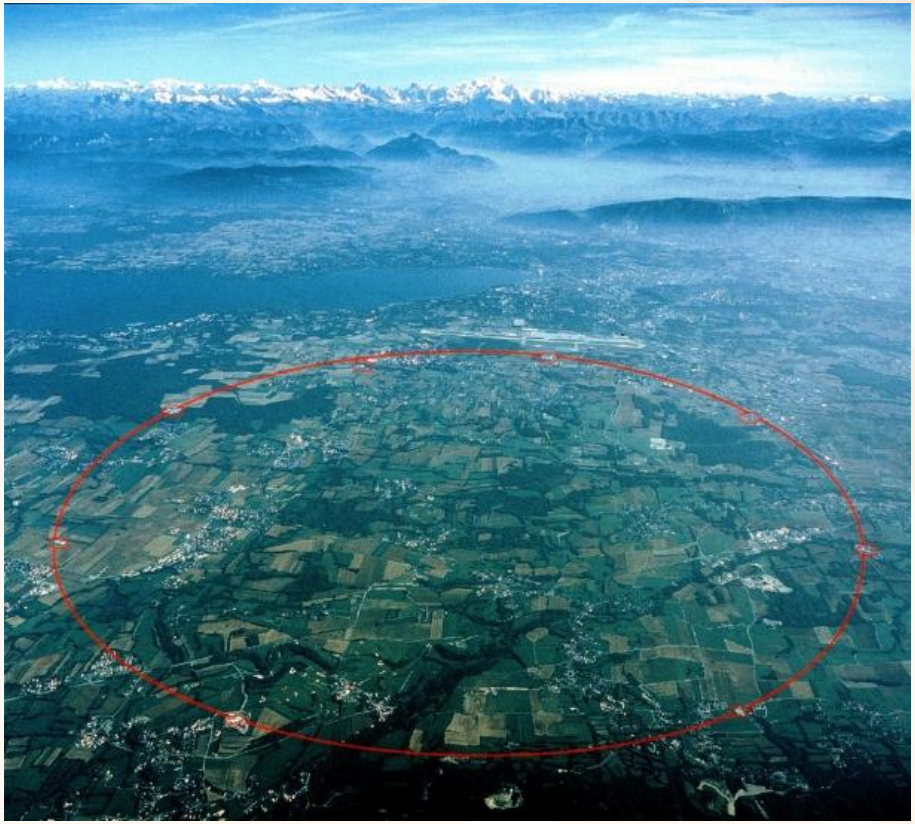
$$\frac{m_e \mathrm{v}^2}{r} < e\mathrm{v}B(r) \quad \Rightarrow \quad \frac{B(r)}{B(r_0)} > \frac{r_0}{r}$$

Это так, если $B(r) \sim \dfrac{1}{r^n}$, $\boxed{0 < n < 1}$

Ускорители заряженных частиц

Ускорители заряженных частиц

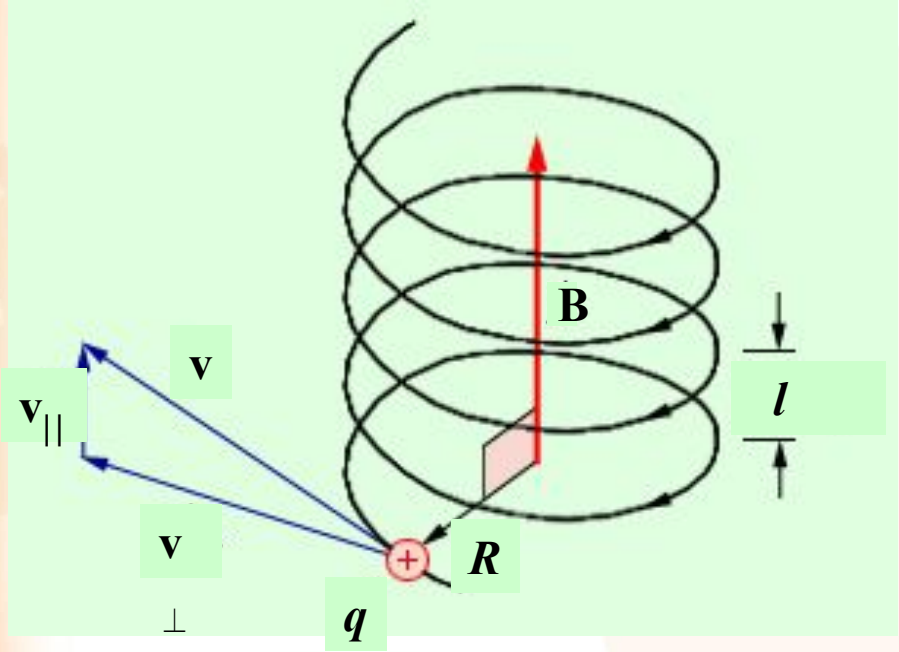
Большой адро́нный колла́йдер (англ. **Large Hadron Collider**, **LHC**; сокр. БАК) — ускоритель заряженных частиц на встречных пучках, предназначенный для разгона протонов и тяжёлых ионов (ионов свинца) и изучения продуктов их соударений. Коллайдер построен в научно-исследовательском центре Европейского совета ядерных исследований (ЦЕРН), на границе Швейцарии и Франции, недалеко от Женевы.

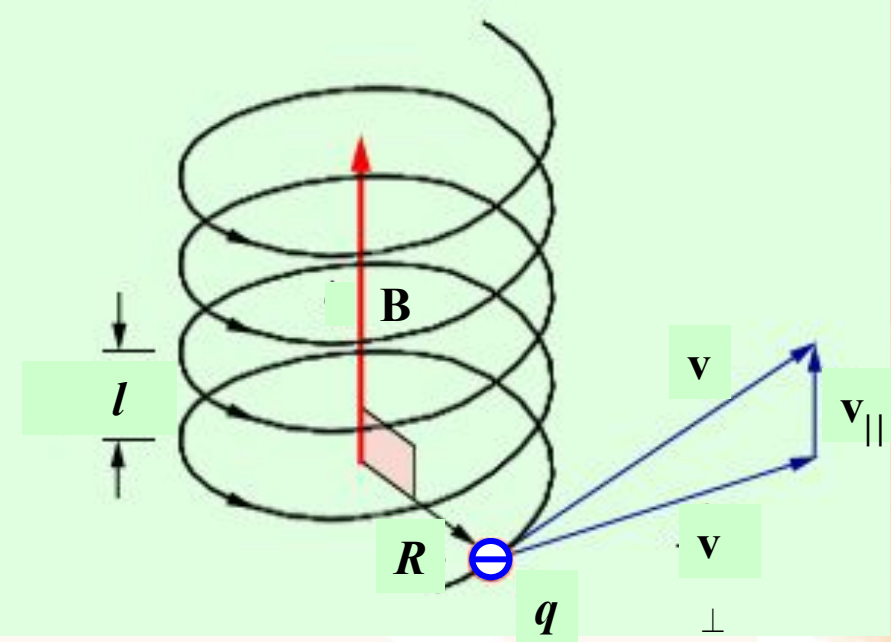


Большим назван из-за своих размеров: длина основного кольца ускорителя составляет 26 659 м; адронным — из-за того, что он ускоряет адроны, то есть частицы, состоящие из кварков.

Движение зарядов в однородных полях

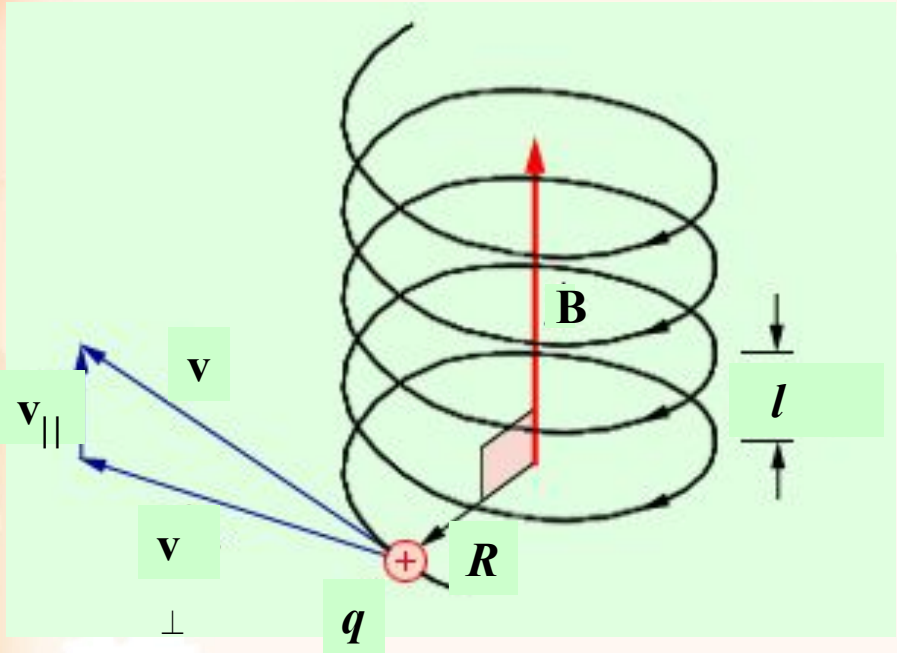
2). Скорость частицы не перпендикулярна вектору индукции магнитного поля

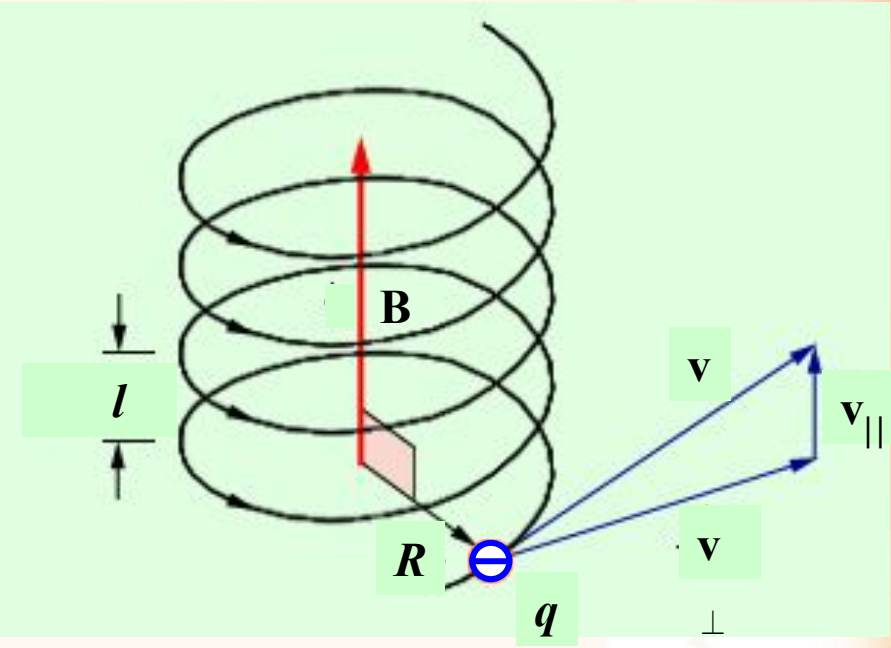




Траектория − левая или правая спираль в зависимости от знака заряда частицы

Движение зарядов в однородных полях

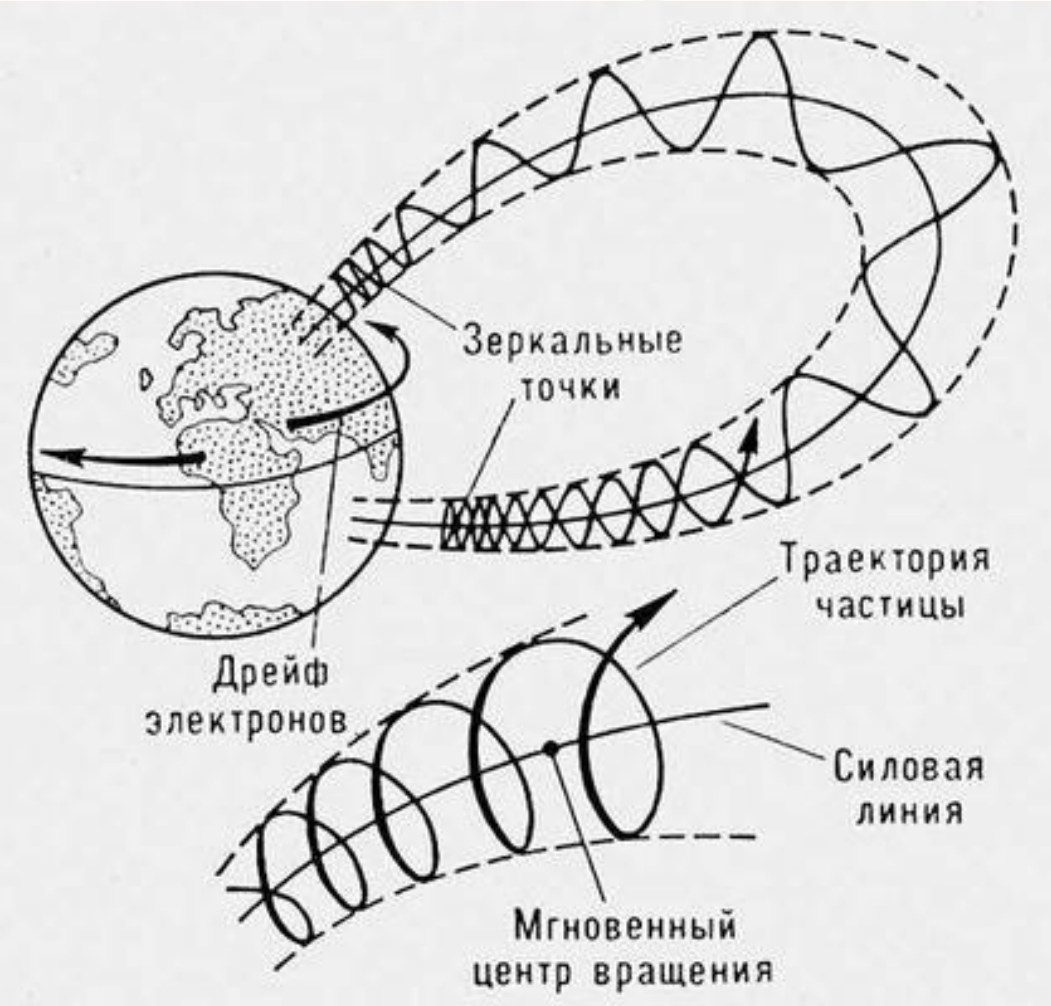




$$\vec{\mathbf{v}} = \vec{\mathbf{v}}_{||} + \vec{\mathbf{v}}_{\perp}, \quad \vec{\mathbf{v}}_{||} \parallel \vec{\mathbf{B}}, \quad \vec{\mathbf{v}}_{\perp} \perp \vec{\mathbf{B}}. \quad \vec{\mathbf{F}} = q\left[\vec{\mathbf{v}}_{\perp}, \vec{\mathbf{B}}\right] \Rightarrow R = \frac{m\mathrm{v}_{\perp}\gamma}{|q|B}$$

$$l = \mathrm{v}_{||}T = \mathrm{v}_{||}\frac{2\pi}{\omega} = \frac{2\pi\mathrm{v}_{||}m\gamma}{|q|B}$$

Движение зарядов в однородных полях



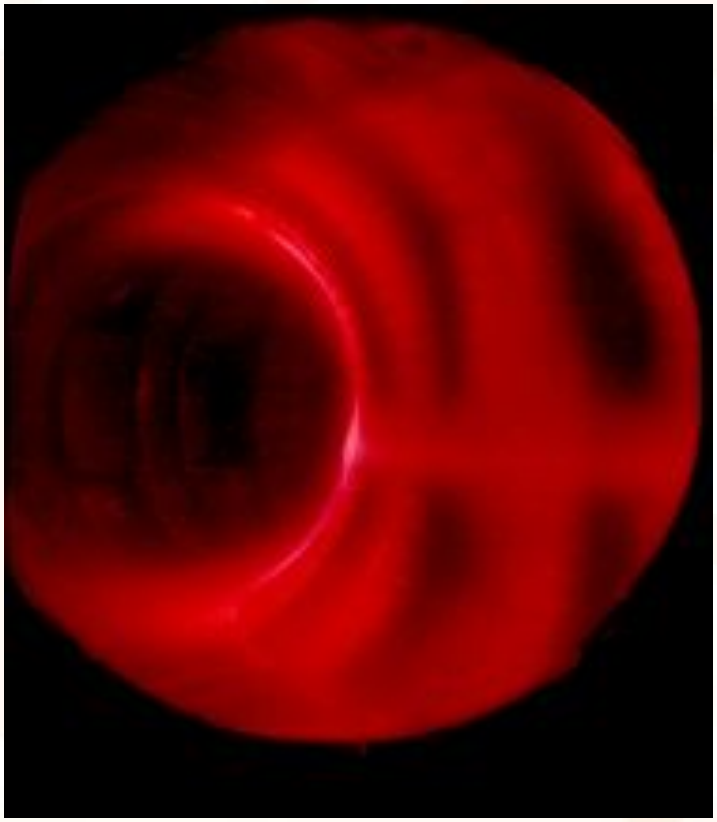
Движение заряженных частиц, захваченных магнитным полем Земли

Плазма.

Плазма как состояние вещества

Плазма = частично или полностью ионизованный газ = среда, состоящая из хаотически движущихся заряженных частиц

При сильном нагревании газа происходит диссоциация (распад) молекул на атомы. Дальнейший рост температуры приводит к ионизации = отрыву электронов от атомов с образованием ионов.

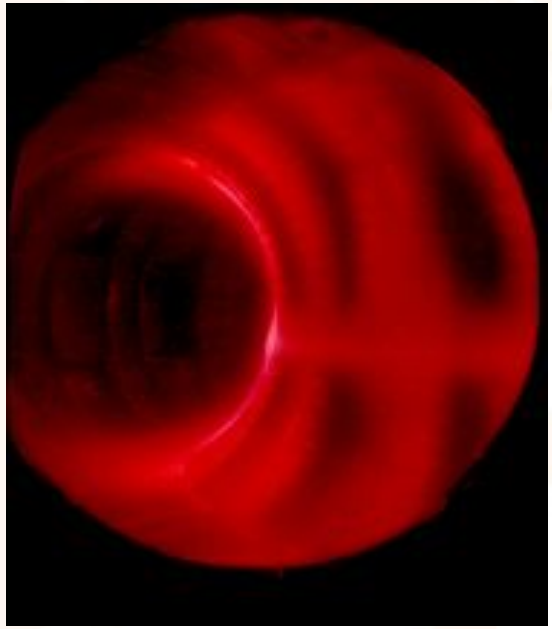


Плазма как состояние вещества

КВАЗИНЕЙТРАЛЬНОСТЬ ПЛАЗМЫ = электрическая нейтральность плазмы в среднем, в достаточно больших объёмах или за достаточно большие времена, т.е. $\langle \rho \rangle \approx 0.$

Степень ионизации плазмы: $\alpha = n_{ion}/n$, где n_{ion} и n – концентрации ионизованных и всех молекул.

Плазма называется низкотемпературной при $T \le 10^5$ K. Если $T \ge 10^6$ -10^8 K, то плазма называется высокотемпературной.



Плазма как состояние вещества

В состоянии плазмы находится большая часть вещества Вселенной – звёзды, звёздные атмосферы, галактические туманности и межзвёздная среда.

Концентрация плазмы меняется в широких пределах: от $n \sim 10^{-6}$ см$^{-3}$ в межгалактическом пространстве до $n \sim 10^{22}$ см$^{-3}$ в твёрдых телах.

Струи солнечной плазмы движутся по дугам вдоль силовых линий магнитного поля. Фото: NASA/TRACE

Плазма как состояние вещества

Свойства плазмы:

- Кулоновское взаимодействие частиц плазмы распространяется на большие расстояния, поэтому взаимодействие частиц является коллективным, а не парным как у молекул обычного газа.
- Электрические и магнитные поля очень сильно влияют на плазму, вызывая появление в ней электрических токов, объёмных зарядов и ряд других специфических свойств.
- Плазма проводит электрический ток.
- Приближённо плазму можно рассматривать как идеально проводящую несжимаемую жидкость, если скорости направленного движения частиц плазмы намного меньше скорости звука в плазме

Дебаевский радиус экранирования

Электростатическое экранирование:
Потенциал заряда в плазме имеет вид:

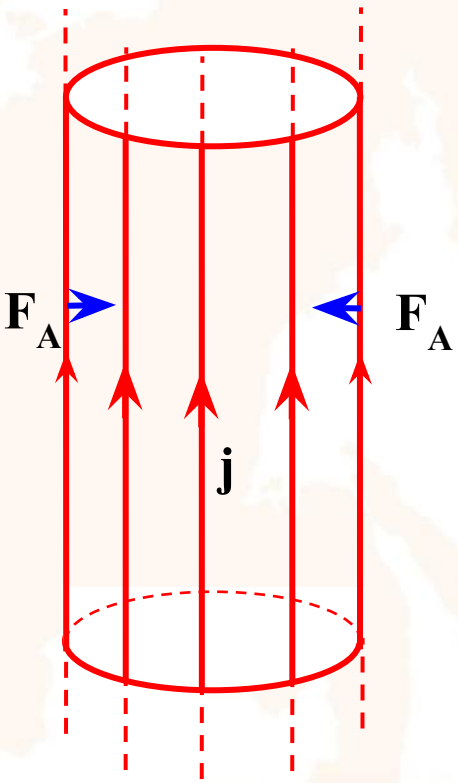
$$\varphi = \frac{q}{4\pi\varepsilon_0 r}\exp\left(-\frac{r}{r_D}\right)$$

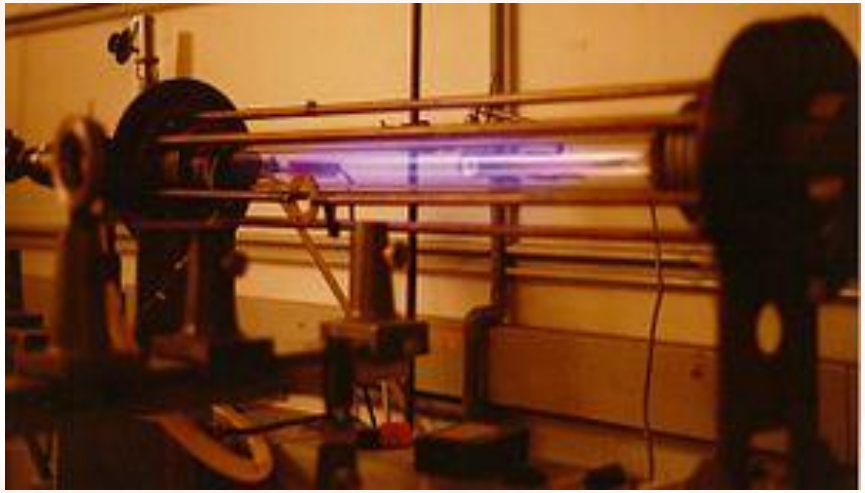
$$\Rightarrow \boxed{r_D \sim \sqrt{\frac{kT\varepsilon_0}{ne^2}}}$$

Пинч-эффект

Ток в проводящей среде имеет свойство уменьшать своё сечение под действием собственного, порождаемого самим током, магнитного поля.

Z-пинч- эффект – это следствие закона Ампера о магнитном притяжении отдельных параллельных токовых струй.

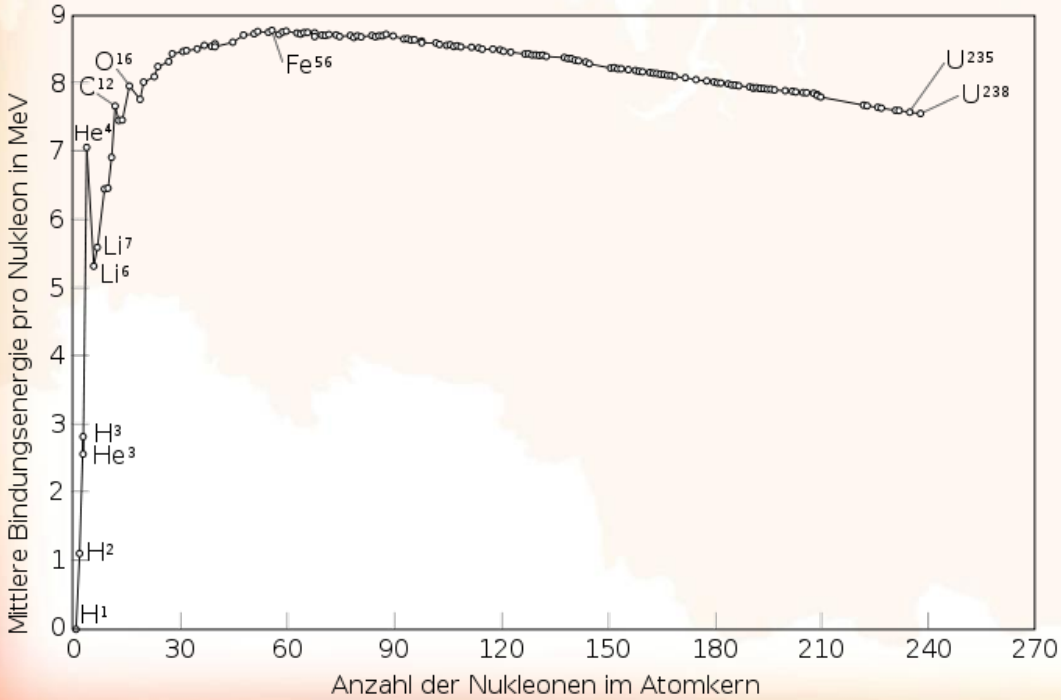


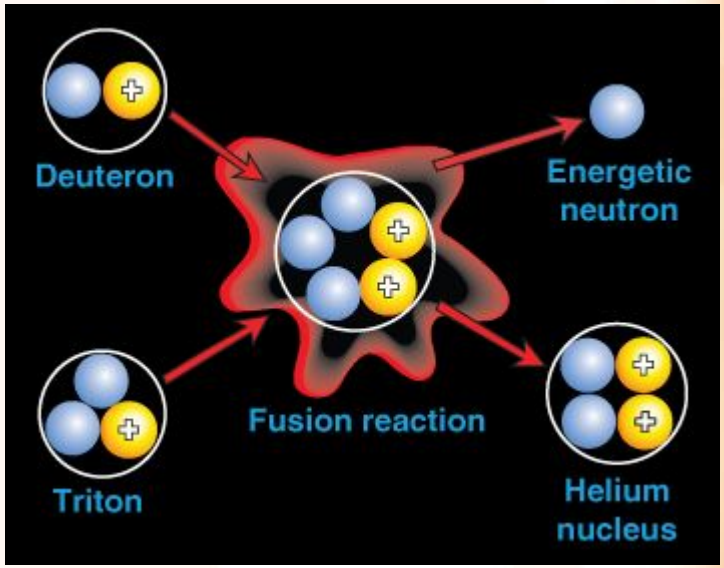


Лабораторная установка для газовых разрядов. Z-пинч в водороде.

Плазма в магнитном поле

Управляемый термоядерный синтез (УТС) – это синтез более тяжёлых атомных ядер из более лёгких при высоких температурах с целью получения энергии, который носит управляемый характер.



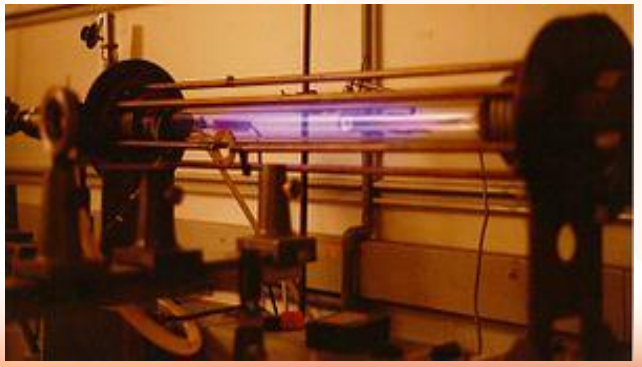


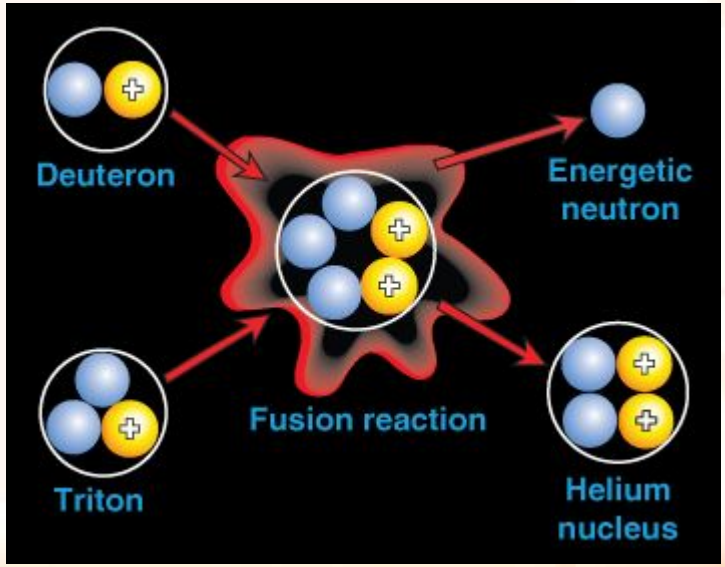
Плазма в магнитном поле

Управляемый термоядерный синтез (УТС) – это синтез более тяжёлых атомных ядер из более лёгких при высоких температурах с целью получения энергии, который носит управляемый характер.

В 1950-ые гг в СССР и США была предложена идея магнитной термоизоляции плазмы для осуществления УТС.

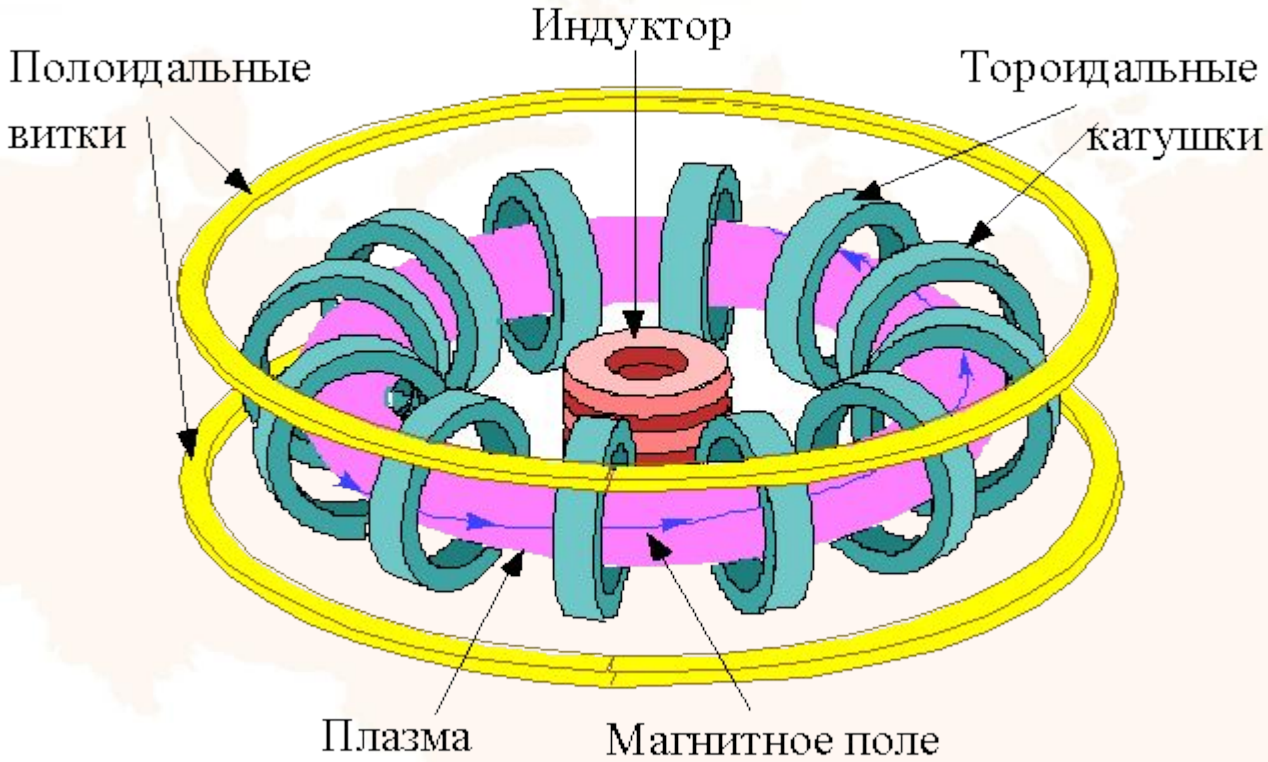
В основе идеи – сжатие плазменного жгута за счет пинч-эффекта





Плазма в магнитном поле

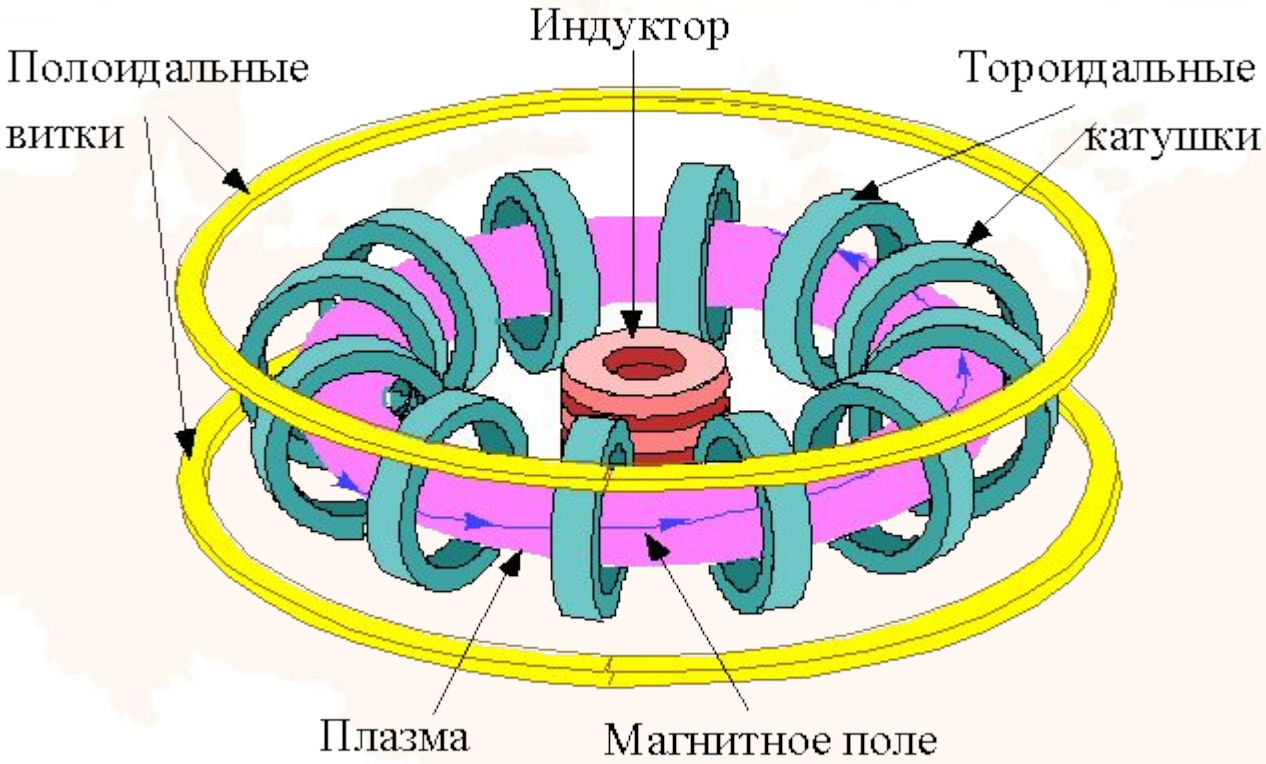
Схема тороидальной камеры с магнитной катушкой (ТОКАМАК).



С помощью индуктора в камере создают вихревое электрическое поле. Протекающий через плазму ток нагревает её и создаёт магнитное поле, которое сжимает протекающий через плазму ток.

Плазма в магнитном поле

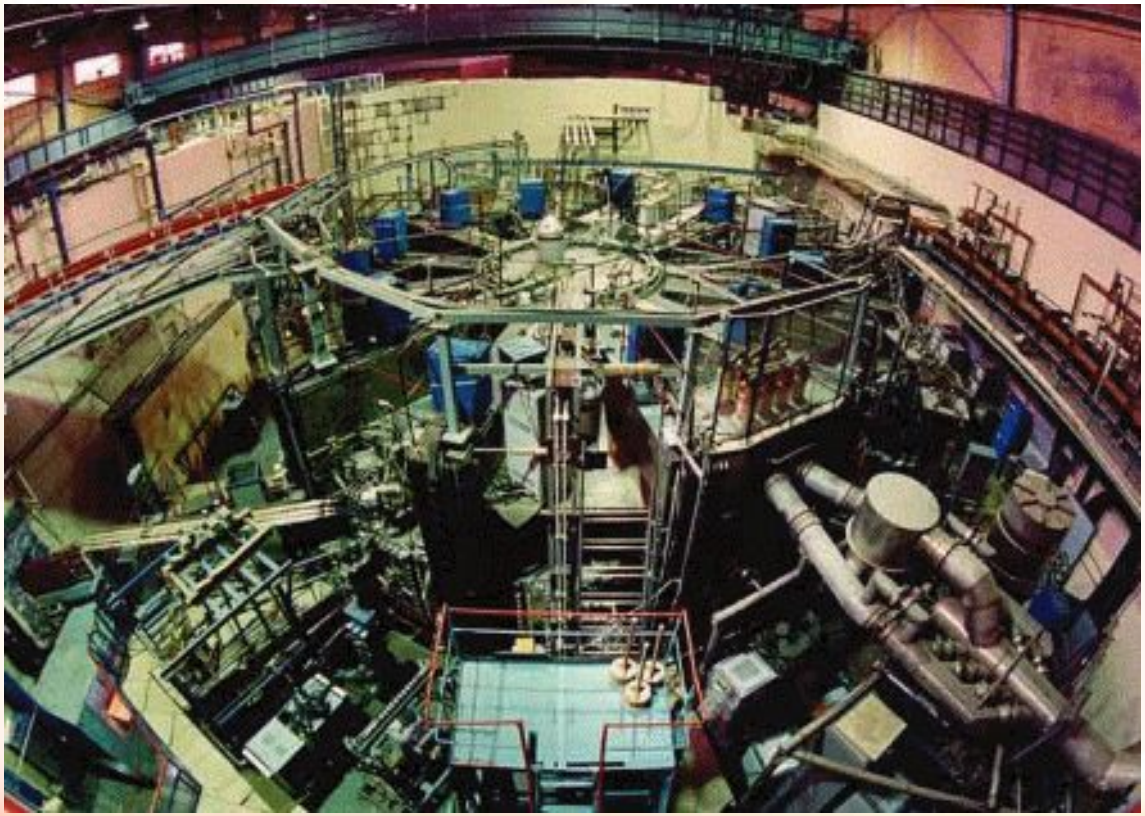
Схема тороидальной камеры с магнитной катушкой (ТОКАМАК).



Тороидальные катушки создают продольное магнитное поле (вдоль оси тора), которое препятствует смещению плазменного шнура. Магнитное поле, создаваемое полоидальными витками, противодействует силе, направленной по большому радиусу тора.

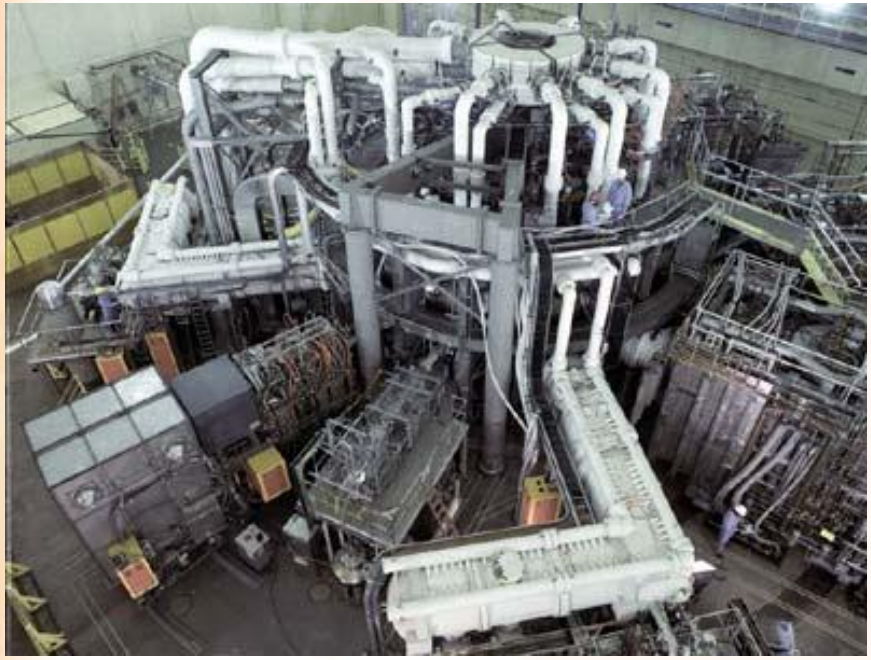
Плазма в магнитном поле

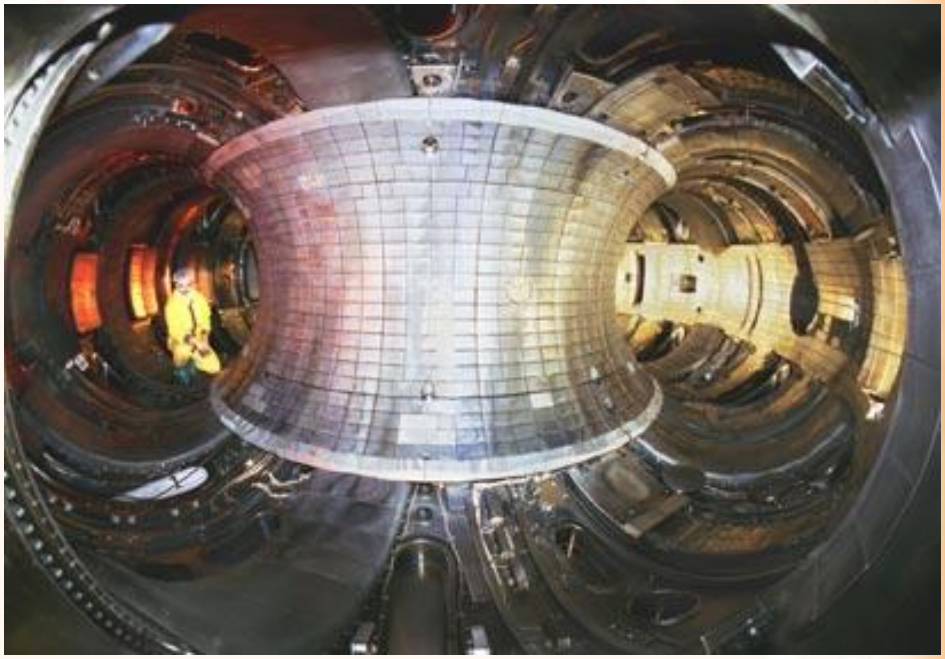
На Токамаках второго поколения были получены внушительные параметры плазмы: температура $8 \cdot 10^7$ К, плотности плазмы превышающие 10^{20} м$^{-3}$.



Токамак Т-15, введен в строй в 1988 году, в настоящее время работы на нем приостановлены .

Плазма в магнитном поле





Лоуренсовские лаборатории, США,
Tokamak Fusion Test Reactor (TFTR)

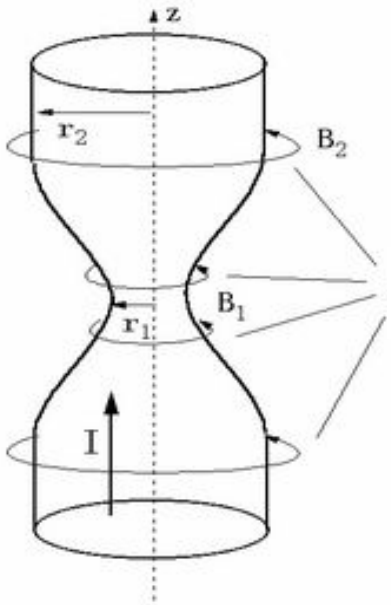
Плазма в магнитном поле

Неустойчивости плазмы проявляются как самопроизвольные отклонения от невозмущённого квазистационарного состояния плазмы.

Различают различного вида неустойчивости: магнитогидродинамические, пучковые, токовые, дрейфовые, кинетические, параметрические, диссипативные, разрывные и другие.

Плазма в магнитном поле

Желобковая неустойчивость. Если в каком-либо сечении плазма сожмётся так, что радиус пинча r_1 станет меньше, чем радиус r_2 соседней области, то магнитное поле в этом сечении пинча повысится.



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

Магнитное поле

$$r_1 < r_2 \quad \Rightarrow$$

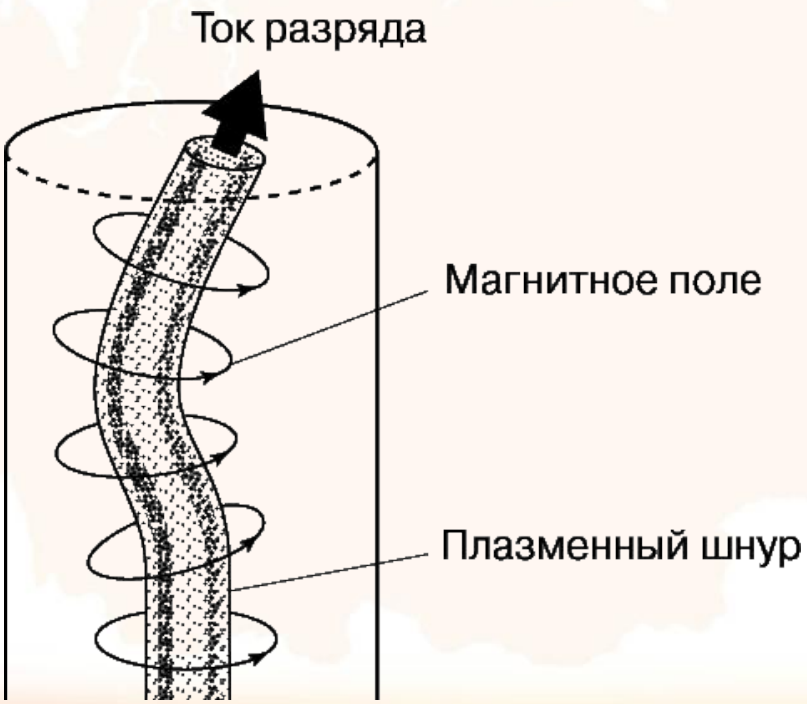
$$B_1 > B_2$$

Увеличивающееся магнитное поле сильнее сожмёт плазму пинча в области перетяжки и температура там повысится. Высокое давление плазмы в перетяжке приводит к вытеканию плазмы из перетяжки в осевом направлении. Это приводит к дальнейшему повышению температуры плазмы в перетяжках.

Плазма в магнитном поле

Изгибная (шланговая) неустойчивость.

На внутренней стороне изгиба силовые линии магнитного поля сгущаются, усиливая магнитное давление, что приводит к увеличению изгиба шнура.



Термоядерный синтез

ITER (*International Thermonuclear Experimental Reactor*, **ИТЭР**) Задача ИТЭР заключается в демонстрации возможности коммерческого использования термоядерного реактора и решении физических и технологических проблем, которые могут встретиться на этом пути.

ЕС, США, Россия, Китай, Япония, Корея, Индия

Спасибо за внимание!
Успеха на экзаменах!

Следующая лекция
В следующем семестре!

Обзор

1. Электростатика

- Линии напряженности электрического поля и эквипотенциальные поверхности.
- Связь между напряженностью и потенциалом.
- Поле вне и внутри объемно заряженного шара.
- Работа силы электрического поля. Потенциал.
- Дипольный электрический момент системы зарядов.
- Поле электрического диполя.
- Электрический диполь в однородном и неоднородном поле (вращательный момент, энергия, сила).
- Энергия электрического поля. Плотность энергии.

Обзор

2. Проводники в электрическом поле. Конденсаторы.

- Электрическое поле одной и двух заряженных плоскостей.
- Электроемкость. Конденсаторы. Емкость плоского конденсатора.
- Энергия заряженного конденсатора. Энергия электрического поля.
- Энергия системы точечных зарядов. Энергия заряженного проводника.
- Проводник в электрическом поле. Распределение заряда в проводнике.

Обзор

3. Диэлектрики. Электрическое смешение (индукция)

- Связь между поляризованностью диэлектрика и объемной плотностью связанных зарядов.
- Связь между поляризованностью диэлектрика и поверхностной плотностью связанного заряда.
- Поле в диэлектрике. Вектор электрического смещения.
- Циркуляция и ротор электрического поля (вектора ***E*** и ***D***).
- Теорема Гаусса для вектора электрического смещения (индукции)
- Условия на границе двух диэлектриков (вектора ***E*** и ***D***)..

Обзор

4. Электрический ток.

- Опыты, подтверждающие наличие свободных электронов в металлах.
- Сила и плотность тока. Уравнение непрерывности.
- Закон Ома в интегральной и дифференциальной формах.
- Мощность тока. Удельная тепловая мощность тока.
- Закон Джоуля-Ленца в интегральной и дифференциальной формах.
- Закон Ома для неоднородного участка цепи. Правила Кирхгофа.

Обзор

5. Магнитостатика

- Магнитное поле равномерно движущегося заряда. Закон Био-Савара.
- Поле бесконечного прямого тока.
- Поле в центре и на оси кругового тока.
- Поле соленоида
- Теорема Гаусса для вектора магнитной индукции.
- Закон Ампера. Сила взаимодействия параллельных токов.
- Энергия магнитного поля. Плотность энергии.
- Контур с током в однородном и неоднородном магнитном поле (вращательный момент, энергия, сила).

Обзор

6. Магнетики

- Намагниченность магнетика. Связь между намагниченностью и плотностью молекулярных токов.
- Циркуляция и ротор магнитного поля (вектора $\boldsymbol{B}$ и $\boldsymbol{H}$).
- Условия на границе двух магнетиков (вектора $\boldsymbol{B}$ и $\boldsymbol{H}$).
- Магнитные свойства диа-и парамагнетиков
- Магнитные свойства ферромагнетиков.
- Поле соленоида

Обзор

7. Электромагнитная индукция и самоиндукция

- Явление электромагнитной индукции. Правило Ленца. Э.Д.С. индукции.
- Явление самоиндукции. Индуктивность соленоида.
- Взаимная индукция двух контуров с токами

8. Электродинамика

- Ток смещения. Полный ток.
- Уравнения Максвелла.
- Энергия и плотность энергии электромагнитного поля.

9. Движение заряженных частиц в электрическом и магнитном поле

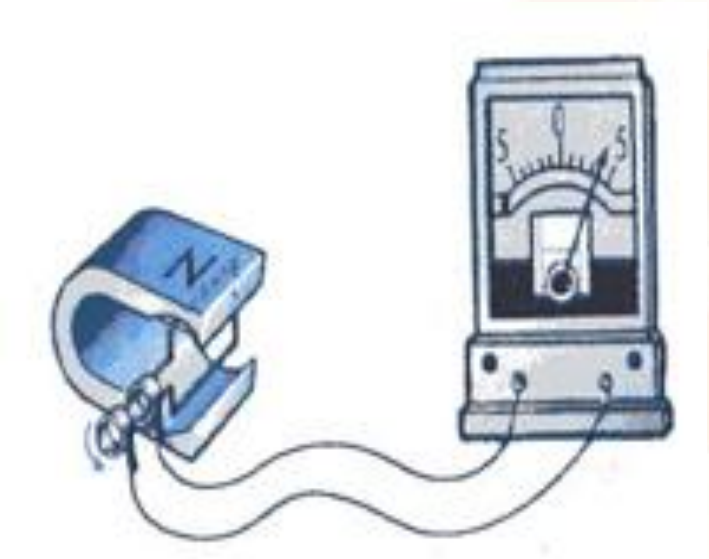
- Сила, действующая на заряд, движущийся в магнитном поле
- Сила Лоренца.
- Ускорители заряженных частиц (качественно)
- Плазма в магнитном поле (качественно)

Следующая лекция
в новом семестре

Дополнение 2.
История электрогенерации

Электромагнитная индукция

Главное практическое применение электромагнитной индукции – это **генерация электроэнергии**



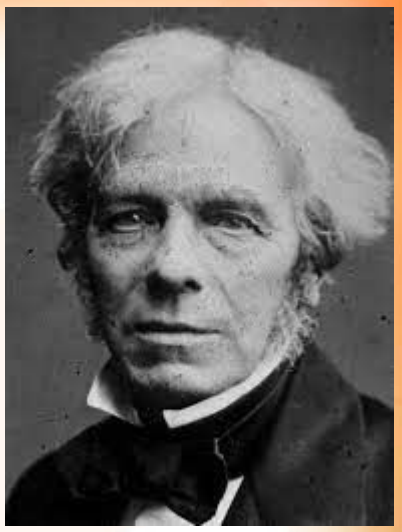
вращение контура в магнитном поле

Технические детали производства, переработки и передачи электрической энергии на расстояние были отработаны трудами большого числа изобретателей и инженеров, среди которых такие знаменитые имена, как Никола Тесла, Вернер фон Сименс, Эмилий Христианович Ленц и иногие другие.

$F = k\frac{q_1 q_2}{r^2}$

Дополнение: история электрогенерации

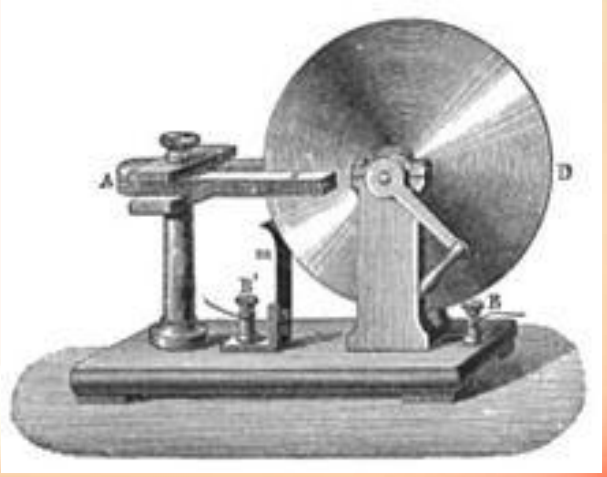
В 1831 году Майкл Фарадей на основе открытого им явления электромагнитной индукции построил генератор электрического напряжения (т.н. «диск Фарадея»). Небольшое напряжение появляется между серединой и периферией медного диска, вращающегося между полюсами подковообразного магнита).



Michael Faraday
1791-1861

Позже эксперименты показали, что используя вместо диска катушку из многих витков провода, можно получить куда более высокое напряжение.

Катушки стали характерной частью всех последующих генераторов



$F = k\frac{q_1 q_2}{r^2}$

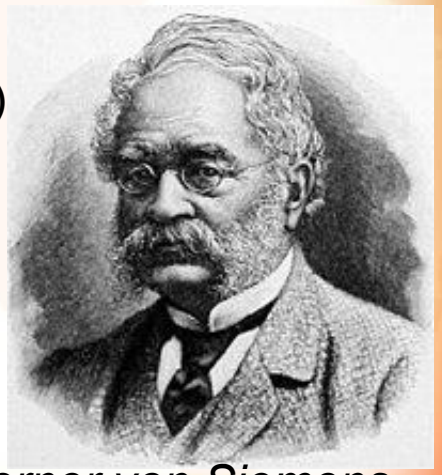
Дополнение: история электрогенерации

Первый действующий электрогенератор, работающий на принципах электромагнитной индукции, построил в 1827 г. - ещё до публикации открытий Фарадея – монах, физик и изобретатель венгр Иштван Йедлик Он же в 1829 г сконструировал один из первых электродвигателей, в 1840-ые Йедлик спроектировал электро-локомотив, а потом еще (sic!) содовую газировку!

Jedlik István Ányos
1800-1895

Очень скромный человек, Йедлик не публиковал и не патентовал своих изобретений. Он вырос и учился в Словакии (тогда – часть Венгрии), потом вступил в орден Бенедиктинцев, преподавал физику в орденских школах в Пребурге (Братислава) С 1839 года он преподавал физику в Будапештском университете, а с 1863 года стал его ректором.

О своем изобретении динамо-машины Йедлик публично заявил по настоянию коллег только в середине 1850-х, когда идея уже была запатентована Вернером фон Сименсом (1816-1892



Werner von Siemens
1816-1892

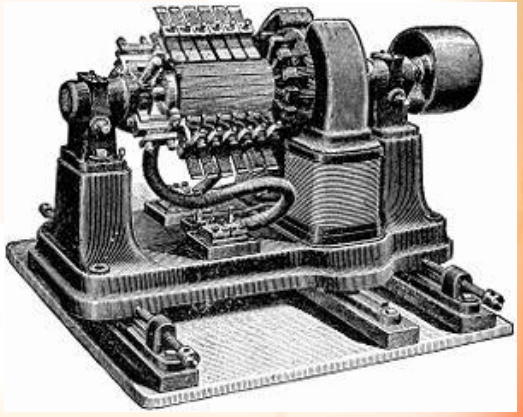
$F = k\frac{q_1 q_2}{r^2}$

Дополнение: история электрогенерации

Россиянин Э.Х. Ленц первым дал математичекую формулировку законам электромагнитной индукции. В 1833 году он высказал идею о том, что одна и та же машина может работать и как электродвигатель, если её питать током, и как генератор электротока, если её ротор вращать механически,
В 1838 году он сам доказал эту возможность экспериментально.

Эмилий Христианович Ленц ,*1804-1865*

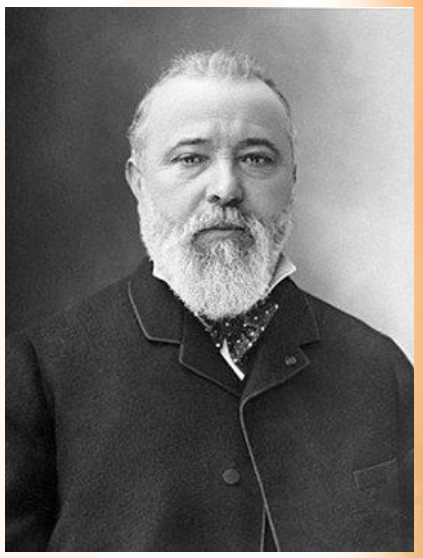
Стало понятно, что электричество – это не только интересный объект для научного исследования, но может оказаться весьма удобным способом приведения в движение различных механизмов



$F = k\frac{q_1 q_2}{r^2}$

Дополнение: история электрогенерации

Для получения большой мощности электрогенератора – нужно сильное магнитное поле. В 1830-40-ые годы в динамо-машинах применяли только постоянные магниты. В 1850-60-ые стали делать генераторы с электромагнитами, обмотка которых питалась током от отдельного генератора с постоянными магнитами.
В 1860-ые А. Пачинотти и З.Т. Грамм получили патенты на машины с самовозбуждением, где магнит запитывался током, генерируемым самой машиной.
В 1873 году бельгийский инженер З.Т. Грамм продемонстрировал две соединённые проводами ~1км. машины, одна из которых (снабженная двигателем внутреннего сгорания) служила генератором и питала электроэнергией вторую, приводившую в движение насос. Это была эффектная демонстрация возможности практического использования электроэнергии.

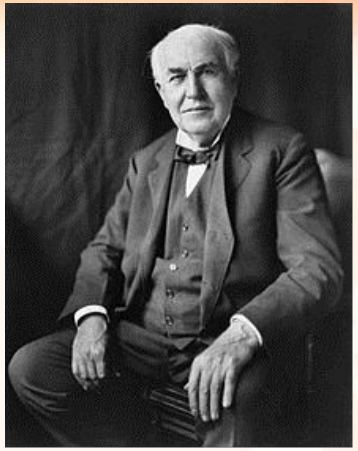


Zénobe-Théophile Gramme, *1826-1901*

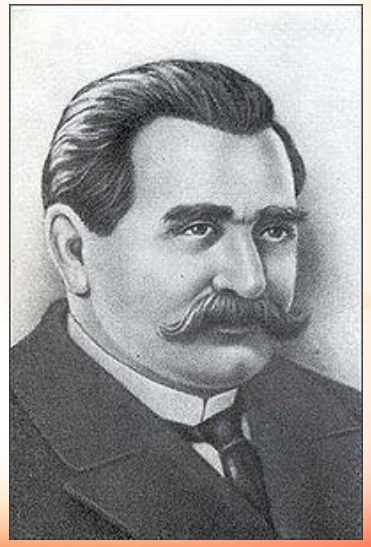
$F = k\frac{q_1 q_2}{r^2}$

Дополнение: история электрогенерации

В 1878 г. изобретатель и бизнесмен Т.А. Эдисон основал компанию «Edisson Electric Light» (позднее - General Electric) по производству и продаже. постоянного электро-тока для систем освещения. Параллельно он совершенствует недавно изобретенные лампочки накаливания. (А. Н.Ладыгин, Т.А.Эдиссон, Дж.У.Суон, и др.).
К 1879 году Эдисон доводит срок службы лампочки до ~12 часов. (сегодня эта цифра кажется смешной, но альтернативами в те годы были только свечи и керосиновые лампы. Эдисон обещал: «*Мы сделаем электрическое освещение настолько дешёвым, что только богачи будут жечь свечи*».



Thomas Alva Edison
1847-1931



Александр Николаевич Ладыгин, *1847-1923*

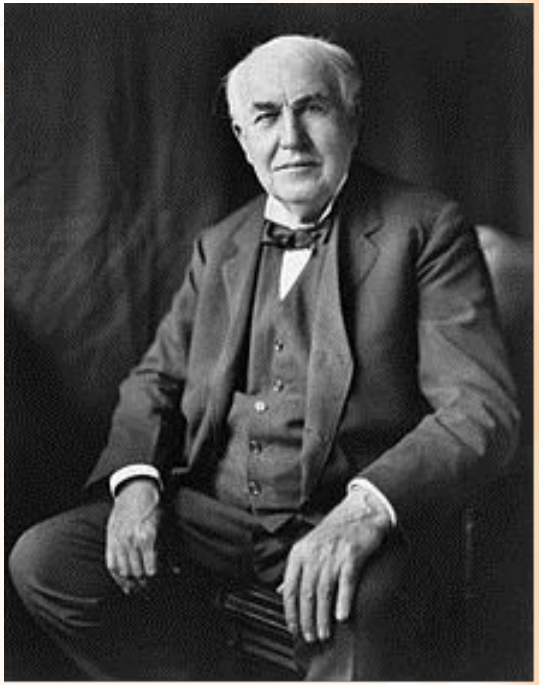
$F = k\frac{q_1 q_2}{r^2}$

Дополнение: история электрогенерации

В 1880 г. Эдисон патентует трехпроводную систему производства и передачи электроэнергии. Три провода - нулевой и два с напряжением ±110 вольт – дают возможность подключить питаемые устройства к разным парам проводов. Это снижает материалоемкость системы.

В январе 1882 года Эдисон запускает первую электростанцию в Лондоне, а в середине года - вторую на Манхэттене, мощностью ~1,5 кВт, освещавшую дом Эдисона и помещения его фирмы.

К 1887 году в США было уже более 100 электростанций постоянного тока, работавших по трёхпроводной схеме Эдисона.



Thomas Alva Edisson
1847-1931

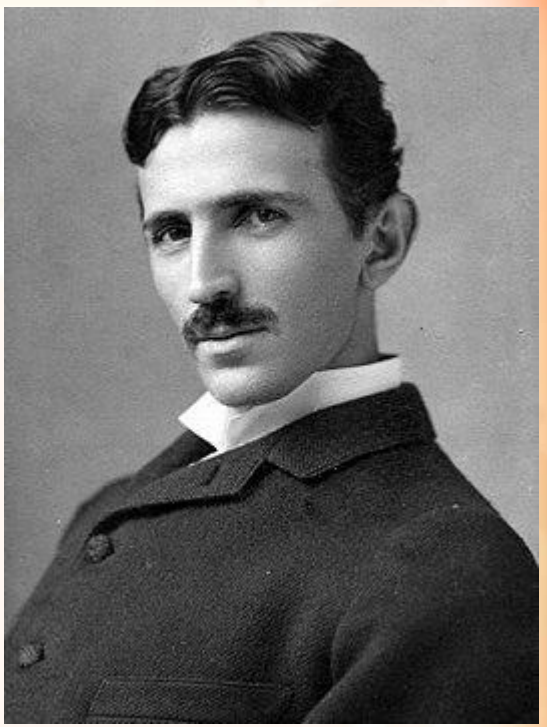
$F = k\frac{q_1 q_2}{r^2}$

Дополнение: история электрогенерации

В 1884 году Эдисон нанимает на работу молодого иммигранта из Австро-Венгрии Николу Тесла - специально для доработки генераторов постоянного тока, пообещав выплатить за это (по утверждению Теслы) 50 тыс. долларов. Менее, чем через год Тесла уволился, сочтя что Эдиссон обманул его.

А 1886 году на взятые в долг деньги Тесла открыл свою фирму по производству ламп уличного освещения, и его дела пошли в гору.

В 1888 году он арендовал офис на 5-ой авеню в Нью-Йорке, как раз около центрального офиса компании Эдисона. Между изобретателями разгорелась борьба, известная в истории США под названием «Война токов» (The Currents War).



Никола Тесла
1856-1943

$F = k\frac{q_1 q_2}{r^2}$

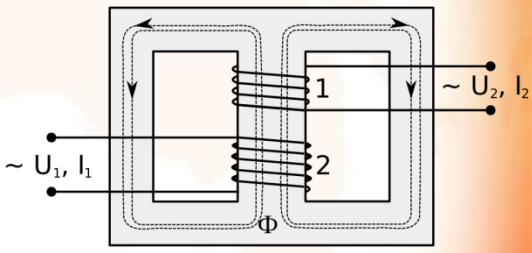
Дополнение: история электрогенерации

Электростанции Эдисона вырабатывали напряжение, близкое к потребительскому (100-200 В), которое по трехпроводной схеме и доставляли потребителям на удалении не более ~1-1,5 км от электростанции. На больших расстояниях потери на нагрев проводов съедают большую часть произведенной энергии..

$$Q = I^2R = (P/U)^2R$$

Снизить потери можно снижая сопротивление проводов (делая их толще, т.е. тяжелее и дороже) или повышая напряжение. Менять напряжение постоянного тока на тот момент не умели, а трансформаторы для изменения амплитуды тока переменного уже были изобретены (П.Н.Яблочков, патент 1876j. Тесла предложил производить ток переменный, передавать по магистральным линиям высокого напряжения (га сотни км), а затем, понизив напряжение, подавать потребителю.

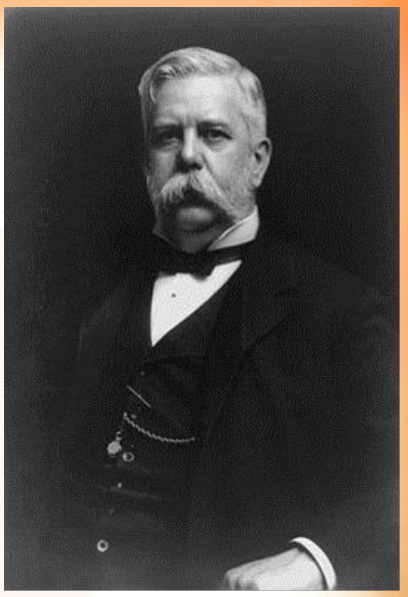
Павел Николаевич Яблочков
1847-1894



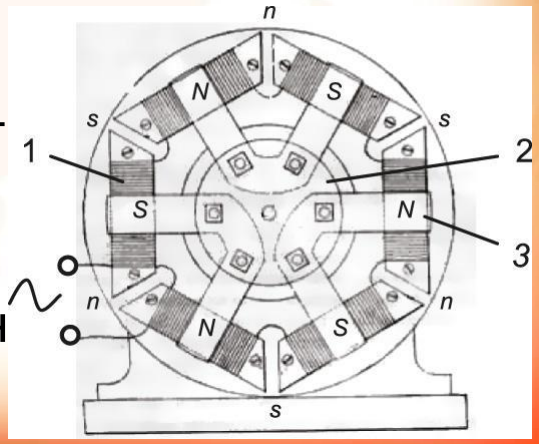
$F = k\frac{q_1 q_2}{r^2}$

Дополнение: история электрогенерации

.У Эдисона был еще один серьезный конкурент - инженер, изобретатель и миллионер Дж. Вестингауз, который, неплохо знал физику и понимал, что слабое звено системы Эдиссона - большие потери мощности в проводах. В 1886 г. Вестингауз построил первую ГЭС, производившую переменный ток в 500В (Грейт-Баррингтон, Массачусетс). Проблема была в отсутствии электромоторов, способных эффективно работать на переменном токе. Проблему решил Тесла, который в 1882 году (еще до приезда в США) изобрел много-фазный электромотор на переменном токе. В 1888 году он патентует свое изобретение в США и берется за разработку генераторов переменного тока. С 1887 г. Тесла и Вестингауз работают вместе, а Эдиссон ведет против них компанию «серного пиара»: платит за сплетни об особой опасности переменного тока и за «электрический стул» Г.Брауна, якобы предоставленн Вестингаузом



George Westinghouse
1846-1914



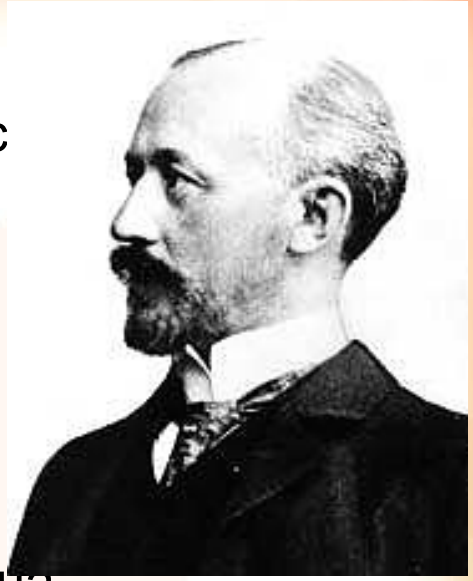
$F = k\frac{q_1 q_2}{r^2}$

Дополнение: история электрогенерации

В 1891 году на электротехнической выставке во Франкфурте-на-Майне немецкая компания AEG демонстрирует линию передачи электрической мощнос около 220 кВт на расстояние 175 км. Сенсационно высокий КПД линии (~ 80 %) был достигнут благодаря применению т.н. трехфазного напряжения, изобретенного русским инженером М. О. Доливо-Добровольским.

Вестингауз приобретает права на использование трехфазной системы и в 1896 году выигрывает тендер на строительство крупнейшей на ту пору ГЭС на Ниагарском водопаде.

После изобретений Теслы и Доливо-Добровольского, система постоянного тока Эдиссона потерпела поражение даже несмотря на то, что сам Тесла вскоре потерял интерес к этой области исследований и занялся изысканиями в области электромагнитных излучений,



Михаил Осипович Доливо-Добровольский
1861-1919

$F = k\frac{q_1 q_2}{r^2}$

Дополнение: история электрогенерации

Уже в начале XX века большинство электростанций выдавали именно переменный ток, хотя все еще существовало немало потребителей постоянного тока. Переменный ток для них преобразовывался в постоянный с помощью ртутных выпрямителей.

Но электростанции постоянного тока строились вплоть до 1920-х годов. Хельсинки окончательно перешёл на переменный ток в 1940-х годах, Стокгольм в 1960-х. В США вплоть до конца 1990-х годов существовало более 4 тысяч разрозненных потребителей постоянного тока, и только в ноябре 2007 года было принято решение о прекращении подачи постоянного тока по сетям и главный инженер компании «Консолидейтед Эдисон», которая этим занималась, сам перерезал символический кабель.

Так закончилась знаменитая «войне токов».

$F = k\frac{q_1 q_2}{r^2}$

Дополнение: история электрогенерации

Динамика мирового производства электроэнергии (Год — млрд. кВт*ч):

1890 — 9
1900 — 15
1914 — 37,5
1950—950
1960—2300
1970 — 5000
1980 — 8250
1990 — 11 800
2000 — 14 500
2005 — 18 138
2007 — 19 895
2013 — 23 127
2015 – 23 550
2019 - 29 000

Общемировой объем электро-генерирующих мощностей в 2017 году превысил 23 ТВт:
В 2019 году крупнейшими в мире производителями электроэнергии являются Китай (27,8%), Северная Америка (США + Канада – 19 %). Евросоюз (12%), Далее идут Индия (5,8%), Россия (4,1%) и Япония (3,8%). Остальной мир – 27,5%.

$F = k\frac{q_1 q_2}{r^2}$

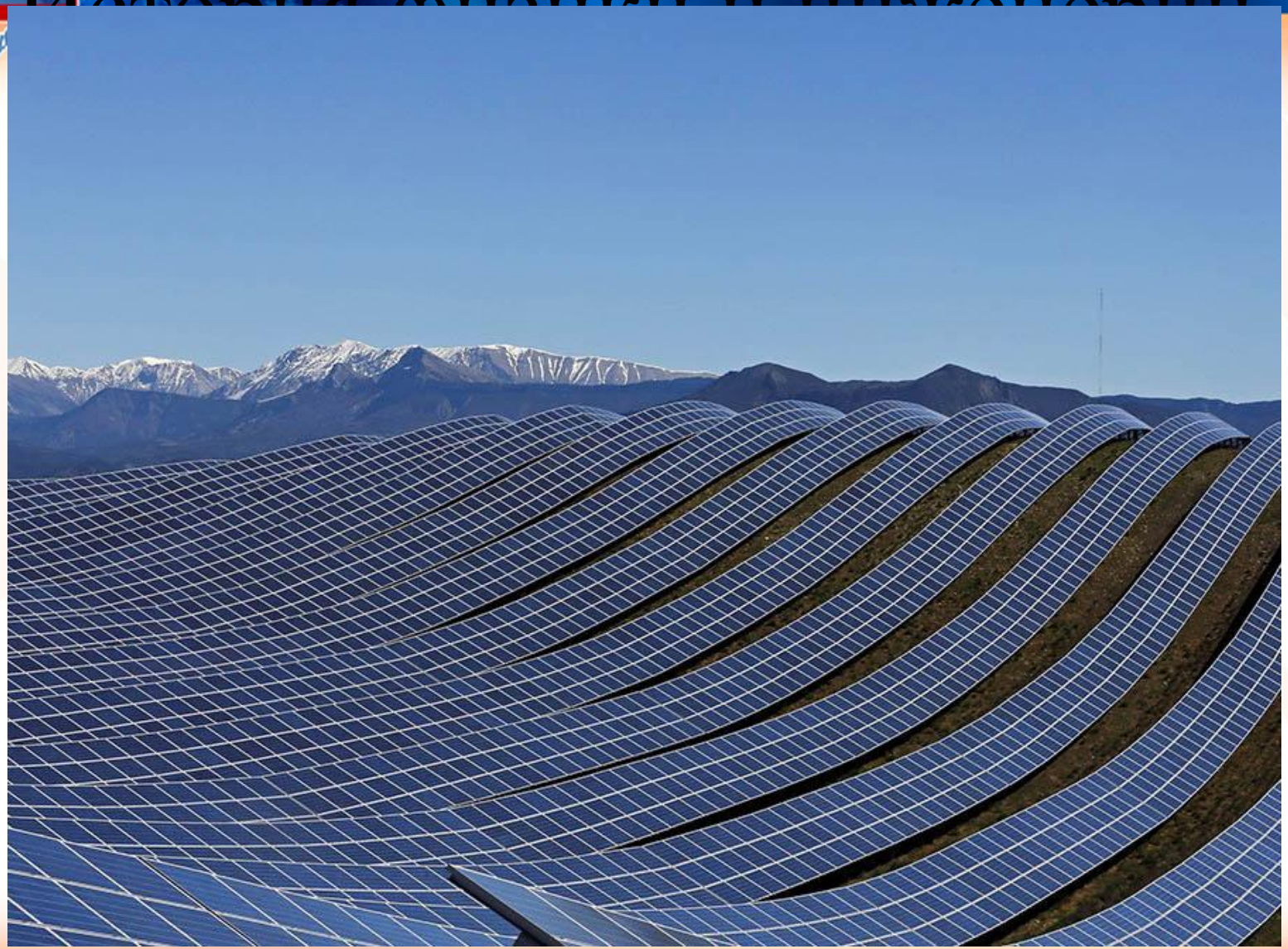
Дополнение: история электрогенерации

Распределение производства электроэнергии по источникам):

Доля	Уголь	Природный газ	ГЭС	АЭС	Нефть	Прочие	Всего
1973 год	38,3 %	12,1 %	20,9 %	3,3 %	24,8 %	0,6 %	6 131 ТВт
2014 год	40,8 %	21,6 %	16,4 %	10,6 %	4,3 %	6,3 %	23 816 ТВт

В 2019 году возобновляемая энергетика (ветер, солнце) выдала 5,3% мирового производства электроэнергии (около 20% европейского производства) и, как казалось, окончательно утвердилась в качестве самого быстрорастущего, основного сектора энергетического рынка. Только в 2017 году было введено в эксплуатацию более 150 ГВт новых мощностей солнечной и ветровой генерации.

Однако, в 2020-21 годы пандемия, климатические и экономические неурядицы заставили усомниться в возможности скорого отказа от углеводородов и атомной энергетики…

$$F = k\frac{q_1 q_2}{r^2}$$

История физики и инженерии