



Введение в физику ускорителей

Алексей Кононенко

ЦЕРН, Женева, Швейцария

ОИЯИ, Дубна, Россия

Программа для украинских учителей в ЦЕРНе, 15.10.2012

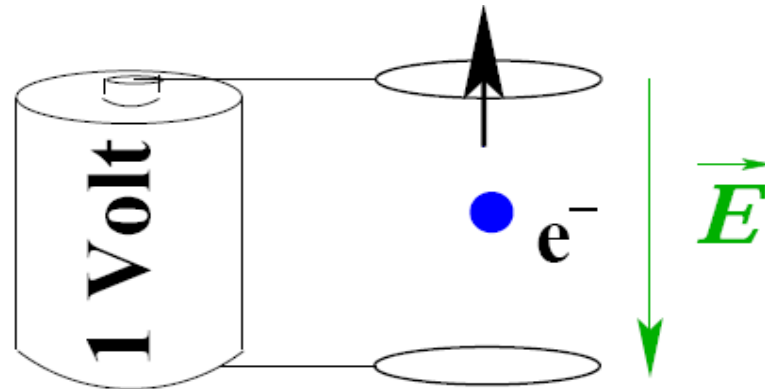
Содержание

- Введение, виды ускорителей
- Ускорение заряженных частиц
- Поперечная динамика пучка
- Коллективные эффекты
- Ускорительный комплекс ЦЕРНа
- Применение ускорителей

Электронвольт

Один **электронвольт** равен энергии, необходимой для переноса элементарного заряда в электростатическом поле в вакууме между точками с разницей потенциалов в 1 В.

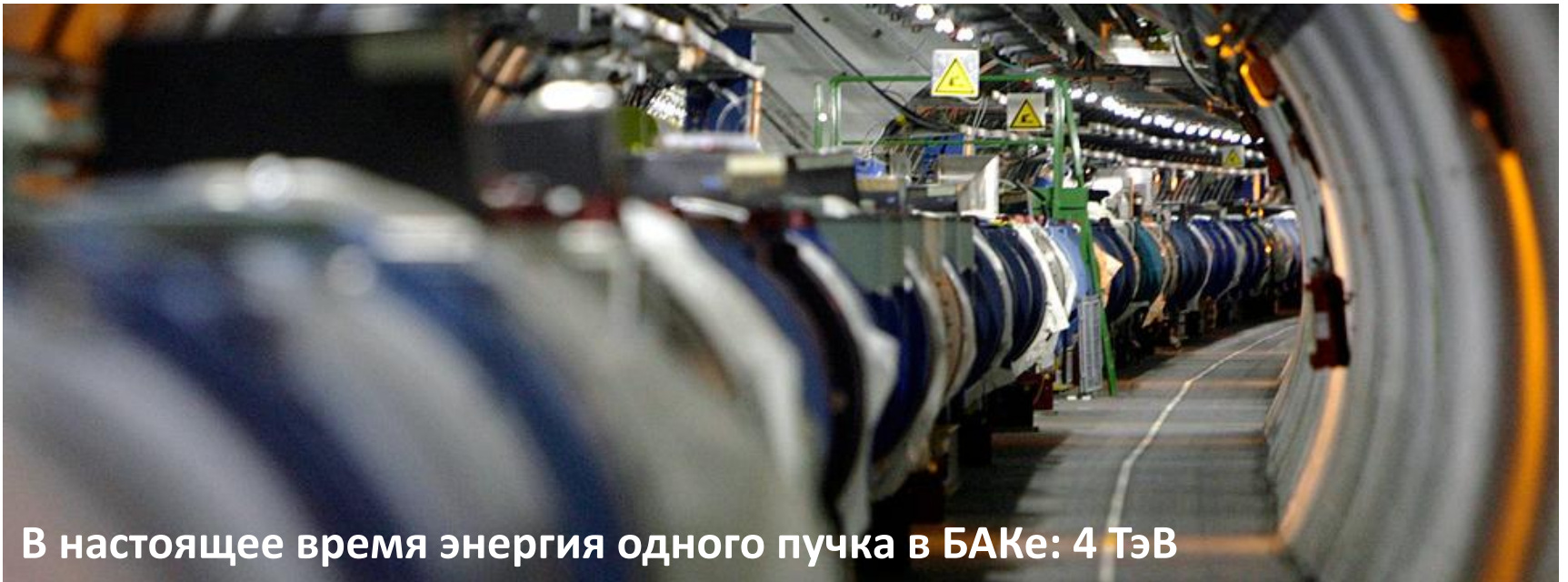
$$1 \text{ эВ} = 1.602 \cdot 10^{-19} \text{ Дж}$$



Также электронвольты часто используются для обозначения массы ($E=mc^2$) **$1 \text{ эВ}/c^2 = 1.783 \cdot 10^{-36} \text{ кг}$**

Что такое ускорители?

Установки для ускорения заряженных элементарных частиц, ионов.
Частицы разгоняются до энергий \sim МэВ, ГэВ, ТэВ, ...

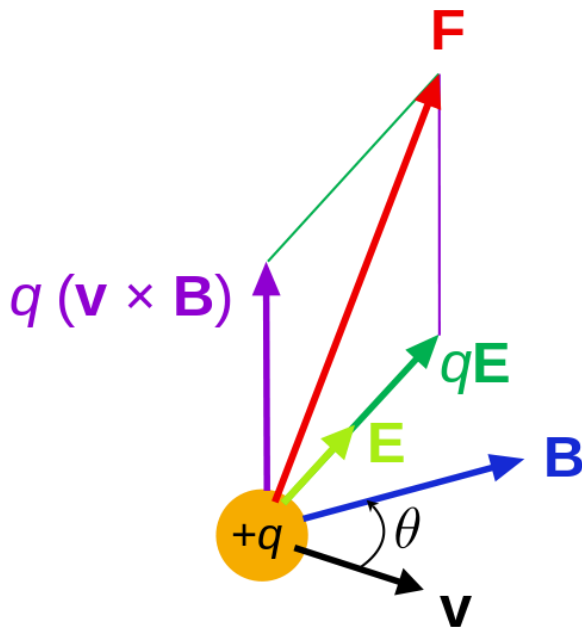


В настоящее время энергия одного пучка в БАКе: 4 ТэВ

Много разных вариантов, но достаточно простой общий принцип:
взаимодействие заряженных частиц с электромагнитными полями

Сила Лоренца

Сила Лоренца – это сила, с которой электромагнитное поле действует на заряженную частицу. Электрическое поле используется для ускорения частицы, а магнитное для изменения траектории её движения.



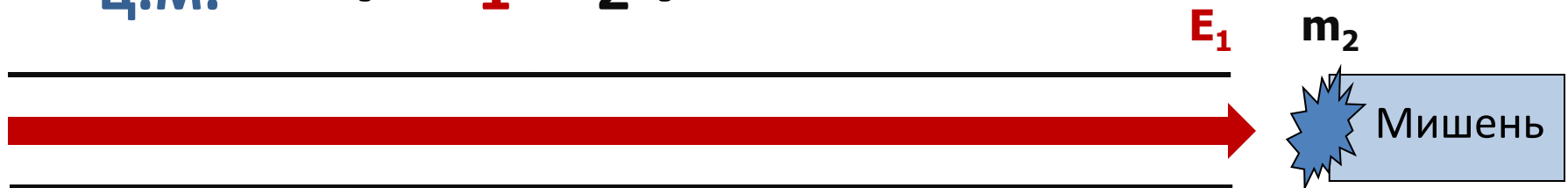
$$\mathbf{F} = q (\mathbf{E} + [\mathbf{v} \times \mathbf{B}])$$

- \mathbf{F} – вектор результирующей силы
- q – заряд частицы
- \mathbf{E} – вектор напряженности электрического поля
- \mathbf{v} – вектор скорости
- \mathbf{B} – вектор индукции магнитного поля

Линейный ускоритель: линак

Линак – частицы движутся по линейной траектории, ускорение происходит по всей длине ускорителя

$$E_{\text{ц.м.}} \approx (2E_1 m_2)^{1/2}$$



Преимущества

- + прямая траектория
- + один пролёт
- + ...

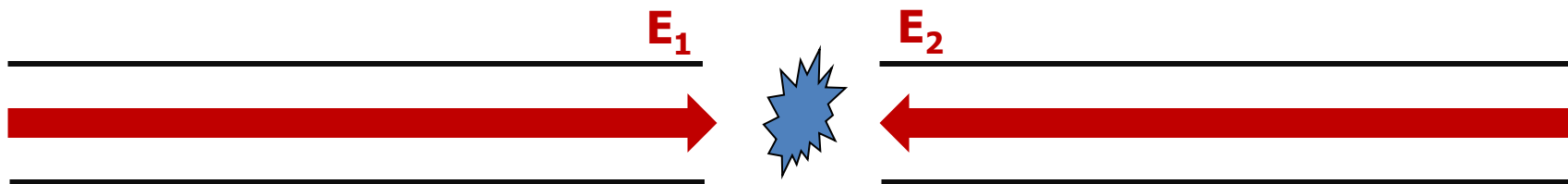
Недостатки

- энергия столкновения
- длина ускорителя
- ...

Линейный коллайдер

Коллайдер – ускоритель на встречных пучках

$$E_{\text{ц.м.}} \approx (4E_1E_2)^{1/2}$$



Преимущества

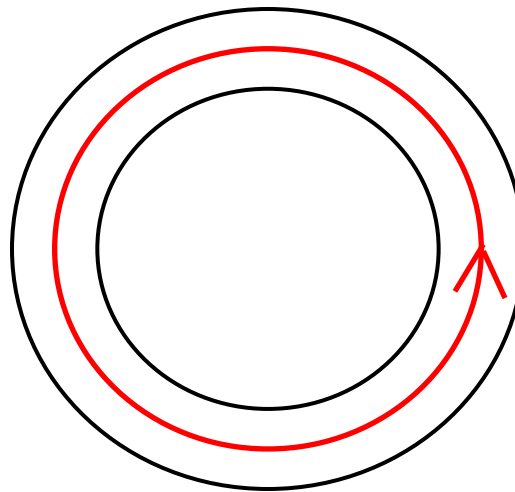
- + прямая траектория
- + один пролёт
- + ...

Недостатки

- длина ускорителя
- ...

Циклические ускорители

В **циклических ускорителях** частицы содержатся долгое время и ускоряются в одной точке траектории – в отличие от линейного случая



Преимущества

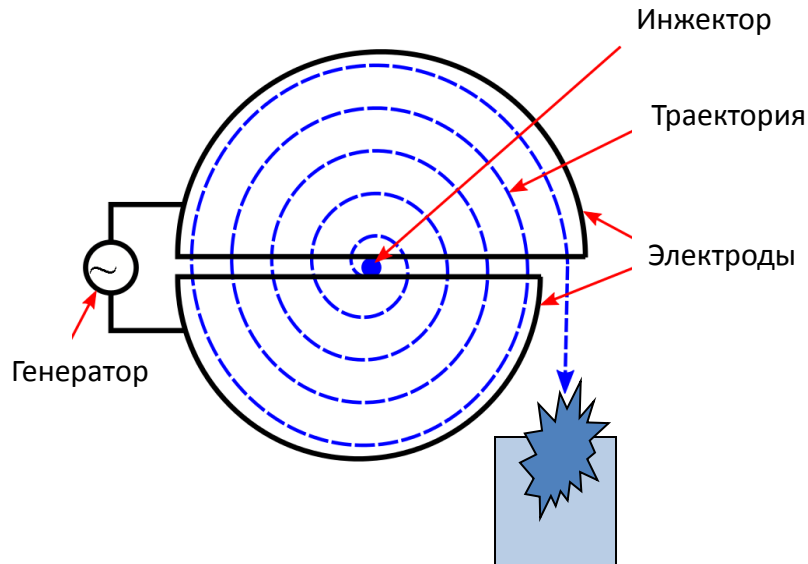
- + несколько пролётов
- + можно ускорять в одной точке
- + ...

Недостатки

- нужно поворачивать частицы
- синхротронное излучение
- ...

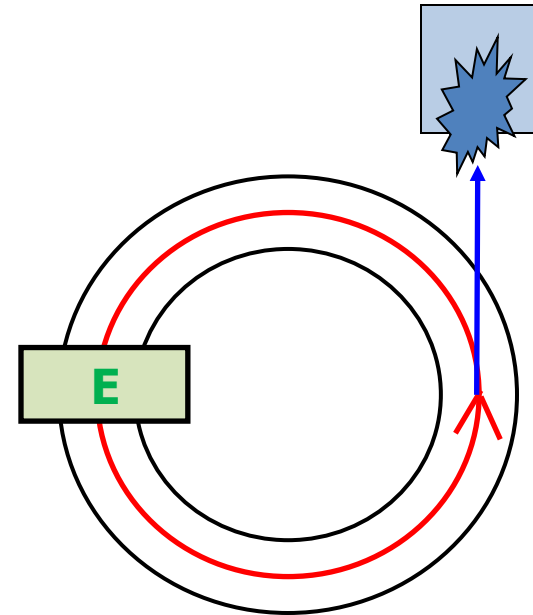
Циклические ускорители

Циклотрон



Огромный дипольный магнит, компактный дизайн, постоянное магнитное поле, низкая энергия, один пролёт

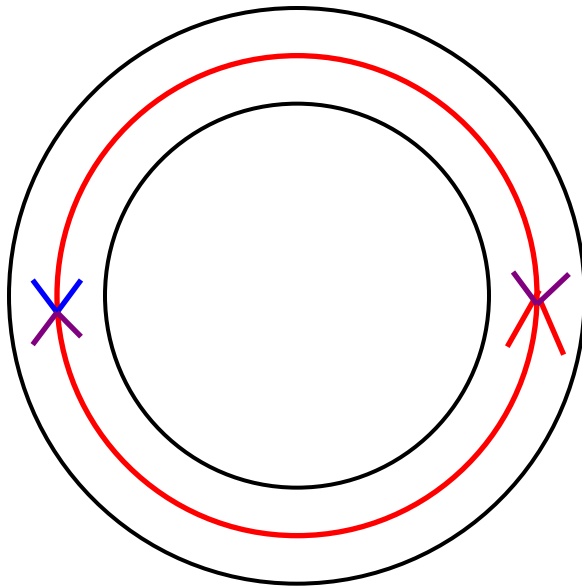
Синхротрон



Изменяющееся магнитное поле, небольшие магниты, большая энергия, ускорение в одной точке

Циклические коллайдеры

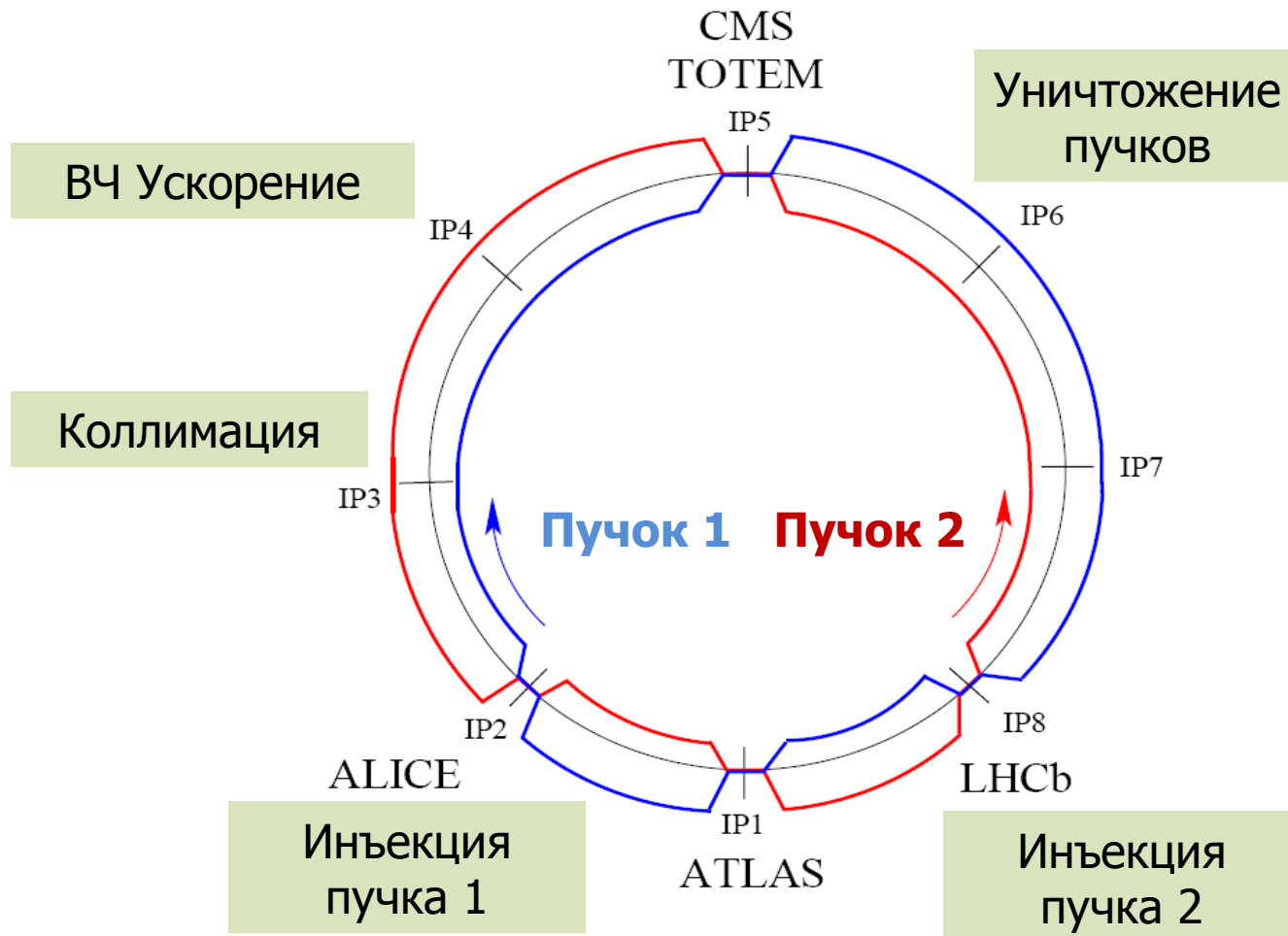
В **циклических коллайдерах** циркулируют два пучка частиц в противоположных направлениях. Типы коллайдеров: лептонный, адронный.



Коллайдеры с одним типом частиц, например, р-р требуют две камеры для их поворота по циклической траектории. Пучки находятся в одной камере в районе точки столкновения.

Большой адронный коллайдер: 8 возможных точек столкновения пучков, 4 основных эксперимента, длина 27 км.

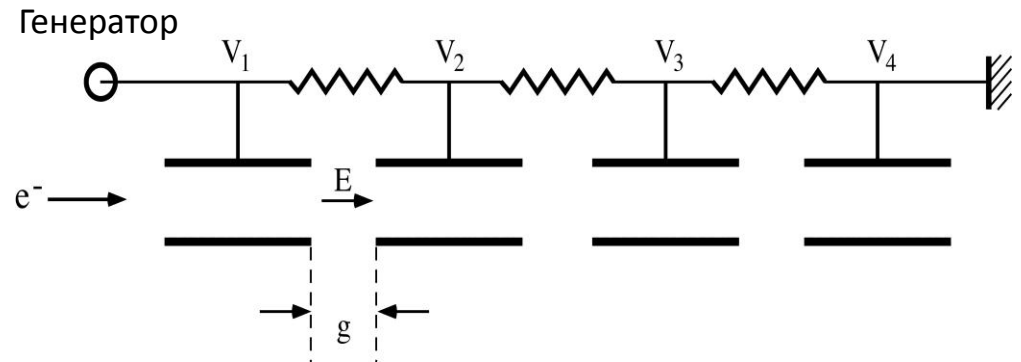
Большой адронный коллайдер



Ускорение частиц

Ускоритель должен сообщать заряженным частицам кинетическую энергию. Для этого создается **электрическое поле**, согласованное с направлением движения частицы.

Электростатический ускоритель



$$\mathbf{F} = q \mathbf{E}$$

$$\mathbf{E} = n e \Delta V$$

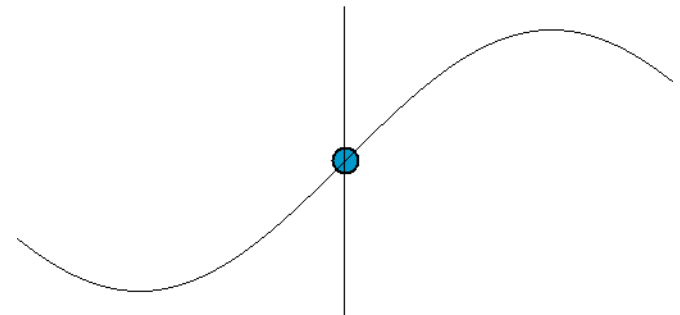
- ограничение $V = \sum V_i$
- возможны искры и пробой!

Альтернатива: использовать ускорение электромагнитными волнами

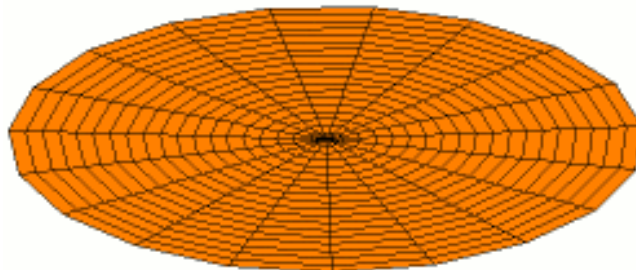
Ускорение волной

Ускорение электромагнитной волной возможно в случае, если направление электрического поля волны согласовано с направлением движения частицы – синхронизм.

Бегущая волна



Стоячая волна

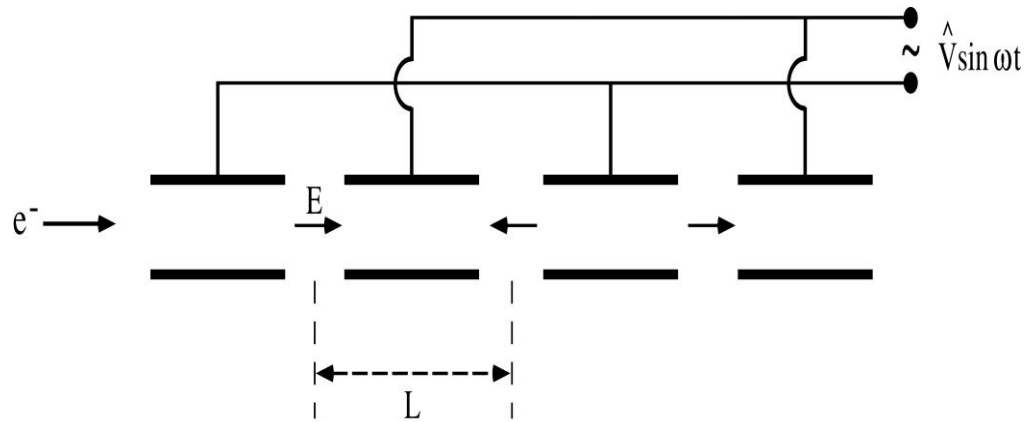


Дрейфовая трубка

Дрейфовая трубка – низкоэнергетичный линейный ускоритель. Частица ускоряется переменным электрическим полем между электродами

Синхронизм

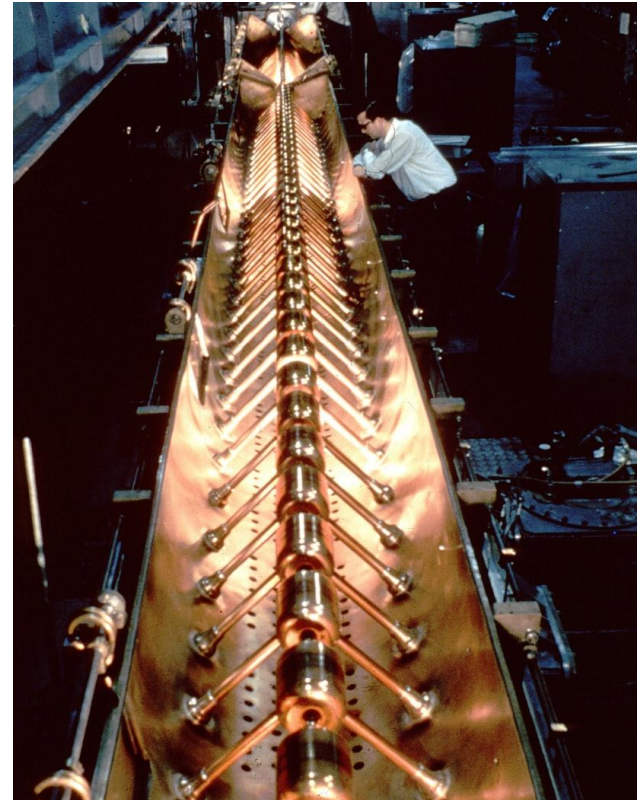
$$L/v = T/2$$



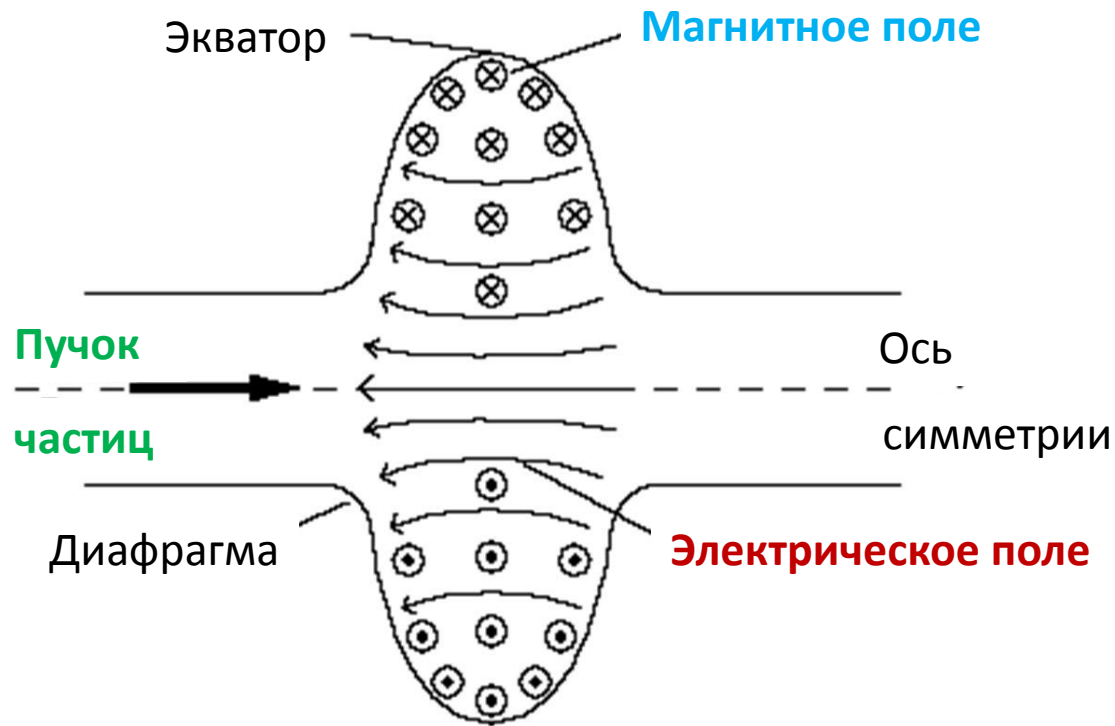
С увеличением скорости частиц длина дрейфовых трубок должна возрастать, чтобы выполнялось условие синхронизма и происходило эффективное ускорение.

Дрейфовая трубка

Линейные
структуры в
ЦЕРНе



Резонаторные структуры



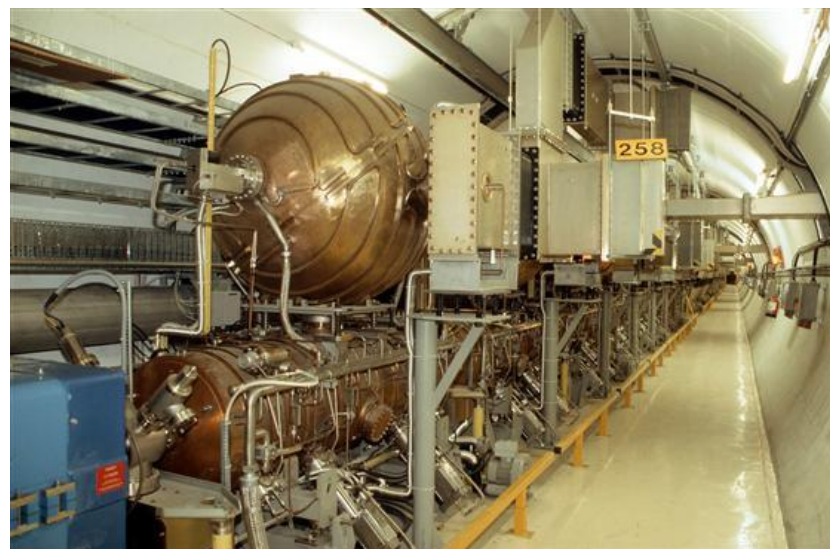
Резонансная частота структуры согласована с частотой ВЧ генератора

Резонаторные структуры

Для повышения эффективности ускорения используются более сложные формы резонаторных структур.



БАК, сверхпроводящие, 400МГц
Ускорение 5 МВ/м

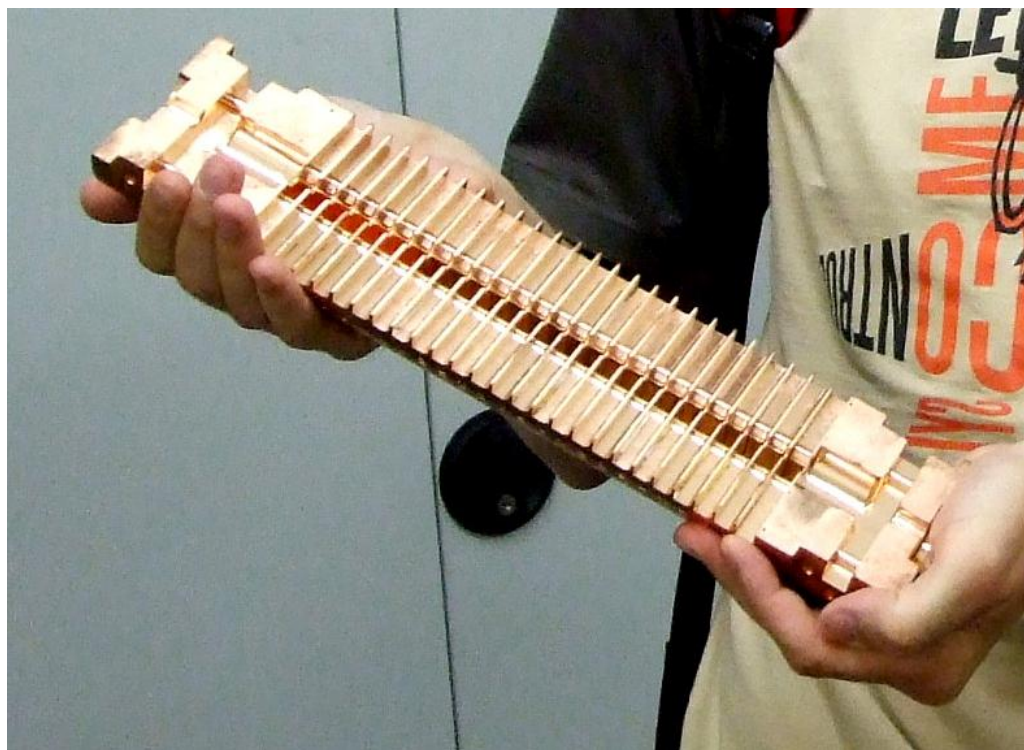


БЭП, медные резонаторы, 352МГц

Резонаторные структуры

Чем выше рабочая частота – тем меньше размер ускорительной структуры. Однако, необходима более высокая точность её производства и более дорогостоящие СВЧ генераторы.

Медный резонатор для компактного линейного коллайдера, 12 ГГц, 100 МВ/м

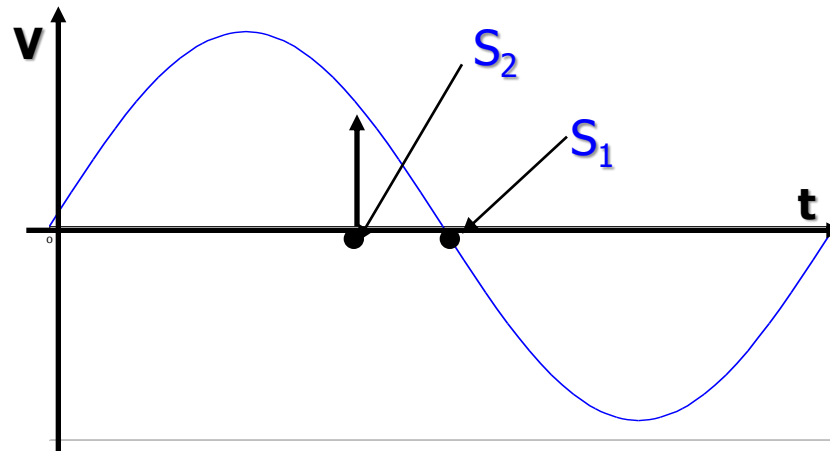


Ускорение и компенсация

Необходимо сообщить энергию частицам, чтобы их **ускорить** или **компенсировать** потери при обращении в кольце циклического ускорителя. «Идеальная» частица должна прибывать в структуру в одной и той же фазе волны круг за кругом.

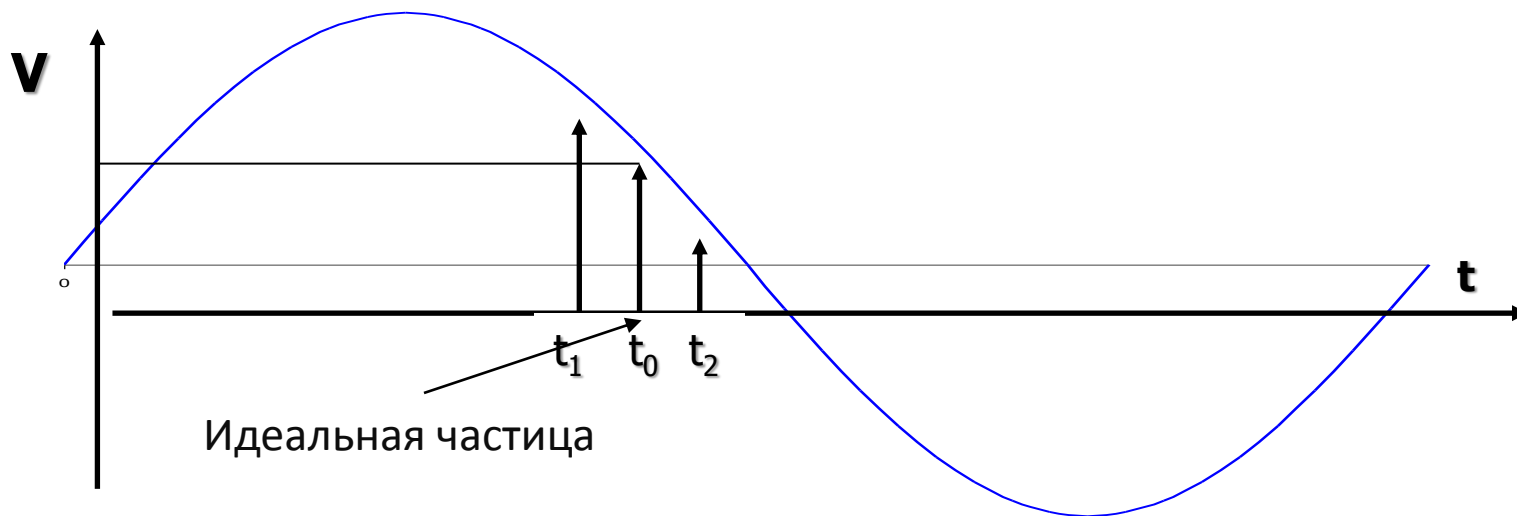
Синхронизм

$$f_{\text{ВЧ}} = h f_{\text{обр}}$$



Принцип автофазировки

Равновесная фаза должна располагаться на спадающем склоне синусоиды ВЧ. Таким образом, обеспечивается стабильность частиц в продольном направлении.



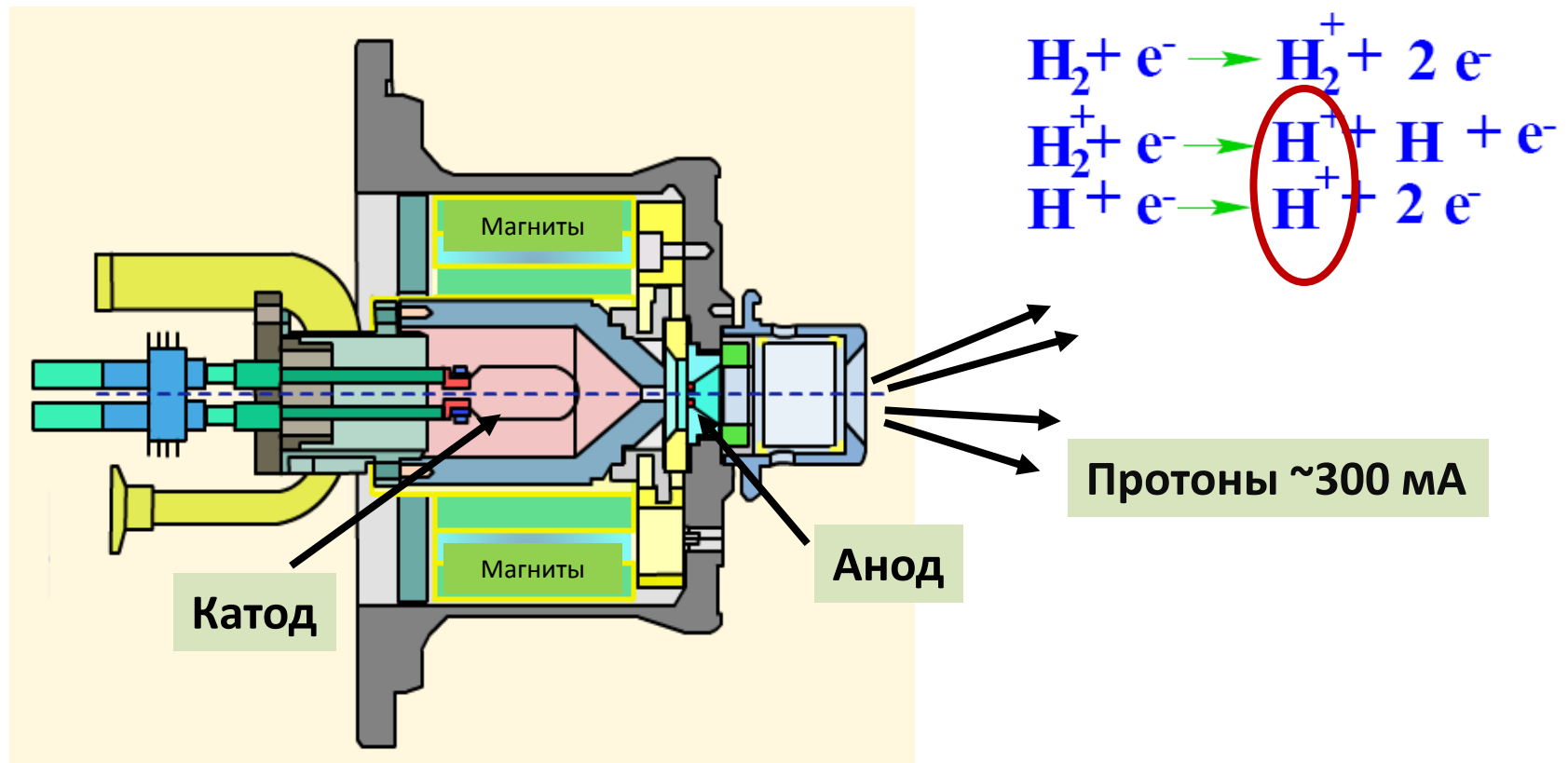
Идеальная частица прилетает в момент времени $t_0 \rightarrow V = V_0 \rightarrow \text{ОК}$

Частица прилетает позже: $t_2 \rightarrow V_2 < V_0$

Частица прилетает раньше: $t_1 \rightarrow V_1 > V_0$

Генерация протонов для БАК

Для генерации протонов в БАК используется дуоплазматрон. В камеру инжектируется водород, который ионизируется электронами.



Пучки частиц

Частицы группируются электромагнитными полями в сгустки. Наборы сгустков образуют пучки.

$$f_{\text{ВЧ}} = h f_{\text{обр}}$$

Большой адронный коллайдер

$$h = 35640$$

$$f_{\text{ВЧ}} = 400 \text{ МГц}$$

$$V_{\text{RF}} = 16 \text{ МВ}$$

2808 сгустков в пучке

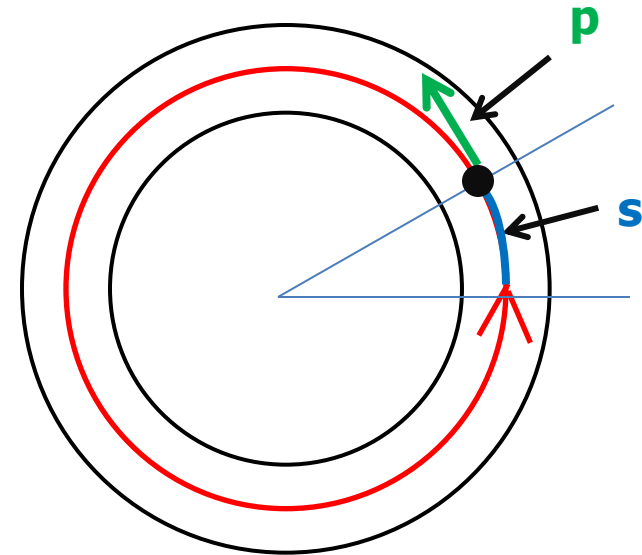


Высокочастотный квадруполь: фокусировка, ускорение и создание сгустков частиц.

Динамика пучка

Для того, чтобы описать движение частиц в циклическом ускорителе, каждая частица характеризуется следующими шестью переменными:

- азимутальная позиция в кольце: s
- импульс: p
- горизонтальная позиция: x
- горизонтальный угол: x'
- вертикальная позиция: y
- вертикальный угол: y'



Имеем шестимерное фазовое пространство (s, p, x, x', y, y')

Динамика пучка

В ускорителе, разработанном для работы на энергии $E_{\text{ном}}$, все частицы вида $(s, E_{\text{ном}}, 0, 0, 0, 0)$ будут циркулировать в центре вакуумной камеры по кругу. Однако, это лишь «идеальные» частицы.

Проблемы возникают, когда:

- используются дипольные магниты для поворота частиц
- $E \neq E_{\text{ном}}$ или $(p-p_0) / p = \Delta p / p_{\text{ном}} \neq 0$
- $x, x', y, y' \neq 0$

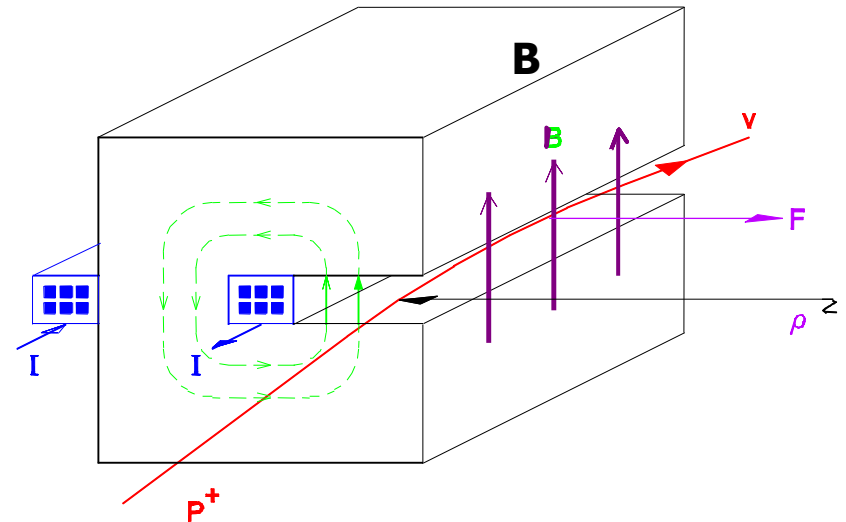
Дипольные магниты

$$F_{\text{Лоренца}} = q [\mathbf{v} \times \mathbf{B}]$$

$$F_{\text{центр}} = mv^2/r$$

Магнитная жесткость

$$Br = mv/q = p/q$$



Частицы с одинаковой магнитной жесткостью будут двигаться по одинаковым траекториям в поле \mathbf{B} . Выражение также верно для релятивистского случая, если импульс $m\mathbf{v}$ заменить на релятивистский импульс \mathbf{p} .

Дипольные магниты

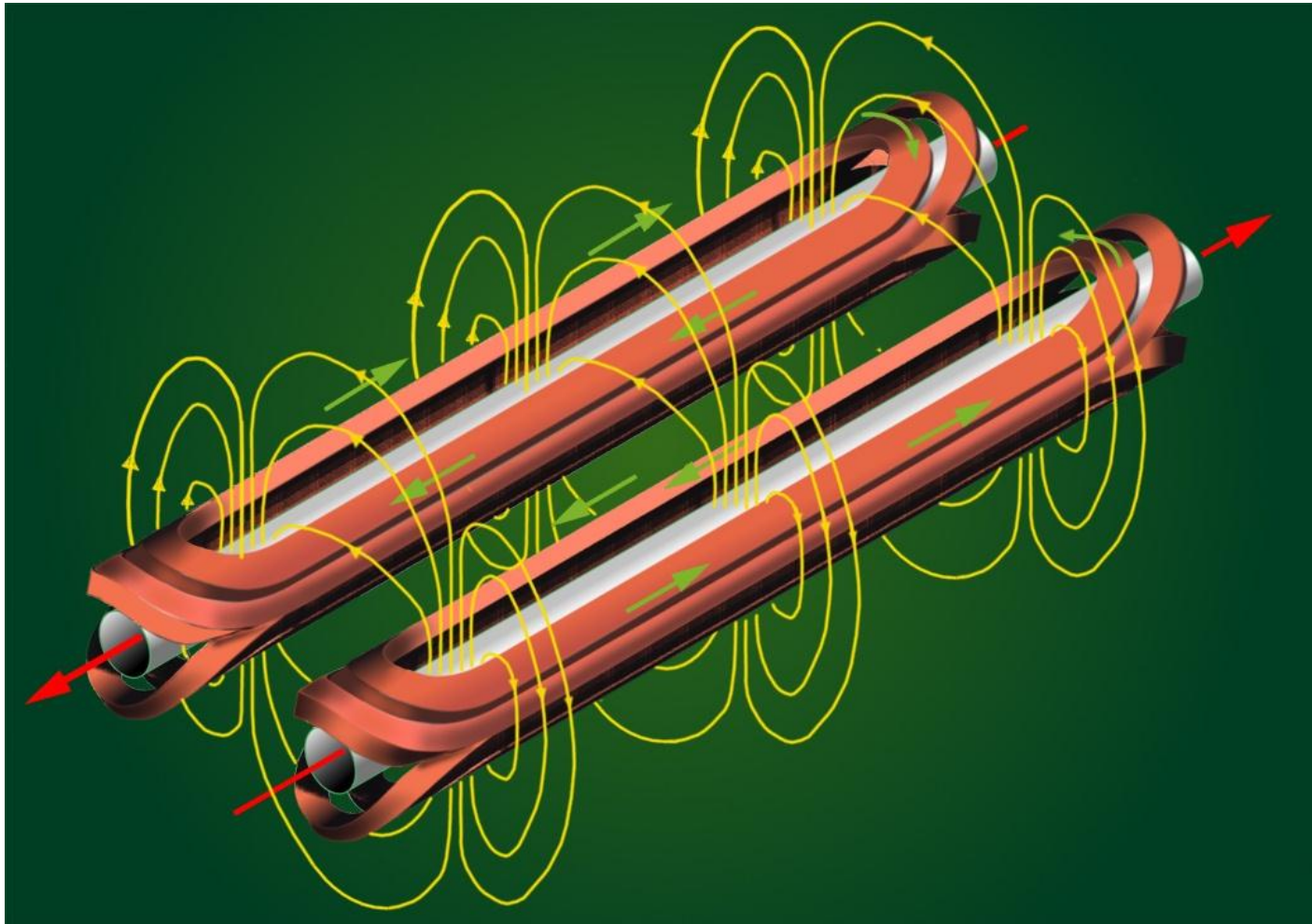
«Теплый» магнит



Сверхпроводящий магнит



Магнитное поле диполя



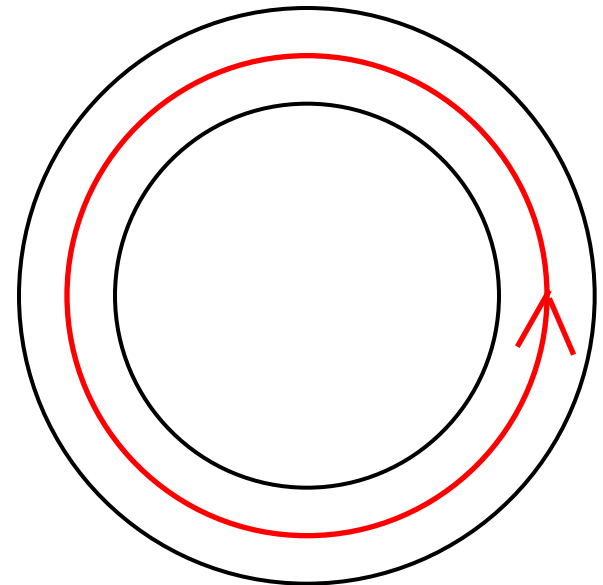
Идеальный коллайдер

Если пренебречь синхротронным излучением в диполях, гравитацией, то идеальные частицы будут циркулировать на оси циклического коллайдера вечно.

К сожалению:

- гравитация $\Delta y = 20 \text{ мм}$ за 64 мс
- выравнивание установки
- движение грунта
- отклонения ЭМ полей от расчетных
- ошибки в энергии частиц, положении

Необходима фокусировка частиц!



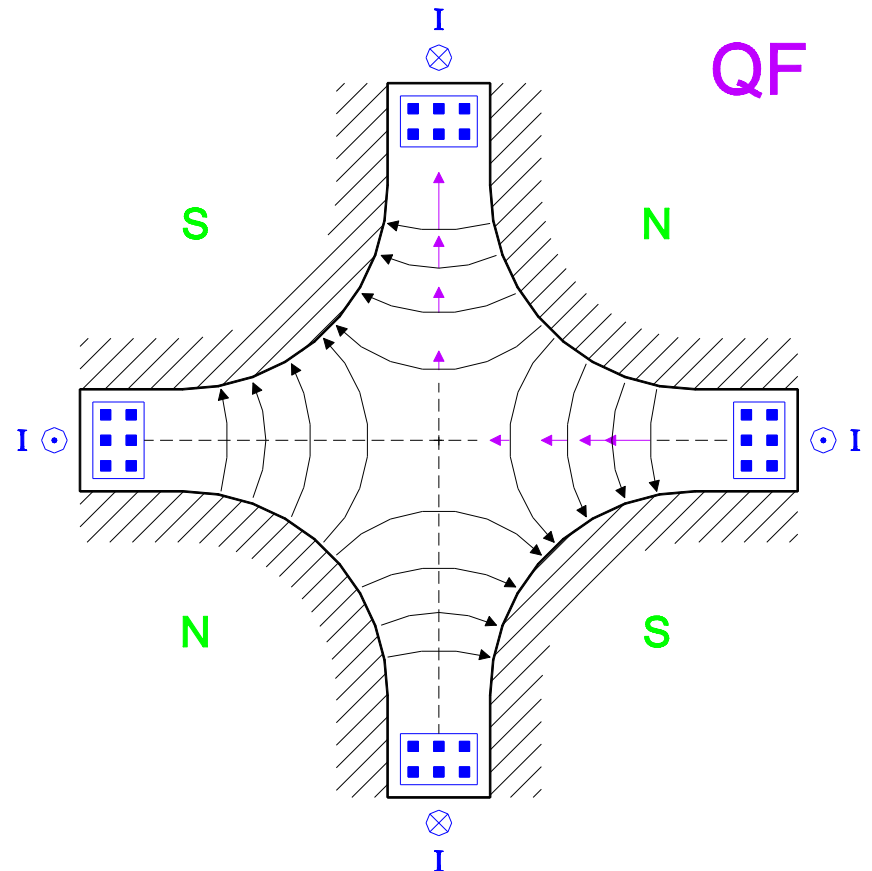
Фокусировка квадрупольями

$$F_x = -gx$$

$$F_y = gy$$

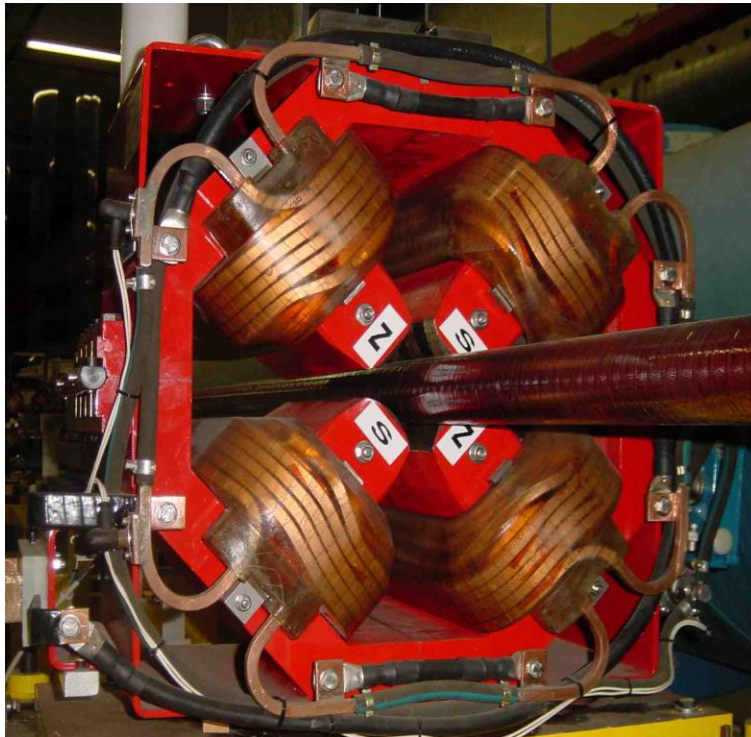
Сила увеличивается линейно со смещением.

К сожалению, такой квадруполь фокусирует частицы в горизонтальной плоскости и рассеивает в вертикальной плоскости



Квадруполи

«Теплый» магнит

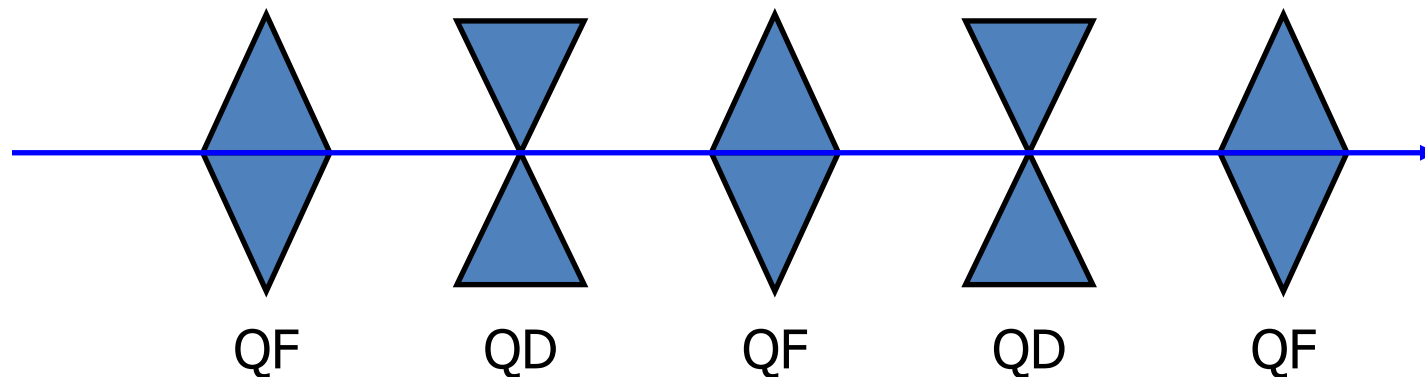


Сверхпроводящий магнит



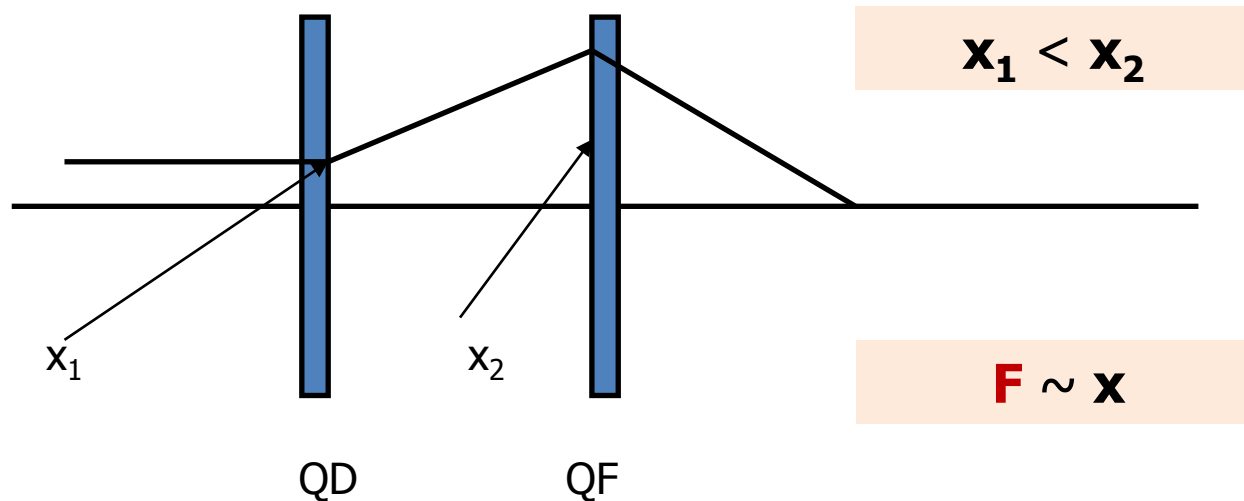
Знакопеременная фокусировка

Основная идея: отказаться от одновременной фокусировки в двух плоскостях. Частицы, у которых $x, x', y, y' \neq 0$ будут осциллировать вокруг «идеальной» частицы внутри вакуумной камеры.



QF – фокусирующий квадруполь, **QD** – дефокусирующий. Схема верна только в одной плоскости: горизонтальной или вертикальной.

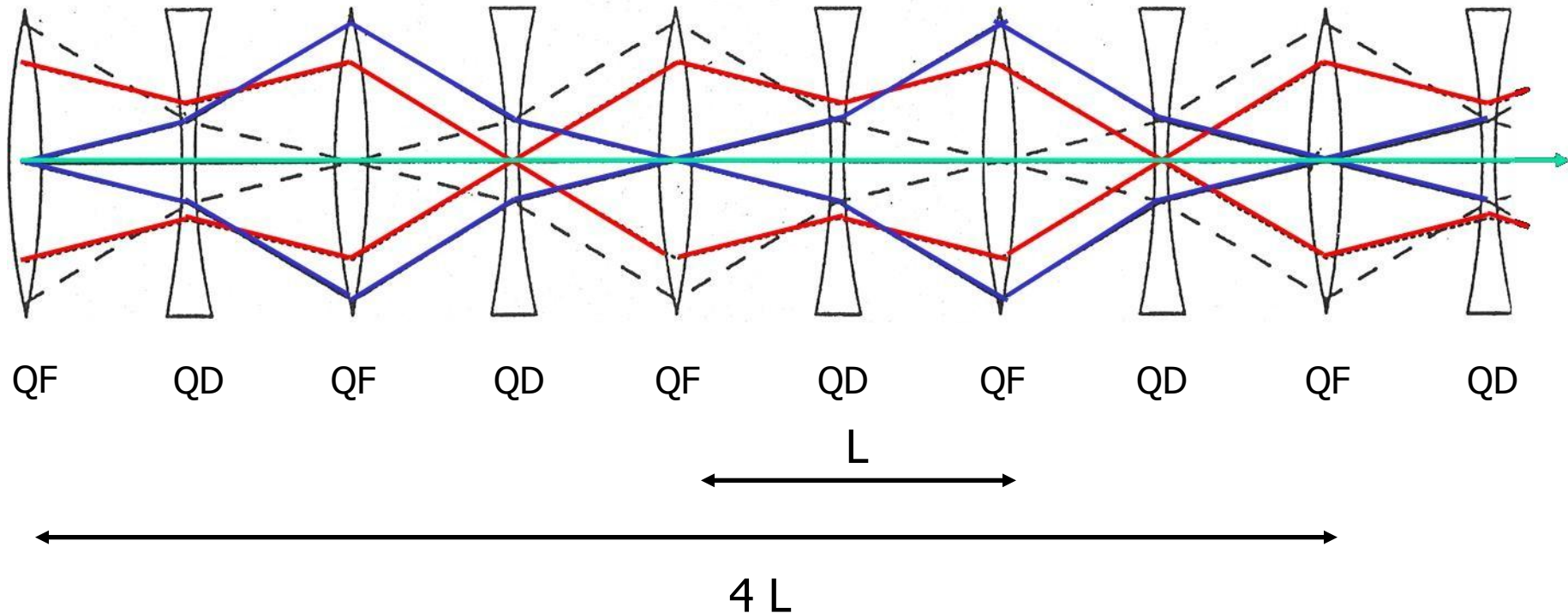
Почему в итоге фокусировка?



Точное доказательство также достаточно простое!

Концепция ячейки FODO

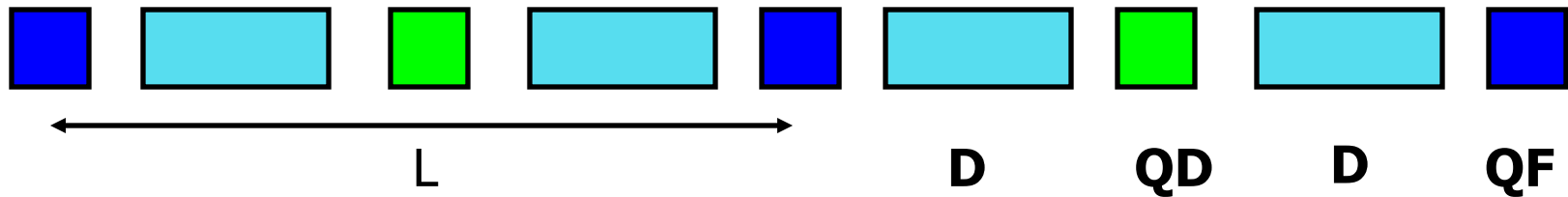
F - фокусировка, O - дрейф, D - расфокусировка, O - дрейф



Период полного колебания: 4 ячейки $\Rightarrow \mu = 90^\circ / \text{ячейку}$

Циклические ускорители

Циклический ускоритель представляет собой периодическую структуру, состоящую из ячеек, кроме прямых участков. Ячейка: фокусирующий квадруполь **QF**, дипольный магнит **D**, расфокусирующий квадруполь **QD**, дипольный магнит **D**.

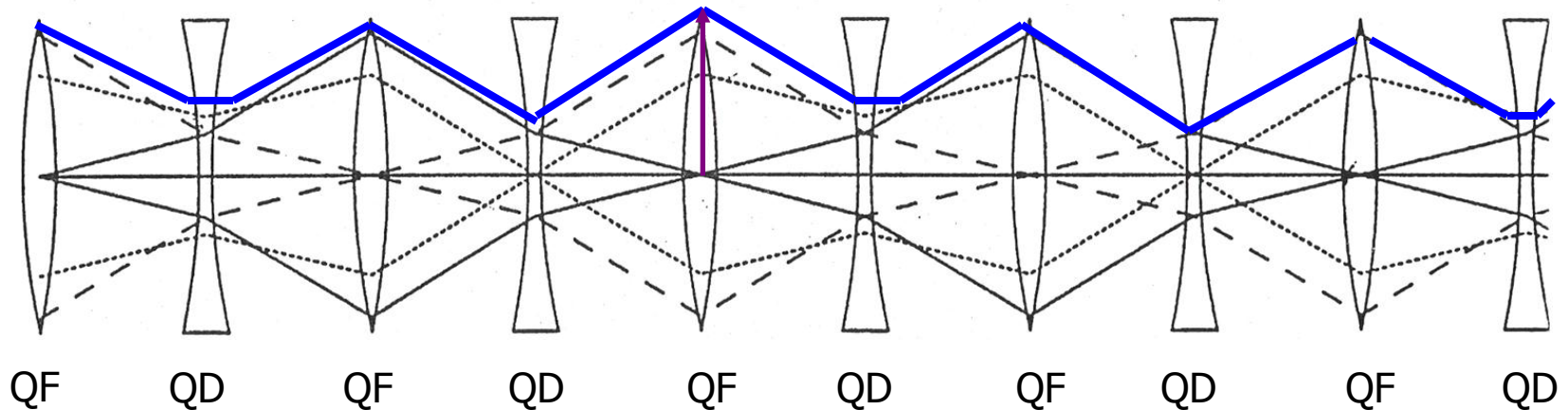


Изменяя поле в квадруполях, можно варьировать набег фазы на ячейку μ . Идеальная частица будет следовать по траектории, которая замкнётся на себя же после полного оборота в кольце.

Реальные частицы будут выполнять колебания вокруг замкнутой орбиты. Количество колебаний для полного оборота в кольце называется настроечным **Q** установки (**Q_x** и **Q_y**).

Бета-функция $\beta(s)$

Бета-функция - это огибающая всех траекторий частиц, циркулирующих в ускорителе.



Минимум **β -функции** находится в **QD**, а максимум в **QF**, что обеспечивает итоговый эффект фокусировки. Вследствие повторения ячеек эта функция является периодической.

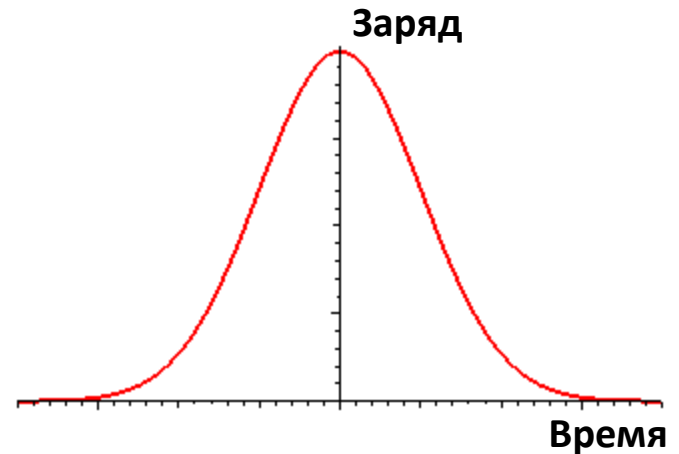
Осцилляции частиц называются бетатронными колебаниями.

Зачем нужна эта функция?

β -функция – фундаментальный параметр, потому что она напрямую связана с размером пучка. Пучек имеет форму близкую к гауссовой.

$$\sigma_{x,y}(s) = (\varepsilon \beta_{x,y}(s))^{1/2}$$

ε - эмиттанс, размер фазового пространства пучка, т.е. критерий отклонения частиц от идеальных



При столкновении пучков в БАК $\sigma = 17 \mu\text{м}$, $\beta = 0.55 \text{ м}$

Синхротронное излучение

Заряженные частицы, движущиеся с релятивистскими скоростями по искривленным магнитным полем траекториям, испускают синхротронное излучение.

$$\Delta E \sim \gamma^4 / r$$

$\gamma = E/E_0 = m/m_0$, m_0 – масса покоя

Протон: $m_0 = 0.938 \text{ ГэВ}/c^2$

Электрон: $m_0 = 0.511 \text{ МэВ}/c^2$

$(m_{o-p}/m_{o-e})^4 = (1836)^4 \cong 10^{13}$

Коллайдер	B [Т]	E/пучок [ГэВ]	γ	ΔE [ГэВ]
БЭП ($e^+ e^-$)	0.12	100	196000	2.92
БАК (p-p)	8.3	7000	7500	0.00001

Вывод: коллайдеры на высоких энергиях для лептонов должны быть линейными. Для адронов же синхротронное излучение сравнительно невелико.

Светимость коллайдера

Светимость – интенсивность столкновения частиц встречных пучков

$$dN/dt = L \sigma \quad [\text{см}^{-2}\text{с}^{-1}][\text{см}^2]$$

$$L = N_1 N_2 f k / (4 \pi \sigma_x \sigma_y) \quad [\text{см}^{-2}\text{с}^{-1}]$$

$N(t)$ – количество столкновений

σ – вероятность столкновения

$N_{1,2}$ – количество частиц в сгустке ($1.15 \cdot 10^{11}$)

f – частота обращения (11.245 кГц)

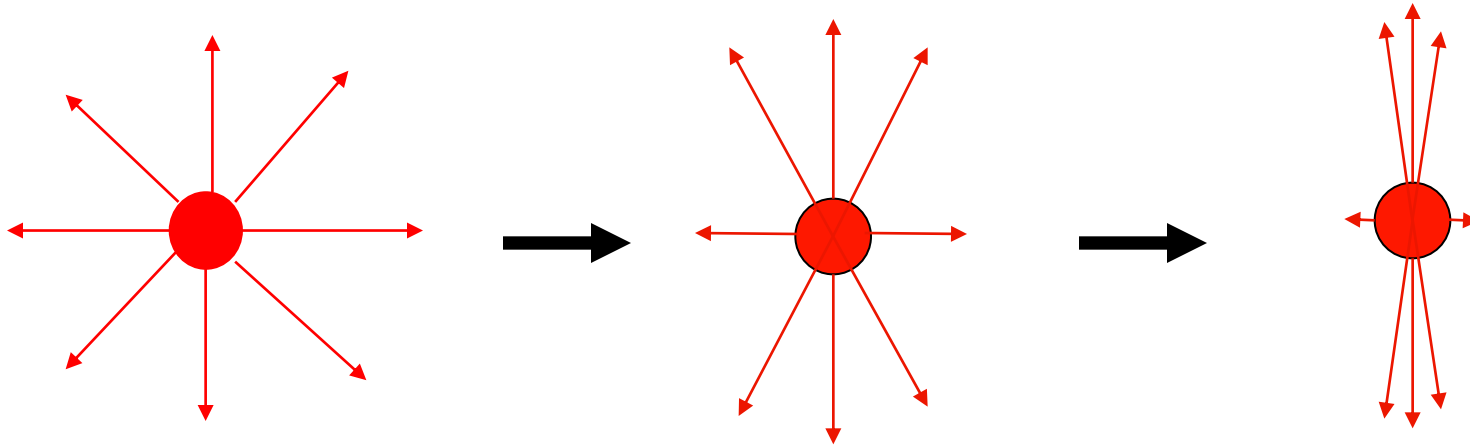
k – количество сгустков в кольце (2808)

$\sigma_{x,y}$ – размеры сгустка (17 $\mu\text{м}$)

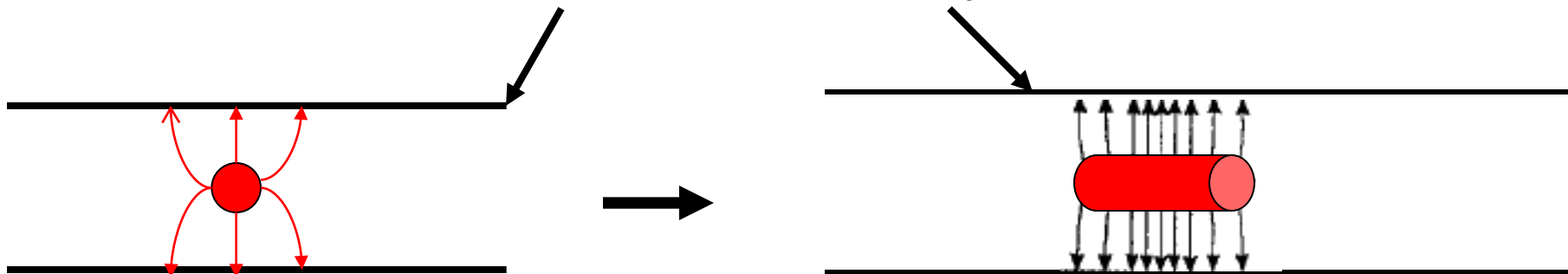
$$\sigma \leq 10^{-39} \text{ см}^2$$

$$L = 10^{34} \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$$

Поле релятивистского пучка



Идеальный проводник: $E_s = 0$



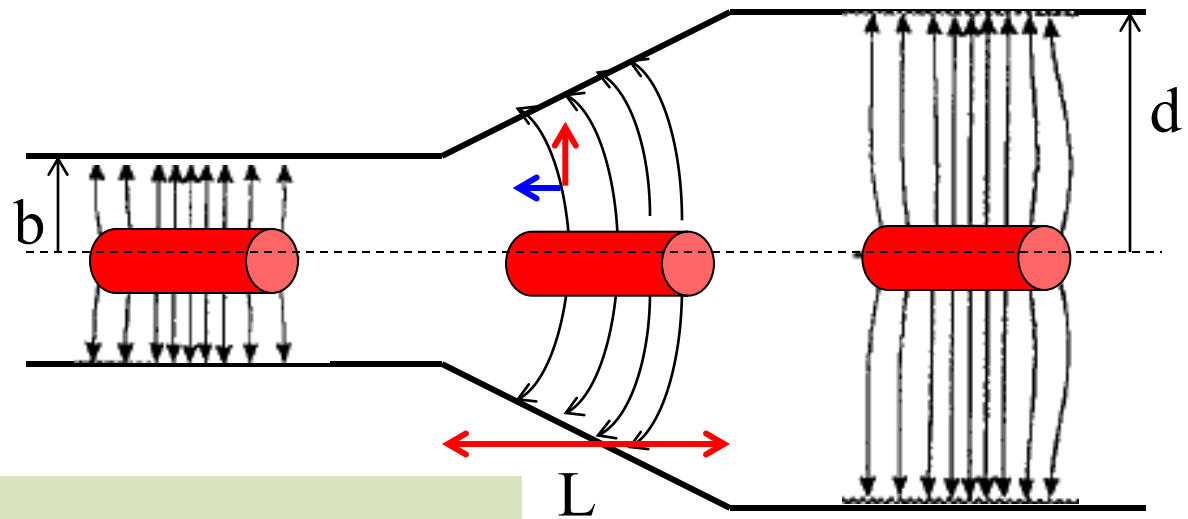
M. Ferrario – CAS Baden 2005

Шунтовой импеданс

Если проводник неидеальный или меняются геометрические параметры, то возникает взаимодействие между пучком и стенками

$$f_{\text{ВЧ}} \sim 1/\sigma$$

$$Z(f) = U(f)/I$$



σ – размер пучка

Z – импеданс (комплексное сопротивление)

U – напряжение на траектории пучка

I – ток пучка

M. Ferrario – CAS Baden 2005

Поля, наведённые пучком

Электромагнитные поля, индуцированные пролётом сгустка в компонентах ускорителя, могут влиять на сам сгусток или на последующие сгустки, вносить нестабильности и нагревать стенки.

A. Candel, SLAC



Экран для пучка в БАК

Без этого дополнительного слоя меди номинальное количество протонов в сгустке, предусмотримое для БАК, не могло бы циркулировать в установке!



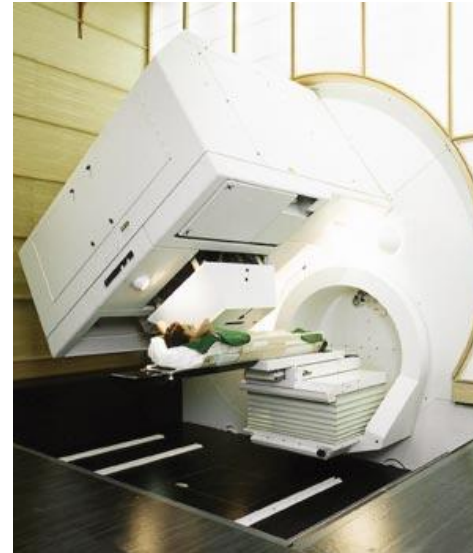
Применение ускорителей

Томограф



Женевская университетская больница

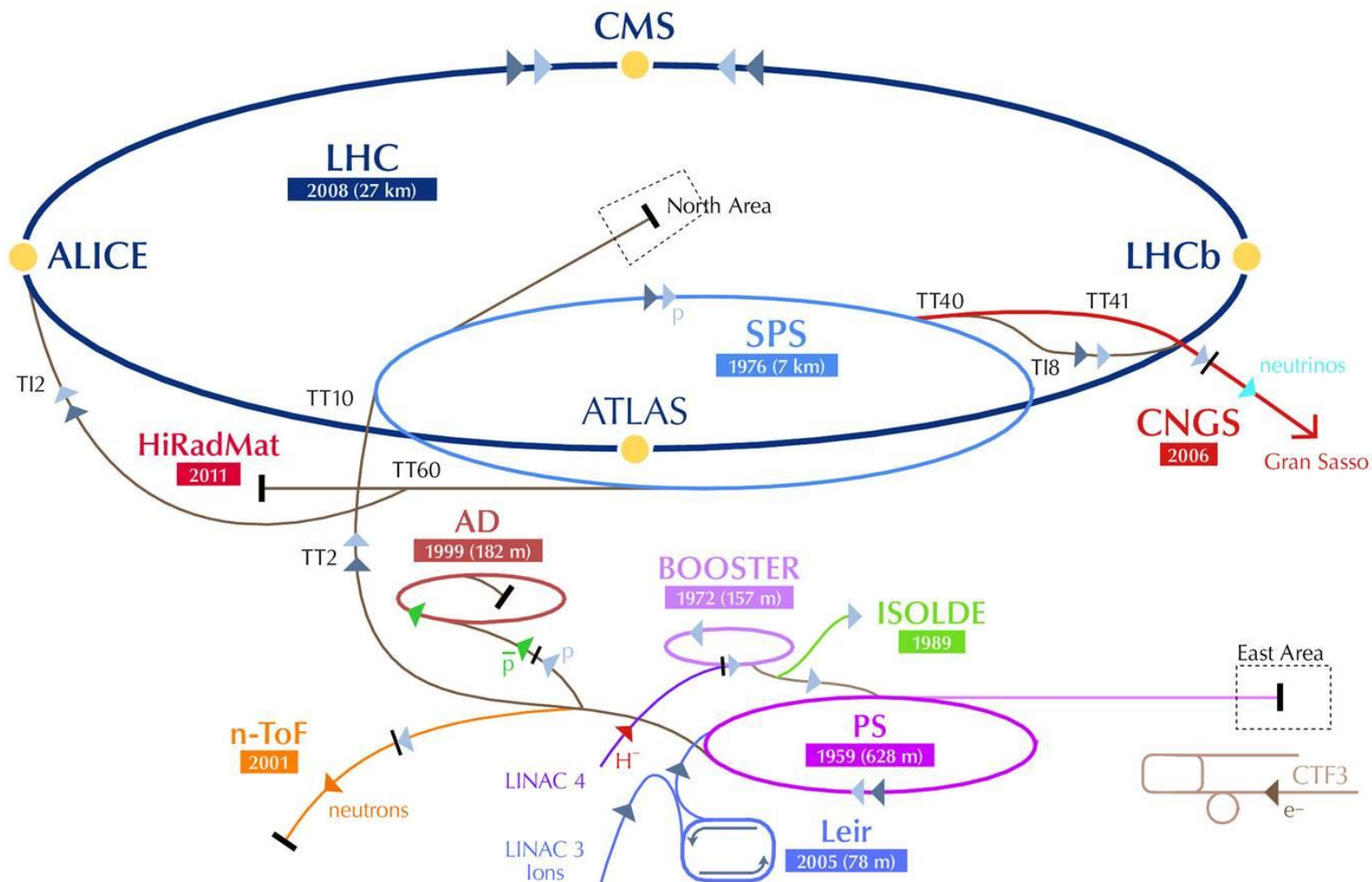
Терапия легкими ионами



Институт Поля Шеррера, Швейцария

- телевизор
- полимеризация пластмассы
- бактериальная стерилизация без нагрева...

Ускорительный комплекс ЦЕРНа



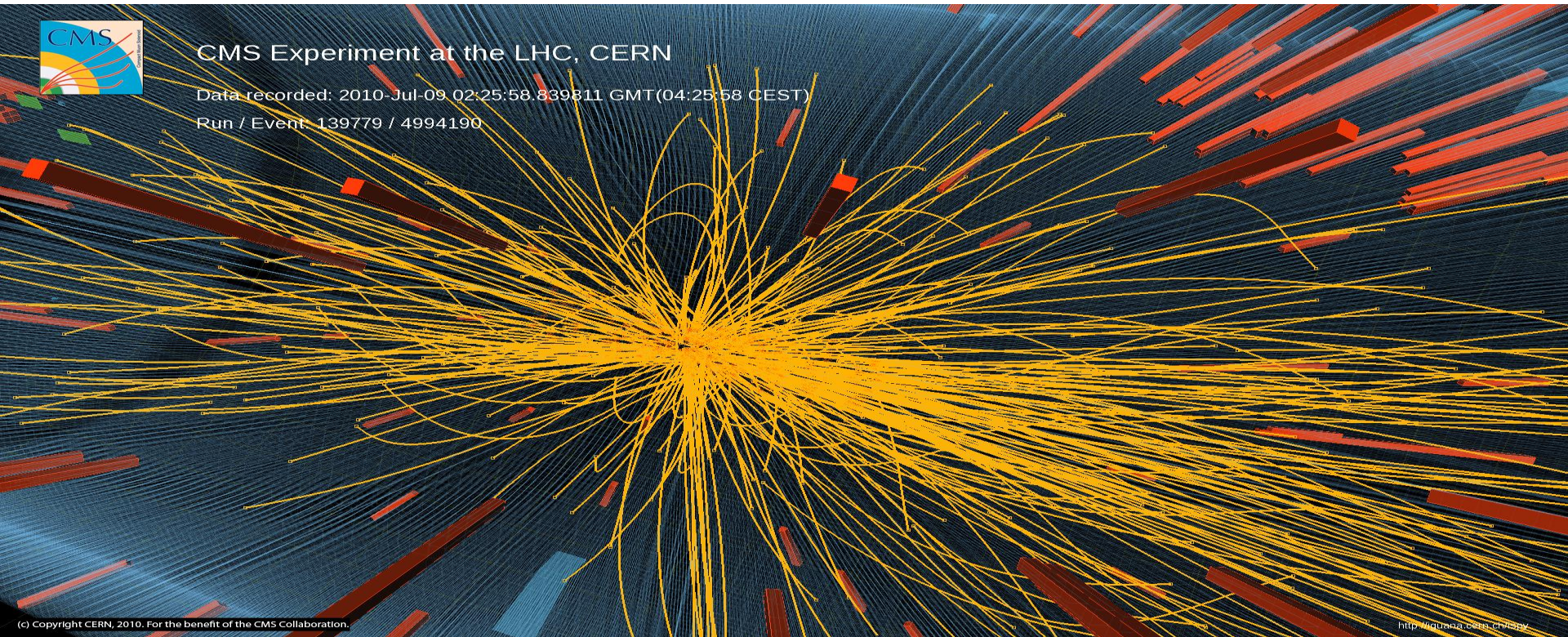
Спасибо за внимание!



CMS Experiment at the LHC, CERN

Data recorded: 2010-Jul-09 02:25:58.839811 GMT(04:25:58 CEST)

Run / Event: 139779 / 4994190



(c) Copyright CERN, 2010. For the benefit of the CMS Collaboration.

<http://cms.cern.ch/box>

Thanks also to Daniel Brandt for the pictures and content taken from his excellent “Introduction to Accelerators” presentation