

Введение в ускорители

Павел Белошицкий
ЦЕРН

Содержание

- Ускорители – что это такое, где применяются, чем отличаются друг от друга
- Немного из истории ускорителей
- Основные системы ускорителей
- Синхротроны и коллайдеры
- Ускорительный комплекс ЦЕРНа

Ускоритель – установка для получения пучков заряженных частиц

Ускорители применяются:

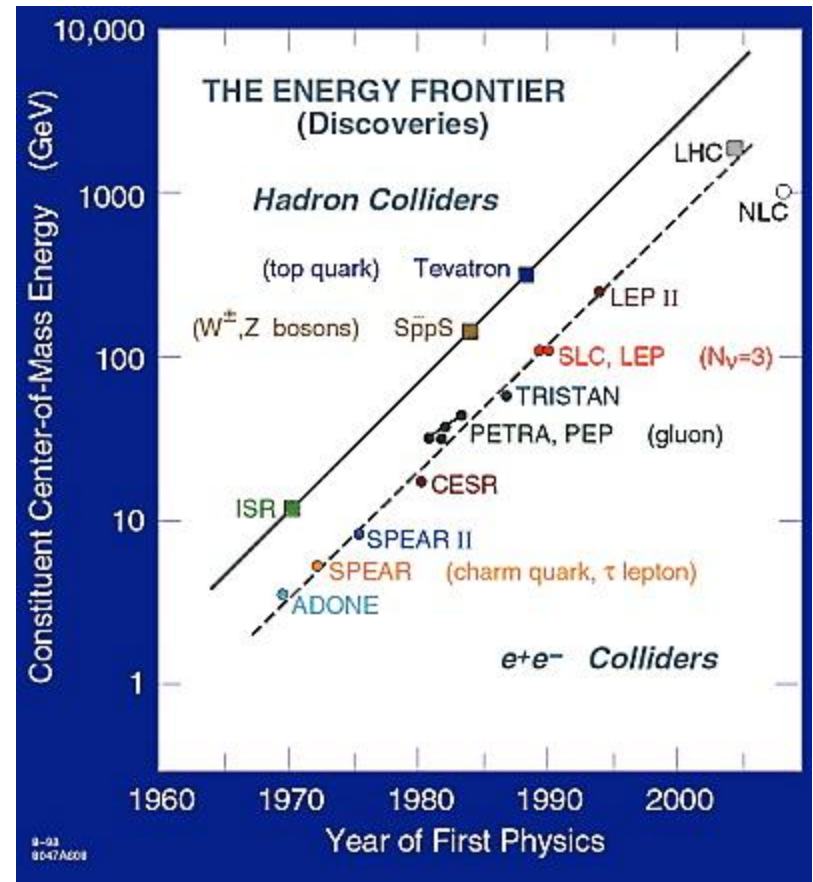
- В научных исследованиях (элементарные частицы, ядерная физика, физика твердого тела, получение не встречающихся в природе нуклидов)
- В прикладных исследованиях (источники синхротронного излучения)
- В медицине (радиационная диагностика и терапия, стерилизация аппаратуры), биологии
- В промышленности (имплантация ионов, дефектоскопия, электронно-лучевая сварка, стерилизация пищевых продуктов, искусственная полимеризация лаков радиационная обработка материалов, изготовление элементов микроэлектроники, модификация свойств материалов, например резины)

Ускорители различаются:

- По назначению
- По составу поставляемых частиц: легкие (электроны, позитроны), промежуточные (мезоны) и тяжелые частицы (протоны), ионы самых разнообразных масс и зарядностей, античастицы (антипротоны)
- По энергии частиц, от самых низких до нескольких ТэВ (10^{12} эВ, $1 \text{ эВ} = 1.6 \cdot 10^{-19}$ Дж)
- По геометрии (кольцевые и линейные)
- По интенсивности пучков

История ускорителей

- Развитие ускорителей - не самоцель, а потребности ядерной физики и физики высоких энергий
- Внимание – экспоненциальный (в зависимости от времени) рост энергии ускоренных частиц

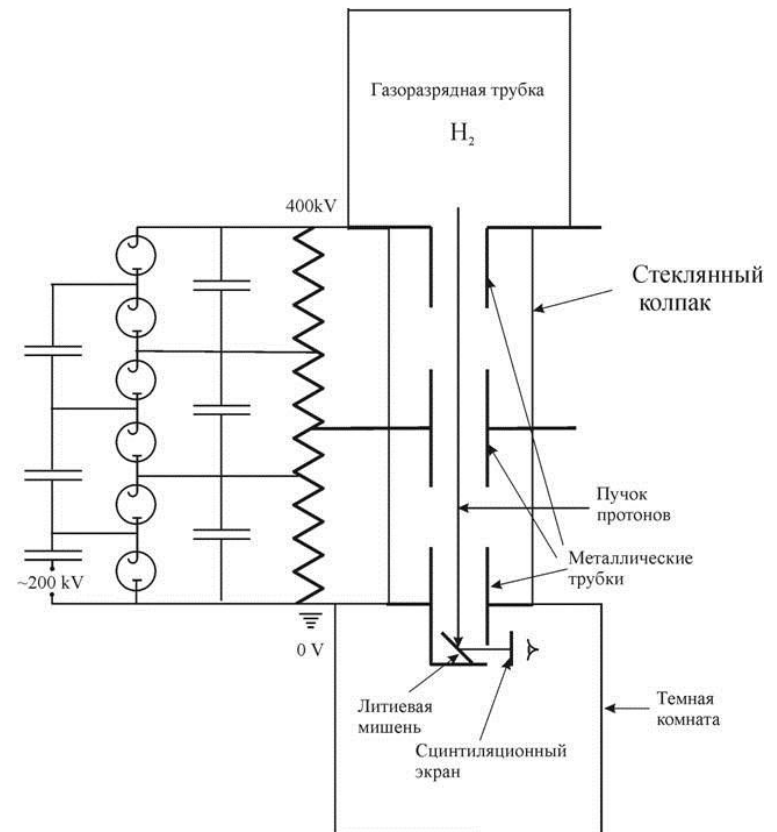


Происхождение ускорителей

- Первая задача – изучение строения атомного ядра
- 1932г., Кокрофт и Уолтон (Англия, Кэвендишская лаборатория) - бомбардировка ядер лития протонами
- первое в мире успешное искусственное превращение химических элементов (литий в гелий)
- впервые была проверена формула Эйнштейна об эквивалентности массы и энергии (кинетическая энергия образовавшихся ядер была больше кинетической энергии исходных ядер)
- Нобелевская премия по физике за 1951г.

Ускоритель Кокрофта-Уолтона

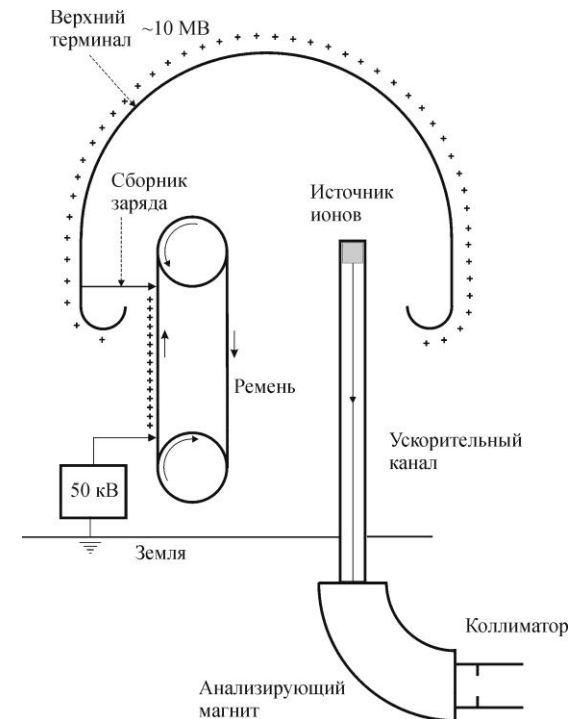
- Лестничный умножитель напряжения, преобразует переменное напряжение в постоянное
- В отличие от трансформатора, не нужен железный сердечник и большие изоляторы
- Дешев, прост для изоляции
- Максимальное напряжение ~ 1 МВ ограничено пробоем в воздухе
- Используется в источниках высокого напряжения, в системах рентгеновского излучения, подсветке ЖК экранов, ионных насосах, ионизаторах воздуха, ускорителях частиц, копировальных аппаратах, осциллографах, телевизорах



Электростатический генератор Ван дер Граафа

Принцип работы:

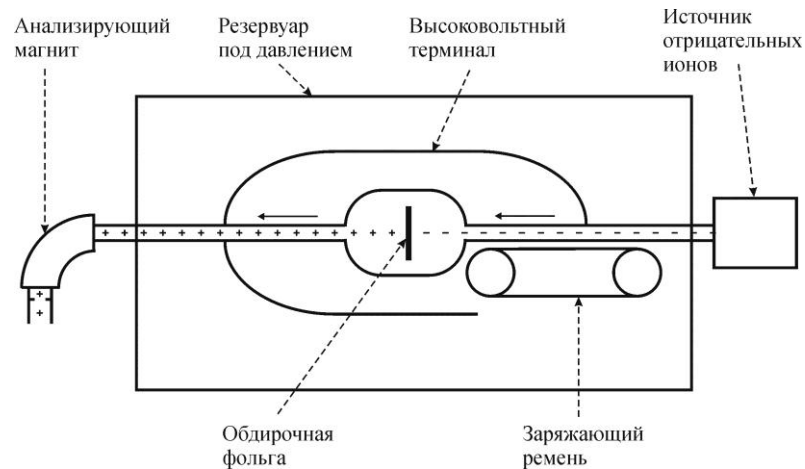
- Воздух ионизируется под высоким (50 кВ) напряжением
- Коронный разряд, ионы заряжают резиновый ремень, вращение блоков задается мотором
- Заряд переносится ремнем вверх до сборника
- Сфера заряжается до высокого потенциала, ограничения связаны с коронным разрядом, зависят от формы поверхности, ее чистоты и т.д.
- Во избежание пробоя внутри сферу заполняют инертным газом (10 Атм, азот, фреон)
- Ионы (протоны) получают в источнике под высоким напряжением (равным потенциалу сферы) и ускоряются в канале
- Нужная зарядность отсортировывается при помощи анализирующего магнита и коллиматора
- Максимальная энергия порядка 10 МэВ



Ускоритель тандем

Принцип работы:

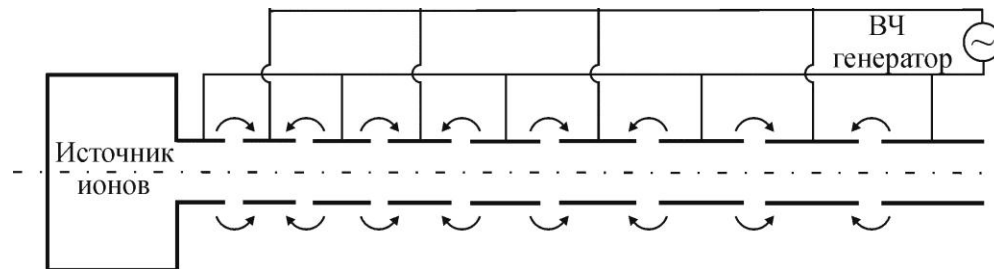
- дважды используется ускоряющее напряжение
- пучок отрицательных ионов вводится из источника под нулевым напряжением и ускоряется до напряжения терминала
- производится его обдирка при прохождении через фольгу до положительной зарядности
- повторное ускорение за счет прохождения разности потенциалов при движении пучка от терминала к магнитному анализатору



Высокочастотный линейный ускоритель (Видероз)

Принцип действия:

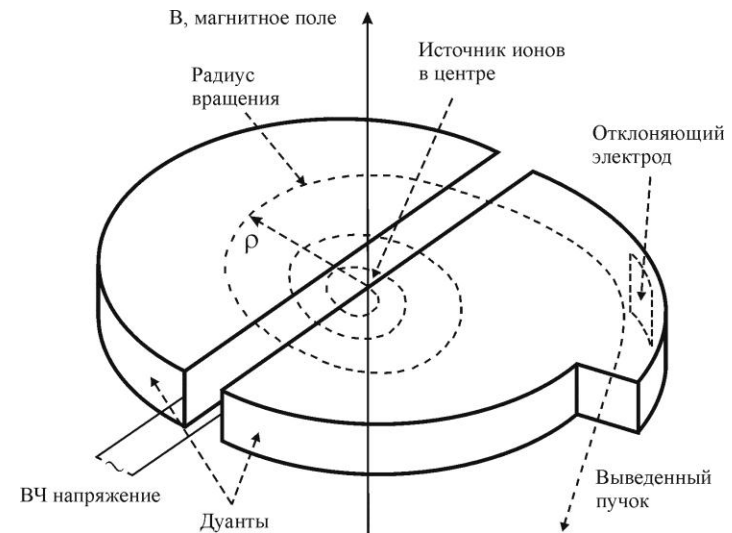
- пучок из ионного источника вводится в последовательность дрейфовых трубок, выполненных из проводящего материала
- высокочастотное напряжение прикладывается ко всем трубкам от генератора
- поля внутри трубок нет, но есть в зазорах
- за время пролета частицы в трубке фаза ускоряющего поля изменяется на 180 градусов
- для поддержания синхронизма между частицей и нужной фазой ускоряющего поля длина трубок нарастает (резонансная структура)
- когда скорость частицы (и, соответственно, длина дрейфовой трубки) нарастает значительно по сравнению с первоначальной, происходит смена частоты на более высокую
- при высоких частотах становятся заметными потери энергии в структуре и зазоры «закрываются», делая их резонаторами



Циклотрон (предложен Лоуренсом в 1932г. В США, Нобелевская премия 1939 г.)

Принцип работы:

- Для нерелятивистских частиц ($v \ll c$) частота обращения в постоянном магнитном поле (дуанты) не зависит от скорости $\omega = eV/mc$
- ВЧ напряжение прикладывается к зазору между дуантами
- С ростом энергии частицы увеличивается ее радиус обращения
- Ограничение – при релятивистских скоростях теряется синхронизм с ВЧ системой $\omega = eV/m\gamma c$ ($\gamma = 1/(1-v^2/c^2)^{1/2}$)
- Максимальная энергия 20-25 МэВ
- Применение: радиационная терапия, получение изотопов



Бетатрон

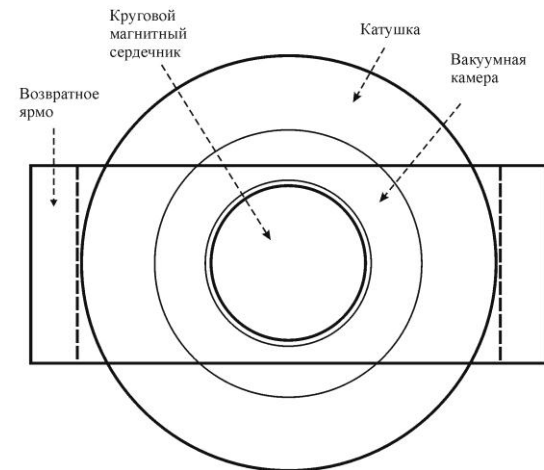
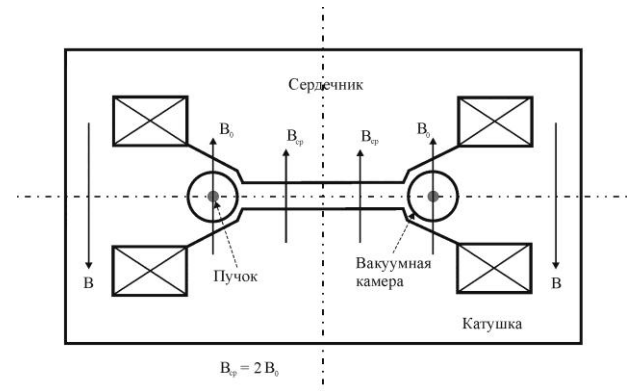
Теоретическая основа заложена Видероз,
впервые построен Керстом в США в 1940 г.

Основные элементы:

- Обмотки переменного тока, генерирующего переменное магнитное поле
- Железный сердечник для формирования потока магнитного поля через охватываемую пучком область
- Условие постоянства орбиты

$$d\bar{V}/dt = 2dB_o / dt$$

- Слабая радиальная вариация магнитного поля (достигается профилированием магнитного полюса) для поперечной устойчивости
- Не зависит от скорости частиц
- Недостаток - небольшое ускоряющее поле
- Максимальная энергия 300 МэВ

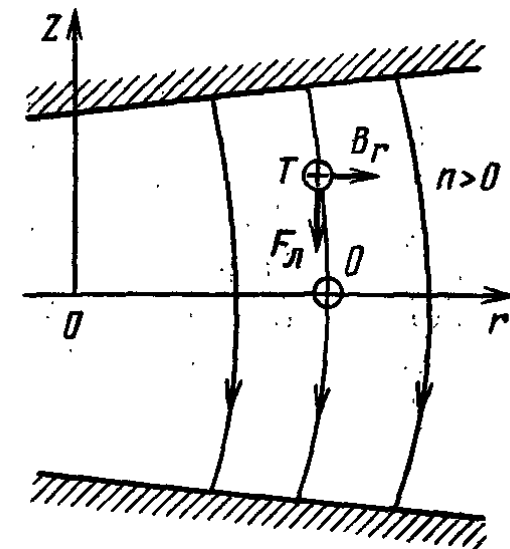


Поперечная (слабая) фокусировка в радиально спадающем магнитном поле

- При увеличении зазора между полюсами магнитное поле искривляется, его радиальная компонента фокусирует пучок по вертикали
- Для частицы с радиусом больше равновесного (определяется из равенства силы Лоренца и центробежной силы) магнитное поле в медианной плоскости падает с ростом радиуса медленнее, чем центробежная сила и частица возвращается к центру. Для частицы с радиусом меньше равновесного магнитное поле падает с ростом радиуса быстрее, чем центробежная сила и частица тоже возвращается к центру.

$$0 < -\frac{r_0}{B\rho} \frac{\partial B_y}{\partial x} < 1,$$

$$B\rho = pc/e.$$



Ускоряющее поле

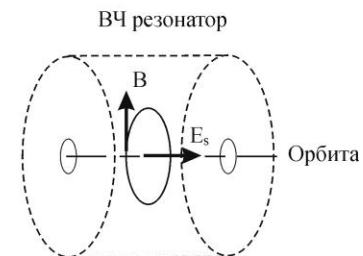
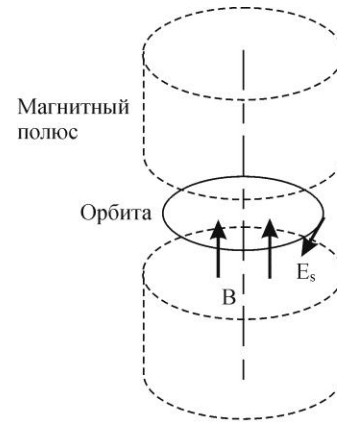
Две топологии ускоряющего поля:

- По типу бетатрона

$$\oint E_s ds = \int_{\text{полюс}} \frac{\partial B}{\partial t} dS$$

- По типу резонатора

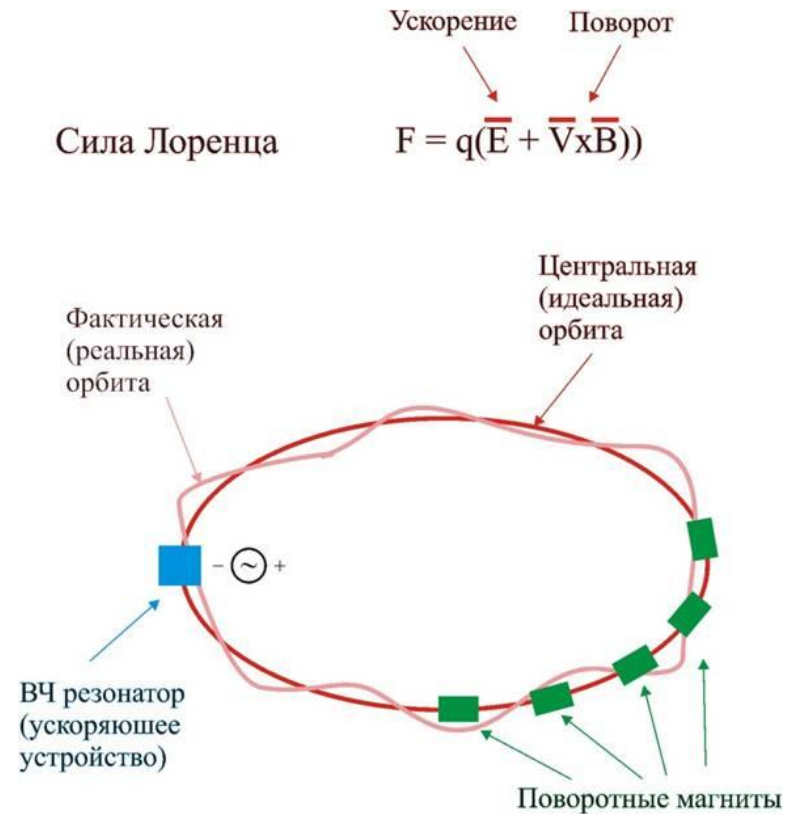
$$\int_{-\infty}^{\infty} E_s ds = \int_{\text{резонатор}} \frac{\partial B}{\partial t} dS$$



Синхротрон

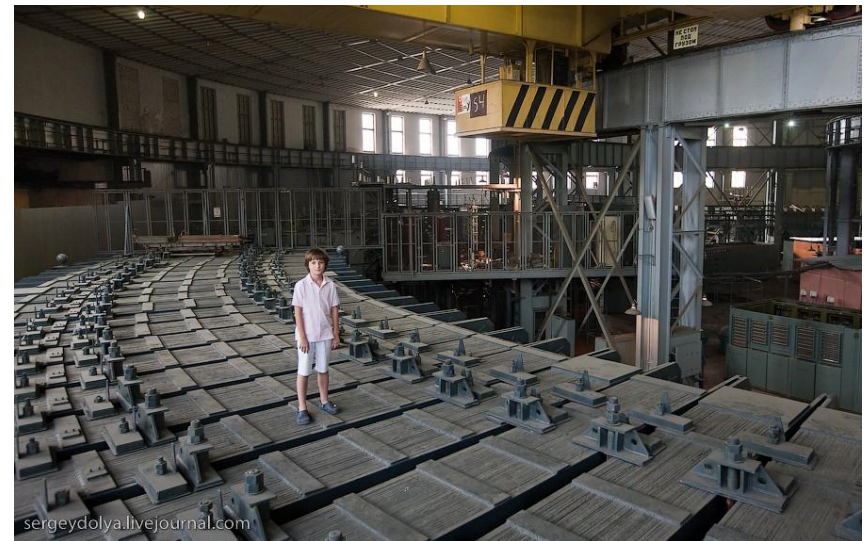
Принцип действия:

- ведущее поле с радиальной фокусировкой (как у бетатрона) растет по мере роста энергии частицы
- условие 2:1 не нужно, вместо этого частота ВЧ подстраивается под частоту обращения
- Принцип автофазировки (Векслер (СССР, 1944) и Макмиллан (США, 1945))



Продольная и поперечная (слабая) фокусировка пучка

- Принцип автофазировки (Векслер (СССР, 1944) и Макмиллан (США, 1945)).
- Ограничение радиальной (слабой) фокусировки – очень большие поперечные размеры пучка -> очень громоздкие магниты (синхрофазотрон в Дубне на 10 ГэВ, 1956г., вес магнита 6000 тонн)



Критическая энергия

С ростом энергии (импульса) частота обращения частицы по орбите в синхротронах сначала растет, а затем, по достижении некоторой энергии, падает

$$f = \frac{v}{L}, \Delta f = \frac{\Delta v}{L} - \frac{v\Delta L}{L^2}, \frac{\Delta f}{f} = \frac{\Delta v}{v} - \frac{\Delta L}{L}, \frac{\Delta v}{v} = \frac{1}{\gamma^2} \frac{\Delta p}{p}, \eta \frac{\Delta p}{p}, \frac{\Delta L}{L} = \alpha \frac{\Delta p}{p},$$
$$\frac{\Delta f}{f} = \frac{1}{\gamma^2} \frac{\Delta p}{p} - \alpha \frac{\Delta p}{p} = \left(\frac{1}{\gamma^2} - \alpha \right) \frac{\Delta p}{p} = \eta \frac{\Delta p}{p}.$$

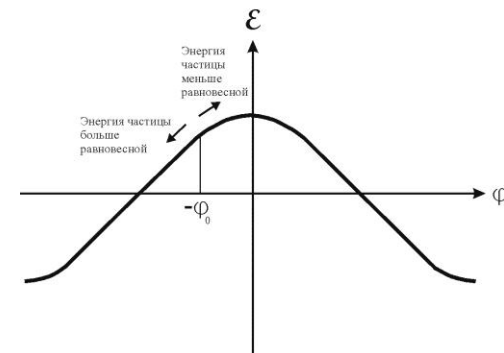
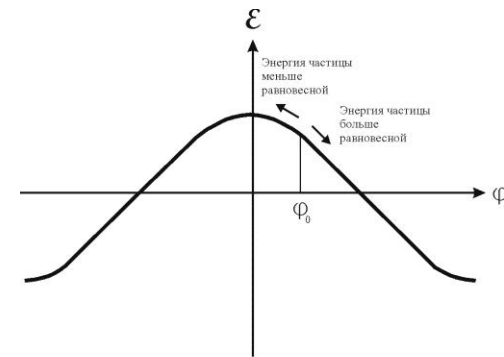
Эта энергия называется **критической**

$$E_{кр} = mc^2 \gamma_{кр} = mc^2 / \sqrt{\alpha}.$$

Коэффициент α называется коэффициентом расширения орбит. Зависимость частоты обращения от импульса определяется двумя факторами: ростом скорости частицы и ростом длины орбиты

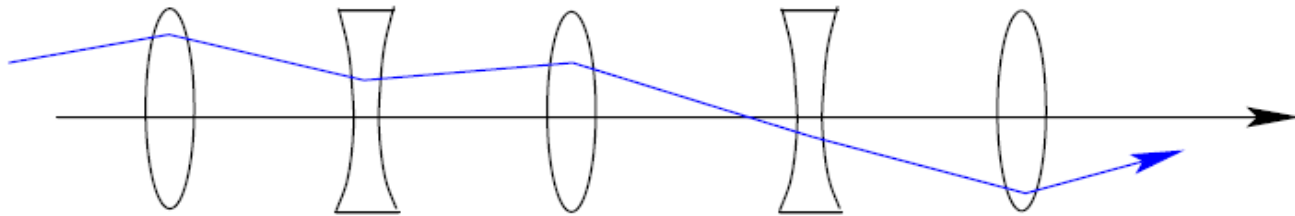
Критическая энергия и принцип автофазировки

- Энергия пучка $E < E_{кр}$, частица с энергией меньше синхронной имеет меньшую частоту обращения, отстает по фазе ВЧ напряжения, попадает в более сильное поле, получает больший прирост энергии
- Энергия пучка $E > E_{кр}$, частица с энергией больше синхронной имеет большую частоту обращения, опережает по фазе ВЧ напряжение, попадает в менее сильное поле, получает меньший прирост энергии



Как работает сильная поперечная фокусировка

- Изобретение принципа сильной фокусировки, Кристофилос (1950, неопубликовано) и независимо Курант, Ливингстон и Снайдерс (США, 1952)
- Каждый из квадруполей фокусирует в одной плоскости и дефокусирует в другой - **фокусировка не одновременная в двух поперечных направлениях, а попеременная**
- Пара, составленная из таких квадруполей, **при определенном выборе их параметров будет фокусировать в обеих плоскостях** (Курант, Ливингстон, Снайдерс, 1952г.)
- Аналог: две линзы в геометрической оптике, фокусирующая и дефокусирующая, при правильном выборе расстояния между ними будут работать как фокусирующая система



Общие требования к пучкам заряженных частиц

- Энергия пучка должна быть известна с высокой точностью
- «Посторонние» частицы должны быть исключены
- Во многих случаях возможно организовать одновременное использование пучка различными группами исследователей
- В некоторых случаях условия эксперимента требуют вывода пучка постоянного тока малой интенсивности (ограничение импульсной загрузки регистрирующей аппаратуры с большим мертвым временем)

Основные системы ускорителя

- Магнитная (обеспечивает движение частиц около заданной траектории и их фокусировку)
- ВЧ (высокочастотная, ускоряет частицы до требуемой энергии и осуществляет продольную фокусировку)
- Система ввода и вывода пучка
- Система питания (обеспечивает питание электромагнитных элементов ускорителя)
- Вакуумная (для поддержания необходимого времени жизни пучка)
- Управления (обеспечивает программируемое во времени изменение параметров других систем, необходимое для получения пучков ускоряемых частиц с заданными параметрами)
- Диагностики (совокупность измерительных устройств, позволяющих контролировать параметры пучка)
- Криогенная (в случае наличия сверхпроводящих магнитов или ВЧ резонаторов)
- Система коллимации пучка
- Система радиационной безопасности

Магнитная система: поворотные магниты

Функция – повернуть пучок в кольцевом ускорителе на 360 градусов

Сила Лоренца, она же – центростремительная сила

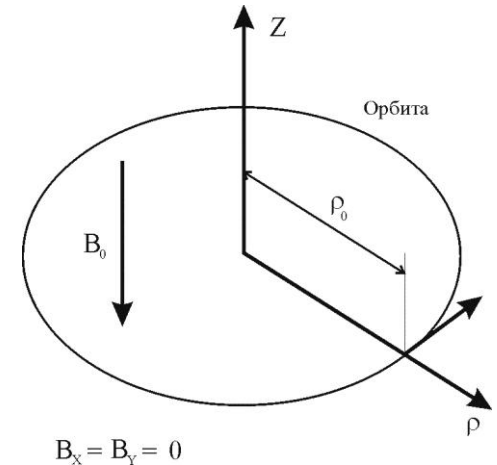
$$F = evB_0 .$$

Условие движения частицы

по замкнутой орбите

$$F = \frac{dp}{dt} = m\gamma \frac{dv}{dt} = m\gamma \frac{v^2}{\rho_0}$$

$$\frac{p}{e} = B_0 \rho_0, \quad p[\text{GeV} / c] = 0.2998 \cdot B_0[\text{T}] \cdot \rho_0[\text{m}].$$



Магнитная система: поворотные магниты

- Пример 1: магнит для ЛНС $B_0 = 8.3$ Т, $p = 7$ ТэВ/с, радиус поворота $\rho = 2804$ м.
- Пример 2: при длине магнита 14.3 м и таком большом радиусе поворота угол поворота $\varphi = l / \rho = 5.1 \cdot 10^{-3}$ рад
- для полного поворота ($\varphi = 2\pi$) нужно очень большое число магнитов (1232) !

Важные следствия:

- Для достижения больших энергий (импульсов) необходимо повышать магнитное поле, по возможности сохраняя небольшим радиус траектории (иначе ускоритель будет очень большой)
- Если задача достижения высоких энергий является первостепенной, приходится строить ускорители очень большого размера
- Стоимость ускорителя растет примерно пропорционально радиусу
- Максимально достижимое поле в нормальных магнитах составляет около 2 Т (насыщение сердечника)
- Достижение высоких магнитных полей является очень актуальным, делая необходимым переход к сверхпроводящим магнитам

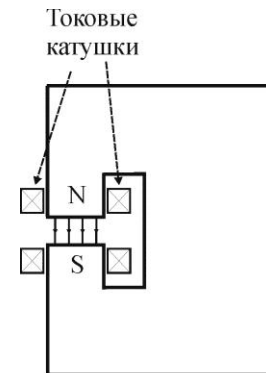
Магнитная система: типы нормальных (теплых) поворотных магнитов

Достоинства магнитов:

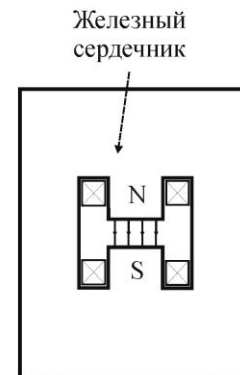
- С-магнит - легкий доступ в вакуумную камеру (не нужно разбирать магнит)
- Н-магнит - экономичность (простота в изготовлении), легче сформировать однородное поле

Некоторые особенности:

- Большой сердечник нужен для высокой ($\Delta B/B = 10^{-5}$) однородности поля
- Сердечник должен быть ламинированным (изготовленным из тонких пластин с изоляционным слоем между ними) для подавления токов Фуко



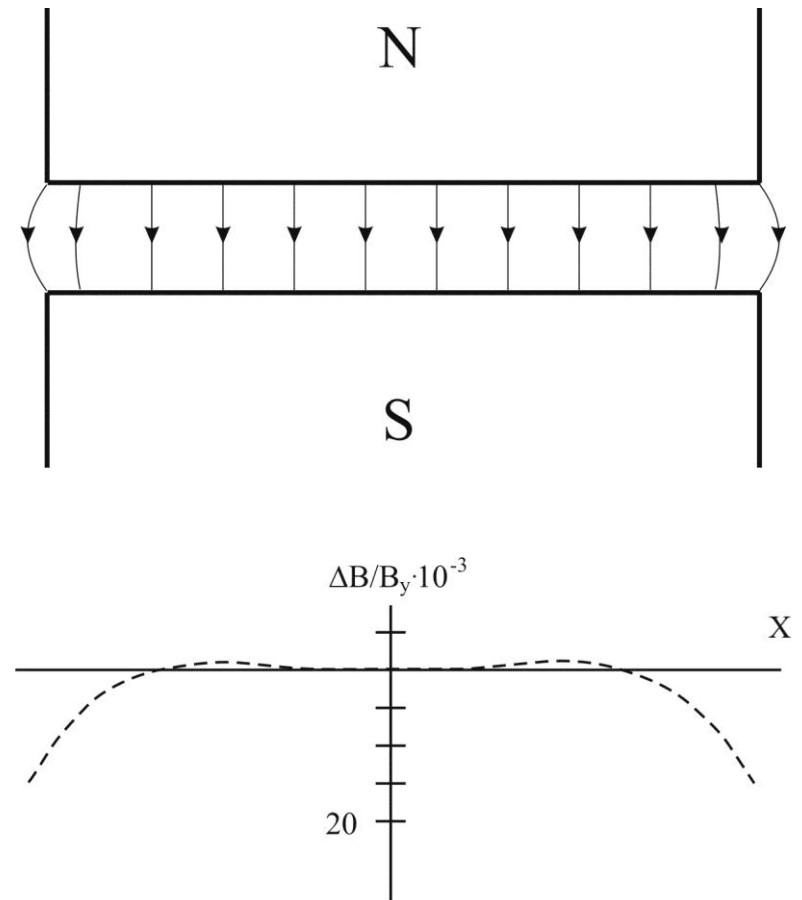
С-магнит



Н-магнит

Магнитная система: что еще важно в поворотных магнитах

- Точность установки (ошибки перекоса \Rightarrow поворот в вертикальной плоскости)
- Стабильные источники питания (10^{-4} - 10^{-5})
- Достаточная область «хорошего» для пучка магнитного поля (можно увеличить с помощью шиммирования)



Магнитная система: сверхпроводящие магниты



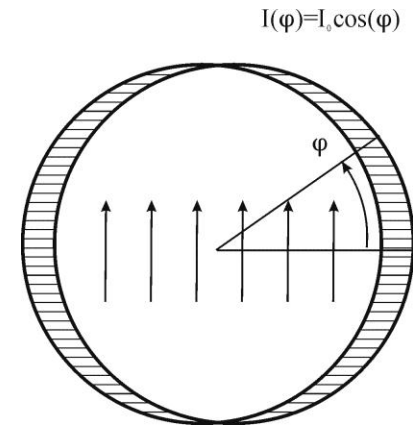
- Выше магнитное поле (до 10 раз) => меньше размер ускорителя или (при заданном размере) выше энергия
- Потребляют меньше энергии
- Более стабильное магнитное поле
- Но: криогенная система, сложность в эксплуатации
- Меньшая однородность поля, сильнее мультипольные компоненты, большее влияние нелинейностей на динамику частиц

Магнитная система: особенности магнитов ЛНС

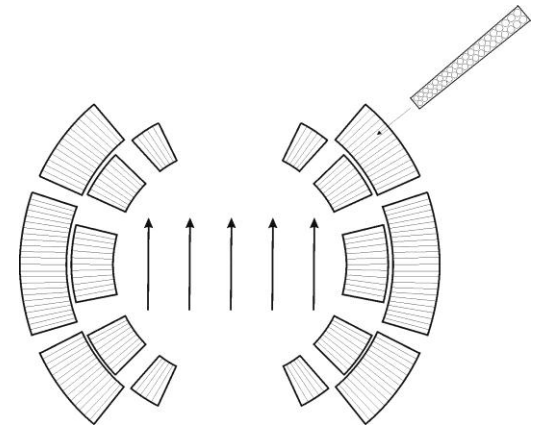
- Два пучка в соседних вакуумных камерах внутри одного магнита
- 14.3 м длиной, 35 тонн весом
- \$ 500,000 каждый, всего нужно 1232 магнита
- Наиболее трудоемки в изготовлении сверхпроводящие катушки
- Катушки закреплены в «воротничках» из немагнитивающейся стали
- Силовая нагрузка на «воротнички» (компенсация электромагнитного взаимодействия токовых катушек) составляет 400 тонн на метр!

Магнитная система: сверхпроводящие магниты

Профиль плотности тока в идеальном случае — непрактично в изготовлении

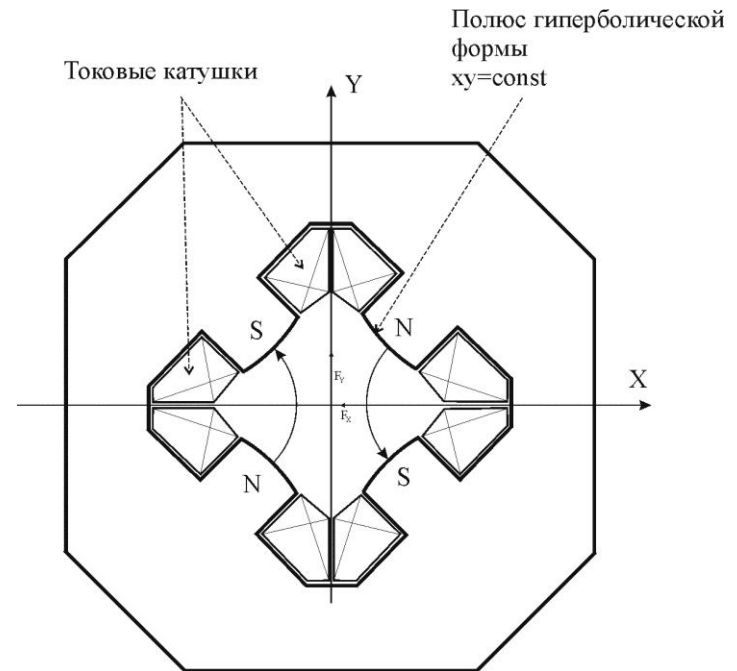


Профиль плотности тока в реальном магните



Магнитная система: квадрупольные линзы

Назначение – поперечная фокусировка пучка



Магнитная система: квадрупольные линзы

Зачем нужна фокусировка:

- если бы все частицы двигались по центральной орбите, то квадрупольные линзы были бы не нужны.
- В реальности траектории частиц не совпадают с идеальной орбитой

Почему:

- Пучки, получаемые в источниках и вводимые в ускоритель, имеют конечный размер, определяемый способом их формирования
- Идеальную орбиту сформировать невозможно из-за различных погрешностей, связанных с изготовлением и установкой поворотных магнитов, установкой квадрупольных линз
- Даже в гипотетическом случае совершенных магнитов силы кулоновского расталкивания между частицами пучка привели бы к росту поперечного размера пучка

Магнитная система: движение частиц в квадрупольной линзе

Магнитное поле квадрупольно растёт линейно в зависимости от расстояния до его оси

$$B_x = -\frac{\partial V_x}{\partial x} = -gy, \quad B_y = -\frac{\partial V_y}{\partial y} = -gx.$$

Оно описывается потенциалом

$$V(x, y) = gxy, \quad B_x = -\frac{\partial V}{\partial x} = -gy, \quad B_y = -\frac{\partial V}{\partial y} = -gx.$$

На частицу действует сила

$$F_x = evB_y = -evgx, \quad F_y = -evB_x = evgy.$$

Уравнения движения в квадруполе

$$x'' - kx = 0, \quad y'' + ky = 0, \quad z'' = \frac{d}{ds^2}, \quad s = vt, \quad k = \frac{eg}{p_0}.$$

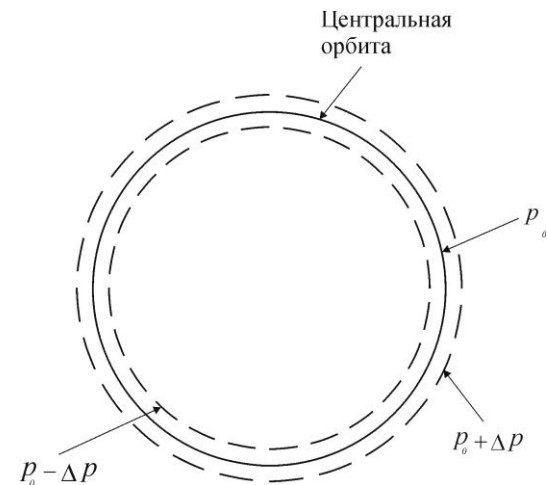
Магнитная система: фокусировка частиц в поворотном магните

Уравнение движения частиц в поворотном магните с учетом отклонения по импульсу

$$x'' + \frac{1}{\rho^2} x = \frac{1}{\rho} \frac{\Delta p}{p}, \quad y'' = 0$$

Радиальная фокусировка в поворотном магните: при движении с большим радиусом, чем центральная орбита ($x > 0$), центробежная сила падает, а сила Лоренца остается прежней.

Такую фокусировку называют слабой – при больших радиусах поворота в магните $1/\rho^2 \ll k$ (фокусировки в квадруполе).



Магнитная система: бета-функция

Уравнение поперечного движения для частицы ($\Delta p=0$)

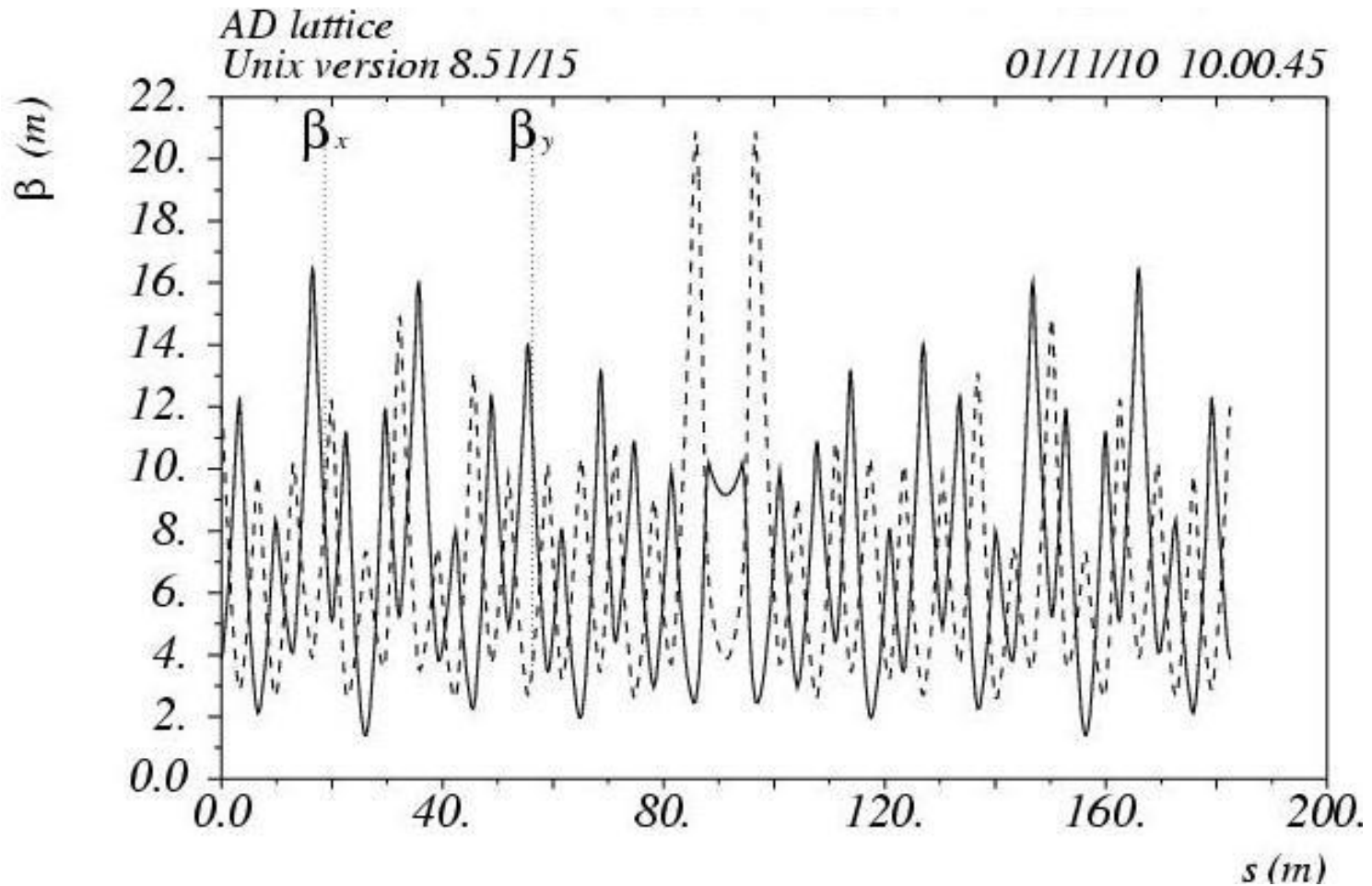
$$z'' + k(s)z = 0$$

Его решение

$$z(s) = \sqrt{\varepsilon\beta(s)} \cos(\mu(s) + \delta), \quad \mu(s) = \int_{s_0}^s \frac{dt}{\beta(t)}.$$

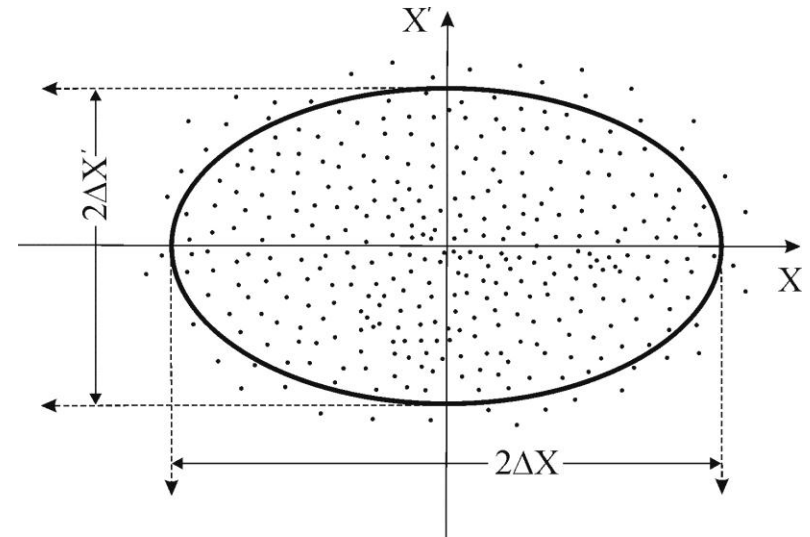
Частицы совершают квази-гармонические колебания с амплитудой $(\varepsilon_{x,y}\beta_{x,y}(s))^{1/2}$ и фазой $\mu_{x,y}(s)$, причем зависимость и фазы, и амплитуды от положения частицы на орбите определяется бета-функцией

Пример: оптика антипротонной фабрики



Магнитная система: поперечный эмиттанс пучка

- эмиттанс пучка $\varepsilon_{x,y}$ не зависит от положения частицы
- Зачем нужен второй параметр для описания движения частицы?
- Ансамбль частиц с разными начальными условиями (на выходе из источника частиц, на входе в ускоритель, на выходе из него)
- Площадь эллипса (площадь, занимаемая пучком в фазовом пространстве) = $\pi \cdot \varepsilon = \pi \cdot \Delta x \cdot \Delta x'$.
Размер пучка $\Delta x = (\varepsilon \beta)^{1/2}$



Магнитная система: частота бетатронных колебаний

Частоты этих колебаний, называемых бетатронными, на длине окружности L равны

$$Q_{x,y} = \frac{\mu}{2\pi} = \int_s^{s+L} \frac{dt}{\beta_{x,y}(t)}.$$

- исключительно важные параметры и должны выбираться при проектировании ускорителя очень тщательно

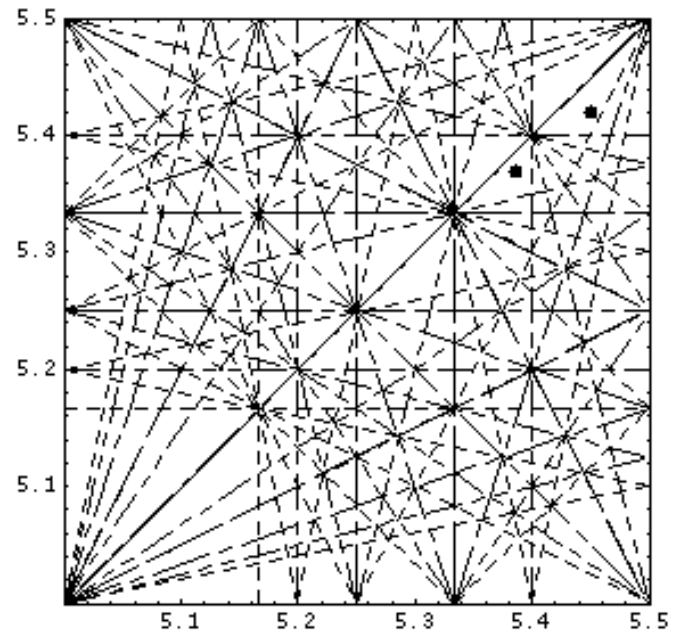
Необходимо, чтобы выполнялось условие (m, n, l – целые числа)

$$mQ_x + nQ_y \neq l.$$

Его физический смысл – различные моды колебаний (дипольная, квадрупольная и более высоких порядков) не должны возбуждаться, т.е. в системе не должно быть резонансов (по крайней мере низших порядков), порядок резонанса равен величине $|m|+|n|$.

Рабочая точка

- Пара чисел $\{Q_x, Q_y\}$ называется рабочей точкой
- Правильный выбор рабочей точки исключительно важен для обеспечения устойчивости поперечного движения
- Важнейшее условие-удаленность рабочей точки от наиболее опасных резонансов
- Резонансы какого порядка опасны – зависит от типа ускорителя (протонный / электронный, на теплых или холодных магнитах, высокоциклический или накопитель)

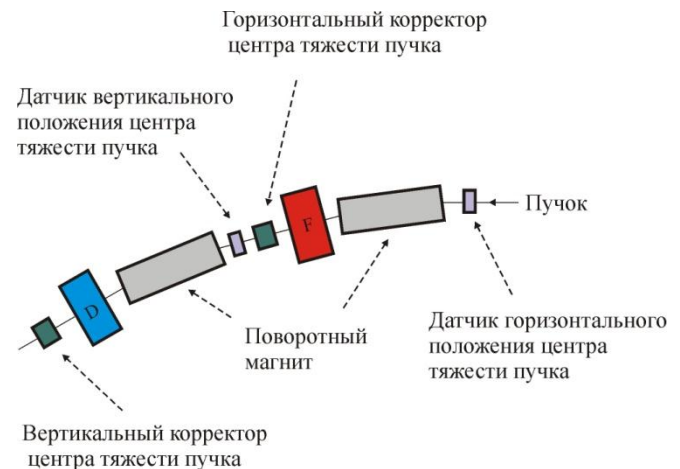


Рабочие точки частот бетатронных колебаний антипротонной фабрики

Магнитная система: учет ошибок

- Погрешности установки и питания поворотных магнитов => искажение орбиты
- Погрешности установки и питания квадрупольных линз => искажение орбиты и неправильная частота бетатронных колебаний => неустойчивость колебаний, потеря пучка
- Очень важна правильная калибровка магнита в лаборатории, дающая зависимость магнитного поля от тока в обмотках
- Применение специальной регуляции и фильтров при запитке магнитов повышает стабильность магнитного поля

Схема коррекции орбиты



Поперечный аксептанс ускорителя

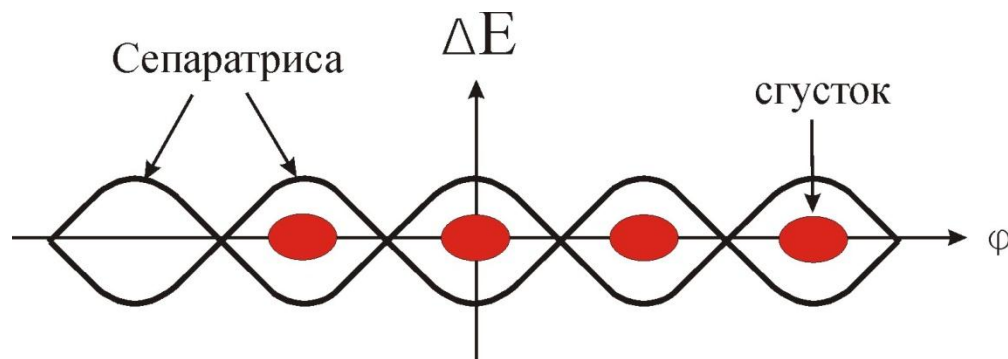
- Аксептанс – это максимальный эмиттанс (= максимальный фазовый объем пучка), при котором еще нет потерь частиц
- Определяется по формуле $A_z = \text{Max} \{ a(s)^2 / \beta_z(s) \}$, a -апертура вакуумной камеры => зависит как от поперечных размеров вакуумной камеры ускорителя и его оптики
- Чем больше аксептанс, тем больше поперечные габариты элементов ускорителя, тем он дороже в изготовлении и эксплуатации (потребление энергии)
- Какой нужен аксептанс - зависит от задачи, решаемой в данном ускорителе
- В накопителях, где важно большое время жизни пучка (порядка суток), область устойчивого движения пучка должна как минимум в $n=7-8$ раз превышать размер пучка => $A_z = n^2 \epsilon_z$, $A_z / \epsilon_z \geq 50$
- В высокоциклических (с длительностью несколько секунд и меньше) ускорителях требования к времени жизни пучка менее жесткие и пучок может заполнять всю вакуумную камеру => $\epsilon_z \approx A_z$

Продольные колебания

- Сепаратриса определяет область устойчивых колебаний
- Малые колебания – гармонические с частотой

$$\Omega_s = \frac{c}{L} \left[2\pi h \sin(\varphi_0) \frac{eV}{E_0} |\eta| \right]^{1/2}$$

- Площадь, занимаемая сгустком – продольный эмиттанс

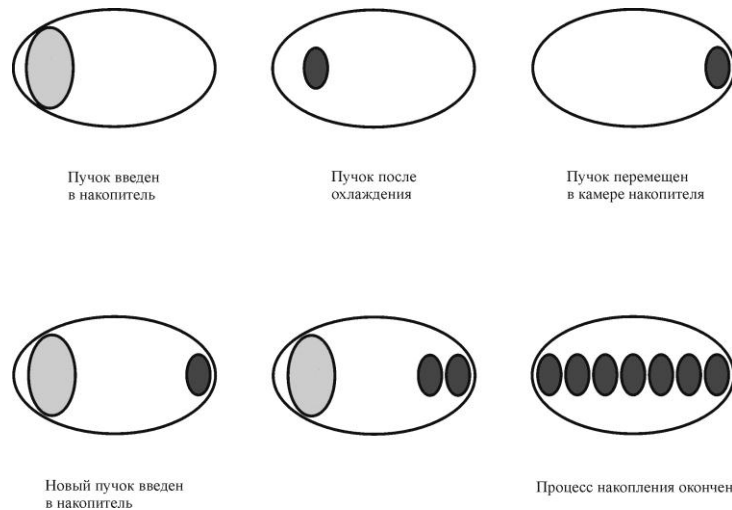


Продольный эмиттанс и продольный аксептанс

- Продольный эмиттанс – область фазового пространства (в координатах $(\Delta E, \varphi)$, заполняемого пучком
- Продольный аксептанс – максимальный, при котором движение пучка происходит без потерь
- Продольный аксептанс ускорителя определяется:
 - а) параметрами ВЧ системы (больше напряжение \rightarrow больше аксептанс)
 - б) зависимостью частот бетатронных колебаний от импульса частицы
- Продольный аксептанс ускорителя важен:
 - а) для обеспечения ускорения без потерь
 - б) для минимизации потерь при рассеянии частиц пучка на остаточном газе

Накопление пучков путем их охлаждения

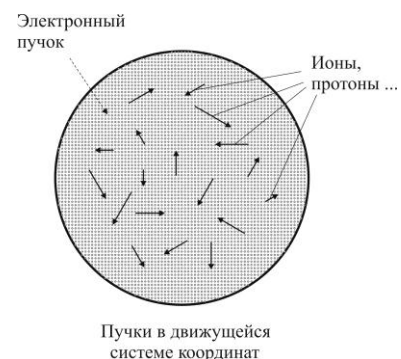
- Цель: повышение интенсивности пучка путем его накопления в кольце с ограниченным аксептансом (фазовым объемом)
- Схема накопления:
 - а) ввод пучка в ускоритель с заполнением аксептанса
 - б) охлаждение эмиттанса до величины значительно меньшей аксептанса
 - в) ввод новой порции частиц и т.д



Электронное охлаждение: принцип действия (Г.И.Будкер, Новосибирск, конец 1960-х)

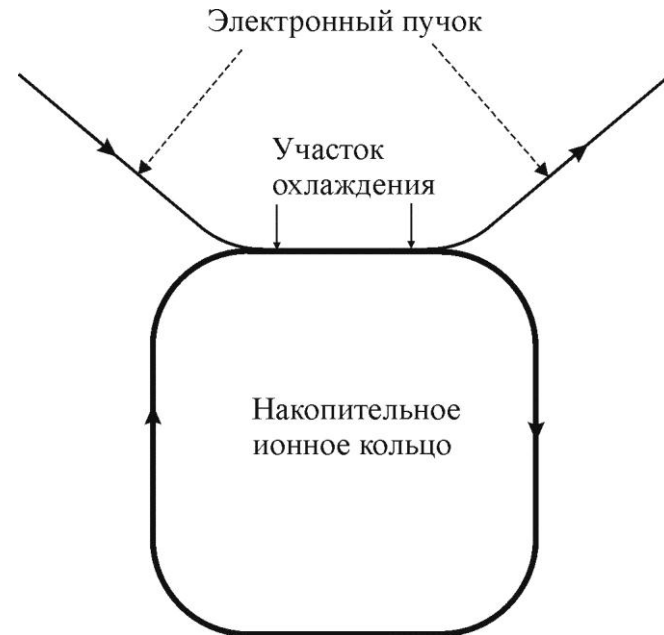
- «холодный» электронный пучок (т.е. пучок с очень малым разбросом по продольным и поперечным скоростям) смешивается с охлаждаемым пучком (протонным, ионным)
- В результате кулоновского взаимодействия происходит выравнивание температур пучков

$$kT_e = kT_i \quad \text{or} \quad mv_i^2 = mv_e^2$$
$$v_i = v_e (m_e / m_i)^{1/2}$$



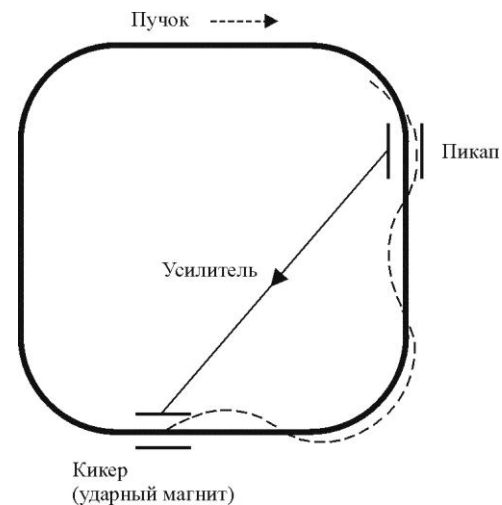
Электронное охлаждение (техническая реализация)

- «холодный» электронный пучок формируется в электронной пушке специального устройства – электронного охладителя
- Электронный охладитель и накопительное кольцо имеют общий участок, на котором происходит охлаждение
- «использованные» электроны собираются на коллекторе
- Постоянное обновление электронного пучка необходимо, иначе он быстро нагреется и охлаждение перестанет работать



Стохастическое охлаждение (принцип действия)

- С помощью датчика положения определяется отклонение частицы от идеальной орбиты
- В точке кольца, отстоящей на $90^\circ + 180^\circ \cdot n$ (n - целое), устанавливается ударный магнит (кикер)
- Информация о величине отклонения передается на кикер, в котором производится удар соответствующей силы, и поперечная скорость частицы обнуляется
- Так как частица движется со скоростью близкой к скорости света, расстояние от датчика до кикера по прямой должно быть заметно короче пути частицы по орбите



- С. ван дер Меер (ЦЕРН), начало 1970-х, Нобелевская премия 1984 г.

От синхротрона к коллайдеру

- Эксперимент на фиксированной мишени
- Полезная энергия

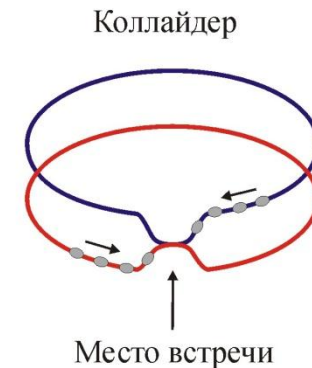
$$E_{пол,1} = \sqrt{2(Emc^2 + m^2c^4)}$$

- Эксперимент на встречных пучках
- Полезная энергия

$$E_{пол,2} = 2(E + mc^2)$$

- Для высоких энергий $E = mc^2\gamma \gg mc^2$ и

$$E_{пол,2} / E_{пол,1} \approx \sqrt{\frac{2E}{mc^2}} = \sqrt{2\gamma} \gg 1$$



Критерии эффективности синхротрона

- Интенсивность пучка – число поставляемых частиц в секунду
- Яркость пучка – отношение тока к эмиттансу

$$B = \frac{I}{\pi^2 \varepsilon_x \varepsilon_y}$$

- Светимость – это отношение числа событий в секунду к сечению реакции

$$L [\text{см}^{-2} \text{сек}^{-1}] = \frac{N}{\sigma}$$

- Светимость не зависит от изучаемого процесса, но зависит от параметров пучка и ускорителя

Потери частиц: некоторые причины и следствия

- Нежелательность потерь: менее эффективная работа ускорителя, возможное повреждение оборудования, возможное радиационное заражение, потенциальная опасность для персонала
- Системы защиты оборудования и персонала
- Причины потерь пучка:
 - отказ оборудования (теряется весь пучок или его часть)
 - одночастичные неустойчивости пучка
 - коллективные неустойчивости пучка
 - внутripучковое рассеяние
 - взаимодействие с остаточным газом
 - многие, многие другие ...

Светимость в коллайдере

- Два пучка => два «кольца» + участок встречи
- Для круглого пучка с гауссовым распределением светимость

$$L = \frac{N_b^2 n_b f_{rev}}{4\pi\epsilon\beta^*} F$$

- N – число частиц в сгустке длиной σ_s , n_b – число сгустков в одном кольце, f_{rev} – частота обращения, ϵ – эмиттанс пучка, β^* и $\sigma^* = (\epsilon\beta^*)^{1/2}$ – бета функция и поперечный размер пучка в месте встречи, F – геометрический фактор, определяющий уменьшение светимости вследствие пересечения частиц под углом θ_c

$$F = \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{\theta_c \sigma_s}{\sigma^*}\right)^2}}$$

От чего зависит светимость в коллайдере?

Светимость пропорциональна

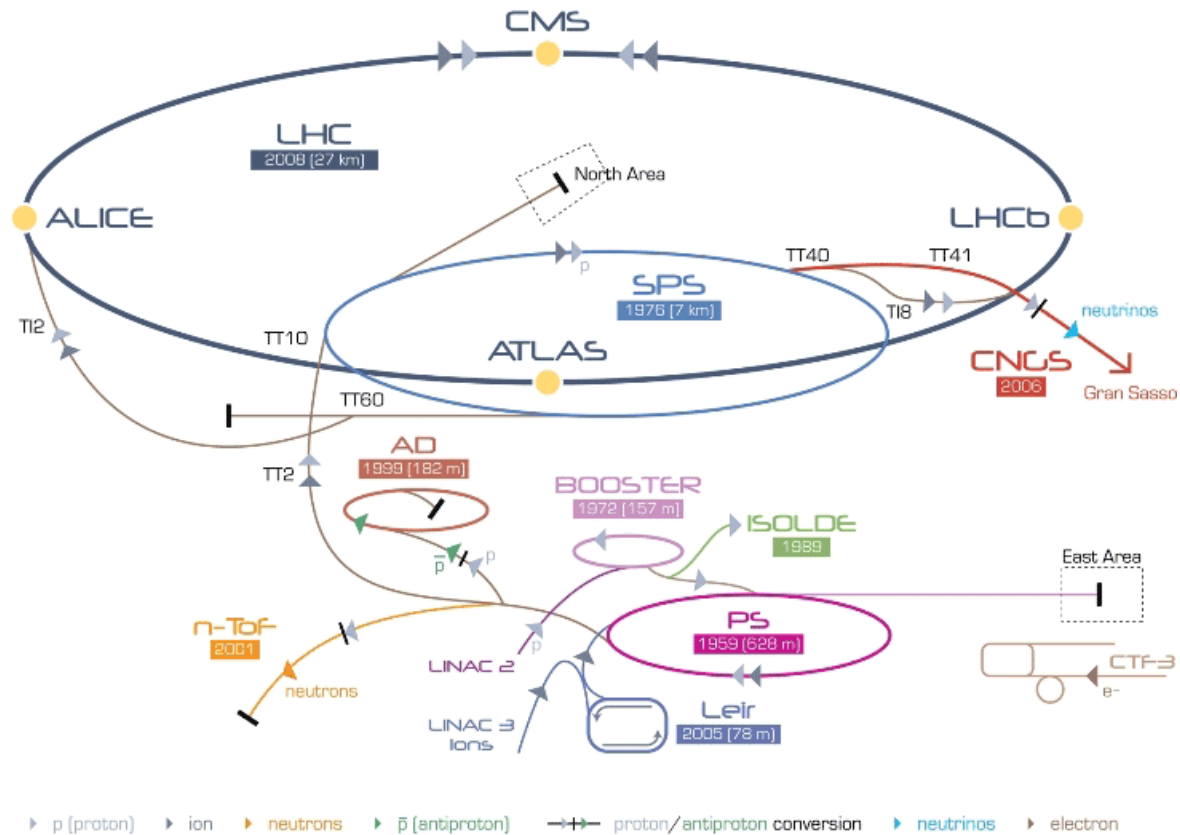
- квадрату числа частиц в сгустке. Ограничения – эффекты места встречи и разнообразные коллективные эффекты, имеющие пороговый характер и обусловленные взаимодействием сгустков с «окружением»
- числу сгустков при фиксированном числе частиц в них. Ограничение – во избежание нежелательного («паразитного») взаимодействия сгустков вне места встречи, ведущего к их деградации, их разведение по двум разным орбитам должно осуществляться как можно быстрее – исключительно сложная задача
- частоте обращения – более высокая частота обращения при фиксированном числе сгустков означает меньший периметр (сверхпроводящие магниты), следовательно, меньшее расстояние между сгустками. Ограничения – максимально достижимое поле в магнитах, взаимодействие сгустков между собой
- с учетом $\epsilon\beta^* = (\sigma^*)^2 = \sigma_x\sigma_y$ поперечному сечению пучка в месте встречи (т.е. его плотности). Ограничения – эффекты места встречи, максимально достижимая фокусировка примыкающими квадрупольными линзами, нелинейные эффекты

LHC main parameters

Table 2.1: LHC beam parameters relevant for the peak luminosity

		Injection	Collision
Beam Data			
Proton energy	[GeV]	450	7000
Relativistic gamma		479.6	7461
Number of particles per bunch		1.15×10^{11}	
Number of bunches		2808	
Longitudinal emittance (4σ)	[eVs]	1.0	2.5 ^a
Transverse normalized emittance	[$\mu\text{m rad}$]	3.5 ^b	3.75
Circulating beam current	[A]	0.582	
Stored energy per beam	[MJ]	23.3	362
Peak Luminosity Related Data			
RMS bunch length ^c	cm	11.24	7.55
RMS beam size at the IP1 and IP5 ^d	μm	375.2	16.7
RMS beam size at the IP2 and IP8 ^e	μm	279.6	70.9
Geometric luminosity reduction factor F^f		-	0.836
Peak luminosity in IP1 and IP5	[$\text{cm}^{-2}\text{sec}^{-1}$]	-	1.0×10^{34}
Peak luminosity per bunch crossing in IP1 and IP5	[$\text{cm}^{-2}\text{sec}^{-1}$]	-	3.56×10^{30}

Ускорительный комплекс ЦЕРНа



LHC Large Hadron Collider SPS Super Proton Synchrotron PS Proton Synchrotron

AD Antiproton Decelerator CTF-3 Clic Test Facility CNCS Cem Neutrinos to Gran Sasso ISOLDE Isotope Separator OnLine DEvice
LEIR Low Energy Ion Ring LINAC LINear ACcelerator n-ToF Neutrons Time Of Flight

Ускорительный комплекс ЦЕРНа

- LINAC2 – линейный ускоритель протонов (до 50 МэВ)
- Booster (4 кольца)– синхротрон на энергию 1.4 ТэВ
- PS - протонный синхротрон на энергию 26 ТэВ
- SPS – суперпротонный синхротрон на энергию 450 ТэВ
- LHC – большой адронный коллайдер на энергию 7 ТэВ
- LINAC3 - линейный ускоритель ионов свинца (4.2 МэВ/нуклон)
- LEIR – ионное кольцо низких энергий (72 МэВ/нуклон)
- ISOLDE – радиационные ионные пучки
- AD – получение атомов антиводорода
- CNGS – нейтрино для лаборатории в Гран Сассо (Италия)

Почему ускорительный комплекс состоит из большого числа звеньев?

Технические причины:

- Диапазон изменения магнитного поля в поворотных магнитах ограничен
- Трудно поддерживать высокую стабильность тока в источниках питания ($10^{-4} \div 10^{-5}$) в широком диапазоне
- Ограничение по диапазону перестройки частоты ВЧ напряжения
- Если осуществлять ускорение в одной установке, то ее цикличность будет невысока

Ограничения, связанные с физикой пучков:

- Ограничение по интенсивности, обусловленное пространственным зарядом пучка, $\sim \beta^2 \gamma^3$
- Ограничения, связанные с коллективными неустойчивостями $\sim \gamma$

Спасибо за внимание!