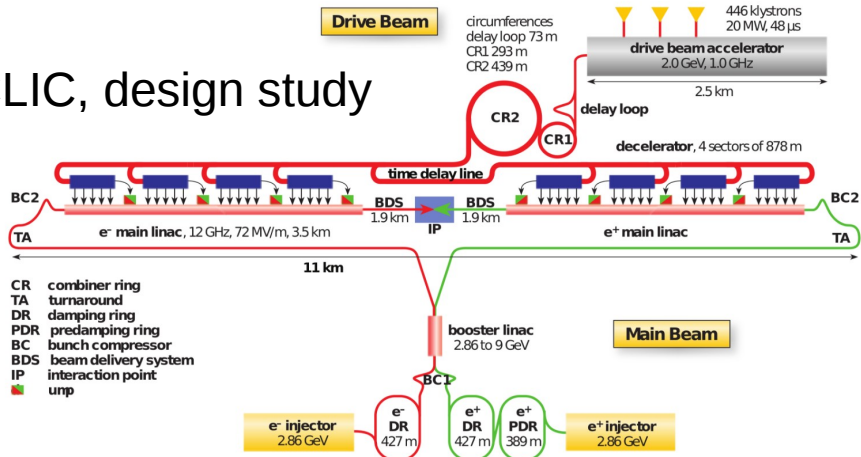


Introduction to Accelerators

Ускорительная техника и терминология

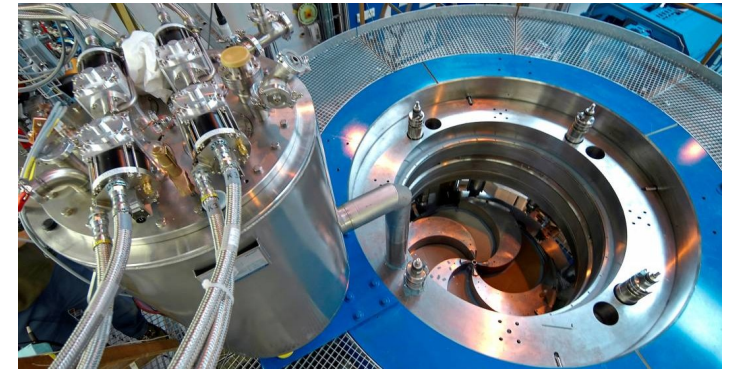
CLIC, design study



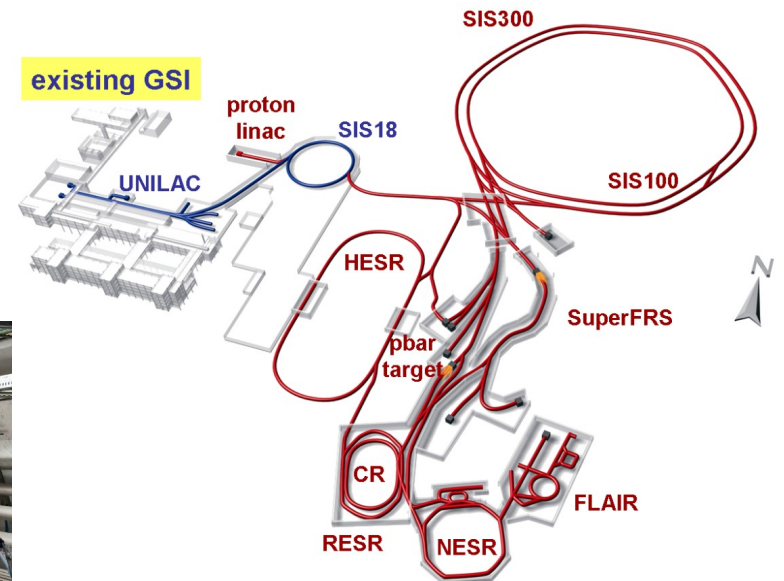
European XFEL, Hamburg



COMET cyclotron, PSI, Villigen

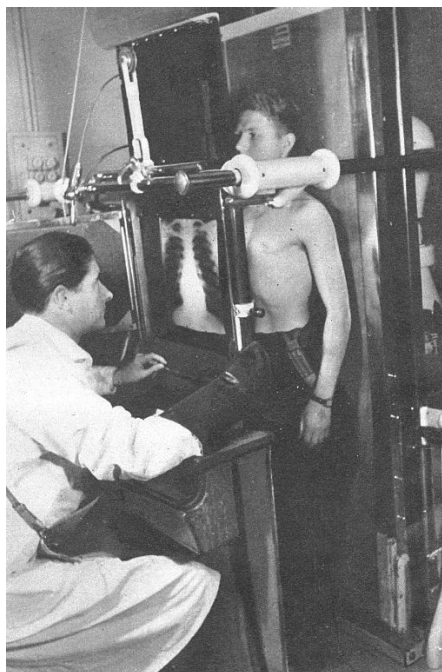


ESRF synchrotron, Grenoble



FAIR, GSI, Darmstadt

- Ускорители вокруг нас

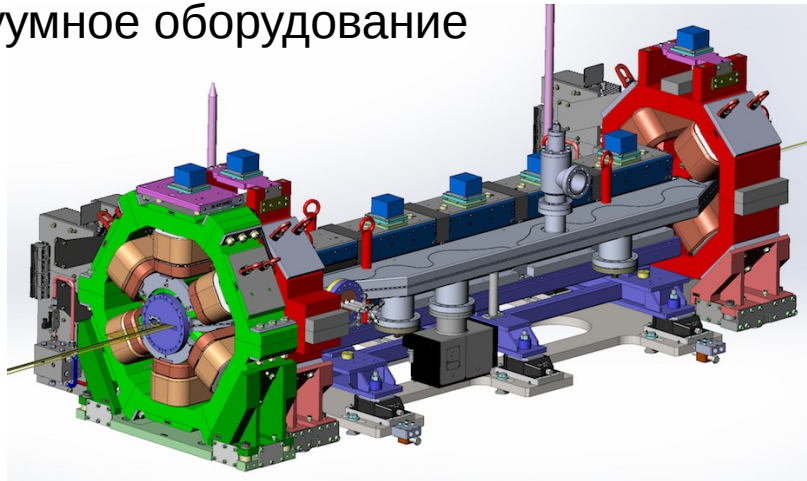


Ускоритель

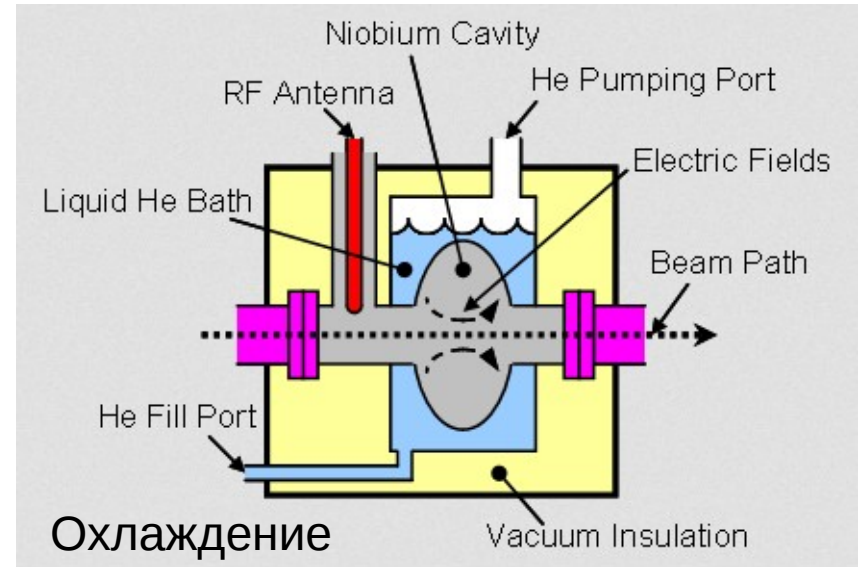
- **Комплекс специальных технических средств**
 - Генерации заряженных частиц
 - Создания и контроля ускоряющего поля
 - Охлаждения
 - Синхронизации
 - Систем удаленного управления
 - Точного механического позиционирования
 - Транспортировки пучка
 - Диагностики пучка и систем обратной связи
 - Систем защиты персонала и оборудования
 - Электропитания

Инфраструктура ускорителя

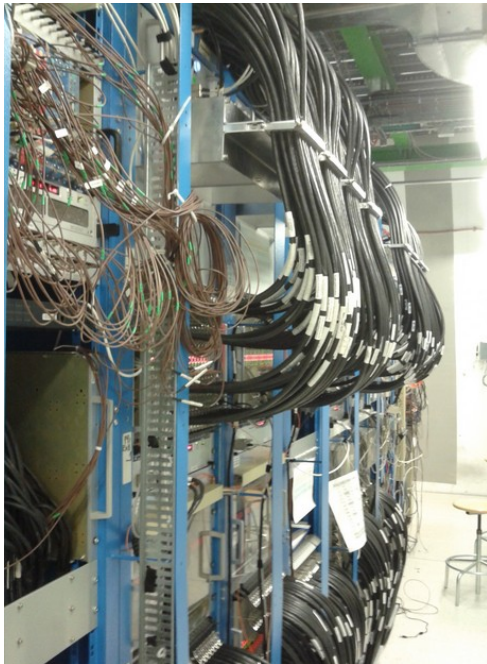
Вакуумное оборудование



ESRF, Grenoble



Охлаждение

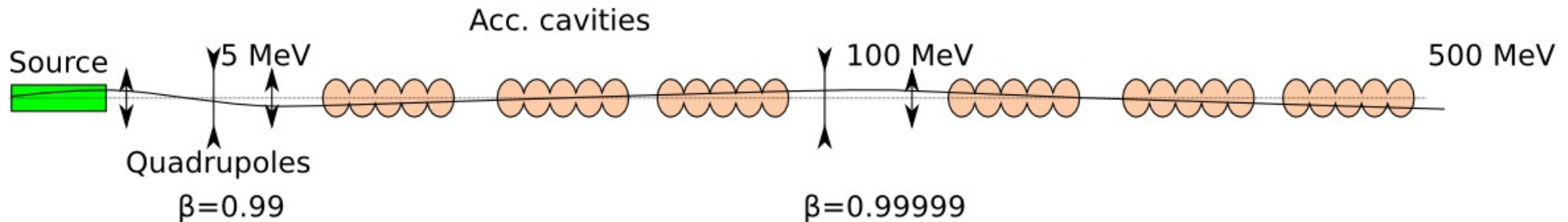


Timing
Power convertors
Diagnostics
Controls
Machine protection
Feedback systems
Radiation protection
...

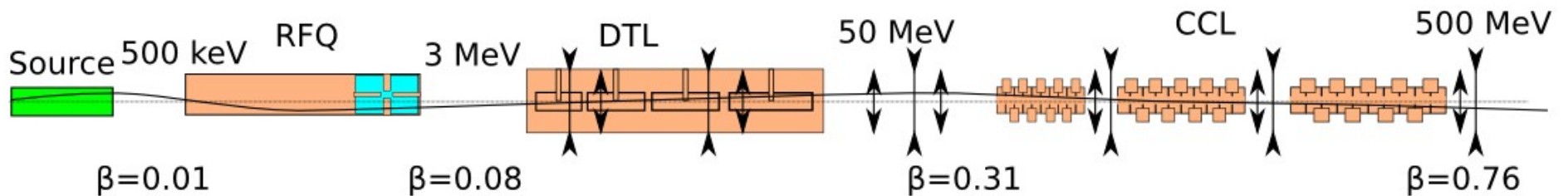


Linear accelerators

- Electron linac



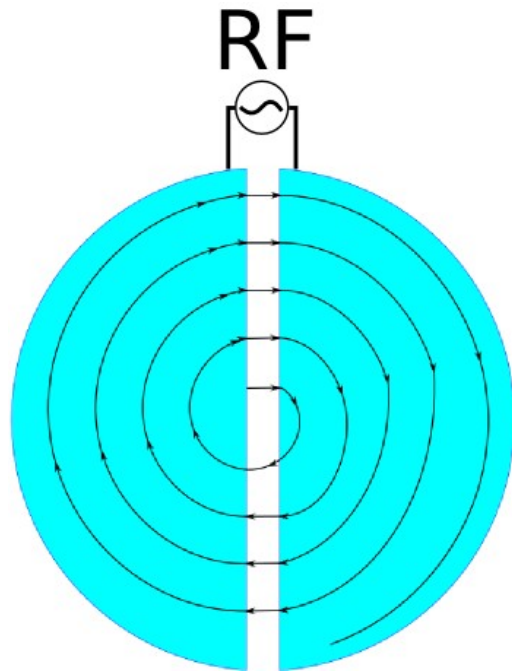
- Proton linac



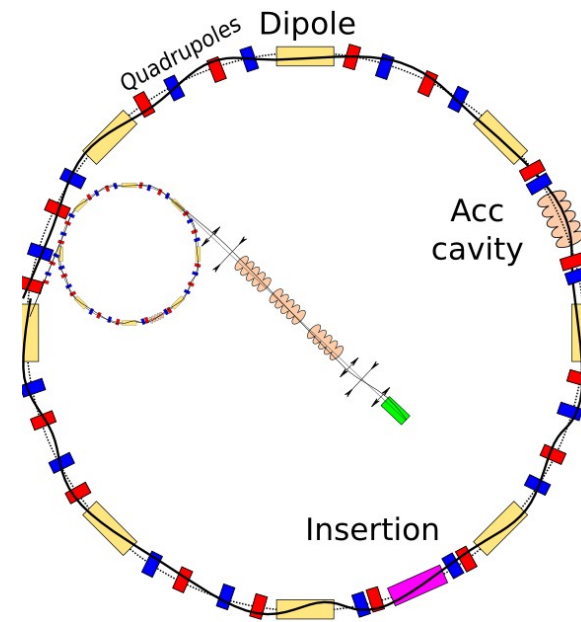
Longest ever built LINAC: at SLAC, 3.2 km, 50 GeV electrons and positrons

Циклические ускорители

Cyclotron



Synchrotron



Small and big

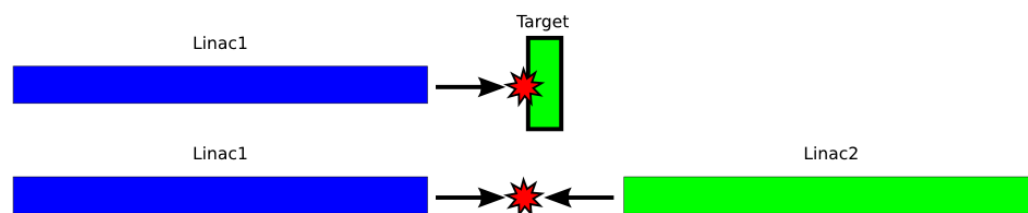
SC medical cyclotron at 250 MeV
Is ~1m in diameter

3rd generation light source:
Electron synchrotrons of ~500 meters
several GeV

Коллайдер

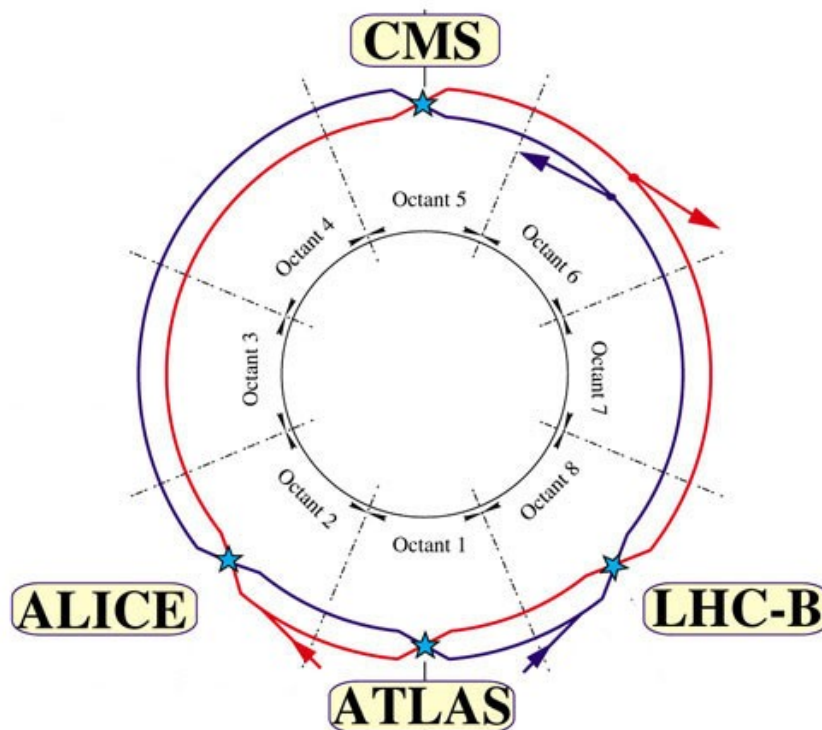
- Взаимодействие на мишени

- Сохранение импульса требует, чтобы часть энергии пучка преобразовалась в кинетическую энергию продуктов реакции



- Взаимодействие на встречных пучках

В случае лобового столкновения вся энергия используется в реакцию, закон сохранения импульса соблюден в любом случае



**Next generation colliders:
ILC and CLIC, ~30 km long,
~1 TeV collision energy**

**Future circular collider
(FCC): 100 km tunnel**



Заряженные частицы

- Элементарные частицы, обладающие зарядом
 - Электрон и позитрон
 - Мюон и антимюон
 - Протон и антипротон
 - ...
- Ионизированные атомы - Ионы

e^-	e^+
p^+	p^-
u^-	u^+
C^{2+}	C^{2-}

Источники частиц

- Электроны

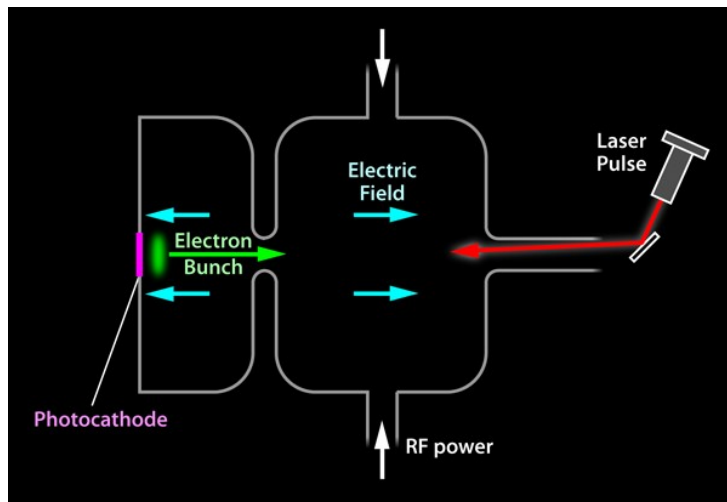
- Термо-эмиссия
- Фото-эмиссия
- Авто-эмиссия

- Протоны

- Ионизация водорода

- Ионы

- Плазменные источники ионов



ЭМ поле

- Электрическое поле
 - Распределение электрического заряда
 - Закон Гаусса
 - Переменное магнитное поле
 - Закон Фарадея
- Магнитное поле
 - Распределение потоков заряда
 - Закон Biot-Savart
 - Переменное электрическое поле
 - Ток смещения

$$\oint_S \vec{E} d\vec{S} = \frac{q}{\epsilon_0}$$
$$\mathcal{E}_i = \frac{-d\Phi}{dt}$$

$$dB = \frac{\mu_0 \cdot Idl \cdot r}{4\pi r^3} \sin \alpha$$

Уравнения Максвелла

$$\operatorname{rot} B = \mu \mu_0 J + \frac{1}{c^2} \partial \frac{E}{\partial t} \quad \operatorname{rot} E = -\partial \frac{B}{\partial t}$$

$$\operatorname{div} B = 0 \quad \operatorname{div} E = \frac{\rho}{\epsilon \epsilon_0}$$



Сила Лоренца

- **Взаимодействие** заряженной частицы с ЭМ полем

$$m \frac{d\vec{p}}{dt} = q(\vec{E} + [\vec{v} \times \vec{B}])$$

- **Работа** ЭМ поля над заряженной частицей
 - **Э** поле **ускоряет** частицу
 - **М** поле не совершает работу, но **отклоняет** частицу

$$\Delta T = \int \vec{F} \cdot d\vec{l} = \int q \vec{E} \cdot d\vec{l}$$

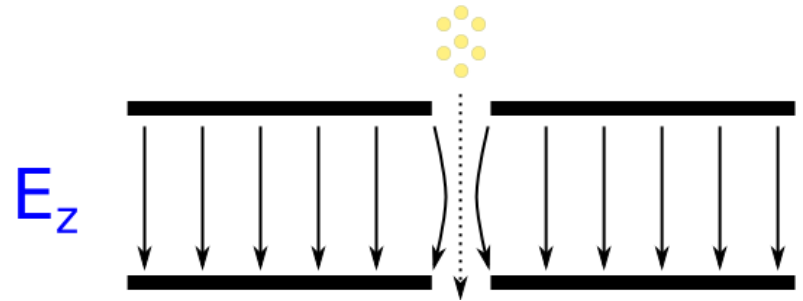
Ускорение постоянным Э полем

- Ускоряющий промежуток

$$m \frac{dp_z}{dt} = q E_z$$

- Энергия частицы

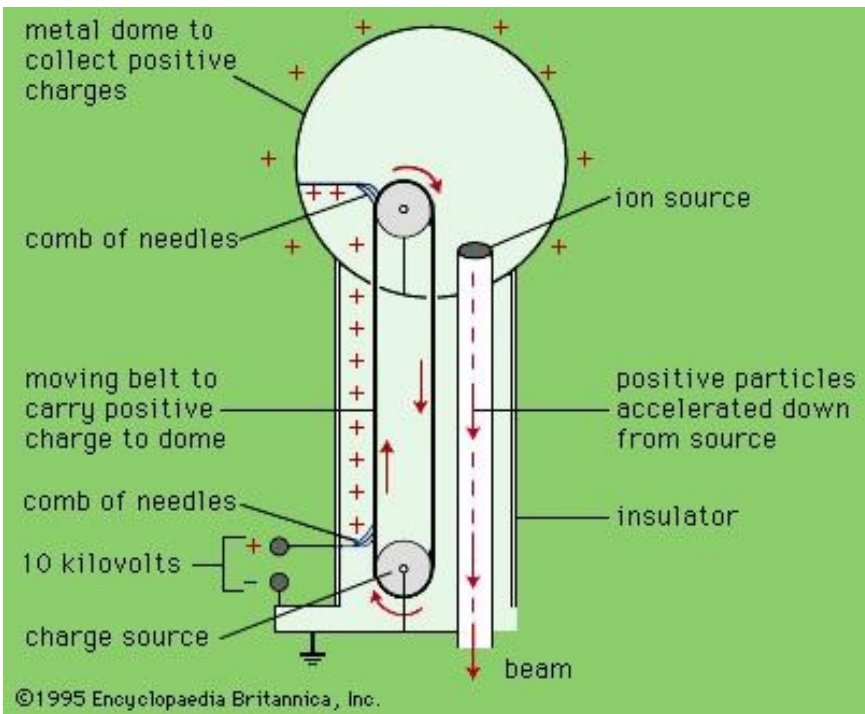
$$T = q \int E_z dz = qV$$



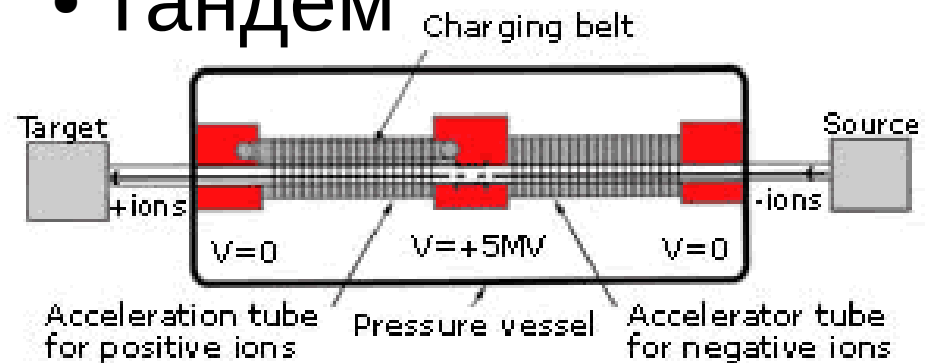
Генератор Ван-дер-Графа

- 1931, задуман для ускорения частиц

- Самый высоковольтный ВдГ - 20 МВ

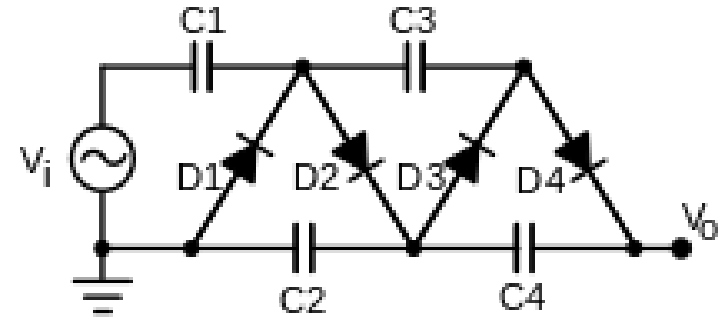


- Тандем



Ускоритель Кокрофта-Волтона

- Каскадный умножитель напряжения, 1921
Грайнахер, Швейцария
- Ускоритель, 1932,
Кокрофт и Волтон,
Кэмбридж



Ускорение в переменном поле

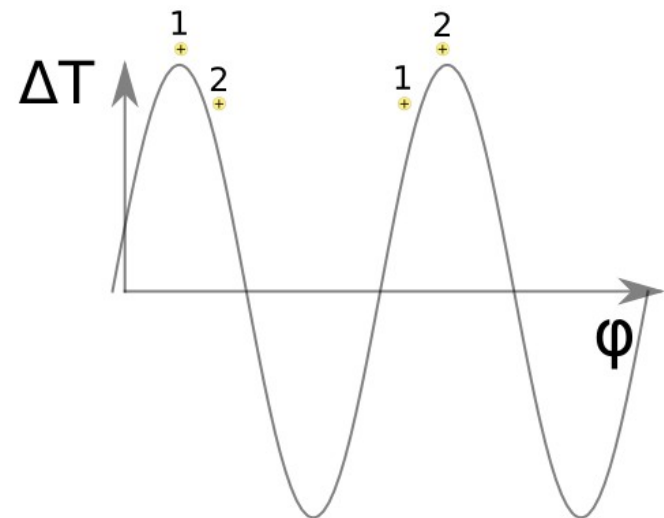
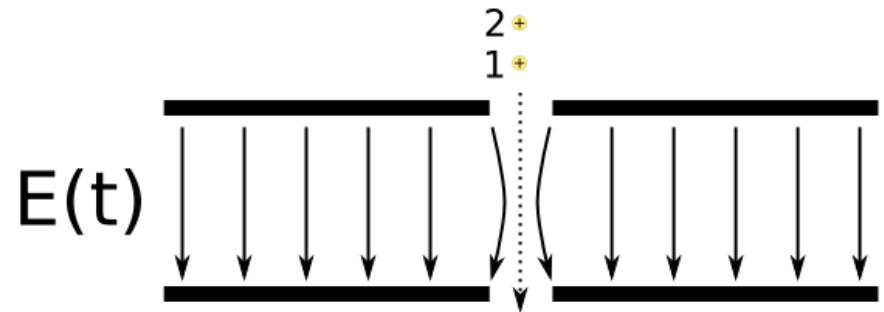
- Ускорение

$$m \frac{dp_z}{dt} = q E_{z0} \sin(\omega t + \varphi)$$

- Прирост энергии

$$\Delta T = q E_{z0} \int_{T_{pass}} \sin(\omega t + \varphi) v dt$$

- Интегральное уравнение
- Фаза максимального ускорения



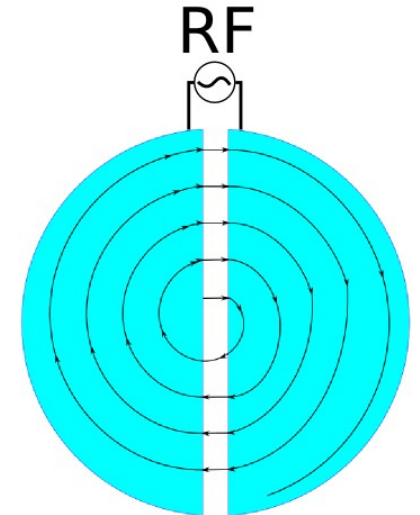
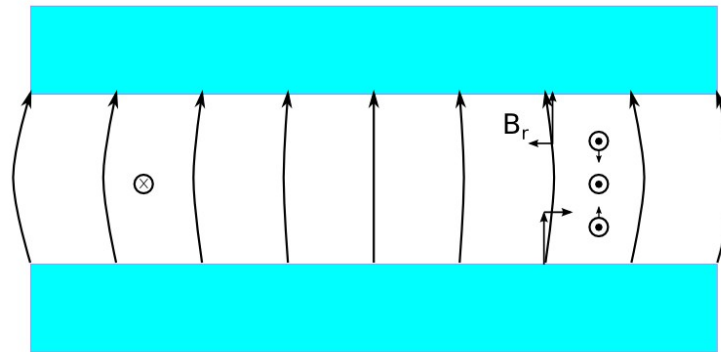
Ускорение ВЧ полем

- Циклотрон

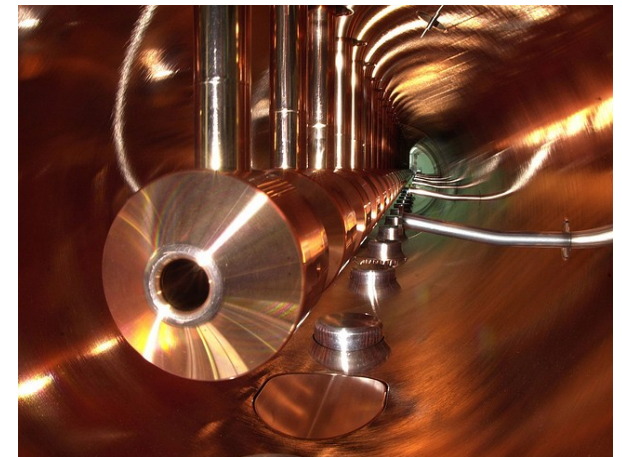
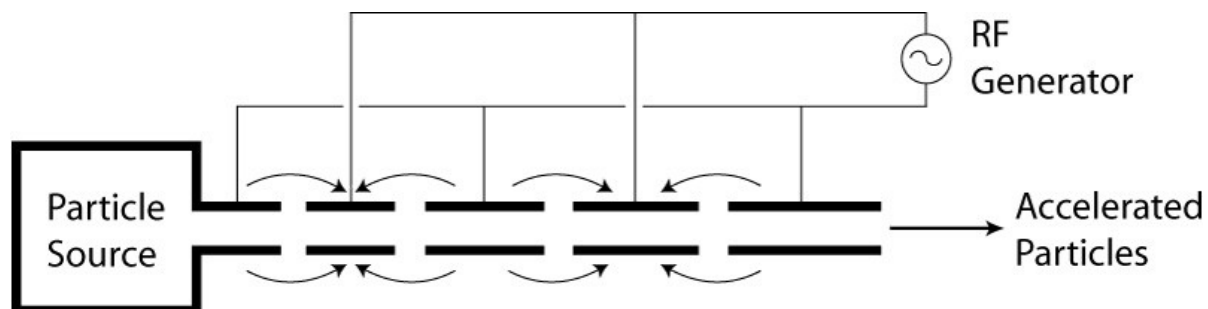
$$m \frac{V^2}{R} = qVB$$

$$t = 2\pi \frac{R}{V} = 2\pi \frac{m}{qB}$$

Для малых энергий период оборота слабо зависит от энергии



- Ускоритель на пролётных трубках (DTL)



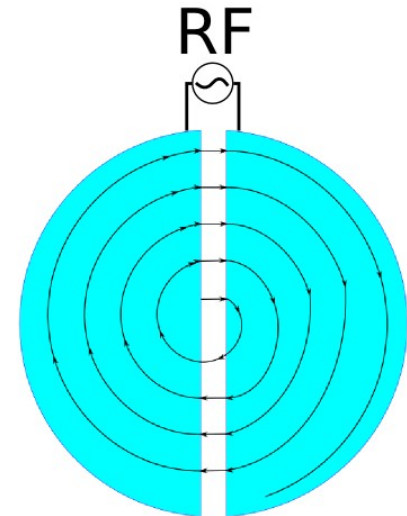
Синхро-циклотрон

- Магнитное поле постоянно. Изменение периода ВЧ поля

$$T_{RF} = 2\pi \frac{R}{V} = 2\pi \frac{m}{qB}$$

$$\frac{T_{RF}}{m} = const$$

- Наличие слабой фокусировки

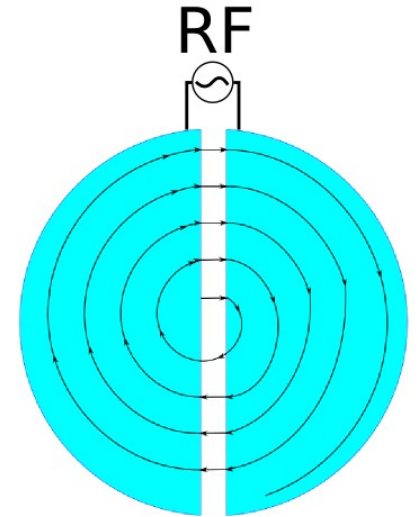


Циклотрон. Релятивизм

- Протоны до 25 МэВ в циклотроне

$$t = 2\pi \frac{R}{V} = 2\pi \frac{\gamma m_0}{qB}$$

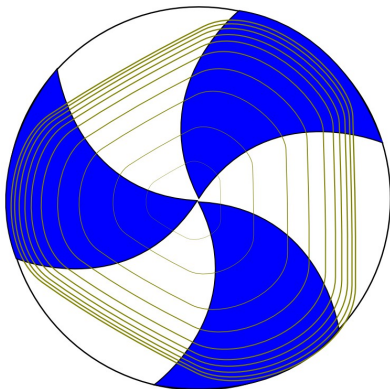
Изменение в частоте вращения нарушает синхронизацию с ВЧ



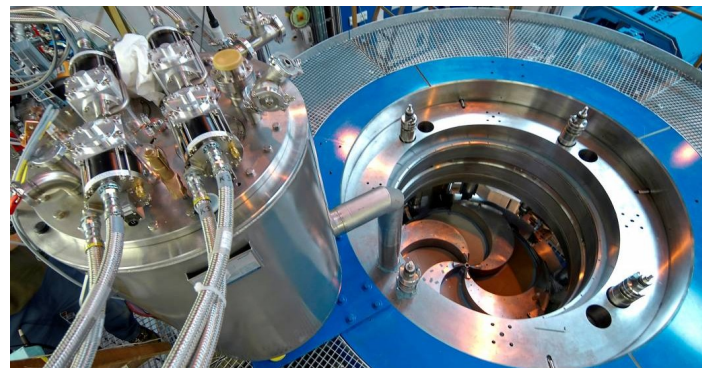
Условие синхронизма: $\omega = \gamma$, наращивание B с увеличением радиуса

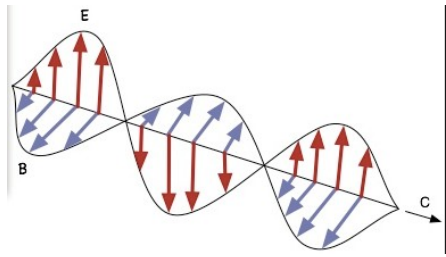
Секторный циклотрон

Период оборота не зависит от энергии.
Отсутствие слабой фокусировки



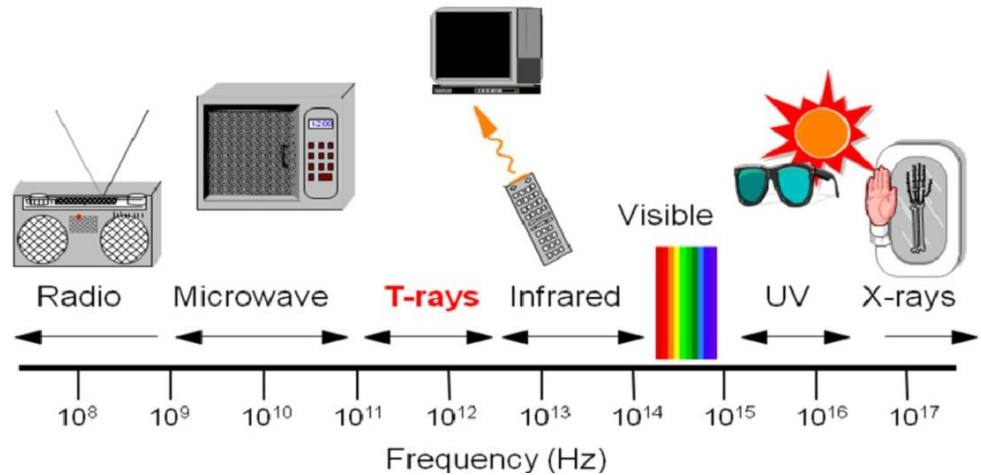
COMET, PSI





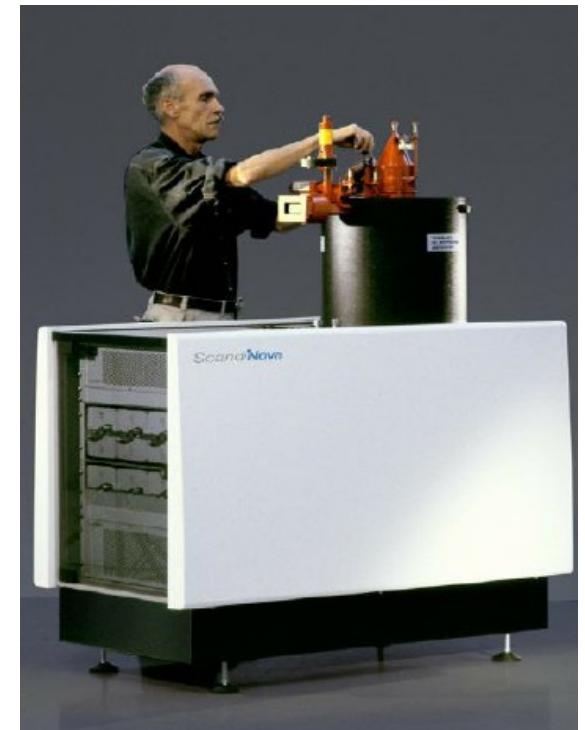
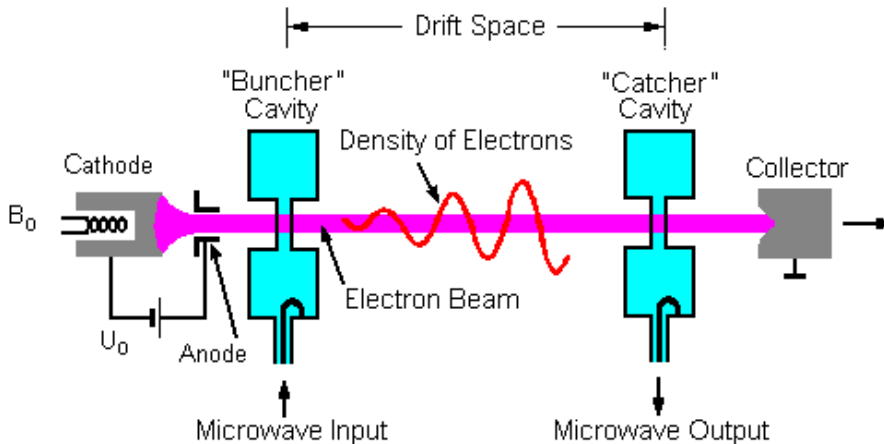
Ускорение ЭМ волной

- Диапазон СВЧ
10 МГц – 100 ГГц



СВЧ усилитель

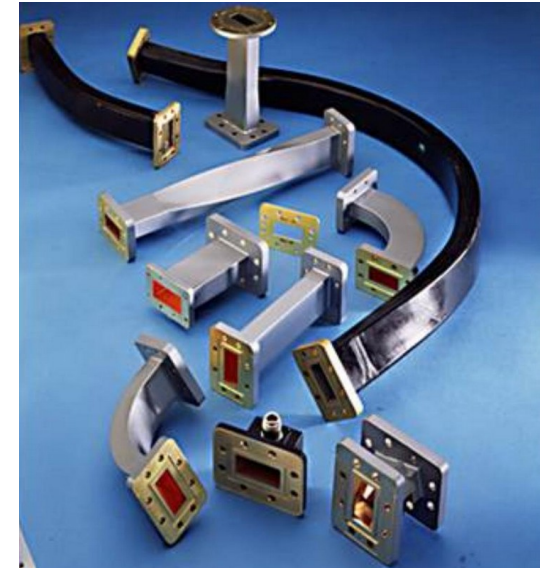
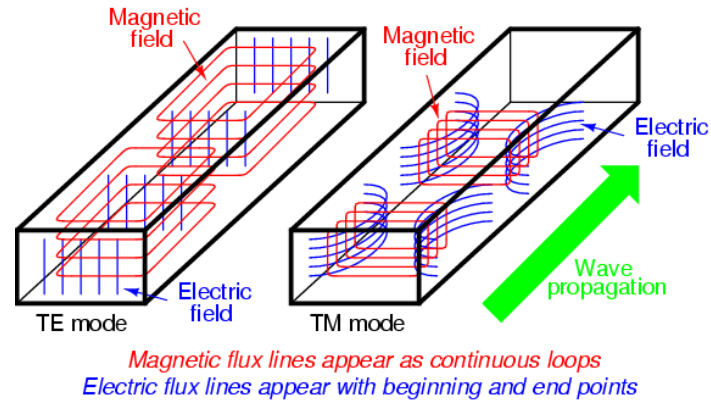
- Ускоряющие поля ~ 10 МВ/м
 - СВЧ Мощность ~ 10 МВт
- Клистронный усилитель СВЧ
 - Ускоритель электронов на постоянном поле



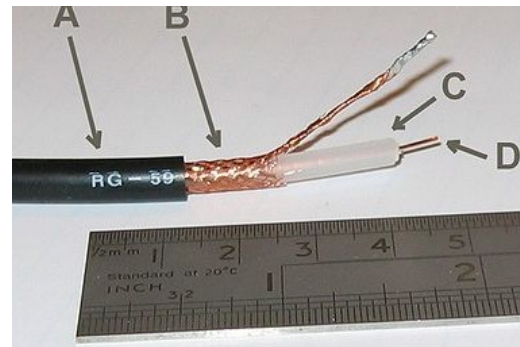
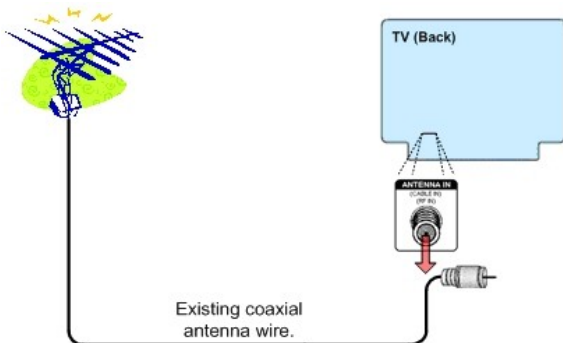
Передача СВЧ энергии

- Волноводы

- прямоугольный

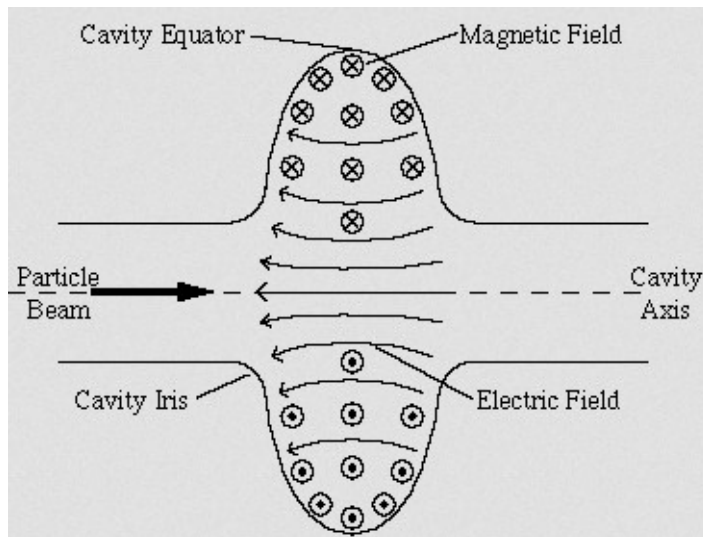


- Коаксиальная линия



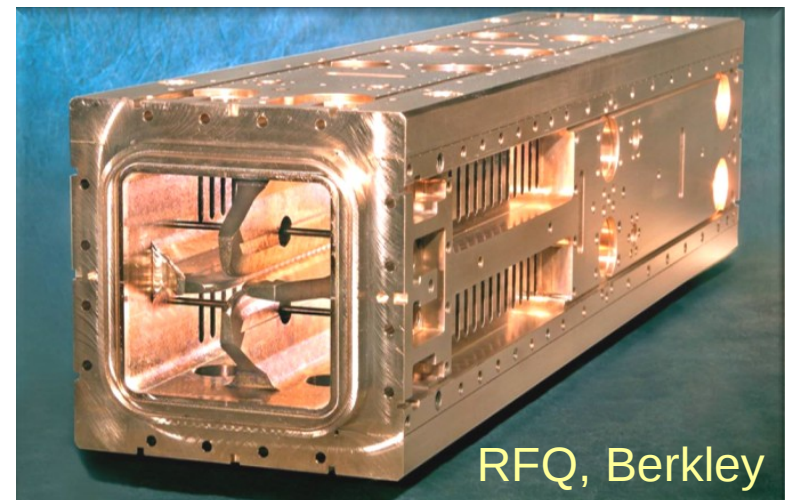
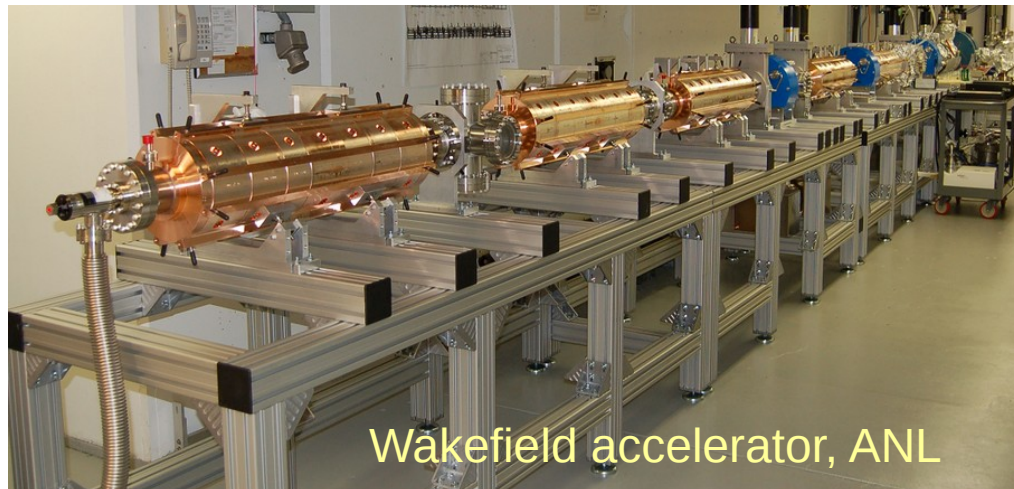
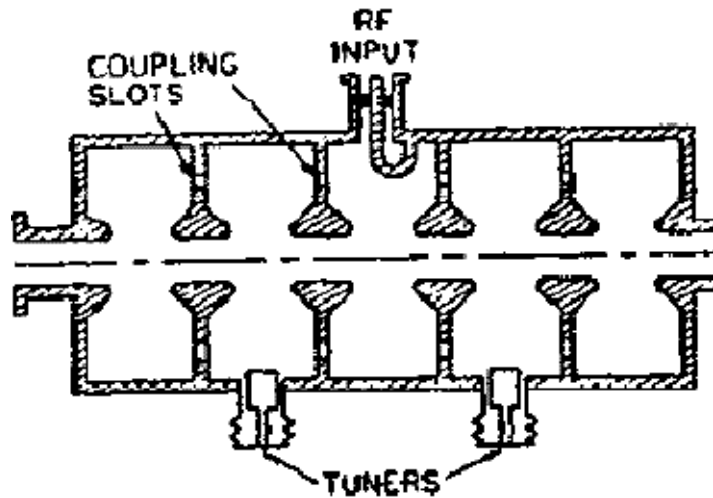
Резонансные структуры

- Резонансная ячейка
 - ЭМ колебания правильной конфигурации только на одной частоте возбуждения
 - Ускорение продольным Э полем TM_{010} моды



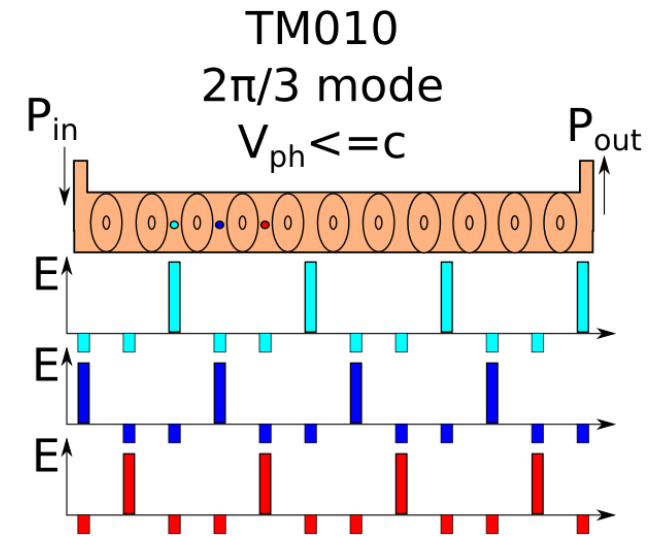
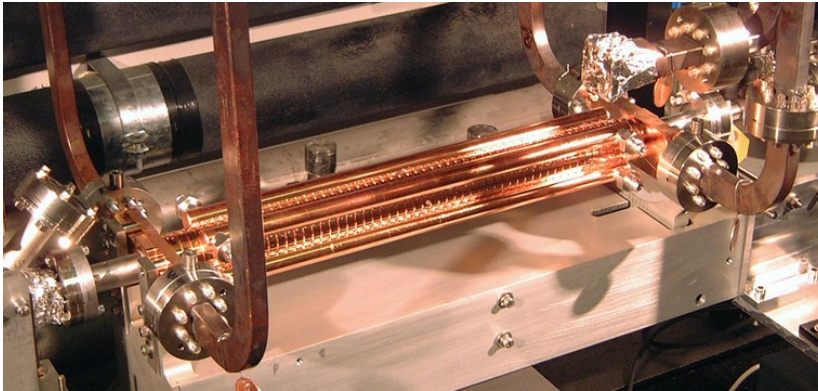
50 MHz cavity at PSI

Multi-cell structures

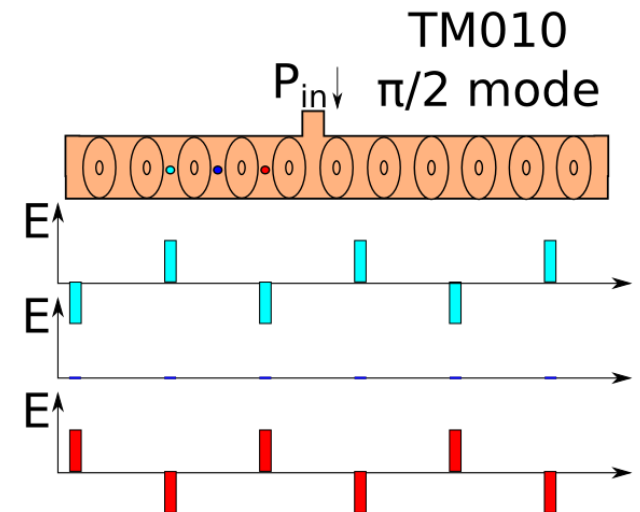
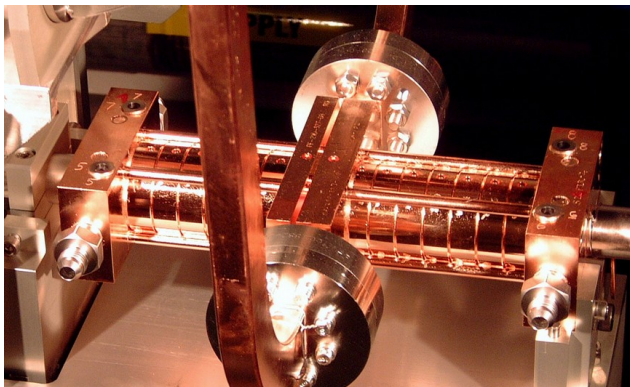


Ускорительные структуры

- Структура на бегущей волне
 - Фазовая скорость согласована со скоростью ускоряемых частиц

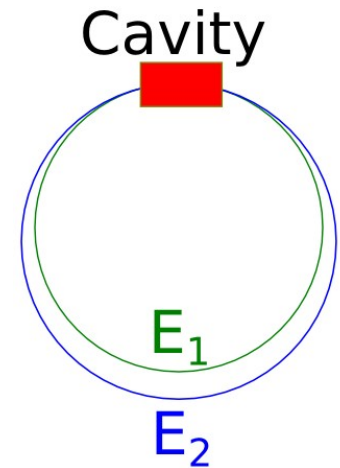
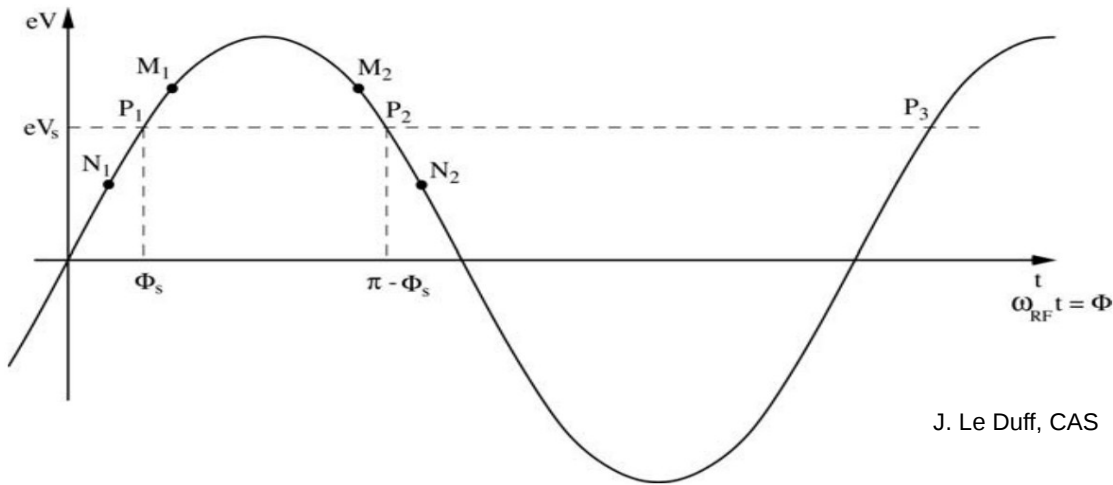


- Структура на стоячей волне



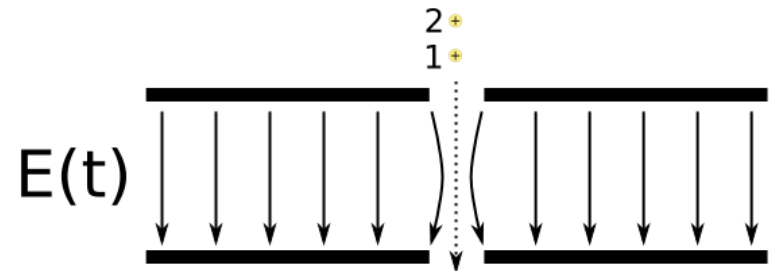
Продольная стабильность пучка

- Частица с фазой Φ_s будет всегда в этой фазе во всех ускоряющих промежутках. Все частицы следуют одной траектории



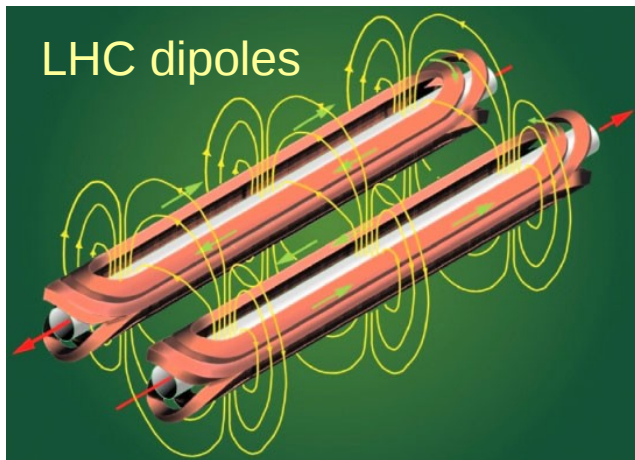
- P1 фаза – стабилизирует пучок в продольном направлении, но дефокусирует в поперечном

$$\frac{dV}{d\Phi} > 0$$



Дипольный магнит

- Отклонение траектории от прямолинейной
 - Поворотный диполь
 - Электромагнит



LHC:
 $B=8.3$ T
 $I=11$ kA
 $N=1200$
 $L=14$ m
 $M=35$ t
500 kCHF each

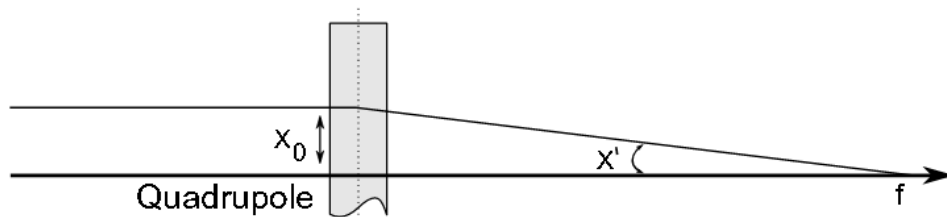


Корректоры – дипольный магнит для малых отклонений пучка, коррекции орбиты.

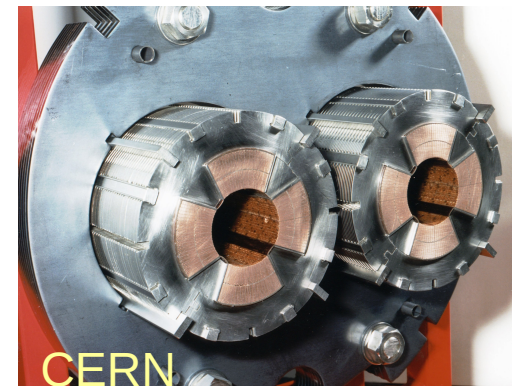
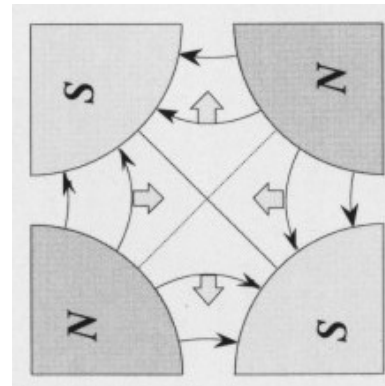
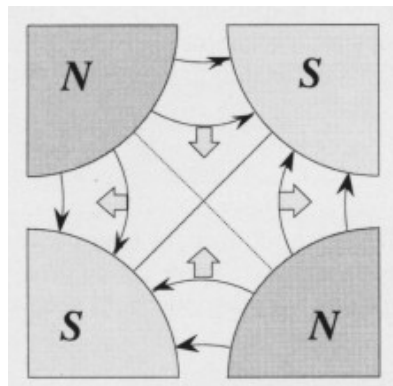
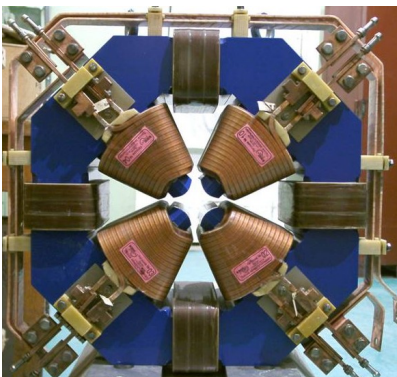


Квадруполь

- Фокусировка градиентом магнитного поля, сильная фокусировка
 - Фокусировка в одной поперечной плоскости одной квадрупольной линзой



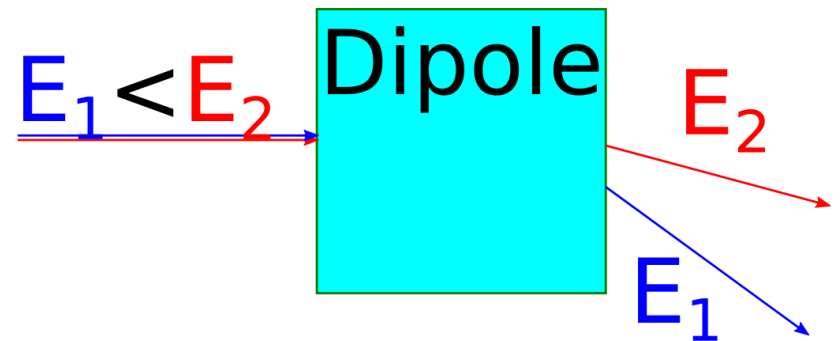
$$f \approx \frac{1}{Kl_q} = \frac{p}{q dB/dr l_q}$$



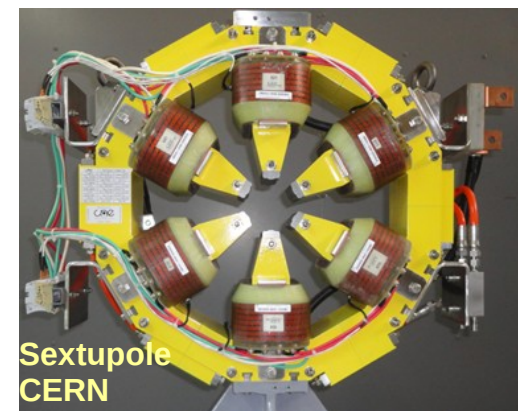
Дисперсия в магнитном поле

- Диполь как спектрометр, измерение энергии и разброса по энергии

$$\frac{mv^2}{R} = qvB$$

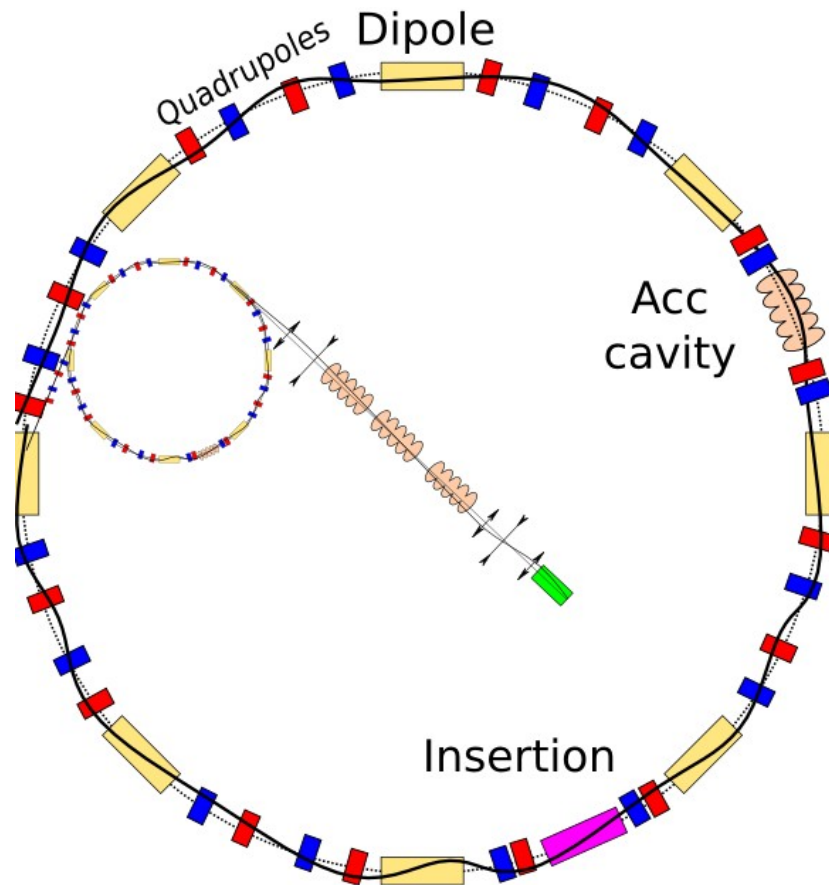


- Для поворотных диполей и квадрупольей дисперсия – паразитный эффект
 - Компенсация дисперсии в квадрупольном магните осуществляется секступольным магнитом



Синхротрон

- R константа, V и T_{RF} варьируются



$$R = \frac{mV}{qB}$$

$$T_{RF} = 2\pi \frac{R}{V} = 2\pi \frac{m}{qB}$$

$$B \propto \beta \gamma$$

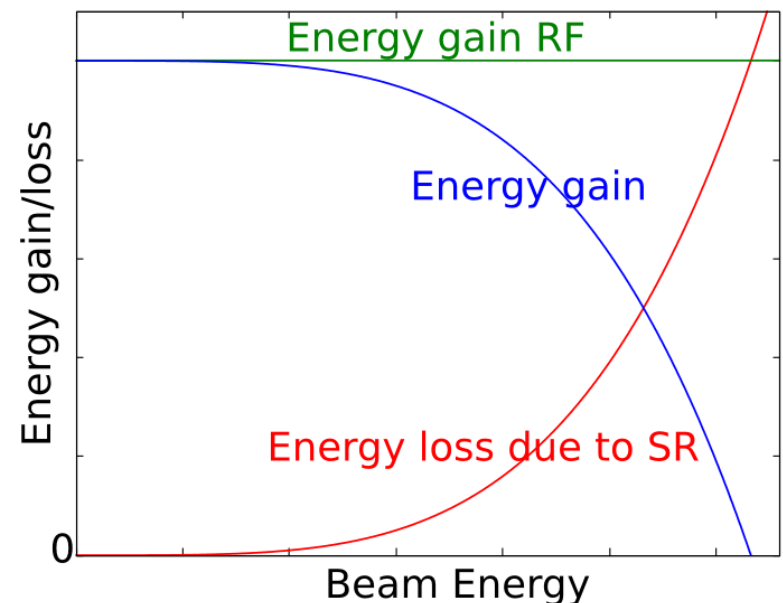
$$T_{RF} \propto \frac{1}{\beta}$$

Излучательные потери

- Ускоряемые заряженные частицы излучают
 - Центростремительное ускорение в диполе вызывает синхротронное излучение

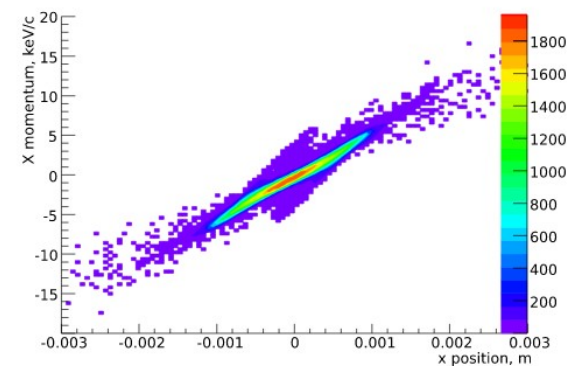
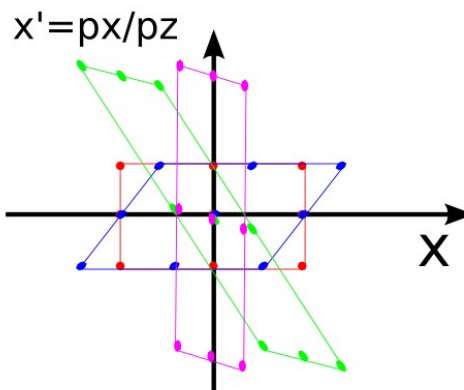
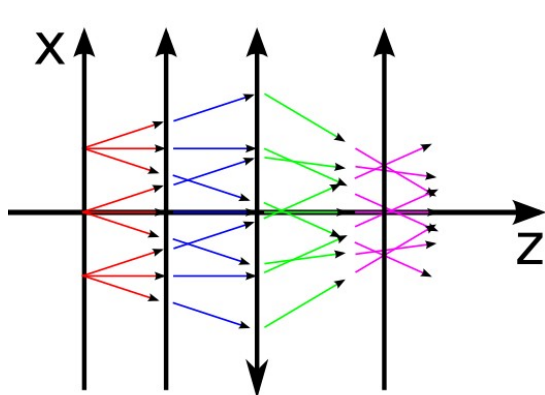
$$\Delta W_r \propto \frac{\gamma^4}{R}$$

- Чтобы удвоить энергию ЛНС, нужно увеличить прирост энергии на один оборот в !16! раз, или же радиус туннеля.



Поперечный Эмиттанс

- Мера сжимаемости пучка в поперечном фокусирующем канале
 - Эмиттанс – это площадь фазового портрета пучка
 - Размер пучка зависит от эмиттенса при заданном фокусирующем канале
 - Эмиттанс пучка в нулевом приближении сохраняется

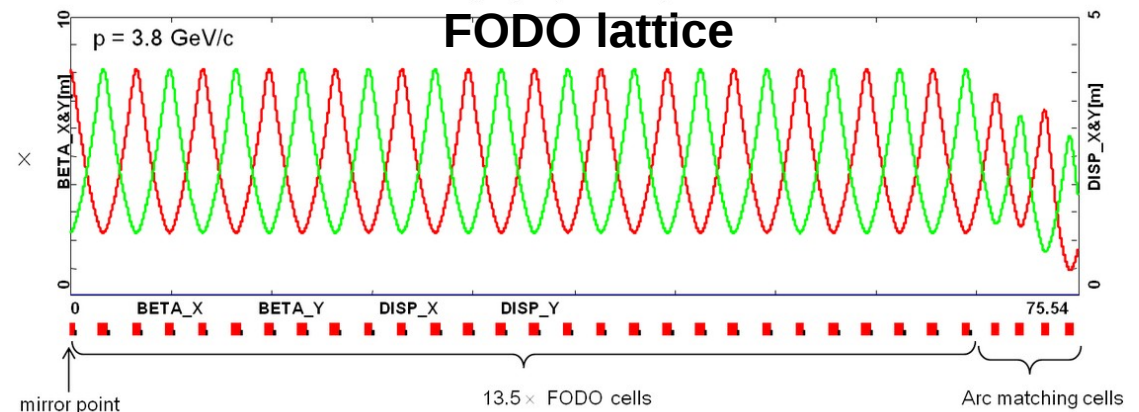
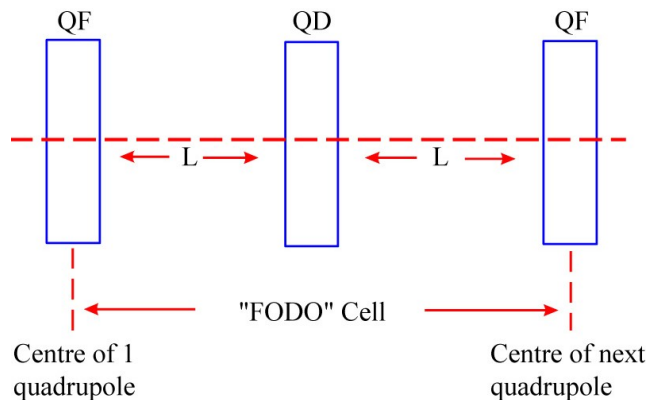
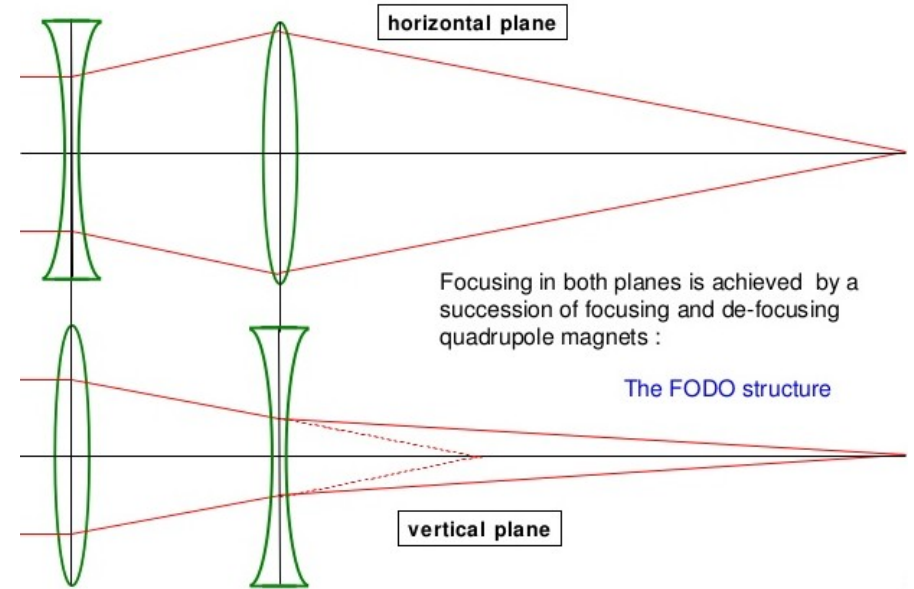


(a): bunch projected

Фокусировка пучка

- Чередуюя quads двух полярностей можно сфокусировать пучок в обеих ПЛОСКОСТЯХ
 - Квадрупольный дублет
 - FODO cell
 - Фокусирующий канал периодическая решетка квадрупольных линз

Accelerator lattice



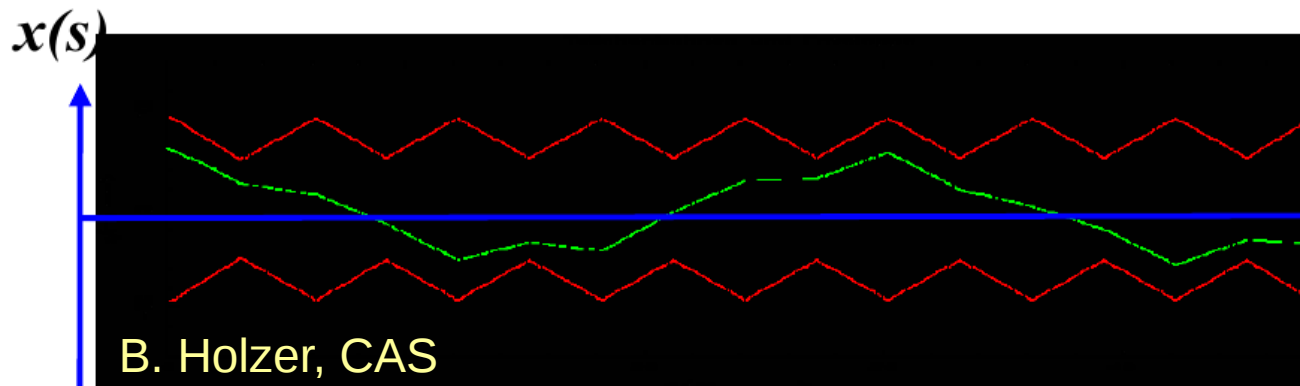
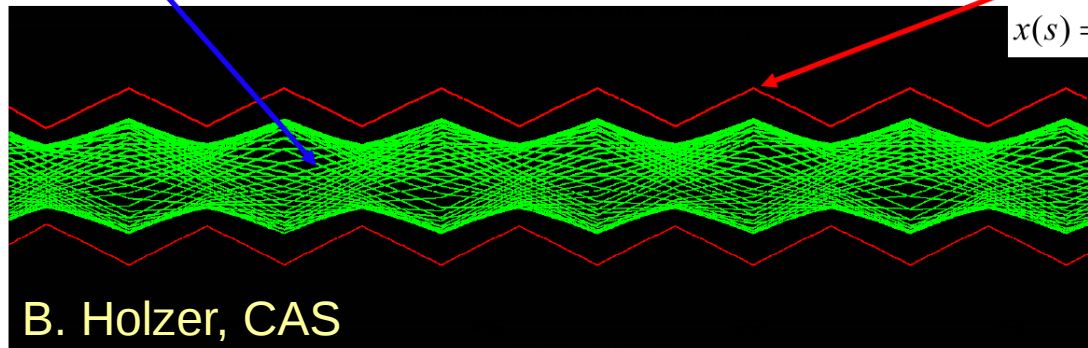
Бетатронные колебания

- Поперечные колебания в канале фокусирующей решетки

$$x(s) = \sqrt{\varepsilon} * \sqrt{\beta(s)} * \cos(\psi(s) + \phi)$$

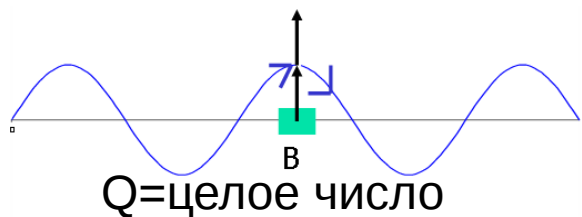
max. amplitude of all particle trajectories

$$x(s) = \sqrt{\varepsilon} * \sqrt{\beta(s)}$$

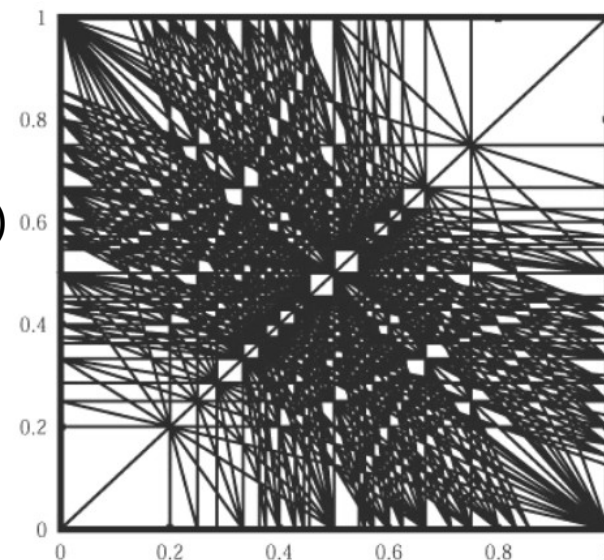
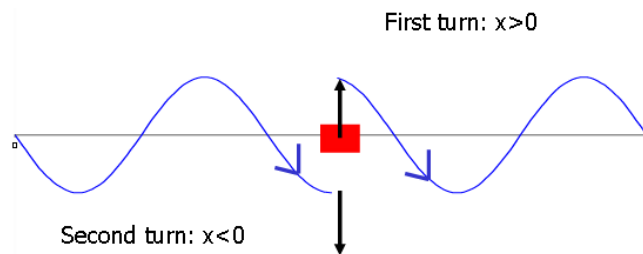
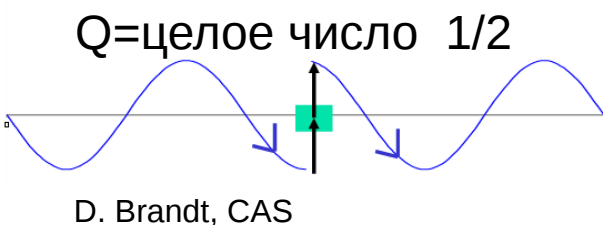


Циклическая неустойчивость

- Количество бетатронных колебаний на один полный оборот в ускорителе целое число
 - Резонансный рост амплитуды колебаний в диполях из-за малых отклонений значения поля
- Количество бетатронных колебаний на один полный оборот в ускорителе целое число полу-колебаний
 - Резонансный рост амплитуды колебаний в квадрупольях из-за малых отклонений значения поля

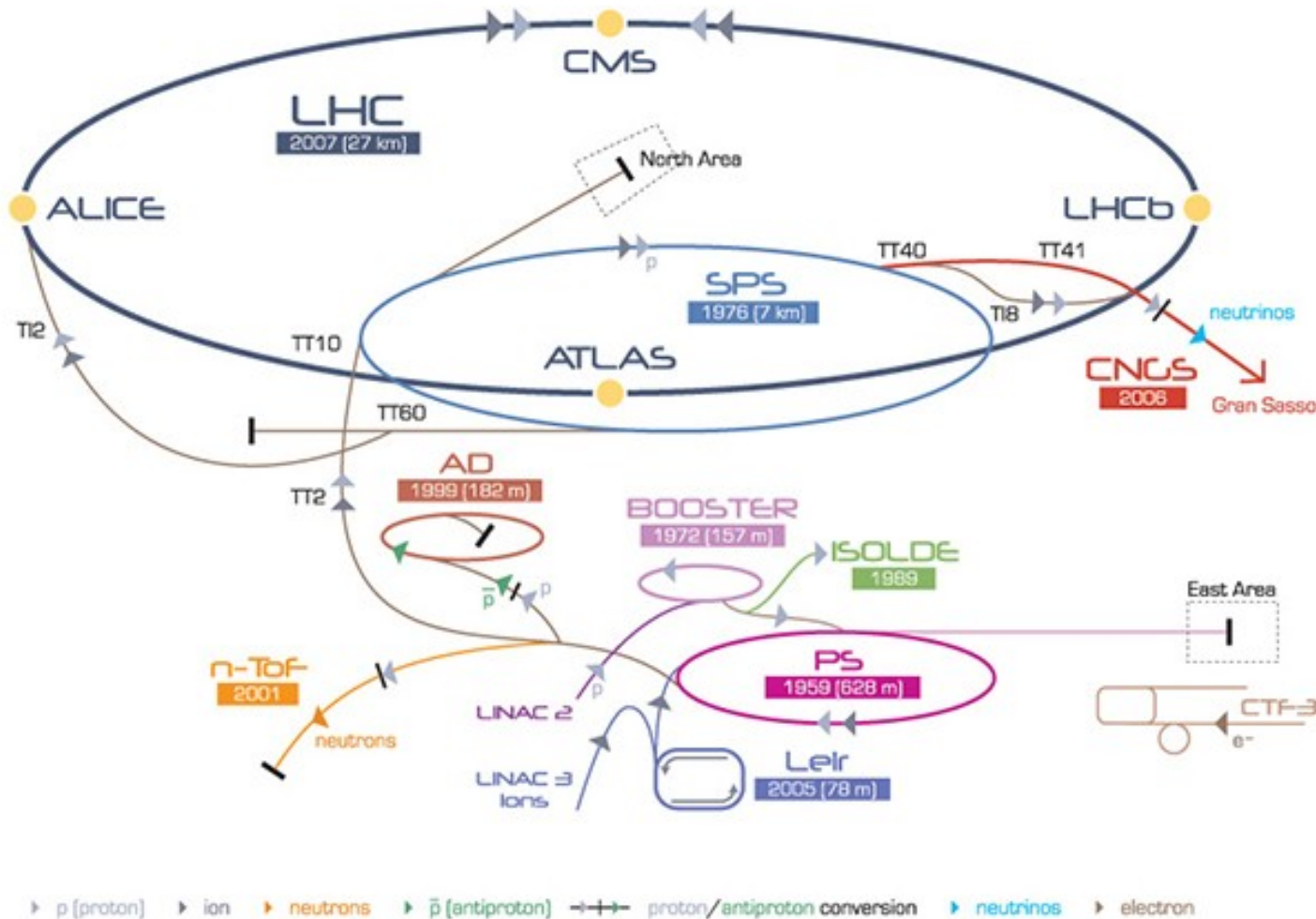


ЛНС: 11 000 оборотов в секунду
2808 банчей в кольце (25 нс/банч)
Время жизни пучка 10 часов



ЦЕРН

CERN Accelerator Complex



LHC

- 50 to 175m under ground
- 450 GeV to 7 TeV
- 27 km long tunnel
- 4 interaction points
- 100+ MW electricity power consumption
- 12 million litres of liquid nitrogen for initial cool down,
- 10^{11} protons per bunch are focused to 64 μm in the interaction point, only 20 interactions per crossing

LHC Large Hadron Collider SPS Super Proton Synchrotron PS Proton Synchrotron

AD Antiproton Decelerator CTF3 Clic Test Facility CNCS Cern Neutrinos to Gran Sasso ISOLDE Isotope Separator OnLine DEvice

LEIR Low Energy Ion Ring LINAC LINear ACcelerator n-ToF Neutrons Time Of Flight

ИСТОЧНИКИ

- CERN Accelerator school, **CAS**
- US Particle accelerator school, **USPAS**
- Joint University Accelerator School, **JUAS**
- The Joint Accelerator Conferences Website, **jacow.org**
- Physical Review Accelerators and Beams, **PRST AB**, free access online journal.

АНОНС

- Ускорители вне физики высоких энергий
 - LHC для школьной лаборатории: концепции суперкомпактных ускорителей
 - “Звездные войны”: ускоритель на орбите и в океане и что досталось фундаментальной науке
 - Безопасная ядерная энергетика
 - Ускоритель в каждой больнице

Спасибо за внимание!

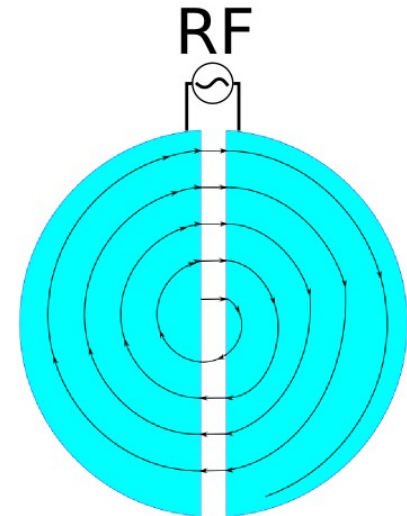
Синхро-циклотрон

- Магнитное поле постоянно. Изменение периода ВЧ поля

$$T_{RF} = 2\pi \frac{R}{V} = 2\pi \frac{m}{qB}$$

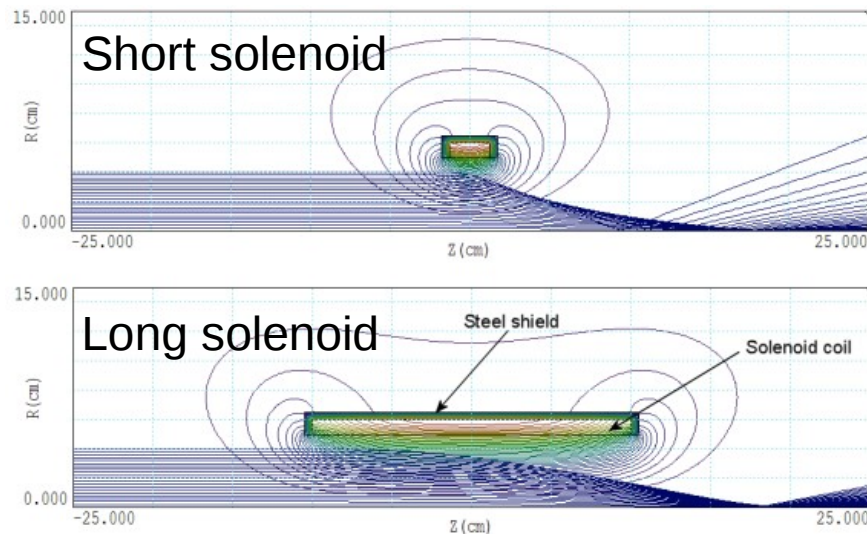
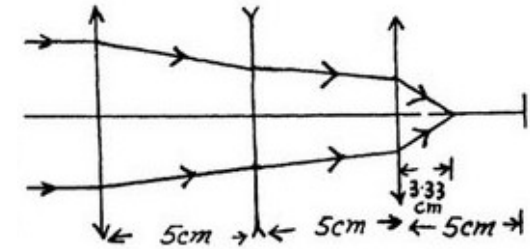
$$\frac{T_{RF}}{m} = const$$

- Наличие слабой фокусировки

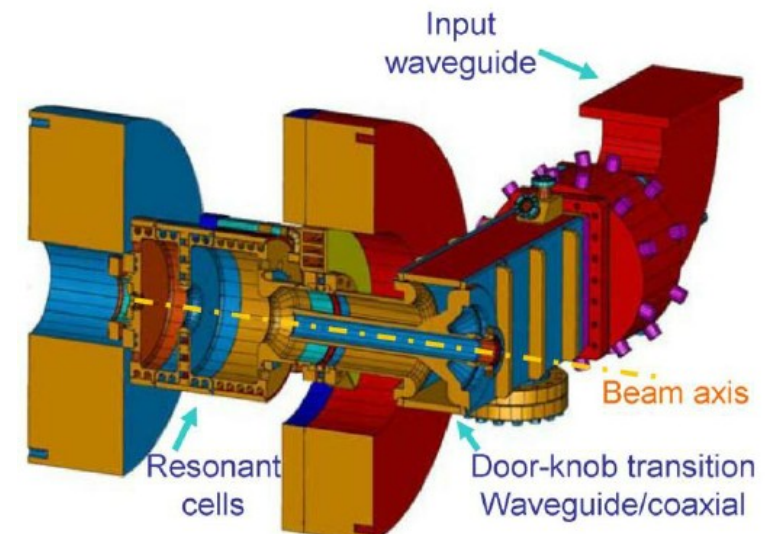


Фокусировка

- Оптика пучка заряженных частиц
 - Методы геометрической оптики
- Соленоидная фокусировка
 - В двух плоскостях одновременно

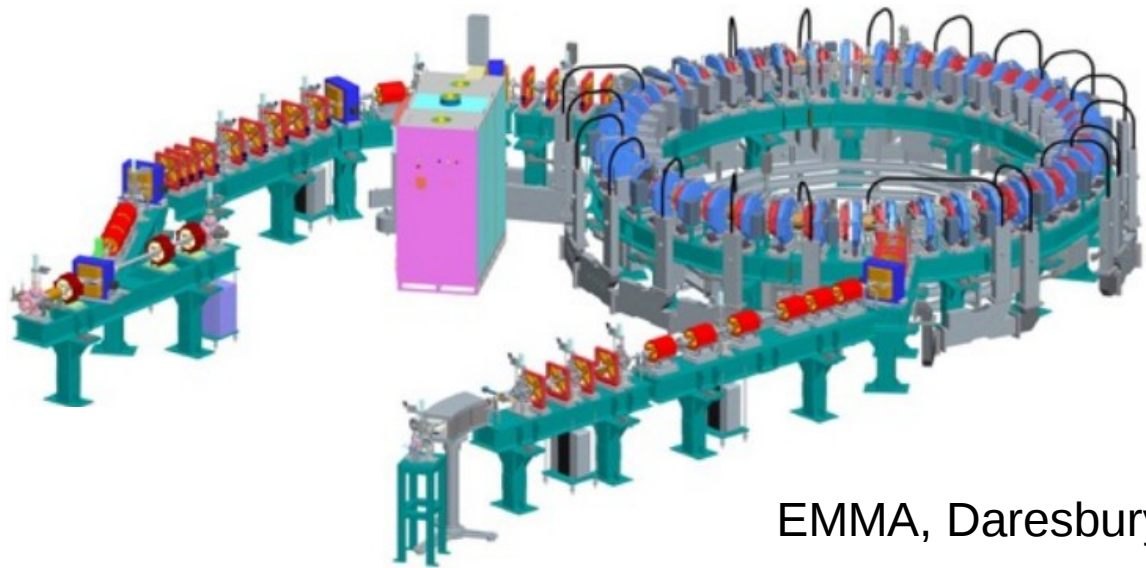
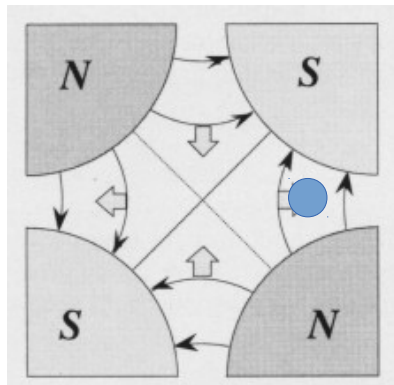


PITZ, DESY, Zeuthen



FFAG

- Fixed field alternating gradient
 - Магнитное поле не меняется
 - Диполи не обязательны
 - ВЧ поле меняется



EMMA, Daresbury