



JOINT INSTITUTE
FOR NUCLEAR RESEARCH

27 августа 2024 г.

Нет обид обиднее на свете...

В.Л. Смирнов

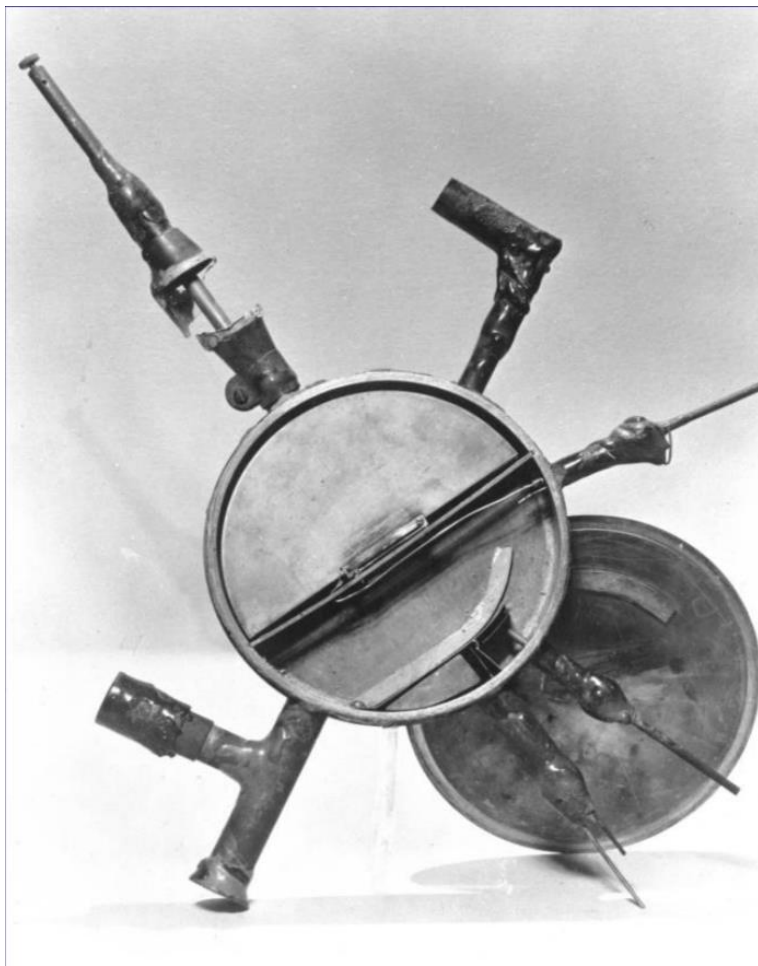
ОИЯИ, Дубна

Международная школа ускорительной физики: циклотроны, 25-30 августа 2024 г.

Цель и содержание доклада

- Основные типы кольцевых ускорителей: циклотрон (+синхроциклотрон) и синхротрон (синхрофазотрон)
- Синхротрон многократно сложнее, технически красивее и дороже циклотрона!
- Слышали такие мнения? Так ли много в них правды? Давайте разберёмся!

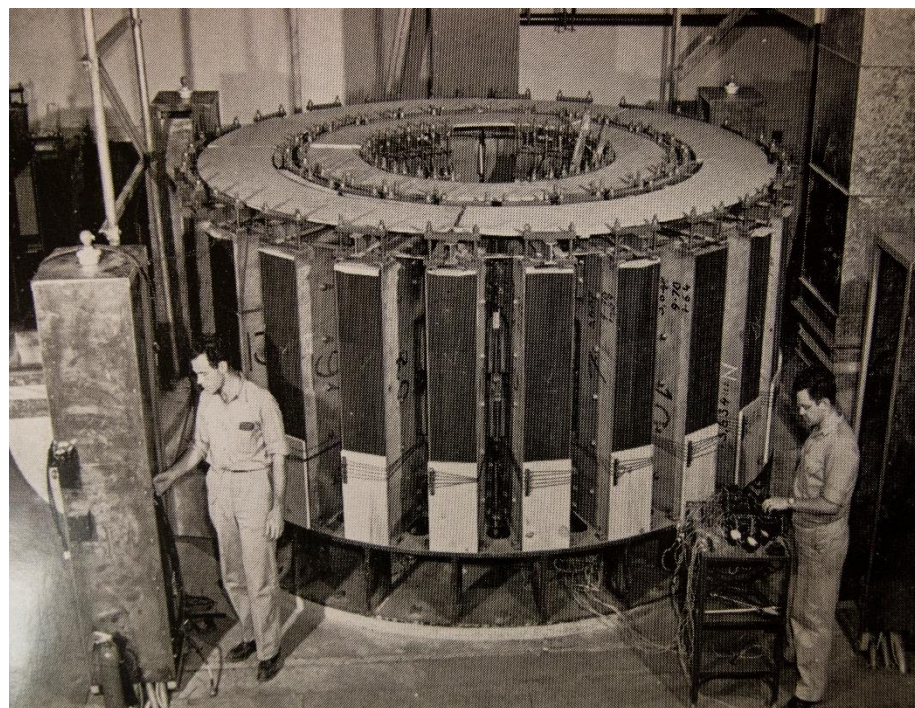
Первый в мире циклический ускоритель.
Циклотрон Лоуренса (1931 г, протоны 80 кэВ)



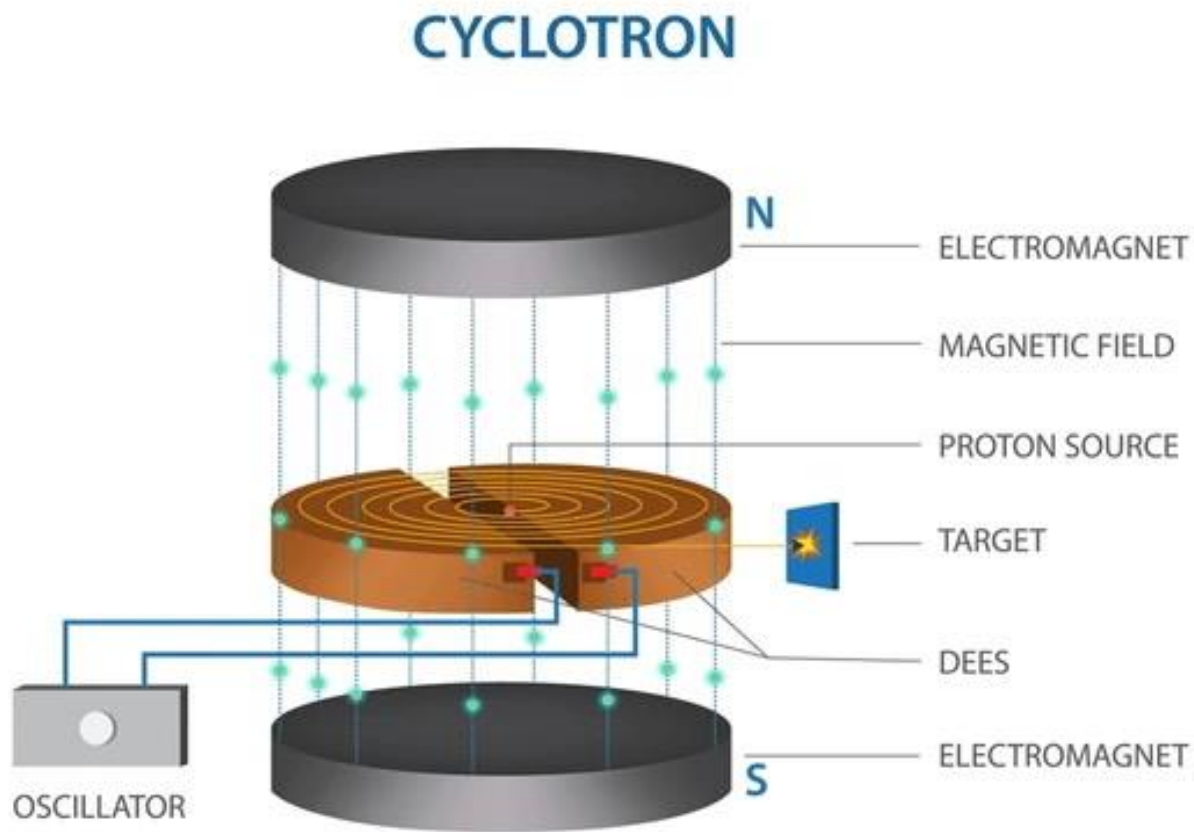
Циклотрон Радиевого института
(Ленинград, СССР, 1937 г).
Протоны 4 МэВ



Синхротрон Корнельского
университета (США, 1949 г).
Электроны 300 МэВ



Принципиальная схема классического циклотрона



Циклотрон

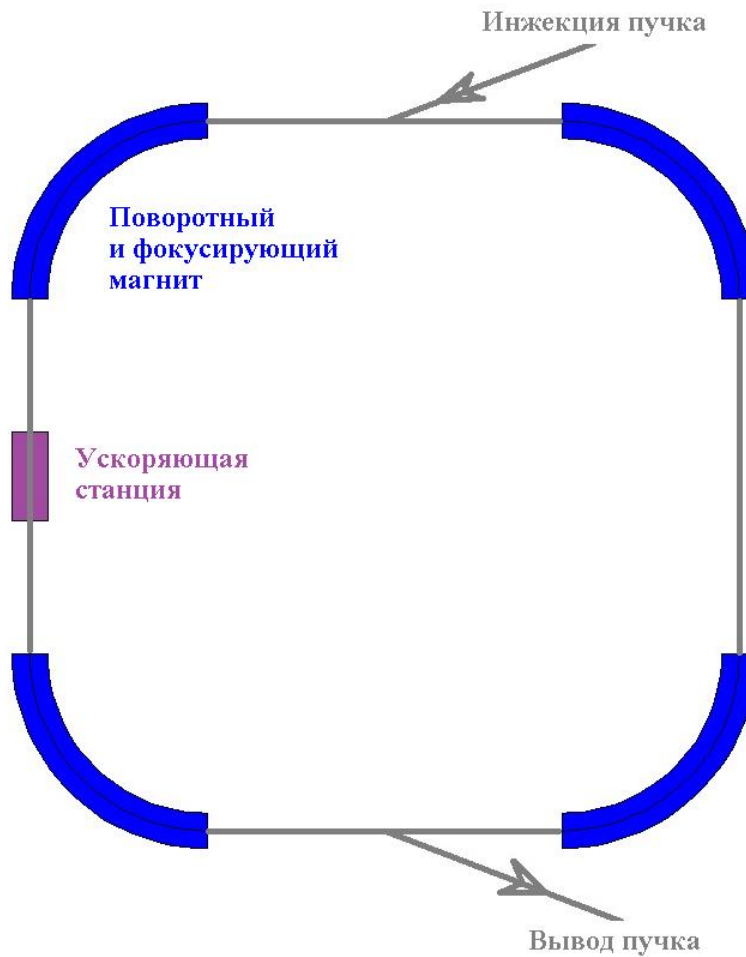
5



Синхротрон



Принципиальная схема слабофокусирующего синхротрона

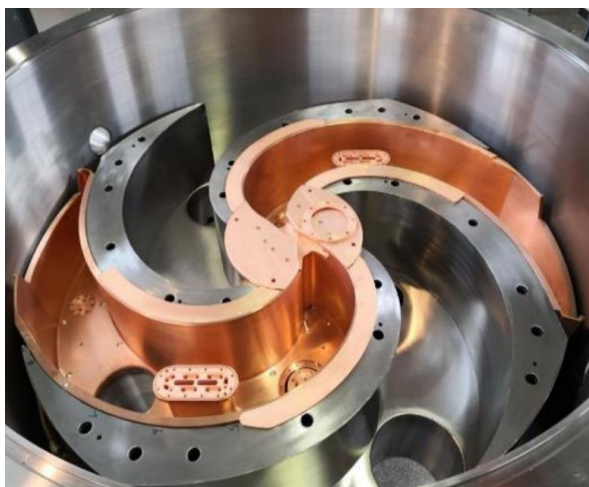


Циклотрон

Синхротрон



Магнитная система современного циклотрона

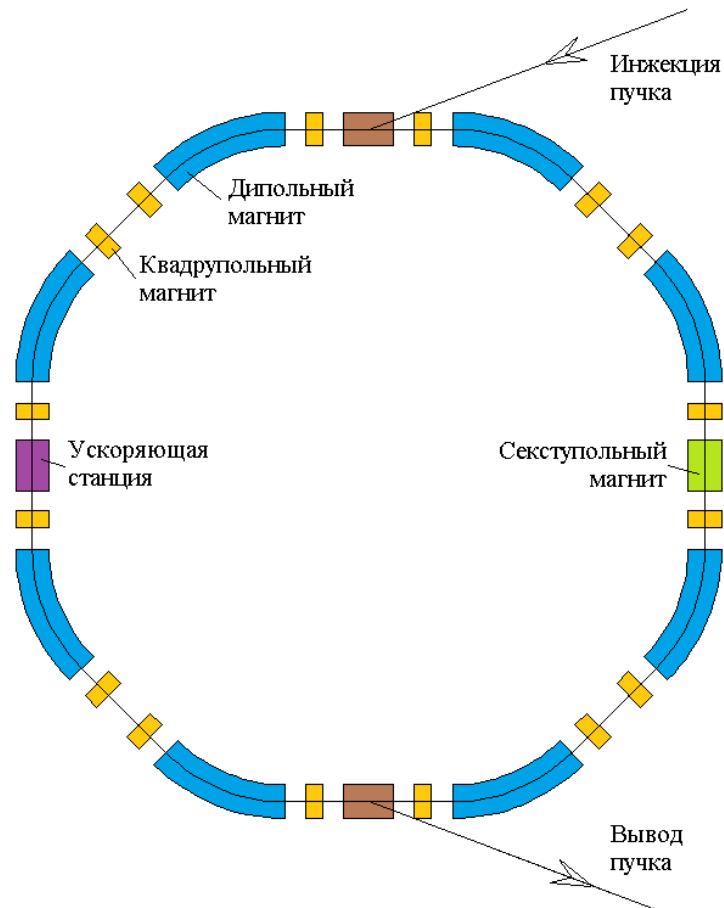


Циклотрон

Синхротрон



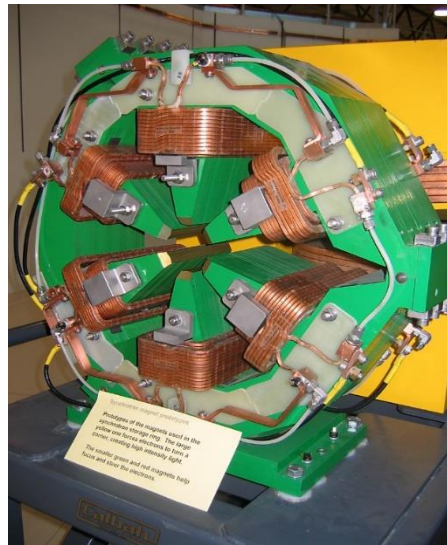
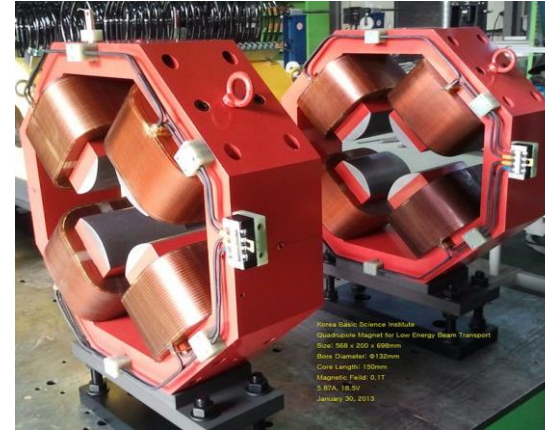
Магнитная система современного синхротрона



Циклотрон

Синхротрон

Магнитная система современного синхротрона



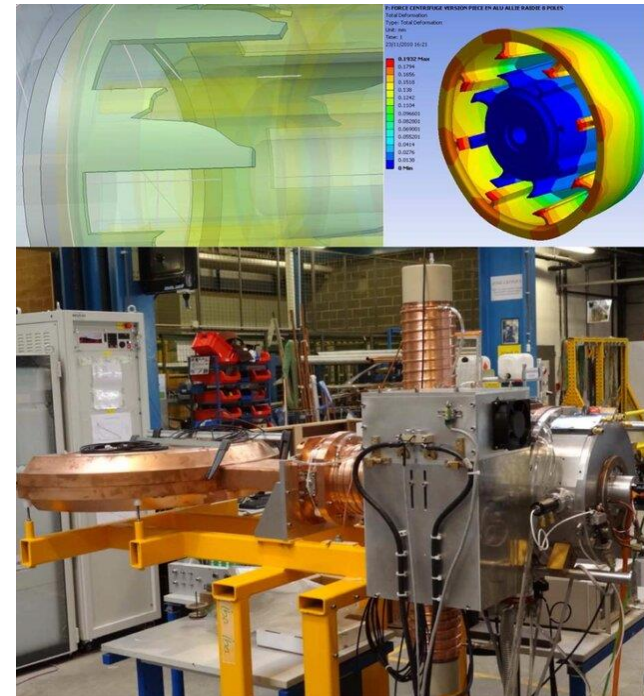
Циклотрон

Синхротрон

Ускоряющая система компактного циклотрона и синхроциклотрона



Циклотрон

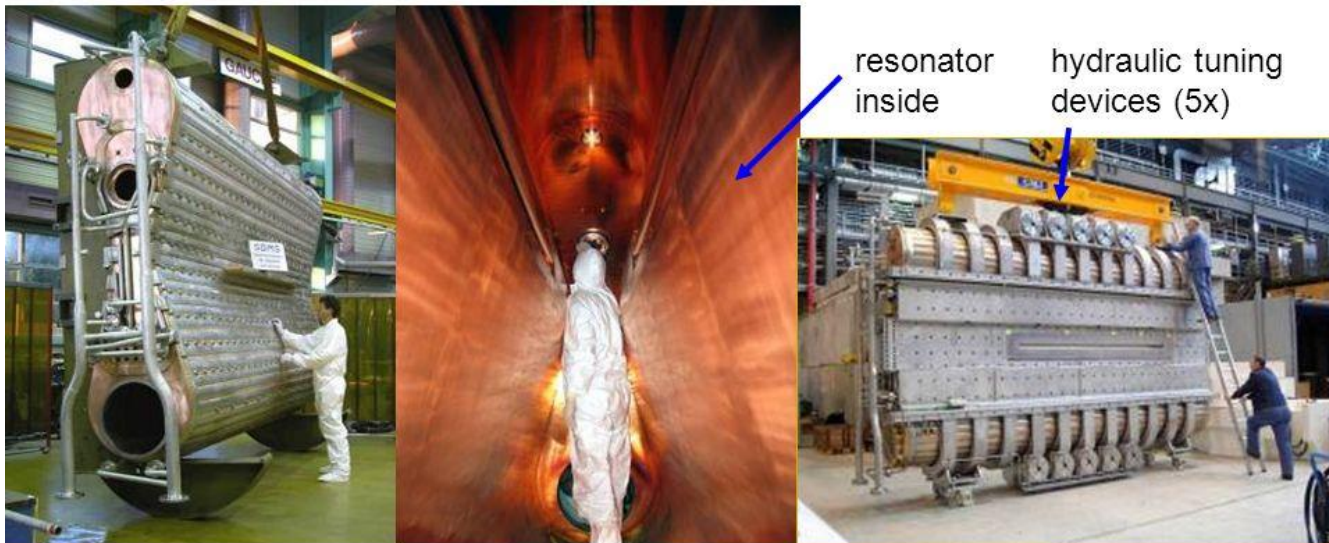


Синхротрон

Ускоряющая система секторного циклотрона

copper resonator in operation at PSI's Ring cyclotron

- $f = 50.6\text{MHz}$; $Q_0 = 4,8 \cdot 10^4$; $U_{\text{max}} = 1.2\text{MV}$ (presently 0.85MV)
- transfer of up to **400kW power to the beam** per cavity
- Wall Plug to Beam Efficiency (RF Systems): **32%**



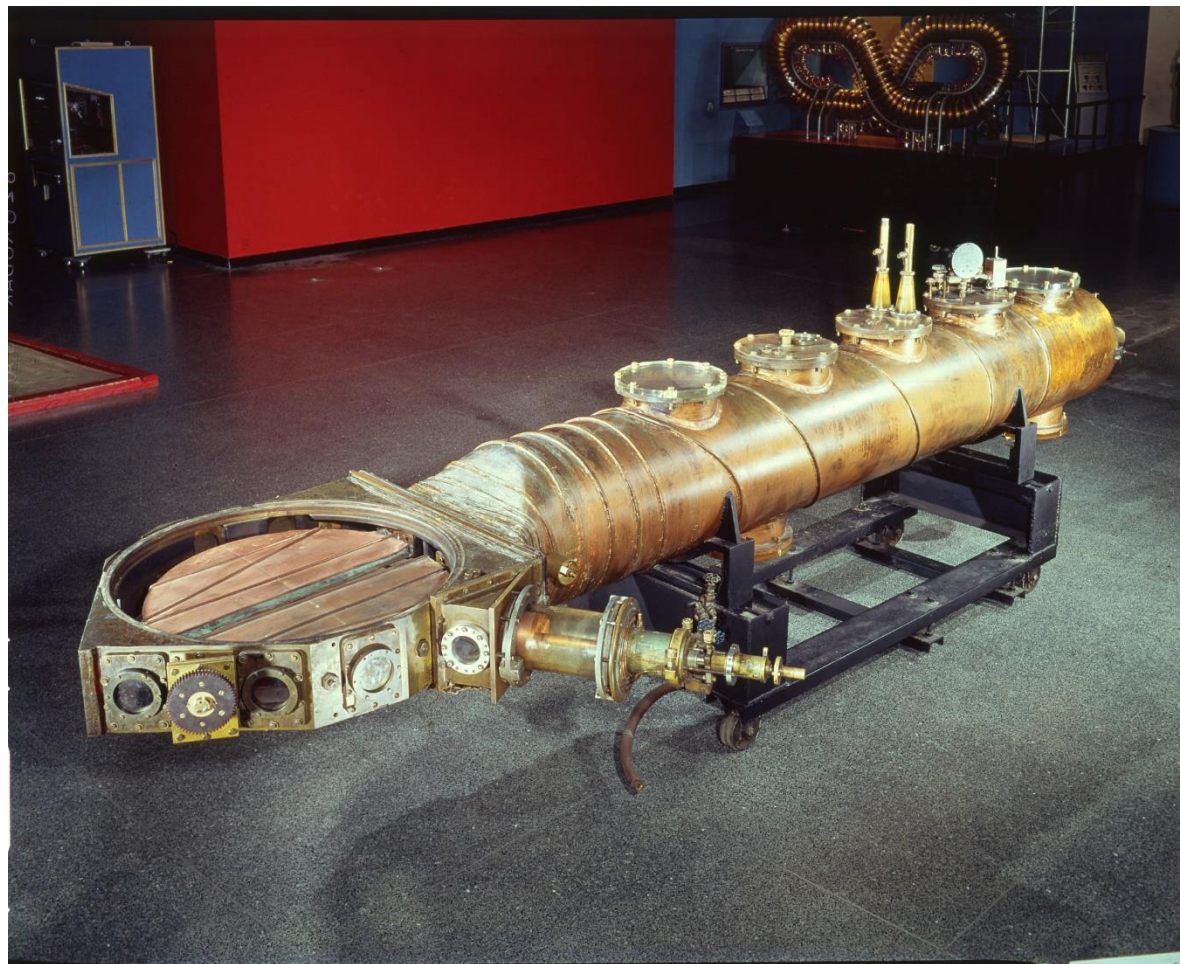
28

Циклотрон

Синхротрон



Ускоряющая система циклотрона 1939 г. (Колумбия, США)

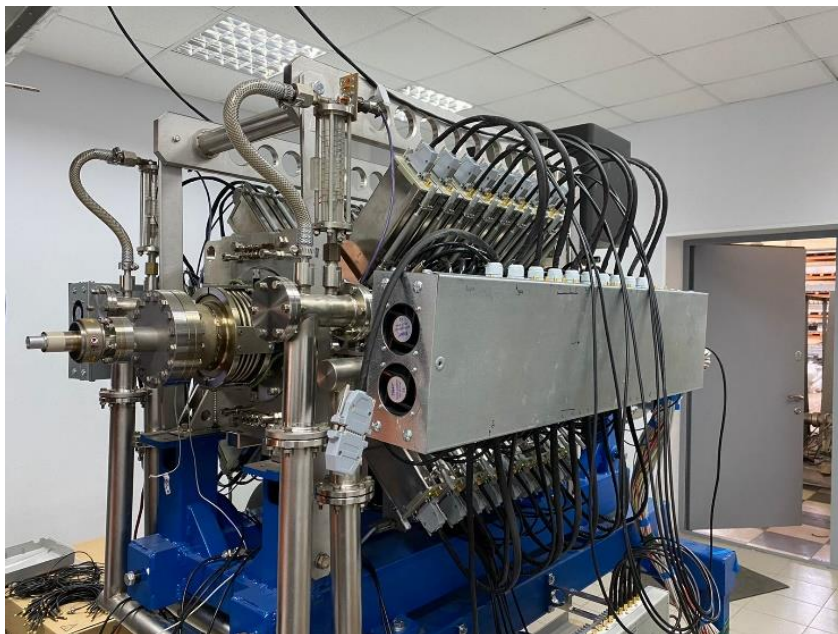


Циклотрон

12

Синхротрон

Ускоряющая система синхротрона

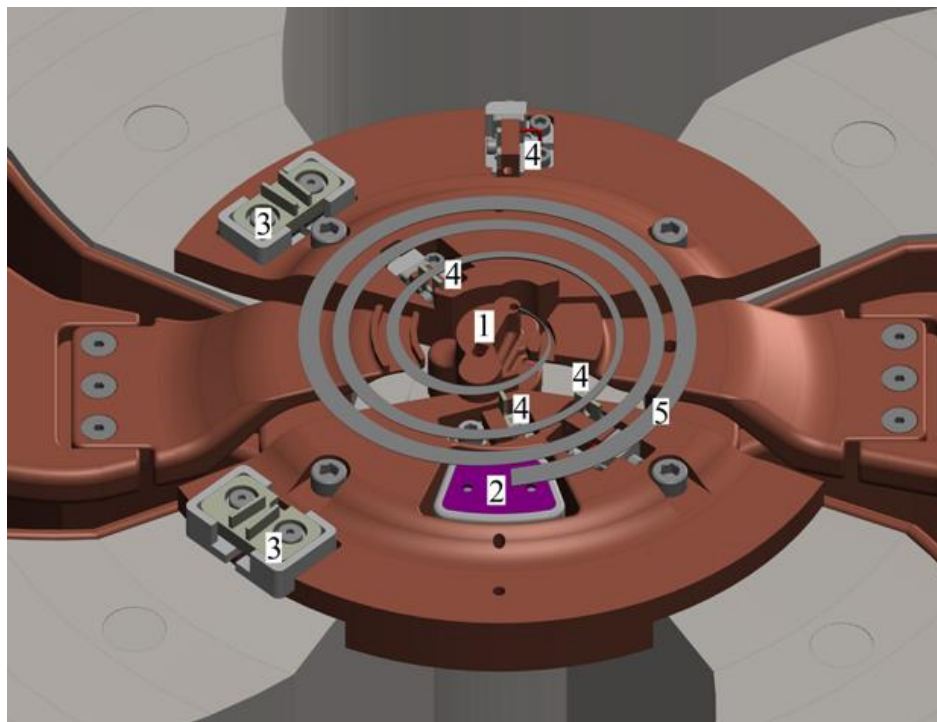


Циклотрон



Синхротрон

Система инжекции современного циклотрона



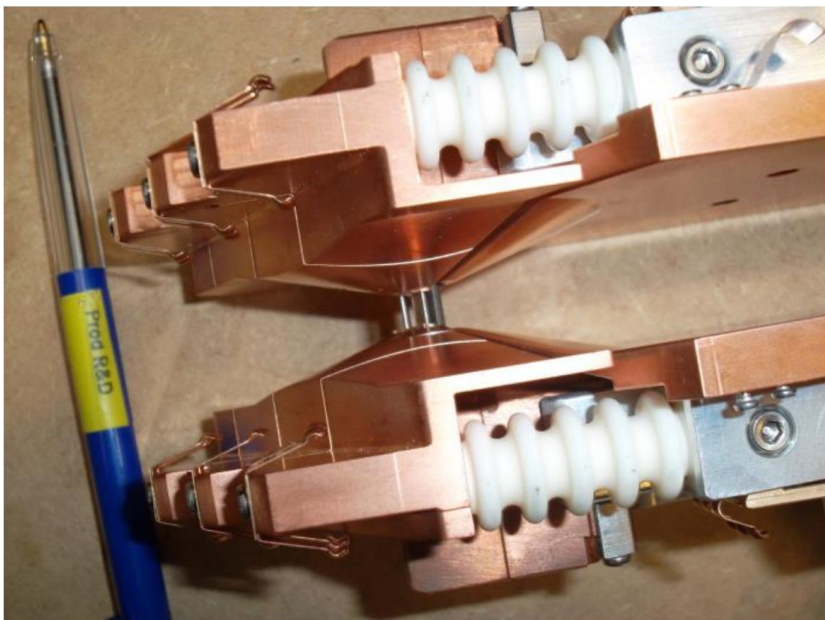
Циклотрон



Синхротрон



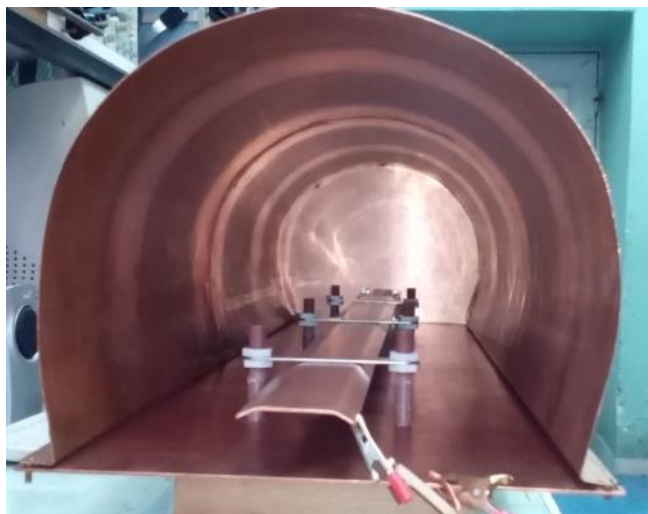
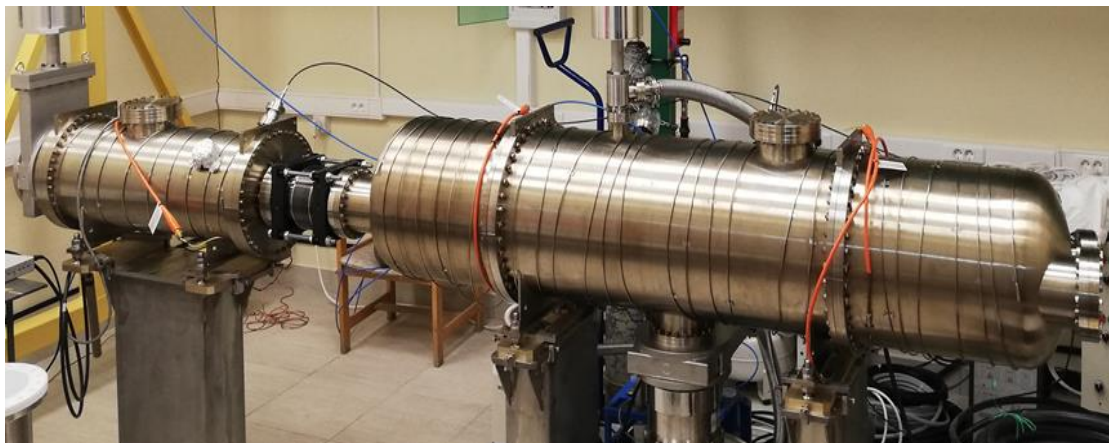
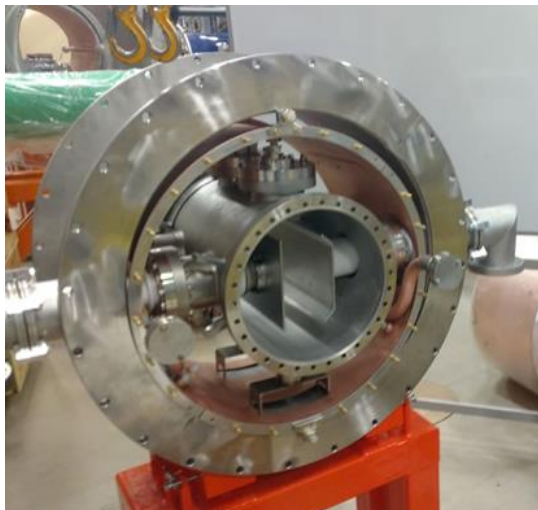
Система инжекции современного циклотрона



Циклотрон

Синхротрон

Система инъекции современного синхротрона



Циклотрон



Синхротрон

Выводная система циклотрона (электростатический дефлектор)

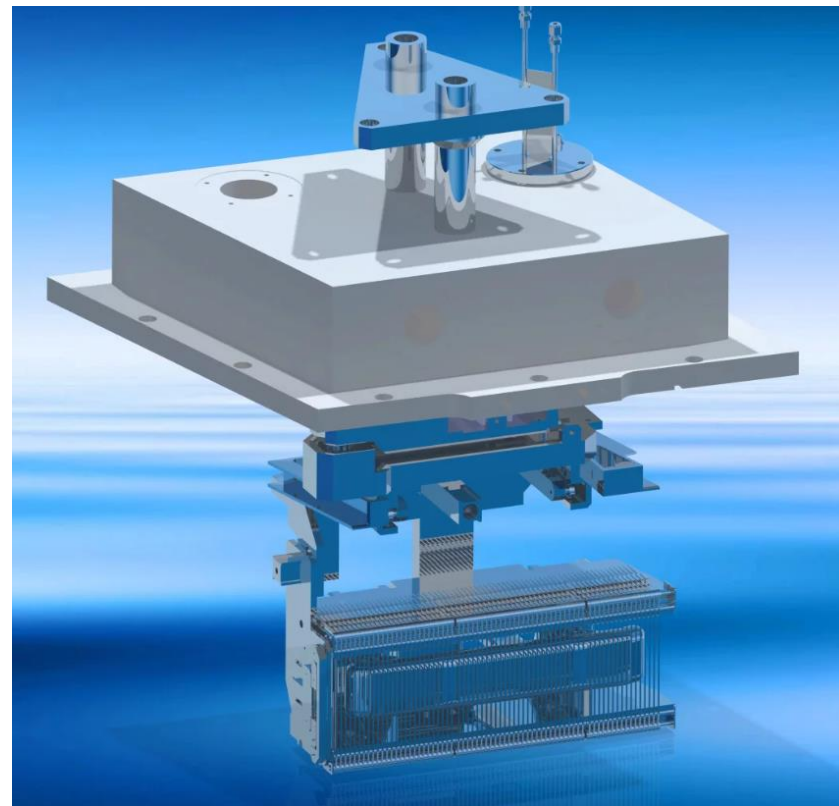
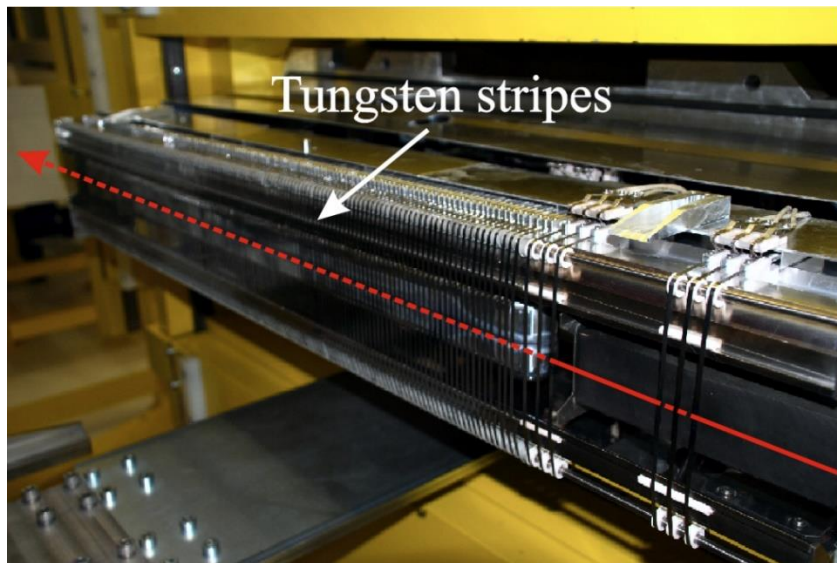


Циклотрон



Синхротрон

Выводная система циклотрона (электростатический дефлектор)



Циклотрон

Синхротрон

Выводная система циклотрона (магнитные каналы)

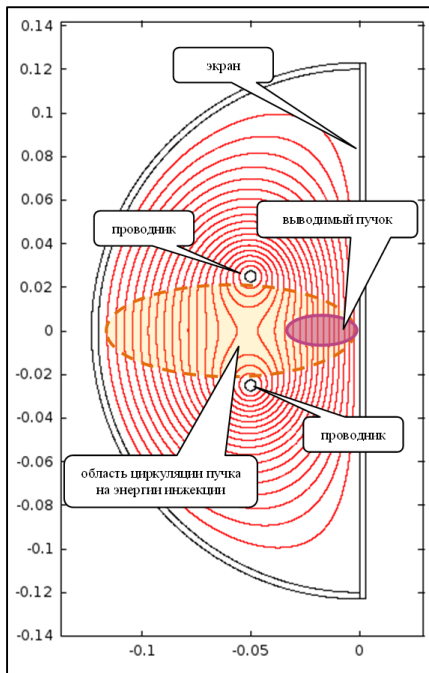


Циклотрон



Синхротрон

Выводная система синхротрона (кикер)

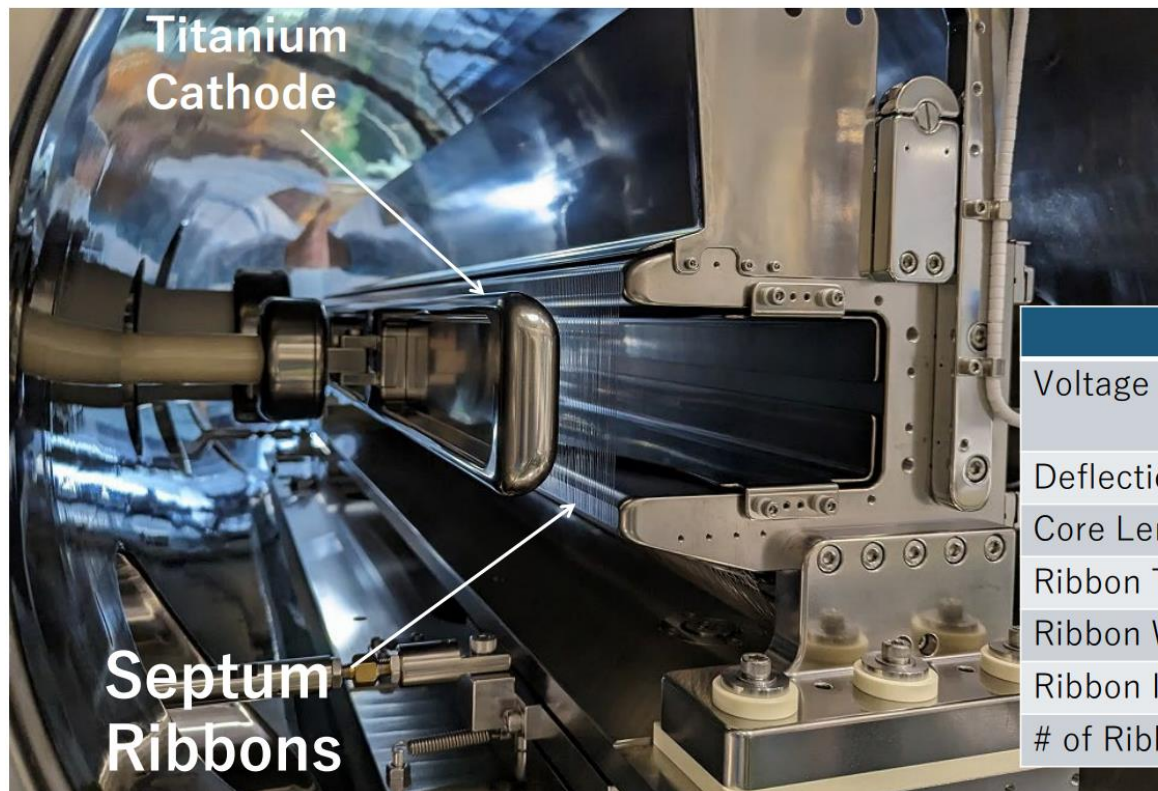


Циклотрон

Синхротрон

Инжекционная система синхротрона (электростатический дефлектор)

Electrostatic Septum (ESS) in J-PARC MR

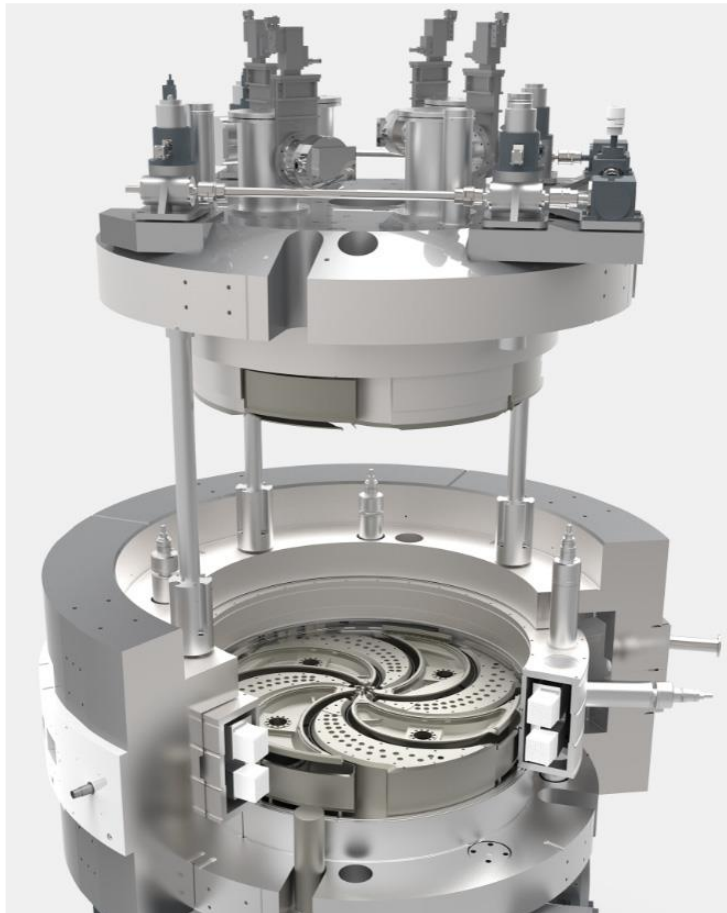


	ESS1,2
Voltage / Gap	104 kV / 25 mm = 4.2 MV/m
Deflection Angle	- 0.2 mrad
Core Length	1.5 m
Ribbon Thickness	30 μ m
Ribbon Width	1 mm
Ribbon Interval	3 mm
# of Ribbons	495

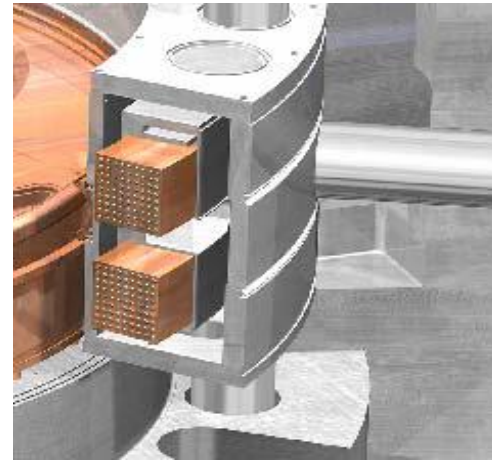
Циклотрон

Синхротрон

Использование сверхпроводимости в циклотронах (применение криокуллеров)

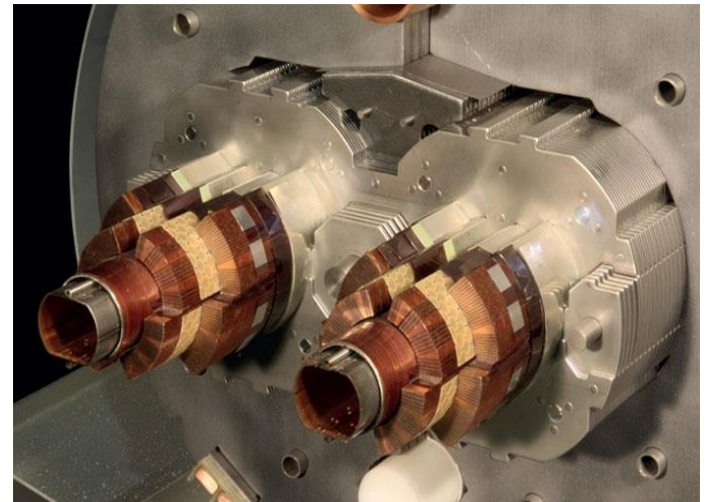


Циклотрон



Синхротрон

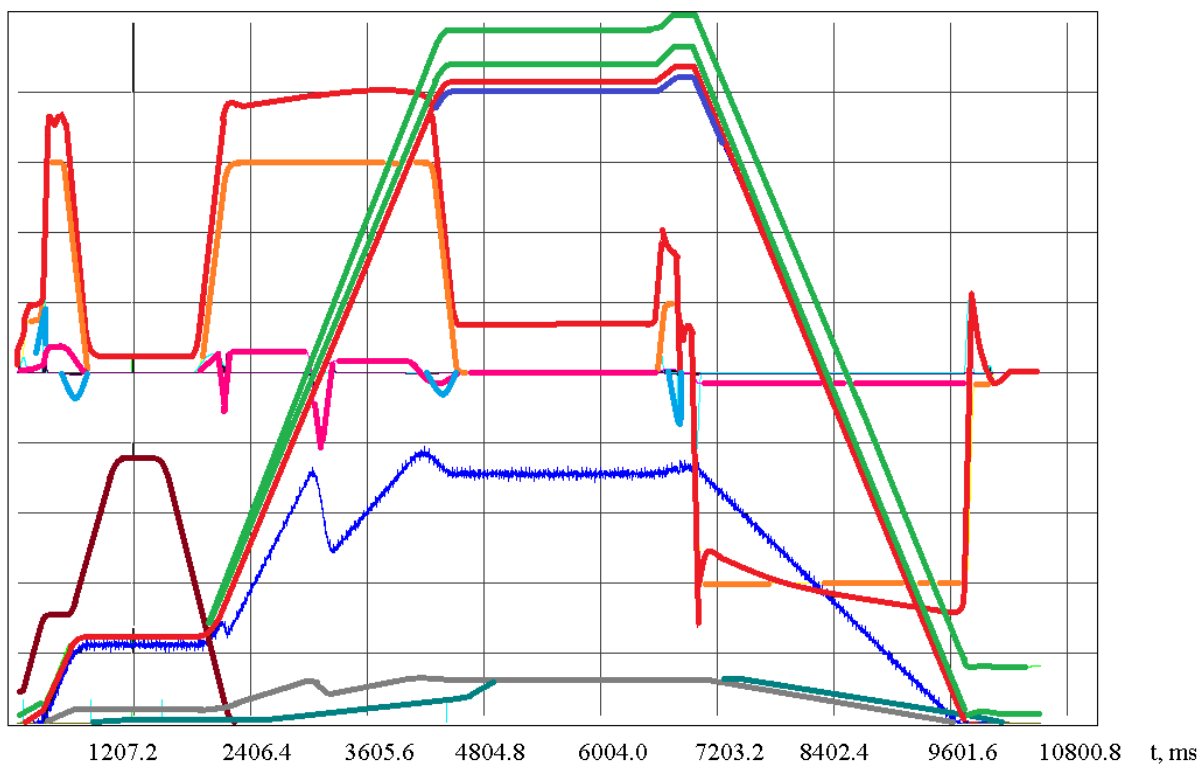
Использование сверхпроводимости в синхротронах (охлаждение проточным гелием)



Циклотрон

Синхротрон

Зависимость магнитных полей в синхротроне от времени



Циклотрон

Синхротрон

Методы расчета динамики пучка в циклотроне

Интегрирование уравнений
движения методом Рунге-Кутта

$$x'' = \frac{q}{m} \sqrt{1 - \beta^2} \left[+ \left(1 - \frac{v_x^2}{c^2} \right) F_x - \frac{v_x v_y}{c^2} F_y - \frac{v_x v_z}{c^2} F_z \right],$$

$$y'' = \frac{q}{m} \sqrt{1 - \beta^2} \left[- \frac{v_x v_y}{c^2} F_x + \left(1 - \frac{v_y^2}{c^2} \right) F_y - \frac{v_y v_z}{c^2} F_z \right],$$

$$z'' = \frac{q}{m} \sqrt{1 - \beta^2} \left[- \frac{v_x v_z}{c^2} F_x - \frac{v_y v_z}{c^2} F_y + \left(1 - \frac{v_z^2}{c^2} \right) F_z \right].$$

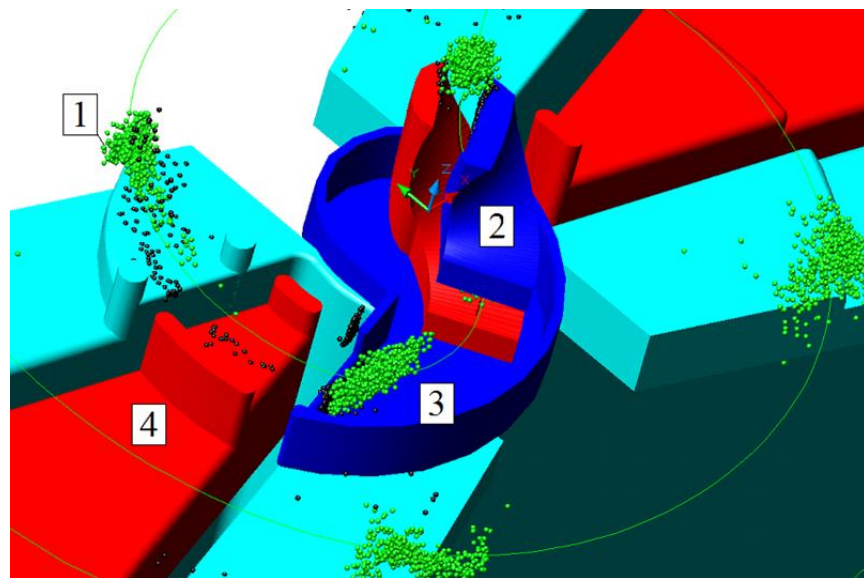
$$F_x = v_y B_z - v_z B_y + E_x,$$

$$F_y = v_z B_x - v_x B_z + E_y,$$

$$F_z = v_x B_y - v_y B_x + E_z.$$

Расчет собственного поля пучка,
решая уравнение Пуассона и используя
методы частиц-в-ячейках

$$\nabla^2 \varphi = -\rho / \epsilon_0,$$



Циклотрон

Синхротрон

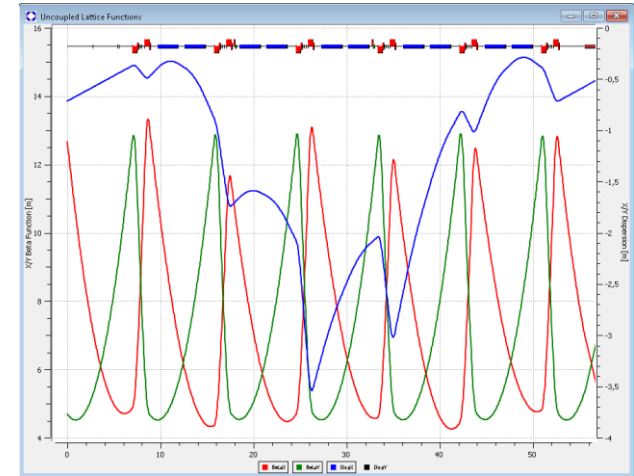
Методы расчета динамики пучка в синхротроне

Расчет движения частиц матричным способом

$$\mathbf{v}(s) = \begin{bmatrix} \sqrt{\beta(s)} \\ -\frac{i + \alpha(s)}{\sqrt{\beta(s)}} \end{bmatrix}, \quad \begin{cases} \mathbf{v}_1 = \mathbf{v} \\ \mathbf{v}_2 = \mathbf{v}^* \end{cases}$$

$$\mathbf{x}(s) = \text{Re} \left(\sqrt{2I_1} \mathbf{v}_1(s) e^{-i(\psi_1 + \mu_1(s))} + \sqrt{2I_2} \mathbf{v}_2(s) e^{-i(\psi_2 + \mu_2(s))} \right)$$

$$M_{1-2} = \begin{pmatrix} \sqrt{\frac{\beta_2}{\beta_1}} [\cos(\mu_{1-2}) + \alpha_1 \sin(\mu_{1-2})] & \sqrt{\beta_1 \beta_2} \sin(\mu_{1-2}) \\ -\frac{1}{\sqrt{\beta_1 \beta_2}} [(1 + \alpha_1 \alpha_2) \sin(\mu_{1-2}) + (\alpha_2 - \alpha_1) \cos(\mu_{1-2})] & \sqrt{\frac{\beta_1}{\beta_2}} [\cos(\mu_{1-2}) - \alpha_2 \sin(\mu_{1-2})] \end{pmatrix}$$



Обеспечение симплектичности

$$M^T U M = U$$

Существует значительное количество программ расчета синхротронов (MAD-X, Zgoobi, OptiMX, PyOrbit, COSY, Lifetrac, ...)

Циклотрон

Синхротрон



Расчет динамики пучка в циклотроне (центральная зона)

Движение заряженной частицы в
электромагнитном поле

$$x = \frac{A}{2} \left\{ \frac{2}{1-4K^2} + \frac{\cos(2K-1)b}{2K-1} - \frac{\cos(2K+1)b}{2K+1} \right\},$$

$$y = \frac{A}{2} \left\{ \frac{\sin(2K+1)b}{2K+1} - \frac{\sin(2K-1)b}{2K-1} \right\},$$

$$z = -A \sin b,$$

$$b = \frac{v t}{A}, \quad A = \frac{m v^2}{q E}, \quad K = \frac{A}{2 \rho} + \frac{k'}{2}, \quad \rho = \frac{m v}{q B}$$

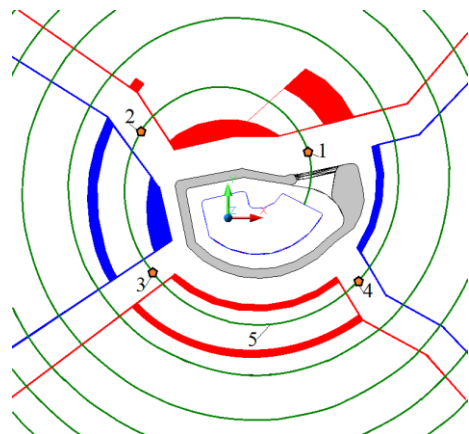


Циклотрон

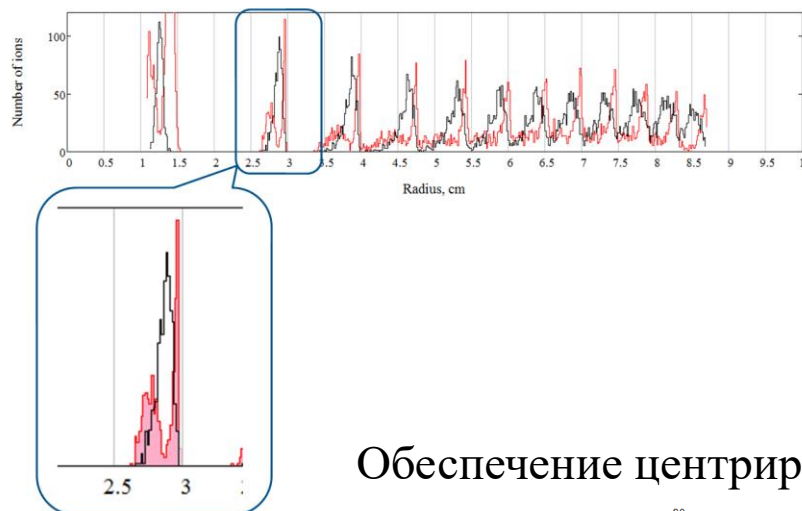
Синхротрон

Расчет динамики пучка в циклотроне (центральная зона)

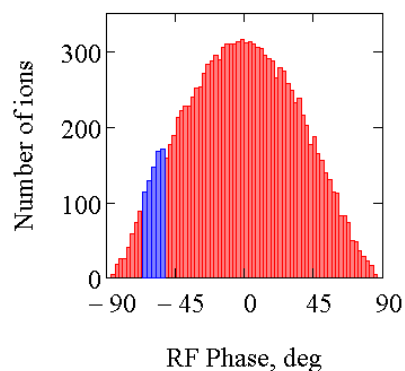
Набор энергии...



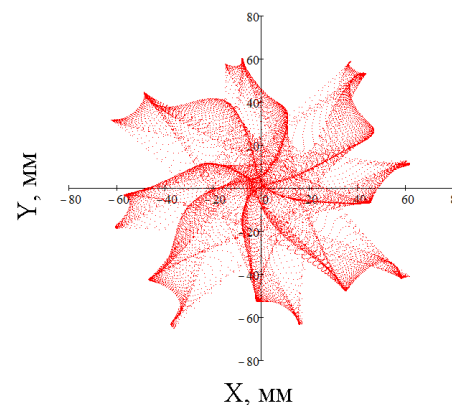
Выборка требуемого фазового диапазона...



Фокусировка выбранных частиц...



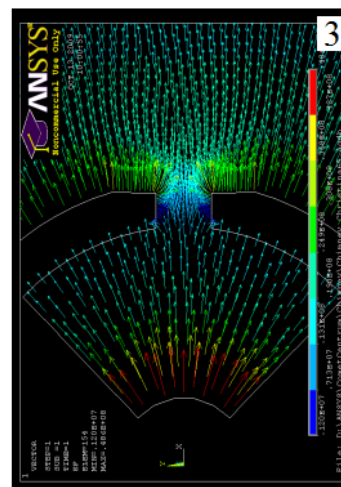
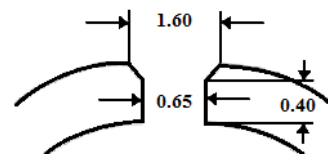
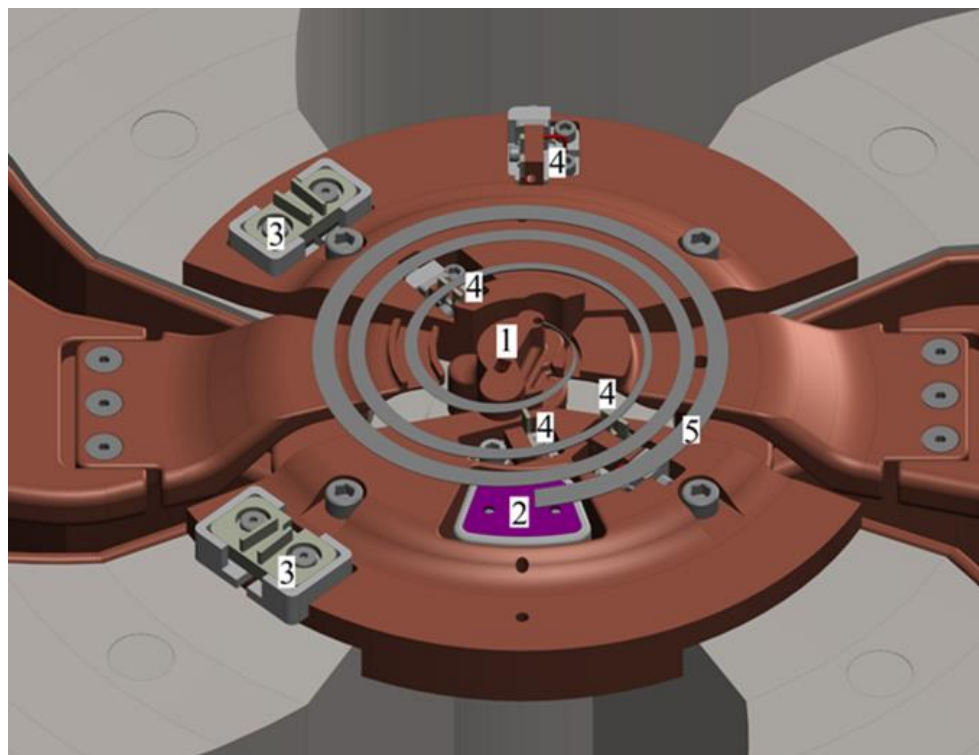
Обеспечение центрирования...



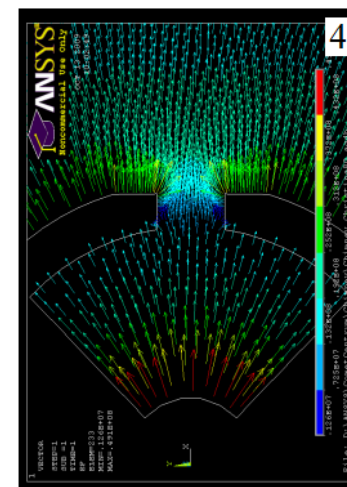
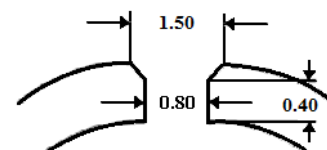
Циклотрон

Синхротрон

Формирование пучка с жесткими параметрам требует создания сложных развитых систем, в которых внимание к деталям является ключевым фактором



max I: 250 nA

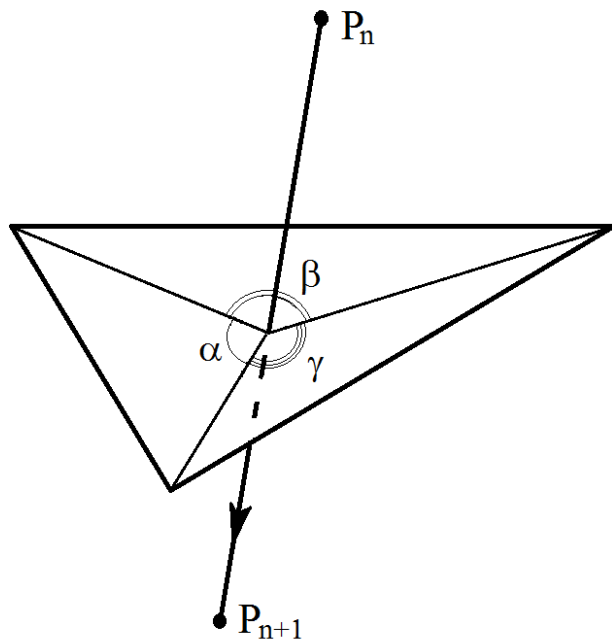


max I: 850 nA

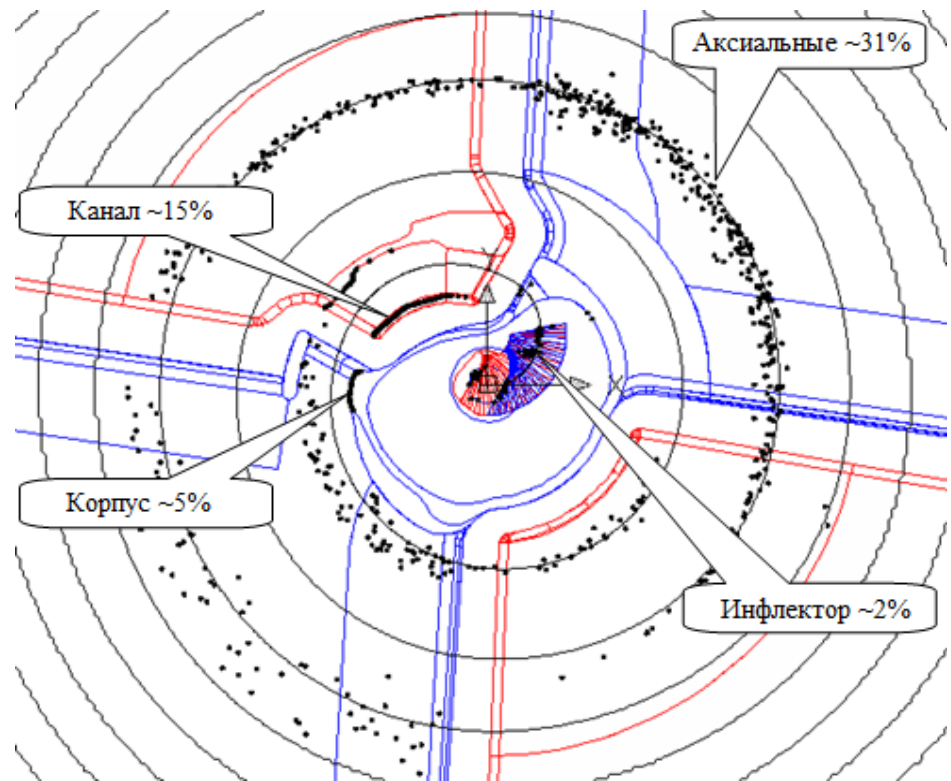
Циклотрон

Синхротрон

Учет потерь частиц на поверхностях структурных элементов.
Трехмерное тело представляется в виде набора триангулированных поверхностей. Исследуется пересечение частицей каждого из треугольников поверхности.



Циклотрон



Синхротрон

Расчет динамики пучка в синхротроне (инжекция)

Расчет требуемого электрического поля кикера

$$dp = \int F dt = \int q E dt = \int q E \frac{dl}{v} = \frac{q E l}{v}$$

$$x' = \frac{dp}{p} = \frac{q E l}{v \cdot p} = \frac{q E l}{v \cdot m v} = \frac{q E l}{m v^2}$$

$$E = x' \cdot \frac{m v^2}{q l}$$

+ расчет магнитного поля инжекционного магнита

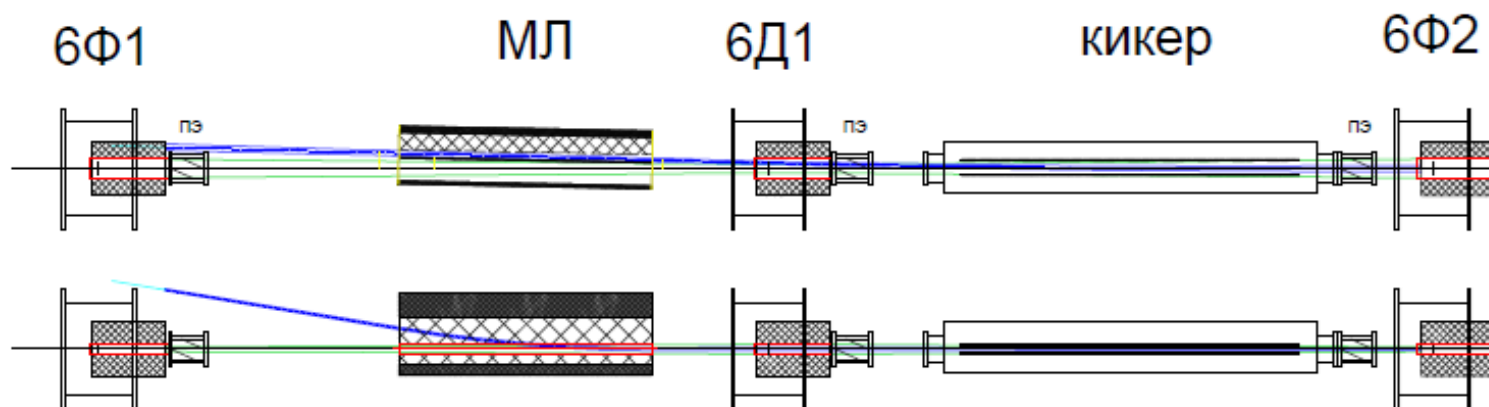
$$B = \mu_0 N I / g$$

Циклотрон

Синхротрон

Расчет динамики пучка в синхротроне (инжекция)

Матричный расчет посадки пучка на замкнутую орбиту



Циклотрон

Синхротрон

Расчет динамики пучка в циклотроне (выводная система)

Расчет структуры каналов в представлении системы намагниченных шимм

$$B(r) = M_0 \int_{h_1}^{h_2} (B_{loop}(r, r_2, h) - B_{loop}(r, r_1, h)) dh,$$

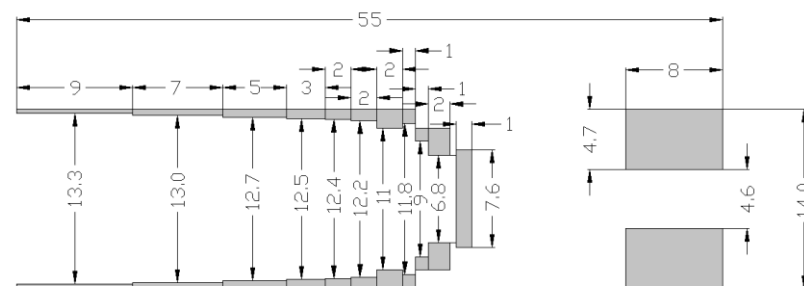
$$B_{loop}(r, R, h) = \frac{sc}{\sqrt{(r+R)^2 + h^2}} \left(K(r, R, h) + \frac{R^2 - r^2 - h^2}{(R-r)^2 + h^2} E(r, R, h) \right),$$

$$SC = \frac{\mu_0}{2\pi},$$

$$K(r, R, h) = \frac{\pi}{2} F_{HYPER} \left(\frac{1}{2}, \frac{1}{2}, 1, k(r, R, h) \right),$$

$$E(r, R, h) = \frac{\pi}{2} F_{HYPER} \left(\frac{1}{2}, -\frac{1}{2}, 1, k(r, R, h) \right),$$

$$k(r, R, h) = \frac{4rR}{(r+R)^2 + h^2}.$$



+ долгие итерационные трехмерные расчеты полей и динамики пучка!

Расчет динамики пучка в синхротроне (выводная система)

Используются кикеры, работающие импульсно и не влияющие на циркулирующий пучок.

Требуется лишь оценка их полей аналогично расчету инъекции пучка.

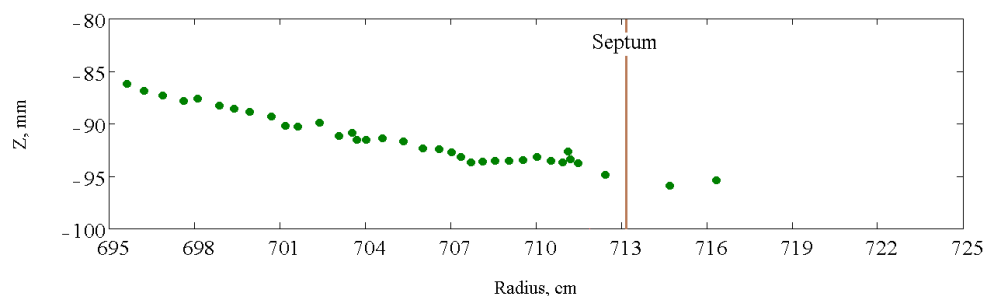
Циклотрон



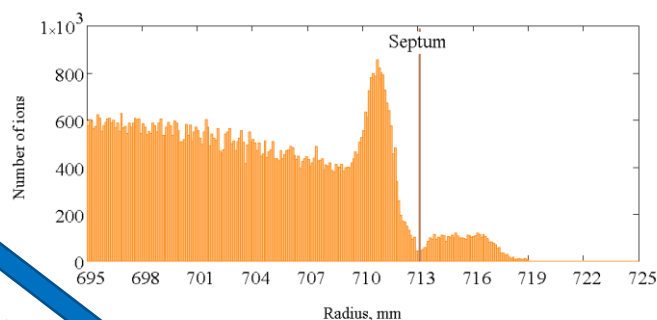
Синхротрон



Резонансный вывод пучка в циклотроне (прецессионный)

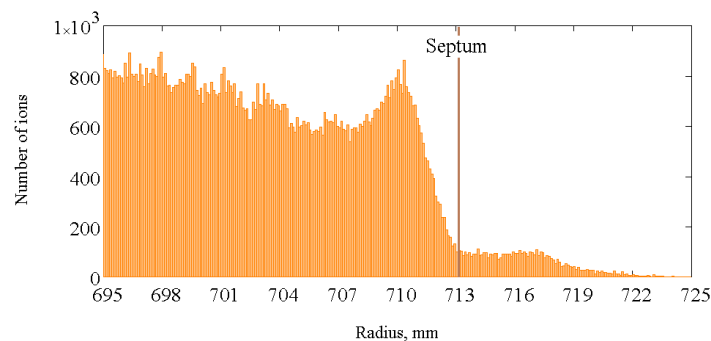


Одна частица



Самосогласованный пучок

Пучок из источника



Результат жестко зависит
реалистичности и точности расчетов

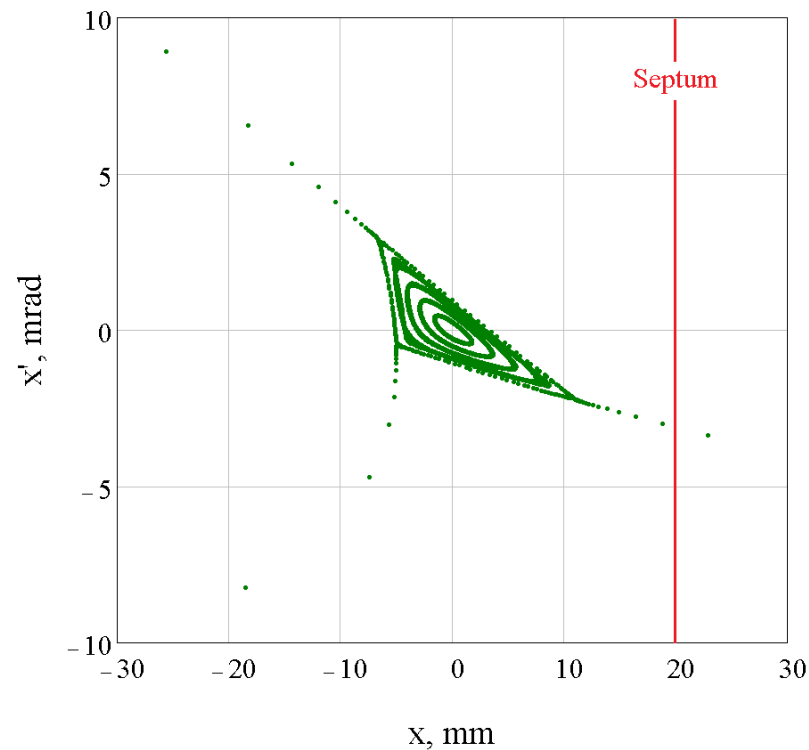
Оптимизация выводной системы требует изменения центральной области и магнитного поля!

Циклотрон

Синхротрон

Резонансный вывод пучка в синхротроне (параметрический)

С достаточной точностью рассчитывается с помощью матричного метода



Циклотрон

Синхротрон

Расчет магнитного поля изохронного циклотрона

Аналитические расчеты требуемого пространственного распределения поля

$$Q_z \approx \sqrt{n + F(1 + 2 \cdot \operatorname{tg}^2 \alpha)} \cdot \frac{N^2}{N^2 - 1},$$

$$Q_r \approx \sqrt{1 - n + F(1 + \operatorname{tg}^2 \alpha)} \cdot \frac{3N^2}{(N^2 - 1)(N^2 - 4)}.$$

$$F(r) = \sum_m \frac{1}{2} \left(\frac{H_{mN}}{\langle B(r) \rangle} \right)^2, \quad H_{mN}(r) = \frac{8M}{m} \cdot \sin \left(mN \frac{\alpha}{2} \right) \left(e^{-m \frac{h_1}{\lambda_{\text{eff}}(r)}} - e^{-m \frac{h_2}{\lambda_{\text{eff}}(r)}} \right).$$

$$\lambda_{\text{eff}}(r) = \frac{\lambda(r)}{\sqrt{1 + \left(\frac{N\lambda(r)}{r} \right)^2}} \quad \lambda(r) = \frac{r}{N \cdot \tan(\xi)}$$

+ долгие итерационные трехмерные расчеты поля и динамики пучка!

Циклотрон

Синхротрон



Расчет ведущего магнитного поля синхротрона

Расчет полей малоразмерных «простых» структурных элементов.
Достаточно в линейном приближении обеспечить требуемые фокусирующие свойства системы.

Необходимо использовать итерационные методы согласования бетатронных частот, набег фаз, дисперсий и подавления связи поперечных колебаний.



Ввод циклотрона в эксплуатацию

Длительный (иногда безрезультатный) процесс
шиммирования магнитного поля



Циклотрон



Синхротрон

Ввод синхротрона в эксплуатацию

Включили. Поварьировали поля. Пучок пошел!

Требуется прецизионное изготовление структурных магнитов и их точное позиционирование.

Необходимо (не всегда) корректировать орбиту для обеспечения циркуляции пучка.

Фурье анализ

$$f(t) = \sum_{n=0}^{N-1} e^{\frac{-inT}{N}}$$

МНК

$$\left(\sum_{i=1}^N (y_i - f(x_i))^2 \right)'_a = 0$$

Метод сингулярного разложения матрицы

$$R^{-1} = \gamma \left[\gamma (R^T R) + (1 - \gamma) B \right]^{-1} R^T$$

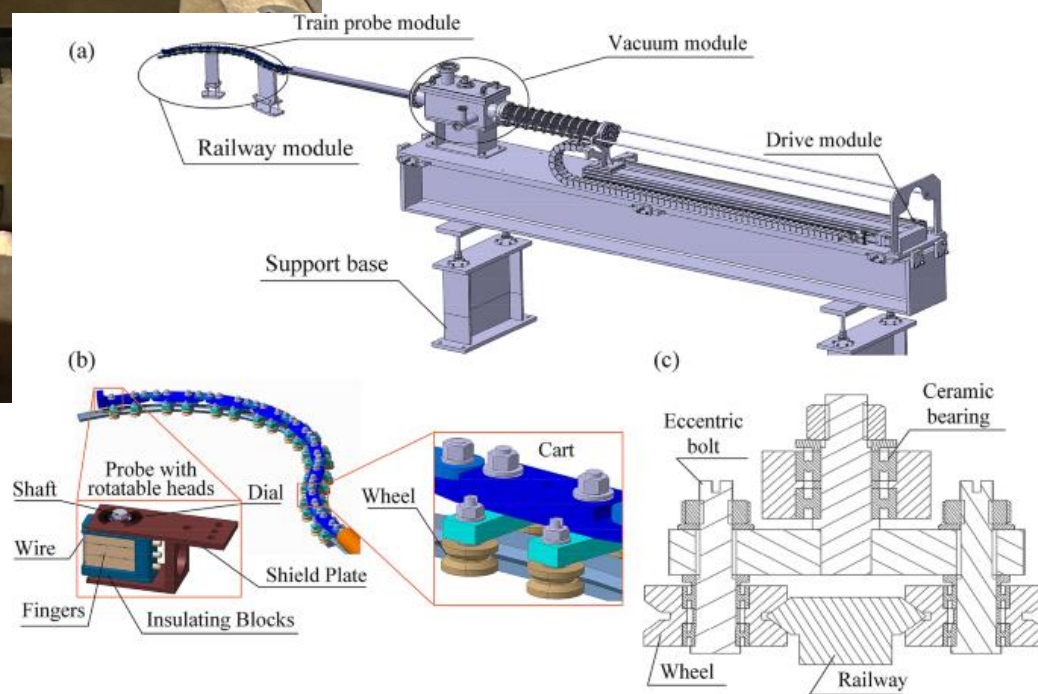
Циклотрон



Синхротрон



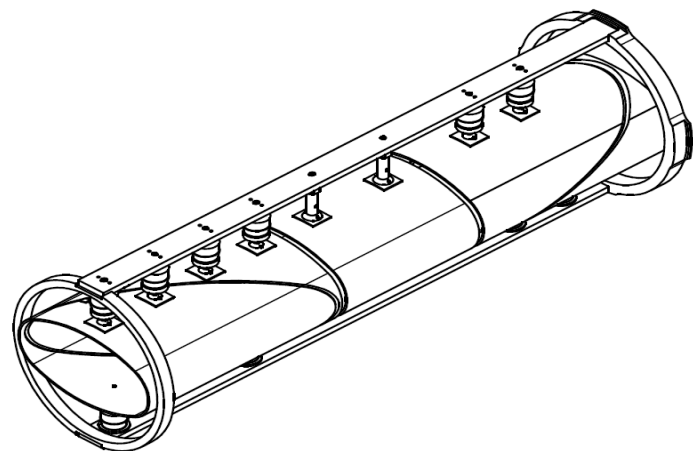
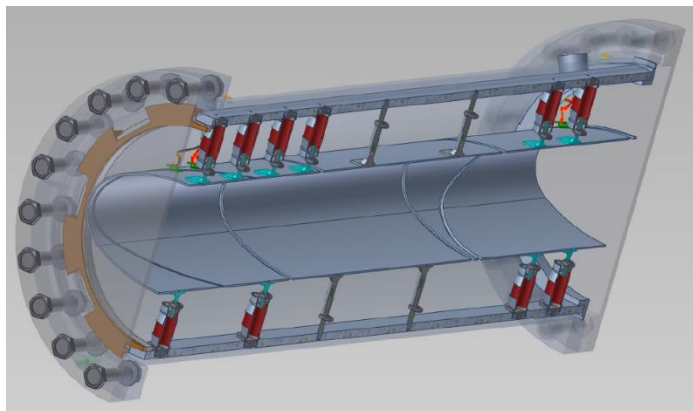
Диагностика пучка в циклотроне



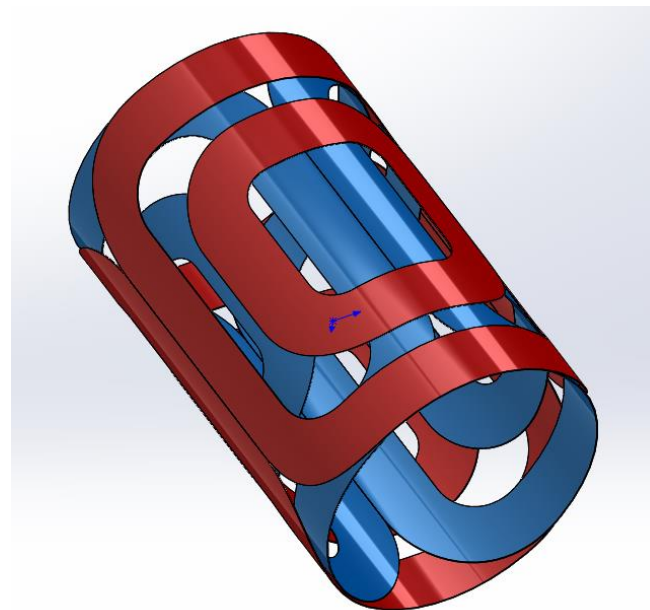
Циклотрон

Синхротрон

Диагностика и коррекция орбиты пучка в синхротроне



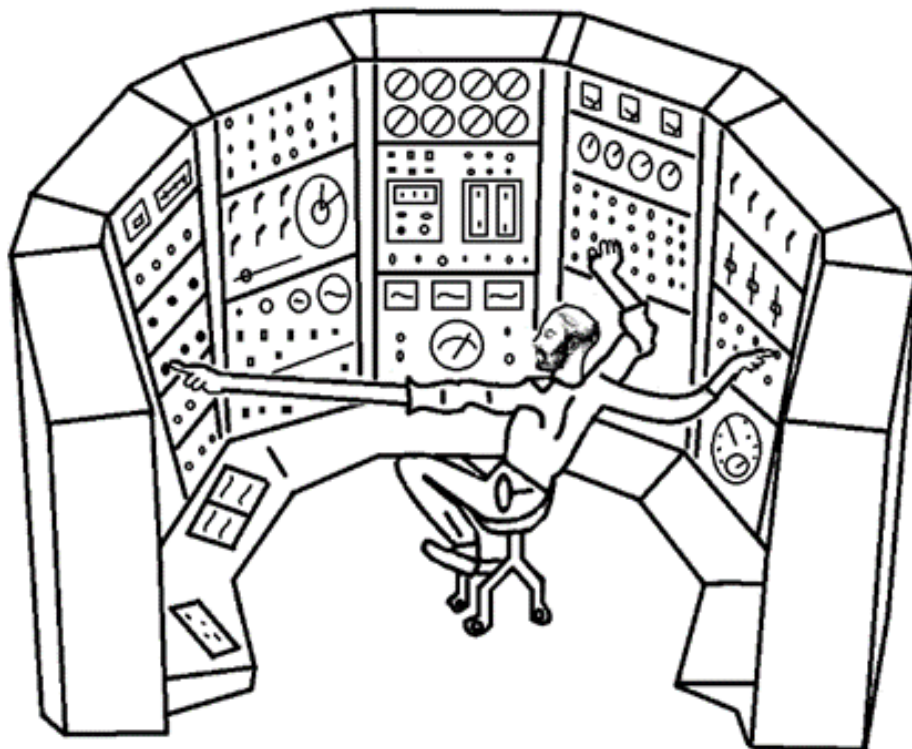
Циклотрон



Требуется знание электротехники, умение взаимодействовать с «железом» и применение теории обработки сигналов.

Синхротрон

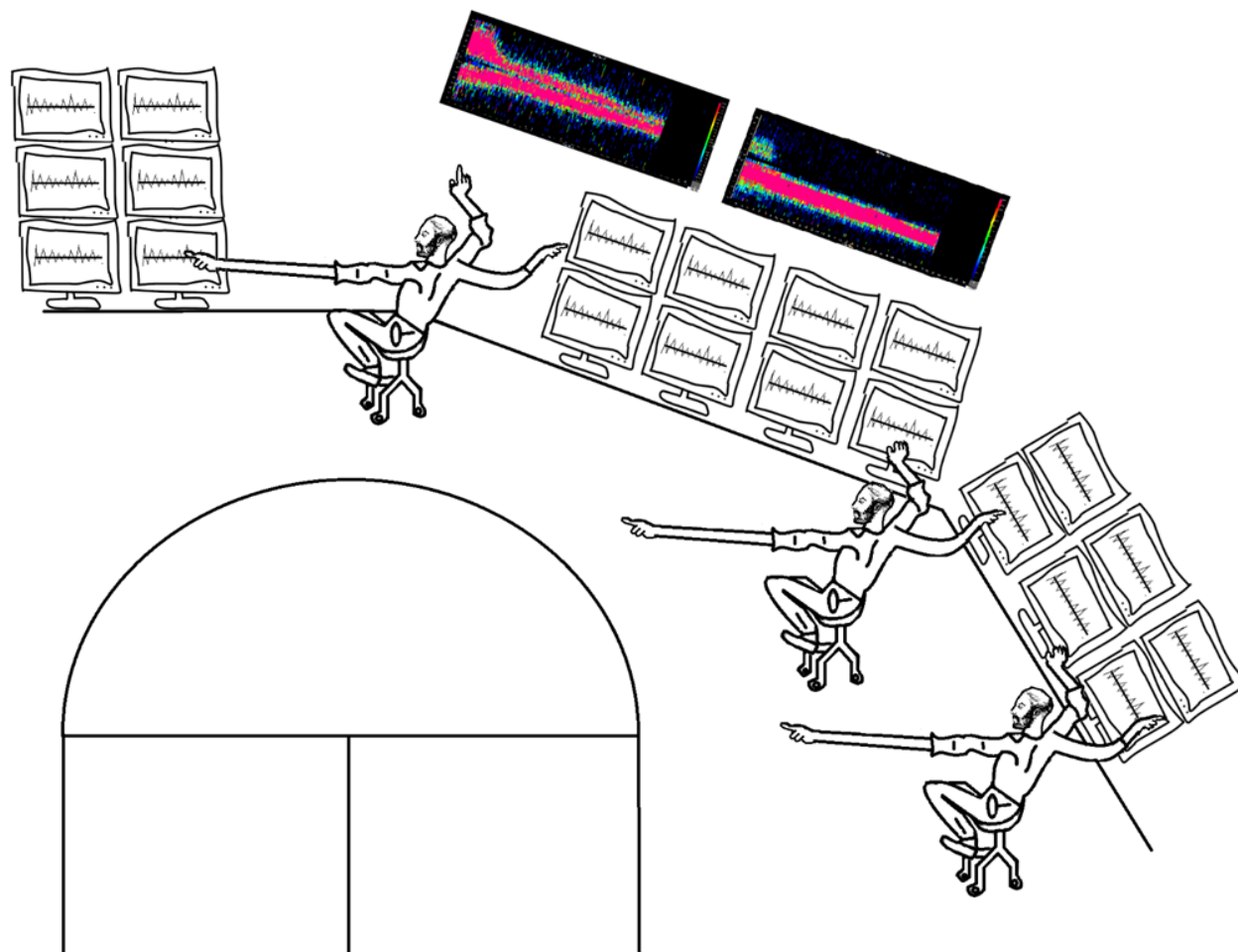
Управление циклотроном



Циклотрон

Синхротрон

Управление синхротроном



Циклотрон

Синхротрон

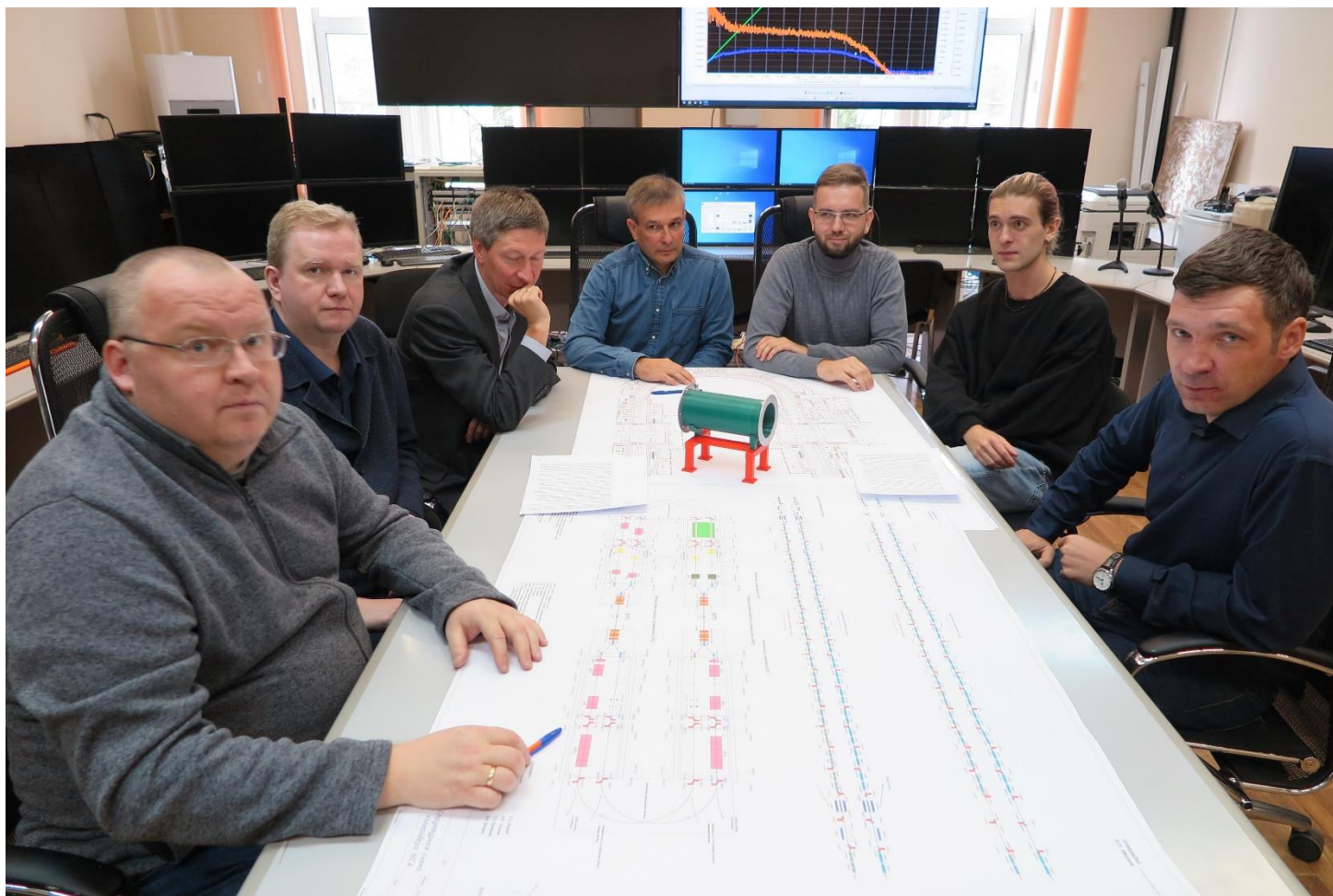
Пультовая циклотрона



Циклотрон

Синхротрон

Пультовая синхротронного комплекса



Циклотрон

Синхротрон

Что в итоге?

- В этой битве нет очевидного фаворита!
- Сложность современных синхротронов объясняется их масштабом, а не принципиальным устройством.
- Циклотрон – глубоко нелинейная система, требующая детальных расчетов, и тяжелая для настройки и ввода в эксплуатацию.
- Синхротрон, являясь модульной машиной, более понятен и приспособлен для настройки и управления.
- Проектирование циклотронов сложнее и требует внимания к деталям. Велик риск фатальной ошибки.
- *Разработка циклотронов более схожа с творчеством.*
- *Синхротроны для любителей теории неустойчивостей, электроники, электротехники и обработки сигналов.*

Циклотрон

Синхротрон

Спасибо за внимание...

Моделируй ускоритель с использованием численных трехмерных расчетов!



Циклотрон

Для расчета ускорителя достаточно аналитических методов и матричного подхода!



Синхротрон