



JOINT INSTITUTE
FOR NUCLEAR RESEARCH

27 августа 2024 г.

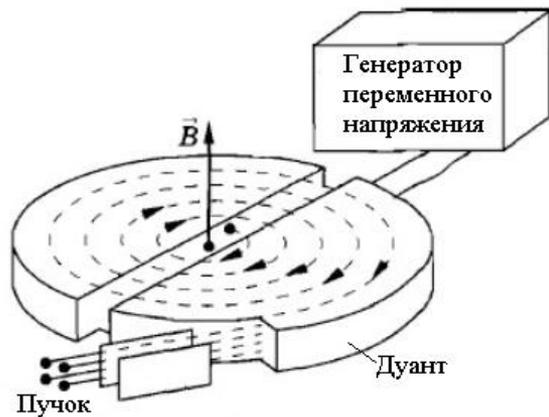
Сверхпроводящие циклотроны для медицинских применений

В.Л. Смирнов

ОИЯИ, Дубна

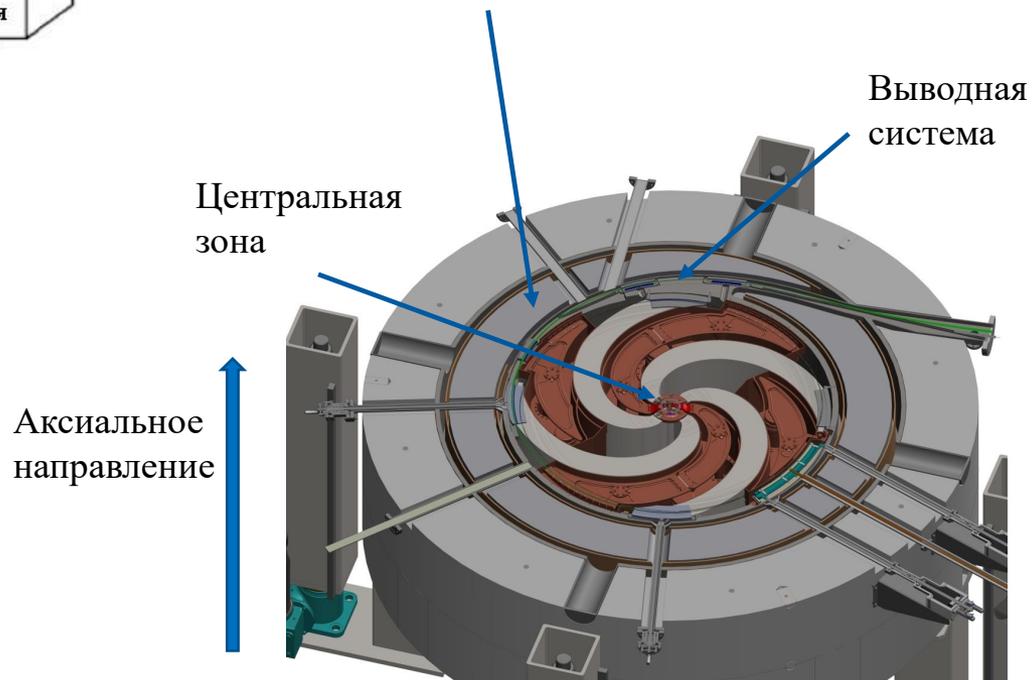
Международная школа ускорительной физики: циклотроны, 25-30 августа 2024 г.

Терминология...



Колебания ВЧ фазы – зависимость фазы, измеренной во время пересечения ускоряющего зазора, от радиуса (энергии).

Компактный циклотрон – ускоритель, имеющий общую токовую обмотку для всех секторов.

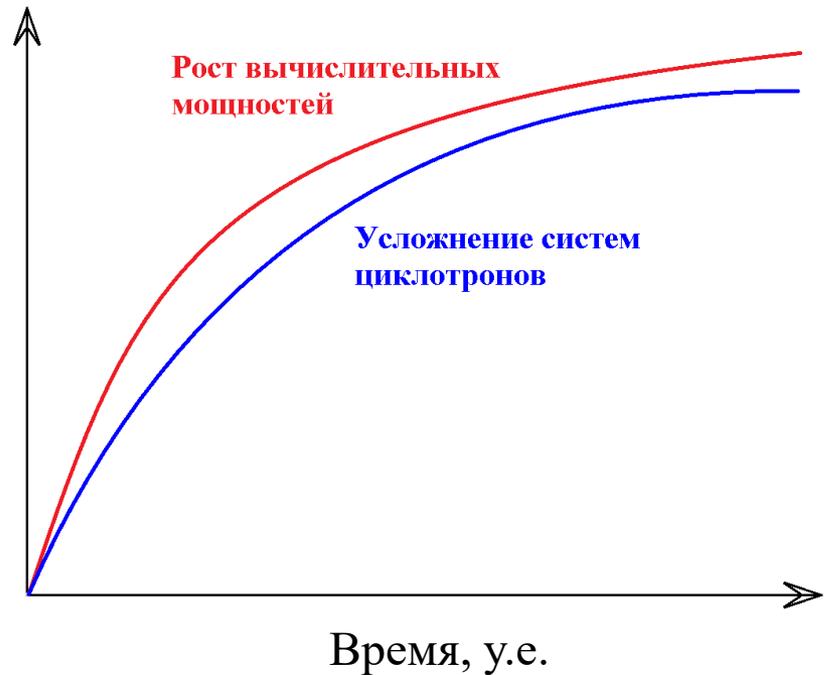


Циклотрон – простой ускоритель?

Рост производительности вычислительных машин НЕ приводит к сокращению времени ввода циклотрона в эксплуатацию.

Причина в усложнении систем циклотронов и требований, предъявляемых к ним.

Решение: использование детального всестороннего численного моделирования.



Основные направления развития современных медицинских циклотронов

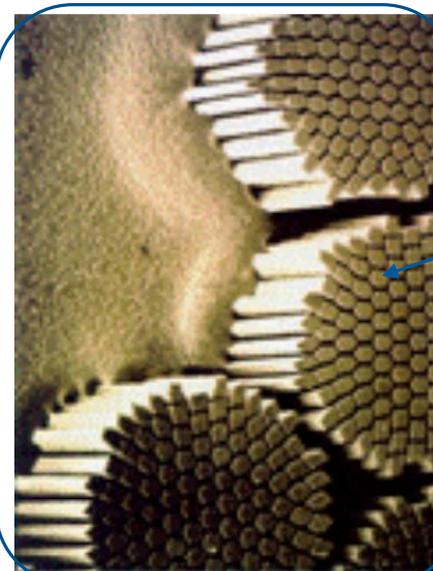
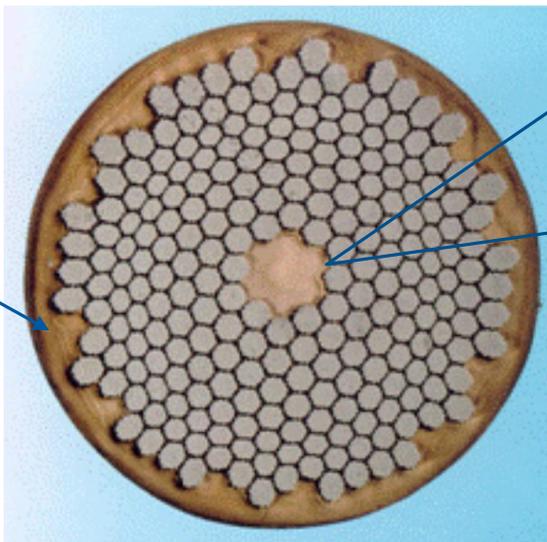
- Использование сверхпроводимости
- Минимизация размеров и веса
- Усложнение систем проводки и формирования пучка

Сверхпроводник выпускается промышленно



Диаметр жилы
несколько мм

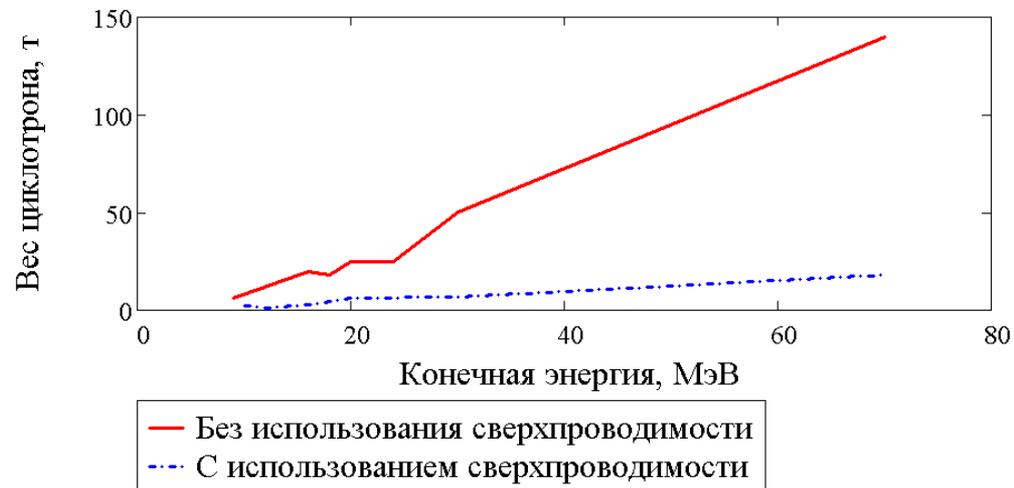
Cu



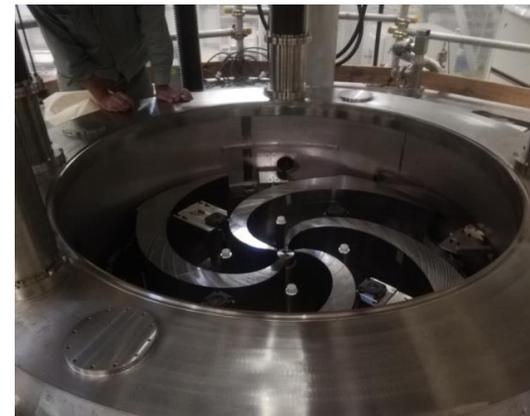
Nb-Ti

Диаметр
сверхпроводника
несколько $\mu\text{м}$

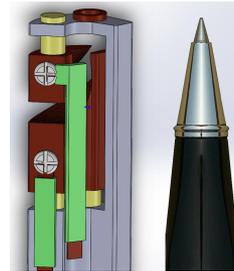
Сверхпроводимость в изохронных циклотронах – относительно редко используемая технология



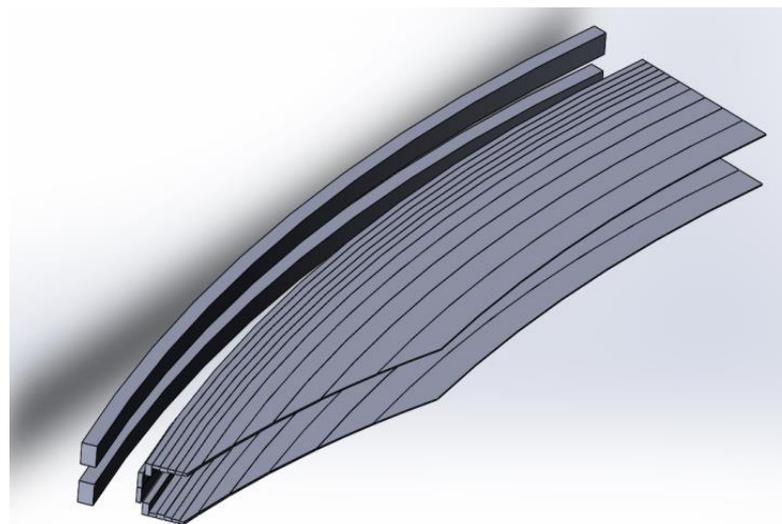
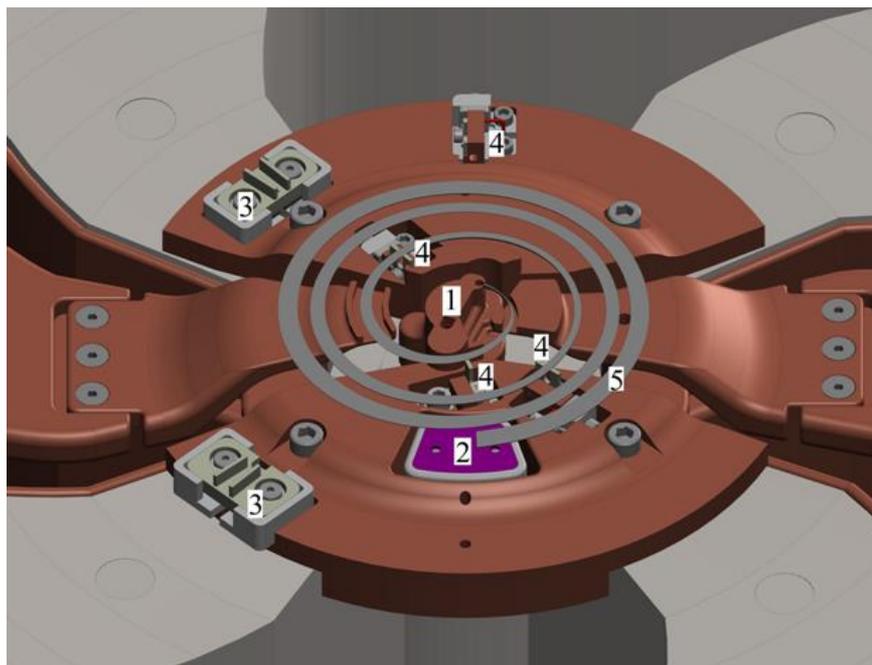
=>
Снижение
веса в 4-7 раз



Снижение размеров установки ведет к значительному усложнению её систем и повышению требований к расчетам



Усложнение систем циклотронов диктуется возрастающими требованиями к характеристикам пучка частиц



Ограничения*
при уменьшении
размеров циклотронов

*не проблемы!

Резистивный
циклотрон

Сверхпроводящий
циклотрон

Плотность тока в
обмотке

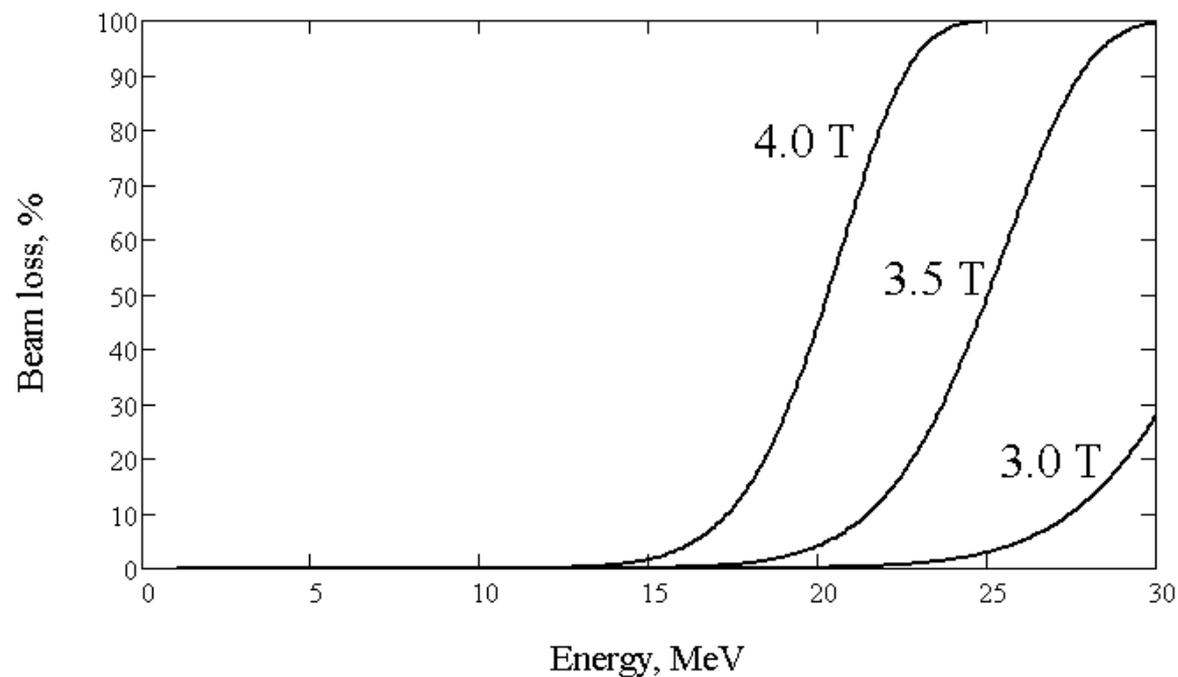
Обеспечение
устойчивости
движения
пучка

Организация
аксиальной
инъекции

Криостат
обмотки, ВЧ
система, ...

Электромагнитная обдирка H^- ионов:

$N_{dee}=2$, $U_{dee}=30$ кВ,

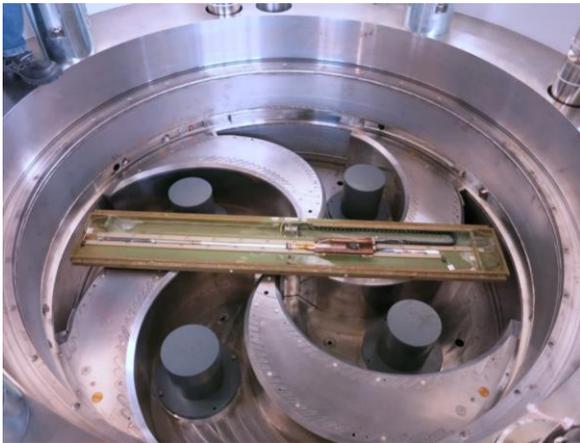


Мировой тренд, к которому нужно стремиться:

- Разработка и создание циклотронов, в проект которых заложена стабильная работа на грани физико-технических возможностей:
 - Применение инновационных физических и технических решений
 - Использование прецизионных методов моделирования динамики пучка.
 - Количество и природа принятых допущений на этапе моделирования критическим образом влияет на практический результат.
 - Обязательное глубокое исследования допусков на изготовление и сборку

Сверхпроводящие циклотроны для протонной терапии

Varian, 250 MeV
(226 MeV from 2019)



IBA S2C2, 250 MeV



Mevion, 250 MeV



Sumitomo, 230 MeV



Hefei-Dubna SC200, 200 MeV



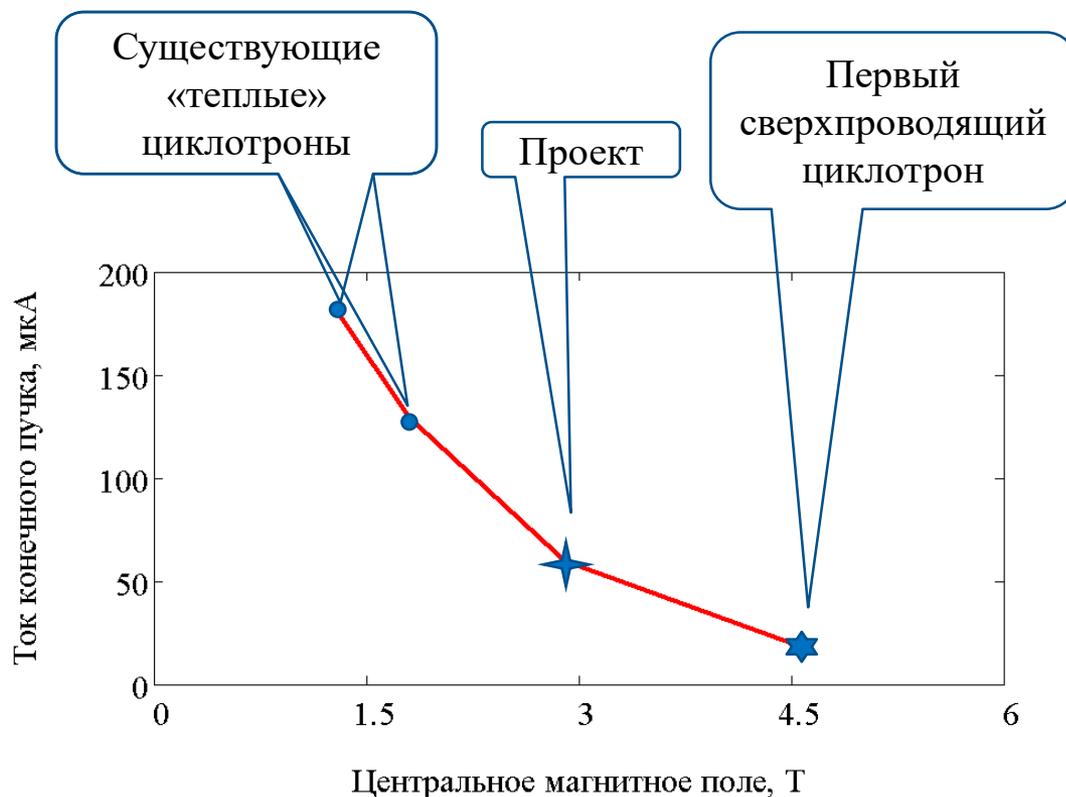
CIAE, 230&250 MeV



Циклотроны для производства изотопов

Принципиальные проблемы создания изохронного циклотрона для производства изотопов с высоким магнитным полем:

- Отсутствие возможности использования внешнего источника ионов.
- Трудности проектирования, изготовления и функционирования центральной зоны.
- Проблемы устойчивости аксиального движения.
- Необходимость использования трехсекторной магнитной системы с одним ускоряющим дуантом приводит к сильной радиальной неустойчивости пучка.



Сверхпроводящие циклотроны для производства изотопов

iMiTrace (OSCAR), 12 МэВ, 50 μ А.
Вес циклотрона 4.5 т (17 т с защитой)



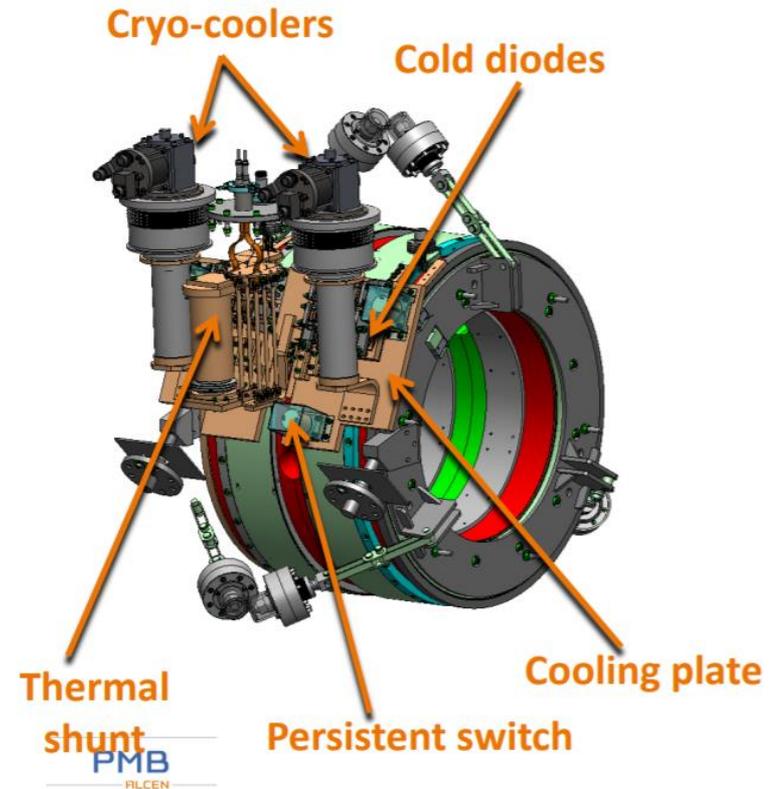
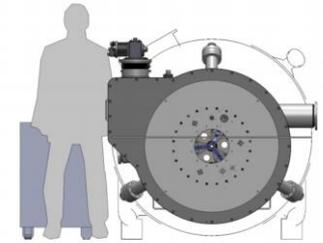
Использование радиальных секторов
ведет к увеличению размера.
Слишком низкий ток пучка.
Высокая потребляемая мощность.

АМИТ, 8.5 МэВ, 10 μ А.
Вес циклотрона 2.5 т.

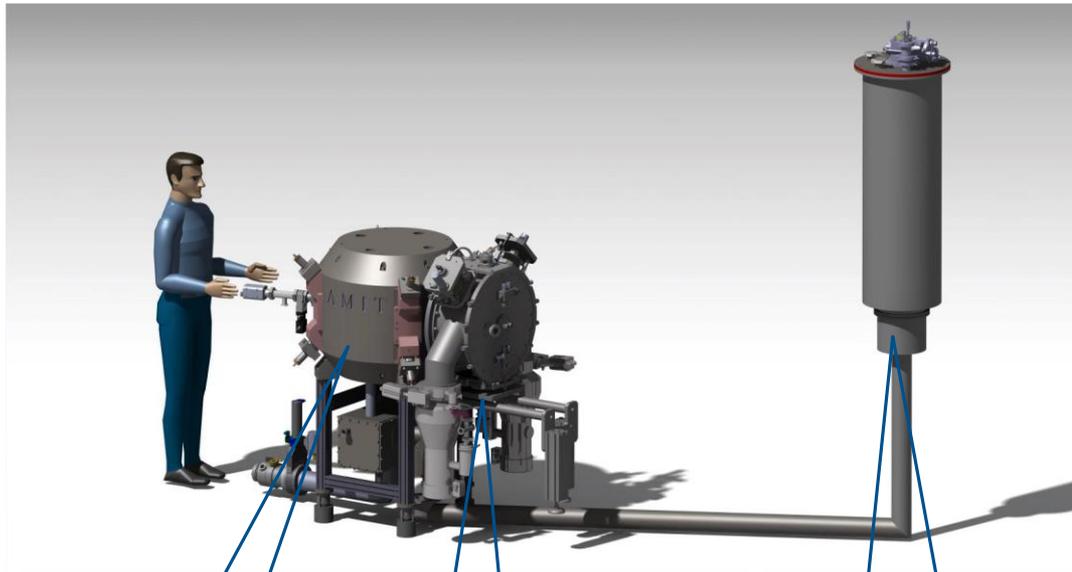


Низкая энергия пучка.
Высокая потребляемая мощность.
Много лет находится в стадии создания.

OSCAR cyclotron from LOTUS project



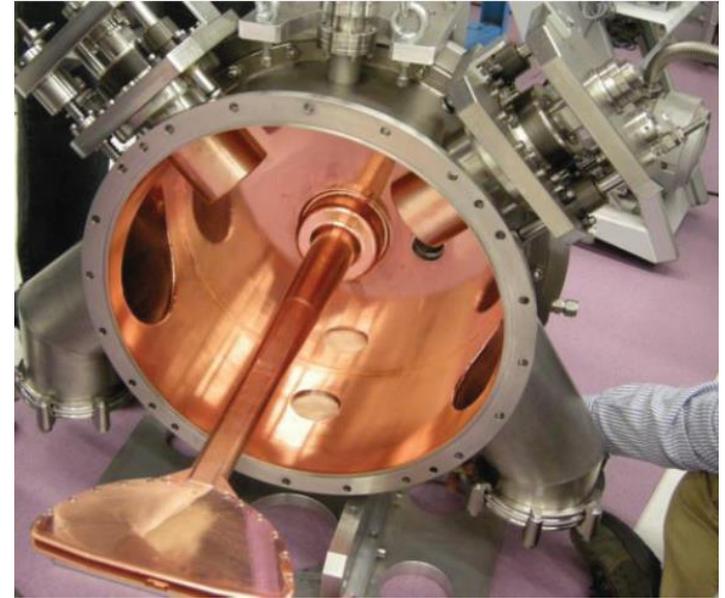
AMIT classical cyclotron



Magnet

RF

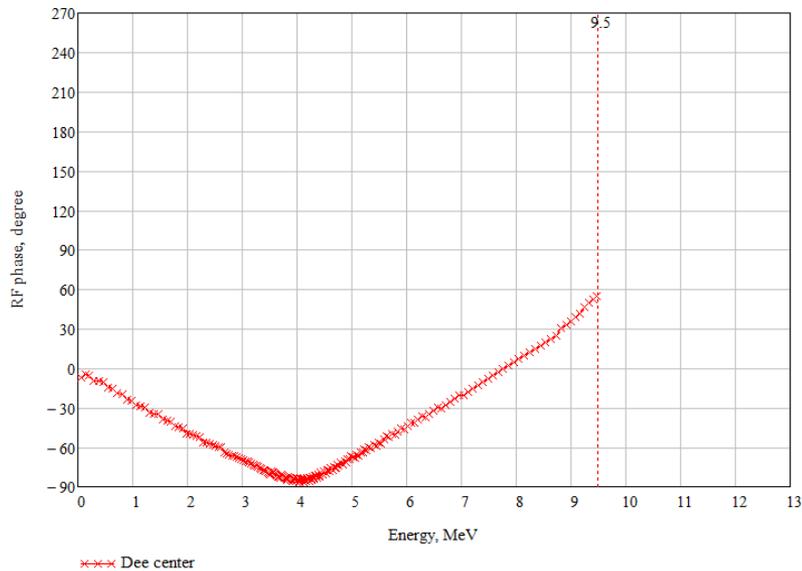
Helium
recondenser



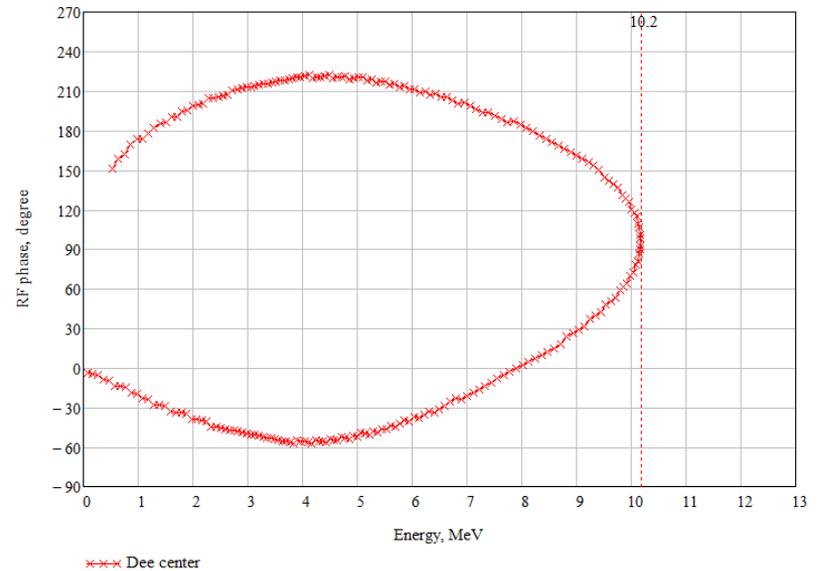
Зависимость фазы ВЧ от энергии в классическом циклотроне

В расчетах используется один 180-градусный дуант

$U_{dee} = 50 \text{ kV}$
 $E_{max} = 9.5 \text{ MeV}$



$U_{dee} = 60 \text{ kV}$
 $E_{max} = 10.2 \text{ MeV}$

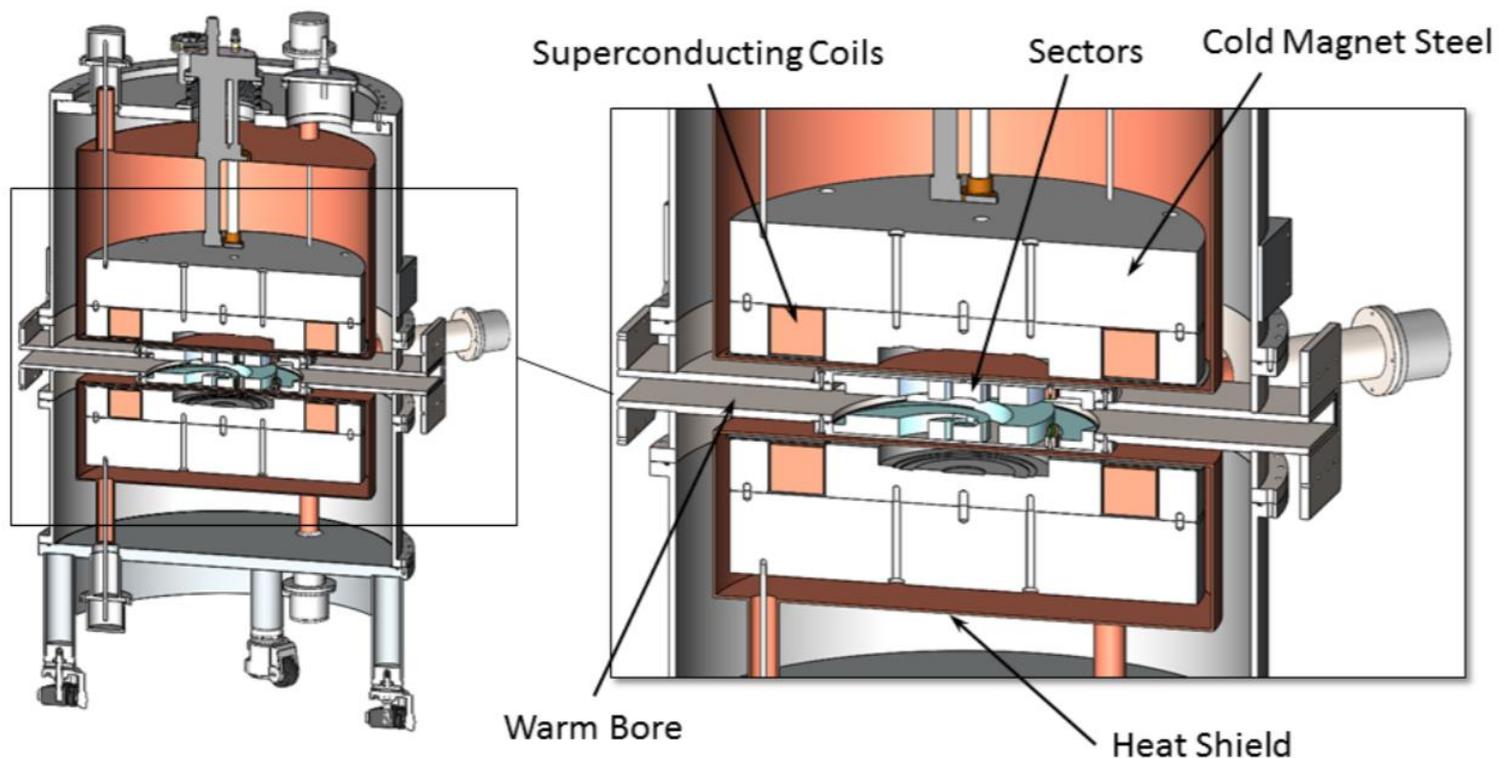


ION-12SC – изохронный циклотрон с самым высоким уровнем магнитного поля в мире!



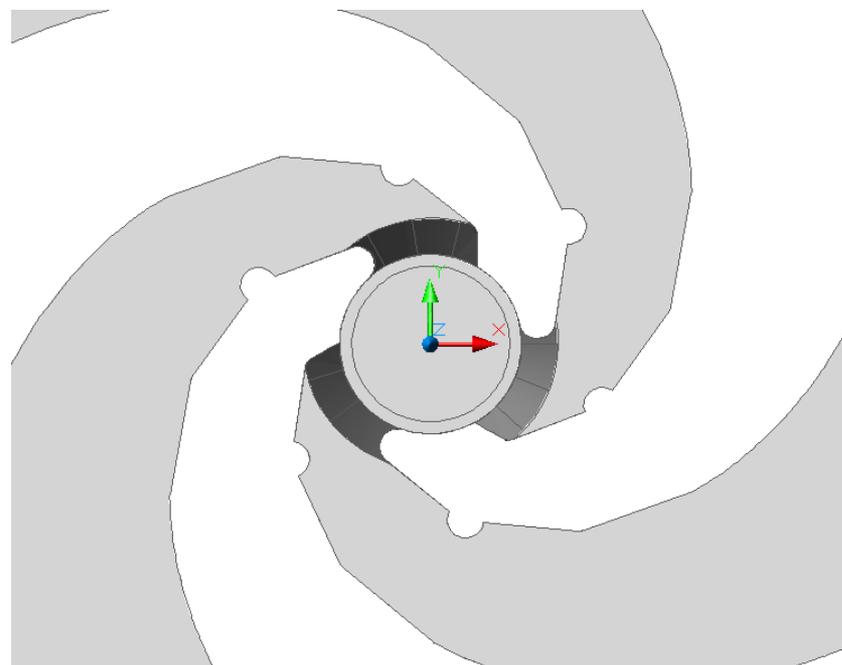
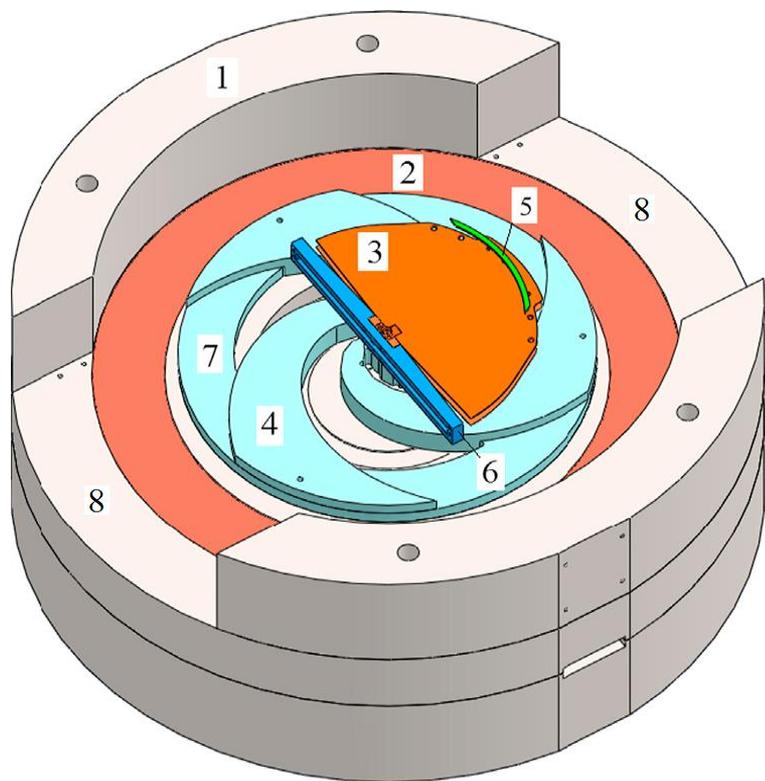
Запущен в серийное производство.
Изготовлены десятки циклотронов.

Уникальная криогенная технология работы с ХОЛОДНЫЙ ЯРМОМ...

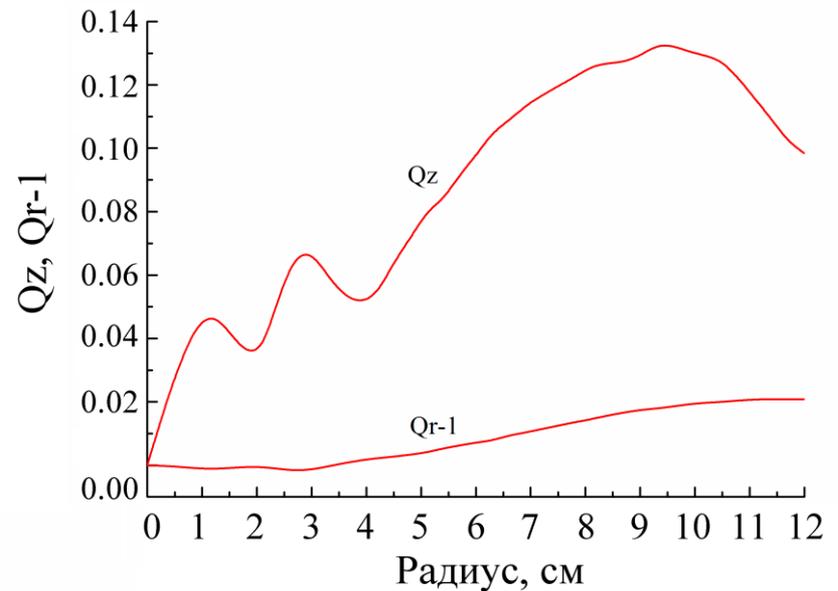
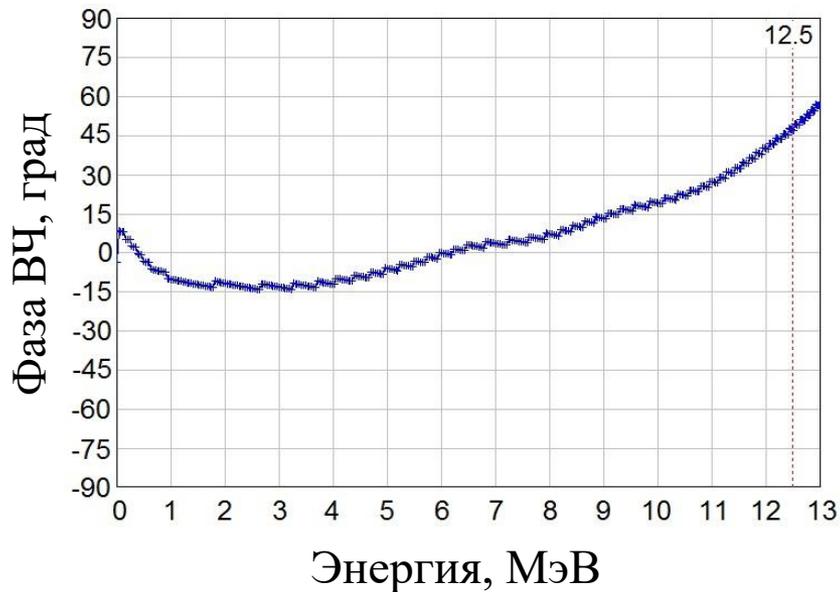


...накладывает дополнительные трудности к достижению устойчивости движения частиц.

Единственный компактный циклотрон с секторами, спиральность которых постоянна на всех радиусах.



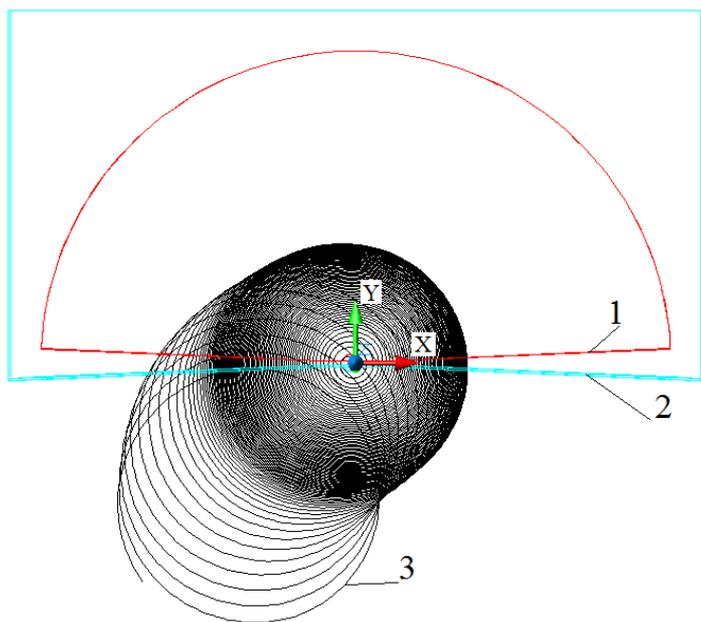
Используется расчетно заданная величина отклонения среднего магнитного поля от изохронного, приводящая к смещению фазы ВЧ частицы на 60 градусов, но позволяющая ослабить требования на аксиальную фокусировку.



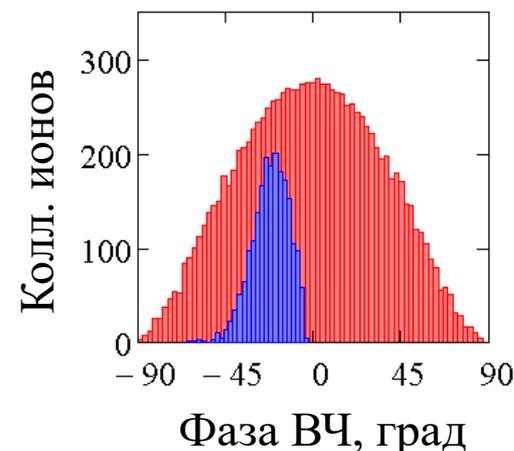
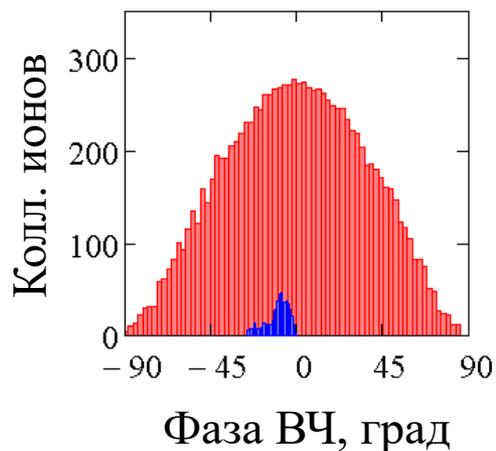
Флаттер
магнитного
поля $5 \cdot 10^{-3}$

Необходимая конфигурация (три сектора и один ускоряющий дуант) крайне неустойчива с точки зрения центрирования пучка. Проблема решается детальным моделированием движения пучка частиц в циклотроне и подбором взаимного положения инжекционной, ускоряющей и магнитной систем.

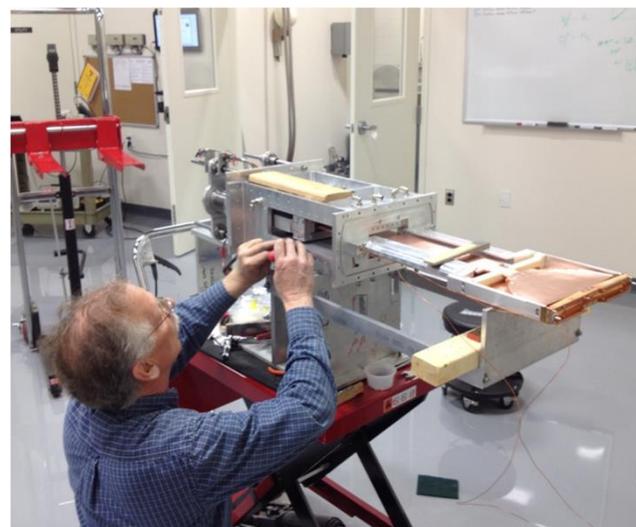
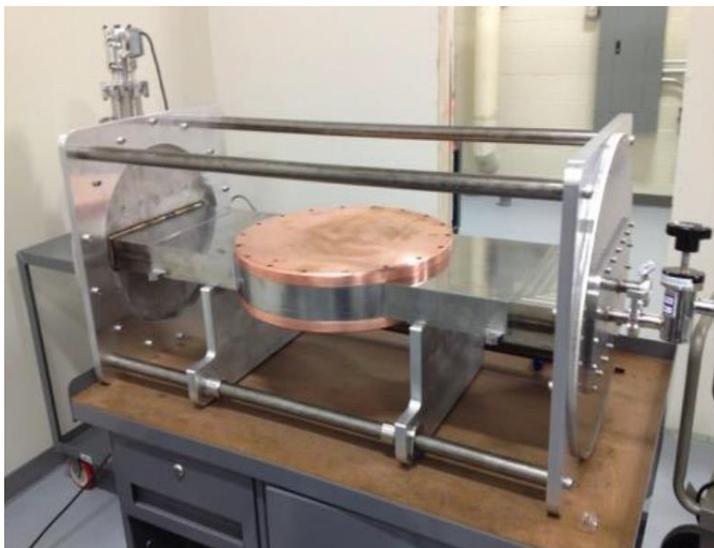
«Раскачка» радиальных колебаний иона под действием «electric gap crossing» резонанса



Увеличение фазового аксептанса центральной зоны за счет радиального смещения источника на 0.5 мм



Узлы циклотрона на этапе сборки

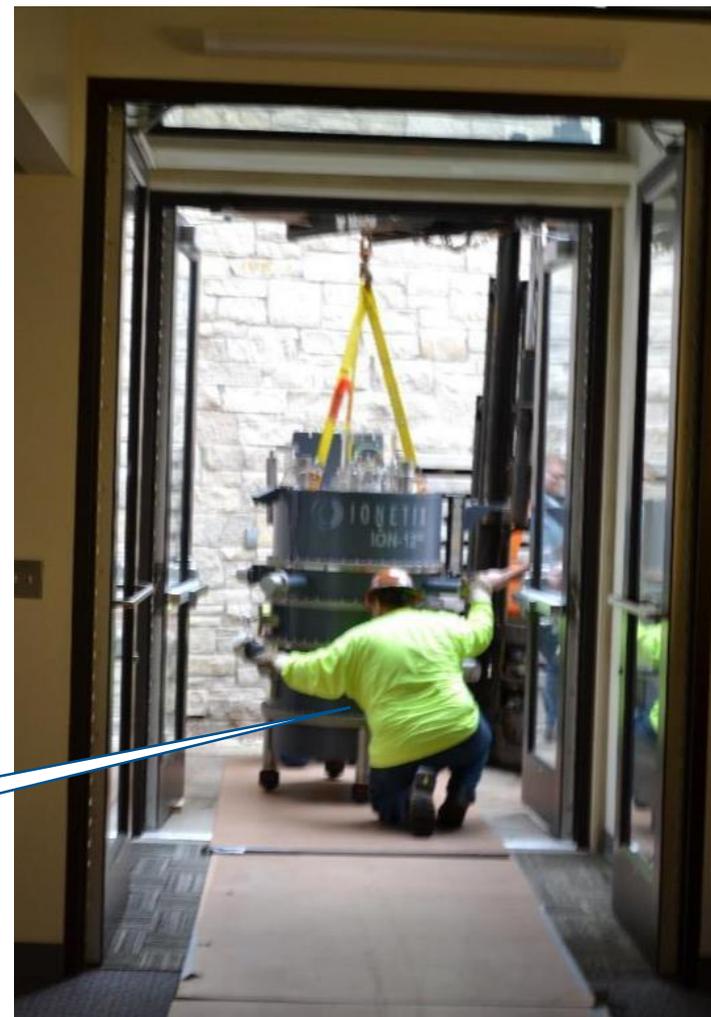


Достаточно двух человек для установки ускорителя в медицинском центре.

Один главный инженер для транспортировки...



... и один помощник.

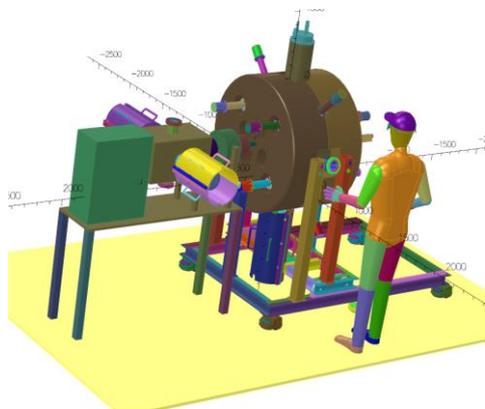


Сравнение сверхпроводящего циклотрона с резистивными машинами

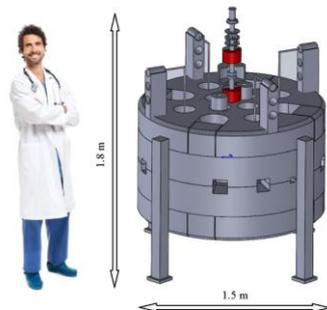
Параметр	ION-12SC	ISOTRACE	AMIT	BEST 14	IBA Cyclone 11
Конечная энергия, МэВ	12.5	12.5	9	14	11
Интенсивность, мкА	25	50	10	100	120
Тип инъекции	Внутр.	Внешн.	Внутр.	Внутр.	Внутр.
Диаметр циклотрона, м	0.9	2.3	0.8	1.7	1.6
Высота циклотрона, м	2.0	3.2	0.7	1.0	2.0
Вес ускорителя, т	1	4.5	2	14	13
Вес установки в сборе, т	2.3	17	3		35
Потребляемая мощность, кВт	34	65	50	60	35

Положительный опыт создания изохронного циклотрона со сверхвысоким магнитным полем открывает путь к проектированию ультракомпактных медицинских циклотронов.

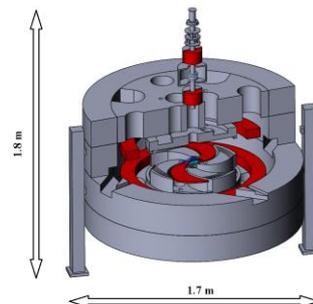
ION-16SC
Вес ~3 т



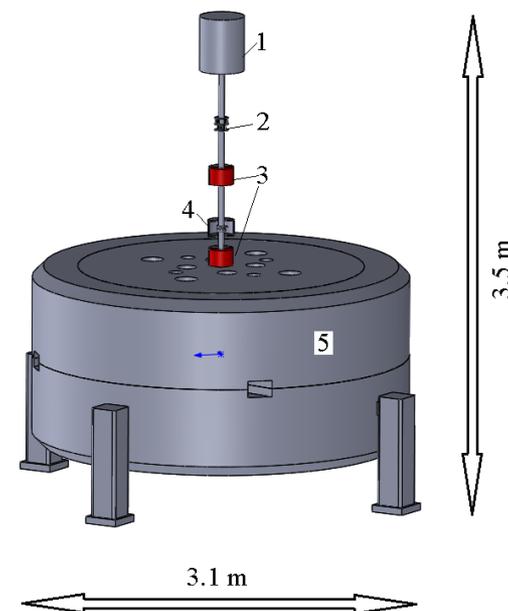
ION-20SC
Вес ~6 т



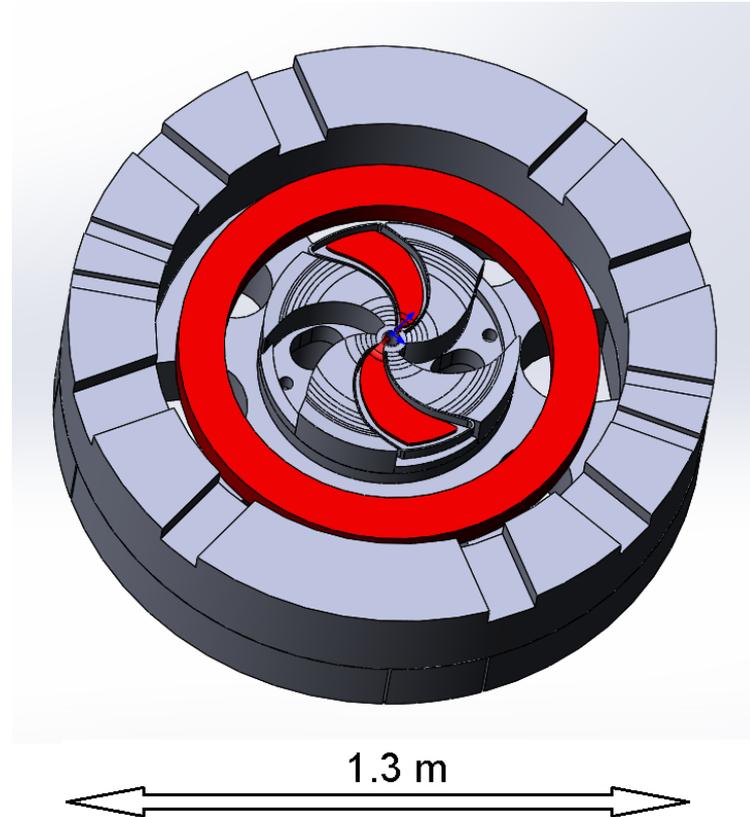
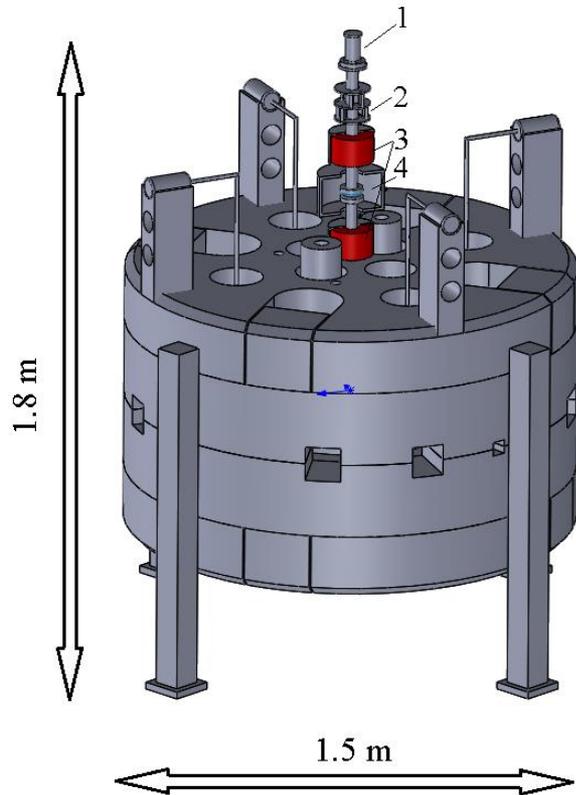
ION-30SC
Вес ~7 т



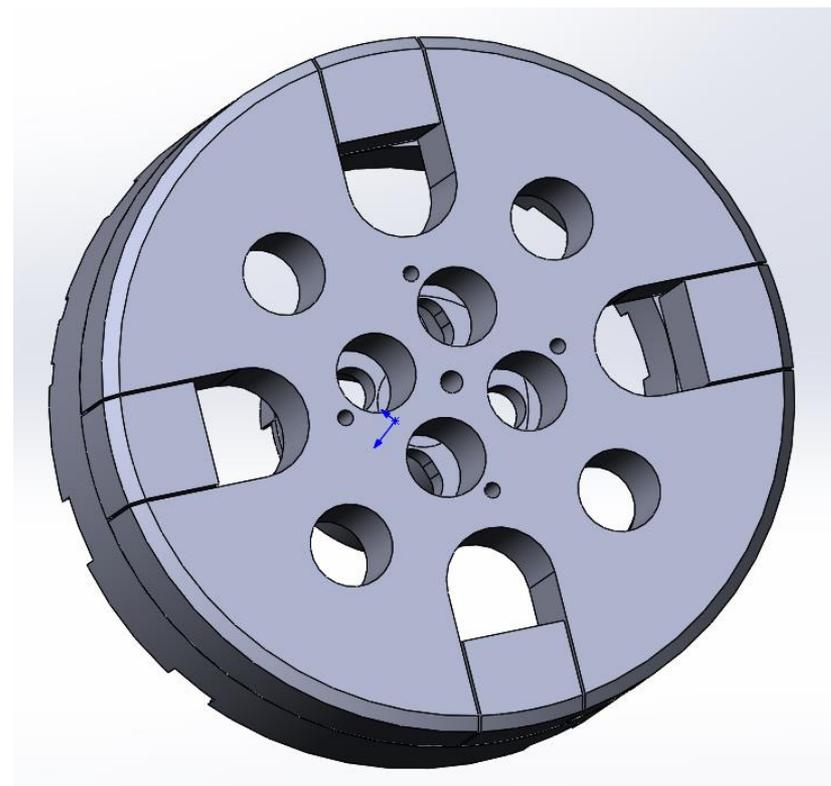
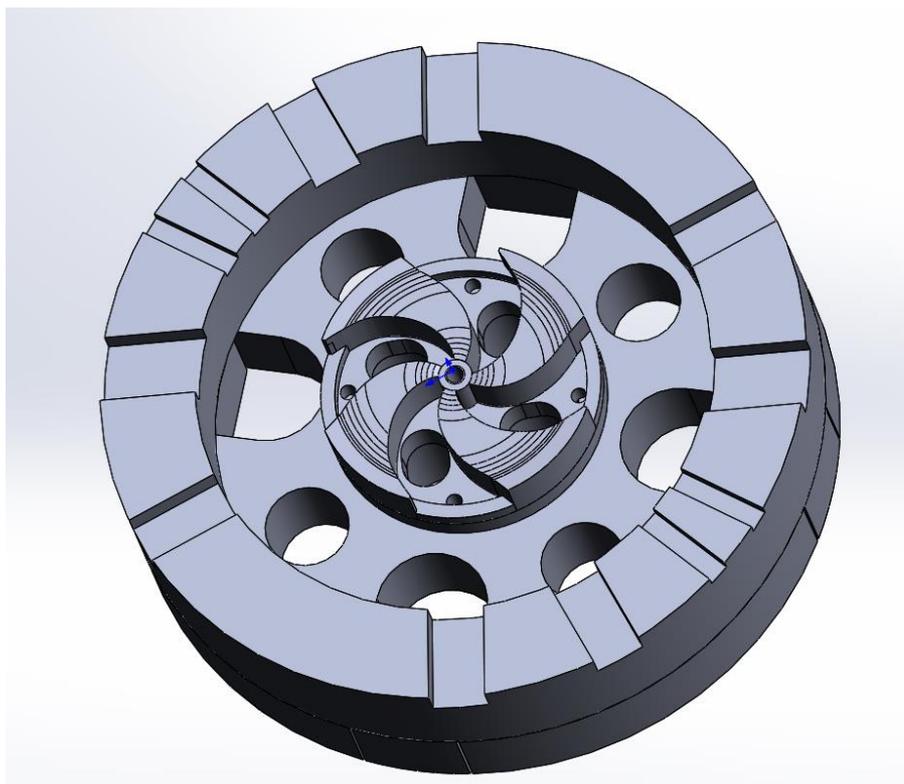
FLASH cyclotron
Вес ~60 т



Циклотрон ИОН-20СС. Протоны – 20 МэВ.

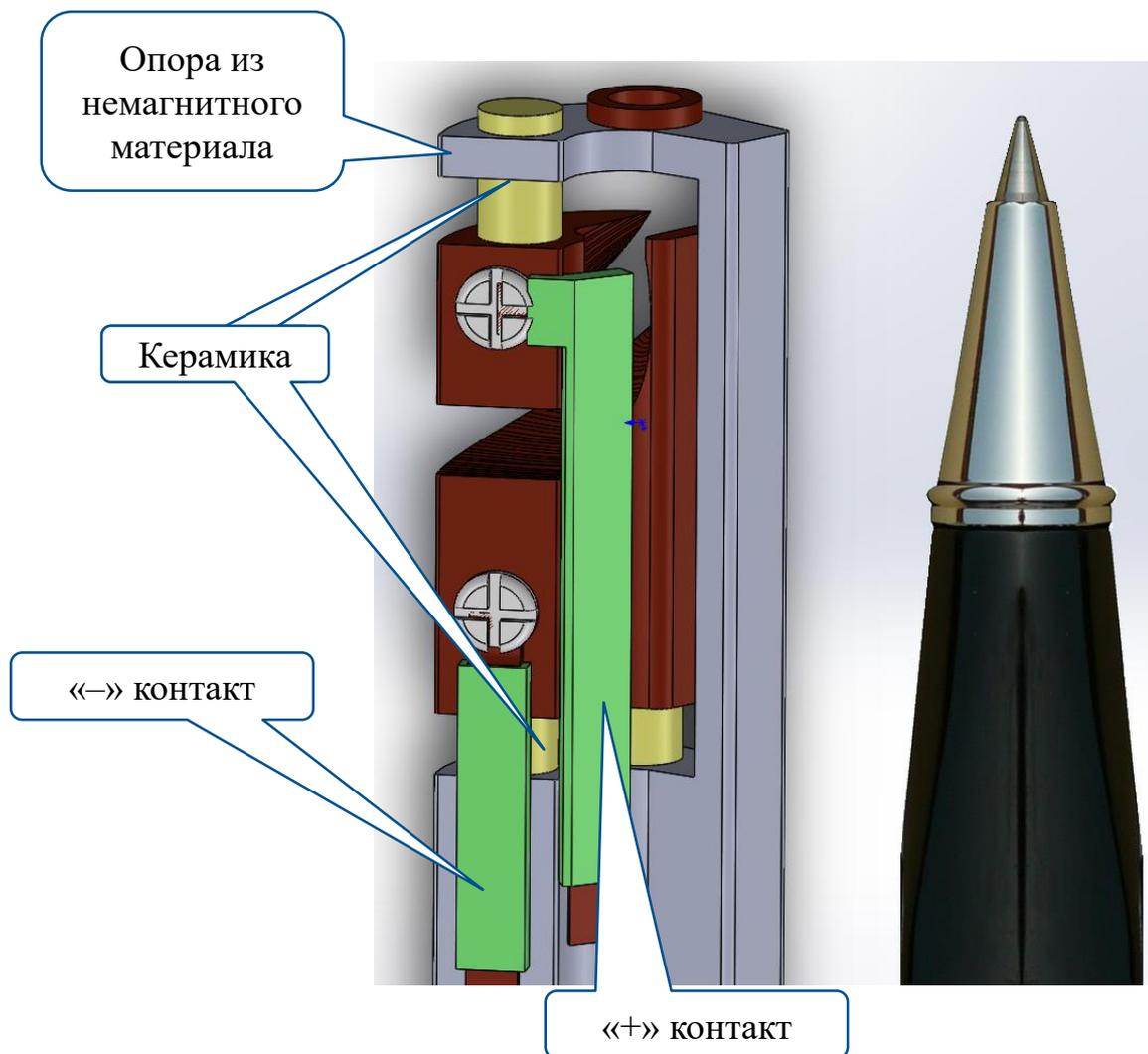


Ярмо циклотрона ION-20SC

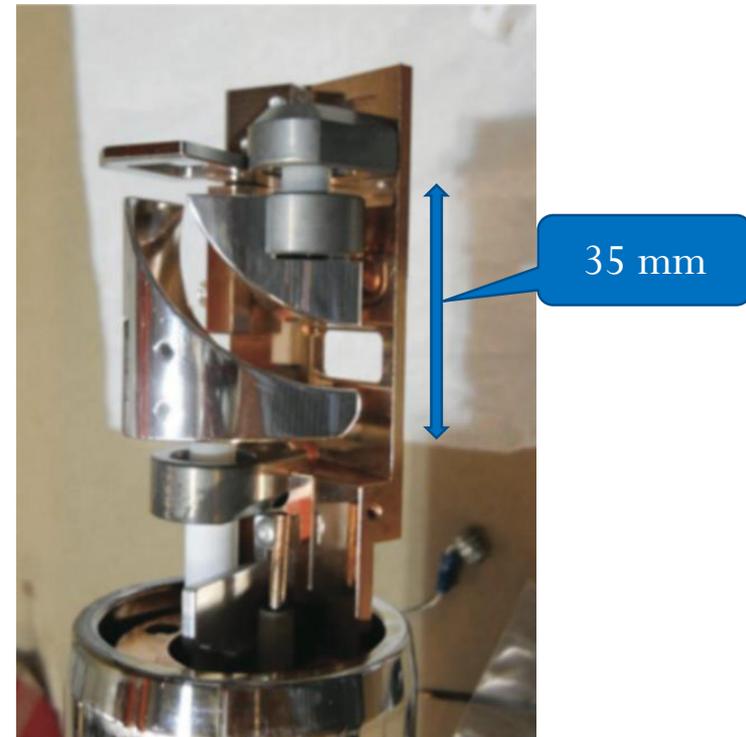
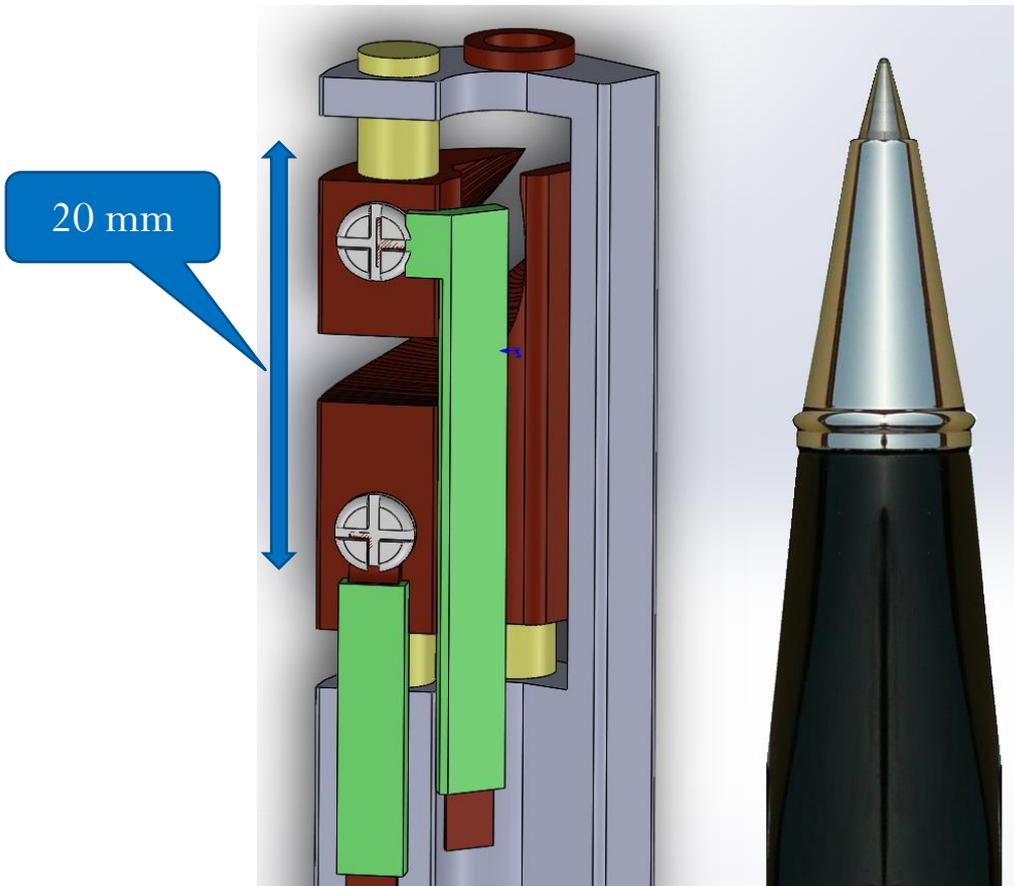


Проблема аксиальной инжекции пучка.

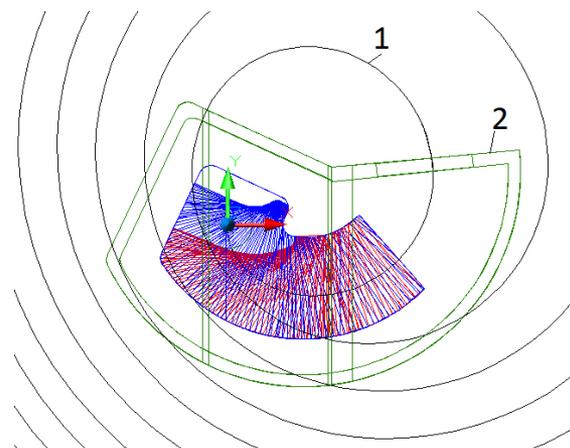
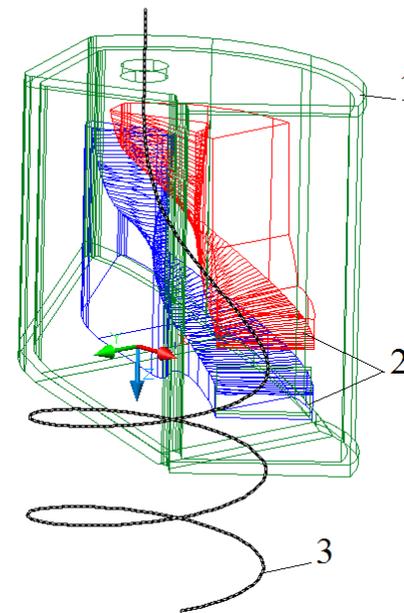
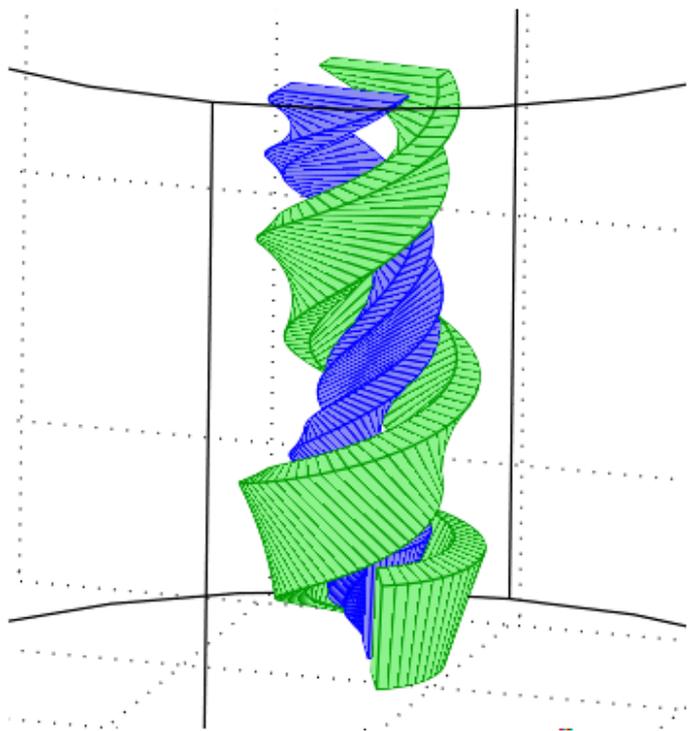
Ограничение – напряженность электрического поля в зазоре 25 кВ/см



Возможно ли такой спиральный инфлектор изготовить?
Справа – инфлектор 88-дюймового циклотрона BNL,
используемый с 1985 года.

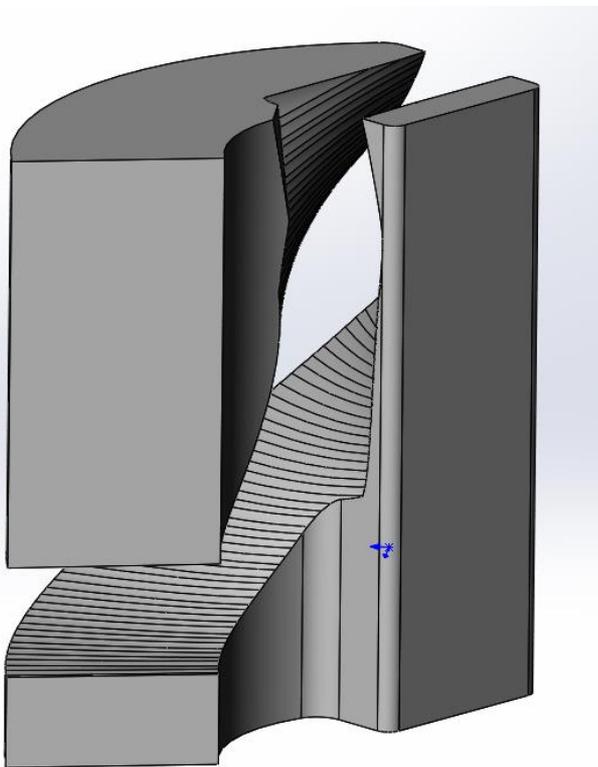


Новаторские идеи для аксиальной инжекции в высокие магнитные поля

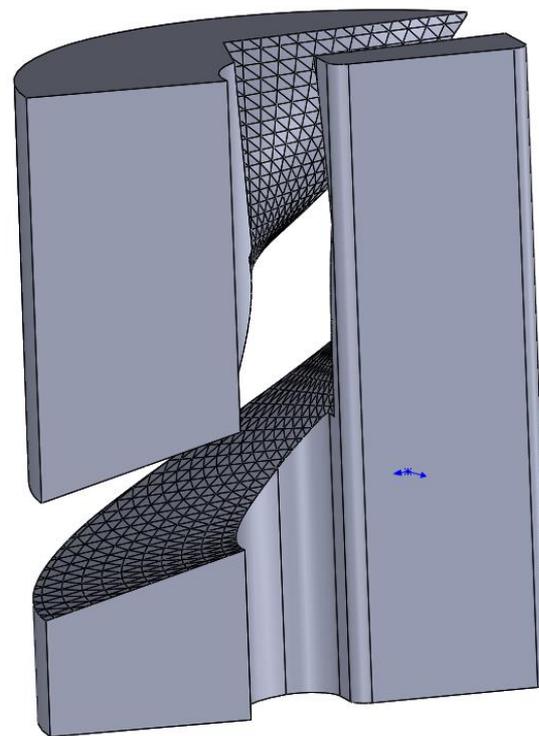


Простая но эффективная идея – использование отрицательного наклона пластин (тилта)

Without tilt

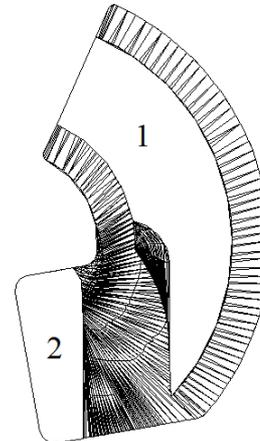
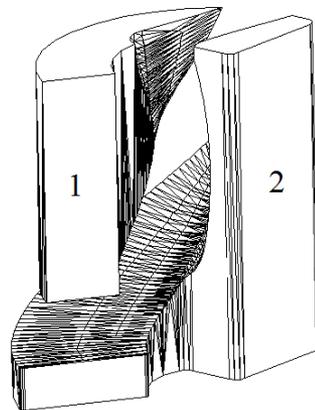


With tilt 15 deg



Уменьшение энергии инъекции увеличивает проводку пучка на первом обороте!

“Intelligent” spiral inflector* & inflector with better axial focusing**



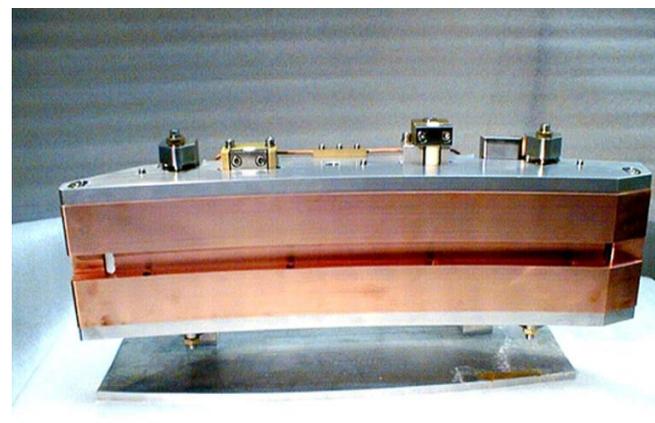
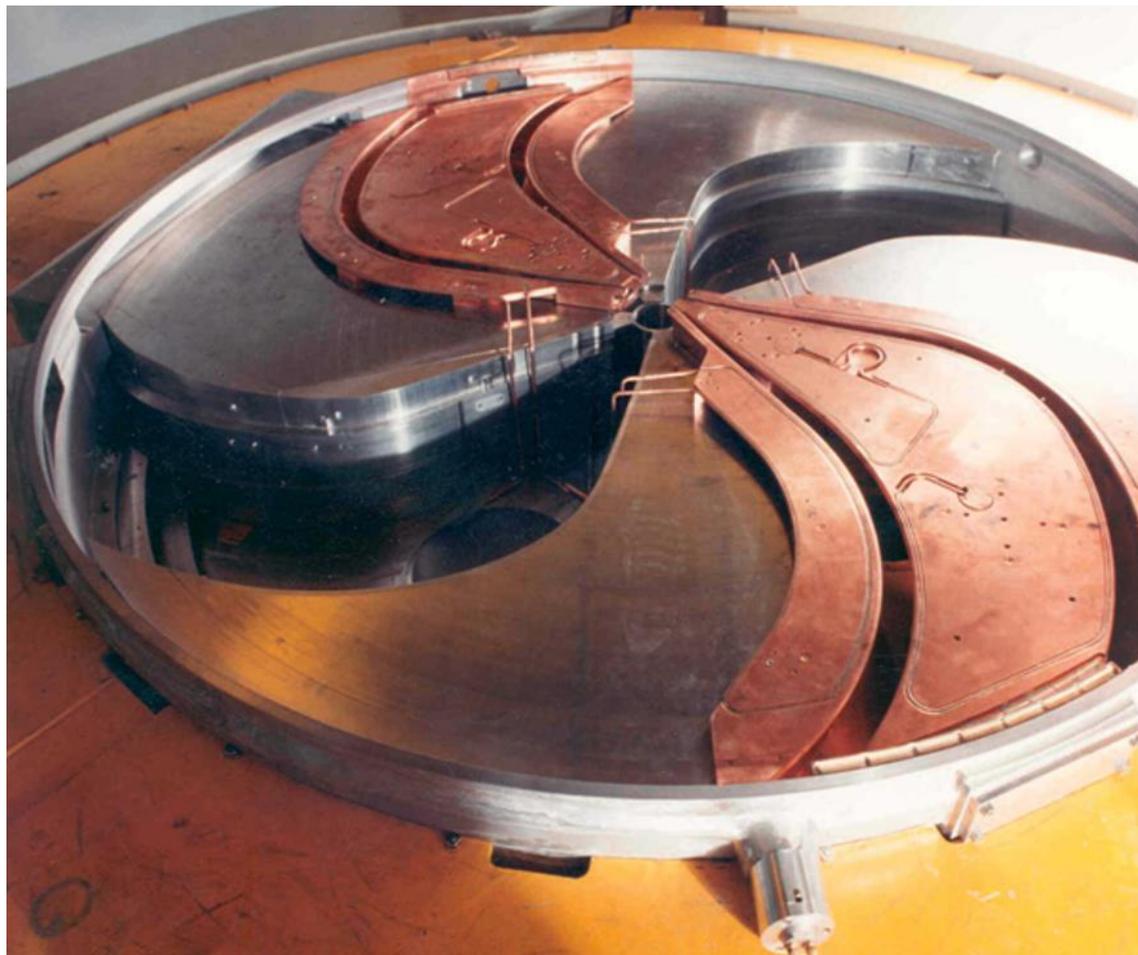
*A.H. Barnard, et. al., “Vertical focusing with a field gradient spiral inflector”, CYCLOTRONS 2019.

** V.L. Smirnov, “Central region design in a compact cyclotron” , Phys. of Part. and Nuc. Let., 2019, Vol. 16, No. 1

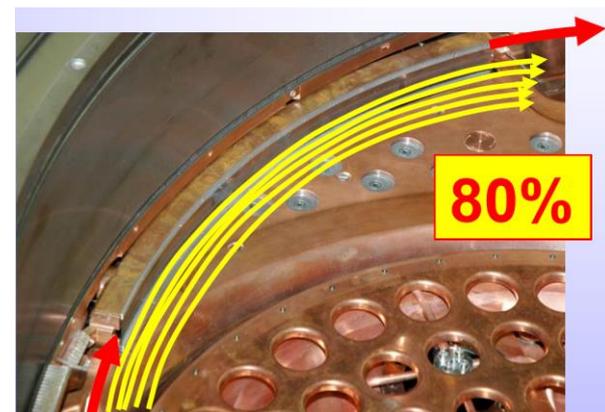
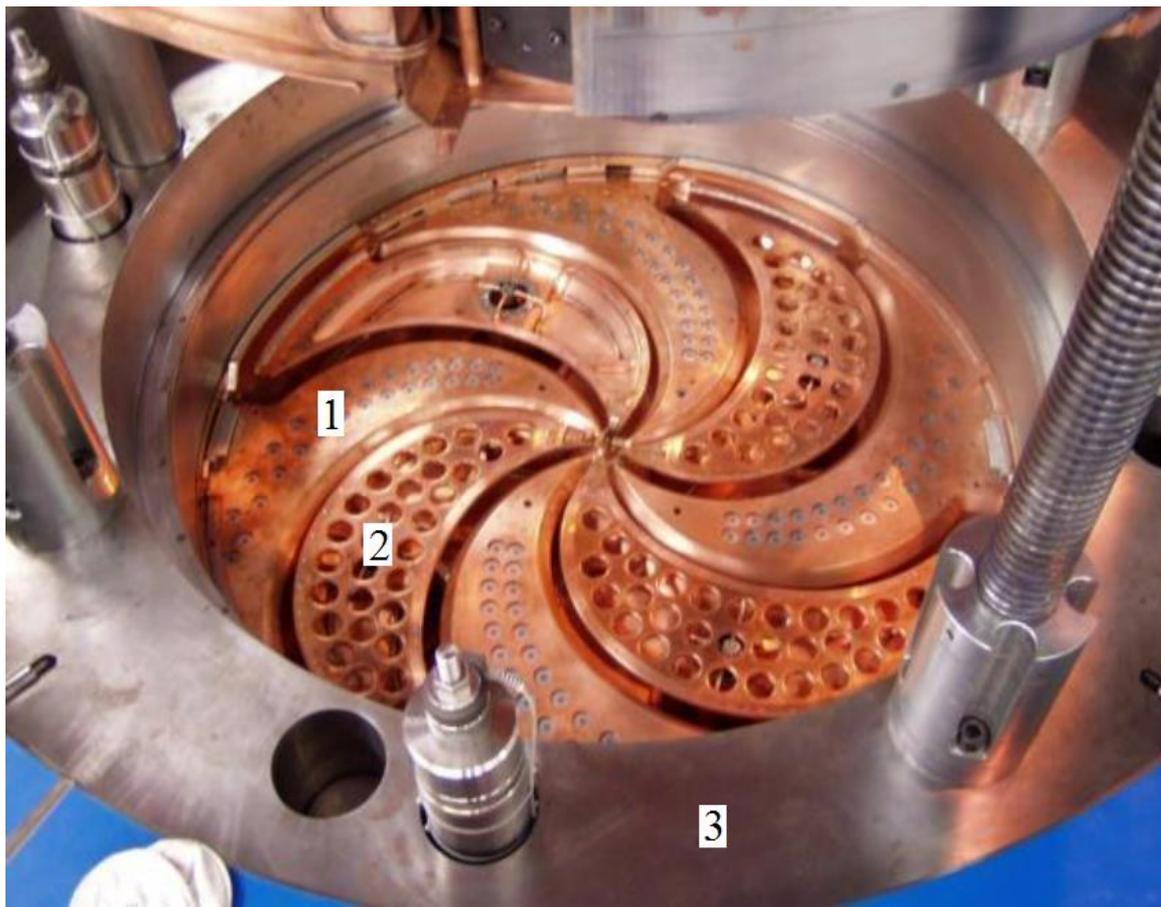
Циклотроны для протонной терапии

Циклотрон ИВА С235.

Самая массовая «тёплая» машина (1.7 Тл, 300 нА, 210 т).



Varian250 – первый сверхпроводящий циклотрон. (2.4 Тл, 800 нА, 90 т)



Магнитные системы циклотронов SC240 (Хефей, Китай) и SHI (Сумитомо, Япония)

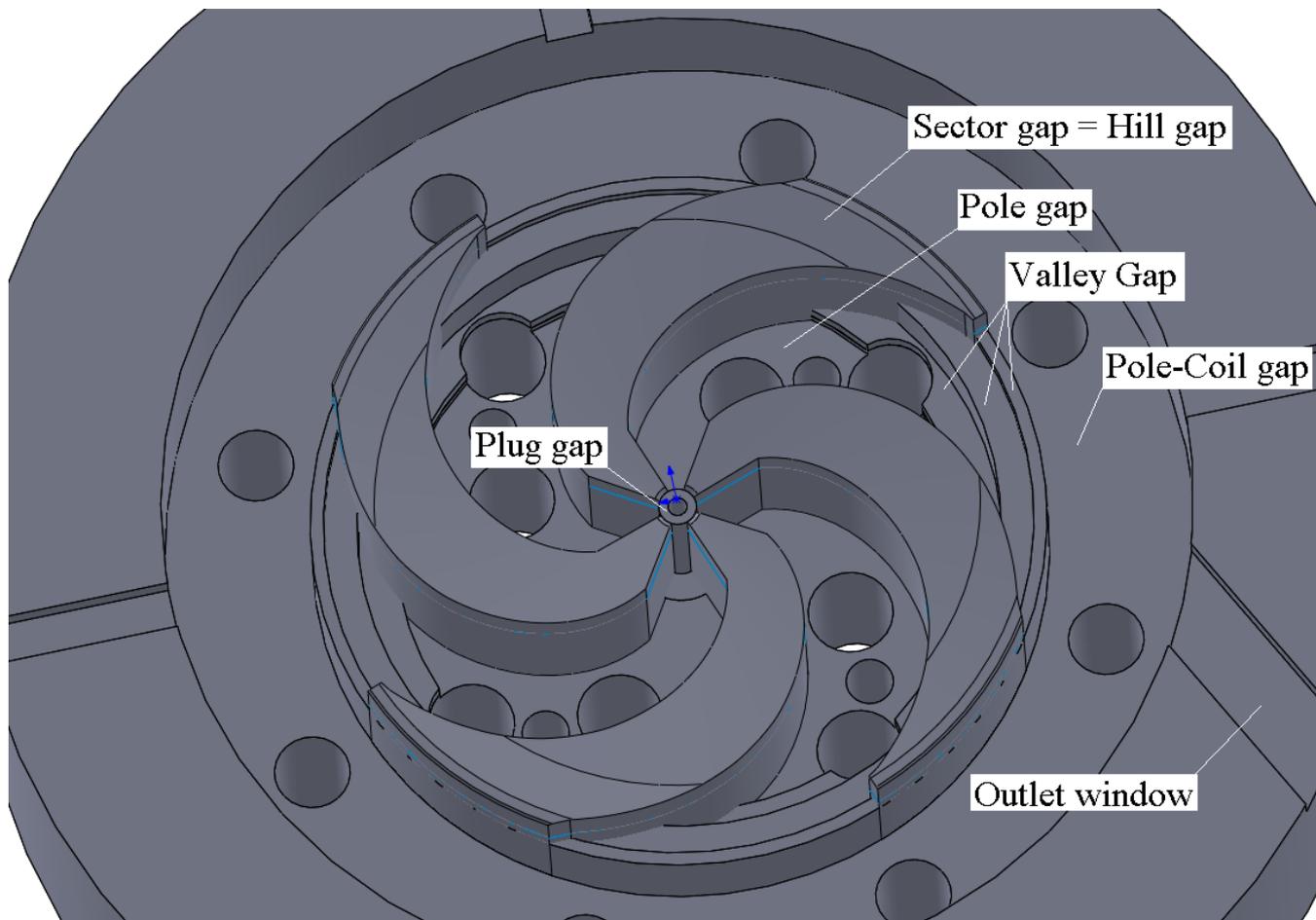
Центральное поле 2.5 Тл



Центральное поле 3.2 Тл

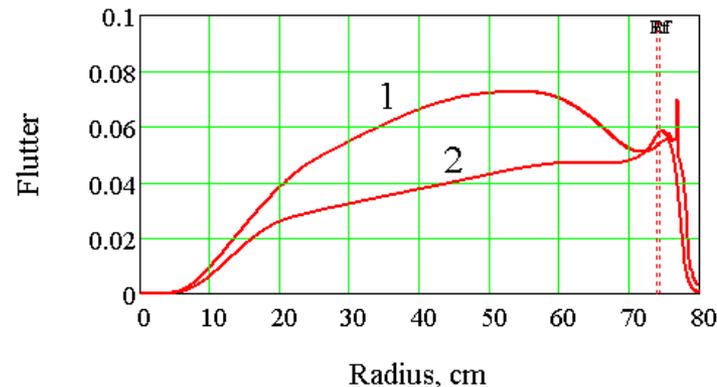
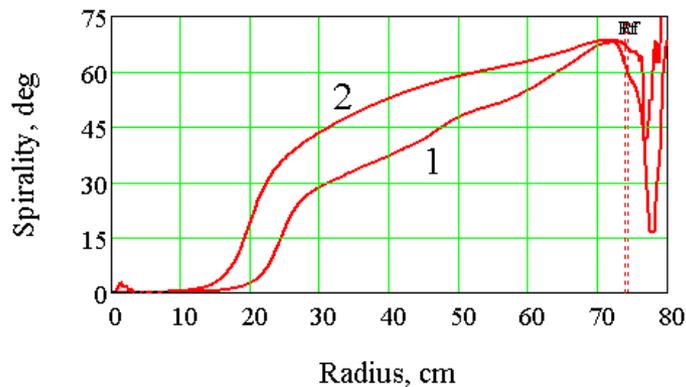
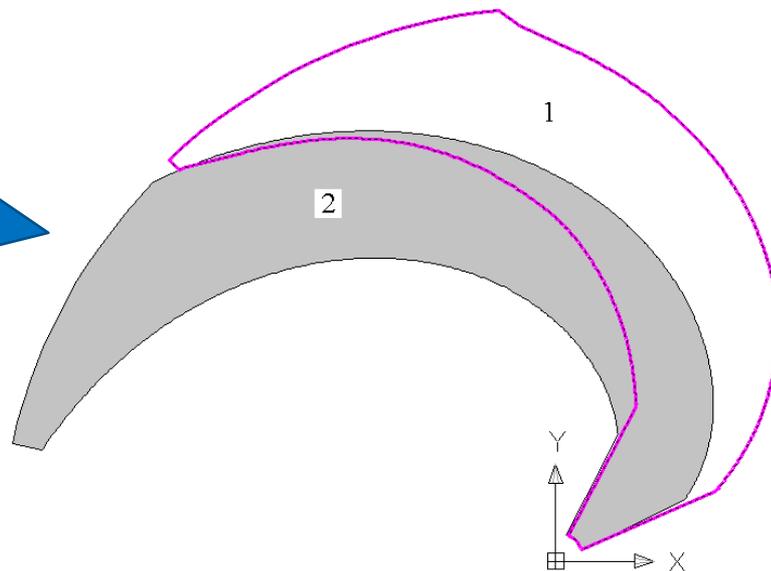


К вопросу о «квалификации (некоторых) современных разработчиков циклотронов»...



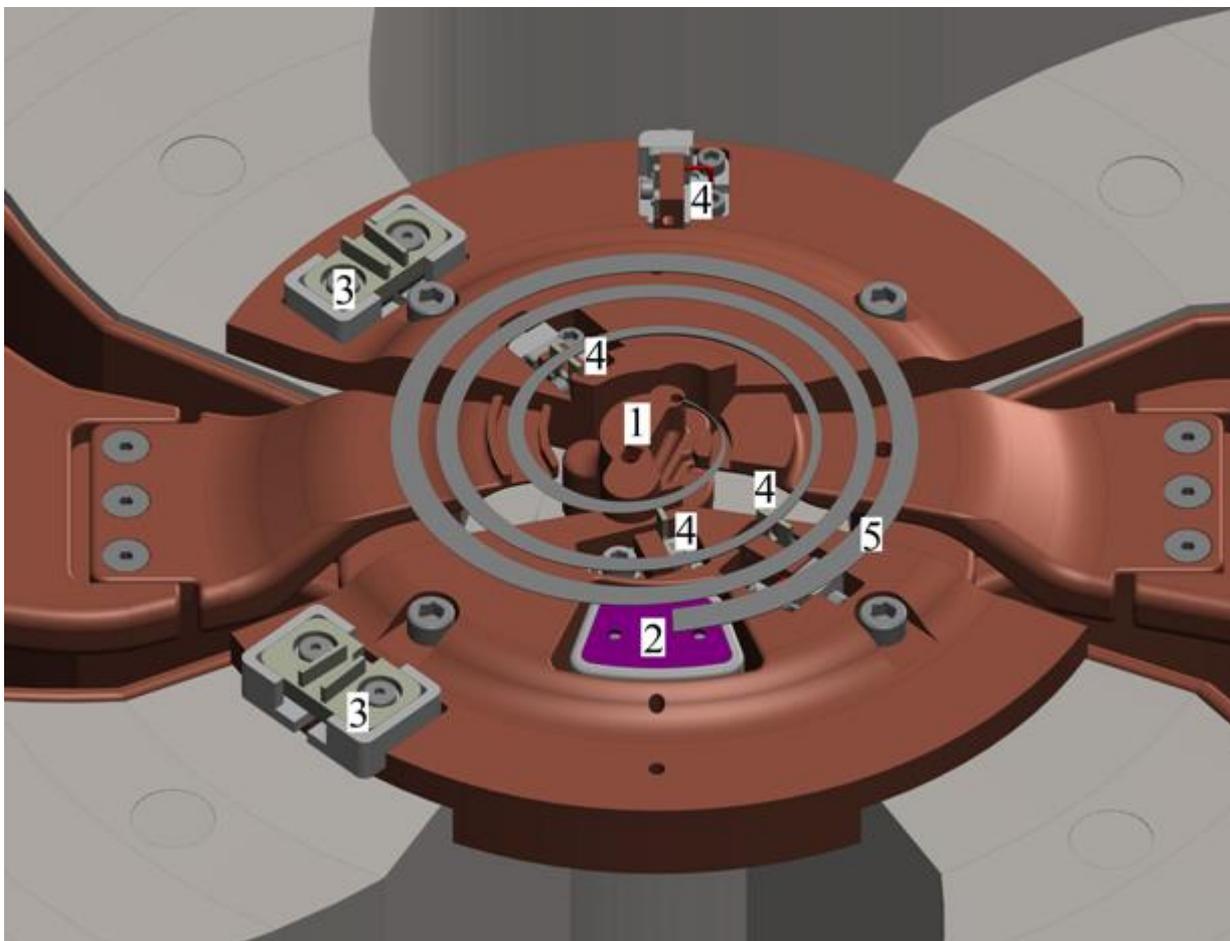
Результат формирования магнитного поля (проектирования магнитной системы) зависит от выбранной стратегии.

Форма секторов двух циклотронов с одинаковым магнитным полем

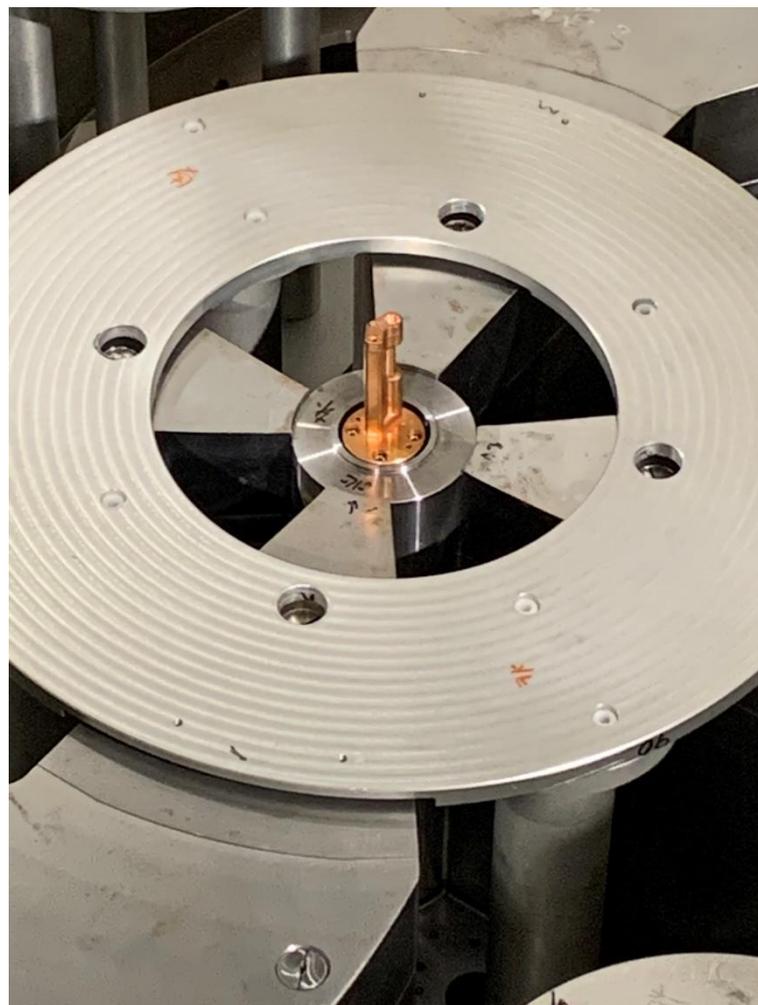


Центральная зона медицинского циклотрона:

1 – ионный источник, 2 – устройство модуляции интенсивности пучка, 3 – аксиальные коллиматоры, 4 – фазовые щели, 5 – пучок.

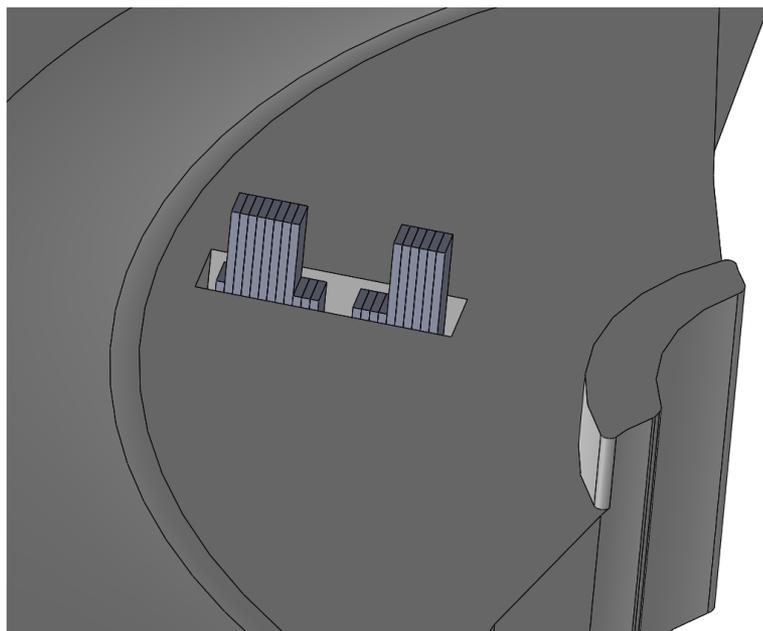


Ионный источник

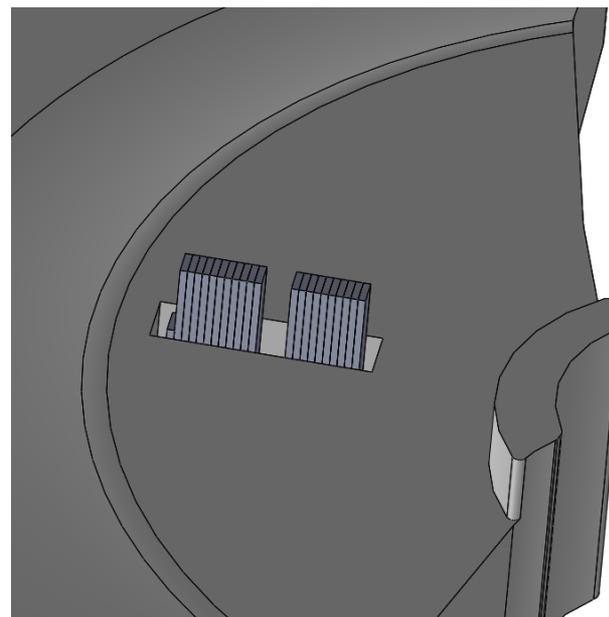


Фазовая щель давно перестала быть «двумя аксиальными постами»

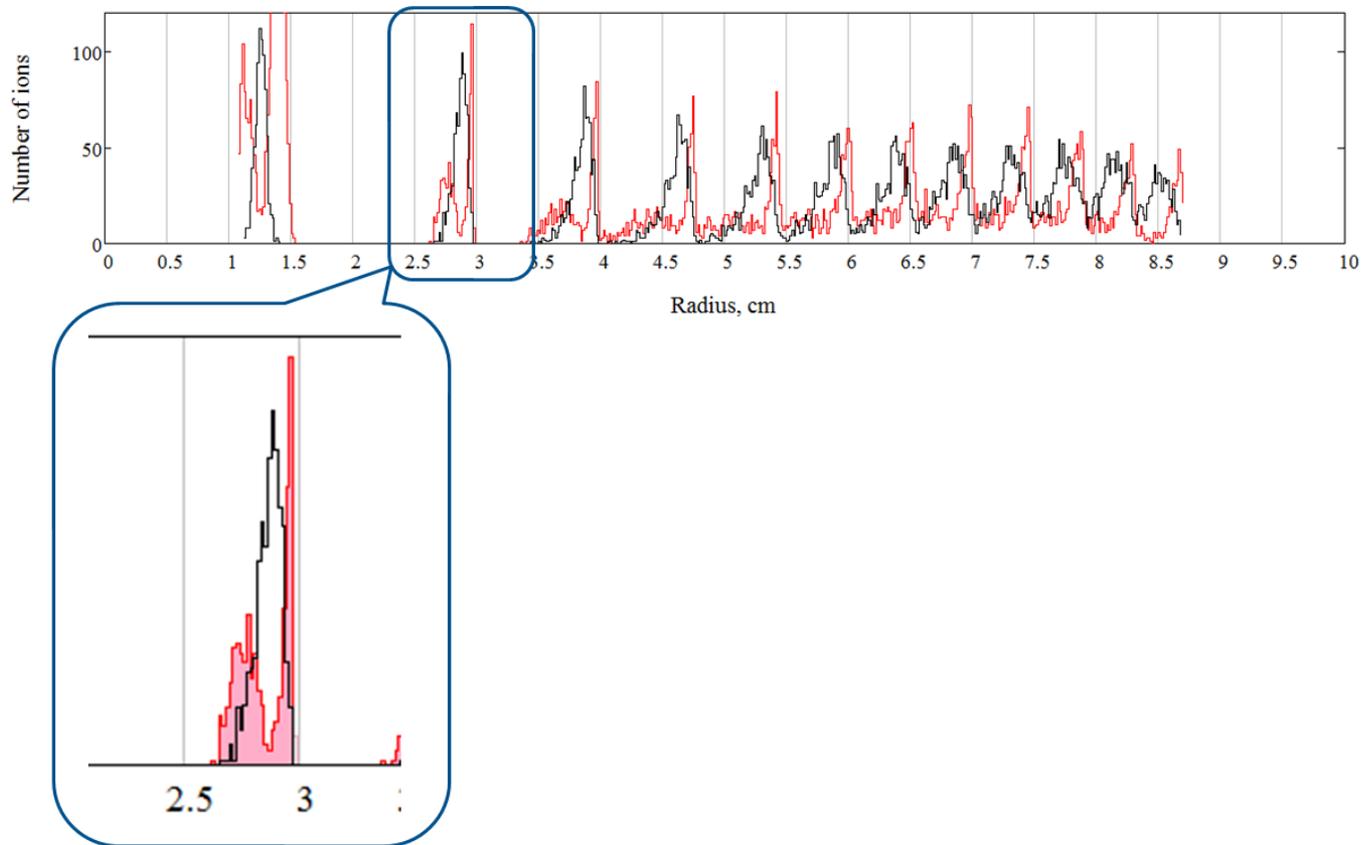
Выделение пучка с ВЧ
размером 12 градусов



Выделение пучка с ВЧ
размером 6 градусов



Выбор положения и формы фазовых щелей основан на обеспечении минимального перекрытия между частицами, которые нужно выделить, и оставшейся частью пучка



Выводная система – основная проблема!

Место основных инновационных решений, ошибок и провалов...



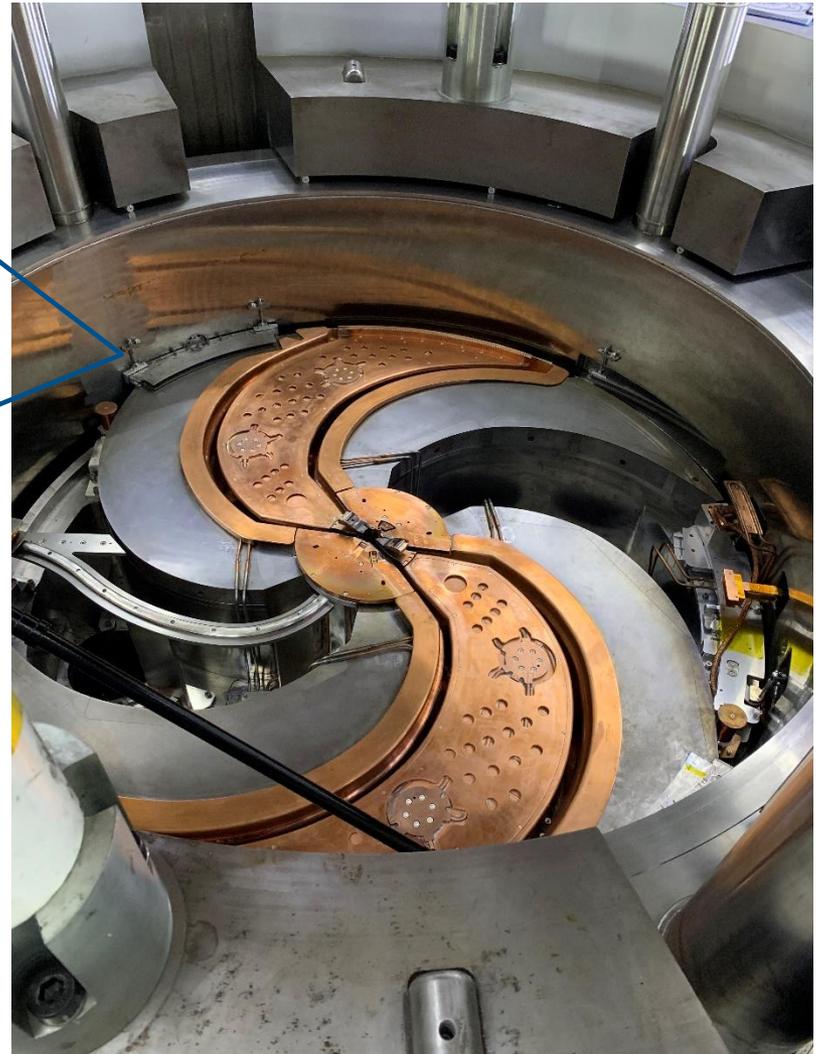
Долинные
шиммы
уникальной
формы

Параметры магнитов из открытых публикаций не отражают критически важные детали

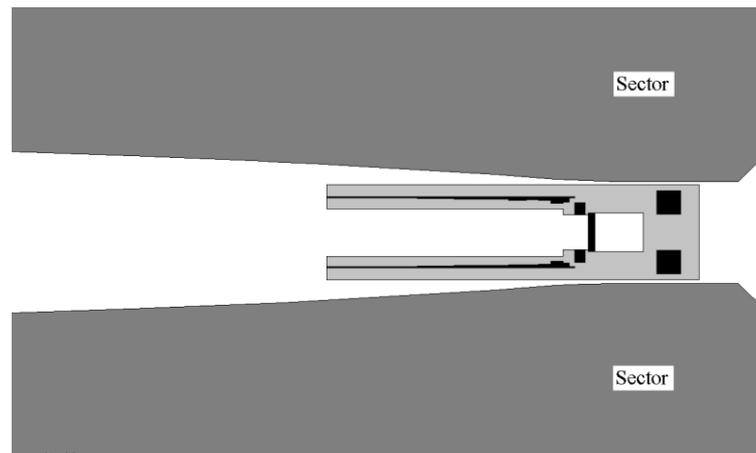
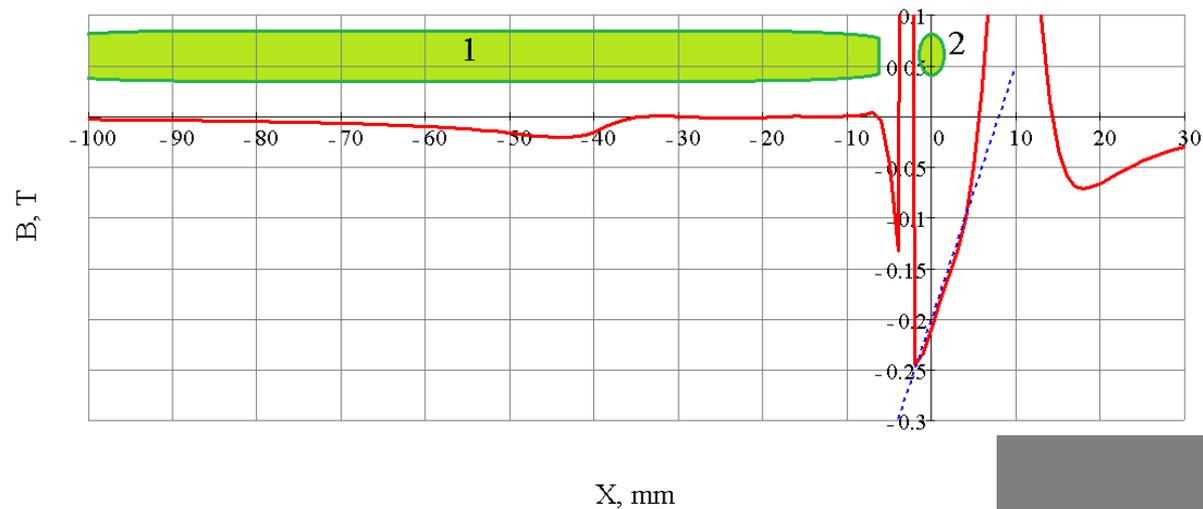
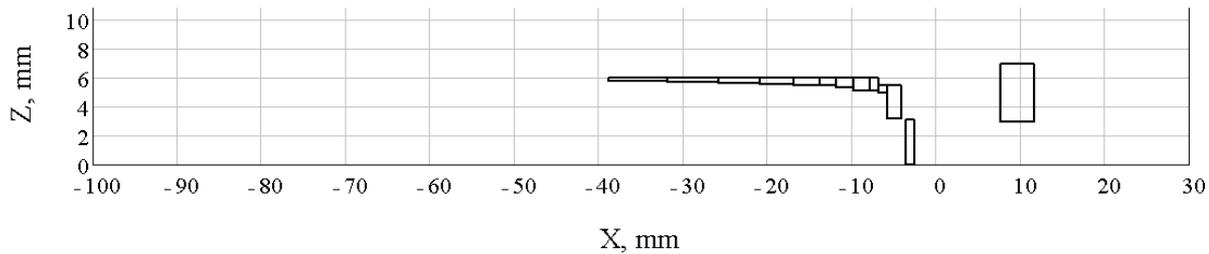
Профилирование секторов на краю?



Использование сложных магнитных каналов



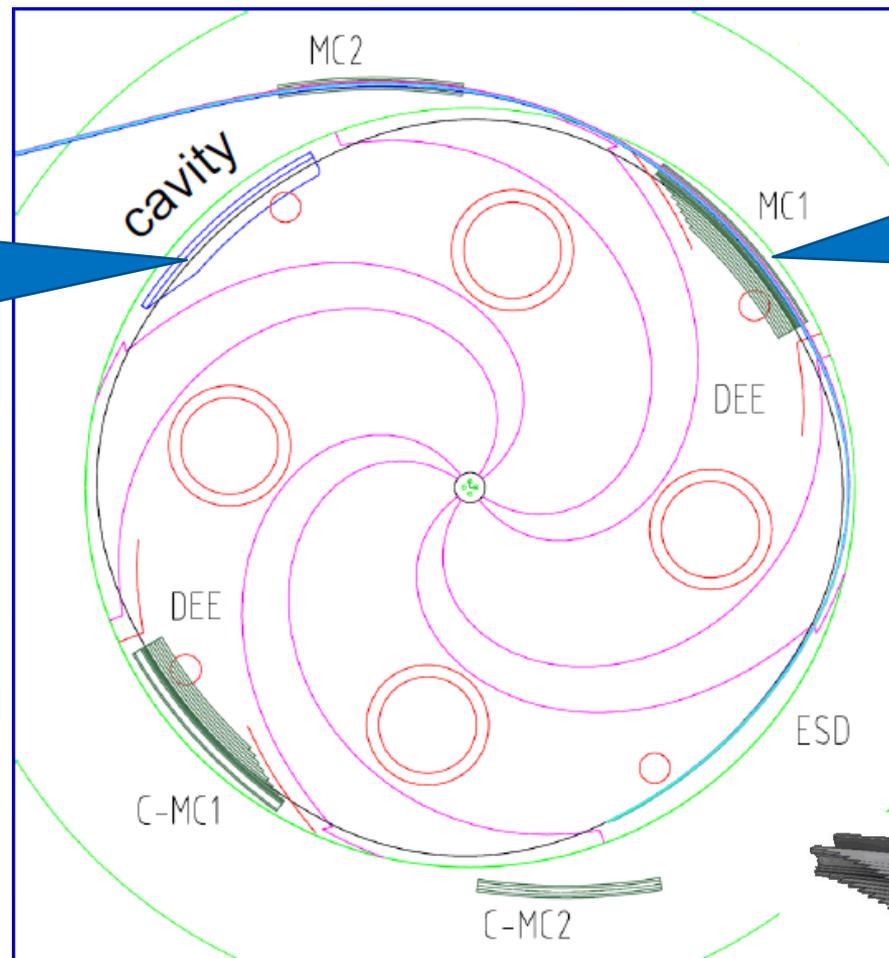
Использование сложных магнитных каналов



К центру циклотрона



Сумасшедшая идея о размещении магнитных каналов в ускоряющих дуантах



Дополнительная ускоряющая станция

Пассивный магнитный канал в спиральном дуанте



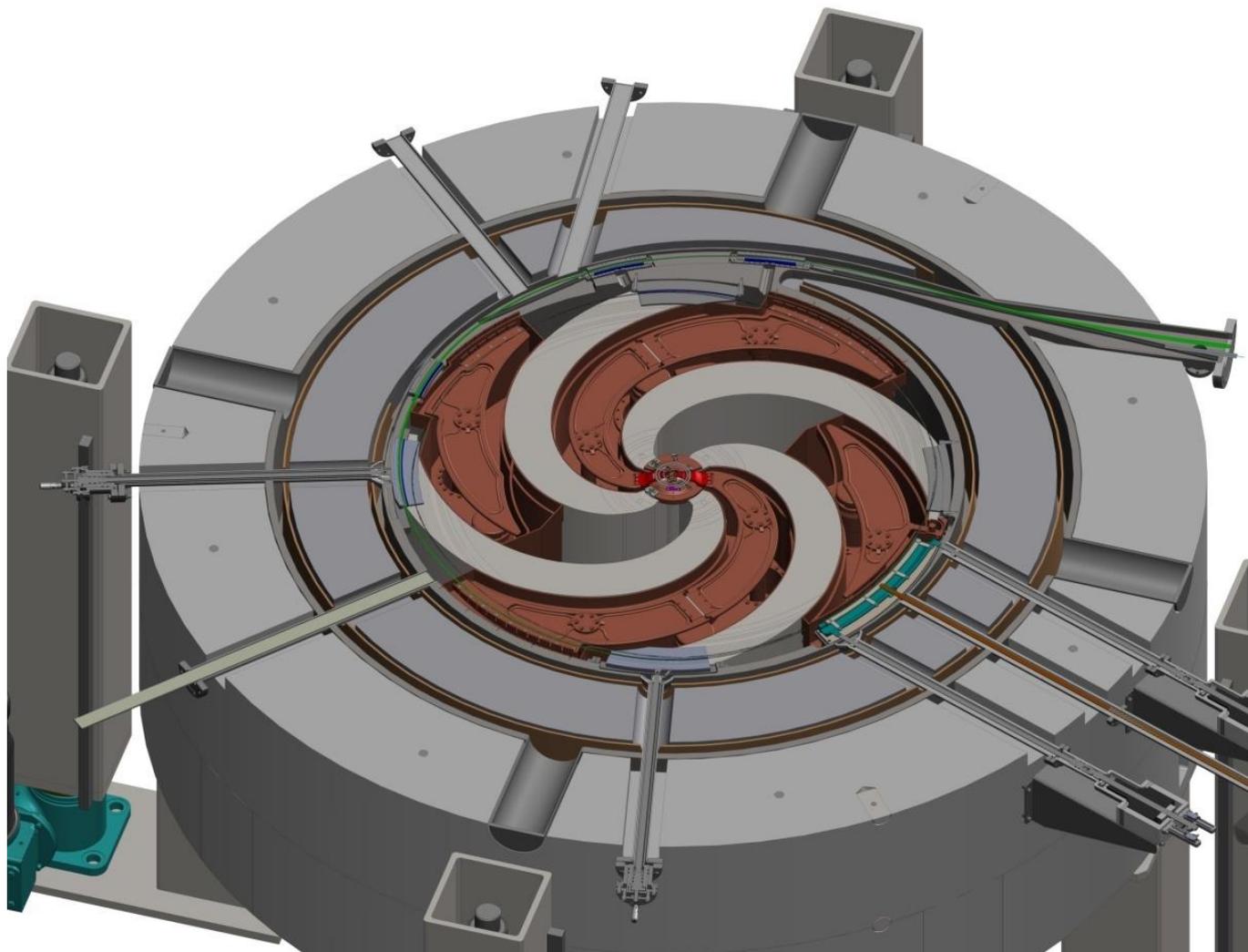
Циклотрон с каналами в дуантах успешно введен в эксплуатацию!



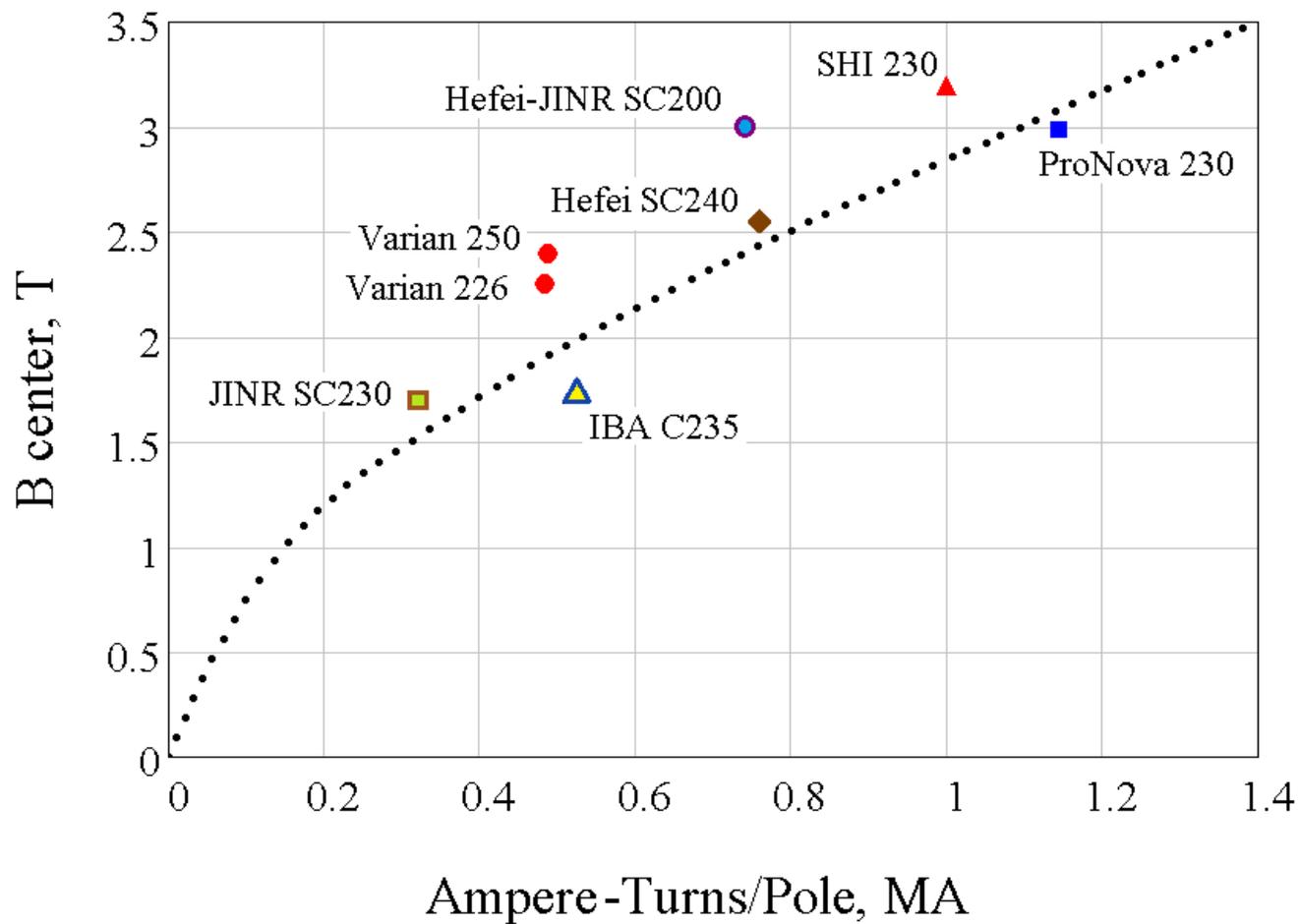
Магнитный канал

Компенсатор магнитного канала

Ускоряющая система из 2+1+1 дуантов
позволяет освободить место для выводной системы



Зависимость магнитного поля циклотронов от ампер-витков в обмотке



Зависимость магнитного поля циклотронов от ампер-витков в обмотке

Малый межсекторный зазор.
Критичная плотность тока в обмотке и параметры выводной системы.
Большие проблемы с работой.

Сложные магнитные каналы.
Детальное моделирование.
Успешно реализован.

Малый межсекторный зазор.
Магнитные каналы в дуантах.
Мега-профессиональная команда, обеспечившая успешный ввод в эксплуатацию.

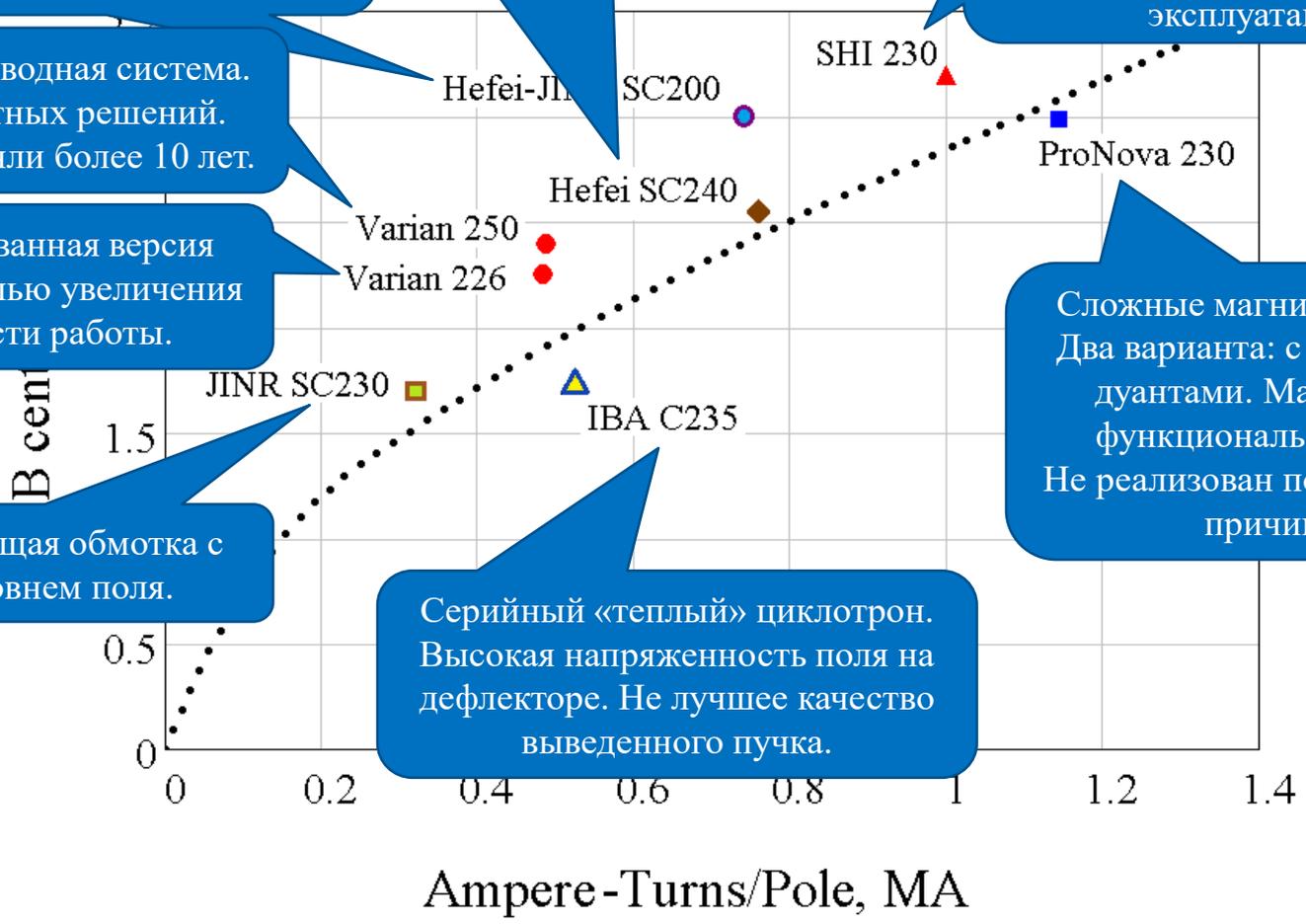
Уникальная выводная система.
Много секретных решений.
Настройки заняли более 10 лет.

Модифицированная версия Varian 250 с целью увеличения стабильности работы.

Сверхпроводящая обмотка с низким уровнем поля.

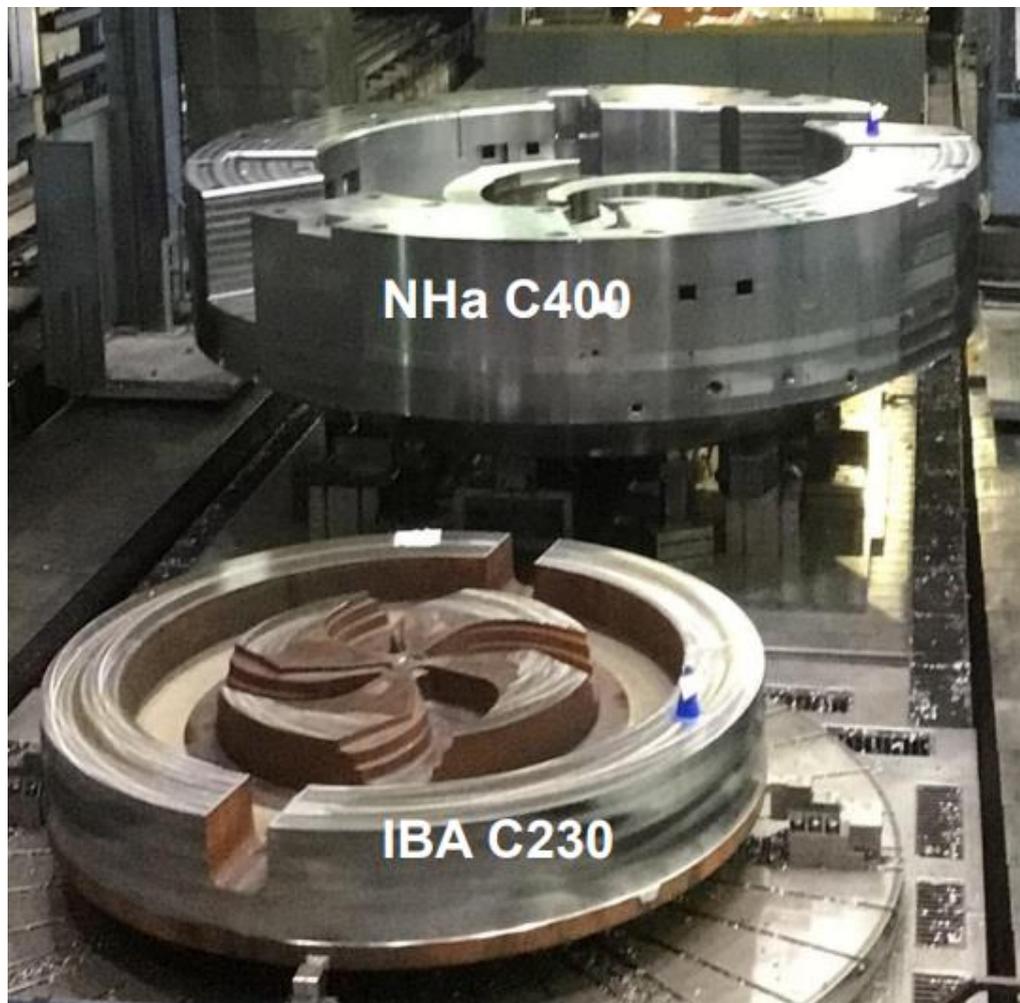
Серийный «теплый» циклотрон.
Высокая напряженность поля на дефлекторе. Не лучшее качество выведенного пучка.

Сложные магнитные каналы.
Два варианта: с 2-мя и 2+1+1 дуантами. Максимально функциональный центр.
Не реализован по финансовым причинам.

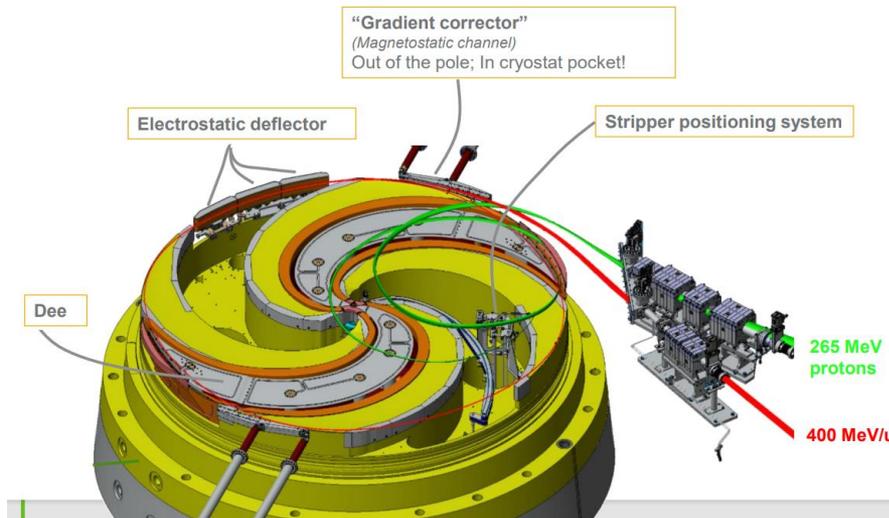


Циклотроны для адронной терапии

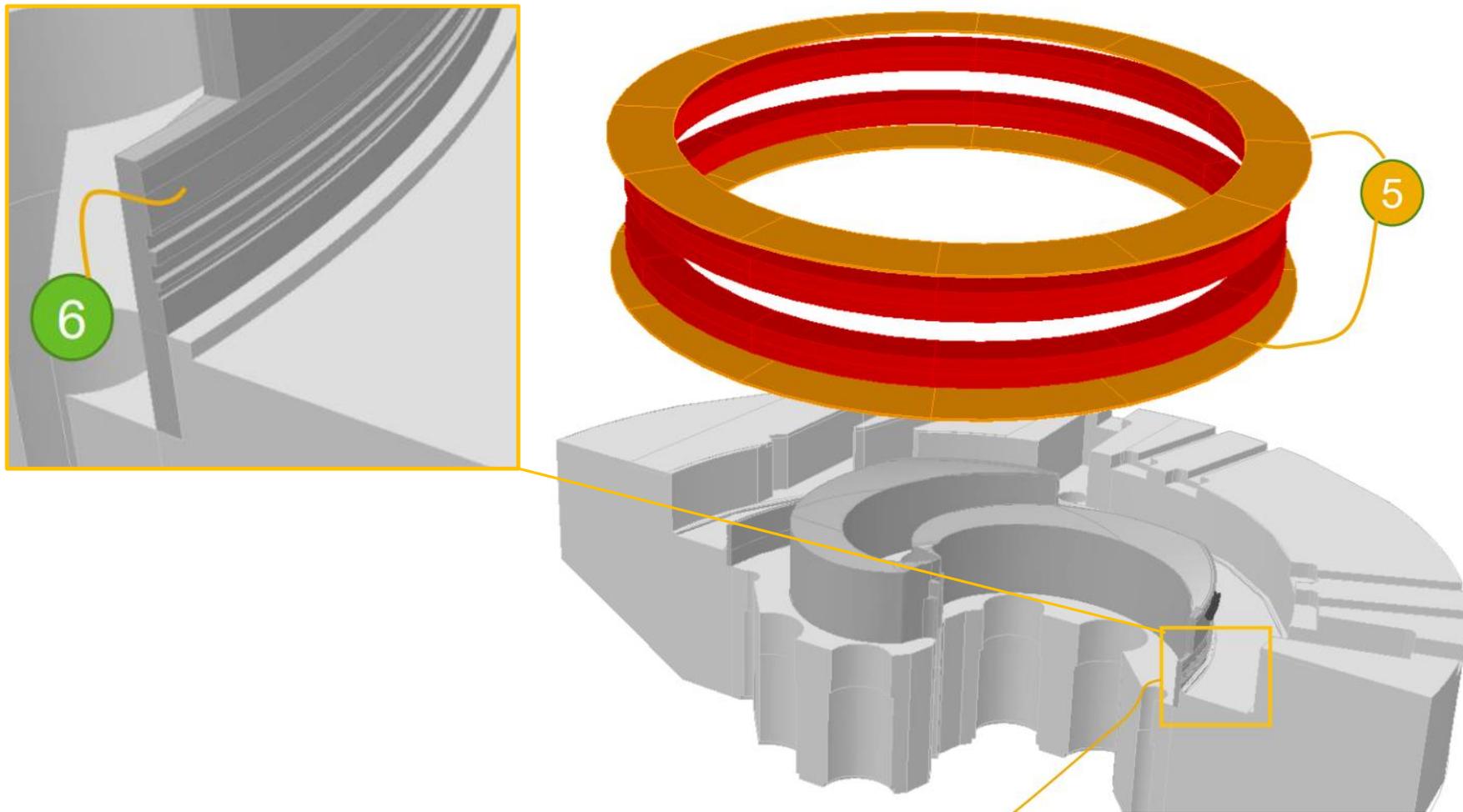
Сверхпроводимость позволяет продвигаться в область углеродных машин для терапии



Сложная и громоздкая магнитная система



Оптимизация поля на внутренних орбитах за счет внешнего профиля кольцевых шимм



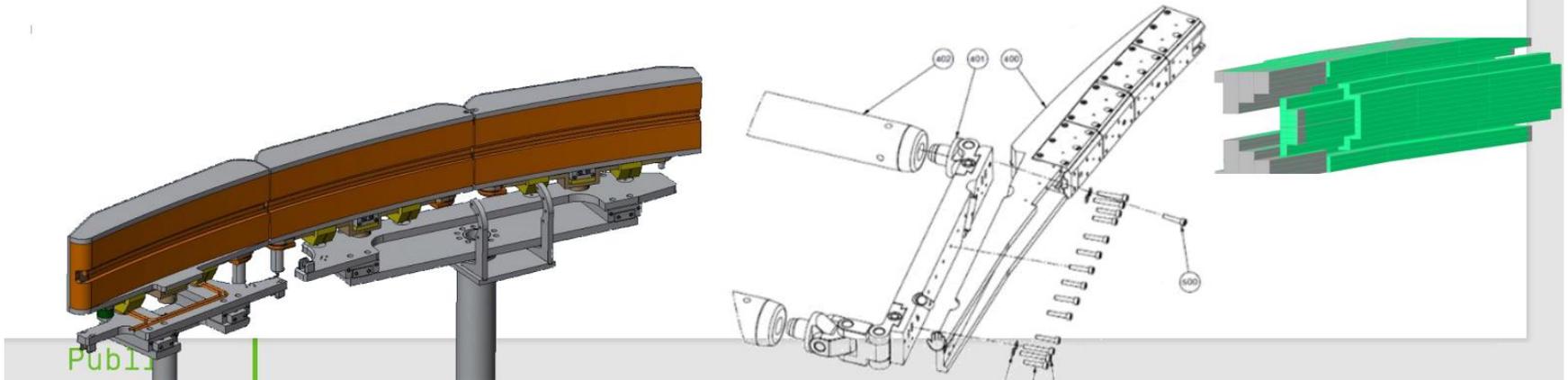
Перестраиваемые элементы системы вывода пучка

ESD Design phase

- Entrance position, exit position, gap are adjustable
- Foreseen operating voltage: <50 kV

GC Manufacturing

- Entrance position, exit position are adjustable

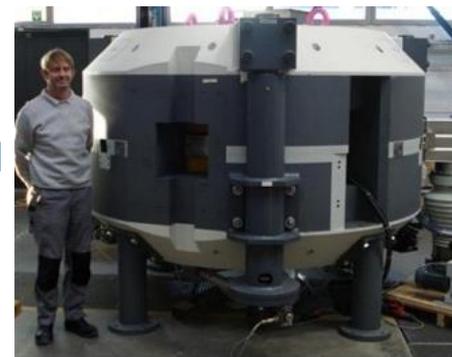
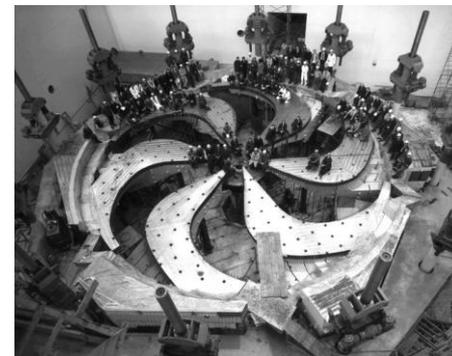


Мораль сей басни такова...

- Потребность в циклотронах растет повсеместно и неуклонно
- Преимущества компактных циклотронов очевидны, но зачастую не принципиальны для пользователей
- Проектирование циклотронов с высоким магнитным полем требует детального реалистичного моделирования динамики пучка. Цена ошибки велика.
 - В расчетах учитываем максимально возможное количество особенностей
- В эксплуатацию введено малое количество сверхпроводящих циклотронов. Открытая информация о их структуре не содержит ключевых физических и технических решений.
 - Известные мировые центры имеют «горький» опыт создания сверхпроводящих циклотронов
 - Технологии во многом решают
- Но правило «Умеем корректно моделировать – получаем результат» железно работает!

Спасибо за внимание...

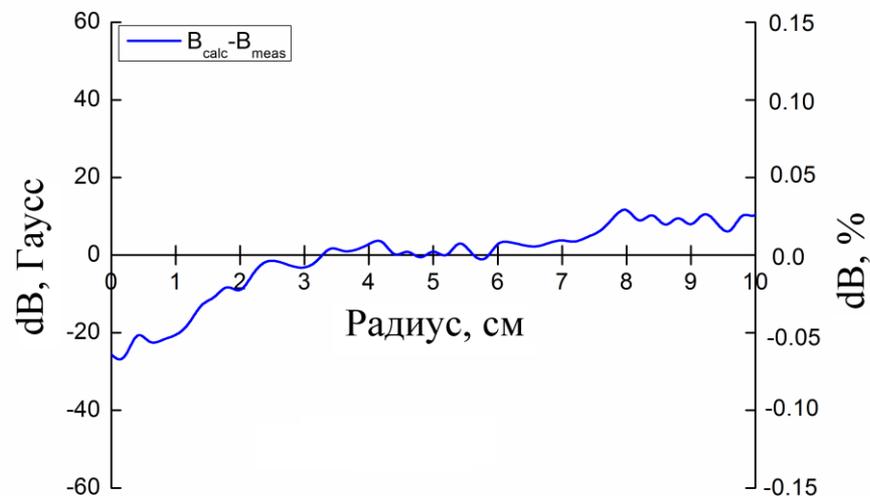
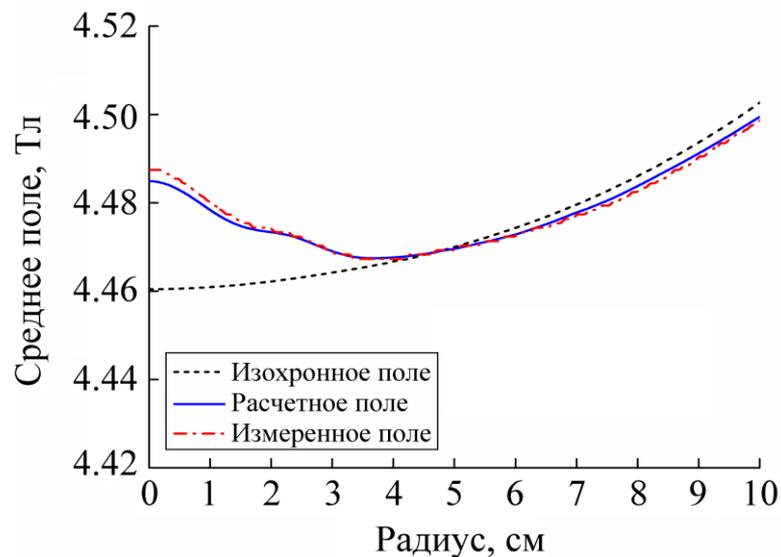
Эволюция размера циклотрона:



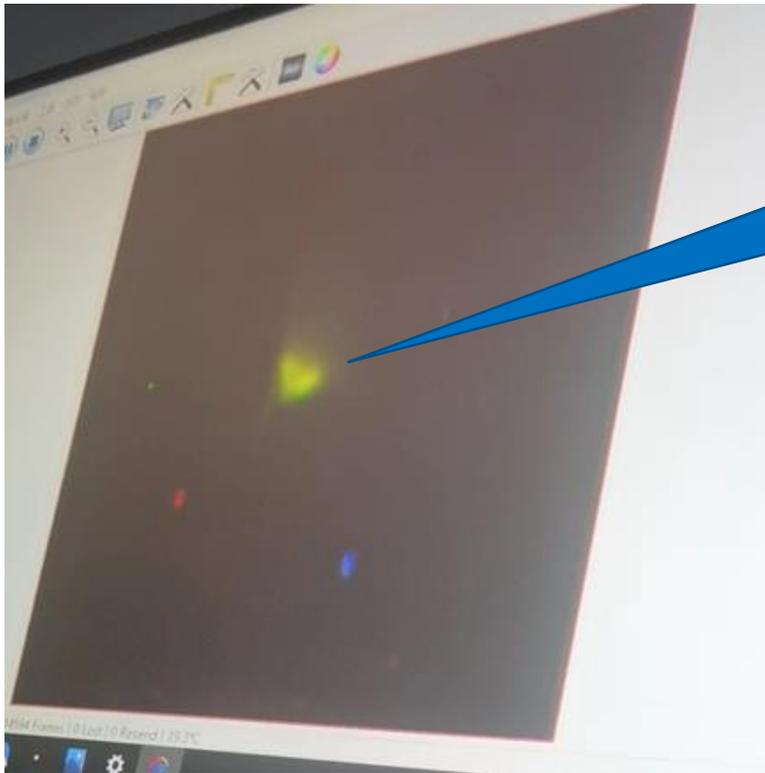
Совпадают ли измерения с расчетами?

Или придется годами шиммировать циклотрон?

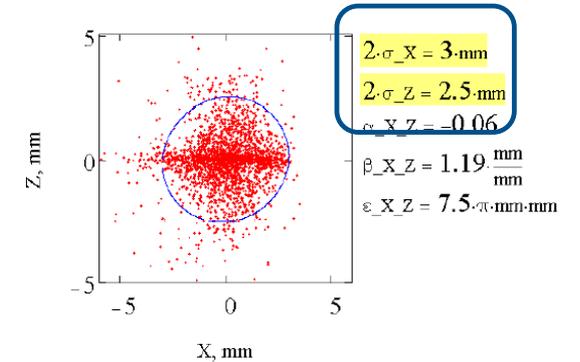
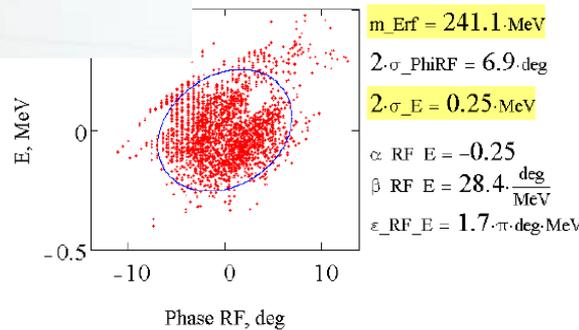
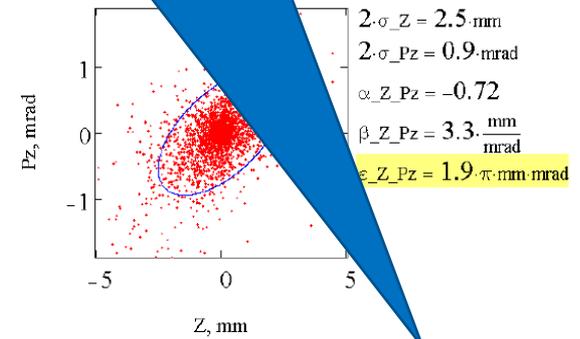
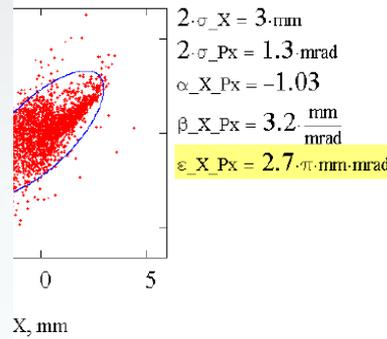
В циклотроне ION-12SC отклонение измеренного среднего магнитного поля от расчетного 0.1 %. Без шиммирования поля!



Детальные и реалистичные численные расчеты с высокой точностью прогнозируют результат

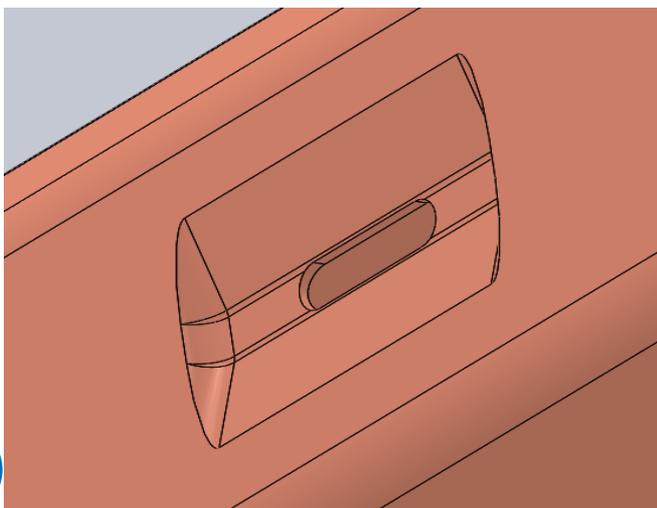
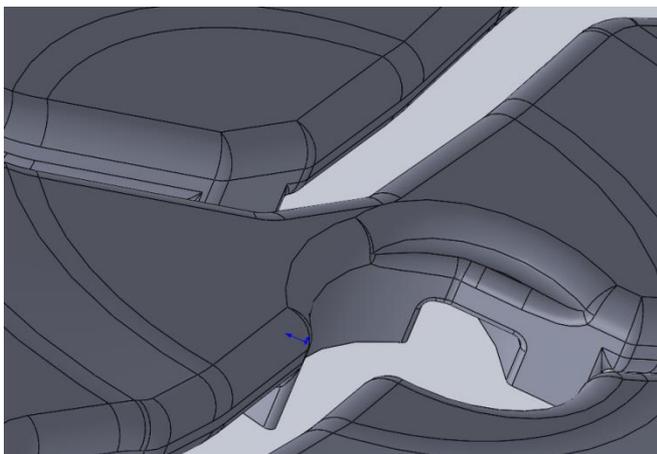


Расчетный размер выведенного пучка $6 \times 5 \text{ мм}^2$, измеренный $7 \times 5 \text{ мм}^2$

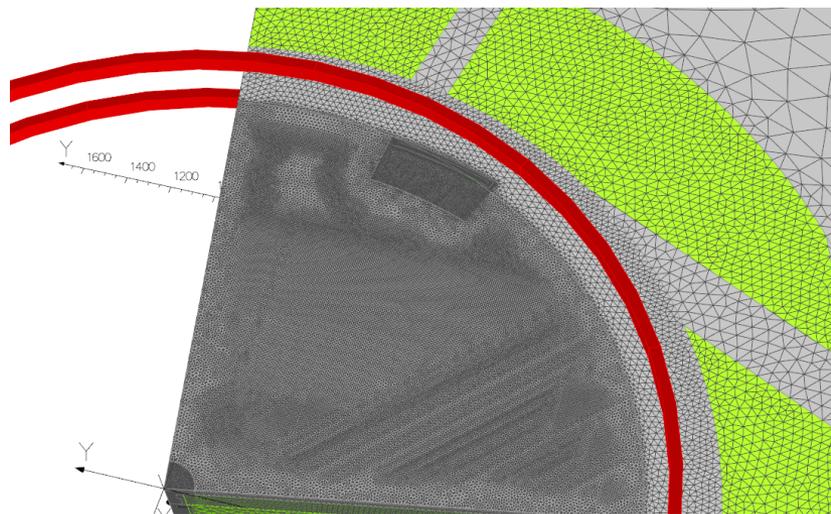
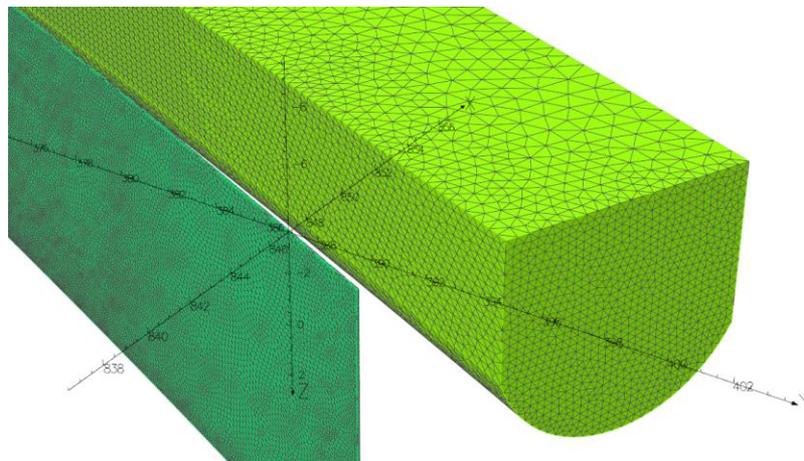


Подготовка модели для расчета трехмерного поля

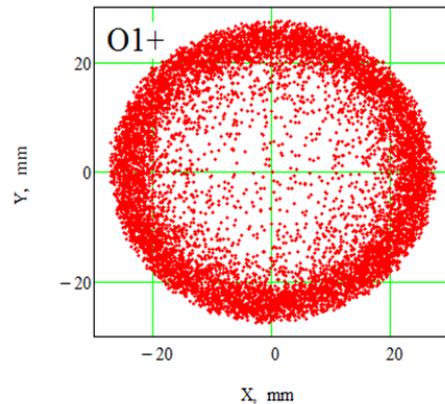
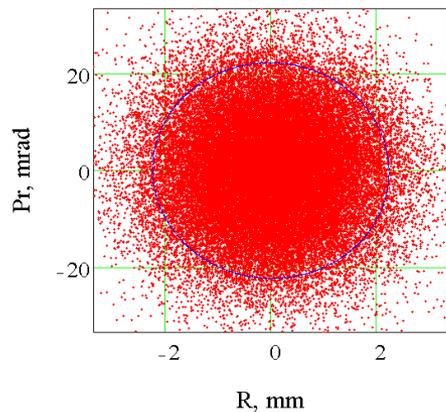
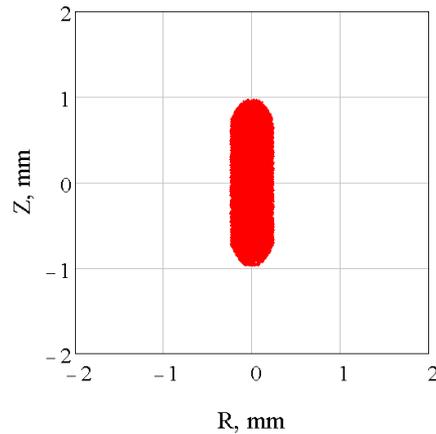
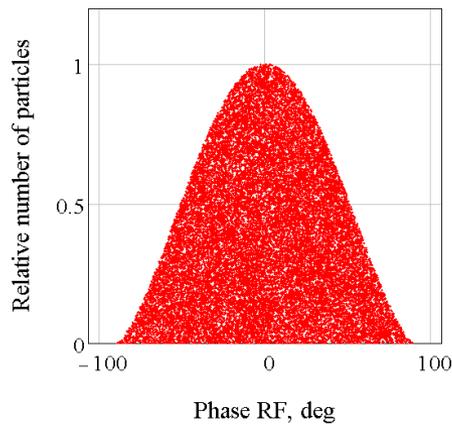
Использование реалистичной структуры с фасками, скруглениями и т.д.



Генерация сетки с большим количеством разбиений даже для мелких деталей и расчет вкладов элементов с присутствием основных полей



Использование реалистичных начальных пучков

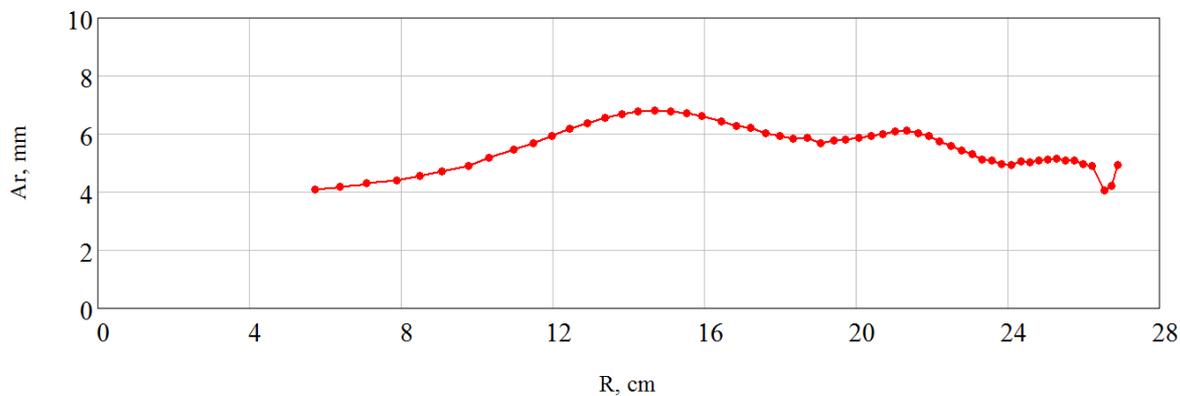


Учет особенностей прохождения пучком промежутка от плазмы до пуллера (Закон Чайлда-Ленгмюра). Генерация пучка в конфигурационном пространстве в соответствии с размерами щели источника или измерениями.

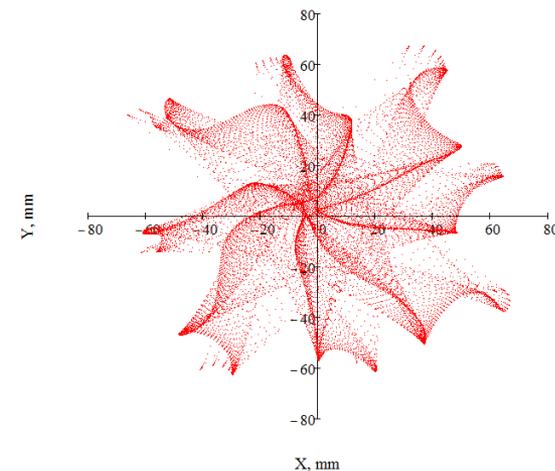
Использование различных схем генерации распределений: Гаусса, Капчинского-Владимирского, равномерного, WaterBag.

Анализ центрирования пучка для частиц, начинающих движение непосредственно из источника.

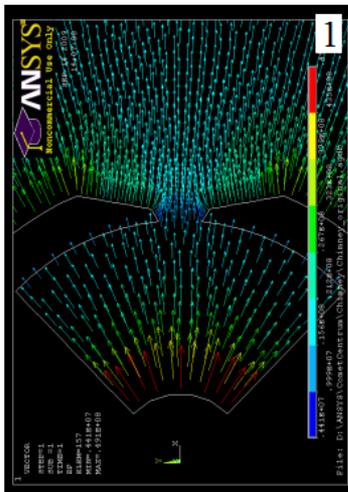
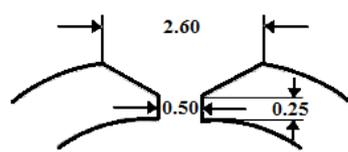
Анализ движения точки на фазовом пространстве $(r; Pr)$



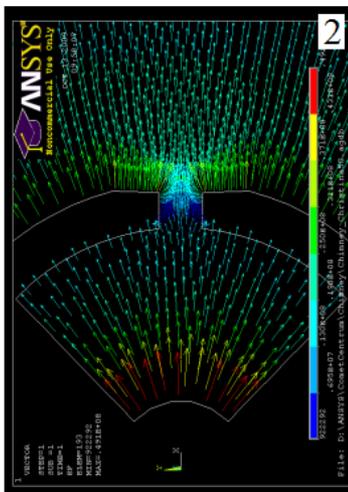
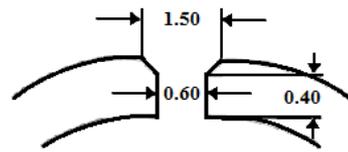
Вычисление центров мгновенных окружностей, касательных к орбите



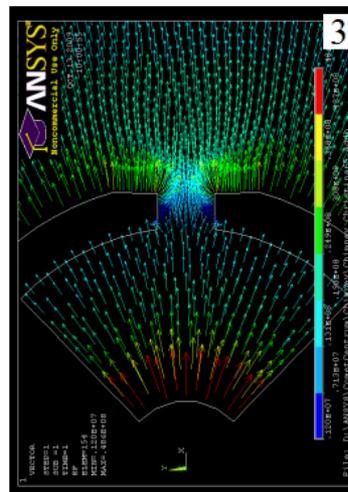
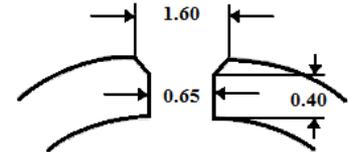
Оптимизация скосов щели источника ионов*



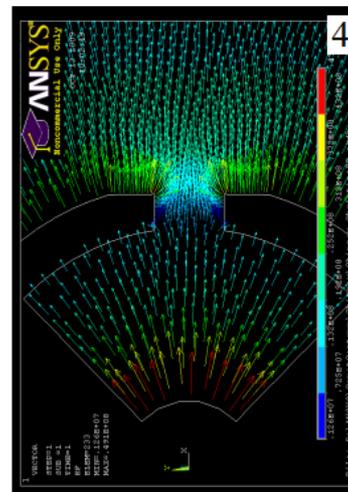
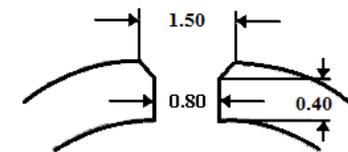
max I: 850 nA



max I: 90 nA



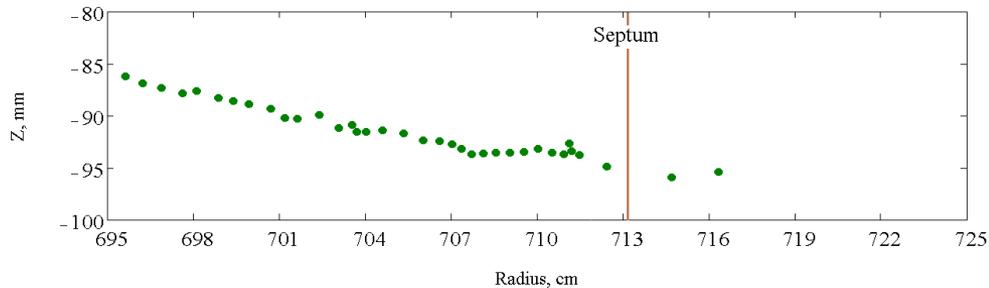
max I: 250 nA



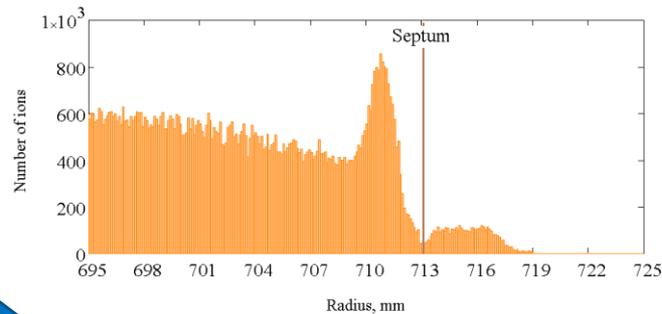
max I: 850 nA

*C. Wouters, C. Baumgarten, S. Forss, V. Vrankovic, H. Zhang, M. Schippers, Central region studies of the 250 MeV SC cyclotron for proton therapy, Proc. of ECPM 2009.

Лишь использование большого количества макро-частиц и реалистичных начальных эмиттансов позволяет получить корректные оценки, в частности, оптимизировать процесс вывода пучка, а также корректно оценить качественные характеристики пучка

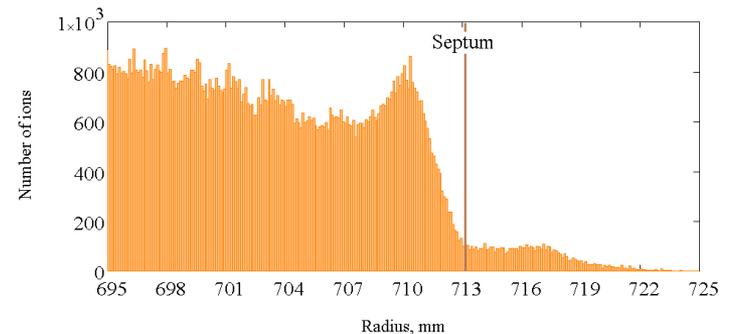


Одна частица

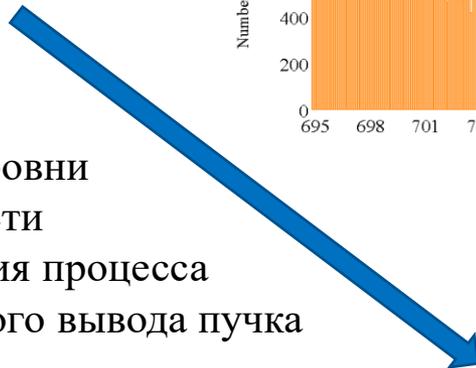


Самосогласованный пучок

Пучок из источника

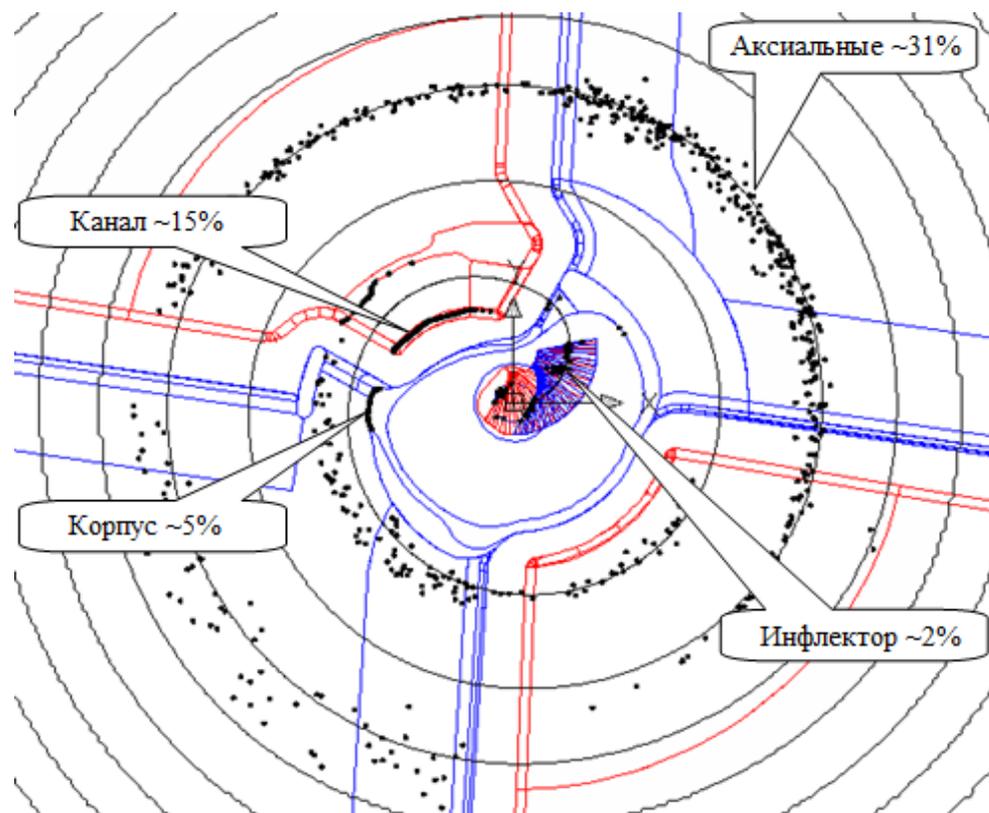
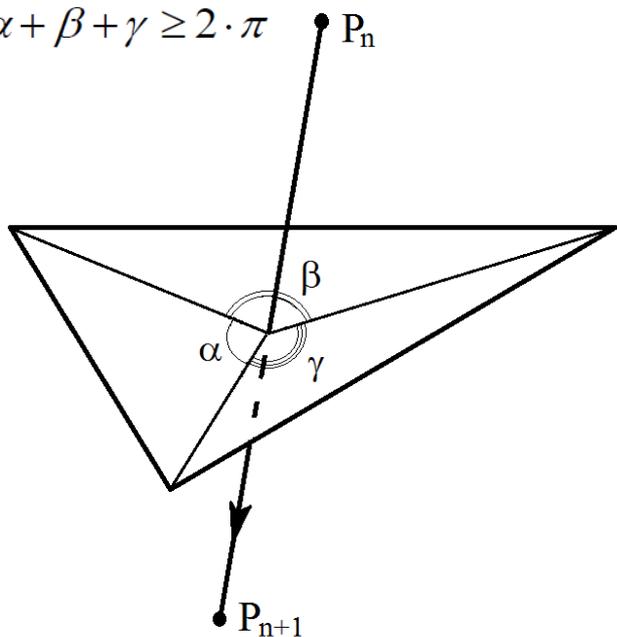


Различные уровни реалистичности моделирования процесса прецессионного вывода пучка

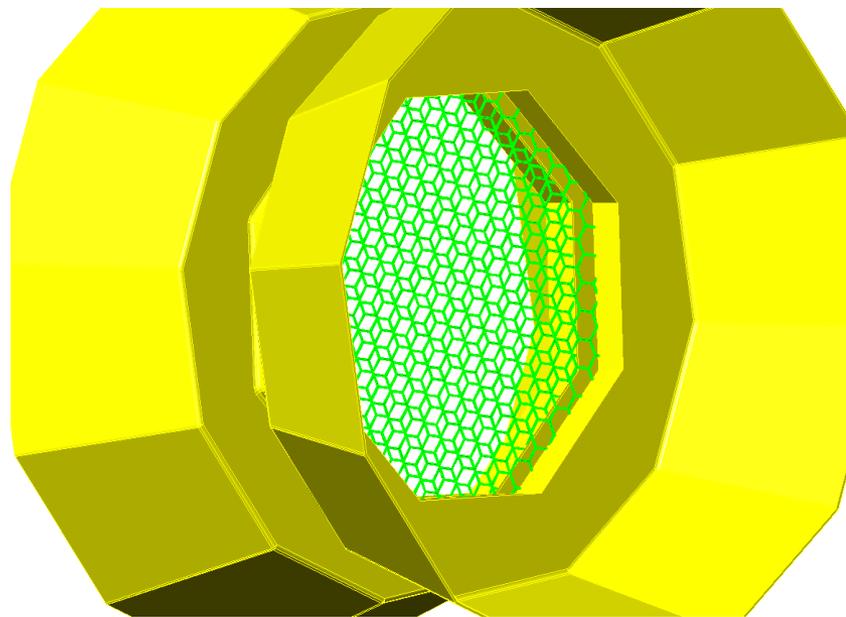
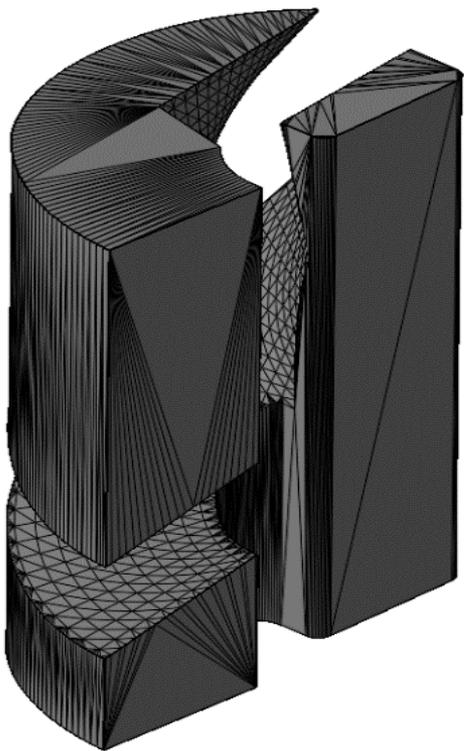


Учет потерь частиц на поверхностях структурных элементов. Трехмерное тело представляется в виде набора триангулированных поверхностей. Исследуется пересечение частицей каждого из треугольников поверхности.

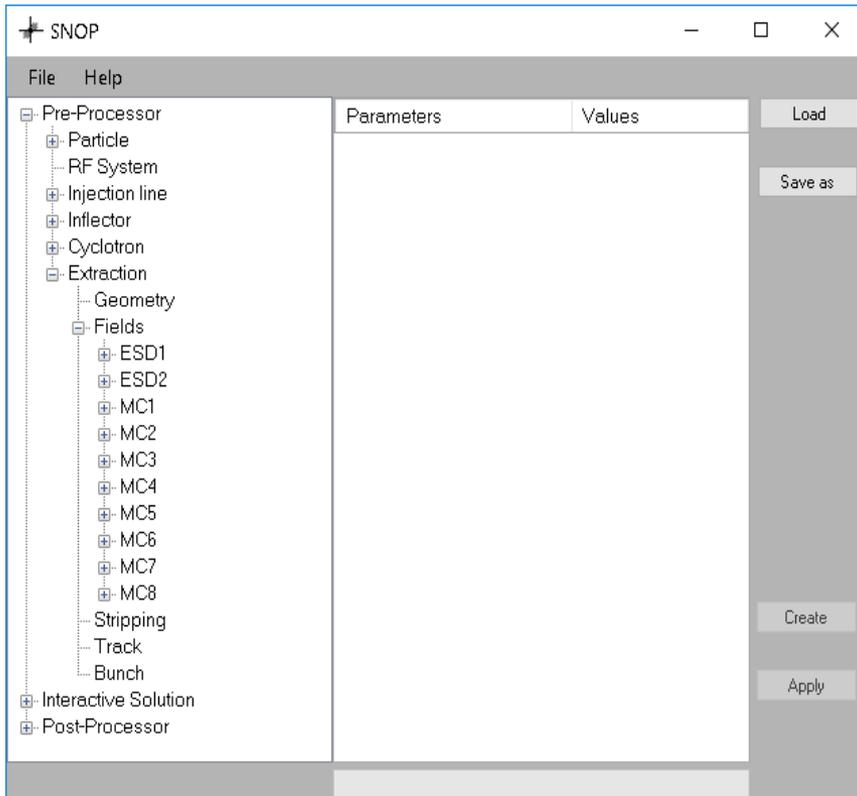
$$\alpha + \beta + \gamma \geq 2 \cdot \pi$$



Описание поверхностей трехмерных тел с максимальной точностью



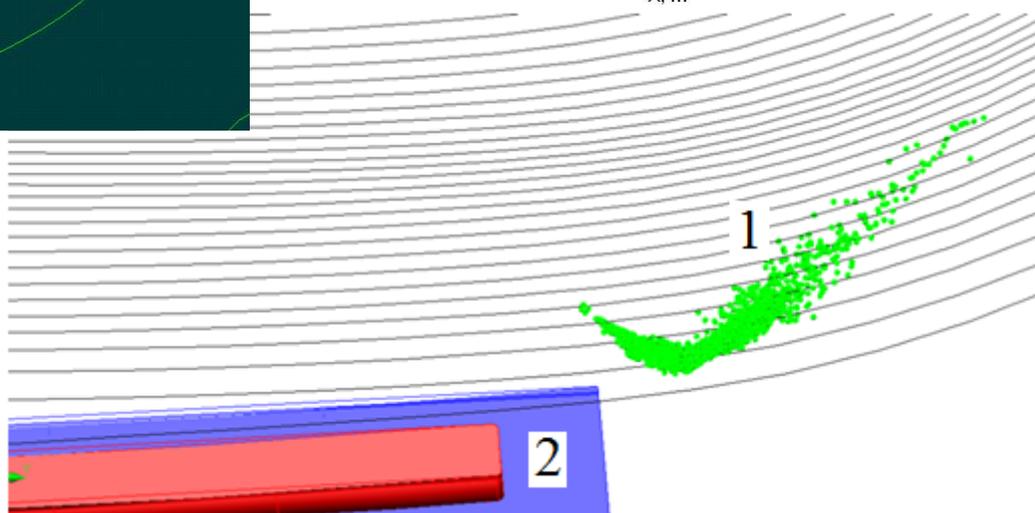
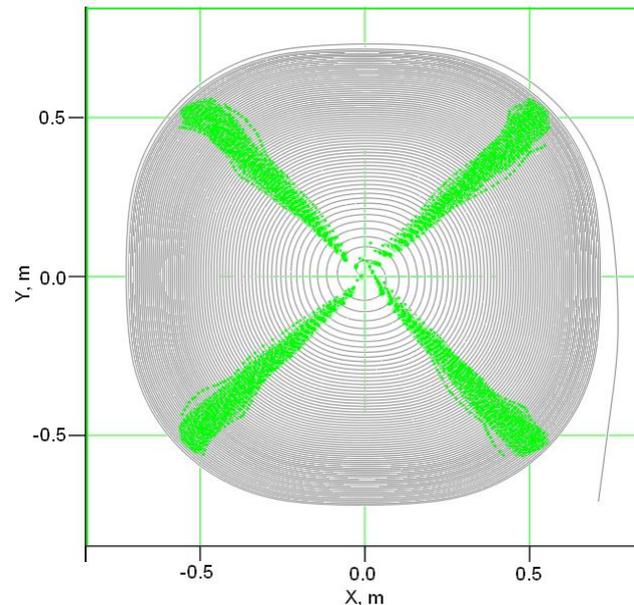
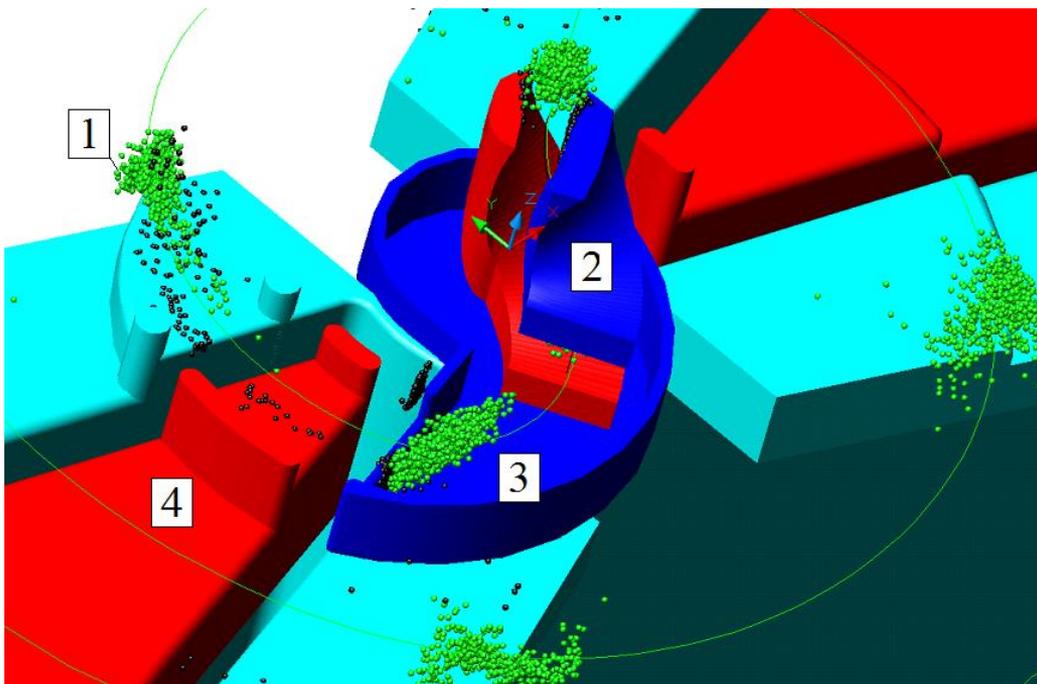
Программа SNOP



- Максимально реалистичные расчеты
 - *Использование трехмерных полей*
 - *Учет пространственного заряда пучка*
 - *Учет потерь частиц*
 - *Возможность проведения расчета в полях с искаженной медианной плоскостью*
- Глубокая интегрируемость
 - *Расчет установки от источника ионов до выводного окна и линии транспортировки*
 - *Поддержка множества структурных элементов.*
 - *Моделирование систем диагностики пучка: дифференциальный пробник, главный пробник, фазовый пробник и т.д.*
- Эффективное использование ресурсов ПК
 - *Использование многоядерности*
 - *Расчет на графических процессорах*
- Удобный в использовании интерфейс
- Широкие возможности по визуализации данных

Использование визуальных методов анализа результатов расчетов

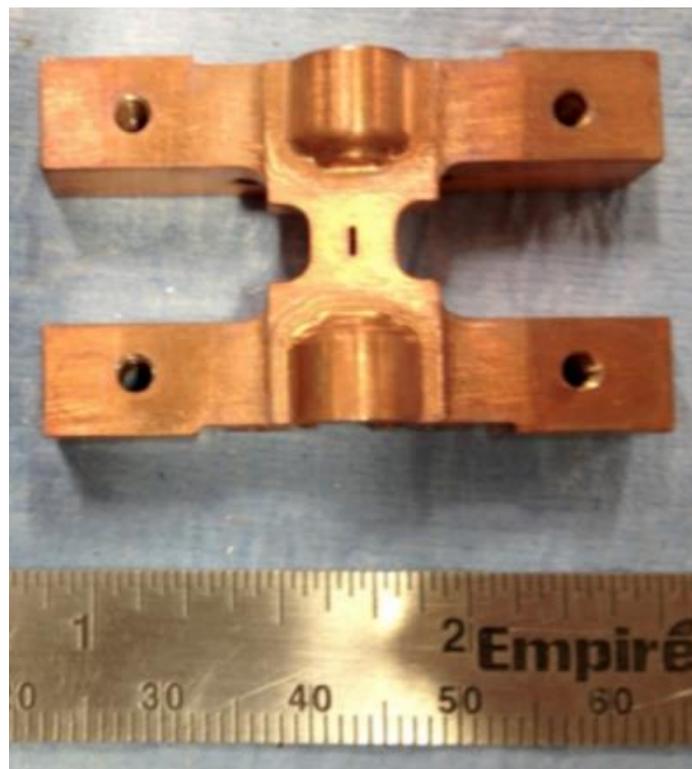
Динамическая и статическая картина движения частиц на фоне трехмерной структуры установки



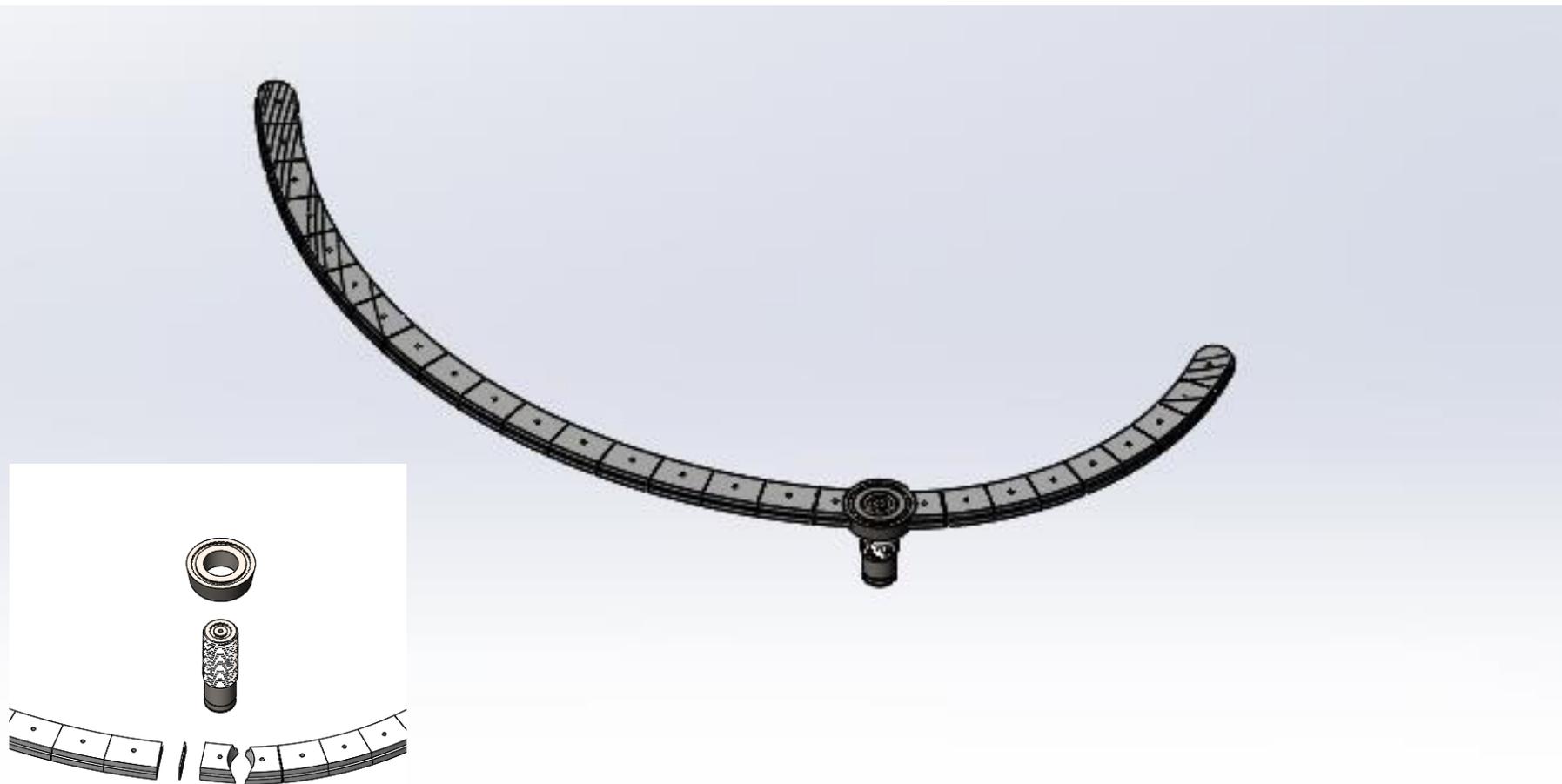
Основные особенности проектирования ультракомпактных изохронных циклотронов

- Требуется прецизионность расчетов, изготовления узлов и их сборки.
- Нет ограничения на величину магнитного поля с точки зрения функционирования токовой обмотки и криогеники
- Главными ограничениями выступают возможность обеспечения устойчивого движения частиц и возможность производства и функционирования узлов, имеющих малые размеры
- Интенсивность конечного пучка падает с ростом величины магнитного поля (с уменьшением размеров узлов и ростом частоты ВЧ)
- С современным уровнем развития технологий верхним ограничением на уровень магнитного поля видится величина 4.5 Тл для случая внешнего источника (5 Тл при использовании редкоземельных сталей) и ~2.7 Тл при использовании внешней инжекции.
- Ввод циклотрона в эксплуатацию осложнен сильной зависимостью устойчивости пучка от малых изменений структуры.

Внутренний источник ионов ION-12SC



Набор из 27 Т-образных шимм устанавливается вдоль центральной линии секторных шимм. Диапазон изменения аксиального размера каждой шиммы ± 5 мм.



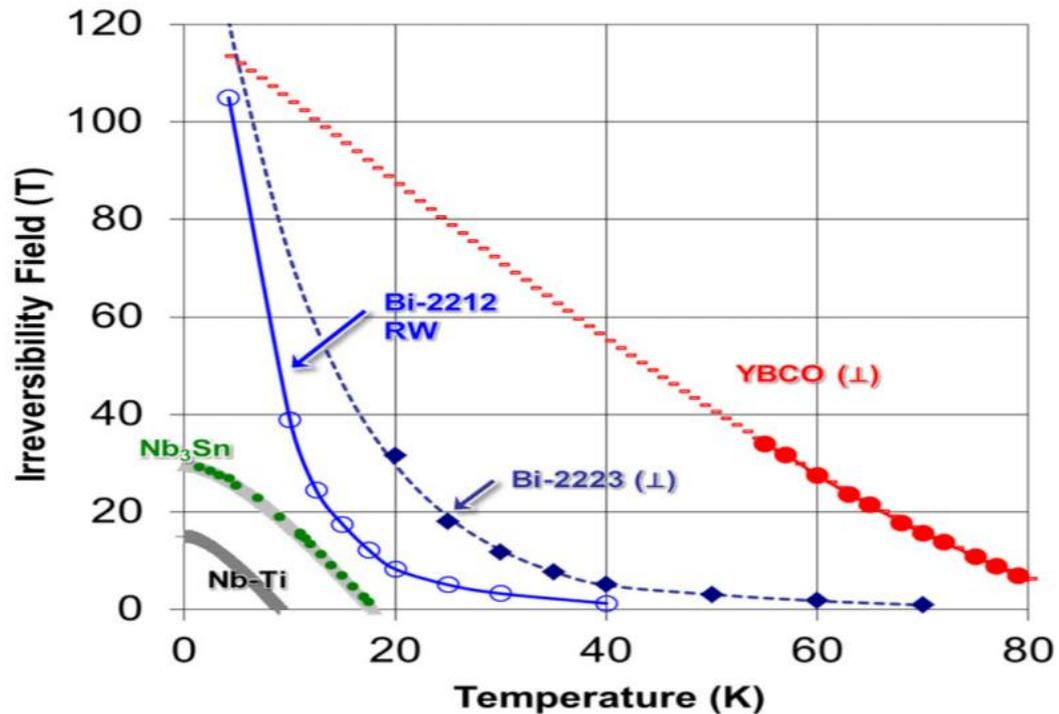
~1/3 таблицы, содержащей формулирование величин допусков на изготовление и позиционирование узлов циклотрона

	Допуск	Критическая величина
Аксиальный сдвиг верхней и нижней частей обмотки в одном направлении	0.1 мм	0.5 мм
Аксиальный сдвиг верхней и нижней частей обмотки в противоположных направлениях	0.3 мм	0.9 мм
Вращение частей обмотки вокруг горизонтальной оси в одном направлении	0.02 градуса	0.06 градуса
Вращение частей обмотки вокруг горизонтальной оси в противоположных направлениях	0.02 градуса	
Радиальный сдвиг обмотки	0.5 мм	
Величина аксиального сечения обмотки	0.2 мм	0.7 мм
Внутренний диаметр обмотки	0.3 мм	
Внешний диаметр обмотки	0.5 мм	
Сдвиг верхних и нижних секторов аксиально в одном направлении	0.1 мм	0.5 мм
Сдвиг верхних и нижних секторов аксиально в противоположных направлениях	0.3 мм	
Азимутальный размер секторов	0.4 мм	
...

Основные параметры циклотрона К230

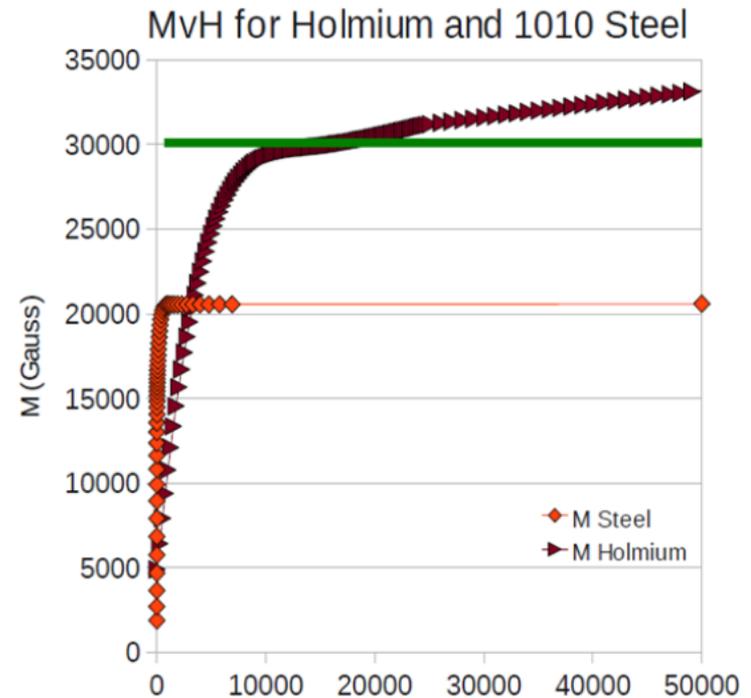
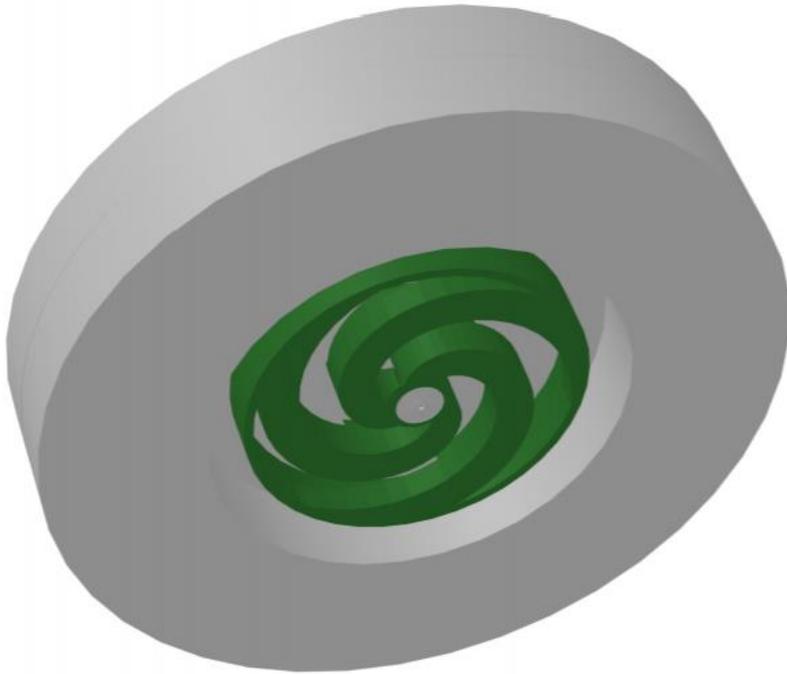
Параметр	Величина
Тип	Компактный изохронный
Ускоряемый ион	Протон
Энергия выведенного пучка	230 МэВ
Интенсивность выведенного пучка	>600 нА
Эмиттансы выведенного пучка	<5 п·мм·мрад
Энергетический разброс	±0.1 %
Тип инжекции	Внутренняя, РIG источник
Среднее магнитное поле: центр/вывод	2.97 Тл/ 3.7 Тл
Количество секторов	4
Азимутальный размер сектора	35-29 °
Максимальная спиральность сектора	71 °
Радиус полюса	650 мм
Зазор между секторами	30-18 мм
Зазор в долине	700 мм
Количество дуантов	2+1+1
Частота ускорения	90.9 МГц
Гармоника ВЧ	2
Амплитуда ускоряющего напряжения: центр/вывод	100 кВ/120 кВ
Радиус вывода	629 мм
Выводная система	Электростатический дефлектор + 5 магнитных каналов
Потребляемая мощность	~425 кВт (магнит: 2.4 кВт, ВЧ: 200 кВт)
Диаметр циклотрона	2600 мм
Высота циклотрона	1570 мм
Вес циклотрона	60 т

Using of new materials for superconductors



*GianLuca Sabbi, “The Future of High Field Superconducting Magnets”, CYCLOTRONS 2019.

Using of a high-permeability material (holmium, gadolinium)



Can help increasing magnetic field level by ~0.5 T

**Needs cooling of sectors
Price is in ~30 times higher than s1010**