

Некоторые особенности гатчинского изохронного циклотрона для ускорения H^- ионов до энергии 80 МэВ



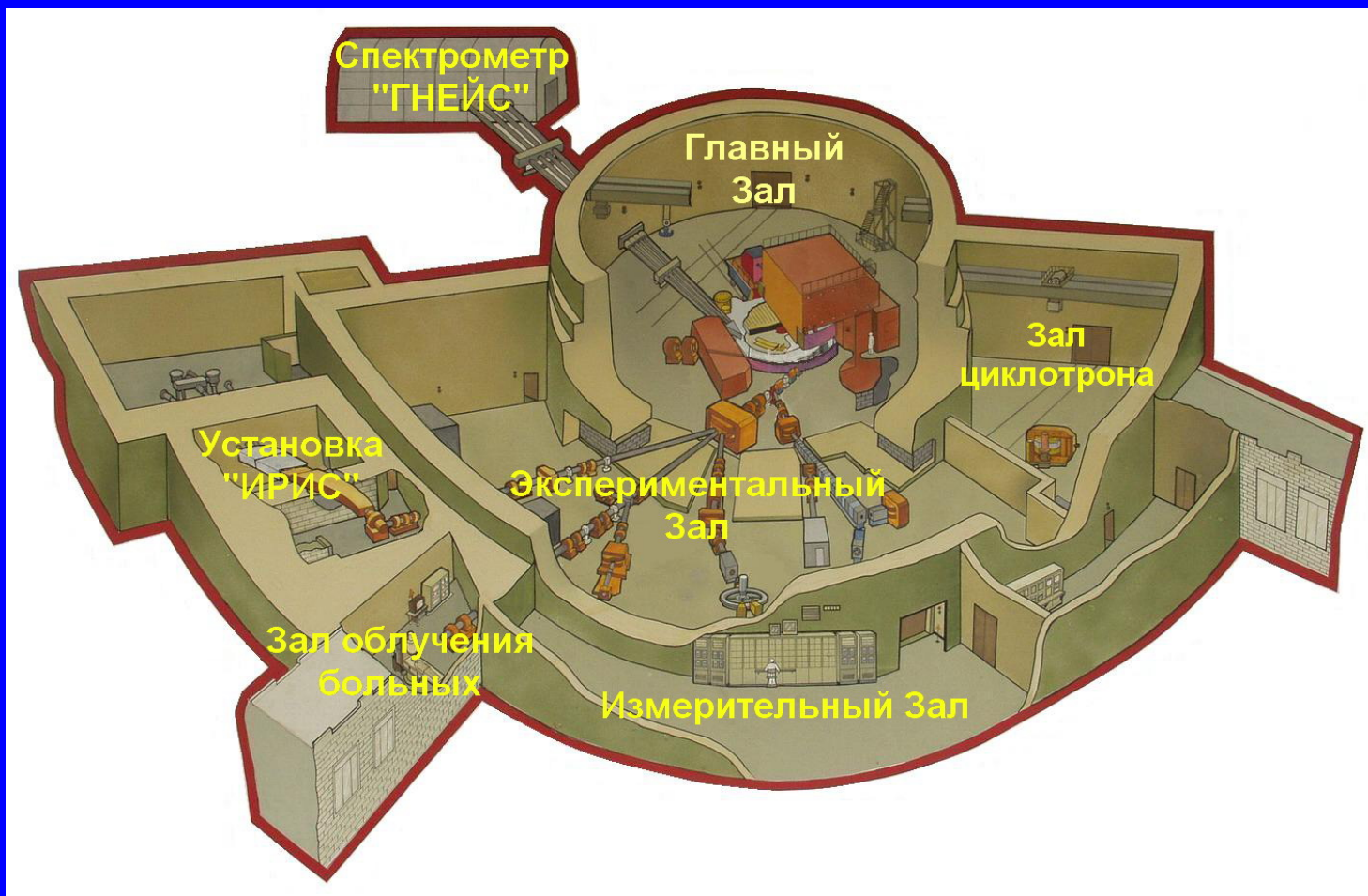
Г.Рябов, С. Артамонов, Е.Иванов,
Михеев, Б. Токарев, Ю. Миронов –
ПИАФ

П. Богданов, В. Мудролюбов-
НИИЭФА

ГАТЧИНА 2012

А

Экспериментальный комплекс синхроциклотрона ПИЯФ



Варианты развития ускорительной базы ПИЯФ

- **Изохронный циклотрон - мезонная фабрика**
- **Ускоритель ионов от водорода до урана**
- **Циклотрон H^- ионов, который можно начать разрабатывать для фундаментальных и прикладных исследований без федерального финансирования – (т. н. хозяйственным методом).**

Циклотрон Н⁻ ионов

+

-

- Возможна инжекция в следующую ступень ускорения
- 100% вывод пучка высокой интенсивности
- Переменная энергия без перестройки магнитной системы

Из-за малой энергии связи электрона в Н⁻ ионе ($E \leq 0.75$ эВ)

- ┌ Специальный источник ионов
- ┌ Магнитное поле в секторе ≤ 17 кГс
- ┌ Высокий вакуум $\leq 10^{-7}$ Торр

Максимальное использование существующей инфраструктуры для экономии средств

- **Чтобы не строить нового здания
ускоритель помещён в неиспользуемую
часть экспериментального зала СЦ**

биологическая защита

электропитание

водоохлаждение

кран 30 тонн

**Для магнита использовалось железо
существующей модели СЦ**

Статус проекта к 2010 г.

- Разработан проект и рабочие чертежи всех основных систем циклотрона.
- Разработан, изготовлен, смонтирован и запущен магнит циклотрона и начаты полномасштабные магнитные измерения.
- Нерешенные проблемы – изготовление элементов циклотрона, требующих заводского оборудования и закупка оборудования промышленного изготовления

Решение проблемы оказалось возможным после вступления в НИЦ «Курчатовский институт»



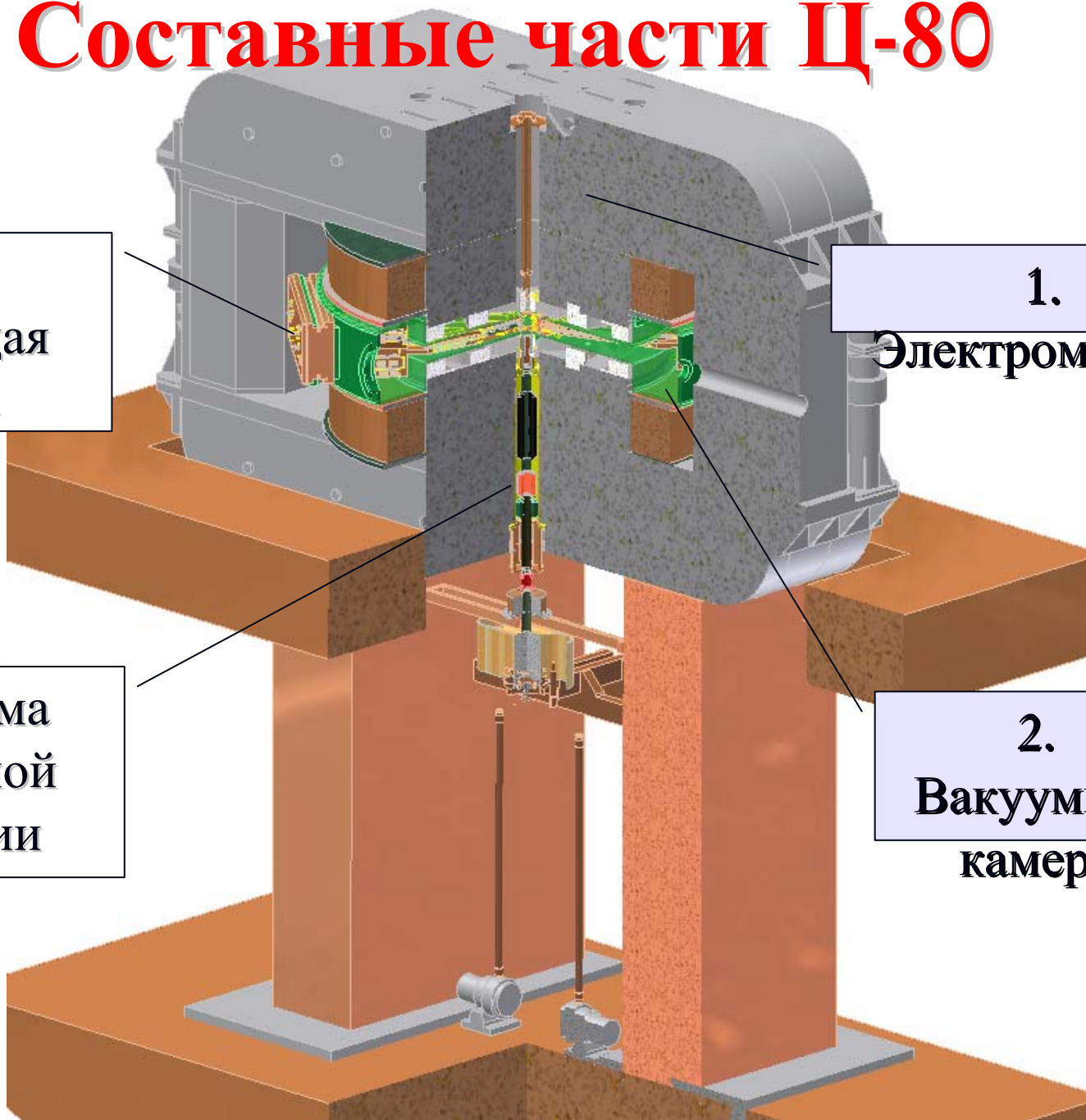
Составные части Ц-80

3. ВЧ-
ускоряющая
система

1.
Электромагнит

4. Система
аксиальной
инъекции

2.
Вакуумная
камера



ОСНОВНЫЕ ПАРАМЕТРЫ **ЦИКЛОТРОНА Ц-80**

<u>МАГНИТ</u> Диаметр полюса Зазор долины Зазор холма (мин.) Число секторов Угол спиральности (макс.) Изохронное поле в центре Флаттер (макс.) Ампер – витки Мощность Вес	2.05 м. 386 мм. 164 мм 4 65 град. 1.352 Т 0.025 3.4×10^5 120 кВт 250 т.	<u>ВАКУУМ</u> Давление 2 криогенных насоса 1 турбомолекулярный	10^{-7} тор. 2×3500 л/с (H ₂)
<u>ВЧ. СИСТЕМА</u> Частота Напряжение Гармоника ВЧ.- мощность	41.2 МГц 60 кВ 2 2×40 кВт	<u>H⁻ источник</u> Мультипольный Энергия инжекции	1.5 мА 26 кВ
		<u>АКСИАЛЬНАЯ ИНЖЕКЦИЯ</u> Транспортная система: линза-соленоид, соленоид, инфлектор	
		<u>ВЫВОДНАЯ СИСТЕМА</u> Метод стриппирования Диапазон энергий	40-80 МэВ



МАГНИТНАЯ СИСТЕМА.

Основные требования к магнитному полю

- 1. Для 80 МэВ поле на конечном радиусе $r_k = 0.9$ м, $\langle Bk \rangle = 14.67$ кГс
- 2. Изохронность поля по орбите с точностью 5 Гс.
- 3 Z -фокусировка и допустимые значения частот горизонтальных ν_x и вертикальных ν_z колебаний .
- 4. Поле в холме должно быть минимально возможным, чтобы ограничить диссоциацию Н- ионов величиной $\sim 5\%$.
- 5. Для установки высокочастотной системы и камеры минимальный зазор между шиммами на краю магнита должен быть не меньше, чем 140 - 150 мм.
- 6. Плоскость симметрии магнитного поля должна совпадать с геометрической плоскостью с точностью не хуже 0.1 мм

Особенность Н- циклотрона

Чтобы уменьшить магнитное поле в холме, для Н - циклотронов целесообразно использовать магнитную структуру со сравнительно малой величиной флаттера и с большой спиральностью

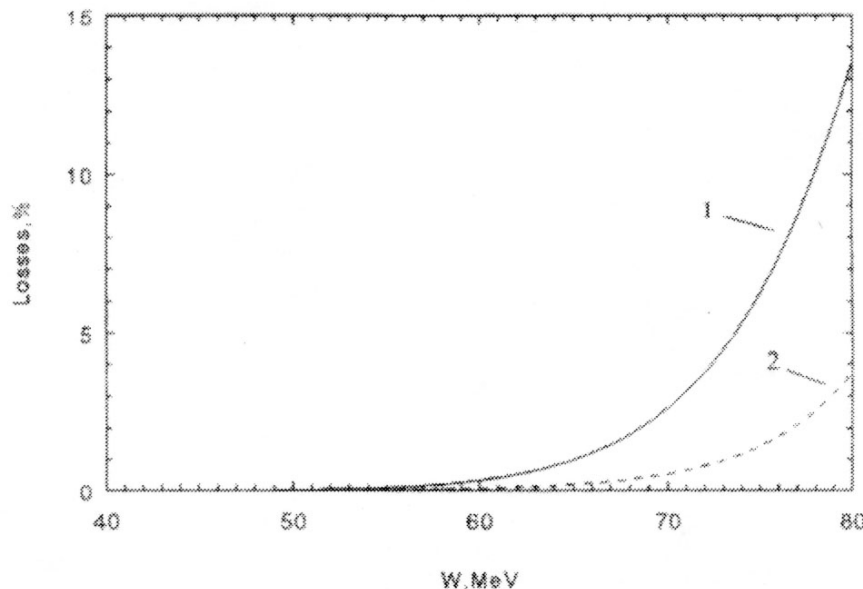


Магнитная структура и потери Н-ионов на электродиссоциацию

Рассматривалось две версии магнитной системы:

1. $F=0.04$, $\gamma=55^\circ$, Амплитуда 4 гармоники = 4.5 кГс
2. $F=0.025$, $\gamma=65^\circ$, Амплитуда 4 гармоники = 3.28 кГс

Второй вариант выбран как основной, т. к. потери в данной структуре менее 5 %





Магнитная структура

Расчёт флаттера даже для прямых секторов в зависимости от радиуса есть 3Д- проблема

Качественное приближённое рассмотрение в предположении равномерного намагничивания сектора

$$B_N = 8M \sin\left(\frac{2\pi a}{d}\right) \exp\left(-\frac{2\pi g_h}{d}\right), \quad F \sim \frac{B_{N^2}}{2} \sim \exp(-2/x),$$

где B_N - гармоника поля, $2a$ – азимутальная протяженность сектора вдоль, $2g_h$ – зазор в холме, N - число секторов, d – период структуры $d=2\pi r/ N$, $4\pi M = 21\text{кГс}$.

$x = r/Ngh$ – безразмерный масштабный параметр

Качественные выводы

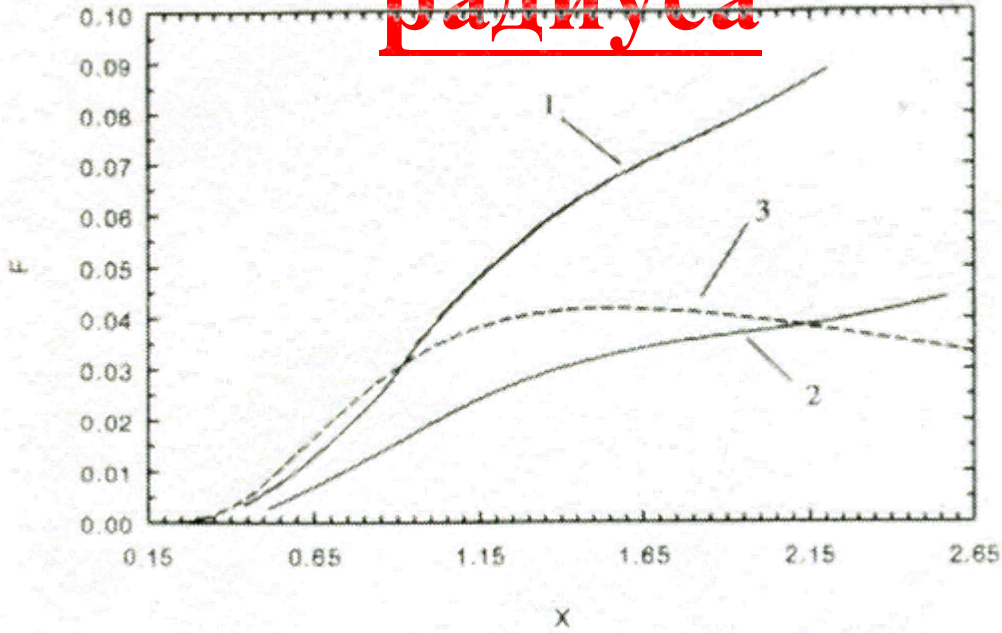
1. $F = F_{\max}$, когда длина холма и долины одинаковы $a = 0.25 d$
2. F растёт при уменьшении g_h
3. F падает при увеличении количества секторов N
4. F стремится к нулю при $x \leq 0.5$ т.е. при $r \leq 0.5 Ng_h$



Магнитная структура

Флаттер в зависимости от

радиуса



Флаттер в зависимости от параметра $x = r/N g_h$, где $N = 4$,
1 - $2g_v = 386 \text{ mm}$, $2g_h = 170 \text{ mm}$, h_1 толщина сектора = 108 mm ;
2 - $2g_v = 284 \text{ mm}$, $2g_h = 145 \text{ mm}$, h_2 толщина сектора = 69 mm ;
3 - равномерное намагничивание для случая 1

Для циклотрона Ц-80 был выбран вариант зазоров,
соответствующий случаю 1,

т. е. $1 - 2g_v = 386 \text{ мм}$, $2g_h = 170 \text{ мм}$, $h_1 = 108 \text{ мм}$



Магнитная структура

Влияние спиральности

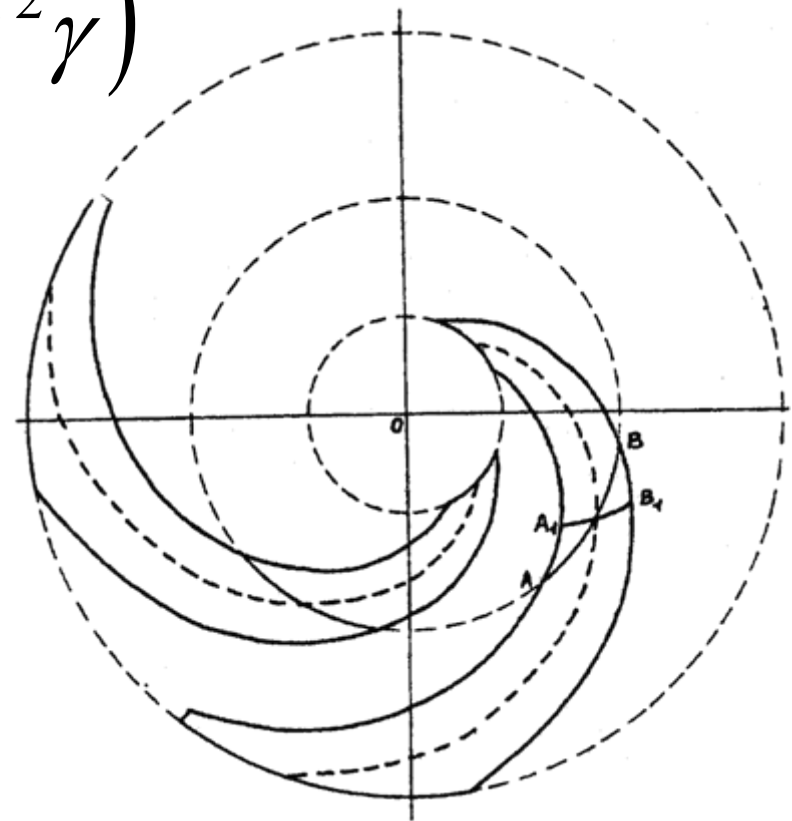
Обычно считается, что увеличение Z -фокусировки за счёт спиральности равно

$$\nu_z^2 \approx -k + F \cdot (1 + 2 \cdot \operatorname{tg}^2 \gamma)$$

где γ - угол спиральности

Однако, на практике выигрыш от введения спиральности меньше, чем по приведённой формуле благодаря двум факторам :

1. уменьшение флаттера при введении спиральности
2. несовпадение механического и магнитного углов спиральности



"Эффективная" длина сектора
 $AB_{\text{эфф}} \approx AB \cdot (\cos \gamma)$, где AB- длина
сектора вдоль азимута $X_{\text{eff}} = X \cos \gamma$



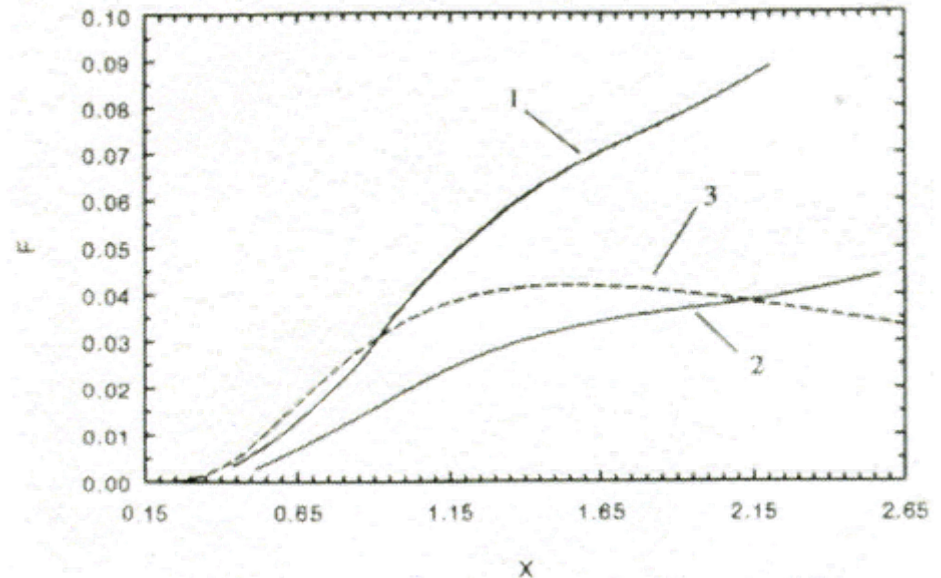
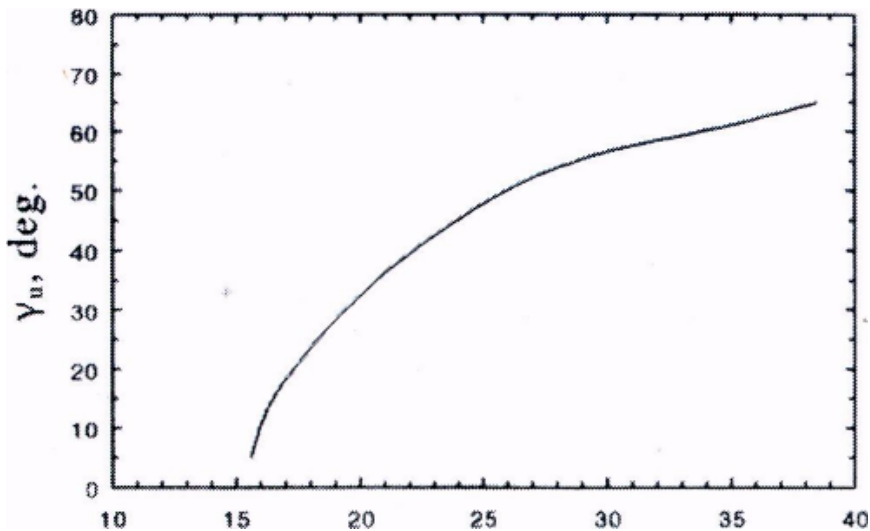
Влияние спиральности

При $x_{\text{eff}} 0.5$ т. е. радиусах $r < 0.5(Ng_h / \cos \gamma)$ спиральность уменьшает Z-фокусировку.

Предельный для данного радиуса угол спиральности, при превышении которого фокусировка уменьшается есть корень уравнения

$$U(x, \gamma) = (F(x \cos \gamma) / F(x)) \cdot (1 + 2 \tan^2 \gamma) - 1 = 0$$

где F есть функция, показанная на рисунке

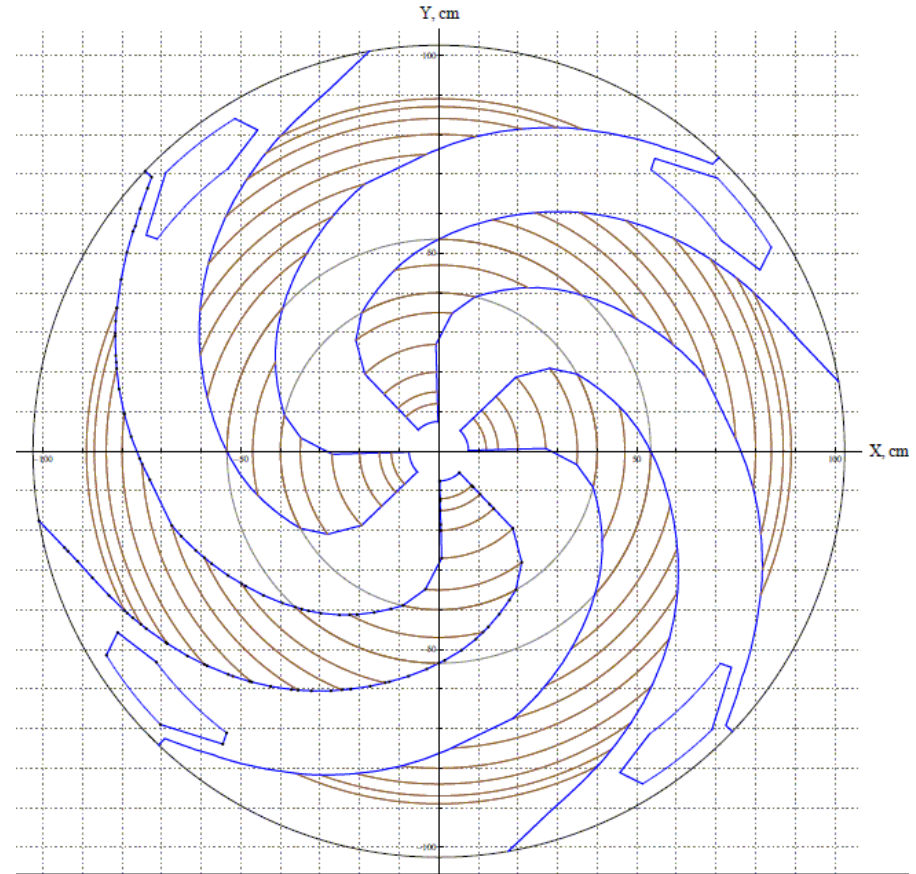


Предельный угол спиральности в зависимости от радиуса для циклотрона Ц-80. Спиральность становится неэффективной на радиусах менее 15 см и структуру с большим углом спиральности целесообразно применять на радиусах более 35 см.



Магнитная структура циклотрона Ц-80

- **Параметры магнитной структуры представлены в Таблице. На Рис представлен вид сверху на полюс магнита**





Магнитные измерения

Расчёт геометрии шимм производился по Новосибирской 3Д-программе MERMAID с учётом насыщения железа в $20 \cdot 10^6$ узлах (подробнее в стендовом докладе)

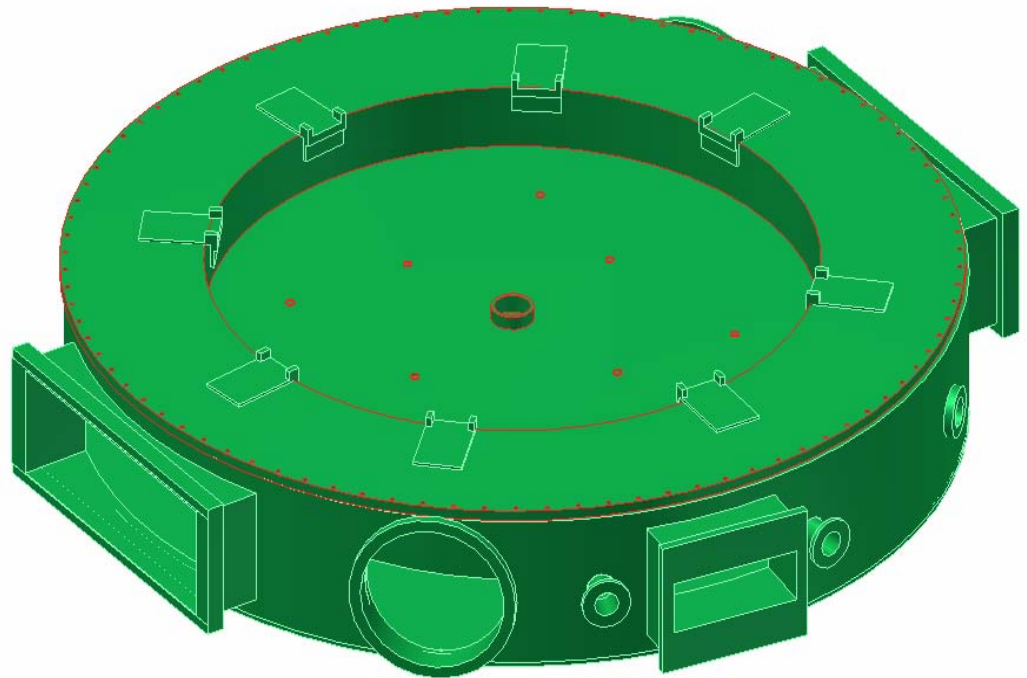
Магнитные измерения производились 20 датчиками Холла, калиброванными по ЯМР, и автоматизированной координатной системой с точностью установки 0.1 мм. Точность измерений 10^{-4} .



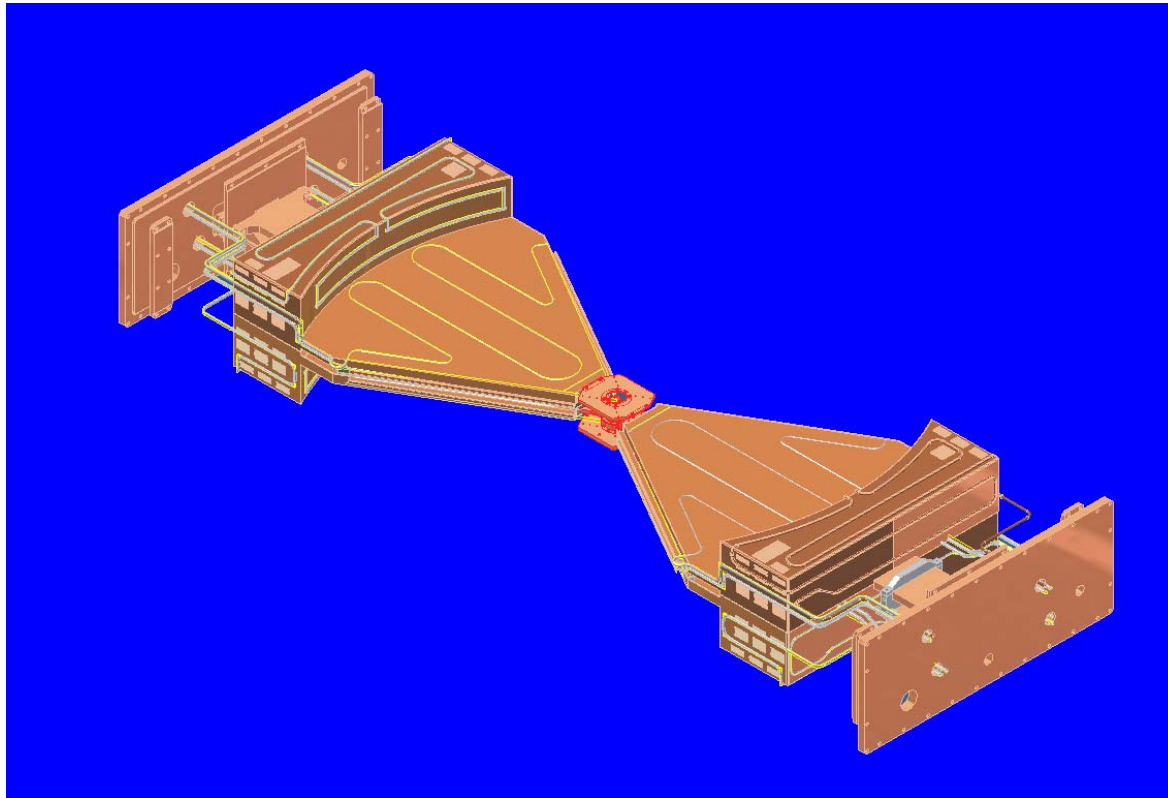
Вакуумная камера и вакуум

Для улучшения ваку

- ┌ **Внешний источники**
система аксиальной
инъекции
- ┌ **Криогенные насосы**
- ┌ **Магнитная система в**
вакуумного объёма и
крышки камеры кре
к полюсам магнита

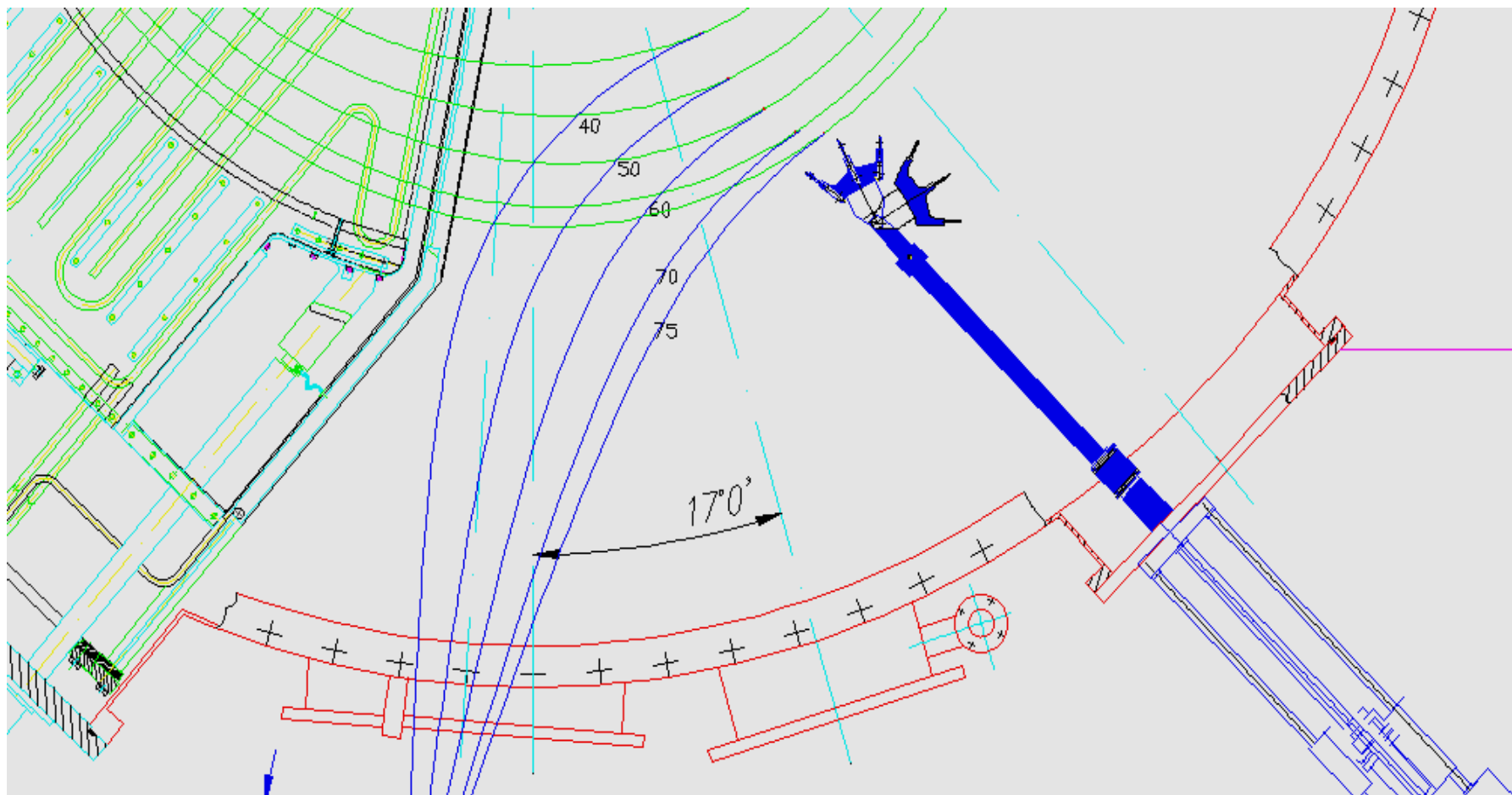


В.Ч. –резонансная система



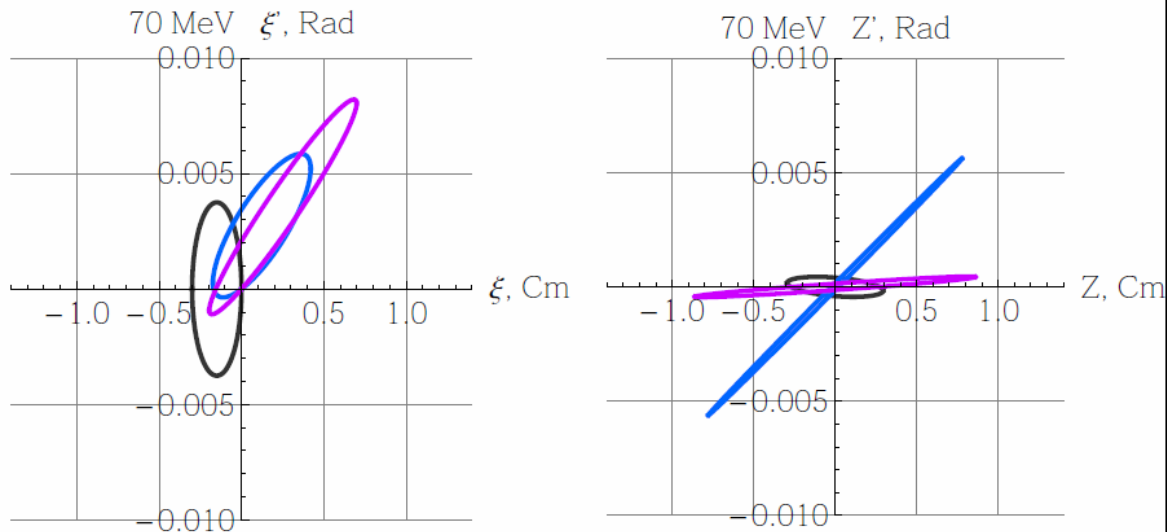
**Параметры ВЧ- системы: частота 41.2МГц ,
ускоряющее напряжение 60 кВ, мощность 80 кВт**

Выводная система





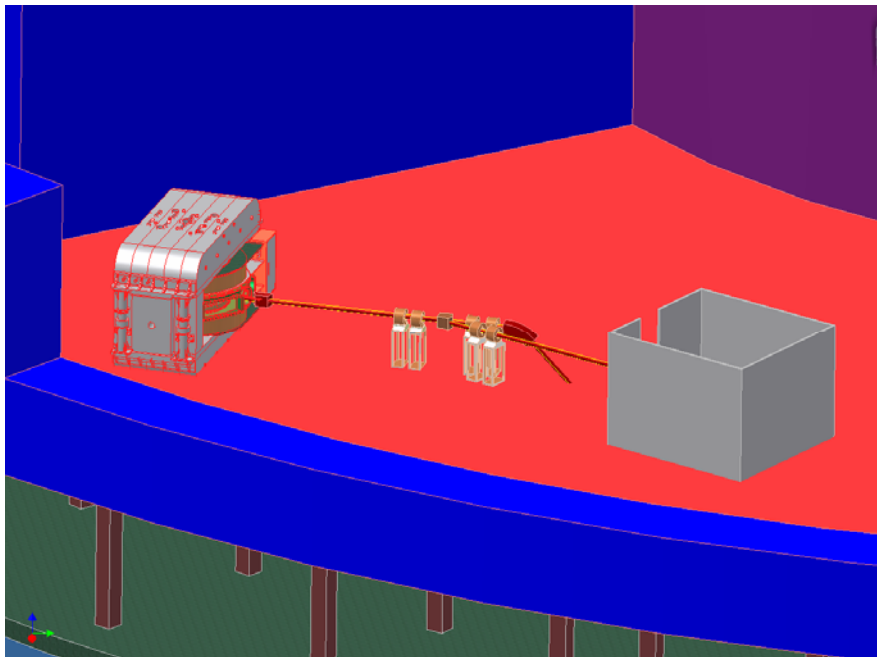
голубой – на входе
в корректирующий магнит сиреневый – на
выходе из корректирующего магнита.



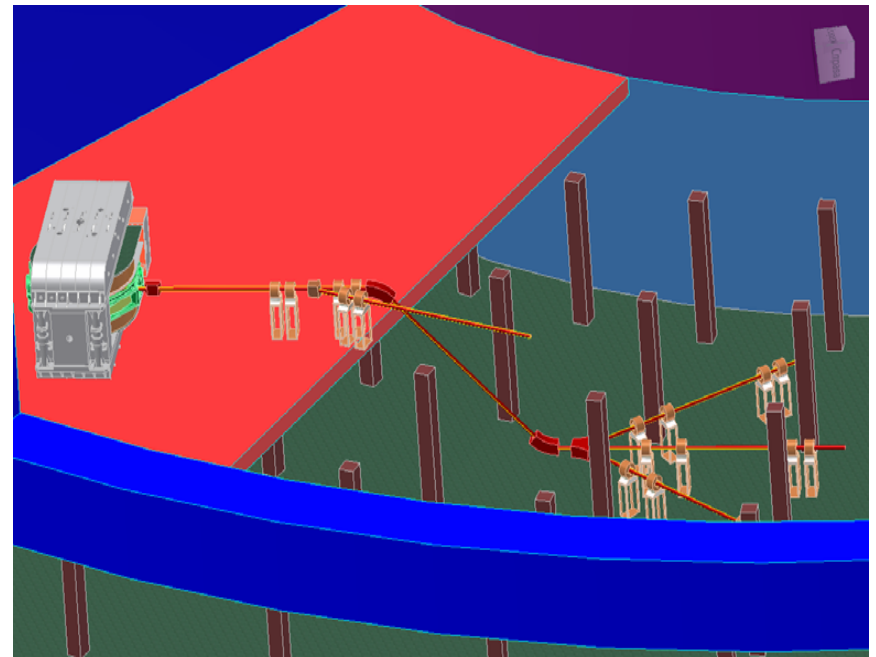
$T, \text{ MeV}$	40		60		70	
	ξ	z	ξ	z	ξ	z
α	-1,793	-5,079	-2,631	0,022	-3,562	-3,123
$\beta, \text{ мм/мрад}$	5,801	5,010	3,307	4,657	3,559	62,220
$\gamma, \text{ мрад/мм}$	0,727	5,348	2,395	0,215	3,845	0,173
$\varepsilon, \text{ мм мрад}$	5,4	3,8	5,9	2,1	5,6	1,2

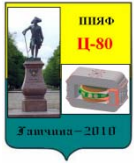
Экспериментальный комплекс

■ Первый этаж



■ Подвальный этаж





Текущая ситуация

- ☐ **Изготовлено заводское и закуплен весь комплект оборудования для циклотрона**
- ☐ **Ведётся монтаж и настройка**
- ☐ **Заканчиваются магнитные измерения**
- ☐ **Планируется получить первый пучок в конце 2012 г.**