

ФГУП «Научно-исследовательский институт  
электрофизической аппаратуры им. Д.В. Ефремова»  
( НИИЭФА)

Санкт-Петербург, Россия



## Циклотрон МСС-30/15 – параметры, пуско-наладочные работы и их результаты

*П.В. Богданов, М.Ф. Ворогушин, А.В. Галчук,  
В.Г. Мудролюбов, А.П. Строкач*

***RuPAC-2010***

- **Компактный циклотрон МСС-30/15**, предназначен для ускорения **отрицательных ионов водорода и дейтерия** с регулированием конечной энергии в диапазонах **18-30** и **9-15 МэВ** соответственно.
- Ток выведенных пучков **протонов** и **дейтронов** составляет более **100 мкА** и **50 мкА** соответственно.
- Разработка циклотрона была выполнена в рамках Контракта на поставку оборудования циклотрона МСС-30/15 в ускорительную лабораторию Университета города Ювяскюля, Финляндия.
- На стадии технического проектирования, которое началось в конце 2007 г. было разработано и согласовано с Университетом Техническое задание на размещение оборудования циклотрона. На основе этого задания финская сторона за два года выполнила разработку проектной документации и строительство помещений.
- Циклотрон обеспечивает производство широкого набора радионуклидной продукции для ядерной медицины, научных исследований и промышленности.
- В ядерной медицине основное назначение циклотрона – производство однофотонных эмиттеров (**Ga-67, In-111, I-123, Rb-81**) для однофотонных-эмиссионных томографов (SPECT) и позитронных эмиттеров (**F-18, O-15, N-13, C-11**) для позитронно-эмиссионных томографов (PET).

# Строительство здания для установки циклотрона МСС-30/15, Университет Ювяскюля, Финляндия



# Основные параметры циклотрона **МСС-30/15**

<b>Пучок</b> Тип ионов - ускоряемых - выведенные Энергия частиц в диапазоне, МэВ Ток выводимого пучка, $\mu\text{A}$	$\text{H}^- / \text{D}^-$ $\text{H}^+ / \text{D}^+$ 18...30 / 9...15 100 / 50 (200 / 70)
<b>Число выводных каналов</b>	2
<b>Магнитная структура</b> Диаметр полюса, см Мощность питания, кВт Масса, т	140 12 46
<b>Высокочастотная система</b> Число дуантов Гармоника Частота, МГц Дуантное напряжение, кВ	2 2 / 4 40,68 38 / 25
<b>ВЧ генератор</b> Выходная мощность, кВт	25
<b>Источник ионов</b> Тип источника Расположение	CUSP внешнее
<b>Электроснабжение</b>	415 / 230 В, 50 Гц
<b>Потребляемая мощность, кВт</b> Ждущие режим, кВт Рабочий режим, кВт	15 80

# Особенности циклотрона МСС-30/15



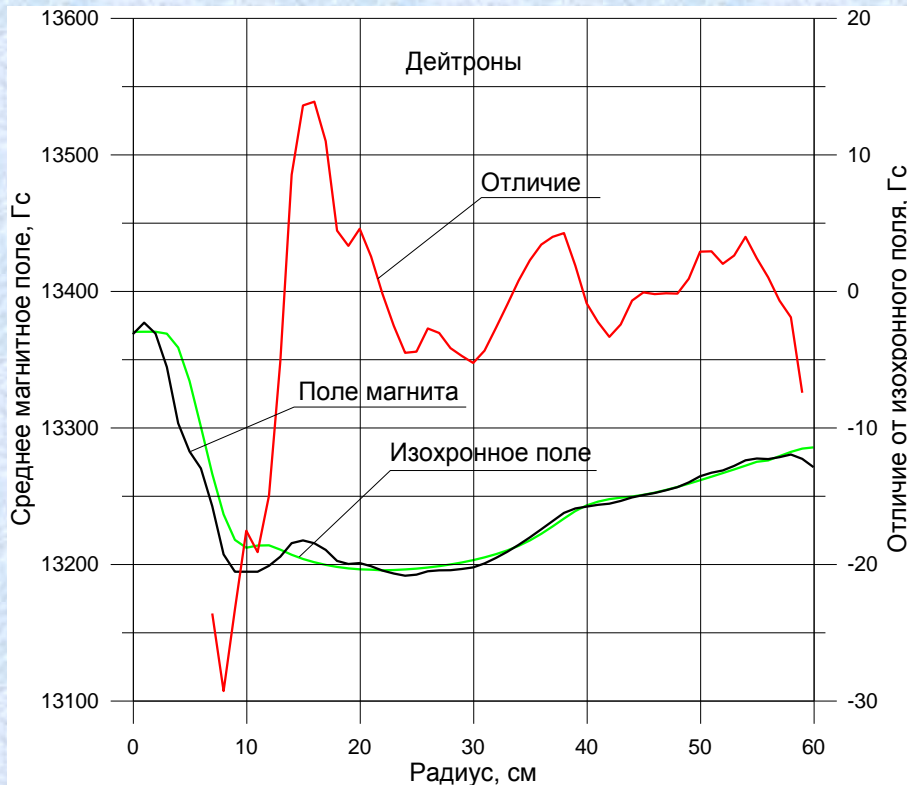
- **Н**а циклотроне используется внешний источник отрицательных ионов водорода и дейтерия с системой аксиальной инжекции в центральную зону ускорения.
- **Д**ва выводных устройства обеспечивают вывод пучков из циклотрона в два канала транспортировки к удаленным мишеням.
- **В**озможен одновременный выпуск из циклотрона двух пучков. Медианная плоскость электромагнита расположена вертикально.
- **П**ри необходимости часть электромагнита отодвигается на расстояние  $\sim 80$  см, обеспечивая удобный подход для профилактического обслуживания узлов, находящихся во внутренней полости электромагнита.

# Магнитное поле циклотрона МСС-30/15



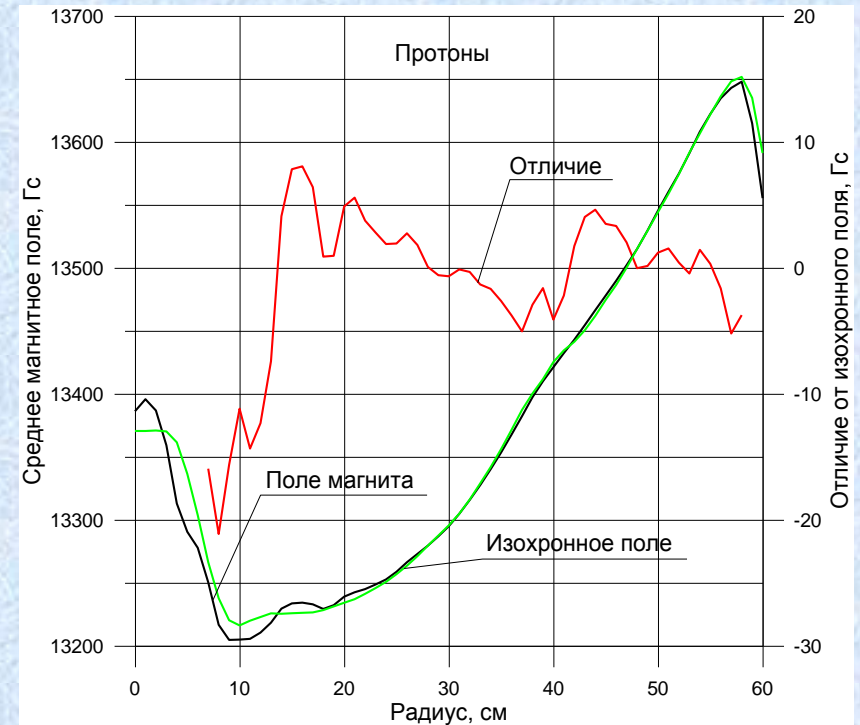
- При переходе от ускорения одной из частиц к ускорению другой использовались поворотные шиммы, расположенные в двух свободных «долинах» циклотрона.
- Для режима ускорения ионов дейтерия эти шиммы полностью утапливаются в тело «долины».

- На боковых границах секторов предусмотрены накладки небольшой азимутальной протяженности, форма которых подбирается при формировании изохронного магнитного поля для режима ускорения ионов дейтерия.
- Для режима ускорения ионов водорода шиммы поворачиваются вдоль своих осей и выводятся в межполюсный зазор, обеспечивая нарастание среднего магнитного поля по радиусу.
- Требуемая изохронная зависимость для ионов водорода была обеспечена подбором формы образующей поворотного шимма.
- Таким образом, процесс формирования двух изохронных кривых был полностью разделен.



## Изохронное поле для ускорения ионов дейтерия

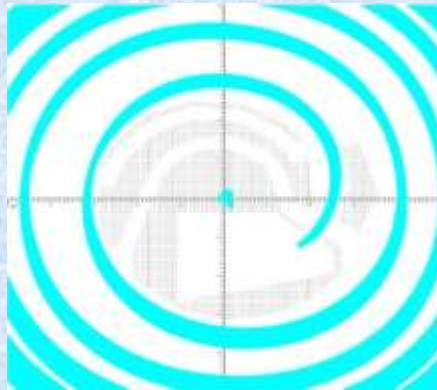
## Изохронное поле для ускорения ионов водорода



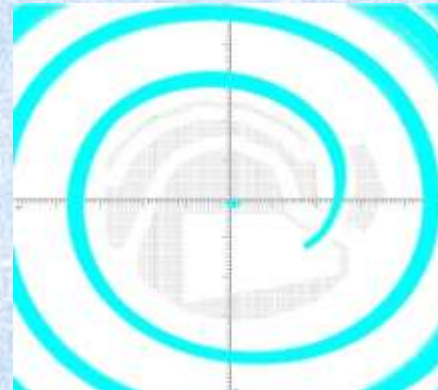
# Электрическое поле циклотрона МСС30/15

- Циклотрон МСС-30/15 работает на фиксированной частоте 40,68 МГц.
- В расчетах динамики пучков была использована карта электрического поля, полученная в результате решений 3-мерной задачи.
- Ускорение ионов водорода и дейтерия производится на 2-й и 4-й гармониках, соответственно.
- В связи с тем, что в данном случае невозможно применить подобие орбит, большое внимание в расчетах было уделено вопросам центрирования пучка с тем, чтобы достичь разумного компромисса в получении оптимальных условий ускорения для двух частиц.

*Центрирование пучка ускоренных ионов водорода. Фазовый диапазон  $\pm 0,25$  рад. Ускоряющее напряжение 37,5 кВ*



*Центрирование пучка ускоренных ионов дейтерия. Фазовый диапазон  $\pm 0,25$  рад. Ускоряющее напряжение 25,5 кВ*



В расчетах по центрированию пучка одними из определяющих параметров центральной области были параметры пучка на выходе инфлектора. По результатам расчетов были определены следующие выходные параметры спирального инфлектора:

- энергия инжекции ионов водорода – 19 кэВ
- энергия инжекции ионов дейтерия – 9,5 кэВ,
- начальный радиус – 20,5 мм,
- угол вылета центральной траектории – 23 град.,
- параметр закручивания – -0,28,
- радиальный эмиттанс – 50 пт мм мрад,
- аксиальный эмиттанс – 50 пт мм мрад.



***Инфлектор циклотрона***

***Резонатор циклотрона МСС-30/15***

# Параметры системы внешней инжекции **МСС-30/15**

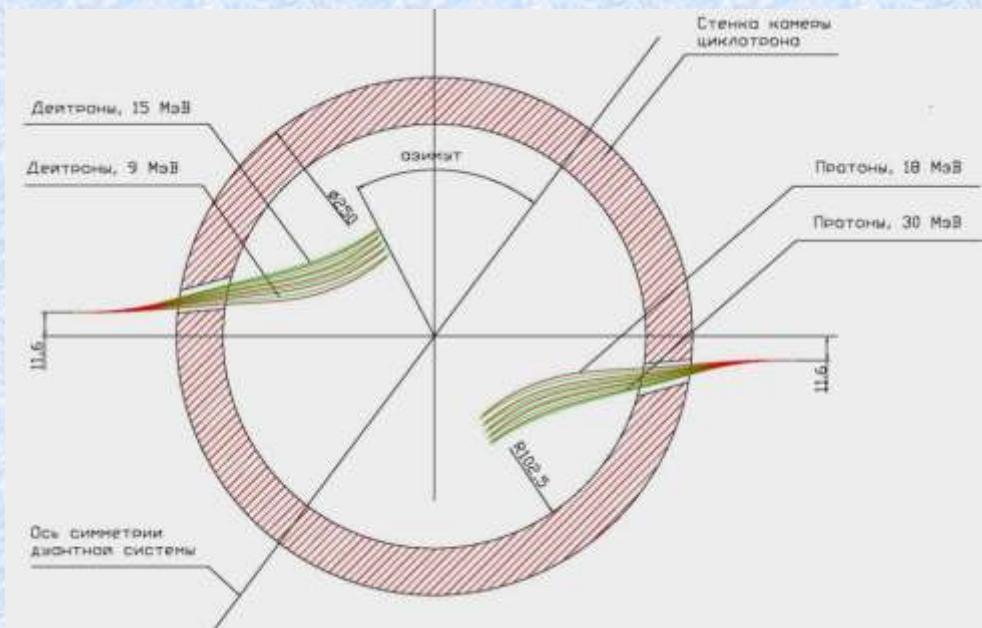
Ускоряемые ионы	H <sup>-</sup> / D <sup>-</sup>
Энергия инжекции, H <sup>-</sup> / D <sup>-</sup> , кВ	19,0/9,5
Длина СВИ от ионного источника до медианной плоскости, м	2,1
Диаметр эмиссионного отверстия ионного источника, мм	6
Ток пучка ионов H <sup>-</sup> / D <sup>-</sup> , измеренный за диафрагмой, мА	1,4 / 0,7
Нормализованный эмиттанс пучка ионов H <sup>-</sup> / D <sup>-</sup> за диафрагмой, п·мм·мрад.	0,35 / 0,18
Фокусирующая линза №1	Соленоид
Фокусирующая линза №2	Электростатическая
ВЧ банчер	Двухзазорный
Расстояние между магнитными пробками, мм	58
Высота инфлектора, мм	23
Параметр закручивания инфлектора	-0,28
Потенциалы на электродах инфлектора, кВ	±6,6
Требуемый диаметр пучка на входе в инфлектор, мм	2,5
Допустимый нормализованный эмиттанс пучка ионов H <sup>-</sup> / D <sup>-</sup> на входе в инфлектор, п·мм·мрад.	0,42 / 0,21
Проектный средний ток ускоренного пучка на выходе циклотрона (протоны/дейтроны), мкА	100 / 50

# Система внешней инъекции МСС-30/15



# Регулирование энергии выведенных пучков протонов и дейтронов

Выпуск пучка в циклотроне МСС-30/15 осуществляется путем обдирки отрицательно заряженных ионов на углеродных фольгах с регулированием энергии выпущенного пучка.



**Схема выпуска пучка из циклотрона МСС-30/15**

Обдирочные фольги расположены симметрично относительно ускоряющей системы циклотрона, позволяя получать пучки во внешних линиях транспортировки, смещенных по вертикали относительно друг друга и расположенных на высоте 1350 мм и 1582 мм от нулевой отметки здания.

Диапазон регулирования энергии обеспечивается изменением радиального положения обдирочной фольги на 120-130 мм и ее азимутального положения на 2-3 градуса.

## Физический пуск и сдача циклотрона МСС-30/15

- В августе 2009 года оборудование циклотрона МСС-30/15 было отправлено в Финляндию и установлено в помещениях Ускорительной лаборатории Университета г. Ювяскюля.
- В течение сентября – октября были проведены монтаж и наладка отдельных систем: электропитания, водоохлаждения, вакуумной откачки, высокочастотного питания, управления, пневмосистемы, источника ионов, инжектора.
- В октябре – декабре была выполнена комплексная наладка циклотрона и проведены предварительные его испытания, которые подтвердили проектные параметры циклотрона.
- Были получены внешние пучки протонов с максимальной энергией и током более 200 мкА в импульсе и дейтронов с максимальной энергией и током более 60 мкА.



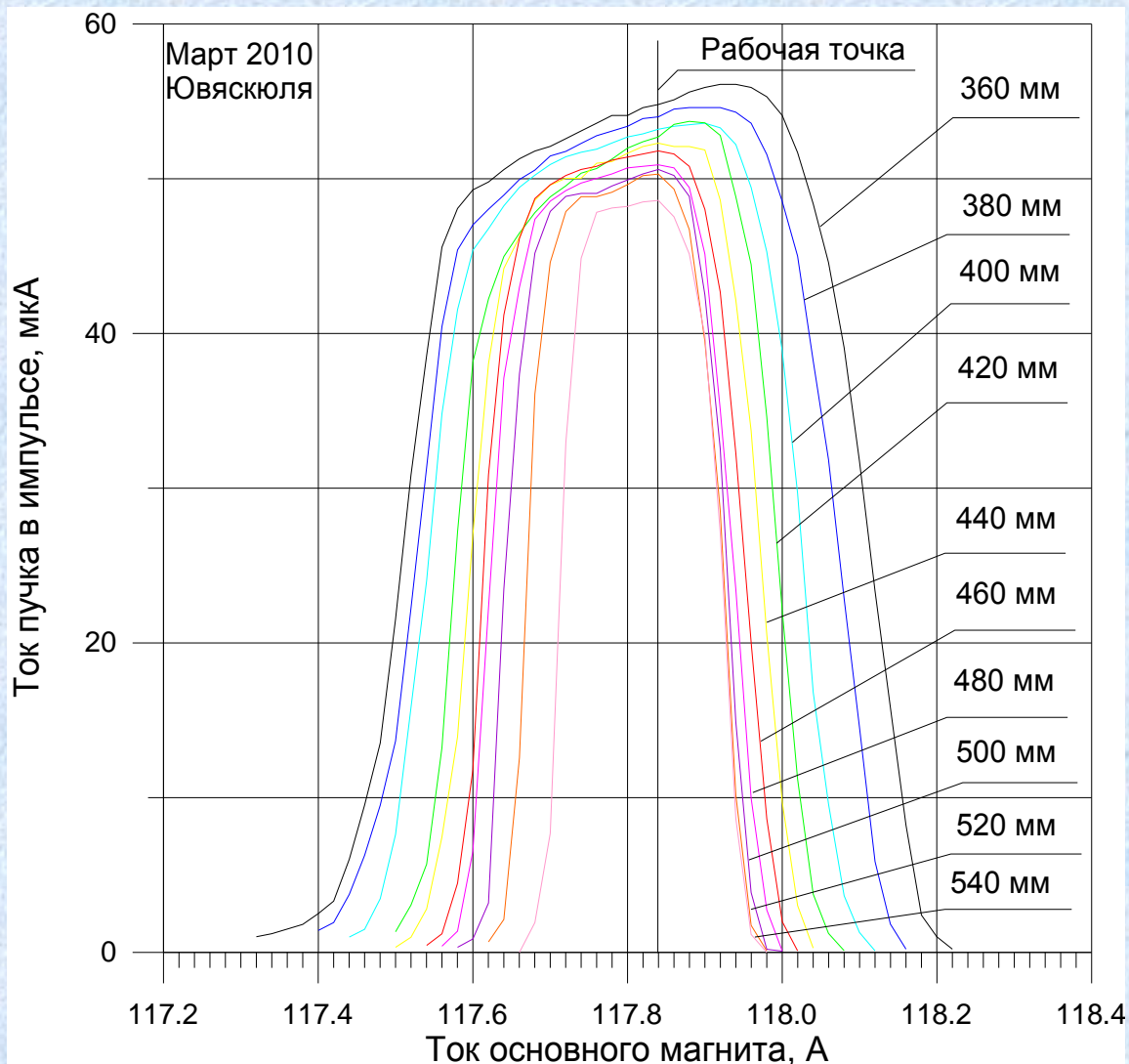
*2009 г. Ювяскюля, Финляндия.  
Монтаж циклотрона МСС-30/15*

# Монтаж, наладка и пуск циклотрона МСС-30/15 в Университете Ювяскюля



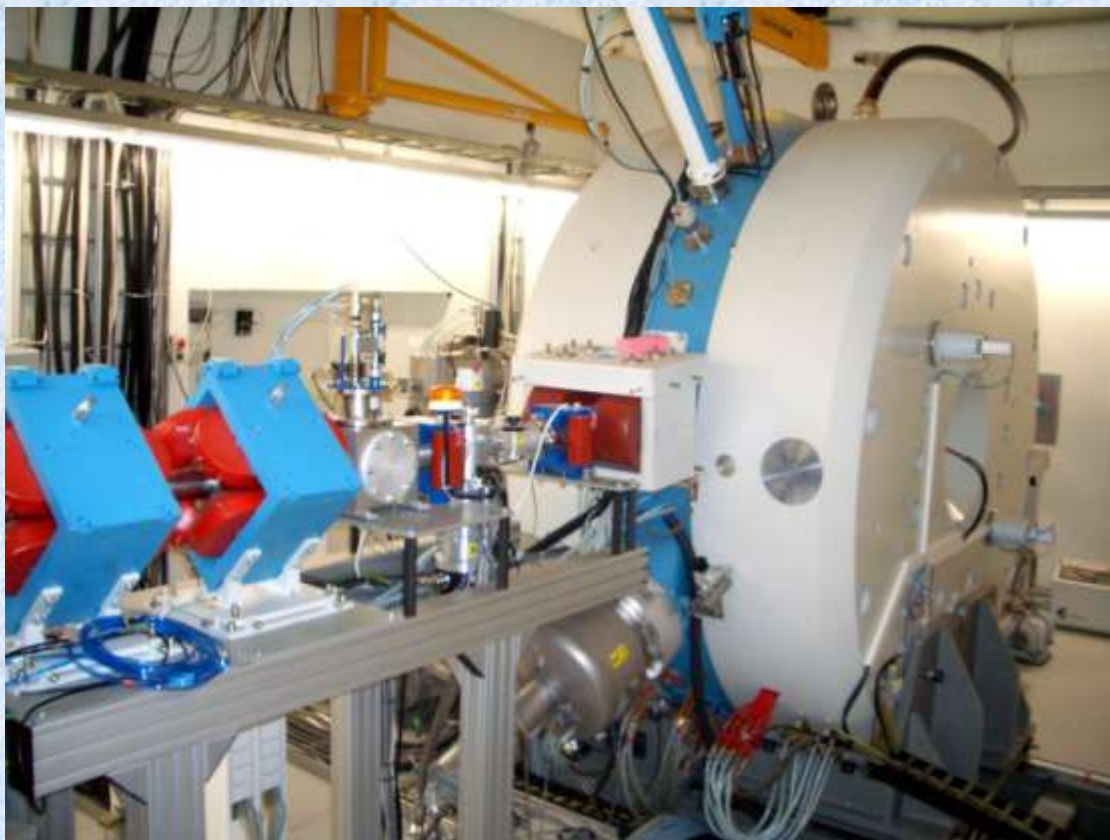


Циклотрон  
**МСС-30/15** во время  
инсталляции  
площадке Заказчика в  
Университете  
г. Ювяскюля,  
Финляндия  
(Открытый магнит)

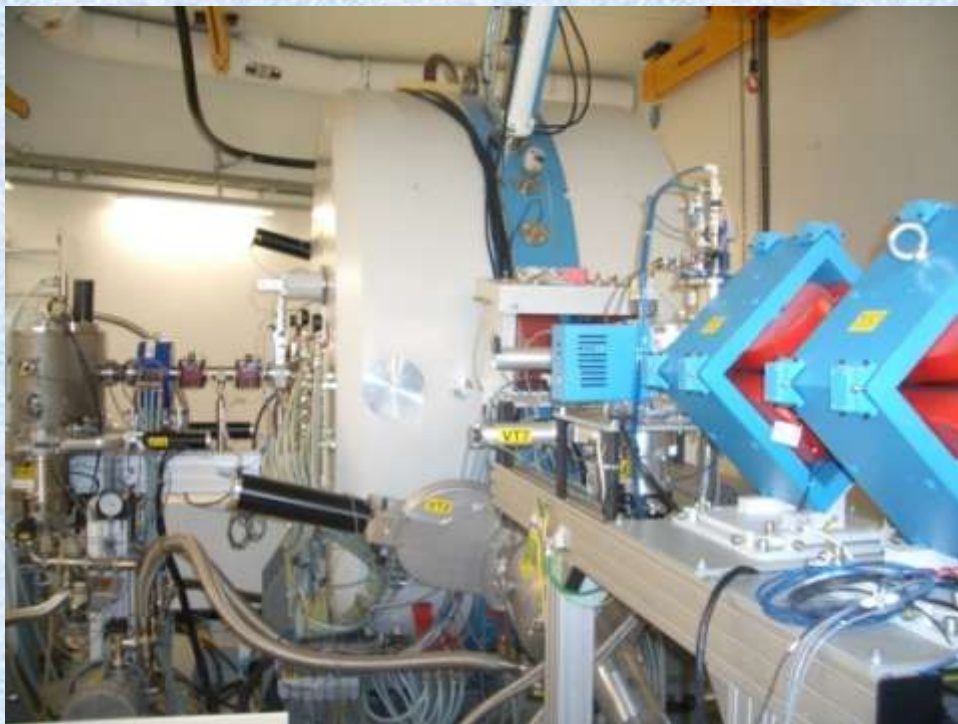


**Резонансные кривые, режим ускорения ионов дейтерия.  
Измеренные резонансные кривые для режима ускорения ионов  
дейтерия подтверждают незначительное движение фазы и  
отсутствие фазовых потерь в основной зоне ускорения**

- **С**о специалистами Ускорительной лаборатории Университета был согласован перечень приемосдаточных режимов работы циклотрона (десять режимов).
- **В** конце апреля 2010 года в течение одной недели все режимы были предъявлены.
- **С** 1 мая 2010 оборудование циклотрона МСС-30/15 было введено в эксплуатацию.



*Циклотрон МСС-30/15 с системами транспортировки пучков*



**Циклотрон МСС-30/15 с системами транспортировки пучков (справа) и внешней инжекции (слева)**

**Стойки систем питания и управления МСС-30/15 в Университете г. Ювяскюля**



**Спасибо за Внимание**