

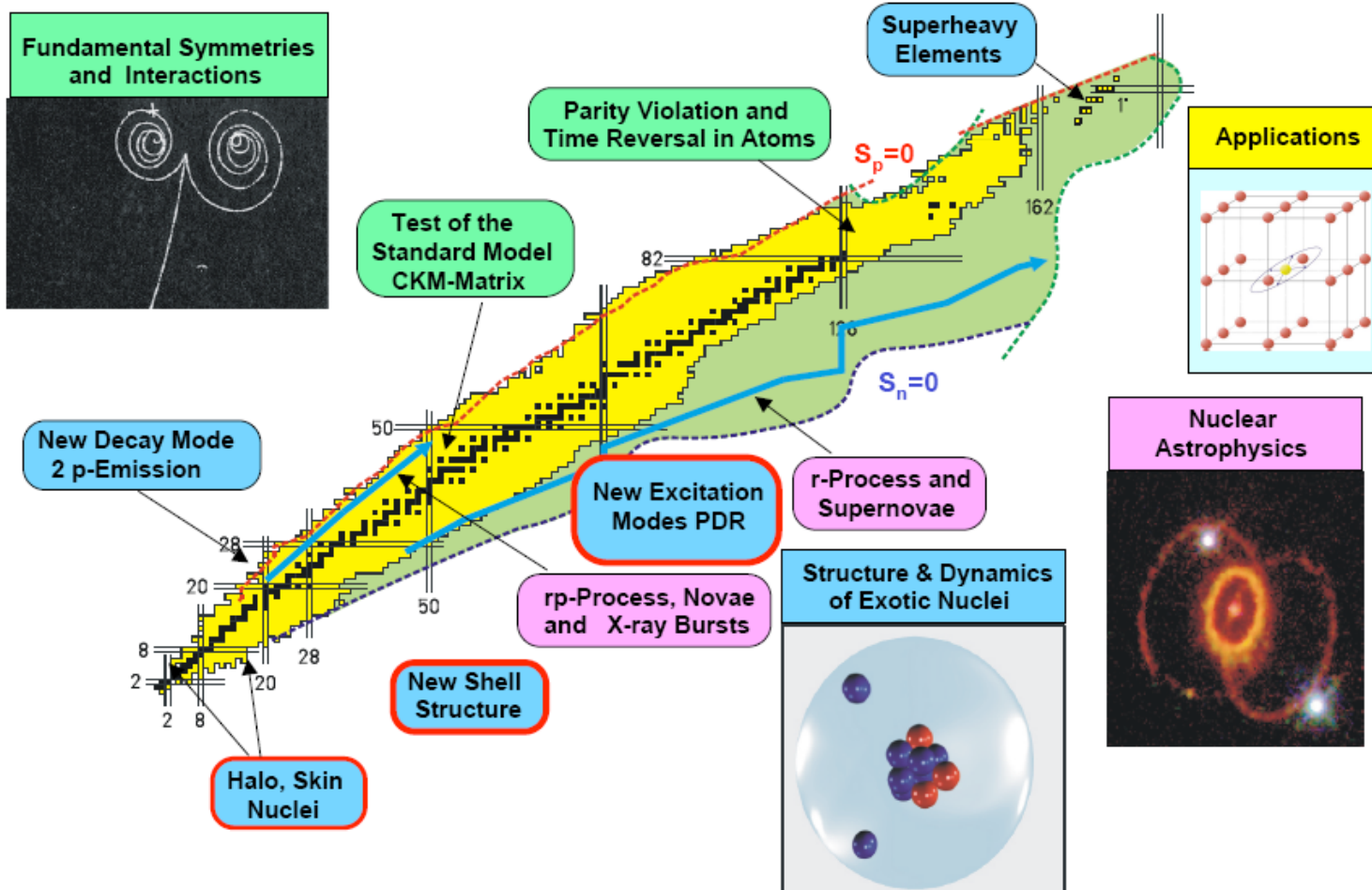
## СТАТУС РАДИОИЗОТОПНОГО КОМПЛЕКСА РИЦ-80

**В.Н. Пантелеев, ОФВЭ ПИЯФ**

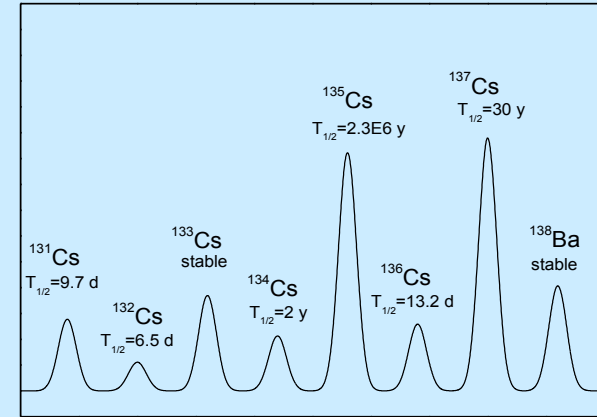
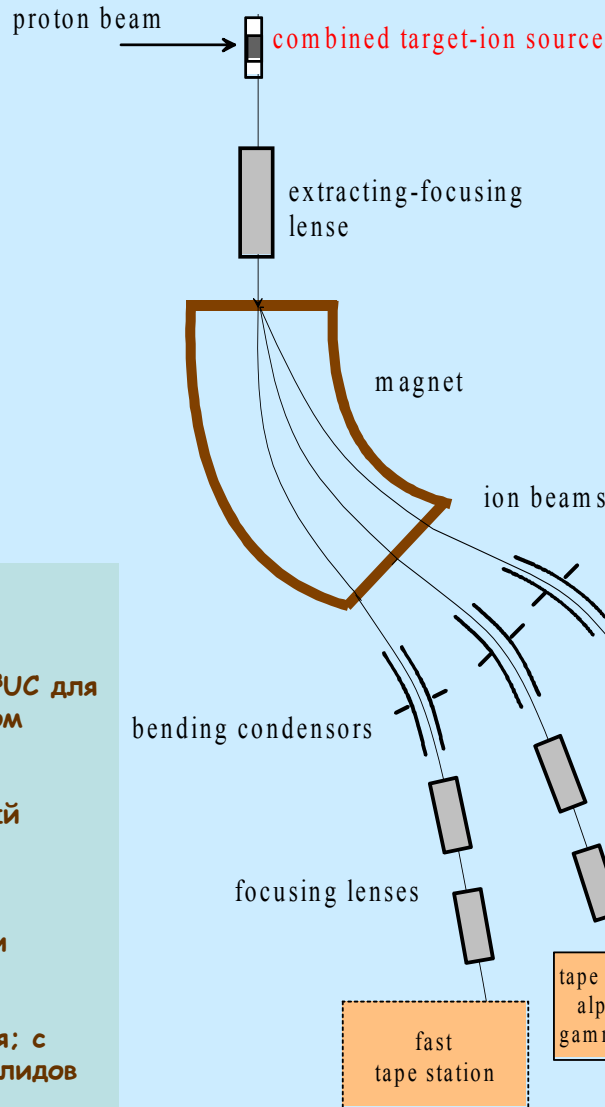
## План доклада

1. Установка ИРИС на синхроциклотроне ПИЯФ
2. Радиоизотопный комплекс РИЦ-80
3. Разработка мишеней для получения радионуклидов для медицины

# Physics with Exotic Nuclei



**ИРИС - единственная в России ISOL установка (работает в ПИЯФ с 1975 г. Исследовано более 200 ядер, открыто 17 новых изотопов)**



**Долгоживущие изотопы Cs из  $^{238}\text{U}$  мишени, измеренные с помощью цилиндра Фарадея на коллекторе масс-сепаратора ИРИС. Эффективность получения  $\epsilon_{r-i} = 65 \pm 15\%$**

**Протоны:** 1000 MeV, до 0.3  $\mu\text{A}$  на мишени

**Мишени:** фольги тугоплавких металлов, расплавленные металлы, карбиды металлов;  $^{238}\text{U}$  для получения изотопов, распадающихся  $\beta^-$  распадом

**Ионные источники:** плазменные, поверхностной ионизации, высокоселективный лазерный ионный источник

**Получаемые изотопы:** изотопы большого числа элементов Периодической системы с периодами полураспада миллисекунды-годы

**Главные цели:** ядерно-физические исследования; с 2010 г. разработка методов получения радионуклидов для ядерной медицины

## Циклотрон Ц-80 с системой вывода и поворота протонного пучка



Планируемый вывод пучка: **конец 2015г. - начало 2016 г.**

Выход на полную интенсивность: **2016г.**

Изготовлены три протонных тракта к мишеням РИЦ-80.

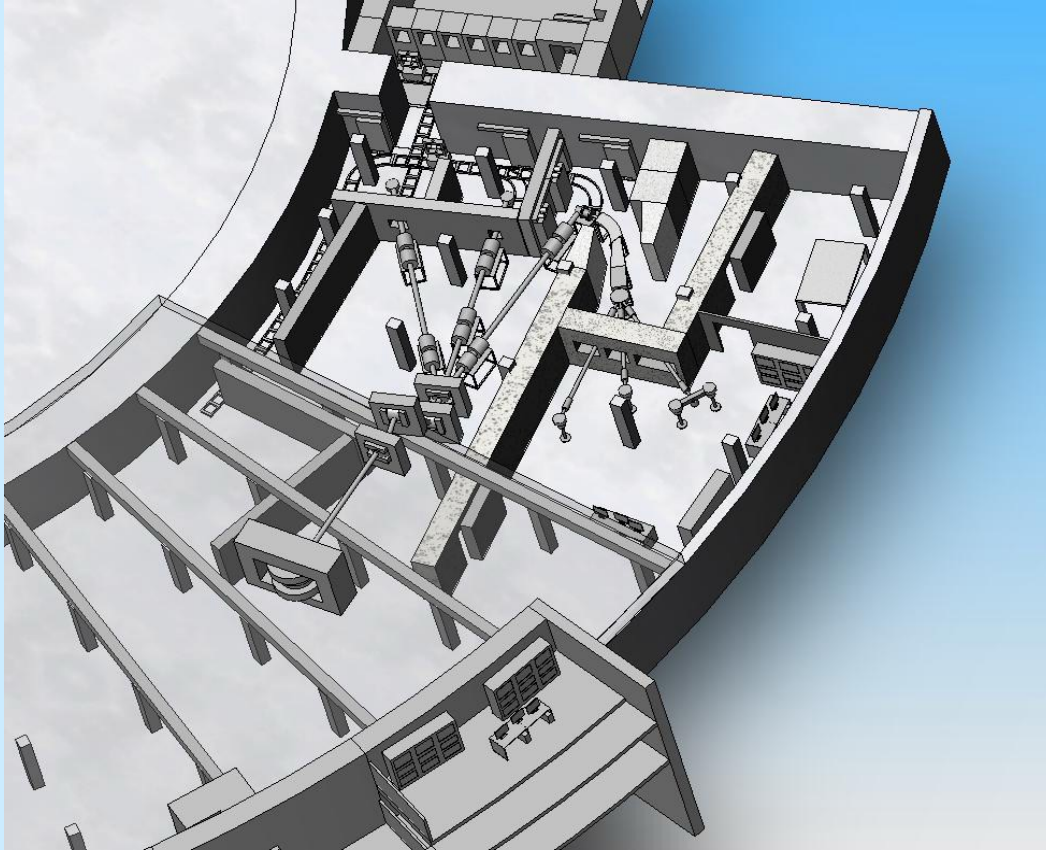
РИЦ-80 (Радиоактивные Изотопы на циклотроне Ц-80)

Создание проекта: **2012 -2014 г.**; (профинансировано, закончено)

Строительство комплекса: **2015 -2018 г.**(финансирование отсутствует)

Получение небольших количеств (0.1 - 0.2 Ки) генераторного радиоизотопа Sr-82: **2016 г.** (финансирование отсутствует)

## Радиоизотопный комплекс РИЦ-80



Три мишенные станции для получения наиболее используемых в настоящее время радионуклидов.

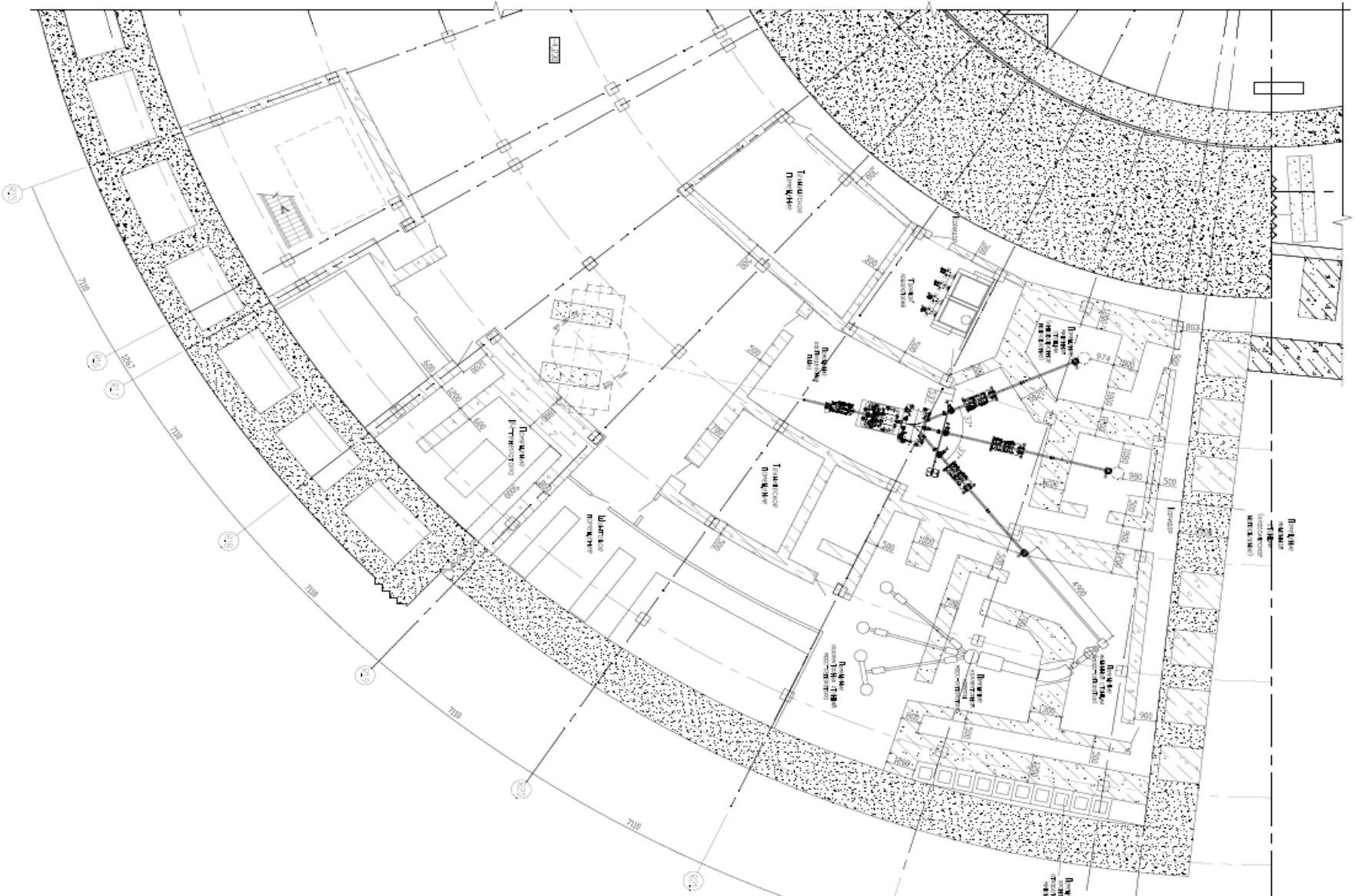
Система автоматической транспортировки для перемещение облученных мишеней в горячие камеры.

Энергия выведенного протонного пучка 40-80 МэВ и интенсивность до 200 мкА обеспечивают самые широкие возможности получения медицинских радионуклидов и радиофармпрепаратов для диагностики и терапии, которых до настоящего времени не было на других Российских установках.

По своим параметрам и возможностям РИЦ-80 будет соответствовать самым лучшим зарубежным аналогам.

По возможности получения сверхчистых радионуклидов данная установка не будет иметь мировых аналогов.

Схема расположения радиоизотопного комплекса РИЦ-80 в подвале экспериментального зала синхроциклотрона ПИЯФ



## Радионуклиды, планируемые к получению на РИЦ-80

| Радионуклид          | T1/2    | Мишень | Время облуч. (ч) | Активность в мишени (Ки) | использование                                                                        |
|----------------------|---------|--------|------------------|--------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|
| Ge-68<br>пэт калибр. | 270.8 d | Ga     | 240              | 2                        | калибровка ПЭТ сканеров, диагностика заболеваний нейроэндокринной системы            |
| Sr- 82 пэт           | 25.55 d | Rb, Y  | 240              | 10                       | диагностика заболеваний сердечно-сосудистой системы                                  |
| Mo-99<br>офэт+тер    | 2.74 d  | Mo     | 240              | 7.3                      | диагностика и терапия различных видов опухолей                                       |
| In-111 офэт          | 2.8 d   | Cd     | 25               | 24.7                     | Диагностика воспалительных процессов и злокачественных образований                   |
| I-123 офэт           | 13.27 h | Te     | 5                | 10.4                     | диагностика щитовидной железы, локализация опухолей (нейробластома и феохромоцитомы) |
| I-124 офэт           | 4.17 d  | Te     | 25               | 9.3                      | диагностика щитовидной железы , локализация опухолей, терапия                        |
| Tb-149 α-тер         | 4.1 h   | Gd     | 12               | 3.5                      | терапия злокачественных образований на клеточном уровне                              |
| Ra-223 α-тер         | 11.4 d  | Th     | 240              | 7.3                      | терапия злокачественных образований                                                  |

Кроме указанных в таблице радионуклидов, планируется создание линии для выделения **Re-188**, получаемого на реакторе. Имеется также возможность после осуществления 2-го этапа проекта производить **Cu-64, Cu-67, Rb-81, At-211**, а также другие медицинские радионуклиды.



## Мишенные станции изотопного комплекса РИЦ-80 для получения медицинских радионуклидов и радиофармпрепаратов.

Станция №1: Инновационное направление - масс-сепаратор.

Классификация - разработанные мишенные технологии для получения разделенных радионуклидов высокой чистоты

**Разработка ИРИС, ПИЯФ, изготовление НИИЭФА**

Станция №2: Инновационное направление - сухое выделение. Высокотемпературное выделение радионуклидов из облученных мишенных веществ.

Разработка ИРИС, ПИЯФ, **изготовление НИИЭФА**

Станция №3: Классическое направление - производство радионуклидов, мокрая радиохимия, полуавтоматизированный или полностью автоматизированный синтез РФТ.

Классификация - поставка готовой технологии. **Поставщик - Von Gahlen, MicroSpin GmbH**

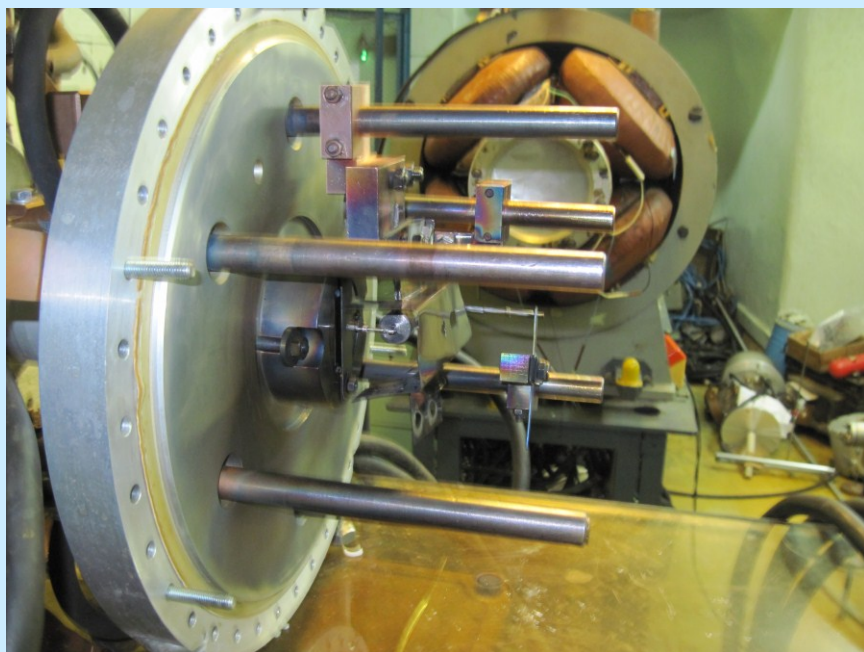
# Разработка масс-сепараторного и высокотемпературного «сухого» метода получения медицинских радионуклидов

## Главные особенности масс-сепараторного и высокотемпературного «сухого» метода получения медицинских радионуклидов

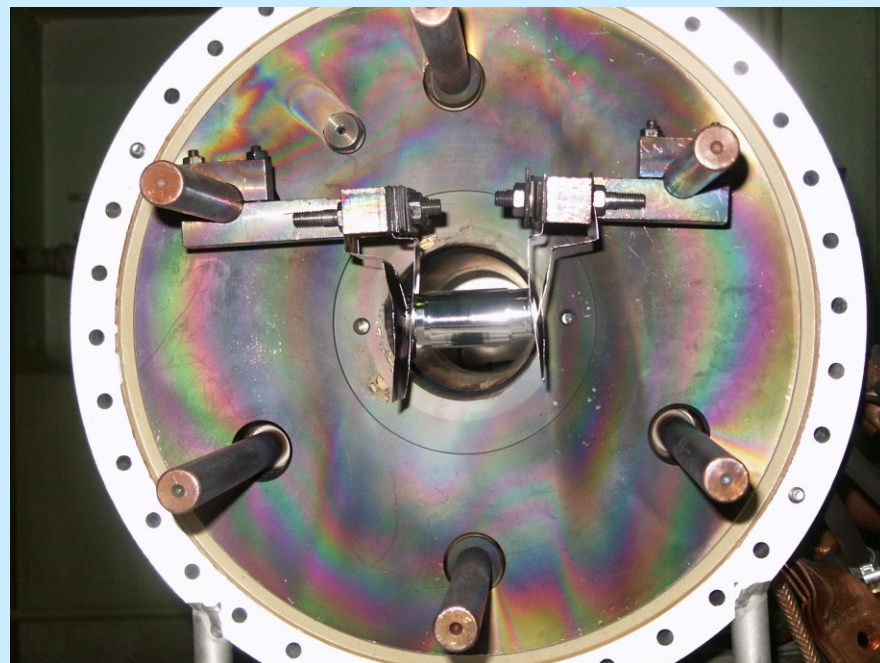
1. Новизна, возможность применения для получения широкого круга медицинских радионуклидов
2. Универсальность ( в том и другом методе используются идентичные мишенные устройства, разрабатываемые на основе мишенных устройств, созданных и используемых на установке ИРИС
3. Выделение производимых радионуклидов в месте их наработки (в вакуумном объеме мишенного устройства) Отсутствие мокрой радиохимии при выделении радионуклида из мишенного материала.
4. Увеличение удельной активности на несколько порядков
5. В случае использования масс-сепаратора получение сразу нескольких разделенных радионуклидов высокой чистоты

# Мишенные устройства (прототипы) с высокотемпературными контейнерами с мишенным веществом

На пучке синхроциклотрона



На вакуумном стенде



Масса мишенного вещества до  $10 \text{ г/см}^2$ , температура до  $2500 \text{ }^\circ\text{C}$ , что соответствует рабочим условиям на Ц-80 (80 МэВ, 100мкА)

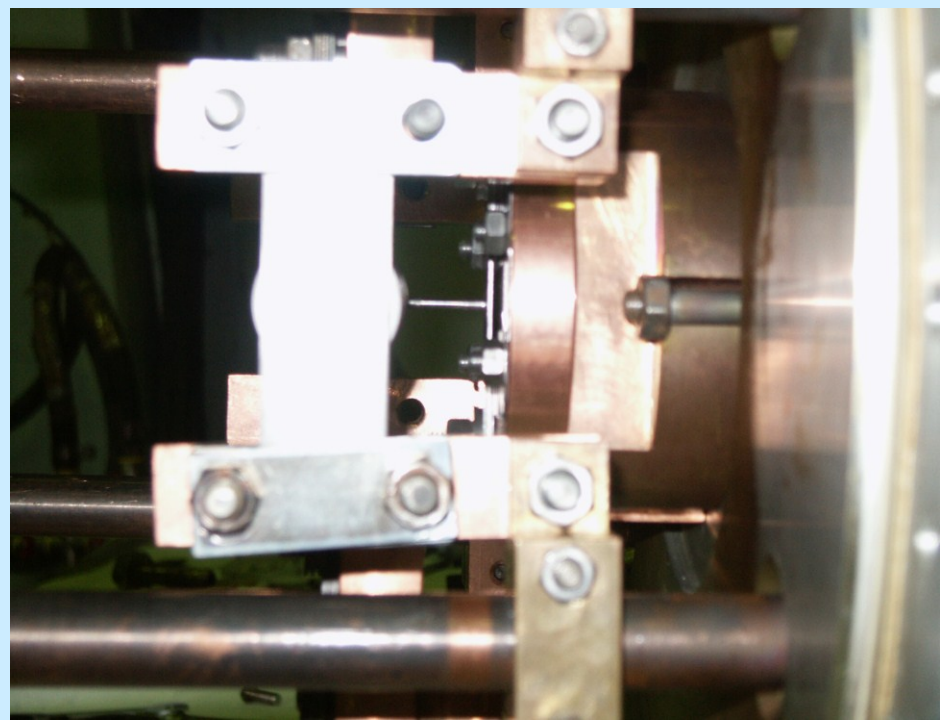
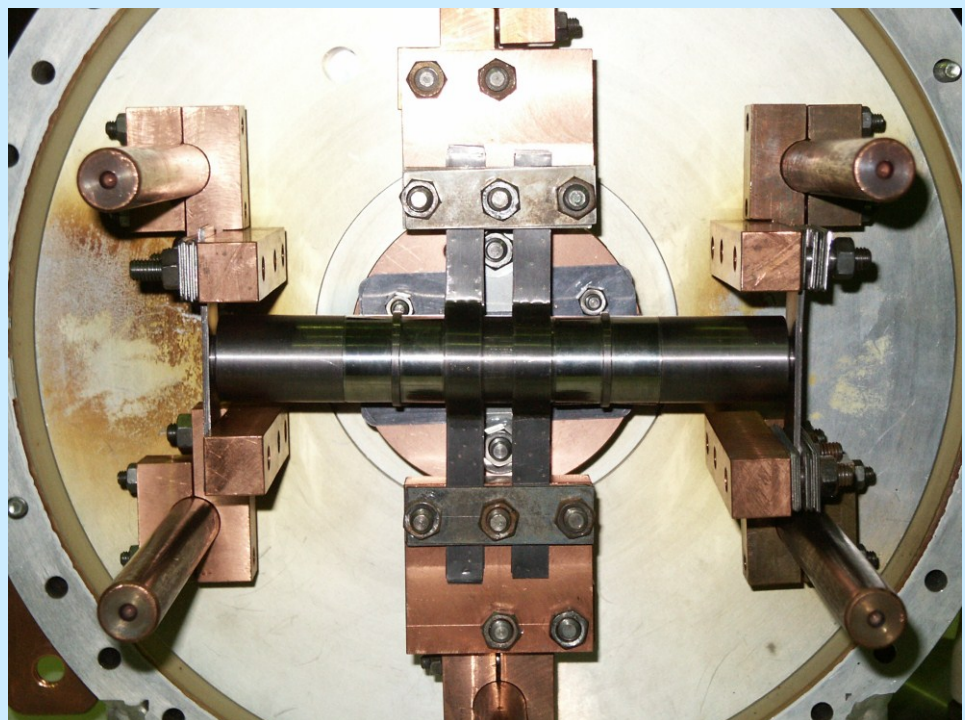
## Рабочий прототип мишени для выделения медицинских радионуклидов

длина мишенного контейнера  
диаметр  
Масса мишени (хлористый или  
металлический рубидий )

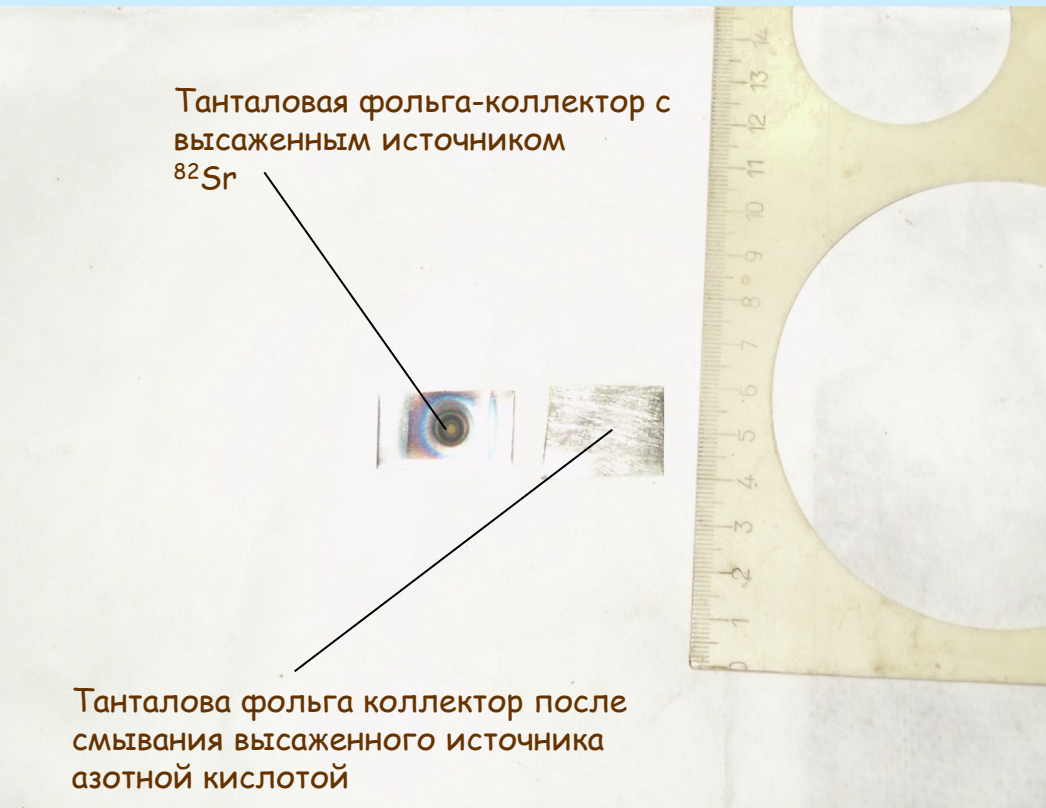
20 см;

3 см;

50-60 г



## Танталовая фольга, используемая в качестве коллектора

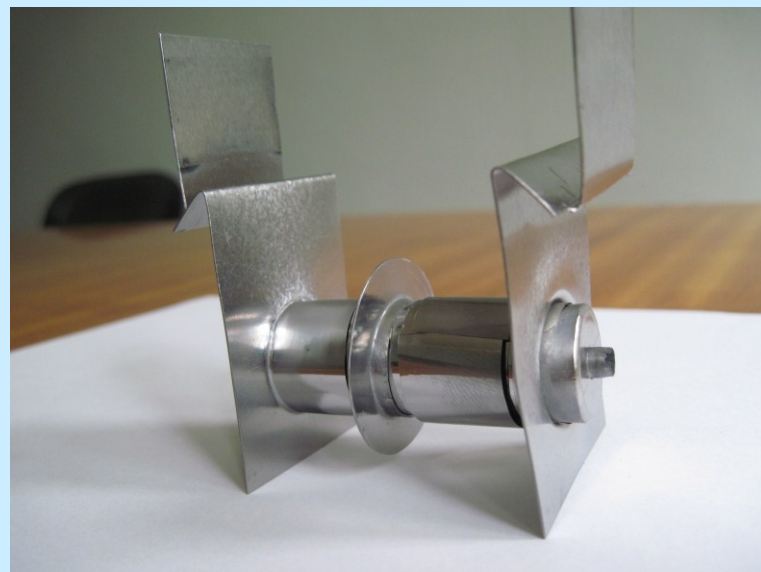


На фольги коллекторы высажено **65%**  
 $^{82}\text{Sr}$  от накопленного в мишени  
за суммарное время около **20-ти** часов  
при температуре **1700-2000 °C**.  
В мишени осталось **7%** от первоначально  
Наработанного количества

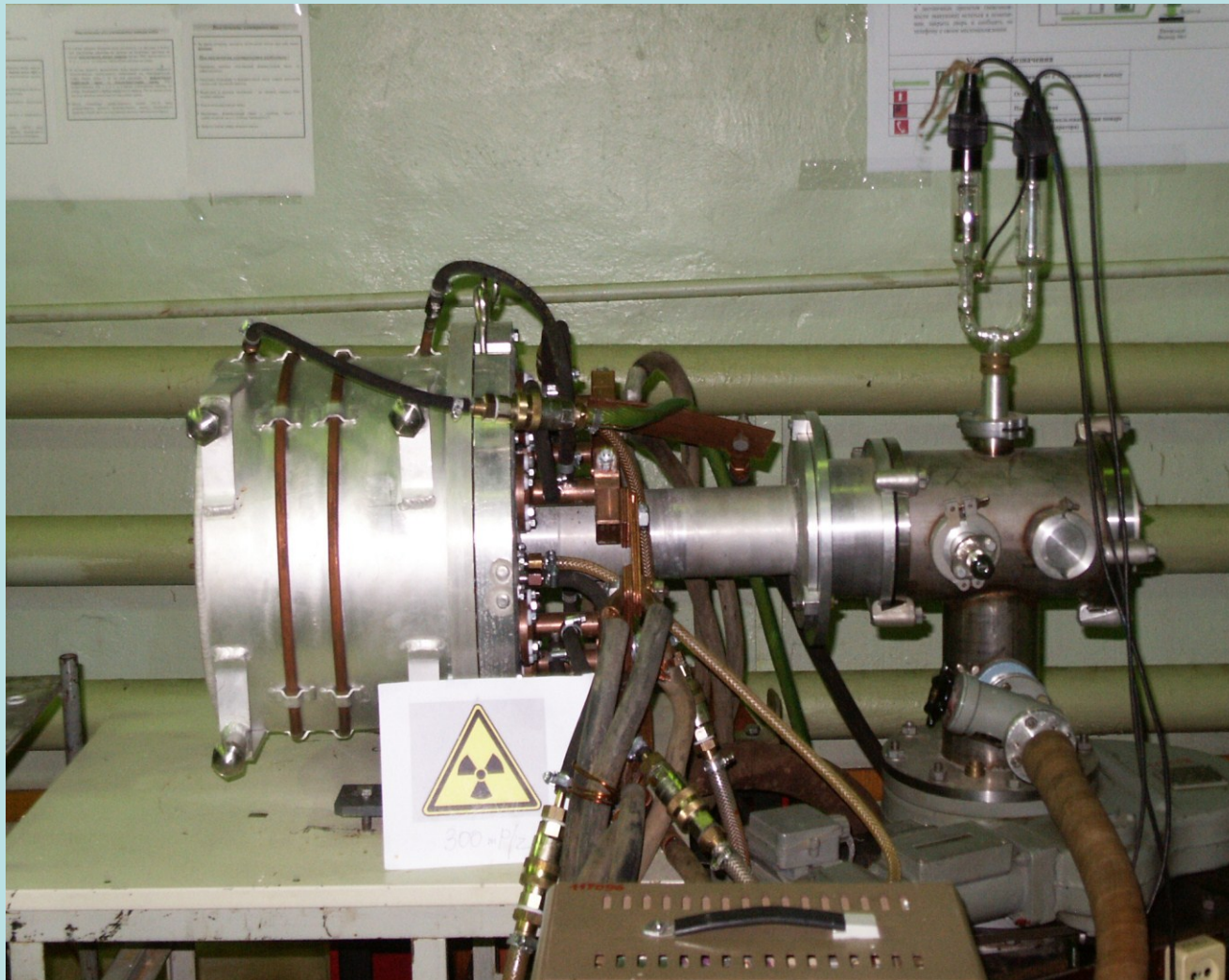
Более **90 %** активности сосредоточено  
в пятне диаметром около **5мм**

Фольга-коллектор может нагреваться проходящим через нее током для  
очистки получаемого источника от легко-летучих примесей

## Рабочие прототипы мишеней для РИЦ-80



## Высоковакуумный стенд с мишенным устройством для выделения генераторного изотопа $^{82}\text{Sr}$ из облученной мишени из $\text{UC}_2$ .



Температура мишенного вещества:

до 2500 °C

Выделяемая на мишени мощность:

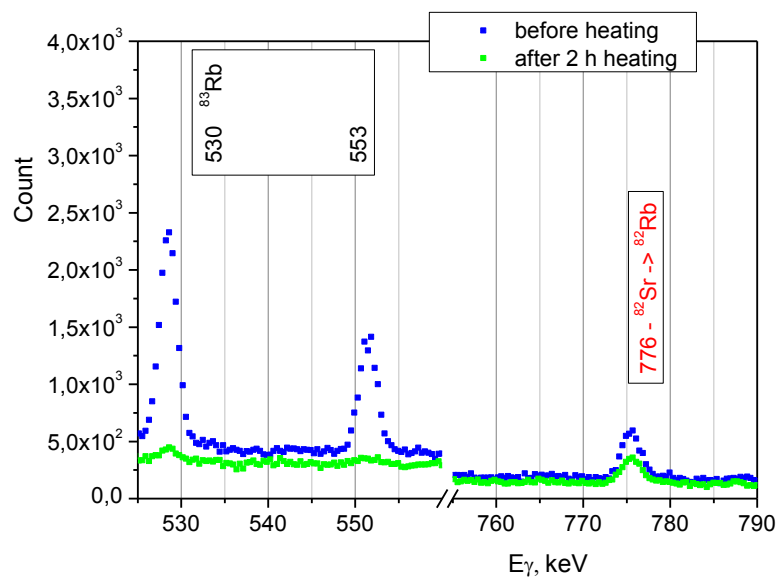
более 9 кВт

*Разработанная конструкция мишенного устройства позволяет выделять радионуклиды из мишенных веществ в виде тугоплавких и жидких металлов, а также тугоплавких металлических карбидов*



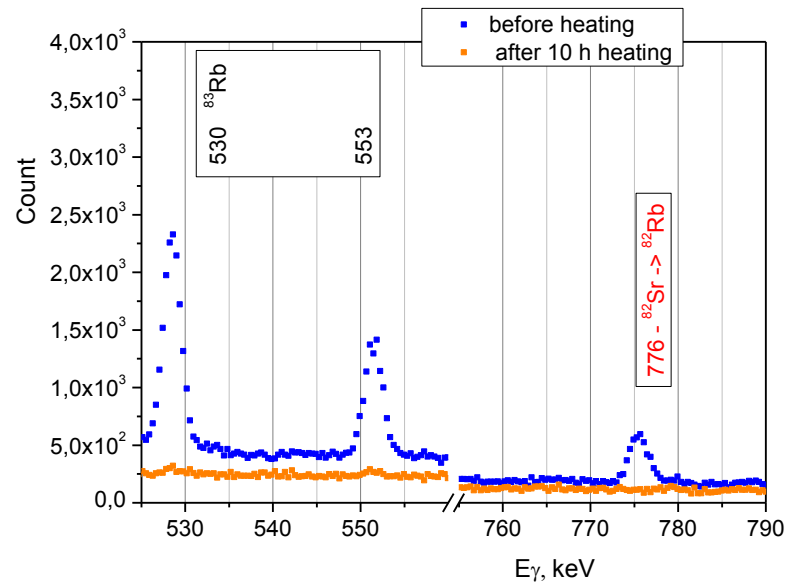
**Выделение Sr-82 из мишеней  
дикарбида иттрия, хлористого  
и металлического рубидия**

## Гамма спектры облученных мишеней $УС_2$ до и после нагрева в мишенном контейнере



Часть гамма-спектра облученного образца дикарбида иттрия, приготовленного в виде таблеток до его нагревания и после нагревания при температуре 1500 °С в течение 2-ух часов.

Эффективность выделения для рубидия 94%, для Стронция 43%.



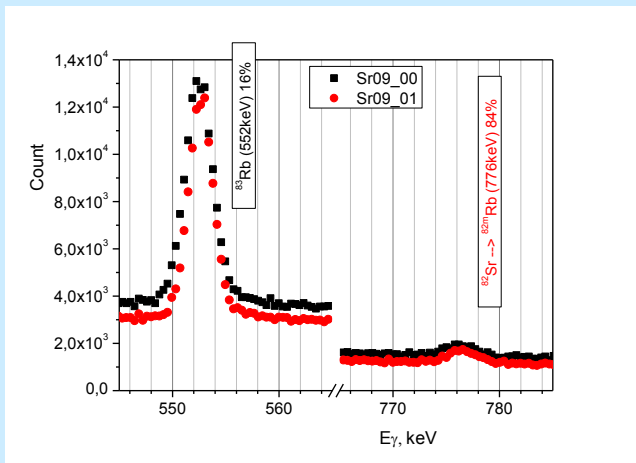
Часть гамма-спектра облученного образца карбида иттрия, приготовленного в виде таблеток до его нагревания и после нагревания при температуре 1500 °С в течение 10-ти часов.

Эффективность выделения для рубидия 100%, для стронция 100%.

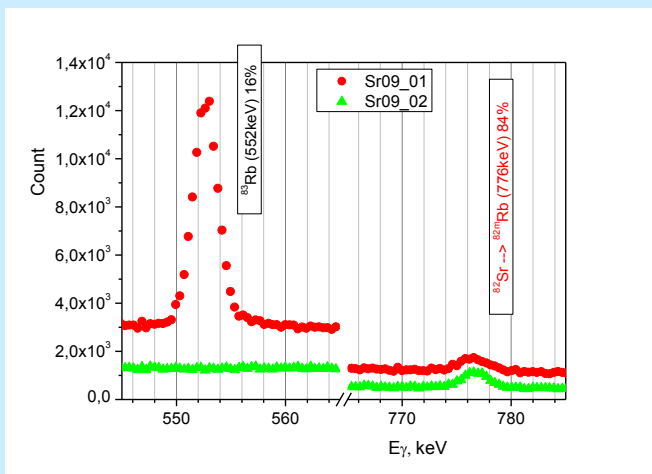
**Количество мишенного вещества составляло около 10 г/см<sup>2</sup> Выделенный таким методом стронций-82 использовался в РНЦ РХТ для тестирования Sr/Rb-82 генератора**

**Вывод:** из рабочего прототипа мишени из дикарбида иттрия высокой плотности толщиной 10 г/см<sup>2</sup> эффективность выделения стронция-82 за 10 часов нагрева при температуре 1500 °С составляет величину близкую к 100%.

# Разработка нового метода высокотемпературного выделения изотопного генератора для ПЭТ $^{82}\text{Sr}$ из мишенного вещества $\text{RbCl}$ , облученного на пучке синхроциклотрона ПИЯФ



Гамма-спектры капсулы с облученным мишенным веществом до нагрева и после нагрева в вакууме при низкой температуре



Гамма-спектры капсулы с мишенным веществом до нагрева и после нагрева при температуре выше температуры возгонки мишенного вещества

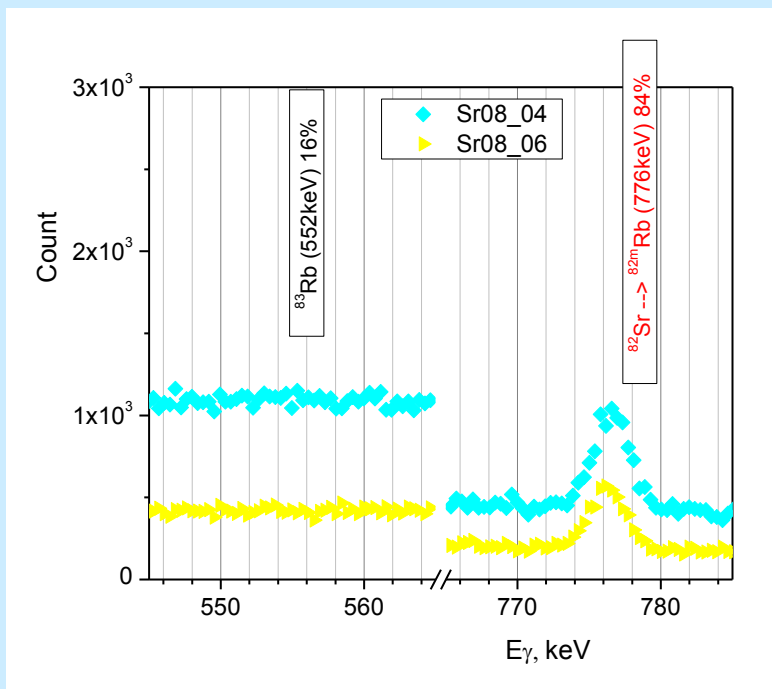


Капсула с мишенным веществом до и после нагрева при низкой температуре



Капсула после полной возгонки мишенного вещества

# Разработка нового метода высокотемпературного выделения изотопного генератора для ПЭТ $^{82}\text{Sr}$ из мишенного вещества $\text{RbCl}$ , облученного на пучке синхротрона ПИЯФ

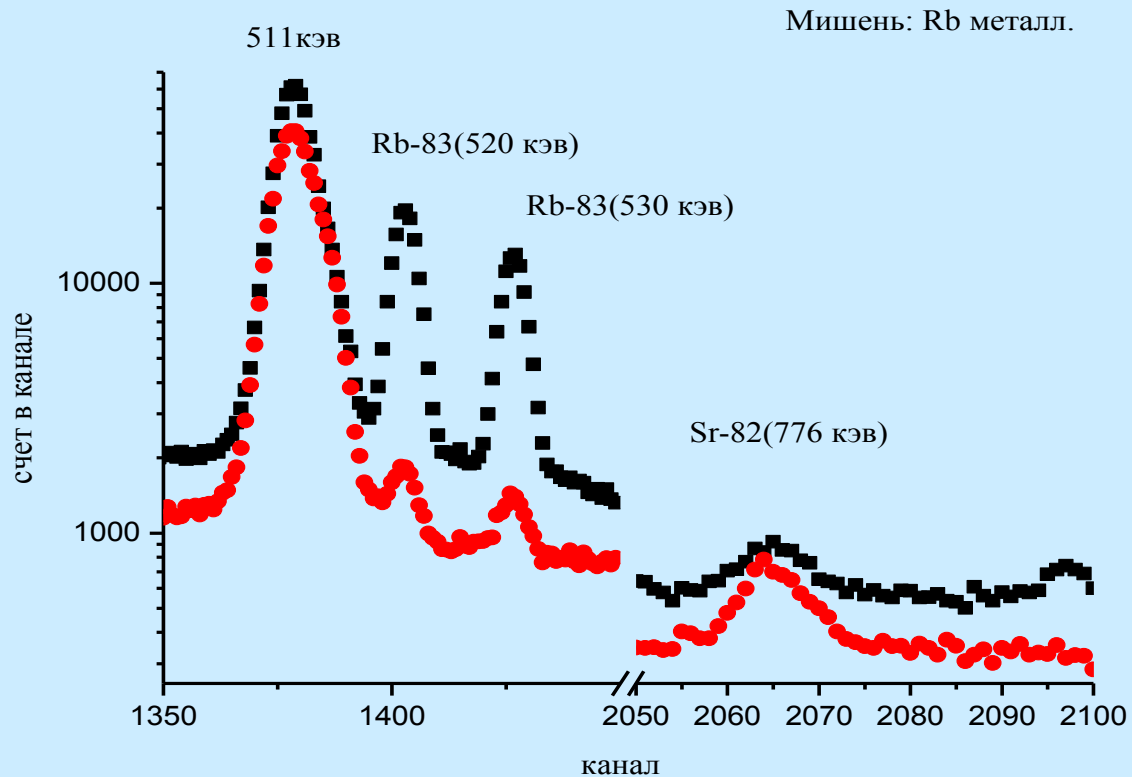


Гамма-спектр капсулы после нагрева и гамма-спектр раствора  $\text{HCl}$ , использованного для вымывания стронция из капсулы

Раствор  $\text{HCl}$  со смывым  $^{82}\text{Sr}$

Получена эффективность выделения  $^{82}\text{Sr}$  равная 80% при полном его отделении от мишенного вещества

# Гамма спектр облученной мишени металлического рубидия в мишенном контейнере до и после его нагрева при $T=800\text{ }^{\circ}\text{C}$

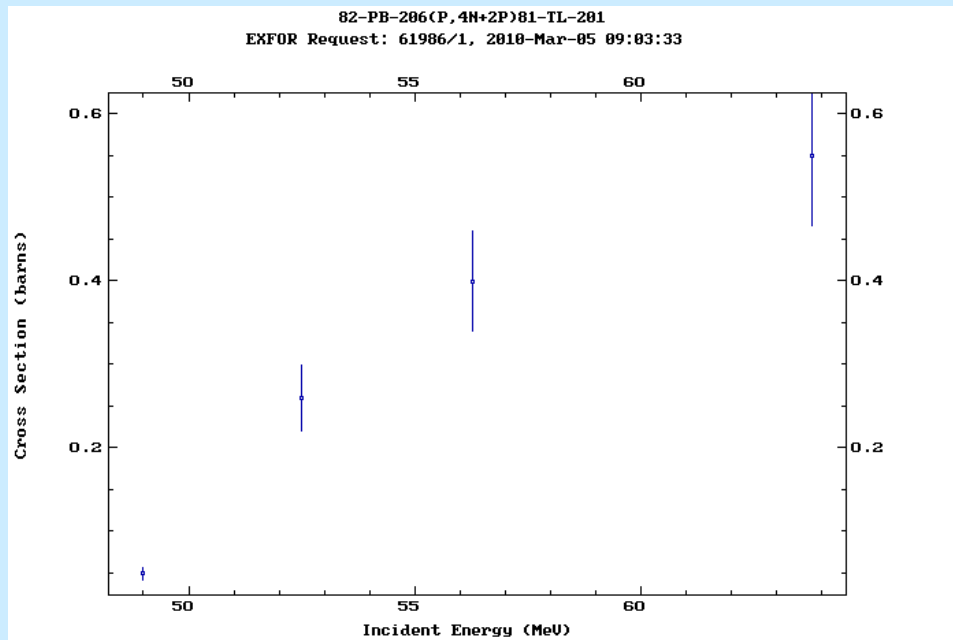


Часть гамма-спектра облученного металлического рубидия до его нагревания и после нагревания при температуре  $800\text{ }^{\circ}\text{C}$  в течение 1 часа.  
Эффективность отделения рубидия 92%.

## **Выделение Tl из облученного свинца**

Для ОФЭТ в диагностике заболеваний миокарда используется

$^{201}\text{Tl}$  ( $T_{1/2}=3.038$  d,  $E_{\gamma}=167; 135$  keV)



С близкими выходами получаются два соседних изотопа

$^{202}\text{Tl}$  ( $T_{1/2}=12,23$  d,  $E_{\gamma}=439; 520$  keV)

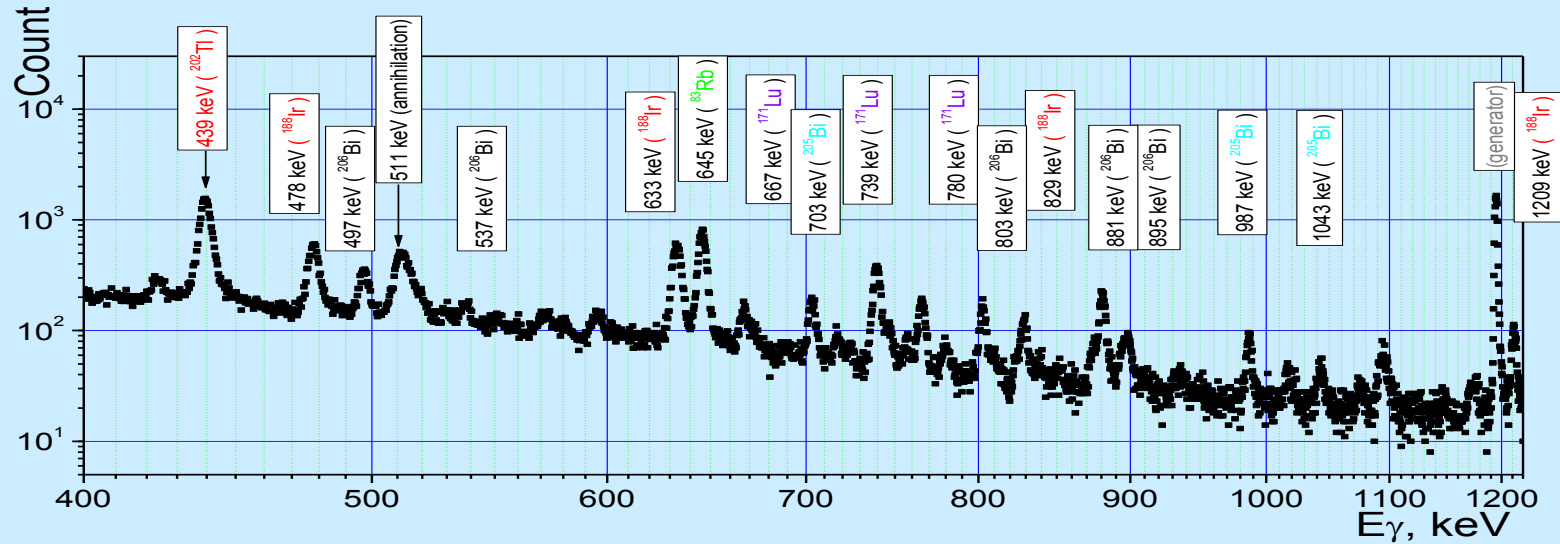
$^{200}\text{Tl}$  ( $T_{1/2}=1.09$  d,  $E_{\gamma}=368; 1206$  keV)

Сечения образования  $^{201}\text{Tl}$  из  $^{206}\text{Pb}$  (24%)

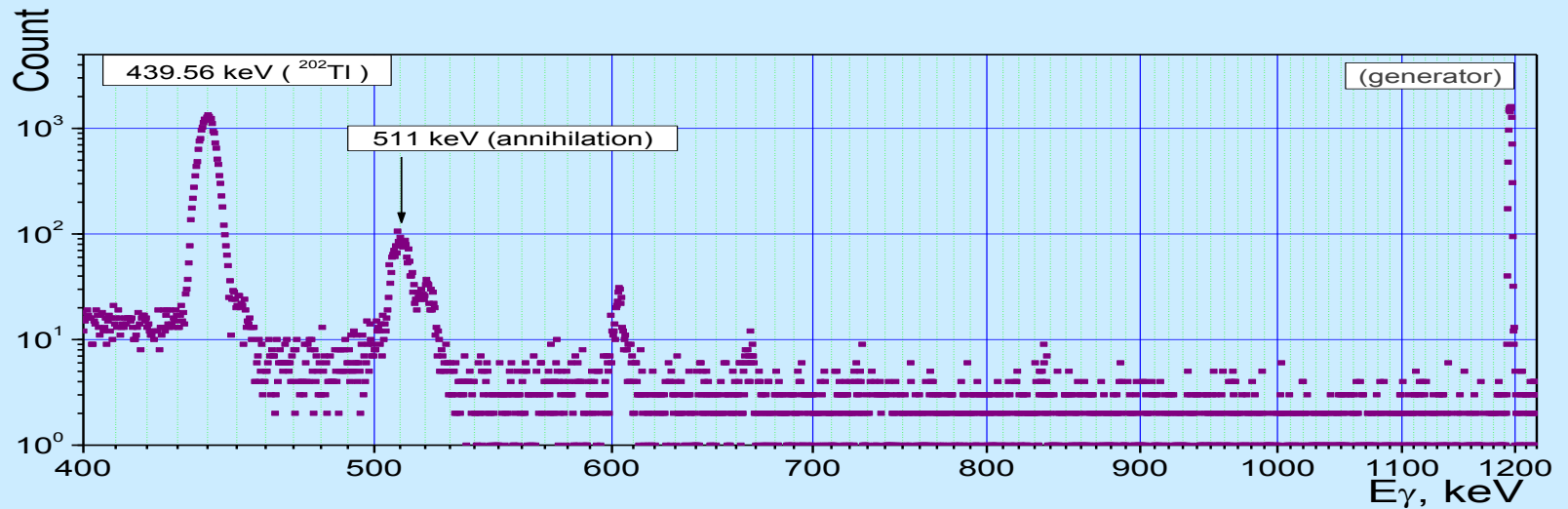
Необходима электромагнитная масс сепарация



# Спектр облученного свинца:

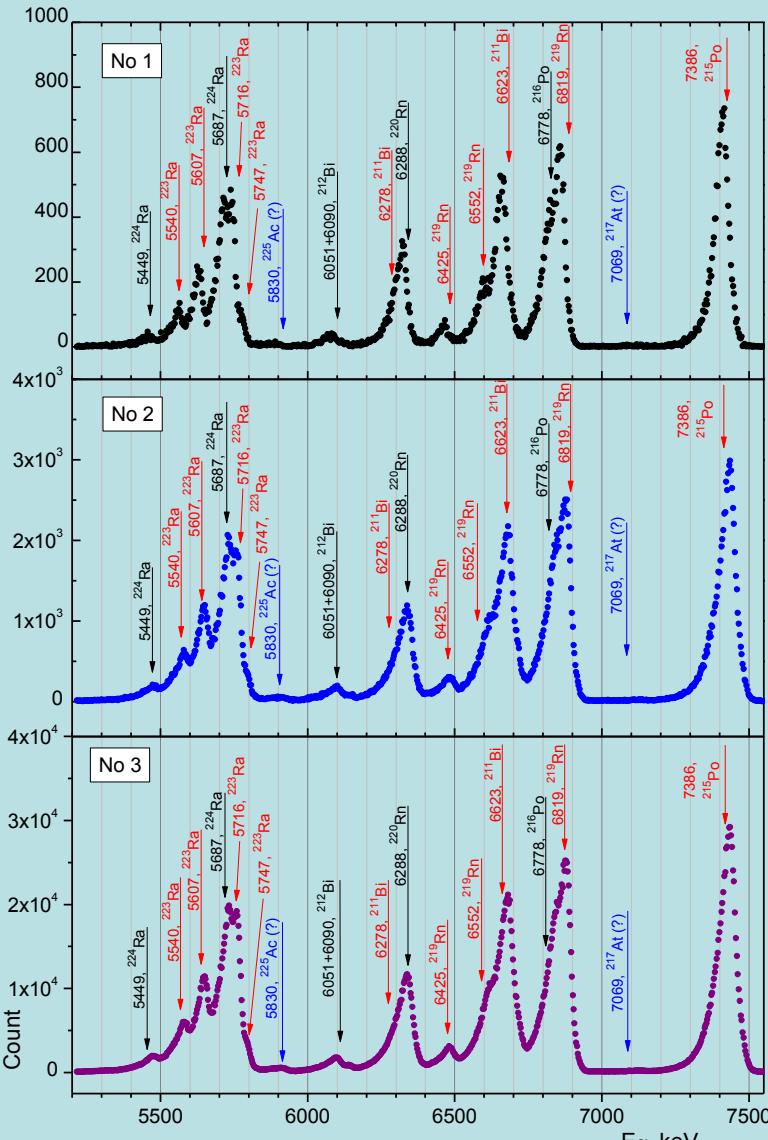
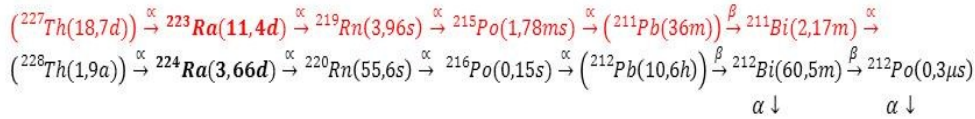


Фракция, высаженная на охлаждаемый коллектор при  $T = 350^\circ\text{C}$



Выделение изотопов  $^{223}\text{Ra}$  и  $^{224}\text{Ra}$ , распадающихся  $\alpha$ -распадом,  
из мишени из карбида урана-238 высокой плотности

# Альфа спектры $^{223,224}\text{Ra}$ высаженных на охлаждаемую подложку в течение двух часов нагрева облученной мишени при разных температурах

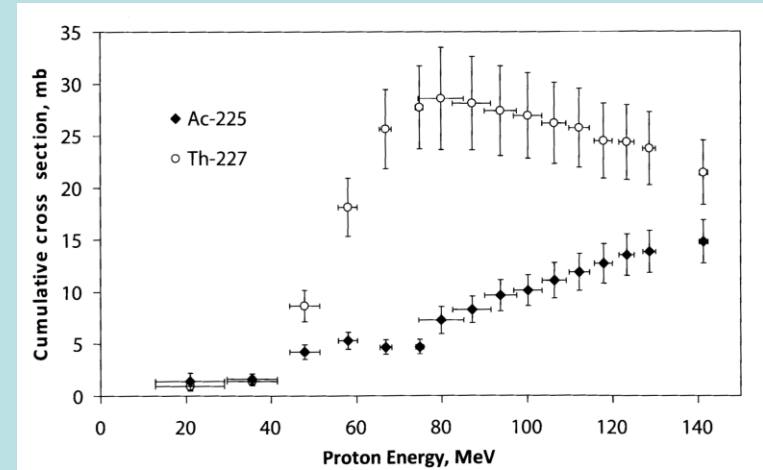


$T = 1900\text{ }^{\circ}\text{C}$   
 Эффективность  
 выделения  
 около 2%

$T = 2100\text{ }^{\circ}\text{C}$   
 Эффективность  
 выделения  
 около 10%

$T = 2300\text{ }^{\circ}\text{C}$   
 Эффективность выделения  
 около 90 %

Следующий этап - использование карбида тория высокой плотности в качестве мишени, что обеспечит получение на РИЦ-80 активности изотопов Ra-223, Ra-224 до 2 Ки. Для одновременной наработки разделенных Ra-223, Ra-224 необходимо использование масс-сепаратора



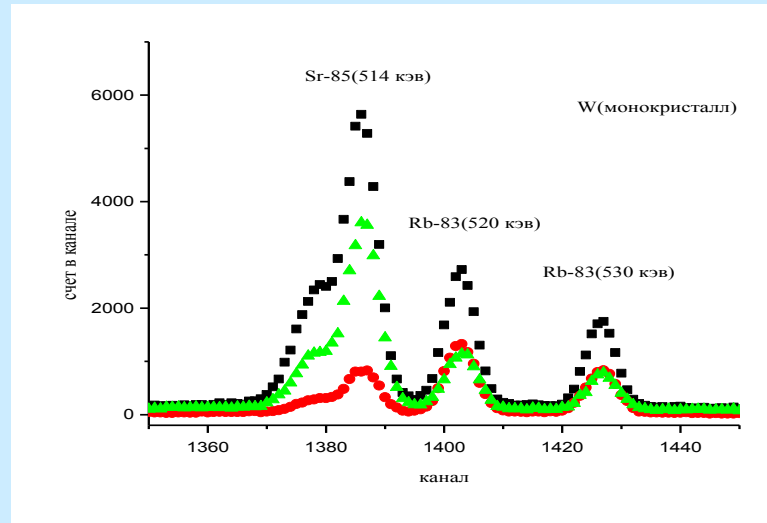
Сечение получения  $^{225}\text{Ac}$  и  $^{227}\text{Th}$  из ториевой мишени ( $^{232}\text{Th}$ ) (S. Ermolaev, B Zhuikov et al., icis7 abstracts, p 32. 4-8 Sept. Moscow, Russia.)

# Измерение эффективности поверхностной ионизации радиоактивного стронция

# Измерение эффективности поверхностной ионизации радиоизотопов стронция

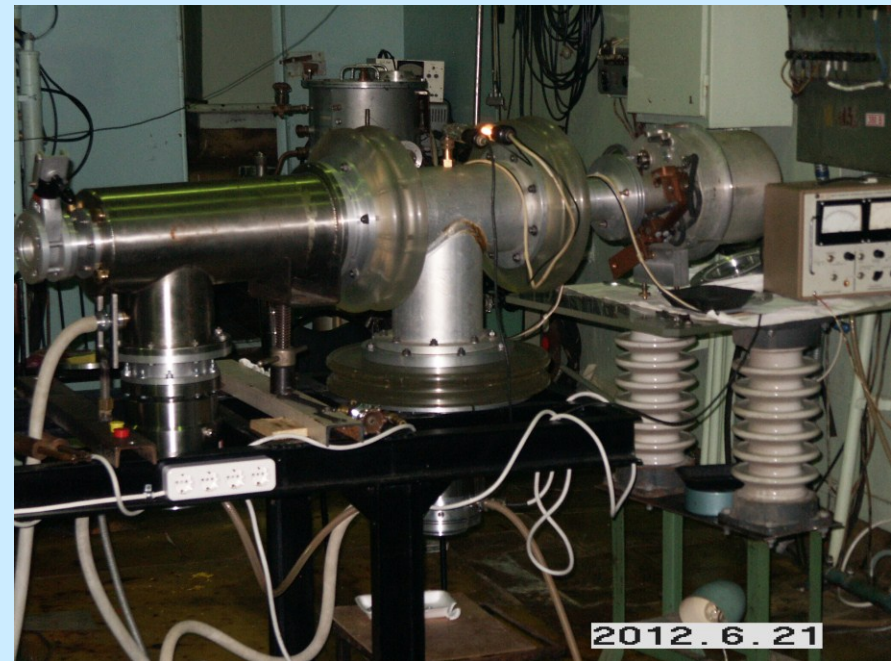


Ионный источник поверхностной ионизации с вольфрамовой трубкой  
Длиной 20 мм из монокристаллического вольфрама с работой выхода 5 эВ



Измеренная эффективность ионизации рубидия при температуре 2400 °С равна 84%, стронция 45%

Линзовая часть нового тестового масс-сепаратора в экспериментальном зале ИРИС



Как было показано, при увеличении длины ионизатора эффективность ионизации возрастает пропорционально его длине, поэтому, используя источник из монокристаллического вольфрама длиной 50 мм, реально получить эффективность ионизации, близкую к 100% как для стронция, так и для радия

## Выводы

### Для разрабатываемых прототипов мишеней для РИЦ-80:

получены эффективности выделения стронция-82 (более 80%) из разных мишенных материалов -  $УС_2$ ,  $RbCl$ , металлического рубидия.

Получена эффективность выделения изотопов радия (более 90%) из мишени урана-238 высокой плотности. Полученные результаты позволяют рассчитывать на высокий выход активности  $Ra-223,224$  (около 2 Ки) из высокотемпературной мишени карбида тория, рабочий прототип которой изготовлен в НПО "ЛУЧ" и поставлен в ПИЯФ.

С использованием источника поверхностной ионизации из монокристалла вольфрама с работой выхода внутренней поверхности 5 эВ получена эффективность ионизации радиоактивных атомов стронция выше 40%. Увеличение длины источника до 50 мм позволит получить эффективность Ионизации более 80%.