

Семинар ОФВЭ, 25.10. 2011

В. Н. Пантелеев

**Изотопный комплекс РИЦ-80.**

**Результаты первых экспериментов по получению генераторного изотопа  $^{82}\text{Sr}$  и других медицинских радионуклидов на синхроциклотроне ПИЯФ.**

Приказ №38 от 12.04.2010

## Об обеспечении мероприятий по развитию и созданию современной научно-технической базы в ПИЯФ РАН.

.

.

.

2.2. Ядерная медицина – проект МКЦС (Медицинский Комплекс на базе Циклотрона и Синхротрона)

Руководитель: директор института Самсонов В.М.

Научные руководители: руководитель ОФВЭ Воробьев А.А, заведующий УО Абросимов Н.К.

Приложение к приказу №38

.

.

2.3. Координация работ по созданию проекта и организации работ по получению радиоизотопов на ускорителях ПИЯФ – зав. Лабораторией КЯ ОФВЭ Пантелеев В.Н, и главный инженер УО Иванов Е.М.

.

.

Директор института

В.М. Самсонов

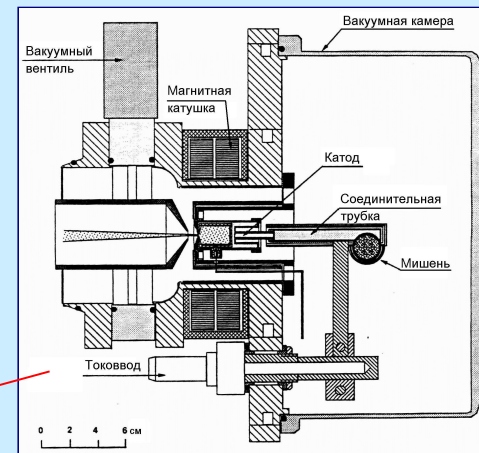
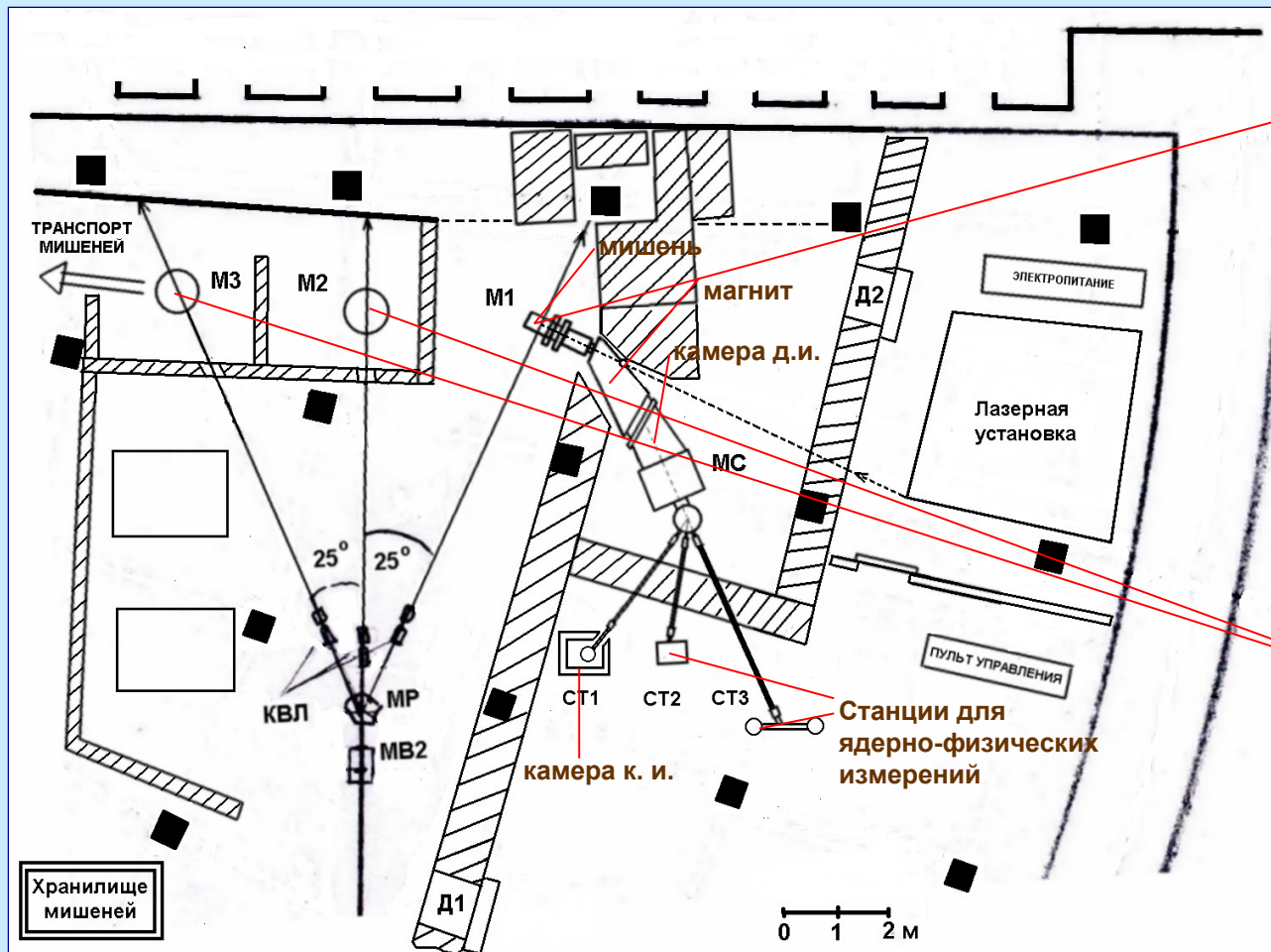
Группа разработки проекта РИЦ-80\_  
ЛКЯ

В.Н. Пантелеев  
Ф.В. Мороз  
К.А. Мезилев  
С.Ю. Орлов  
Ю.М. Волков  
А.Е. Барзах  
А.Г. Поляков  
А.М. Филатова  
ГЭЯ  
Л.Х. Батист

Группа разработки проекта ИРИНА  
ЛКЯ

В.Н. Пантелеев  
Ф.В. Мороз  
В.С. Иванов  
В.В. Лукашевич  
Д.В. Федоров  
А.Е. Барзах  
П.Л. Молканов

# Схема расположения установки РИЦ-80 в подвале экспериментального зала синхротрона



Мишенно-ионное устройство масс-сепаратора

Две радиохимические станции

Установка РИЦ-80 с масс-сепаратором

## Сравнение активностей радионуклидов, нарабатываемых на РИЦ-80 на выходе масс-сепаратора и в радиохимической мишени, $I_p = 100 \mu\text{A}$

Изотоп	Период полураспада	Мишень, проц. содерж. изотопа	Реакция, Сечение мбарн	Время облучения, часы	Активность разделенных изотопов на КОЛЛ. М.-С., Кюри	Активность в р.-х. мишени, Кюри
$^{67}\text{Ga}$ офэт $^{73}\text{Ga}$ , $^{72}\text{Ga}$ $^{70}\text{Ga}$ , $^{68}\text{Ga}$ , $^{65}\text{Ga}$	3.2 дн.	Ge ест	(p;2p,xn) 100	25	<b>1.1</b> ( $\epsilon_i=20\%$ )	<b>38</b> (из Zn)
$^{82}\text{Sr}$ пэт	25.55 дн.	Y ест.	(p; 2p,6n) 25	250	<b>1.3</b> ( $\epsilon_i=80\%$ )	<b>8</b> (из Rb)
$^{103}\text{Pd}$ тер $^{101,100}\text{Pd}$	16.99 дн.	Rh ест.	(p,xn) 700	120	<b>0.24</b> ( $\epsilon_i=1\%$ )	<b>24</b>
$^{109}\text{Cd}$ офэт $^{107}\text{Cd}$	1.27 г.	$^{109}\text{Ag}$ 48.2	(p,n) 380	250	<b>0.1</b> ( $\epsilon_i=10\%$ )	<b>1</b>
$^{111}\text{In}$ офэт $^{112-117}\text{In}$	2.8 д.	Sn ест.	(p;2p,xn) 40	25	<b>1.4</b> ( $\epsilon_i=20\%$ )	<b>28</b> (из Cd)
$^{123}\text{I}$ офэт	13.27 ч.	$^{124}\text{Te}$ 4.8	(p,2n) 1000	5	<b>7</b> ( $\epsilon_i=20\%$ )	<b>34</b>
$^{124}\text{I}$ пэт+тер $^{123,124,125,126,128,130}\text{I}$	4.17 дн.	$^{125}\text{Te}$ 7.1  Te ест	(p,2n) 1000	25	<b>5</b> ( $\epsilon_i=20\%$ )	<b>24</b>
$^{201}\text{Tl}$ офэт	3.04 дн.	$^{206}\text{Pb}$ 24.1	(p;2p,xn) 450	25	<b>1.7</b> ( $\epsilon_i=20\%$ )	<b>25</b> (из $^{203}\text{Tl}$ )

Изотоп	Период полураспада	Мишень, проц. содерж. изотопа	Реакция, сечение мбарн	Время облучения, часы	Активность раздел. изот. на м.-с., Кюри	Активность в р.-х. мишени, Кюри
$^{61}\text{Cu}$ пэт	3.33 ч.	$^{61,62}\text{Ni}$ 1.1, 3.6	(p,n) 500	1	<b>2.8</b> ( $\epsilon_i=10\%$ )	<b>28</b>
$^{62}\text{Zn}$ пэт	9.18 ч.	Cu ест.	(p,xn) 80	3	<b>0.5</b> ( $\epsilon_i=10\%$ )	<b>5</b>
$^{63}\text{Zn}$ пэт	38.47 мин.	Cu ест.	(p,xn) 350	0.2	<b>2.9</b> ( $\epsilon_i=10\%$ )	<b>29</b>
$^{64}\text{Cu}$ пэт+тер	12.7 ч.	$^{64}\text{Ni}$ 0.926	(p,n) 750	4	<b>4.3</b> ( $\epsilon_i=10\%$ )	<b>43</b>
$^{73}\text{As}$ офет	80.3 дн.	Ge ест.	(p,n) 400	120	<b>0.5</b> ( $\epsilon_i=10\%$ )	<b>5</b>
$^{74}\text{As}$ пэт+тер	17.77 дн.	Ge ест.	(p,n) 380	150	<b>2.1</b> ( $\epsilon_i=10\%$ )	<b>21</b>
$^{75}\text{Br}$ пэт	1.61 ч.	$^{76}\text{Se}$ 9.36	(p,2n) 500	0.5	<b>7</b> ( $\epsilon_i=20\%$ )	<b>35</b>
$^{76}\text{Br}$ пэт	16.2 ч.	$^{76}\text{Se}$ 9.36	(p,n) 900	5	<b>8.6</b> ( $\epsilon_i=20\%$ )	<b>43</b>
$^{77}\text{Br}$ офэт	2.38 дн.	$^{77}\text{Se}$ 7.63	(p,n) 700	20	<b>7.2</b> ( $\epsilon_i=20\%$ )	<b>36</b>
$^{195\text{m}}\text{Hg}$ офэт	41 ч.	$^{197}\text{Au}$ 100	(p,3n) 700	10	<b>4.4</b> ( $\epsilon_i=40\%$ )	<b>11</b>

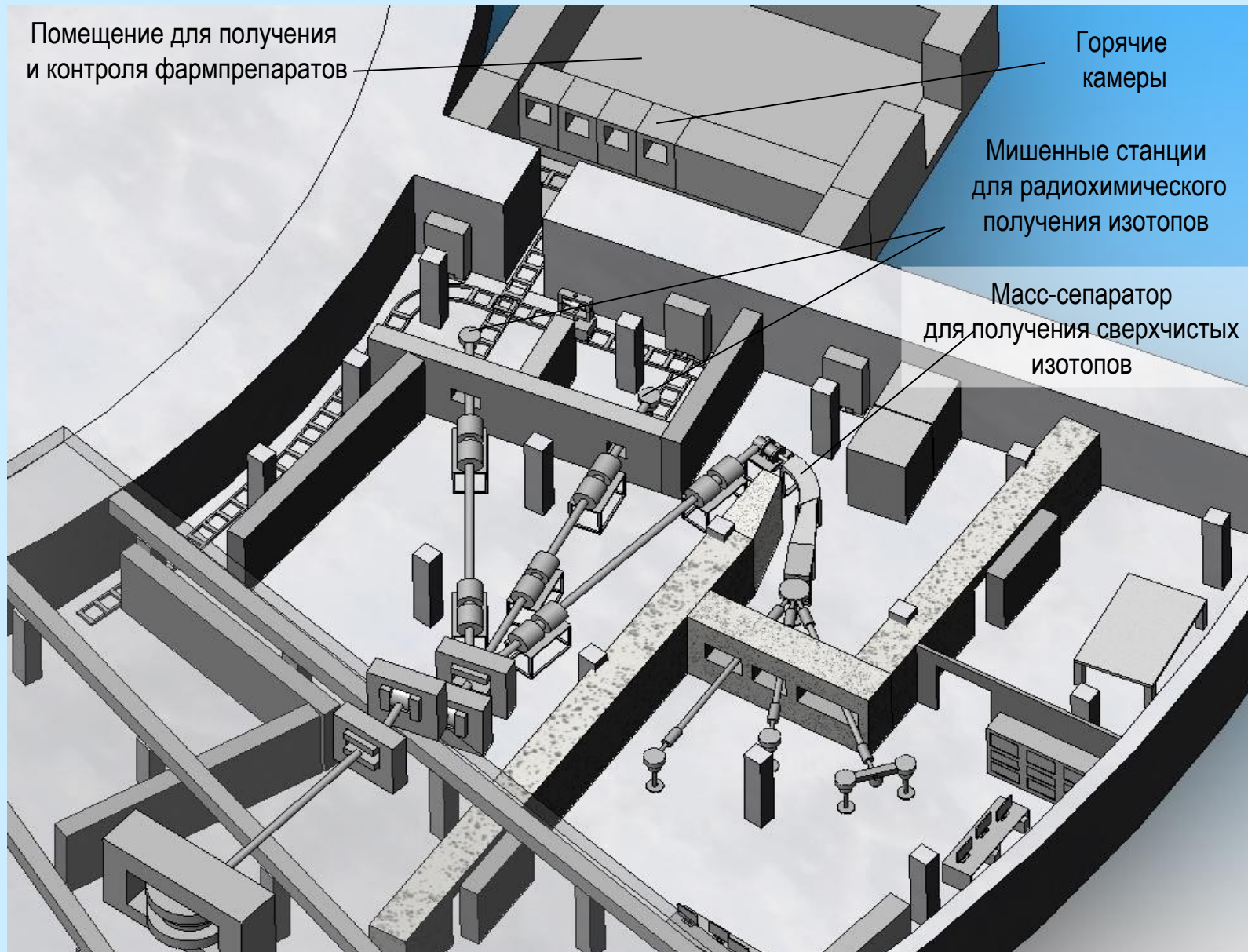
Расчетная активность изотопов производимых в мишени из естественного Rb(\*) на пучке протонов энергии 80 МэВ, интенсивностью 100 мкА. Толщина мишени 4 г/см<sup>2</sup>

<sup>85</sup> Rb	72.2%	Изотоп	T <sub>1/2</sub>	Сечение образования	Скорость образования в мишени, 1/s	Активность (в мишени) после 10 суток облучения, Кюри
<sup>87</sup> Rb	28.2%	<sup>86</sup> Rb	18.7 дн.	100-200 mb	9x10 <sup>11</sup>	4
		<sup>84</sup> Rb	32.8 дн.	150-250 mb	3.5 x10 <sup>12</sup>	16
		<sup>83</sup> Rb	86.2 дн.	150-300 mb	3.9 x10 <sup>12</sup>	8
		<sup>85</sup> Sr	64.9 дн.	200-300 mb	4.3x10 <sup>12</sup>	11
		<sup>83</sup> Sr	1.35 дн.	100-200 mb	2.6x10 <sup>12</sup>	50
		<sup>82</sup> Sr	25.55 дн.	150 mb	2.6 x10 <sup>12</sup>	15

*(\*) Метод используемый в Троицке. Активность <sup>82</sup>Sr, получаемая в Троицке (140МэВ, 100 мкА) для приготовления фармпрепаратов за 10дней облучения – 5 Кюри.*

*Если использовать в качестве материала мишенного контейнера сталь, то в результате реакции <sup>56</sup>Fe (p,n)<sup>56</sup>Co (T<sub>1/2</sub>=77,27 d) за 5 дней в мишенном контейнере образуется активность около 4 Кюри*

Схема расположения установки РИЦ-80 в подвале  
экспериментального зала синхроциклотрона +  
горячие камеры и помещения для изготовления  
фармпрепаратов





## Схема Р/Х производства стронция-82 в ПИЯФ



Выделенная активность Sr-82 после 10 суток облучения и двухнедельной выдержки мишени рубидия  $4\text{гсм}^2$ , облучаемой на пучке 100 мкА, ~8 Ки

Справка: 90 мКи  $^{82}\text{Sr}$ , заряженного в генератор, используется для диагностики 42 пациентов в течение 2-ух месяцев.

Примесь  $^{85}\text{Sr}$  50 мКи! *V. Chudakov et al., abstracts icis7, Moscow 4-8 Sept., p 42.*

Мишенное вещество в р/х методе получения  $^{82}\text{Sr}$ :  
рубидий металлический или соль ( $\text{RbCl}$ )?

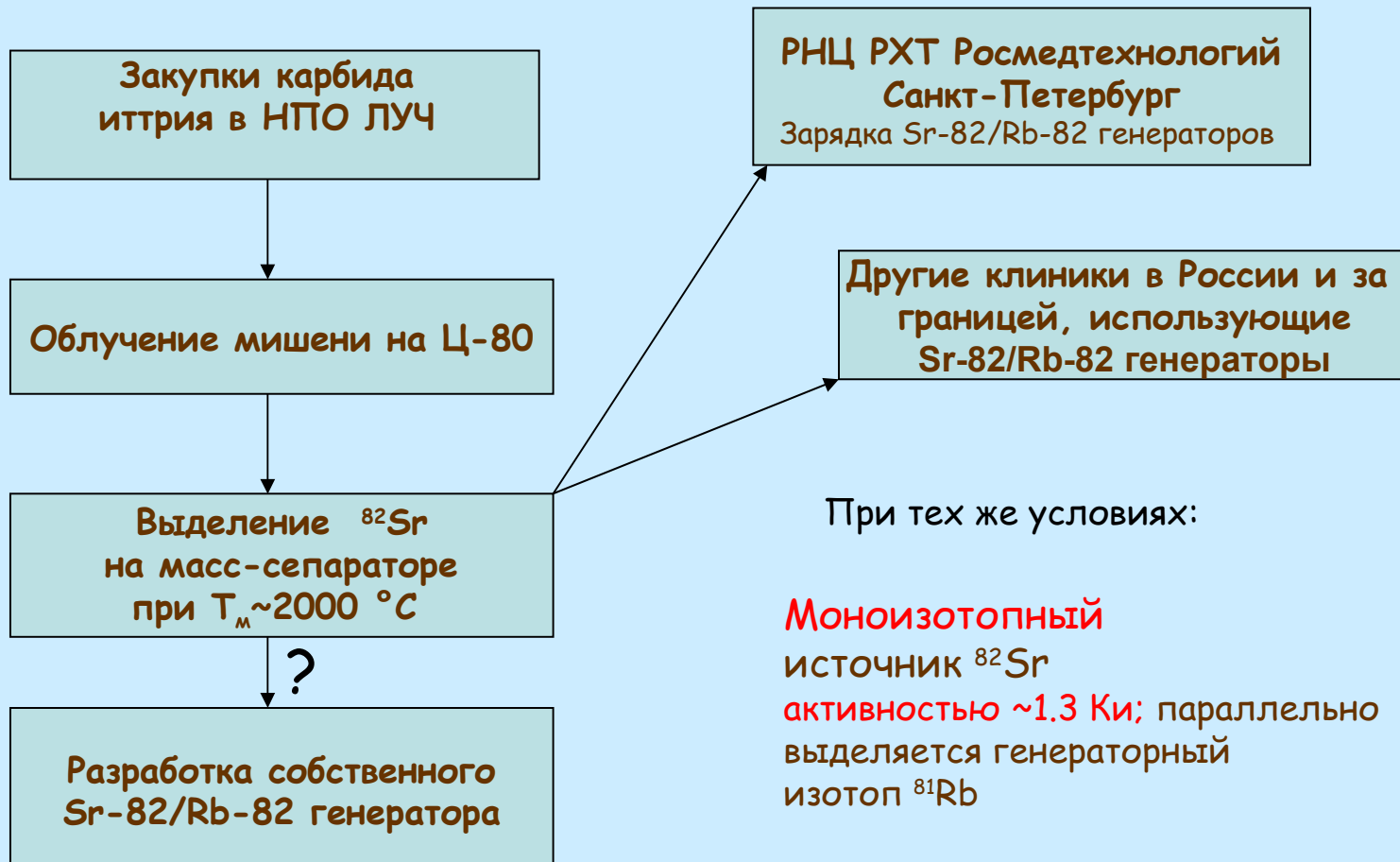
При работе на высокоинтенсивных пучках одним из главных параметров мишенного вещества является его **теплопроводность**.

Теплопроводность металлического рубидия при температуре 20-600 °C:  $\Lambda = 35.5-22.2$  Вт/м град

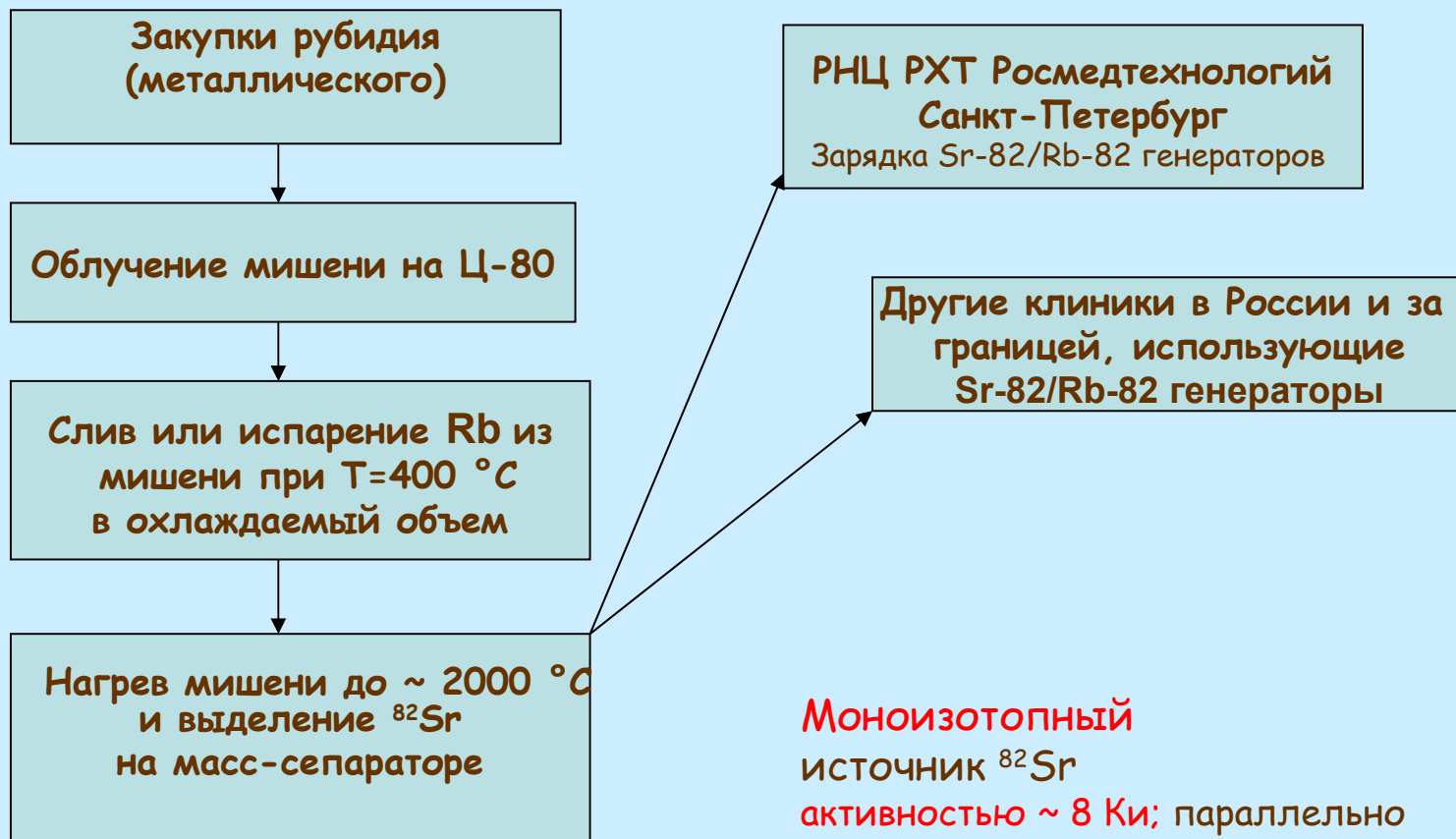
Теплопроводность  $\text{RbCl}$  при температуре 0 -700 °C  $\Lambda = 4.4 - 1.2$  Вт/м град

Теплопроводность танталового контейнера при температуре 600-700 °C  $\Lambda = 70$  Вт/м град

## Схема производства стронция-82 из карбида иттрия с использованием масс-сепараторного метода



## Схема производства стронция-82 из рубидия с использованием масс-сепараторного метода



**Моноизотопный**  
источник  $^{82}\text{Sr}$   
активностью  $\sim 8\text{ Ки}$ ; параллельно  
выделяется генераторный  
изотоп  $^{81}\text{Rb}$

## **An alternate approach to the production of radioisotopes for nuclear medical applications**

John M. D'Auria<sup>1</sup>, Roderich Keller<sup>2</sup>, Keith Ladouceur<sup>3</sup>, Suzy Lapi<sup>4</sup>, Tom Ruth<sup>5</sup>, and Paul Schmor<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Simon Fraser University, Burnaby, B.C., CANADA

<sup>2</sup> Santa Fe, NM, USA

<sup>3</sup> AAPS, Vancouver, B.C. CANADA

<sup>4</sup> Washington University, St. Louis, MI, USA

<sup>5</sup> TRIUMF, Vancouver, B.C., CANADA

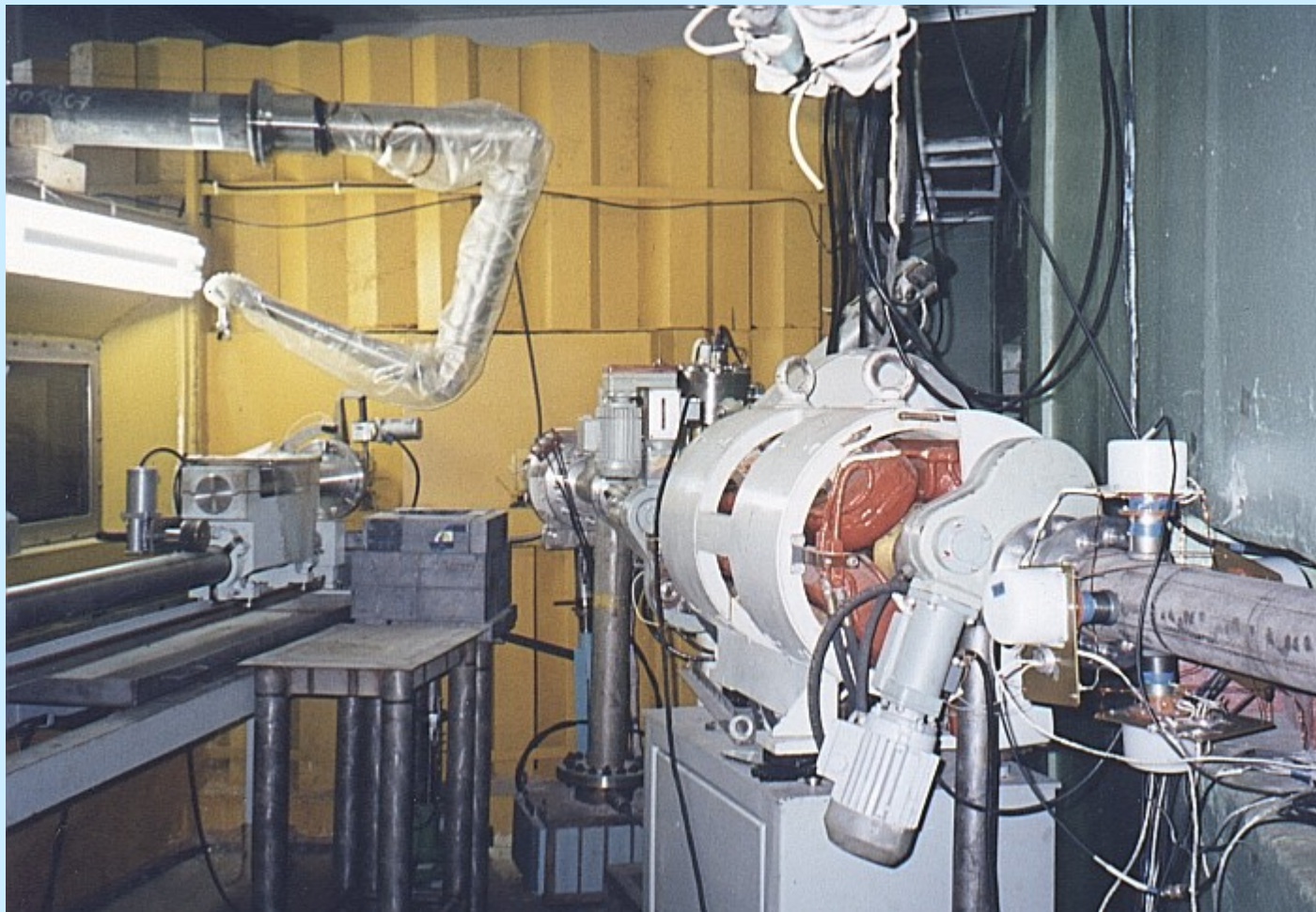
[dawria@sfu.ca](mailto:dawria@sfu.ca), [rokion19@gmail.com](mailto:rokion19@gmail.com), [keith.ladouceur@aapsinc.com](mailto:keith.ladouceur@aapsinc.com), [lapis@mir.wustl.edu](mailto:lapis@mir.wustl.edu),  
[truth@triumf.ca](mailto:truth@triumf.ca), [schmor@aapsinc.com](mailto:schmor@aapsinc.com)

There is a growing need for the production of radioisotopes for both diagnostic and therapeutic medical applications. Recent <sup>99</sup>Mo supply disruptions have highlighted the need for alternate methods of commercial production. Advanced Applied Physics Solutions (AAPS; [www.aapsinc.com](http://www.aapsinc.com)) at the TRIUMF ([www.triumf.ca](http://www.triumf.ca)) national laboratory is actively developing an approach utilizing ion source technology. Neutron-rich radioisotopes can be produced using (n,γ) or (γ,n) reactions. Unfortunately, the resultant specific activity (radioactivity/gram) is typically very low due to the high ratio of target material of the same element in the sample. The only method to effectively remove isotopic impurity is electro-magnetic (EM) mass spectroscopy, and this is the goal of the MoRe Isotopes Project for such key radioisotopes as <sup>99</sup>Mo, <sup>153</sup>Sm, <sup>177</sup>Lu, and <sup>186</sup>Re. A key component of the EM separation apparatus is the ion source. An ion source test facility (ISTF) has been constructed at TRIUMF to develop high-intensity, high-efficiency, reliable ion sources for the purification of a range of commercially desirable radioactive isotopes, particularly those used in nuclear medicine. Difference ion sources have been and will be studied to explore the optimal system for the mass separation of the radioisotopes of interest. Present results include beams with a current density >35 mA/cm<sup>2</sup>, and a Mo<sup>+</sup> beam intensity of ~8 mA. A review of the program, the ISTF and the ion sources being developed will be presented along with the status of the plans to produce a Mo<sup>+</sup> beam with intensities of the order of 100 mA.

Радиоизотопные установки, опыт которых  
может быть использован

Изотопная установка на ускорителе в Троицке. Линейный ускоритель, отведенный пучок, энергия протонов до 150 МэВ, ток 100мкА.

*Б.Л. Жуйков, ИЯИ РАН*





Установка АРРОНАКС (Нант, Франция). Циклотрон, энергия протонов 70 МэВ, ток до 500 мкА. Изготовитель - фирма ИВА (Бельгия)





**Subject:** RE:

**From:** "Boris Zhuikov" [bz@inr.ru](mailto:bz@inr.ru)

**Date:**

Tue, October 4, 2011 5:29 pm

**To:** [vnp@pnpi.spb.ru](mailto:vnp@pnpi.spb.ru)

**Priority:** Normal

Глубокоуважаемый Владимир Николаевич!

IBA - очень известная бельгийская фирма,

которая делает в основном циклотроны низких энергий - 19 и 30 МэВ.

Я там был и сейчас контактируем. Они также делают мишенные устройства для таких циклотронов.

Впервые они построили циклотрон для больших энергий ARRONAX.

Что касается мишенных устройств для средних и высоких энергий высокой интенсивности, то они здесь специалистами не являются, пока ни одно такое устройство не работает.

Концепция для ARRONAX - такая же что и для низких энергий - голый ионопровод с пневмопочтой без защиты - неудачный подход для более высоких энергий.

Мишенную станцию на высокоинтенсивном пучке они не разработали.

Поэтому ARRONAX заключил контракт с нами,

чтобы мы сделали как надо исходя из данного подхода IBA. Получится или нет исправить и сделать, чтобы все работало как надо? - Посмотрим, пока работаем. Есть сомнения.

Съездите еще в Южную Африку в iThemba, посмотрите как у них сделано.

Б. Жуйков Boris L. Zhuikov, Dr. Sci. Head of Laboratory of Radioisotope

Complex Institute for Nuclear Research of Russian Academy of

Sciences 60th October Anniversary Prospect, 7a, Moscow,

117312, RUSSIA Telephone: +7-496-7510185, +7-903-7977871 Fax:

+7-496-7510711

Система снятия и постановки мишени установки Ithemba  
Южная Африка, Кейптаун. Циклотрон, энергия протонов до 200 МэВ, ток 100 мкА



RADIONUC LIDE	HALF- LIFE (days/years)	NUCLEAR REACTION	PRODUCT
$^{82}\text{Sr}$	25 days	$\text{Rb}(p,xn)^{82}\text{Sr}$	Produced as a radionuclide
$^{68}\text{Ge}$	271 days	$^{69}\text{Ga}(p,2n)^{68}\text{Ge}$	Produced as a radionuclide
$^{88}\text{Y}$	106.6 days	$\text{Sr}(p,xn)^{88}\text{Y}$	Produced as a radionuclide
$^{109}\text{Cd}$	453 days	$\text{Ag}(p,xn)^{109}\text{Cd}$	Produced as a radionuclide
$^{22}\text{Na}$	2.602 years	$\text{Mg}(p,n)^{22}\text{Na}$	Produced as a radionuclide

## Система транспортировки на установке ISOLDE

Протонный пучок до 3-ех мкА, энергия 1.4 ГэВ. По выделяемой в мишени активности и потоку вторичных нейтронов сравнимо с РИЦ-80.

Для снятия и транспортировки используемых мишеней используется система двух роботов, работающих на два масс-сепаратора.

Привет Володя!

Информация о стоимости робота в письме Ричарда. Он сказал, что для замены старых роботов на новые они пришли к выводу, что движение по рельсу подвешенному к потолку оптимально. Как альтернатива рассматривались свободно движущиеся системы не привязанные к рельсам, но с ними нет гарантий на работу в радиоактивном окружении. Удачи!  
Валентин

From: Richard Catherall Sent: 08 July 2011 15:27 To: Valentine Fedosseev Subject: robots Hi Valentine,

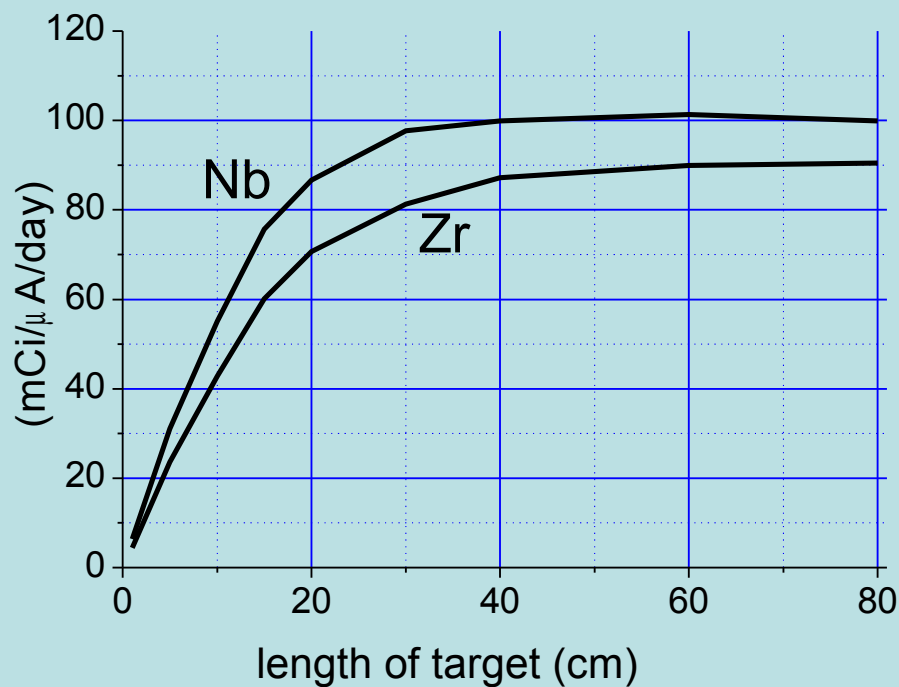
Here is a very rough estimate of the future robot costs for ISOLDE **Robot Kuka with 5 metres of linear axis** 96000Euros Training by Kuka 8000 Euros (we want to learn how to program it ourselves) Nuclearization (motors, cables and electronic cards) 75000Euros (we requested further information on this because we find it quite expensive) Metallic cable conveyor and 65metres of cable 23000Euros Giving a total of **202000Euros**. As I said, this is a very approximate estimate and an official price enquiry will go out soon but it will give you an idea of the costs. Kuka have the added advantage of supplying both the robot arm and the 7th axis making them very compatible. Another option we have asked for is the "safe" robot meaning that it does not force and it can be recovered quite easily.  
Cheers Richard

## Выводы по первой части доклада

- Для получения медицинских радионуклидов на комплексе РИЦ-80 с его планируемыми рабочими параметрами ( $E_p = 80$  МэВ,  $I_p \geq 100$  мкА) необходимы горячие камеры
- Варианты транспортировки:
  1. Рельсовые каретки (Ithemba)
  2. Роботосистема (ISOLDE)
  3. Пневмопочта (на такую мощность не существует)
- Для р/х получения  $^{82}\text{Sr}$  при планируемых рабочих параметрах Ц-80 предпочтительней использование в качестве мишени металлического рубидия, т.к. его теплопроводность в  $\sim 10$  выше соли  $\text{RbCl}$
- Для каждого радионуклида необходимо разрабатывать свою мишень и свой цикл выделения

**Результаты первых  
экспериментов по получению  
генераторного изотопа  $^{82}\text{Sr}$  и  
других медицинских  
радионуклидов на  
синхроциклотроне ПИЯФ.**

FLUKA calculated  
activity of  $^{82}\text{Sr}$  accumulated during one-day irradiation of Nb and Zr target  
with 1  $\mu\text{A}$  1.0 GeV proton beam (*Расчеты Л.Х. Батиста*)



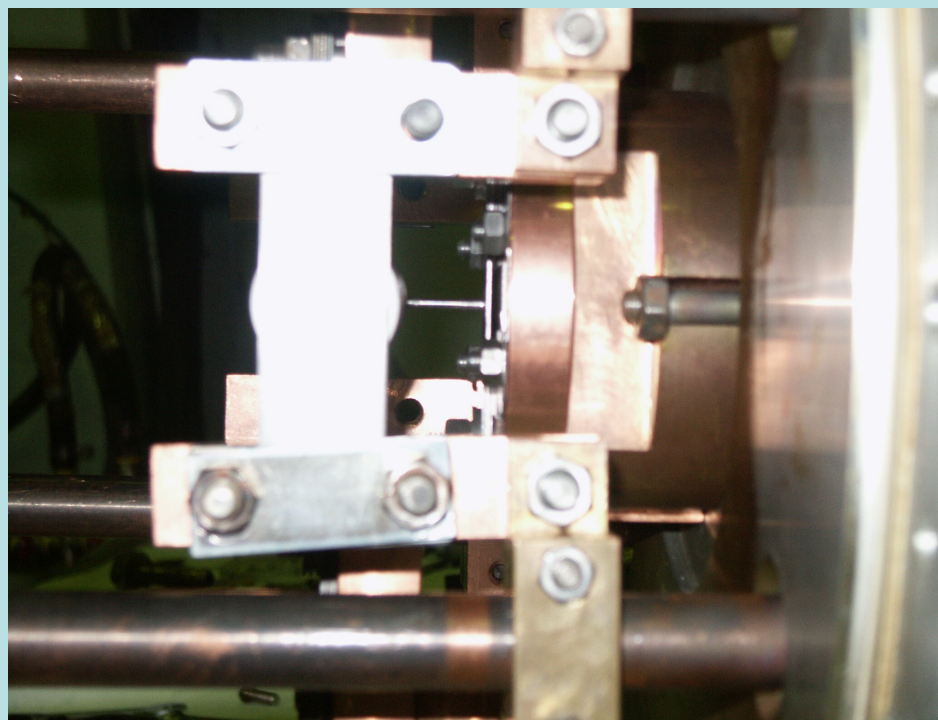
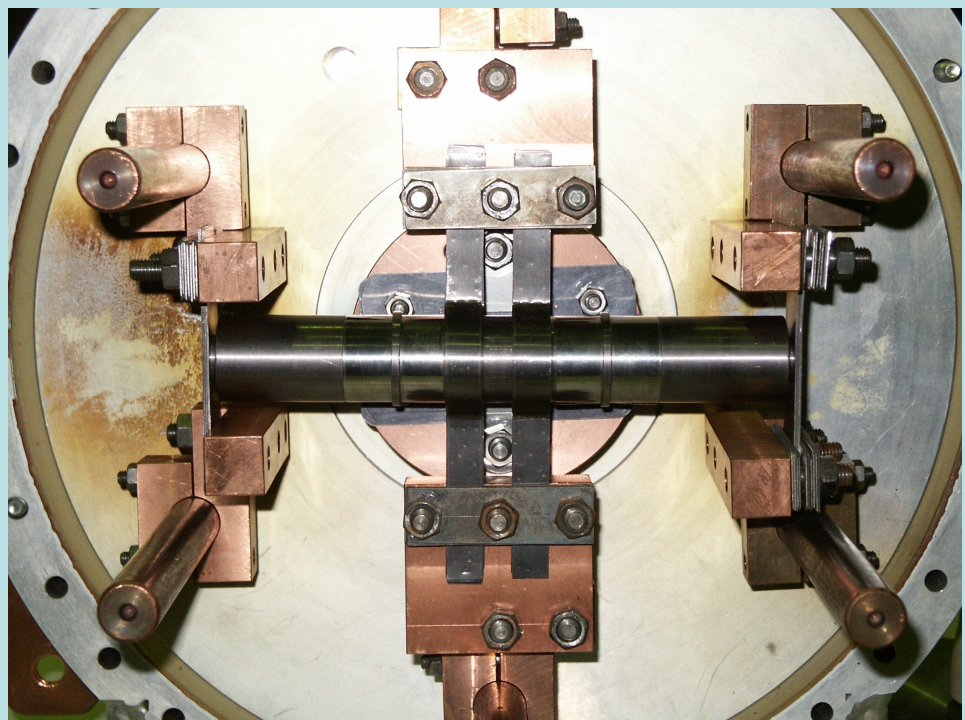
толщина мишени из Nb фольг  $\sim 260\text{г/см}^2$ ;  
длина мишени 30 см;  
диаметр 3 см;  
масса мишени  $\sim 870\text{ г}$ .

За 250 часов облучения на выведенном пучке синхроциклотрона в мишени  $260\text{ г/см}^2$  образуется 1 Кюри  $^{82}\text{Sr}$  -

## Масс-сепараторная мишень для выделения медицинских радионуклидов

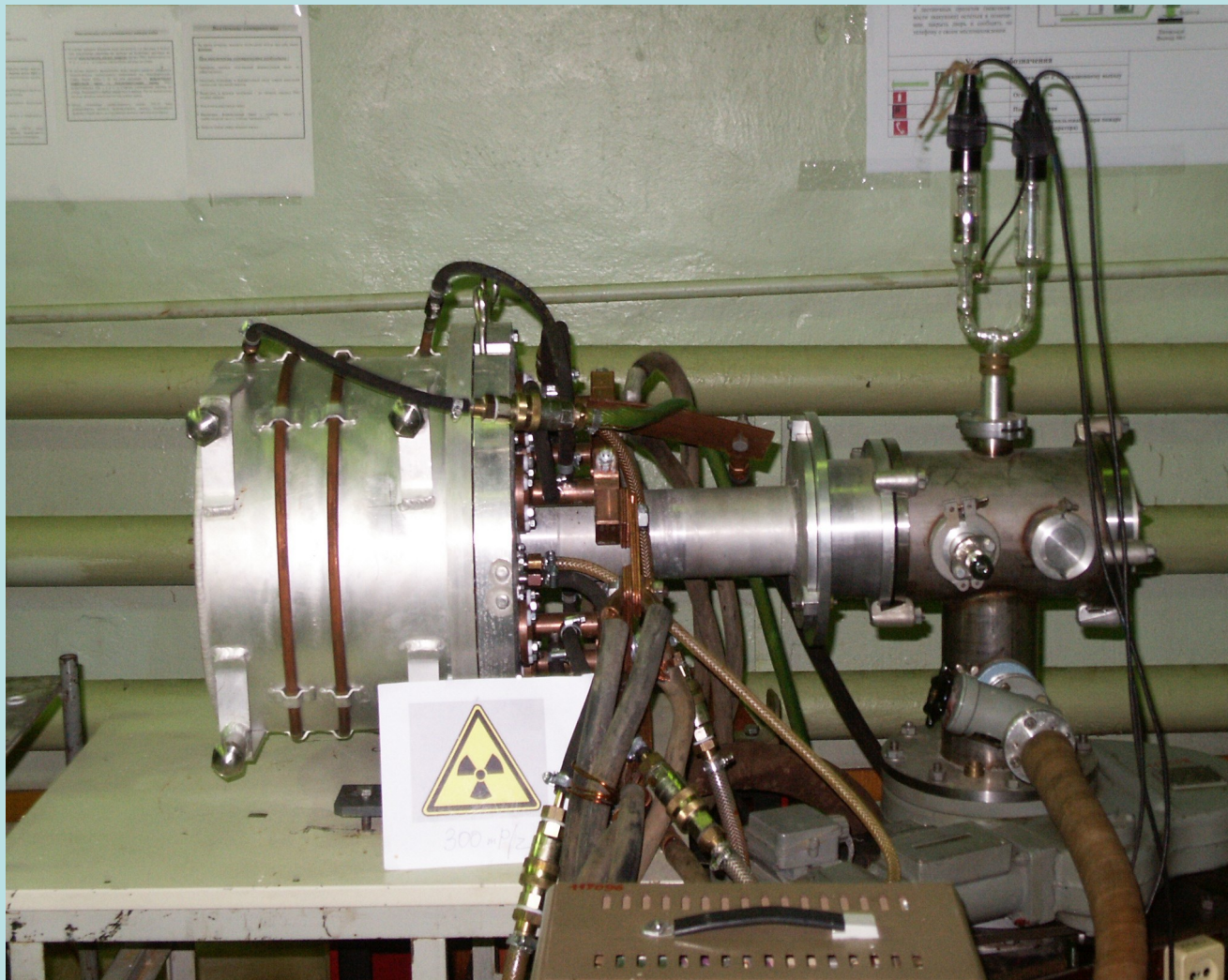
длина мишенного контейнера  
диаметр  
толщина мишени (ниобиевые фольги)

20 см;  
3 см;  
16 г/см<sup>2</sup>





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



Температура мишенного вещества:

до 2500 °C

Выделяемая на мишени мощность:

до 9 кВт

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



## Танталовая фольга, используемая в качестве коллектора

Танталовая фольга-коллектор с  
высаженным источником  
 $^{82}\text{Sr}$



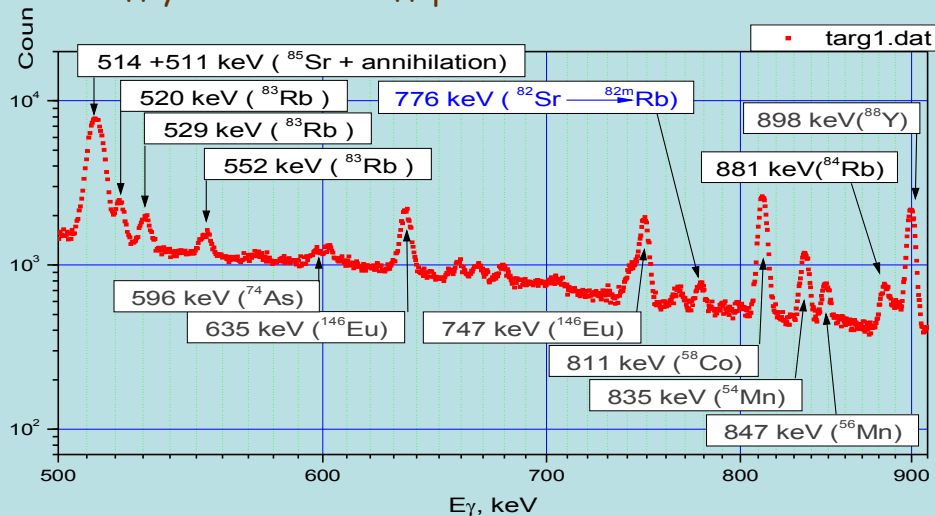
Танталова фольга коллектор после  
смыывания высаженного источника  
азотной кислотой

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

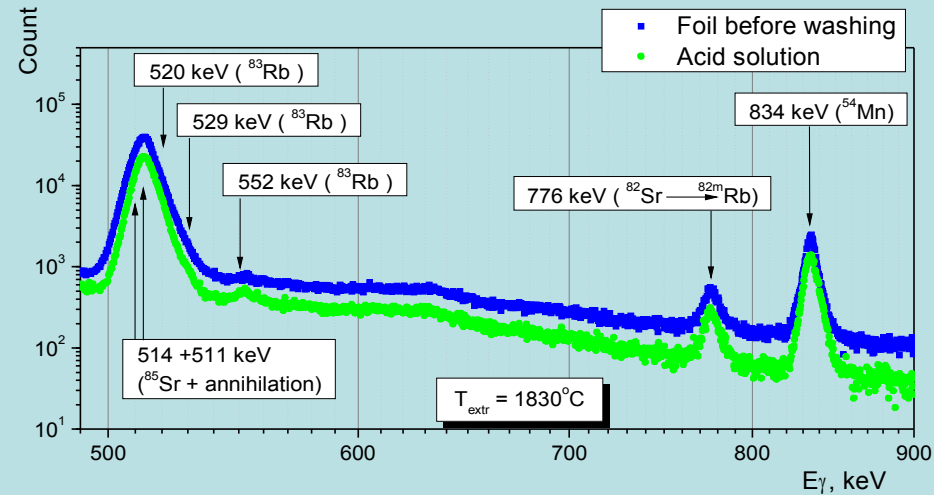
Более **90 %** активности сосредоточено  
в пятне диаметром около **5мм**

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

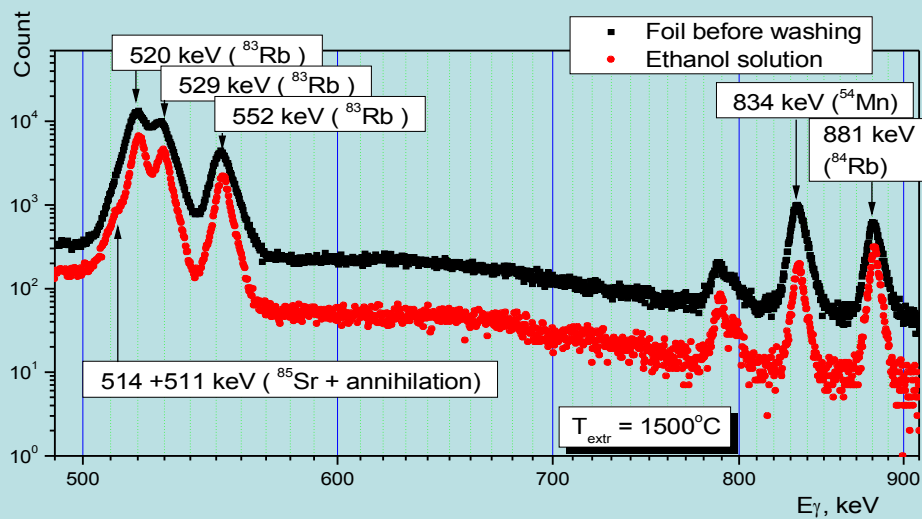
Участок  $\gamma$ -спектра облученной мишени после двухмесячной выдержки



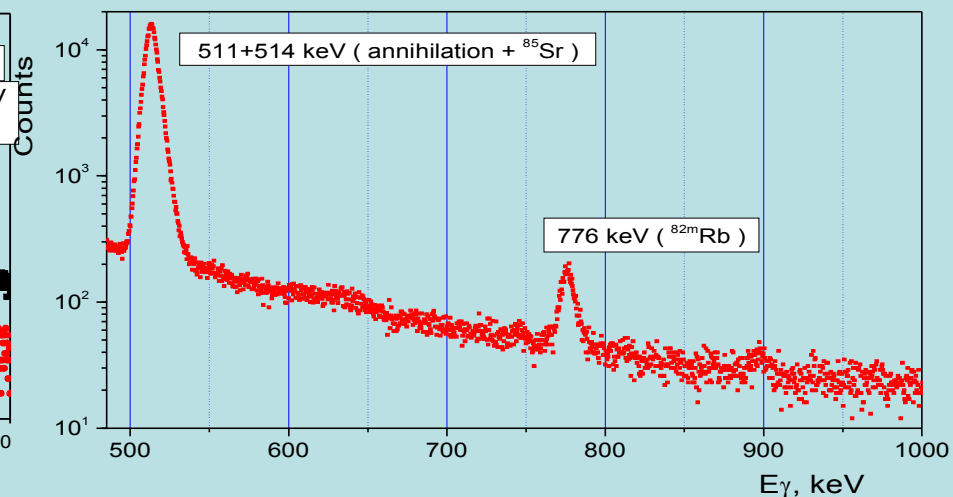
Тот же участок  $\gamma$ -спектра образца высаженного на коллектор при температуре мишени 1800 °C и смывого азотной кислотой



Тот же участок  $\gamma$ -спектра образца высаженного на коллектор при температуре мишени 1500 °C и смывого спиртом



Тот же участок  $\gamma$ -спектра образца высаженного на коллектор при температуре мишени 2000 °C и температуре коллектора около 1000 °C



# Процент смывания с коллекторов различных нуклидов спиртом и азотной кислотой

Температура выделения 1500°C

## Foil 3

Nuclide	Eg, keV	S (before)	S (ethanol)	%
<sup>83</sup> Rb	552	146 201	37 723	25.80
<sup>54</sup> Mn	834	30 668	3 594	11.72
<sup>84</sup> Rb	881	18 321	5 764	31.46

Температура выделения 1830°C

## Foil 6

Nuclide	Eg, keV	S (before)	S (acid)	%
<sup>85</sup> Sr	514,1+511	1 069 737	627 875	58.7%
<sup>82</sup> Sr	776.5	8 259	5 875	71.1%
<sup>54</sup> Mn	834.85	47 544	34 463	72.5%

Выделение Тl из облученного свинца

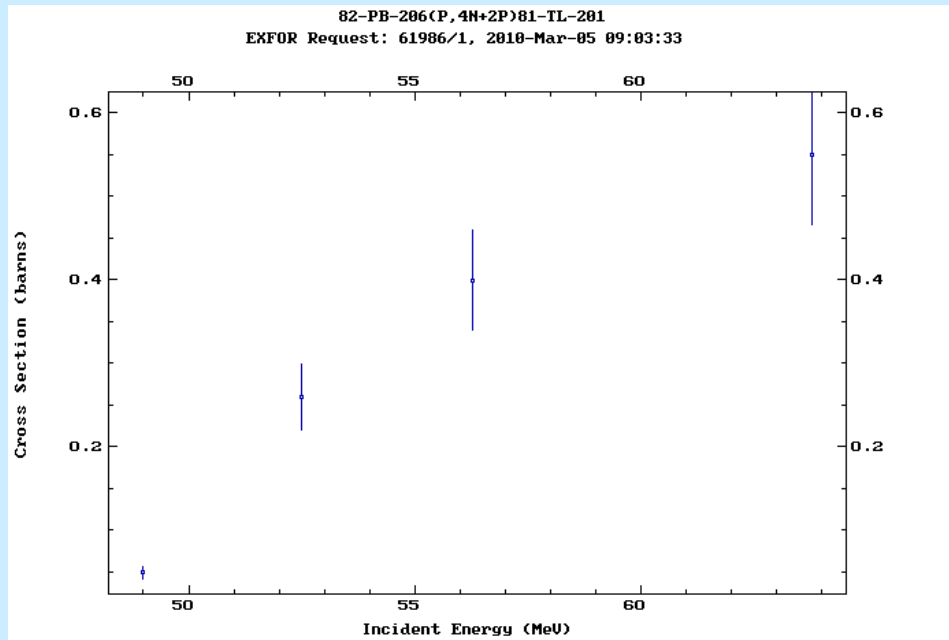
Для ОФЭТ в диагностике заболеваний миокарда используется

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

с близкими выходами получают два соседних изотопа

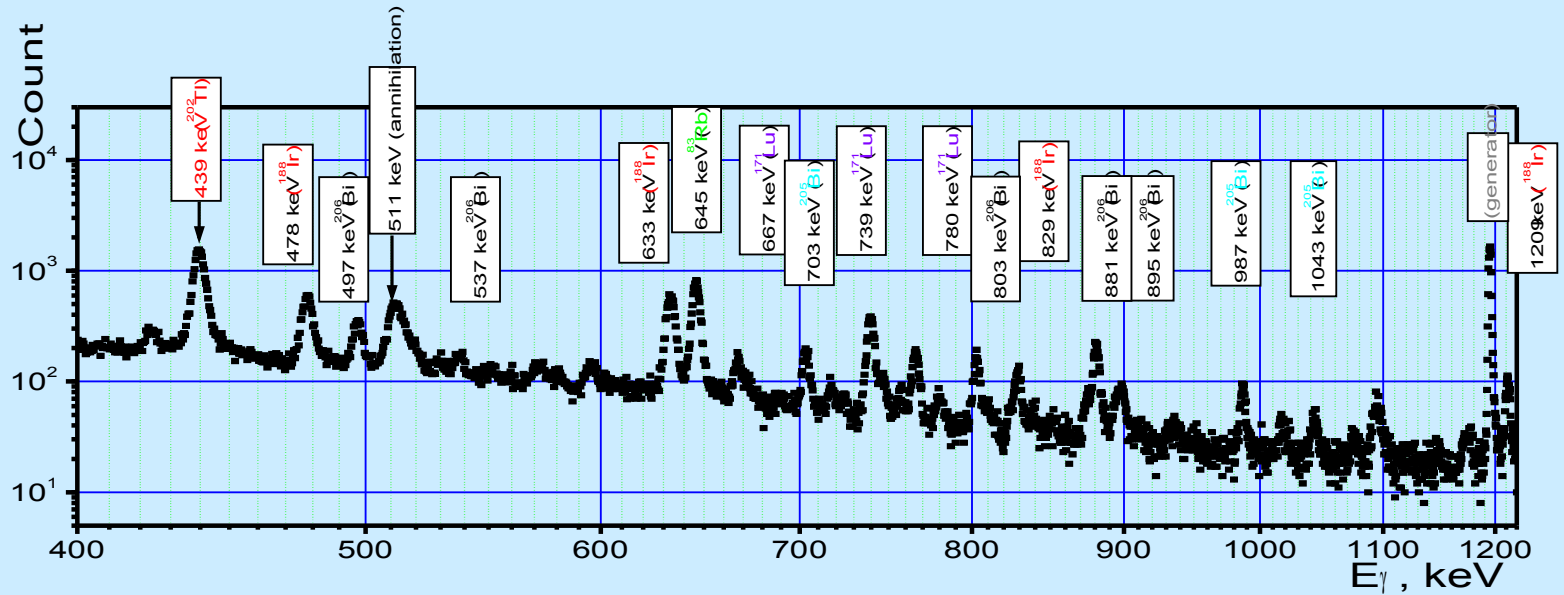
$^{202}\text{Tl}$  ( $T_{1/2}=12,23$  d,  $E_{\gamma}=439; 520$  keV)

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

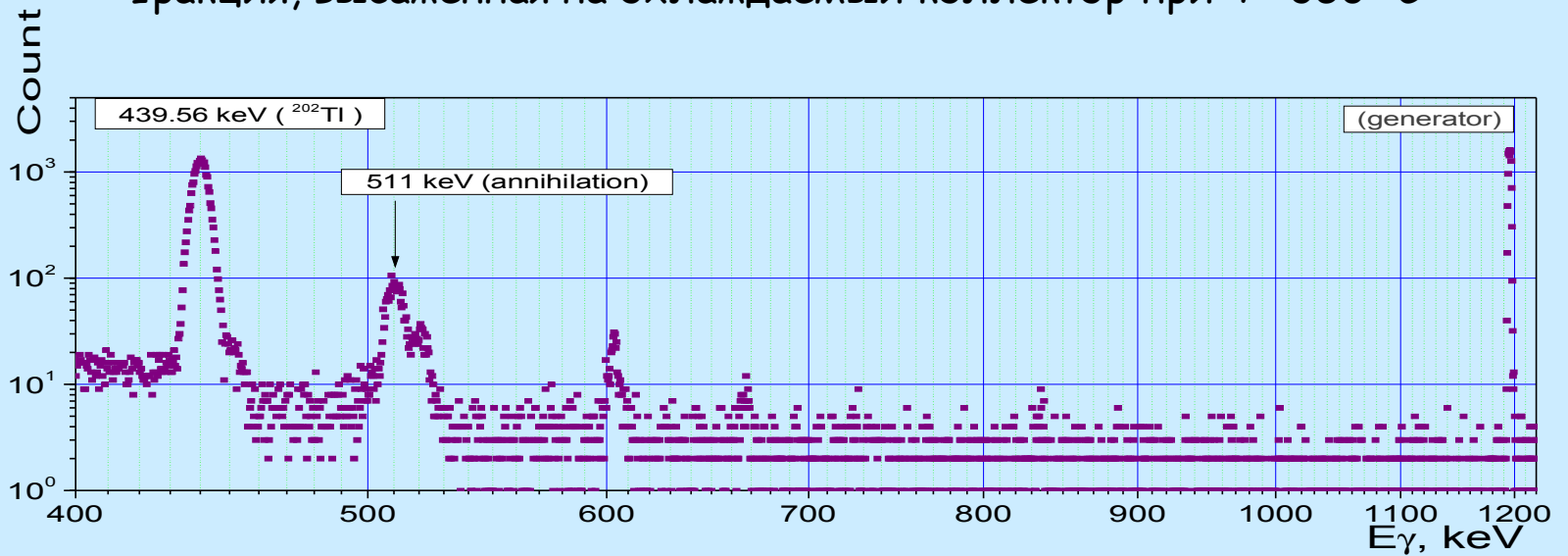


Сечения образования  $^{201}\text{Tl}$  из  $^{206}\text{Pb}$  (24%)

# Спектр облученного свинца:



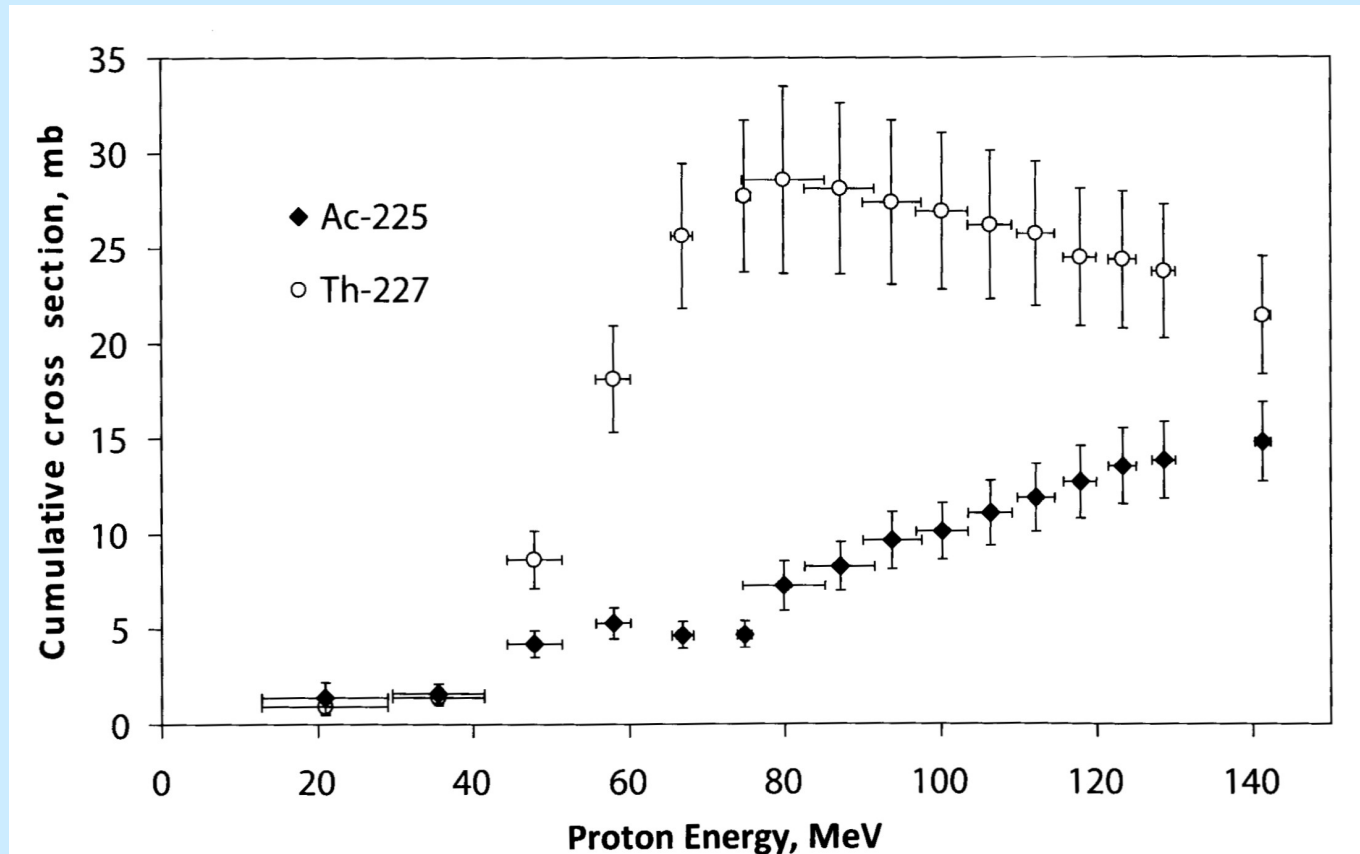
## Фракция, высаженная на охлаждаемый коллектор при $T = 350^\circ\text{C}$



Возможность получения альфа - распадного  
генераторного изотопа  $^{223}\text{Ra}$

$^{227}\text{Th}(18.7\text{d}) - ^{223}\text{Ra}(11.4\text{d}) - ^{219}\text{Rn}(3.96\text{s}) - ^{215}\text{Po}(1.8\text{ms}) -$   
 $^{211}\text{Pb}(36.1\text{min}) - ^{211}\text{Bi}(2.14\text{min}) - ^{207}\text{Tl}(4.77\text{min}) - ^{207}\text{Pb}(\text{стаб})$

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.*)



Необходимо отделять изотопы сателлиты:  $^{224}\text{Ra}(3.66\text{d})$ ,  $^{225}\text{Ra}(14.9\text{d})$



Контракт №494-300-1/2011 с НПО ЛУЧ (РОСАТОМ). В 2011 г. - ПИЯФ получил 2 млн. руб. Деньги пошли на оплату работы ускорителя, надбавки сотрудников ИРИСа и ускорительного отдела, на материалы и командировки. \_

Разработана технология высокоплотных мишеней из монокарбида урана.  
Разработана технология более высокотемпературной по сравнению с монокарбидом урана мишенной композиции на основе уран-циркониевого карбонитрида с температурой плавления выше 3300 К.

Изготовлены для испытаний на протонном генераторе две партии высокоплотных мишеней из монокарбида урана (общее количество мишеней 56 шт.) и одна партия мишеней из уран-циркониевого карбонитрида количеством 37 штук.

Испытания показали эффективность генерации изотопов из предлагаемых мишенных композиций на протонном ускорителе в ПИЯФ.

Контракт на 2012 г с НПО ЛУЧ (РОСАТОМ). Планируется в ПИЯФ 4 млн. руб.\_

1. Разработка технологии повышения эффективности эмиссии изотопов из UC и U,Zr(C,N) и ThC с введением нано добавок.
2. Разработка конструкции и технологии мишеней из изотопа  $^{100}\text{Mo}$  для генерации  $^{99}\text{Mo}$  ( $^{99}\text{Tc}$ ) для демонстрации эффективности генерации изотопов.
3. Разработка конструкции и технологии мишеней на основе изотопов  $^{93}\text{Nb}$ ,  $^{85}\text{Rb}$ ,  $^{89}\text{Y}$  для получения генераторного изотопа  $^{82}\text{Sr}$  для диагностики кардио заболеваний.
4. Разработка расчетно-экспериментальной модели процессов выхода изотопов из мишени.
5. Испытания мишенных сборок из UC и U,Zr(C,N) и ThC с нано добавками и мишеней на основе  $^{100}\text{Mo}$  на протонном ускорителе и определение оптимальных условий наработки изотопов.
6. Определение эффективных применений нарабатываемых изотопов для радиационной медицины

## Стоимость производства $^{82}\text{Sr}$

на циклотроне + м.-сепаратор, или + горячая мишень:

за 5 дней можем получить **1.3 Кюри – 318.500\$** при токе протонов 100 мкА

на циклотроне + радиохимия:

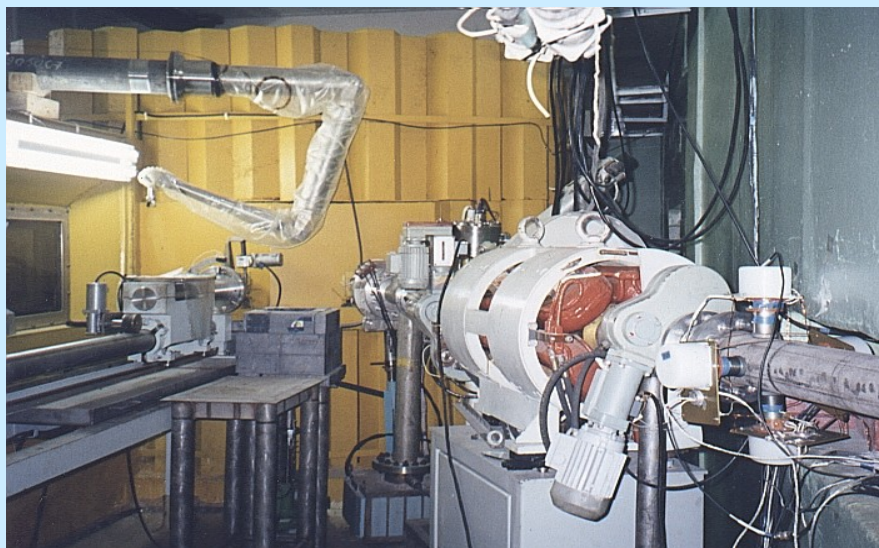
за 5 дней **2.5 Кюри – 612.500\$** при токе протонов 100 мкА (действующая установка в Троицке)

**+ необходимость использовать горячие камеры и дорогостоящие мишени**

*Стоимость работы нашего циклотрона **15000 руб/час (500\$/h) – за 5 дней 60.000\$***

Чтобы разработать, спроектировать, запустить, отладить и сертифицировать такую систему вам понадобится много лет (в Лос-Аламосе заняло 7 лет, стоило 23-30 млн. долл., в Южной АФРИКЕ - примерно так же). В Арронаксе циклотрон построили быстро, но с мишенной системой возятся уже давно и еще долго будут возиться. 1-10 мкА и регулярное производство на 100-150 мкА на таких энергиях - это принципиальная разница.

*Б.Л. Жуйков, ИЯИ РАН.*



### Возможности получения некоторых радионуклидов а установке за одно облучение током 100 нА

Радио-изотопы	Период полураспада	Материал мишени	Диапазон энергии, МэВ	Время облучения, час	Активность произв. продукта, Ки
Sr-82	25,3 дн.	Pb	100 - 40	250	10
Na-22	2,6 лет	Al	150 - 35	250	1
		Mg	150 - 35	250	2
Cd-109	453 дн.	In	140 - 80	250	8
Cu-67	62 час.	Zn	150 - 70	100	30
Pd-103	17 дн.	Ag	150 - 50	100	100
Co-57	271 дн.	Ni	28 - 15	250	1
Ti-44	47,3 лет	Sc	80 - 20	250	0,01
Ge-68	288 дн.	Ga	50 - 20	250	0,5
Tl-201	73 час.	Pb-206	60 - 52	25	6
		Pb	70 - 55	25	4

### Реальные возможности производства некоторых радионуклидов в ИЯИ РАН кюри/год

Радио-изотоп	Возможное производство	Оценка мирового потребления	Область применения
Sr-82	30	30	Кардиологические ПЭТ-исследования. Полная диагностика кровеносной системы.
Pd-103	500	3000	Терапия онкологических заболеваний простаты.
Cu-67	300	3000	Терапия онкологических заболеваний «in vivo».
Ge-68	4	7	Калибровка медицинского ПЭТ – оборудования.
Na-22	20	3	Мёссбауровская спектроскопия для научных целей.
Cd-109	20	10	Рентгено-флуоресцентный анализ материалов и образцов.
Tl-201	200	3000	Кардиодиагностика.
I-123	200	2000	Диагностика болезней почек, щитовидной железы, мозга и т.д.
Sn-117m	20	в будущем	Лечение костных онкологических заболеваний.
Se-72	7	в будущем	Радиоактивная метка ферментов при ПЭТ- исследовании раковых опухолей.

Расчетная активность изотопов производимых в мишени из естественного Rb на пучке протонов энергии 80 МэВ, интенсивностью 100  $\mu$ А. Толщина мишени 4 г/см<sup>2</sup>

<sup>85</sup> Rb	72.2%	Изотоп	T <sub>1/2</sub>	Сечение образования	Скорость образования в мишени, 1/s	Активность после 250 часов облучения, Кюри ( <i>в мишени</i> )
<sup>87</sup> Rb	28.2%	<sup>86</sup> Rb	18.7 дн.	100-200 mb	2.6 x10 <sup>12</sup>	3
		<sup>84</sup> Rb	32.8 дн.	150-250 mb	3.5 x10 <sup>12</sup>	13
		<sup>83</sup> Rb	86.2 дн.	150-300 mb	3.9 x10 <sup>12</sup>	8
		<sup>85</sup> Sr	64.9 дн.	200-300 mb	1.04x10 <sup>13</sup>	12
		<sup>83</sup> Sr	1.35 дн.	100-200 mb	6.9x10 <sup>12</sup>	50
		<sup>82</sup> Sr	25.55 дн.	150 mb	2.6 x10 <sup>12</sup>	15

## Стоимость производства $^{82}\text{Sr}$

На синхроциклотроне с м.-сепаратором, или с горячей мишенью:

На международном рынке стоимость 0.06 Кюри  $^{82}\text{Sr}$  - 14.700\$ (согласно информации из Р.И.)

На синхроциклотроне за 5 дней можем получить 0.4 Кюри – 98.000\$ (при токе протонов 1 мкА)

Стоимость работы ускорителя 20.200 руб/час (673.3\$/h) – за 5 дней 80.800\$



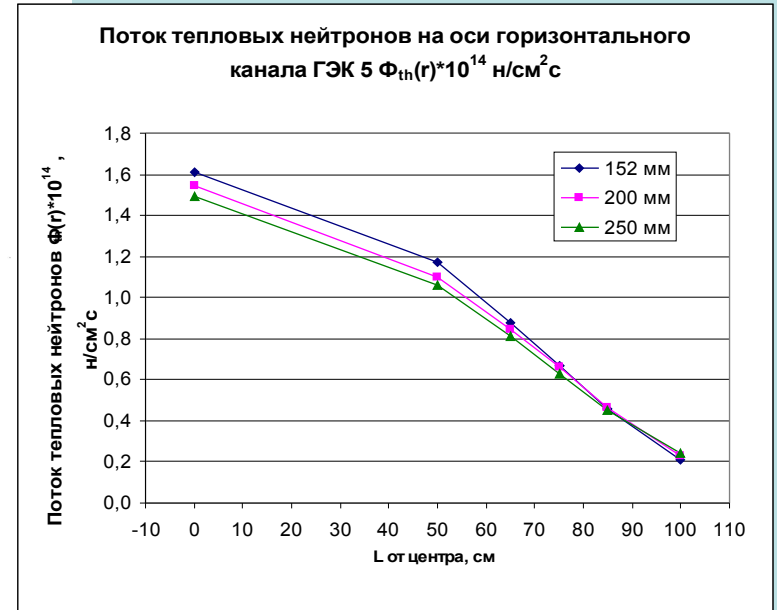
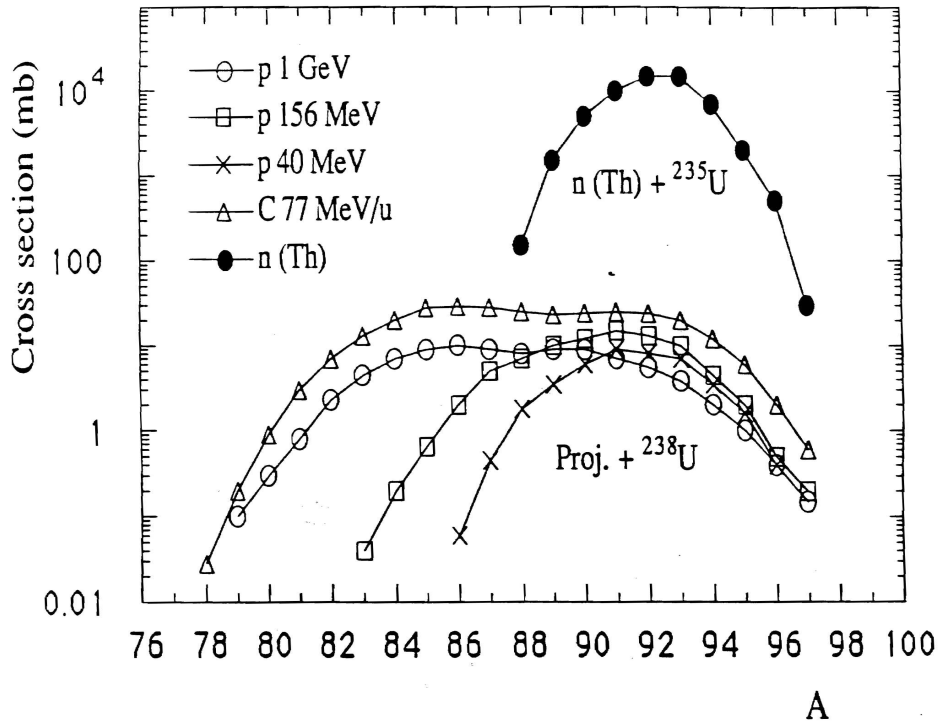
**Расчетная активность изотопов производимых в мишени из  
естественного Rb(\*) на пучке протонов энергии 80 МэВ, интенсивностью 100 мкА.  
Толщина мишени 4 г/см<sup>2</sup>**

<sup>85</sup> Rb	72.2%	Изотоп	T <sub>1/2</sub>	Сечение образования	Скорость образования в мишени, 1/s	Активность после 5 суток облучения, Кюри (в мишени)
<sup>87</sup> Rb	28.2%	<sup>86</sup> Rb	18.7 дн.	100-200 mb	2.6 x10 <sup>12</sup>	2.7
		<sup>84</sup> Rb	32.8 дн.	150-250 mb	3.5 x10 <sup>12</sup>	7
		<sup>83</sup> Rb	86.2 дн.	150-300 mb	3.9 x10 <sup>12</sup>	4
		<sup>85</sup> Sr	64.9 дн.	200-300 mb	4.3x10 <sup>12</sup>	5.7
		<sup>83</sup> Sr	1.35 дн.	100-200 mb	2.6x10 <sup>12</sup>	49
		<sup>82</sup> Sr	25.55 дн.	150 mb	2.6 x10 <sup>12</sup>	7.6

*(\*)Метод используемый в Троицке в течение 10-ти лет. Активность <sup>82</sup>Sr, получаемая на ускорителе в Троицке (140МэВ, 100 мкА) за 10дней облучения – 5 Кюри.*

*Если использовать в качестве материала мишенного контейнера сталь, то в результате реакции <sup>56</sup>Fe (p,n)<sup>56</sup>Co (T<sub>1/2</sub>=77,27 d) за 5 дней в мишенном контейнере образуется активность около 4 Кюри*

ИРИНА: поток нейтронов  $3 \times 10^{13}$  н/см<sup>2</sup>сек  
 масса мишени  $\sim 3 - 4$  г. (Масса и поток могут быть увеличены)  
 Выход <sup>97</sup>Rb ( $T_{1/2}=0.17$ s):  $7.6 \times 10^9$  ат/сек



Синхроциклотрон: ток  $0.3 \mu\text{A} = 0.3 \times 6.2 \times 10^{12} = 1.7 \times 10^{12}$  п/сек  
 масса мишени  $100 \text{ г/см}^2$  (большая масса – медленный выход !)  
 Выход <sup>97</sup>Rb:  $9.4 \times 10^7$  ат/сек

Циклотрон: ток  $100 \mu\text{A} = 100 \times 6.2 \times 10^{12} = 6.2 \times 10^{14}$  п/сек  
 масса мишени  $4 \text{ г/см}^2$   
 Выход <sup>97</sup>Rb:  $1.2 \times 10^9$  ат/сек