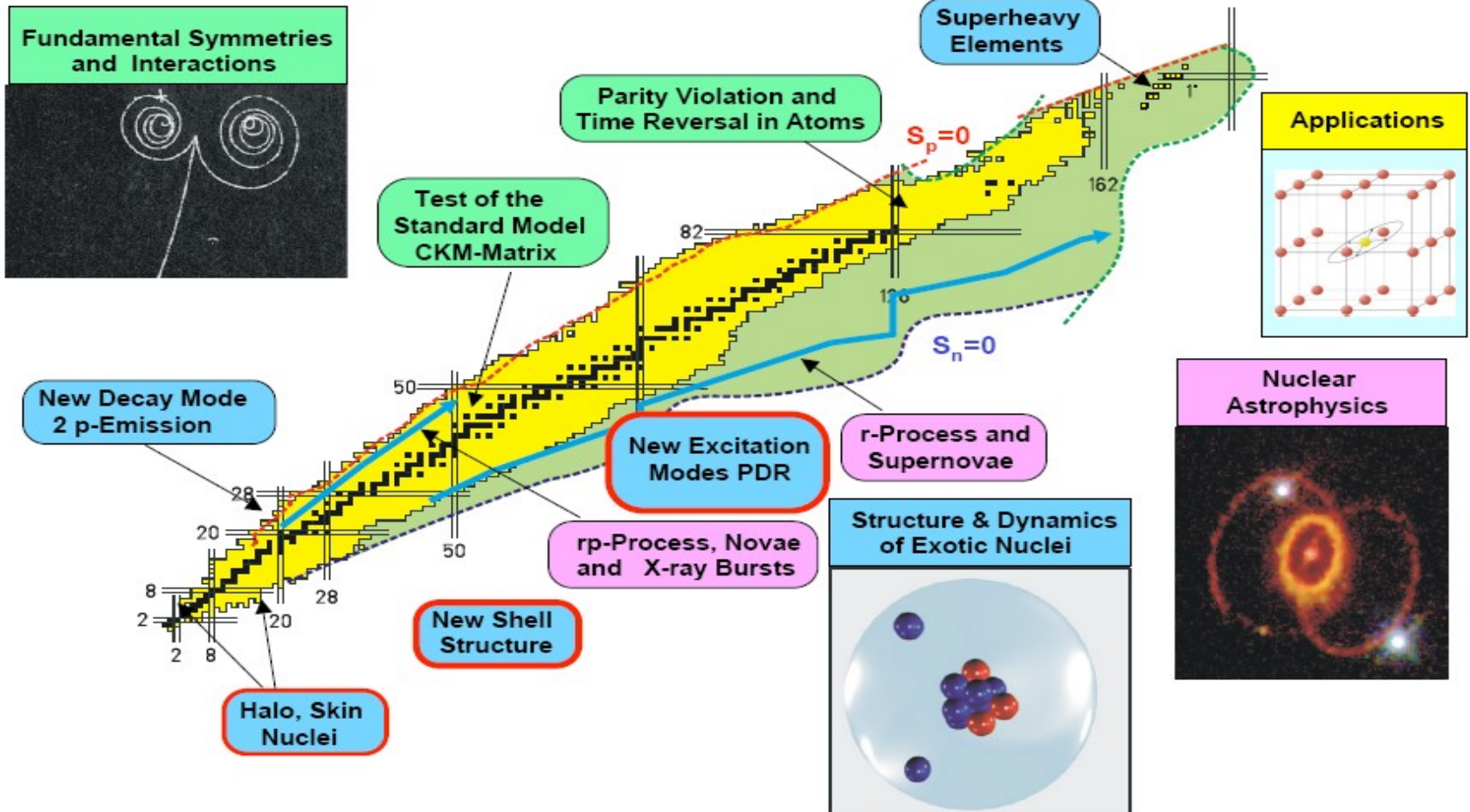


**Сессия ученого Совета ОФВЭ, 27- 30 декабря 2010 г.,**

*Лаборатория короткоживущих ядер  
В. Н. Пантелеев*

**Получение медицинских радионуклидов и предварительный проект  
установки РИЦ - 80 (Радиоактивные изотопы на Циклотроне Ц-80)**

# Physics with Exotic Nuclei



## Основные производители радиоизотопов для медицины в России

Название организации	Город	Энергия частиц	Производимые изотопы
АОЗТ «Циклотрон»	Обнинск	22 МэВ p, $\alpha$	$^{67}\text{Ga}$ , $^{111}\text{In}$ , $^{57}\text{Co}$ , $^{103}\text{Pd}$ , $^{109}\text{Cd}$ , $^{68}\text{Ge}$
РНЦ «Курчатовский институт»	Москва	35 МэВ p, d	$^{123}\text{I}$ , $^{201}\text{Tl}$
НПО «Радиевый институт им. В.Г. Хлопина»	Санкт-Петербург	20 МэВ p, $\alpha$	$^{123}\text{I}$ , $^{124}\text{I}$ , $^{67}\text{Ga}$
ЦНИРРИ	Санкт-Петербург	Циклотрон МГЦ -20	$^{123}\text{I}$
ТГУ	Томск	13 МэВ p	$^{199}\text{Tl}$ , $^{123}\text{I}$
ЦНИИ МО РФ	Тверь	30 МэВ p	$^{67}\text{Ga}$ , $^{57}\text{Co}$

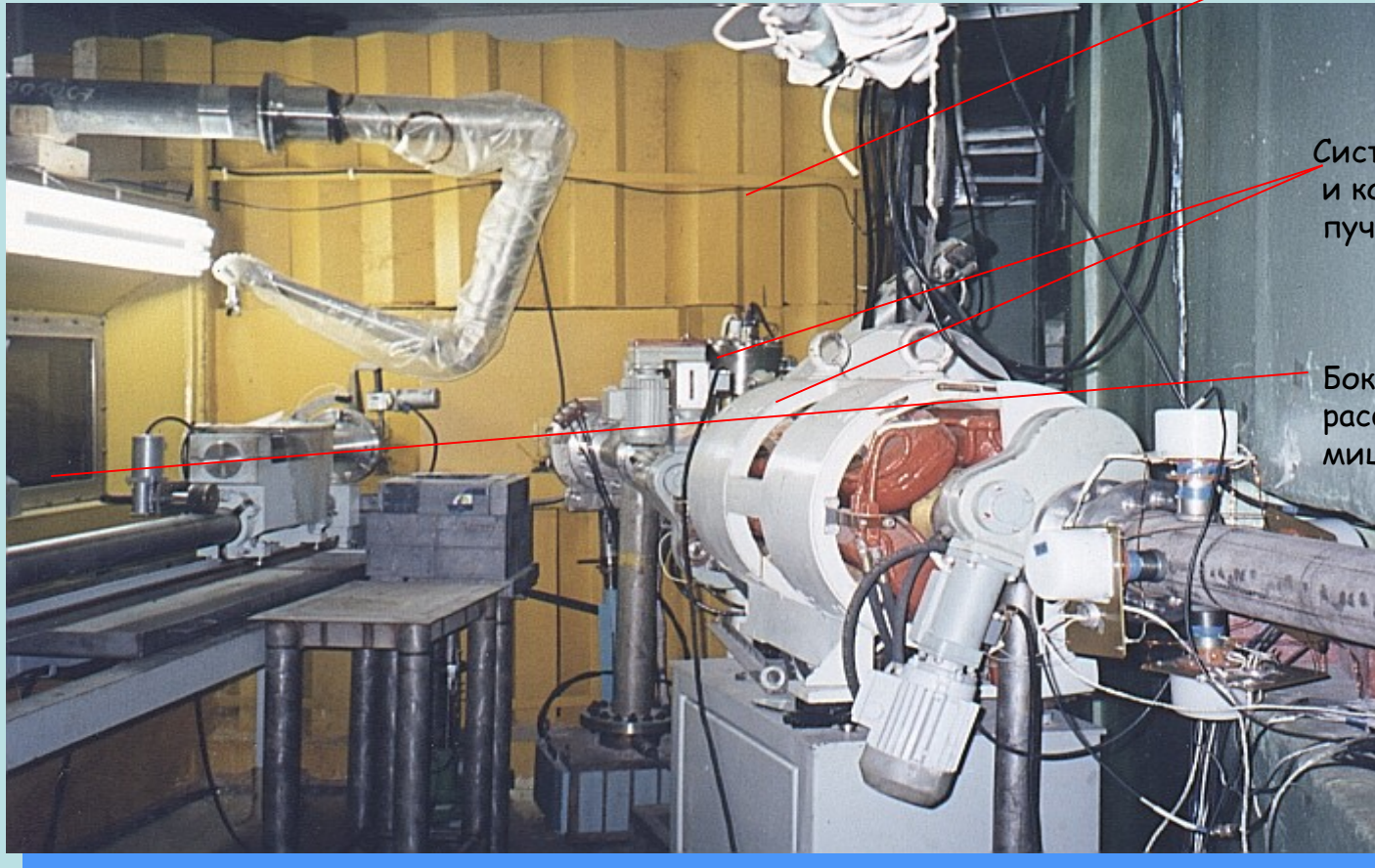
## “Троицкий” радиохимический метод - Б. Л. Жуйков

В ИЯИ РАН (г. Троицк Московской обл.) функционирует линейный ускоритель - Московская мезонная фабрика. На отводе протонного пучка 160 МэВ создана лаборатория с установкой по облучению мишеней током 120 мкА для получения медицинских радионуклидов. Установка интенсивно эксплуатируется, являясь одной из крупнейших в мире по энерговыделению пучка, аккумулярованному на наработку радионуклидов и обеспечивает возможность производства практически всего перечня ускорительных радионуклидов. Существенным недостатком данного метода является тот факт, что эксплуатация ускорителей такого рода чрезвычайно дорога, и стоимость производства медицинских радионуклидов на ней значительно дороже, чем при использовании циклотрона с энергией протонов 75-80 МэВ.

Троицк: 3,5 млн. руб. за 10 дней, - только стоимость потребляемого электричества

Гатчина: циклотрон 15 тыс в час, 3,6 млн. руб. за 10 дней - электричество + эксплуатация

## Установка для получения медицинских радионуклидов на установке В ИЯИ РАН, г. Троицк



Радиационная защита -  
чугунный куб  
весом 40 т

Системы фокусировки  
и контроля протонного  
пучка

Бокс хранения и  
расфасовки облуч.  
мишеней

В ИЯИ нет горячих камер, поэтому облученные мишени после двухнедельной выдержки доставляются для выделения стронция в Лос-Аламос или Обнинск. Активность мишени до **20 Кюри**, активность  $^{89}\text{Sr}$  около **5 Кюри**.

Таблица 3. Возможности наработки некоторых радионуклидов на установке ИЯИ РАН за одно облучение током 100 мкА

Радионуклид	Период полураспада	Мишень	Диапазон энергии протонов, МэВ	Время облучения, ч	Произведенная активность, Ки
<b>Sr-82*(Д)</b>	25,3 дн.	<b>Rb</b>	100-40	250	5
<b>Na-22</b>	2,6 г.	<b>Mg, Al</b>	150-35	250	2
<b>Cd-109</b>	453 дн.	<b>In</b>	150-80	250	2
<b>Se-72*(Д)</b>	8,5 дн.	<b>GaAs</b>	60-45	250	3
<b>Pd-103(Т)</b>	17 дн.	<b>Ag</b>	150-50	250	50
<b>Ge-68*(Д)</b>	288 дн.	<b>Ga, GaNi</b>	50-20	250	0,5
<b>Cu-67(Т)</b>	62 ч	<b>Zn-68</b>	150-70	100	10
<b>Cu-64*(ДТ)</b>	12,7 ч	<b>Zn</b>	150-40	15	15
<b>Sn-117m(ДТ)</b>	14,0 дн.	<b>Sb</b>	150-40	250	3
<b>Ra-223 (Т)</b>	11,4 дн.	<b>Th</b>	150-30	250	7
<b>Ac-225(Т)</b>	10 дн.	<b>Th</b>	150-30	250	1
Co-57	271 дн.	<b>Ni</b>	28-15	250	1
Ti-44	47,3 г.	<b>Sc</b>	60-20	250	0,01
<b>I-123(Д)</b>	13 ч	<b>NaI</b>	80-50	2	0,2
<b>I-121*(Д)</b>	2 ч	<b>NaI</b>	90-50	2	0,2
<b>Tl-201(Д)</b>	73 ч	<b>Bi</b>	60-52	25	2

**Выделено жирным**– радионуклиды, уже получаемые на установке.

Т – радионуклиды для медицинской терапии.

Д – радионуклиды для медицинской диагностики.

\* Радионуклиды, используемые в позитронно-эмиссионной томографии.

**Радионуклиды**, которые наиболее перспективно выделять с помощью высокотемпературных методов.

**Радионуклиды**, которые можно выделять с помощью высокотемпературных методов, однако эти методы не являются предпочтительными.

# Схема производства, транспортировки и применения стронция-82



## Существующие установки для производства радиоизотопов на интенсивном пучке протонов средних энергий

- **Институт ядерных исследований РАН (Троицк)**  
**160 МэВ, 120 мкА**
- **Los Alamos National Laboratory (NM, USA)**  
**100 МэВ, 100-200 мкА**
- **Brookhaven National Laboratory (NY, USA)**  
**200 МэВ, 80 мкА**
- **TRIUMF (Vancouver, Canada)**  
**110 МэВ, 50 мкА**
- **iThemba Laboratory (Cape Town, South Africa)**  
**66 МэВ, 70-... мкА**
- + **ARRONAX, (Nant, France)**  
**70 МэВ, 100-300 мкА**



# Рынок радиоизотопов

## Применение радиоизотопов в медицине

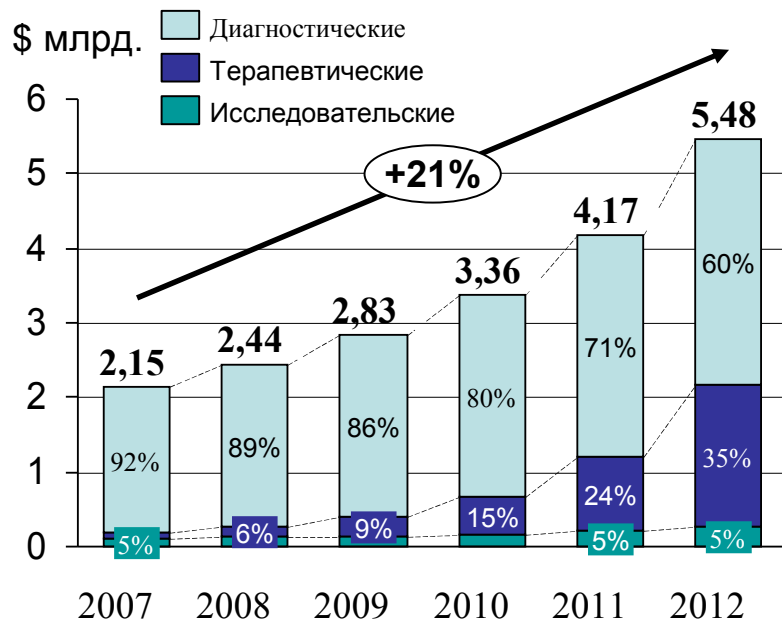
1. Более 80% радиоизотопов применяется для диагностики заболеваний: СPECT и ПЭТ диагностика
2. Радиоизотопы применяются в терапевтических целях, в основном для борьбы с онкологическими заболеваниями
3. Часть изотопов закупается научными центрами и фармацевтическими компаниями для исследования воздействия радиоизотопов на организм и создания новых лекарственных средств

## Спрос на радиоизотопы

Основными драйверами спроса на радиоизотопы являются:

1. Рост онкологических заболеваний в мире
2. Развитие технологий направленного транспорта радионуклидов непосредственно к клеткам – мишеням
3. Распространение способов ранней диагностики заболеваний: SPECT и ПЭТ диагностика

## Мировой рынок медицинских радиоизотопов



## Предложение радиоизотопов

•Существующие мощности: **273 ускорителя** и **54 реактора**, производящих радиоизотопы

•Высокие издержки введения в строй ускорителей, и тем более, реакторов обуславливает **неэластичность предложения радиоизотопов**

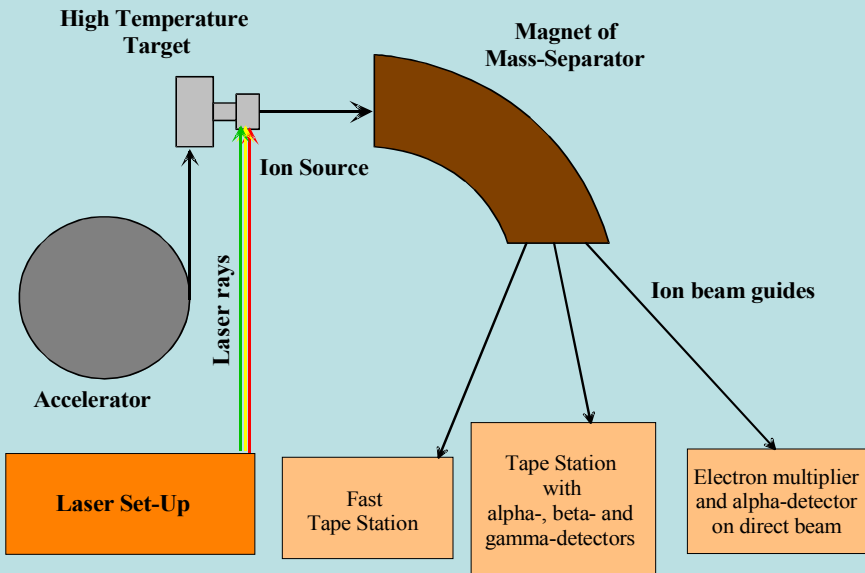
## Дефицит на рынке радиоизотопа

•В 2009 году на рынке радиоизотопа Мо-99m (80% всех радиоизотопов) наблюдался дефицит, обусловленный неплановой остановкой нескольких реакторов

•Более **80% процедур** были отложены на **2-3 недели**

## Масс-сепаратор на пучке циклотрона

Ток протонов до 100  $\mu\text{A}$ , энергия до 80 МэВ.  
Толщина мишени до 4 г/см<sup>2</sup>.



Использование мишеней массой несколько граммов из жидких металлов, фольг тугоплавких металлов, карбида урана позволит получать чистые изотопные пучки радионуклидов для медицинского использования очень широкого круга элементов от Be до Ra.

Изобарическая селективность достигается использованием высокоселективных ионных источников:  
лазерного источника,  
источника на отрицательные ионы,  
источника поверхностной ионизации.

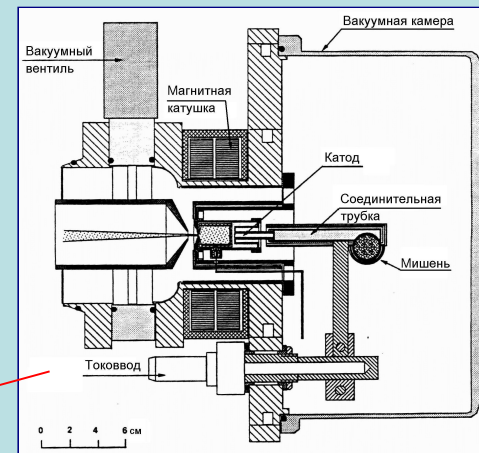
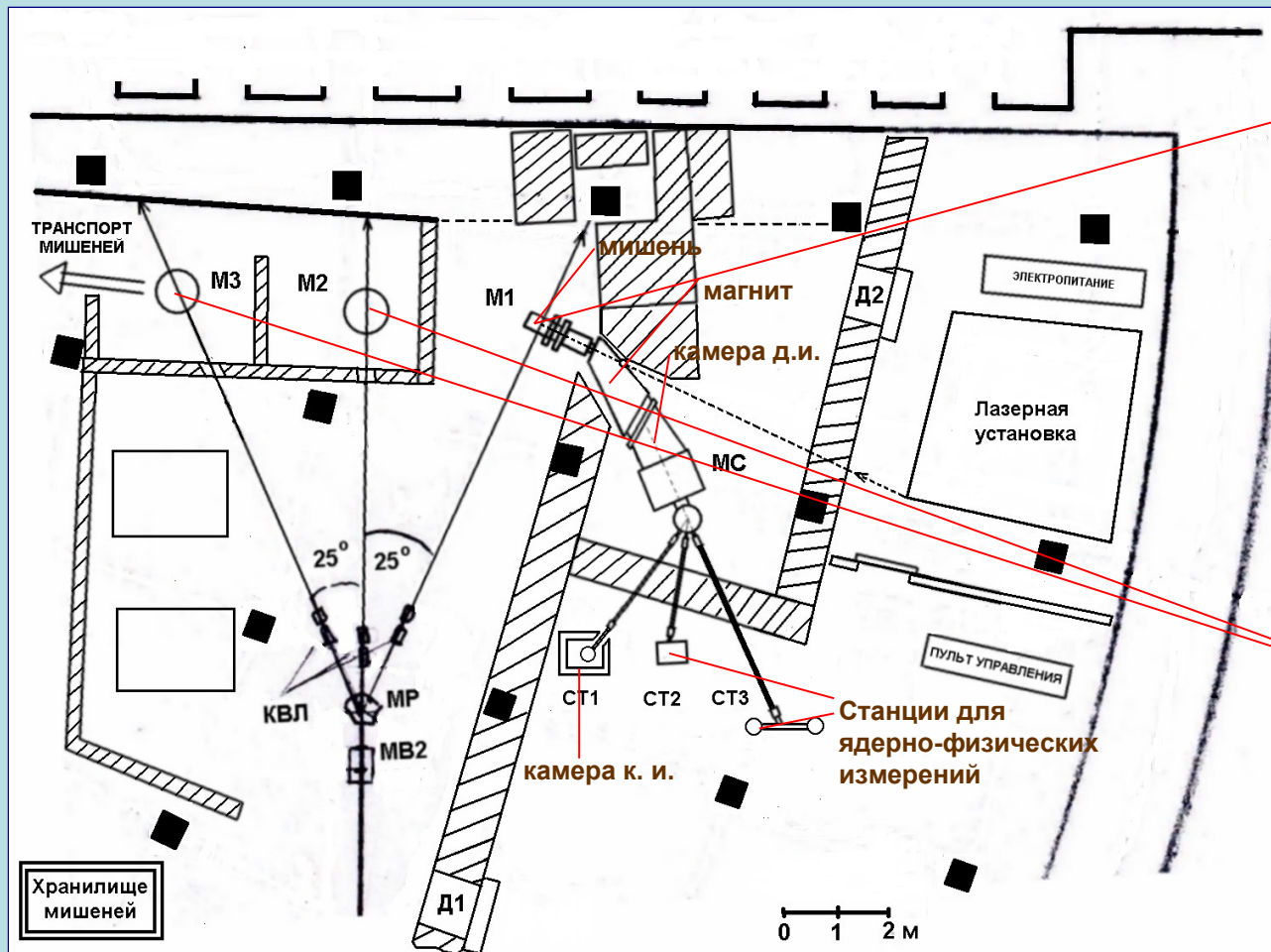
## Синхроциклотрон

Вывод протонного пучка на мишень установки ИРИС



При токе  $I_p = 2 \mu\text{A}$  в ниобиевой мишени масс-сепаратора 200 г/см<sup>2</sup> за 250 часов нарабатывается активность <sup>88</sup>Sr около 3 Кюри.

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

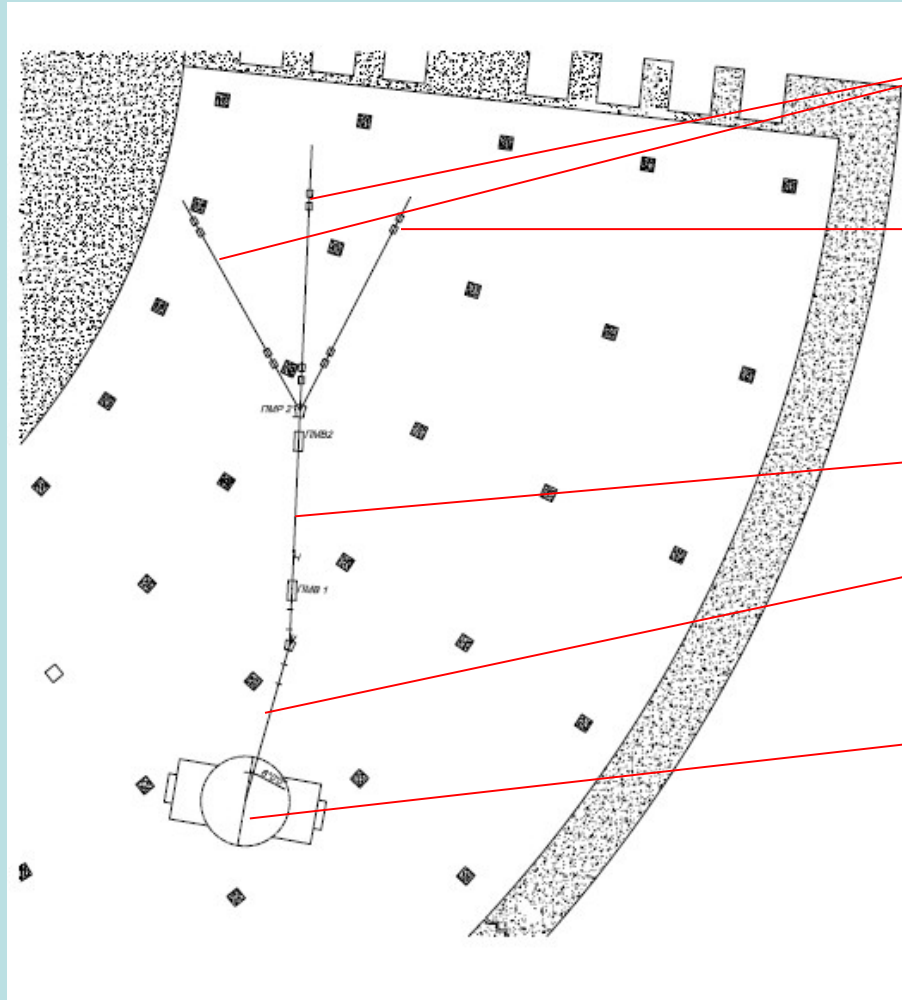


Мишенно-ионное устройство масс-сепаратора

Две радиохимические станции

Установка РИЦ-80 с масс-сепаратором

## Подвал экспериментального зала с новой трассировкой пучков на изотопные мишенные станции



Пучки на р/х мишени

Пучок на м/с мишень

Пучок протонов в подвале  
экспериментального зала

Пучок в экспериментальном  
зале

Циклотрон Ц-80 в  
экспериментальном зале

## Расчетная активность радионуклидов в р/х мишени на РИЦ-80

Изотоп	Период полураспада	Мишень, проц. содерж. изотопа	Реакция, Сечение мбарн	Время облучения, часы	Активность в мишени Кюри, Гатчина	Производимая активность, Гроицк
<sup>57</sup> Co офэт	271.8 дн.	Ni ест.	(p,2p,xn) 450	250	3.8	1
<sup>67</sup> Ga офэт	3.2 6 дн.	<sup>68</sup> Zn 4.1, 18.8	(p,n) (p,2n) 700	25	38	
<sup>68</sup> Ge пэт калибр.	270.8 дн.	Ga ест.	(p,xn) 300	250	2.3	0.5
<sup>82</sup> Sr пэт	25.55 дн.	<sup>85</sup> Rb 72.2	(p,4n) 160	250	8	5
<sup>103</sup> Pd тер	16.99 дн.	<sup>103</sup> Rh 100	(p,n) 700	120	24	50 (из Ag)
<sup>109</sup> Cd офэт	1.27 г.	<sup>109</sup> Ag 48.2	(p,n) 380	250	1	2 (из In)
<sup>111</sup> In офэт	2.8 д.	<sup>111</sup> Cd 12.8 <sup>112</sup> Cd 24.1	(p,n) 750 (p,2n) 950	25	28 36	
<sup>123</sup> I офэт	13.27 ч.	<sup>124</sup> Te 4.8	(p,2n) 1000	5	34	0.5 (мишень NaI)
<sup>124</sup> I пэт	4.17 дн.	<sup>124</sup> Te 4.8 <sup>125</sup> Te 7.1	(p,n) 600 (p,2n) 1000	25	15 24	
<sup>201</sup> Tl офэт	3.04 д.	<sup>203</sup> Tl 29.5	<sup>203</sup> Tl(p,3n) 1300 <sup>201</sup> Pb→ <sup>201</sup> Tl	25	25	2 (из Bi)

Расчеты приведены для толщины мишени 2 г/см<sup>2</sup> для мишеней с естественным содержанием изотопов, и для такой же толщины мишеней с обогащенным содержанием изотопов.

# Сравнение активностей радионуклидов, нарабатываемых на РИЦ-80 на выходе масс-сепаратора и в радиохимической мишени

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
<sup>67</sup> Ga офэт <sup>67</sup> Ga, <sup>72</sup> Ga <sup>70</sup> Ga, <sup>68</sup> Ga, <sup>65</sup> Ga	3.2 дн.	Ge ест	(p;2p,xn) 100	25	1.1 (ε <sub>i</sub> =20%)	38 (из Zn)
<sup>82</sup> Sr пэт	25.55 дн.	Y ест.	(p; 2p,6n) 25	250	1.3 (ε <sub>i</sub> =80%)	8 (из Rb)
<sup>103</sup> Pd тер <sup>103m</sup> Pd	16.99 дн.	Rh ест.	(p,xn) 700	120	0.24 (ε <sub>i</sub> =1%)	24
<sup>109</sup> Cd офэт <sup>107</sup> Cd	1.27 г.	<sup>109</sup> Ag 48.2	(p,n) 380	250	0.1 (ε <sub>i</sub> =10%)	1
<sup>111</sup> In офэт <sup>112m117</sup> In	2.8 д.	Sn ест.	(p;2p,xn) 40	25	1.4 (ε <sub>i</sub> =20%)	28 (из Cd)
<sup>123</sup> I офэт	13.27 ч.	<sup>124</sup> Te 4.8	(p,2n) 1000	5	7 (ε <sub>i</sub> =20%)	34
<sup>124</sup> I пэт+тер <sup>123Ia</sup> <sup>125Ia</sup> <sup>123Ib</sup> I	4.17 дн.	<sup>125</sup> Te 7.1  Te ест	(p,2n) 1000	25	5 (ε <sub>i</sub> =20%)	24
<sup>201</sup> Tl офэт	3.04 дн.	<sup>206</sup> Pb 24.1	(p;2p,xn) 450	25	1.7 (ε <sub>i</sub> =20%)	25 (из <sup>203</sup> Tl)

Расчеты приведены для толщины мишени 2 г/см<sup>2</sup>

Стоимость  $^{82}\text{Sr}$  для Sr/Rb генератора: **14.700\$ за 0.06 Кюри**

**на циклотроне + м.-сепаратор:**

*за 10 суток можем получить **1.25 Кюри – 306.250\$ при токе протонов 100 мкА***

**на циклотроне + троцкий метод:**

*За 10 суток можем получить **7.5 Кюри → 4 Кюри – 980.000\$ при токе протонов 100 мкА**  
+ **необходимость использовать горячие камеры и дорогостоящие мишени***

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

При работе с масс-сепаратором, одновременно с накоплением  $^{82}\text{Sr}$  в отдельные коллекторы может имплантироваться  $^{81}\text{Rb}$  для рубидиево-криптонового генератора, а также другие короткоживущие изотопы Rb.

Создание установки РИЦ-80 позволит получать широкий спектр радионуклидов для их использования в медицине как для диагностики, так и для лечения различных заболеваний. Активность производимых нуклидов при использовании реакции  $(p, xn)$  может достигать нескольких десятков Кюри



Исходя из проведенных расчетов и данных предварительных экспериментов, использование **масс-сепаратора** с соответствующими мишенно-ионными устройствами в линию с циклотроном Ц-80

- позволит получать **сверхчистые пучки** медицинских изотопов широкого круга элементов
- одновременно могут накапливаться несколько разделенных радионуклидов
- глубина имплантации несколько десятков ангстрем позволяет использовать очень тонкие органические подложки, что значительно упрощает приготовление фарм-препаратов
- метод имплантации радиоактивных ионов позволяет получать уникальные генераторы радиоактивных благородных газов
- мишень используется многократно и не требует восстановления
- **использование мишени из карбида урана-238 высокой плотности даст возможность получать  $\beta^-$  - распадчики для терапии.**

Получаемые данным методом активности разделенных радиоизотопов могут достигать нескольких Кюри