

*Сессия Уч. Сов. ОФВЭ, 22 - 24 декабря 2009 г.,
Лаборатория короткоживущих ядер*

В. Н. Пантелеев

**Исследование нейтронно-избыточных
и нейтронно-дефицитных ядер,
удаленных от полосы β -стабильности, 2009 г**

Состав Лаборатории короткоживущих ядер

- Н. сотрудников – 12
 - Инженеров – 3
 - Техников – 1
 - Механиков – 2
 - Лаборантов – 1
- всего: 19 сотрудников
из них: 1 н. сотр. на 1/2 ставки,
1 н. сотр на контракте,
1 инж.-химик на 1/2 ставки.
-

Заявка

на формирование тематики и объемов финансирования работ на 2010-2014 годы в рамках научной программы НИЦ «Курчатовский институт» от Лаборатории короткоживущих ядер ОФВЭ ПИЯф

Приоритетное направление:

Фундаментальные исследования в области ядерной физики

Тип проекта:

Проблемно-ориентированные поисковые исследования

Тема проекта:

Получение и исследование ядер, удаленных от полосы бета стабильности на установке ИРИС.

Цели проекта:

Исследование нейтронно-дефицитных и нейтронно-избыточных ядер, удаленных от полосы бета стабильности на установке ИРИС. Разработка новых высокоэффективных, изобарно-селективных мишенных устройств и ионных источников.

Руководитель проекта:

*к.ф.-м.н. Пантелеев Владимир Николаевич,
тел. 8-813-71-462-08, e-mail vnp@pnpi.spb.ru,*

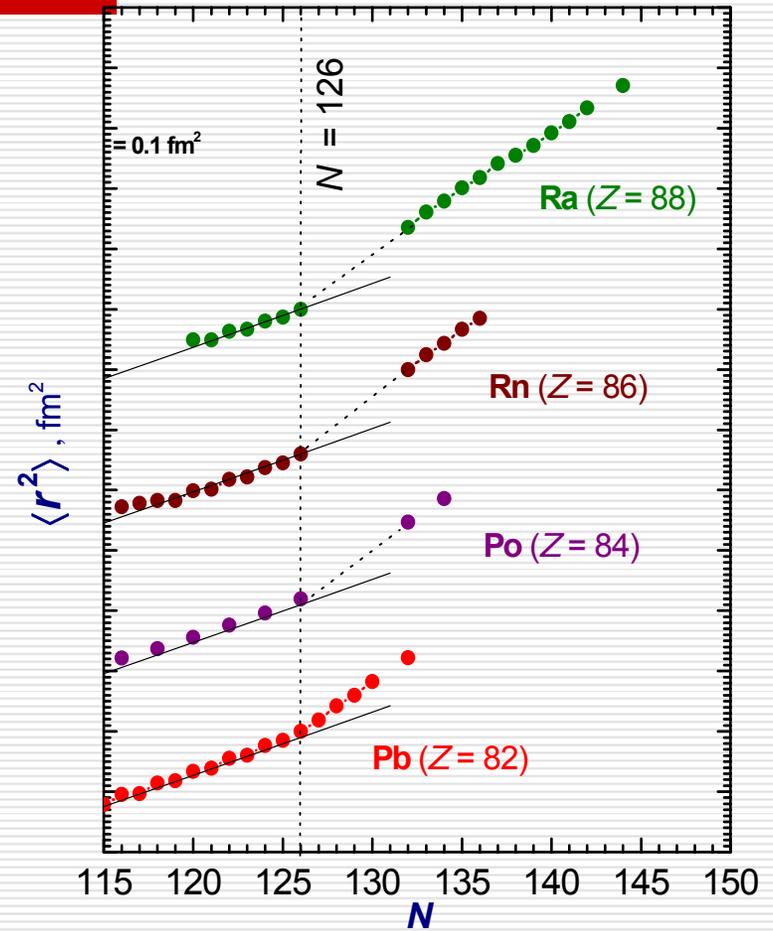
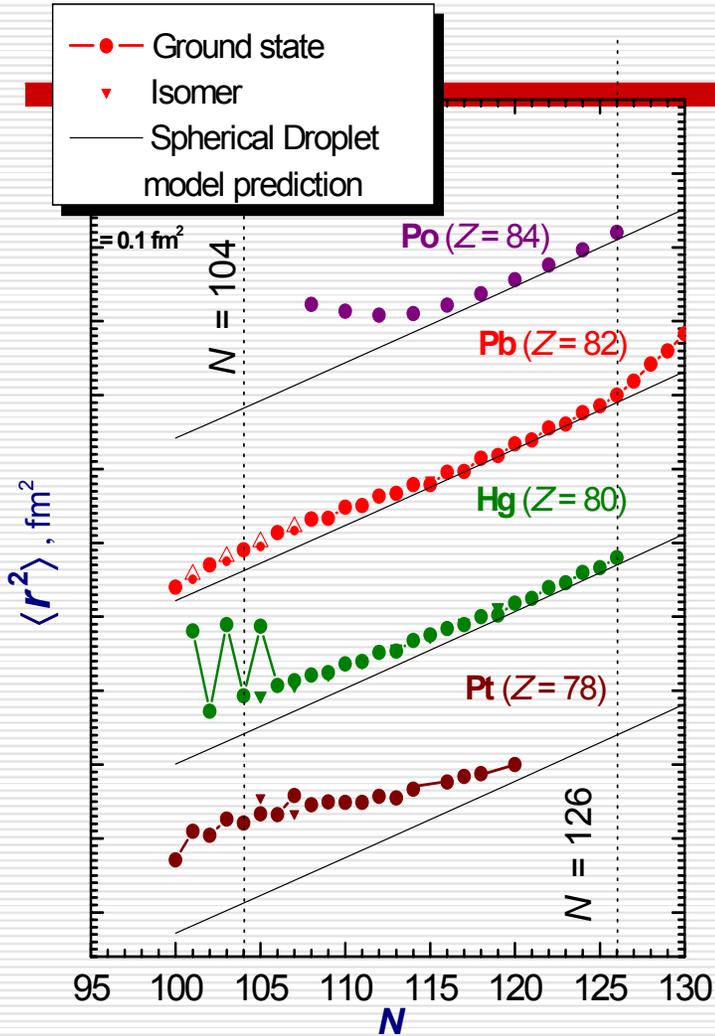
1. Обоснование необходимости выполнения данного проекта

1.1. Актуальность проекта

- **1. Исследование нейтронно-дефицитных и нейтронно-избыточных ядер вблизи границы протонной и нейтронной устойчивости с использованием работающих “в-линию” с ускорителями масс-сепараторов (так называемых ISOL (Isotope Separator On-line) установок) является одним из главных направлений изучения ядерной материи. Одной из основных, фундаментальных характеристик ядерной материи является зарядовый радиус ядра. Систематические исследования среднеквадратичных зарядовых радиусов для длинных изотопных цепочек открывают уникальную возможность для изучения основных свойств ядра при значительном дефиците или избытке числа нейтронов. Полученные величины изменения зарядовых радиусов позволяют делать выводы о форме ядра и используются для проверки справедливости современных ядерных моделей.**
- **Для нейтронно-дефицитных ядер вблизи замкнутых протонных и нейтронных оболочек $Z=50$, 82 и $N=82$, 126 взаимодействие между одно-частичными и много-частичными состояниями конечного числа сильно-взаимодействующих фермионов приводит к появлению состояний различной формы при малых энергиях возбуждения. Данный феномен “сосуществования форм” является предметом интенсивного экспериментального и теоретического изучения.**
- **Предсказанный теорией эффект не сохранения магических чисел в ядре при уходе от полосы бета-стабильности также может быть экспериментально проверен путем измерения зарядовых радиусов для цепочек крайне удаленных ядер.**
- **Исследование формы ядер изотопов Ge, Ga, Zn, Cu и Ni (окрестность оболочки с магическим числом протонов $Z=28$ и магическим числом нейтронов $N=50$) позволит изучить влияние на форму ядра оболочечного эффекта для легких ядер.**
- **Кроме исследований по фундаментальной ядерной физике, радиоактивные пучки, получаемые на ISOL установках широко используются в исследованиях по физике твердого тела, а также в современной медицине для диагностики и лечения различных заболеваний. Поэтому разработка новых высокоселективных, эффективных мишенно-ионных устройств для ISOL систем является одной из главных задач в лабораториях, использующих подобные системы.**

Изменения зарядовых радиусов ядер в районе свинца ($Z=84$), измеренные на ISOLDE.

Pb и Po измерялись методом лазерной спектроскопии в лазерном ионном источнике впервые предложенном и осуществленном на ИРИСе (Г. Д. Алхазов, А. Е. Барзах, Э. Е. Берлович, В. Н. Пантелеев)



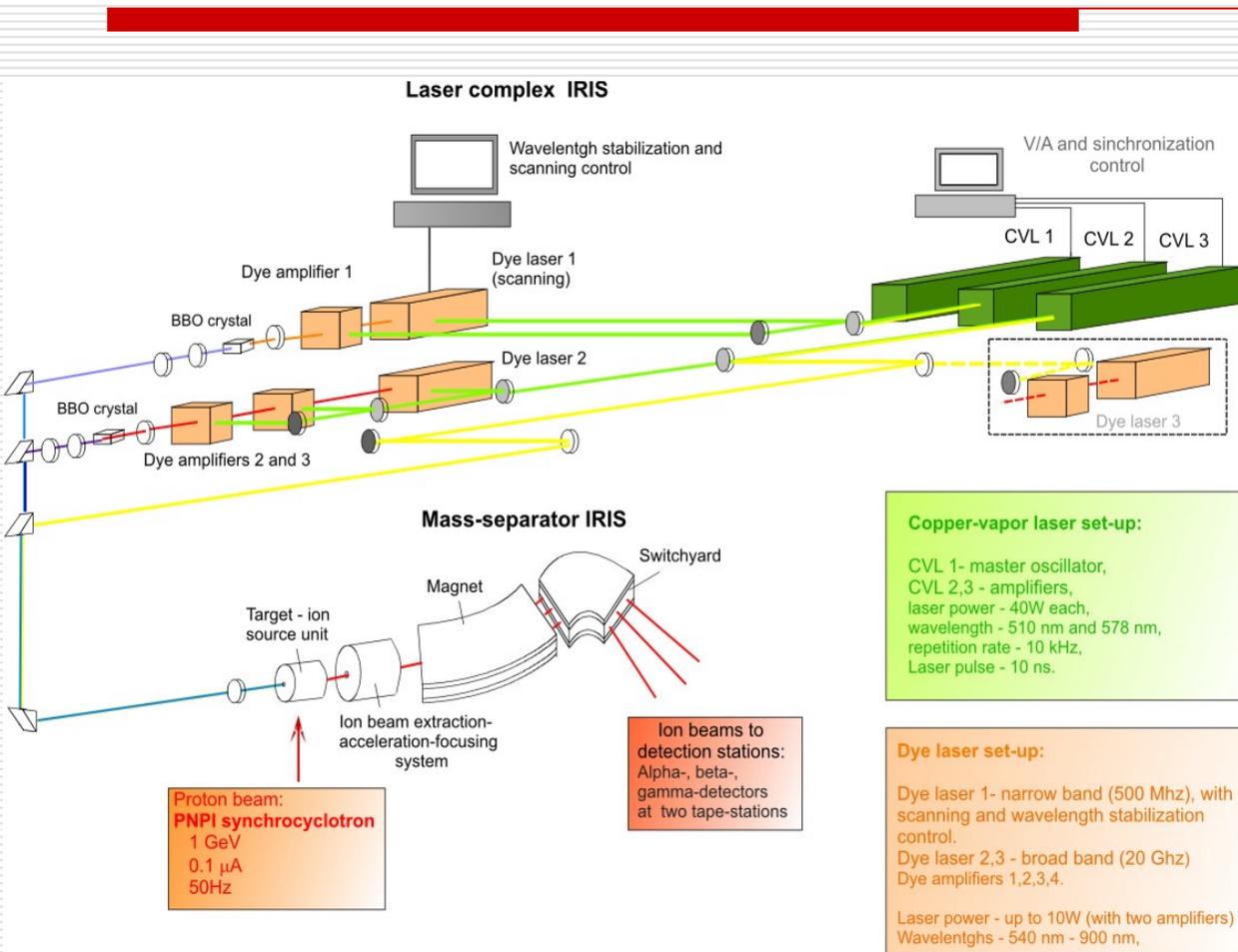
1.2. Описание решаемых проблем, поставленной задачи и предлагаемых подходов к ее решению.

Предлагается следующая программа: Исследовать форму и свойства удаленных от полосы бета стабильности нейтронно-дефицитных и нейтронно-избыточных ядер вблизи границы протонной и нейтронной устойчивости в районе оболочек с магическим числом нейтронов $N = 50, 82, 126$ и протонов $Z = 28, 50, 82$ путем определения изменений зарядовых радиусов и величин электромагнитных моментов исследуемых нуклидов

Предлагаемые подходы к решению поставленной задачи

Наиболее эффективным и перспективным методом для селективного “on-line” получения ядер, удаленных от полосы бета-стабильности на ISOL установках, является метод лазерного ионного источника, впервые разработанный и примененный на установке ИРИС в ПИЯФ. Также впервые на установке ИРИС был разработан и использован метод резонансной ионизационной спектроскопии в лазерном ионном источнике, являющийся в настоящее время самым чувствительным методом, позволяющим проводить исследования формы ядер и их электромагнитных моментов при выходе исследуемых нуклидов до 1×10^{-1} ядер/сек. Его внедрение позволило провести исследования зарядовых радиусов и электромагнитных моментов более ста нейтронно-дефицитных ядер в районе оболочки с магическим числом нейтронов $N=82$, а также в области крайнего нейтронного дефицита. В настоящее время на установке ИРИС (ПИЯФ) завершается создание универсальной лазерно-ионизационной спектроскопической системы (УЛИСС), физический пуск которой осуществлен в 2009 г. По своим основным характеристикам – эффективности, селективности разделения изобар и широкой области получаемых нуклидов, создаваемая система не уступает лазерно-спектроскопической системе ISOLDE, являющейся в настоящее время самой эффективной среди подобного типа установок. Запуск УЛИСС позволит значительно расширить области изучения крайне нейтронно-дефицитных ядер и перейти в область крайне нейтронно-избыточных нуклидов.

Схема Универсальной Лазерно-Ионизационной Спектроскопической Системы (УЛИСС), создаваемой на ИРИСе



Изготовлено и запущено в экспериментальном зале ИРИСа:

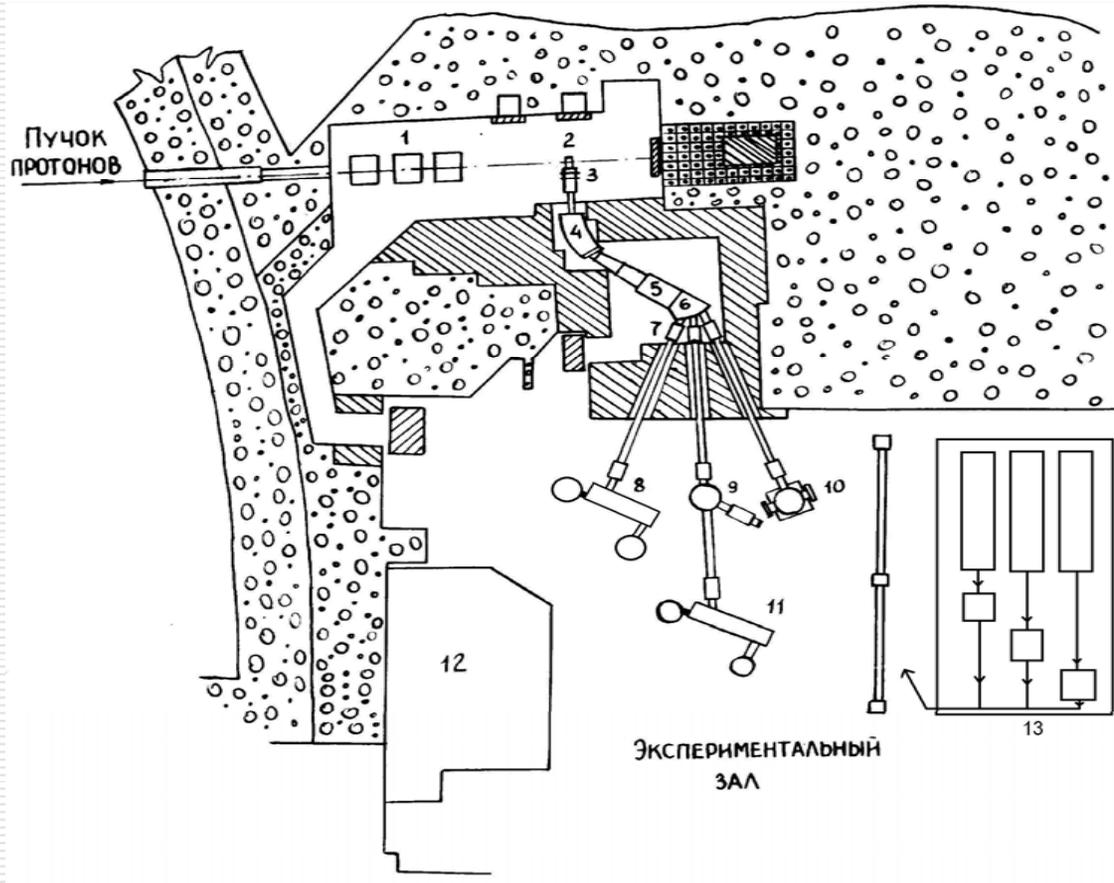
1. Новая система лазеров на парах меди
2. Лазер на красителе + умножитель частоты (один канал излучения в области ультрафиолета)

Для проведения on-line экспериментов по лазерной спектроскопии Ga, Al, Ca, Ag, In, Tl, Fr изготовлена и запущена система сканирования частоты и система транспортировки ультра-фиолетового излучения к мишенно-ионному устройству

Получен резонансный сигнал на стабильных изотопах In и Tl

Для обеспечения возможности резонансно ионизовать атомы еще ~25 элементов Периодической системы нужно построить еще один у.ф. канал

Экспериментальный зал ИРИСа с новой лазерной установкой УЛИСС



1. Протонный тракт
2. Мишенно-ионное ус-во
3. Линзовая система
4. Магнит масс-сепаратора
5. Дисперсионная камера
6. Камера разводки пучков
7. Ионные тракты
8. Быстрое л.п. ус-во
9. Поворотная камера
10. Камера ФЭУ
11. Л. П. ус-во
12. Лазерная установка видимого диапазона
13. Универсальная лазерно-ионизационная спектроскопическая система (УЛИСС)

Физический запуск системы УЛИСС. Получена резонансная ионизация стабильных изотопов Tl и In в лазерном ионном источнике



Схема двухступенчатой резонансной ионизации атомов Tl

Сверхтонкая структура, измеренная на стабильных изотопах ^{205}Tl и ^{115}In

Схема ионизации: **276.873 nm (УФ)** \Rightarrow **510.6 nm (Cu vapor laser)**

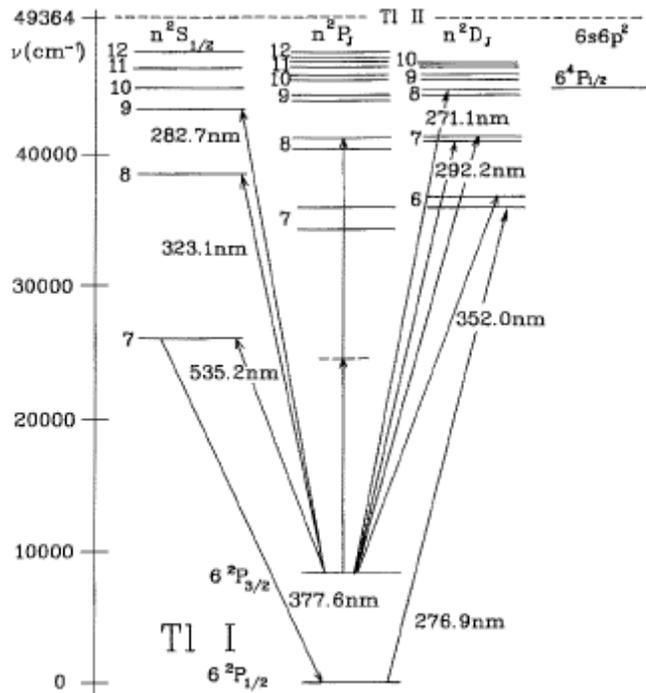
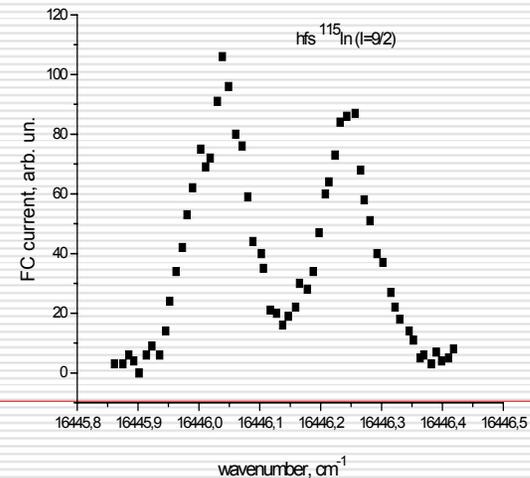
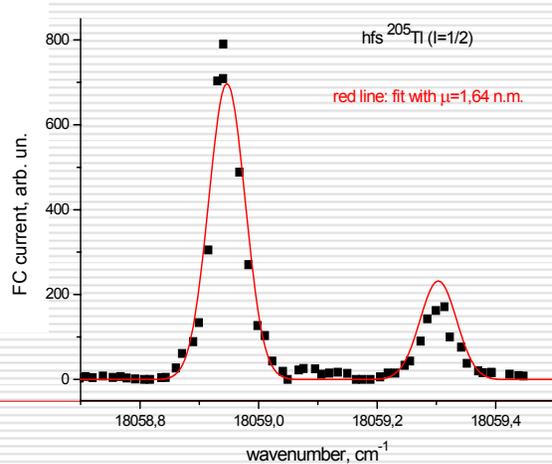
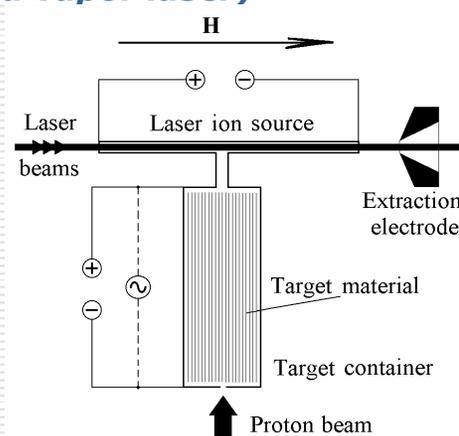


Fig. 1. Energy-level diagram of Tl I with the investigated transitions



1. Обоснование необходимости выполнения данного проекта

1.3 Краткая характеристика работы, включая сравнение достигаемых показателей с конкретными аналогами.

В работе по получению и исследованию ядер, удаленных от полосы бета стабильности предполагается получить следующие результаты:

- а)** Будут разработаны новые, эффективные мишенные устройства, позволяющие значительно расширить круг получаемых нуклидов, далеко отстоящих от полосы бета-стабильности как в нейтронно-дефицитной, так и в нейтронно-избыточной области.
 - б)** Будут разработаны и внедрены новые высоко-эффективные ионные источники высокой селективности ионизации изобар для получения интенсивных разделенных пучков радиоактивных ионов высокой чистоты.
 - в)** В ПИЯФ будет введена в строй универсальная лазерно-ионизационная спектрометрическая система, которая по своим основным характеристикам – эффективности, селективности разделения изобар и широкой области получаемых нуклидов, не уступает лучшим существующим в мире аналогам.
 - г)** Впервые будут измерены зарядовые радиусы и магнитные моменты для ряда нейтронно-дефицитных и нейтронно-избыточных ядер в области тяжелых элементов (Tl, Bi, Fr), а также в области ядер с магическим числом протонов и нейтронов $Z=28, N=50$ (Ge, Ga, Zn, Cu и Ni) и $Z=50, N=82$ (Te, Sb, Sn, In, Cd и Ag).
-

1. Обоснование необходимости выполнения данного проекта

1.4. Характеристика ожидаемого народно-хозяйственного результата.

- В результате планируемых исследований будут получены новые данные о свойствах атомных ядер – зарядовые радиусы, электромагнитные моменты. Эти данные необходимы для развития теории атомного ядра, для формирования фундаментальных знаний о строении вещества. Полученные данные будут также важны для решения некоторых задач ядерной астрофизики.
 - Будут разработаны высоко-селективные, эффективные мишенно-ионные устройства, позволяющие получать интенсивные пучки радиоактивных изотопов высокой чистоты для их использования не только в ядерно-физических исследованиях, но также в исследованиях по физике твердого тела и в медицине.
-

1. Обоснование необходимости выполнения данного проекта

1.5. Имеющийся научный задел.

- В ПИЯФ на масс-сепараторном комплексе ИРИС, созданном в 1975 г., со времени его создания ведутся работы по получению и исследованию ядер, удаленных от полосы бета стабильности.
 - В 1984 г. в линию с установкой ИРИС был запущен и на протяжении 25-ти лет работает лазерно-ядерный комплекс – первая в мире установка по многоступенчатой резонансной ионизации радиоактивных ядер, получаемых в режиме “on-line”.
 - В настоящее время завершается создание и запуск новой установки УЛИСС, которая позволит существенно расширить возможности лазерно-спектроскопических исследований ядер, удаленных от полосы бета стабильности, а также значительно увеличить круг исследуемых нуклидов.
 - Разработанные на установке ИРИС мишенно-ионные устройства позволяют получать в режиме on-line нейтронно-дефицитные и нейтронно-избыточные изотопы большинства элементов Периодической системы - от изотопов Li ($Z=3$) до изотопов Ra ($Z=88$) для их последующего исследования и использования.
-

2. Какой научно-технический результат должен быть получен в итоге выполнения работ по проекту.

2.1. Описание планируемых результатов.

- В 2010 г. будет введена в эксплуатацию для использования в on-line экспериментах уникальная лазерно-спектроскопическая система УЛИСС. С использованием данной системы откроются новые возможности исследования нуклидов крайне удаленных от полосы бета-стабильности.
- Будут измерены зарядовые радиусы и магнитные моменты ядер в широкой области нейтронно-дефицитных и нейтронно-избыточных нуклидов. На установке ИРИС-УЛИСС будут исследованы форма и свойства нейтронно-дефицитных ядер редкоземельных элементов вблизи границы протонной устойчивости в районе оболочки с магическим числом нейтронов $N=82$;
- будет исследована новая область нейтронно-дефицитных изотопов - ядра изотопов франция с аномально короткими периодами полураспада ($T_{1/2}=1-20$ мс);
- будет совершен переход в новые области нейтронно-избыточных изотопов и исследована форма изотопов Te, Sb, Sn, In, Cd и Ag с числом нейтронов близким к магическому $N=82$ в окрестности границы нейтронной устойчивости;
- будет исследована форма ядер изотопов Ge, Ga, Zn, Cu и Ni (в окрестности оболочки с магическим числом протонов $Z=28$ и магическим числом нейтронов $N=50$) с целью изучения влияния на форму ядра оболочечного эффекта;
- на установке ИРИС будут разработаны новые высокоэффективные и высокоселективные мишенно-ионные устройства для получения короткоживущих ядер, удаленных от полосы бета-стабильности, а также для использования в исследованиях по физике твердого тела и в медицине.

2. Какой научно-технический результат должен быть получен в итоге выполнения работ по проекту.

2.2. Описание потенциальных потребителей научного результата.

Потребителями полученных научных результатов могут являться ведущие научные центры, занимающиеся исследованиями в области теории атомного ядра и астрофизики. Получаемые моно-изотопные радиоактивные ионные пучки высокой чистоты могут быть использованы для исследований и новых разработок в сотрудничестве с лабораториями, работающими в области физики твердого тела, а также с медицинскими учреждениями, использующими радиоактивные изотопы для лечения и диагностики различных заболеваний.

2.3. Какие сторонние организации могут участвовать в выполнении данного проекта.

В выполнении данного проекта могут участвовать Рад. Инст. им. В. Г. Хлопина, ФГУП НИИ НПО "Луч", ООО "Стерилизационные медицинские приборы."

3. Выполнение индикаторов программного мероприятия в рамках данного проекта.

Индикатор	ед. изм.	2010	2011	2012	2013	2014
число завершенных проектов научно-исследовательских работ, перешедших в стадию опытно-конструкторских работ с целью разработки конкурентоспособных технологий для последующей коммерциализации	единиц					
число публикаций в ведущих научных журналах, содержащих результаты интеллектуальной деятельности, полученные в рамках выполнения проектов проблемно-ориентированных поисковых исследований	единиц	3	4	5	5	5
число патентов (в том числе международных) на результаты интеллектуальной деятельности, полученные в рамках выполнения проектов проблемно-ориентированных поисковых исследований	единиц					
число диссертаций на соискание ученых степеней, защищенных в рамках выполнения проектов проблемно-ориентированных поисковых исследований	единиц		1		1	

4. Оценка и обоснование сроков выполнения данного проекта в полном объеме

- Данный проект будет выполняться в 2010-2014 гг. Время выполнения проекта оценивалось, исходя из опыта работы на установке ИРИС в линию с синхроциклотроном ПИЯФ в течение последних пяти лет. Для выполнения предлагаемой программы исследований необходимо 15-16 сеансов на пучке, каждый средней продолжительностью 4-5 суток. Т. к. частота работы установки ИРИС на пучке 3, максимум 4 раза в год, то необходимое время выполнения программы 4-5 лет. Некоторые исследования будут продолжены после 2014 г.

 - **Пояснения к бюджетной части проекта**
Основных участников проекта – 6 н. сотр. (+4 н. сотр проект ISOLDE, + 2 +? н. сотр. проект ИРИНА)
-

5. Оценка стоимости проекта и обоснование объемов финансирования.

Общий объем финансирования проекта:

Наименование статей затрат в тыс. руб.	2010	2011	2012	2014	2015
Материалы	1000	1100	1300	1500	1700
Спецоборудование для научных (экспериментальных работ)	1500	2500	3300	4000	4500
Затраты на оплату труда работников, непосредственно занятых созданием научно-технической продукции	3240	3600	4000	4400	4840
Отчисления на социальные нужды	1100	1220	1360	1500	1650
Командировочные расходы	100	110	115	120	125
Затраты по работам, выполняемым сторонними организациями и предприятиями					
Прочие расходы	30	33	36	40	44
Всего	6970	8563	10111	11560	12859

Структура проекта

«Фундаментальные исследования в области ядерной физики»

Направления и проекты	Соисполнители Руководители проекта	Цели проекта, ожидаемые результаты.	Планы на 2010г	Объем финансир. 2010-2014гг. (тыс. руб)
Исследование фундаментальных свойств материи				
Фундаментальная ядерная физика.	ПИЯФ РАН			50063
Проект Получение и исследование экзотических ядер на установке ИРИС	Руководитель В.Н.Пантелеев к.ф.-м.н.	Лазерно-спектроскопические исследования экзотических ядер. Измерения зарядовых радиусов и электромагнитных моментов ядер, удаленных от полосы бета – стабильности. Разработка эффективных, высокоселективных мишенно-ионных устройств.	Разработка и исследование мишени из карбида урана высокой плотности для получения изотопов Tl для лазерно-спектроскопических экспериментов на установке ИРИС. Использование новой лазерной установки УЛИСС для измерения изотопических сдвигов изотопов Tl в лазерном ионном источнике.	

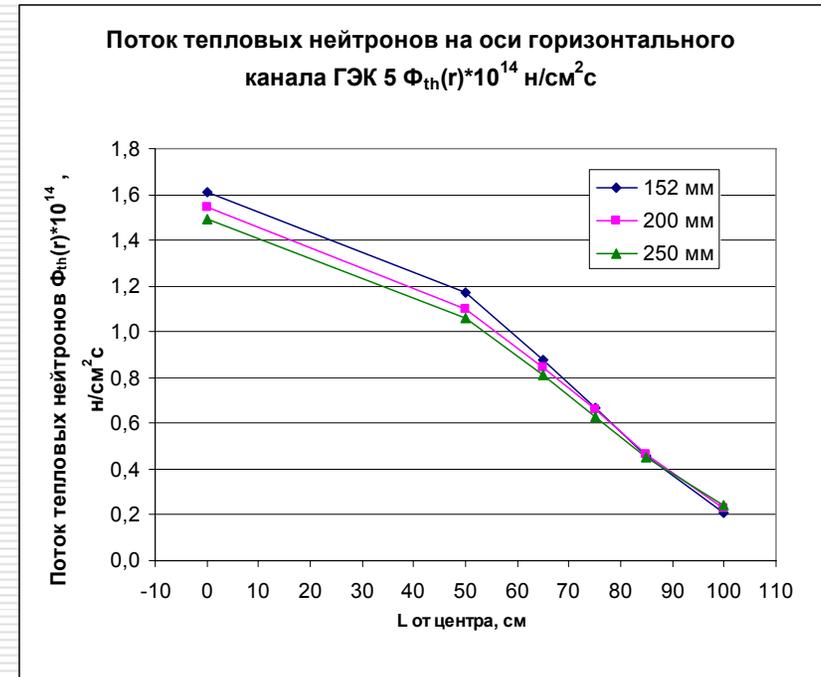
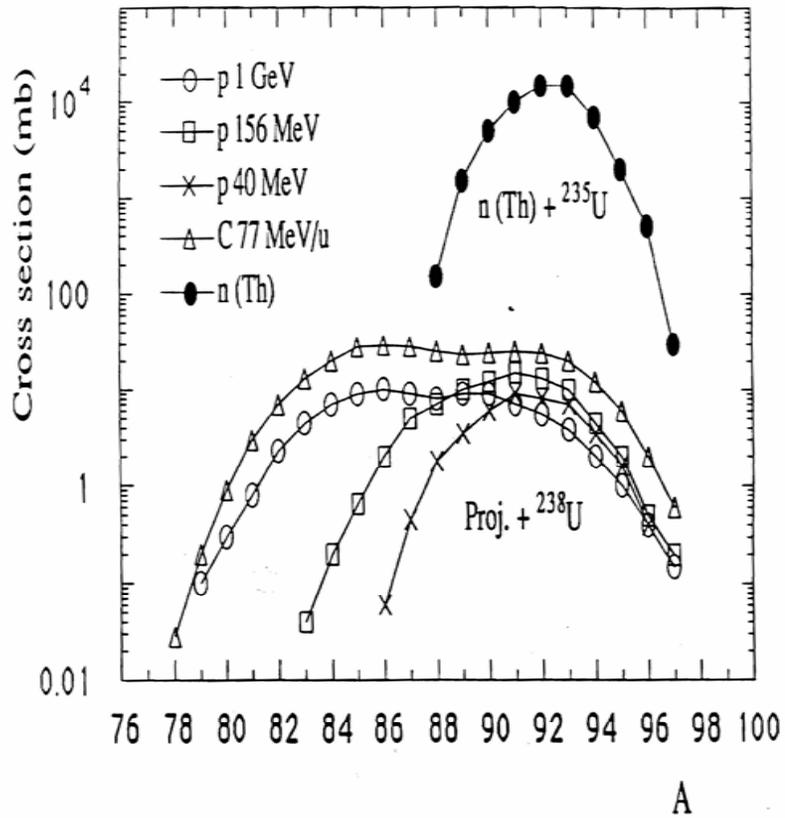
План работ ЛКЯ на 2009 год

(из отчета за 2008 г.)

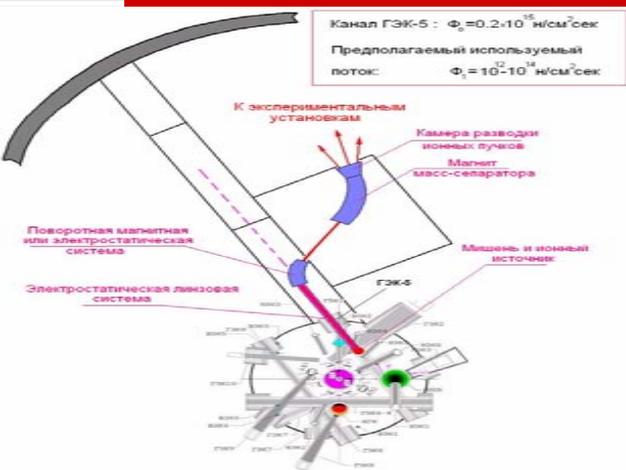
1. Запуск в экспериментальном зале ИРИС новой лазерной установки (2ой очереди) ультрафиолетового диапазона излучения с системой сканирования частоты и каналом транспортировки ультрафиолетового излучения к лазерному ионному источнику.
2. On-line исследования мишенно-ионных устройств с UC мишенным веществом различной пористости и дисперсности. Измерение выходов изотопов Cs и Fr из разработанных высокотемпературных мишеней.
3. Изучение формы ядер Po ($Z=84$) и других нуклидов этой области на установке ISOLDE с использованием лазерного ионного источника.
4. Продолжение разработки проекта ИРИНа.
5. Изготовление и тесты мишени для получения медицинских пучков

Проект ИРИНА

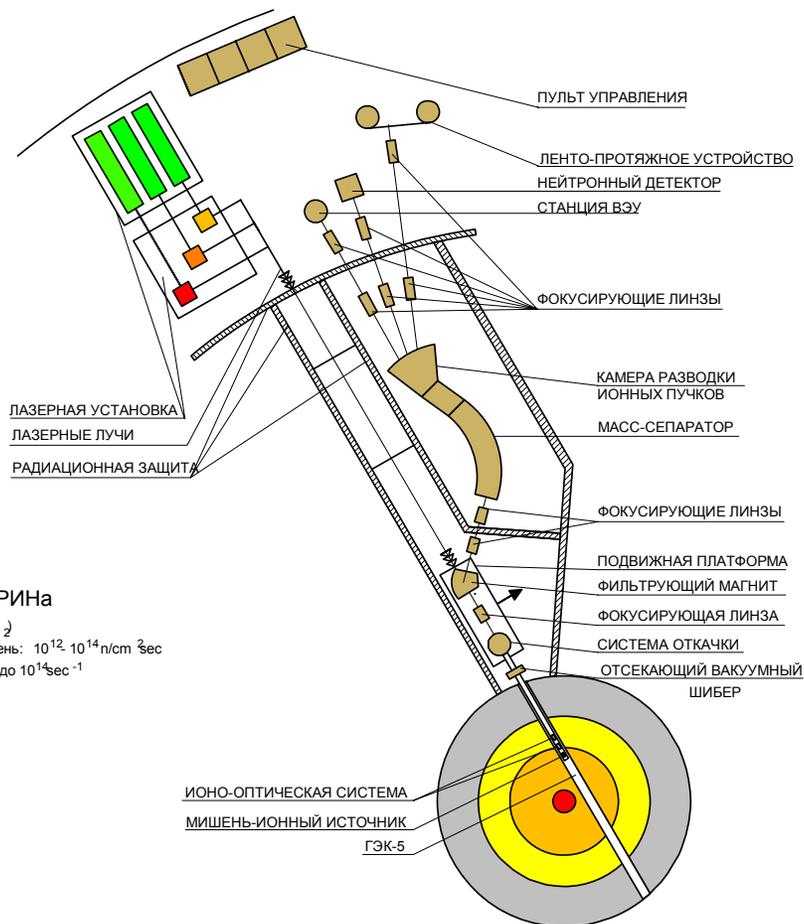
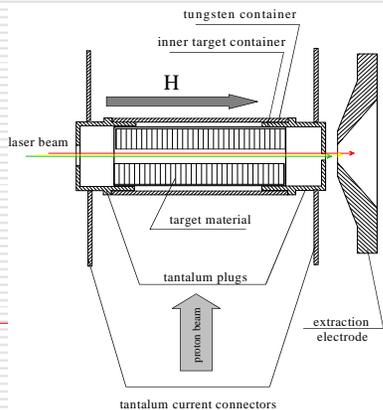
Сечения образования изотопов Rb
на пучках различных частиц



Проект ИРИНА



Совмещенный лазерный источник-мишень, впервые разработанный и испытанный на ИРИСе



Масс-сепаратор ИРИНА

Мишень: 1-6g ²³⁵U (UC, UC₂)

Поток нейтронов через мишень: $10^{12} - 10^{14}$ н/см²сек

Число делений в мишени: до 10^{14} сек⁻¹

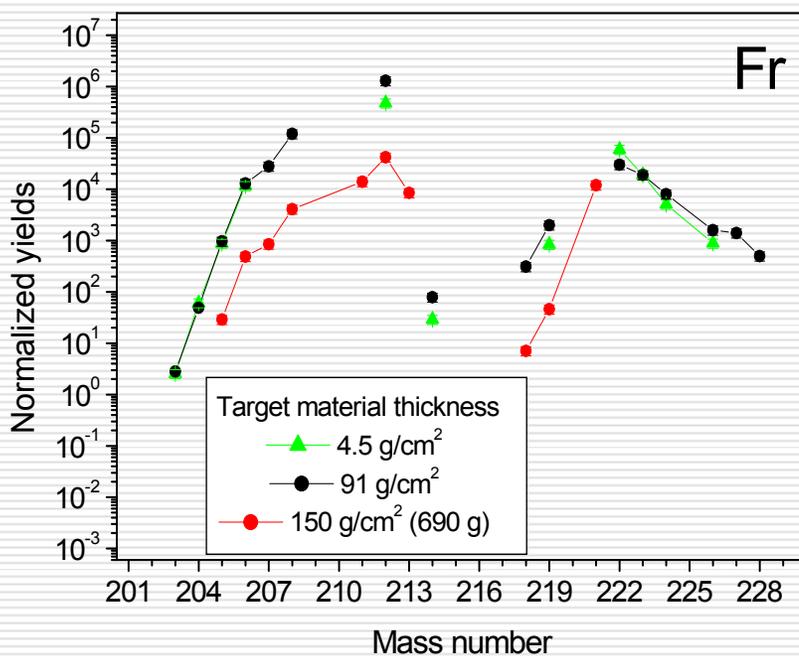
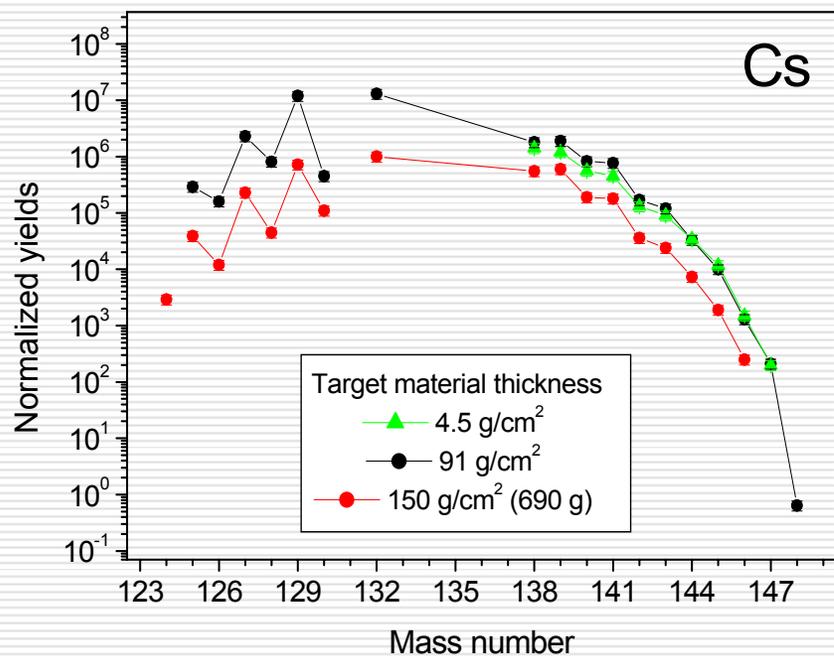
T мишени: до 2400 °C

Сравнение расчетных выходов (в мишени) установок ИРИНА и SPIRAL2

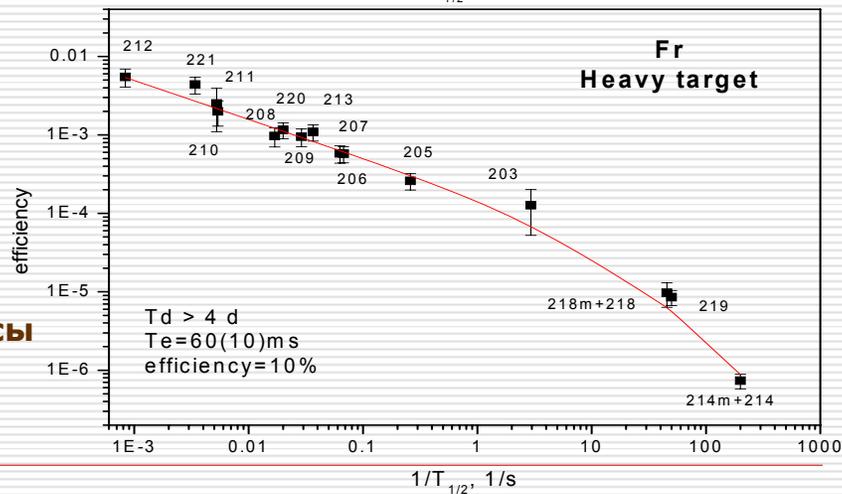
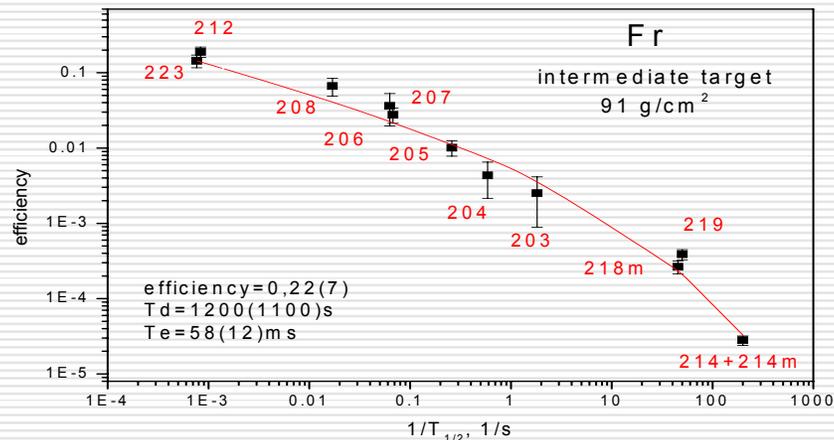
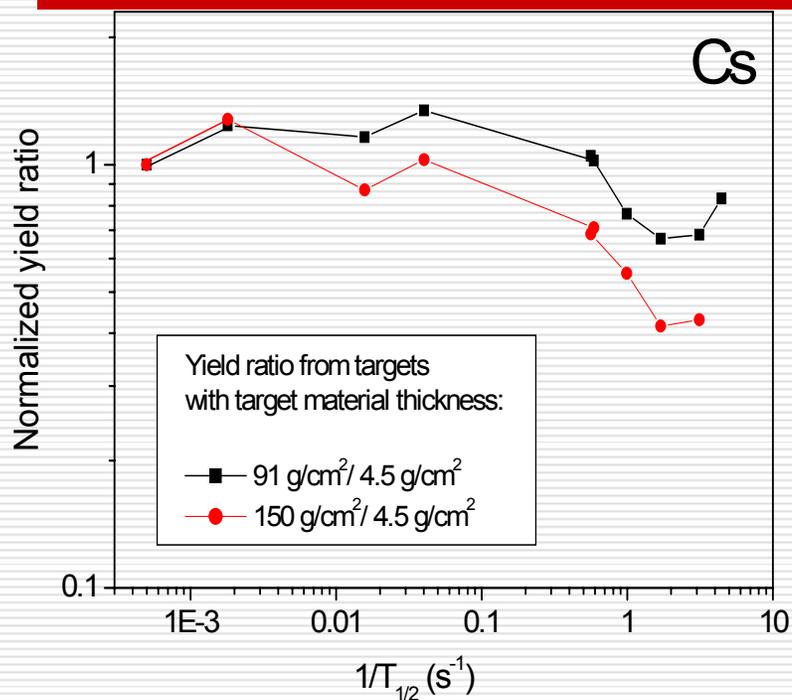
Nuclide	Z	T1/2 sec	IRIN	SPIRAL2
			Cum.Yield	Cum. Yield
74Ni	28	0,9	4,58E+06	2,75E+05
78Cu	29	0,342	1,09E+07	1,15E+06
80Zn	30	0,545	2,42E+08	2,64E+09
84Ga	31	0,085	1,11E+10	1,24E+07
85Ge	32	0,535	2,13E+09	4,09E+08
87As	33	0,49	5,27E+10	8,60E+09
91Se	34	0,27	6,66E+08	2,71E+08
93Br	35	0,102	3,09E+09	3,35E+09
95Kr	36	0,78	7,19E+09	4,45E+09
100Rb	37	0,051	3,48E+10	1,79E+07
102Sr	38	0,069	1,73E+08	9,02E+07
102Y	39	0,3	2,68E+11	1,02E+10
105Zr	40	0,6	1,16E+11	5,68E+09
107Nb	41	0,3	2,31E+09	9,32E+10
110Mo	42	0,3	3,90E+09	3,52E+09
113Tc	43	0,17	1,40E+08	2,74E+09

	Z	T1/2, sec	IRIN	SPIRAL2
			Cum.Y.	Cum. Y.
115Ru	44	0,4	2,57E+08	2,77E+09
117Rh	45	0,44	4,67E+08	2,12E+10
120Pd	46	0,5	2,71E+09	1,06E+10
127Ag	47	0,109	1,58E+02	1,71E+01
130Cd	48	0,195	8,78E+10	8,03E+09
133In	49	0,18	1,71E+08	1,06E+08
134Sn	50	1,12	1,77E+10	2,62E+09
136Sb	51	0,82	1,15E+10	3,45E+09
138Te	52	1,4	6,62E+10	7,96E+09
141I	53	0,43	4,07E+10	3,69E+09
145Xe	54	0,9	7,16E+07	1,87E+08
148Cs	55	0,14	1,31E+07	3,53E+07
150Ba	56	0,3	5,02E+07	7,82E+07
150La	57	0,51	1,05E+10	3,15E+09
152Ce	58	1,4	2,06E+10	1,06E+10
154Pr	59	2,3	5,11E+09	4,01E+09
156Nd	60	5,47	4,74E+09	6,00E+09

Нормированные выходы изотопов Cs и Fr из мишеней различной массы (нормировка на 1г/см² и 0.1 μА)



Сравнение быстродействия и эффективности мишеней с массой 93 и 690 г.



Вывод: при увеличении массы мишени от 4.5 до 93 г выходы Cs и Fr растут пропорционально массе мишенного вещества. При увеличении массы до 700 г рост выходов существенно уменьшается из-за значительного замедления процесса диффузии