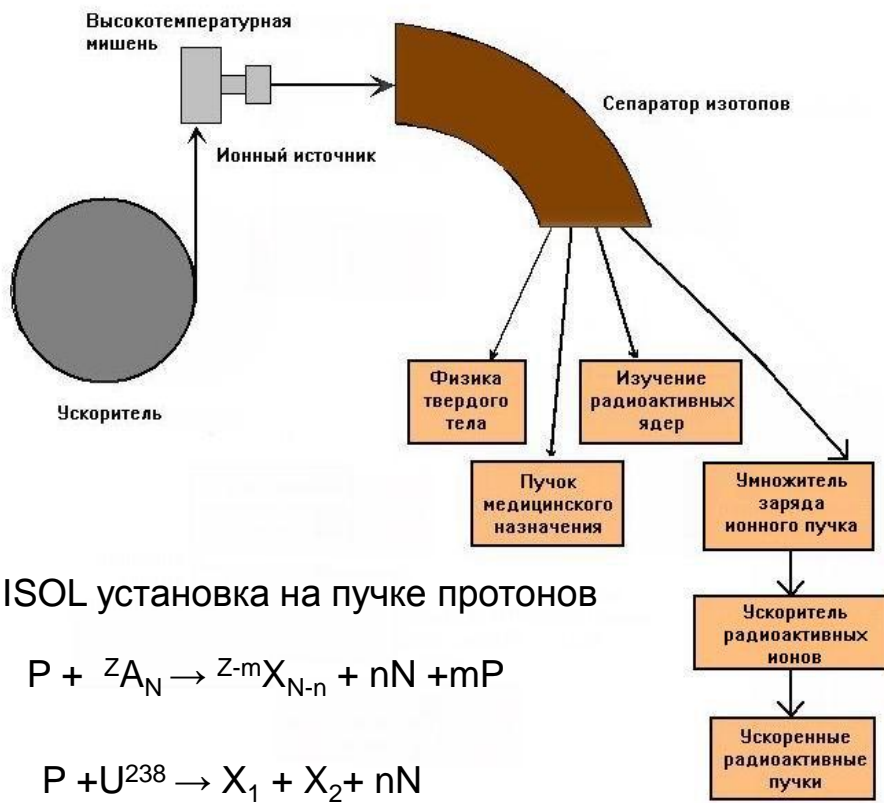


Проект ИРИНА на реакторе ТИК

В.Н. Пантелеев

Разработка проекта и создание масс-сепараторного лазерного комплекса ИРИНА на реакторе ТИК для исследования нейтронно-избыточных, экзотических ядер удаленных от полосы β -стабильности и разработка методов получения радионуклидов для медицины.

Современная ядерная физика полностью ориентирована на использование ISOL установок (Isotope Separator On-Line)



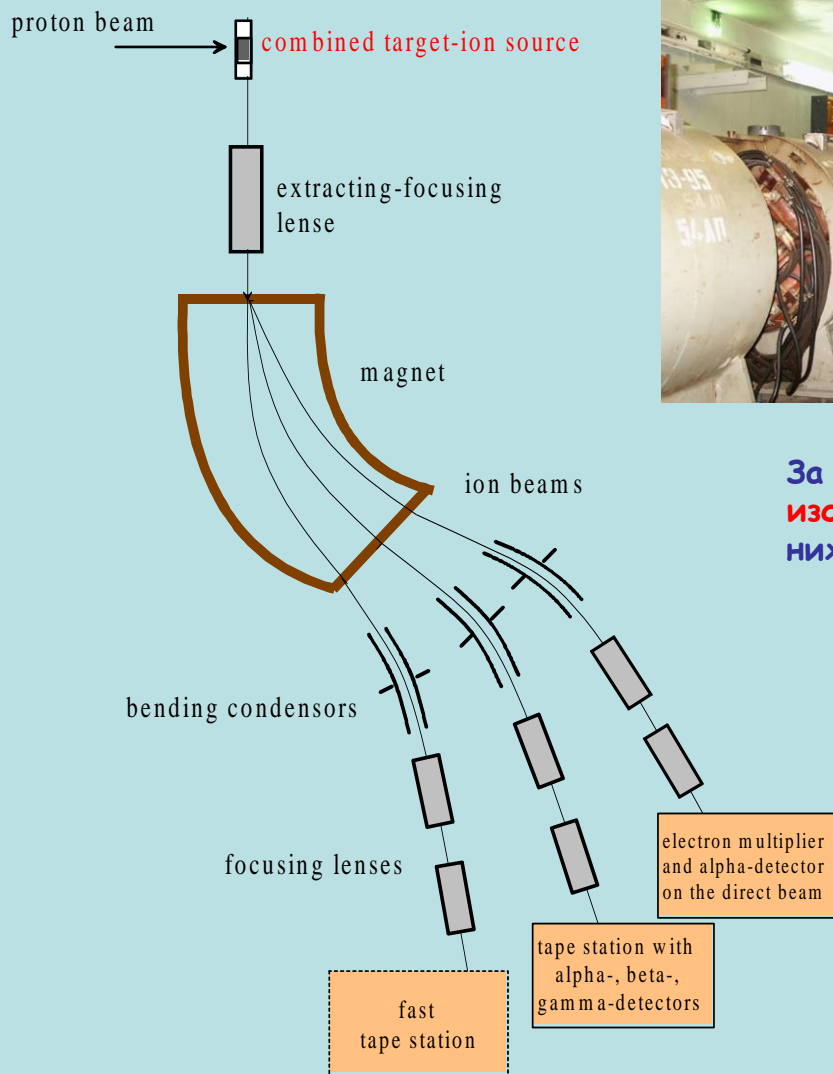
Исследования удаленных ядер:

- Массы ядер
- Радиусы, электромагнитные моменты
- Моды распада
- Фундаментальные взаимодействия
- Астрофизические процессы

Трикладные использования:

- Получение радионуклидов для медицины
- Физика твердого тела

ИРИС (Исследование Радиоактивных Изотопов на Синхроциклотроне) - единственная в России ISOL установка (работает в ПИЯФ с 1975 г.)



За время работы ИРИС исследовано **более 200 изотопов** из различных областей нуклидной карты, **17** из них получены впервые

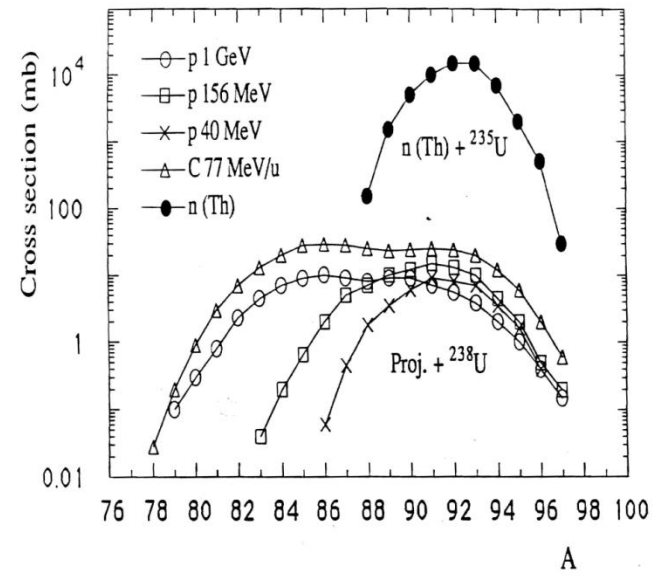
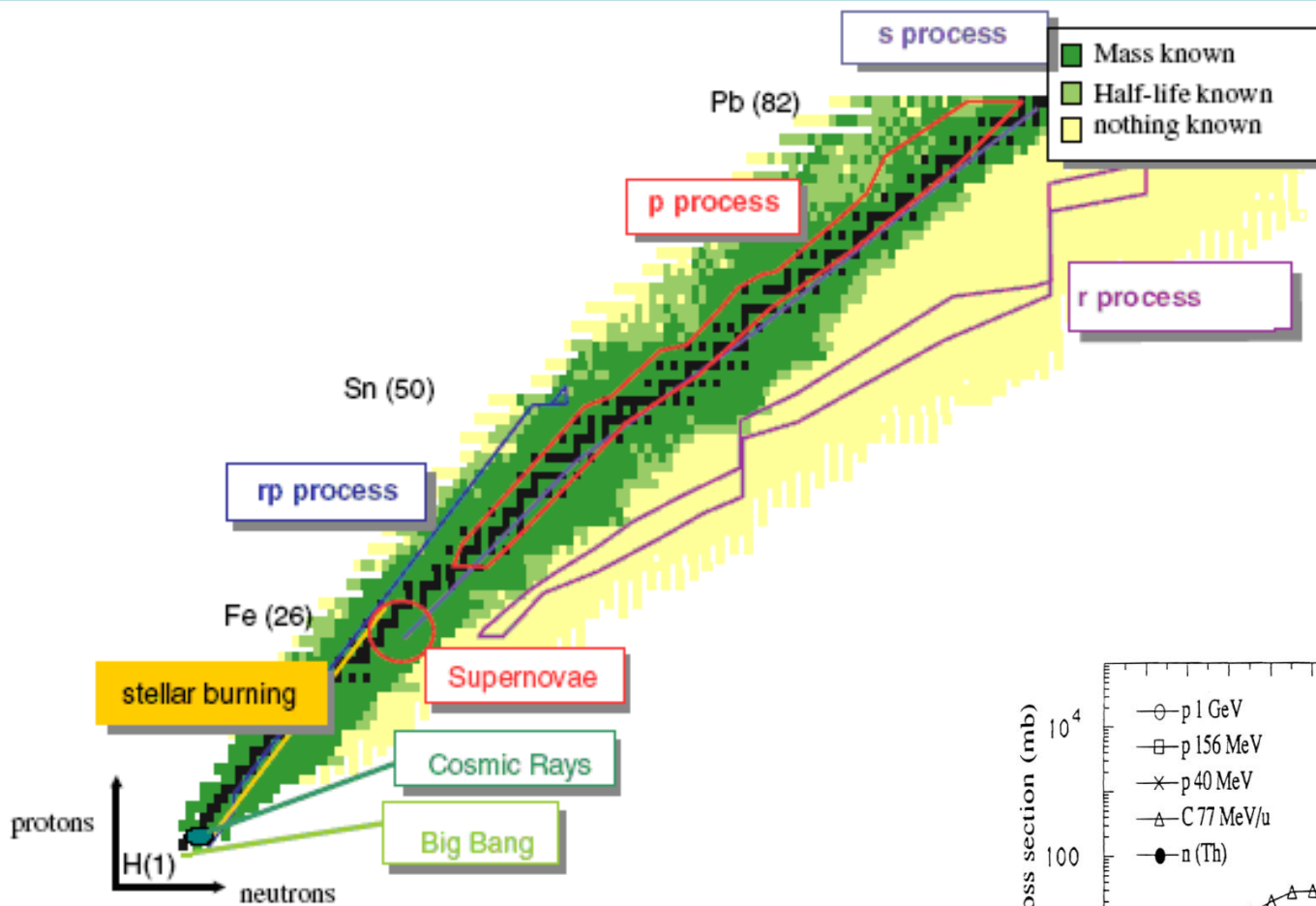
Основные разработки и know-how, которые будут внедрены и использованы на установке ИРИНА

Мишени: *мишень из карбида урана высокой плотности (патент).*

Ионные источники: *высокоселективный лазерный ионный источник (патент).*

Методы исследования удаленных ядер: *метод лазерной ионизационной спектроскопии в лазерном ионном источнике (ИРИС);*

Карта нуклидов



Сравнение расчетных выходов (в мишени) нуклидов, крайне удаленных от линии бета-стабильности, для установок ИРИНА и SPIRAL2

Nuclide	Z	T1/2 sec	IRINA	SPIRAL2
			Cum.Yield	Cum.Yield
⁷⁴ Ni	28	0,9	4,58E+06	2,75E+05
⁷⁸ Cu	29	0,342	1,09E+07	1,15E+06
⁸⁰ Zn	30	0,545	2,42E+08	2,64E+09
⁸⁴ Ga	31	0,085	1,11E+10	1,24E+07
⁸⁵ Ge	32	0,535	2,13E+09	4,09E+08
⁸⁷ As	33	0,49	5,27E+10	8,60E+09
⁹¹ Se	34	0,27	6,66E+08	2,71E+08
⁹³ Br	35	0,102	3,09E+09	3,35E+09
⁹⁵ Kr	36	0,78	7,19E+09	4,45E+09
¹⁰⁰ Rb	37	0,051	3,48E+10	1,79E+07
¹⁰² Sr	38	0,069	1,73E+08	9,02E+07
¹⁰² Y	39	0,3	2,68E+11	1,02E+10
¹²⁷ Ag	47	0,109	1,58E+02	1,71E+01
¹³³ In	49	0,18	1,71E+08	1,06E+08
¹³⁴ Sn	50	1,12	1,77E+10	2,62E+09
¹³⁶ Sb	51	0,82	1,15E+10	3,45E+09
¹³⁸ Te	52	1,4	6,62E+10	7,96E+09
¹⁴¹ I	53	0,43	4,07E+10	3,69E+09
¹⁴⁵ Xe	54	0,9	7,16E+07	1,87E+08
¹⁴⁸ Cs	55	0,14	1,31E+07	3,53E+07
¹⁵⁰ Ba	56	0,3	5,02E+07	7,82E+07
¹⁵⁰ La	57	0,51	1,05E+10	3,15E+09

Для большинства крайне удаленных нейтронно-избыточных изотопов выходы на установке ИРИНА выше, чем на установке SPIRAL2, которая, согласно сегодняшним оценкам, будет иметь самые высокие выходы нейтронно-избыточных изотопов

Создание ISOL установки
на реакторе ТИК позволит получать **нейтронно**
-избыточные изотопы с рекордной интенсивностью

Программа

- Измерение радиусов ядер
- Измерение ЭМ моментов ядер
- Измерение масс ядер
- Исследование γ - процесса
- Разработка методов получения радионуклидов для медицины
- Физика твердого тела

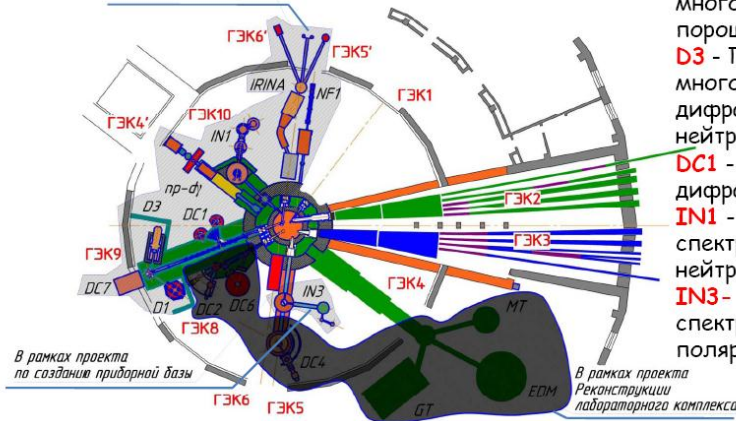
Рабочая группа проекта ИРИНА

В.Н. Пантелеев	зав. ЛКЯ ОФВЭ
Д.В. Федоров	с. н. сотр., зам. зав. ЛКЯ
А.Е. Барзах	вед. н. сотр.
П.Л. Молканов	н. сотр.
В.С. Иванов	с. н. сотр.
М.Д. Селиверстов	с. н. сотр.
В.В. Лукашевич	с. н. сотр.
Л.Х. Батист	с. н. сотр.

Создание приборной базы реакторного комплекса ТИК

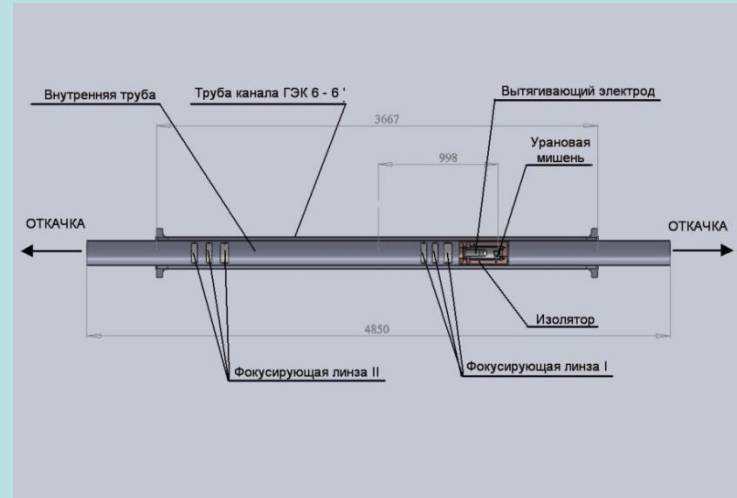
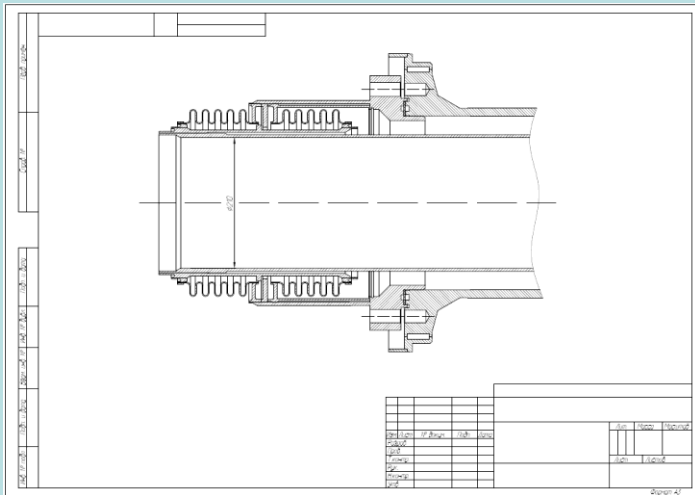
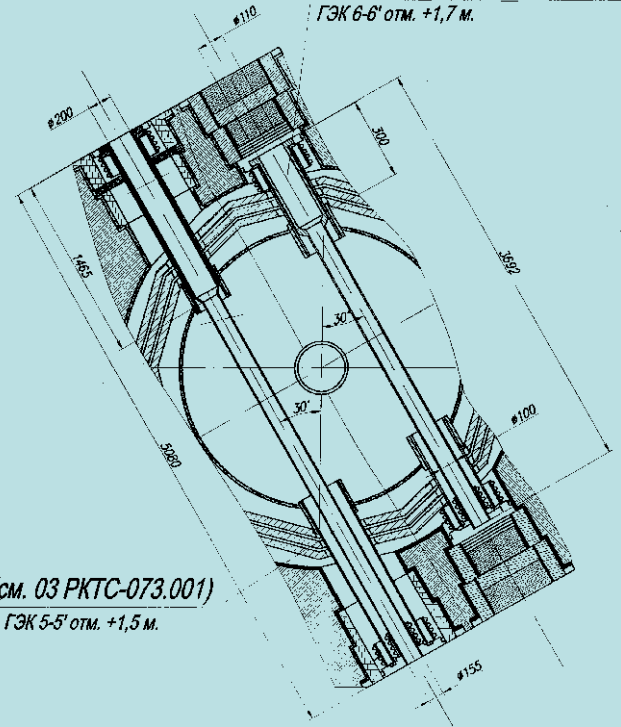
Зал горизонтальных каналов (8шт.)

В рамках проекта по созданию приборной базы



- **np-dy** - Установка «Бета-распад нейтрона»
- **IRINA** - Масс-сепараторный лазерно-ядерный комплекс ИРИНА
- **n4** - Установка «Нейтрино» (расположена в подреакторном пространстве)

И - И (см. 03 РКТС-073.001)
ГЭК 6-6' отм. +1,7 м.



Вставная вакуумная труба с мишенно-ионным устройством в новом канале ГЭК-5-5' увеличенного диаметра

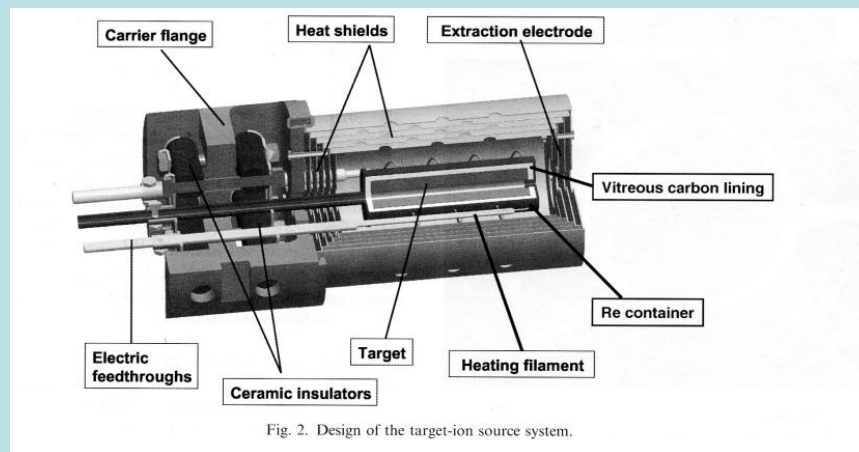
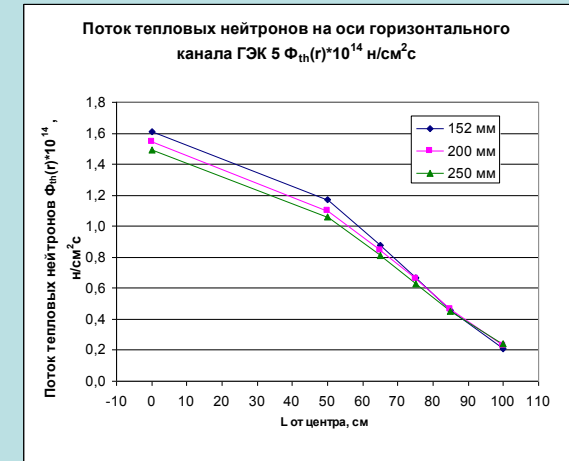
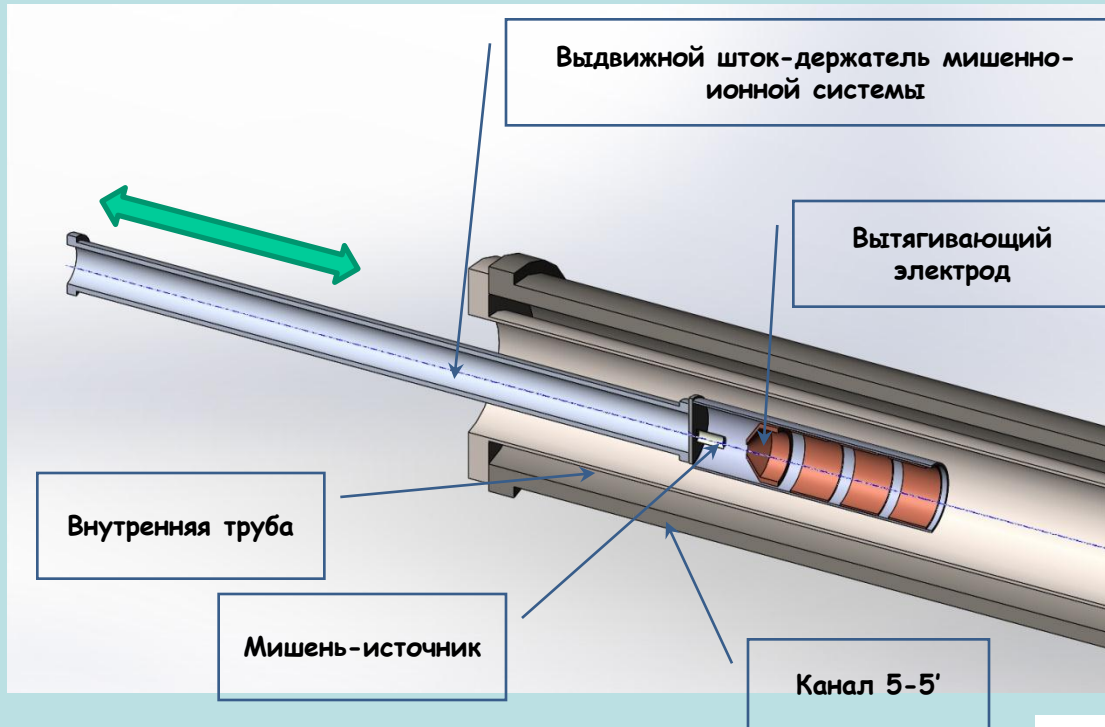


Fig. 2. Design of the target-ion source system.

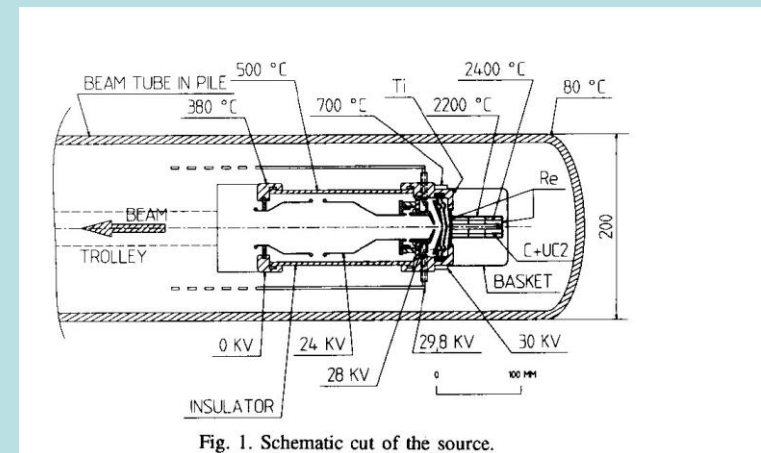
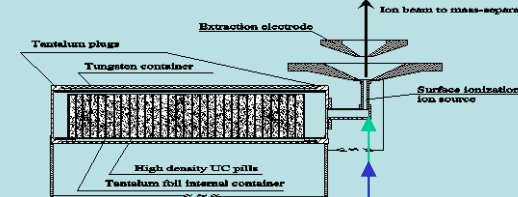
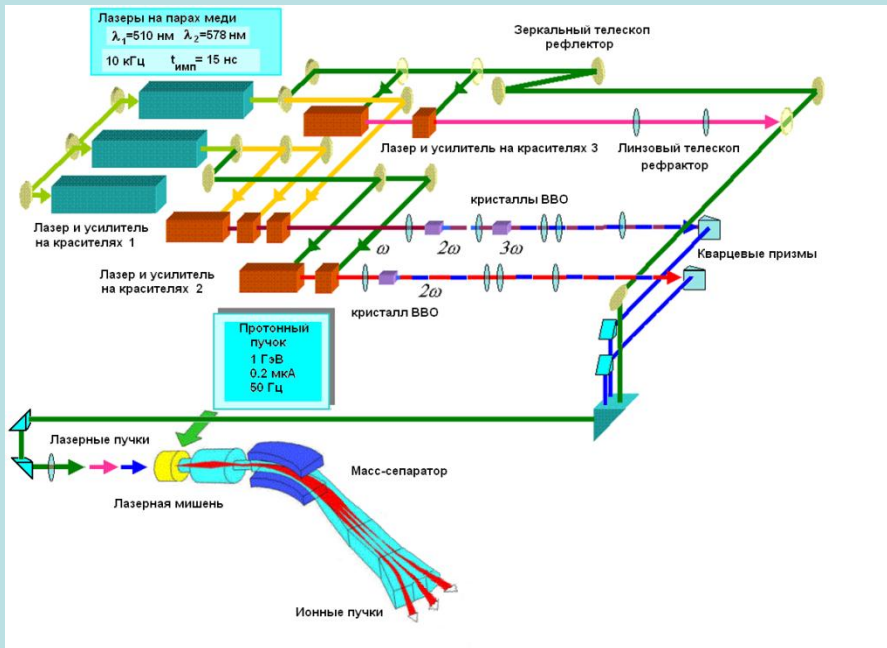


Fig. 1. Schematic cut of the source.

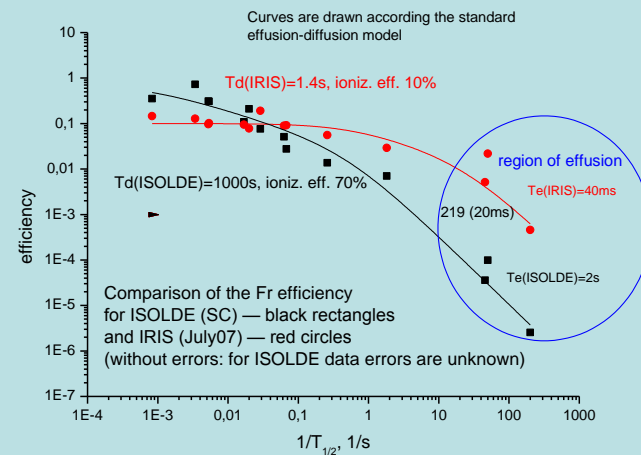
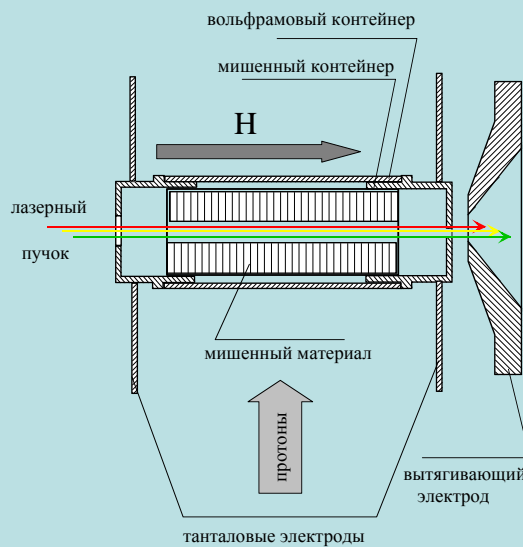
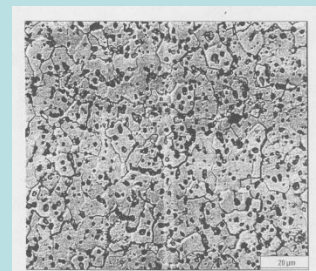
Мишень из карбида урана с вытягивающим электродом для установки MAFF на реакторе в Мюнхене (Гарчинг, Германия)

Мишень из карбида урана с электростатической системой вытяжки и формирования ионного пучка (PIAFE)

Лазерно-ядерный комплекс ИРИС



Мишень из монокарбида урана-238
 высокой плотности



Расположение оборудования в канале 5-5' и в экспериментальном зале реактора ПИК

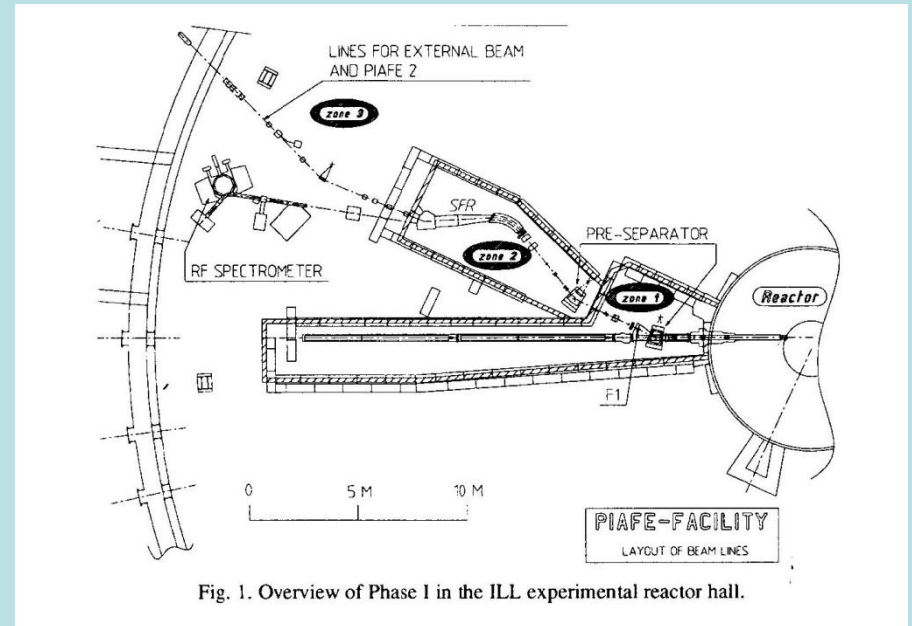
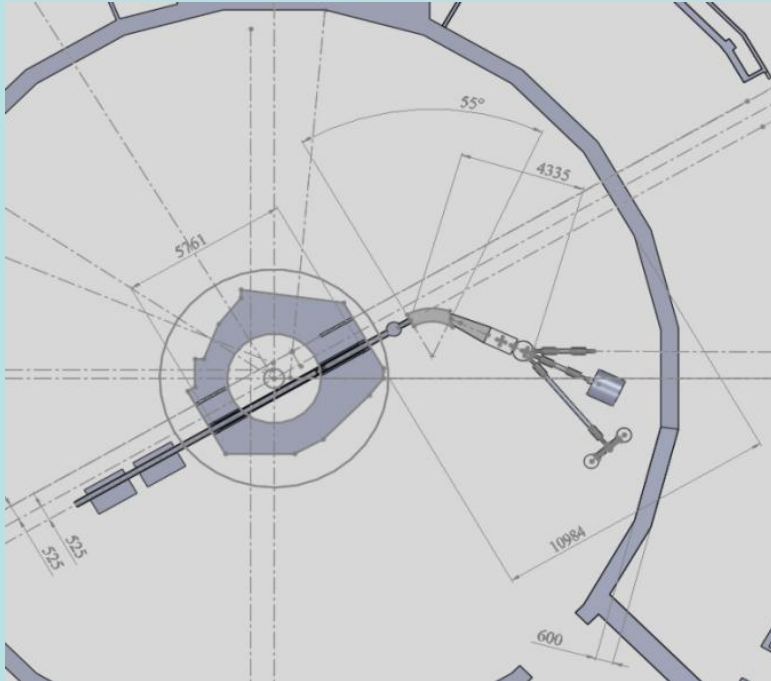
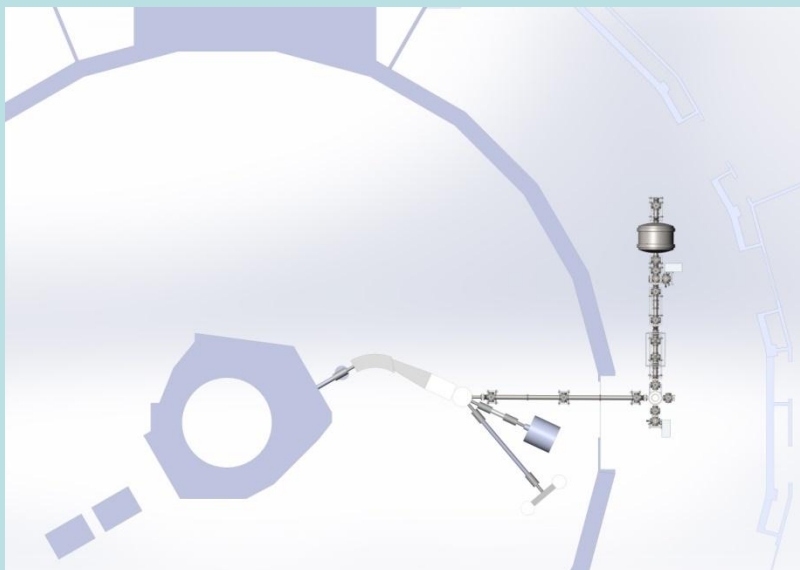


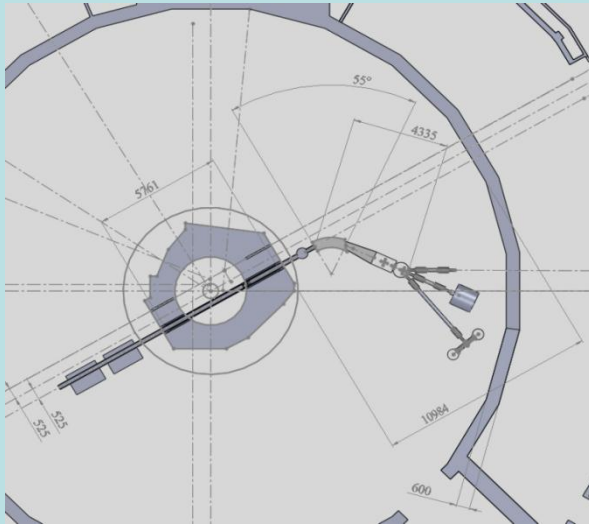
Fig. 1. Overview of Phase I in the ILL experimental reactor hall.

Проект установки PIAFE на реакторе в Гренобле (Франция) - не осуществлен



Внутренняя труба: мишень-ионный источник, вытягивающий электрод, две фокусирующие линзы.
Экспериментальный зал: две горячие камеры, масс-сепаратор с ионными трактами, лентопротяжным устройством и детекторами.
Внешний зал: система ловушек PITRAP.
Лабораторное помещение 107: лазерная установка.

**Плотность потока нейтронов на выходе канала на границе биологической защиты реактора
(расчеты сделаны М.С. Онегиным)**

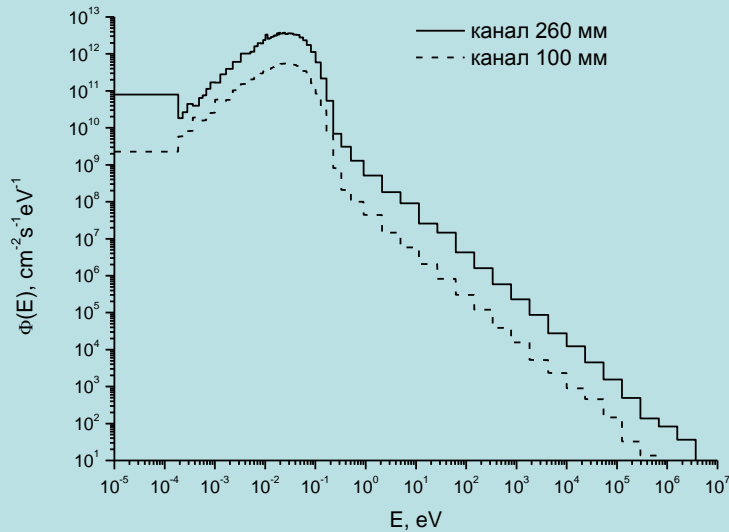


Канал диаметром 100 мм:

Диапазон энергий	Плотность потока нейтронов, $\text{см}^{-2}\text{с}^{-1}$
Тепловые нейтроны, энергия < 0,625 эВ	$3,87 \times 10^{10}$
Быстрые нейтроны, энергия > 0,1 МэВ	$2,8 \times 10^7$
Все энергии	$3,91 \times 10^{10}$

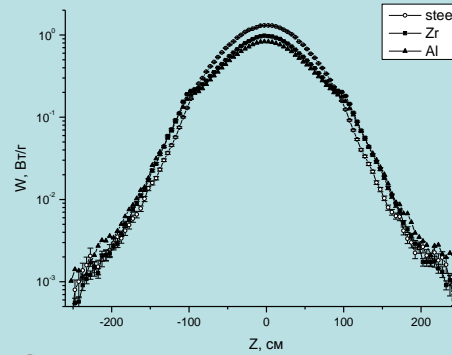
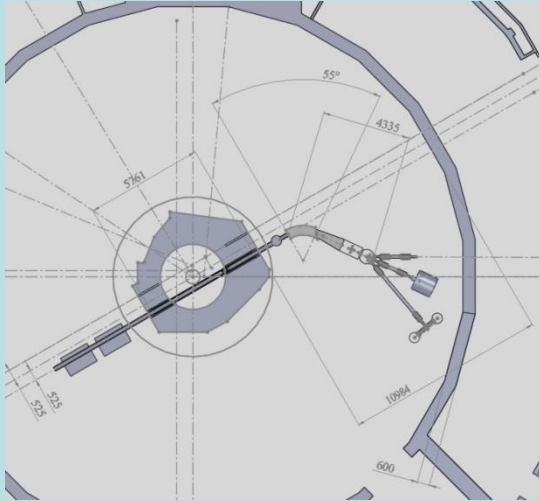
Канал диаметром 260 мм:

Диапазон энергий	Плотность потока нейтронов, $\text{см}^{-2}\text{с}^{-1}$
Тепловые нейтроны, энергия < 0,625 эВ	$2,65 \times 10^{11}$
Быстрые нейтроны, энергия > 0,1 МэВ	$2,73 \times 10^8$
Все энергии	$2,70 \times 10^{11}$



Спектр нейтронов на выходе канала ГЭК-5.

Энерговыведение на вставной трубе в канале ГЭК 5-5'



Вставная труба из алюминия САВ-6.
При расходе $1.5 \text{ м}^3/\text{час}$ температура
охлаждающей воды: вход - $55 \text{ }^\circ\text{C}$
выход - $75 \text{ }^\circ\text{C}$

Расчет Г.А. Кирсанова

Распределение удельного энерговыведения по длине вставной трубы.



Заключение

Использование ISOL комплекса ИРИНА на канале реактора ТИК с потоком нейтронов на мишени 5×10^{13} н/см²сек обеспечит самые высокие в мире выходы нейтронно-избыточных ядер, что позволит значительно расширить область исследуемых изотопов, в частности, продвинуться в малоисследованную область изотопов с максимальным избытком нейтронов (астрофизические аспекты исследований).

Использование ионной ловушки PITRAP на одном из ионных трактов установки ИРИНА позволит измерять с высокой точностью (несколько кэВ) массы большого массива ядер, удаленных от полосы бета-стабильности.

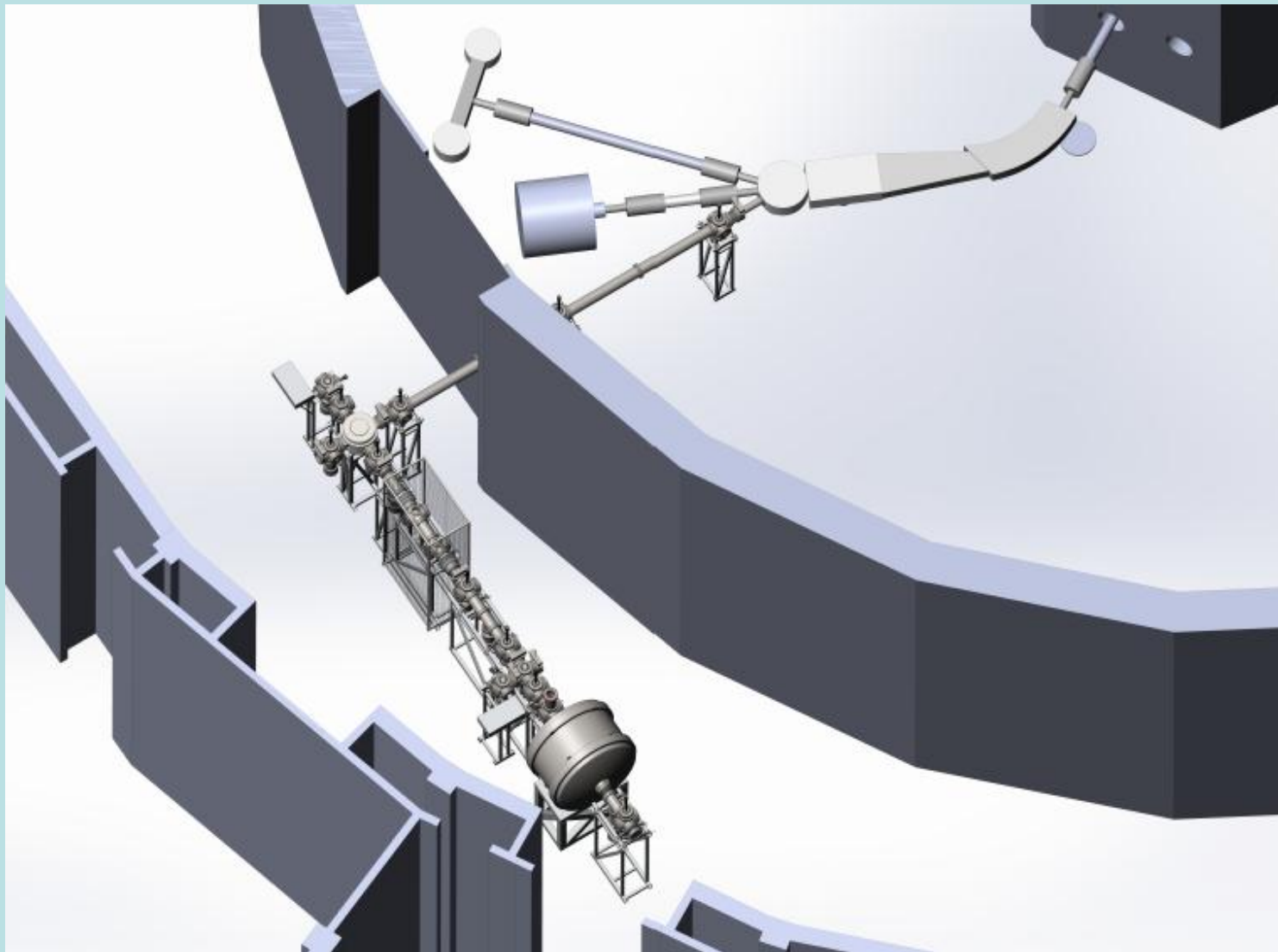
С использованием высокочувствительного метода резонансной лазерно-ионизационной спектроскопии будут проводиться измерения зарядовых радиусов и электромагнитных моментов большого числа ядер в наиболее интересных для ядерной физики областях дважды магических ядер ^{78}Ni и ^{132}Sn .

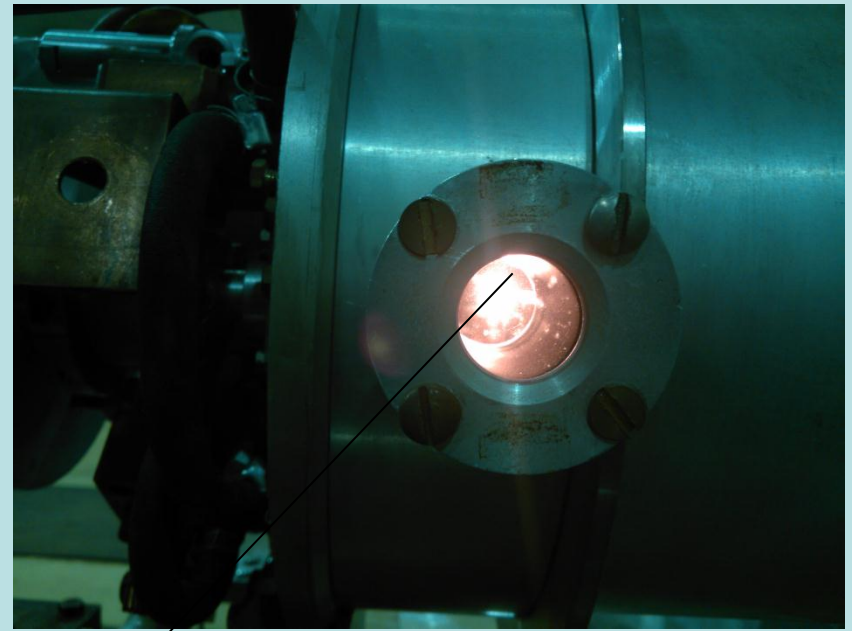
Кроме того, на радиоизотопном комплексе ИРИНА возможно получение сверхчистых радионуклидов для медицинского применения.

В НИКИЭТ разрабатывается проект нового канала 5-5' для расположения мишенно-оптической системы установки ИРИНА.

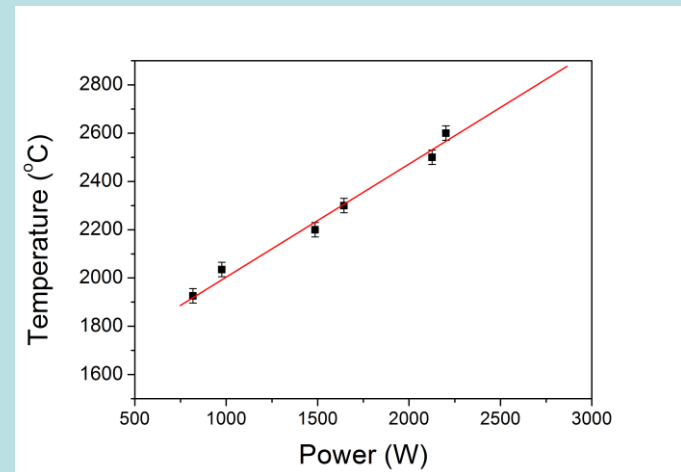
Разработано техническое задание на НИОКР мишенно-оптической системы установки ИРИНА, помещаемой в канал 5-5'

Установки ИРИНА и ПИТРАПТ на канале 5-5'





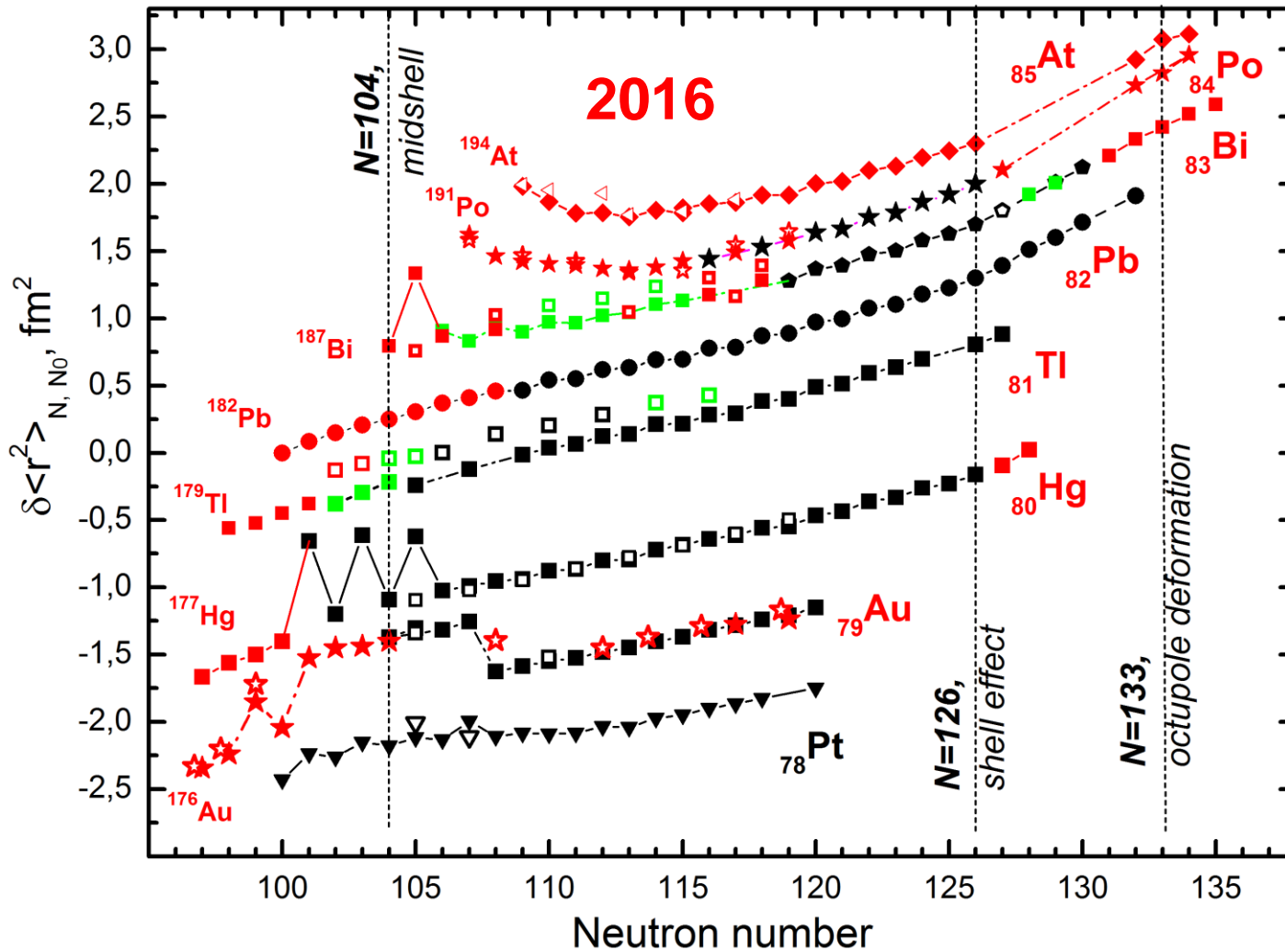
Нагрев источника-мишени при напряжении на вытягивающей электроде 30 кВ



Результаты расчетов для канала ГЭК 5-5'

Расстояние от центра канала, см	Плотность невозмущенного потока на оси канала, см ⁻² с ⁻¹	Энерговыведение в урановой мишени весом 3.5 грамм (обогащение 95%), Вт
0	$1.09 \cdot 10^{14}$	2730
10	$1.06 \cdot 10^{14}$	
20	$1.00 \cdot 10^{14}$	
30	$9.2 \cdot 10^{13}$	
40	$8.2 \cdot 10^{13}$	
50	$7.05 \cdot 10^{13}$	1790
60	$5.84 \cdot 10^{13}$	
70	$4.53 \cdot 10^{13}$	
80	$3.21 \cdot 10^{13}$	
90	$1.95 \cdot 10^{13}$	
100	$1.05 \cdot 10^{13}$	
110	$5.95 \cdot 10^{12}$	

Лазерная спектроскопия в лазерном ионном источнике





1 H																	2 He	
3 Li	4 Be	<div style="display: flex; align-items: center; gap: 10px;"> <div style="width: 20px; height: 20px; background-color: red;"></div> New Schemes tested at ISOLDE in 2014/15 </div>														10 Ne		
11 Na	12 Mg	<div style="display: flex; align-items: center; gap: 10px;"> <div style="border: 1px solid black; padding: 2px;">Z</div> <div style="border: 1px solid black; padding: 2px;">X</div> <div style="font-size: 8px;">Efficiency (%) TlSa Dye</div> </div>														18 Ar		
19 K	20 Ca	21 Sc	22 Ti	23 V	24 Cr	25 Mn	26 Fe	27 Co	28 Ni	29 Cu	30 Zn	31 Ga	32 Ge	33 As	34 Se	35 Br	36 Kr	
37 Rb	38 Sr	39 Y	40 Zr	41 Nb	42 Mo	43 Tc	44 Ru	45 Rh	46 Pd	47 Ag	48 Cd	49 In	50 Sn	51 Sb	52 Te	53 I	54 Xe	
55 Cs	56 Ba			72 Hf	73 Ta	74 W	75 Re	76 Os	77 Ir	78 Pt	79 Au	80 Hg	81 Tl	82 Pb	83 Bi	84 Po	85 At	86 Rn
87 Fr	88 Ra	104 Rf	105 Db	106 Sg	107 Bh	108 Hs	109 Mt	110 Ds	111 Rg	112 Cn	113 Uut	114 Uuq	115 Uup	116 Uuh	117 Uus	118 Uuo		

57 La	58 Ce	59 Pr	60 Nd	61 Pm	62 Sm	63 Eu	64 Gd	65 Tb	66 Dy	67 Ho	68 Er	69 Tm	70 Yb	71 Lu
89 Ac	90 Th	91 Pa	92 U	93 Np	94 Pu	95 Am	96 Cm	97 Bk	98 Cf	99 Es	100 Fm	101 Md	102 No	103 Lr

- Dye schemes tested
- Ti:Sa and Dye schemes tested
- Feasible
- Released from ISOLDE target
- Not released
-

Achieved in 2016 at ISOLDE: **Eu**, **Te** efficiency, alternative **Bi** scheme, **Ra**, **Fe**