

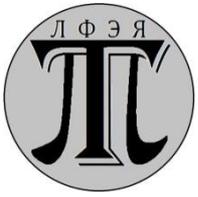
Проект ПИТРАП-ионной ловушки на реакторе ПИК

Ю.Н. Новиков



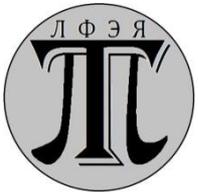
Семинар ОФВЭ ПИЯФ

23 апреля 2015 г.



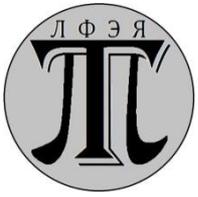
Тематика доклада

1. Физические задачи проекта ПИТРАП (Яд.Ф. и Астро-Ф.)
2. Место ПИТРАП в ансамбле других международных проектов. Возможности коллаборации с ними.
3. Технические принципы создания комплекса установок проекта ПИТРАП. Материально-техническая база.
4. Что выполнено к настоящему времени (НИР, предпосылки НИОКР, публикации)? Ближайшие задачи.



Действующие и планируемые on-line установки с ионными ловушками Пеннинга

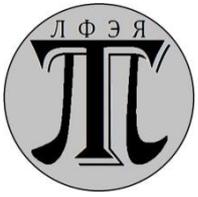




Установка TRIGA-TRAP как прообраз ПИТРАП

В настоящее время единственной установкой с ионной ловушкой на реакторе является TRIGA-TRAP в Майнце (Германия) [1]. Однако малая мощность реактора, на несколько порядков величины уступающей ПИК, существенно ограничивает возможности системы.

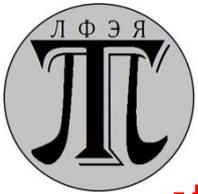




Уникальные возможности ПИЯФ

- Высокопоточный реактор ПИК,
- Возможность установки высокочувствительной и высокопрецизионной установки для измерения масс нуклидов и их времён жизни,
- Наличие единственной в России группы ЛФЭЯ, специализирующейся в работе с ионными ловушками (в коллаборациях с немецкими группами в Дармштадте, Майнце, Хайдельберге, финской группой в Ювяскюля, группой в ЦЕРНе),

Прекрасные условия для синергии



Основные направления с использованием ионной ловушки ПИТРАП в фундаментальной физике

*Прямые высокоточные измерения масс (и времён жизни)
нуклидов в целях:*

On-line

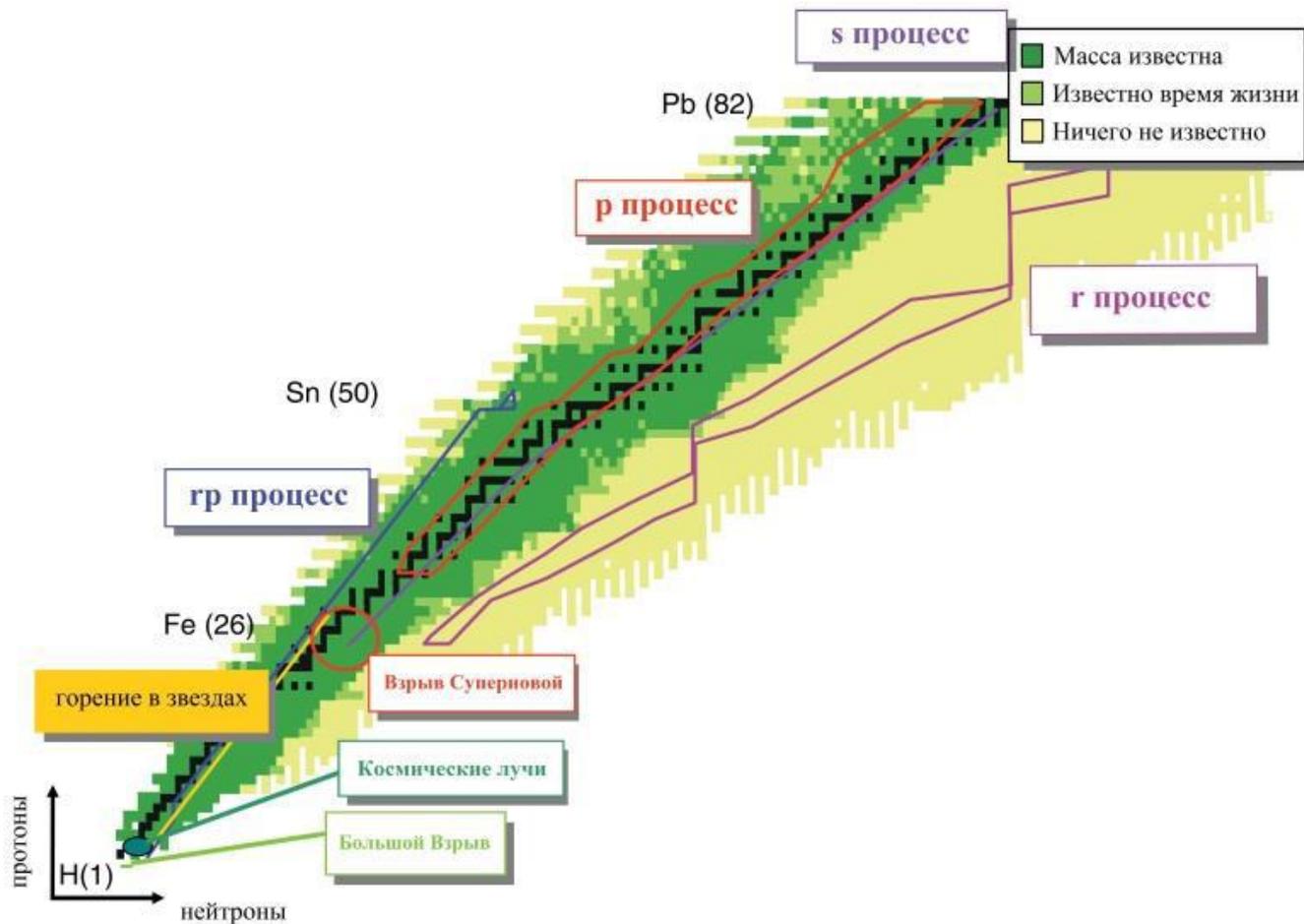
- Ядерная физика (ландшафт массовой поверхности экзотических нуклидов, ядерная изомерия, формулы масс, пост-ловушечная спектроскопия),
- Астрофизика – свойства r -процесса; определение пути r -процесса.

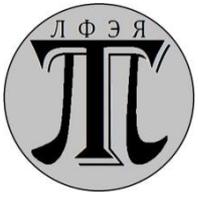
Off-line

- Астрофизика – свойства s -процесса (космохронология)
- Нейтринная физика (закон сохранения лептонного заряда, существование тяжёлых «стерильных» нейтрино),

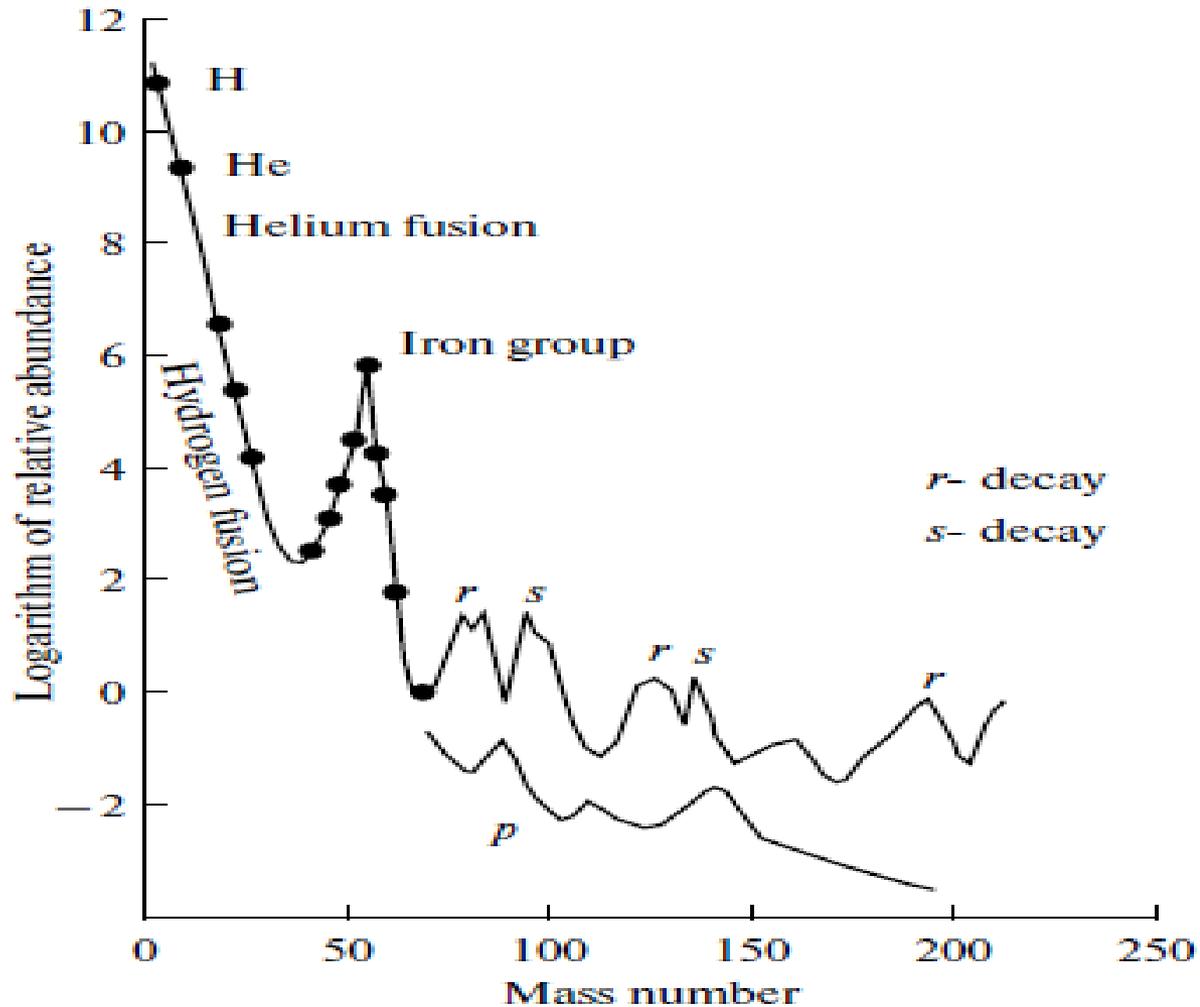


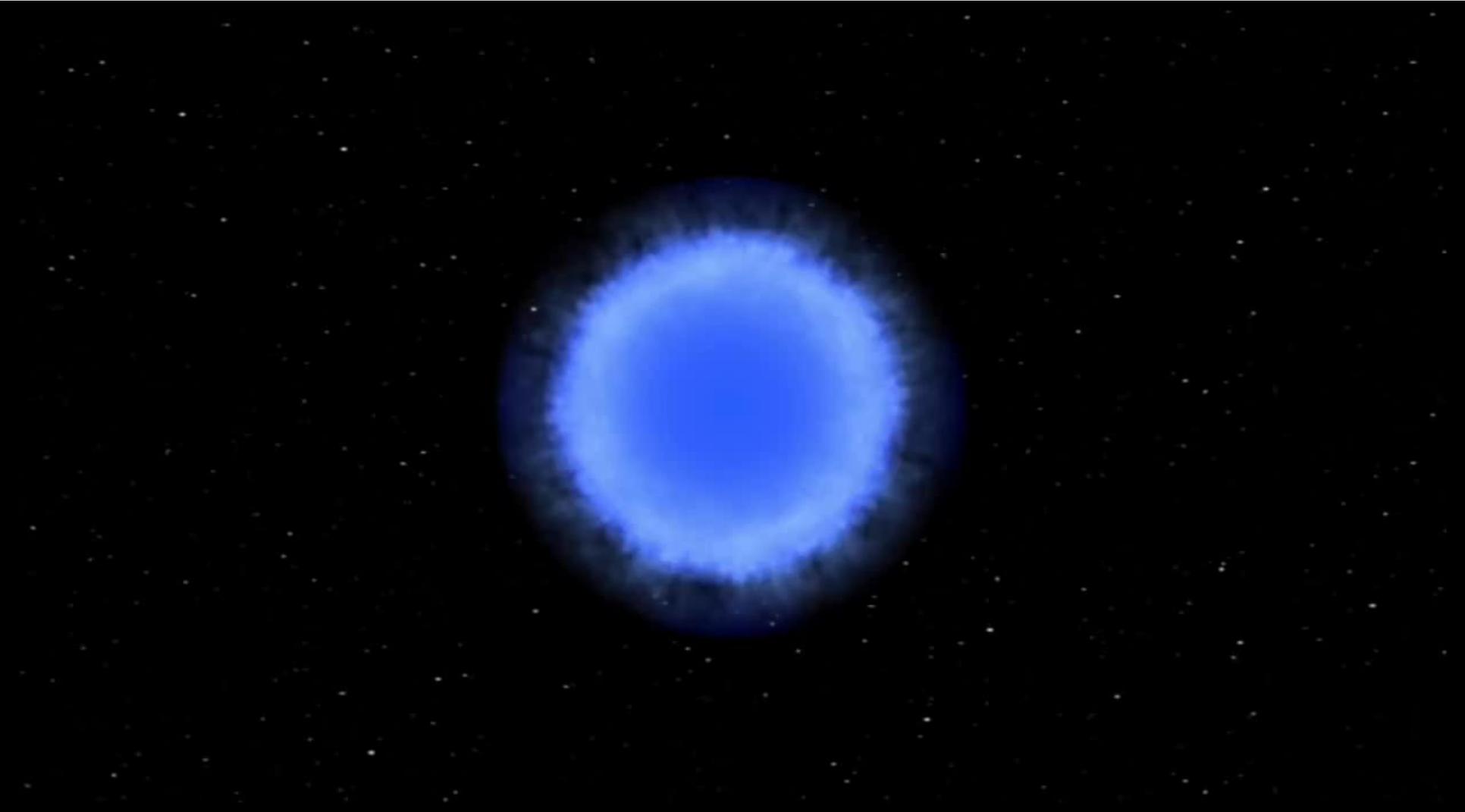
«Астрофизическая» карта нуклидов

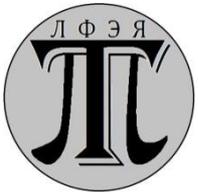




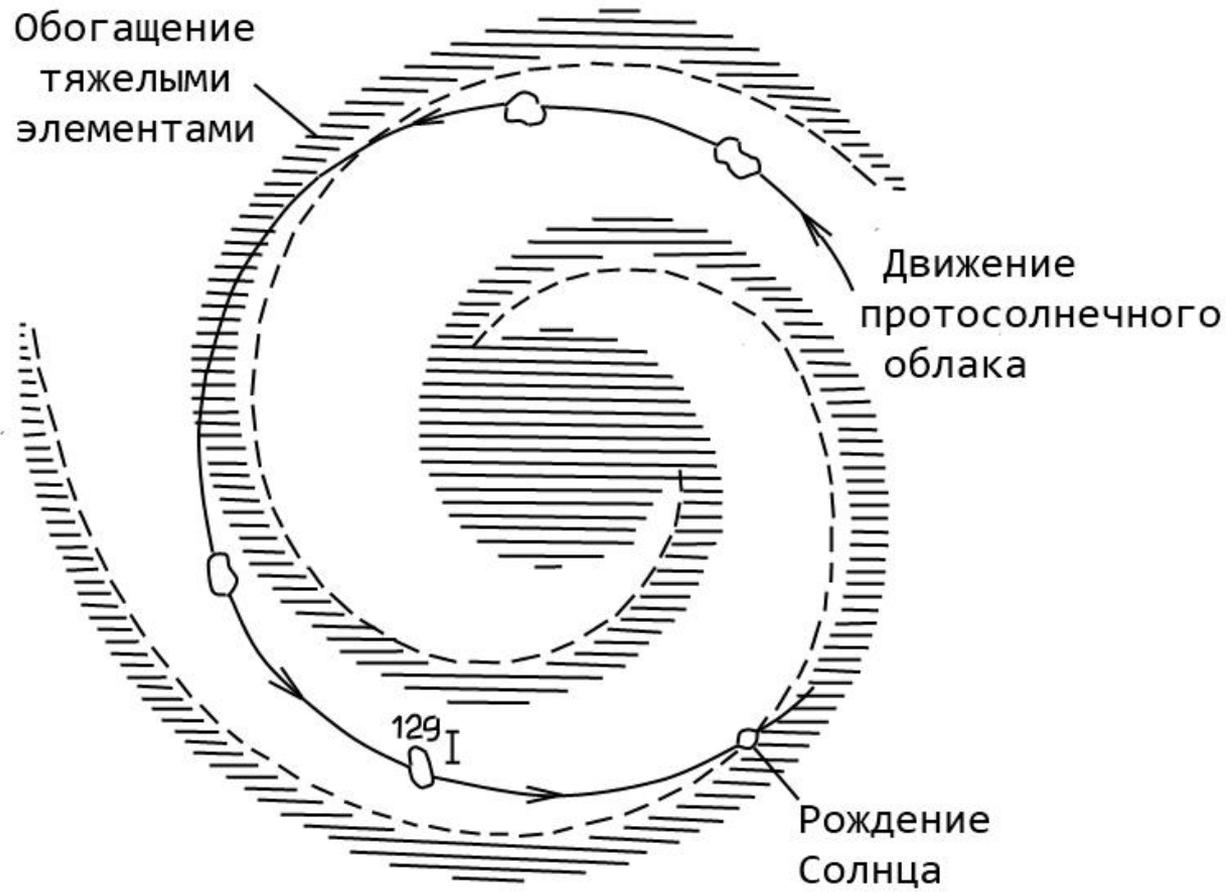
Распространённость элементов в природе

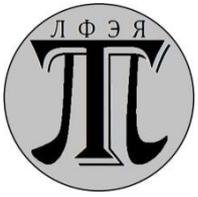






Обогащение солнечной системы химическими элементами





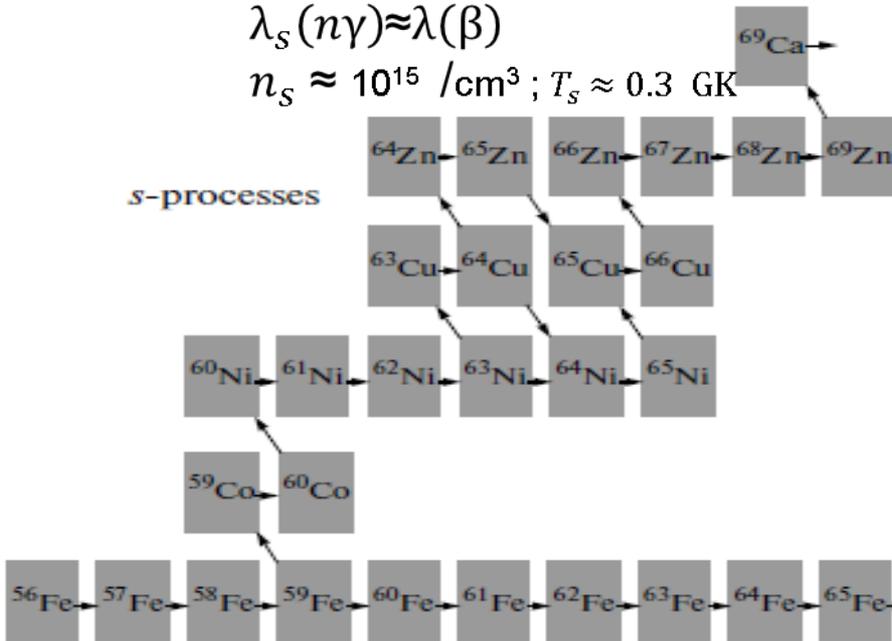
Сравнение нуклидных путей r - и s -процессов

$$\lambda(n\gamma) = \langle \sigma v \rangle n_n$$
$$\lambda(\beta) \approx Q_\beta^5 / 10^4 \text{ s}^{-1}$$

$$\lambda_s(n\gamma) \approx \lambda(\beta)$$

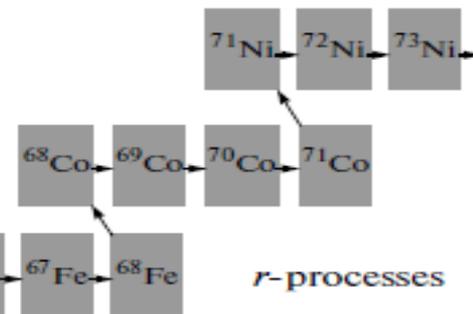
$$n_s \approx 10^{15} / \text{cm}^3 ; T_s \approx 0.3 \text{ GK}$$

s-processes

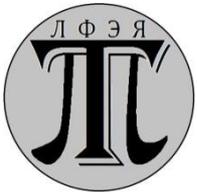


$$\lambda_r(n\gamma) \gg \lambda(\beta)$$

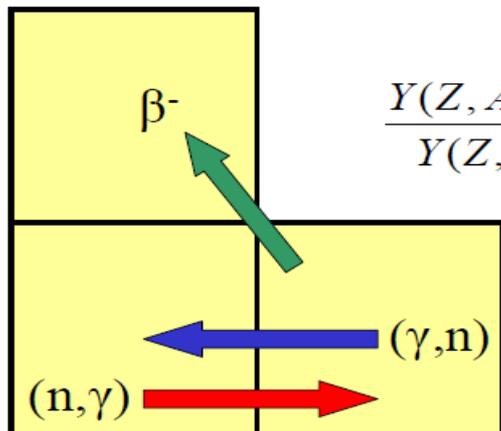
$$n_r \approx 10^{24} / \text{cm}^3 ; T_r \gg 1 \text{ GK}$$



r-processes



Статистическое равновесие в r-процессе



Abundances:

$$\frac{Y(Z, A+1)}{Y(Z, A)} = n_n \frac{G(Z, A+1)}{2G(Z, A)} \left[\frac{A+1}{A} \frac{2\pi\hbar^2}{m_u kT} \right]^{3/2} \exp(S_n / kT)$$

$Y(Z, A) \equiv$ abundance of nuclide (Z, A)

$n_n \equiv$ neutron number density

$m_u \equiv$ mass of 1 u

$G(Z, A) \equiv$ nuclear partition function

$S_n \equiv$ neutron separation energy

Abundance maxima:

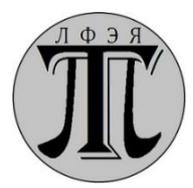
$$\frac{dY}{dA} = 0$$

$$\overline{S_n} = kT \ln \left[\frac{2}{n_n} \left(\frac{m_u kT}{2\pi\hbar^2} \right)^{3/2} \right]$$

Independent of neutron capture cross-section!!!

$T=1.5 \text{ GK}$, $n_n=10^{24} / \text{cm}^3$, $S_n \sim 3 \text{ MeV}$ *Courtesy of J. Clark(UM)*

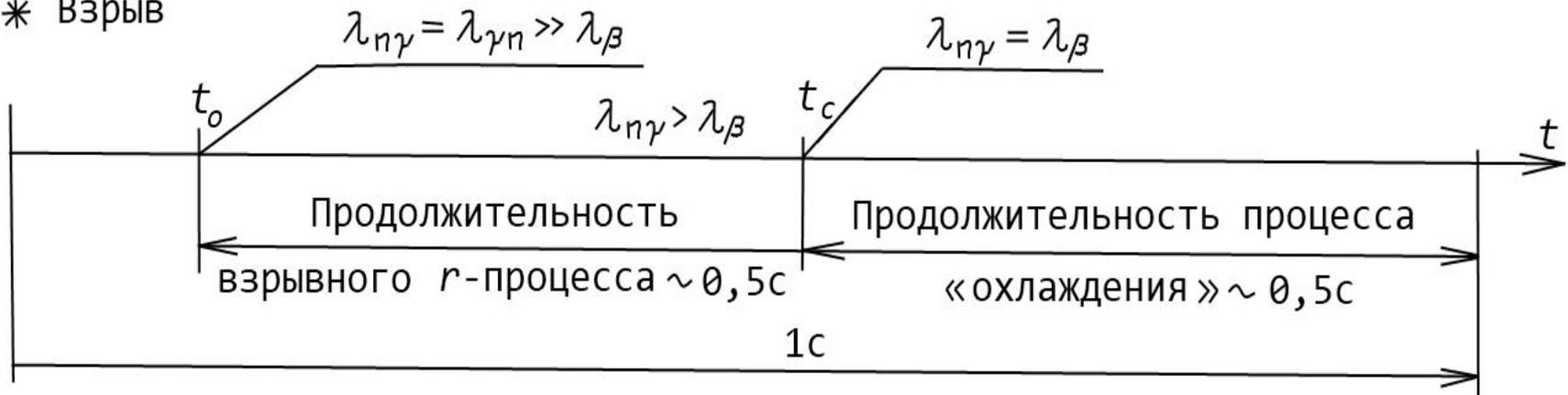
$$S_n = M(Z, N - 1) - M(Z, N) + m_n$$



Взрыв и охлаждение r -процесса

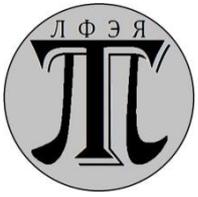
(картинка В.П. Чечева)

* Взрыв



t_0 - начало взрывного r -процесса

t_c - начало «охлаждения»



Развитие теории r -процесса

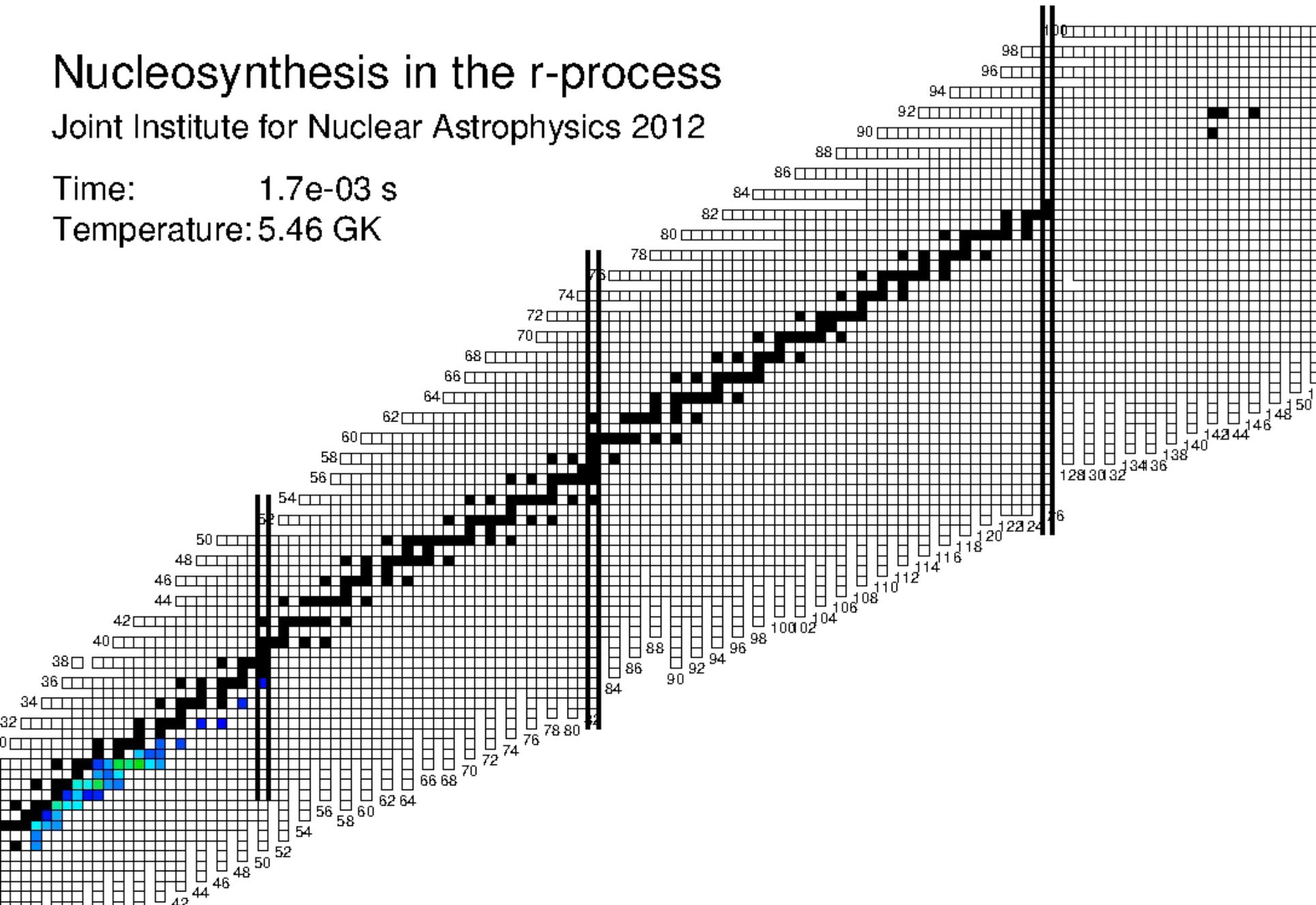
- Классическая «статическая» теория -М.иДж. Бербиджи, У. Фаулер, Ф. Хойл. (1957)
- Теория с разным набором параметров для пиков распространённости r -нуклидов с $A \approx 80$, $A \approx 130$, $A \approx 165$ и $A \approx 195$
- Теория «перезикловки» с r -процессом на осколках деления
- «Динамическая теория» с переменными величинами p_n и T_9
- «Двойной» r -процесс

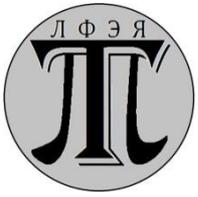
Nucleosynthesis in the r-process

Joint Institute for Nuclear Astrophysics 2012

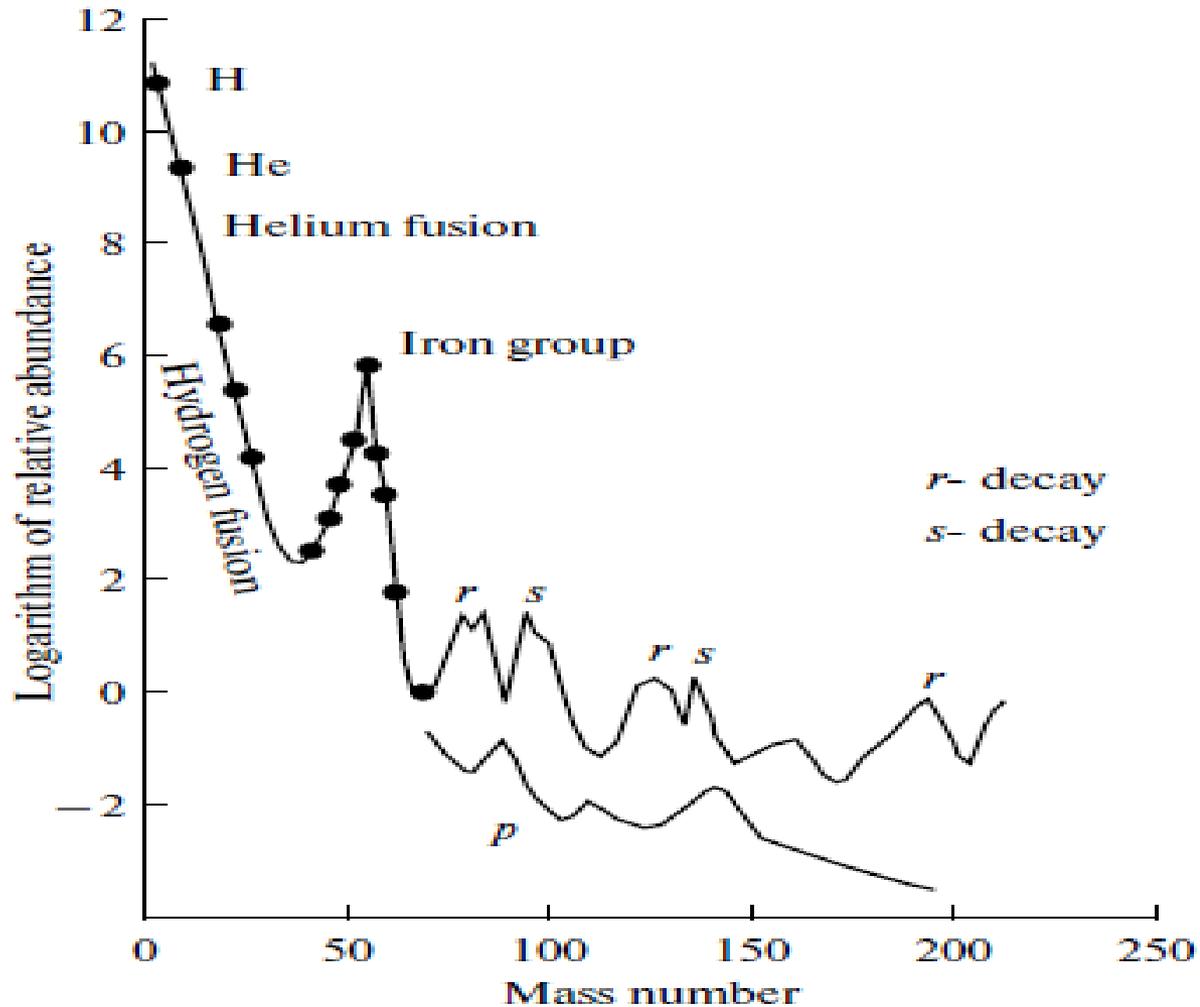
Time: 1.7×10^{-3} s

Temperature: 5.46 GK





Распространённость элементов в природе



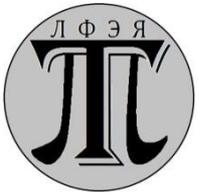
**«Чем дальше эксперимент от теории,
тем он ближе к Нобелевской премии»**

Ф. Жолио -Кюри



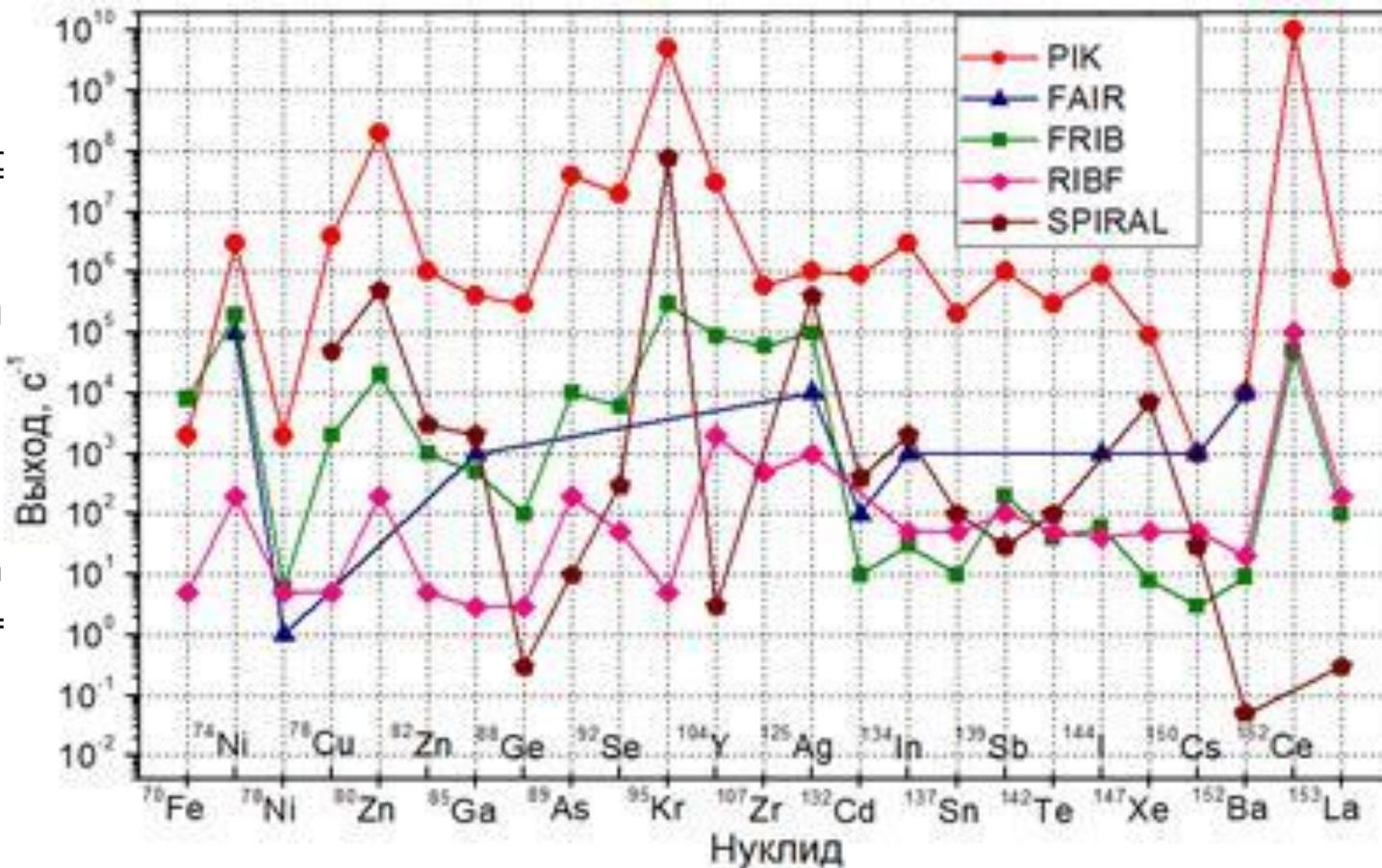
Какие свойства нуклидов представляют интерес для процесса быстрого захвата нейтронов (r-процесса) ?

- Ландшафт массовой поверхности экзотических нуклидов – абсолютные значения масс основных и долгоживущих изомерных состояний, → **путь процесса**
- Времена жизни основных и долгоживущих изомерных состояний, → **развитие процесса во времени**
- Ветвление распада на запаздывающие процессы (нейтронные, деление) → **корректный расчёт распространённости элементов в природе**



Сравнительная продуктивность различных установок

- ПИК:
U=1.5 г, 310^{13}
- FAIR:
U =1 мкА frag
on Be =4 г
- FRIB:
U=1 мкА frag
- RIBF:
U=10 нА frag
on Pb=0.6 г
- SPIRAL:
neutrons from
d-beam on U=
280 г.





Оценка скорости генерации нуклидов в мишени ^{235}U при облучении тепловыми нейтронами с потоком $I_n=3 \times 10^{13} \text{ н/см}^2/\text{с}$. Для нейтроноизбыточных нуклидов с зарядом Z и неизвестными или неточными значениями масс показаны периоды полураспада $T_{1/2}$, выход нуклидов на одно деление и скорости генерации нуклидов в вариантах тонкой "холодной" мишени и массивной "горячей" мишени.

Нуклид	Z	$T_{1/2}$, мс [10]	Выход нуклидов на одно деление [11]	Скорость генерации, с^{-1} ("холодная" мишень)	Скорость генерации, с^{-1} ("горячая" мишень)
^{74}Ni	28	680(120)	5,0E-08	5,4E+06	7,5E+06
^{78}Cu	29	335(11)	8,3E-08	9,0E+06	1,2E+07
^{80}Zn	30	550(11)	3,6E-06	3,9E+08	5,4E+08
^{84}Ga	31	85(10)	1,7E-07	1,8E+07	2,6E+07
^{85}Ge	32	540(50)	2,4E-05	2,6E+09	3,6E+09
^{87}As	33	610(120)	1,1E-04	1,2E+10	1,7E+10
^{91}Se	34	270(50)	6,9E-06	7,5E+08	1,0E+09
^{93}Br	35	102(10)	1,9E-05	2,1E+09	2,9E+09
^{95}Kr	36	114(3)	1,0E-04	1,1E+10	1,5E+10
^{100}Rb	37	48(3)	3,9E-08	4,2E+06	5,9E+06
^{102}Sr	38	69(6)	4,8E-07	5,2E+07	7,2E+07
^{102}Y	39	298(9)	1,1E-04	1,2E+10	1,7E+10
^{130}Cd	48	162(7)	7,3E-06	7,9E+08	1,1E+09
^{133}In	49	165(3)	3,1E-06	3,3E+08	4,7E+08
^{134}Sn	50	1050(11)	1,3E-04	1,4E+10	2,0E+10
^{136}Sb	51	923(14)	2,1E-03	2,3E+11	3,2E+11
^{138}Te	52	1400(400)	9,4E-04	1,0E+11	1,4E+11
^{141}I	53	430(20)	2,1E-04	2,3E+10	3,2E+10
^{145}Xe	54	188(4)	3,7E-06	4,0E+08	5,6E+08
^{148}Cs	55	146(6)	1,6E-07	1,7E+07	2,4E+07
^{150}Ba	56	300	5,9E-07	6,4E+07	8,9E+07
^{150}La	57	510(30)	1,1E-04	1,2E+10	1,7E+10

Мишень для газ. носителя

фольга ^{235}U

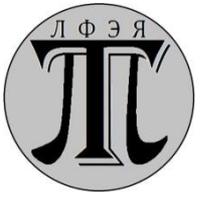
вес 1.5 г

площадь 150 см^2

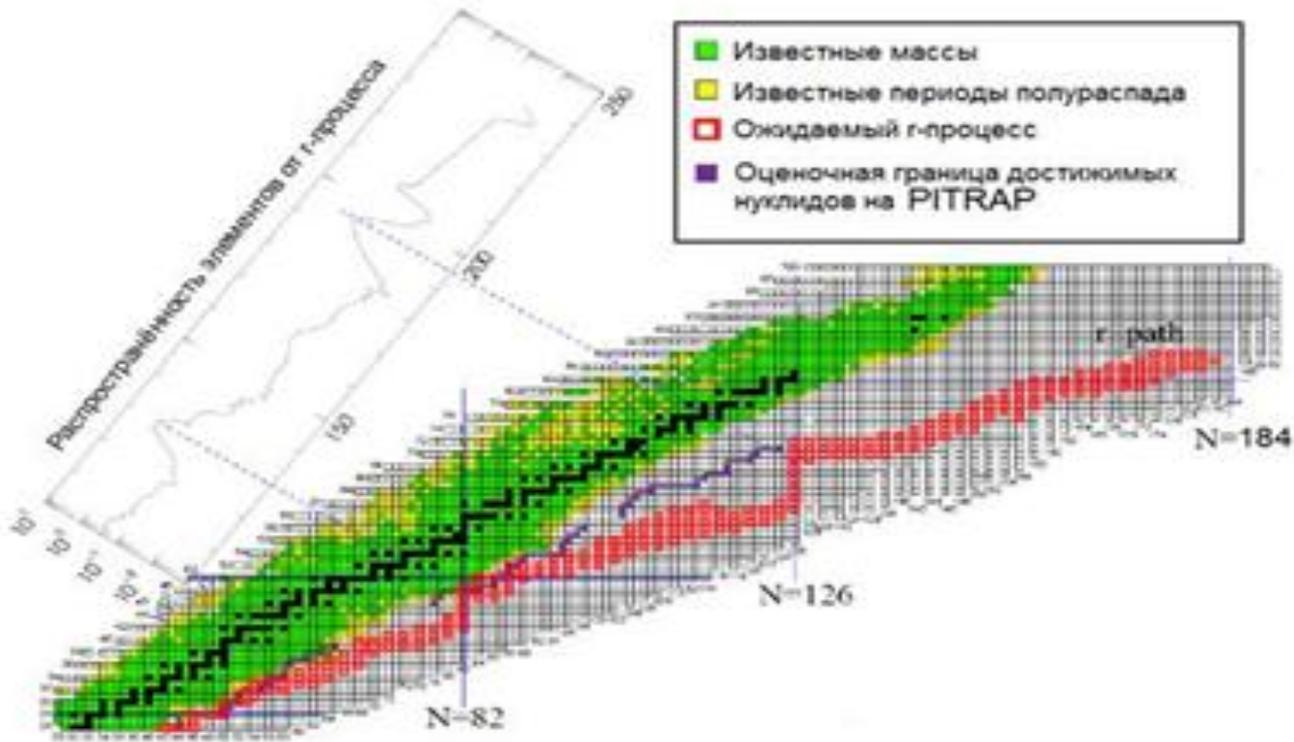
$2.5 \cdot 10^{19} \text{ ат/см}^2$

Поток нейтронов $3 \cdot 10^{13} / \text{см}^2 \text{ с}$

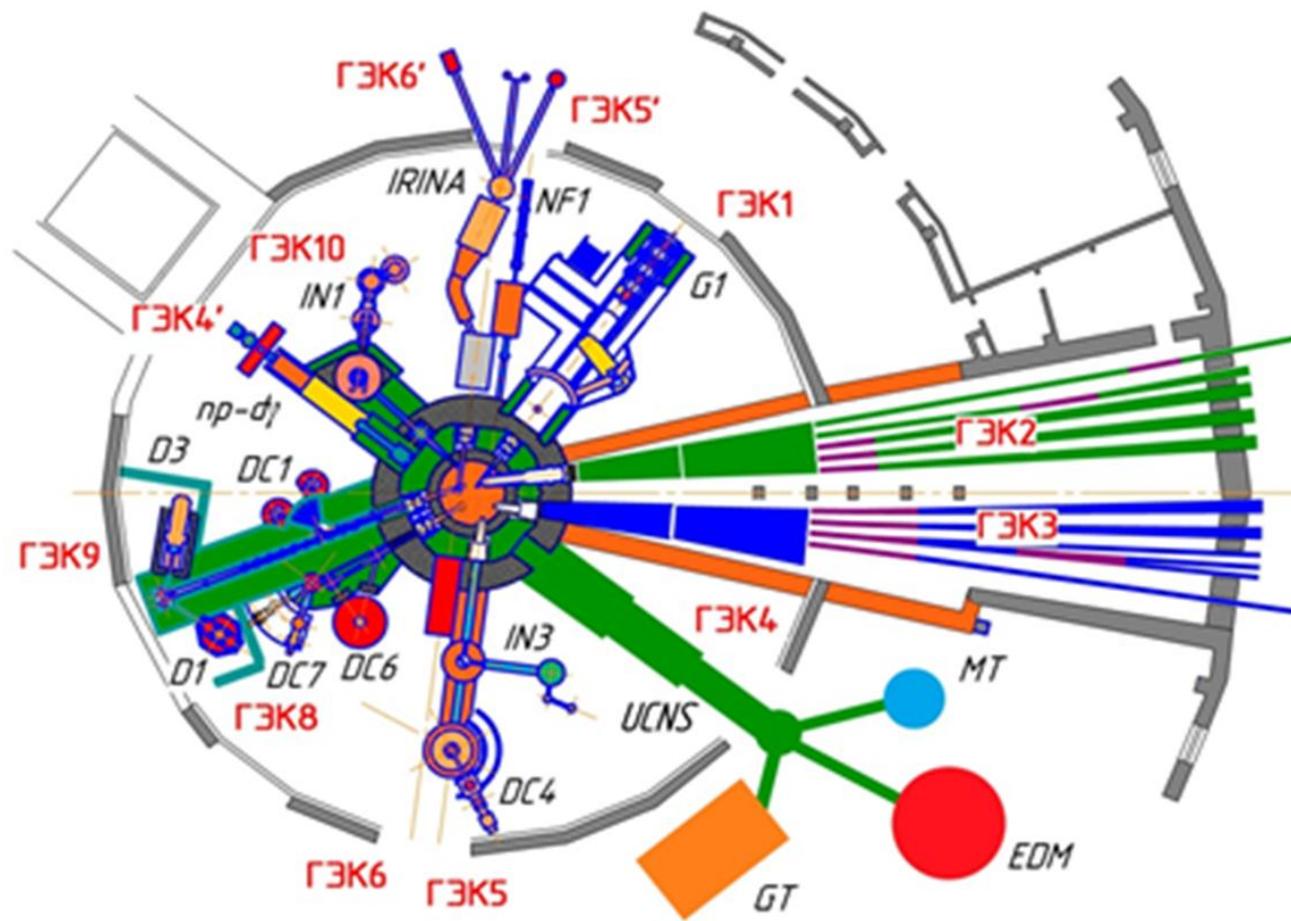
Выделяемая мощность 1.5 кВт



Карта нуклидов с ожидаемым путём r -процесса и границей достижимых нуклидов на ПИТРАПе

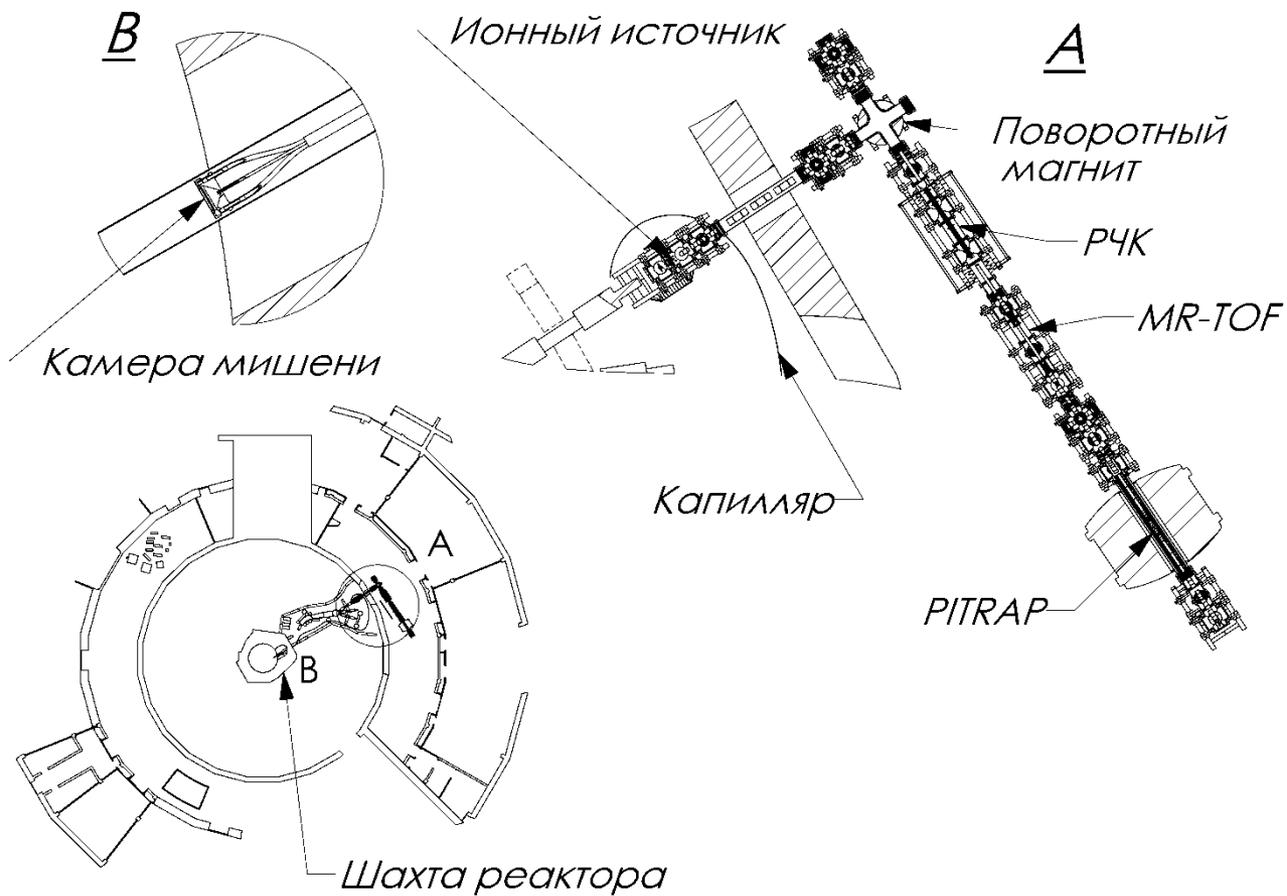


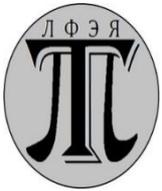
Зал горизонтальных каналов ПИК



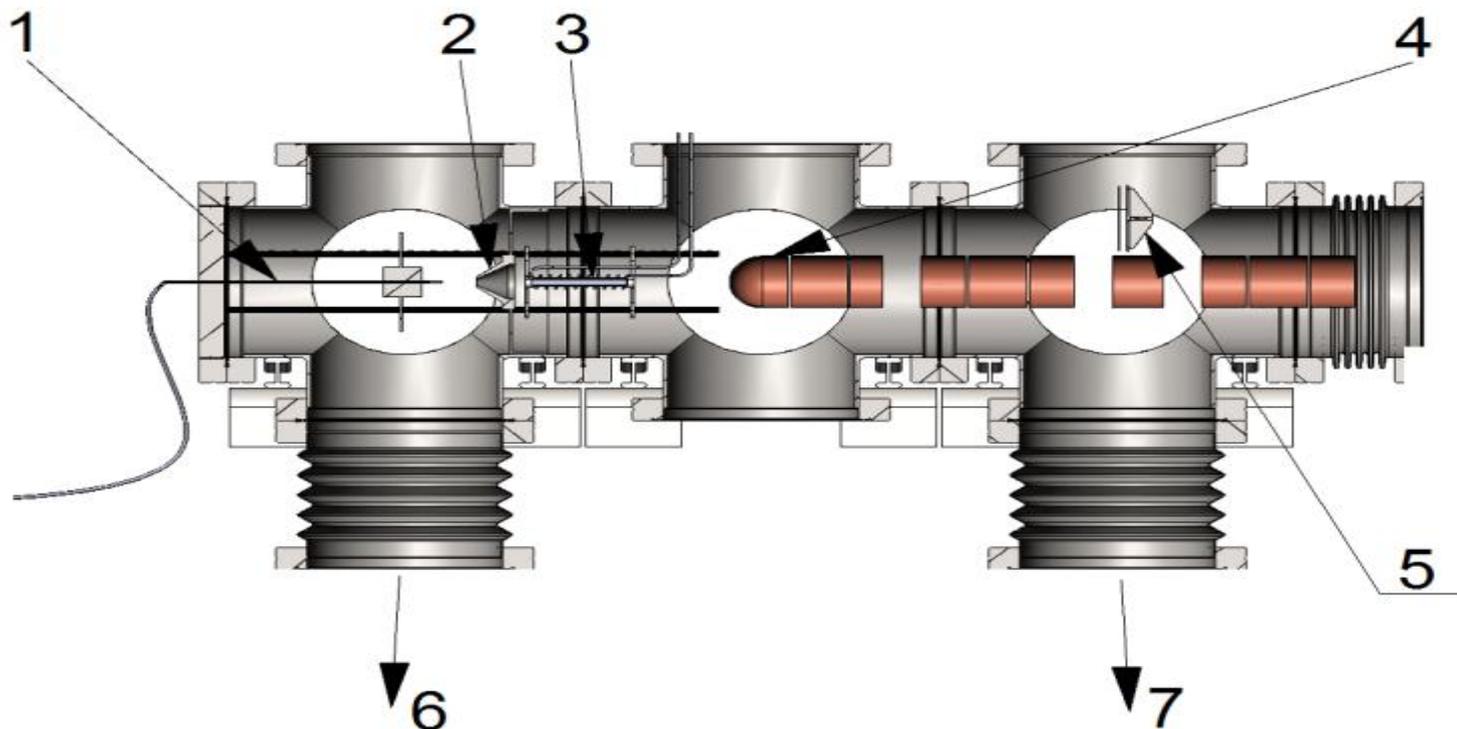


Расположение тракта ловушки в измерительном зале и мишени с газовым носителем в горизонтальном канале ПИК

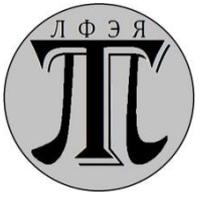




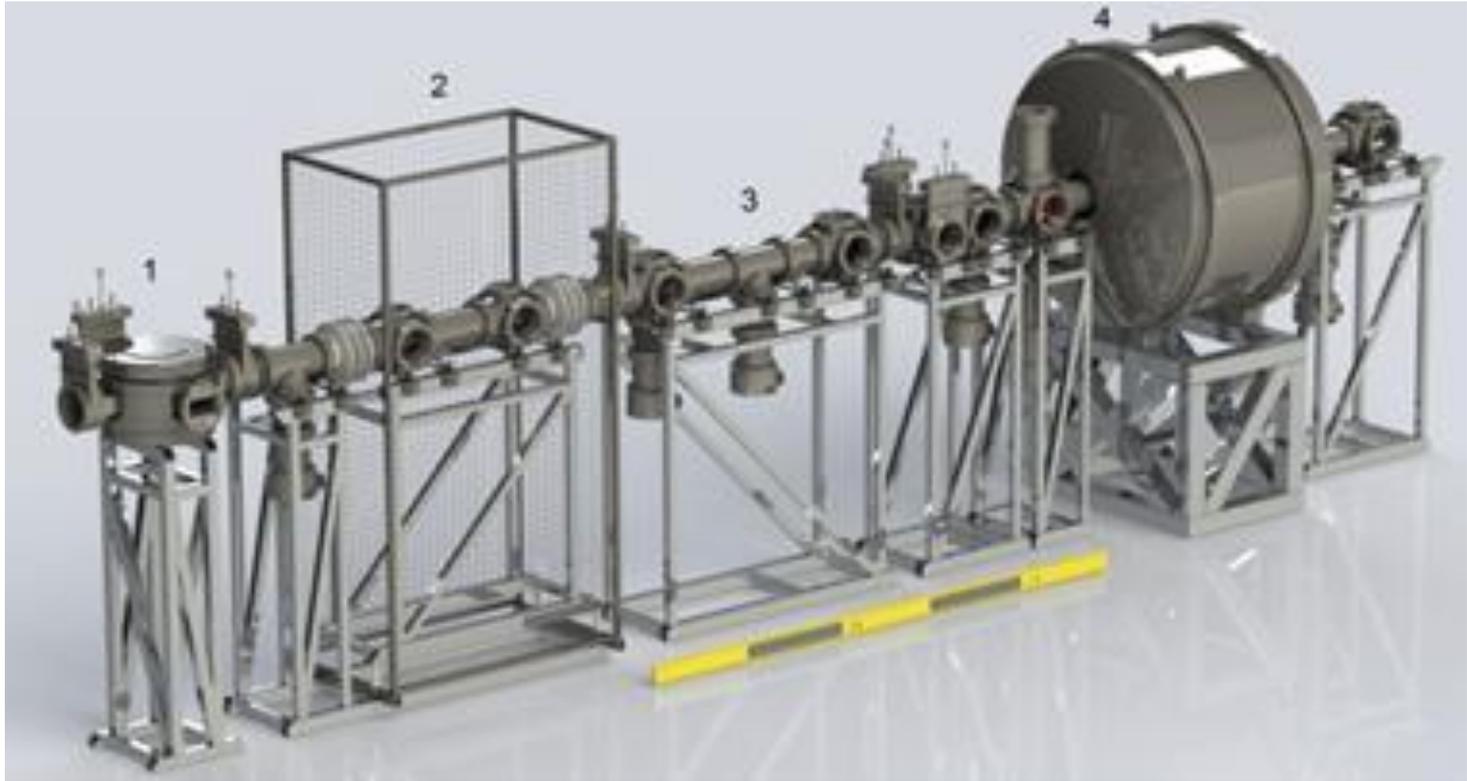
Приёмная часть и ионизационный узел в варианте газового носителя продуктов



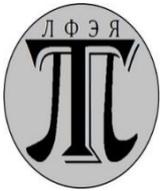
Узел поверхностно-ионизационного источника, состоящий из капилляра(1), скиммера (2), ионизационной трубки (3), вытягивающих электродов (4), показанных схематично, и детекторной станции (5).



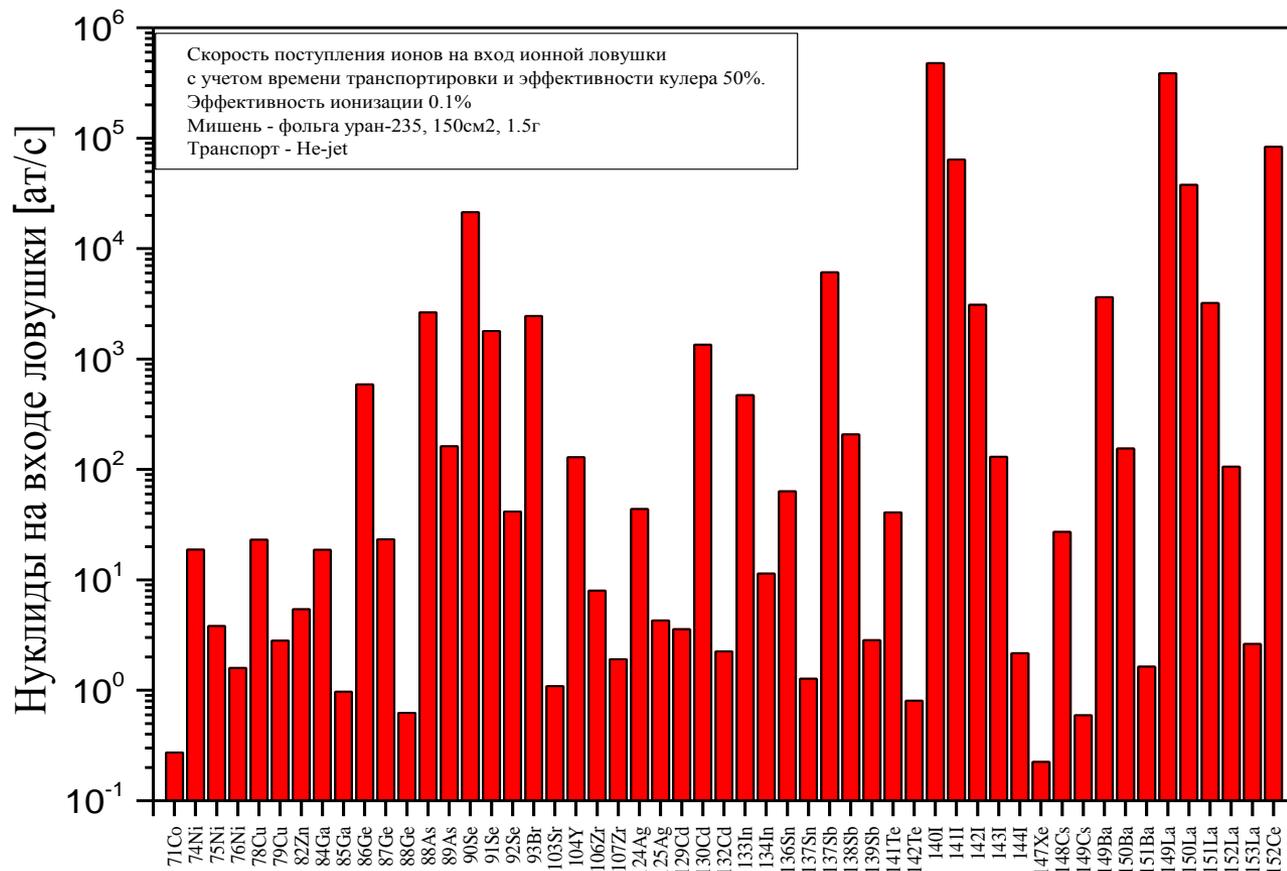
Макет основной трассы ПИТРАП с ионной ловушкой

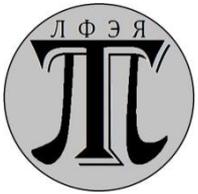


Макет установки ПИТРАП, состоящей из следующих основных элементов: поворотного магнита (1), газонаполненного радиочастотного квадруполья (2), времяпролётного масс-анализатора (3), сверхпроводящего магнита с ловушками Пеннинга (4).

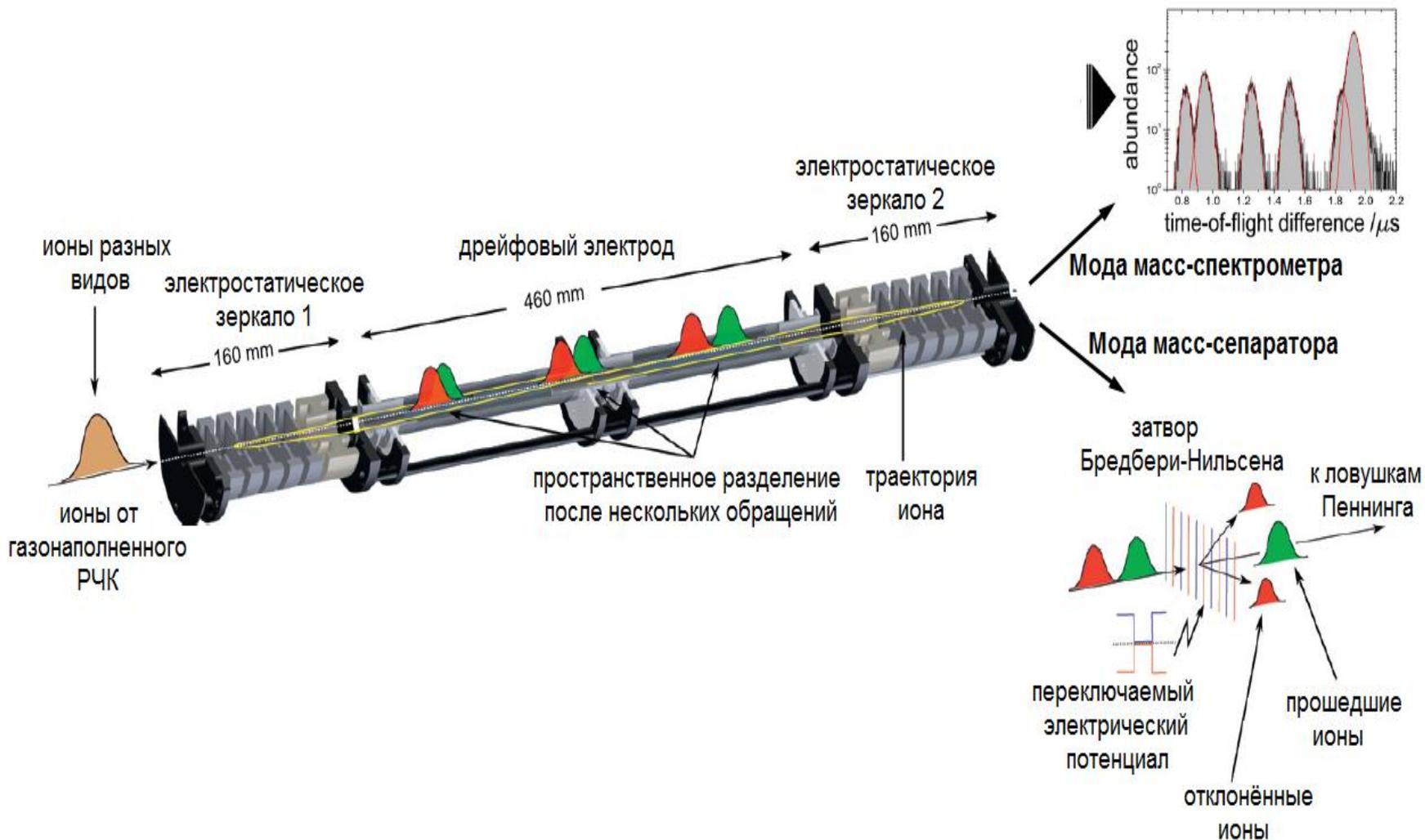


Выходы нуклидов на ловушке





Время-пролётный масс-спектрометр



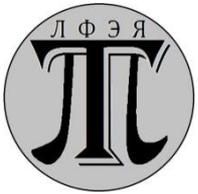
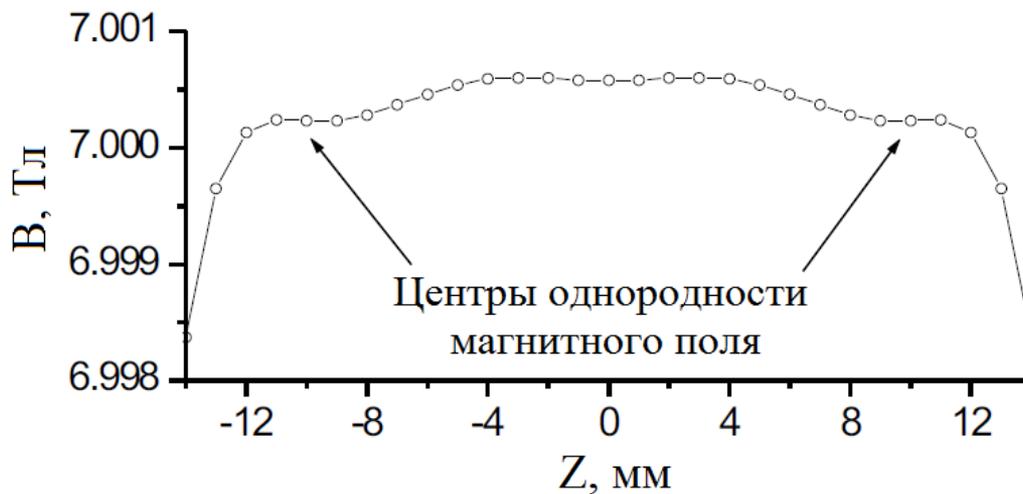
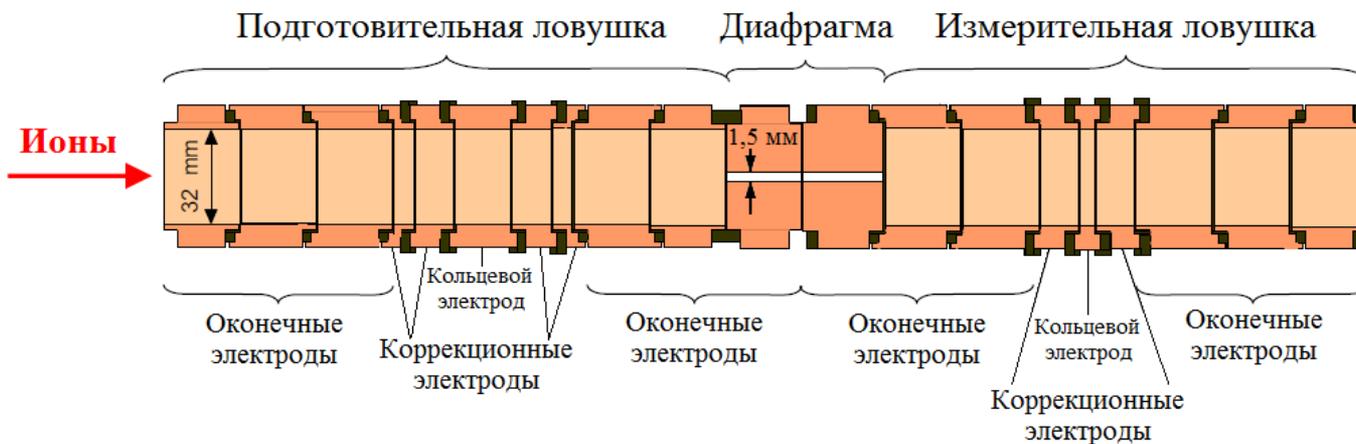


Схема системы из двух ловушек Пеннинга (подготовительной и измерительной)



Движение ионов в ловушке

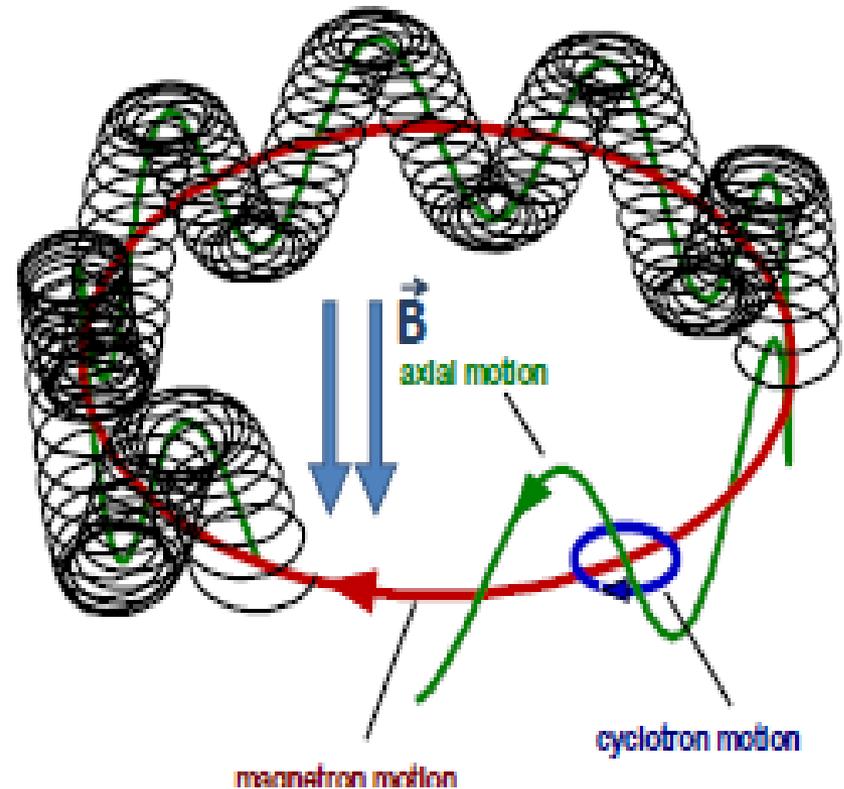
Удержание ионов внутри ловушки Пеннинга осуществляется сильным магнитным полем и слабым электрическим.

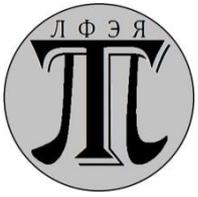
$$\omega_c = \frac{qB}{m}$$

$$\omega_+ = \frac{\omega_c}{2} + \sqrt{\frac{\omega_c^2}{4} - \frac{\omega_z^2}{2}}$$

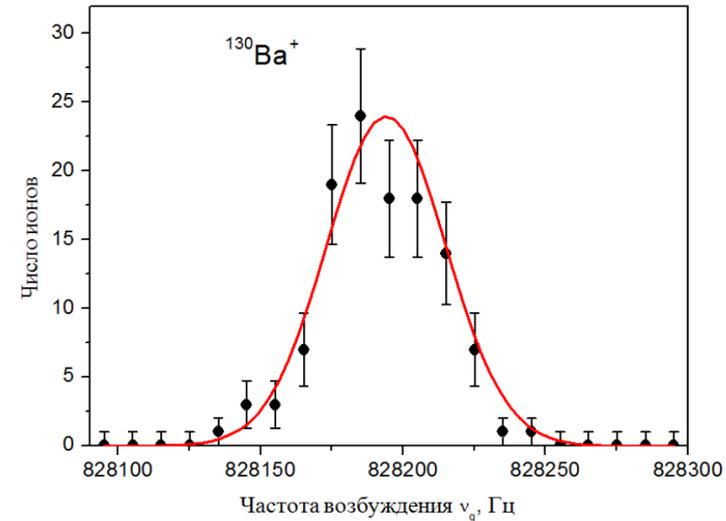
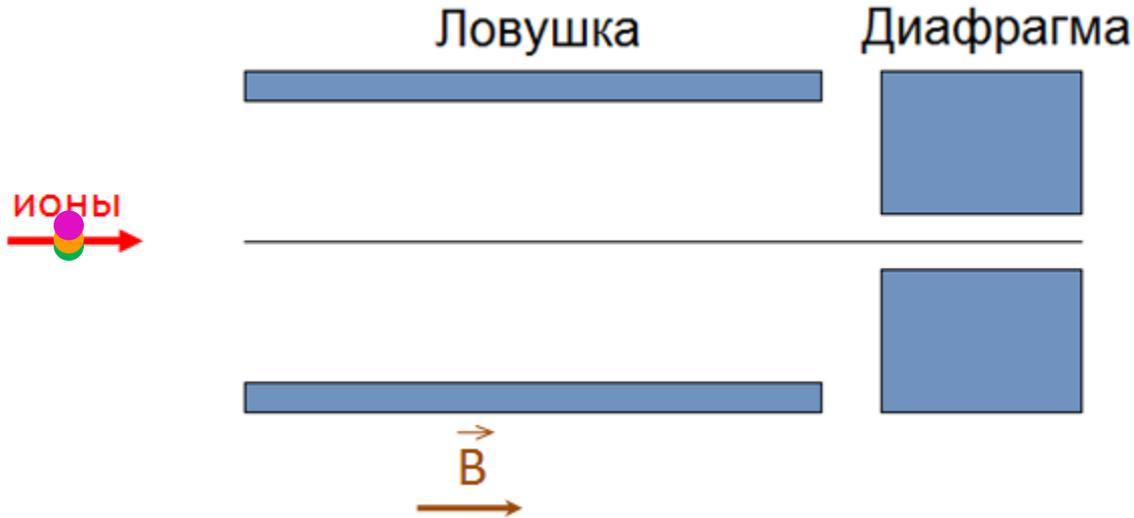
$$\omega_z = \sqrt{\frac{2qV_0}{mr_0^2}}$$

$$\omega_- = \frac{\omega_c}{2} - \sqrt{\frac{\omega_c^2}{4} - \frac{\omega_z^2}{2}}$$

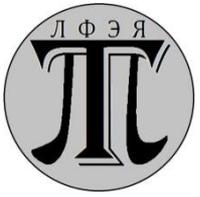




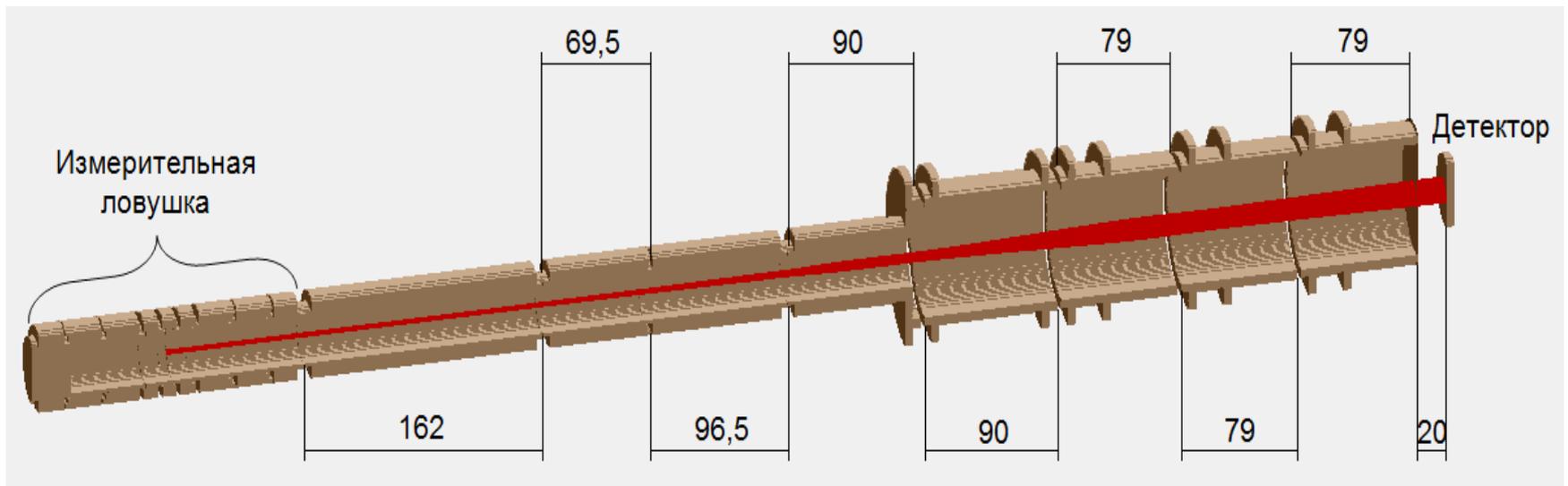
Подготовительная ловушка Пеннинга: охлаждение в буферном газе

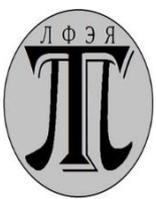


- ◇ Давление буферного газа (гелий) $\approx 10^{-6}$ мбар
- ◇ Время охлаждения ≈ 100 мс
- ◇ Разрешающая способность $\approx 10^5$
- ◇ Число ионов в ловушке < 100
- ◇ Зарядовые состояния ионов: $1+$, $2+$

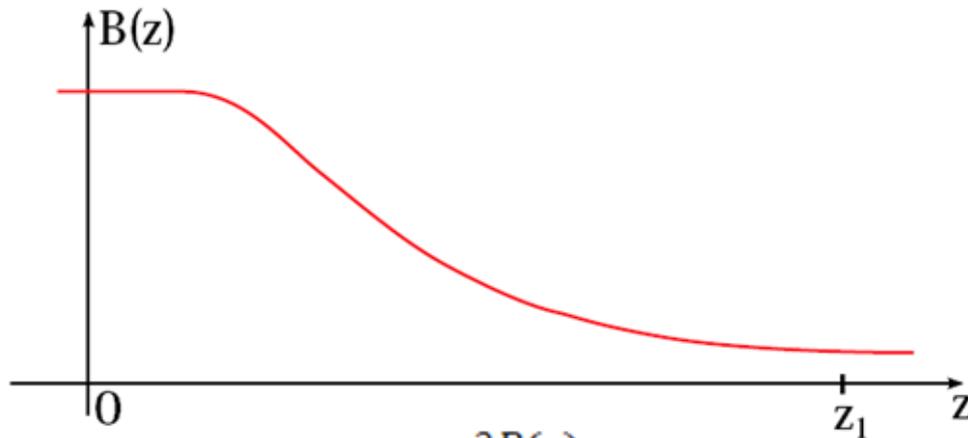
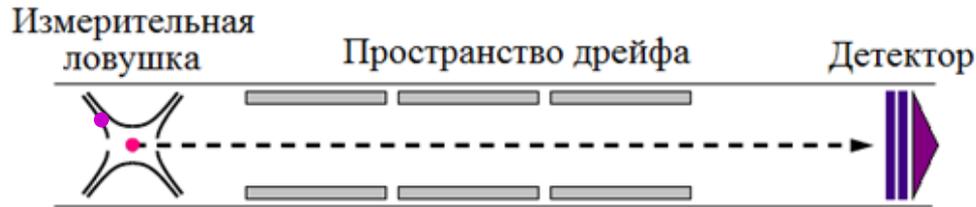


Продольный разрез схемы ионно-оптического тракта за измерительной ловушкой





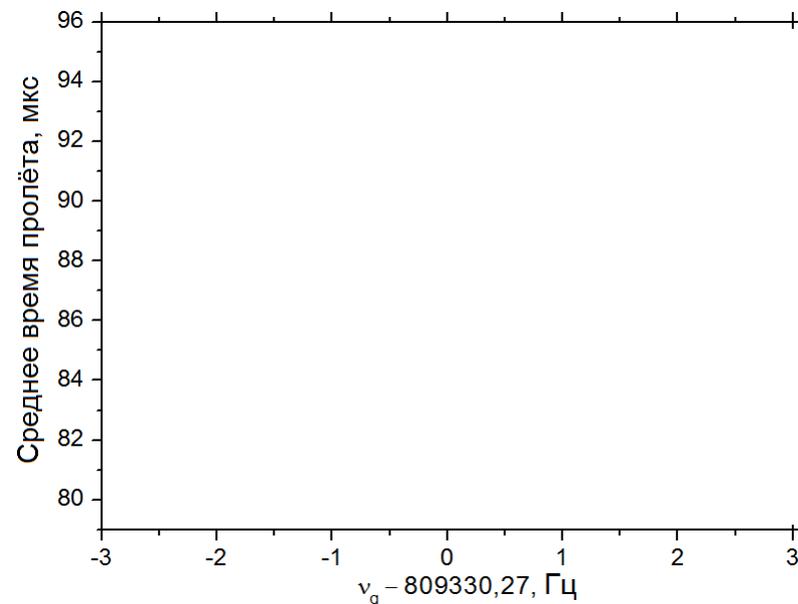
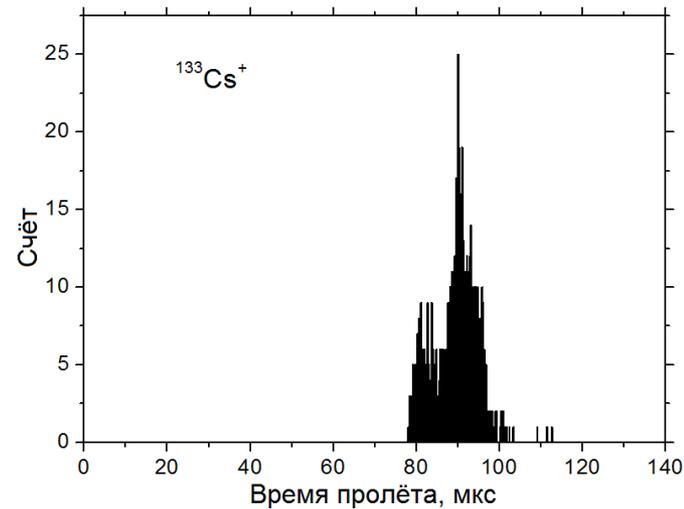
Измерительная ловушка Пеннинга: времяпролётный ИЦР

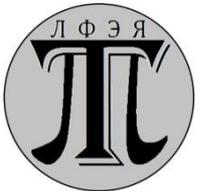


$$\vec{F} = -\mu \frac{\partial V(z)}{\partial z} \hat{e}_z$$

$$dv \approx \frac{0,9}{T_{exc}}$$

$$R = \frac{v}{\Delta v} \approx 10^6, \text{ при } T_{exc} = 1 \text{ с, } m = 100 \text{ у}$$





Измерительная ловушка Пеннинга: фазовый метод



$$\nu_- = \frac{\varphi_- + 2\pi n_-}{2\pi t_-}, \quad \nu_+ = \frac{\varphi_+ + 2\pi n_+}{2\pi t_+}$$

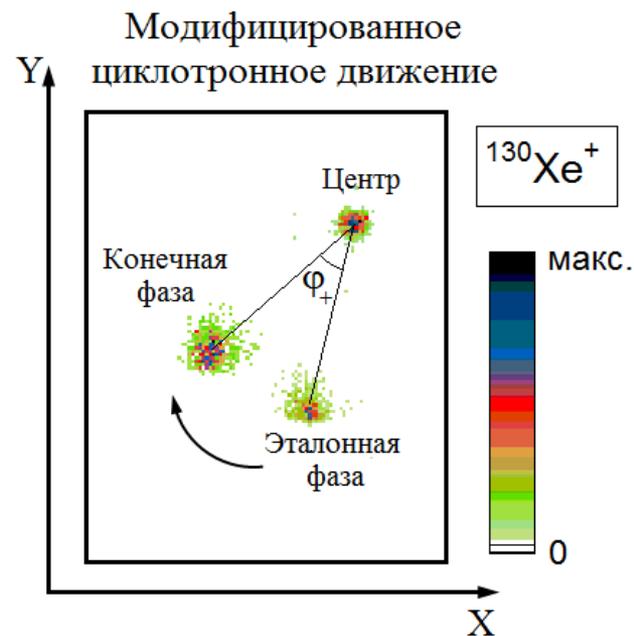
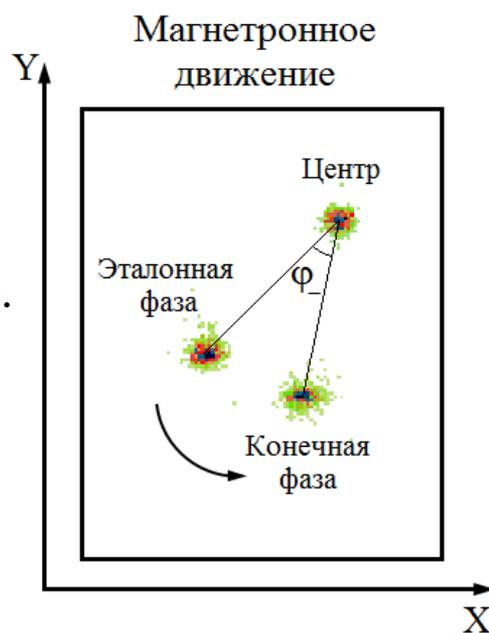
$$\nu_c = \nu_- + \nu_+$$

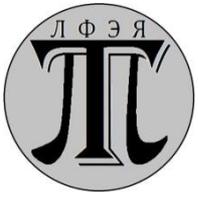
◇ Разрешающая способность
 $R \approx 6,5 \times 10^6$ ($T_{\text{асс}} = 100$ мс, $m = 100$ у).

◇ Точность определения ν_c в 5 раз лучше, чем во времяпролётном методе.

◇ Требуется позиционно-чувствительный детектор.

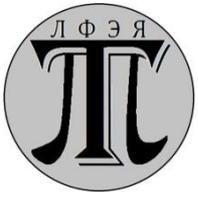
◇ Требуется стабилизация магнитного и электрического полей.





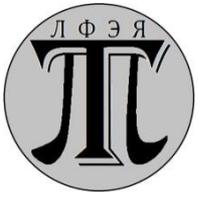
На пути к реализации проекта ПИТРАП

- Выполнена НИР проекта,
- Сдано Техническое Задание,
- Ведётся подготовка НИОКР,
- Выпущен препринт, посвящённый подробному описанию проекта,
- Отправлена (и принята к публикации в ж. «Атомная Энергия») статья о проекте,
- Доклады о ПИТРАП представлены на КМУС-14 в ПИЯФ и ISINN-23 в ОИЯИ(Дубна),
- Составлено и частично подписано «Письмо о намерениях» между ПИЯФ, МПИ(Гейдельберг) и ГСИ/ФАИР,
- Действует Меморандум о содружестве между МПИ и ПИЯФ, а также Соглашение с Унив.Ювяскюля.



Необходимые дальнейшие шаги

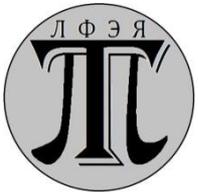
- Проработка и расчеты (термические, механические, дозой активности) для источника и канала,
- Проработка конструкции био-защиты
- Оценка условий и принципов действия при аварийной ситуации,
- Поиск производителя сверхпроводящих магнитов в России !!!



Непосредственные участники проекта

(на 1 мая 2015 г)

- **ЛФЭЯ-** Ю.И. Гусев, В.С. Гусельников, С.А. Елисеев, Т.В. Конева, Д.А. Нестеренко, Ю.Н. Новиков, А.В. Попов, М.В. Смирнов, П.Е. Филянин, С.В. Ченмарёв
- **Группа из ЛЖиСТ**
- **Группы из МПИ (Хайдельберг), ГСИ/ФАИР (Дармштадт) и Университета Майнца (потенциальные участники)**
- **В дальнейшем - сотрудники ПИК**



Смета на материалы и оборудование

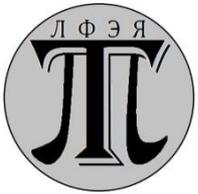
(в ценах 2012 г.)

Элемент установки	Цена (тыс. Евро)	Место разработки/ производства
сверхпроводящий магнит, 7 Тесла	700	фирма Magnex Великобритания
газонаполненный квадруполь с электроникой	200	GSI и МРІК, Германия
время-пролётный спектрометр	250	Greifswald, Германия
детекторные станции: механический привод сборка держателя МКП-детектор Si-детектор электроника	100	VACOM, PREVAC МРІК, Германия El-Mul, Израиль ORTEC ORTEC
ионные источники: механика вакуумная камера матрицы щел.-зем. элем. лазер и оптика	200	ПИЯФ, Россия ПИЯФ, Россия HeatWave, США несколько фирм



Смета на материалы и оборудование (продолжение)

Криостат, электроника для третьего этапа (FT-ICR)	350	несколько фирм, Германия
распределительный квадруполь: электроды вакуумная камера	15	ПИЯФ, Россия ПИЯФ, Россия
ионная оптика: электроды вакуумные камеры электроника и электрика	100	ПИЯФ, Россия ПИЯФ, Россия CAEN, Италия
вакуумные камеры (сталь 1.4429 ESU)	100	несколько фирм, Германия
сборка электродов ловушек	100	MPIK, Германия
электроника и электрика для ловушек	150	GSI, MPIK/ Германия AGILENT, Stanford Research/ США
вакуумная техника: турбонасосы форвакуумные насосы измерители давления система подачи газа	150	OERLEKON OERLEKON PFEIFFER PFEIFFER, Swagelok
высоковольтная платформа	50	ПИЯФ, Россия ИТЕМ
сборочная платформа	50	ПИЯФ, Россия ИТЕМ
система стабилизации: температуры магнита давления в магните	50	ПИЯФ, Россия MKS, США
Газонаполненная камера	200	GSI, MPIK/ Германия ПИЯФ



Статьи расходов (в ценах 2012 г.)

№ № пп	Наименование статьи расходов	Сумма (тыс.руб.)
1.	Материалы, комплектующие изделия и оборудование, изготовленное за рубежом	110600
2.	Расходы на оплату труда	50000
3.	Обязательные отчисления от оплаты труда	17000
4.	Командировки	5000
5.	Услуги сторонних организаций	2000
6.	Растаможивание/Транспортные расходы (30% от стоимости продукта)	7400
7.	Накладные расходы (30% от п.2)	15000
	Всего расходов	207000

От всех



СПАСИБО !!!

Схема масс-сепаратора на ПИК в проекте СОЛЯРИС (1991 г.)

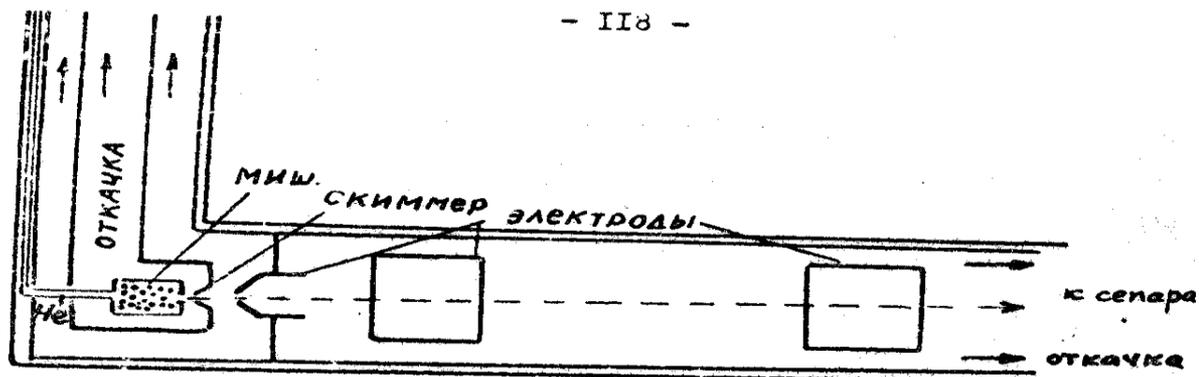


Рис. 1. Схема "холодного" иононосителя.

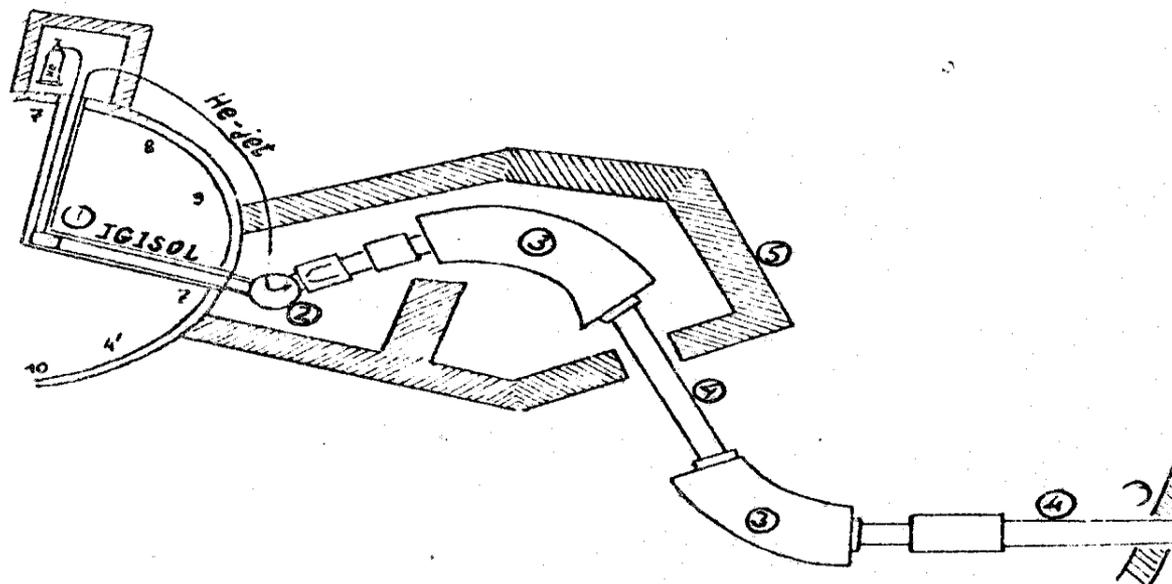
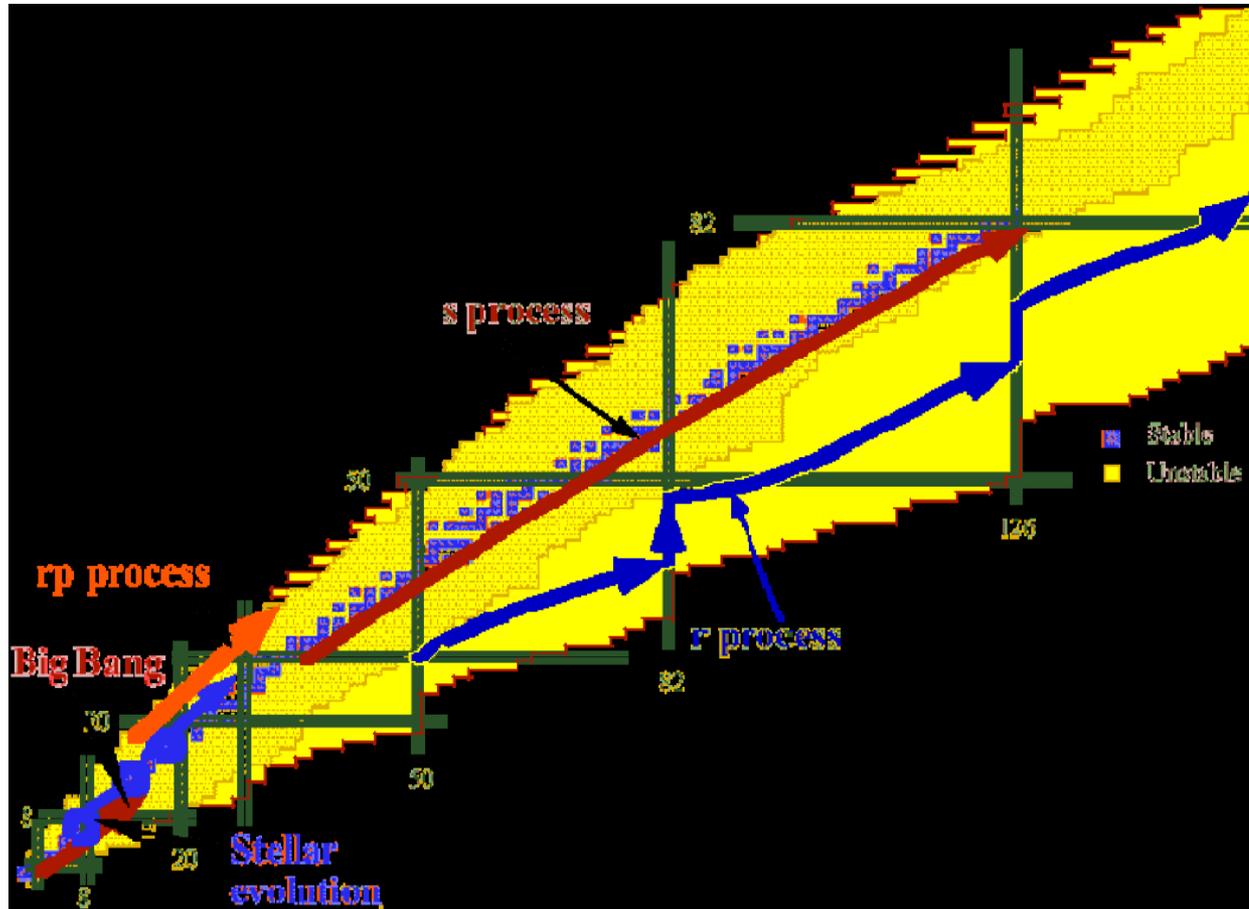
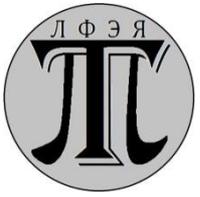
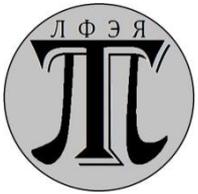


Рис. 2. Общая схема расположения комплекса СОЛЯРИС.
Обозначения: 1 - мишенная камера, 2 - поворотный конденсатор, 3 - электромагнит, 4 - ионопровод, 5 - защита, 6, 7, 8, 9, 10 - различные ГЭК реактора ПИК.





Продуктивная способность зарубежных установок для измерения масс

