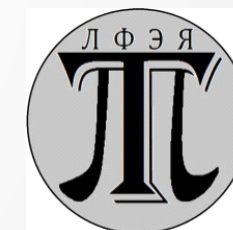
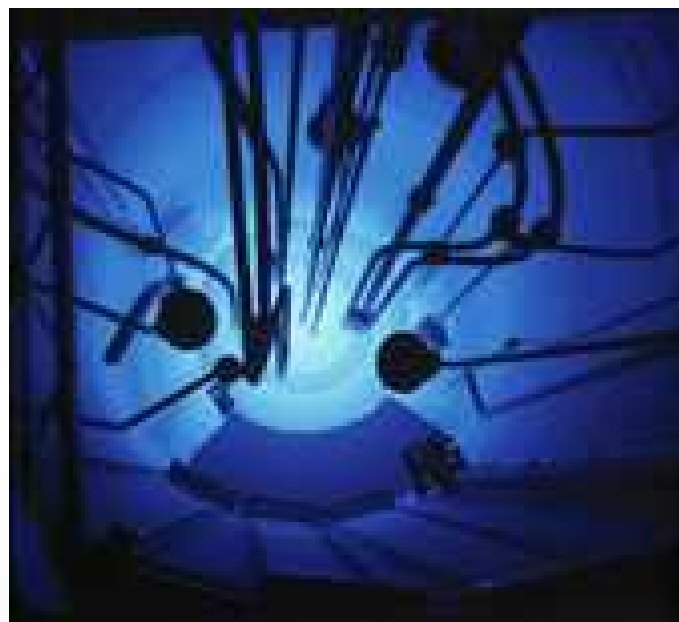




Ядерно-физические исследования на реакторе TRIGA в Майнце (Германия)



Ченмарев Станислав Валерьевич

Сотрудник лаборатории физики экзотических ядер ПИЯФ

Цели доклада

Рассказать о достижениях по физике на ТРИГе и перекинуть мост к тем аналогичным проблемам, которые планируются исследовать на ПИКе:

- Масс-спектрометрия экзотических ядер (прототип проекта ПИТРАП на реакторе ПИК),
- Проблемы ядерного эталона частоты ($^{229\text{m}}\text{Th}$),
- Время жизни нейтрона,
- Прецизионные значения массы протона и его g-фактора

Применения ядерных реакторов в физике

Исследовательские ядерные реакторы в первую очередь используются как мощные источники нейтронов для

- Изучения свойств самих нейтронов

Определение времени жизни,
электрического дипольного момента...

- Ядерной физики

Изучение структуры ядра, наработки искусственных радиоактивных нуклидов для различных задач физики, астрофизики, химии и биотехнологий

- ФТТ

Исследование структуры твёрдого тела

- Прикладные задачи

Материаловедение

Реакторы TRIGA

Trainig, **R**esearch, **I**sotopes, **G**eneral **A**tomics – серия исследовательских реакторов, использующих топливо на основе $UZrH_x$, содержащего

8,5-12% U из которого 20% ^{235}U

Построено с 1958 года 65 реакторов в 24 странах



Fig. 1. World map showing TRIGA installations to date



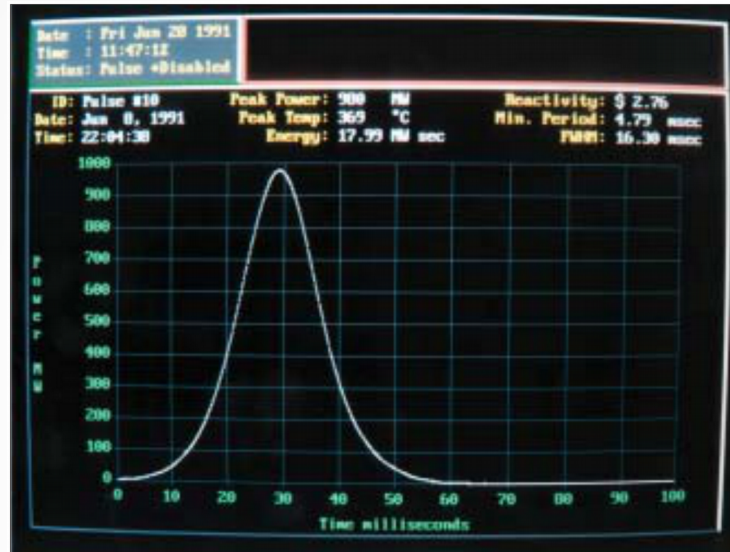
Обеспечивается поток нейтронов в зоне облучения $7 \times 10^{11} \text{ н / см}^2 \text{ с}$ в непрерывном и $1,75 \times 10^{15} \text{ н / см}^2 \text{ с}$ в импульсном режиме

Характеристики реактора ТРИГА в сравнении с реакторами ПИК и ВВР-М в Гатчине

	TRIGA Mainz		ПИК	ВВР-М
Режим	непрерывный	импульсный	непрерывный	непрерывный
Тепловая мощность	100 кВт	250 МВт в течение 30 мс	100 МВт	18 МВт
Плотность потока нейтронов, н/см²с	7x10¹¹	1,75x10¹⁵	5x10¹⁵	4x10¹⁴
Топливо	U ZrH _x		UO ₂ +CuBe	U Al керамика
Степень обогащения топлива по ²³⁵ U	8,5-12% x 20%		90%	90%
Замедлитель	ZrH _x + вода		Вода	Вода
Отражатель	Графит		Тяжелая вода	Металлический Be
Число ГЭК	4		10	17
Число ВЭК	1 + барабан и 2 петли пневмопочты в отражателе		6 + 6 наклонных	15
Ввод в эксплуатацию	1965		2018	1960

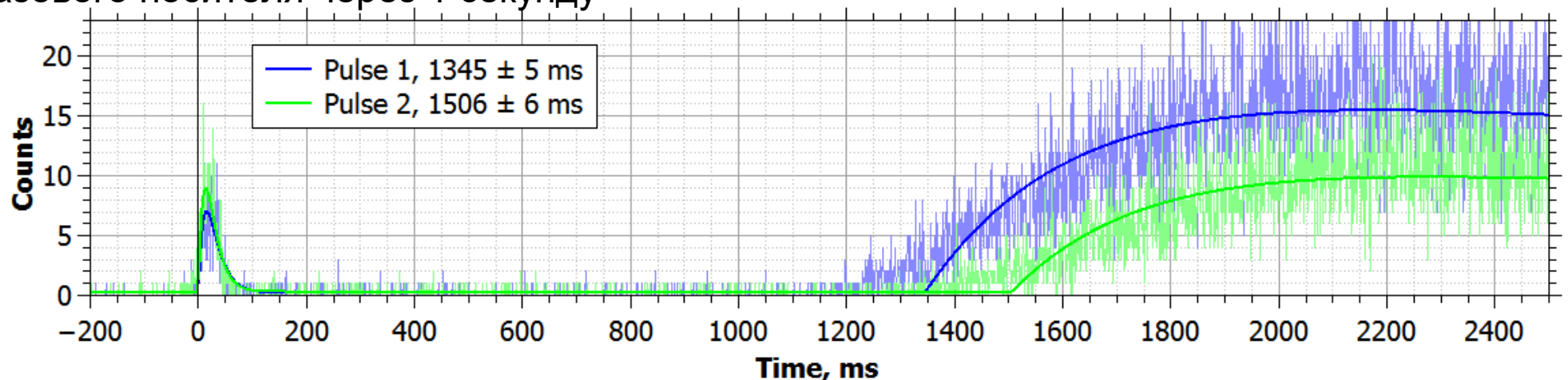
Импульсный режим

На реакторе TRIGA-Mainz в течении 30 мс нейтронный поток увеличивается в 2500 раз



- Например позволяет упростить спектроскопию изомерных состояний
- Более эффективная работа при проведении экспериментов изначально в прерывистом режиме
- Удобно для временных измерений

На нижнем графике виден мгновенный гамма пик от импульса реактора и появление активности на выходе газового носителя через 1 секунду



Проблема изомера тория

Мишени для получения ^{229m}Th

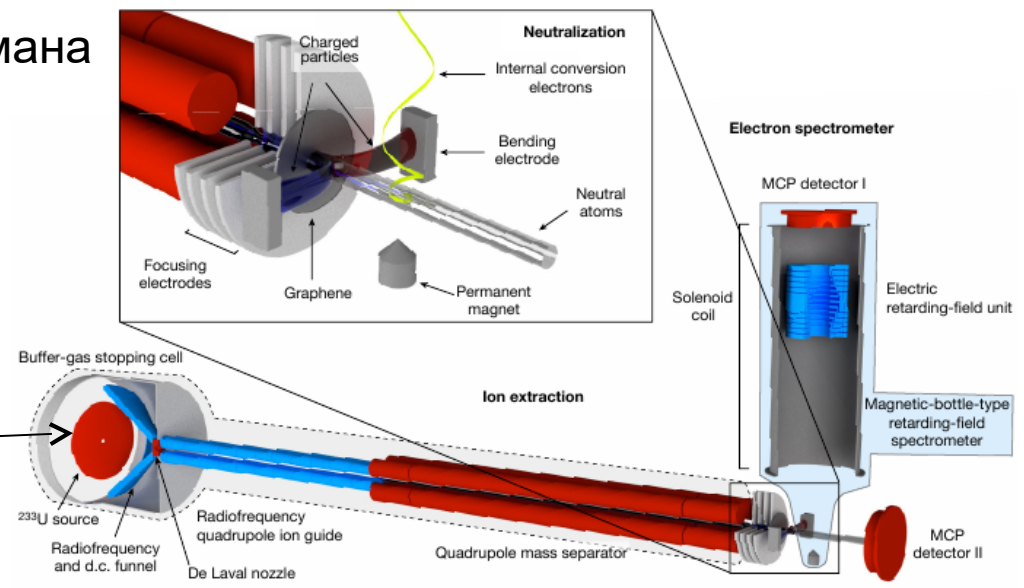
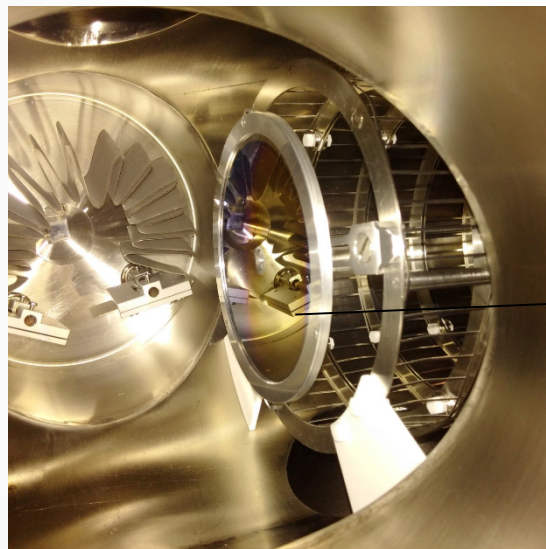
Низколежащий изомер ^{229m}Th позволяет создать ядерные «часы»

В Мюнхене был проведен эксперимент по определению энергии перехода в низколежащее изомерное состояние и его свойств методом лазерной спектроскопии

Для этого в Майнце группой проф. К. Дюльмана была создана мишень из ^{233}U

$$E_{is} = 8,28 \pm 0,17 \text{ eV}$$

$$Q_s^m = 1,74(6) \text{ eb}$$



Benedict Seiferle, Lars von der Wense, Christoph E. Düllmann, et. al.
Energy of the ^{229}Th nuclear clock transition
Nature 573, 243–246. **2019**

В нашем институте темой изомера ^{229}Th активно занимается А. В. Попов из нашей лаборатории

Yu. I. Gusev, Yu. N. Novikov, A. V. Popov, and V. I. Tikhonov. *Studying the Decay of Thorium-229 Isomer by Means of Conversion Spectroscopy*. **2016**

Yu. I. Gusev, F. F. Karpeshin, Yu. N. Novikov, and A. V. Popov. *Measuring the Energy of ^{229}Th Isomer Decay*. **2019**

Время жизни нейтрона

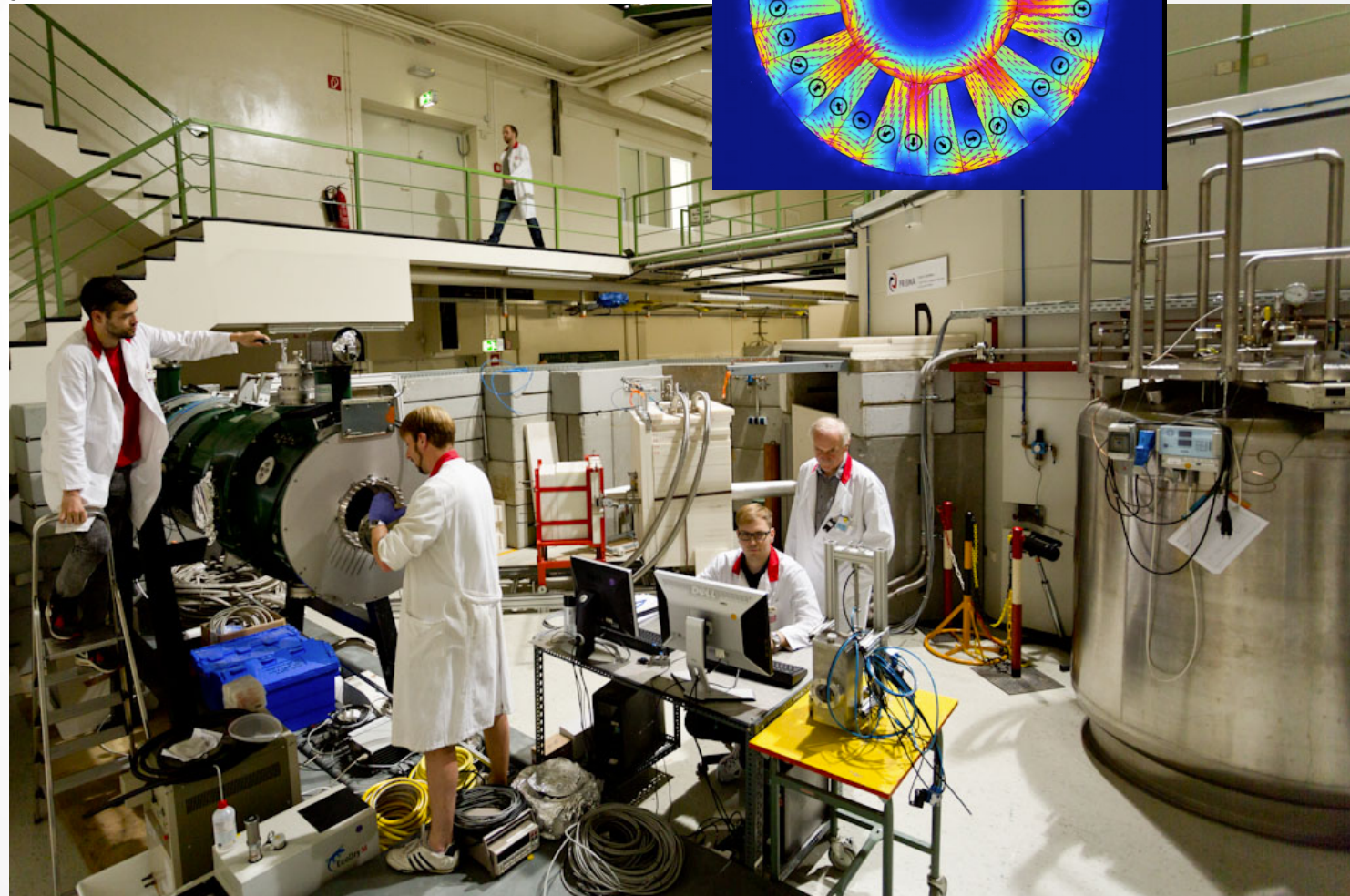
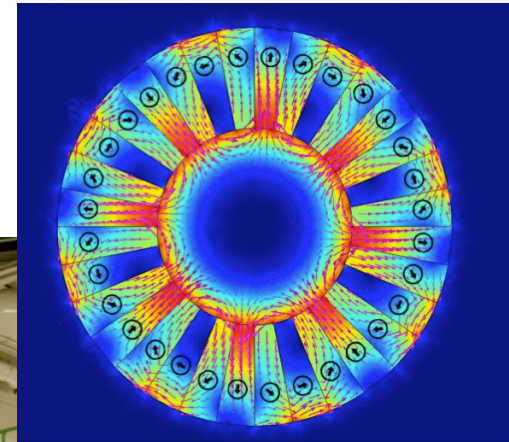
Время жизни нейтрона

■ Эксперимент τ SPECT

Основной эксперимент с ультрахолодными нейтронами

Измерения времени жизни нейтронов в пучках, а также в кристаллах дают несколько различающиеся значения.

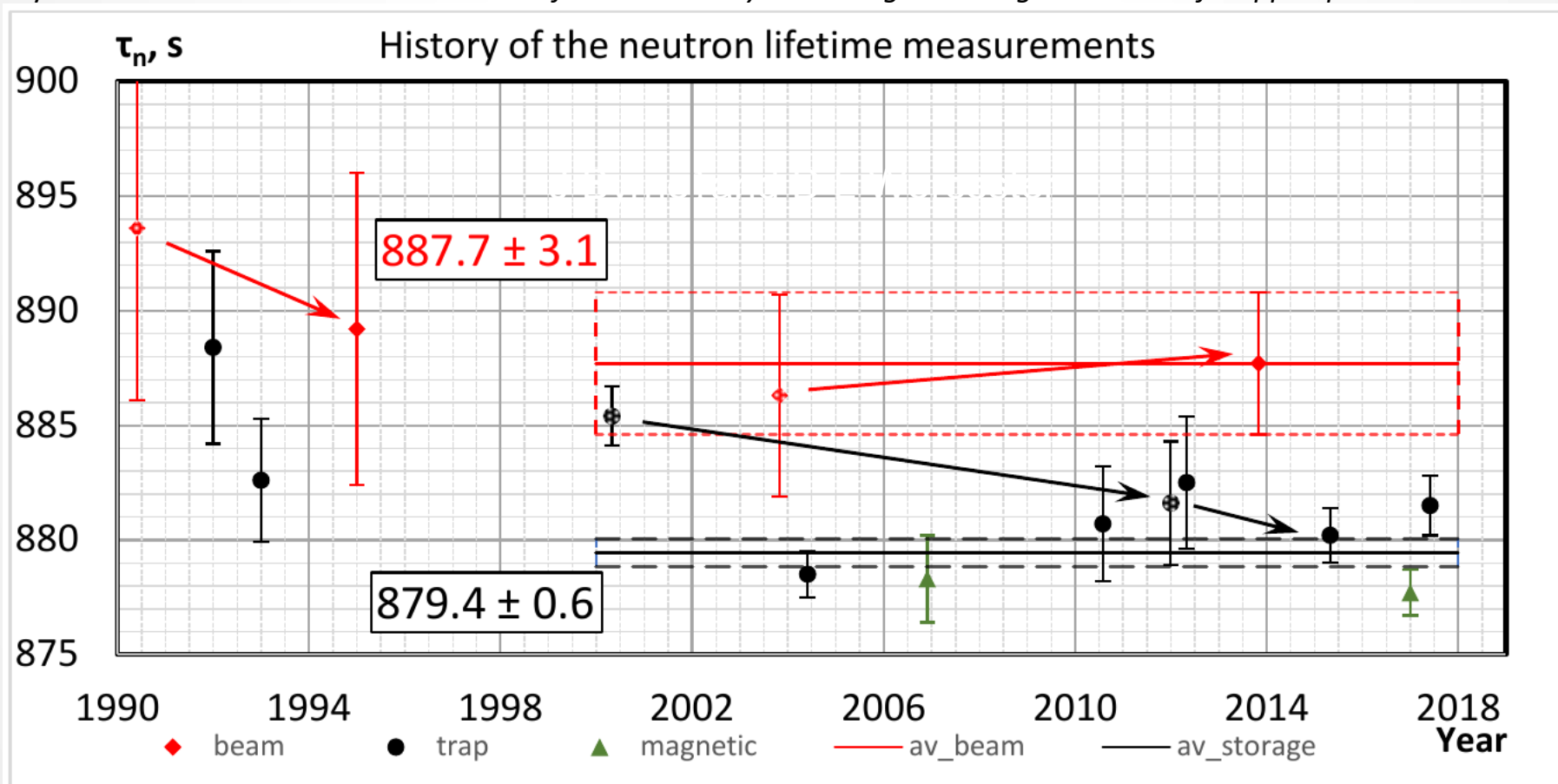
В экспериментах с ультрахолодными нейтронами осуществляется их удержание в магнитной ловушке и производится детектирование протонов и электронов бета-распада.



«Нейтронная аномалия»

- Есть два пути для определения времени жизни нейтрона – в пучках и в ловушках
- Результаты измерения времени жизни нейтрона в пучках и в ловушках различаются
- По последним данным, это может быть связано с систематической погрешностью измерения числа протонов бета-распада, связанной с потерей их в столкновениях с молекулами остаточного газа и пр дающей противонаправленные сдвиги для обоих методов

J. Byrne and D. L. Worcester. *The neutron lifetime anomaly and charge exchange collisions of trapped protons*. 2019



A. P. Serebrov , R. M. Samoilov , I. A. Mitropolsky , A. M. Gagarsky.
Neutron lifetime, dark matter and search for sterile neutrino. 2017

Ченмарев С. В. семинар ОФВЭ 22.10.2019

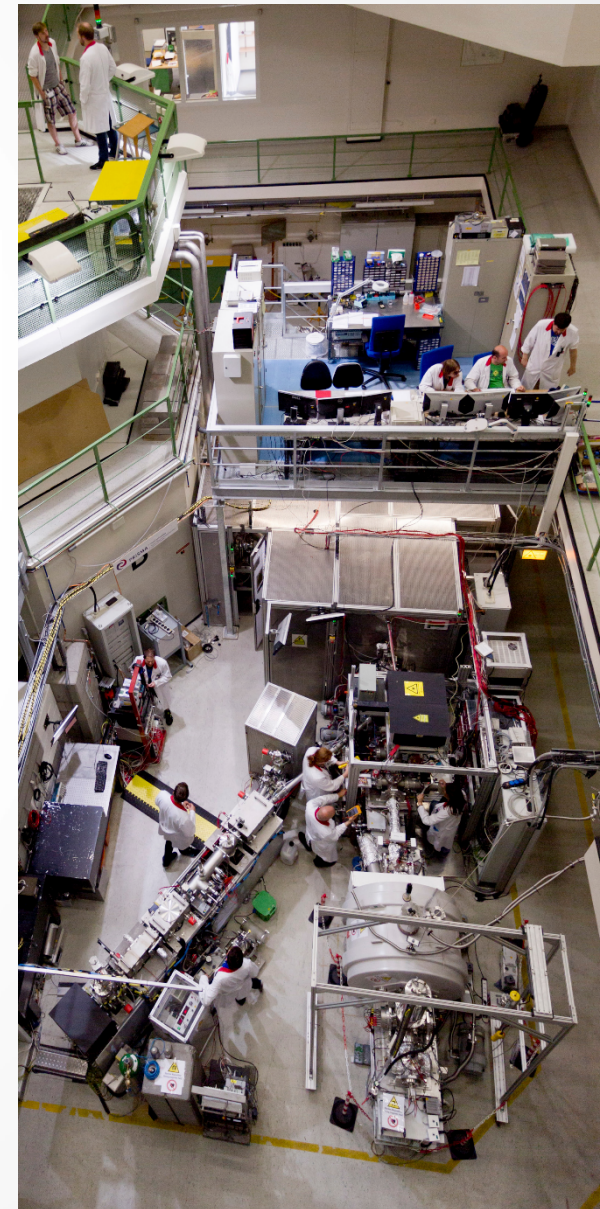
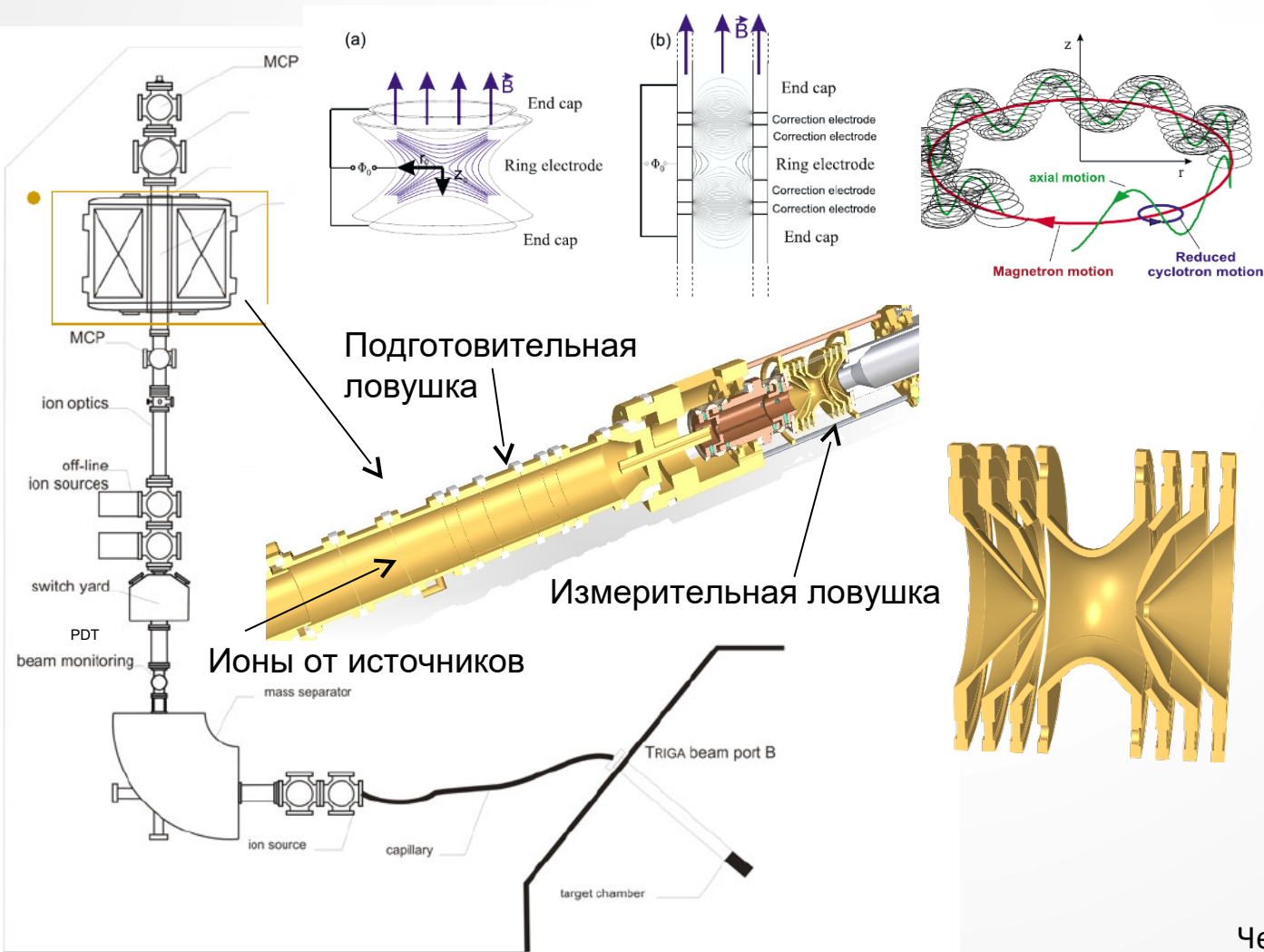
Ионные ловушки TRIGA-TRAP vs. ПИТРАП

Система TRIGA-TRAP

– Пока единственная установка на базе ловушки Пеннинга на реакторе для масс-спектрометрии продуктов деления

$$\omega_c = \frac{q}{m} \cdot \vec{B}$$

$$m_{atom} = \frac{\omega_{c,ref}}{\omega_c} (m_{ref} - m_e) + m_e$$

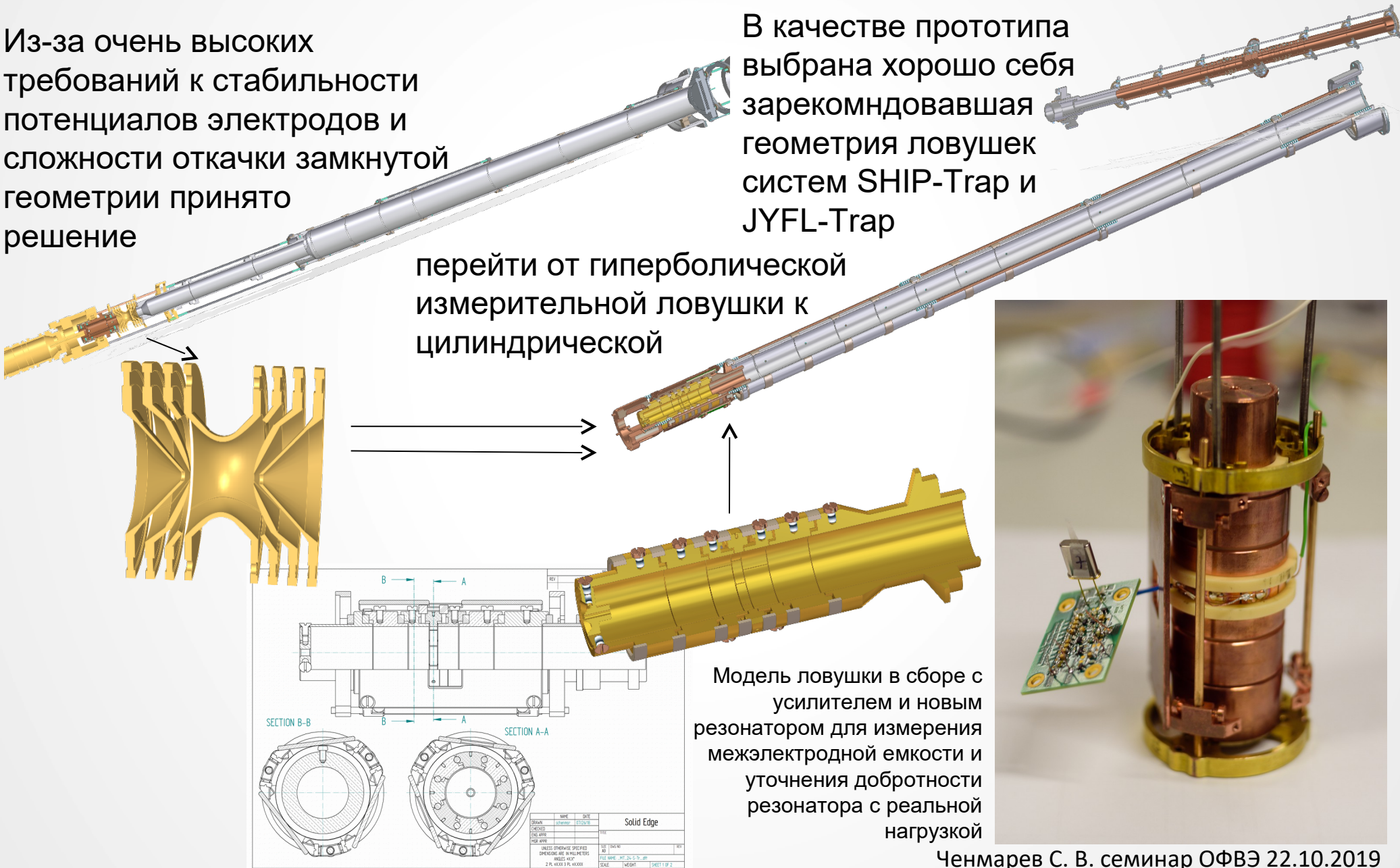


Модернизация системы TRIGA-TRAP

Из-за очень высоких требований к стабильности потенциалов электродов и сложности откачки замкнутой геометрии принято решение

В качестве прототипа выбрана хорошо себя зарекомендовавшая геометрия ловушек систем SHIP-Trap и JYFL-Trap

перейти от гиперболической измерительной ловушки к цилиндрической



Модель ловушки в сборе с усилителем и новым резонатором для измерения межэлектродной емкости и уточнения добротности резонатора с реальной нагрузкой

Квазимагические числа $N = 152$ и $N = 162$?

(TRIGA-TRAP vs. SHIP-TRAP)

Ю. Новиков, О. Безроднова, Г. Воробьев, М. Гончаров, Ю. Гусев, С. Елисеев,
Н. Мартынова, Д. Нестеренко, П. Филянин, С. Ченмарев и коллаборация SHIP-TRAP

Измерения на TRIGA-TRAP

Последние измерения были посвящены массам в районе N 152

$$m_{atom} = \frac{\omega_{c,ref}}{\omega_c} (m_{ref} - m_e) + m_e$$

Ion	r to $^{12}\text{C}_{22}^+$	$\delta r/r$ / 10^{-9}	ME_{IT}^{atom} (keV)
$^{241}\text{Am}^{16}\text{O}^+$	0.9736807966(72)	7.4	52936.9(1.8)
$^{243}\text{Am}^{16}\text{O}^+$	0.9812738087(56)	5.7	57176.2(1.4)
$^{244}\text{Pu}^{16}\text{O}^+$	0.9850723904(72)	7.3	59806.2(1.8)
$^{249}\text{Cf}^{16}\text{O}^+$	1.0040521297(52)	5.2	69718.1(1.3)

- SHIP-Trap 2010-2012
- TRIGA-Trap 2012
- SHIP-Trap 2018
- TRIGA-Trap 2019-2020

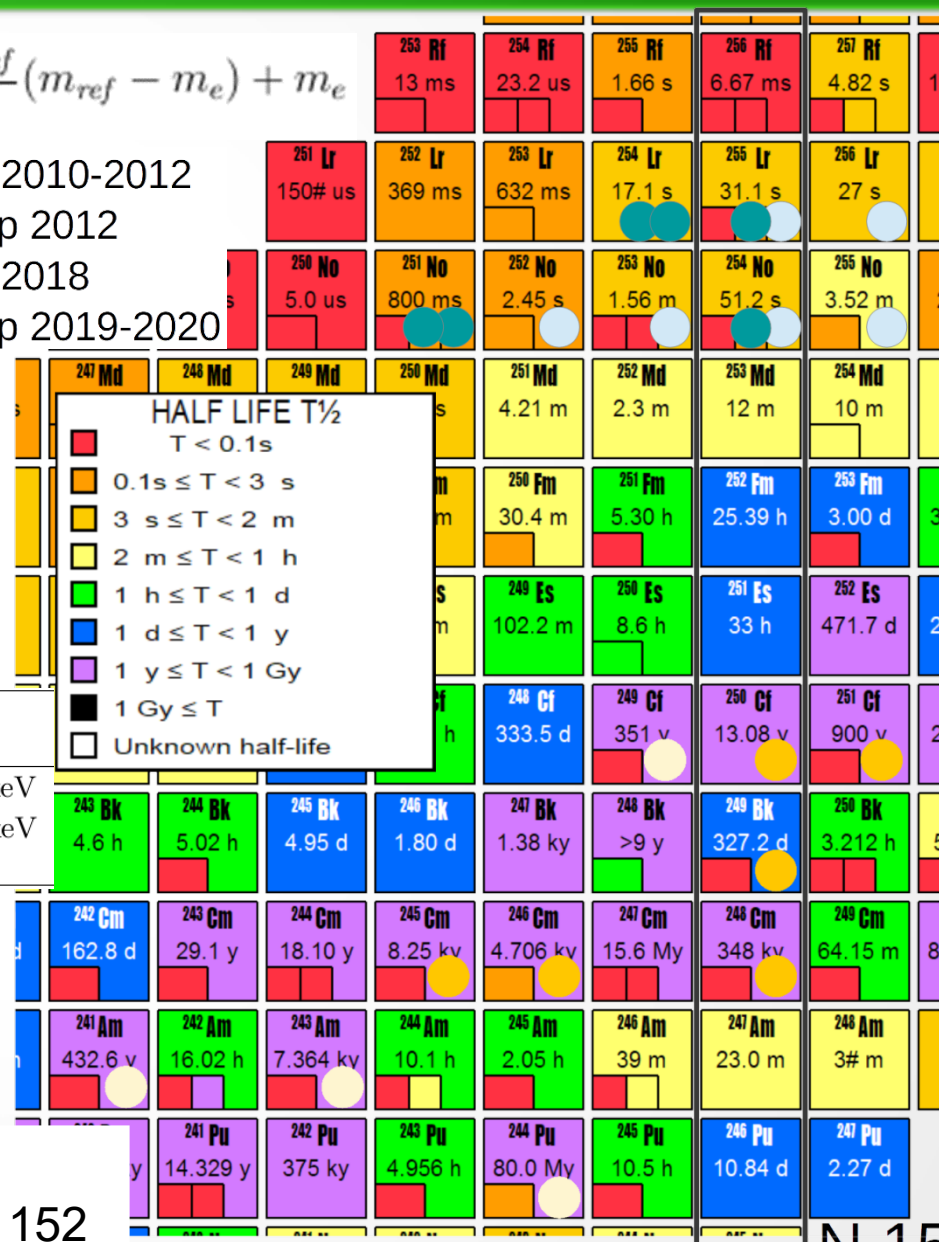
M. Eibach, K. Blaum, Sz. Nagy, et al. *Direct high-precision mass measurements on $^{241,243}\text{Am}$, ^{244}Pu , and ^{249}Cf .* 2014

и предварительному измерению Q величины перехода $^{163}\text{Ho} > ^{163}\text{Dy}$

Target Ion	Reference Ion	Ratio $r = \frac{\nu_{c,ref}}{\nu_{c,ion}}$	Extracted Value
$^{163}\text{Ho}^{16}\text{O}^+$	$^{12}\text{C}_{15}^+$	0.994 020 278 3(54)	$ME(^{163}\text{Ho}) = -66379.3(9)$ keV
$^{163}\text{Dy}^{16}\text{O}^+$	$^{12}\text{C}_{15}^+$	0.994 020 264 7(48)	$ME(^{163}\text{Dy}) = -66381.7(8)$ keV
$^{163}\text{Ho}^{16}\text{O}^+$	$^{163}\text{Dy}^{16}\text{O}^+$	1.000 000 015 2(43)	$Q_{EC} = 2.5(7)$ keV

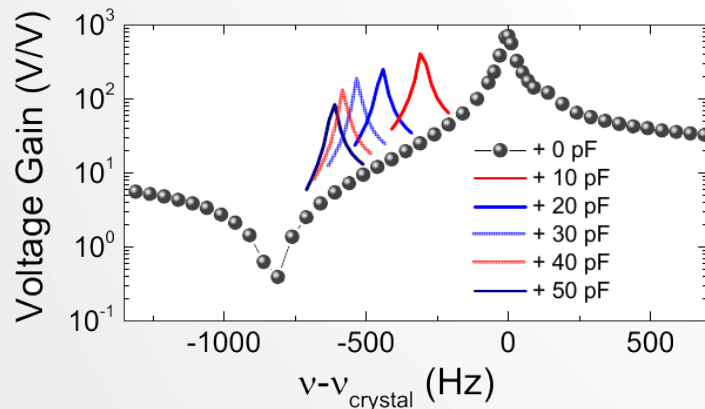
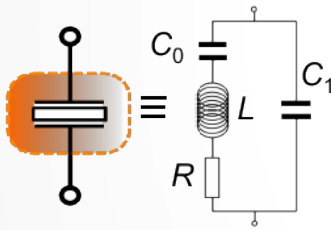
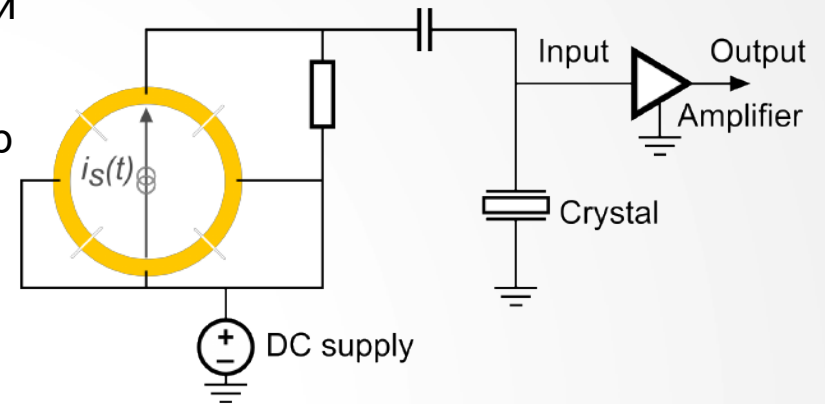
F. Schneider, K. Blaum, S. Chenmarev, S. Eliseev, Sz. Nagy, Yu. N. Novikov, et Al. *Preparatory studies for a high-precision Penning-trap measurement of the ^{163}Ho electron capture Q-value.* Eur. Phys. J. A 51, 89 2015

В ближайшее время планируется измерение ряда редких актиноидов, в районе N 152 таких как $^{246, 248, 245}\text{Cm}$ $^{250, 251}\text{Cf}$ оф-лайн

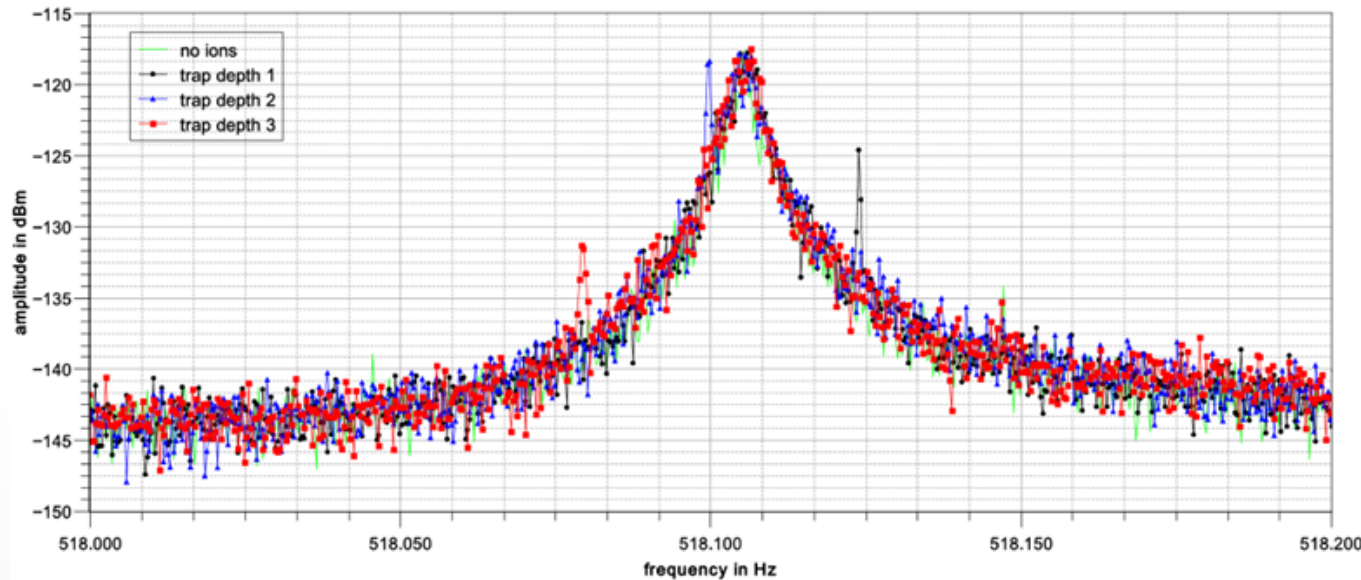


Неразрушающая детекция ионов при комнатной температуре

- Заряд изображения, возникающий на электродах при движении иона в ловушке очень мал.
- Обычно для выделения сигнала требуется резонатор с добротностью более 1000 и используются сверхпроводящие катушки резонатора.
- Очень хорошим резонатором может быть правильно вырезанный кристалл кварца



518 kHz test (Pb 207)



Удалось получить сигнал от ионов, движущихся в ловушке без использования криогенных температур.

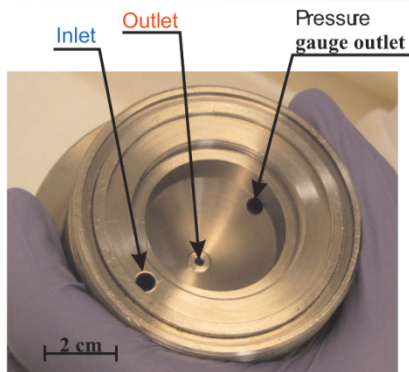
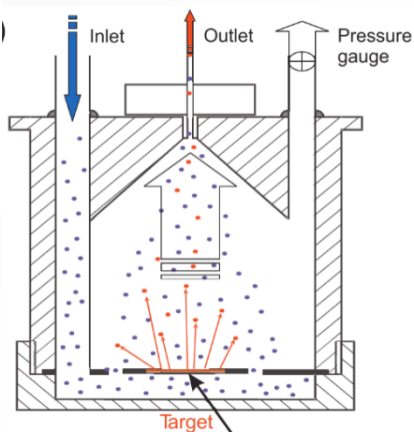
Для попадания в резонанс удобнее корректировать частоту движения ионов чем перестраивать кварц

Ченмарев С. В. семинар ОФВЭ 22.10.2019

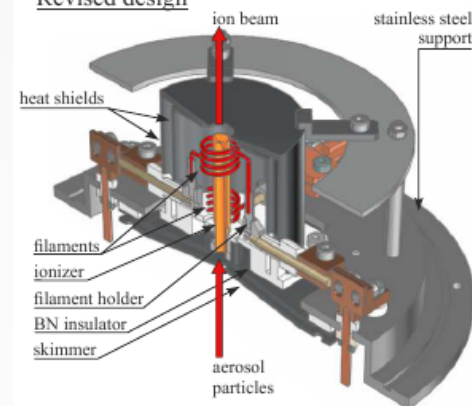
ГАЗОВЫЙ НОСИТЕЛЬ

Target

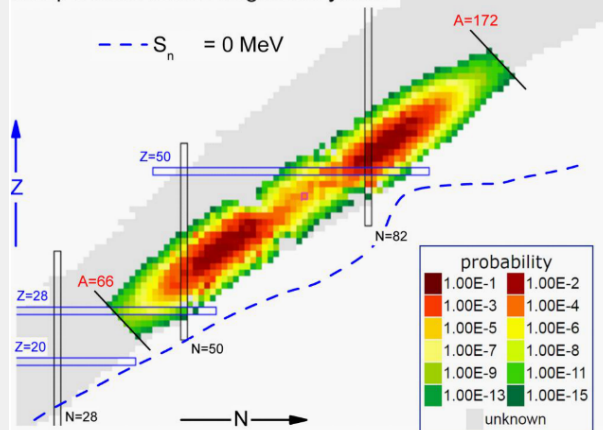
Surface diameter (mm)	15.0(5)
Target amount ^{235}U (μg)	1440(72)
Areal density ^{235}U ($\mu\text{g cm}^{-2}$)	815(41)
Thickness Al foil (μm)	10(3)



Revised design

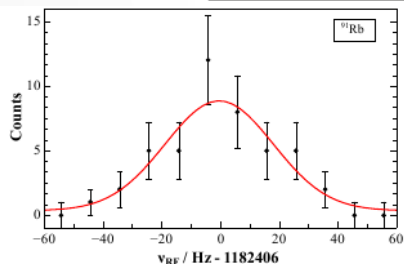
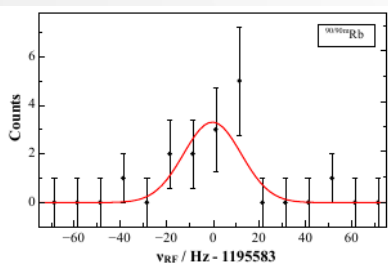


Independent fission fragments yields

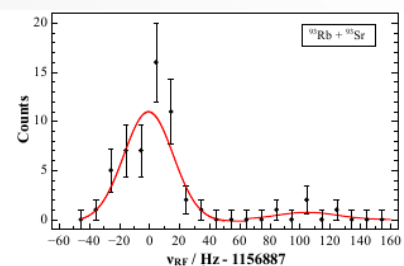
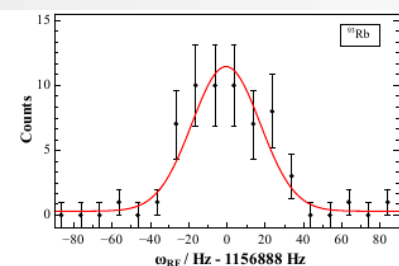
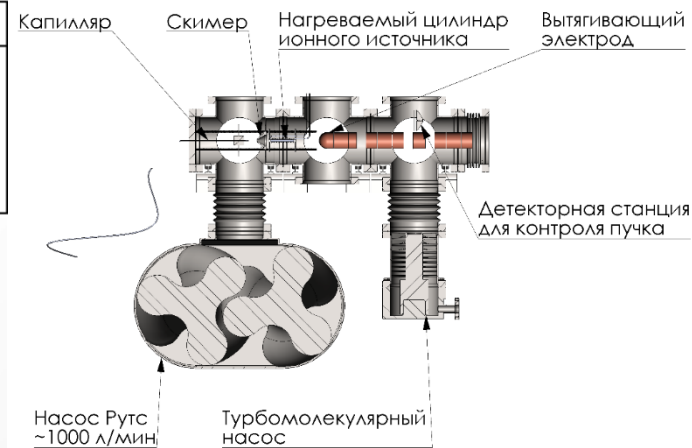


Sr 86 9.86	Sr 87 2.81 h 7.06	Sr 88 82.58	Sr 89 50.5 d	Sr 90 28.90 a	Sr 91 9.5 h	Sr 92 2.71 h	Sr 93 7.43 m	Sr 94 74 s	Sr 95 24.4 s
Rb 85 72.17	Rb 86 1.00 m 18.7 d	Rb 87 27.83	Rb 88 17.8 m	Rb 89 15.2 m	Rb 90 4.3 m 2.6 m	Rb 91 58 s	Rb 92 4.5 s	Rb 93 5.84 s	Rb 94 2.70 s

Nuclide	Γ (#/s)
$^{90/90\text{m}}\text{Rb}^+$	$2.1 \cdot 10^6 / 4.1 \cdot 10^5$
$^{91}\text{Rb}^+$	$6.6 \cdot 10^6$
$^{93}\text{Rb}^+$	$9.1 \cdot 10^6$
$^{93}\text{Sr}^+$	$7.6 \cdot 10^6$



Atom	$m_{\text{atom}}^{\text{TT}} (\mu\text{u})$	rel. prec.
^{90}Rb	89 914580 (210)	$2 \cdot 10^{-6}$
^{91}Rb	90 916670 (170)	$2 \cdot 10^{-6}$
^{93}Rb	92 922060 (130)	$1 \cdot 10^{-6}$
^{93}Sr	92 912990 (420)	$4 \cdot 10^{-6}$



Part	$\tau_{\text{part}} (\%)$
Gas-jet	17.7(4)
Aerodyn. lens	40(2)
IS	55(8)
Magnet	88(9)
RFQ _{cw}	25(4)
RFQ _{bunched}	38(8)
PDT	$2 \cdot 10^{-4}$

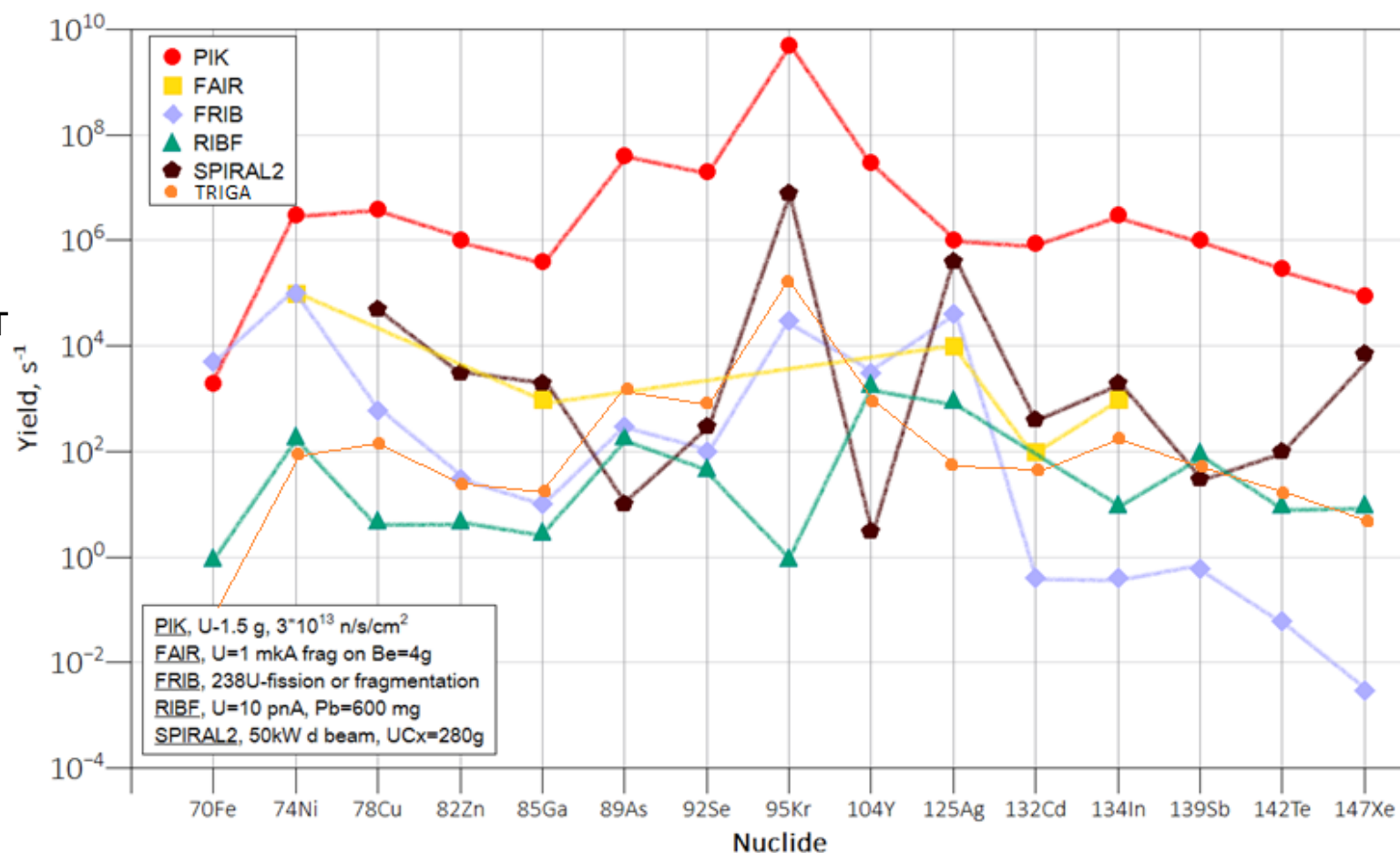
J. Grund. Online coupling of TRIGA-TRAP to the research reactor TRIGA Mainz. 2018

Выходы продуктов деления

Сравним выходы в планируемых установках для получения экзотических нейтронно-избыточных ядер

Использование реакторов выгодно для получения изотопов в районе массовых чисел нуклидов $80 < A < 150$.

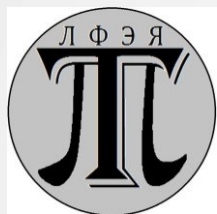
Картинка показывает значительное преимущество реактора ПИК на фоне всех других планируемых нереакторных проектов. На оси абсцисс картинке показаны нуклиды с неизвестными массами



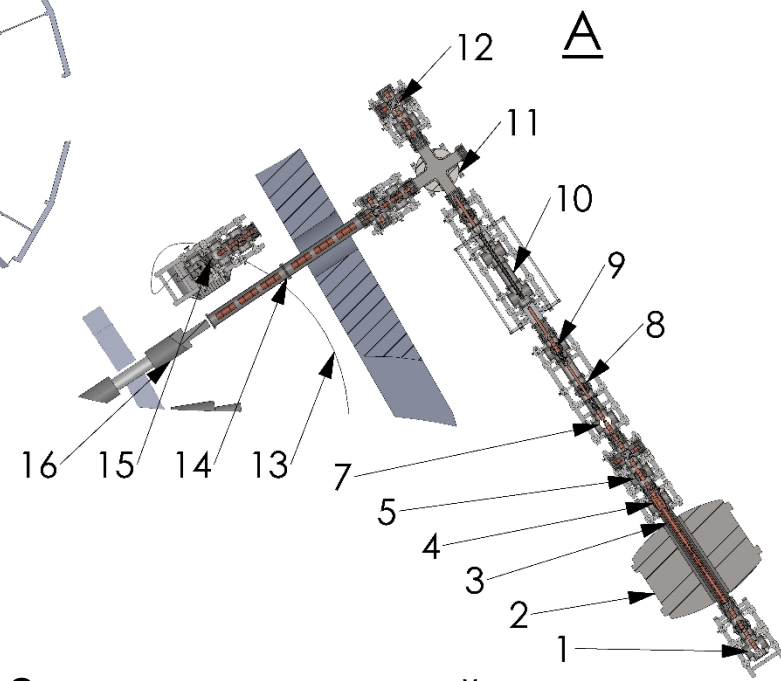
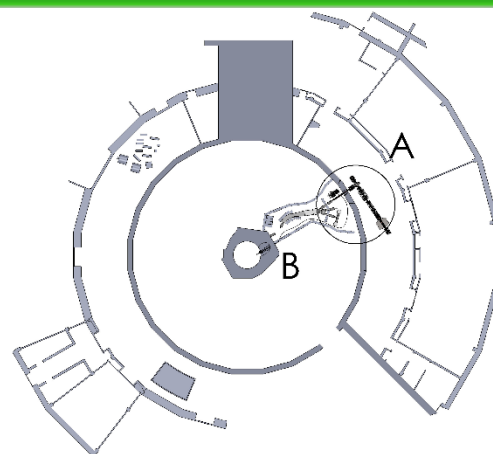
О. Безроднова, ЛФЭЯ ПИЯФ 2018

Ченмарев С. В. семинар ОФВЭ 22.10.2019

Система ПиТРАП в ПИЯФ (Гатчина)



Планируемая ловушка Пеннинга
на реакторе ПиК



За счет высокого нейтронного потока реактора можно рассчитывать на заметное преимущество в выходах нейтронно-избыточных ядер, интересных для исследования пути астрофизического r -процесса

Эксперименты с протонами

TRIGA Mainz

MAinzer MIcrotron

Institute of Physics JGU



На территории университета Майнца производились или планируются несколько экспериментов, связанных с протонами

- Планируемый эксперимент по определению радиуса протона (А. А. Воробьев и др.)
- Эксперимент по определению гиромангнитного соотношения протона в ловушке Пеннинга G. Schneider, A. Mooser, M. Bohman, et. Al, *Double-trap measurement of the proton magnetic moment at 0.3 parts per billion precision.* **2017**

$$\mu_p = 2.79284734462 (82) \mu_N$$

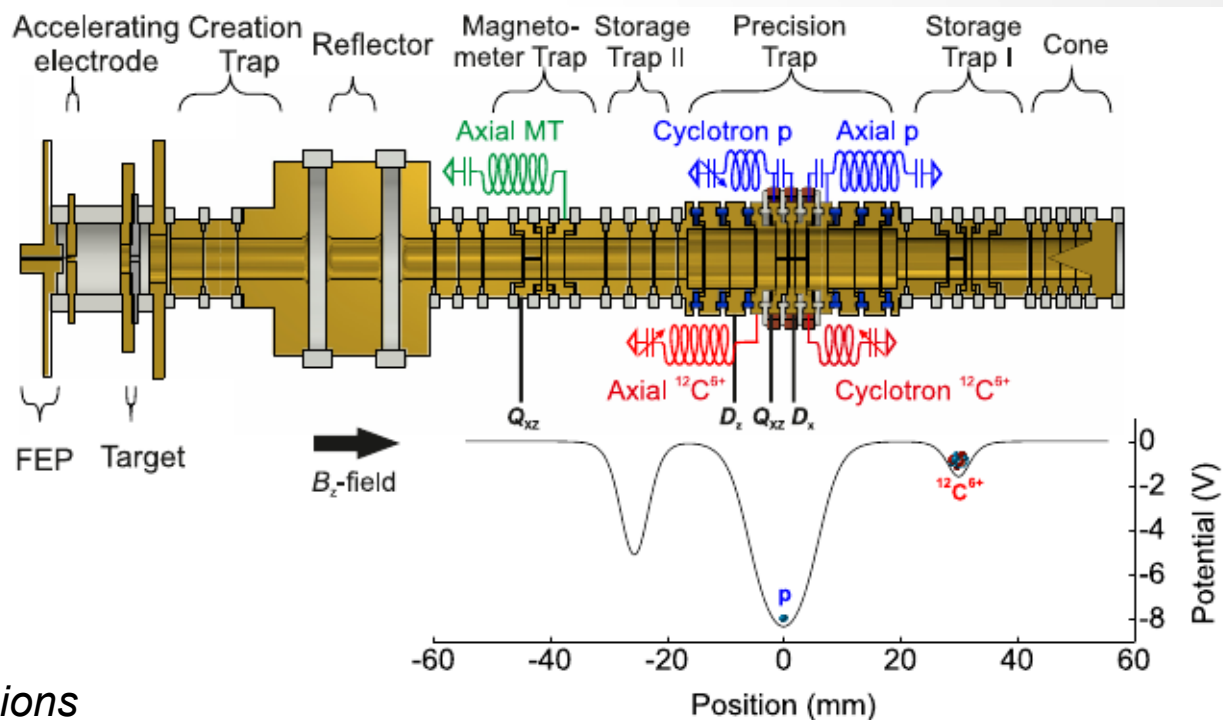
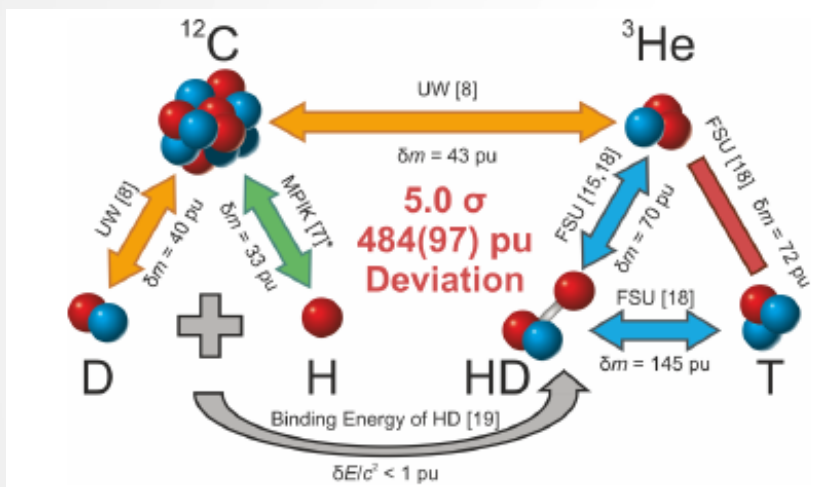
- Установка для измерения масс легких ядер на основе ловушки пеннинга, на которой была уточнена масса протона

$$m_p = 1.007\,276\,466\,598(16)(29) \text{ u,}$$

Ловушка для измерения масс легких ядер LION-Trap

Существует вопрос несоответствия современных серий измерения масс молекул H и HD друг другу

Для решения этой загадки в институте физики в Майнце создана новая установка на основе ловушек Пеннинга, оптимизированная для легких ионов



High-precision mass spectrometer for light ions

F. Heiße, S. Rau, F. Köhler-Langes, W. Quint, G. Werth, S. Sturm, and K. Blaum

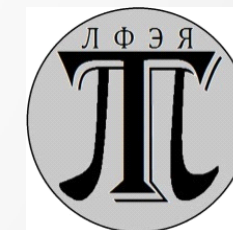
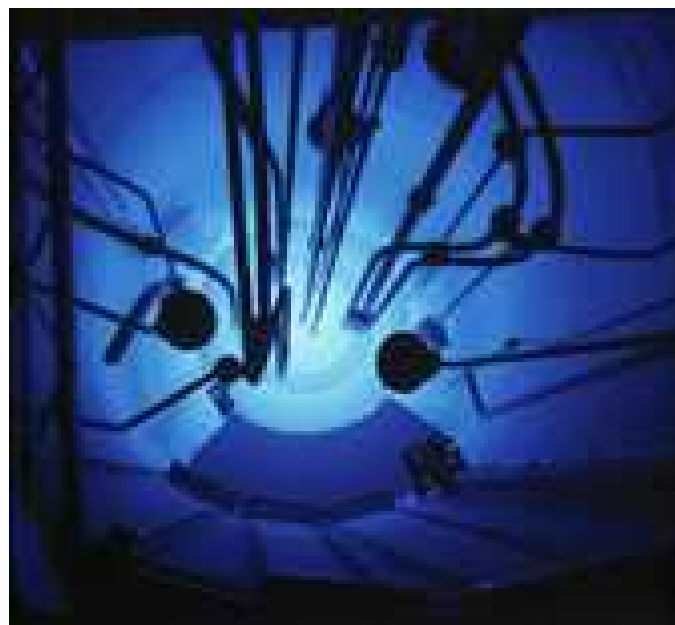
Phys. Rev. A 100, 022518 (2019)

$$m_p = 1.007\,276\,466\,598(16)(29) \text{ u}, \quad \frac{\delta m_p}{m_p} = 3.3 \times 10^{-11}$$



Спасибо за внимание

И большое спасибо сотрудникам коллабораций TRIGA-TRAP, SHIP-TRAP, PENTA-TRAP



Ченмарев Станислав Валерьевич

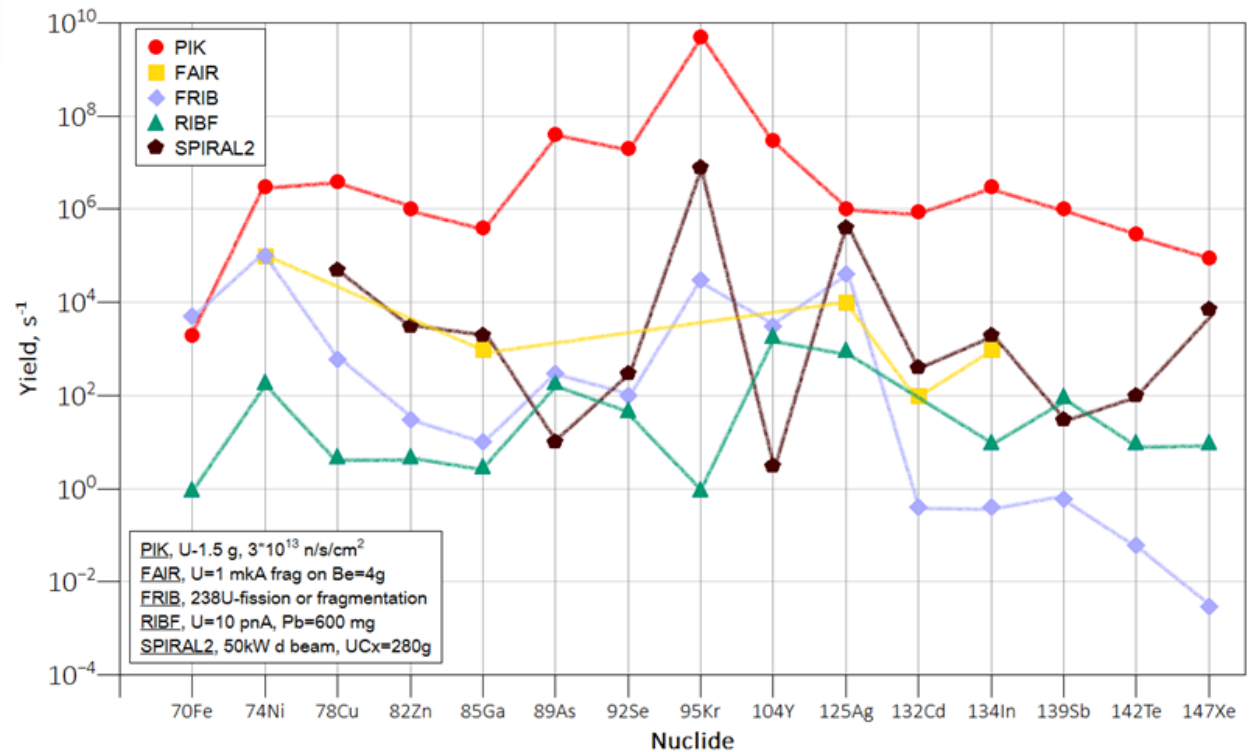
Сотрудник лаборатории экзотических ядер ПИЯФ

Сравнение выходов

Можно сравнить ожидаемую эффективность получения нуклидов на различных установках

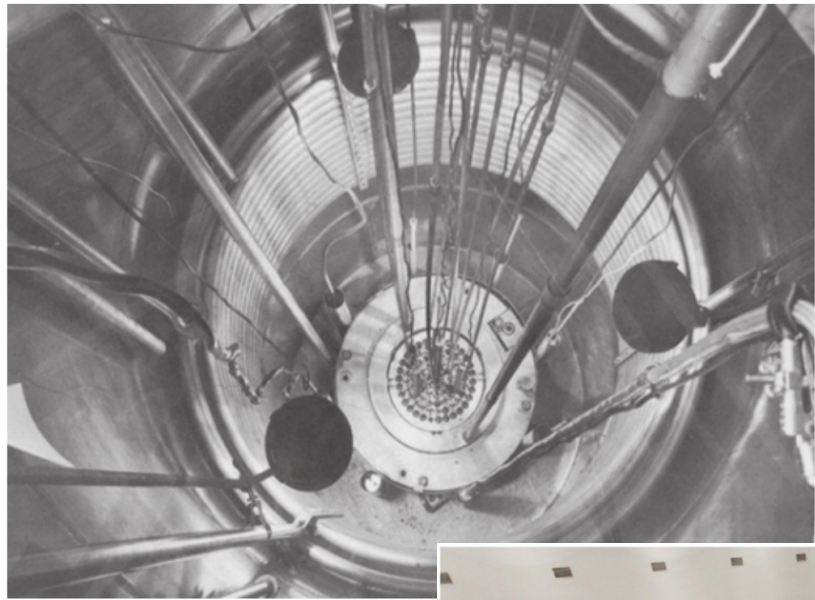
- При различных способах получения – ускорители или реактор

- Для системы TRIGA-Spec и перспективной установки ПиТРАП на реакторе ПиК



Элемент	Щелочные	Щелочно-земельные	Остальные	Щелочные	Щелочно-земельные	Остальные
Сечение	TRIGA-Spec			ПиК		
1 мб	8,0E+4	8,0E+3	8,0E+2	2,0E+9	2,0E+8	2,0E+7
100 мкб	8,0E+3	8,0E+2	8,0E+1	2,0E+8	2,0E+7	2,0E+6
1 мкб	8,0E+1	8,0E+0	8,0E-1	2,0E+6	2,0E+5	2,0E+4

Основные варианты реакторов ТРИГА



- Mark II
- С 1965 года
- тепловая мощность от 100 до 250 кВт
- и импульсный режим

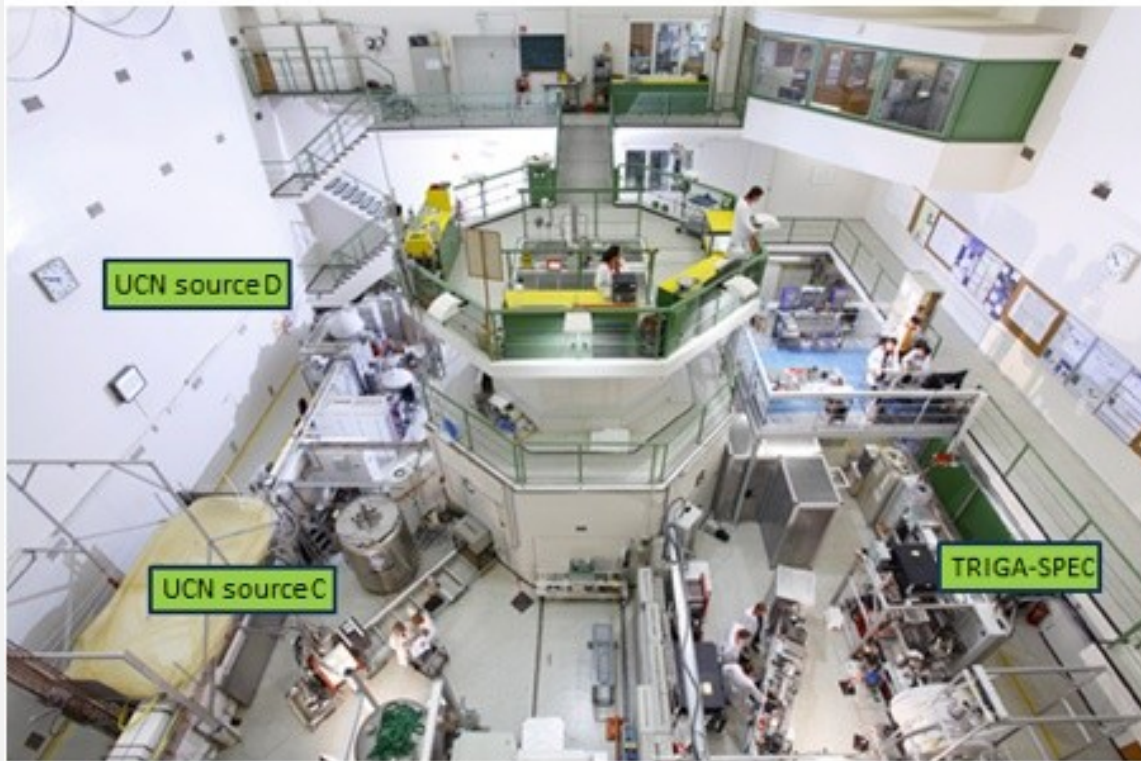


- Mark I
- С 1960 года
- тепловая мощность от 10 до 250 кВт



- Mark III
- С 1968 года
- тепловая мощность от 1 до 2 МВт

Эксперименты на TRIGA-Mainz



- В вертикальных каналах производится облучение образцов
- Горизонтальные каналы А и В задействованы для ионной ловушки ТригаТрап

- Горизонтальные каналы С и D задействованы для источников УХН

Список реакторов ТРИГА

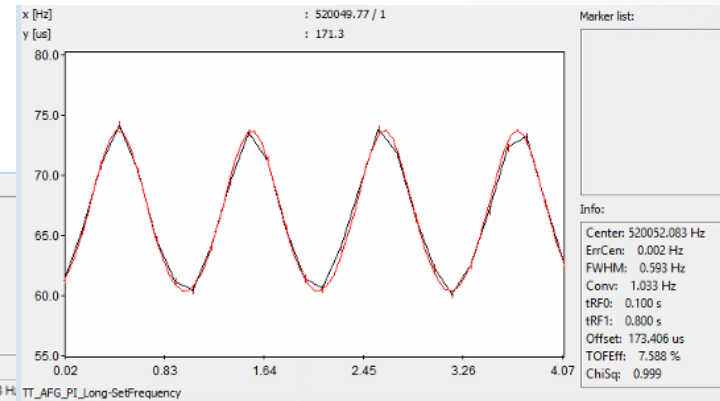
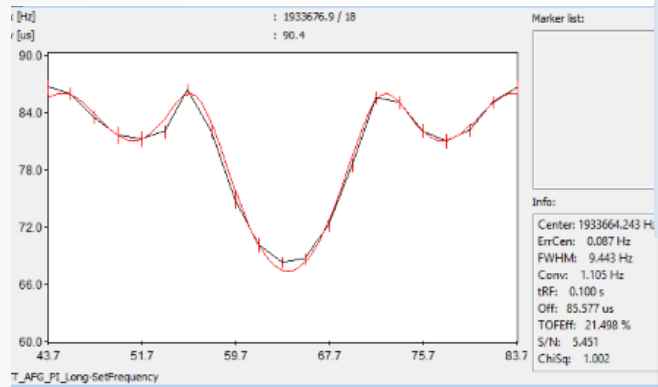
Mark 1			Mark 2			Mark 3			ACRP		
Brazil	100	1960	Viena	250	1962	Ger FRN	1000	1972	Jap NSRR	300	1975
Congo	50	1959	Bangladesh	3000	1986	Kor SEOUL	2000	1972	USA ACRR	4000	1967
Ger FRH	250	1973	Congo	1000	1972	Mexco	1000	1968			
Ger HD1	250	1966	Finland	250	1962	Thai TRR	2000	1977			
Ger HD2	250	1978	Ger FRMZ	100	1965	USA BERCLEY	1000	1966	Dual core		
UK ICI	250	1971	Inndonesia KARTINI	100	1979	USA GA	1500	1966			
USA ILLINOIS	10	1971	Indonesia BANDUNG	2000	1964				Rom PITESTI	14000	1980
USA ATUTR	250	1989	Pavia	250	1965				Rom PITESTI	500	1980
USA DOW	300	1967	Italy RC1	1000	1960	Mark F					
USA GA	250	1960	Jap MUSASHI	100	1963						
USA GA	250	1958	Jap RIKKIO	100	1961	USA AFFRI	1000	1962	Modified to TRIGA		
USA GSTR	1000	1969	Kor SEOUL	250	1962	USA DORF	250	1989			
USA NRF	1000	1977	Mal PUSPATI	1000	1962	USA NORTHRI	1000	1963	Ger FRF2	1000	1977
USA RRF	250	1968	Slo LJUBLIANA	250	1966				Philipp PRR	3000	1963
USA MICHIGAN	250	1969	Turk ITU-TRR	250	1979				Taiwan THOR	2000	1961
USA UTAH	100	1975	USA KSU	250	1962				USA ARRR	250	1964
USA VET. ADMIN	20	1959	USA NARD	250	1977				USA TEXAS	1000	1962
USA UCI IRVIN	250	1969	USA OREGON	1100	1967				USA PUERTO RICO	2000	1960
USA UI	100	1960	USA COLUMBIA	250	1977				USA WASHINGTON	1000	1961
USA ARIZONA	100	1958	USA CORNEL	500	1962				USA WISCONSIN	1000	1961
USA UT Texas	1000	1963	USA TEXAS	1100	1992				USA PSBR PENN	1000	1955
			USA DAVIS	2000	1990			Operaiting			
			USA ILLINOIS	1500	1969			Shutdown			
								Decommissioned			

Доступные для TRIGA-TRAP методы измерения масс атомов

$$m_{atom} = \frac{\omega_{c,ref}}{\omega_c} (m_{ref} - m_e) + m_e$$

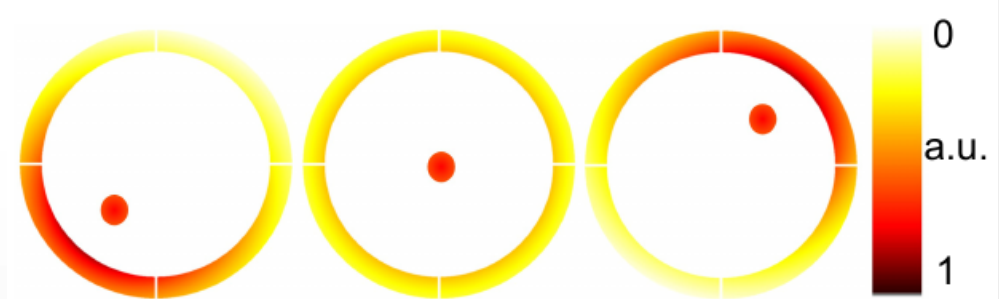
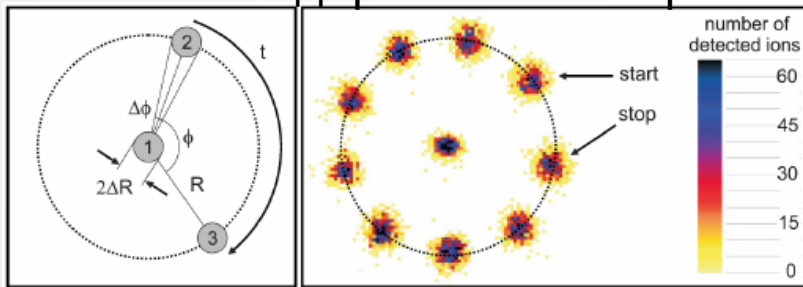
В ловушках Пеннинга задача измерения массы атома сводится к измерению отношения частот движения измеряемого и опорного иона

- Метод время пролетного ионного циклотронного резонанса



- Неразрушающий метод на основе Фурье-преобразования

- Новый метод фазового отображения



S. Eliseev, K. Blaum, M. Block et al. *Phase-imaging ion-cyclotron-resonance measurements for short-lived nuclides*. Phys. rev. lett., **110**(8), (2013) 082501.

Облучение образцов для ядерной физики и химии

- Основное облучение потоком нейтронов производится в «карусели» на 20 мест для 40 образцов, расположенной в верхней части отражателя
- Возможно использование камеры в центре активной зоны с большим потоком нейтронов
- Для работы с короткоживущими нуклидами есть две петли пневмопочты – устройства быстрой доставки облучённых образцов сжатым воздухом

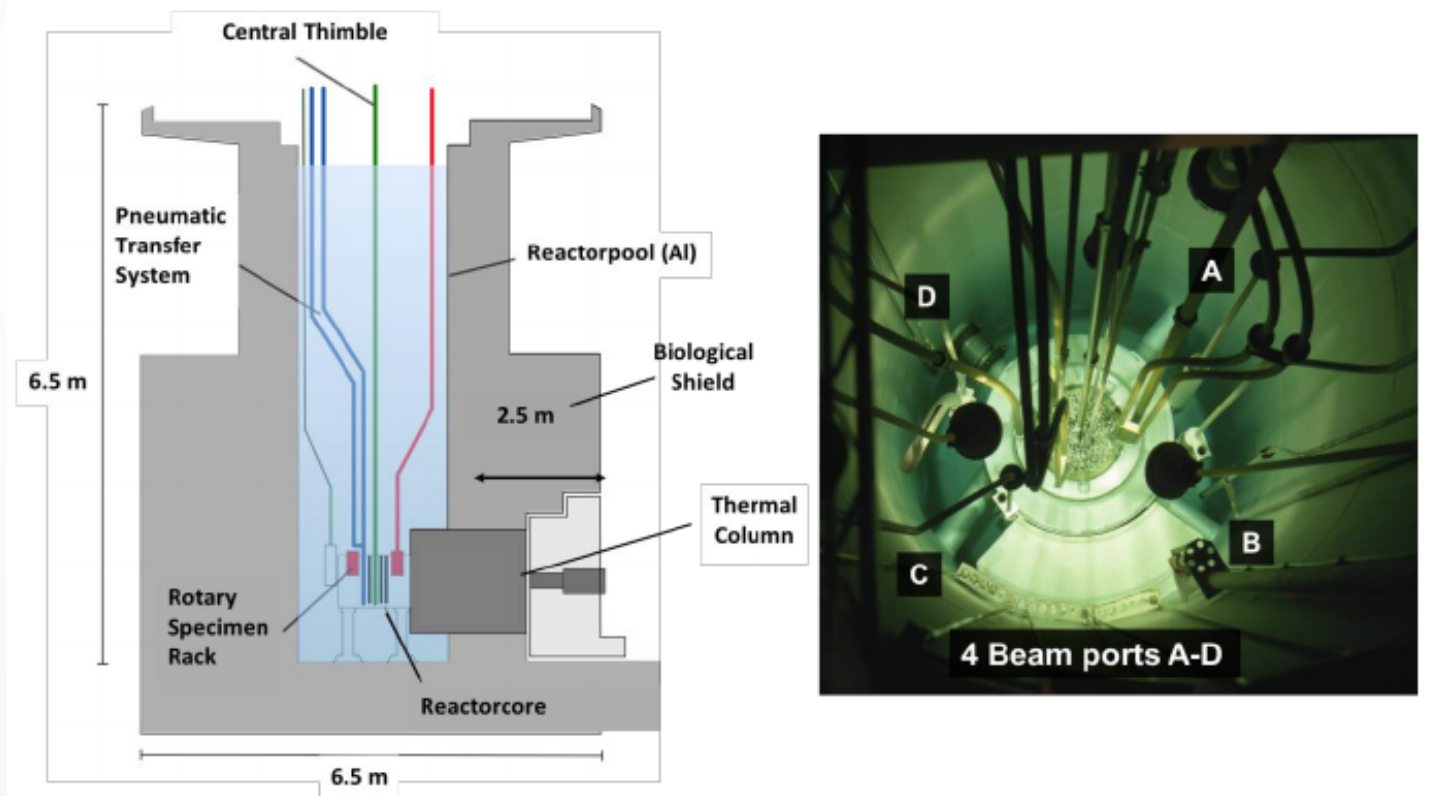
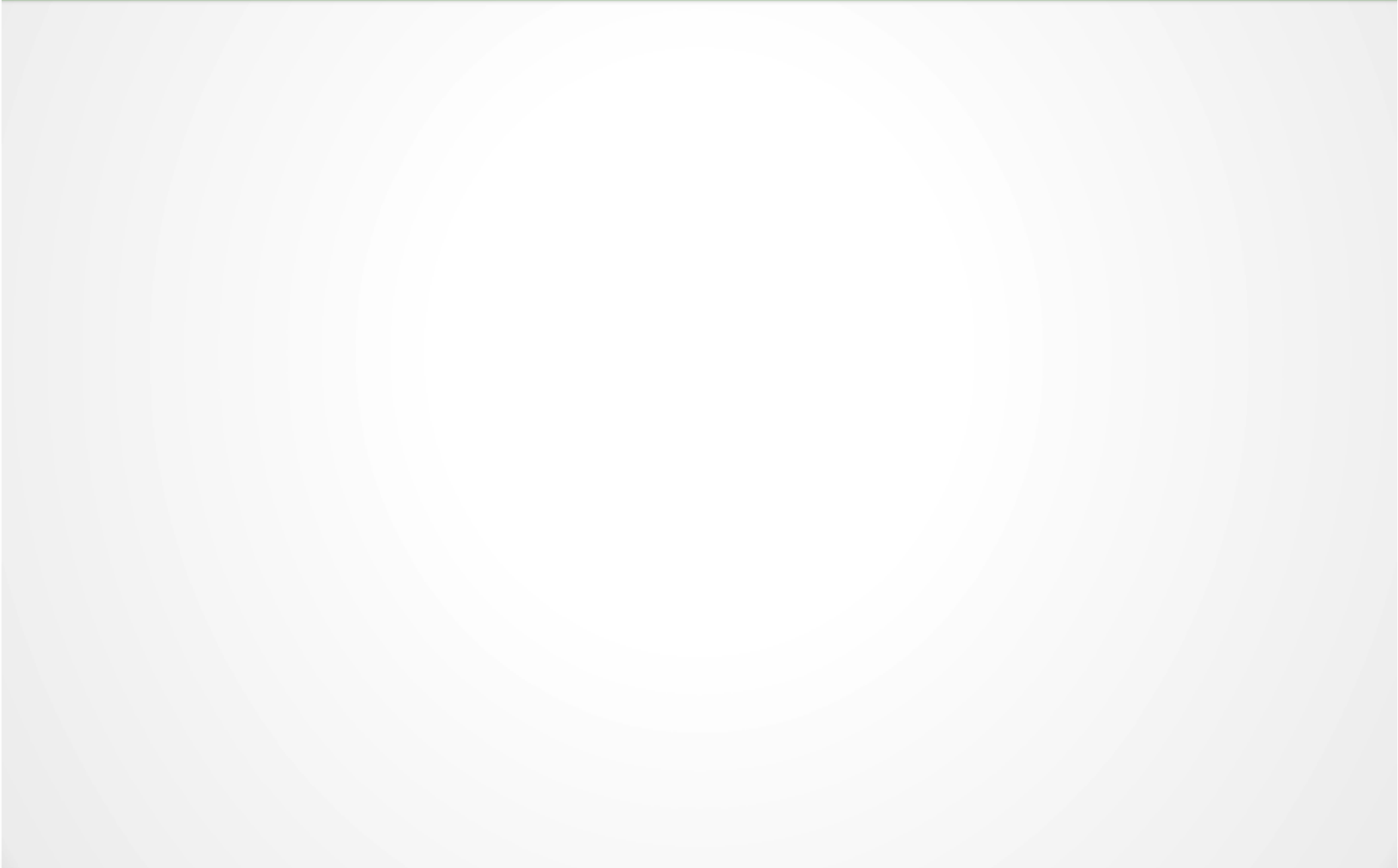
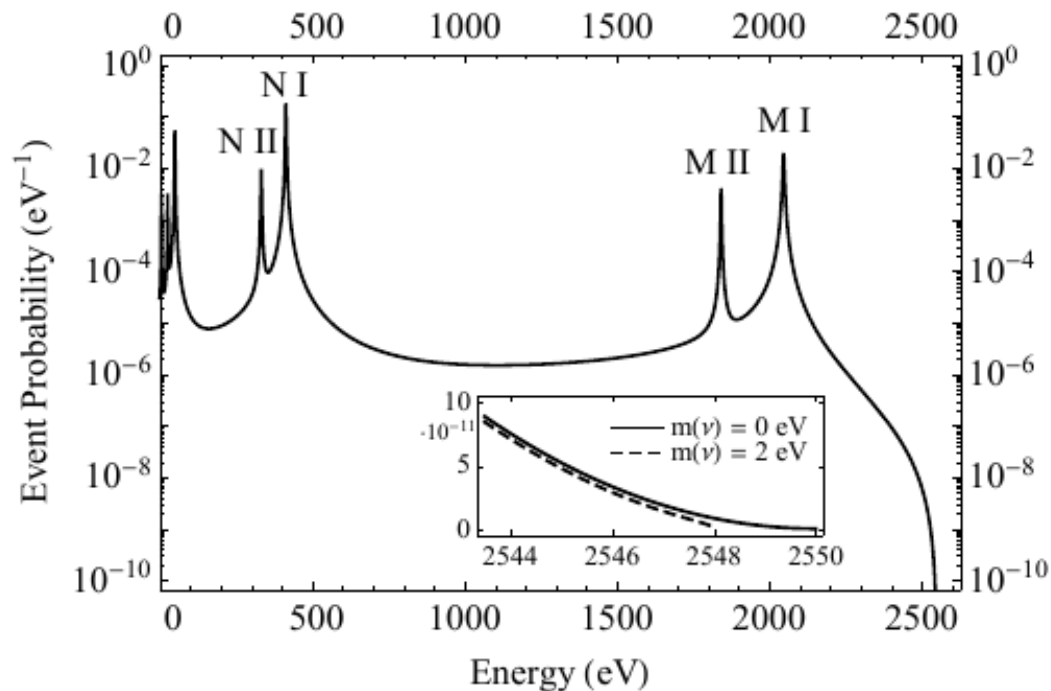
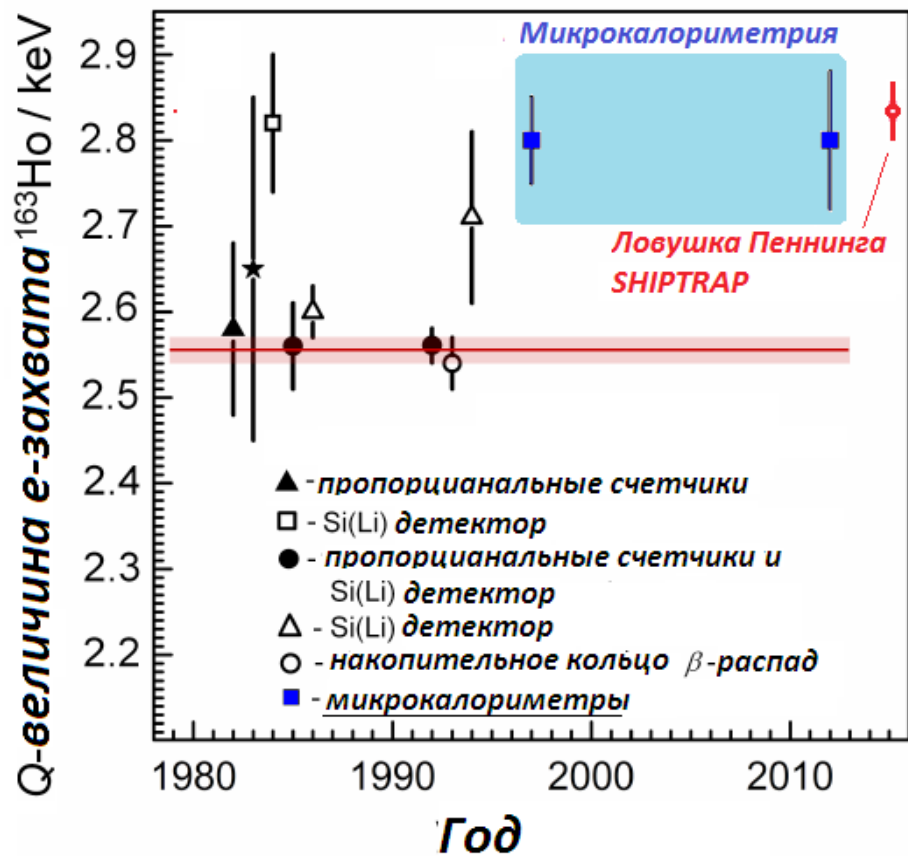


FIG. 3. Vertical cross section view of the TRIGA Mainz and photo of reactor pool indicating the position of the four beam ports A-D.

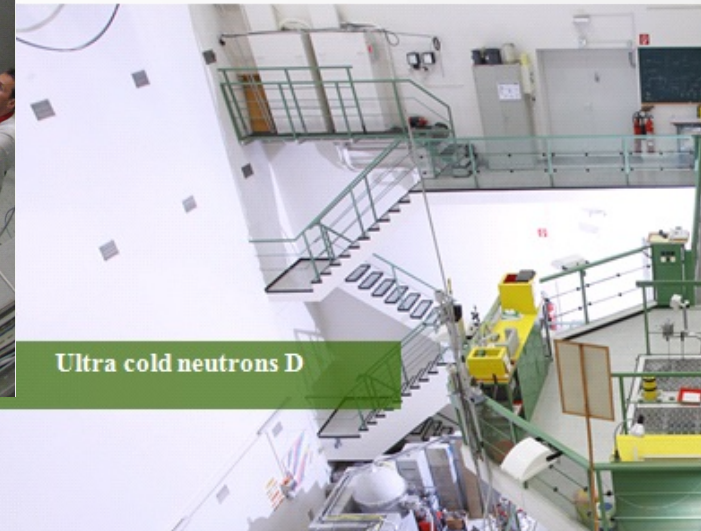
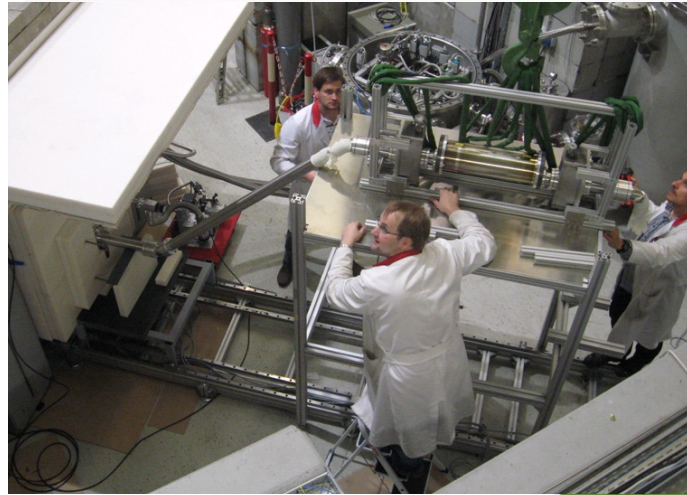
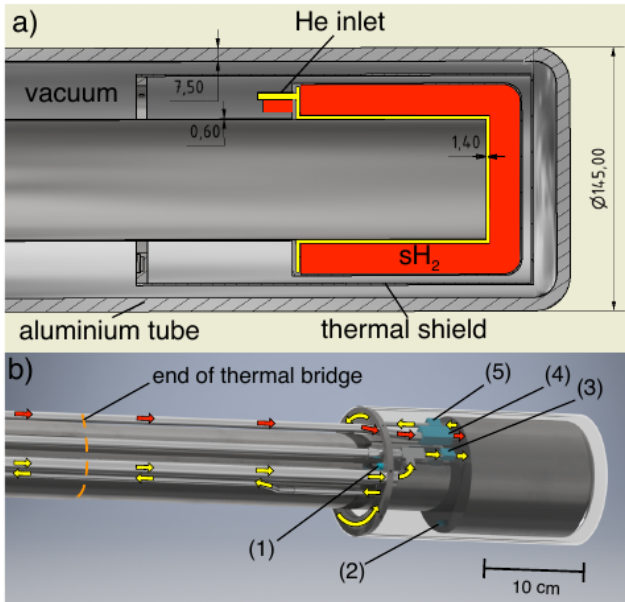


Наработка ^{163}Ho при облучении мишени из эрбия нейтронами для определения точного Q-значения электронного захвата

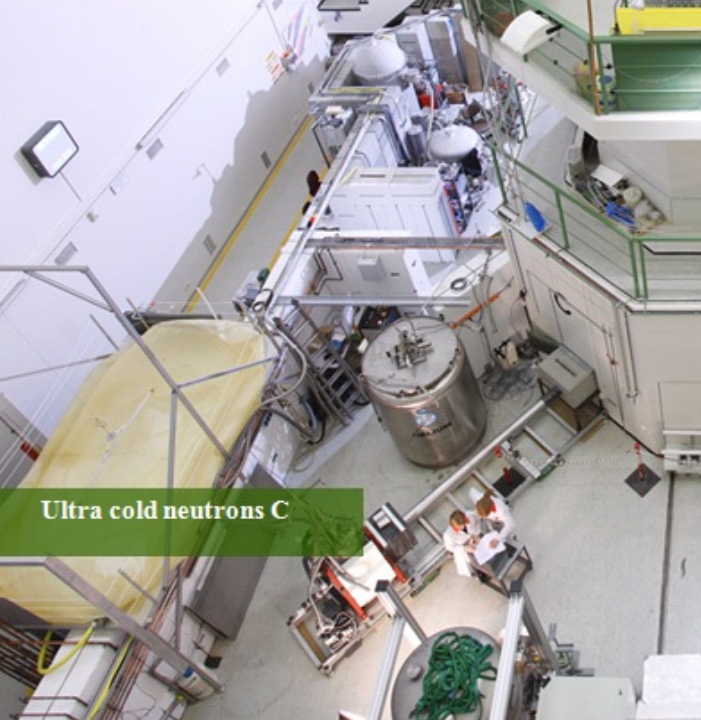
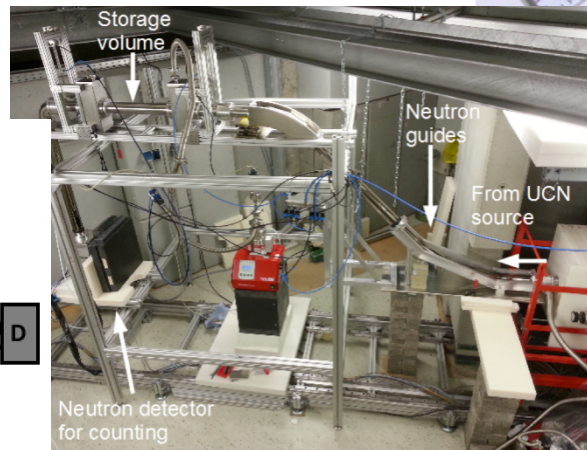
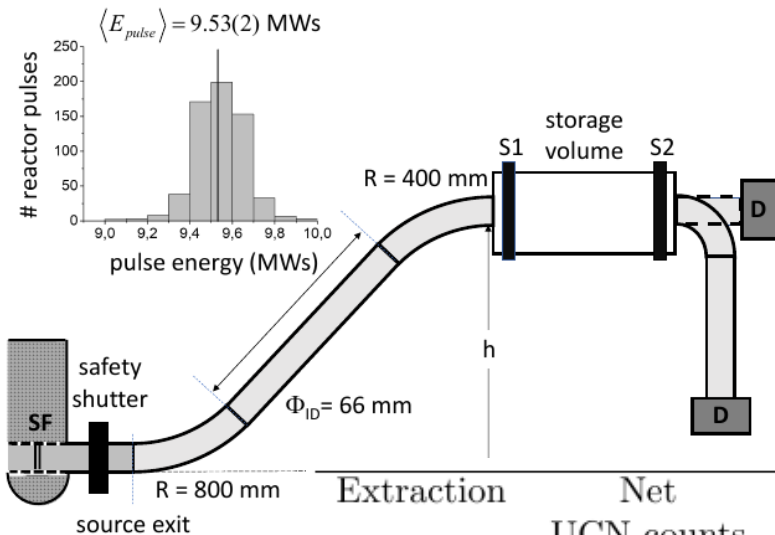


$$\Delta M = 2833 (30_{stat.}) (15_{syst.}) \text{ эВ}/c^2$$

Источники УХН на реакторе ТРИГА



Ultra cold neutrons D



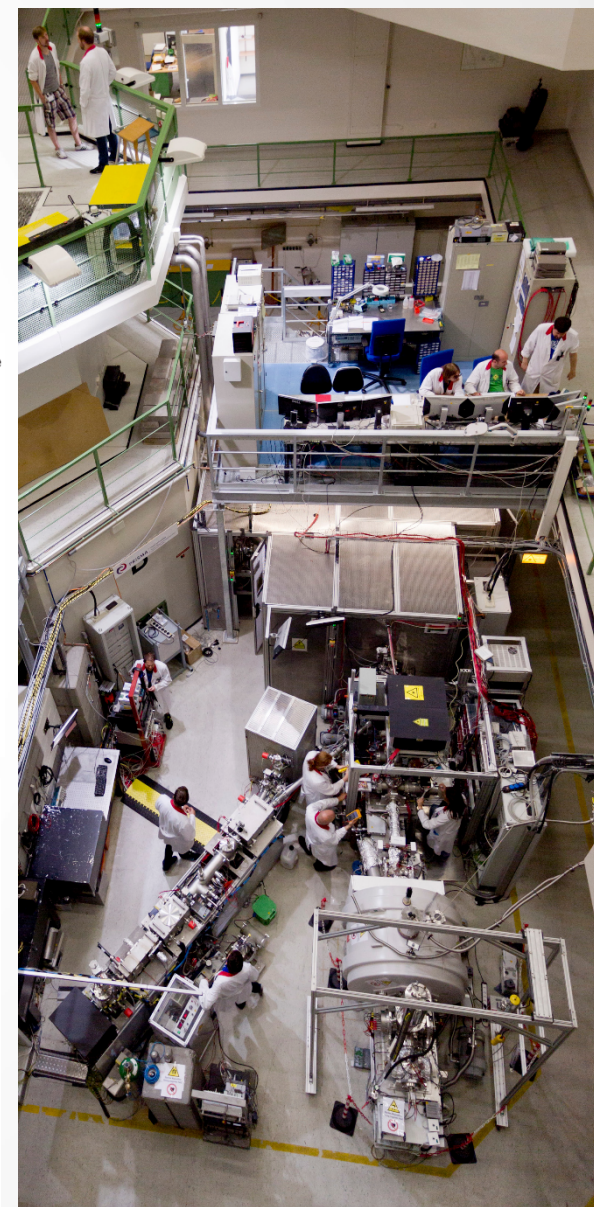
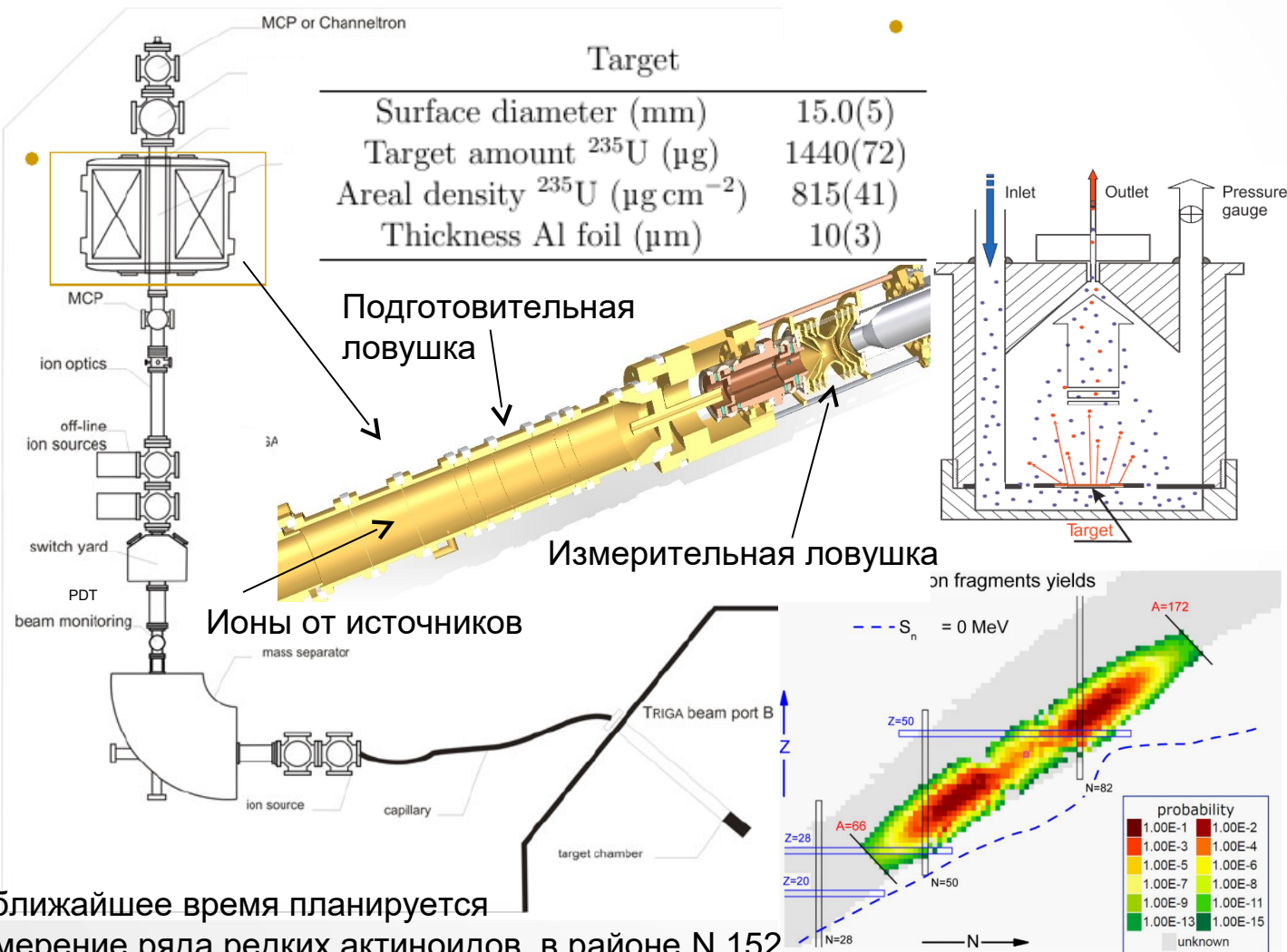
Ultra cold neutrons C

ВВР-М до 5 УХН/см³

	Extraction	Net UCN counts	Subtracted leakage counts	Density (UCN/cm ³)
horizontal		51299(215)	722(30)	1.60(1)
vertical		77941(383)	1229(30)	2.43(2)

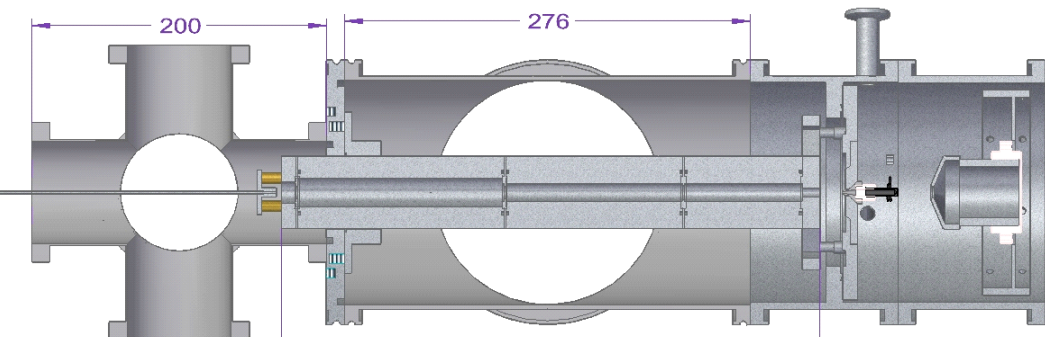
Система TRIGA-TRAP

– Пока единственная установка на базе ловушки Пеннинга на реакторе для масс-спектрометрии продуктов деления

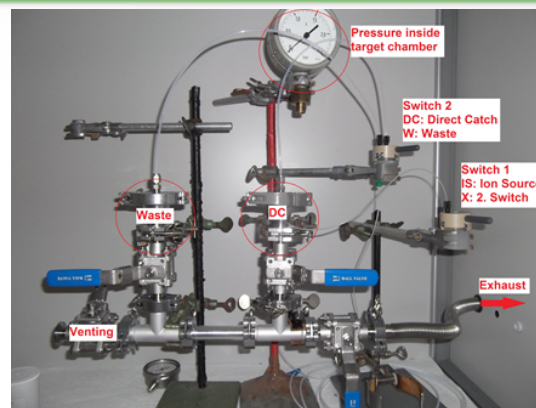


В ближайшее время планируется измерение ряда редких актиноидов, в районе N 152 таких как ^{246}Cm , ^{248}Cm , ^{245}Cm , ^{250}Cf , ^{251}Cf оф-лайн

Газовый носитель



Турбомолекулярные и Рутс вакуумные насосы



Part	τ_{part} (%)
Gas-jet	17.7(4)
Aerodyn. lens	40(2)
IS	55(8)
Magnet	88(9)
RFQ _{cw}	25(4)
RFQ _{bunched}	38(8)
PDT	$2 \cdot 10^{-4}$

