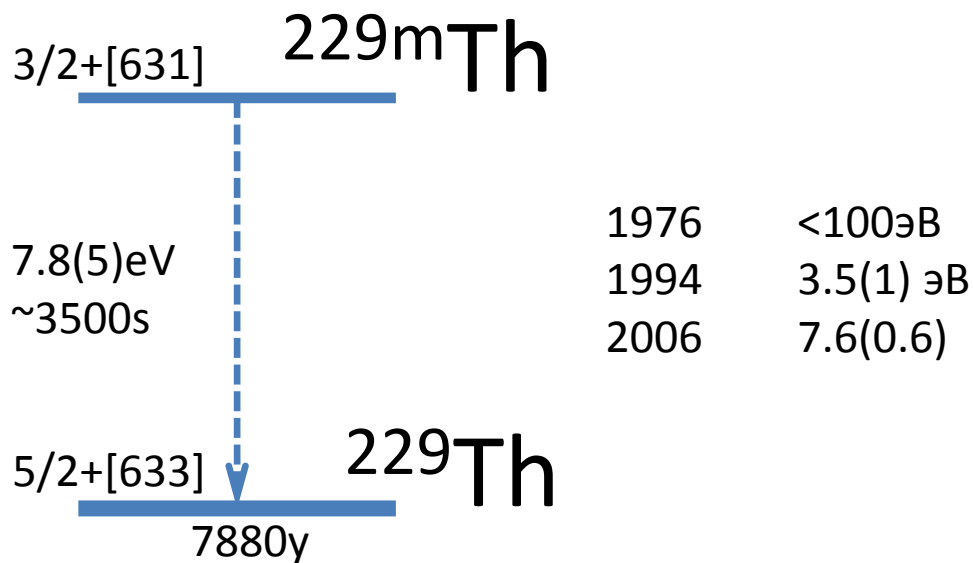


Мотивация
Статус
ПИЯФ - ?



Мотивация

Особенности

- Большое время жизни, малая ширина линии
- Менее чувствительны к внешним полям
- Возможность взаимодействия в оптическом диапазоне
- Влияние химического окружения на распад
- Зависимость энергии изомера от сильного и э.м. взаимодействия

Возможные приложения:

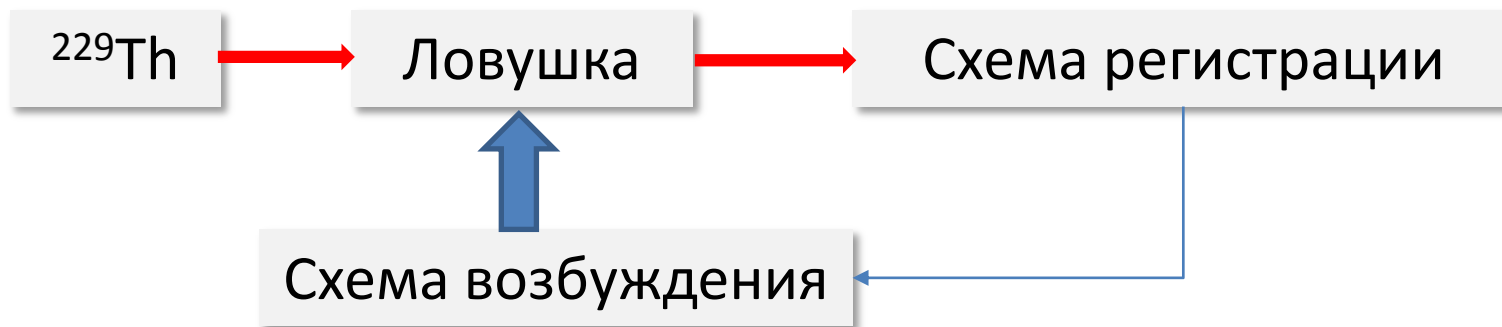
Метрология, техника, фундаментальная физика, космология

- Твердотельные часы, стандарт частоты.
- Мессбауэровская спектроскопия в оптическом диапазоне.
- Qubit.
- Зависимость от времени фундаментальных констант.

Мотивация

Требуется

Технологии генерации и регистрации изомера.



Почему в ПИЯФ?

- Опыт работы ГЭЯ с газовыми источниками ионов и ионными пучками.
- Единственный источник ионов $^{229g,m}\text{Th}$ в JYFL - в зоне ответственности ГЭЯ.
- Наличие опыта дружественных лазерной, радиохимической группы, группы по поляризации ^3He .
- Возможность генерации ^{229m}Th на Ц80.

Мотивация

Ближайшие задачи

1. Отработка методики регистрации изомера.

- Требуется прямая регистрация каналов распада (фотоны, электроны). Изучение особенностей распада в различных условиях.
- Наблюдение сверхтонкой структуры изомерного состояния.

2. Определение значения энергии перехода

- Уточнение схемы энергетического баланса
- Прямое измерение длины волны испускаемого фотона
- Наблюдаемые при заселении изомера.

3. Заселение изомерного состояния

- С использованием электронного моста.
- Прямое двухфотонное возбуждение.

ExtreMe Matter Institute EMMI

EMMI Workshop

The ^{229m}Th Nuclear Isomer Clock

September 25 - 27, 2012
GSI, Darmstadt, Germany

Предложения экспериментов и м

- Progress towards fabrication of ^{229}Th sources
- Prospects for a Nuclear Optical Frequency Standard
- Constraining the Evolution of the ^{229}Th Isomer (2010)
- Optical transition of the ^{229}Th nuclear isomer
- Nuclear laser spectroscopy of the ^{229}Th isomer
- Proposed Experimental Method to Measure the ^{229}Th Isomer Lifetime (2009)
- "Investigations of the Low Lying Isomer of ^{229}Th "
- "The search for the existence of ^{229}Th isomer"
- Wigner Crystals of ^{229}Th for Optical Frequency Standards
- Ultraviolet Photon Emission Observation of the ^{229}Th Isomer
- Towards a direct transition energy measurement

Эксперименты по поиску переходов

- Search for a "3.5-eV isomer" in ^{229}Th
- Energy Splitting of the Ground-State ^{229}Th
- Search for decay of the 3.5-eV level
- Reexamination of the Optical Gamma-ray Emission
- Observation of Electromagnetic Resonance

Теоретические работы

- Optical pumping ^{229m}Th through the ^{229}Th isomer
- Nuclear structure of ^{229}Th , Phys. Rev. Lett. 92, 122501 (2004)
- Spontaneous emission probability of the ^{229}Th isomer
- Decay of the low-energy isomer ^{229m}Th
- Resonance conversion as a dominant decay channel
- Impact of the electron environment on the ^{229}Th isomer

Ядерные часы

- Performance of a ^{229}Th isomer as a nuclear clock

Теоретические работы связанные с

- Coulomb energy contribution to the ^{229}Th isomer
- Splitting sensitivity of the ground state ^{229}Th
- Temporal variation of the fine structure constant
- Sensitivity of nuclear transition frequencies to the fine structure constant
- Enhanced Effect of Temporal Variation of the Fine Structure Constant on the ^{229}Th Isomer

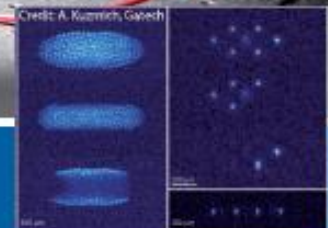
Credit: J. Sterba/C.Brandau



Росатом создаст
ядерные часы
Известия 2012

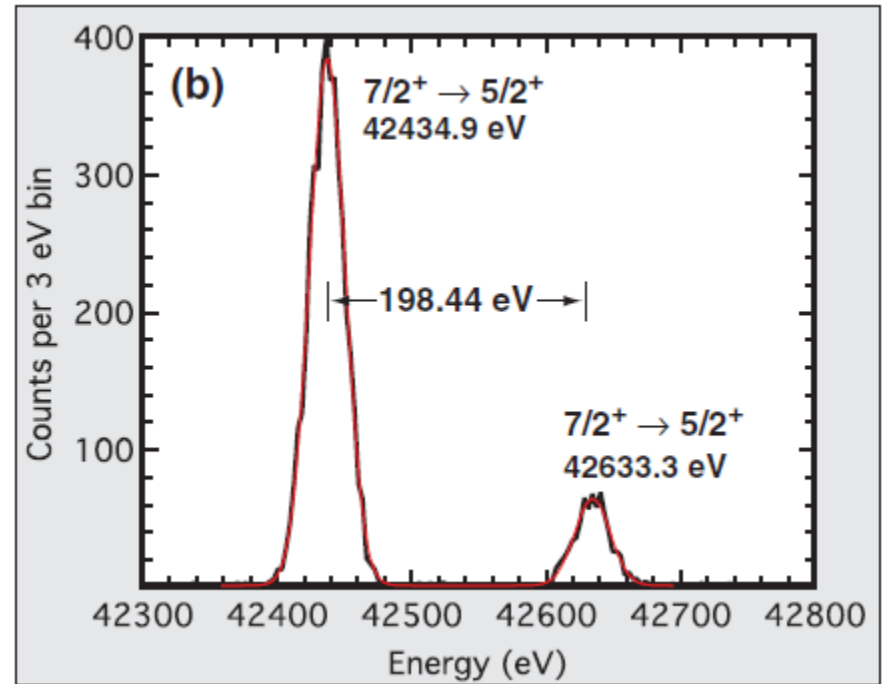
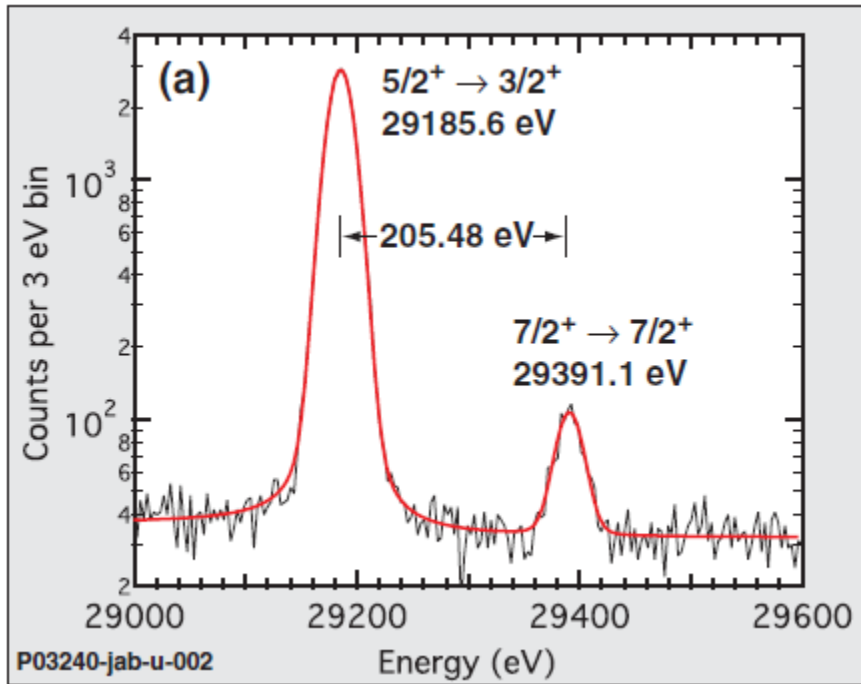
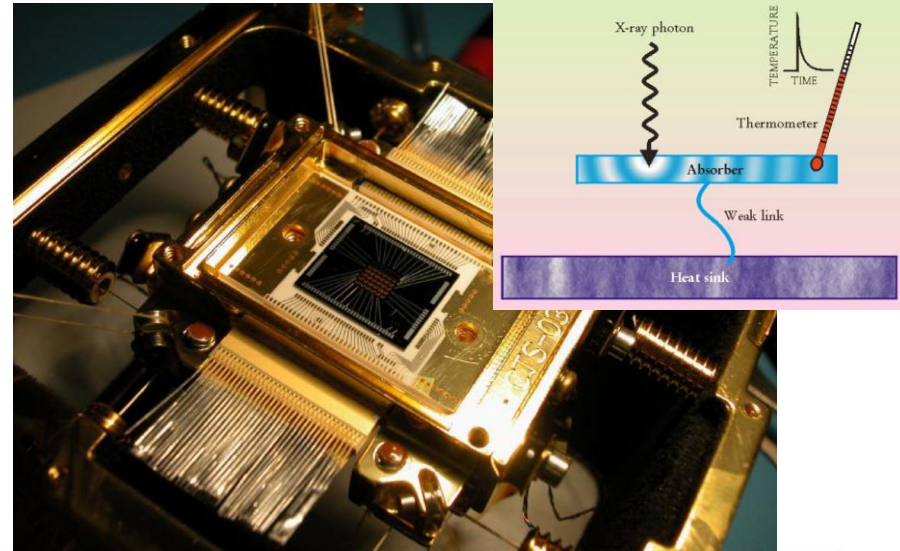
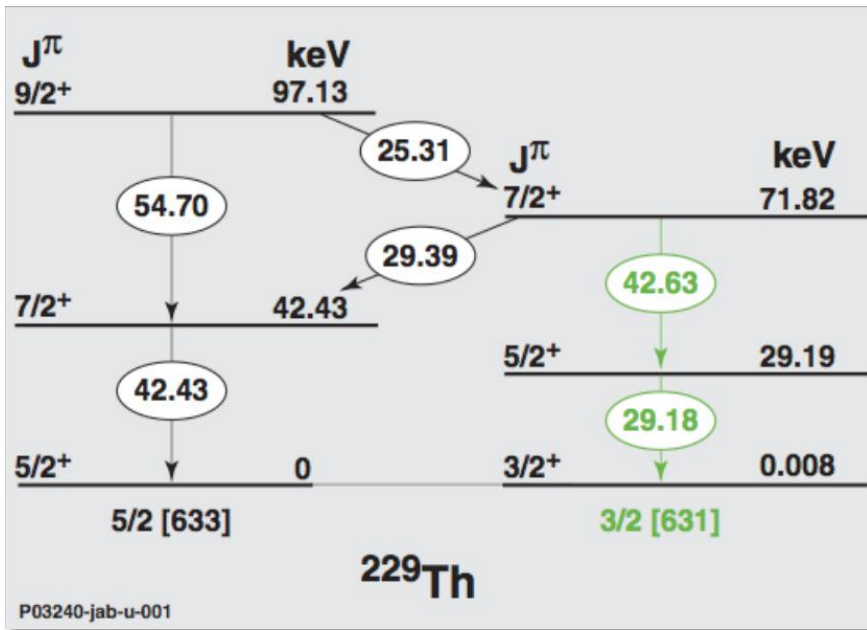


Credit: Th. Schumm, TU Vienna



Credit: A. Kuznetsov, GSI

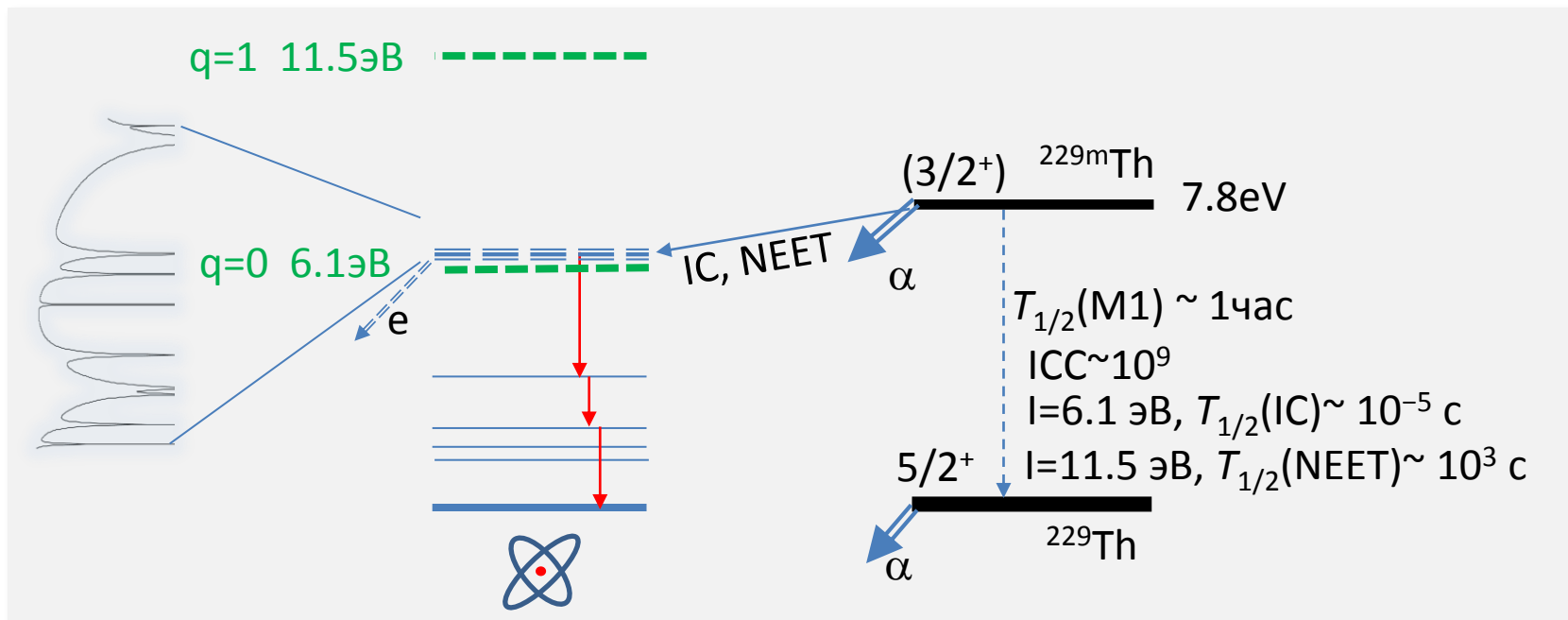
NASA's XRS absorber/LLNL
26eV FWHW. Beck et al 2006



Наблюдаемые

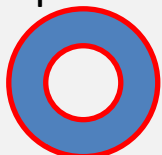
- Фотон $\sim 160\text{nm}$
- Конверсионный электрон (0-5eV)
- Спектр фотонов в NEET
- α -спектр
- Временная зависимость α -спектра
- Сверхтонкая структура ионных уровней

- Распад с эмиссией фотонов и наблюдение сверхтонкой структуры только из ионов тория.
- Для наблюдения фотона 160nm желательны 3х-зарядные ионы.
- Регистрация СЕ требует тонкого источника с малой работой выхода.

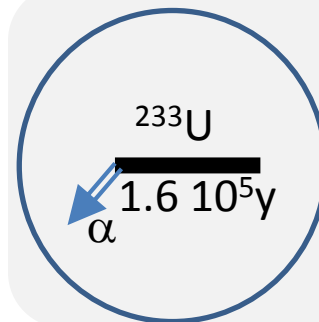


Заселение изомерного состояния

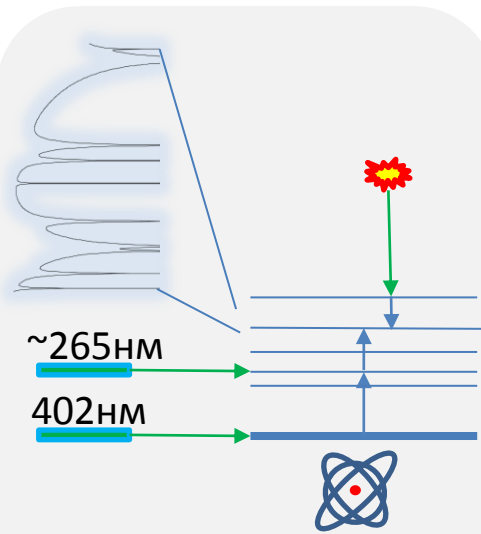
ALS @ LBL: 10^{16} фотонов/с, 10^6 с $^{-1}$



29.2кэВ

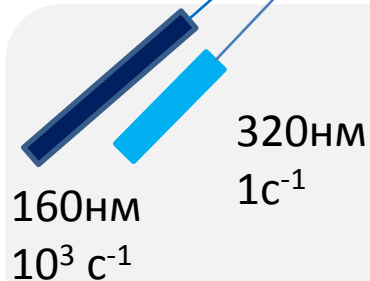
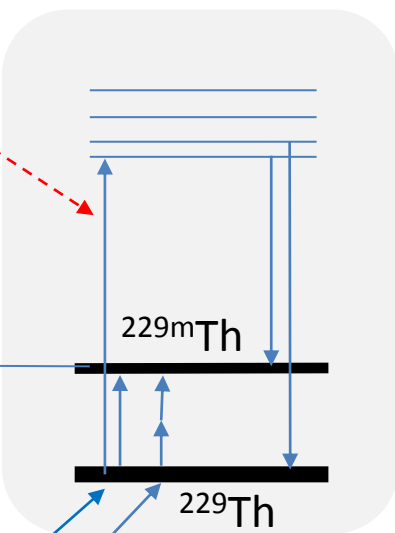


10^5 Бк, 2%, $\epsilon \sim 1.6\%$
 ~ 40 с $^{-1}$

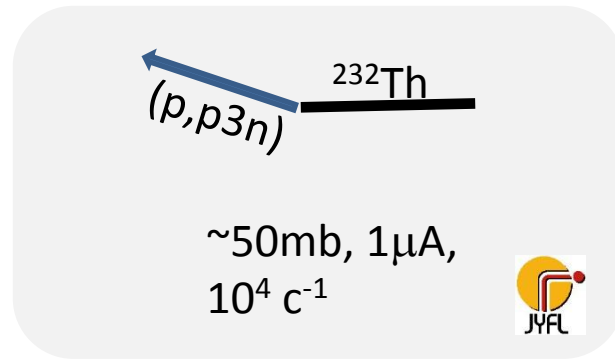
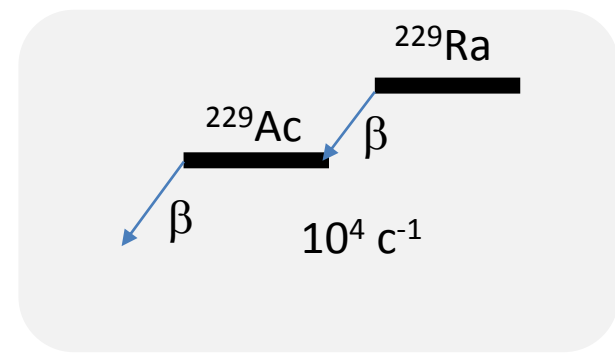


Возбуждение через
электронный мост

NEET



Прямое возбуждение



Эксперименты по поиску изомера ^{229}Th

- Оптическое излучение после распада ^{233}U .
- Временная зависимость интенсивностей альфа и гамма линий.
- Электроны конверсии.
- Флюоресценция после широкополосного облучения и в тлеющем разряде.
- Рассеянное на ^{229}Th оптическое излучение (наблюдение сверхтонкой структуры).

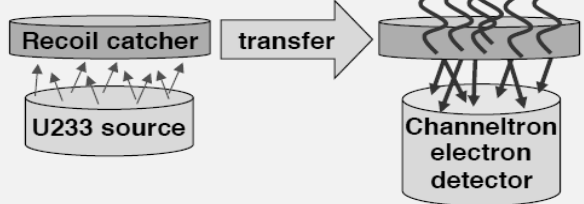
$T_{1/2}$	Заселение	Наблюдаемые	Источник
1-3 мин	^{229}Th + разряд	α -спектроскопия	PRC 79, 034313 (2009)
13.9 ± 3 ч	^{230}Th (γ, n), хим очистка	α - спектроскопия	J. Rad. Nucl. Chem. 255 63 (2003)
6 ± 1 ч;	^{233}U , хим очистка, атомы отдачи на MgF_2	Два ФЭУ, вакуум. $\lambda > 160$ nm, отсутствует IC.	PRL 109, 160801 (2012)

Эксперименты по поиску изомера ^{229}Th

Распад ^{233}U

Jason Burke, LLNL, EMMI
2012

^{229}mTh recoils
onto catcher



Электронный мост

Использовался тлеющий разряд или HgXe –лампа.

Флюоресценция, α -распад.

Заселение в реакциях

$^{232}\text{Th} + p(1\text{GeV}) \rightarrow ^{229}\text{Fr} -$
 $^{229}\text{Ra} - ^{229}\text{Ac} - ^{229}\text{Th}$

ISOLDE

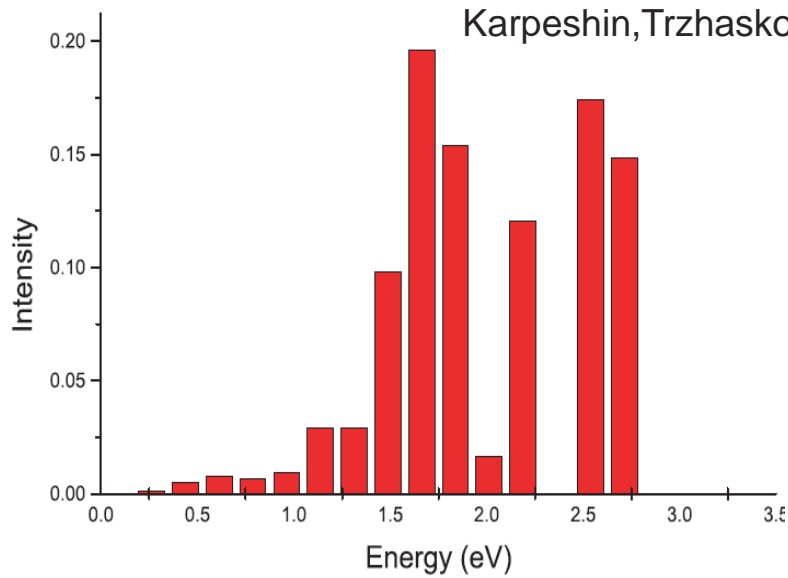
$^{232}\text{Th} + p(50\text{MeV}) \rightarrow ^{229}\text{Th}$

IGISOL

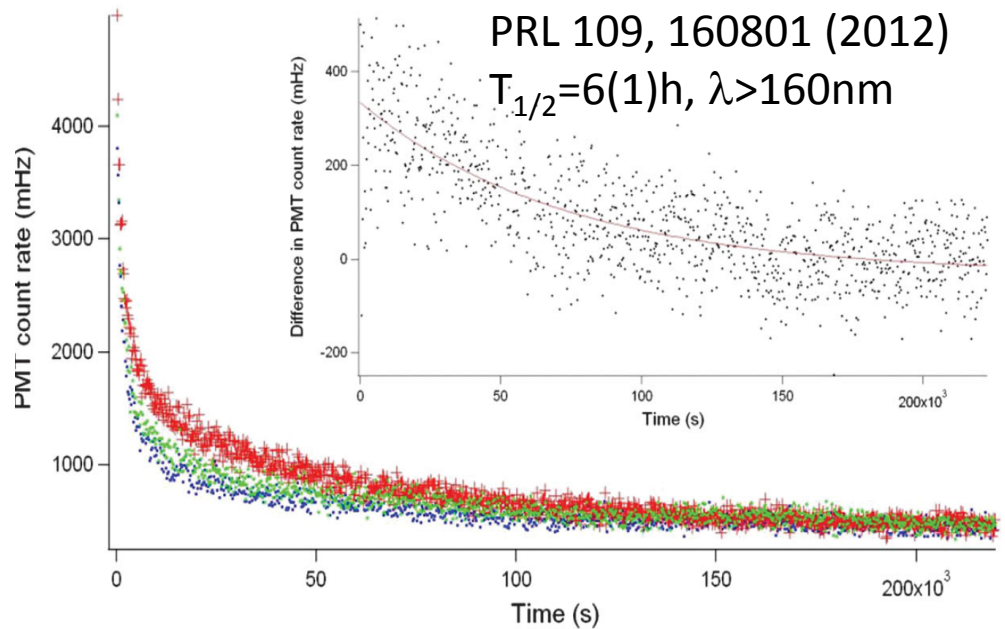
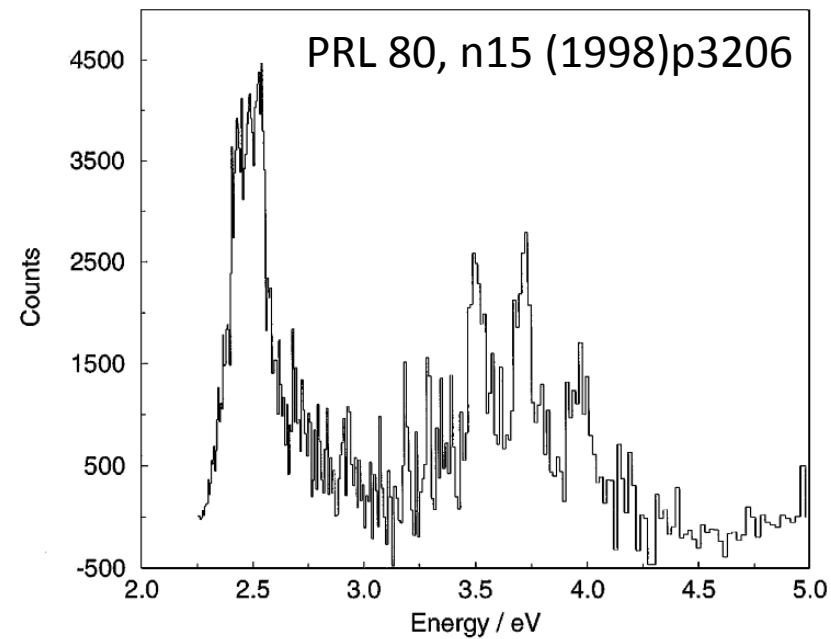
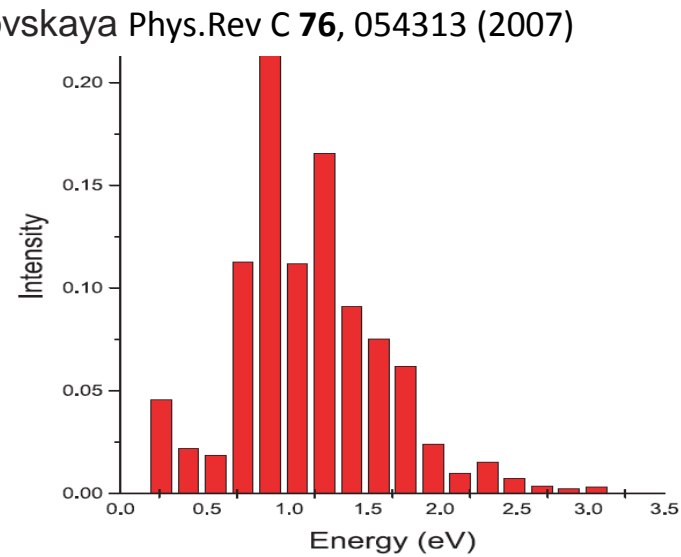
- Неопределенное время жизни в среде $10^{-5}\text{с} - 10^4\text{с}$.
- Возможен безрадиационный распад в среде.
- Вероятность IC в среде на 5-6 порядков выше распада с эмиссией фотонов
- Атомы отдачи имеют пробег 20-30нм. Пробег SE в металле 2-5нм.
- Фотоны могут иметь $\lambda < 130\text{нм}$.
- Фон от сопутствующего излучения (α , β , γ , e, фотоны).
- Флюоресценция среды под действием излучения. Термолюминисценция.

Наблюдаемые: Фотоны

Primary photons



Secondary photons



Требования к эксперименту

Общие

- Очистка образца от примесей и продуктов распада.
- Масс-сепарация получаемых ионов
- Работа в вакууме

Регистрация оптического излучения

- Регистрация излучения 160нм требует имплантации в прозрачную для VUV подложку. Можно ожидать сильной конкуренции со стороны NEET канала и безрадиационной разрядки.
- Спектр излучения в результате NEET процесса может зависеть от материала подложки.
- Время «высвечивания» изомера после имплантации от минут до часов.

Регистрация уровней сверхтонкой структуры

- Флуоресценция в RF ловушке

Регистрация электронов конверсии

- Регистрация электронов 0-10эВ.
- Тонкий источник на поверхности с малой работой выхода.
- Регистрация электронов конверсии сразу после высадки (0-100μсек)

Ионы тория для регистрации изомерного перехода

Пучок ионов

$^{229}\text{Th}^{+,++,+++}$

^{233}U α -распад

Aysto, Jyvaskyla

Thirolf, Munich

^{229}Th - лазерное испарение

Chapman, USA

Tamm, PTB D

- Масс-сепарация и удержание в ловушке
- Возможность имплантации в различные среды
- Возможность «мягкой» высадки на поверхность
- Наблюдение конверсионных электронов
- Возможность изучения процессов с электронным мостом
- Определение ядерного состояния по переходам сверхтонкой структуры
- Можно использовать лазерное охлаждение
- Флуоресценция одиночных ионов
- Малое число ионов ($\approx 10^5$)
- Чистая система

Допирование в кристалл


$^{229}\text{Th}^{4+}$

Hudson, USA

ATI Vienna

- Прямое возбуждение/регистрация „ядерной флуоресценции“
- Можно пренебречь Допплеровским уширением
- Проще (?)
- Большое число частиц
- Эффекты кристалла(?)
- Существенно удобнее для приложений

Группы работающие с пучком ионов ^{229}Th

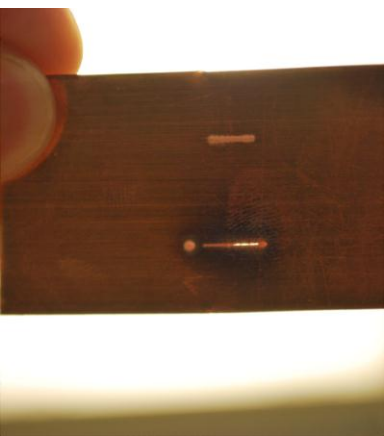
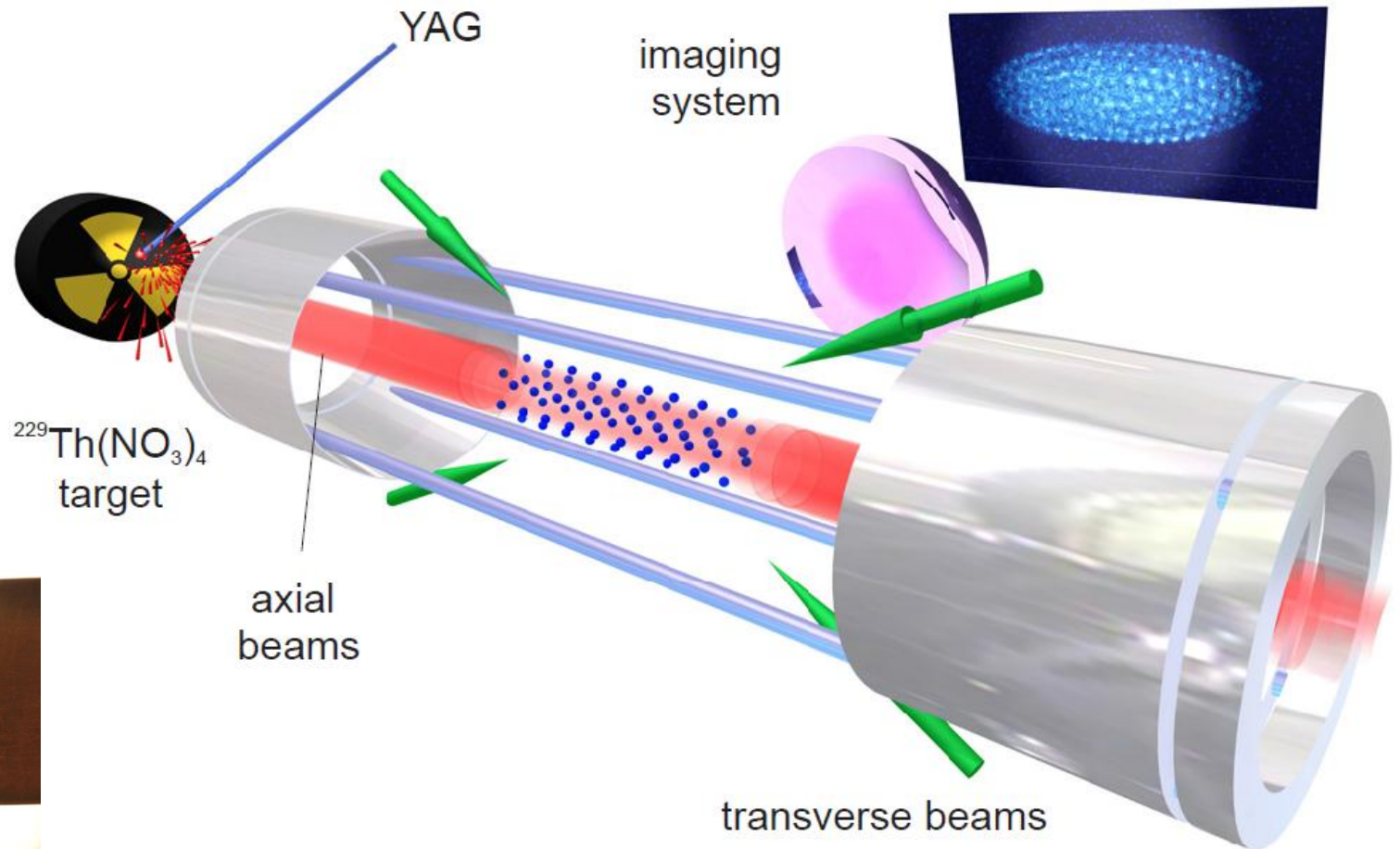
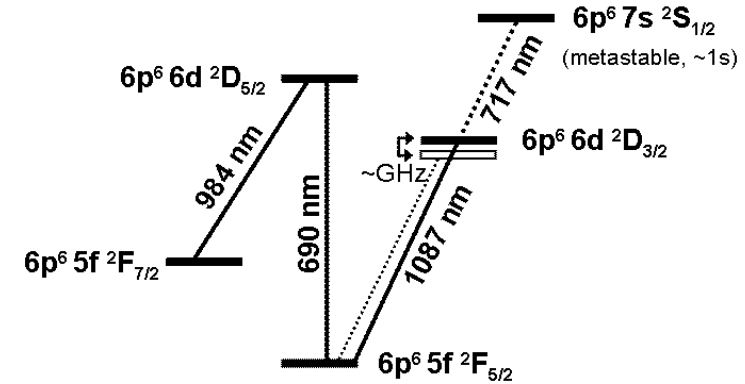
Группа	Метод получения	Оборудование для манипуляции ионами	Наблюдаемые
Aysto, Jyvaskyla 	^{233}U α -распад: $^{232}\text{Th}(p,p3n) \ ^{229m,g}\text{Th}$ $^{229}\text{Th}_{1,2,3+}$, ($^{229m}\text{Th}_{1,2,3+}$)	Газовая ячейка, магнитный фильтр, RF- и магнитная ловушки, установки для коллинеарной лазерной спектроскопии и ионизации	Сверхтонкая структура
Thirolf, Munich	^{233}U α -распад: ($^{229}\text{Th}_{1,2,3+}$, $^{229m}\text{Th}_{1,2,3+}$)	Газовая ячейка, RFQ-фильтр	Спектр в УФ-области
Chapman, USA Tamm, PTB D	^{229}Th - лазерное испарение: $^{229}\text{Th}_{1,2,3+}$	Лазерный ИИ, RF-ловушка, схема оптического охлаждения	УФ - флуоресценция

$^{229}\text{Th}^{3+}$ в ионной ловушке

Chapman, Kuzmich USA

Tamm, Peik PTB D

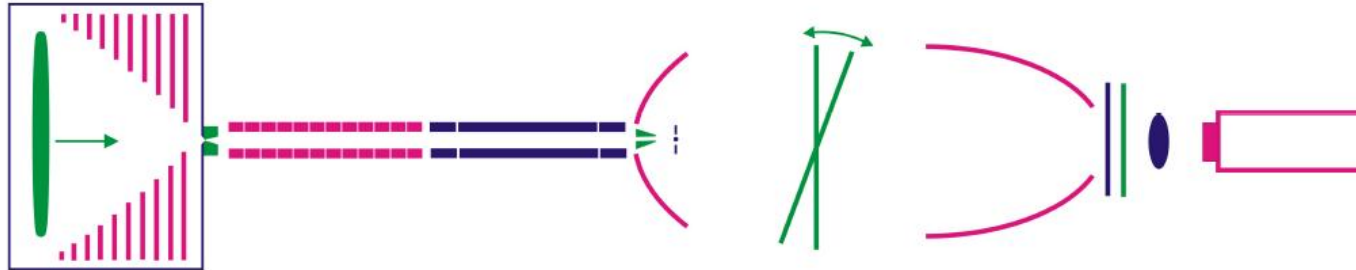
Atomic level scheme of $^{229}\text{Th}^{3+}$ allowing for laser cooling.



LMU Munchen setup

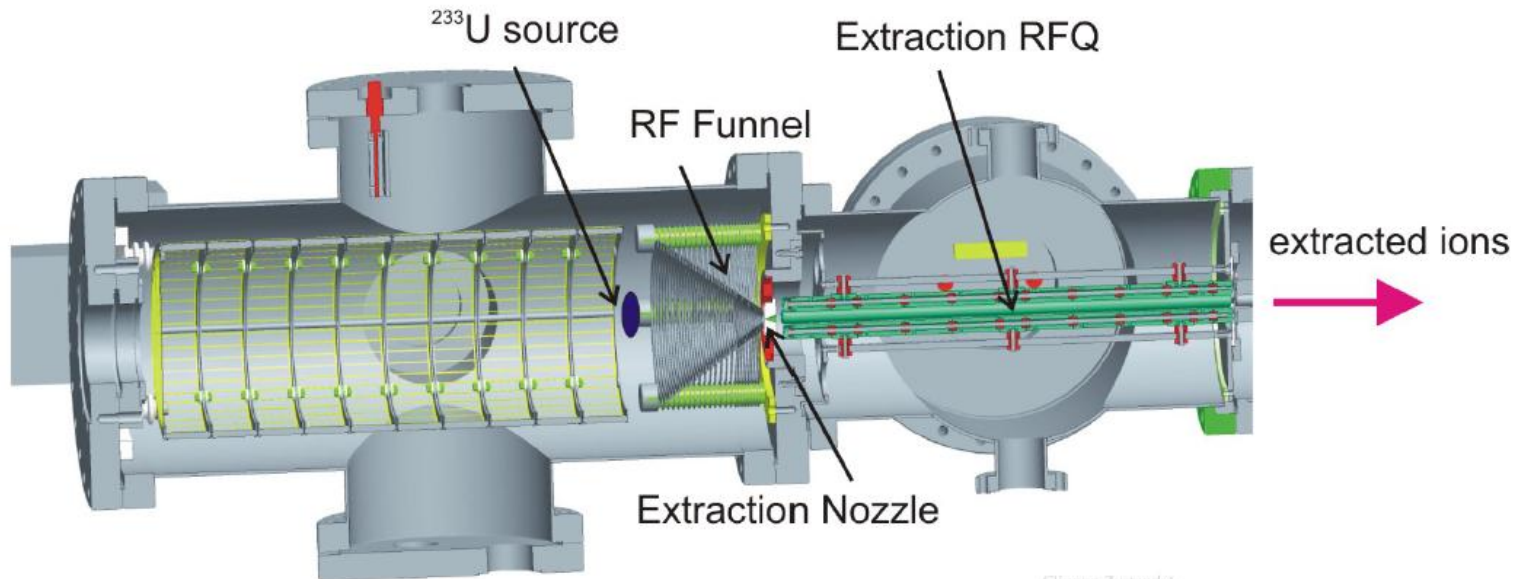
Lars v.d.Wense, NIC2012

- Step 1:
Stopping & Extraction
- Step 2:
Mass Filtering
- Step 3:
Collection
- Step 4:
VUV Optics &
- Step 5:
Detection



Isomer: Extraction:	Charge:	Mass Filter:	Collection:	Mirror acceptance:	Mirror reflectivity:	Focusing:	Detection:
2 %	10 %	70 %	80 %	42 %	49 %	87 %	16 %

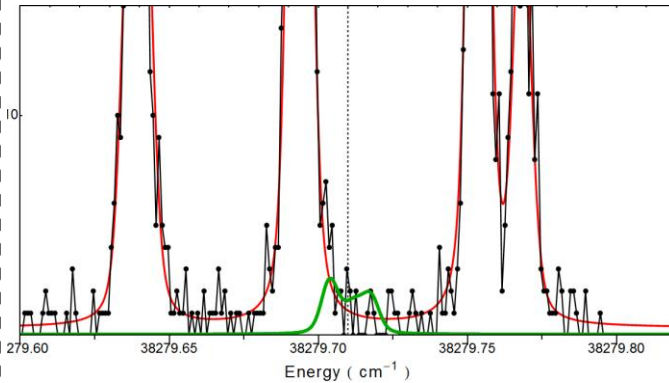
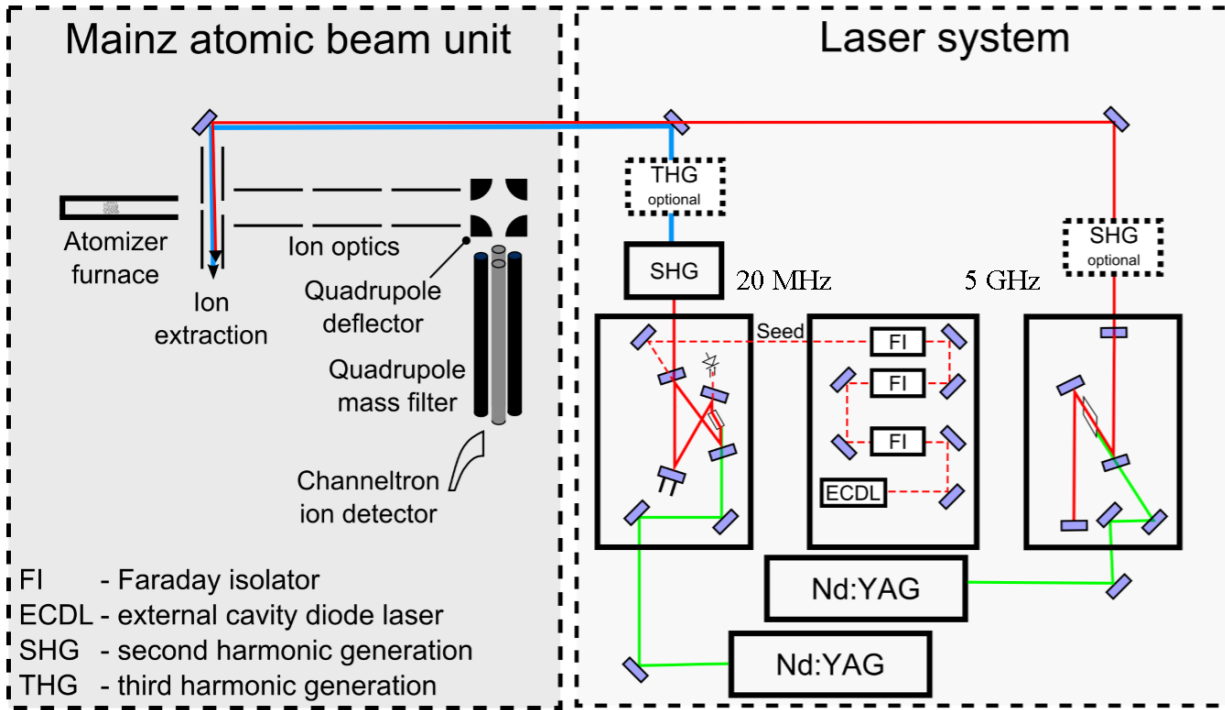
Total efficiency:
 $1.2 \cdot 10^{-5}$



Сверхтонкая структура ^{229}Th

V. Sonnenschein EMMI 2012

Mainz University Laser System
and Mass-Spectrometer MABU



Определены схемы резонансной ионизации для Ti:sa лазера RILIS

Спектроскопия высокого разрешения HFS для ^{229}Th

Впервые определены коэффициенты A & B ^{229}Th для основного состояния атома.

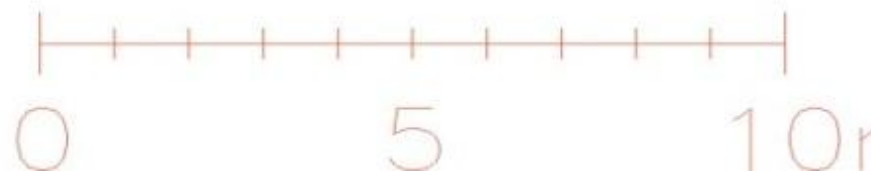
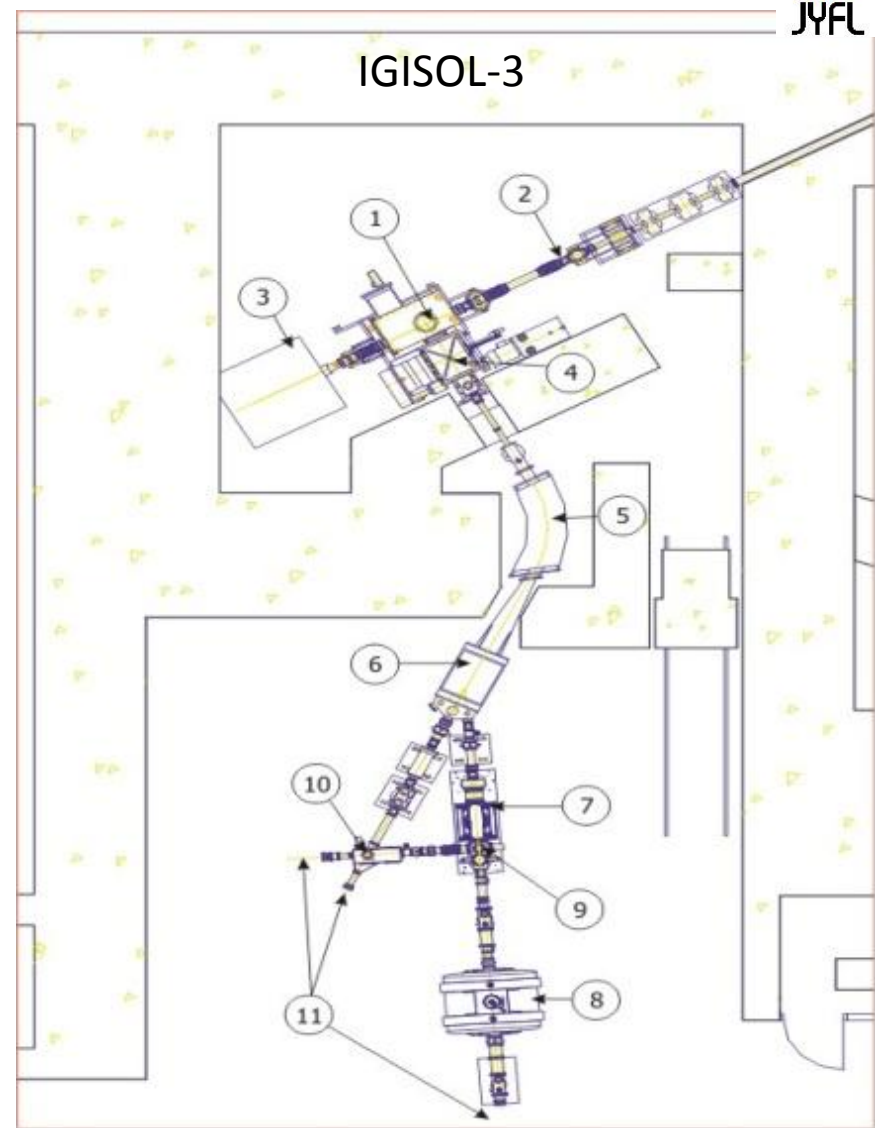
Малые ширины HFS для тория в основном состоянии.

Планируется использовать коллинеарную спектроскопию для RIS.

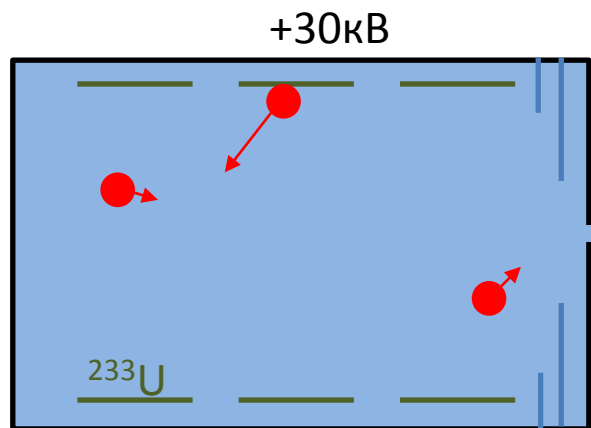
Оборудование в Юваскюля для изучения ^{229m}Th



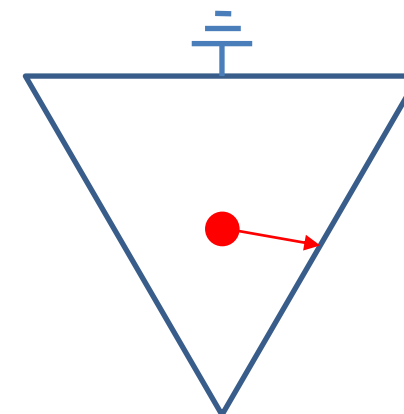
- Циклотрон K-130 (HI, P 80МэВ, 20μА)
- Газовые ячейки (ячейка с ^{233}U , ячейка с ^{232}Th , HI - ячейки)
- Система дифференциальной откачки с RF-транспортом ионов
- Масс-сепаратор
- Деградер/RF-ловушка/кулер
- Магнитная RF-ловушка для масс-спектропии
- Установки для коллинеарной лазерной спектроскопии и лазерной ионизации



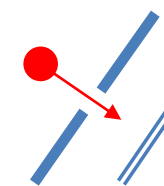
Пучок ионов ^{229}Th в JYFL



Газовая ячейка

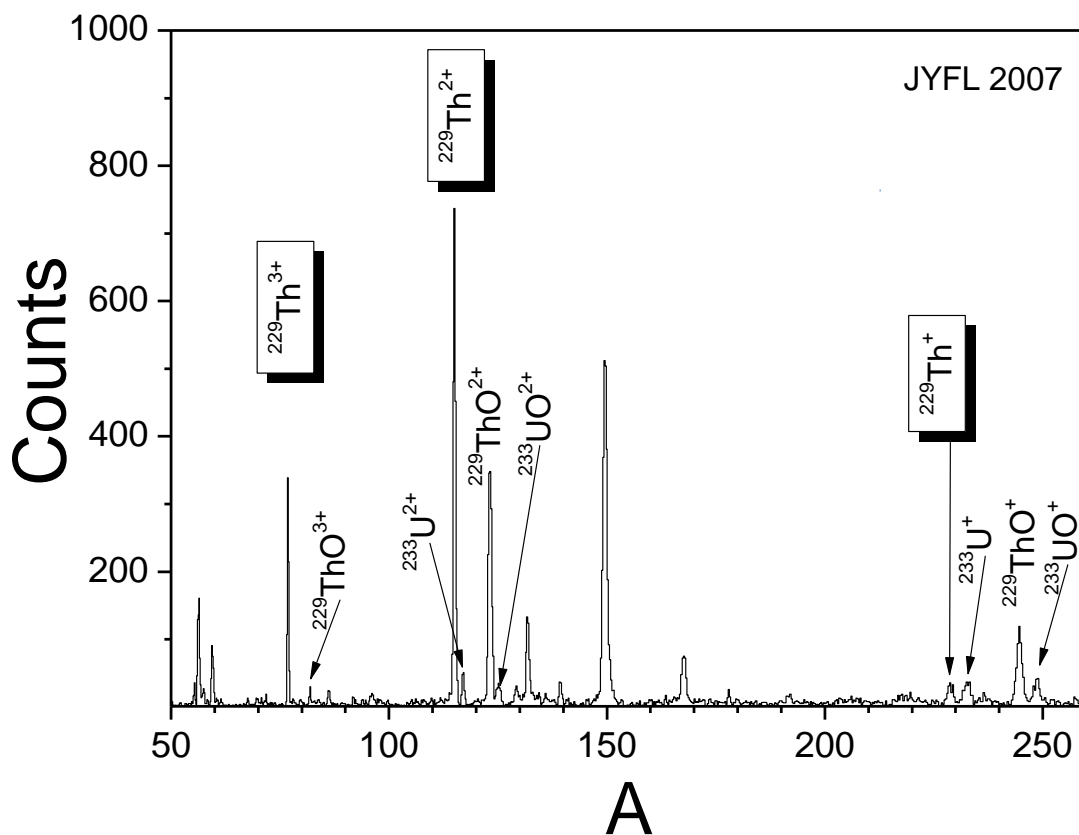


Магнитный фильтр

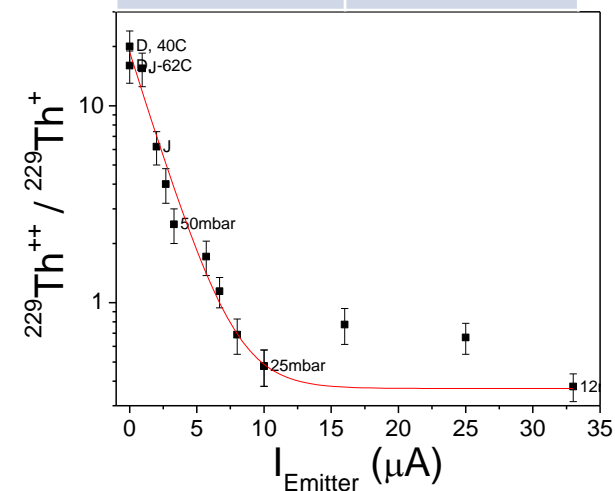


МКП

$^{229}\text{Th}^+$ 2400/c
 $(^{229\text{m}}\text{Th}^+ 50/c)$



ИЗОТОП	ϵ (%)
^{229}Th	1.6
^{221}Fr	16
^{217}At	16



Газовая ячейка

Пучок ионов ^{229}Th в JYFL



^{233}U , $1.4 \cdot 10^5$ Бк, 110cm^2

Эвакуация ионов электрическим полем

Отгаживание и охлаждение до -40°C

Эвакуация:

1. Электростатическая
2. RF-carpet
3. С инъекцией электронов

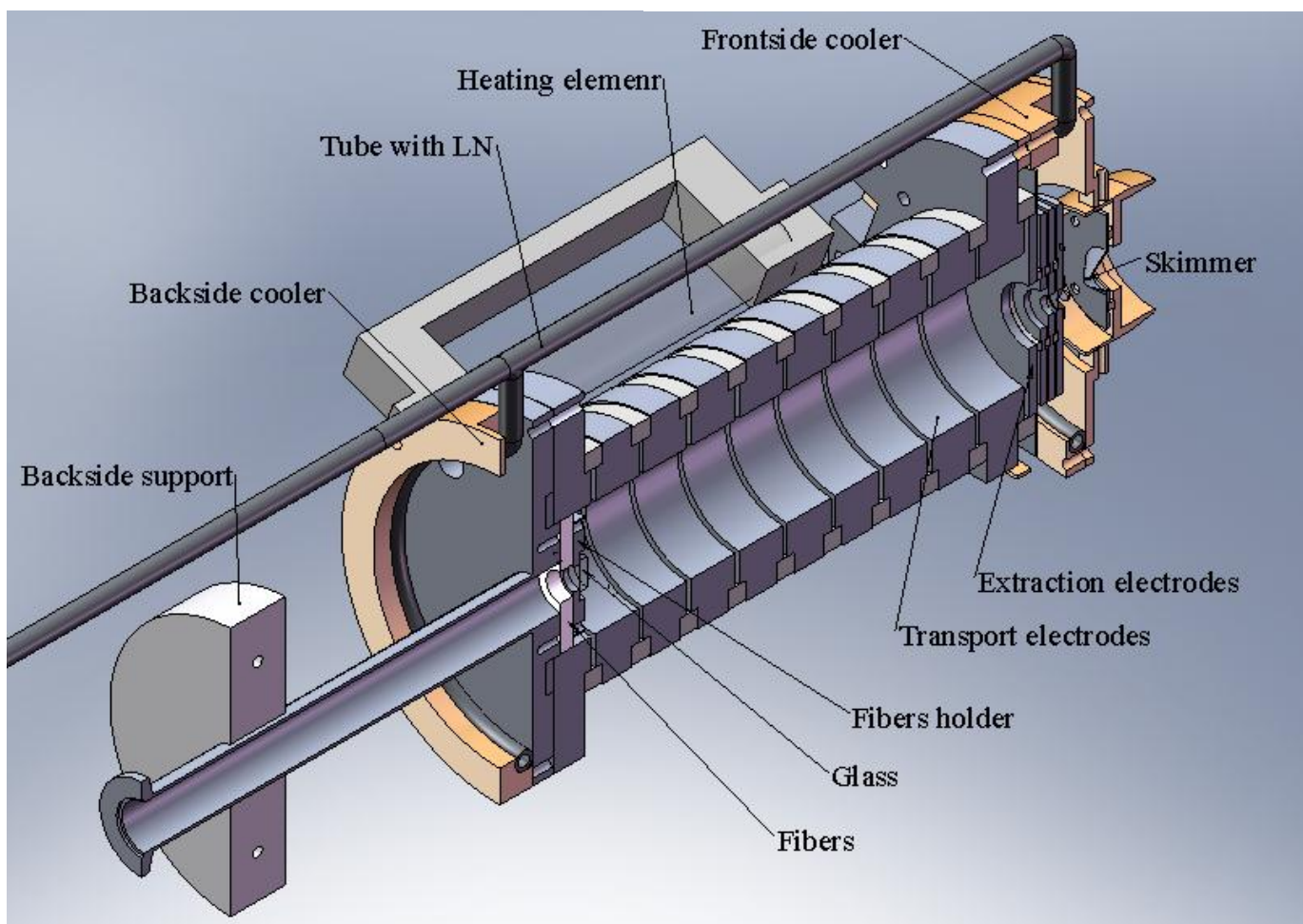
Большой объем

Химическая активность ионов тория

Примеси в гелии

Объемный заряд

Требуется высокая скорость эвакуации



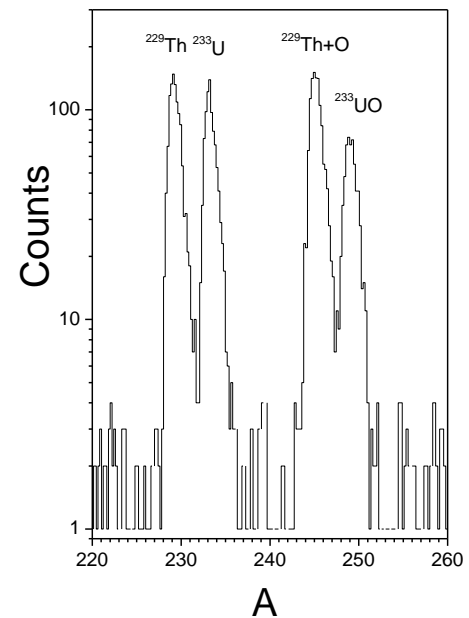
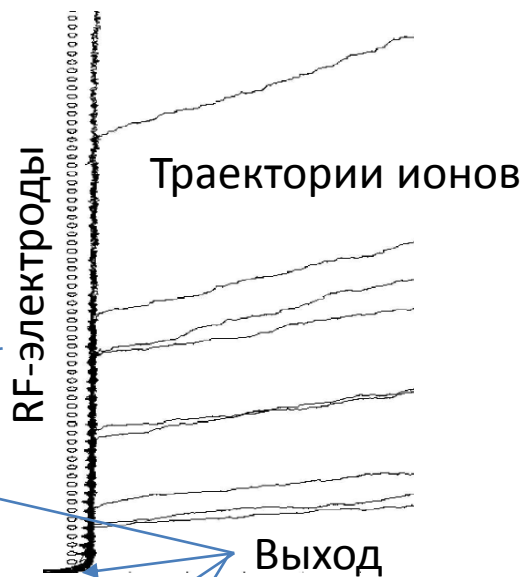
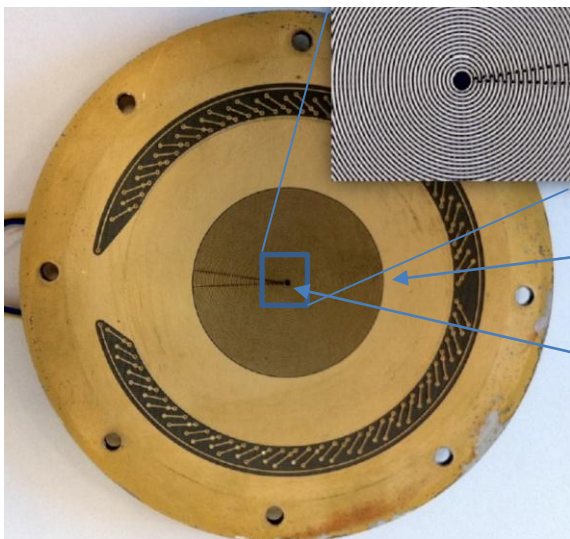
Пучок ионов ^{229}Th в JYFL



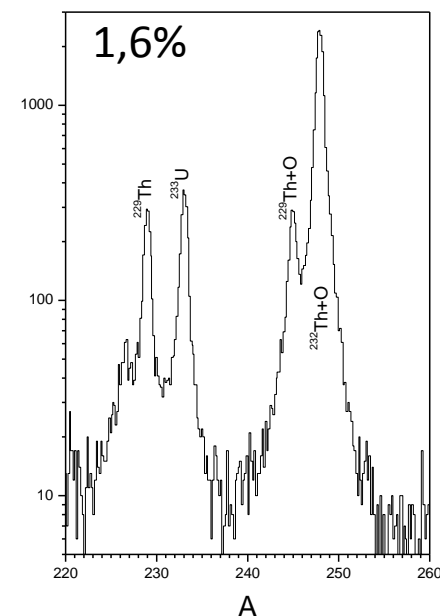
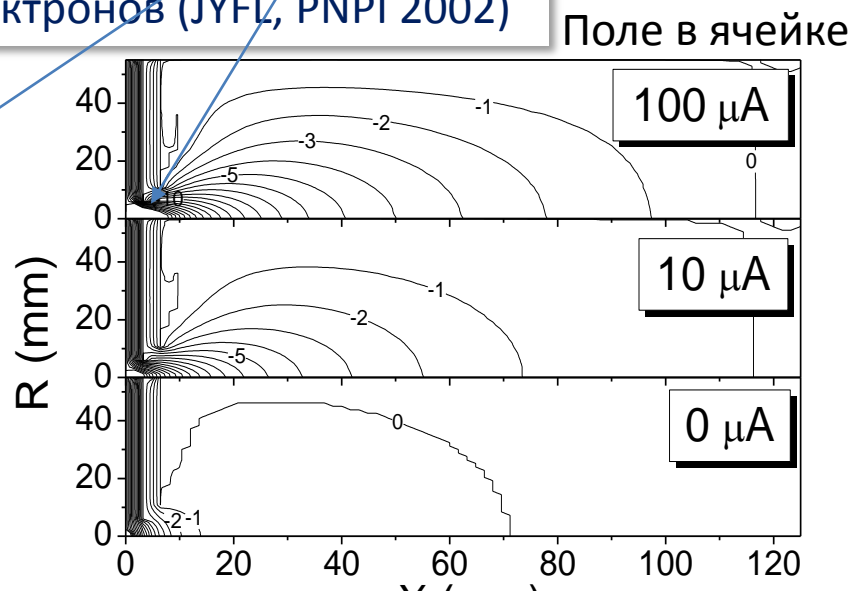
0,4%, -40°C

Эвакуация ионов из газовой ячейки

RF- транспорт (JYFL, T. Sonoda)



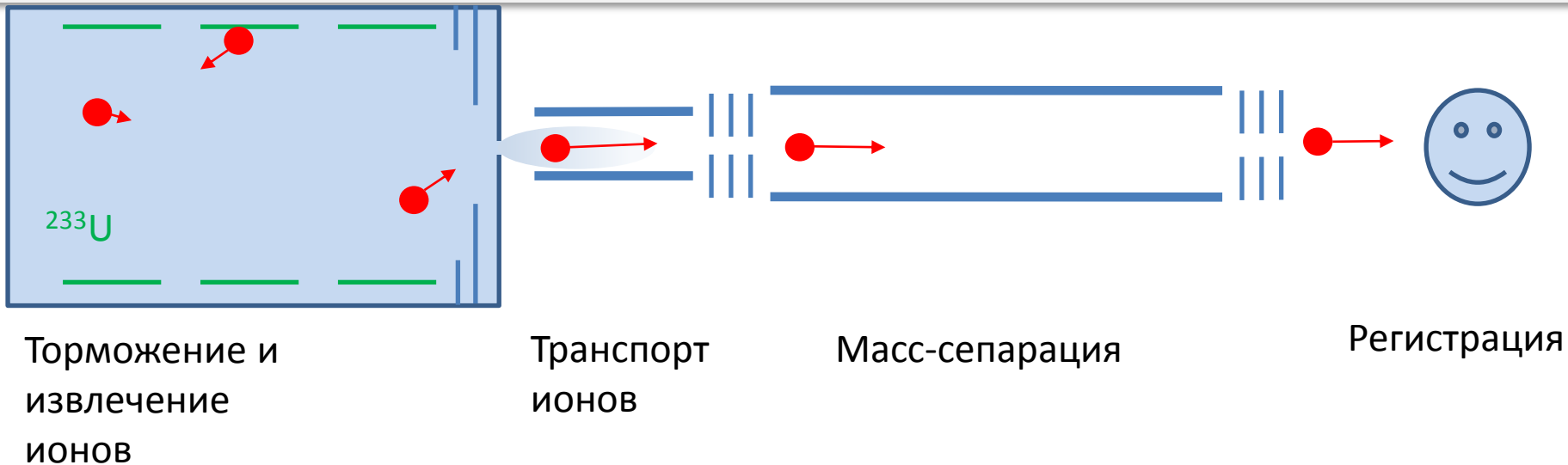
Транспорт с инъекцией электронов (JYFL, PNPI 2002)



Оборудование для изучения распада ^{229m}Th



- Газовая ячейка с источником ^{233}U
 1. С зарядовой компенсацией (эффективная)
 2. Охлаждаемая (низкофоновая, источник 1, 2х и 3х зарядных ионов)
- Транспорт ионов в области дифференциальной откачки
- RFQ-фильтр масс
- Формирование источника
 1. Высадка на поверхность (1-100эВ)
 2. Имплантация (100-10000эВ)
 3. RF-ловушка (хранение ионов и заселение изомера)
- Регистрация
 1. Регистрация электронов конверсии и фотоэлектронов
 2. Регистрация фотонов радиационного и NEET переходов
 3. Регистрация сверхтонкой структуры основного и изомерного состояний





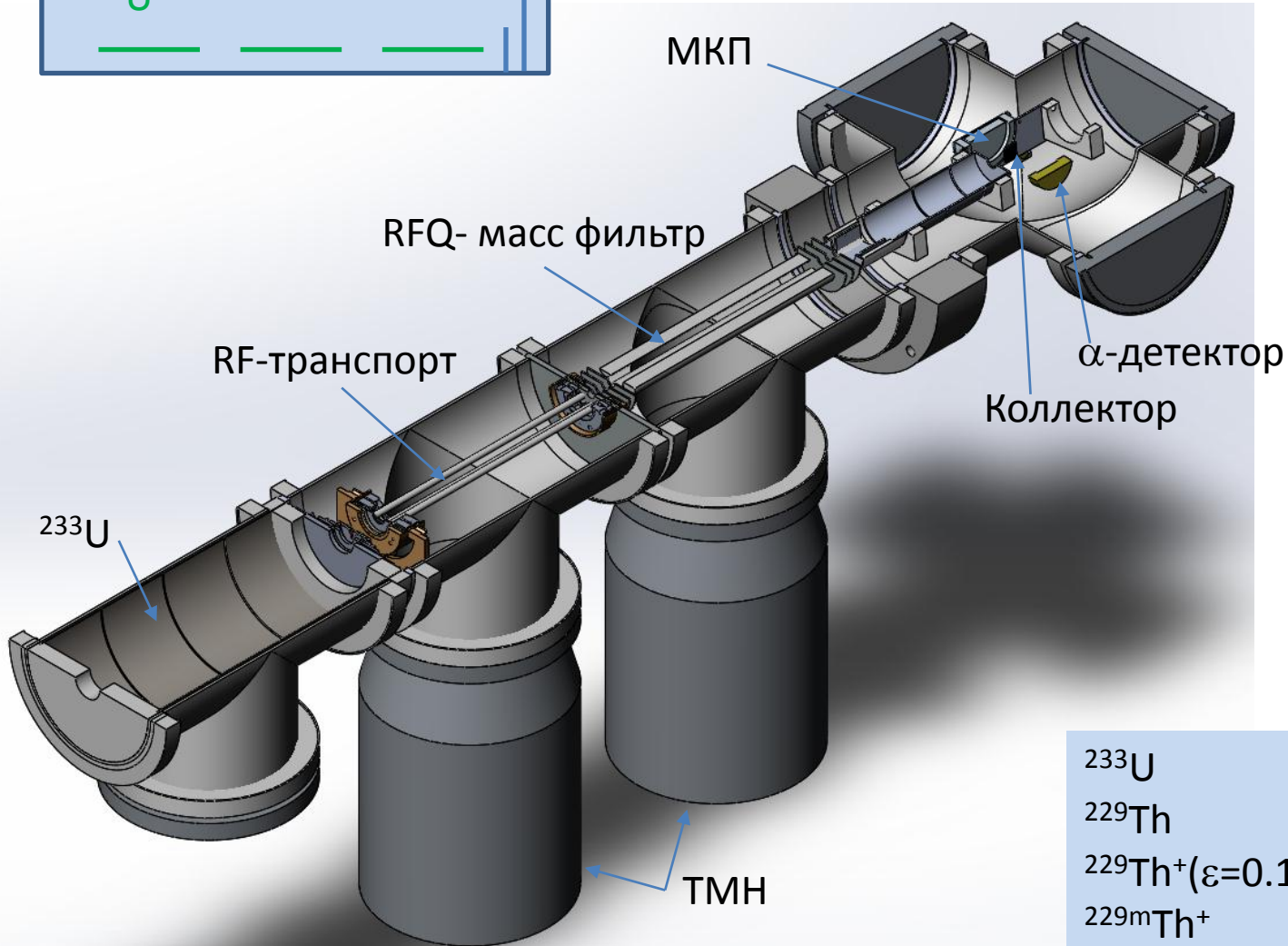
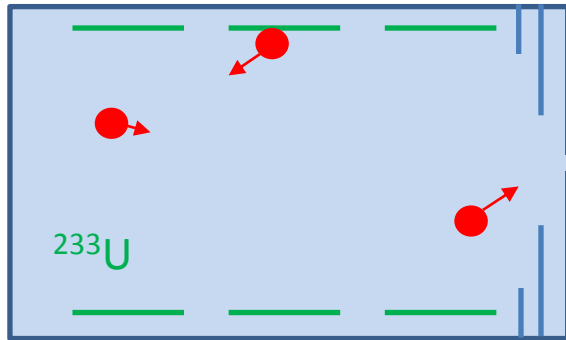
Особенности предлагаемого источника

- Вероятное присутствие изомерного состояния ($\sim 2\%$) позволяет использовать источник для поиска и идентификации изомерного состояния
- Формирование пучка 1, 2 и 3х – зарядных ионов с возможностью вариации
- Фильтрация по массе
- Малая энергия ионов получаемого пучка – не требуется высоковольтной платформы и RF-кулера больших размеров
- Стабильная, долговременная работа
- Высокая эффективность
- Небольшая стоимость материала источника – ^{233}U ($\sim \$10/\text{mg}$)

Методы регистрации – 1 стадия

- Регистрация конверсионных электронов с металлической поверхности. Требуется мягкой высадки ионов. Быстро. Эффективно. Дополнительная селекция по совпадению с Оже-электронами возникающими при нейтрализации ионов. Возможна грубая оценка энергии перехода.
- Регистрация UV фотонов. Медленно. Требуется имплантации ионов в материал с широкой запретной зоной. Абсолютное измерение энергии перехода.

Оборудование для изучения распада ^{229m}Th

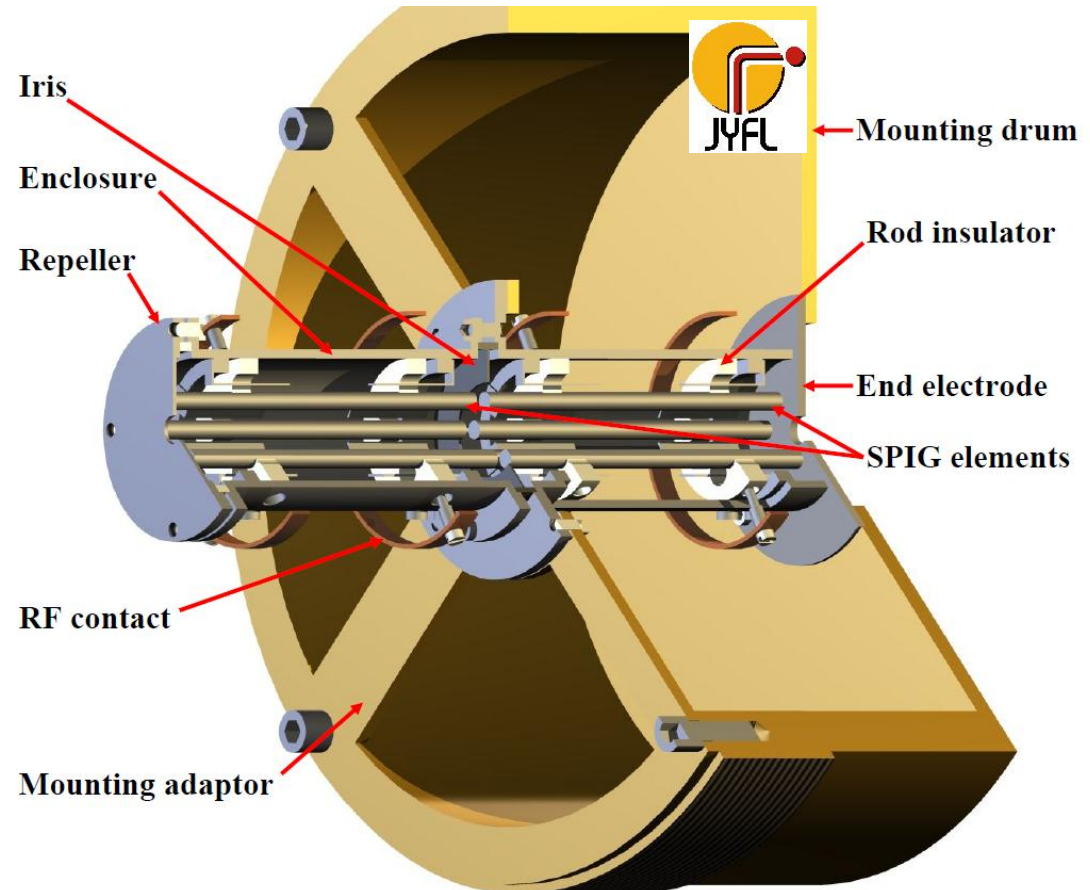
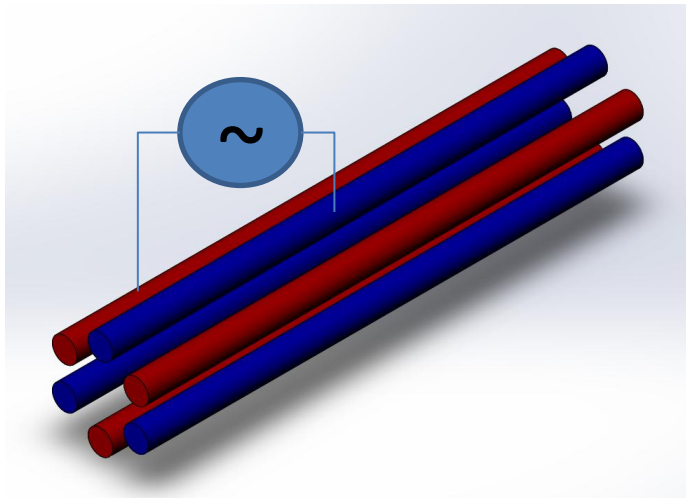


^{233}U	$2 \cdot 10^6$ Bq (6mg)
^{229}Th	$6 \cdot 10^5$ recoils
$^{229}\text{Th}^+(\epsilon=0.1)$	$6 \cdot 10^4$ ions/s
$^{229m}\text{Th}^+$	1200 ions/s

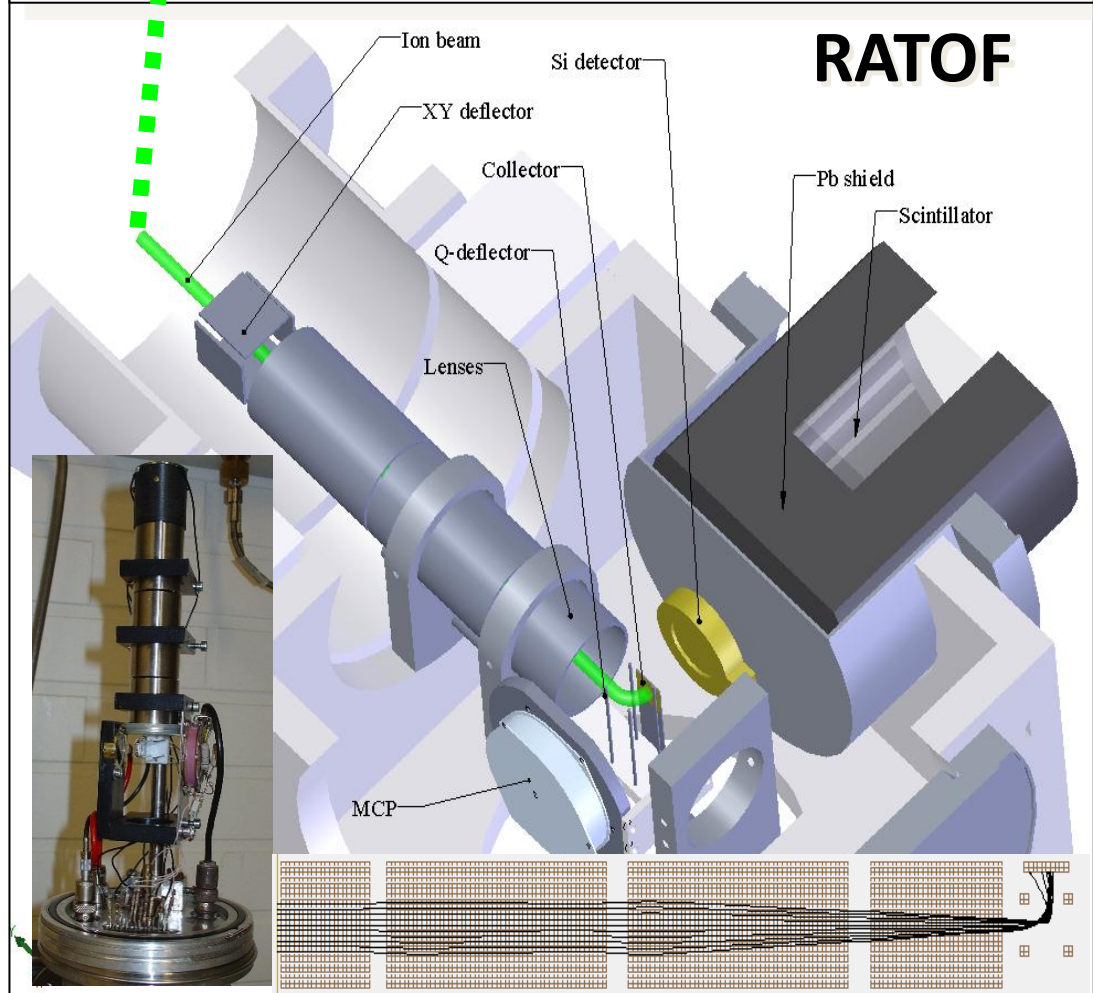
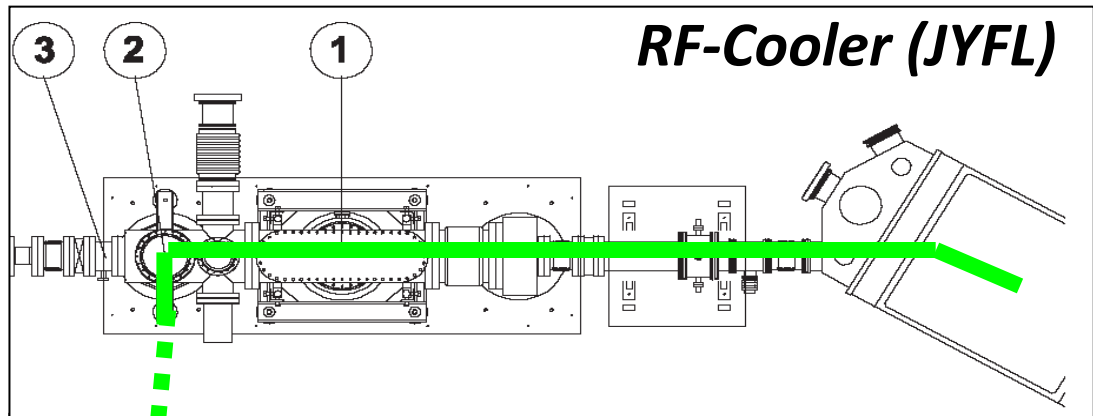
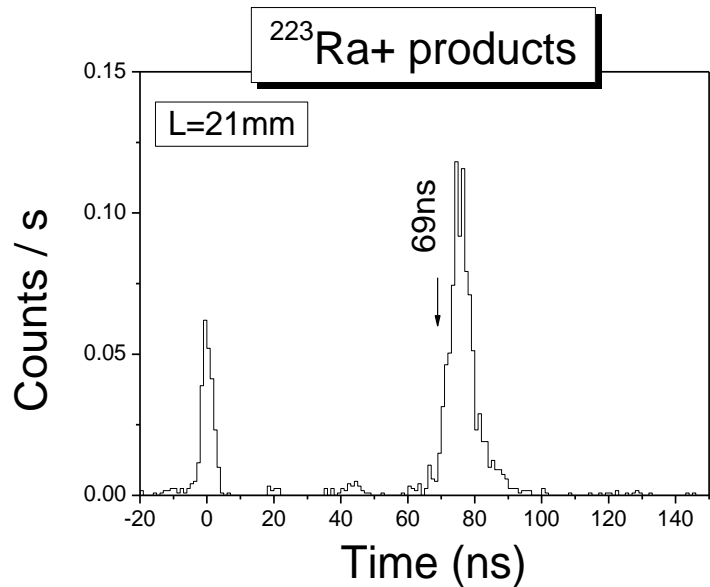
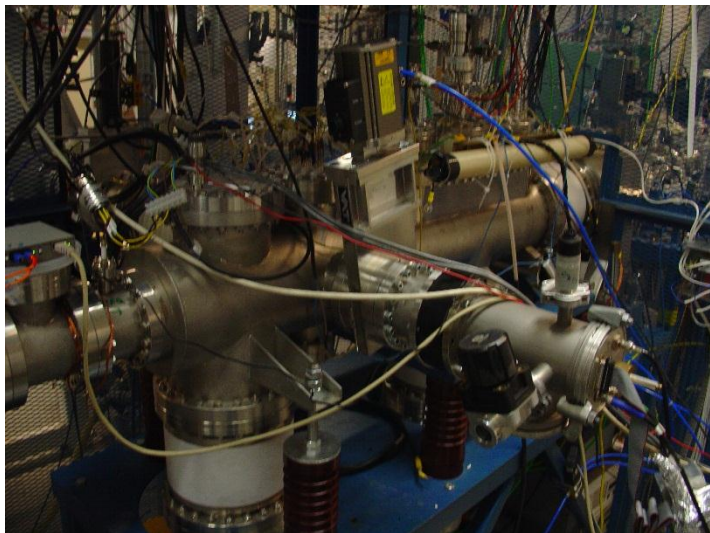
Оборудование для изучения распада ^{229m}Th



RF-транспорт в области дифференциальной откачки



Времяпролетный спектрометр атомов отдачи





Ионный источник

Фольги с ^{233}U

Газовая ячейка

Схема очистки гелия

Вакуумный тракт

RF-секступоль

RF-фильтр масс



Извлечение ионов $^{233}\text{U}^{+,++,+++}$; Оптимизация параметров ячейки по α -активности ^{221}Fr , ^{217}At .

Кондиционирование и фильтрация пучка.

Регистрация распада

Конверсионные электроны

Схема мягкой посадки ионов

Схема регистрации электронов

Регистрация изомера по двойным импульсам;
Изучение зависимости $T_{1/2}$ материала коллектора; Оценка энергии распада.

Фотоны прямого/NEET перехода

Схема имплантация ионов в кристалл (CaF_2 ?).

Схема регистрации фотонов

Сбор фотонов и спектрометрия

Регистрация изомера по UV излучению;
Изучение зависимости $T_{1/2}$ материала коллектора; Измерение энергии распада.

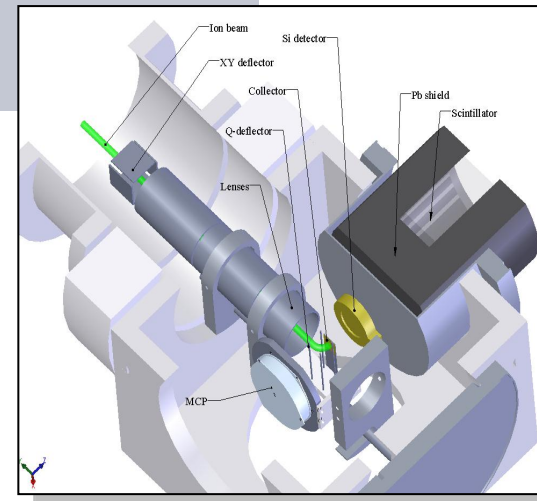
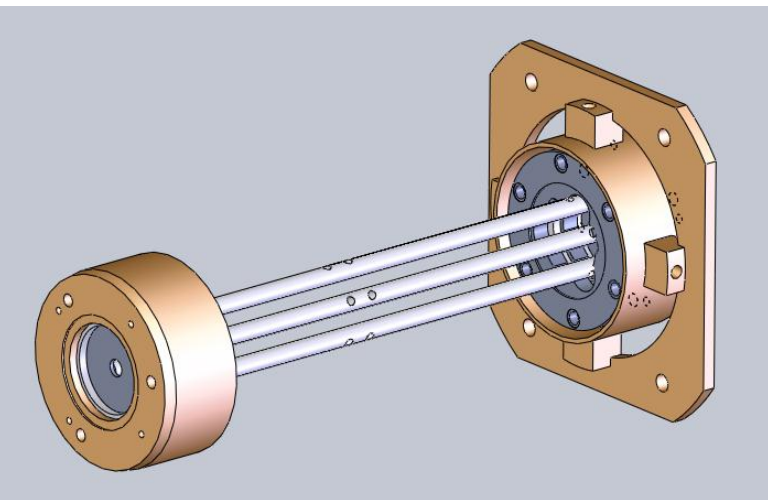
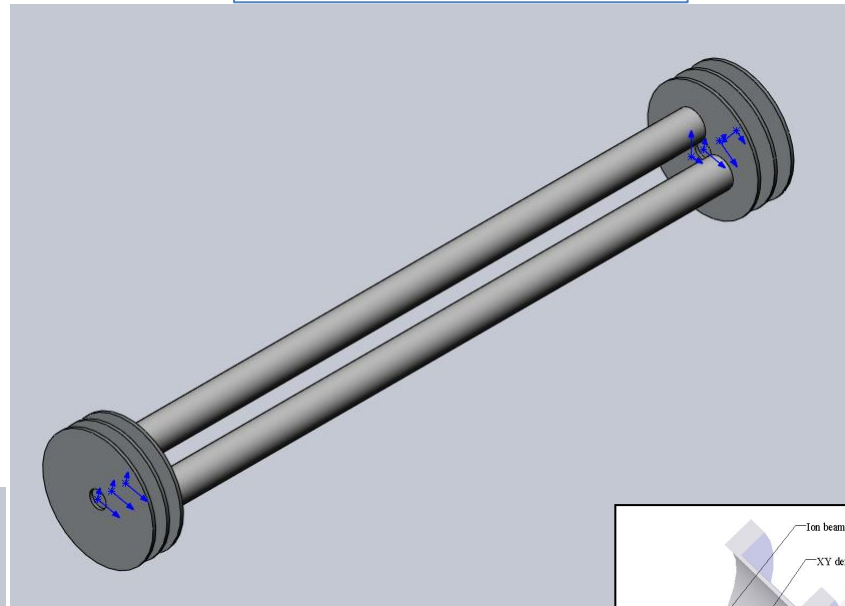
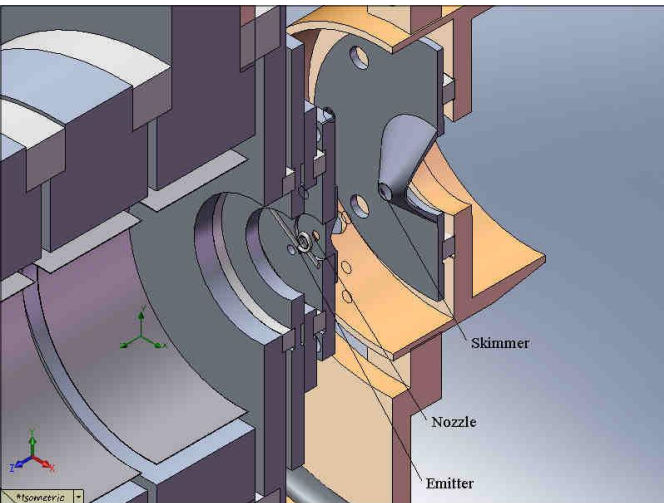
Компоненты

Газовая ячейка
10 торр

ВЧ-транспорт
0.01 торр

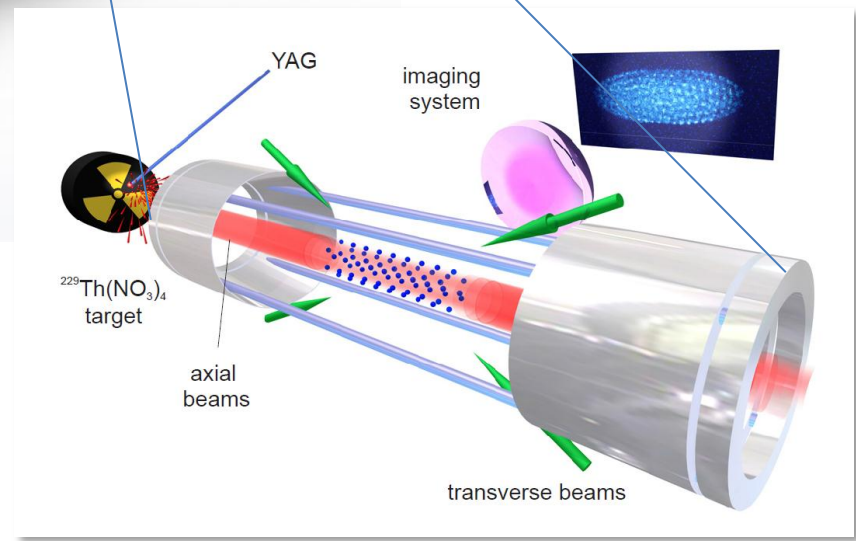
Квадрупольный
фильтр
10⁻⁶ торр

Детекторы
10⁻⁶ торр



Потом...

Реализация схемы охлаждения, возбуждения, регистрации.



В результате

1 шаг: Источник ионов

- Стабильный, очищенный источник ионов $^{229\text{g,m}}\text{Th}^{+,++,+++}$.
- Схемы регистрации с использованием конверсионных электронов, и фотонов.
- Данные о модах распада изомера в разных условиях.

2 шаг: Источник ионов + ловушка + лазеры

- Отработка схемы возбуждения изомера
- Схемы регистрации с использованием сверхтонкой структуры
- ...

3 шаг: Источник ионов + ловушка + лазеры => Кристаллизация

- Схема охлаждения
- ...

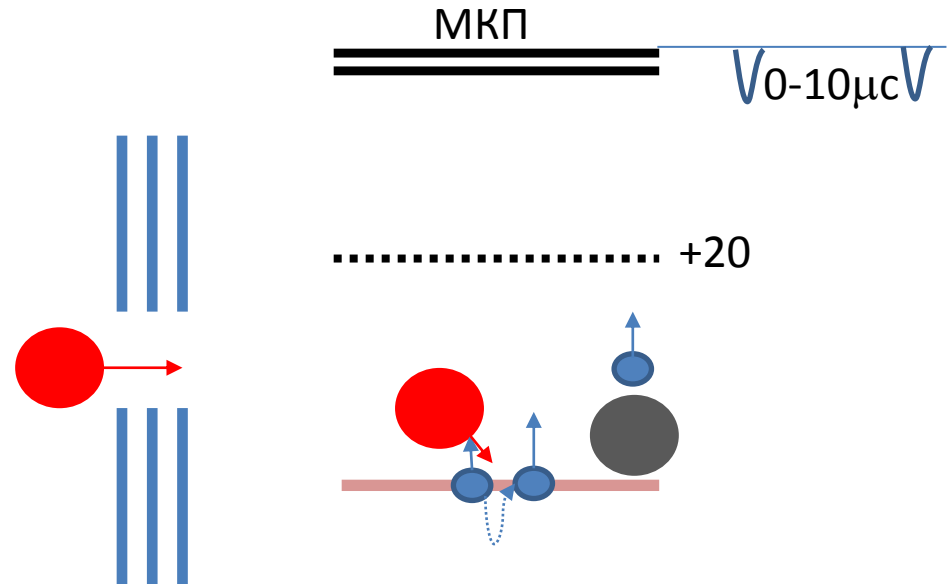
4 шаг: Эталон частоты

- Техника стабилизации лазерного излучения
- ...

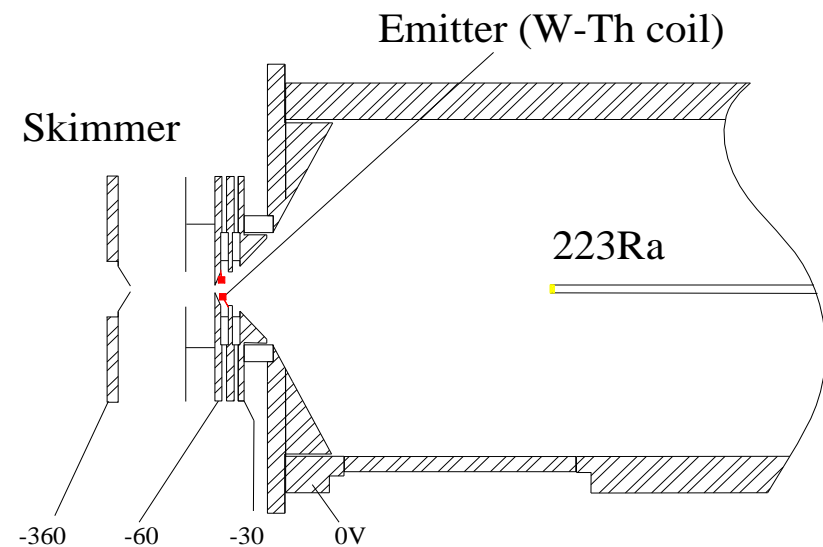
Спасибо за внимание

Регистрация конверсионных электронов

- Атомы отдачи имеют пробег 20-30нм. Пробег СЕ в металле 2-5нм.
- Период полураспада для канала с эмиссией электрона $\sim 10^{-5}$ с.
- Малое время жизни в среде с шириной зоны $<$ энергии изомерного состояния ($\sim 10^{-5}$ с ?).



Газовая ячейка с электродами и электронным эмиттером



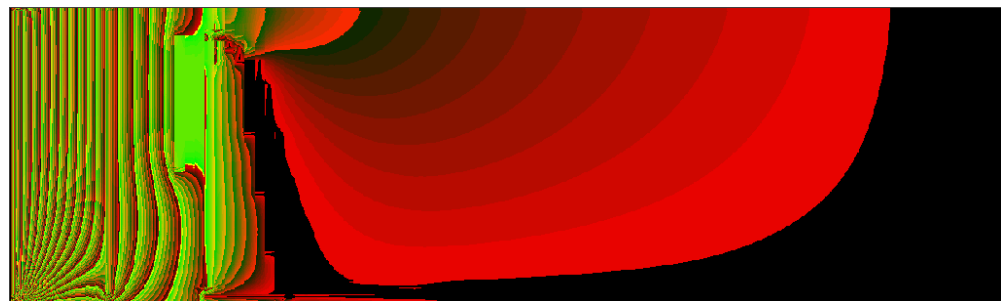
Без объемного заряда

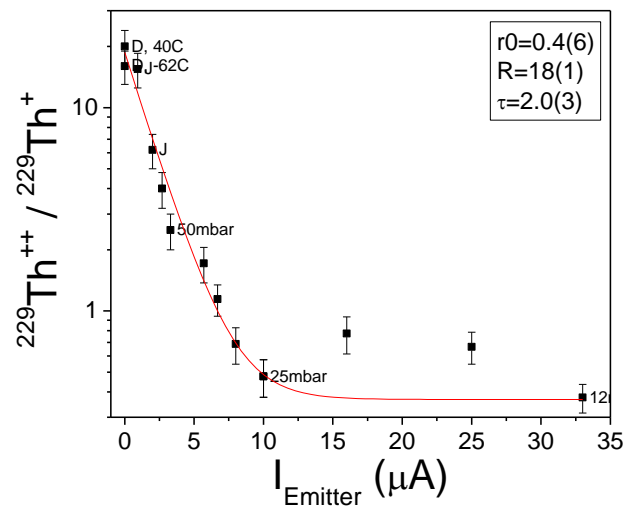
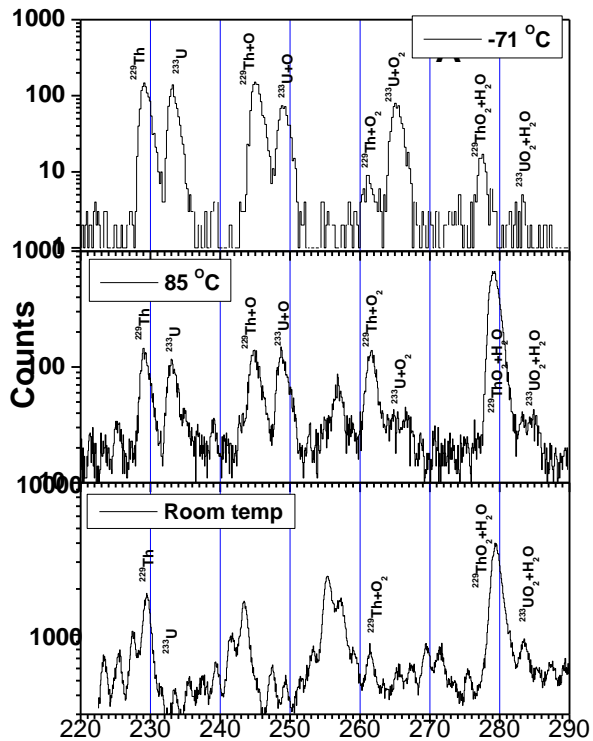
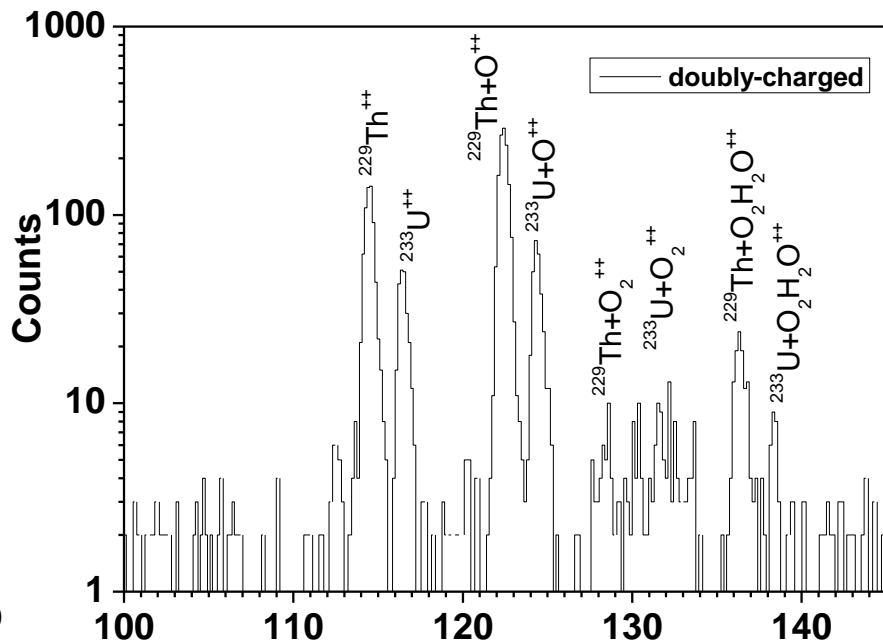
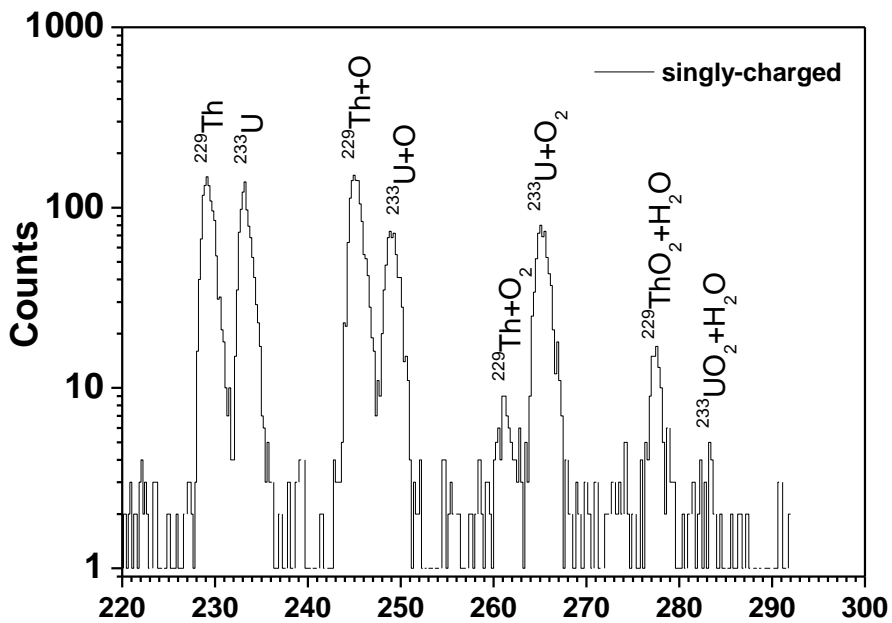


Особенности:

- Поле генерируется объемным зарядом
- Поле более однородно
- Поле не экранируется в слабой плазме

$6 \cdot 10^8 \text{ e/cm}^3$ (100 μA)





A

A

Чувствительность к вариации фундаментальных констант

Flambaum, arXiv:0705.3704v2 2007

$$\frac{\Delta\omega}{\omega} \approx 10^5 \left(2 \frac{\Delta\alpha}{\alpha} + 0.5 \frac{\Delta X_q}{X_q} - 5 \frac{\Delta X_s}{X_s} \right); X_q = m_q / \Lambda_{\text{QCD}}; X_s = m_s / \Lambda_{\text{QCD}};$$

$$\Delta\nu \approx 3 \cdot 10^{20} \frac{\Delta X_q}{X_q} \text{ [Hz]}; \text{ чувствительность к изменению } \frac{\Delta X_q}{X_q} \sim 10^{-24} / \text{год}$$

($\delta X_q / X_q$: $10^{-14} \rightarrow 10^{-25}$ /год)

Ювяскюля & ПИЯФ

Методические работы

- "Production of refractory elements close to the Z=N line using the ion-guide technique"*** NIM A 416(1998) 485-496.
- "Status of HIGISOL, a new version equipped with SPIG and electric field guidance"***, HI 132(2001)485-490
- "Ion guide simulation, simple approach"*** "NIPNET, La Londe-les-Maures. 2003
- "Production of neutron deficient rare isotope beams at IGISOL; on-line and off-line studies"*** NIMB v.222 (3-4), p.632-652, 2004.
- "Production of beams of neutron-rich nuclei between Ca and Ni using the ion-guide technique"***. Eur. Phys. J. A 25, S1 (2005) 749 - 750.
- "Performance of IGISOL 3"***. Eur. Phys. J. A 25, S1 (2005) 745 – 747
- "New ion-guide for the production of beams of neutron-rich nuclei between Z = 20–28"*** NIMA 546(2005), p418-425
- "Development of a sextupole ion guide for LIST"***. SMI-06, Groningen, 2006.
- "An Ion Guide for the Production of a Low Energy Ion Beam of Daughter Products of α -Emitters"*** NIMB 252 (2006) 347–353.
- "Investigations of the Low Lying Isomer in ^{229}Th by Collinear Laser Spectroscopy"***. HI 171, 197 – 201 (2006).
- "LIST developments at IGISOL"***. EPJ. ST150, 283-284 (2007).
- "Off-line studies of the laser ionization of yttrium at the IGISOL facility"*** NIMB 266 (2008) 681–700.
- "A cryogenic gas catcher for high energy radioactive ions"***, Eu.N.Ph. Conf. '09, Bochum, Germany.
- "A study of on-line gas cell processes at IGISOL"***. NIMB 268, 6, 2010, 657-670
- "Characterization of a cryogenic ion guide at IGISOL"*** NIMA: V685, 2012, 70–77
- "The search for the existence of ^{229}mTh at IGISOL"*** EPJA 48, 4 (2012), 52

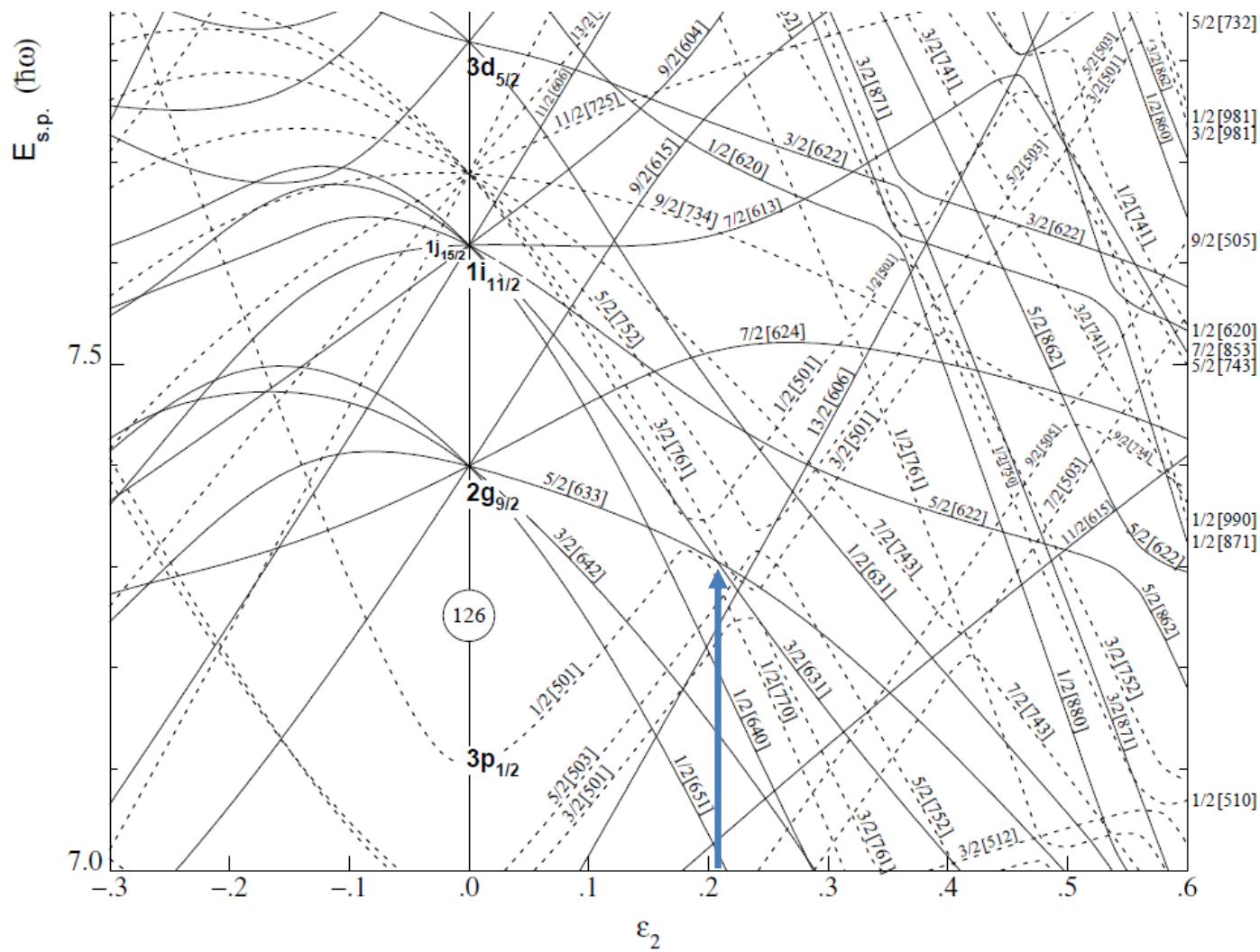


Figure 9. Nilsson diagram for neutrons, $N \geq 126$ ($\epsilon_4 = \epsilon_2^2/6$).