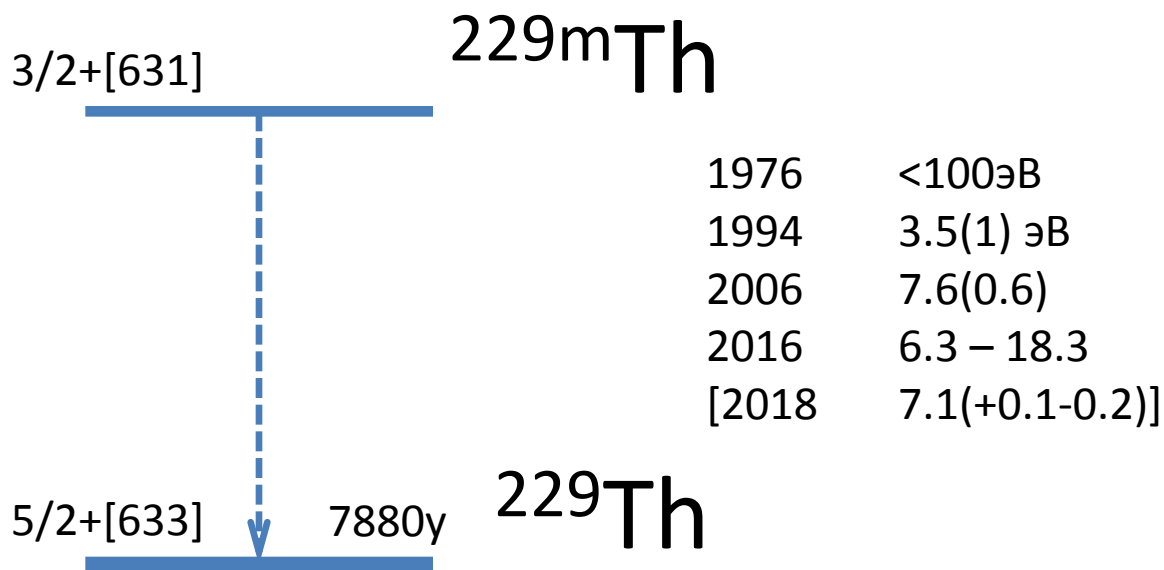


Об измерении энергии распада изомера тория-229



YUFL+ПИЯФ 2005

LMU 2007

МИФИ 2012

ПИЯФ «Генератор ионов изомера тория-229» 2013

Мотивация

Особенности осциллятора

- Малая естественная ширина линии
- Малый размер, экранировка электронами
- Энергия перехода в оптическом диапазоне
- Влияние химического окружения на распад
- Зависимость от сильного взаимодействия

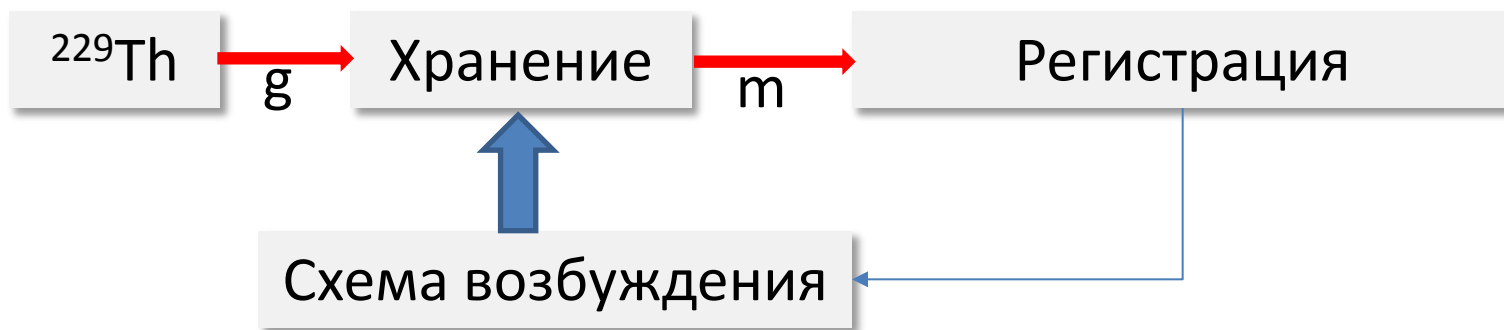
Приложения:

Метрология, техника, фундаментальная физика, космология







- Улучшение точности и стабильности.
- Твердотельный стандарт частоты.
- Мессбауэровская спектроскопия в оптическом диапазоне
- Проверка стабильности фундаментальных констант

Требуется

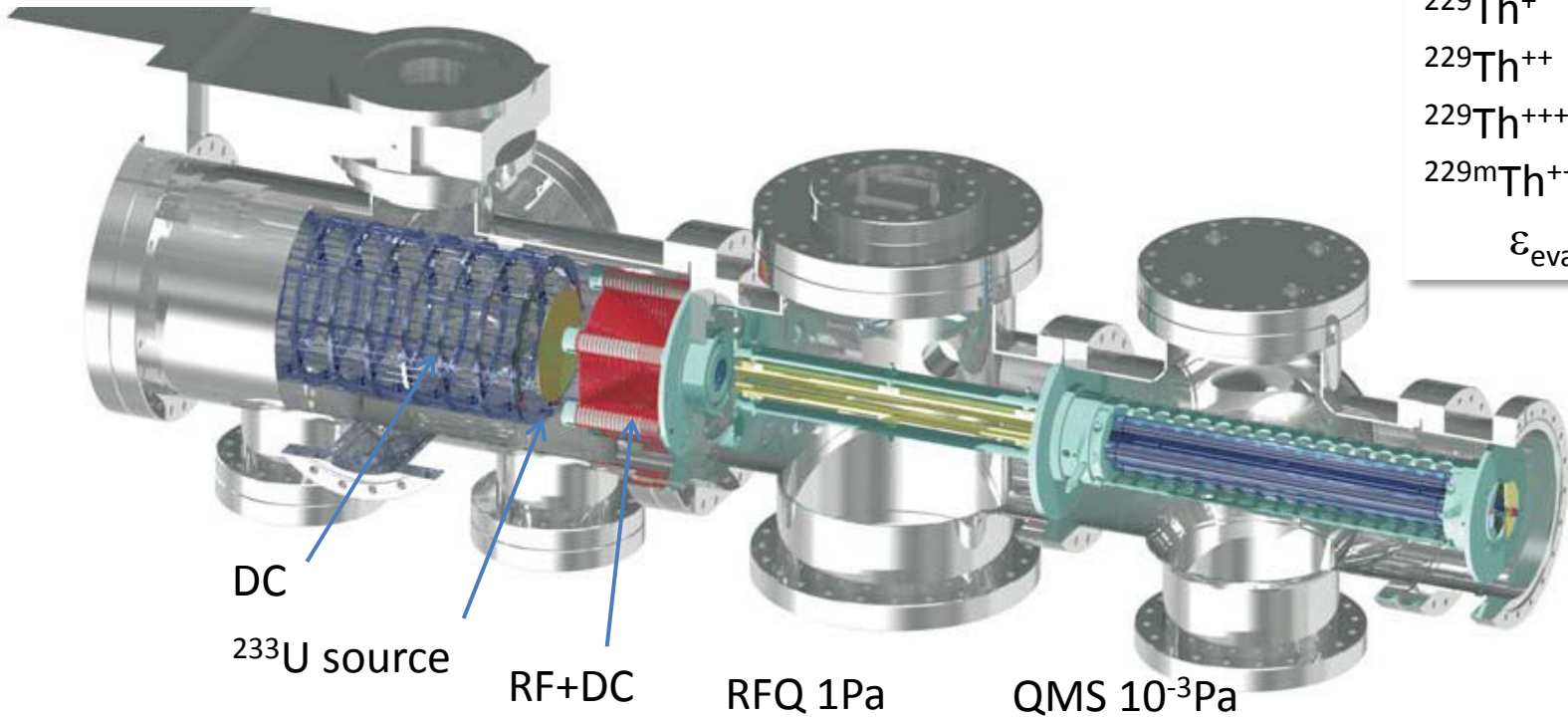
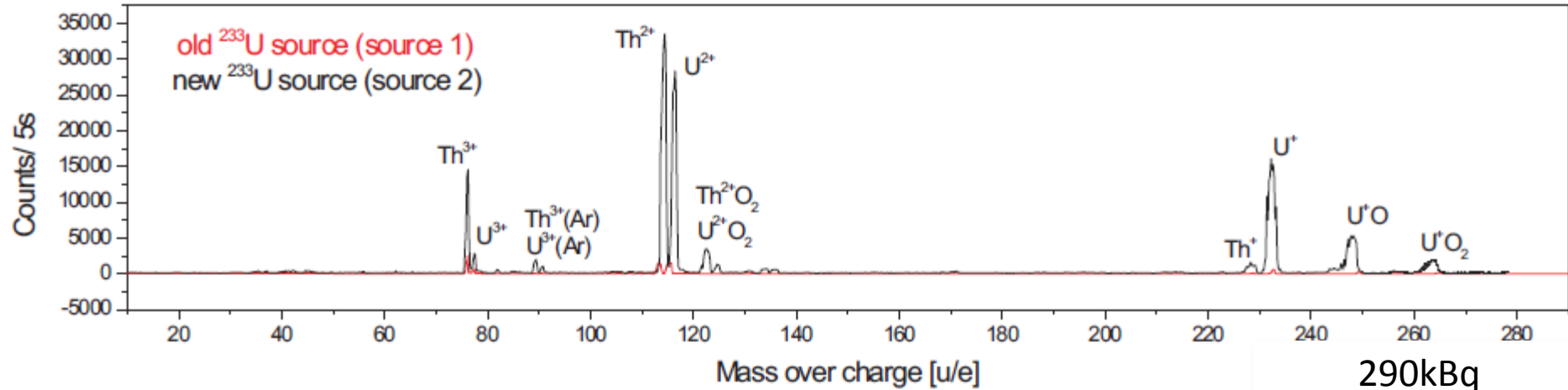
Техника генерации, регистрации и заселения изомера.



Ближайшие задачи

- ~~Генератор ионов ^{229, 229m}Th.~~ JYFL, ПИЯФ 2006, LMU 2015  ПИЯФ
- ~~Регистрация электронов конверсии ^{229m}Th.~~ LMU 2015  ПИЯФ
- ~~Влияние среды на распад.~~ LMU 2015
- Измерение энергии CE. LMU, ПИЯФ 
- ~~Измерение HFS.~~ LMU, PTB 2017  JYFL
- ~~Регистрация фотонов IT. Измерение энергии.~~ LMU МИФИ 2018?! 
- ~~Заселение изомерного состояния.~~ LMU, PTB МИФИ 2018?! 

Генератор ионов тория (LMU 2015-2017)



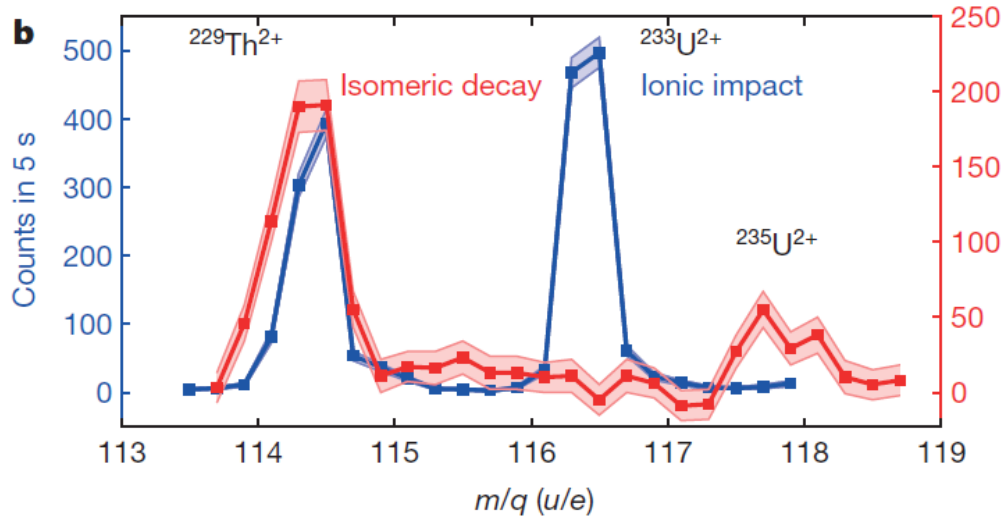
290kBq

$^{229}\text{Th}^+$	500/c
$^{229}\text{Th}^{++}$	10000/c
$^{229}\text{Th}^{+++}$	10000/c
$^{229\text{m}}\text{Th}^{+++}$	(200/c)
$\epsilon_{\text{evac}} \sim 30\%$	

Эксперимент LMU

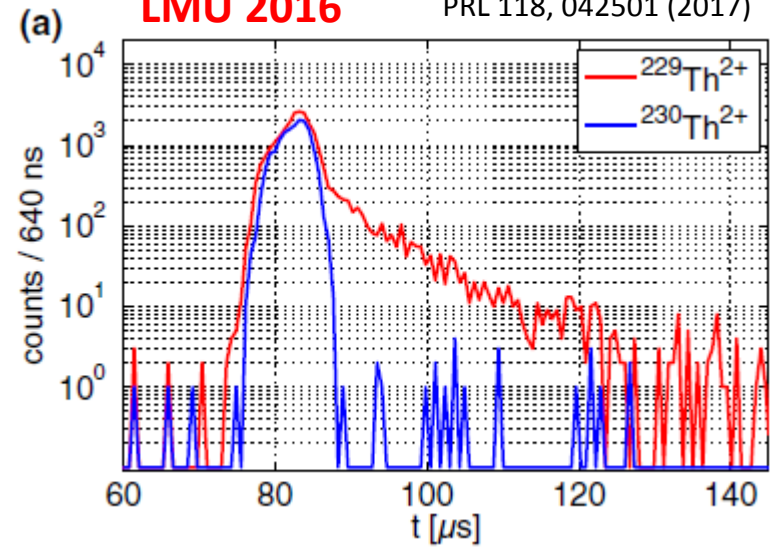
LMU 2015

doi:10.1038/nature17669



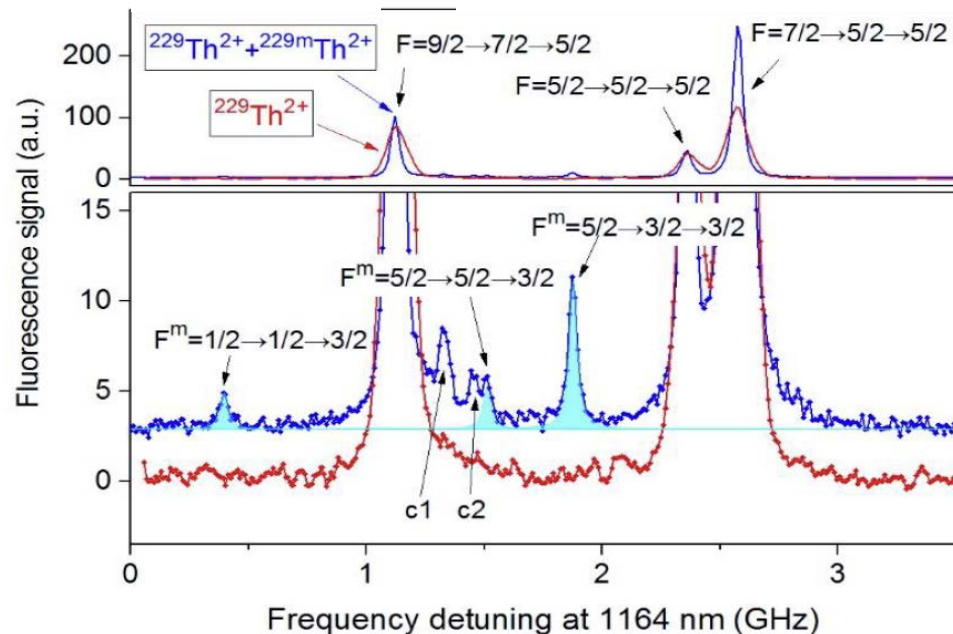
LMU 2016

PRL 118, 042501 (2017)



LMU 2017

arXiv:1709.05325



(intrinsic) electric quadrupole moment:

$$Q_{0m} = 8.7(3) \text{ eb (prolate)}$$

magnetic dipole moment:

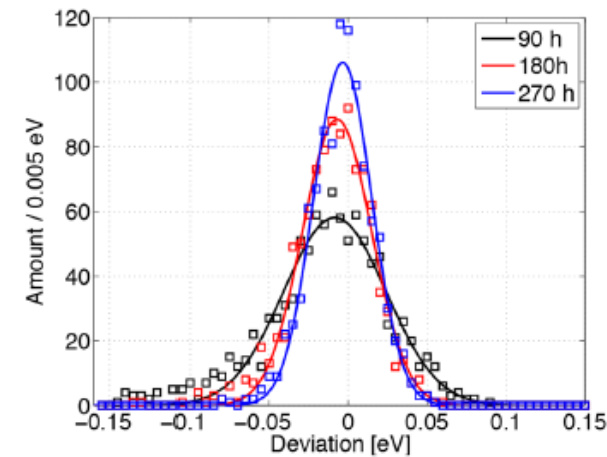
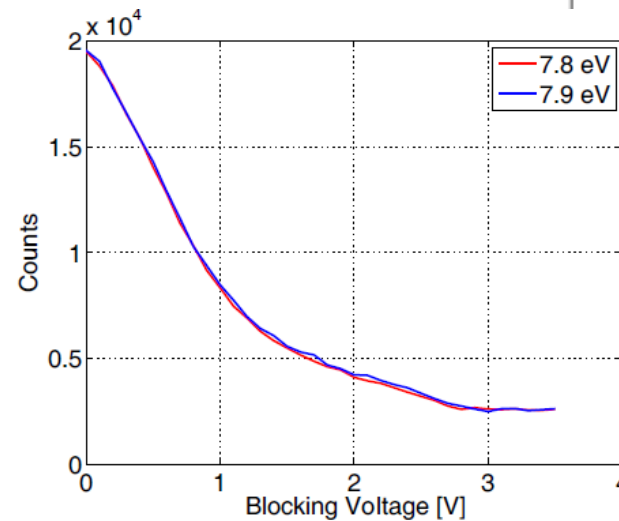
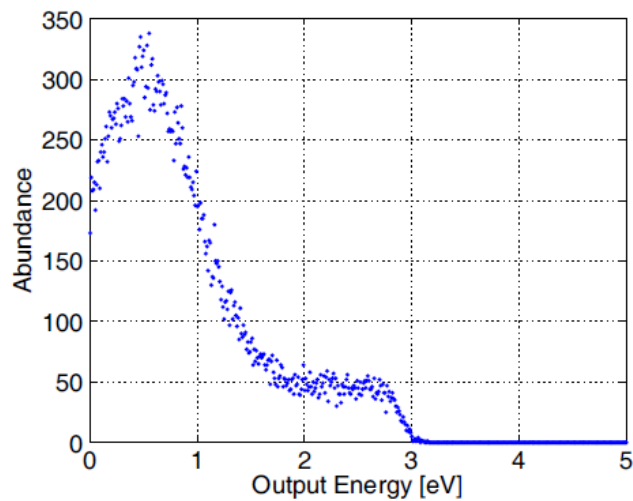
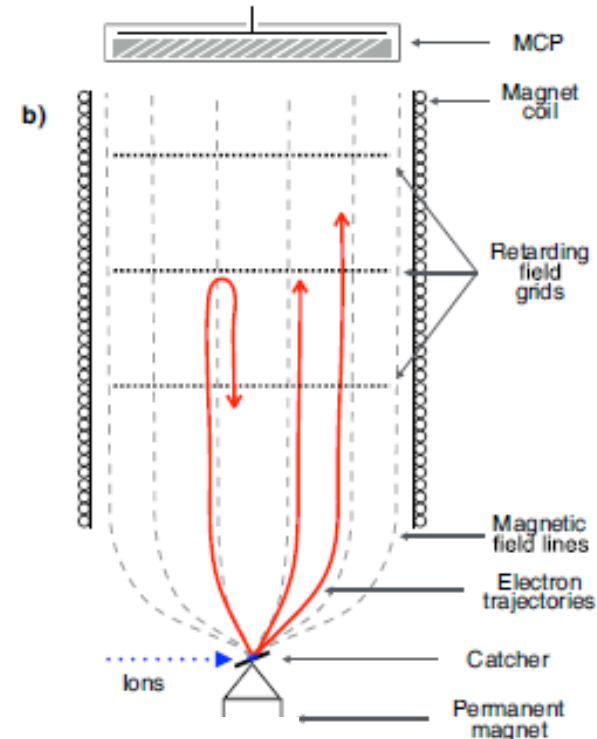
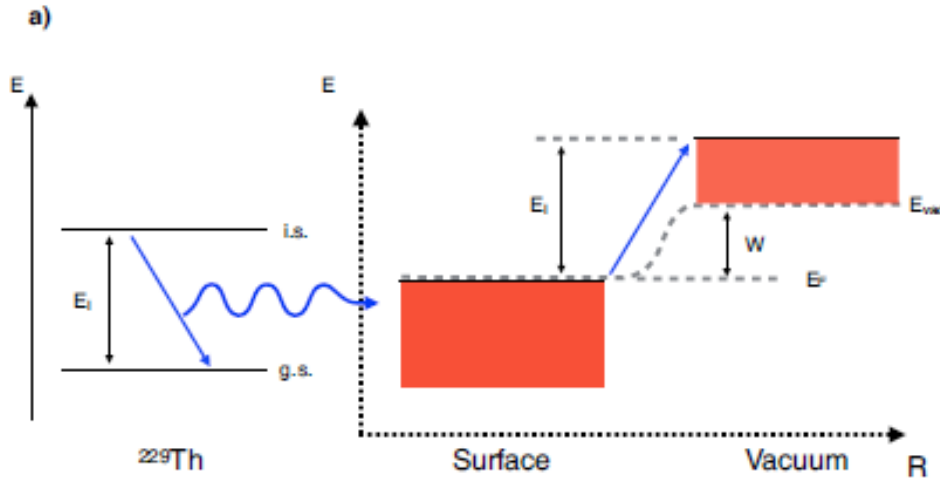
$$\mu_m = -0.37(6) \mu_N$$

charge radius:

$$\langle r^2 \rangle_{^{229\text{m}}\text{Th}} - \langle r^2 \rangle_{^{229}\text{Th}} = 0.012(2) \text{ fm}^2$$

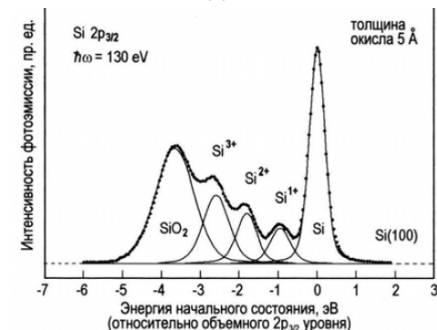
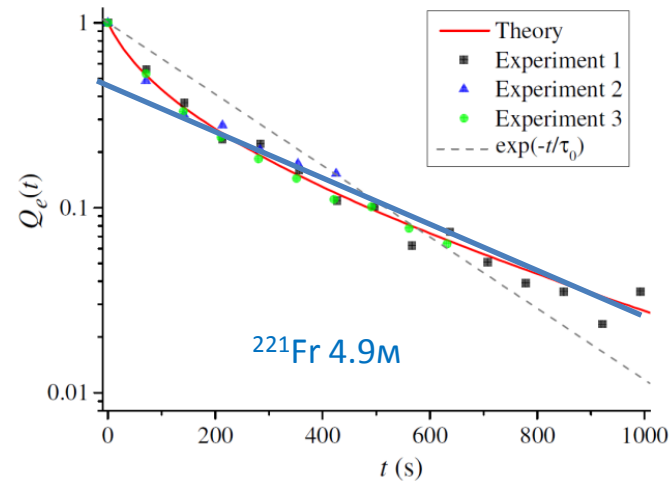
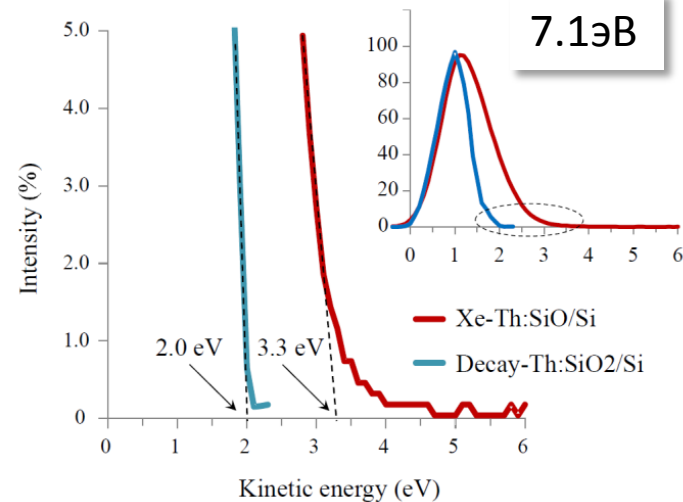
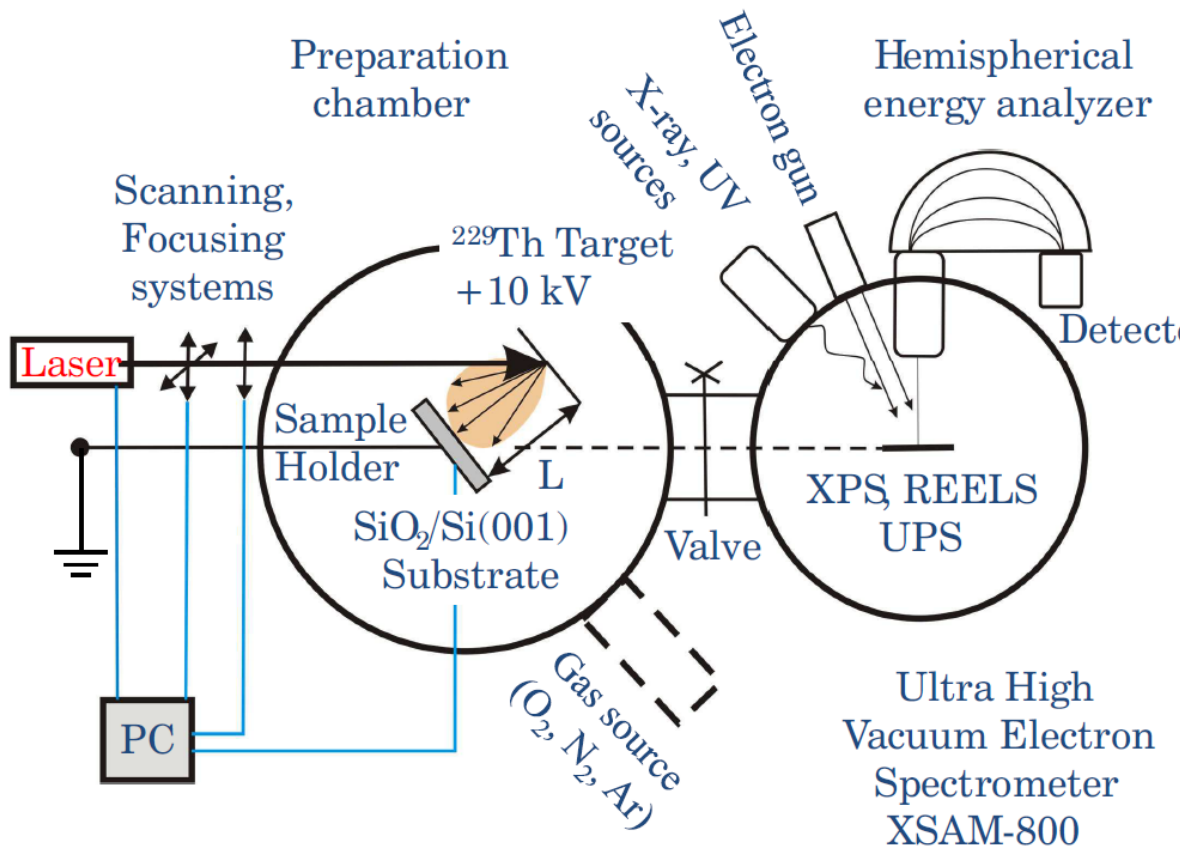
MLL - планы по измерению энергии электронов

Eur. Phys. J. A (2017) 53: 108



Эксперимент МИФИ

arXiv:1804.00299v1



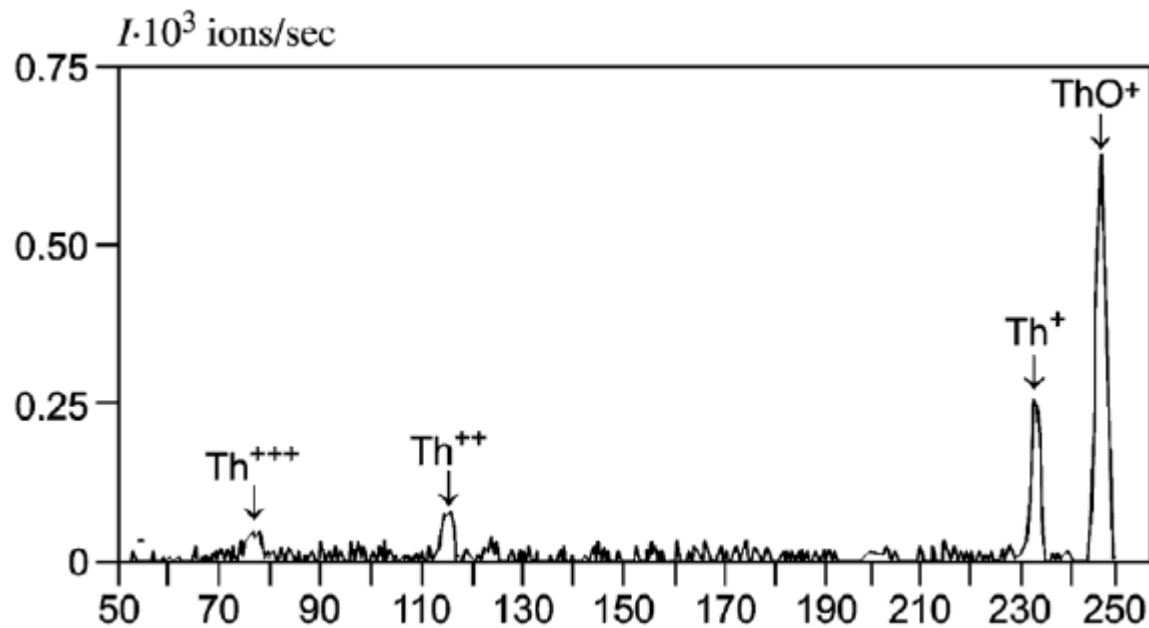
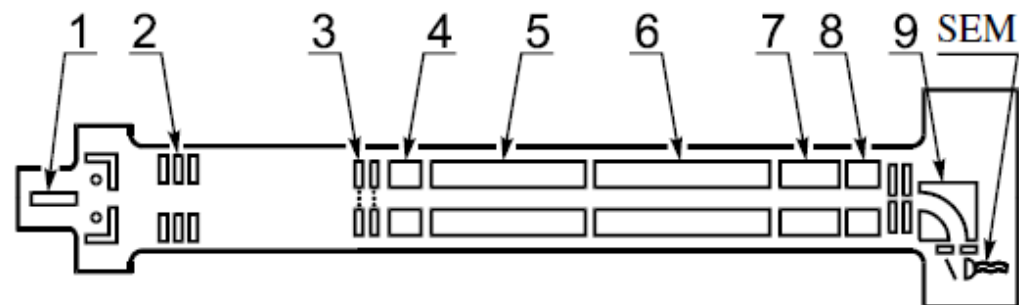
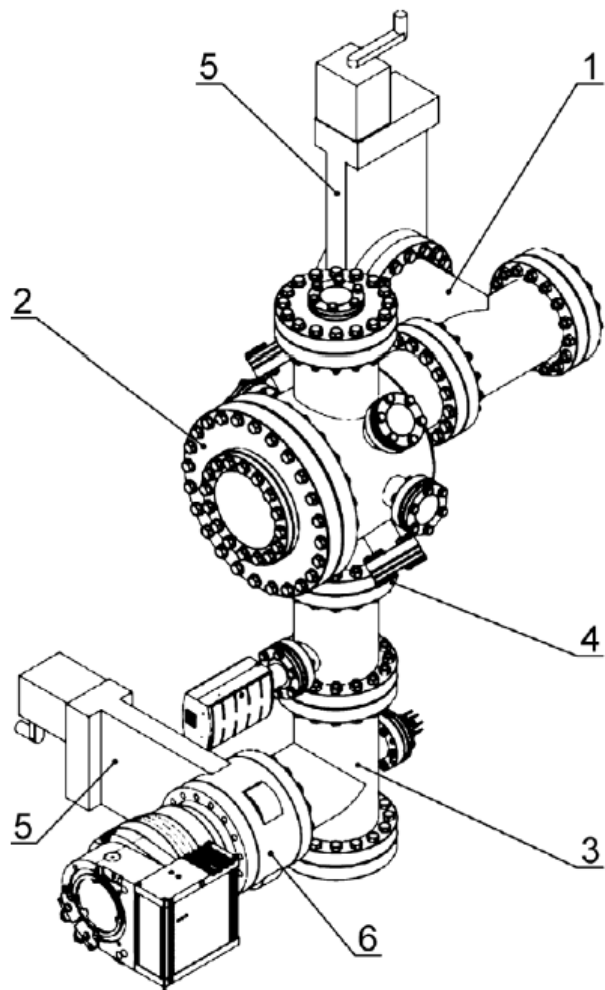
Наблюдалось заселение изомера

Измерена энергия изомера

Парциальное время жизни гамма распада изменяется в среде

1 Апреля?

Ионная ловушка МИФИ



Как измерять энергию?

Наблюдаемые из распада ^{233}U

Косвенные измерения – баланс схемы распада

Измерения разницы масс – пока недоступно

Наблюдаемые из распада $^{229\text{m}}\text{Th}$

Энергия электромагнитного перехода ионов в т.т. матрице – LMU, МИФИ

Энергия электромагнитного перехода ионов в ловушке - обсуждается

Энергия конверсионных электронов – LMU

Заселение в зависимости от энергии

через «электронный мост» - лазеры или электронный удар
синхротронным излучением (несколько попыток ...)

Связанные эффекты

Электроны конверсии для ионов Th^+ , ThO^{++} , ThAr^{++} etc.

Электронная конверсия с метастабильных состояний

Распад изомера через электронный мост

Поиск распада изомера для ионов Th^+

Не наблюдали электроны
конверсии для однозарядных
ионов тория

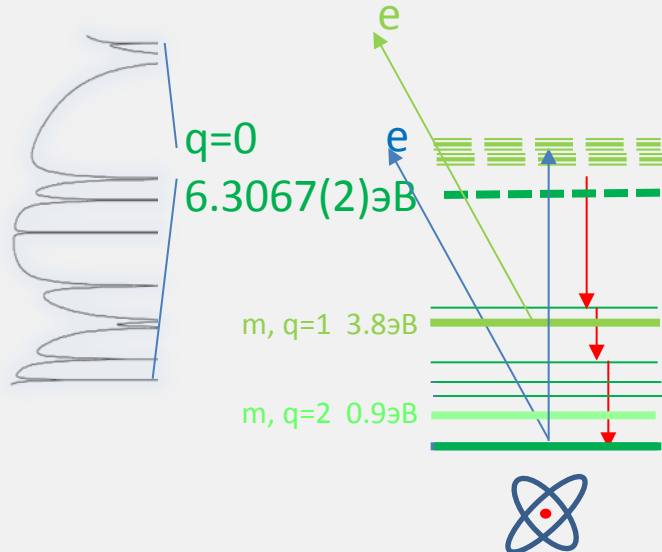
$q=3$ 28.65эВ
 $q=2$ 18.32эВ

$q=1$ 12.1эВ

$q=0$
6.3067(2)эВ

$m, q=1$ 3.8эВ

$m, q=2$ 0.9эВ



Возможные варианты

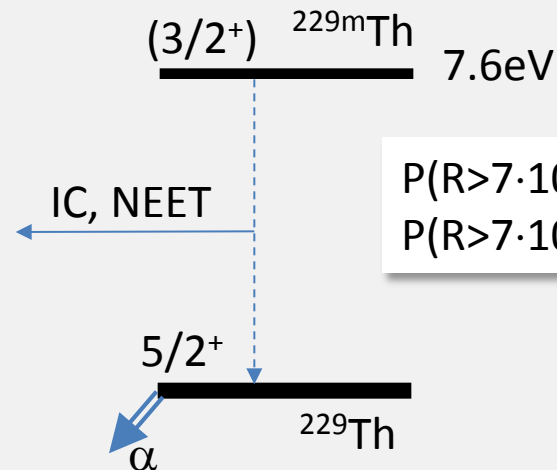
1. Энергия изомера > 12 эВ. Электронная конверсия разрешена. $\tau \sim 7 \mu\text{s}$

Энергия изомера < 12 эВ.

1. Конверсия на связанные состояния. $\tau \sim 1-1000 \text{ms}$.
2. Электронная конверсия на метастабильном состоянии $5f 6d^2$, ~ 4 эВ, 0.4 s .

Методика

Перезарядка иона $2^+ \rightarrow 1^+$ и быстрая доставка образованного иона.



$P(R > 7 \cdot 10^4) \sim 30\%$ ($\tau < 100 \text{ms}$)
 $P(R > 7 \cdot 10^5) \sim 10\%$ ($\tau < 10 \text{ms}$)

Ближайшие задачи

Задача

Определение канала распада изомера тория-229 для однозарядных и молекулярных ионов.

Решение

Частичная нейтрализация Th^{3+} , $\text{Th}^{2+} \rightarrow \text{Th}^+$ в области выходного отверстия газовой ячейки с быстрой эвакуацией и транспортировкой.

Задача

Измерение энергии конверсионных электронов при нейтрализации в ловушке.

Решение

Термализация ионов изомера тория-229 в мультипольной ловушке. Нейтрализация в реакции с примесными атомами. Измерение электронов конверсии для нейтральных атомов.

Генератор ионов тория (обсуждение ПИЯФ 2013)



Детектор

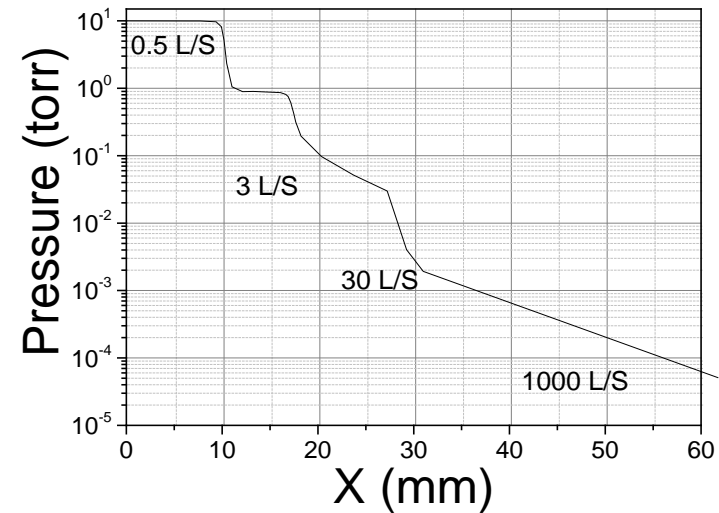
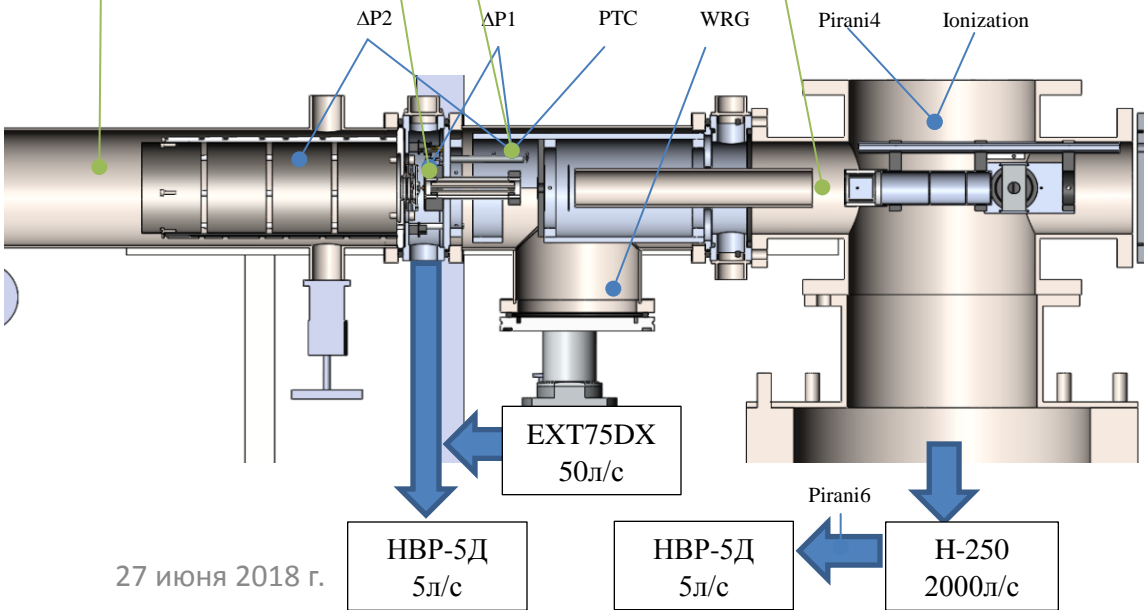
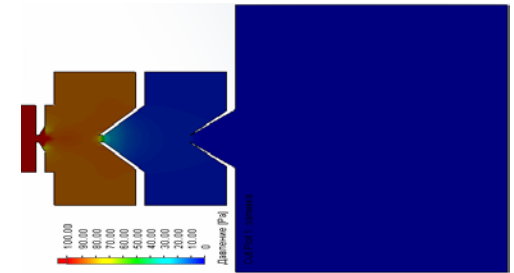
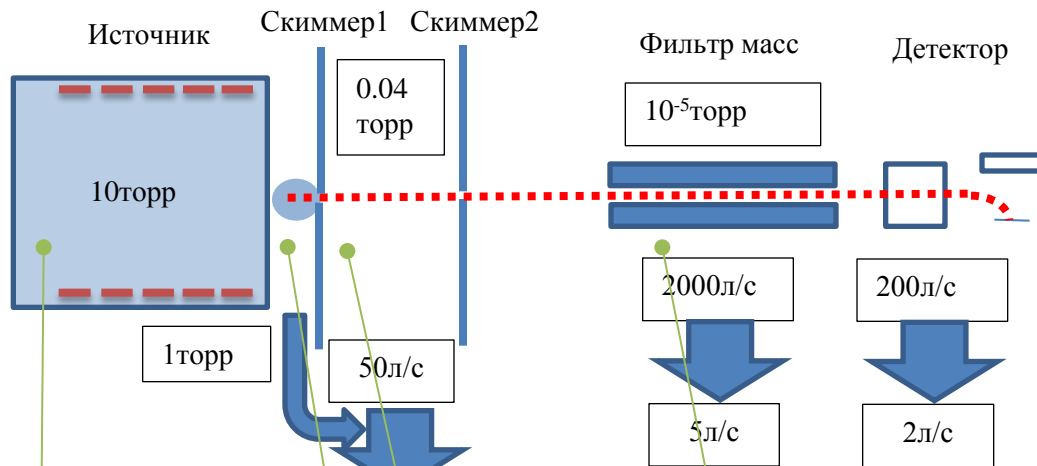
Фильтр масс

RFQ

^{233}U

Генератор ионов тория

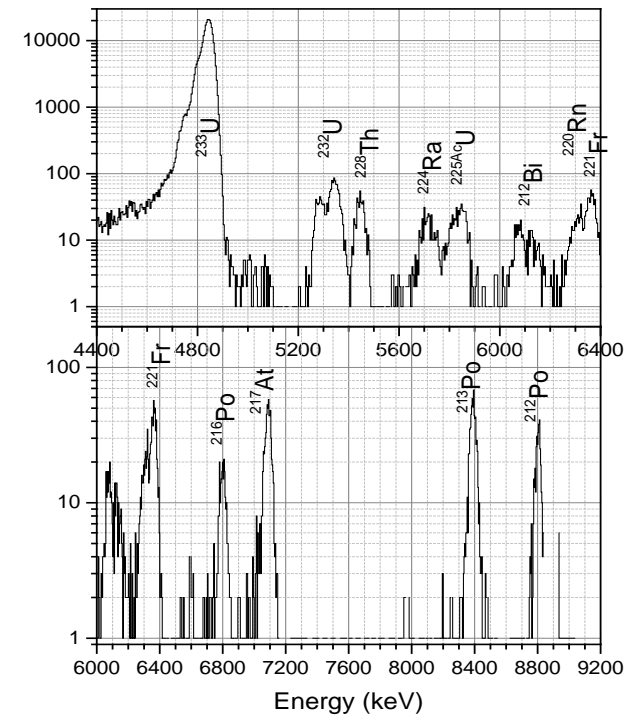
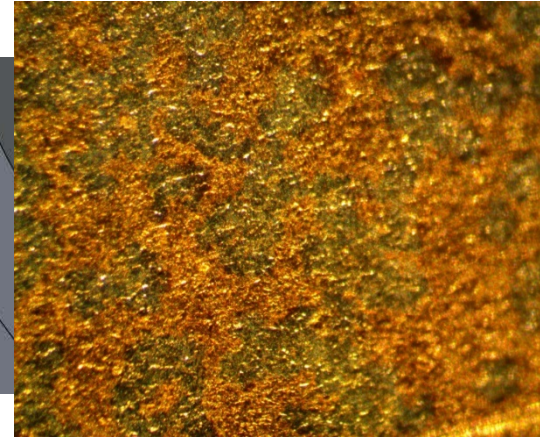
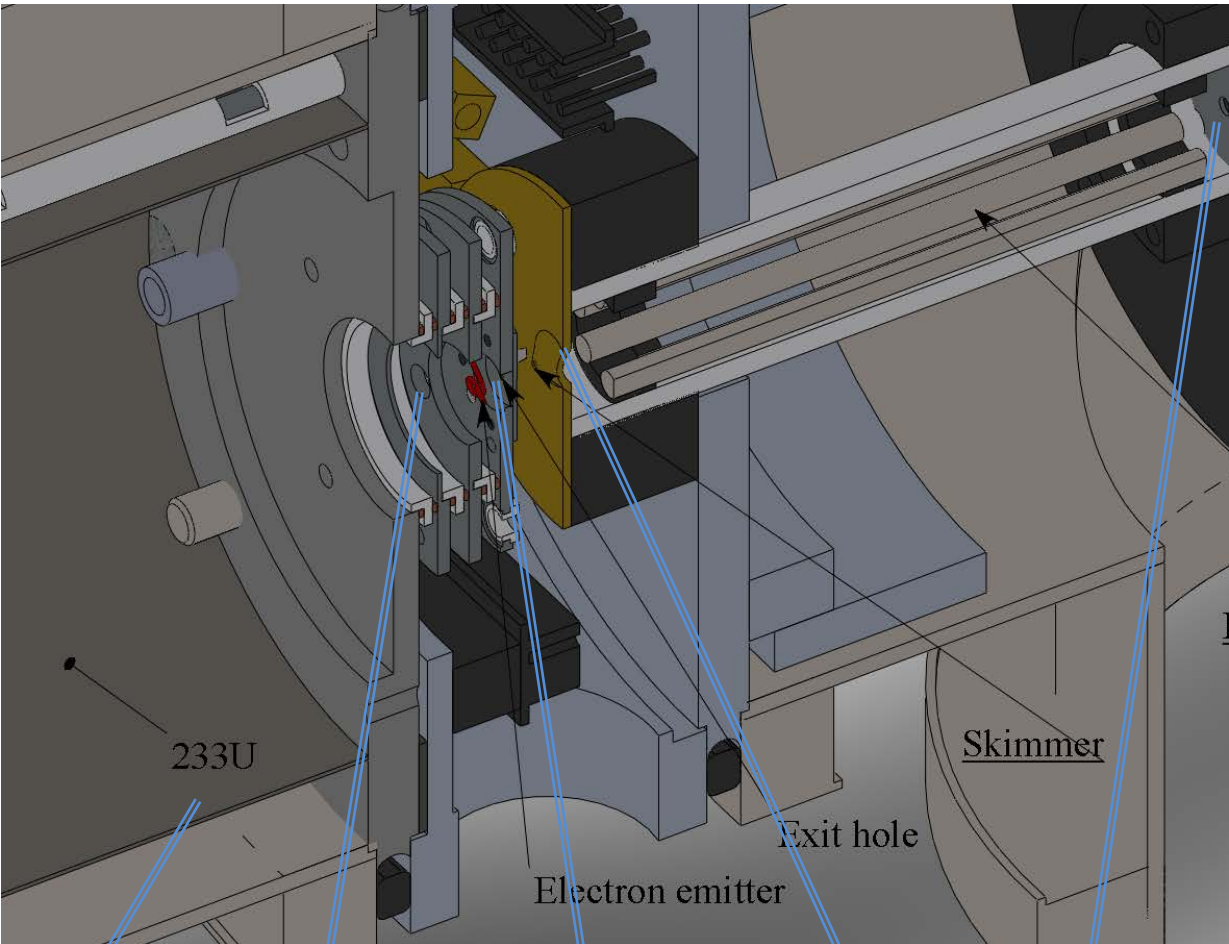
Вакуумная схема



27 июня 2018 г.

Генератор ионов тория

Газовая ячейка и транспорт в области дифференциальной откачки



Фольга 0.16	Сбор в газе 0.75	Эвакуация 0.17	Скиммер 0.25	RFQ 0.1
----------------	---------------------	-------------------	-----------------	------------

Некоторые особенности методики

Ионный источник

☐ Сбор с инжекцией электронов

- Быстрая и эффективная эвакуация ионов
 - Большая эффективная площадь источника
 - Меньшее давление – быстрая эвакуация
 - Нет необходимости в кондиционировании
- Манипуляция зарядом ионов

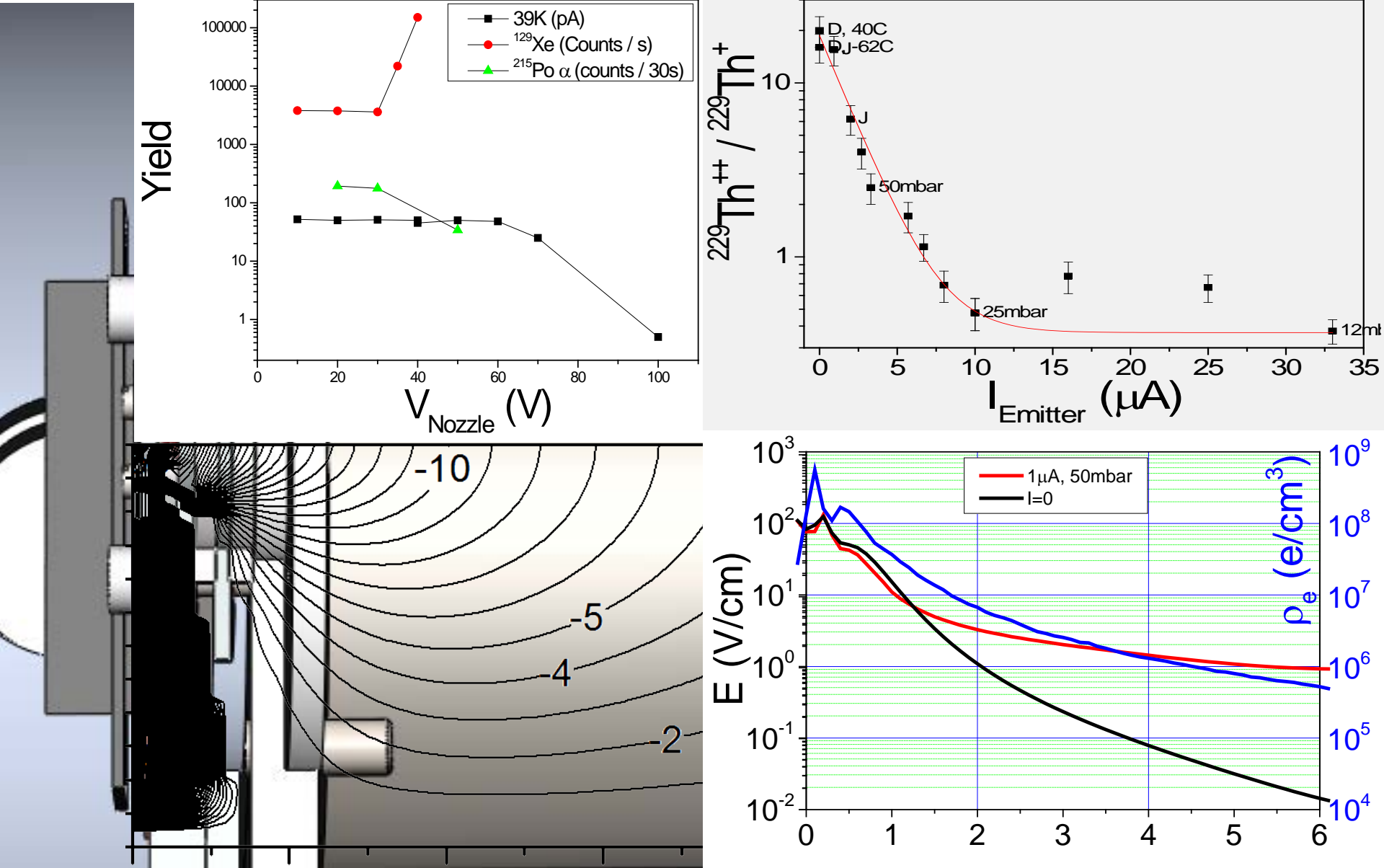
Измерение энергии

☐ Спектрометр электронов

- Спектрометр с магнитной коллимацией
- Электроны конверсии после зарядовообменной реакции в RF-ловушке
- Возможно наблюдение конверсии с метастабильных состояний.
- Разрядка изомера через электронный мост.

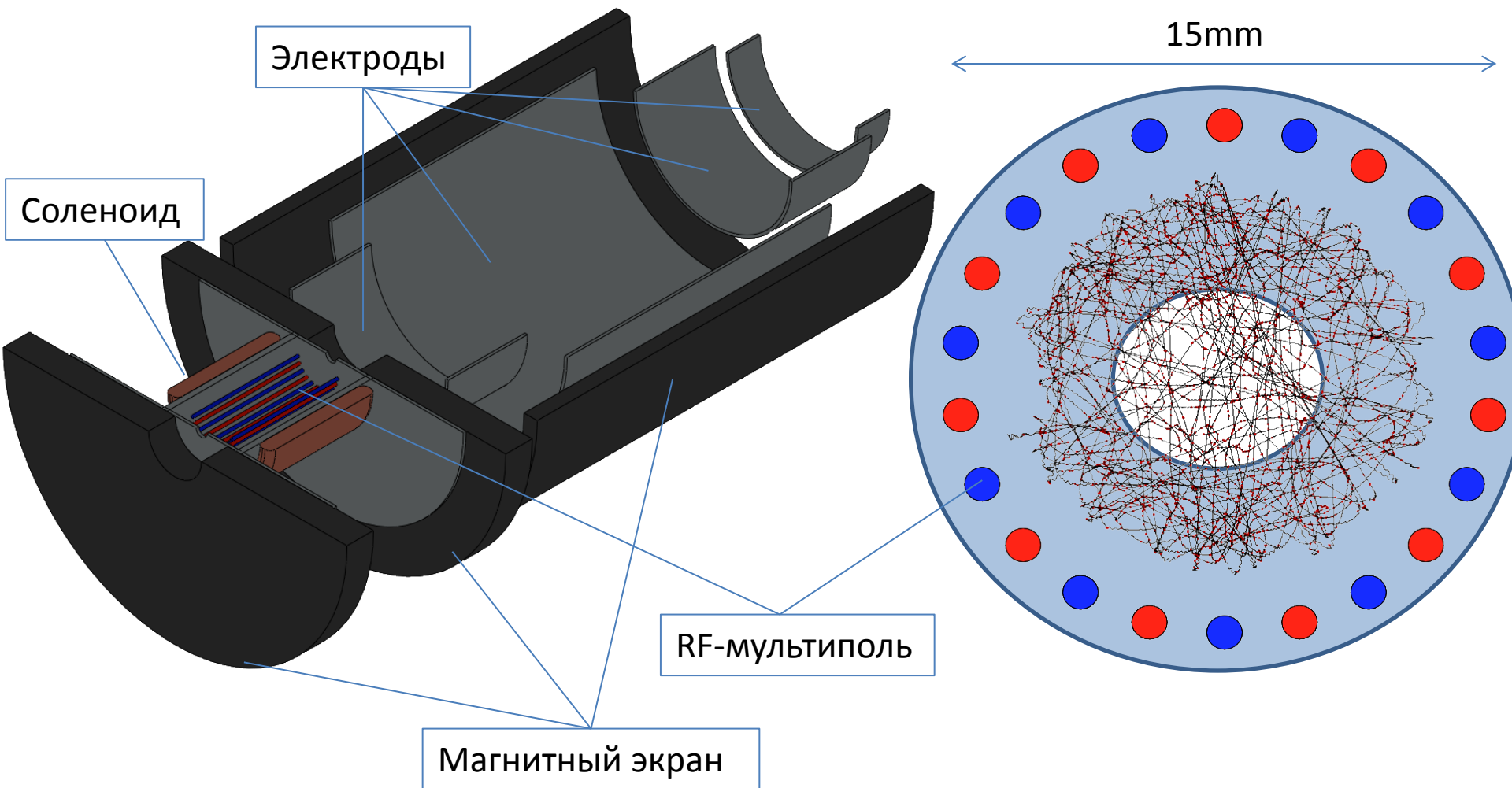
	^{233}U	^{229}Th	$^{229/229\text{m}}\text{Th}^+ / \text{s}$	$^{229}\text{Th}^{++} / \text{s}$	$^{229}\text{Th}^{+++} / \text{s}$
PNPI (2020)	1.5MBq	-	(50000/1000)	(50000/1000)	(10000/200)
JYFL (2006)	0.38MBq	-	2500/(50)	1000/(50)	300/(6)
LMU (2016)	0.3MBq	-	500/ ?	10000/200	10000/200
МИФИ	-		~250		/3000

Поиск распада изомера для ионов Th^+

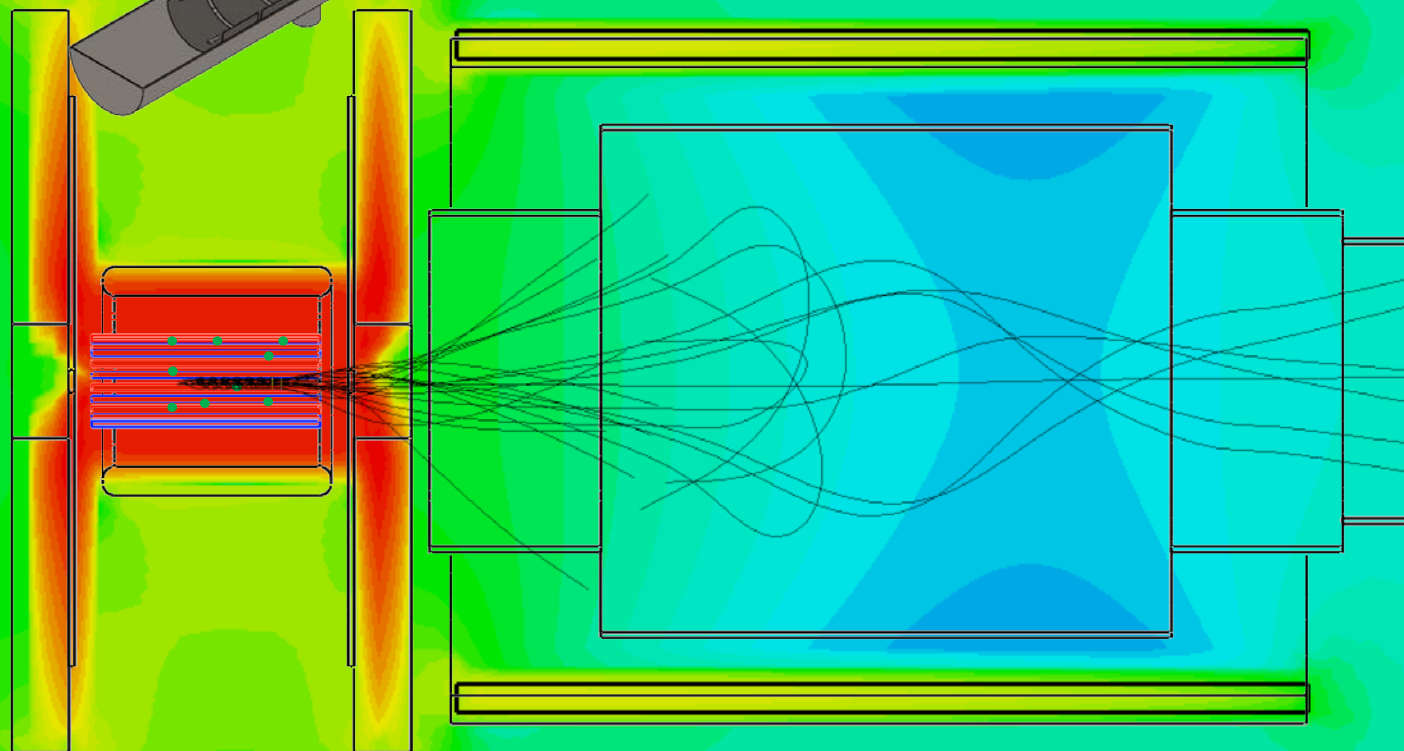
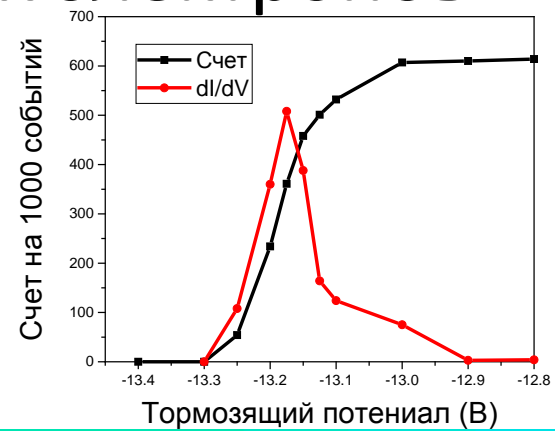
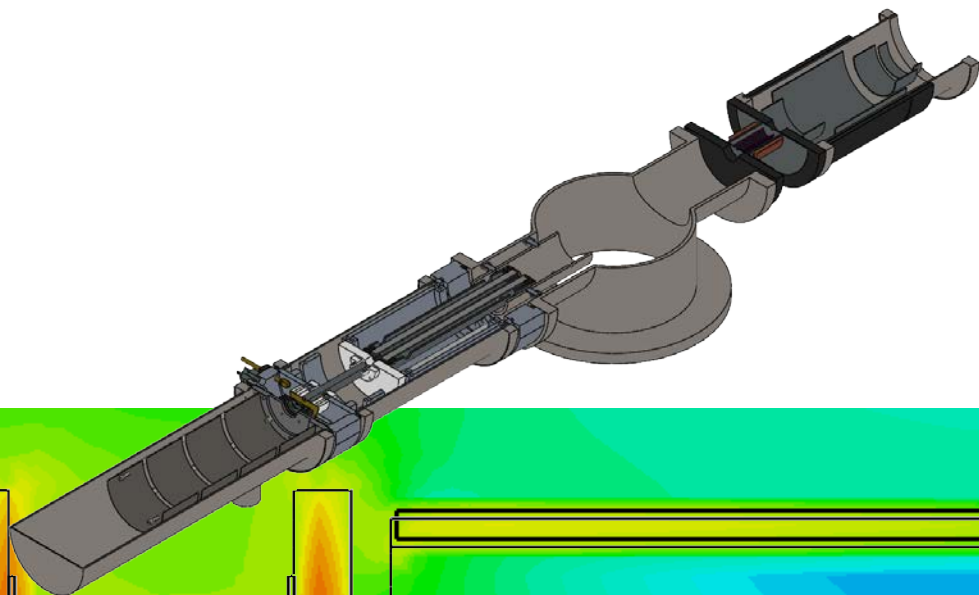


Измерение энергии конверсионных электронов

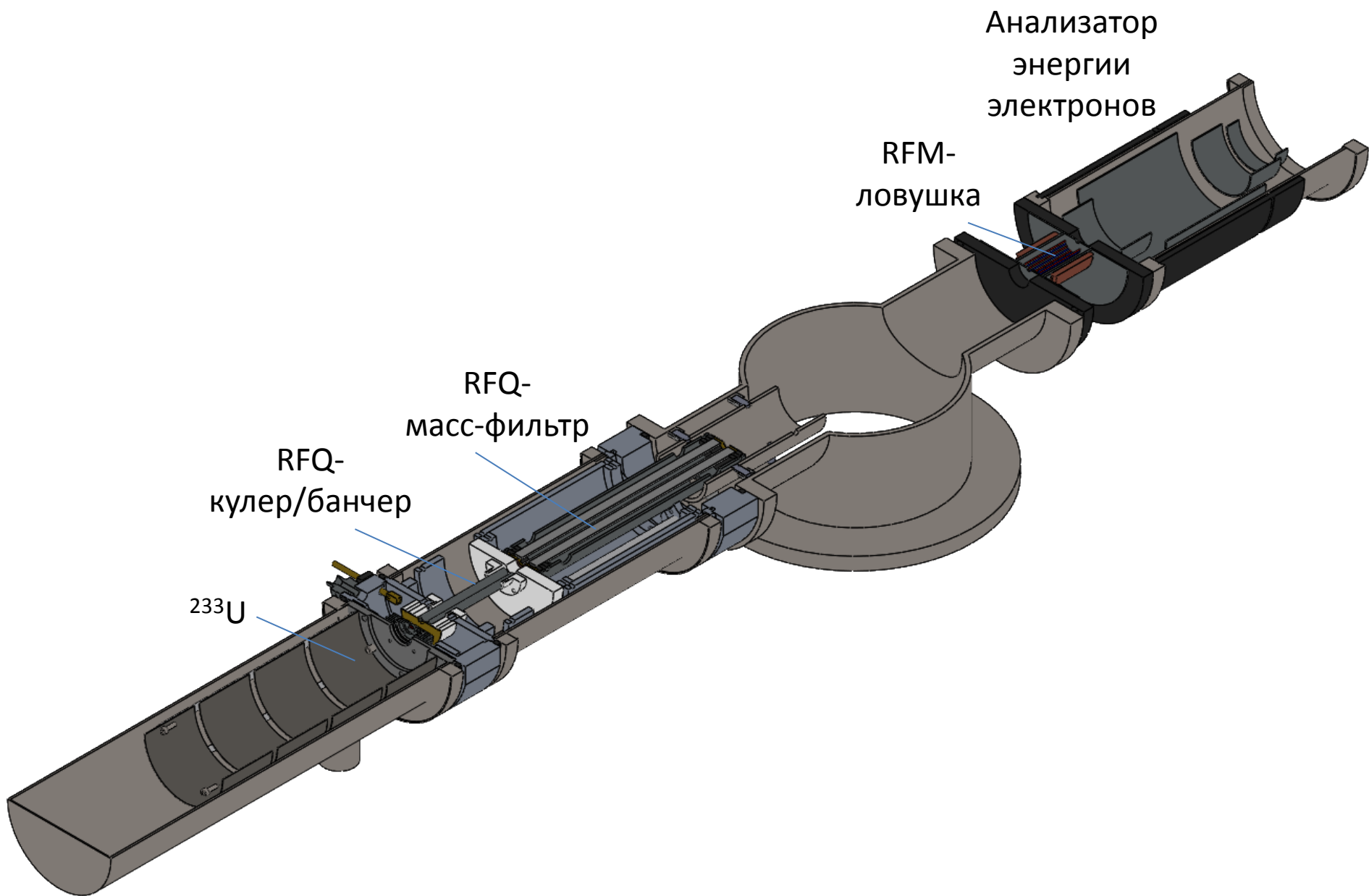
Хранение и нейтрализация ионов



Измерение энергии конверсионных электронов



Измерение энергии конверсионных электронов



Заключение

- Изомер существует.
- Изомер генерируется и наблюдается.
- Измерено время жизни в нейтральном состоянии.
- Измерены магнитный и квадрупольный электрический моменты, разница среднеквадратичных радиусов основного и изомерного состояний.
- Генерация, хранение и регистрация ионов изомера тория-229 доступна небольшой лаборатории.
- Пока нет данных исключающих практическое использование изомера.

Требуется:

- Энергия изомерного состояния
- Знание каналов распада

Экономический эффект

Неопределенность во времени ΔT уменьшается в 10^3 раз

Потребление энергии $\Delta E \approx 10^{13}$ USD/год

$$\Delta E \Delta T \sim \text{const}$$

$$10^{13} * 10^3 = 10^{16} \text{ USD/год}$$

$$10^6 \text{ USD/год/человека}$$

Спасибо за внимание

- Семинар ПИЯФ 2013
- Заявка РФН 2014
- Заявка РФФИ 2014
- Конференция С.Петербург 2015
- Семинар РИ 2015
- Заявка РФФИ 2015 (ПИЯФ-МРІК)
- Заявка РФФИ 2016 (ВНИИМ-ПИЯФ)

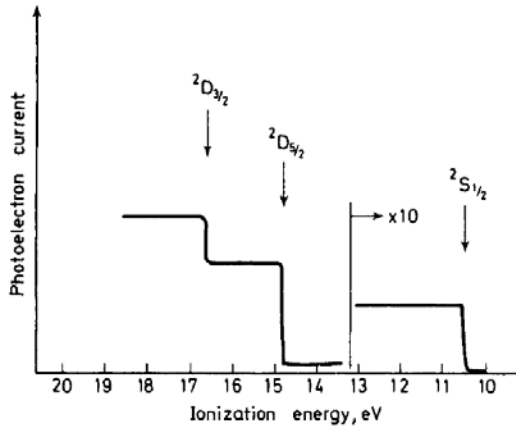


Figure 1.3 Integral photoelectron spectrum of mercury excited by He I radiation. (After Frost, D.C., McDowell, C.A., Sandhu, J.S. and Vroom, D.A., in Kendricks, E. (Editor) *Advances in Mass Spectrometry, Vol 4*, Institute of Petroleum, London, 781 (1968))

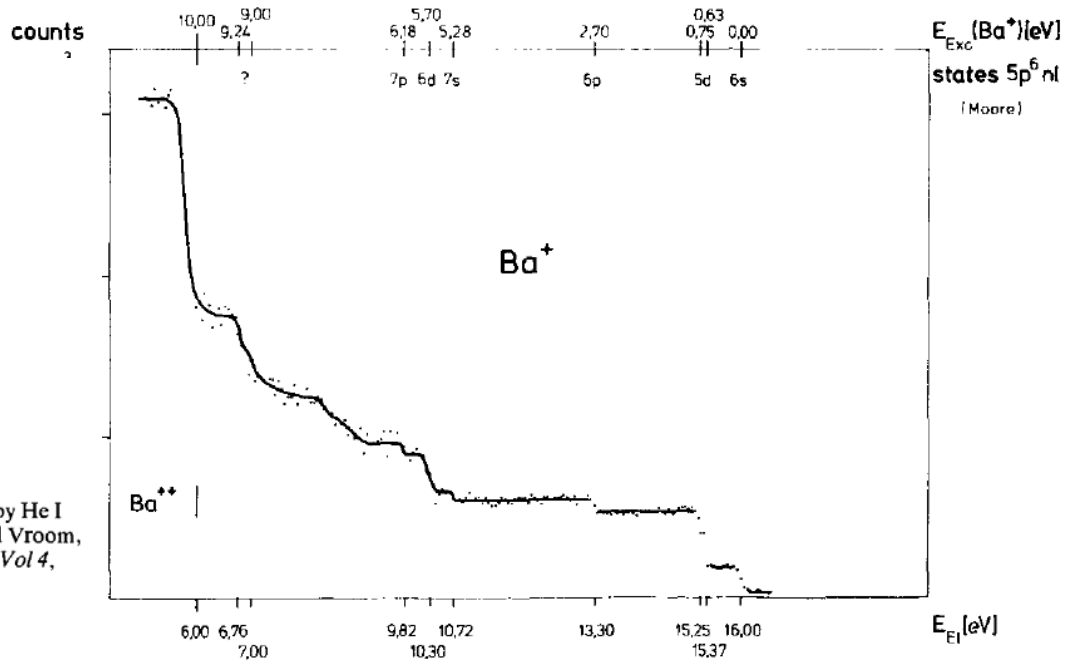
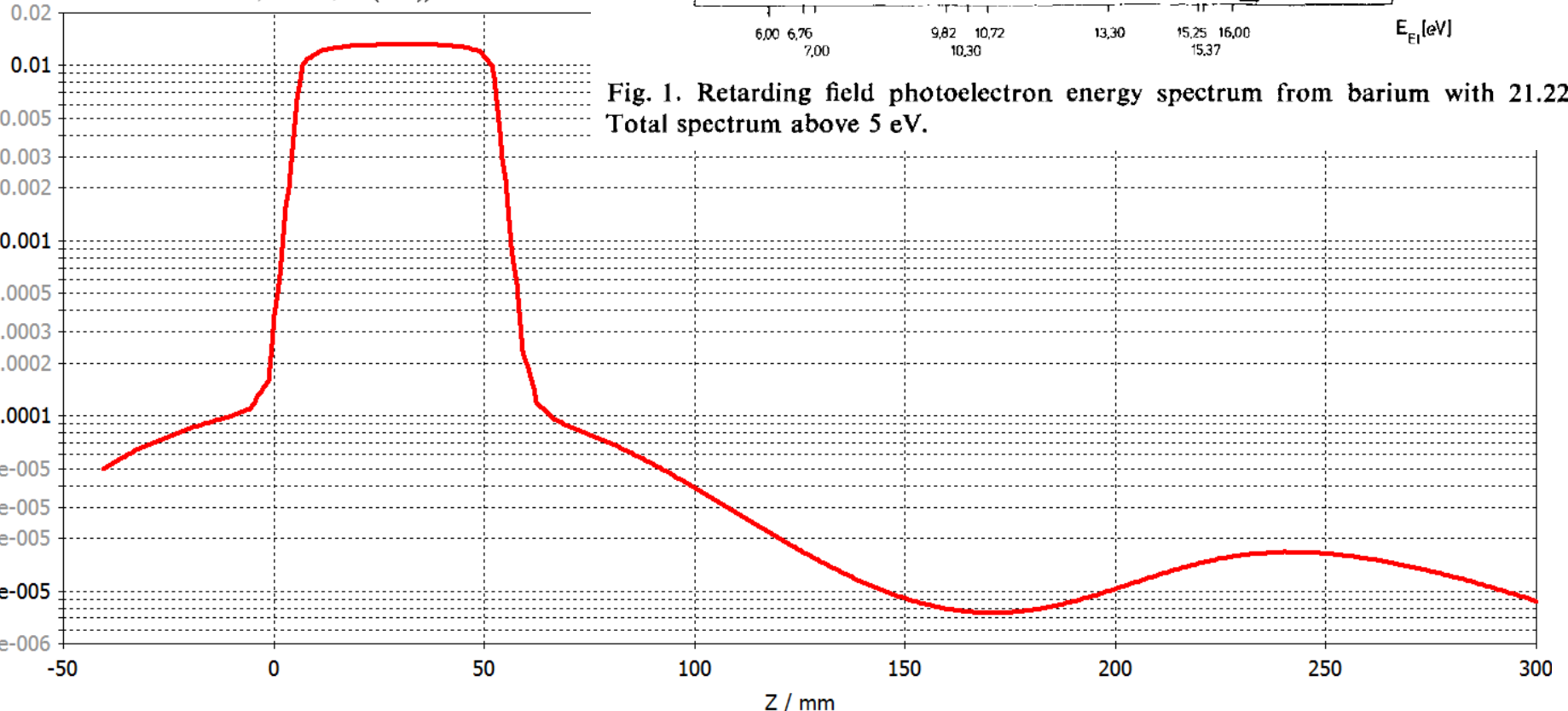


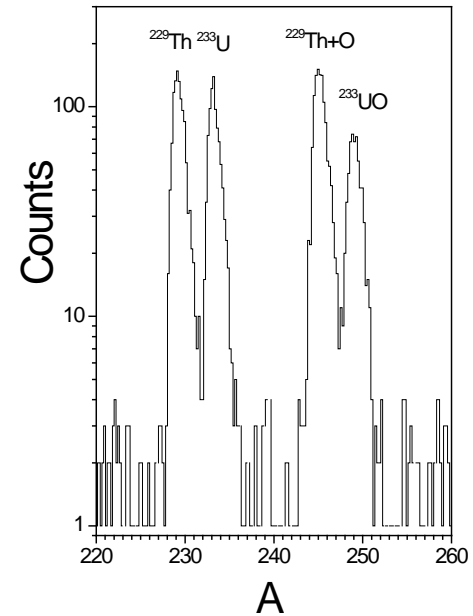
Fig. 1. Retarding field photoelectron energy spectrum from barium with 21.22-eV Total spectrum above 5 eV.



Пучок ионов ^{229}Th в JYFL (2007)

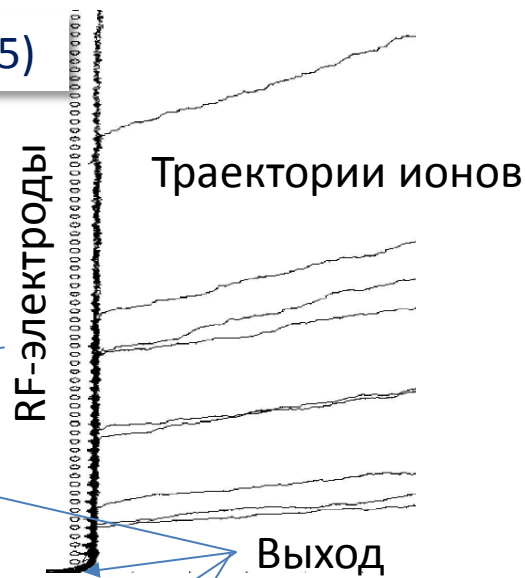
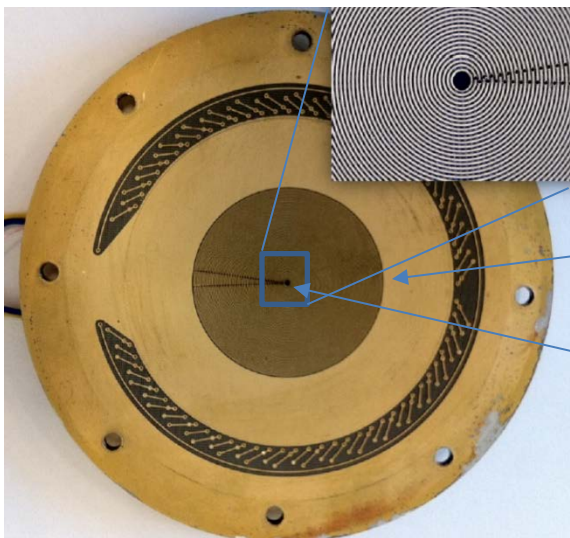


0,4%, -40°C

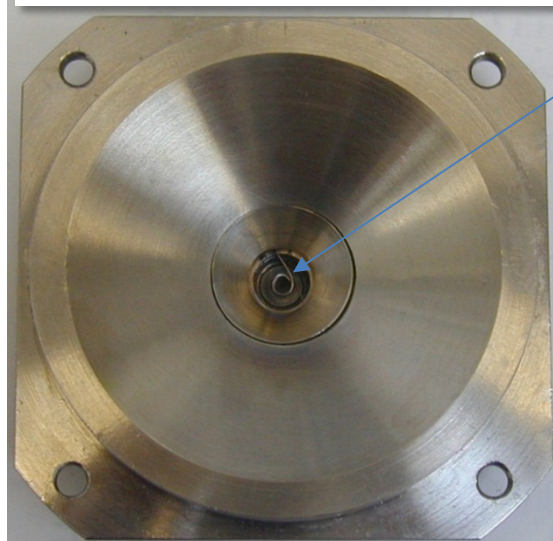


Эвакуация ионов из газовой ячейки

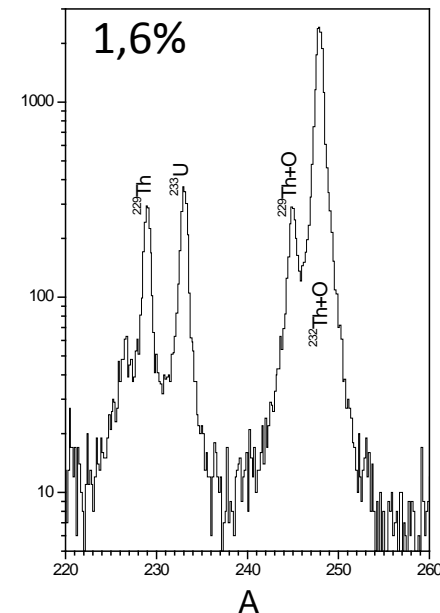
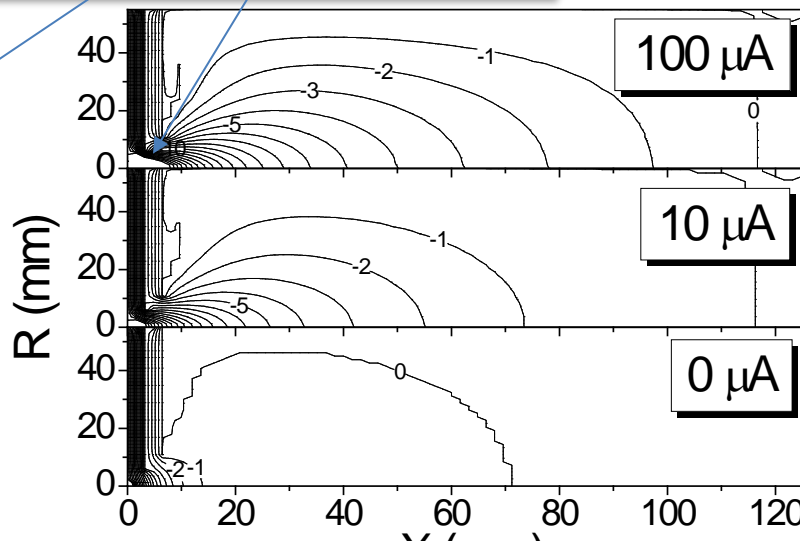
RF- транспорт (JYFL, T. Sonoda, 2005)

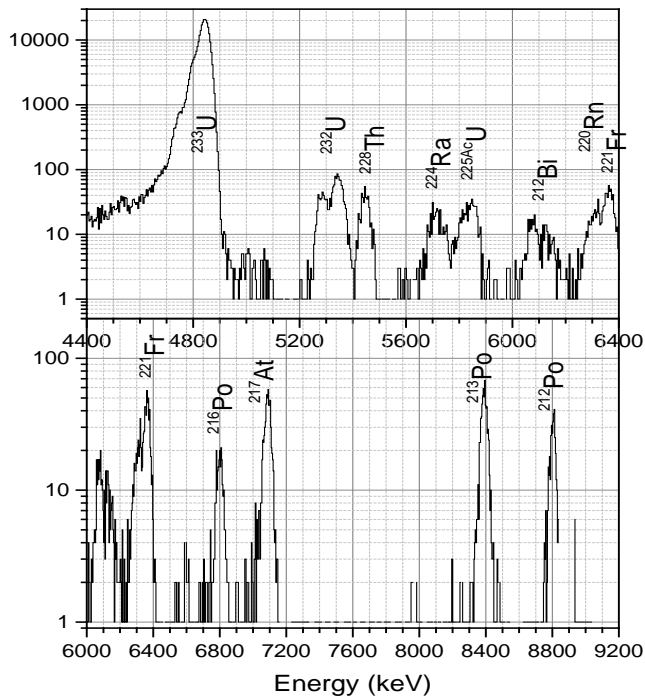


Транспорт с инжекцией электронов (JYFL, PNPI 2002)



Поле в ячейке





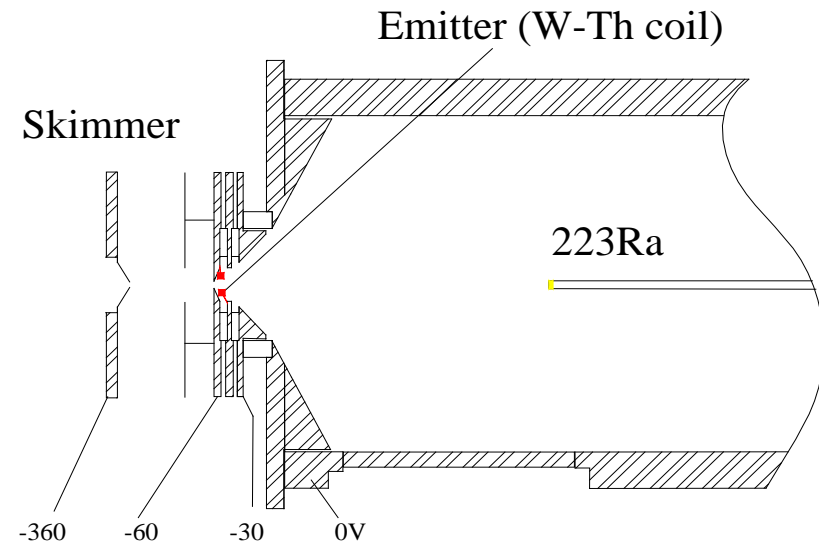
					U230 20.8 d 0+	U231 4.2 d (5/2-)	U232 68.9 y 0+	U233 1.592E+5 5/2+
Pa224 0.79 s	Pa225 1.7 s	Pa226 1.8 m	Pa227 38.3 m (5/2-)	Pa228 22 h 3+	Pa229 1.50 d (5/2+)	Pa230 17.4 d (2-)	Pa231 32700 y 3/2-	Pa232 1.31 d (2-)
Th223 0.60 s (5/2)+	Th224 1.05 s 0+	Th225 8.72 m (3/2)+	Th226 30.57 m 0+	Th227 18.72 d (1/2+)	Th228 1.9116 y 0+	Th229 7340 y 5/2+		
Ac222 5.0 s 1-	Ac223 2.10 m (5/2-)	Ac224 2.78 h 0-	Ac225 10.0 d (3/2-)	Ac226 29.37 h (1)	Ac227 21.77 y 3/2-	Ac228 6.15 h 3+		
Ra221 28 s 5/2+	Ra222 38.0 s 0+	Ra223 11.43 d 3/2+	Ra224 3.66 d 0+	Ra225 14.9 d 1/2+	Ra226 1600 y 0+	Ra227 42.2 m 3/2+		
Fr220 27.4 s 1+	Fr221 4.9 m 5/2-	Fr222 14.2 m 2-						

Rn215 2.30 Us 9/2+	Rn216 45 Us 0+	Rn217 0.54 ms 9/2+	Rn218 35 ms 0+	Rn219 3.96 s 5/2+	Rn220 55.6 s 0+	Rn221 25 m 7/2(+)
At214 558 ns 1-	At215 0.10 ms 9/2-	At216 0.30 ms 1-	At217 32.3 ms 9/2-	At218 1.5 s	At219 56 s	At220 3.71 m 3
Po213 4.2 Us 9/2+	Po214 164.3 Us 0+	Po215 1.782 ms 9/2+	Po216 0.145 s 0+	Po217 10 s	Po218 3.10 m 0+	
Bi212 60.55 m 1(-)	Bi213 45.59 m 9/2-	Bi214 19.9 m 1-	Bi215 7.6 m	Bi216 3.6 m (1-)		

Эффективность вылета
16%

134

Газовая ячейка с электродами и электронным эмиттером



Особенности:

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

Без объемного заряда



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

