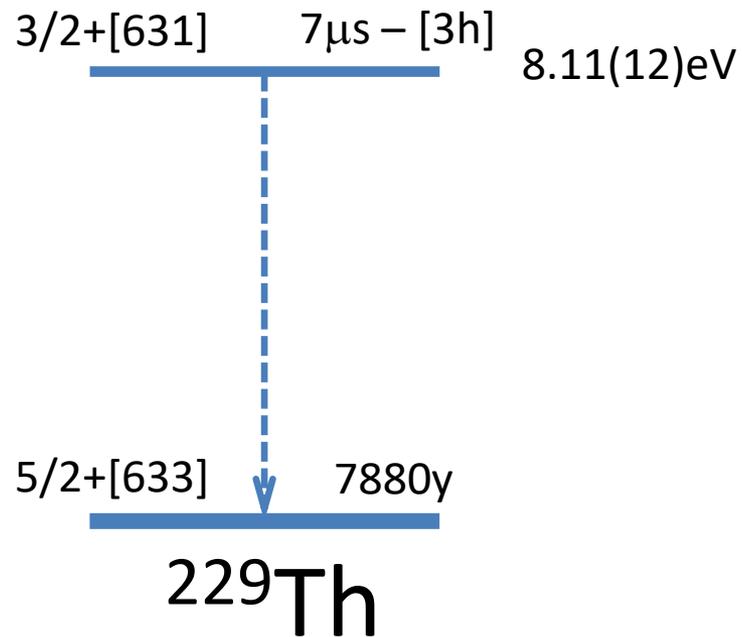


В поисках моста изомер тория-229



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

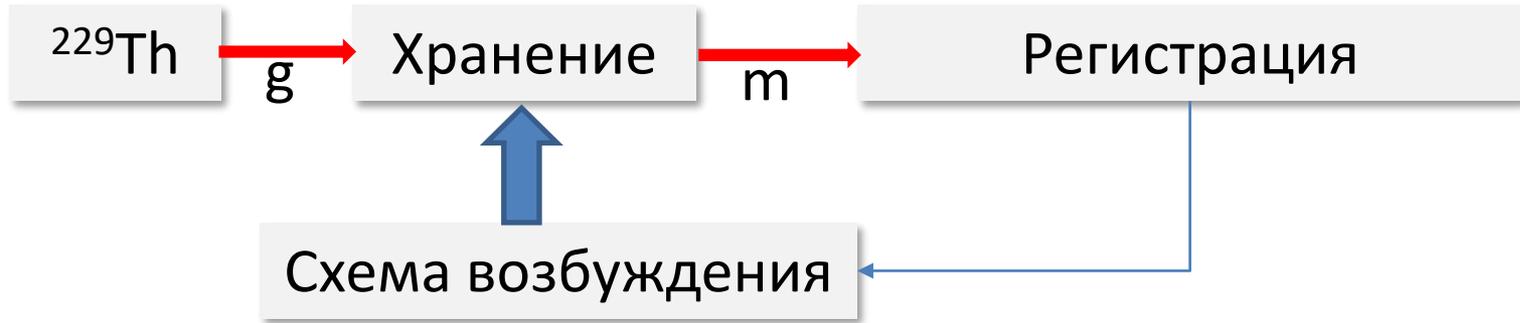
Приложения:

Метрология, техника, фундаментальная физика, космология

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

Требуется

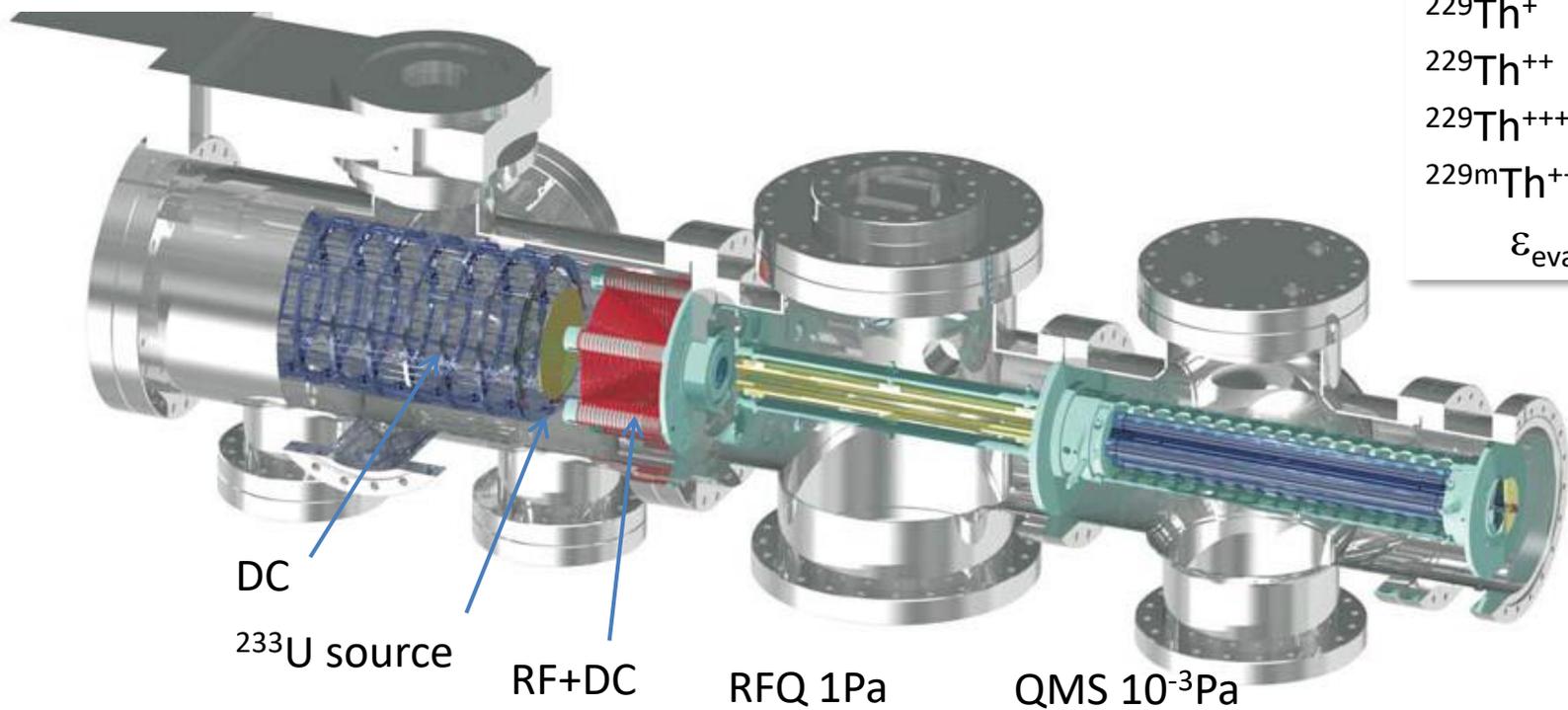
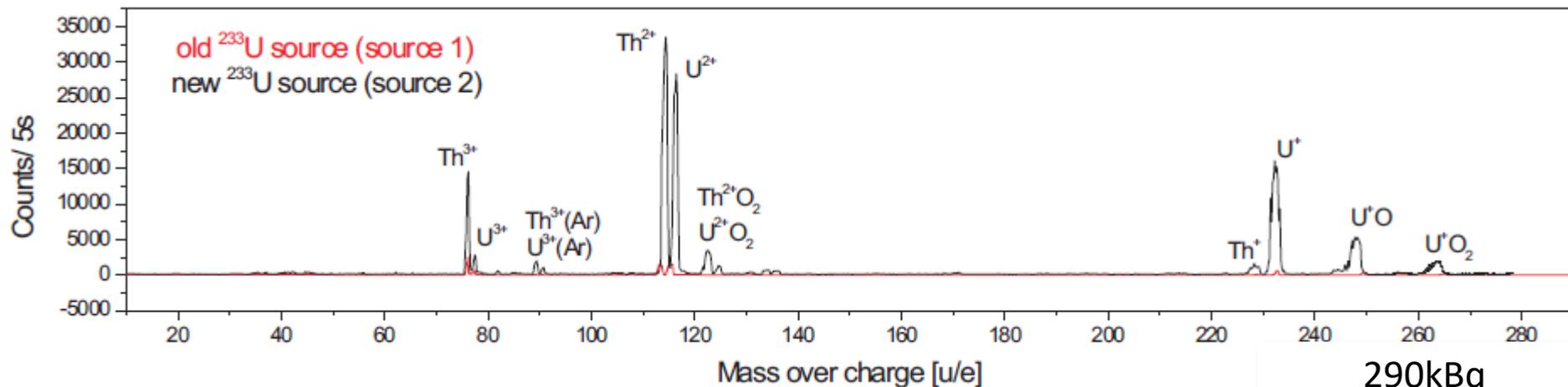
Техника генерации, регистрации и заселения изомера.



Ближайшие задачи (@ семинар ПИЯФ 2013)

- ~~Генератор ионов $^{229}, ^{229m}\text{Th}$. JYFL, ПИЯФ 2006, LMU 2015~~  ПИЯФ
- ~~Регистрация электронов конверсии ^{229m}Th . LMU 2015~~  ПИЯФ
- ~~Влияние среды на распад. - - - - - LMU 2015~~
- ~~Измерение энергии CE. LMU 2019~~
- ~~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)

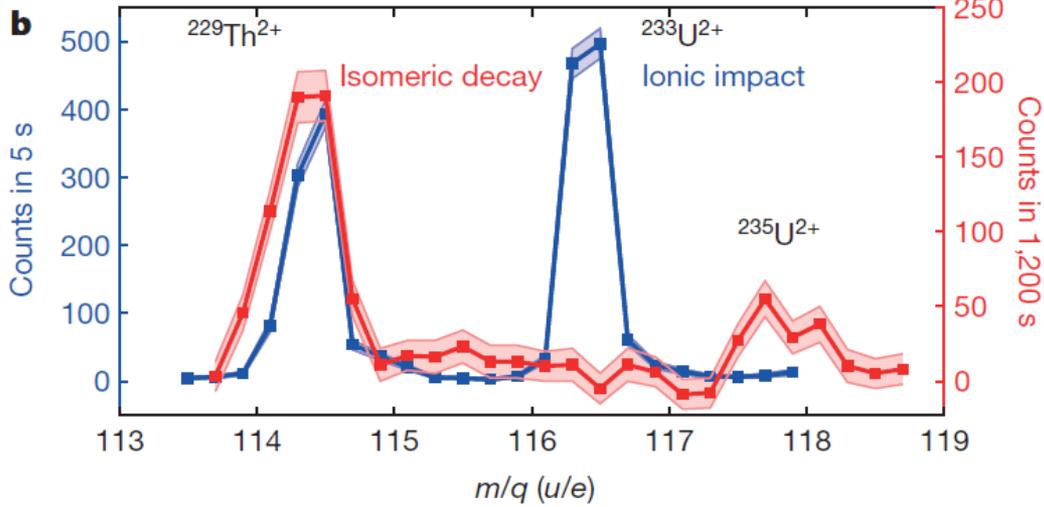


290kBq	
$^{229}\text{Th}^+$	500/c
$^{229}\text{Th}^{++}$	10000/c
$^{229}\text{Th}^{+++}$	10000/c
$^{229\text{m}}\text{Th}^{+++}$	(200/c)
ϵ_{evac}	$\sim 30\%$

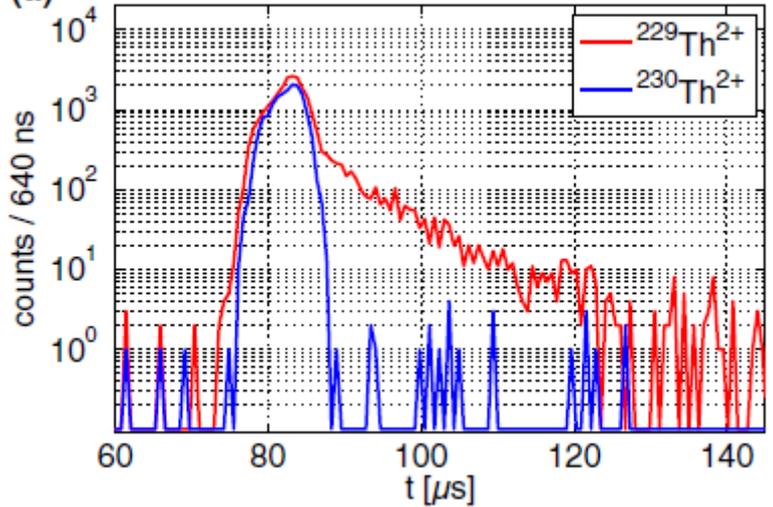
Эксперимент LMU

Eur. Phys. J. A (2020) 56:277
 Lars von der Wense, Benedict Seiferle

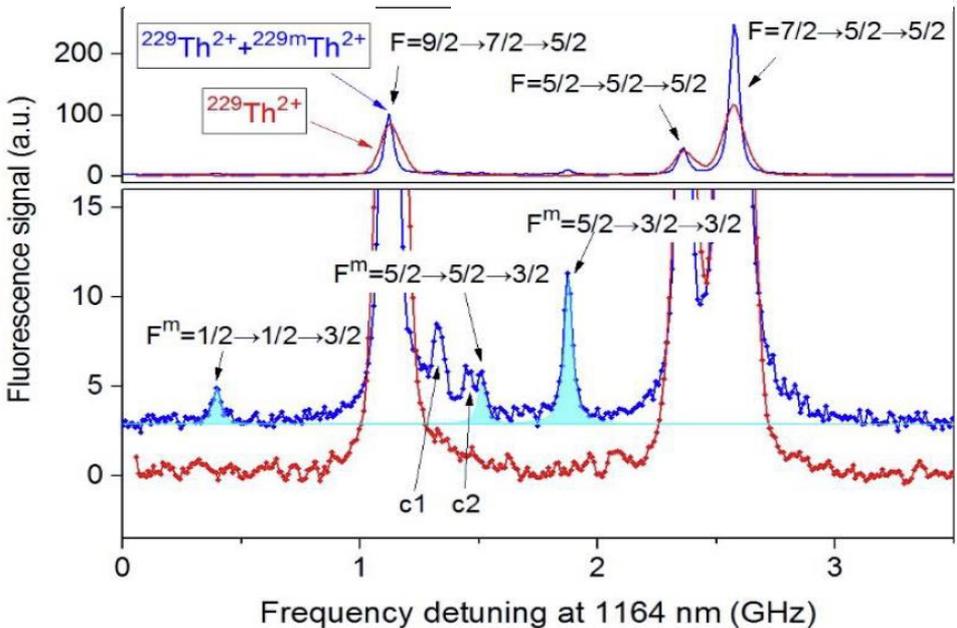
LMU 2015 doi:10.1038/nature17669



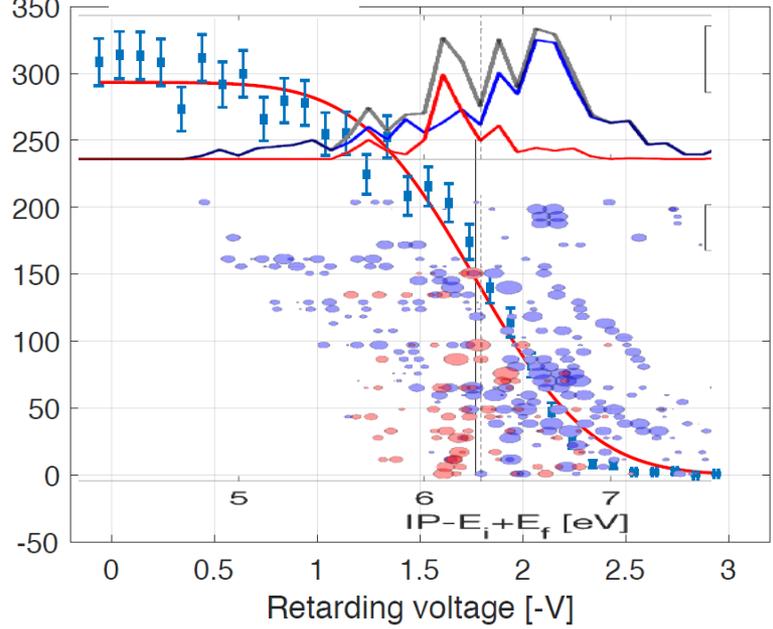
LMU 2016 PRL 118, 042501 (2017)



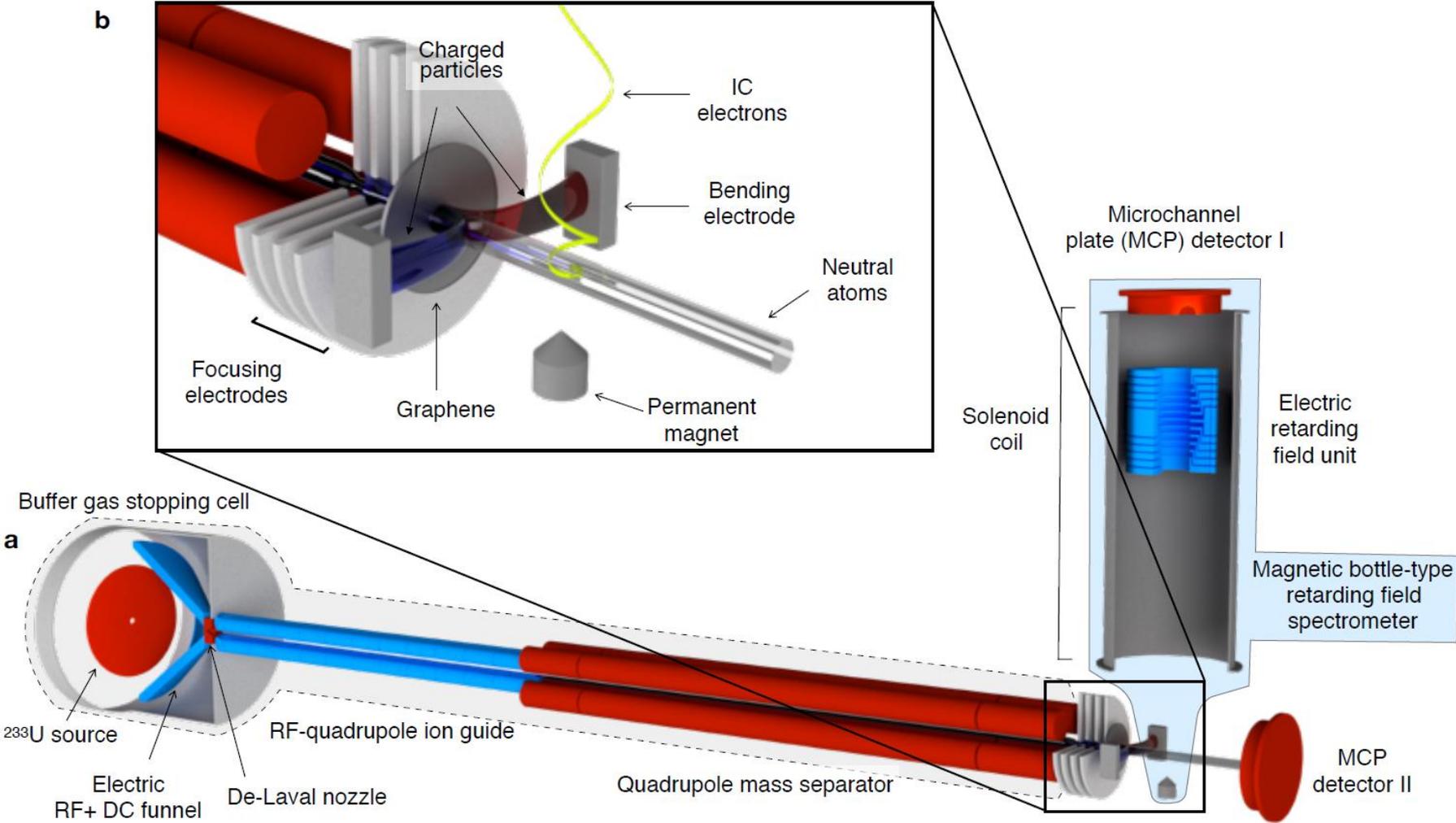
LMU 2017 arXiv:1709.05325



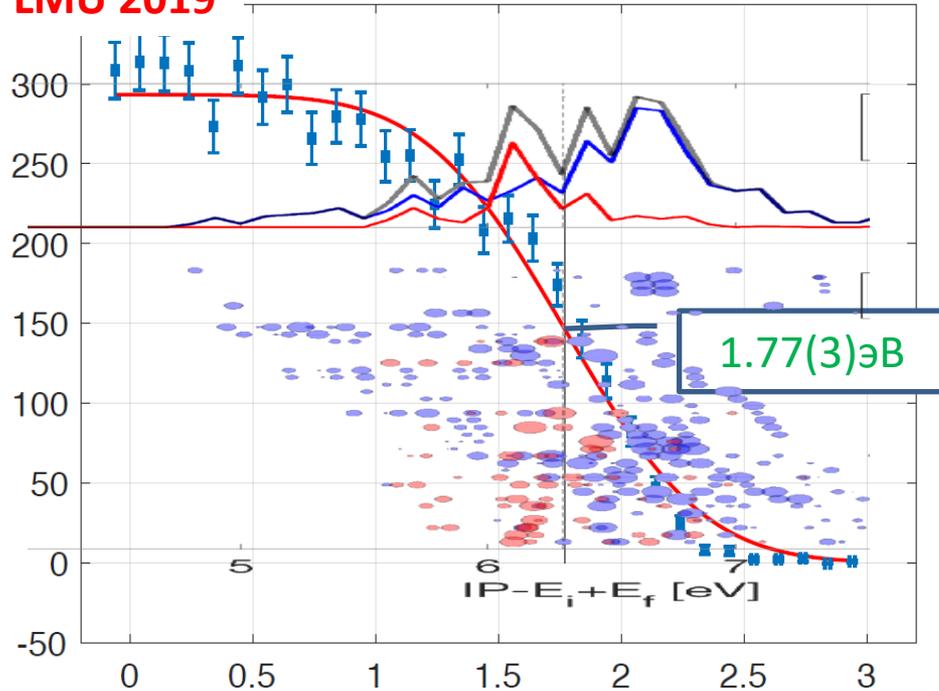
LMU 2019



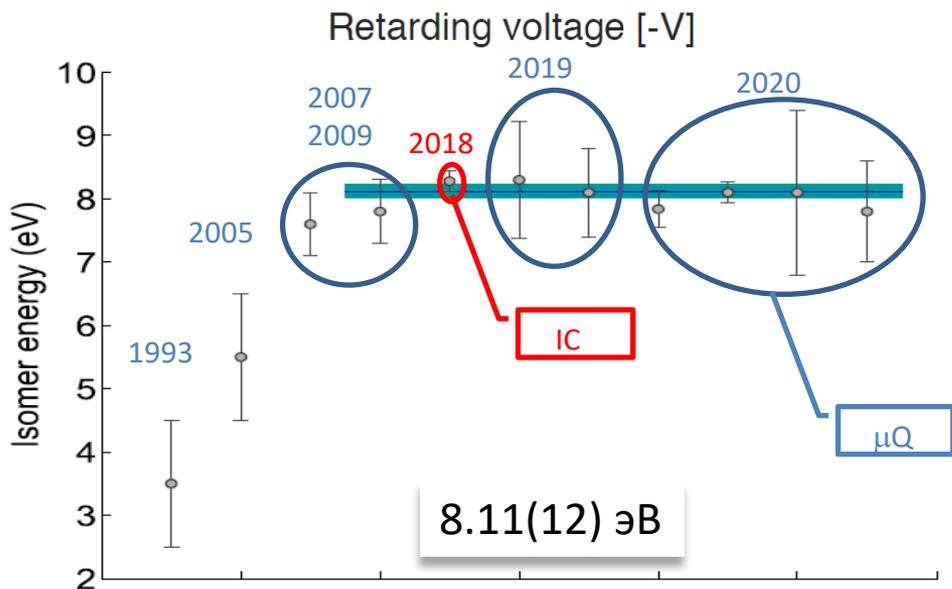
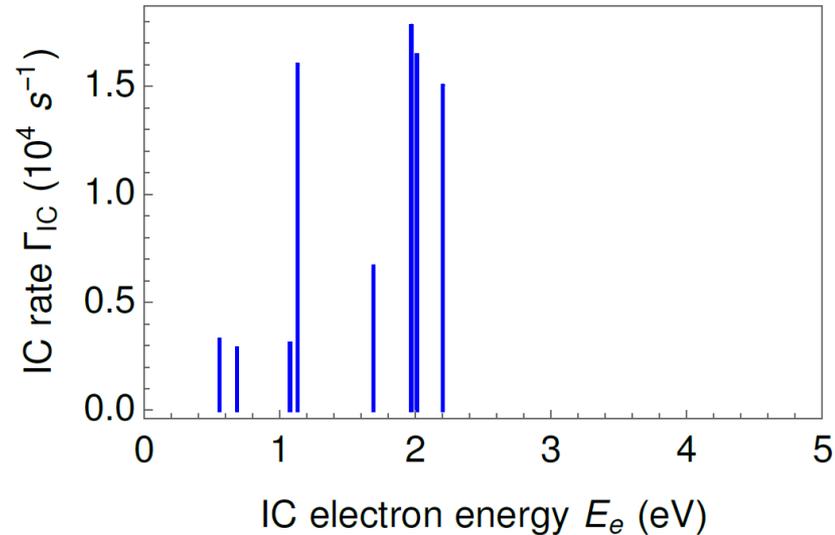
LMU 2019



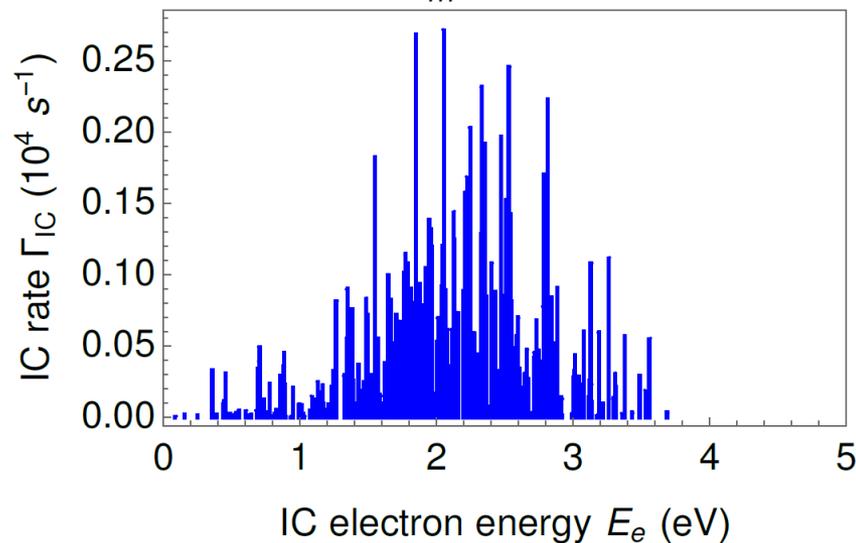
LMU 2019



$E_m = 8.5 \text{ eV}$

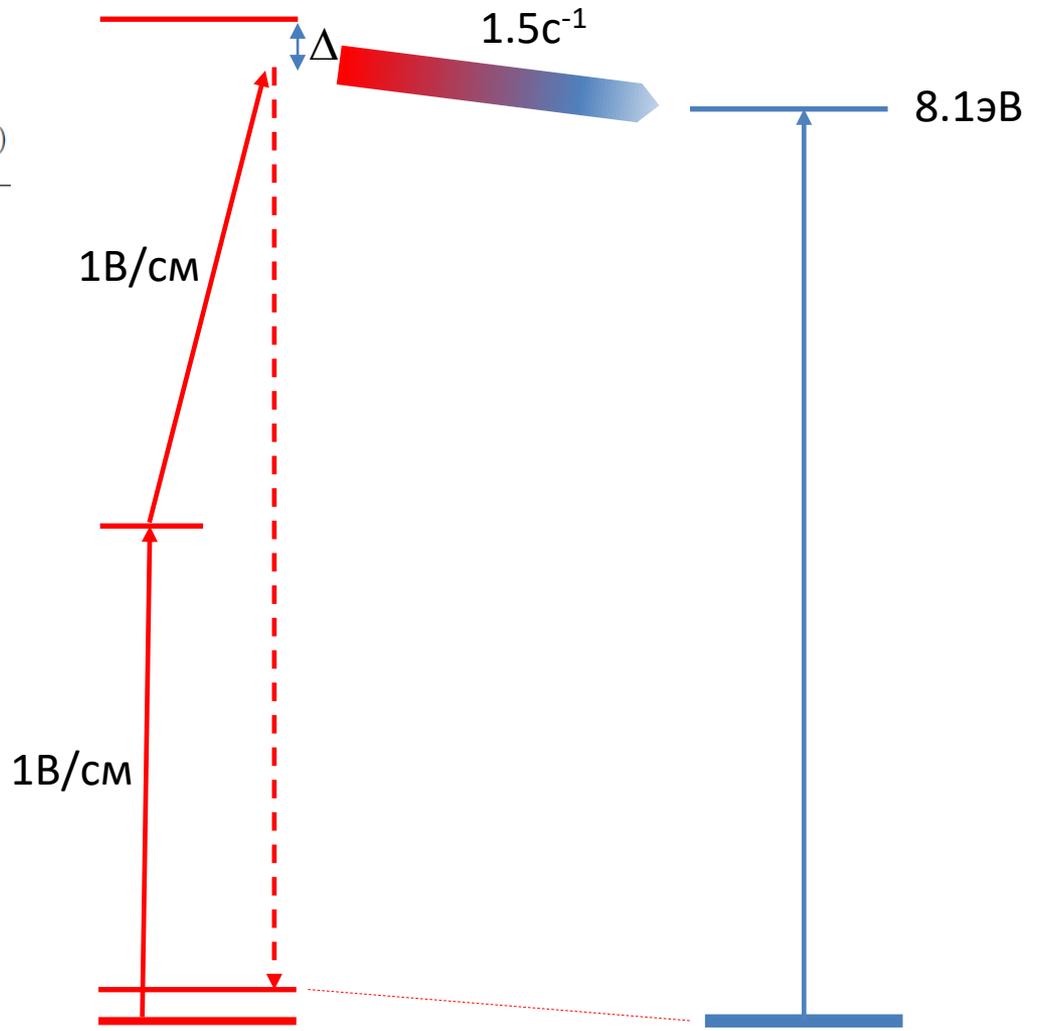


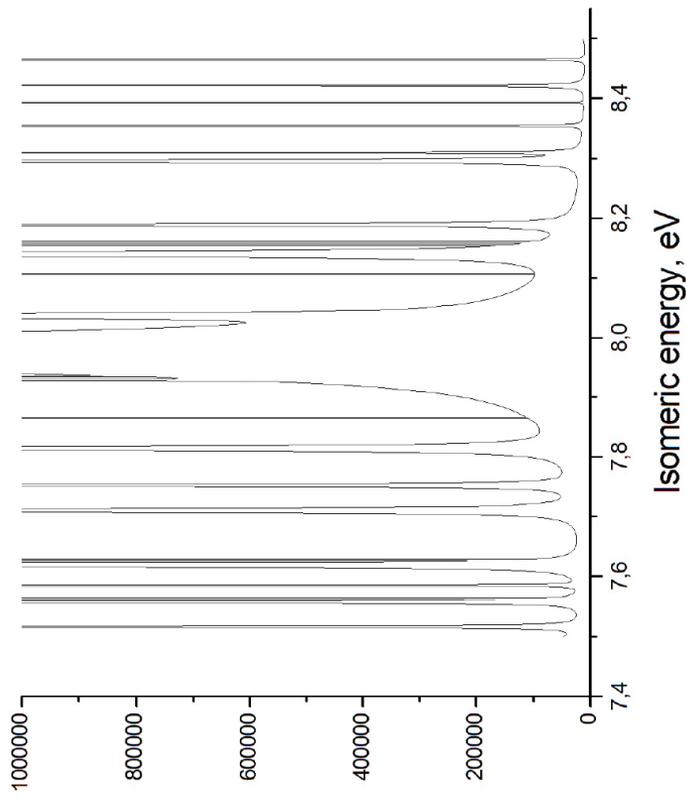
$E_m = 8.5 \text{ eV}$



P. Bilous, thesis 2020

$$f = \frac{(2I_2 + 1)(2j_2 + 1)}{9(2I_1 + 1)(2j_1 + 1)(2j_3 + 1)} \times \frac{\Gamma_\gamma^{(a)}(2 \rightarrow 1; \omega_1) \Gamma_\gamma^{(a)}(3 \rightarrow 2; \omega_2) \alpha_d \Gamma_\gamma^{(n)}}{\Gamma_t^{(2)} \Delta^2 + (\Gamma_t^{(3)}/2)^2} \frac{1}{2\pi} \times P_1(\omega_1) S_1(\omega_1) P_2(\omega_2) S_2(\omega_2),$$



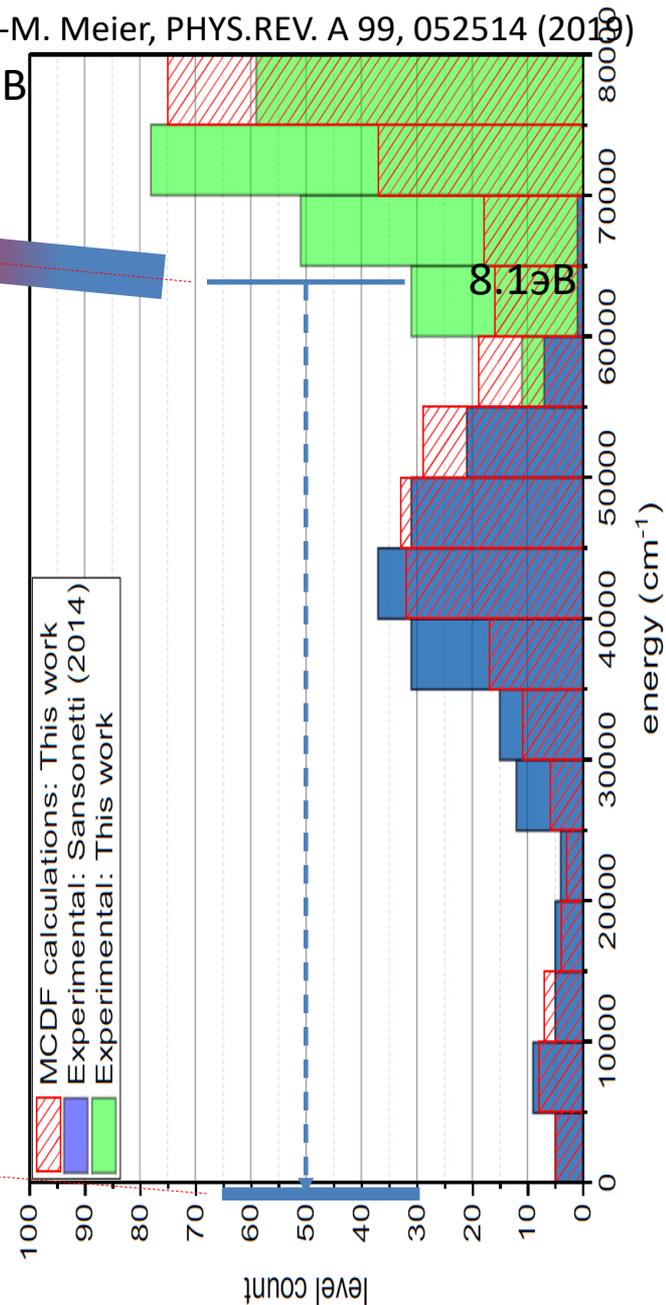
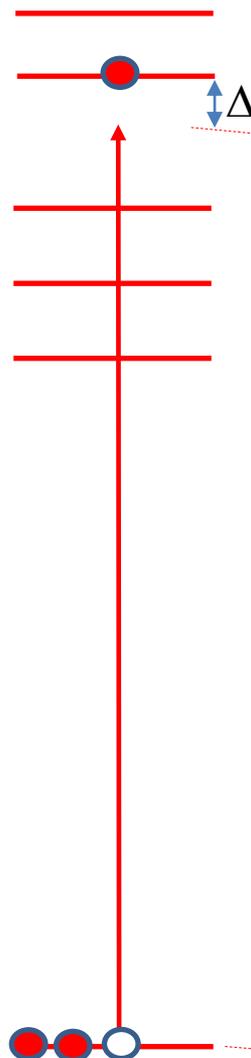


$$R = 10^4 - 10^{14}$$

$$R = \sum_i \frac{\alpha_d^{(i)}(M1)\Gamma_t^{(i)}/2\pi}{(\Delta^{(i)})^2 + (\Gamma_t^{(i)}/2)^2}$$

If $\Delta=0$; $R = \frac{\alpha^i}{2\pi\Gamma_t^i}$; $\alpha^i \sim 10^8 eV$
 $\Gamma_t^i \sim 10^{-7} eV$
 $R \sim 10^{14}$

Th⁺ ~50 Уровней на эВ



Подстройка атомной оболочки

Выбор начальной конфигурации, параметры среды, магнитное и электрическое поля, молекулы, примесные уровни. /Карпешин ЭЧАЯ т37(2)/

Выбор начальной конфигурации

Th⁺ метастабильные состояния

[9/2], $6d^27s$ 0.77eV, 10^4 s;

[7/2], $6d^27s$, 0.5eV;

[5/2], $6d^27s$, 0.19eV;

[15/2] $5f 6d^2$ 3.75eV , 0.4 s;

Заселение

- Лазерная накачка
- При перезарядке
- Столкновения

Collisional quenching $6d^27s$ 1521 5/2 in Th⁺
63(3) s⁻¹Pa⁻¹ (Oscar-Andrey Herrera-Sancho PhD thesis 2012)

Подстройка атомной оболочки

параметры среды (давление, температура)
магнитное и электрическое поля

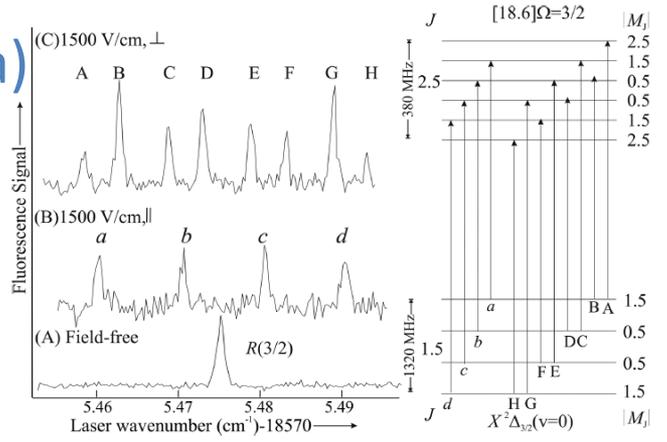
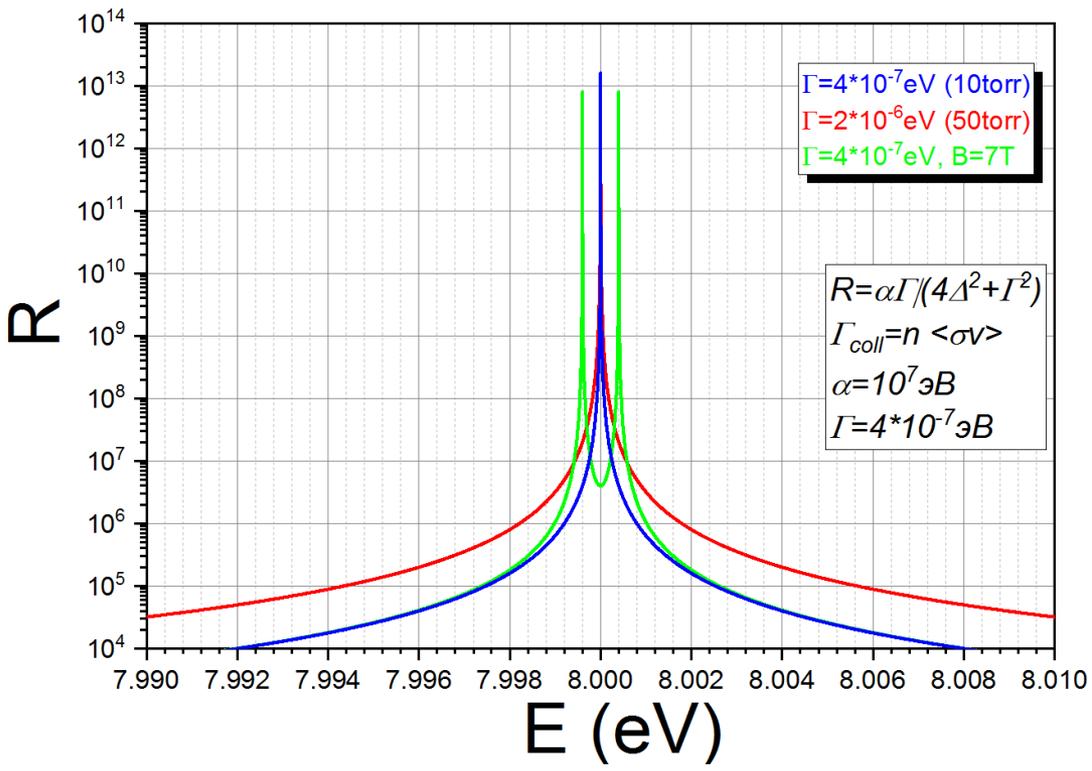
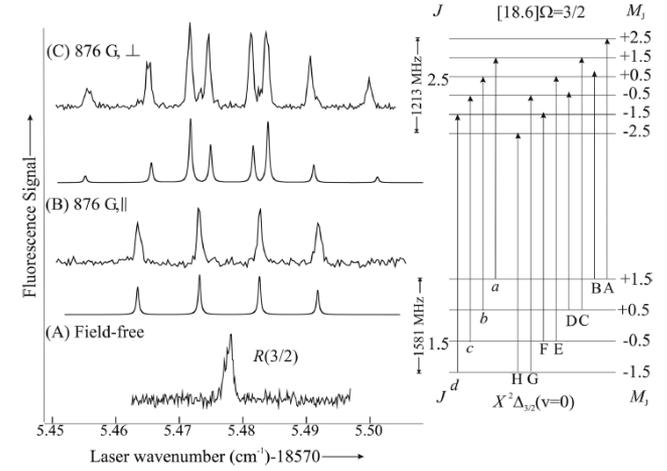
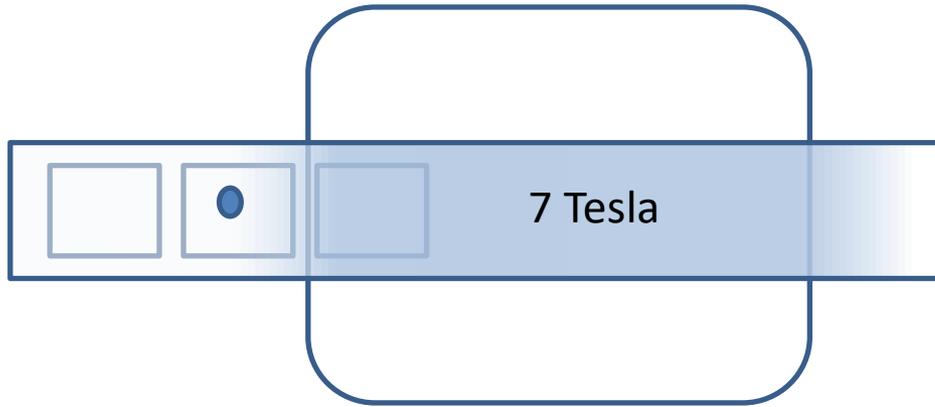


Figure 4. R(3/2) ($\nu = 18\,575.4762\text{ cm}^{-1}$) line of the $[18.6]\Omega = 3/2 - X^2\Delta_{3/2}(v',0)$ band of ThF recorded field-free and in the presence of a 1500 V/cm electric field with parallel ($\Delta M_J = 0$) and perpendicular ($\Delta M_J = \pm 1$) polarizations. Also shown are the energy level pattern and assignment.



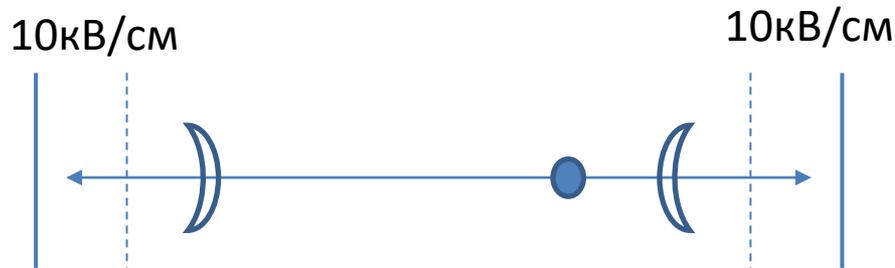
J. Phys. Chem. A 2019, 123, 1423–1433
Optical Stark and Zeeman Spectroscopy of Thorium Fluoride (ThF) and Thorium Chloride (ThCl)

Подстройка атомной оболочки

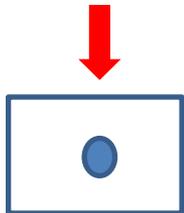


Эффект Зеемана

$$\Delta E = g_L \mu_B m_j B; \mu_B = 58 \text{ [}\mu\text{eV/T]}$$



Статический эффект Штарка

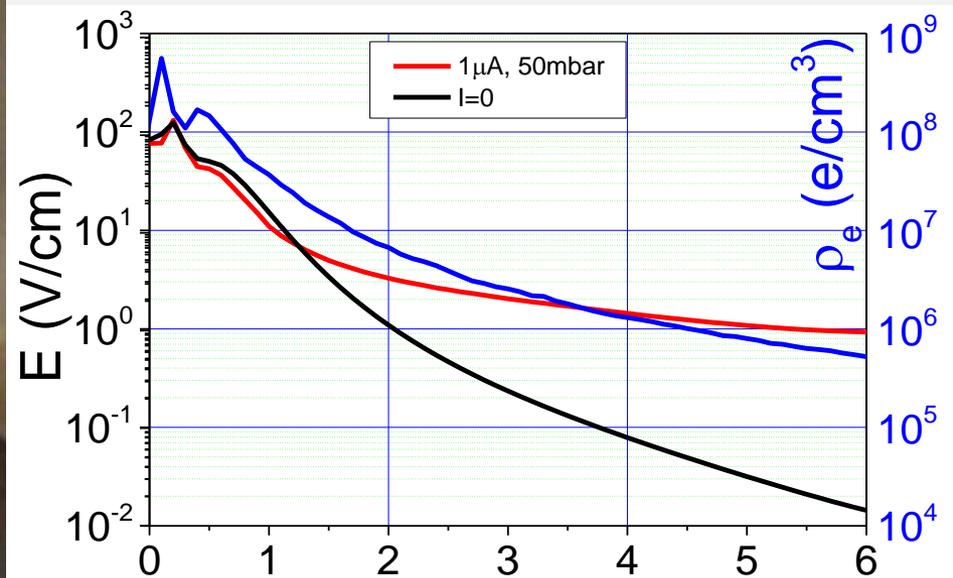
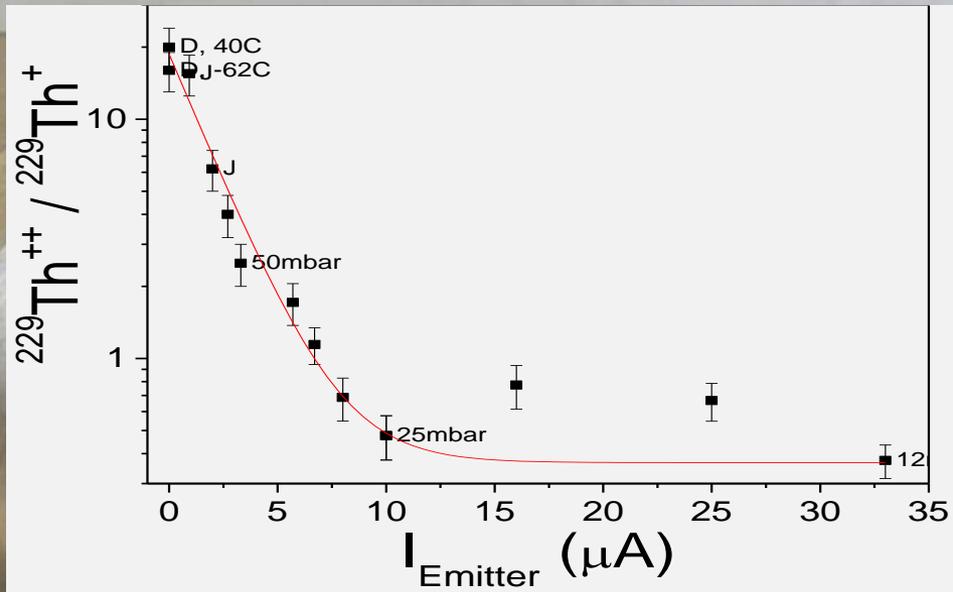
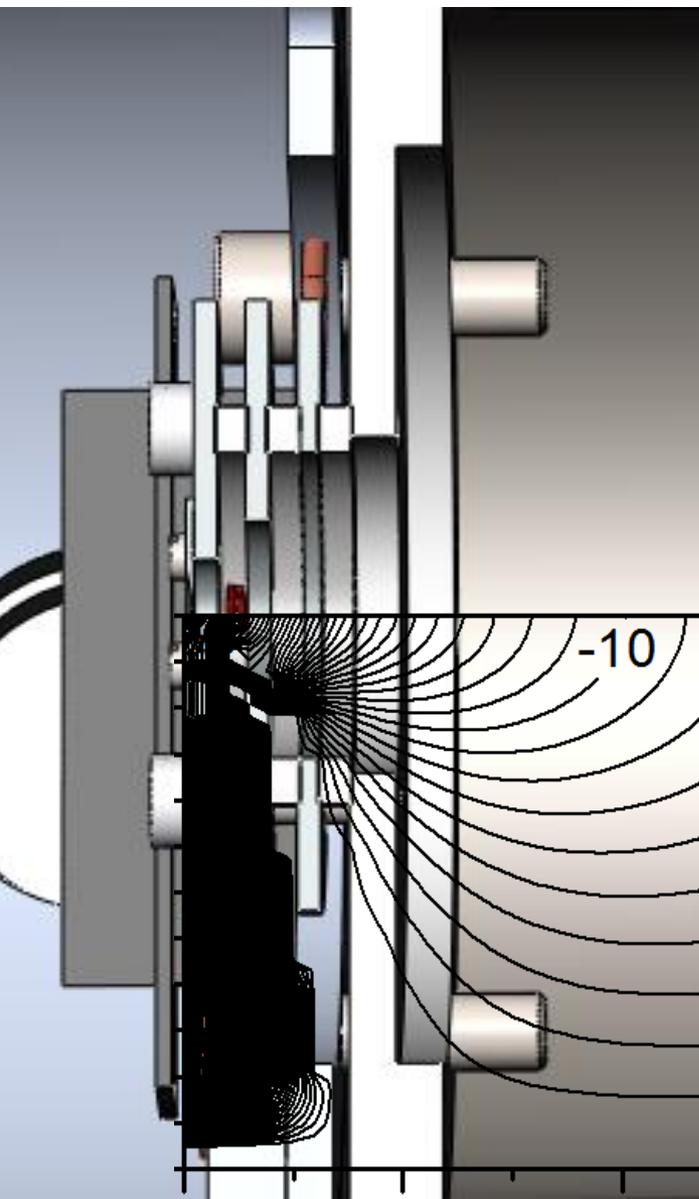


Laser-assisted BIC (1V/cm, 10³)

F.F.Karpeshin I.M. Band, M.B. Trzhaskowskaya.

Phys.Lett.B 282 (1992) 267-270

Генерация ионов Th^+



Counts (^{215}Po) / 100s

$T_{1/2} (^{215}\text{Po}) = 1.8\text{ms}$

1000

100

0

50

100

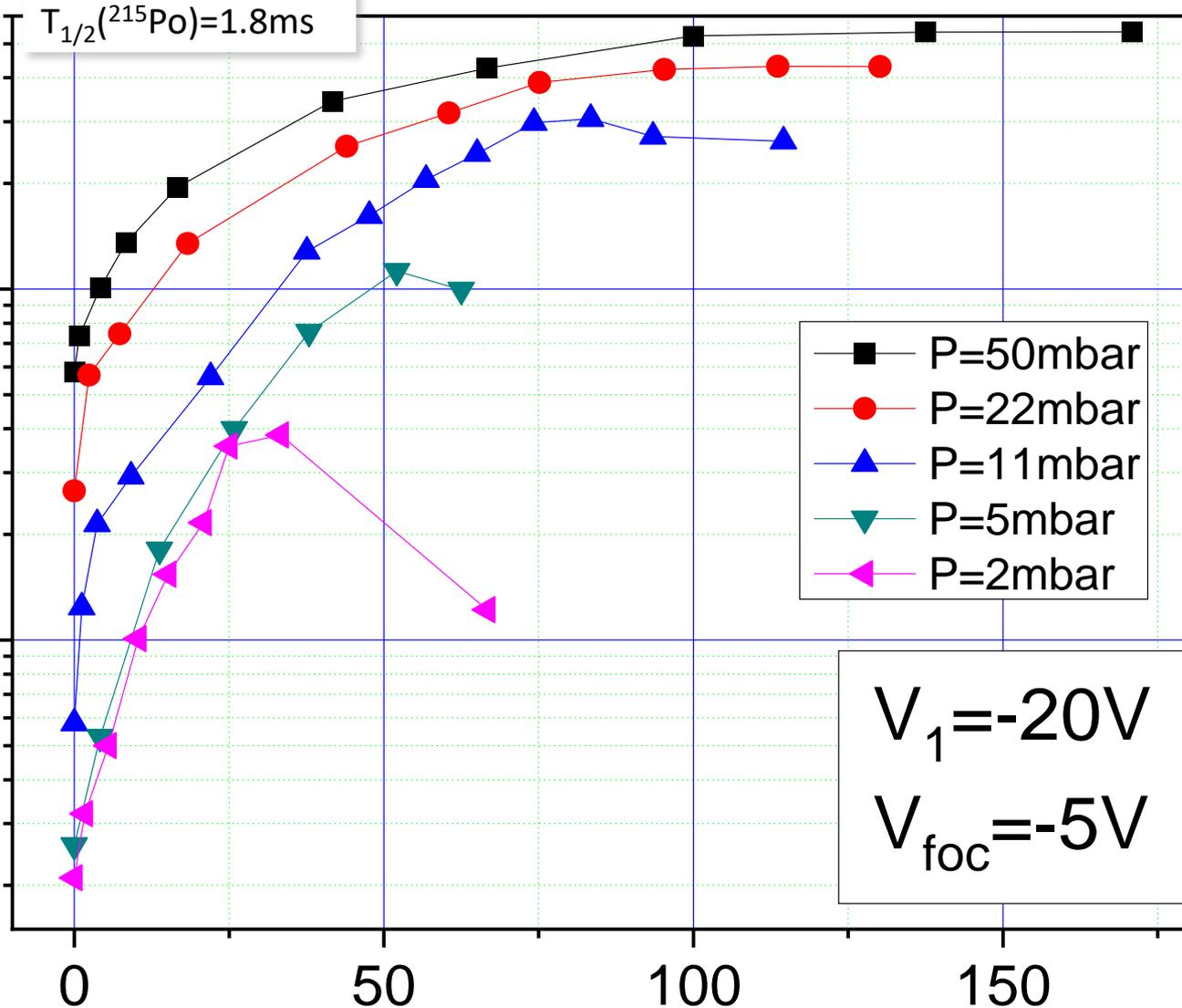
150

$P * I_{\text{emitter}}$ (mbar * μA)

- P=50mbar
- P=22mbar
- ▲ P=11mbar
- ▼ P=5mbar
- ◄ P=2mbar

$V_1 = -20\text{V}$

$V_{\text{foc}} = -5\text{V}$

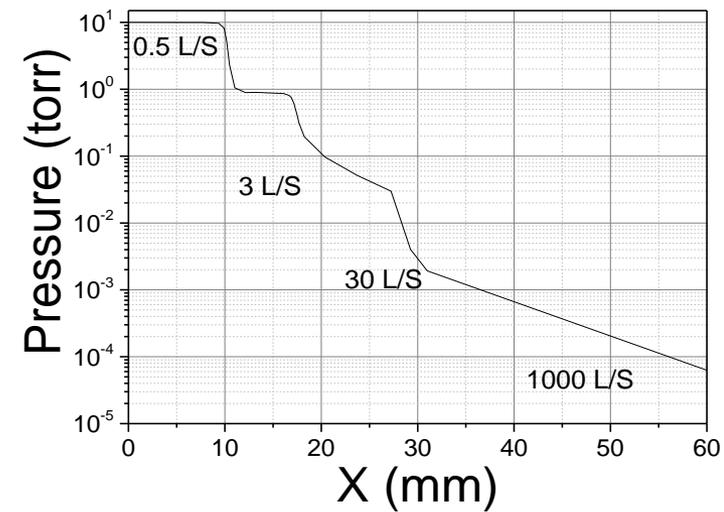
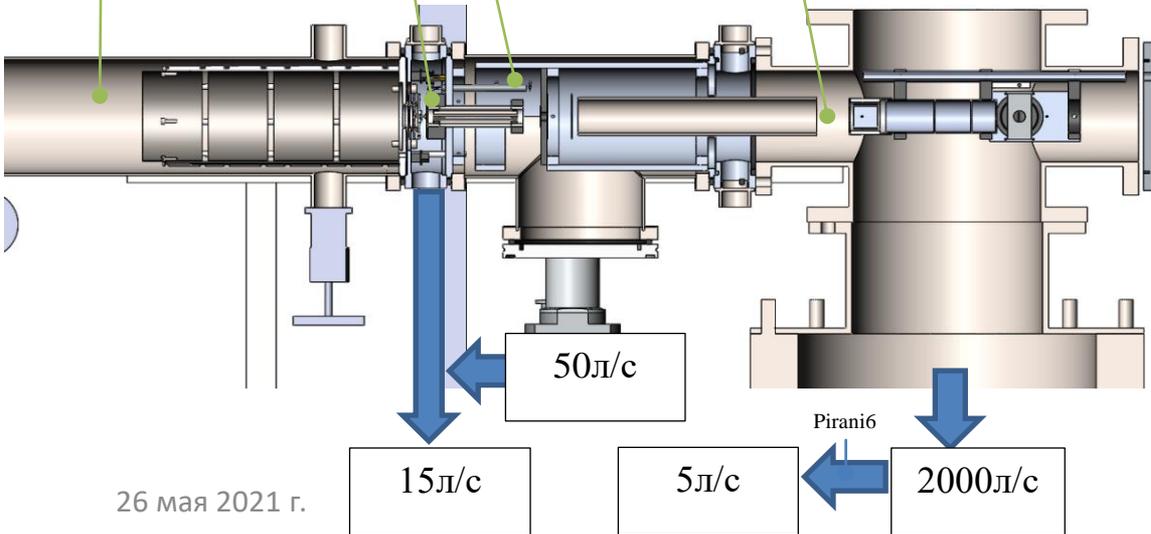
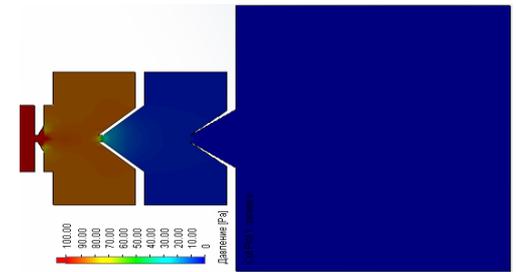
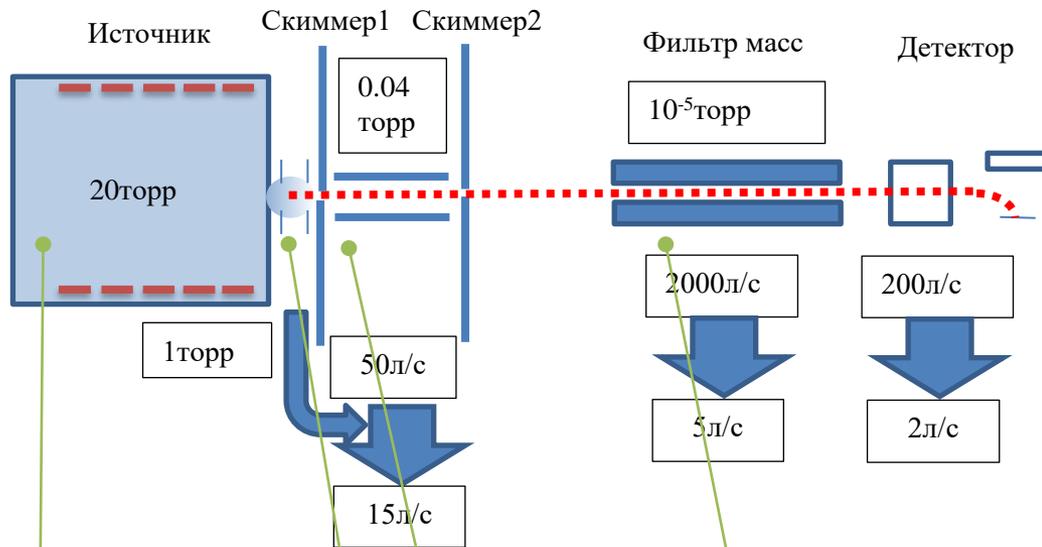


Генератор ионов тория

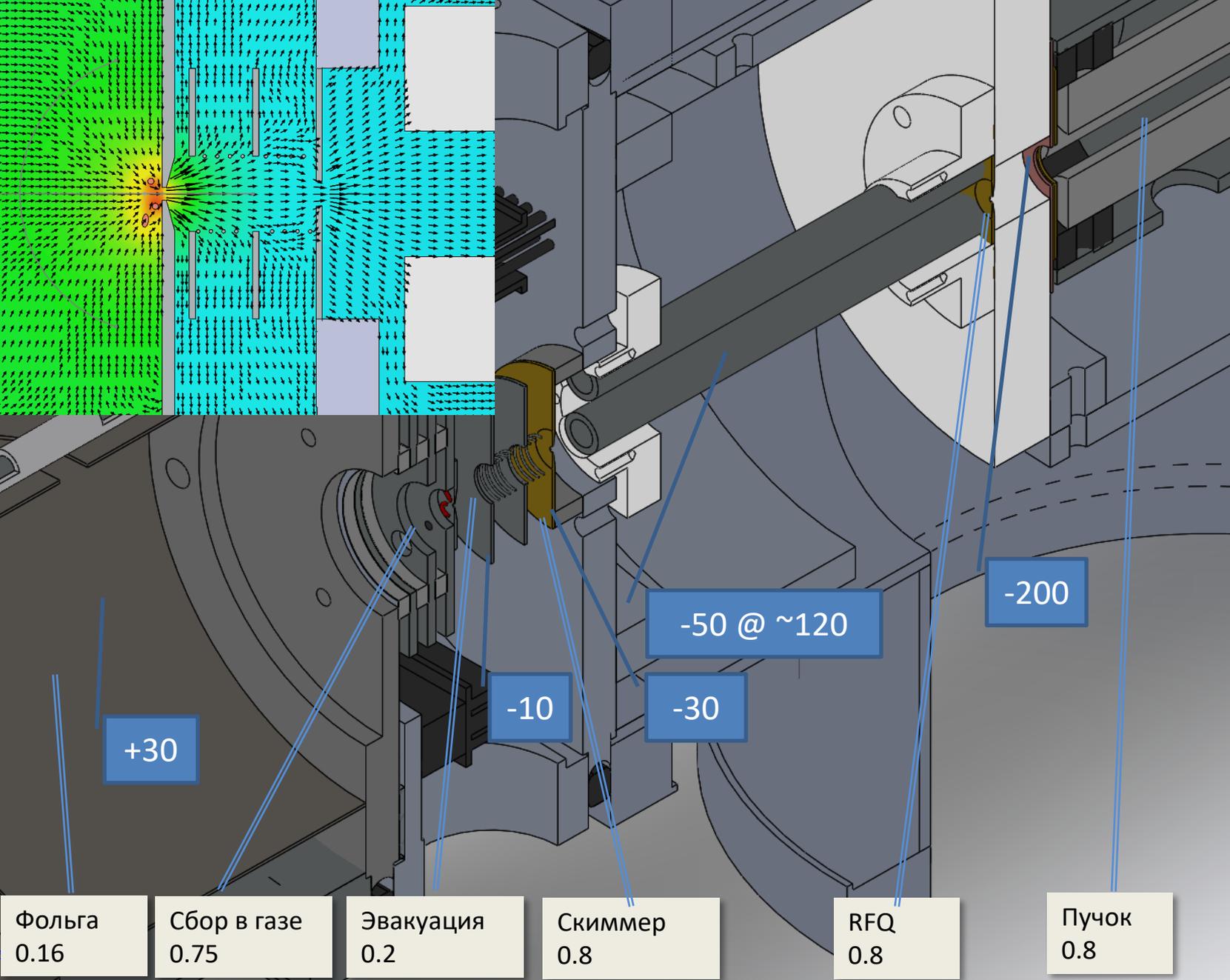


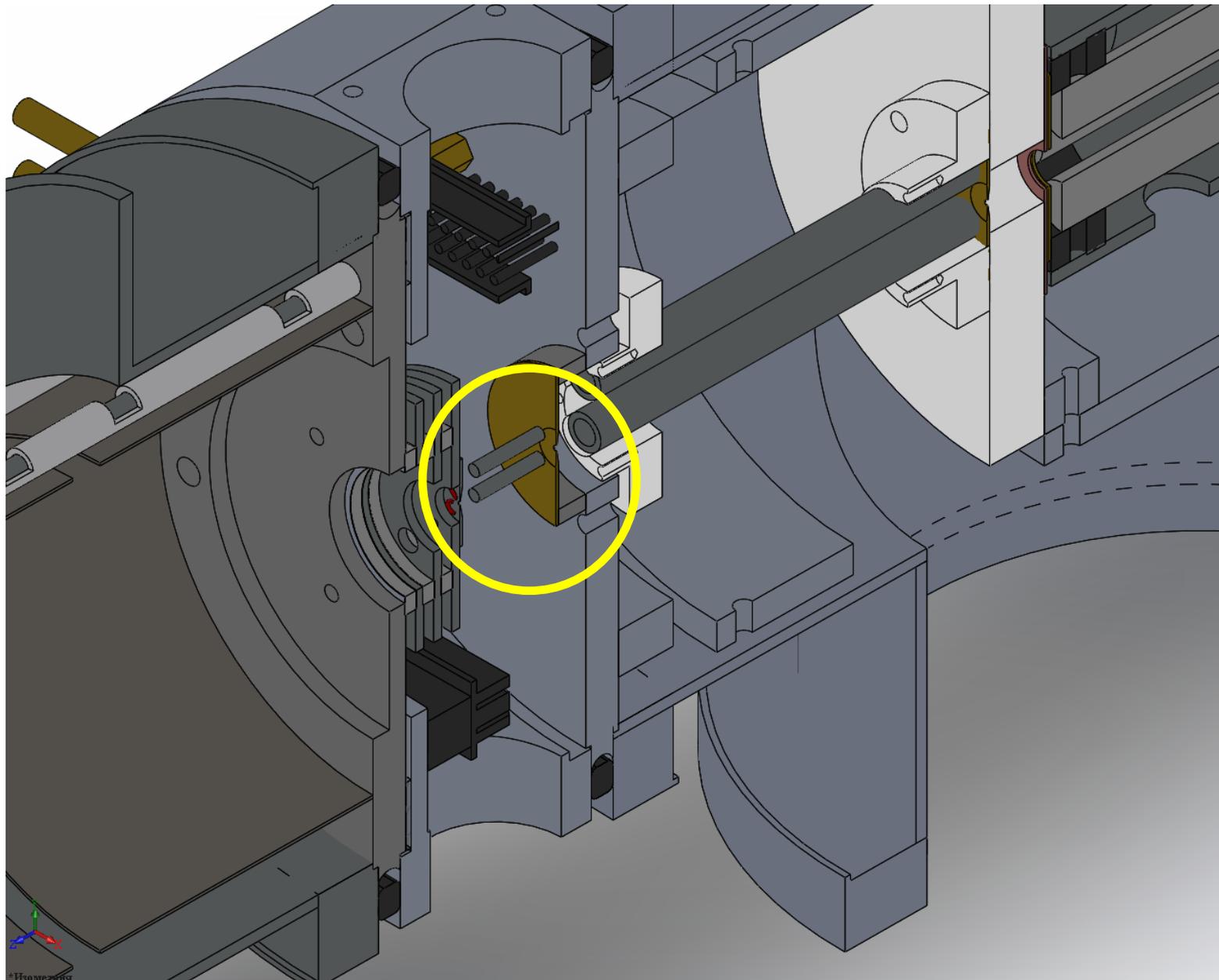
Генератор ионов тория

Вакуумная схема



26 мая 2021 г.





Заключение

Цели на первом этапе

- Время жизни изомера в однозарядном ионе.
- Зависимость времени жизни изомера от давления и температуры.
- Наличие временных компонент распада.
- Время жизни изомера в молекулярных ионах (ThF, ThCl).

Реализация этих целей определит возможность использования времени жизни изомера в качестве наблюдаемой при подстройке атомной оболочки подбором конфигурации или наложением внешних полей.

Это может значительно увеличить вероятность заселения изомера лазерным излучением.

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, быстрая эвакуация новообразованных ионов.**

На первом этапе

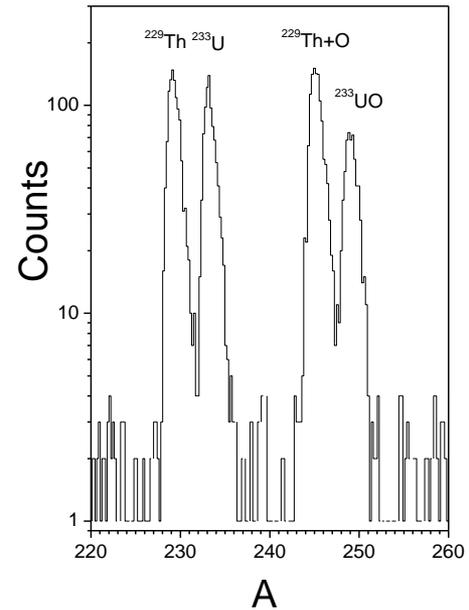
- Время жизни изомера в однозарядном ионе.
- Зависимость времени жизни изомера от давления и температуры.
- Наличие временных компонент распада.
- Время жизни изомера в молекулярных ионах (ThF, ThCl).

	^{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

Пучок ионов ^{229}Th в JYFL (2007)

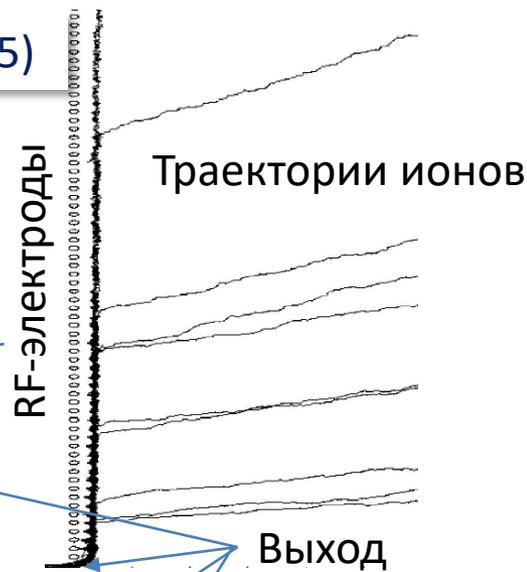
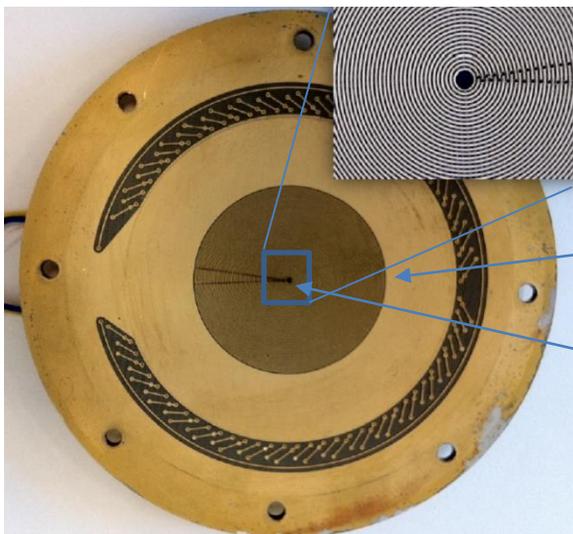


0,4%, -40°C



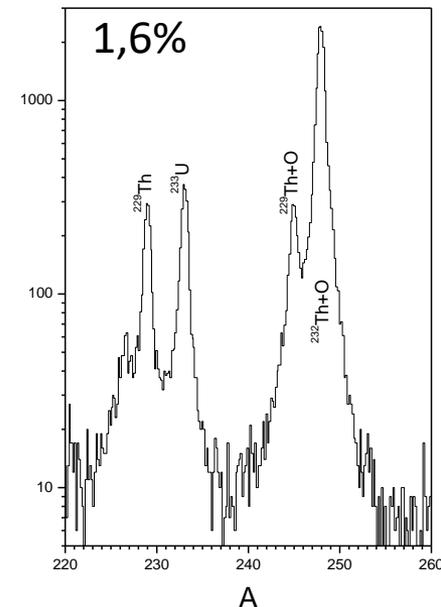
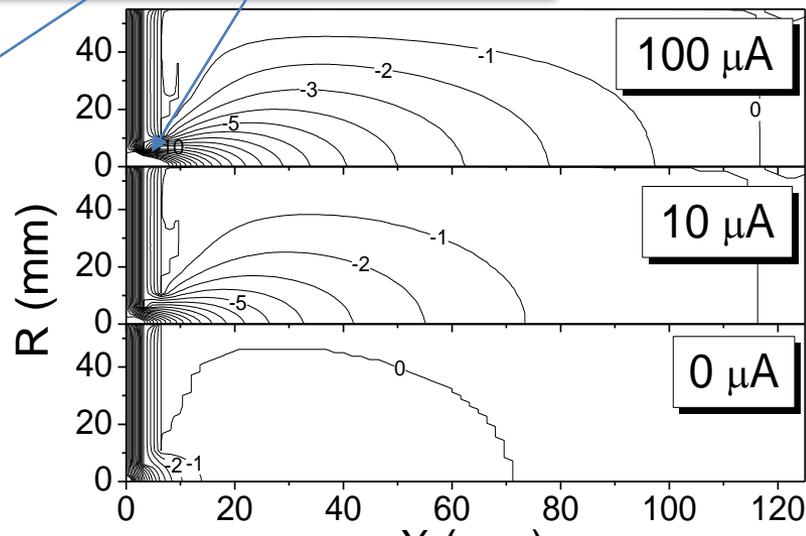
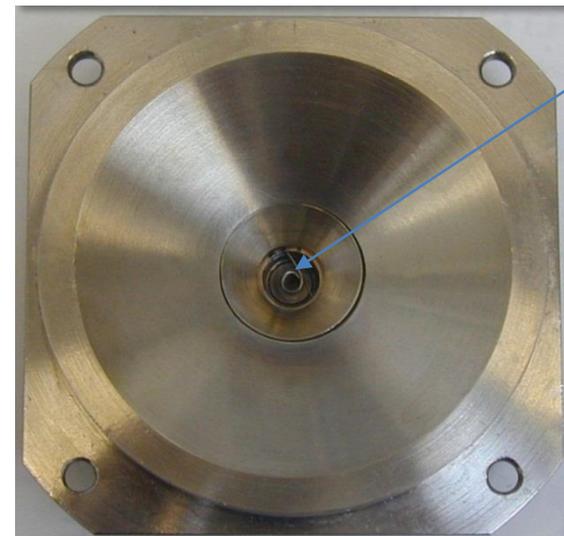
Эвакуация ионов из газовой ячейки

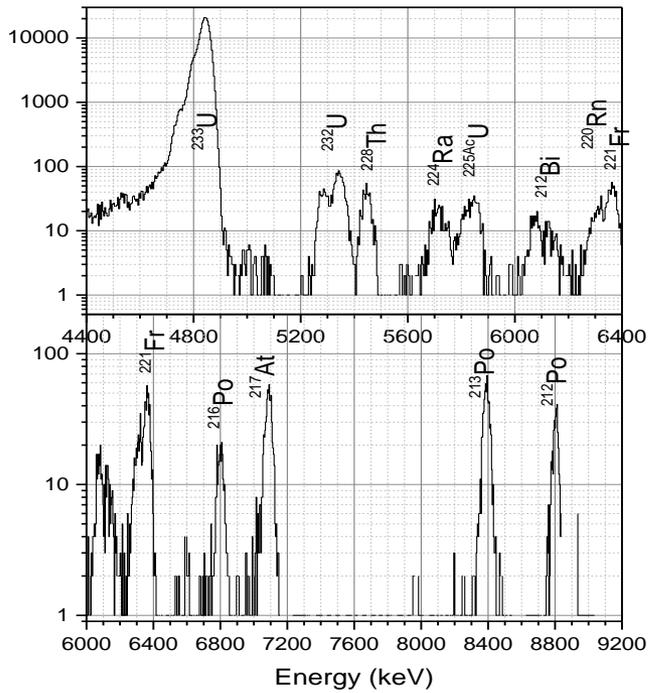
RF- транспорт (JYFL, T. Sonoda, 2005)



Транспорт с инжекцией электронов (JYFL, PNPI 2002)

Поле в ячейке





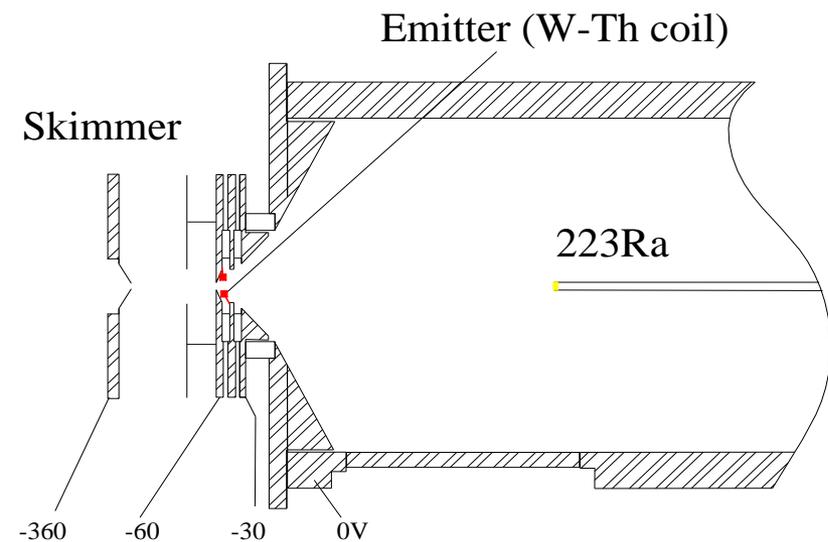
						U230 20.8 d 0+	U231 4.2 d (5/2-)	U232 68.9 y 0+	U233 1.592E+5 5/2+
Pa224 0.79 s α	Pa225 1.7 s α	Pa226 1.8 m EC, α	Pa227 38.3 m (5/2-) EC, α	Pa228 22 h 3+ EC, α	Pa229 1.50 d (5/2+) EC, α	Pa230 17.4 d (2-) EC, β , α ,...	Pa231 32760 y 3/2- β , α	Pa232 1.31 d (2-) EC, β	
Th223 0.60 s (5/2)+ α	Th224 1.05 s 0+ EC, α	Th225 8.72 m (3/2)+ α	Th226 30.57 m 0+ α	Th227 18.72 d (1/2)+ α	Th228 1.9116 y 0+ α	Th229 7340 y 5/2+ α			
Ac222 5.0 s 1- α , β	Ac223 2.10 m (5/2-) EC, α	Ac224 2.78 h 0- EC, β , α ,...	Ac225 10.0 d (3/2-) α	Ac226 29.37 h (1) EC, β , α ,...	Ac227 21.77 y 3/2- β	Ac228 6.15 h 3+ β			
Ra221 28 s 5/2+ α , ^{14}C	Ra222 38.0 s 0+ α , ^{14}C	Ra223 11.43 s 3/2+ α , ^{14}C	Ra224 3.66 d 0+ α , ^{14}C	Ra225 14.9 d 1/2+ α , ^{14}C	Ra226 1600 y 0+ α , ^{14}C	Ra227 42.2 m 3/2+ β			
Fr220 27.4 s 1+ β , α	Fr221 4.9 m 5/2- β	Fr222 14.2 m 2- β							

Rn215 2.30 Us 9/2+ α	Rn216 45 Us 0+ α	Rn217 0.54 ms 9/2+ α	Rn218 35 ms 0+ α	Rn219 3.96 s 5/2+ β , α	Rn220 55.6 s 0+ α	Rn221 25 m 7/2(+) β , α
At214 558 ns 1- α	At215 0.10 ms 9/2- α	At216 0.30 ms 1- EC, β , α ,...	At217 32.3 ms 9/2- β , α	At218 1.5 s β , α	At219 56 s β , α	At220 3.71 m 3 β , α
Po213 4.2 Us 9/2+ α	Po214 164.3 Us 0+ α	Po215 1.78 ms 9/2+ β , α	Po216 0.145 s 0+ α	Po217 10 s β , α	Po218 3.10 m 0+ β , α	
Bi212 60.55 m 1(-) α , β , α ,...	Bi213 45.59 m 9/2- β , α	Bi214 19.9 m 1- β	Bi215 7.6 m β	Bi216 3.6 m (1-) β		

Эффективность вылета
16%

134

Газовая ячейка с электродами и электронным эмиттером



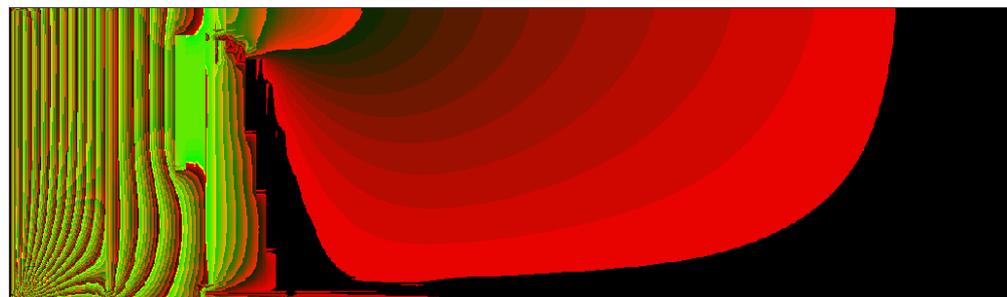
Без объемного заряда



Особенности:

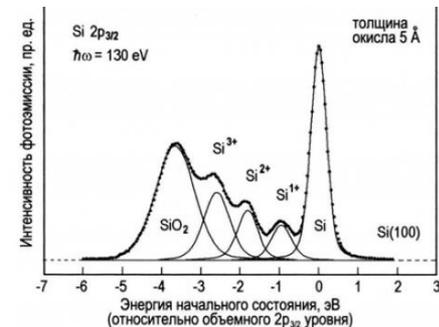
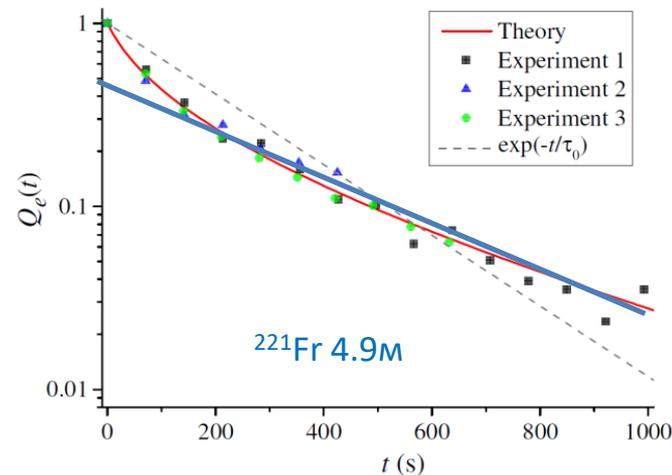
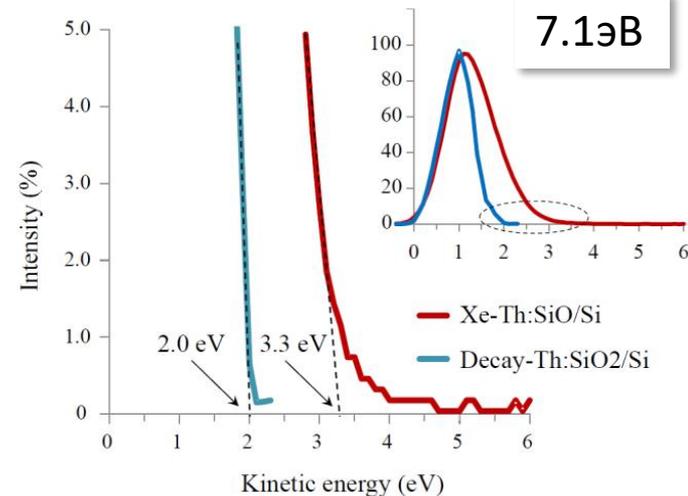
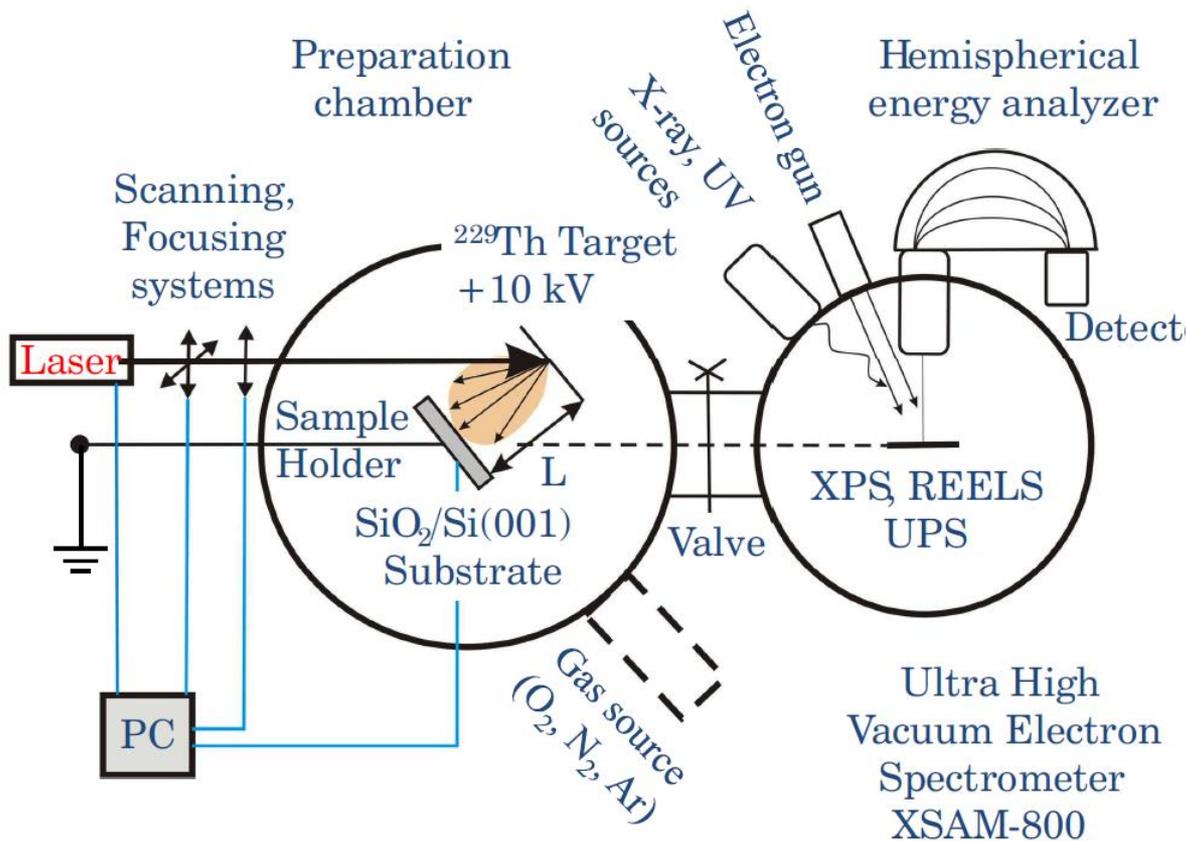
- Поле генерируется объемным зарядом
- Поле более однородно
- Поле не экранируется в слабой плазме

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



Эксперимент МИФИ

arXiv:1804.00299v1



Наблюдалось заселение изомера

Измерена энергия изомера

Парциальное время жизни гамма распада изменяется в среде

1 Апреля?

EU grant (DE, AT, US) € 13 789 990, 2020-2026

«Thorium nuclear clocks for fundamental tests of physics»

<https://cordis.europa.eu/project/id/856415>

МИФИ, 2013

«Разработка метода первичного и вторичного лазерного охлаждения ионов тория для создания физических основ прецизионного стандарта частоты нового поколения на ядерном изомерном переходе в изотопе тория-229»

Бюджетные средства 39,6 млн, внебюджетные средства 4,4 млн

[Экспир, экспертиза 481](#)

МИФИ, 2018

РНФ 19-72-30014, 2019-2022. $30+28+26+24+\dots=108+\dots$ млн.р.

«Разработка стандарта времени и частоты на базе уникального оптического перехода в ядре тория-229»

<https://poisknews.ru/skript/49702/>