

Докладчик:

Доцент каф.78 НИЯУ МИФИ

Борисюк Пётр

20.12.2016

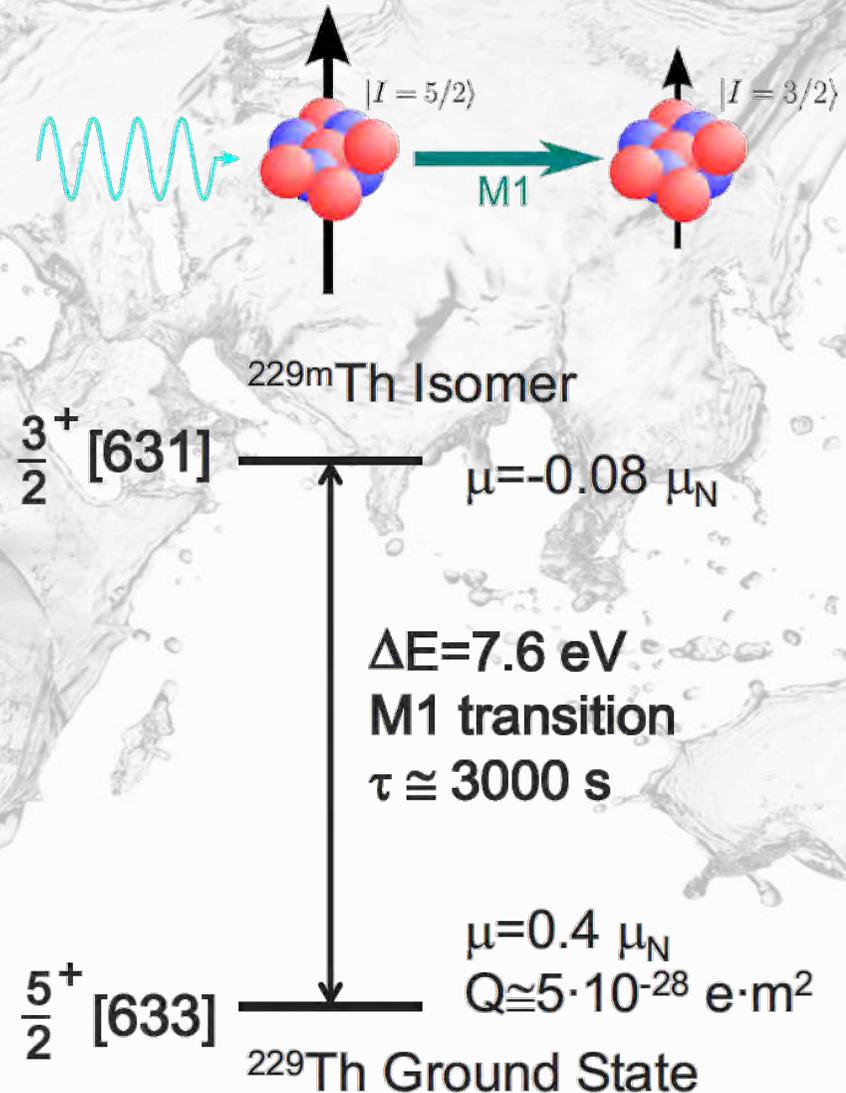


Экспериментальные исследования с ядрами тория

БОРИСЮК П.В., ВАСИЛЬЕВ О.С., ДЕРЕВЯШКИН С.П., КРАСАВИН А.В.,
ЛЕБЕДИНСКИЙ Ю.Ю., ПАЛЬЧИКОВ В.Г., ПОТЕШИН С.С., СЫСОЕВ А.А.,
ТКАЛЯ Е.В., ТРОЯН В.И., ЯКОВЛЕВ В.П.

Долгоживущее изомерное состояние в изотопе тория-229

- Уникальная система в ядерной физике: обладает изомерным состоянием с энергией возбуждения в оптическом диапазоне и в диапазоне электронных переходов внешних оболочек
- Энергия перехода **~ 7.6 эВ** (область вакуумного ультрафиолета)
- Длина волны **~ 160 нм**
- Переход доступен для исследования лазерной спектроскопией
- Время жизни изомерного состояния **~ 1 час**
- Экранирование ядра атомными электронами приводит к уменьшению чувствительности ядерного перехода к внешним возмущениям на несколько порядков



Предпосылки к решению задачи

2003 – Свойства перехода оптической энергии в ядре ^{229}Th

E.V. Tkalya // *Phys. Usp.* 46 315–320 (2003)

Skobel'tsyn Institute of Nuclear Physics, Россия

2003 – Идея создания «ядерных часов» на ионах ^{229}Th

E.Peik, C.Tamm // *Europhys.Lett.* 61 (2003) 181

PTB, Германия

2007 – Первое (косвенное) измерение энергии перехода методом гамма-спектроскопии 7.6 ± 0.5 эВ

B.R. Beck et al. // *PRL* 98 (2007) 142501 (уточнение в 2009)

Livermore, Los Alamos, NASA, США

2011 – Оптический кристалл из ионов Th^{3+} в ловушке Пауля, селективное лазерное возбуждение ^{232}Th и ^{229}Th

A.G. Radnaev et al. // *PRL* 106 (2011) 223001

Georgia Institute of Technology, США

2013 – Измерены электронные уровни Th^+ в диапазоне энергий от 7.3 эВ до 8.3 эВ

E. Peik, M. Okhapkin et al. // *PRA* 88 (2013) 012512

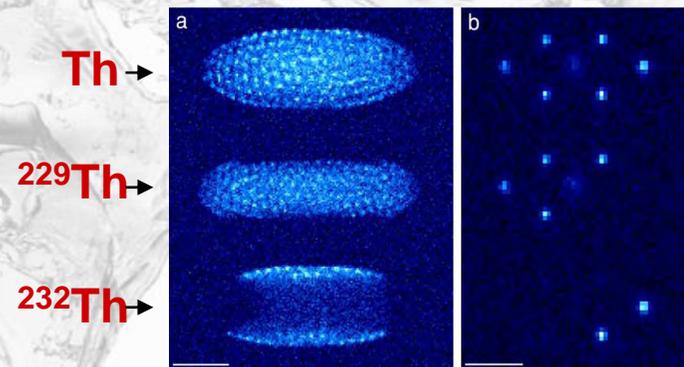
PTB, Германия

2016 – «Доказательство теоремы о существовании»

Peter G. Thirolf et al. // *Nature* 533 (2016) 47–51

До сих пор **нет** прямого точного измерения частоты оптического перехода!

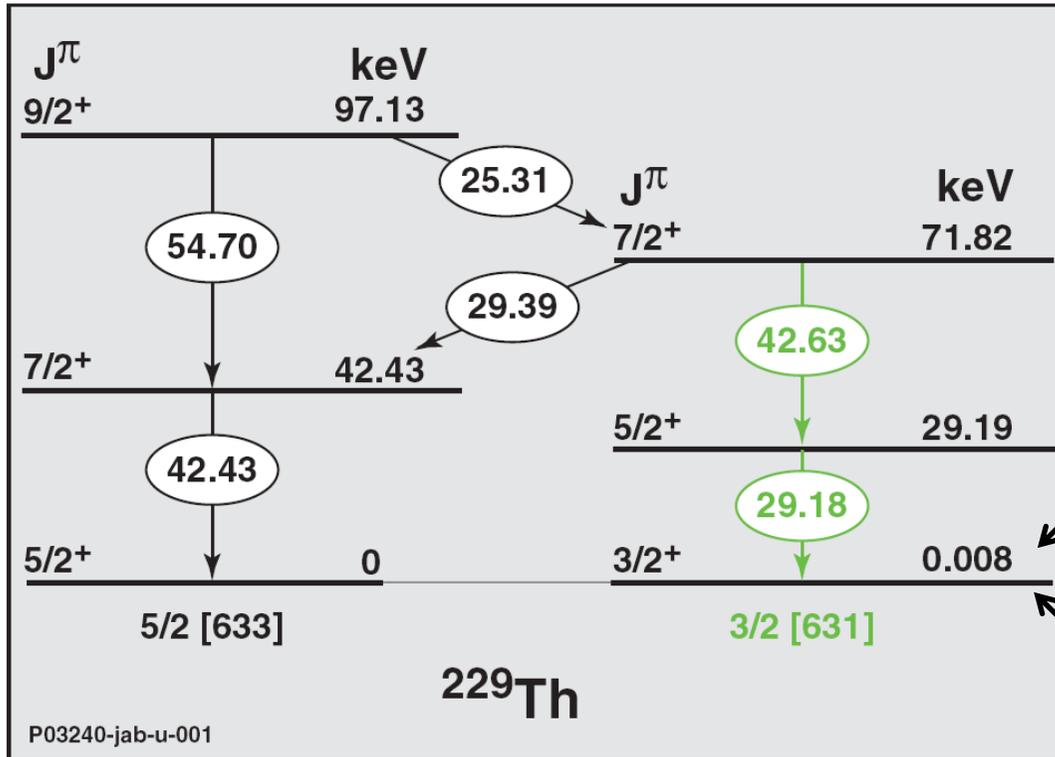
Вигнеровский кристалл



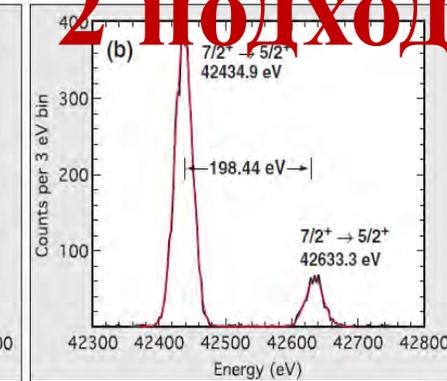
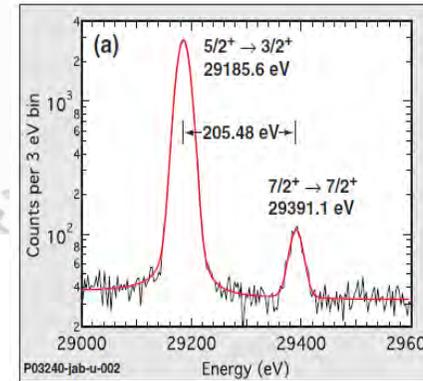
4 иона $^{229}\text{Th}^{3+}$ в ловушке

200 мкм

Nuclear transition ^{229}Th



Partial level scheme of ^{229}Th with E_γ in keV.



2 ПОДХОД

B. R. Beck *et al.*, *Phys. Rev. Lett.* **98**, 142501 (2007)

^{229}Th isomer level:

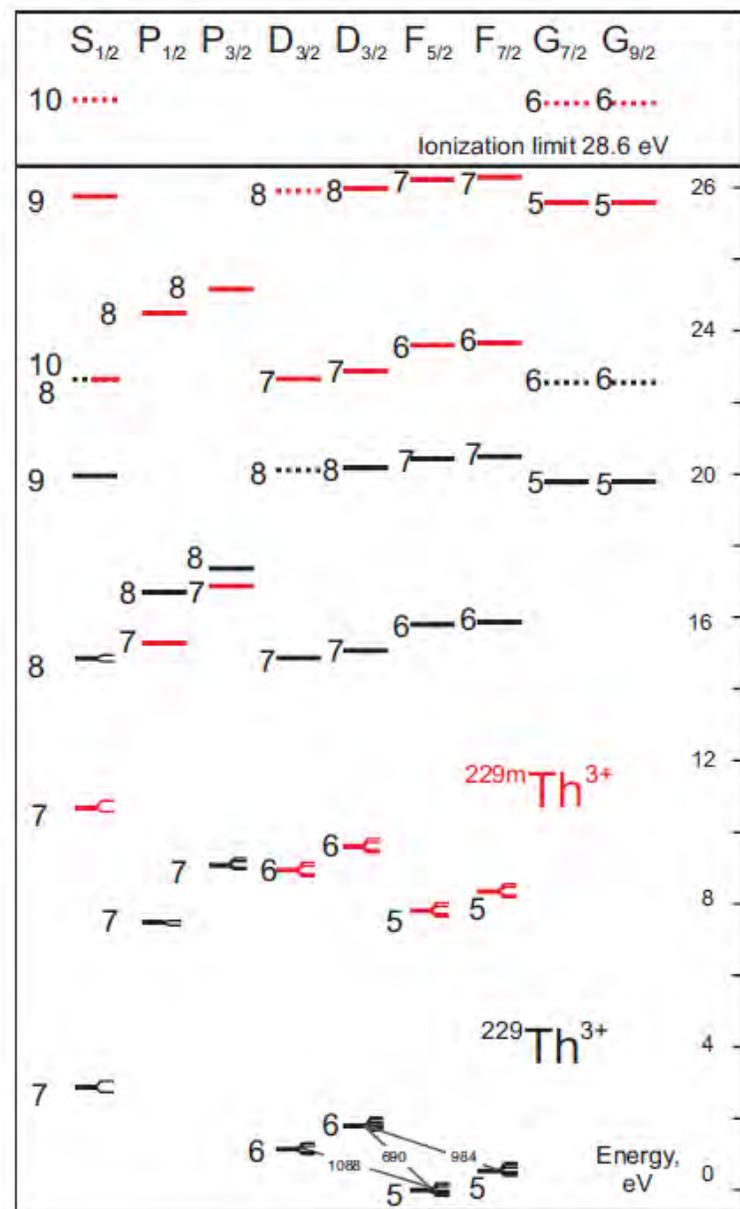
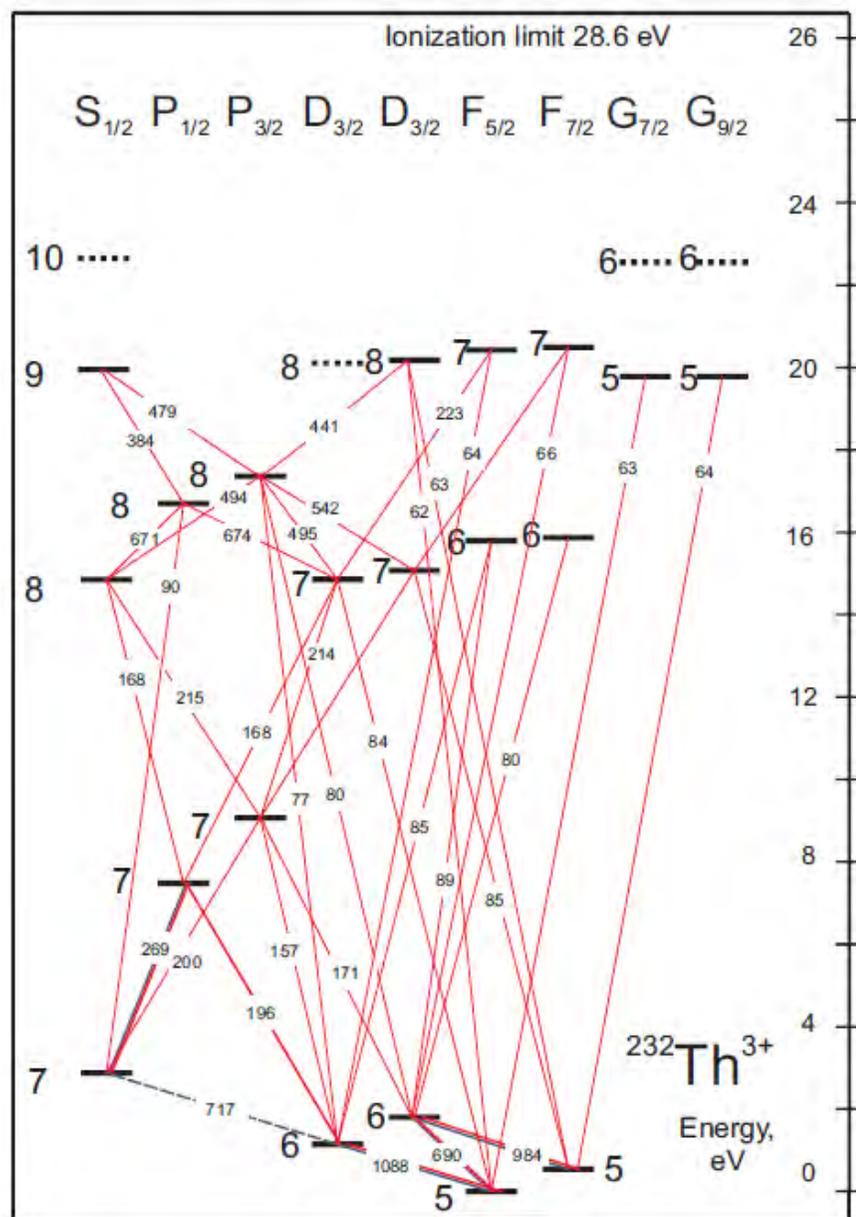
- 7.6(0.5) eV
- $10^3 - 10^5$ s lifetime

B. R. Beck *et al.*, *Proceedings Materials* **1**, 255-258 (2010)

^{229}Th isomer level

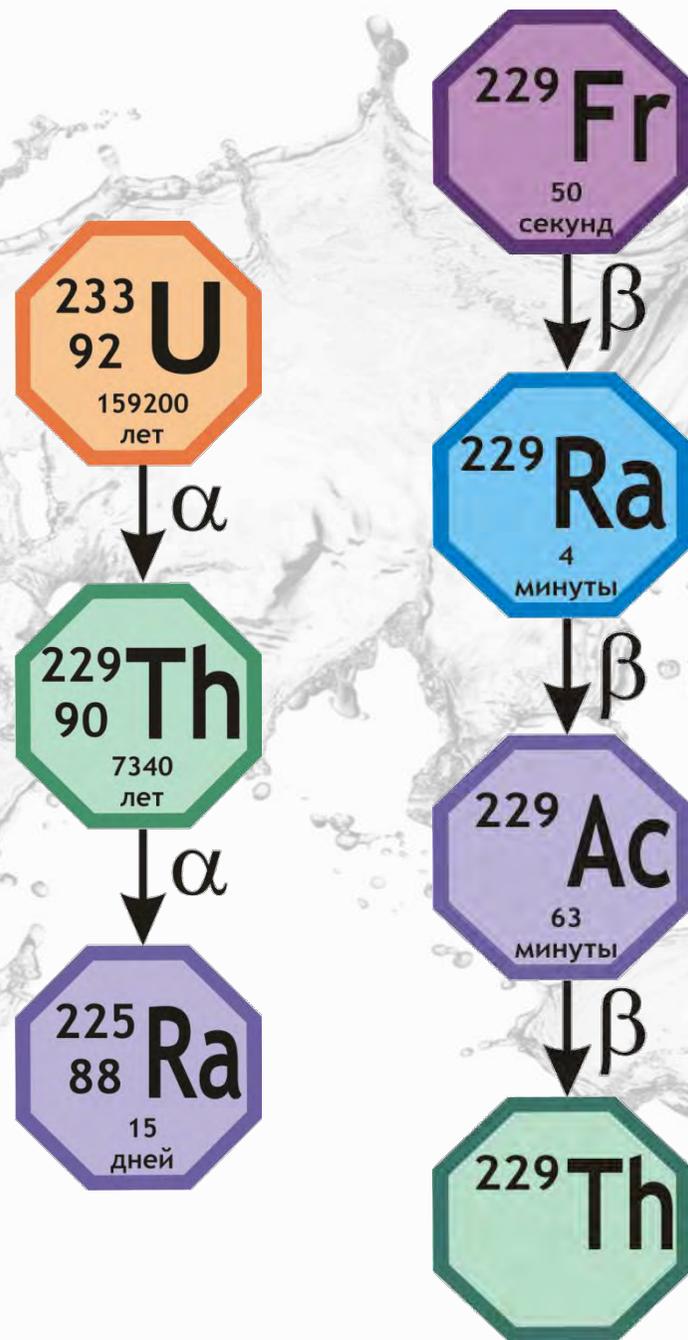
(improved result):

- 7.8(0.5) eV



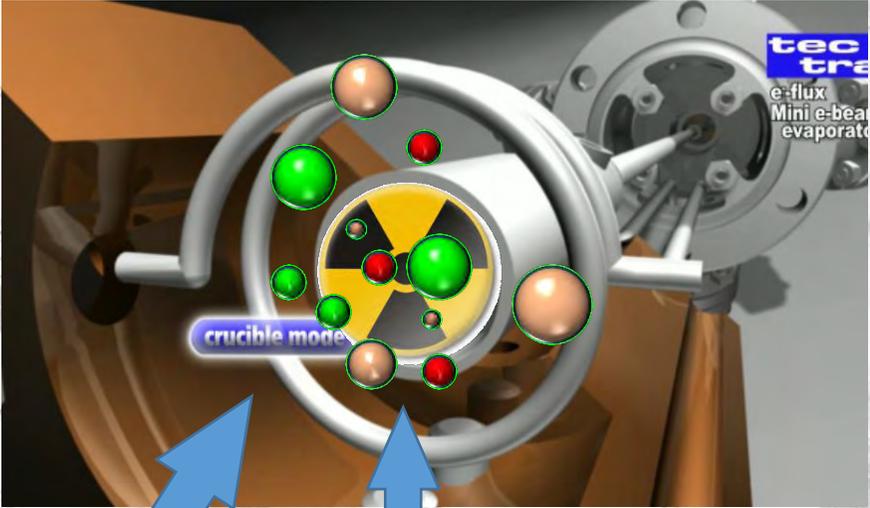
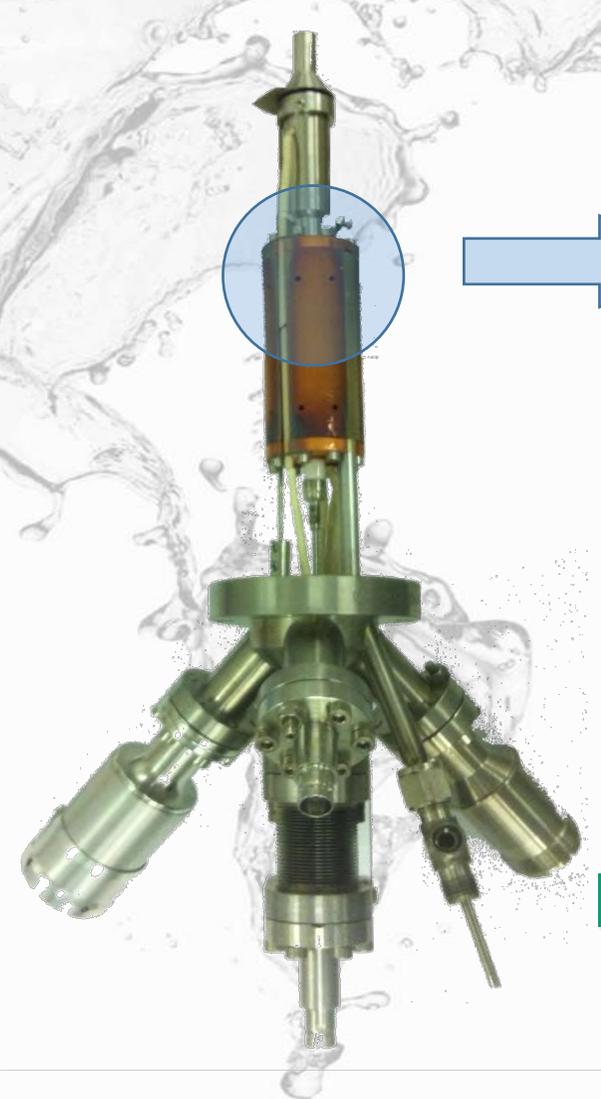
0. Получение ^{229}Th

- Является продуктом распада ^{233}U
- Может быть получен из изотопа ^{229}Fr
- Наиболее стабильные изотопы тория:
 - ^{232}Th ($t_{1/2} = 14.5$ млрд. лет)
 - ^{230}Th ($t_{1/2} = 75380$ лет)
 - **^{229}Th ($t_{1/2} = 7340$ лет)**
 - ^{228}Th ($t_{1/2} = 1.91$ года)



1. Получение ионов $^{229}\text{Th}^{n+}$

1 ПОДХОД



Катод
(W-Th)

Анод
(Th/C)

$I_{em} < 100 \text{ mA}$

$U_0 < 1 \text{ кВ}$

- Th^{3+} (green sphere)
- Th^{2+} (orange sphere)
- Th^{1+} (red sphere)



Исследование низколежащего изомерного перехода в ядрах изотопа тория-229

1 подход

1. Получение ионов $^{229}\text{Th}^{n+}$

2. Захват и удержание $^{229}\text{Th}^{n+}$

3. Лазерное охлаждение

4. Возбуждение и регистрация часового перехода



ЧЯС

2 подход

1. Синтез широкополосных диэлектрических кристаллов с $^{229}\text{Th}^{n+}$

2. Уточнение энергии перехода с помощью СИ в УФ диапазоне

3. Возбуждение и регистрация часового перехода

2. Захват и удержание $^{229}\text{Th}^{n+}$

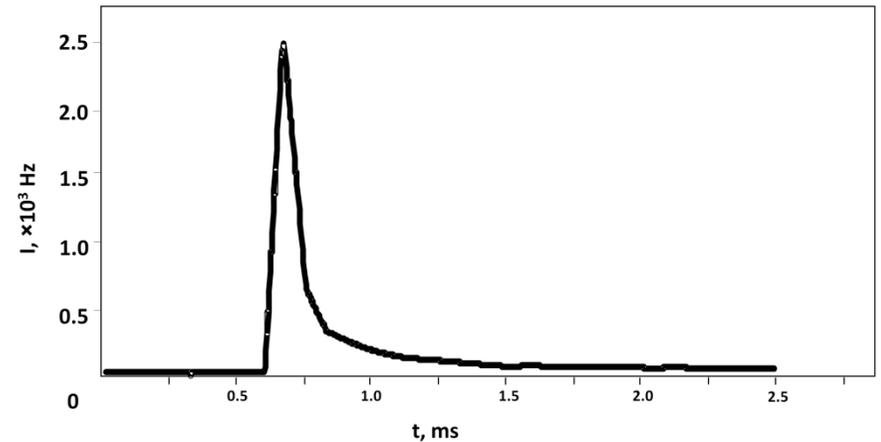
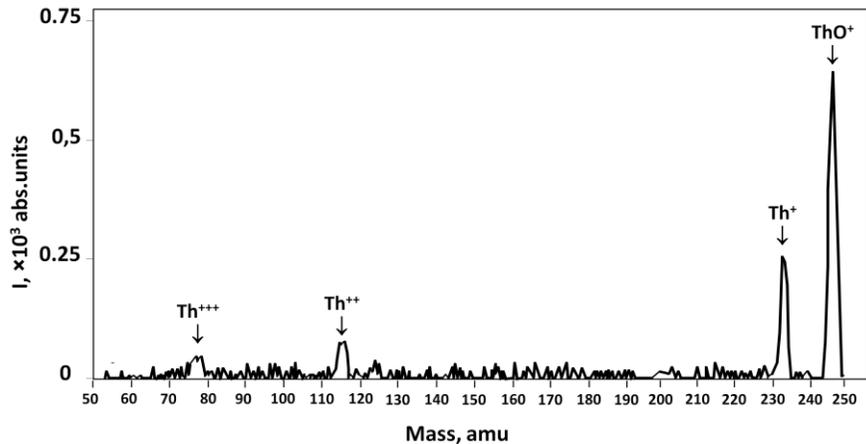
1 подход



1. Получение ионов



2. Захват и удержание

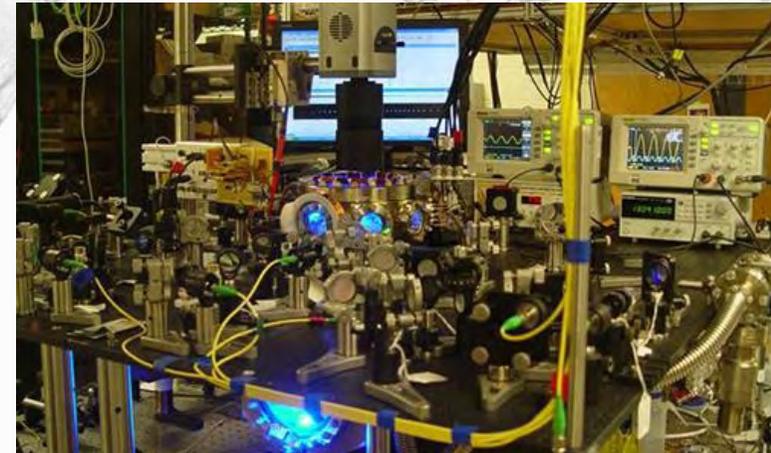
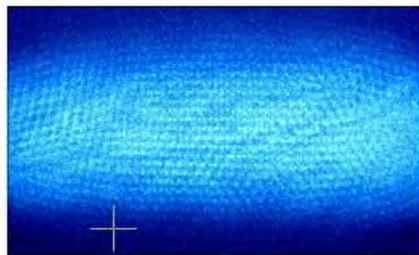
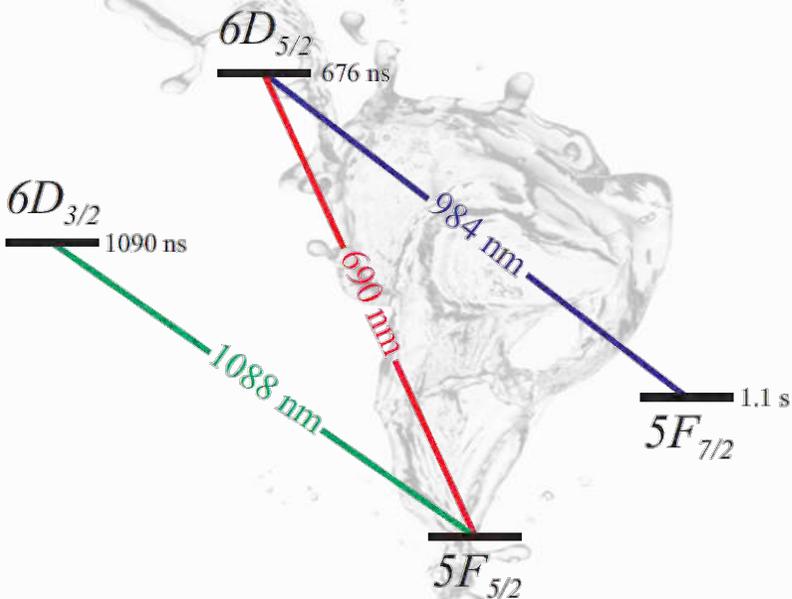
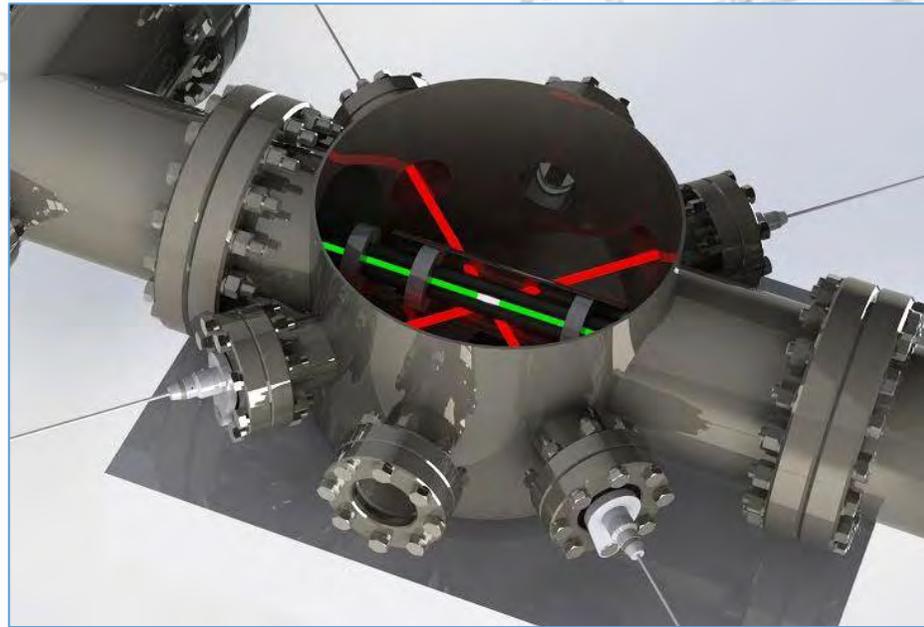


Масс-спектры одно-, двух- и трехкратно заряженных ионов тория-232, полученных с использованием пятисекционной квадрупольной ловушки Пауля линейной конфигурации с энергофильтром и источником ионов на основе электронно-лучевого испарителя

Выход ионов тория-232 из пятисекционной квадрупольной ловушки Пауля линейной конфигурации с энергофильтром и источником ионов на основе электронно-лучевого испарителя, после удержания в течение 5 минут

3. Охлаждение до 1 мК

Лазерное
Охлаждение
 $^{229}\text{Th}^{3+}$



1. Синтез широкополосных диэлектрических кристаллов с $^{229}\text{Th}^{n+}$

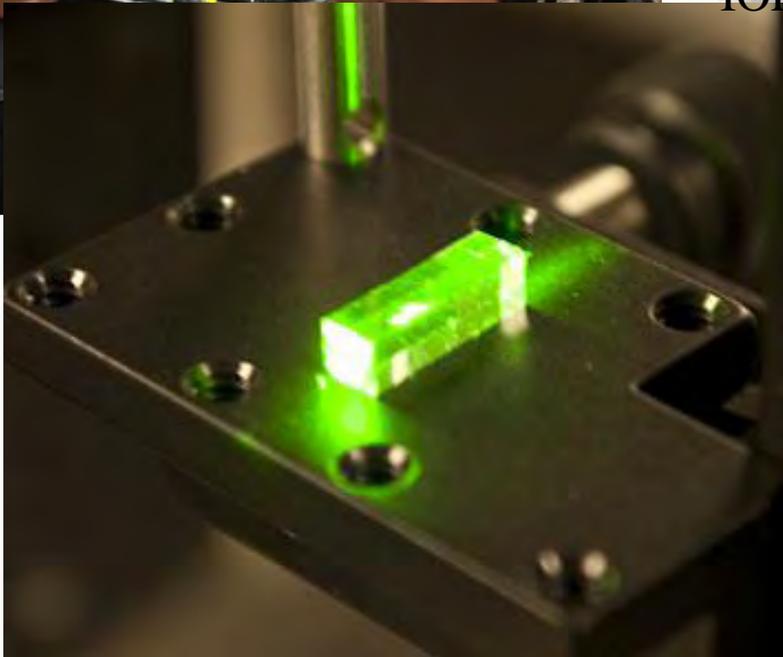
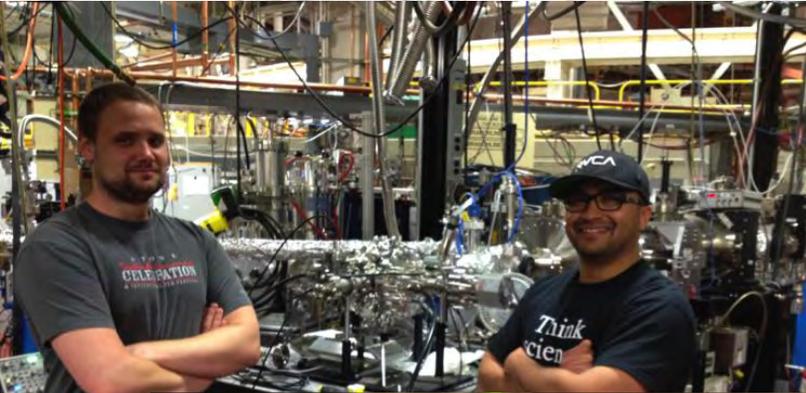
2 ПОДХОД

In 2010, *Hudson's group* proposed a novel optical frequency standard based on a high-Q transition in the ^{229}Th nucleus

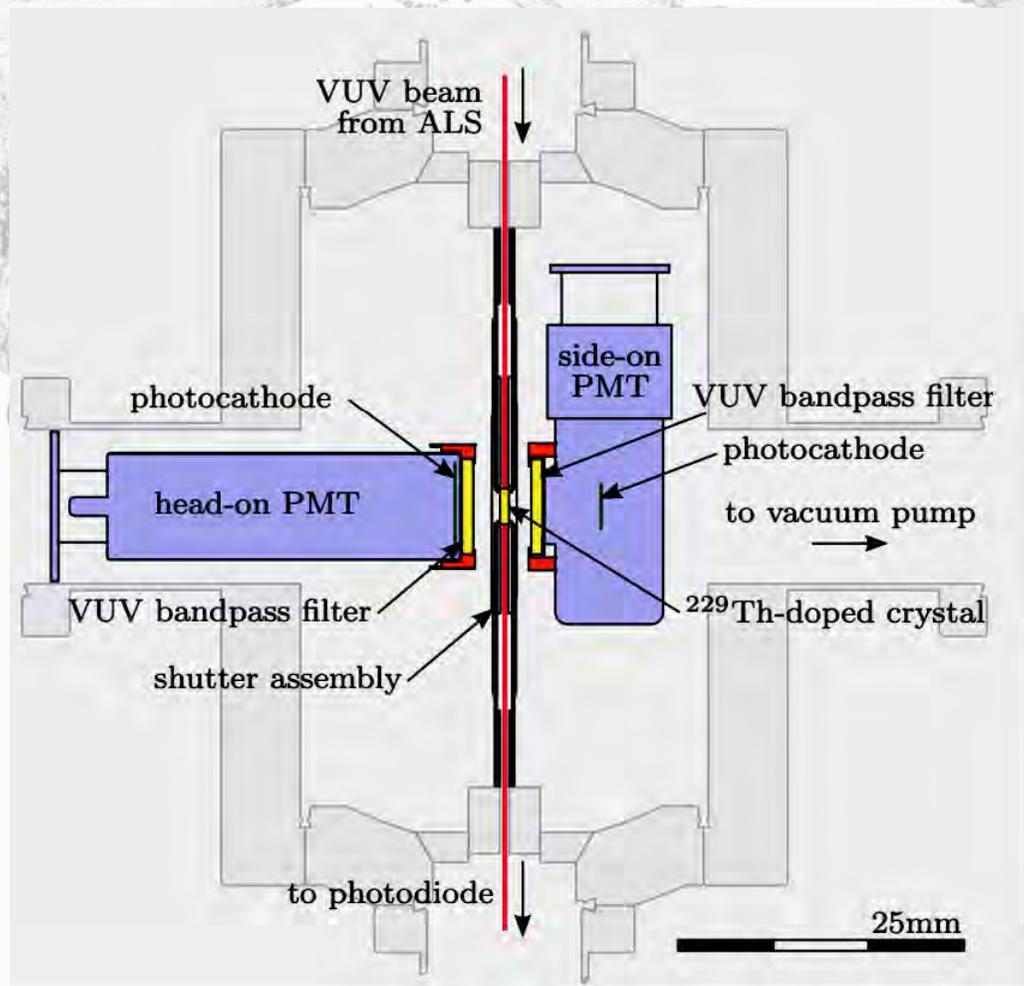
Rellergert W.G., Sullivan S.T., DeMille D., Greco R.R., Hehlen M.P., Jackson R.A., Torgerson J.R., Hudson E.R. // IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng. 2010. V. 15. P. 012005.)



Th:LiSAF



2. Уточнение энергии перехода с помощью СИ в УФ диапазоне

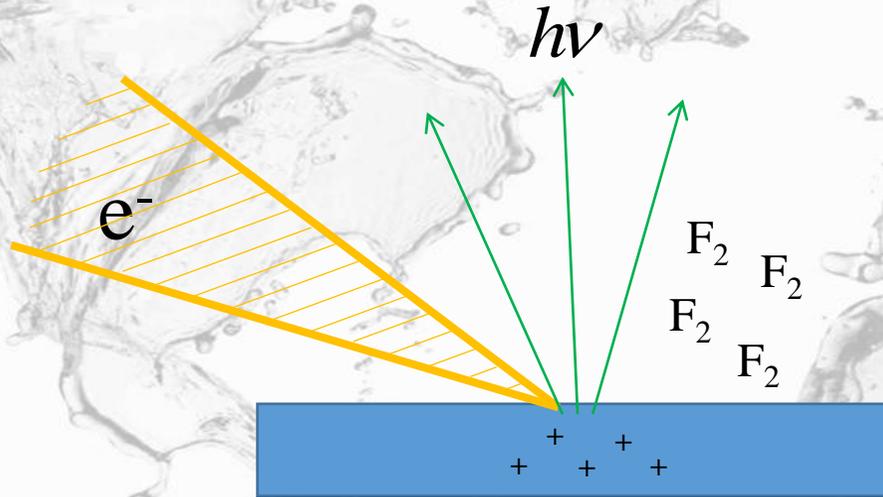


Hudson's group find no evidence for the thorium nuclear transition between 7.3 eV and 8.8 eV with transition lifetime $(1-2) \text{ s} \cdot \tau \cdot (2000-5600) \text{ s}$

Justin Jeet, Christian Schneider, Scott T. Sullivan, Wade G. Rellergert¹, Saed Mirzadeh, A. Cassanho, H. P. Jenssen, Eugene V. Tkalya, and Eric R. Hudson¹
// Results of a direct search using synchrotron radiation for the low-energy ^{229}Th nuclear isomeric transition // PRL 114 (2015)

??? Возбуждение и регистрация часового перехода ???

Возбуждение перехода с помощью электронного пучка



Инжектирование электронами

Обеднение по фтору

Образование вакансий

Образование центров окраски

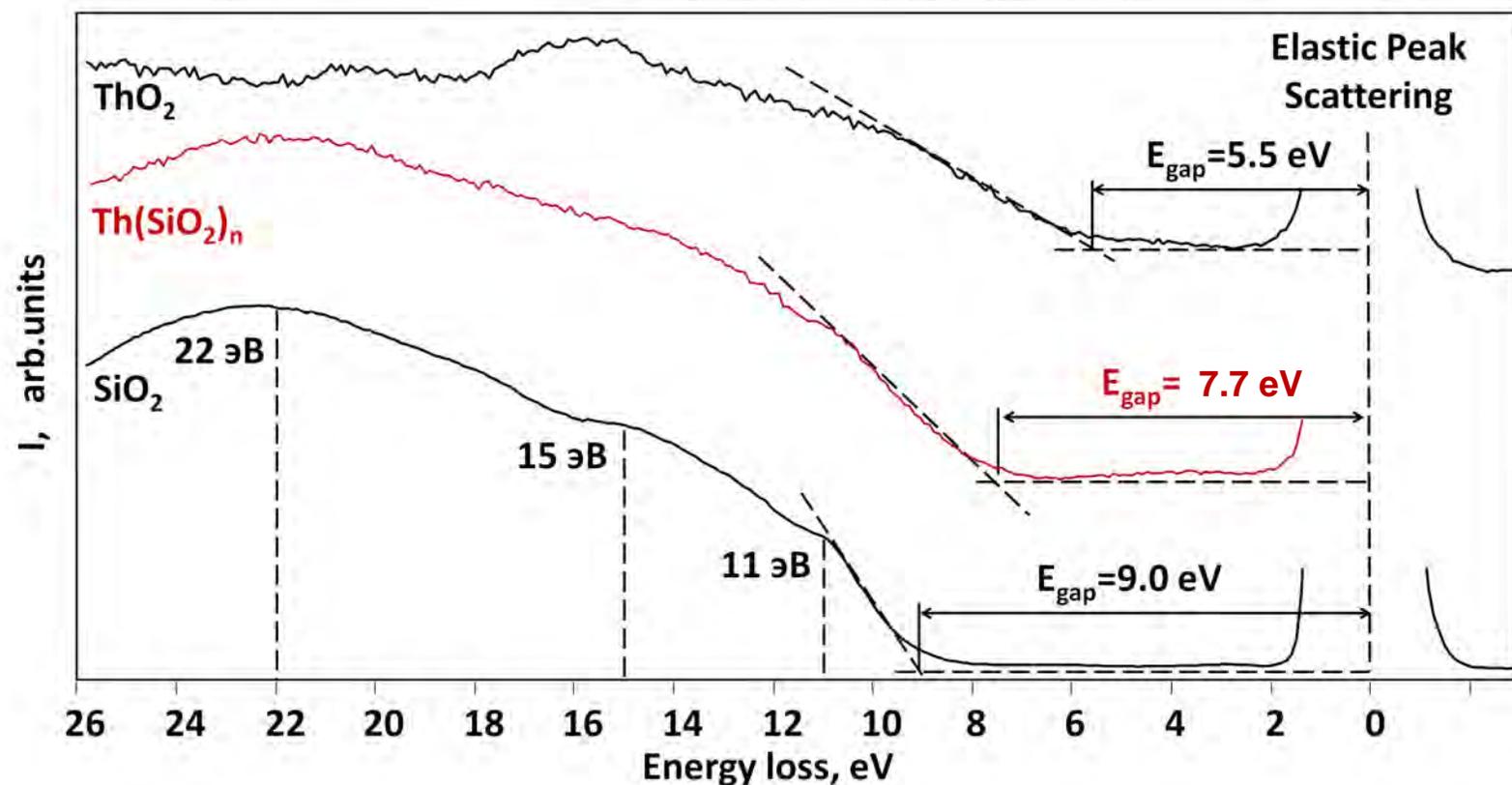
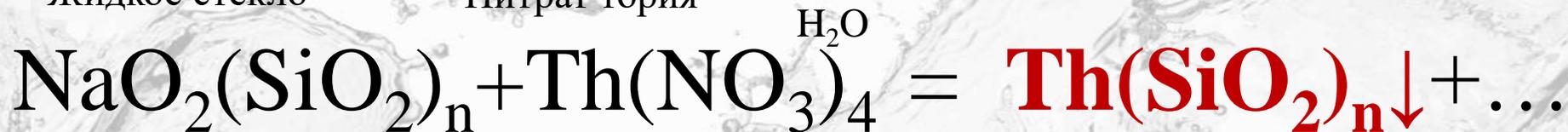
Изменение зонной структуры

Релаксация изомерного состояния через электронную конверсию

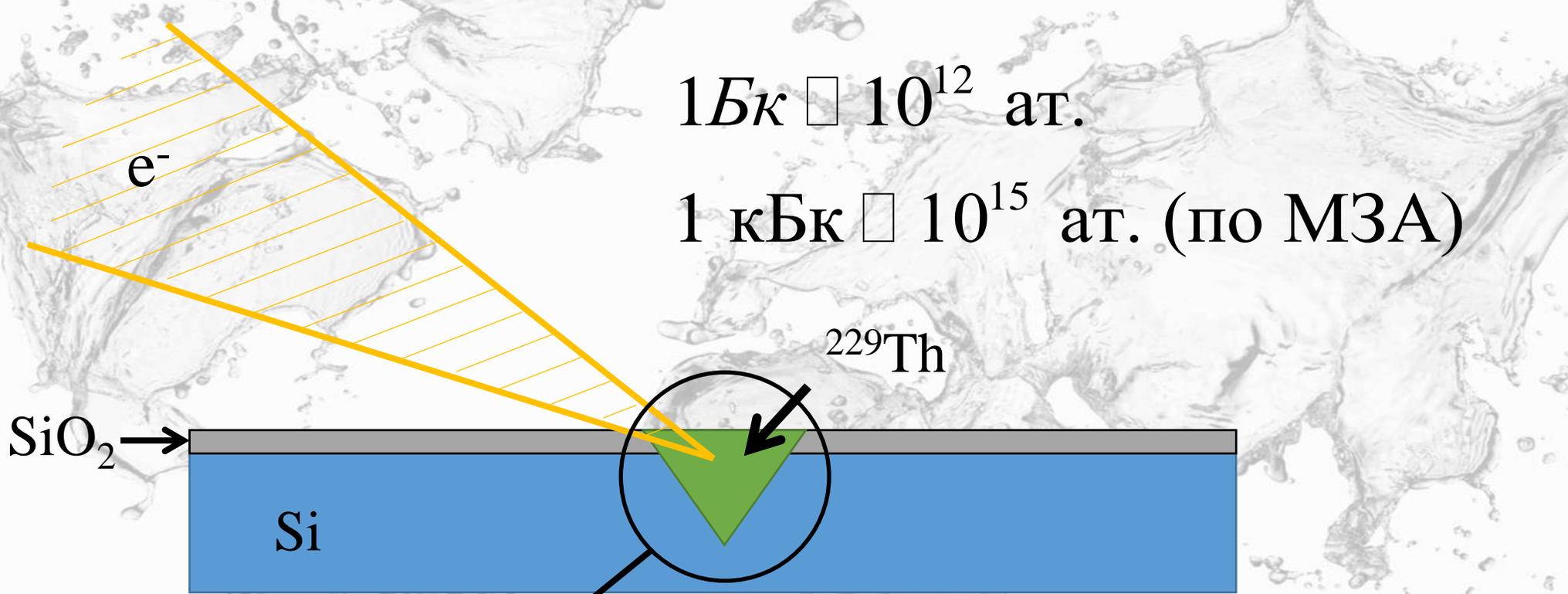
Поиск широкополосного диэлектрика стойкого к воздействию электронным пучком

Жидкое стекло

Нитрат тория



Возбуждение перехода с помощью электронного пучка



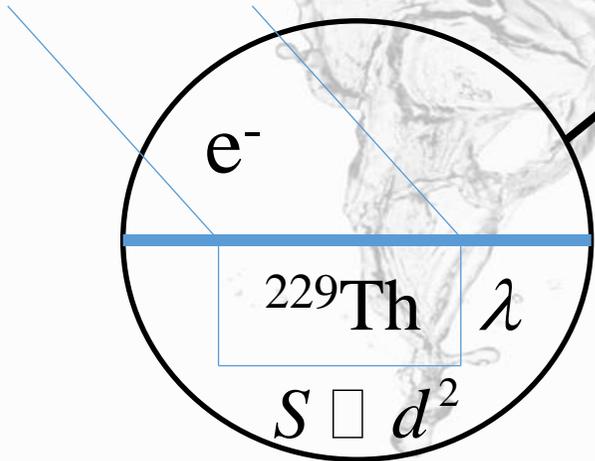
1 Бк $\approx 10^{12}$ ат.

1 кБк $\approx 10^{15}$ ат. (по МЗА)

^{229}Th

SiO₂

Si



$d = 10^{-2}$ см – диаметр ториевого пятна

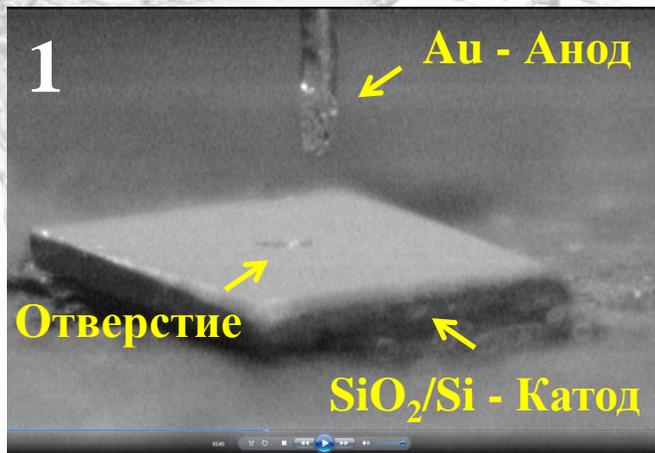
$S \approx 10^{-4}$ см² – площадь ториевого пятна пучка

$\lambda \approx 10^{-4}$ см – средняя длина траектории в ThO₂ для электронов с энергией 30 кэВ

$N_{^{229}\text{Th}} = n \cdot S \cdot \lambda \approx 10^{14} \div 10^{15}$ ат.

Локальное электрохимическое осаждение Th^{232}

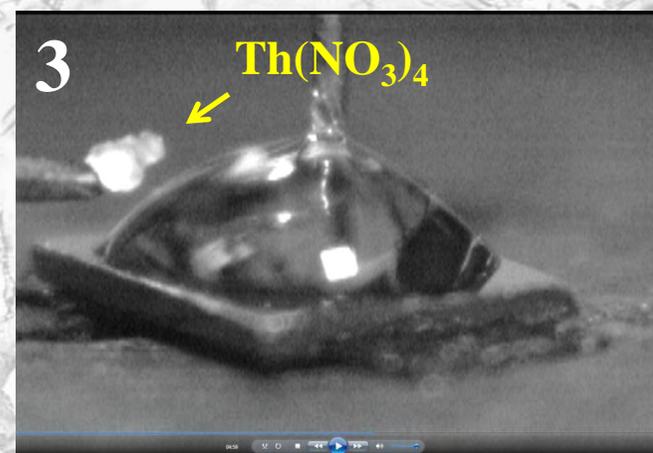
Подвод анода



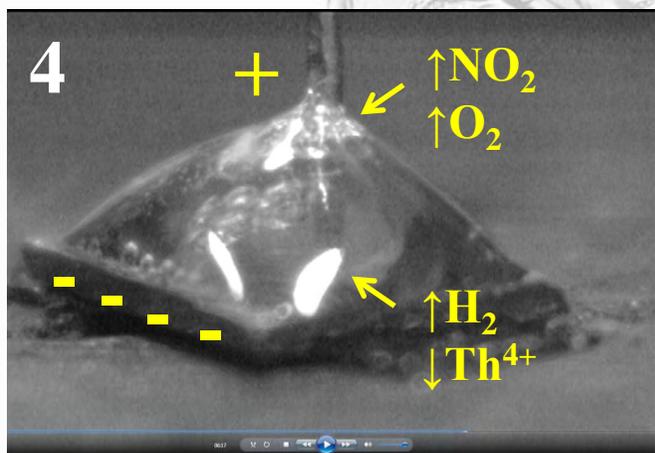
Добавление воды



Добавление тория



Подача потенциала



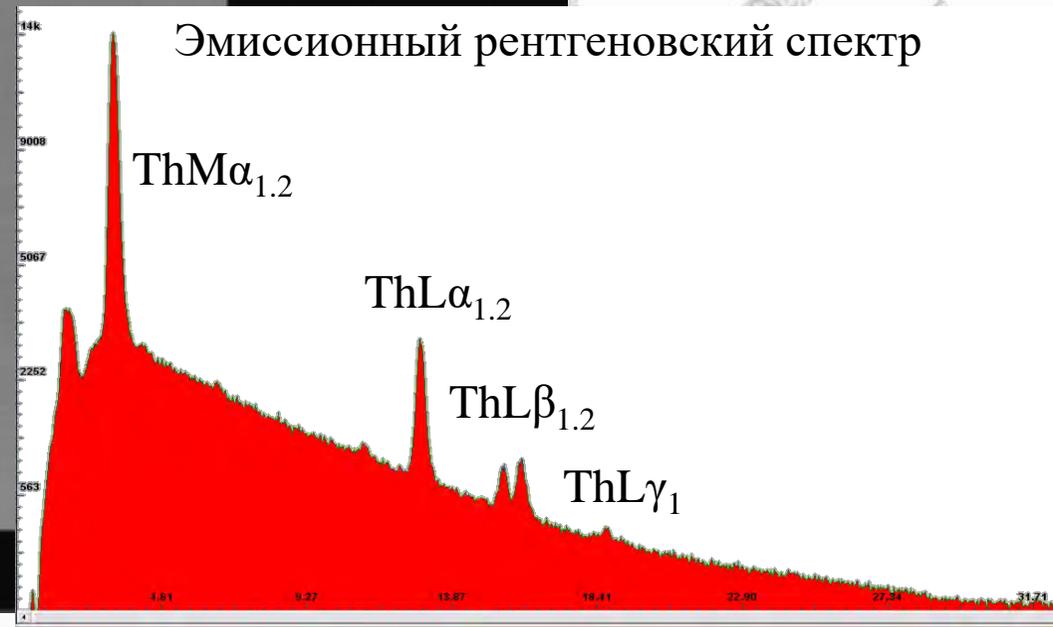
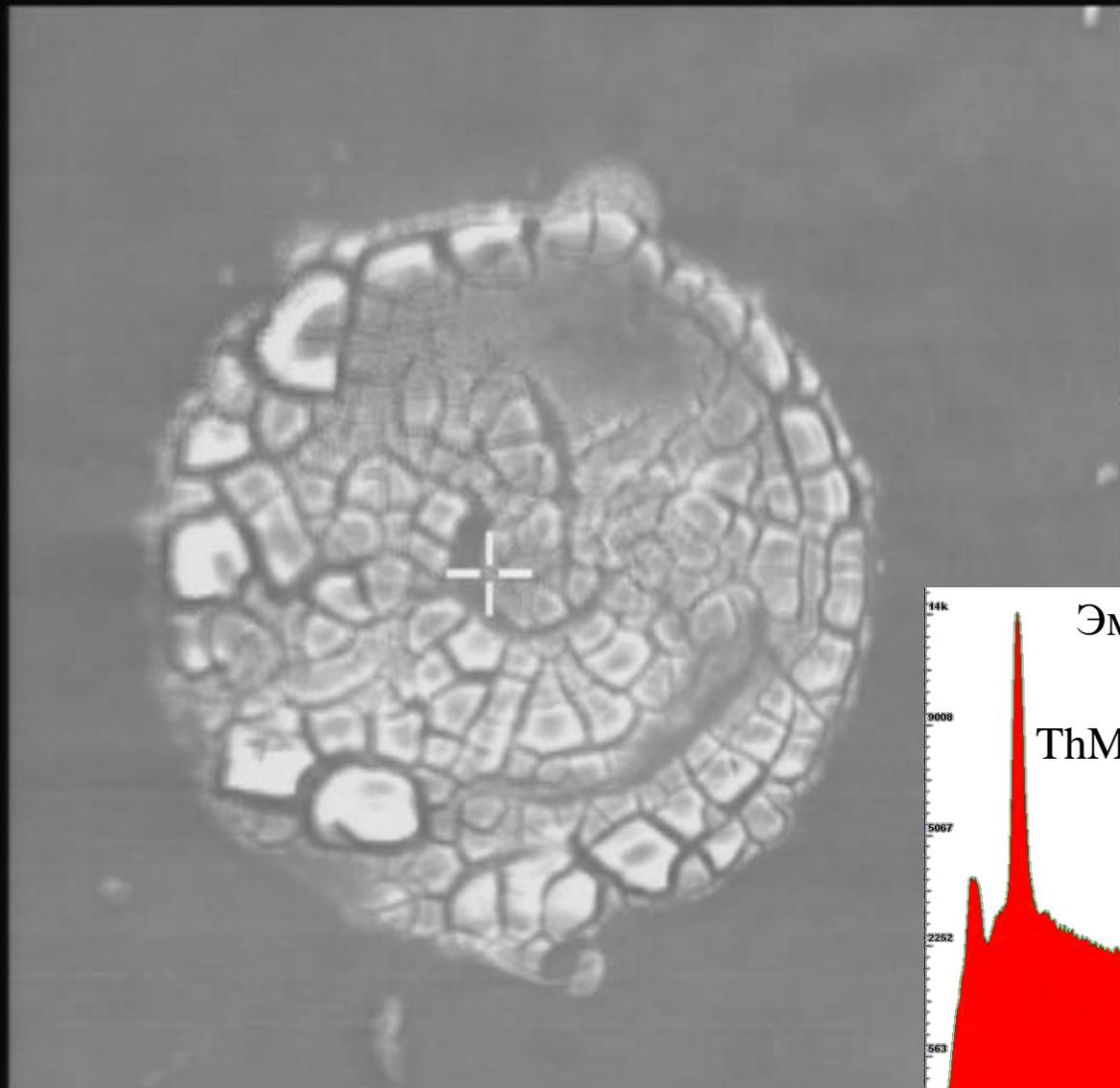
Отбор воды



Финиш

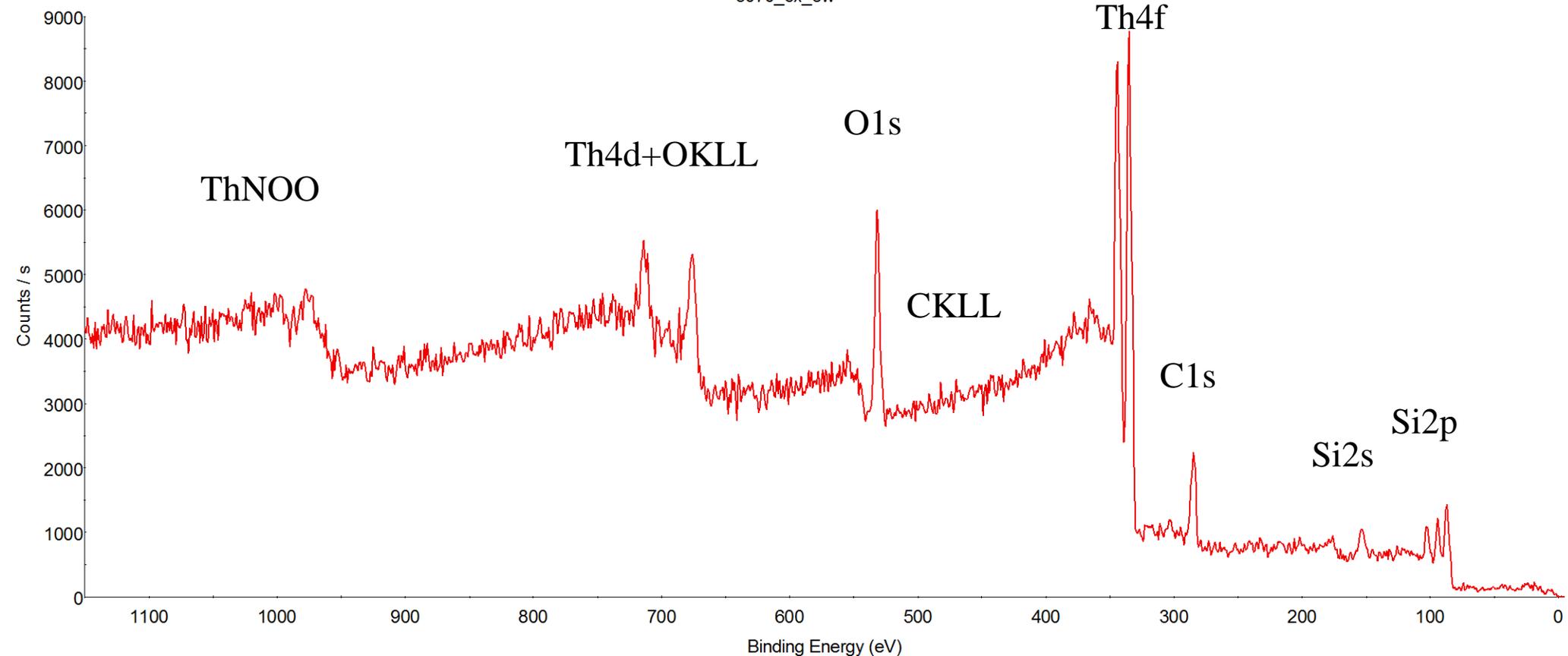


Локальное электрохимическое осаждение Th^{232}



Хим. состав пятна до прогрева (РФЭС)

3070_6x_3w

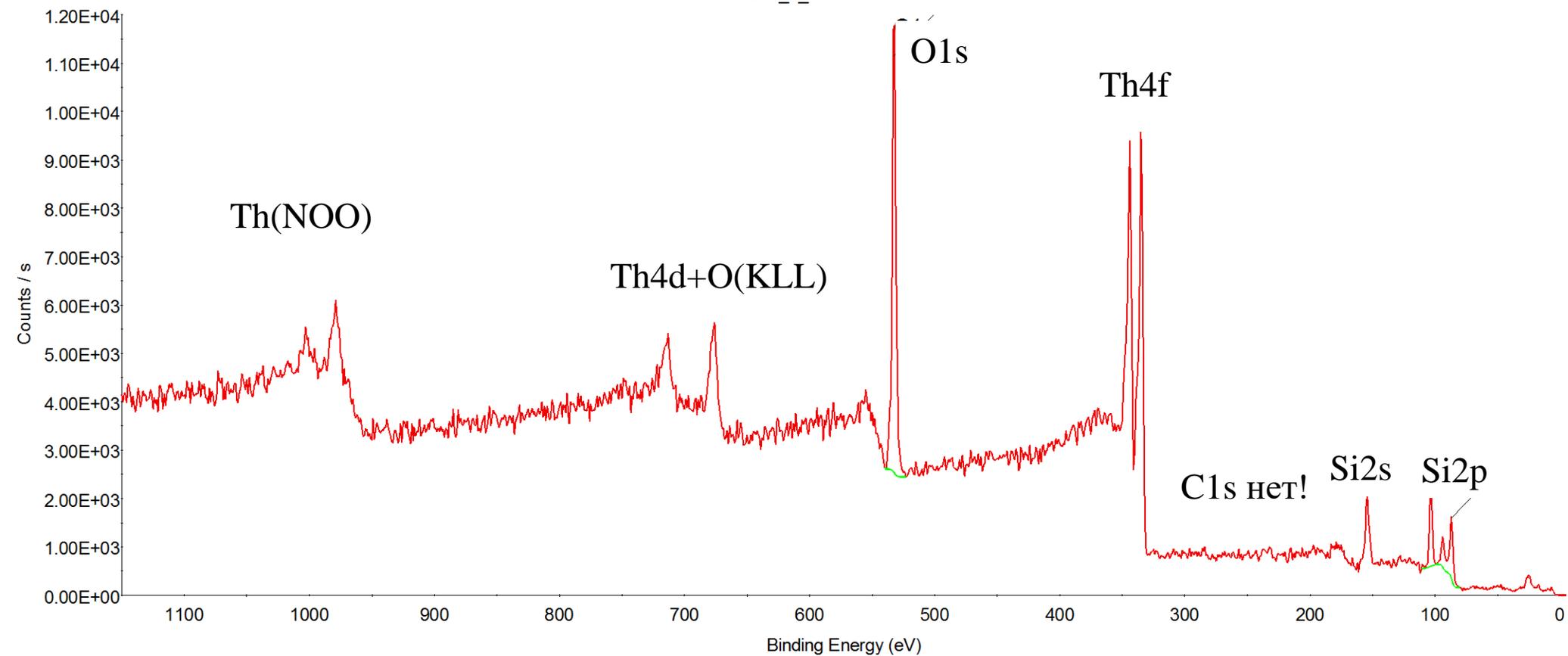


ThO₂ с примесью углерода

Хим. состав пятна после прогрева (РФЭС)

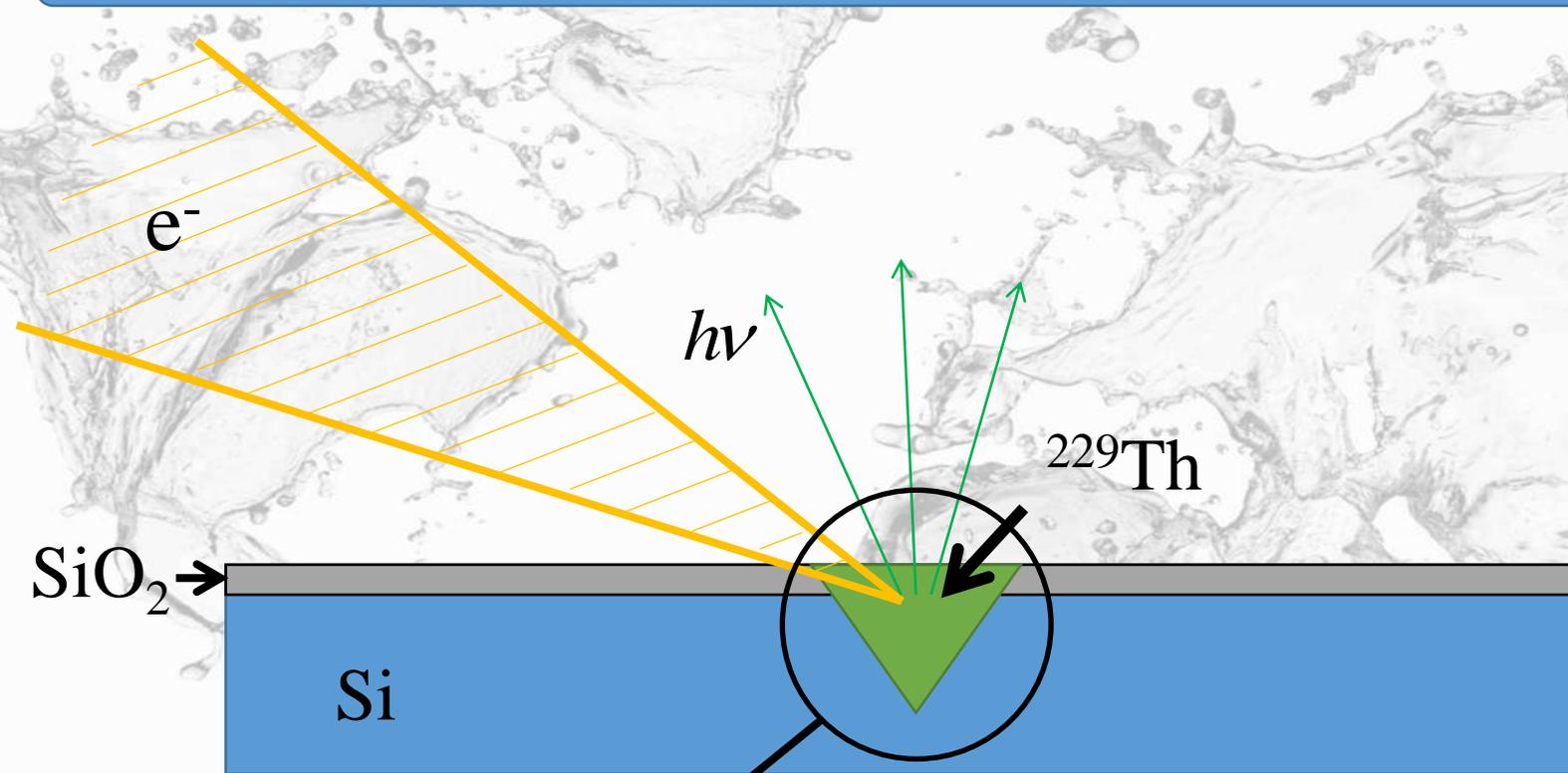


3070_6_7w



Чистый Th(SiO₂)_n

Возбуждение перехода с помощью электронного пучка



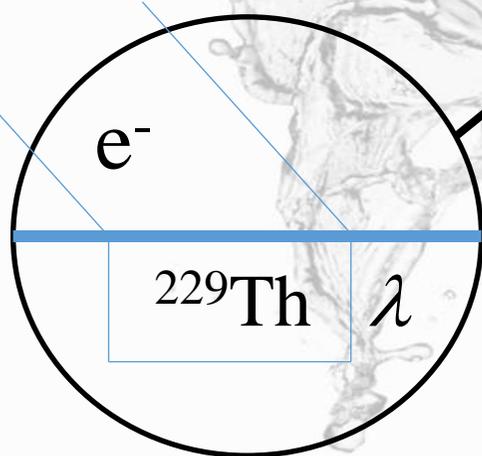
$$I_0 = 2 \text{ мкА}$$

$$E_0 = 30 \text{ кЭВ}$$

$$\lambda \approx 10^{-6} \text{ см}$$

$$\sigma \approx 10^{-29} \text{ см}^2$$

$$N_{SE} \approx 10^3$$



$$N_{is} = \frac{\sigma}{S} \frac{N_{el}}{t} N_{nucl} = \sigma \frac{I_0}{e} \lambda n N_{SE} \approx 10^3 \div 10^4 \frac{\text{яд}}{\text{сек}}$$

1. Синтез кристаллов с ^{229}Th

2. Уточнение энергии на СИ в УФ диапазоне

3. Возбуждение и регистрация часового перехода

0. Получение $^{229}\text{Th}^{n+}$

1. Получение ионов $^{229}\text{Th}^{n+}$

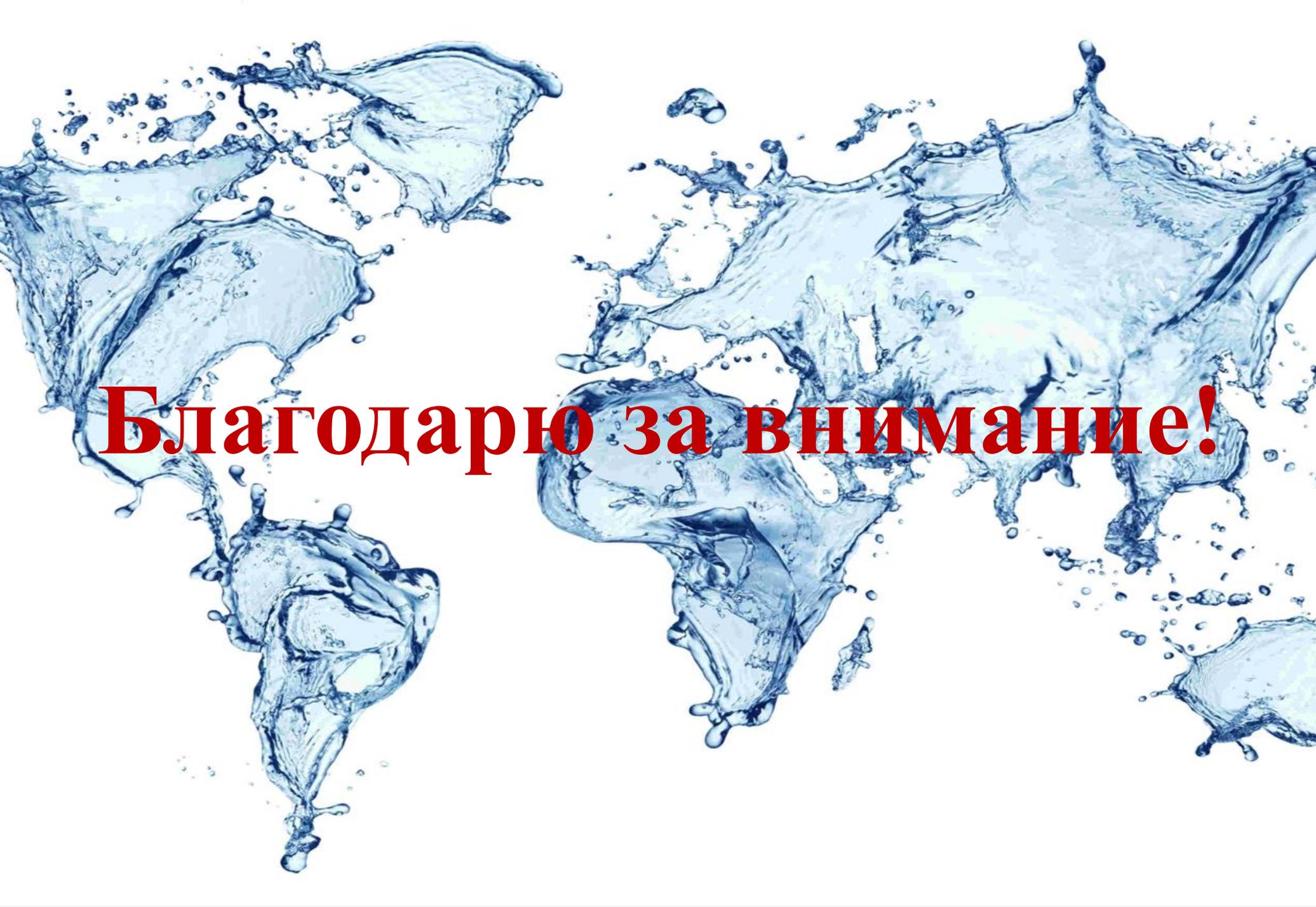
2. Захват и удержание $^{229}\text{Th}^{n+}$

3. Охлаждение до 1 мК

4. Возбуждение и регистрация часового перехода

Альтернативный подход
возбуждение изомера электронным пучком





Благодарю за внимание!