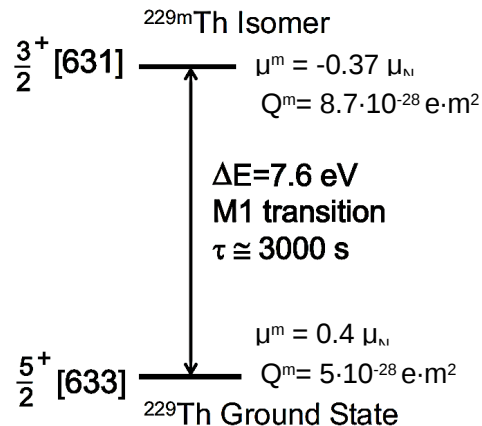
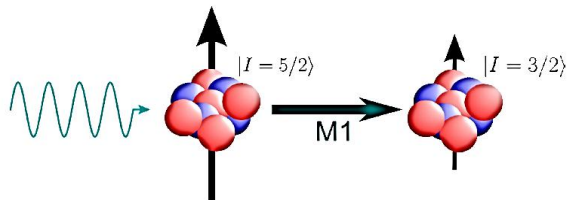


# Ионы тория в линейной квадрупольной ловушке

Борисюк П.В., Васильев О.С., Деревяшкин С.П., Колачевский Н.Н., Лебединский Ю.Ю., Потешин С.С., Сысоев А.А., Ткаля Е.В., Трегубов Д.О., Троян В.И., Хабарова К.Ю., 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  $7.6 \pm 0.5$  эВ (область вакуумного ультрафиолета)
- Длина волны  $\sim 160$  нм
- Малая естественная ширина  $\sim 1$  мГц
- Экранирование ядра атомными электронами приводит к уменьшению чувствительности ядерного перехода к внешним возмущениям на несколько порядков
- Время жизни изомерного состояния  $\sim 1$  час
- Переход доступен для исследования лазерной спектроскопией



# Перспективы использования изомерного перехода в ядре тория-229

EUROPHYSICS LETTERS

*Europhys. Lett.*, **61** (2), pp. 181–186 (2003)

15 January 2003

PRL **108**, 120802 (2012)

PHYSICAL REVIEW LETTERS

week ending  
23 MARCH 2012

## Nuclear laser spectroscopy of the 3.5 eV transition in Th-229

E. PEIK(\*) and CHR. TAMM

*Physikalisch-Technische Bundesanstalt - Bundesallee 100  
38116 Braunschweig, Germany*

(received 17 June 2002; accepted in final form 11 November 2002)

PACS. 23. 20. -g – Electromagnetic transitions.

PACS. 42. 62. F1 – Laser spectroscopy.

PACS. 33. 40. +f – Multiple resonances (including double and higher-order resonance processes, such as double nuclear magnetic resonance, electron double resonance, and microwave optical double resonance).

**Abstract.** – We propose high-resolution laser spectroscopy of the 3.5 eV nuclear transition in Th-229 in isolated atoms. Laser excitation of the nucleus can be detected efficiently in a double-resonance method by probing the hyperfine structure of a transition in the electron shell. It is shown that for a suitably chosen electronic level, the frequency of the nuclear transition is independent of external magnetic fields to first order and of electric fields to second order. This makes Th-229 a possible reference for an optical clock of very high accuracy. The nuclear-electronic double-resonance method can be conveniently applied to a laser-cooled ion of  $^{229}\text{Th}^{3+}$  in a radiofrequency trap. Further applications of nuclear laser spectroscopy are discussed.

## Single-Ion Nuclear Clock for Metrology at the 19th Decimal Place

C. J. Campbell,<sup>1,\*</sup> A. G. Radnaev,<sup>1</sup> A. Kuzmich,<sup>1</sup> V. A. Dzaba,<sup>2</sup> V. V. Flambaum,<sup>2</sup> and A. Derevianko<sup>3</sup>

<sup>1</sup>*School of Physics, Georgia Institute of Technology, Atlanta, Georgia 30332-0430, USA*

<sup>2</sup>*School of Physics, University of New South Wales, Sydney 2052, Australia*

<sup>3</sup>*Department of Physics, University of Nevada, Reno, Nevada 89557, USA*

(Received 7 October 2011; published 22 March 2012)

The 7.6(5) eV nuclear magnetic-dipole transition in a single  $^{229}\text{Th}^{3+}$  ion may provide the foundation for an optical clock of superb accuracy. A virtual clock transition composed of stretched states within the  $5F_{5/2}$  electronic ground level of both nuclear ground and isomeric manifolds is proposed. It is shown to offer unprecedented systematic shift suppression, allowing for clock performance with a total fractional inaccuracy approaching  $1 \times 10^{-19}$ .

DOI: 10.1103/PhysRevLett.108.120802

PACS numbers: 06.20.Fb, 06.20.Jr, 21.10.Tg, 24.80.+y

Effect	Shift  ( $10^{-20}$ )	Uncertainty ( $10^{-20}$ )
Excess micromotion	10	10
Gravitational	0	10
Cooling laser Stark	0	5
Electric quadrupole	3	3
Secular motion	5	1
Linear Doppler	0	1
Linear Zeeman	0	1
Background collisions	0	1
Blackbody radiation	0.013	0.013
Clock laser Stark	0	$\ll 0.01$
Trapping field Stark	0	$\ll 0.01$
Quadratic Zeeman	0	0
Total	18	15

PRL **106**, 162501 (2011)

PHYSICAL REVIEW LETTERS

week ending  
22 APRIL 2011

## Proposal for a Nuclear Gamma-Ray Laser of Optical Range

E. V. Tkalya\*

*Institute of Nuclear Physics, Moscow State University, Moscow, Russia*

(Received 2 November 2010; published 21 April 2011)

A possibility of the amplification of the 7.6 eV  $\gamma$  radiation by the stimulated  $\gamma$  emission of the ensemble of the  $^{229m}\text{Th}$  isomeric nuclei in a host dielectric crystal is proved theoretically. This amplification is a result of (1) the excitation of a large number of  $^{229m}\text{Th}$  isomers by laser radiation, (2) the creation of the inverse population of nuclear levels in a cooled sample owing to the interaction of thorium nuclei with the crystal electric field or with an external magnetic field, (3) the emission or absorption of the optical photons by thorium nuclei in the crystal without recoil, and (4) the nuclear spin relaxation through the conduction electrons of the metallic covering.

DOI: 10.1103/PhysRevLett.106.162501

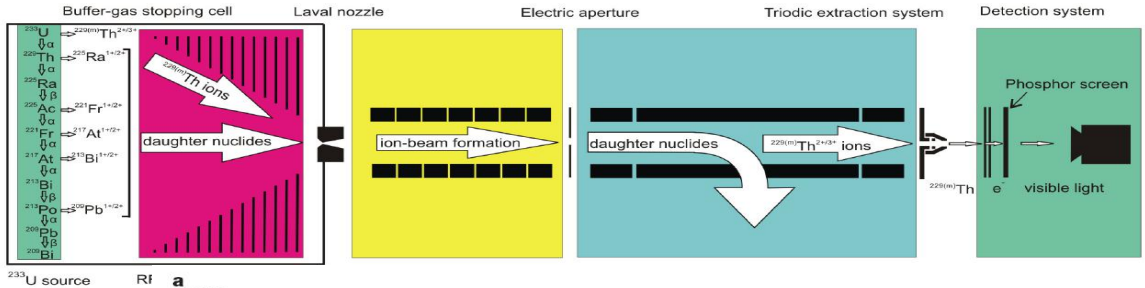
PACS numbers: 23.20.Lv, 27.90.+b, 42.72.Bj

estimated clock inaccuracy is  $1.5 \times 10^{-19}$ .

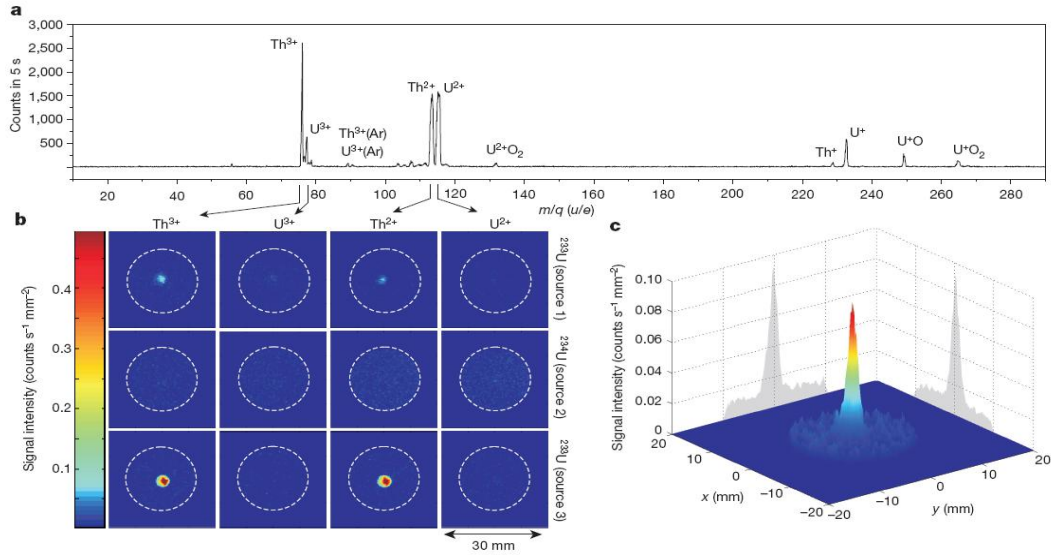
Неточность ядерного стандарта ожидается на уровне  $10^{-19}$

# Direct detection of the (229)Th nuclear clock transition.

L. v. d. Wense, P. Thirolf et al., Nature 533, 47 (2016)



«Доказательство теоремы о существовании»



Регистрация распада изомерных ядер через канал электронной конверсии

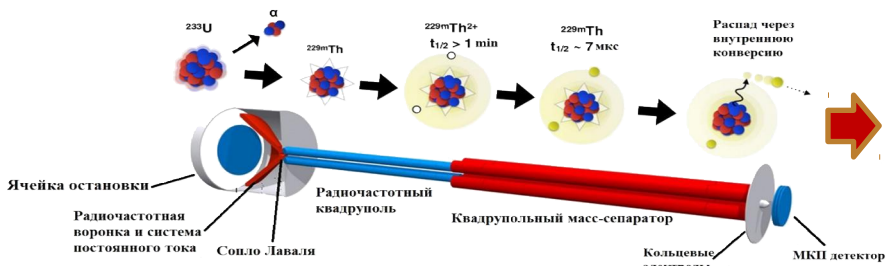


## Lifetime Measurement of the $^{229m}\text{Th}$ nuclear isomer

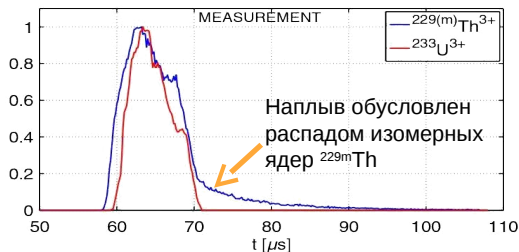
Benedict Seiferle, Lars von der Wense, and Peter G. Thirolf

Ludwig-Maximilians-Universität München, Am Coulombwall 1, 85748 Garching bei München, Germany

(Received 23 November 2016; published 26 January 2017)



Измерение характеристик изомерного распада пучка ионов  $^{229m}\text{Th}^{3+}$  (синяя кривая) и сравнительное измерение с  $^{233}\text{U}^{3+}$  (красная кривая)



**Период полураспада изомерных ядер на поверхности твердого тела:  $7 \pm 1$  ms**

Согласуется с оценками Ткаля Е.В. [Sov. Phys. JETP 72, 387 (1991); PRC 92, 054324 (2015)]

Важное наблюдение: время жизни изомерных ядер для ионов в ловушке зависит от зарядности ионов тория  $\text{Th}^+$ :  $< 10$  ms - возможно ограничено распадом через канал электронного моста (?)

$\text{Th}^{2+}$ :  $< 60$  s - ограничено химическими реакциями с атомами остаточного газа (время удержания ионов в ловушке)

## Nuclear Experiment

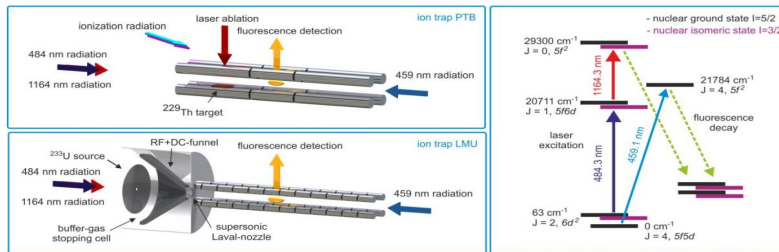
Laser spectroscopic characterization of the nuclear clock isomer  $^{229m}\text{Th}$ 

Johannes Thielking, Maxim V. Okhupkin, Przemyslaw Glowacki, David M. Meier, Lars von der Wense, Benedict Seiferle, Christoph E. Düllmann, Peter G. Thirolf, Ekkehard Peik

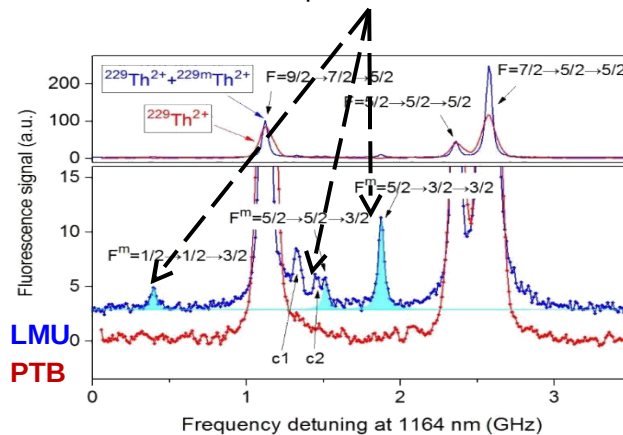
(Submitted on 15 Sep 2017)

Сравнение результатов лазерной спектроскопии ионов тория-229 в 2-х ловушках:

- 1 - Physikalisch-Technische Bundesanstalt (PTB) загружается  $^{229}\text{Th}^{2+}$  методом лазерной абляции; 2% ионов в ловушке LMU находятся в изомерном состоянии
- 2 - Ludwig-Maximilians-Universität (LMU) загружается  $^{229}\text{Th}^{2+}$  ионами отдачи от  $\alpha$ -распада  $^{233}\text{U}$



По сверхтонкому расщеплению измерены:

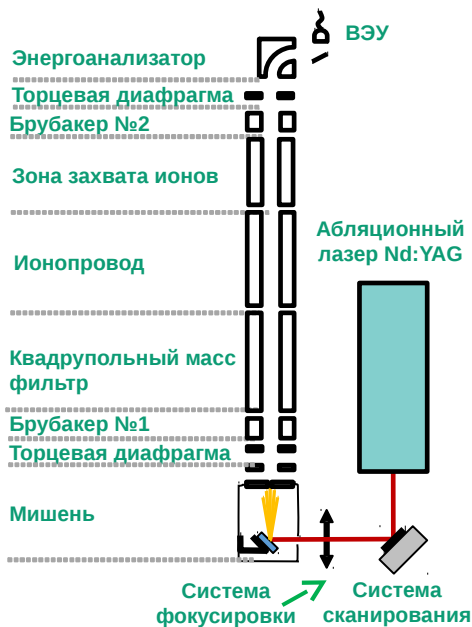
магнитный дипольный момент  
изомерного состояния  $\mu^m = -0,37 (6) \mu_N$ квадрупольный момент  
изомерного состояния  $Q_0^m = 8.7 (3) \text{ eb}$ 

# Цели работ нашей научной группы с торием в квадрупольной ловушке:

Проведение исследований изомерного перехода в ядре  $^{229}\text{Th}$  :  
Попытки возбуждения изомерного перехода

Создание инфраструктуры для реализации ядерных часов:

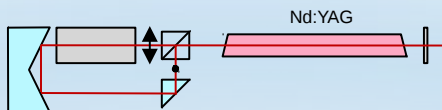
# Многосекционная квадрупольная ловушка Пауля





# Структурные элементы экспериментальной установки

## Лазерная абляция

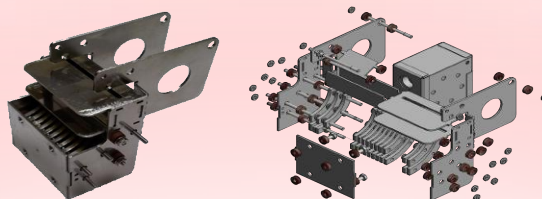


Nd:YAG лазер, работающий в режиме модуляции добротности

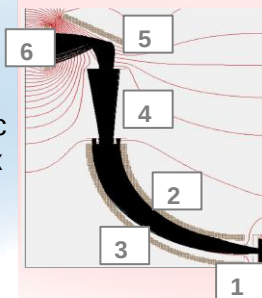
### Параметры лазера :

Длительность импульса ~ 25 нс  
Энергия в импульсе ~ 300 мДж  
Диаметр сфокусированного пятна ~ 100 мкм

## Поворотный энергоанализатор Юза-Рожанского



Траектории ионов, смоделированные в пакете Simion:



1. 1x10 мм входная щель для ионов
2. Внутренняя обкладка энергоанализатора
3. Внешняя обкладка энергоанализатора
4. Выходная щель, финальная часть фильтрации по массам
5. Дефлектор
6. Вход во вторичный электронный усилитель

## Система регистрации ионов

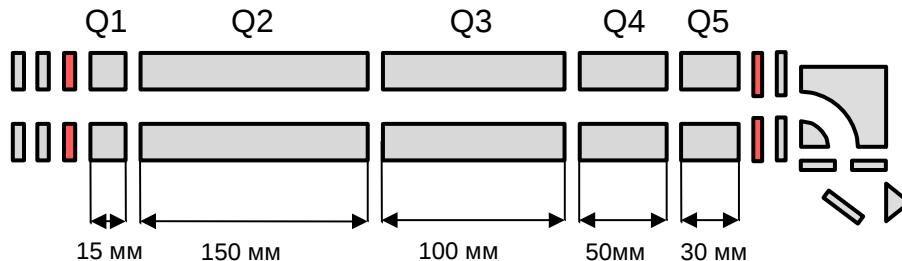
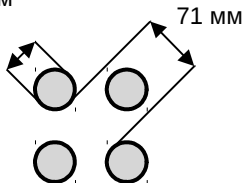


Вторично - электронный умножитель канального типа ВЭУ-6

В качестве мишени использовался металлический  $^{232}\text{Th}$ .

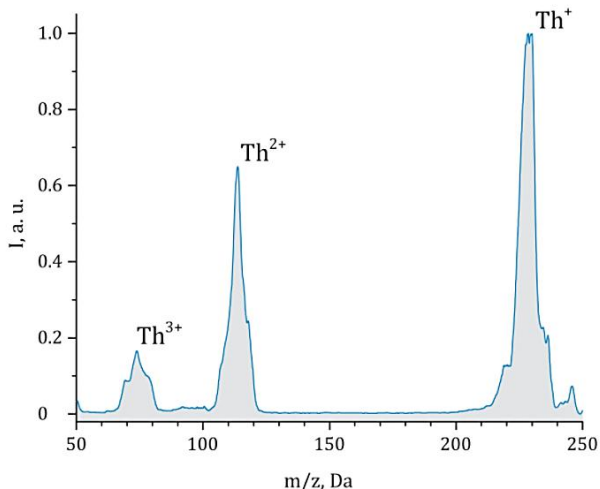
# Параметры линейной квадрупольной ионной ловушки

Ø 80 мм



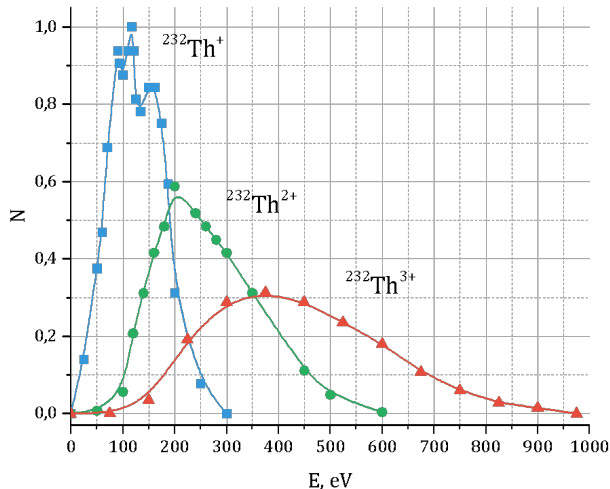
Диаметр стержней, мм	80
Расстояние между противоположными стержнями, мм	7,1
Напряжение смещения, В	<400
Частота переменного напряжения, МГц	1,22
Амплитуда переменного напряжения, В	2,7-338
Величина постоянного напряжения, В	0,24-30,4
Диапазон масс доступных для фильтрации	2 - 250
Напряжение на ВЭУ, В	3000

# Характеристики ионов $^{232}\text{Th}$ , полученных при помощи лазерной абляции



Масс спектр ионов тория-232 полученных в результате лазерной абляции металлической мишени.

Продемонстрировано наличие трехкратно заряженных ионов



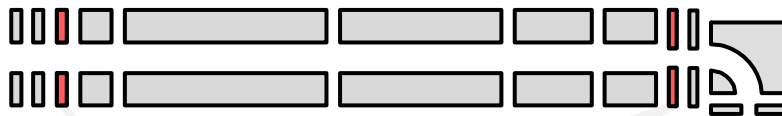
Энергетический спектр ионов тория-232 полученных в результате лазерной абляции металлической мишени.

Zφ, В	
$\text{Th}^{+}$	120
$\text{Th}^{2+}$	200
$\text{Th}^{3+}$	375

Оптимальные значения потенциала на оси квадруполя.

Z – зарядность иона,  
φ – потенциал оси

# Иллюстрация процесса захвата

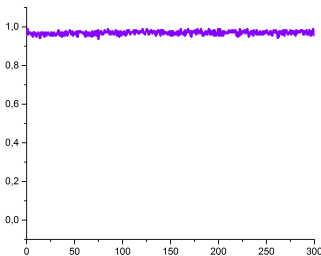


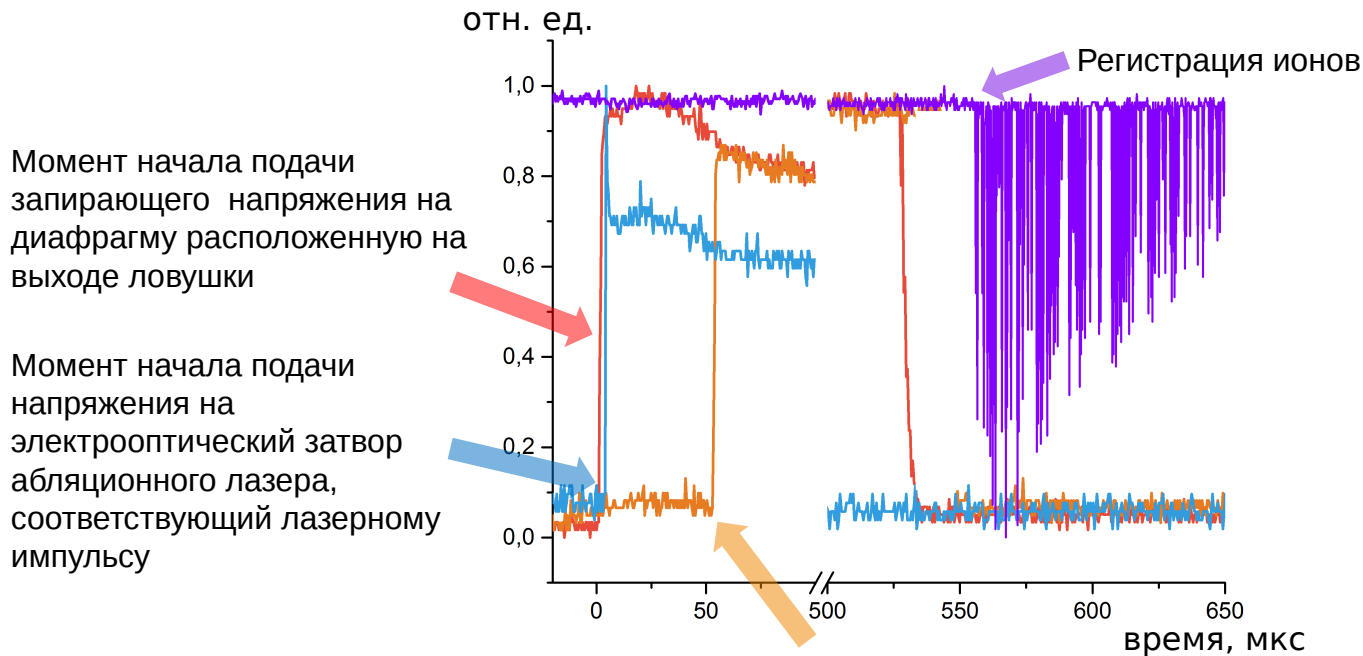
Слишком высокая энергия для захвата

Акт регистрации

Подача запирающих потенциалов  
Снятие запирающего потенциала

Ионы, отфильтрованные по массе





Момент начала подачи запирающего напряжения на диафрагму расположенную на входе ловушки

# Характеристики процесса захвата ионов

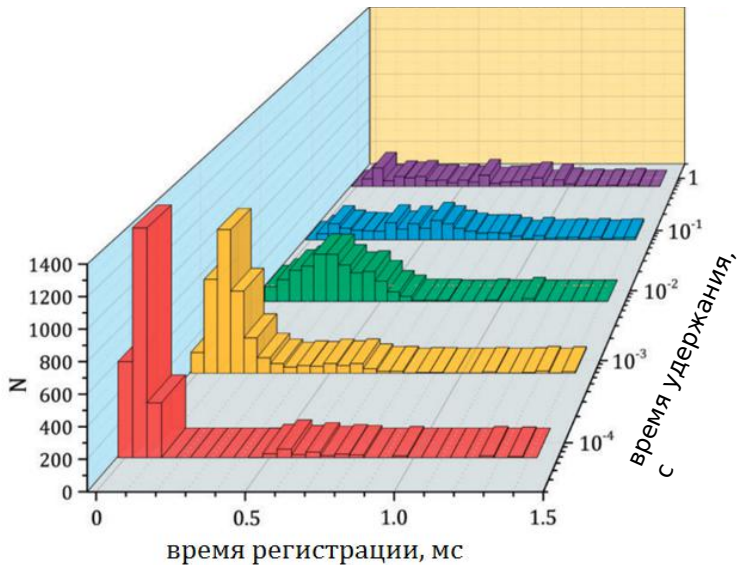


График зависимости числа ионов, регистрируемых на выходе из ловушки в зависимости от времени их регистрации для различных времен удержания.

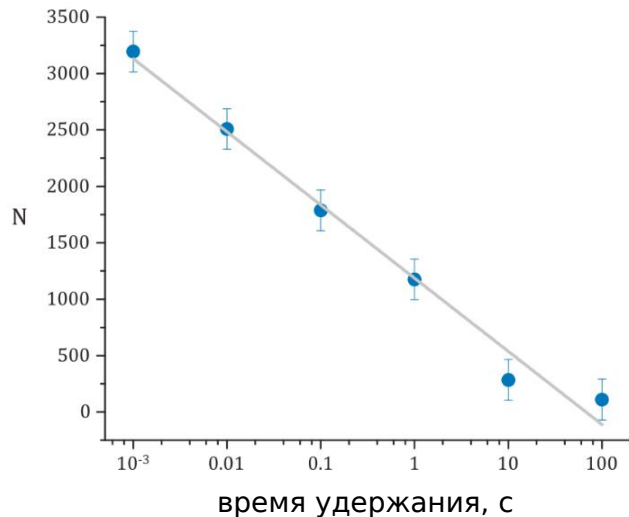


График зависимости общего числа высвобождаемых из ловушки ионов от времени удержания.

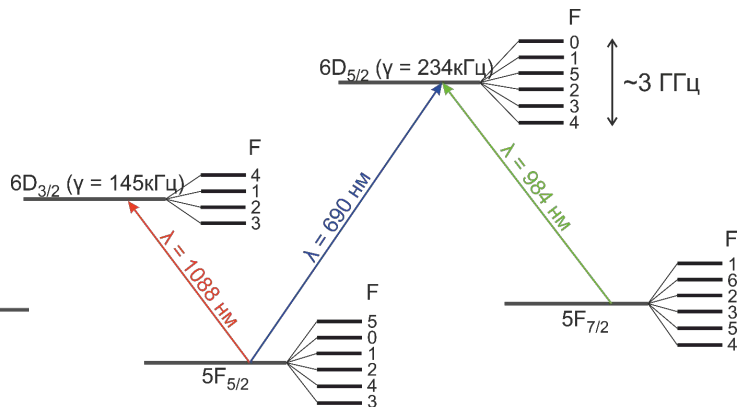
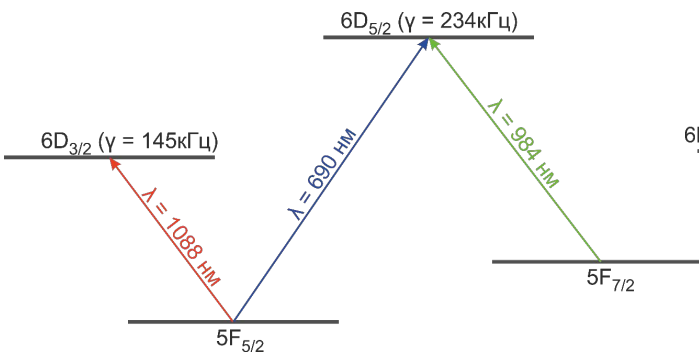
# Отличительные особенности используемой в работе ионной ловушки:

- Пять секций
- Возможность осуществлять фильтрацию по массам
- Возможность осуществлять фильтрацию по энергиям
- Возможность работать с различными источниками ионов

# Структура уровней ионов $\text{Th}^{3+}$

$^{232}\text{Th}^{3+}$  ( $I = 0$ )

$^{229}\text{Th}^{3+}$  ( $I = 5/2$ )







Спасибо за внимание