

Ловушки Пеннинга для фундаментальной физики

Эксперименты на SHIPTRAP и PENTATRAP

Сергей Елисеев

K. Blaum, M. Block, Ch. Böhm, С. Ченмарёв, A. Dörr,
C. Droese, П. Филянин, М. Гончаров,
E. Minaya Ramirez, Д. Нестеренко, Ю.Н. Новиков,
A. Rischka, V. Simon

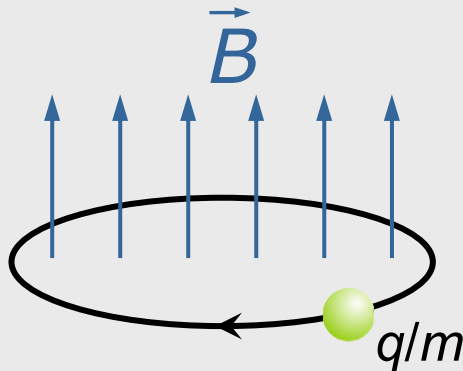
Масса Нуклидов: от коротко-живущих до стабильных

физика	примеры	$\delta m/m$
структура ядер	оболочки, области деформации, гало, границы нейтронной и протонной стабильности, остров стабильности сверхтяжёлых нуклидов	$10^{-6} - 10^{-7}$
астрофизика	пути rp - и r -процессов, скорости ядерных реакций, нуклидный состав нейтронных звёзд,	100-10 кэВ
слабые взаимодействия	гипотеза CVC, унитарность СКМ матрицы	10^{-8} 1 кэВ
метрология, фундаментальные константы нейтринная физика	$\alpha (h/m_{Cs}, m_{Cs}/m_p, m_p/m_e), m_{Si}$ $0\nu\beta\beta, 0\nu 2EC$	$10^{-9} - 10^{-10}$ 100-10 эВ
масса нейтрино стерильное нейтрино СРТ QED в сильных э/м полях	β -распад, EC m_p и $m_{\bar{p}}, m_{e^-}$ и m_{e^+} энергия связи электронов	$10^{-10} - 10^{-11}$ 10-1 эВ

Ловушка Пеннинга

самый точный спектрометр масс

сильное однородное
постоянное магнитное
поле

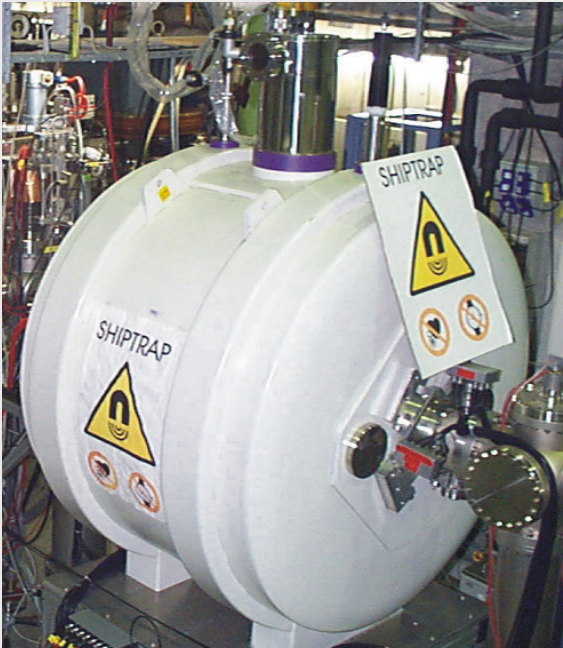


$$v_c = \frac{1}{2\pi} \frac{q}{m} B$$

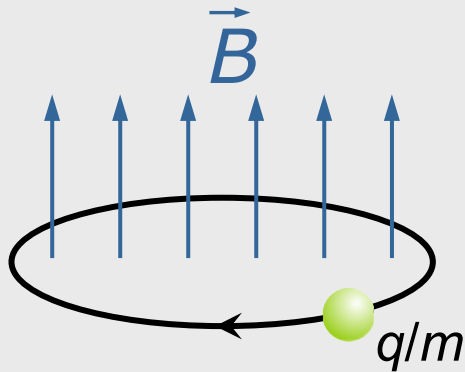
Ловушка Пеннинга

SHIPTRAP
JYFLTRAP
TRIGATRAP
MLLTRAP

$$\frac{\Delta B}{B} < 5 \cdot 10^{-9} \text{ h}^{-1}$$



сильное однородное
постоянное магнитное
поле



$$v_c = \frac{1}{2\pi} \frac{q}{m} B$$

THE-TRAP

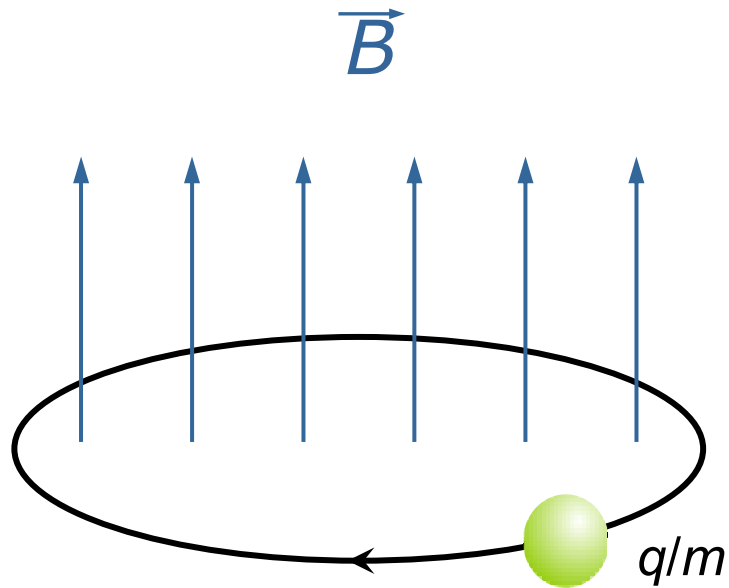
Max-Planck Institute for Nuclear Physics,
Heidelberg

$$\frac{\Delta B}{B} < 10^{-11} \text{ h}^{-1}$$

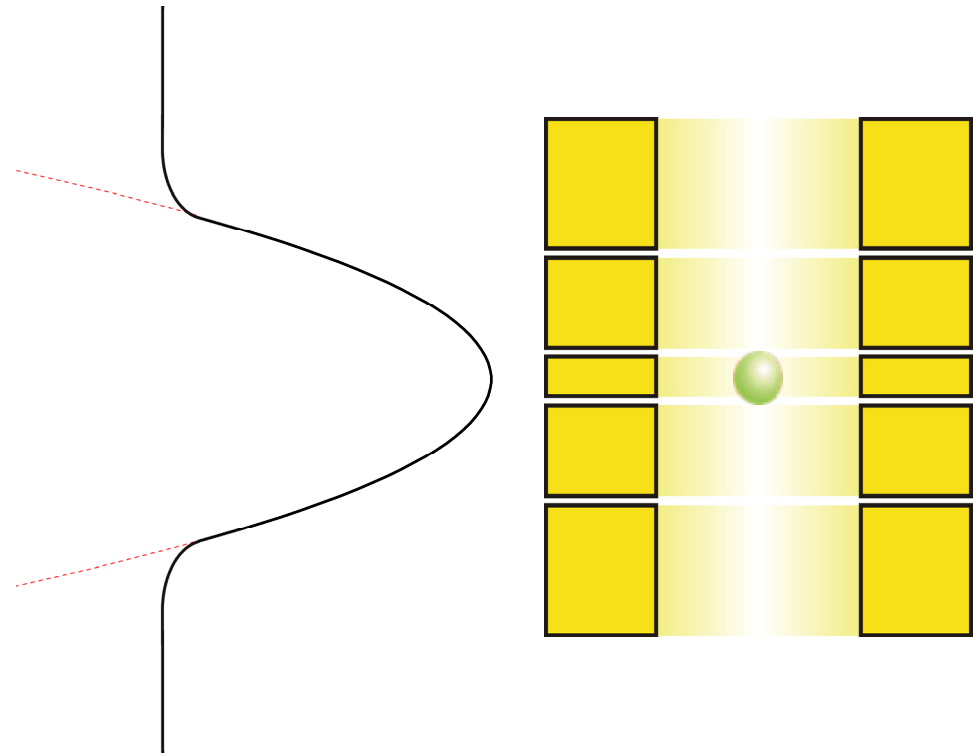


Ловушка Пеннинга

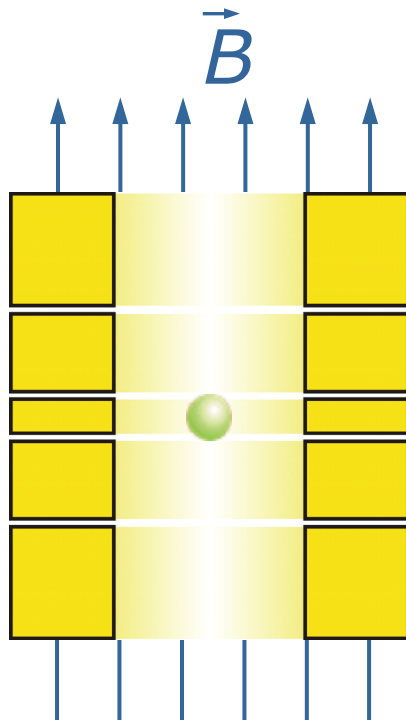
магнитное поле



электростатическое поле



Ловушка Пеннинга



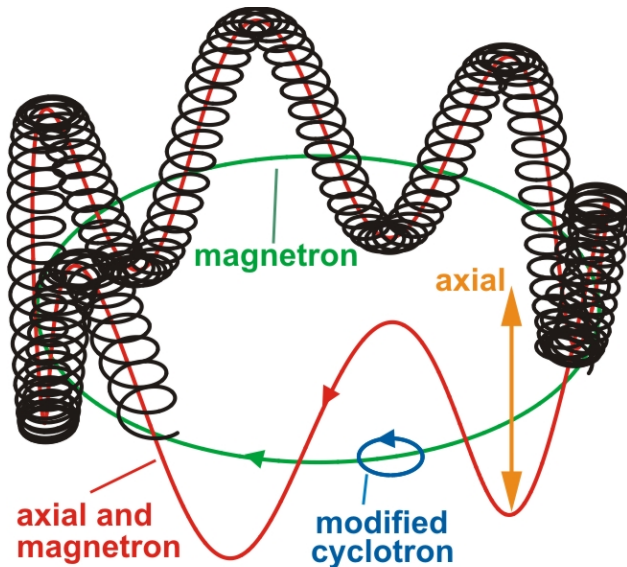
циклотронное движение ν_+
магнетронное движение ν_-
аксиальное движение ν_z

однорядные ионы ^{132}Xe :

$$\nu_+ \approx 800 \text{ кГц}$$

$$\nu_z \approx 40 \text{ кГц}$$

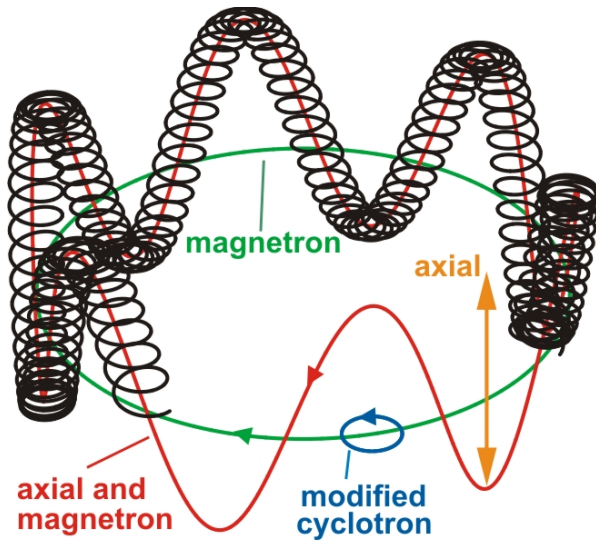
$$\nu_- \approx 1 \text{ кГц}$$



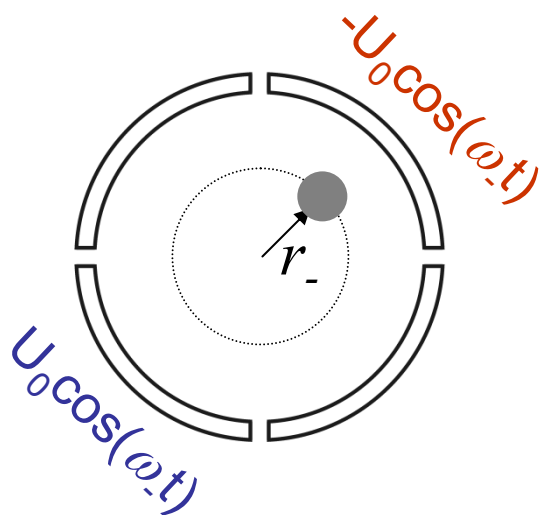
присутствие газа (гелий):

циклотронное v_+ и аксиальное v_z
затухают

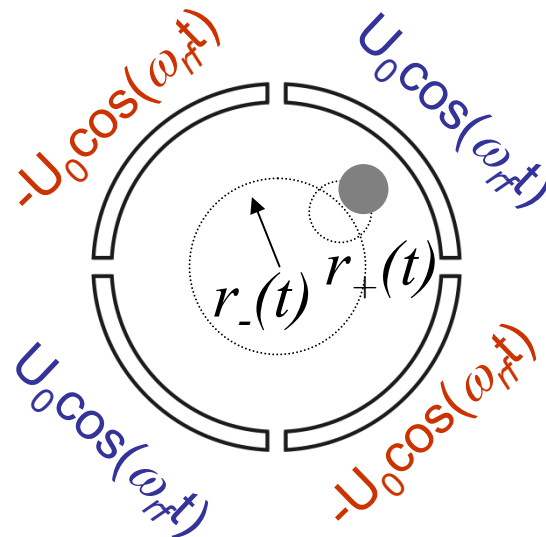
радиус магнетронного движения v_-
увеличивается !!!



возбуждение:



конвертация:



$$v_{rf} = v_+ + v_-$$

$$r_-^2(t) + r_+^2(t) = \text{Const}$$

циклотронное движение: $v_+ = v_c \cdot \left(\frac{1}{2} + \frac{1}{2} \sqrt{1 - 2v_z^2} \right)$

магнетронное движение: $v_- = v_c \cdot \left(\frac{1}{2} - \frac{1}{2} \sqrt{1 - 2v_z^2} \right)$

аксиальное движение: $v_z = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{q}{m} \cdot \frac{U}{d^2}}$

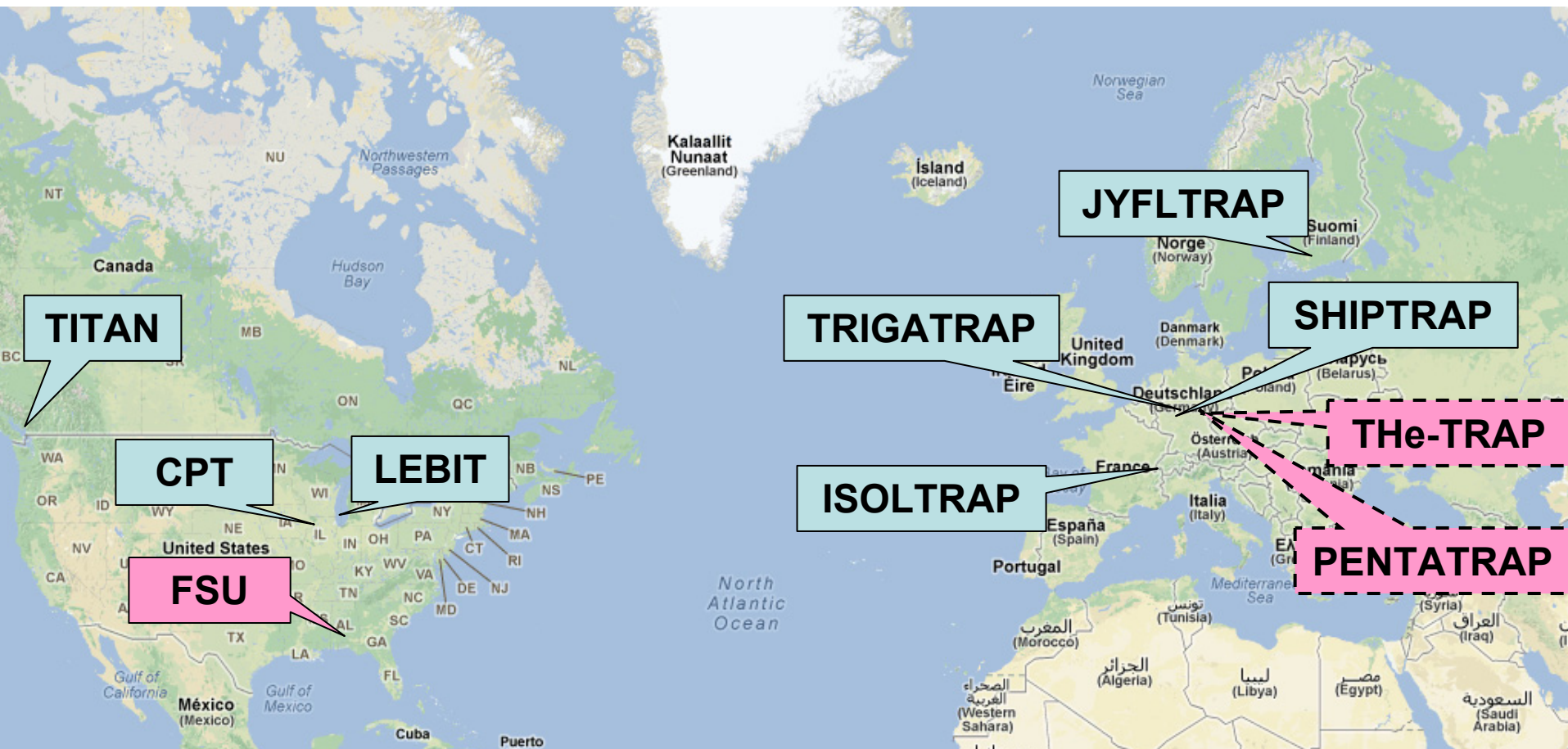
$$v_c^2 = v_+^2 + v_-^2 + v_z^2 \quad \frac{\delta v_c}{v_c} < 10^{-10}$$

долгоживущие и стабильные нуклиды

$$v_c = v_+ + v_- \quad \frac{\delta v_c}{v_c} > 10^{-10}$$

короткоживущие нуклиды

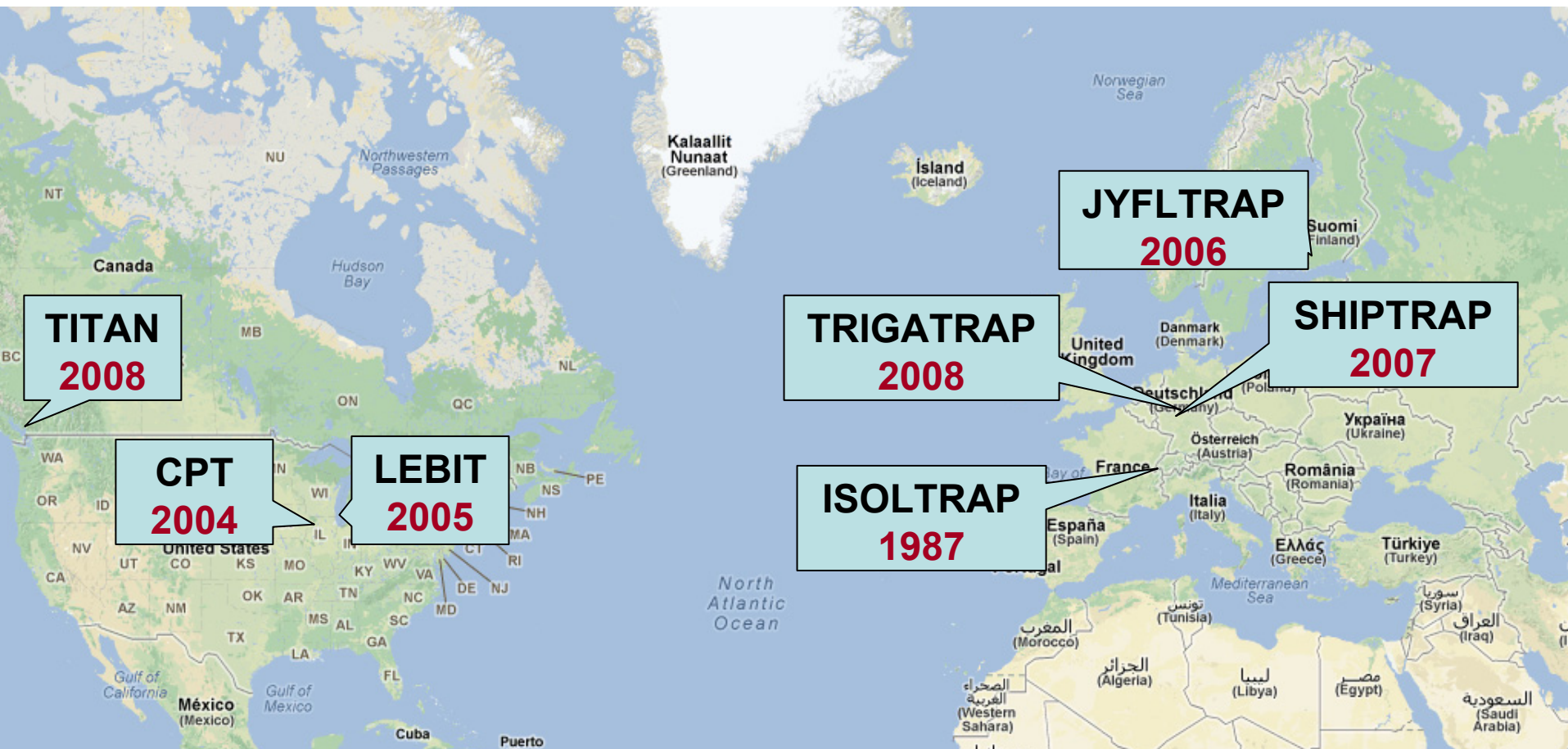
Установки на базе ловушек Пеннинга



on-line установки (короткоживущие нуклиды) $\delta m/m \sim 10^{-6} - 10^{-8}$ \longrightarrow методика ToF-ICR

off-line установка (стабильные нуклиды) $\delta m/m \sim 10^{-10}$ \longrightarrow методика FT-ICR

Установки на базе ловушек Пеннинга



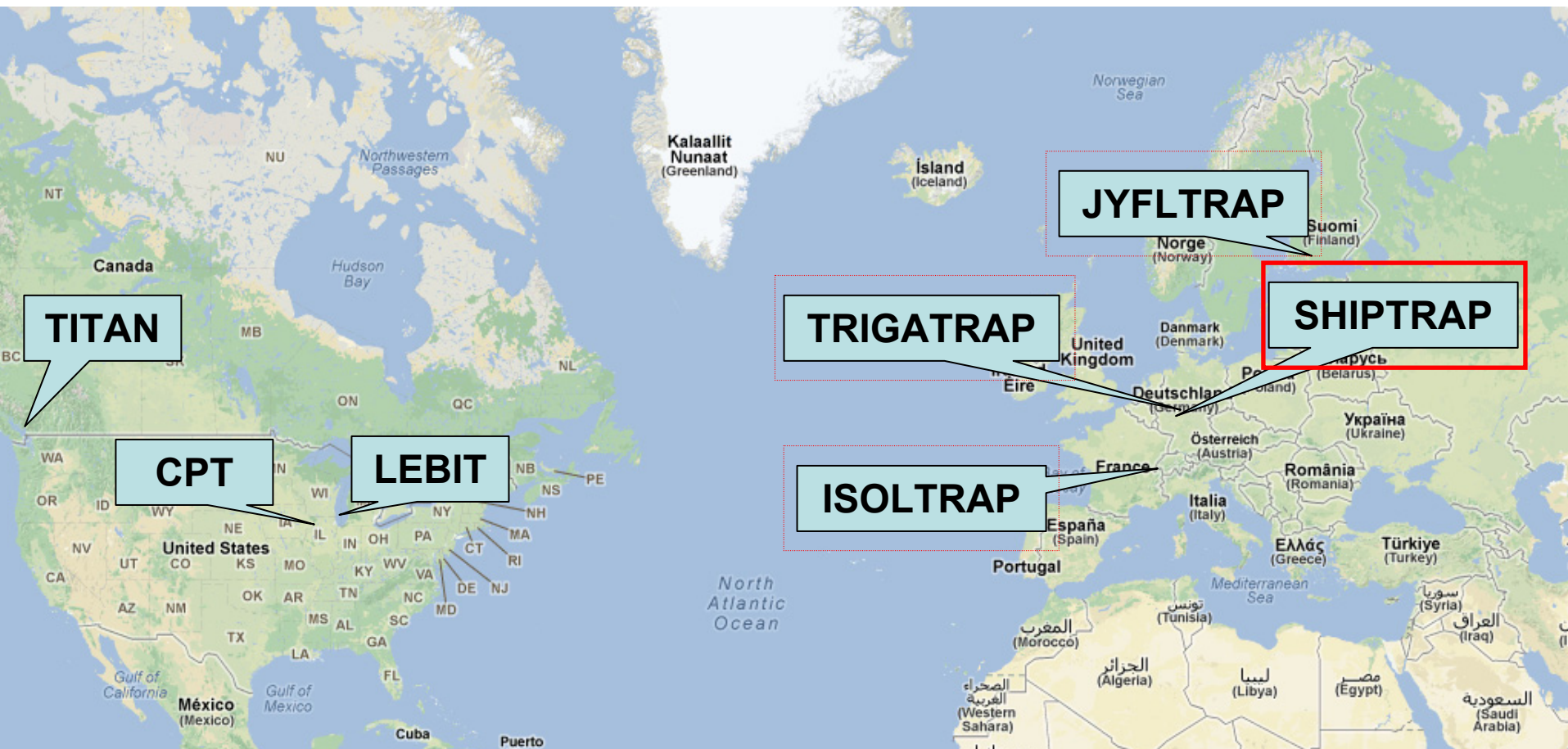
on-line установки (короткоживущие нуклиды)

$$\delta m/m \sim 10^{-6} - 10^{-8}$$

методика ToF-ICR

тип реакций	ISOLTRAP	TITAN	LEBIT	SHIPTRAP	JYFLTRAP	CPT	TRIGATRAP
фрагментация <i>p (0.5 или 1.4 ГэВ) + U</i>	●	●					
фрагментация <i>Ионы (100 МэВ/u) + Be</i>			●				
слияние - испарение				●	●		
спонтанное деление						●	
деление нейтронами							●

Установки на базе ловушек Пеннинга



on-line установки (короткоживущие нуклиды)

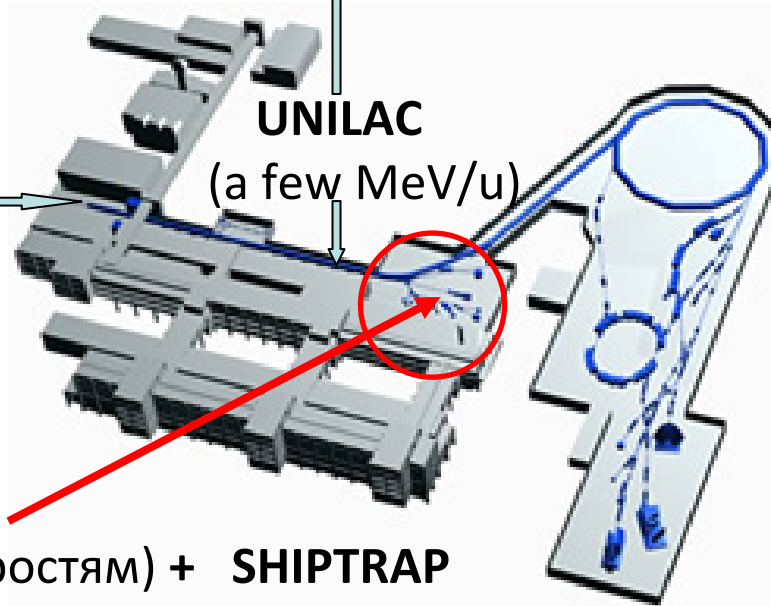
$$\delta m/m \sim 10^{-6} - 10^{-8}$$

методика ToF-ICR

Установка SHIPTRAP



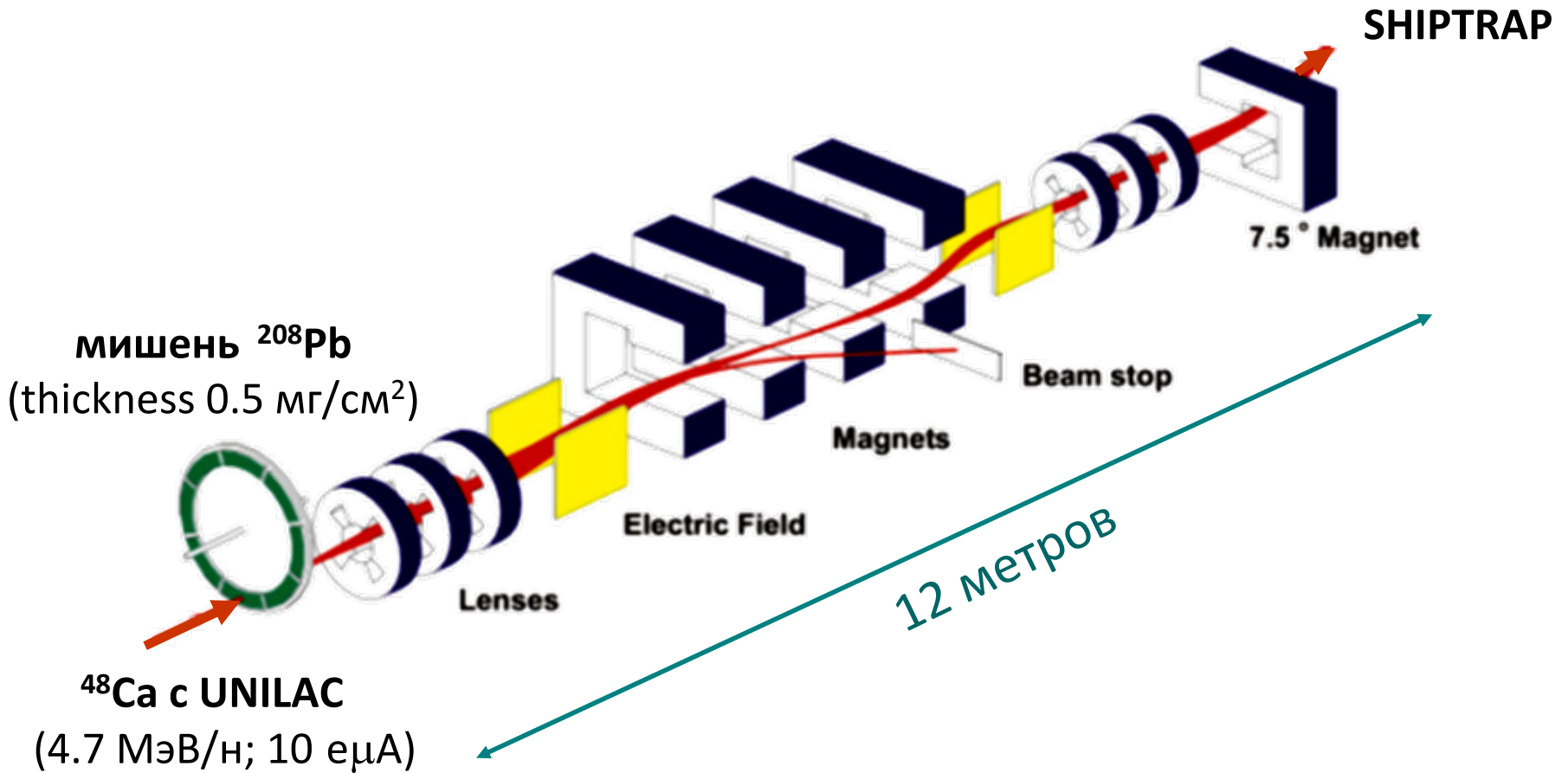
Ионные источники
(ICR, Penning)
протоны - уран



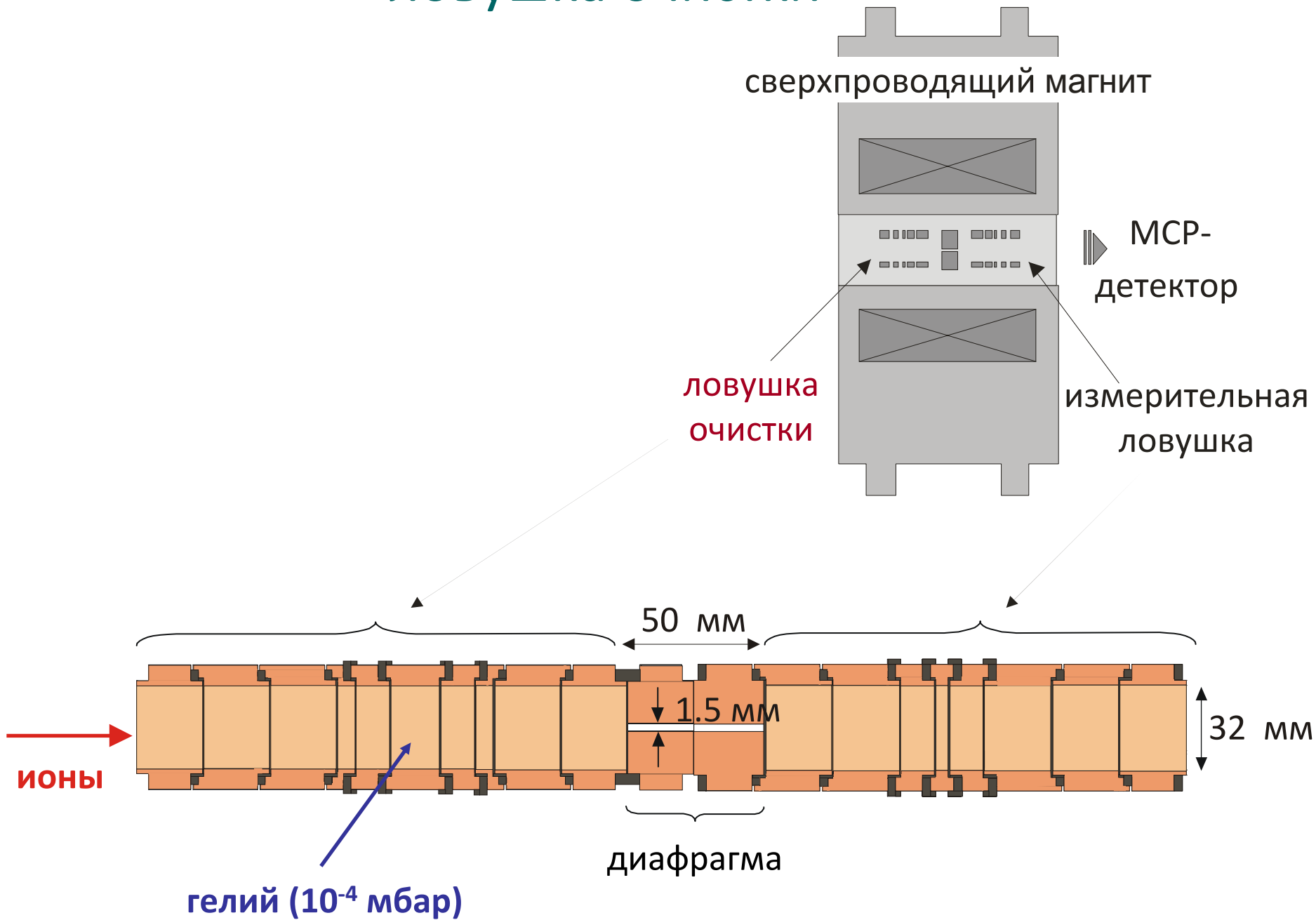
UNILAC
(a few MeV/u)

SHIP (фильтр по скоростям) + SHIPTRAP

Фильтр по скоростям SHIP



ЛОВУШКА ОЧИСТКИ



ЛОВУШКА ОЧИСТКИ

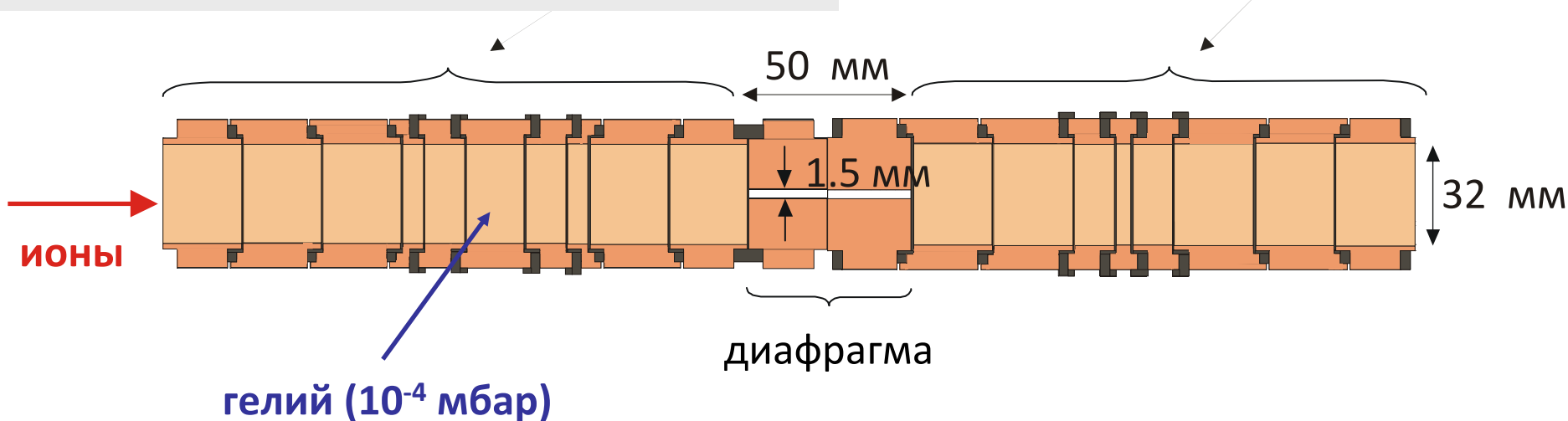
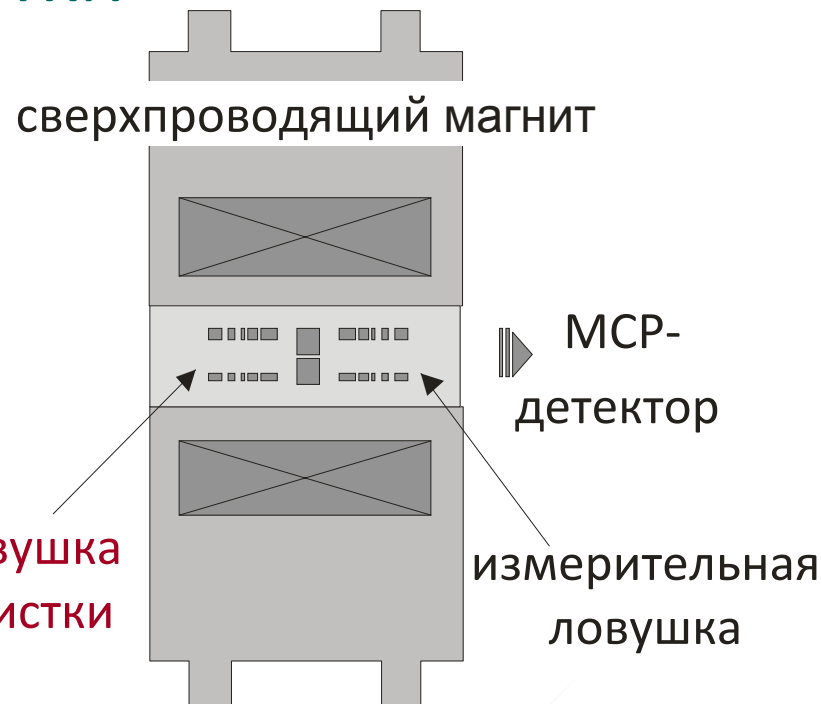
(1) захват ионов в ловушке очистки

(2) возбуждение v_- движения

(3) конвертация v_- в v_+ на частоте

$$v_c(M) = v_- + v_+(M)$$

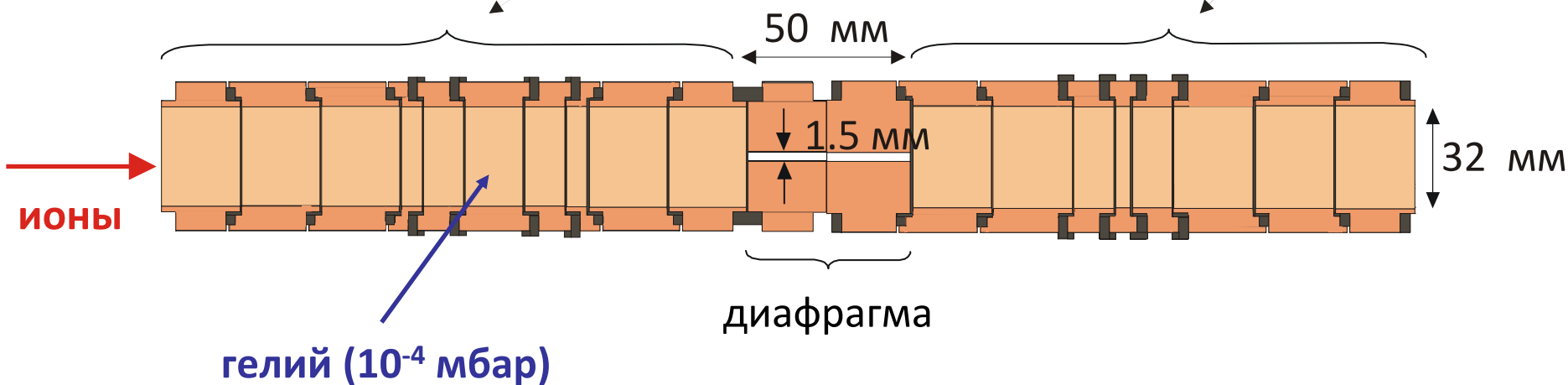
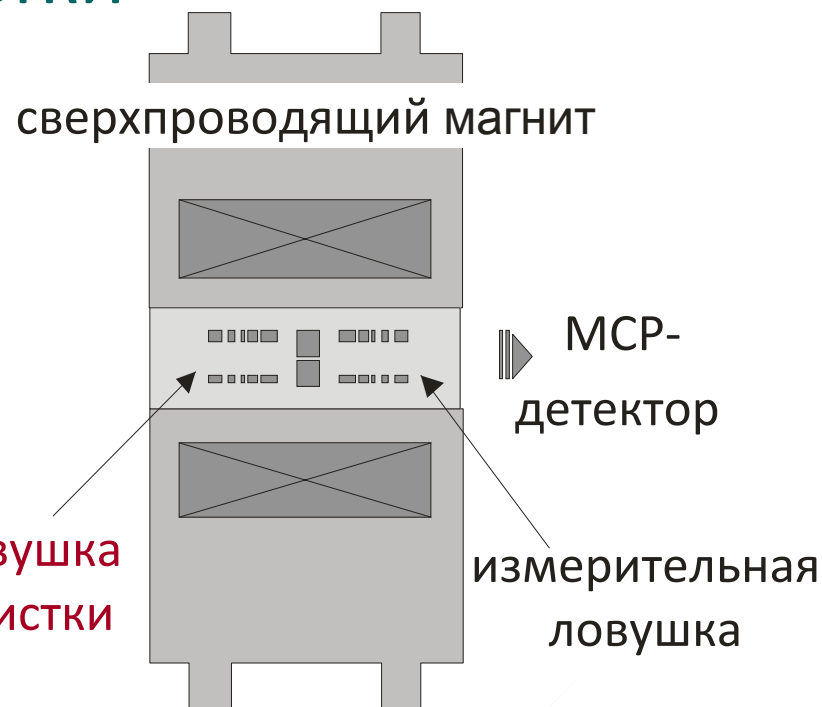
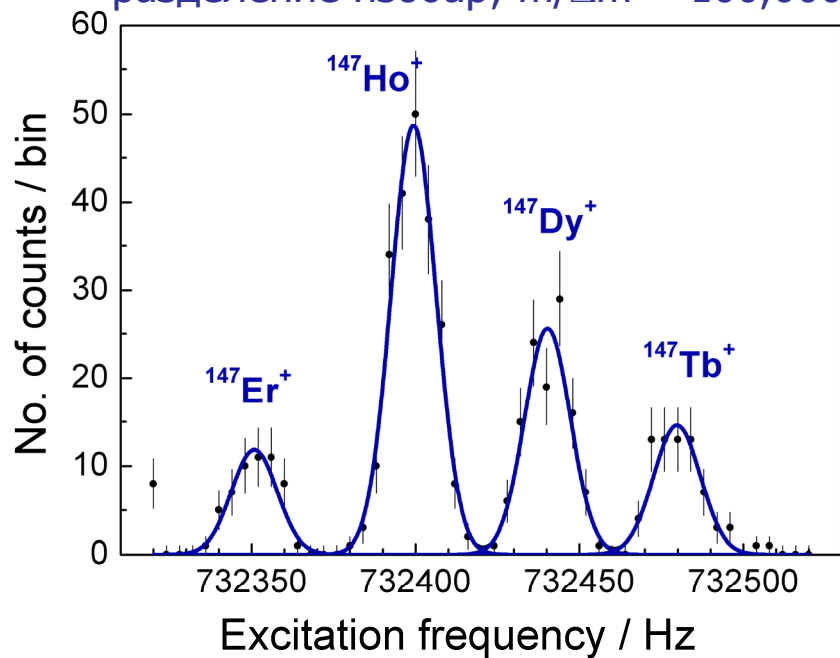
(4) транспортировка ионов M в измерительную ловушку



ЛОВУШКА ОЧИСТКИ

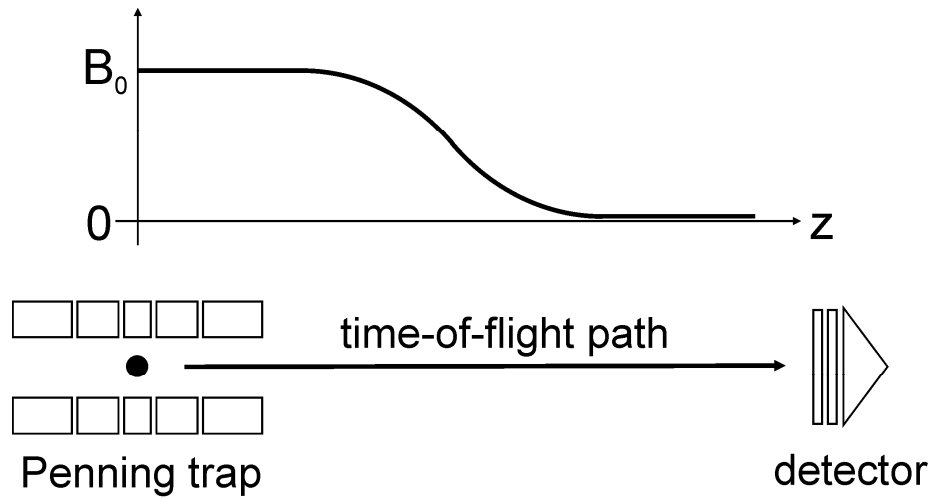


разделение изобар; $m/\Delta m \approx 100,000$



методика ToF-ICR

(Time-of-Flight Ion-Cyclotron-Resonance)



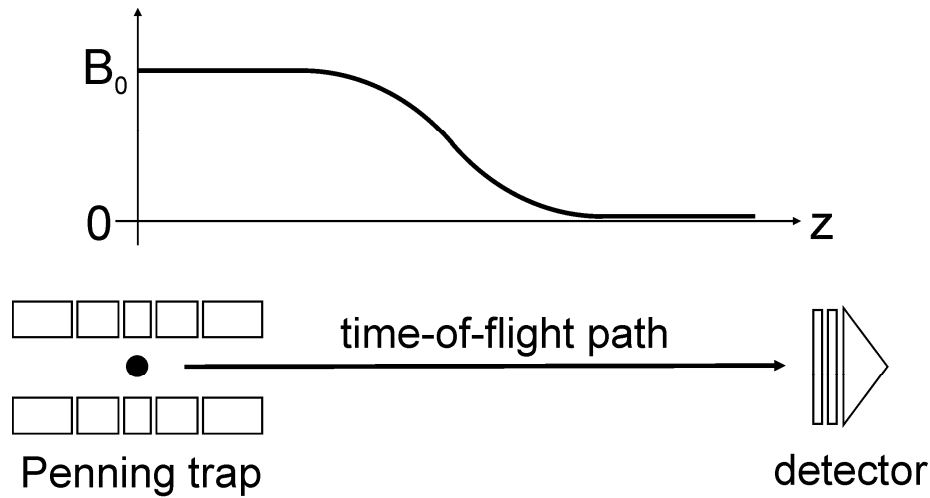
$$\vec{F} = -\vec{\mu} \cdot \frac{\partial \vec{B}}{\partial z}$$

$$|\mu| \sim v \cdot r^2$$

больше $\mu \rightarrow$ меньше ToF

методика ToF-ICR

(Time-of-Flight Ion-Cyclotron-Resonance)

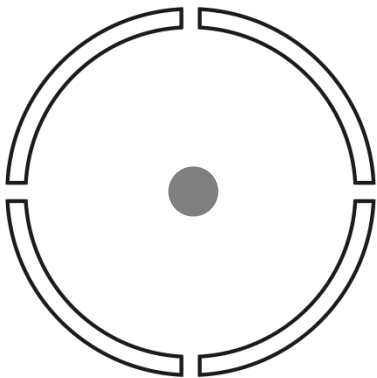


$$\vec{F} = -\vec{\mu} \cdot \frac{\partial \vec{B}}{\partial z}$$

$$|\mu| \sim v \cdot r^2$$

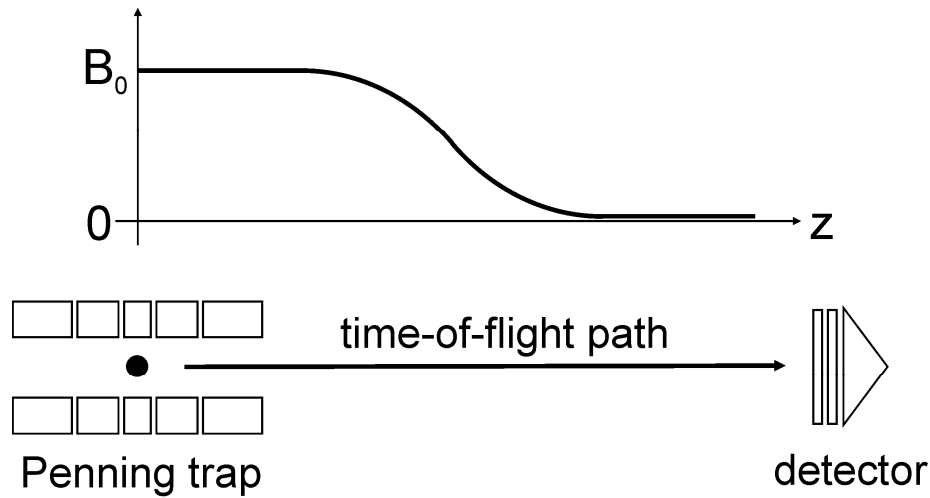
больше $\mu \rightarrow$ меньше ToF

захват



методика ToF-ICR

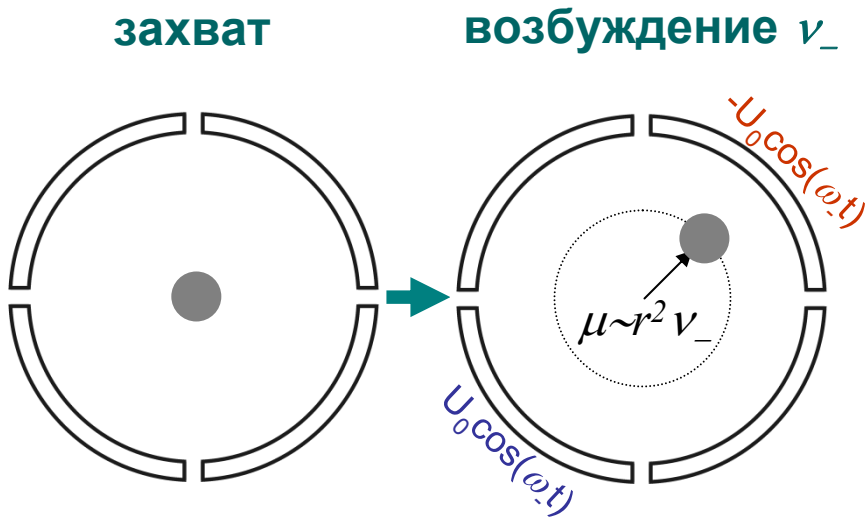
(Time-of-Flight Ion-Cyclotron-Resonance)



$$\vec{F} = -\vec{\mu} \cdot \frac{\partial \vec{B}}{\partial z}$$

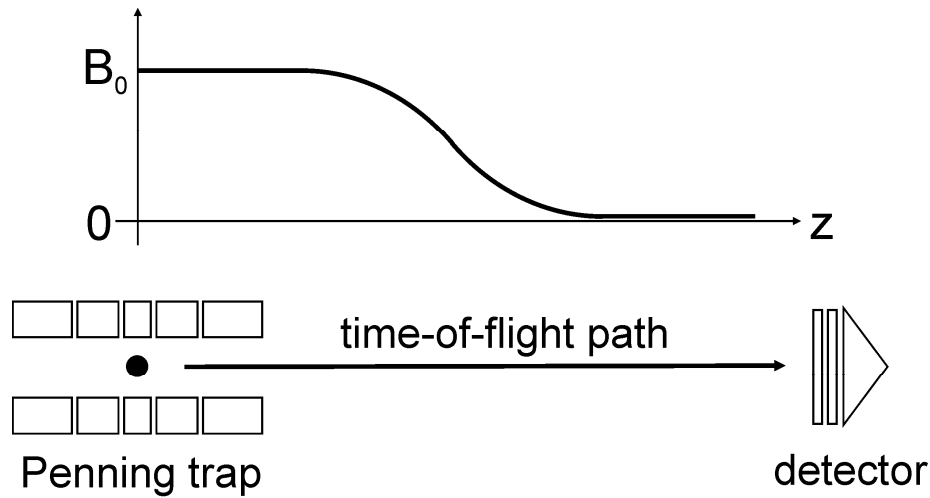
$$|\mu| \sim \nu \cdot r^2$$

больше $\mu \rightarrow$ меньше ToF



методика ToF-ICR

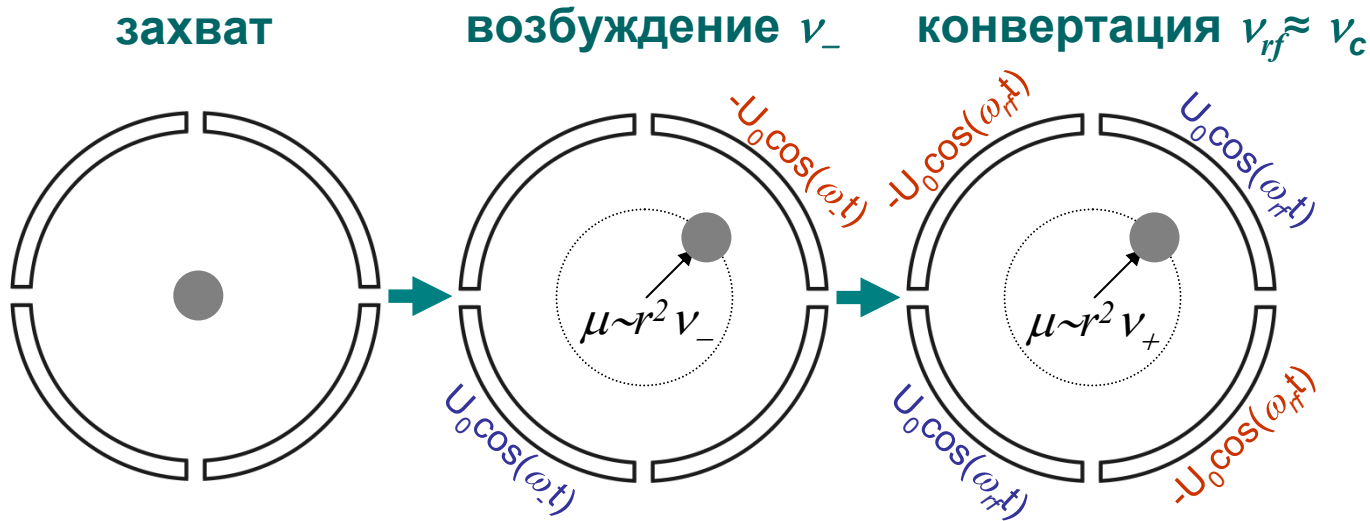
(Time-of-Flight Ion-Cyclotron-Resonance)



$$\vec{F} = -\vec{\mu} \cdot \frac{\partial \vec{B}}{\partial z}$$

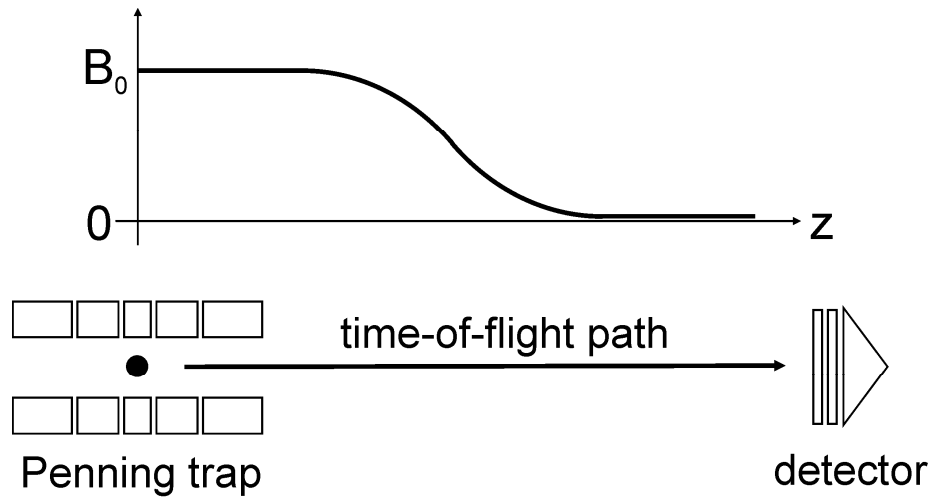
$$|\mu| \sim v \cdot r^2$$

больше $\mu \rightarrow$ меньше ToF



методика ToF-ICR

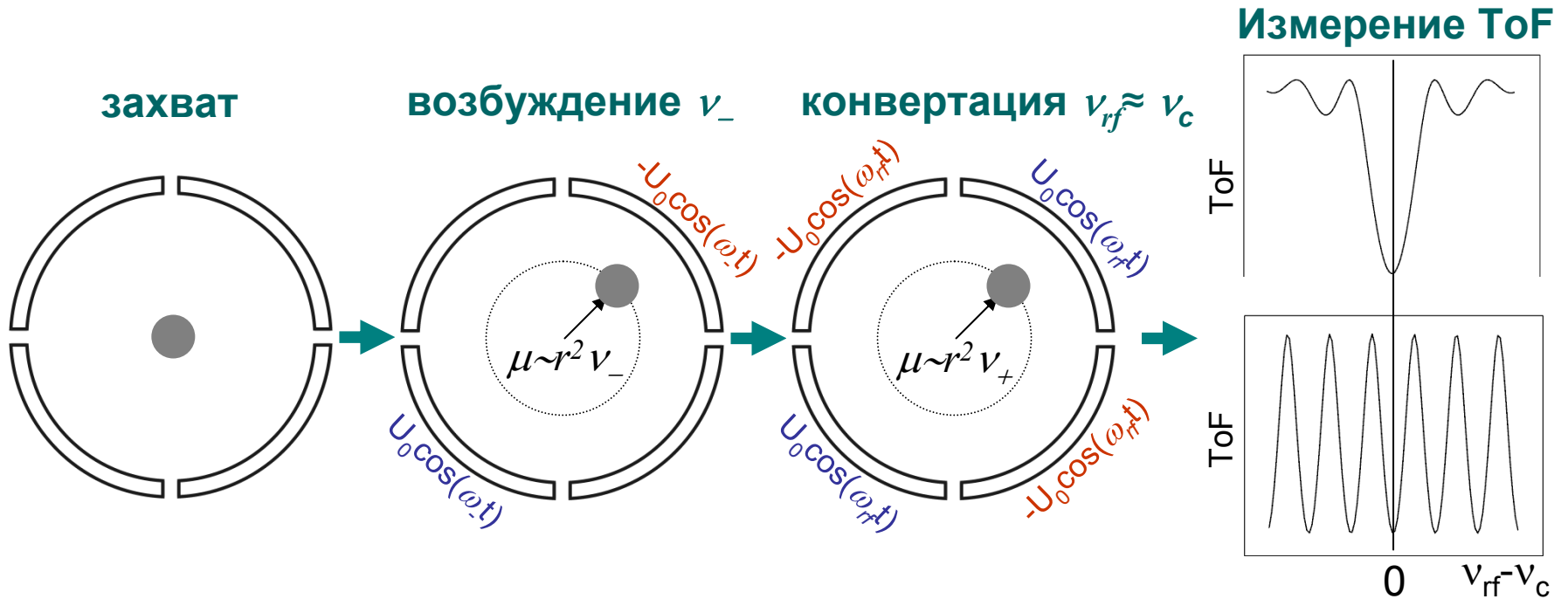
(Time-of-Flight Ion-Cyclotron-Resonance)



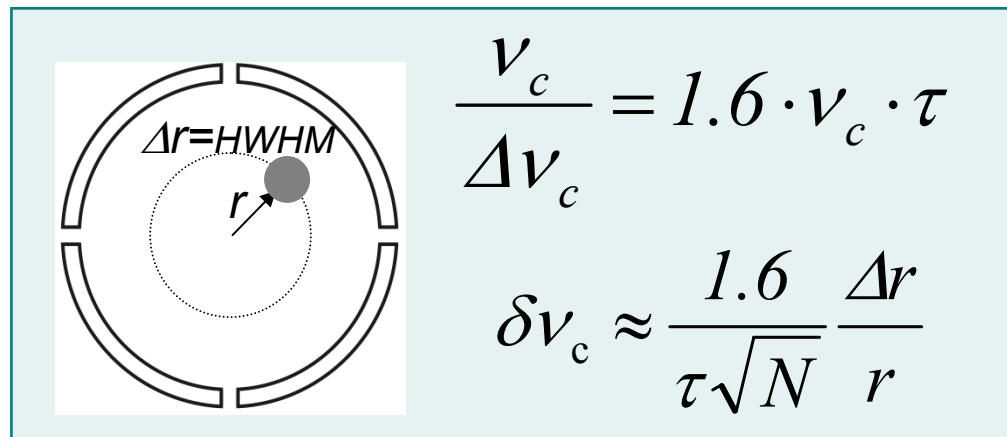
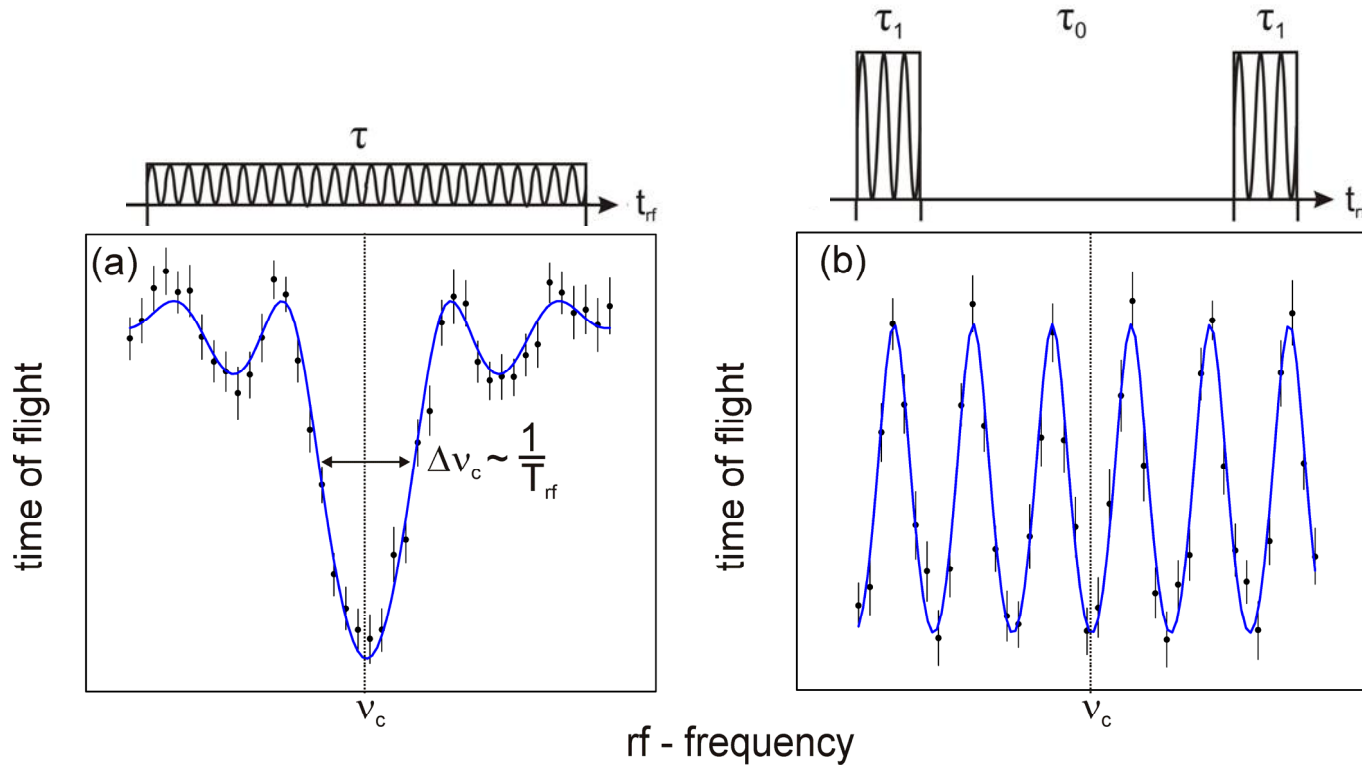
$$\vec{F} = -\vec{\mu} \cdot \frac{\partial \vec{B}}{\partial z}$$

$$|\mu| \sim v \cdot r^2$$

больше $\mu \rightarrow$ меньше ToF



методика ToF-ICR



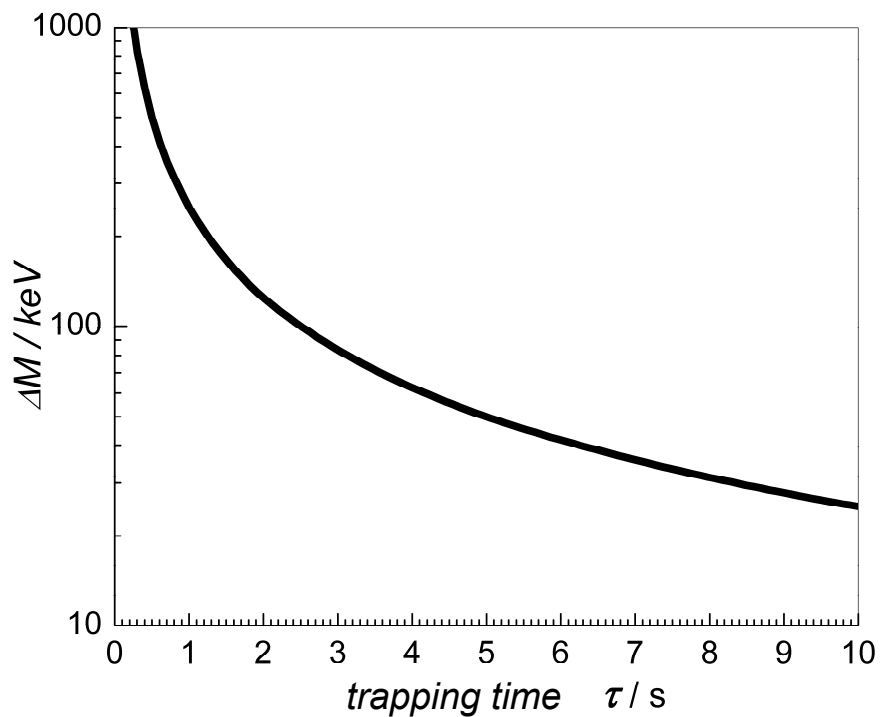
методика ToF-ICR

однорядные ионы $M=200$

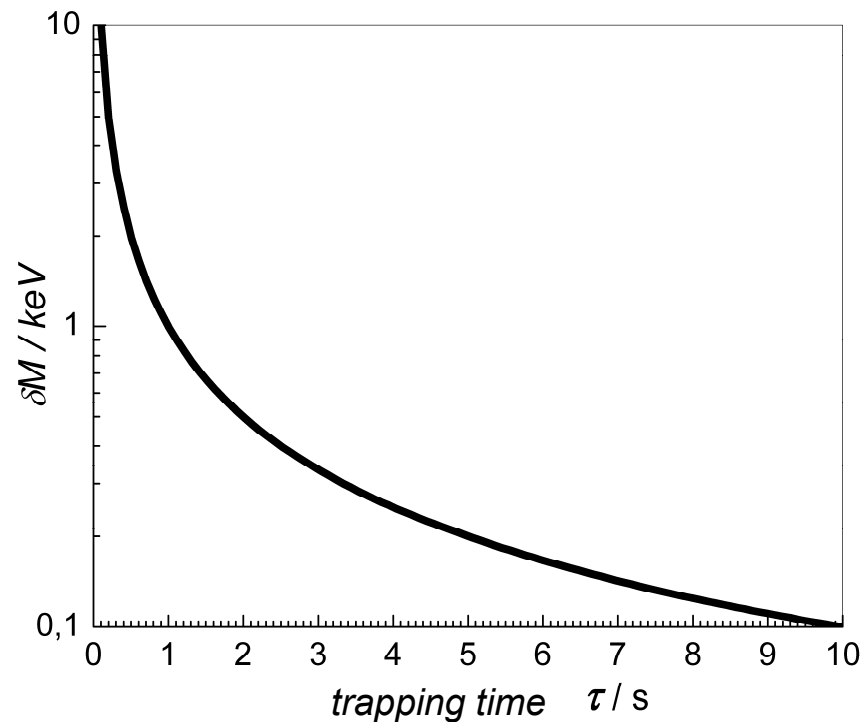
$\nu_c \approx 500$ кГц

$N=1000$

разрешающая способность

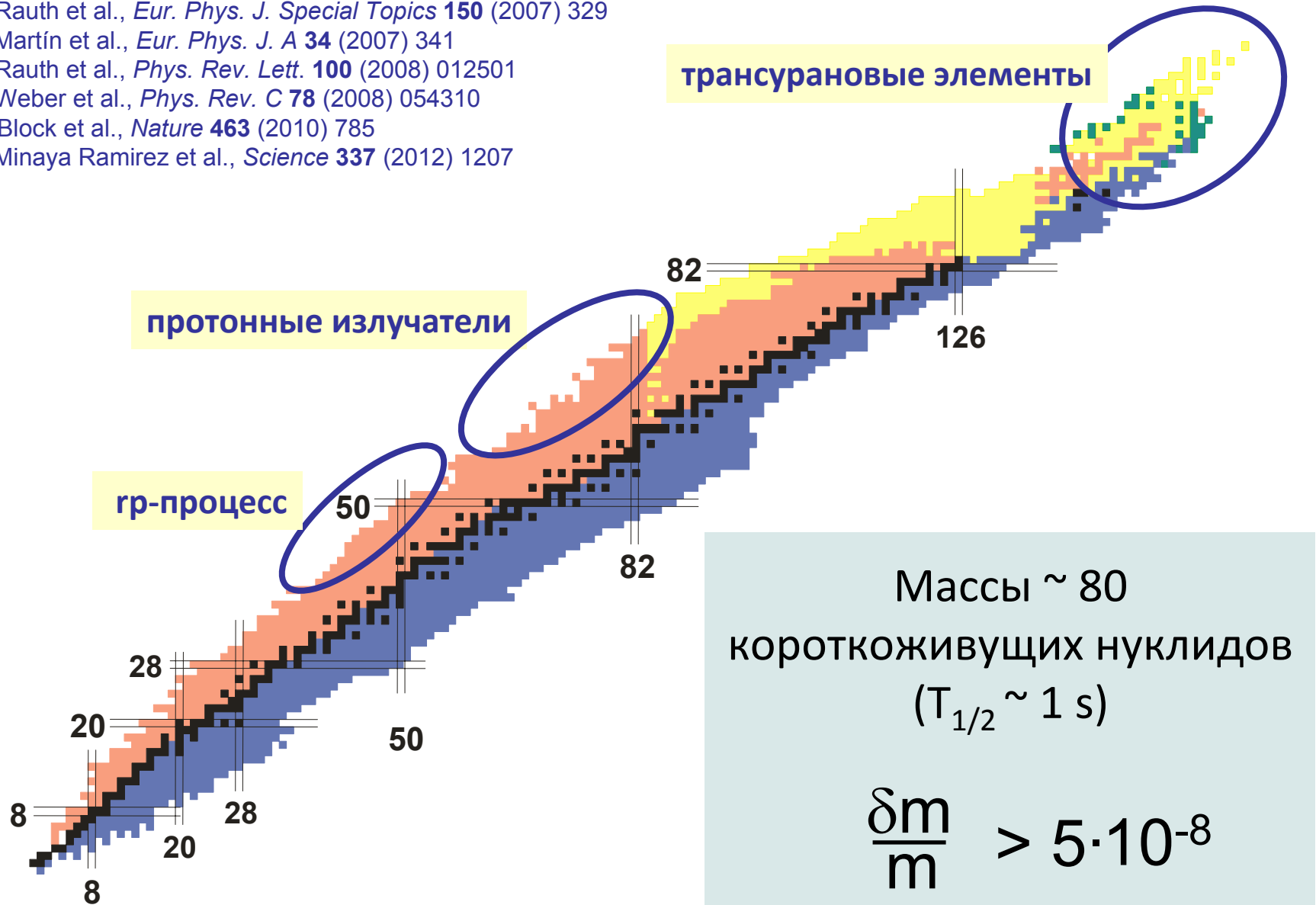


точность измерения массы



измерения на SHIPTRAP с 2007

- C. Rauth et al., *Eur. Phys. J. Special Topics* **150** (2007) 329
A. Martín et al., *Eur. Phys. J. A* **34** (2007) 341
C. Rauth et al., *Phys. Rev. Lett.* **100** (2008) 012501
C. Weber et al., *Phys. Rev. C* **78** (2008) 054310
M. Block et al., *Nature* **463** (2010) 785
E. Minaya Ramirez et al., *Science* **337** (2012) 1207

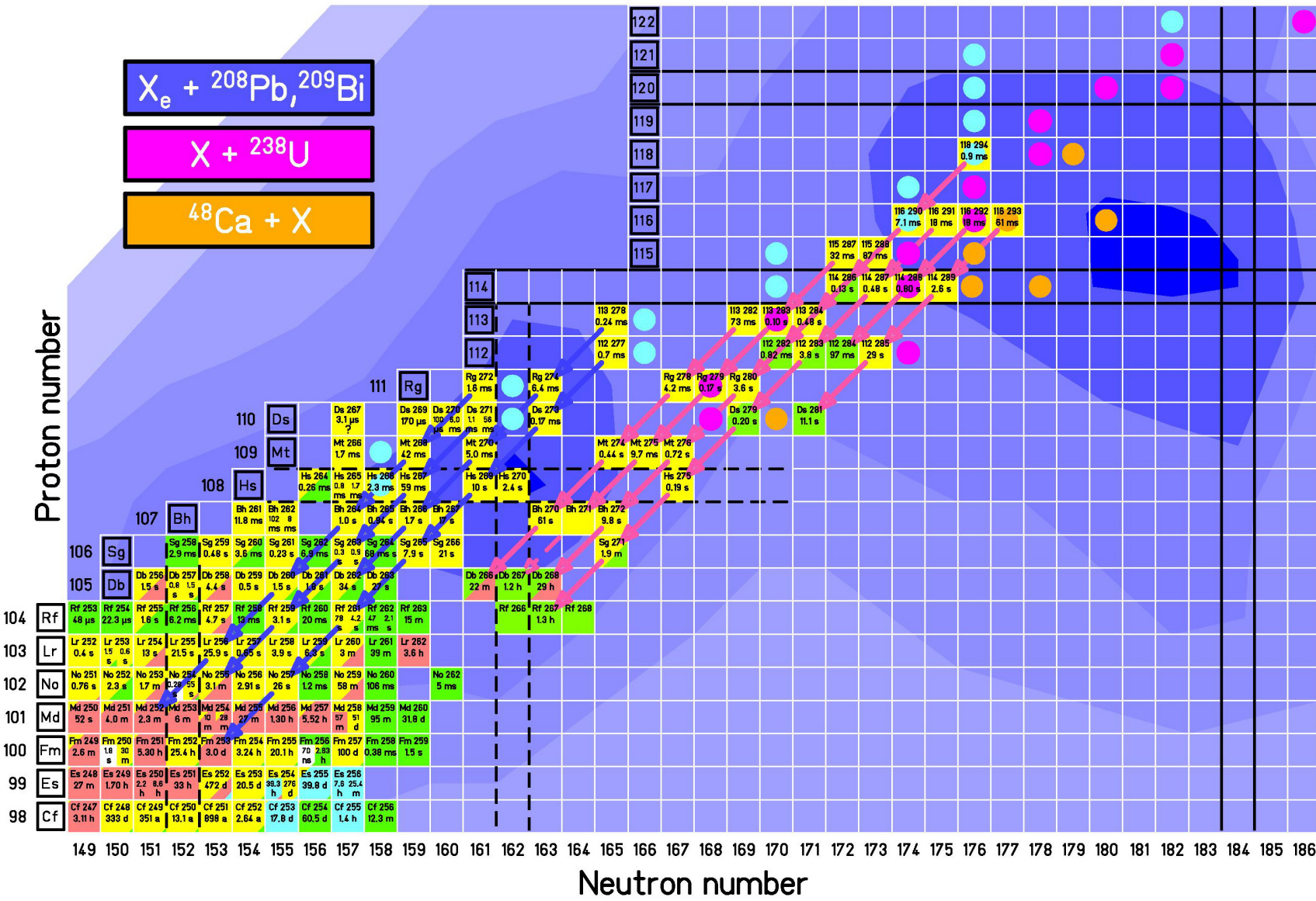
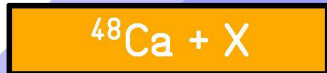


трансурановые элементы

- Zr
- Y
- Sr
- Rb
- Kr
- Br
- Se
- As
- Ge
- Ga
- Zn
- Cu
- Ni
- Co
- Fe

- Zn
- Cu
- Ni
- Co
- Fe
- Mn
- Cr
- V
- Ti
- Sc
- Ca
- K
- Ar
- Cl
- S
- P
- Si
- Al
- Mg
- Na
- Ne

- X
- X

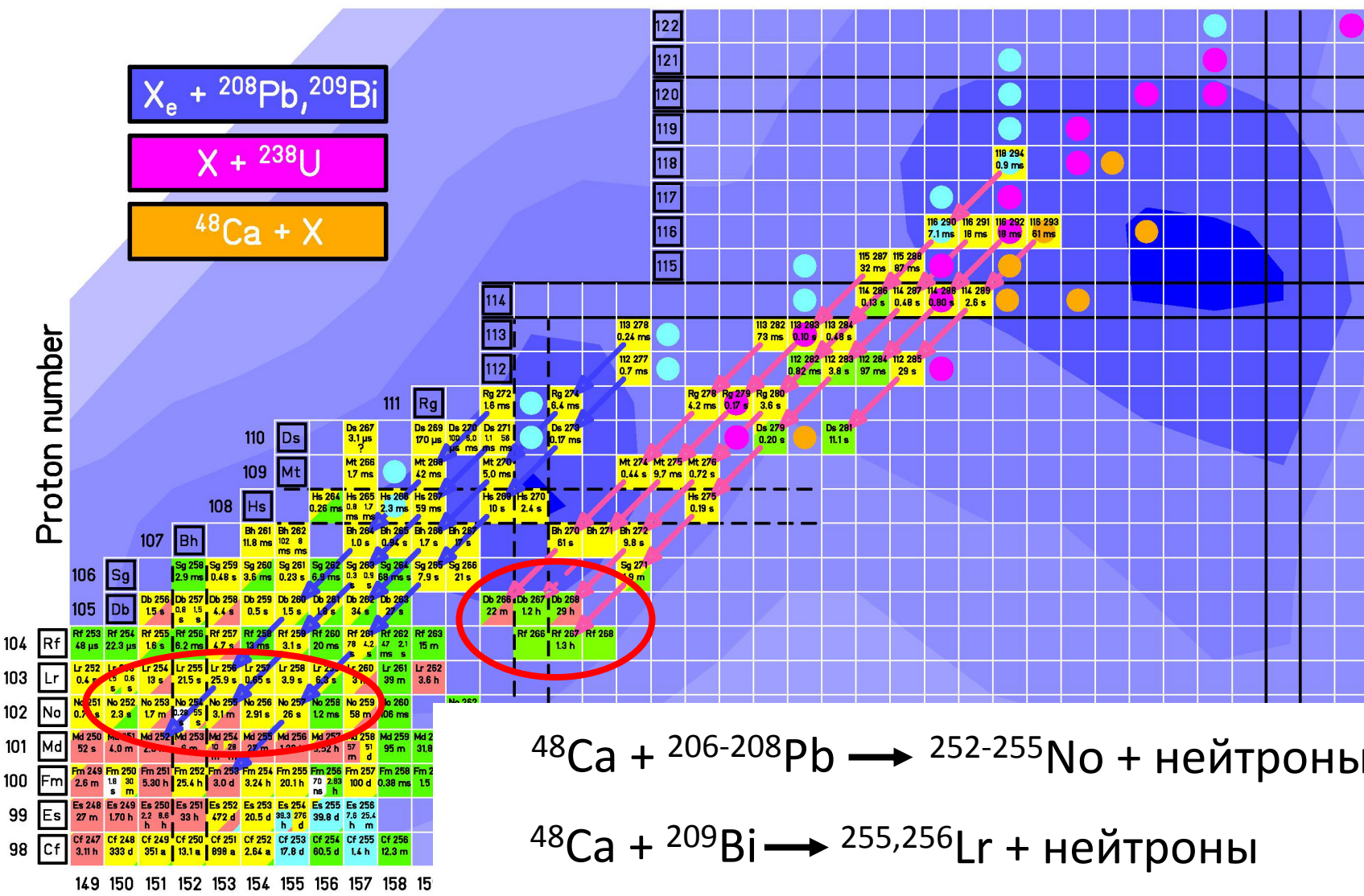


Neutron number

Proton number

трансурановые элементы

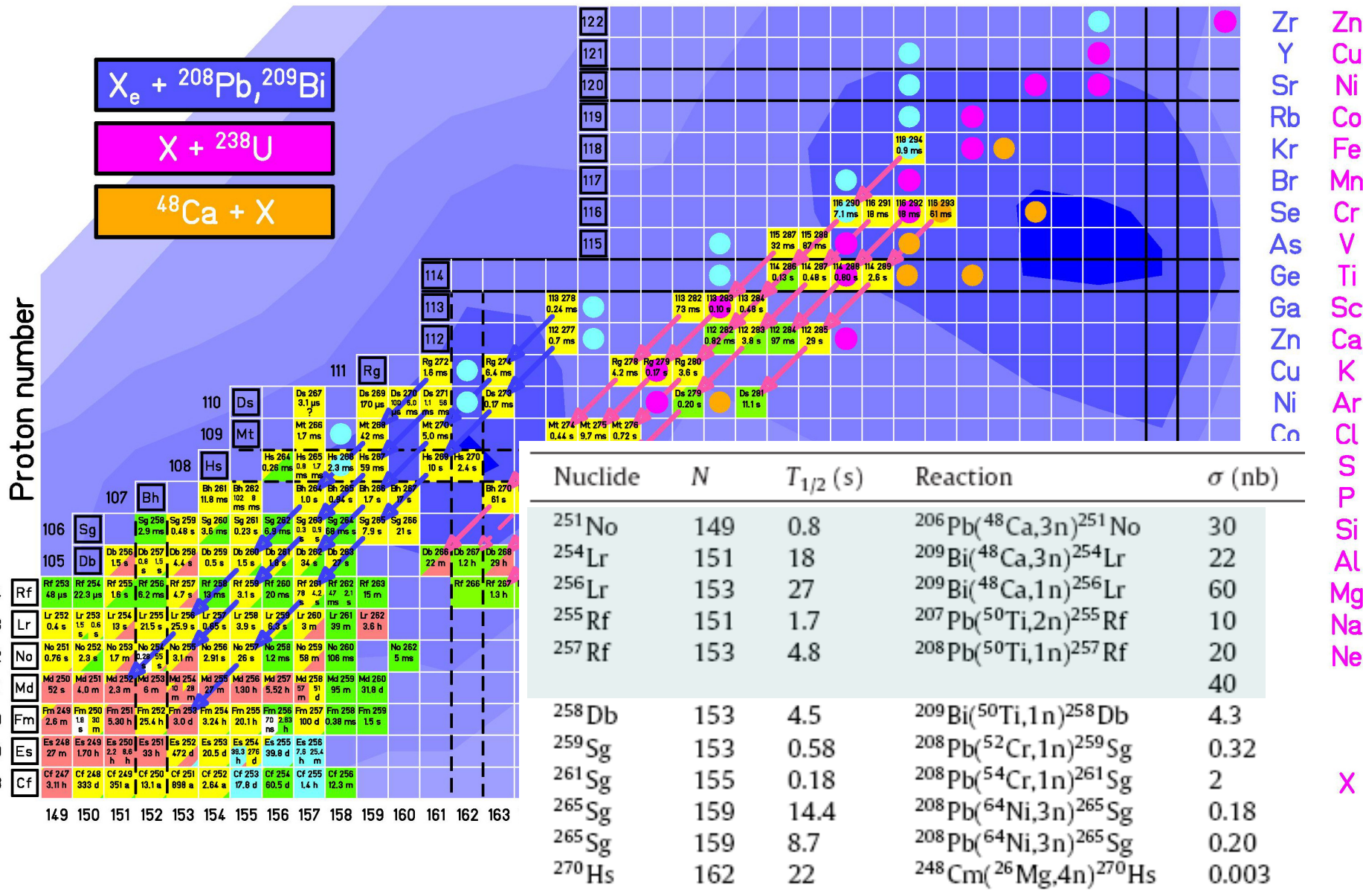
- Zr
- Y
- Sr
- Rb
- Kr
- Br
- Se
- As
- Ge
- Ga
- Zn
- Cu
- Ni
- Co
- Fe
- Zn
- Cu
- Ni
- Co
- Fe
- Mn
- Cr
- V
- Ti
- Sc
- Ca
- K
- Ar
- Cl
- S
- P
- Si
- Al
- Mg
- Na
- ..



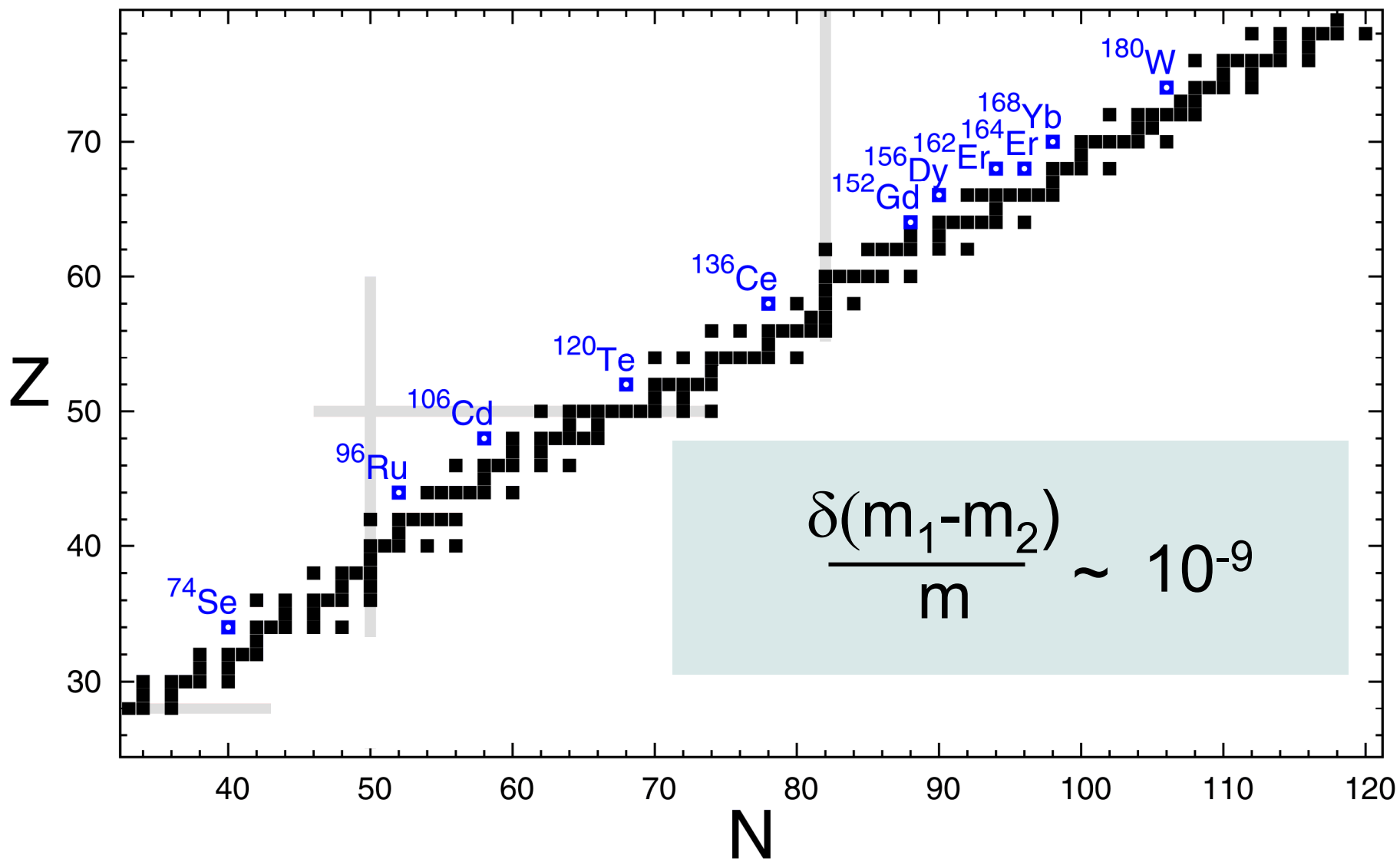
трансурановые элементы

нуклид	$T_{1/2}(gs)$	$T_{1/2}(is)$	реакция	σ	счёт в ловушке
^{252}No	2.44 с	110 мс	$^{206}\text{Pb}(^{48}\text{Ca},2n)^{252}\text{No}$	400 нбарн	3.3 ионов / час
^{253}No	1.62 мин	<1 мс	$^{207}\text{Pb}(^{48}\text{Ca},2n)^{253}\text{No}$	1 мбарн	8 ионов / час
^{254}No	51 с	266 мс	$^{208}\text{Pb}(^{48}\text{Ca},2n)^{254}\text{No}$	1.8 мбарн	15 ионов / час
^{255}No	3.52 мин	-	$^{208}\text{Pb}(^{48}\text{Ca},1n)^{255}\text{No}$	140 нбарн	1 ионов / час
^{255}Lr	31.1 с	2.54 с	$^{209}\text{Bi}(^{48}\text{Ca},2n)^{255}\text{Lr}$	200 нбарн	1.5 ионов / час
^{256}Lr	27 с	266 мс	$^{209}\text{Bi}(^{48}\text{Ca},1n)^{256}\text{Lr}$	60 нбарн	0.5 ионов / час (48 ионов / 93 часа)

трансурановые элементы

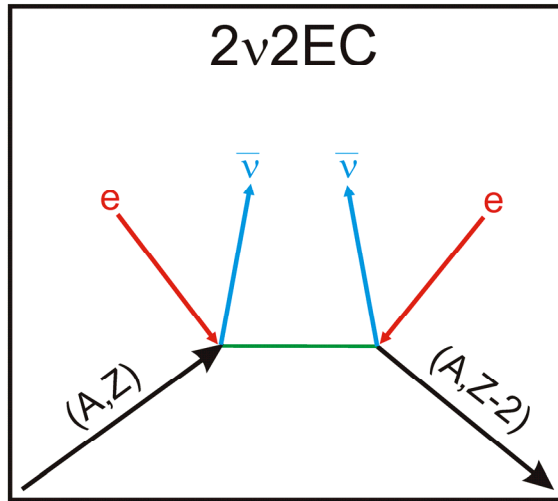


поиск резонансно-ускоренных $0\nu 2EC$ переходов

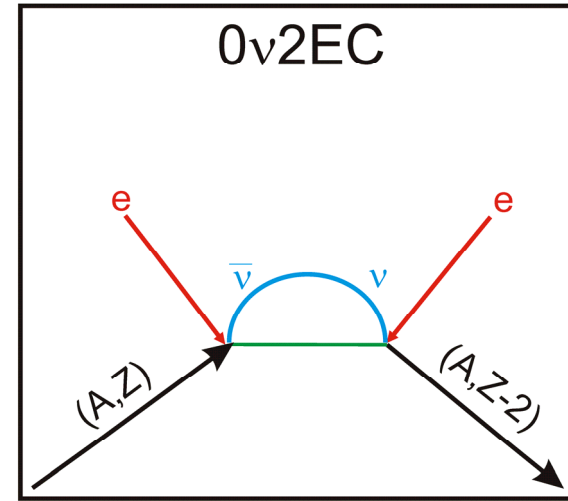


захват двух орбитальных электронов ядром

двух-нейтринный ($2\nu 2EC$)

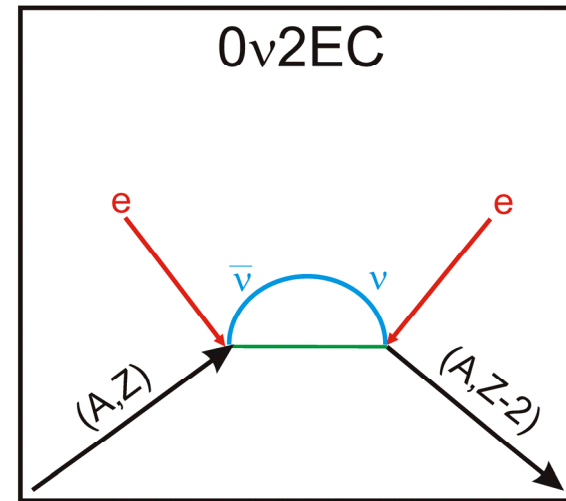


безнейтринный ($0\nu 2EC$)



захват двух орбитальных электронов ядром

безнейтринный ($0\nu 2EC$)



если существует:

- нейтрино – частицы Майорана, $\nu = \bar{\nu}$
- нарушение полного лептонного числа

измерение периода полураспада:

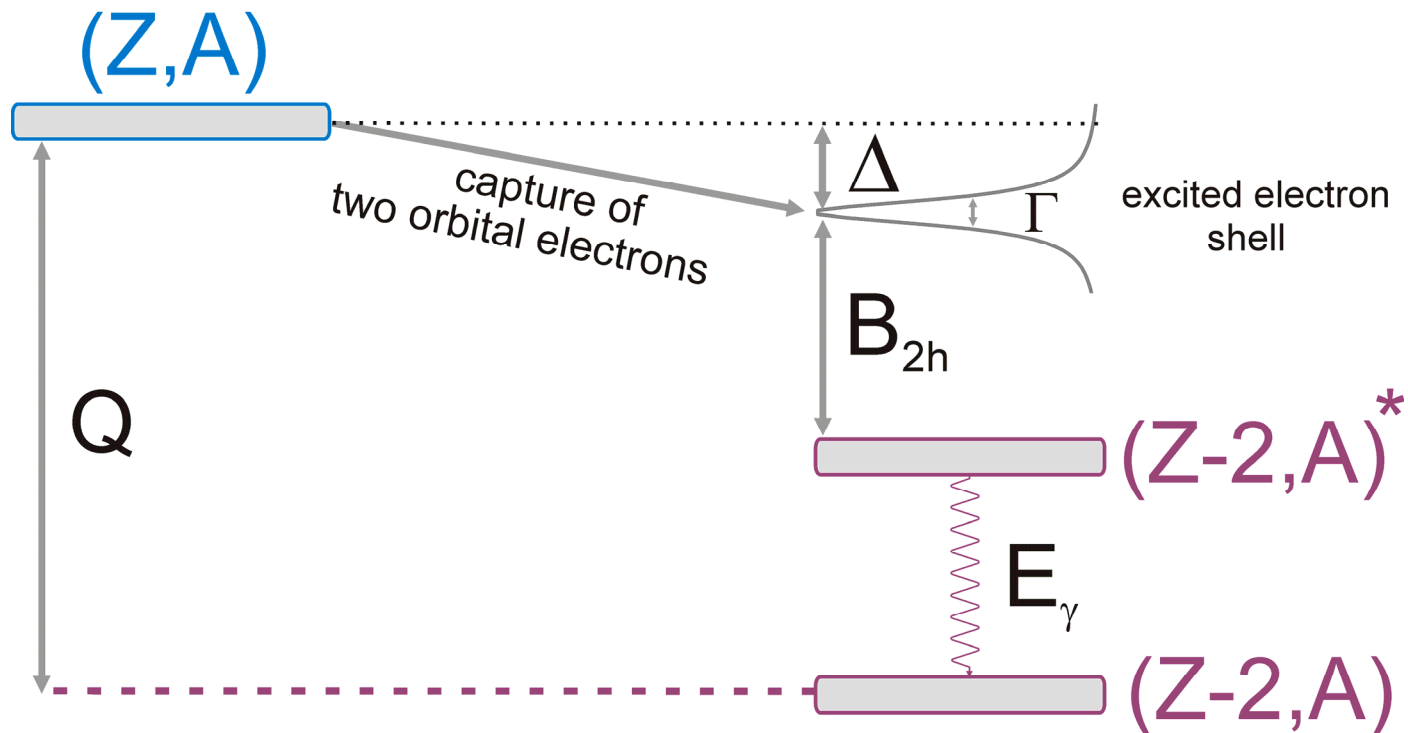
- эффективная майорановская масса нейтрино

$$|m_{\beta\beta}| = \left| \sum_i U_{ei}^2 \cdot m_i \right|$$

безнейтринный двойной электронный захват

ожидаемый $T_{1/2} > 10^{30}$ лет

$$\frac{1}{T_{1/2}} \sim \frac{\Gamma}{(Q - B_{2h} - E_\gamma)^2 + \frac{1}{4}\Gamma^2}$$



безнейтринный двойной электронный захват

ожидаемый $T_{1/2} > 10^{30}$ лет

$$\frac{1}{T_{1/2}} \sim \frac{\Gamma}{\left(\cancel{Q - B_{2h} - E_\gamma}\right)^2 + \frac{1}{4}\Gamma^2}$$

резонансное усиление процесса: $T_{1/2} < 10^{23}$ лет

безнейтринный двойной электронный захват

ожидаемый $T_{1/2} > 10^{30}$ лет

$$\frac{1}{T_{1/2}} \sim \frac{\Gamma}{\left(\cancel{Q - B_{2h} - E_\gamma}\right)^2 + \frac{1}{4}\Gamma^2}$$

резонансное усиление процесса: $T_{1/2} < 10^{23}$ лет

поиск переходов с $(Q - B_{2h} - E_\gamma) < 1$ кэВ



измерение $Q = M_1 - M_2$ с точностью ~ 100 эВ

измерение Q-значений на SHIPTRAP

ИСТОЧНИКИ ИОНОВ

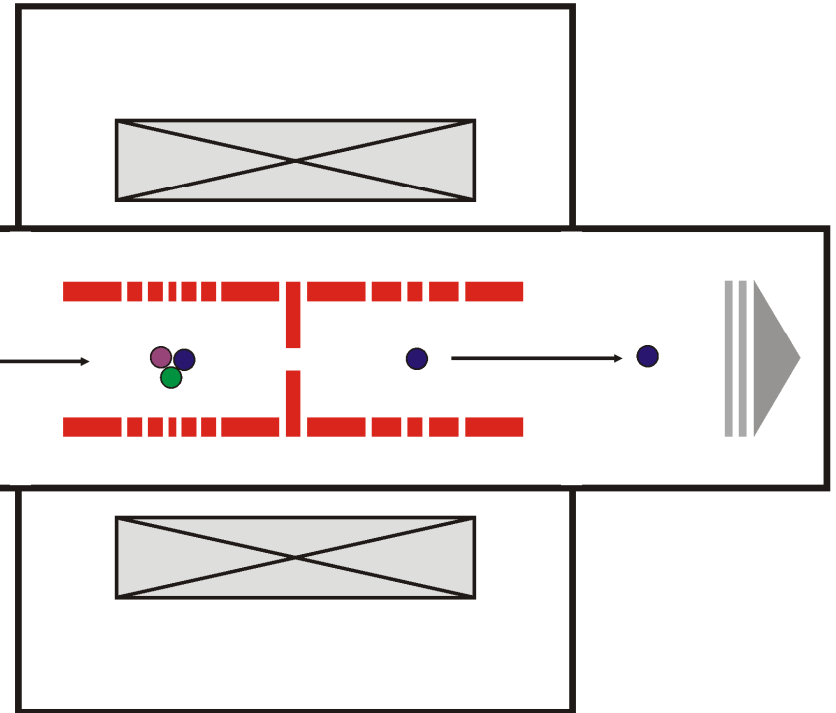
ловушки Пеннинга

газовый
ионный источник

мишени

лазерный ионный
источник

Nd:YAG лазер



$$Q = M_{\text{mother}} - M_{\text{daughter}} = M_{\text{daughter}} \cdot \left[\frac{v_c^{\text{daughter}}}{v_c^{\text{mother}}} - 1 \right]$$

исследованные $0\nu 2EC$ переходы

$^{112}\text{Sn} \rightarrow ^{112}\text{Cd}$	JYFLTRAP , S. Rahaman <i>et al.</i> , Phys. Rev. Lett. 103, 042501 (2009)
$^{74}\text{Se} \rightarrow ^{74}\text{Ge}$	JYFLTRAP , V. S. Kolhinen <i>et al.</i> , Phys. Lett. B 684, 17 (2010) FSU , B. J. Mount <i>et al.</i> , Phys. Rev. C 81, 032501(R) (2010)
$^{136}\text{Ce} \rightarrow ^{136}\text{Ba}$	JYFLTRAP , V. S. Kolhinen <i>et al.</i> , Phys. Lett. B 697, 116 (2011)
$^{152}\text{Gd} \rightarrow ^{152}\text{Sm}$	<h2>измерения на SHIPTRAP/GSI</h2> <p>Phys. Rev. Lett. 106 (2011) 052504; 107 (2011) 152501; Phys. Rev. C 83 (2011) 038501; 84 (2011) 028501; 84 (2011) 012501; Nucl. Phys. A 875 (2012) 1;</p> <p>программа измерений завершена !</p>
$^{164}\text{Er} \rightarrow ^{164}\text{Dy}$	
$^{180}\text{W} \rightarrow ^{180}\text{Hf}$	
$^{96}\text{Ru} \rightarrow ^{96}\text{Mo}$	
$^{162}\text{Er} \rightarrow ^{162}\text{Dy}$	
$^{168}\text{Yb} \rightarrow ^{168}\text{Er}$	
$^{106}\text{Cd} \rightarrow ^{106}\text{Pd}$	
$^{156}\text{Dy} \rightarrow ^{156}\text{Gd}$	
$^{124}\text{Xe} \rightarrow ^{124}\text{Te}$	
$^{130}\text{Ba} \rightarrow ^{130}\text{Xe}$	
$^{184}\text{Os} \rightarrow ^{184}\text{W}$	

$0^+ \rightarrow 0^+$ переходы

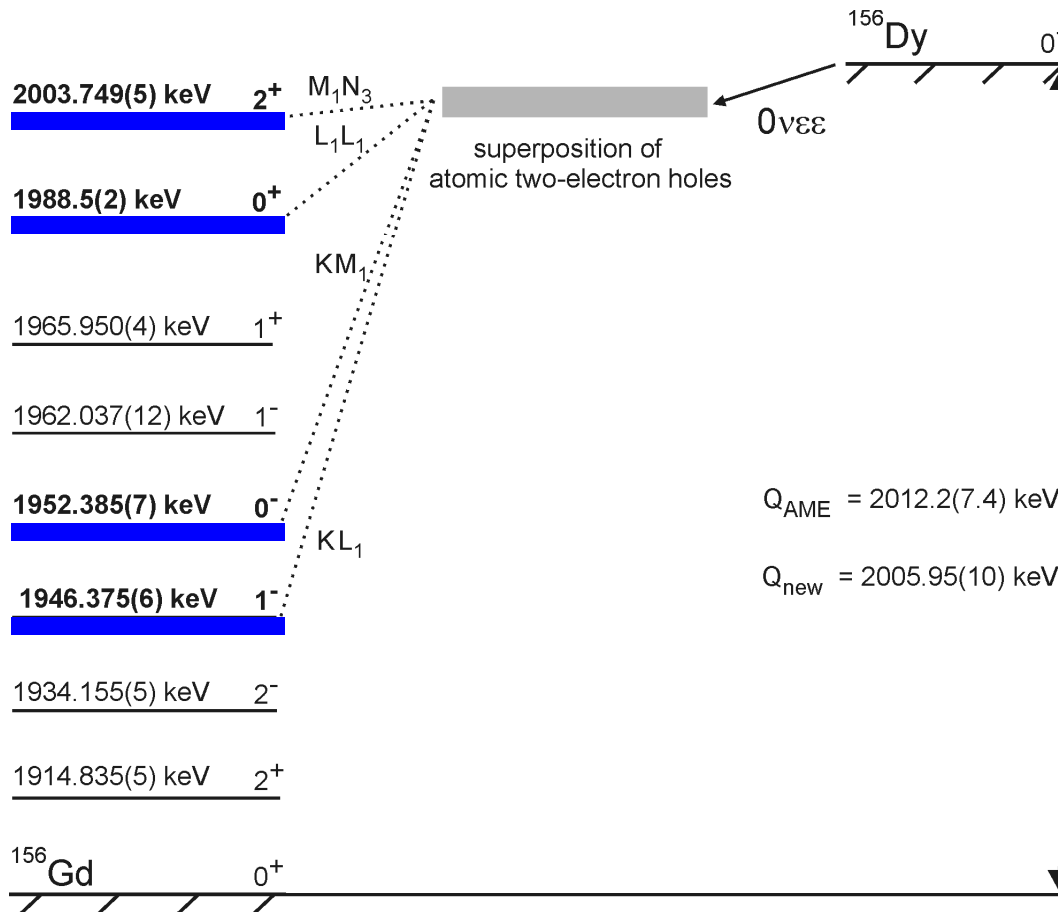
МЕЖДУ ОСНОВНЫМИ ЯДЕРНЫМИ СОСТОЯНИЯМИ

$2EC$ -переход	Q (old), кэВ	Δ (old), кэВ	Q (new), кэВ	Δ (new), кэВ	$T_{1/2} \cdot m_{2EC} ^2$, лет
$^{152}\text{Gd} \rightarrow ^{152}\text{Sm}$	54.6(3.5)	-0.2(3.5)	55.7(0.2)	0.9(0.2)	10^{26}
$^{164}\text{Er} \rightarrow ^{164}\text{Dy}$	23.3(3.9)	5.2(3.9)	25.07(0.12)	6.81(0.12)	$2 \cdot 10^{30}$
$^{180}\text{W} \rightarrow ^{180}\text{Hf}$	144.4(4.5)	13.7(4.5)	143.1(0.2)	12.4(0.2)	$3 \cdot 10^{27}$

несколько резонансно-ускоренных переходов в ^{156}Dy

E_γ / keV	I_γ^{rel}	electron orbitals (XY)	$(B_{XY}) / \text{keV}$	Δ / keV	Γ_{XY} / eV	EF	$ \Psi_X ^2 \Psi_Y ^2$	$T_{1/2} / \text{y}$
1946.375(6)	1^-	KL ₁	58.822(8)	0.75(10)	26	4.1×10^6	1.23×10^{10}	
1952.385(7)	0^-	KM ₁	52.192(8)	1.37(10)	35	1.7×10^6	2.68×10^9	
1988.5(2)	0^+	L ₁ L ₁	16.914(8)	0.54(24)	8	2.5×10^6	1.65×10^9	
2003.749(5)	2^+	M ₁ N ₃	2.160(24)	0.04(10)	15	$7.7 \times 10^{8\ddagger}$	1.52×10^1	

§ For the maximum resonance enhancement with $\Delta = 0$, which is not excluded by the obtained Δ value, the EF is equal to 2.4×10^{10} .



◆ $|M| = 3$ for $0^+ \rightarrow 0^+$

$T_{1/2} (0^+ \rightarrow 0^+) \sim 3 \cdot 10^{24} \text{ y}$
 $|m_{2EC}| = 1 \text{ эВ}$

$Q_{\text{AME}} = 2012.2(7.4) \text{ keV}$

$Q_{\text{new}} = 2005.95(10) \text{ keV}$

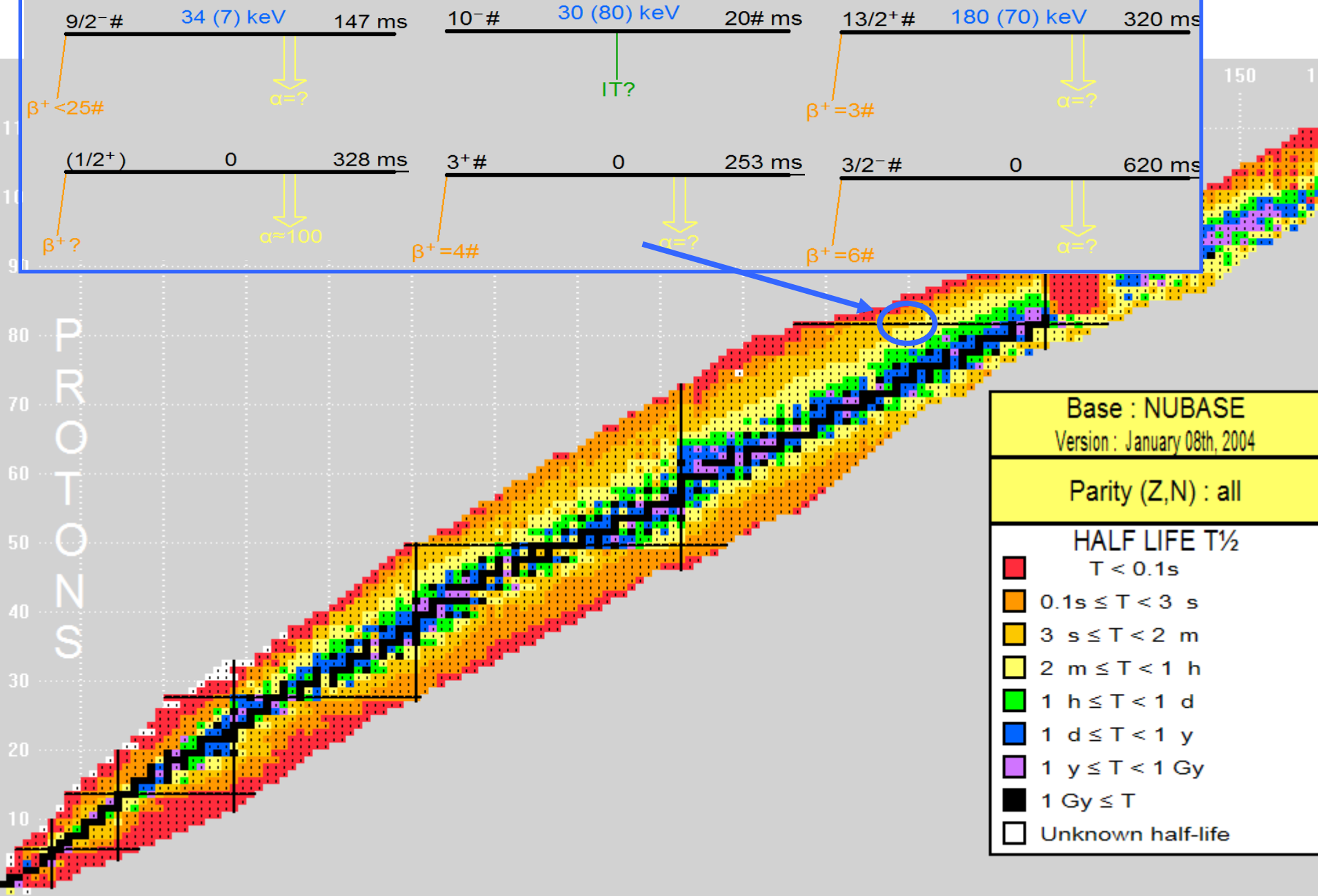
текущая активность
на SHIPTRAP

**разработка новой
методики измерения масс**

195At

196At

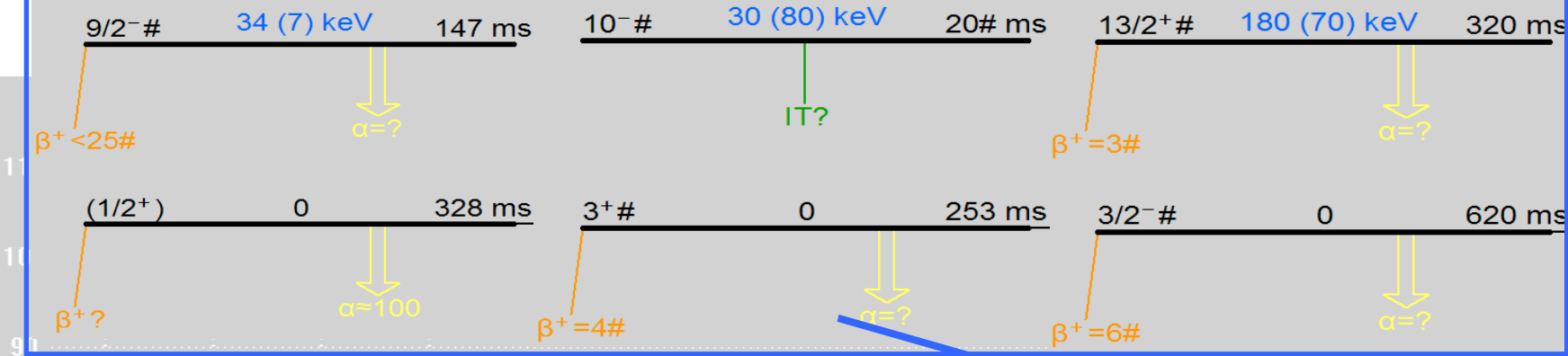
199Rn



195At

196At

199Rn



методика измерения масс должна обеспечивать

точность $\delta m/m \sim 10^{-8}$ для нуклидов с $T_{1/2} \sim 100$ мс

разрешение изомерных состояний с $E \sim 30$ кэВ

- $1 \text{ Gy} \leq T$
- Unknown half-life

ASE
th, 2004
: all
T_{1/2}

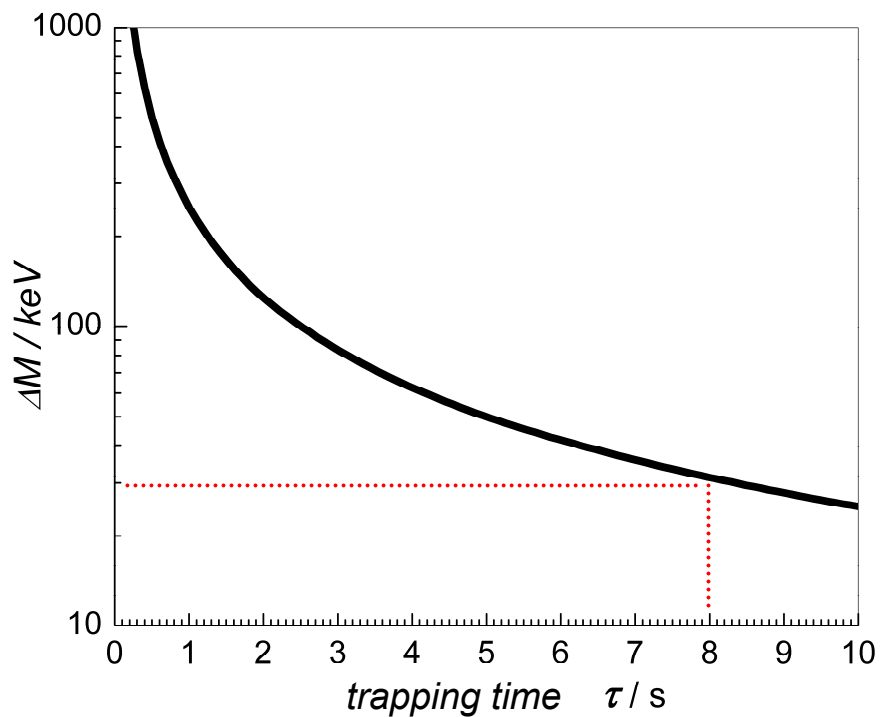
методика ToF-ICR

однорядные ионы $M=200$

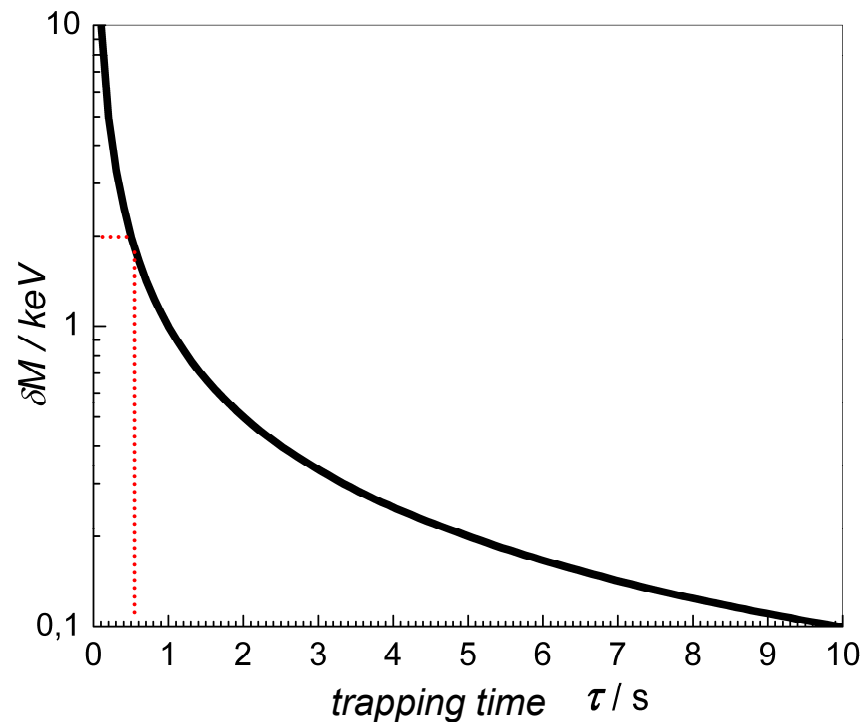
$\nu_c \approx 500$ кГц

$N=1000$

разрешающая способность



точность измерения массы



новая методика измерения масс однозарядных ионов

- увеличение разрешения: ~ 40
- значительно более быстрая
- увеличение точности: ~ 5

определение массы нейтрино с точностью 0.2 эВ



- Проект



Анализ

ЕС в ^{163}Ho

β^- -распад ^{187}Re

$\delta Q \sim 1 \text{ эВ}$ ($\delta Q/m < 10^{-11}$)



PENTATRAP

$\delta Q \sim 50 \text{ эВ}$ ($\delta Q/m < 3 \cdot 10^{-10}$)



развитие
ECHo-проекта

определение массы нейтрино с точностью 0.2 эВ



- Проект → Анализ

EC в ^{163}Ho

β^- -распад ^{187}Re

$\delta Q \sim 1 \text{ эВ}$ ($\delta Q/m < 10^{-11}$)



PENTATRAP

$\delta Q \sim 50 \text{ эВ}$ ($\delta Q/m < 3 \cdot 10^{-10}$)



развитие
ECHo-проекта

SHIPTRAP в 2014

измерение Q -значений
 β^- -распада ^{187}Re & EC в ^{163}Ho
с точностью $< 50 \text{ эВ}$

методика ToF-ICR

$$\frac{\delta m}{m} \sim 10^{-8}$$

нуклиды с $T_{1/2} \sim 1$ с

$$\frac{\delta(m_1 - m_2)}{m} \sim 10^{-9}$$

$0\nu 2\text{EC}$ нуклиды

новая методика

$$\frac{\delta m}{m} \sim 10^{-8}$$

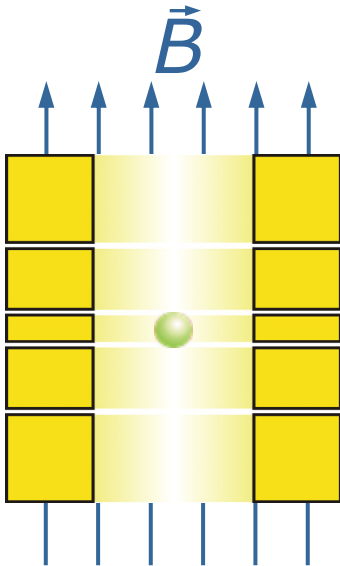
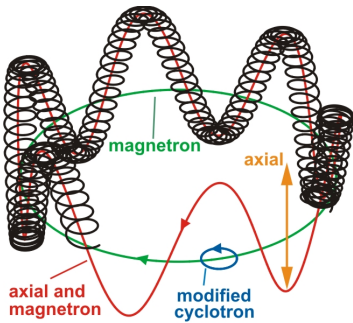
нуклиды с $T_{1/2} \sim 100$ мс

$$\frac{\delta(m_1 - m_2)}{m} \sim 10^{-10}$$

долгоживущие массовые дубл.

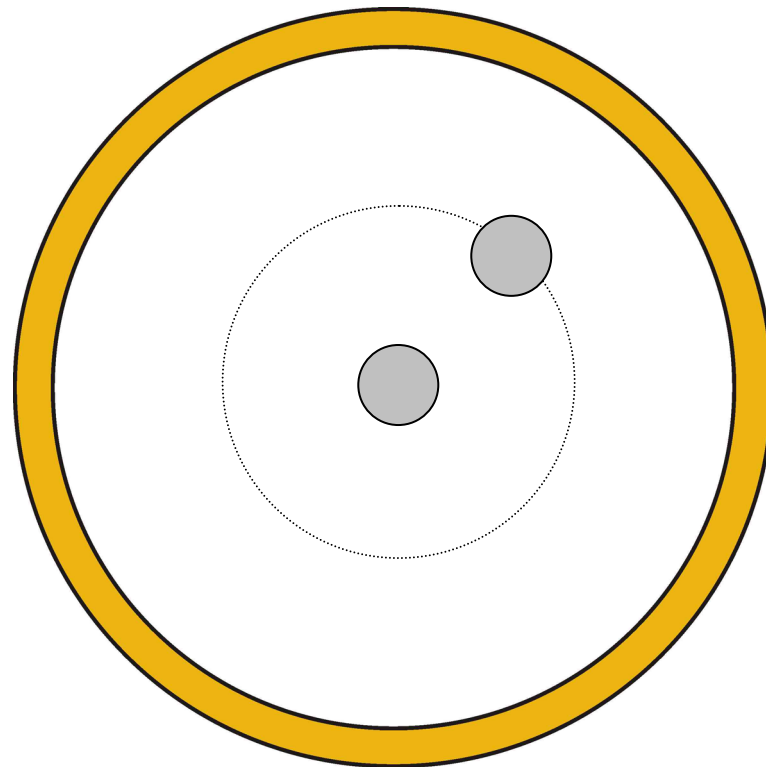
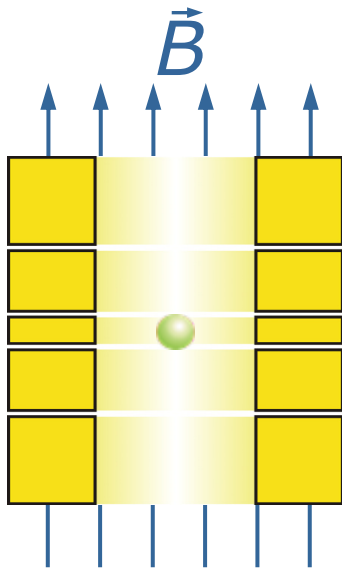
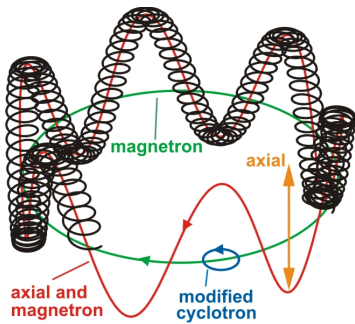
НОВАЯ МЕТОДИКА **PI-ICR** (**Phase-Imaging Ion-Cyclotron-Resonance**)

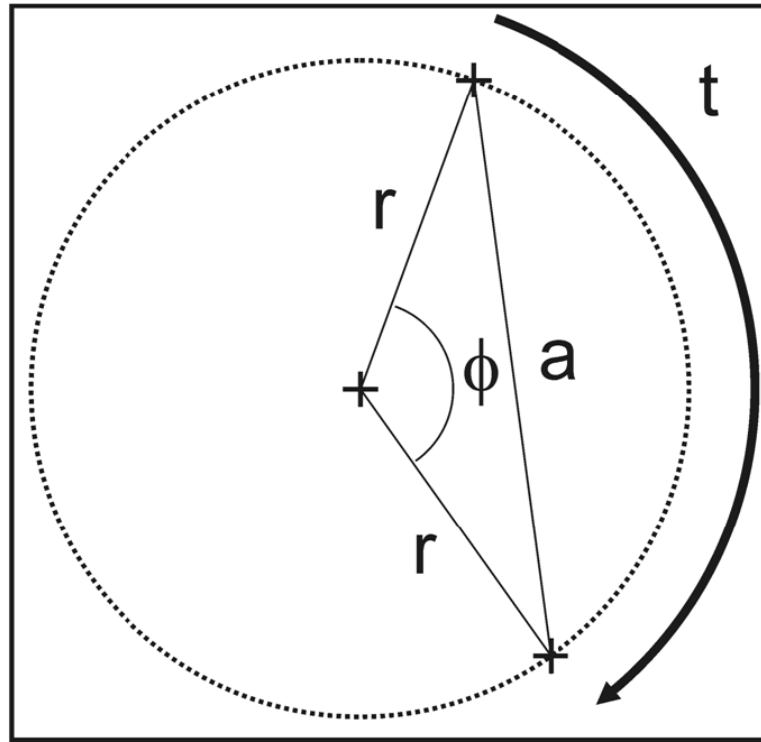
$$V_c = V_+ + V_-$$



НОВАЯ МЕТОДИКА PI-ICR (Phase-Imaging Ion-Cyclotron-Resonance)

$$V_c = V_+ + V_-$$





$$v_- = \frac{\phi_- + 2\pi n_-}{2\pi t_-}$$

$$v_+ = \frac{\phi_+ + 2\pi n_+}{2\pi t_+}$$

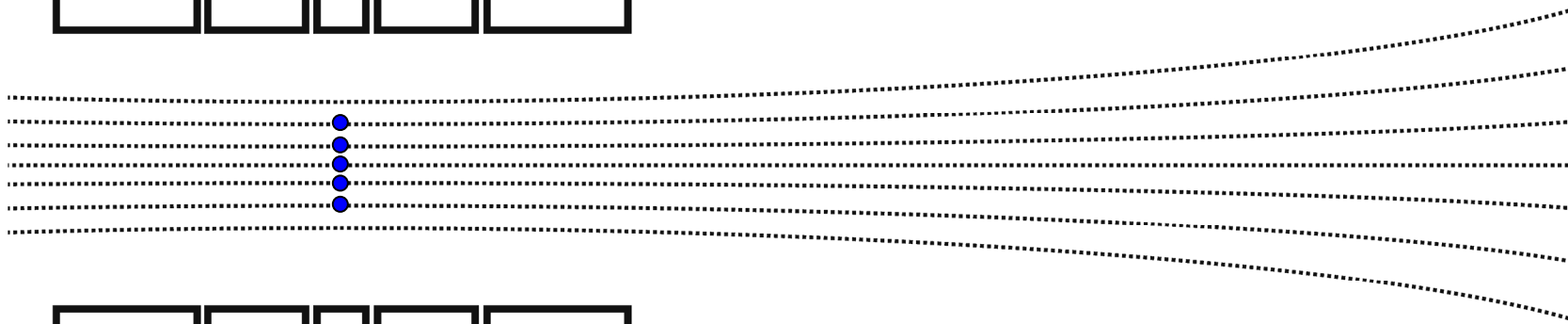
$$v_c = v_+ + v_-$$

ловушка Пеннинга

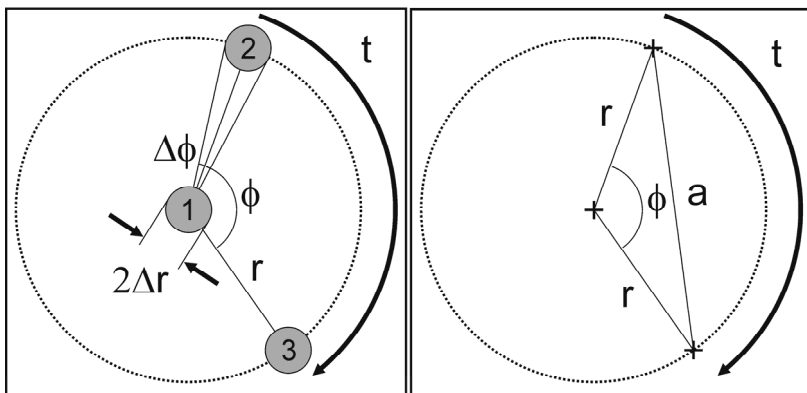


позиционно-чувствительный
MCP детектор

\vec{B}

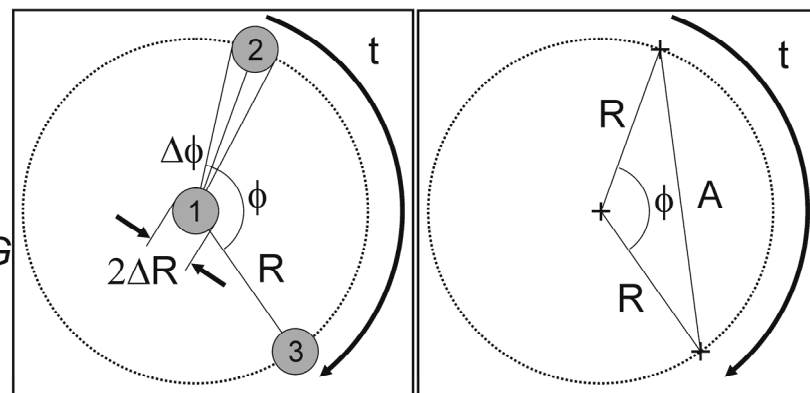


radial ion motion in a Penning trap



projection with
magnification G

image of radial ion motion on detector



delayline MCP детектор RoentDek GmbH DLD40

активный диаметр	42 мм
диаметр канала	25 μm
xy - разрешение	70 μm
макс. В	10 мТл

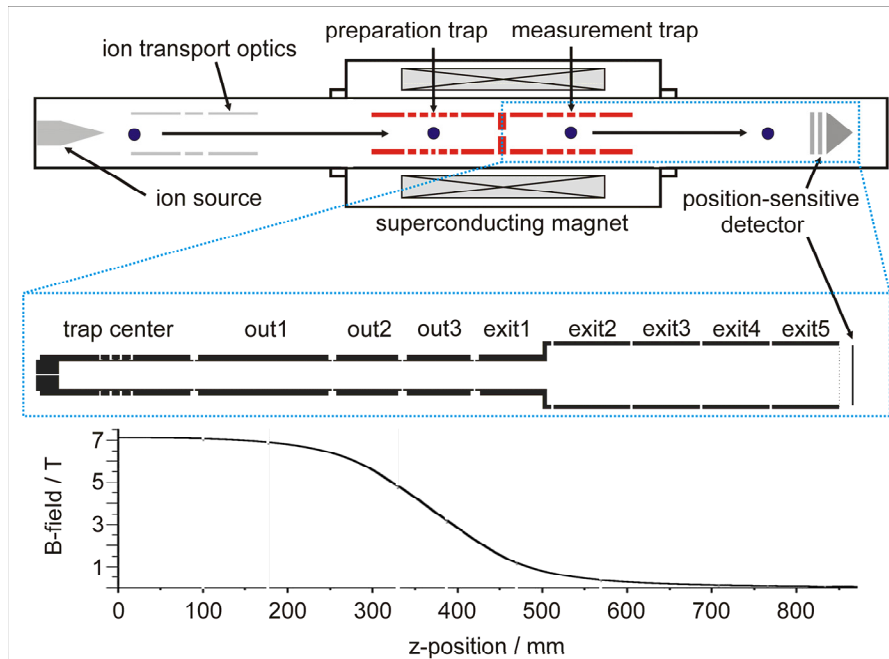
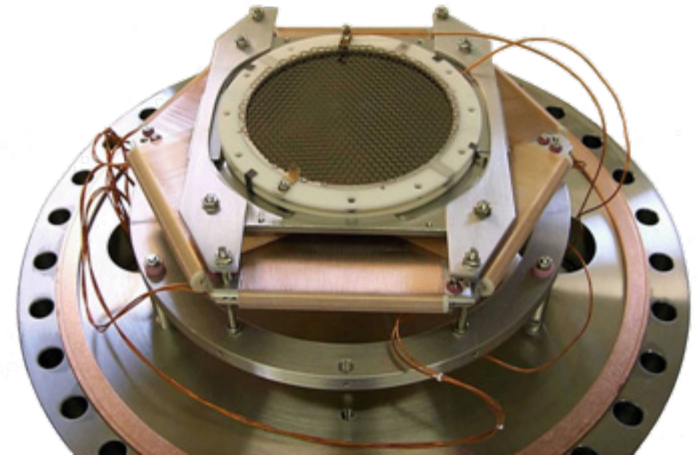
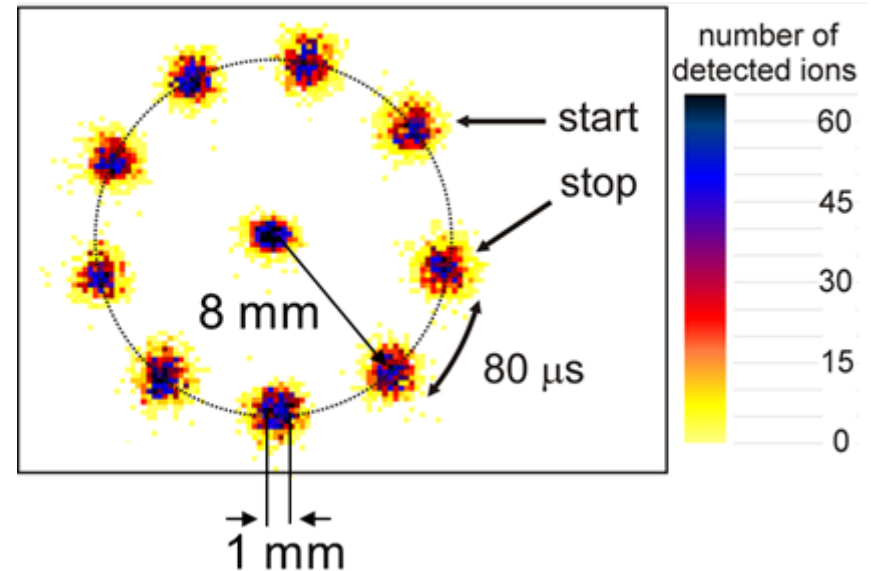
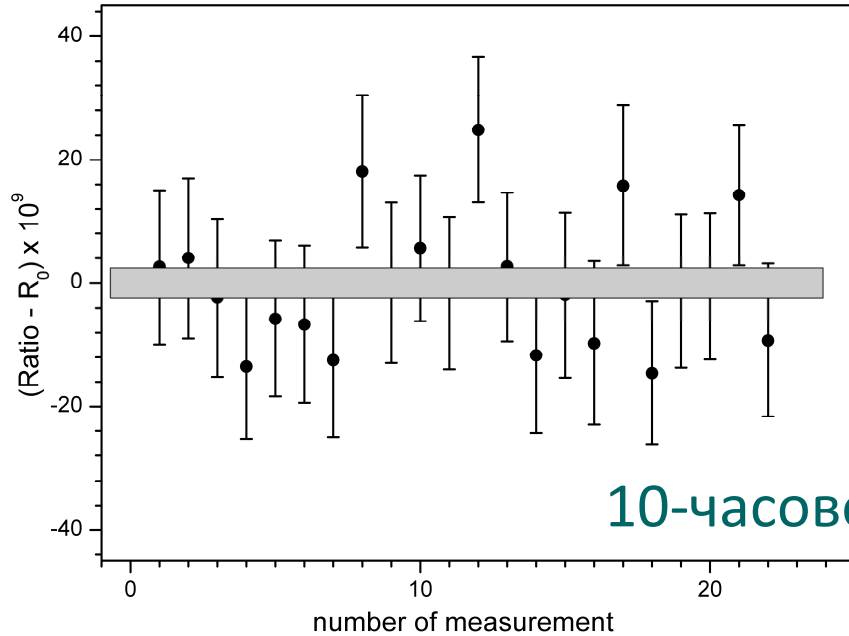


image of magnetron motion ($G \approx 20$)

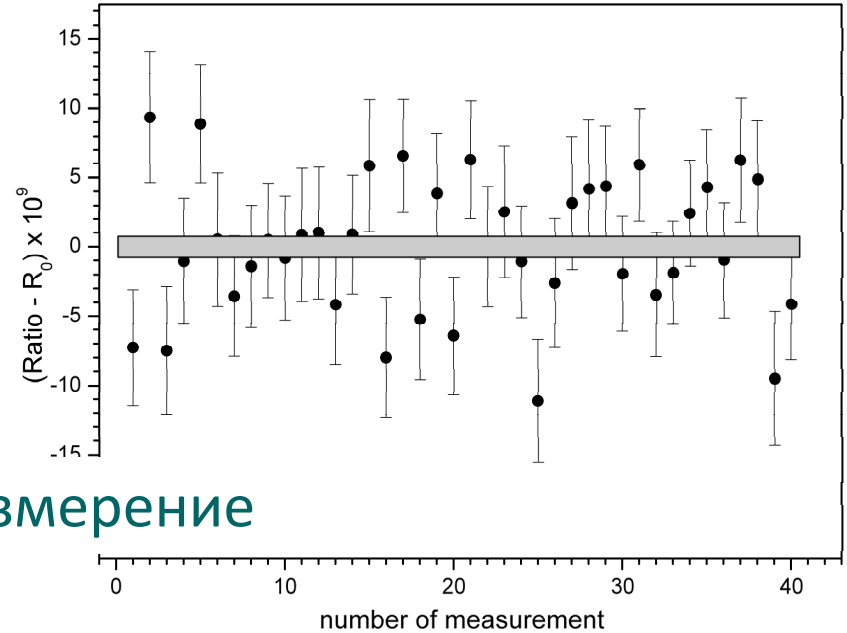


PI-ICR vs. ToF-ICR

ToF-ICR



PI-ICR

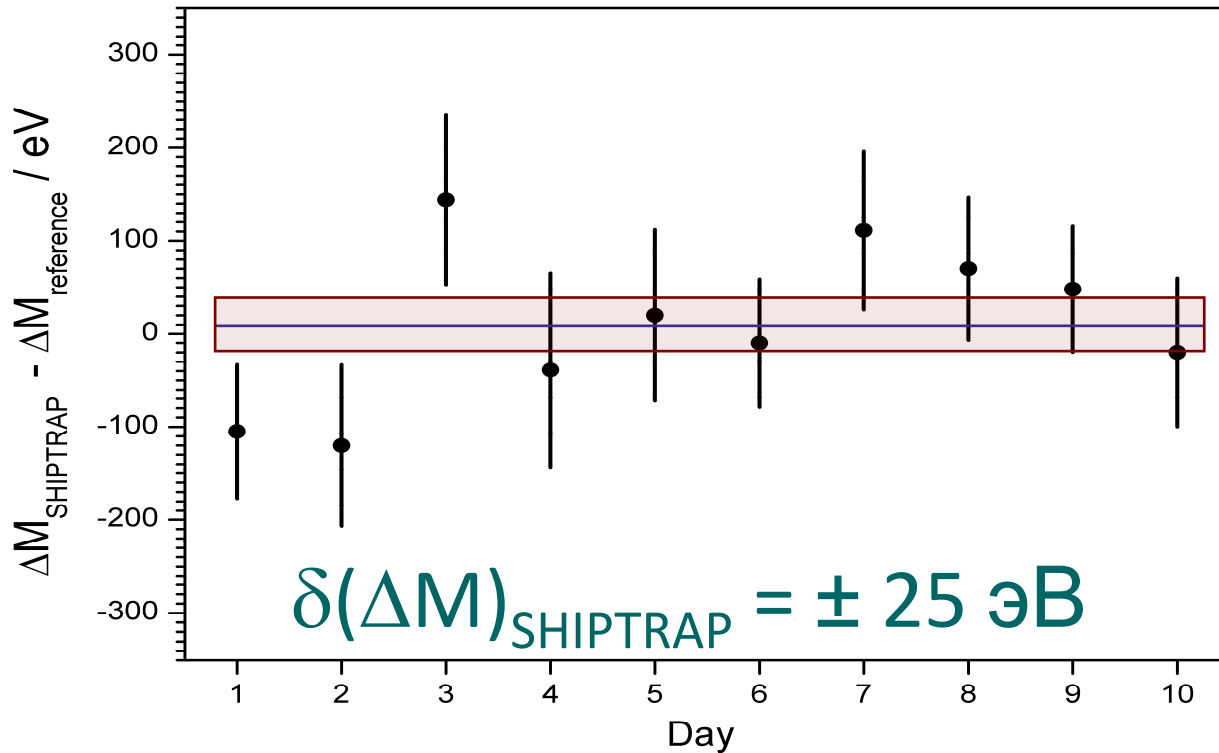


$$\delta[M(^{124}\text{Xe}) - M(^{124}\text{Te})] \sim 300 \text{ эВ}$$

$$\delta[M(^{132}\text{Xe}) - M(^{131}\text{Xe})] \sim 70 \text{ эВ} !!!$$

увеличение точности: ~ 4.5 !!!

$$\Delta M = M(^{132}\text{Xe}) - M(^{131}\text{Xe})$$



$$\Delta M_{\text{SHIPTRAP}} - \Delta M_{\text{reference}} = (9 \pm 28) \text{ eV}$$

впервые измерена разница масс
однозарядных тяжёлых нуклидов
с точностью $2 \cdot 10^{-10}$!!!

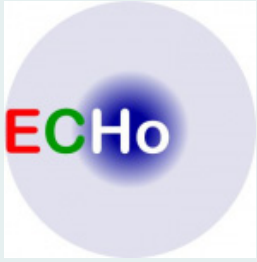
подготовка измерения Q-значений:

(1) β^- -распад ^{187}Re Февраль 2014

(2) EC в ^{163}Ho ? 2014

с точностью < 50 эВ

определение массы нейтрино с точностью 0.2 эВ



- Проект



Анализ

ЕС в ^{163}Ho

β^- -распад ^{187}Re

$\delta Q \sim 1$ эВ ($\delta Q/m < 10^{-11}$)



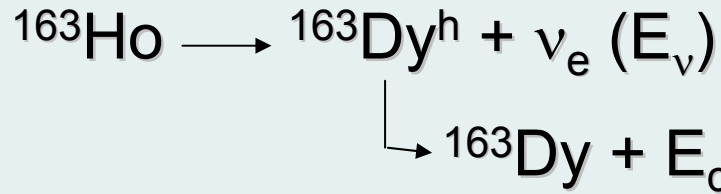
PENTATRAP

$\delta Q \sim 50$ эВ ($\delta Q/m < 3 \cdot 10^{-10}$)



развитие
ECHo-проекта

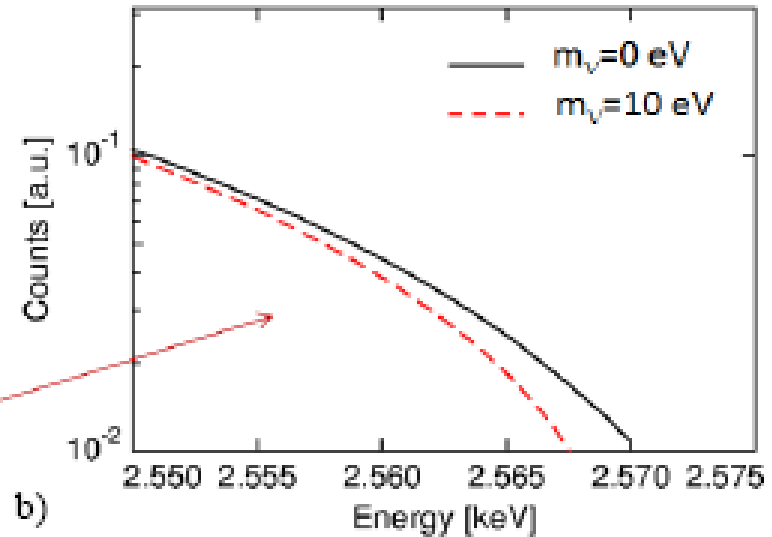
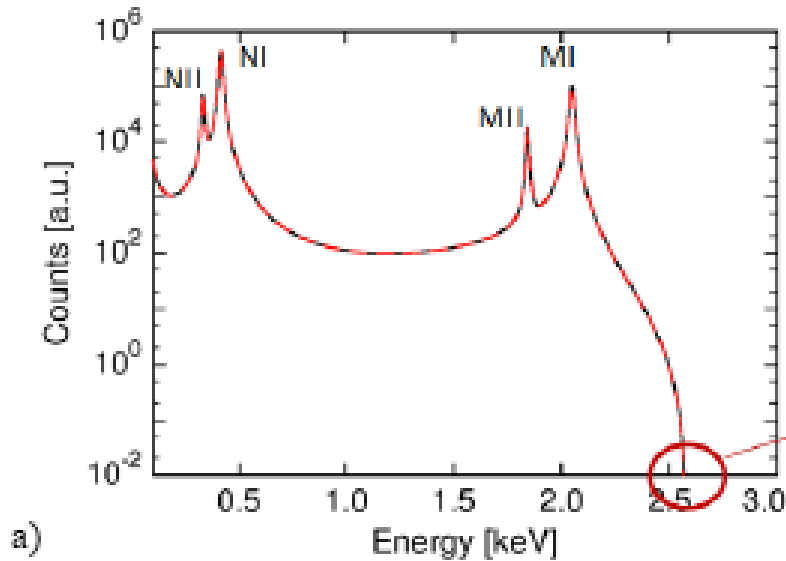
определение массы нейтрино с точностью 0.2 эВ



АНАЛИЗ СПЕКТРА РАЗРЯДКИ



m_ν



криогенные μ -калориметры (группа Prof. Enss, KIP, Uni Heidelberg)

АНАЛИЗ СПЕКТРА РАЗРЯДКИ

РЕНТАТРАП/ МРІК

Q_{EC} -ЗНАЧЕНИЕ < 1 эВ



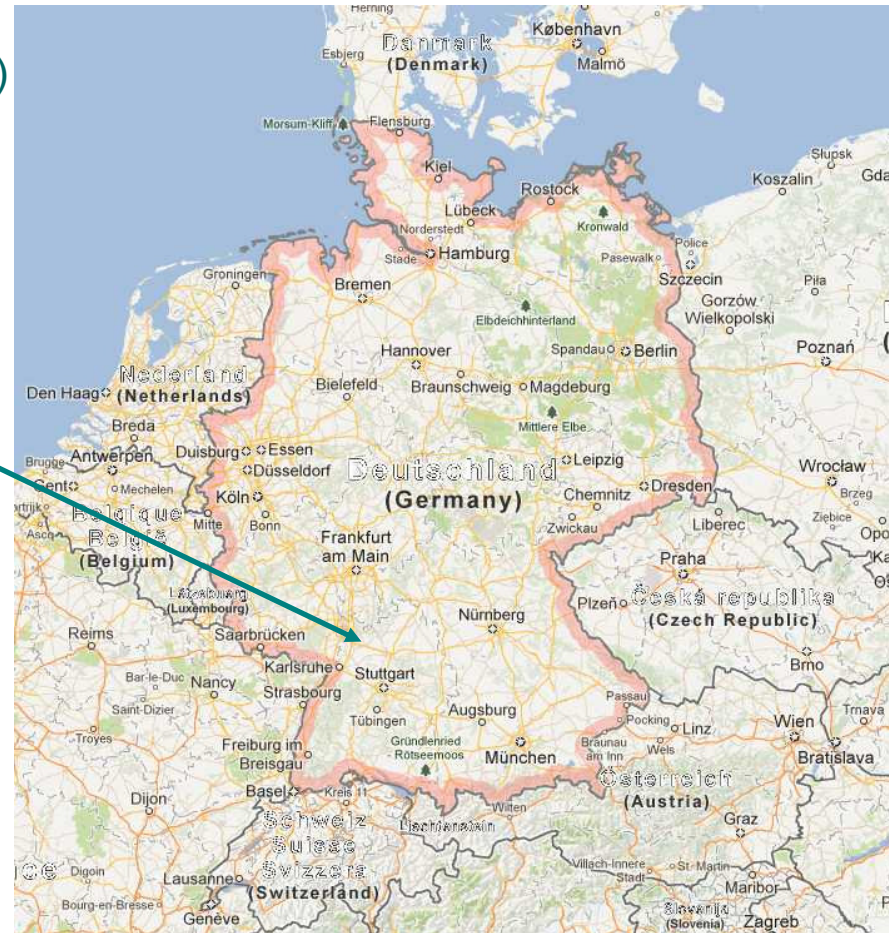
$m_\nu \sim 0.2$ эВ



расположение

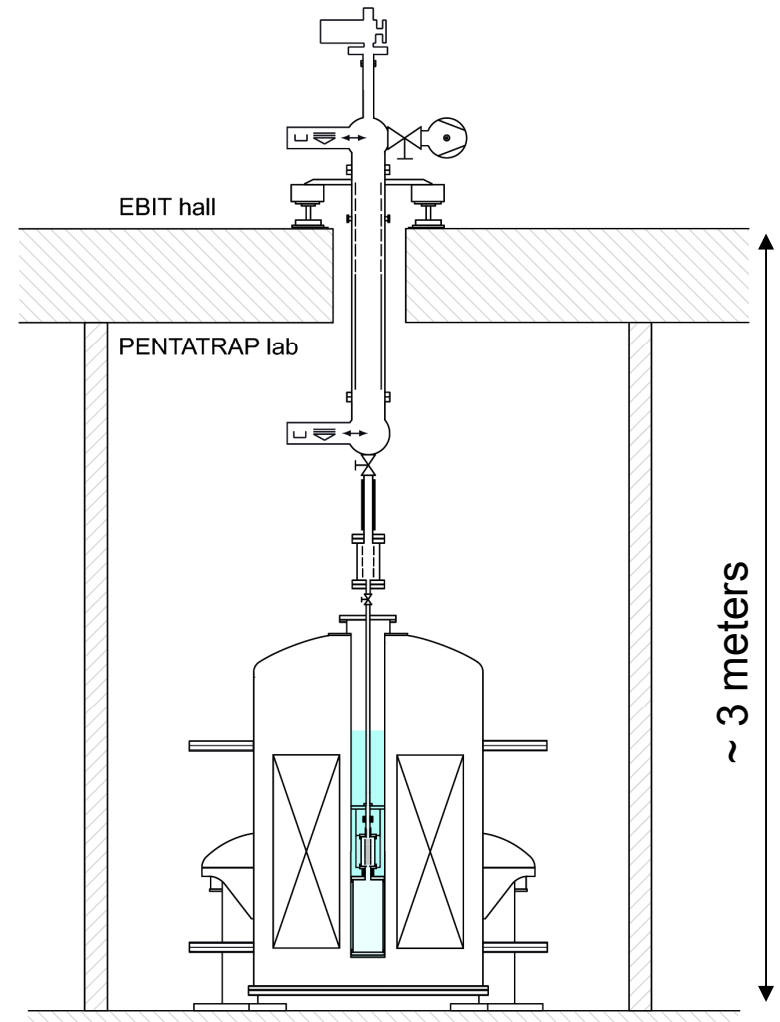
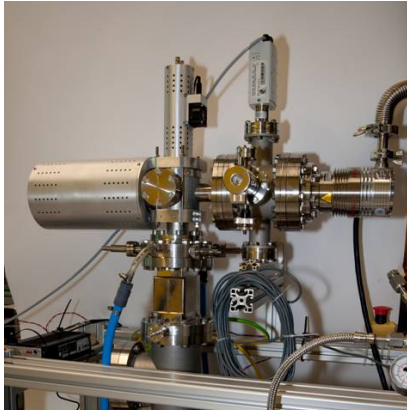
Max-Planck Institute for Nuclear Physics (Heidelberg)

Division “Stored and Cooled Ions”
(Prof. Blaum)

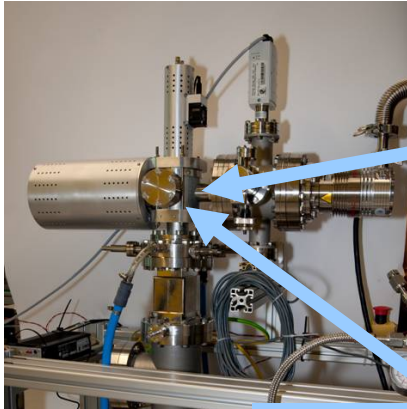


измерение масс высокозарядных,
долгоживущих нуклидов до урана
с точностью $< 10^{-11}$

PENTATRAP



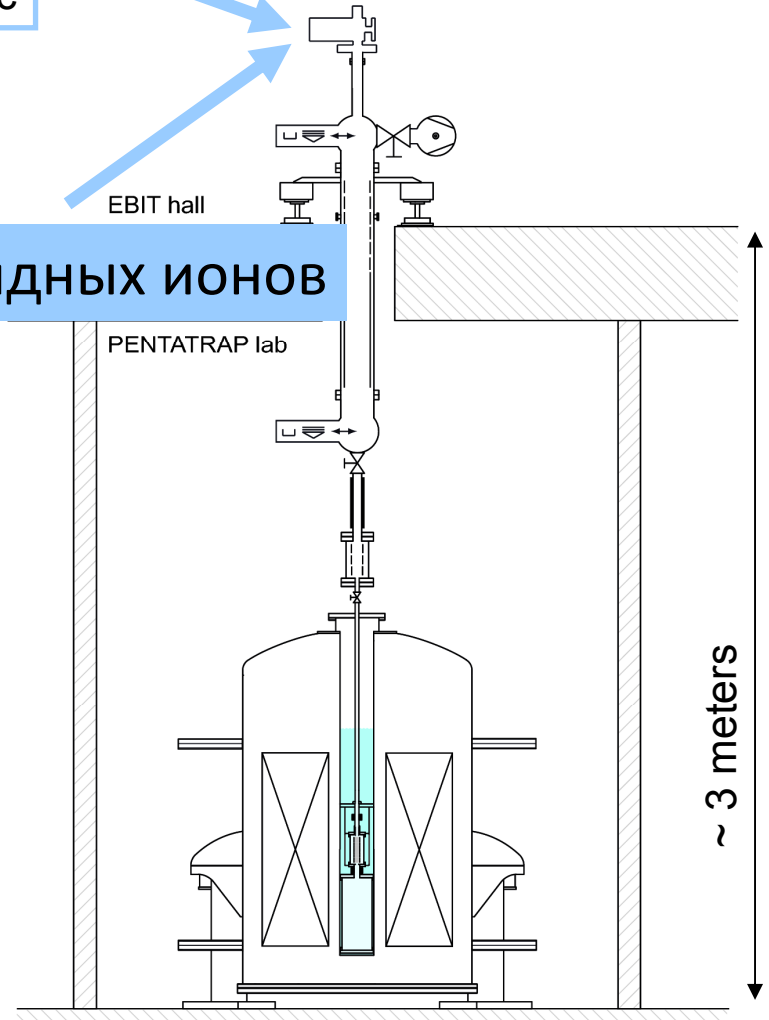
PENTATRAP



DREEBIT
 $^{187}\text{Re}^{50+}$
100 ионов/с

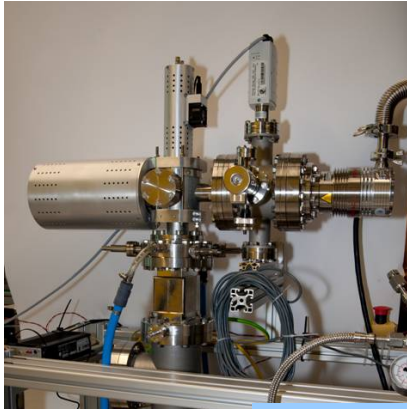
EBIT hall

создание высокозарядных ионов

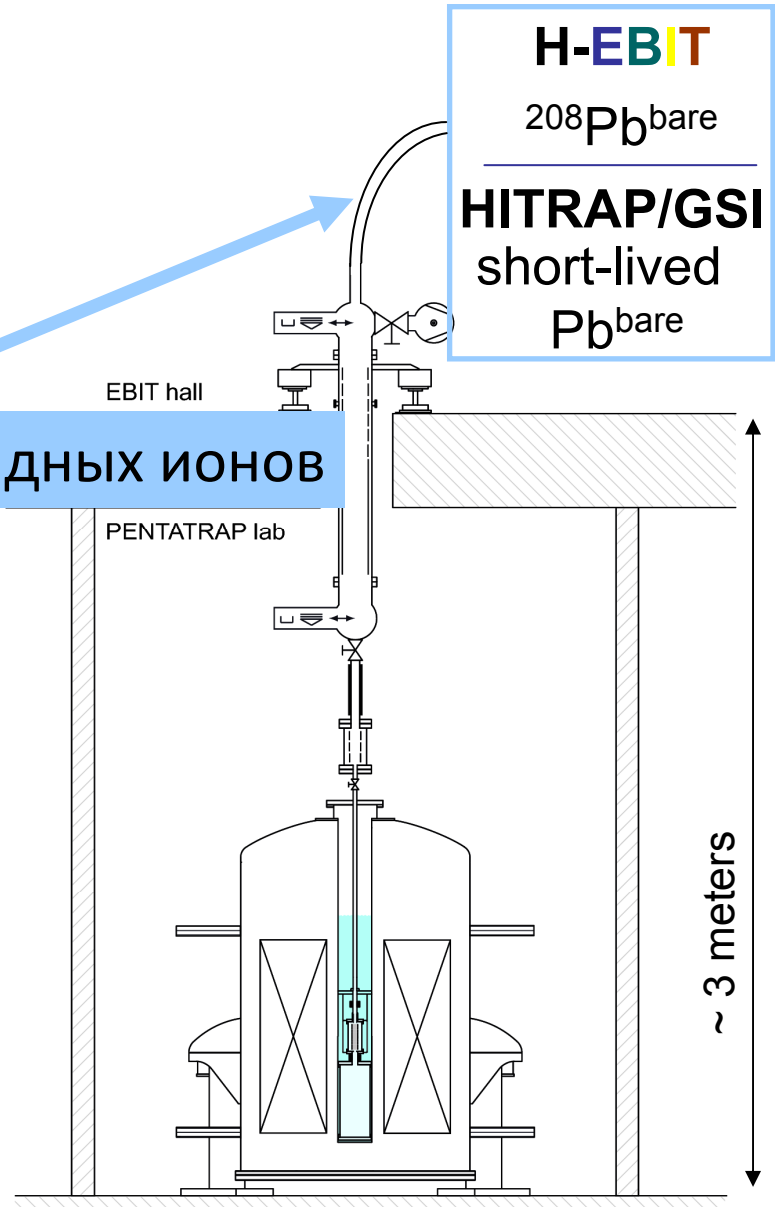


~ 3 meters

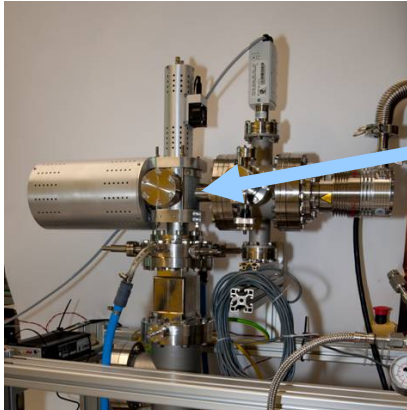
PENTATRAP



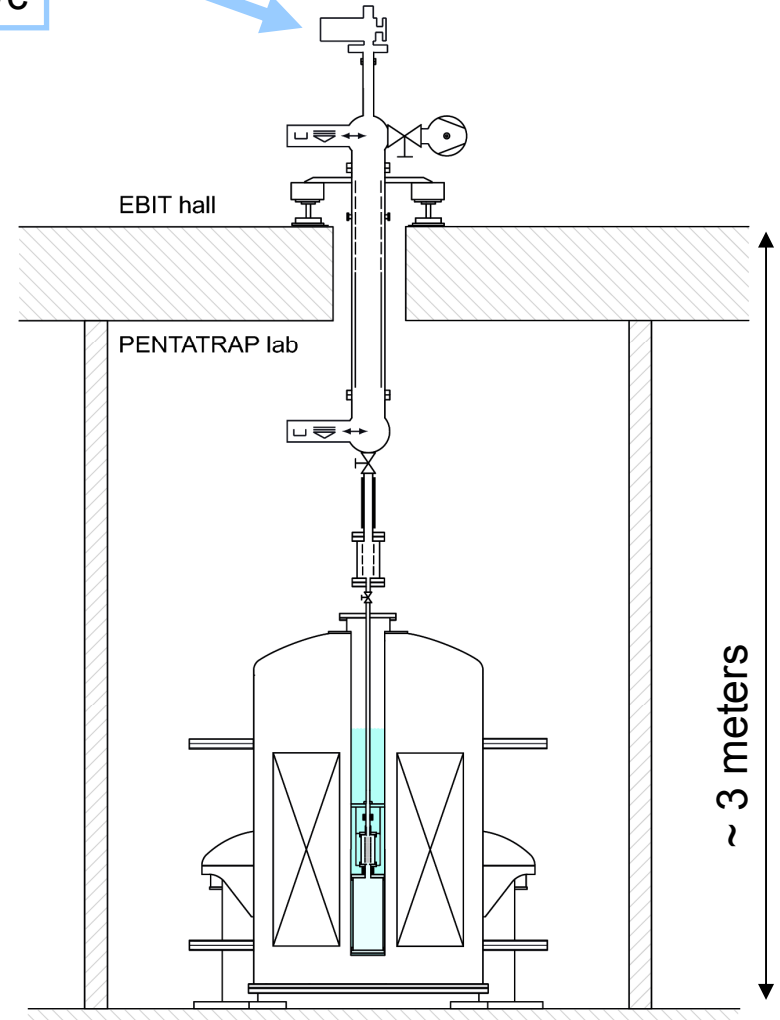
создание высокозарядных ионов



PENTATRAP

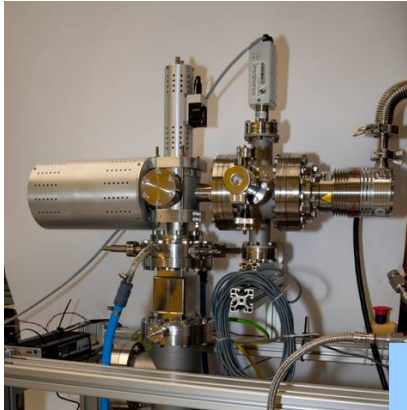


DREEBIT
 $^{187}\text{Re}^{50+}$
100 ионов/с



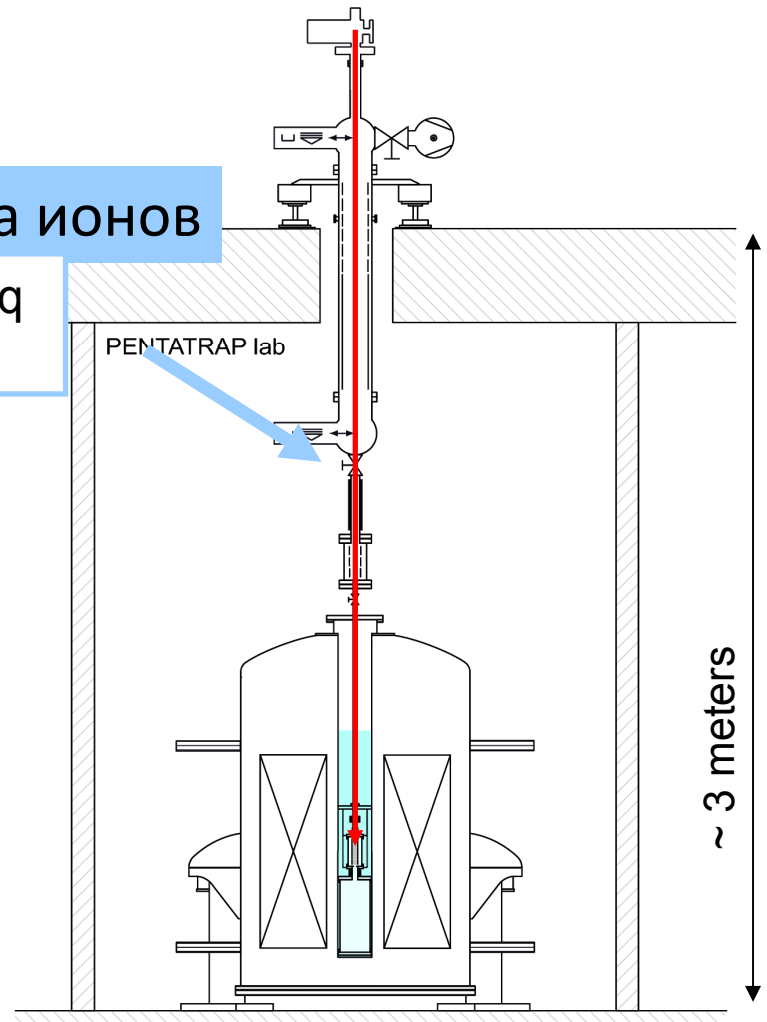
~ 3 meters

PENTATRAP

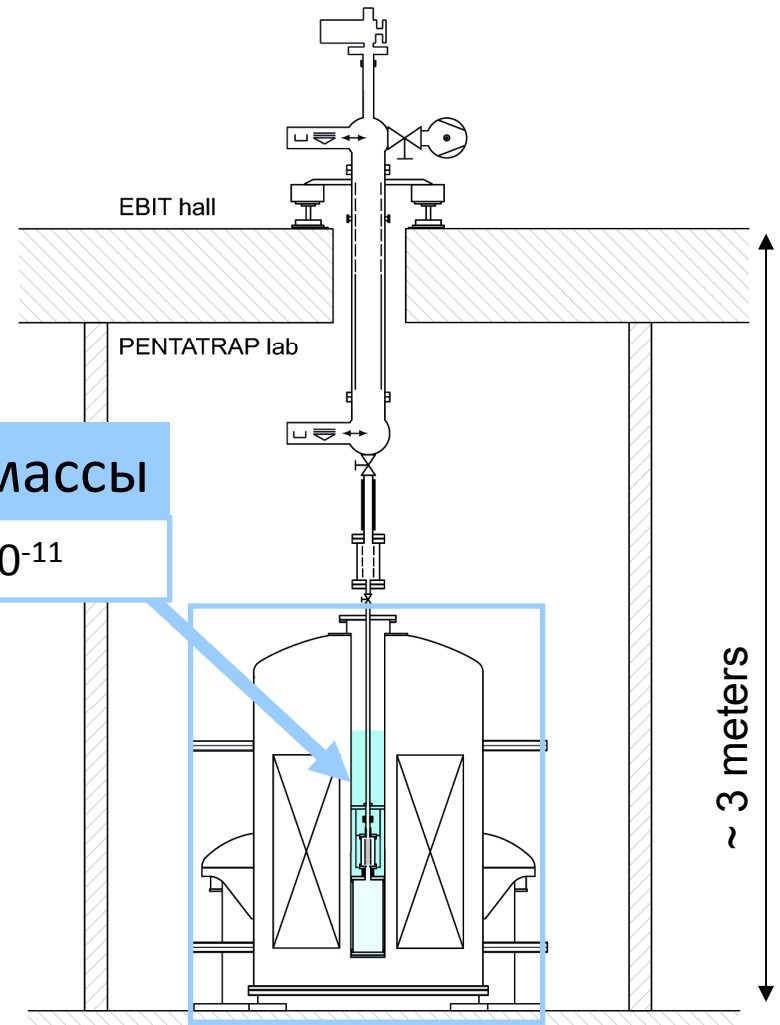
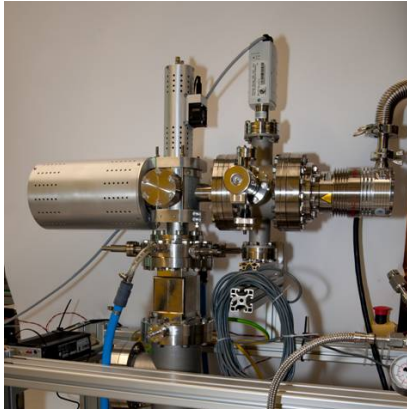


транспортировка ионов

старт: ~ 7 кэВ/q
стоп: \sim эВ/q



PENTATRAP



измерение массы

точность $< 10^{-11}$

PENTATRAP

$$v_c = \frac{1}{2\pi} \cdot \frac{q}{m} \cdot B \quad v_z = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{q}{m} \cdot \frac{U}{d^2}}$$

стабильность и однородность В-поля
стабильность и квадратичность U-ямы

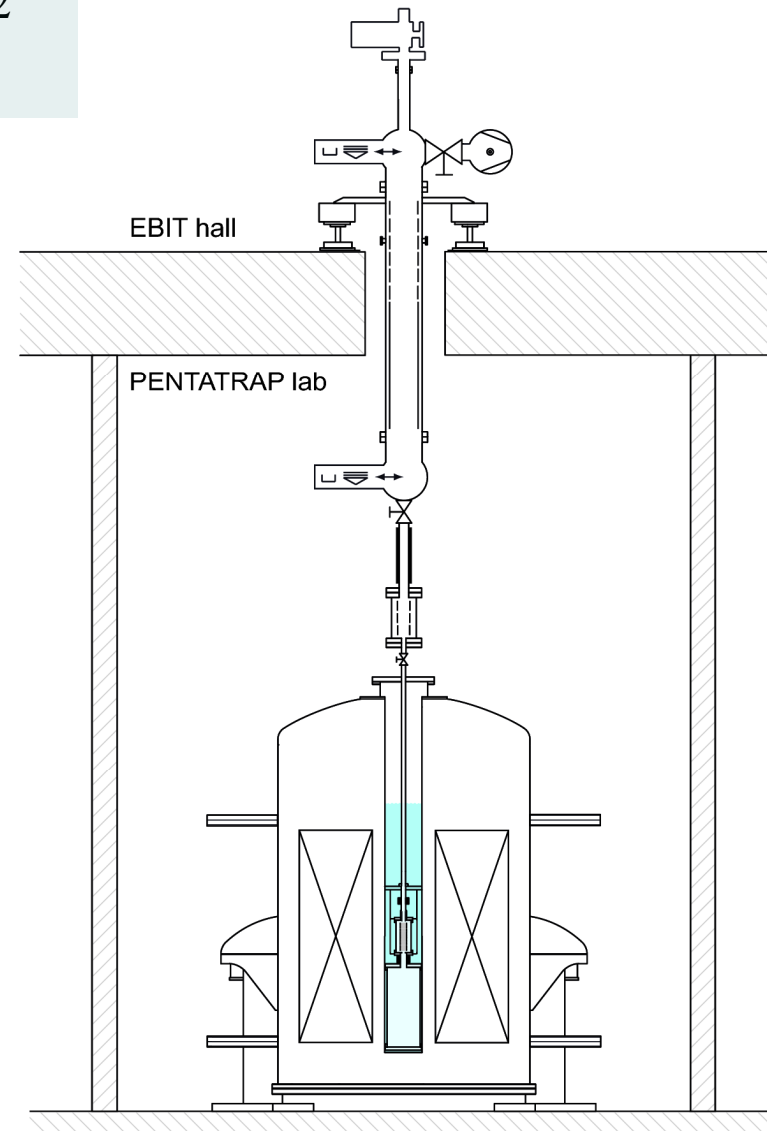
высокие зарядовые состояния ионов

криогенные ловушки (4 К)

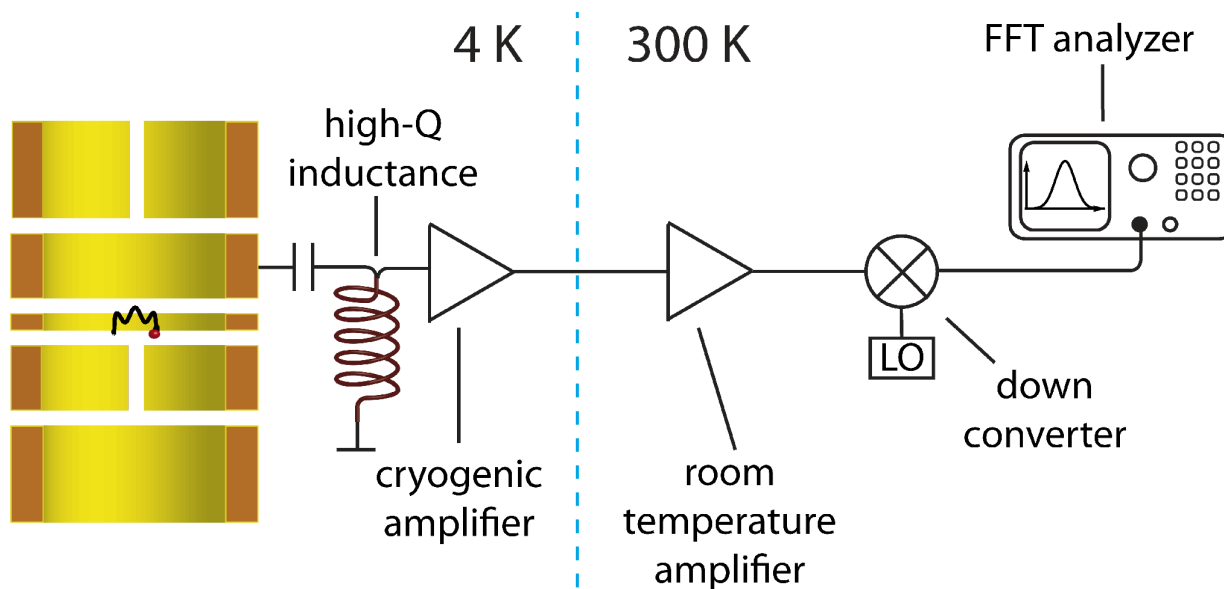
пять ловушек

FT-ICR методика измерения частот

стабилизация “всего и вся”



измерение частот в ловушке



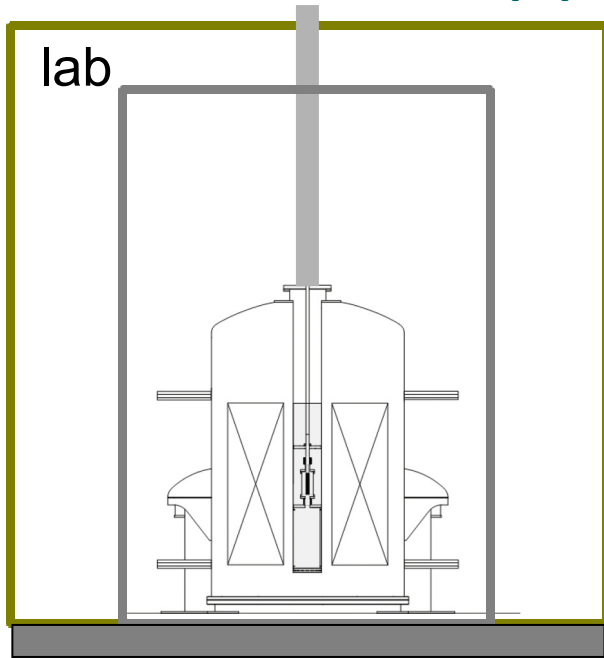
$^{187}\text{Os}^{45+}$:

$\nu_+ \approx 26 \text{ МГц}$, $\nu_- \approx 7 \text{ кГц}$, $\nu_z = 600 \text{ кГц}$ ($B = 7 \text{ Тл}$, $V_0 = -20.5 \text{ В}$)

$R_+, R_- \ll 1 \text{ }\mu\text{м}$, $R_z \sim 10 \text{ }\mu\text{м}$

$\Delta B/B = 10^{-6}/\text{см}^3$, $\Delta B/B(t) = 10^{-10}/\text{час}$, $\Delta U/U(t) = 10^{-8}/\text{час}$

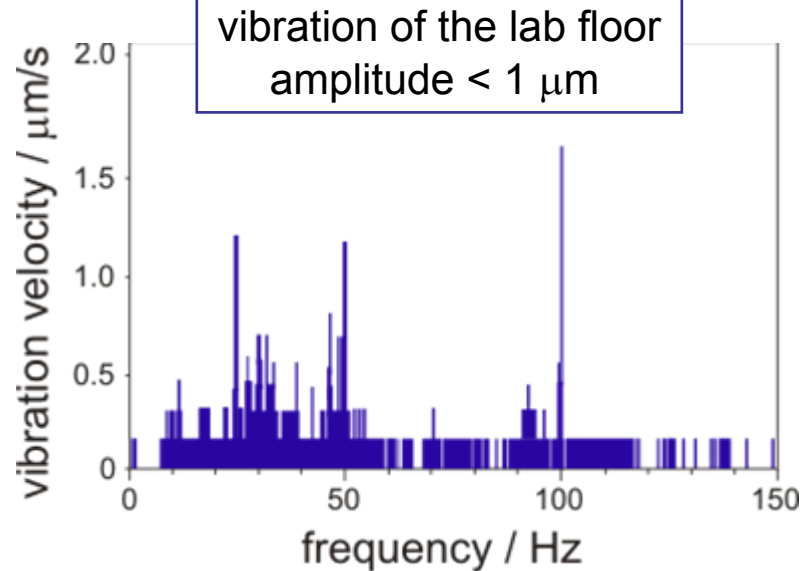
подавление вибраций



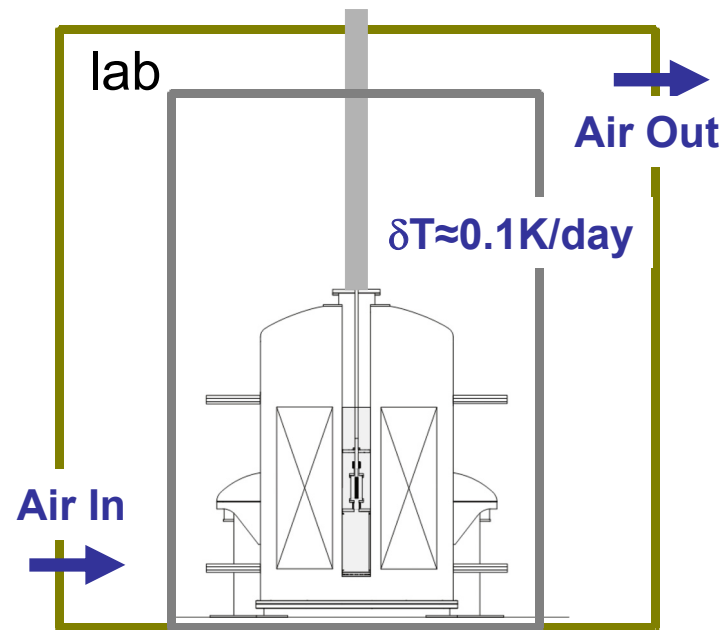
lab

пенопластовые
панели

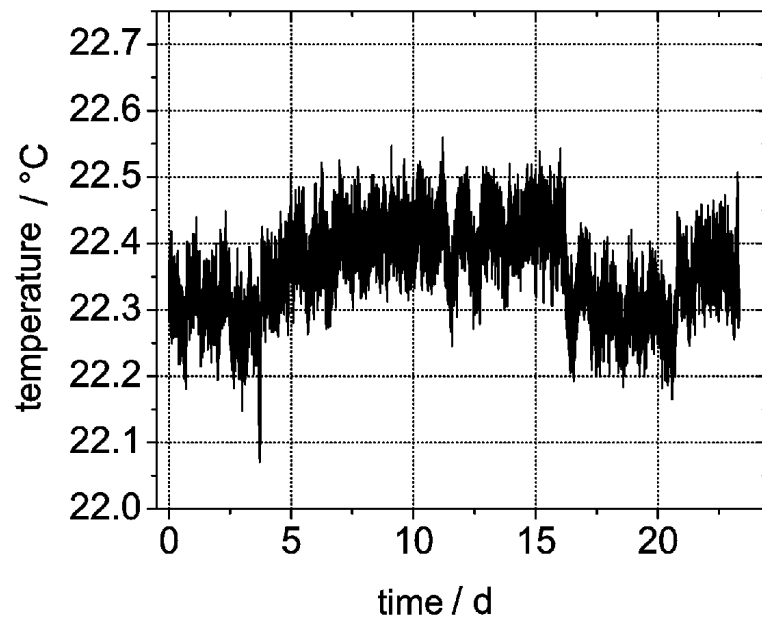
70 см бетонная подушка



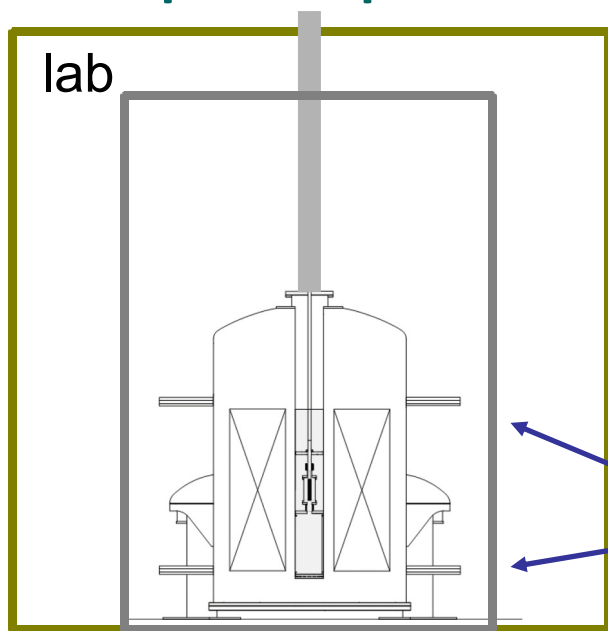
стабилизация температуры



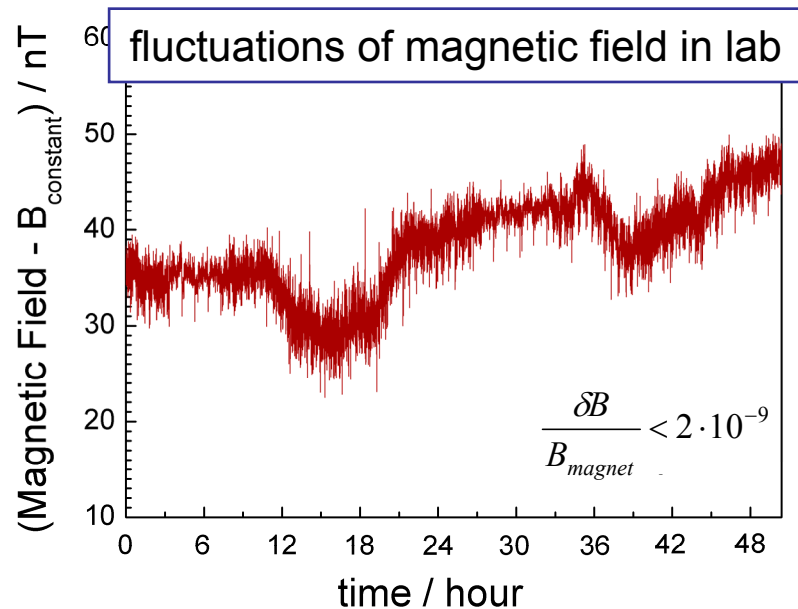
пенопластовые
панели



экранирование ионов от внешних полей



катушки Гемгольца



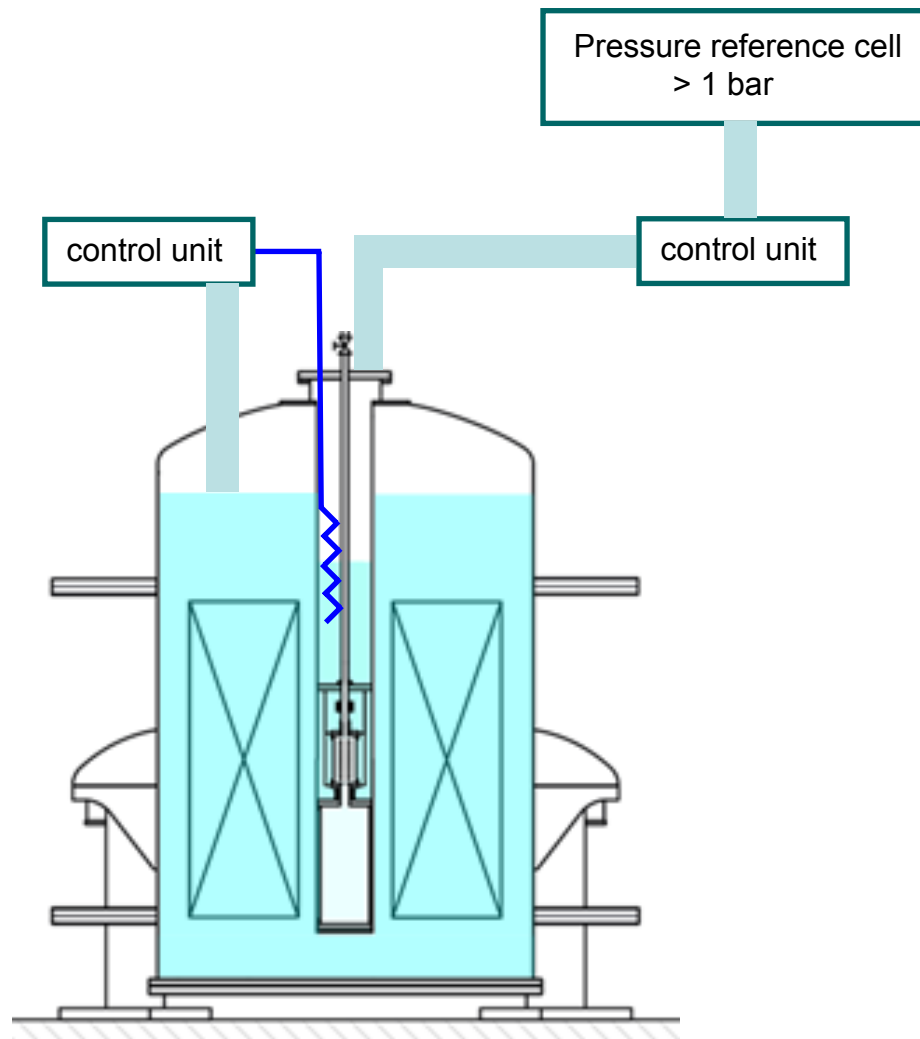
$\delta B/B < 2 \cdot 10^{-9}$ в комнате

→ shielding factor of magnet is ~ 100

→ compensation factor of Helmholtz coils is ~ 10

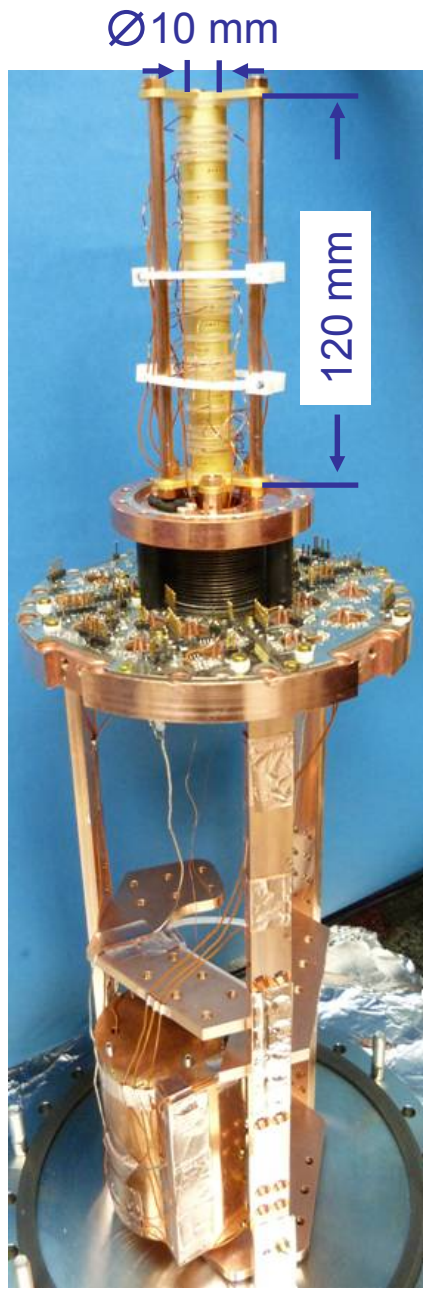
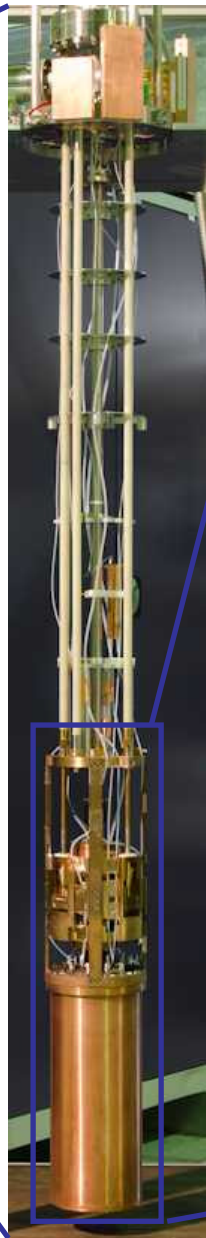
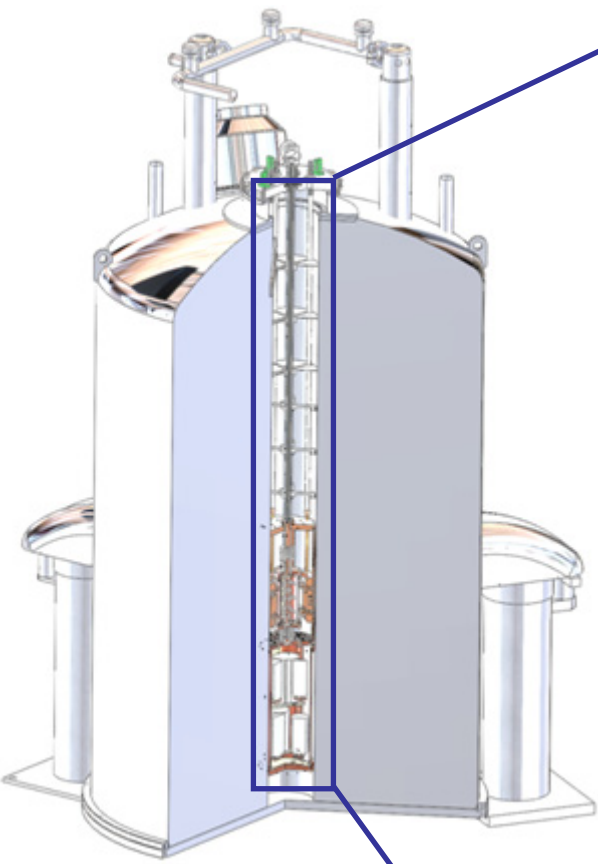
$\delta B/B < 2 \cdot 10^{-12}$ в ловушке

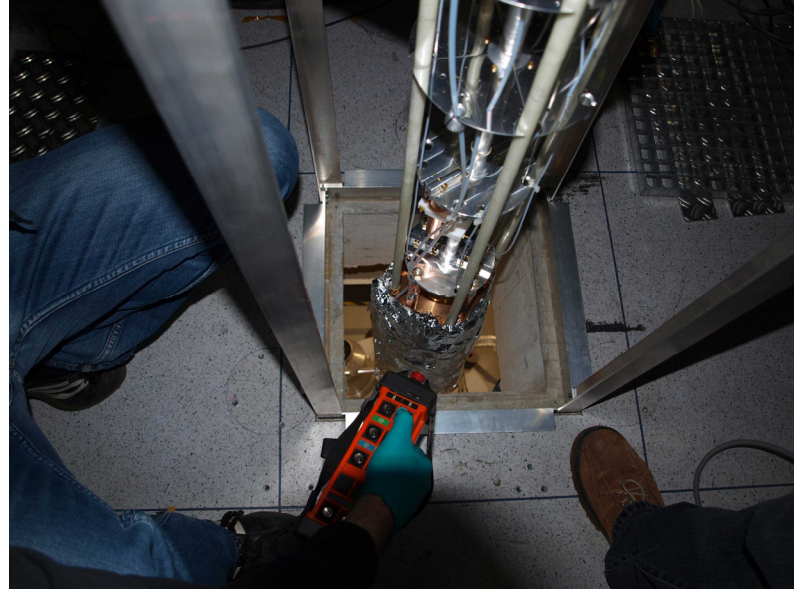
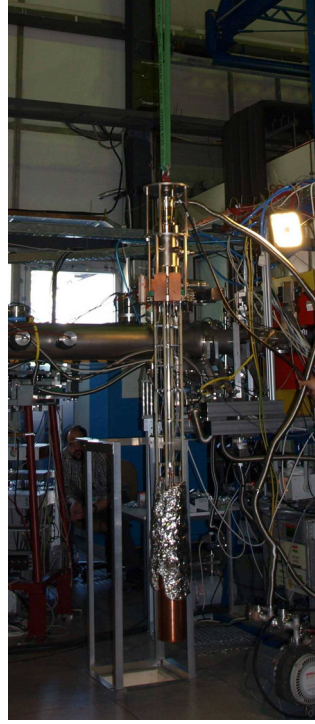
стабилизация давления и уровня гелия



стабилизация давления на уровне **1 μ бар**

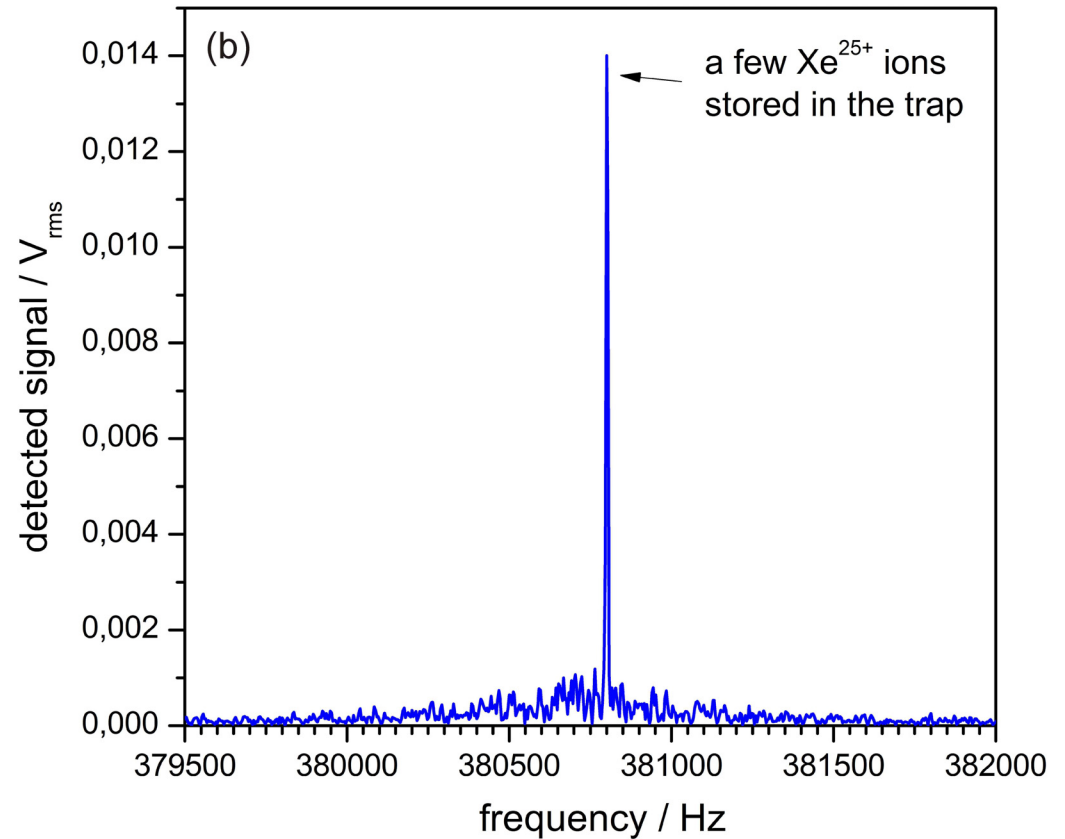
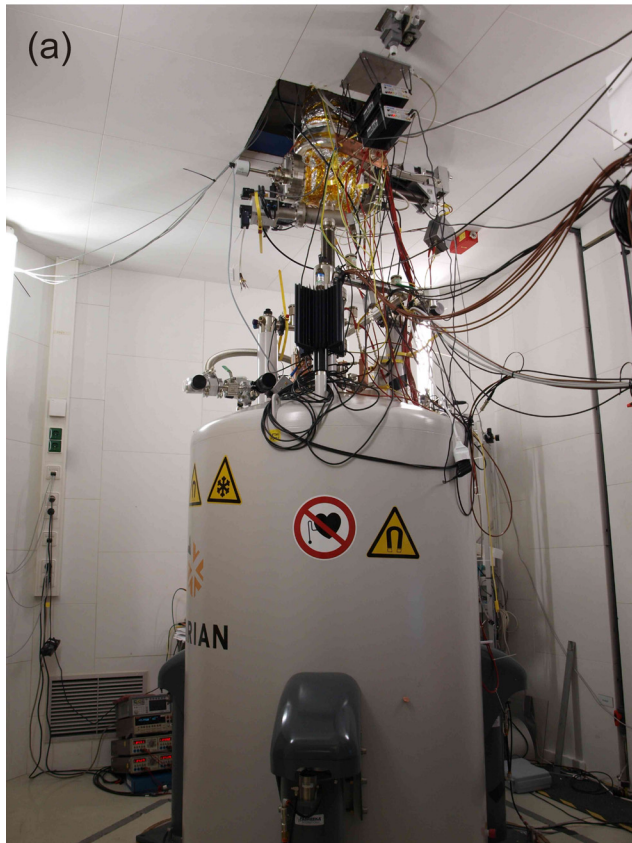
стабилизация уровня на уровне **0.1 мм**





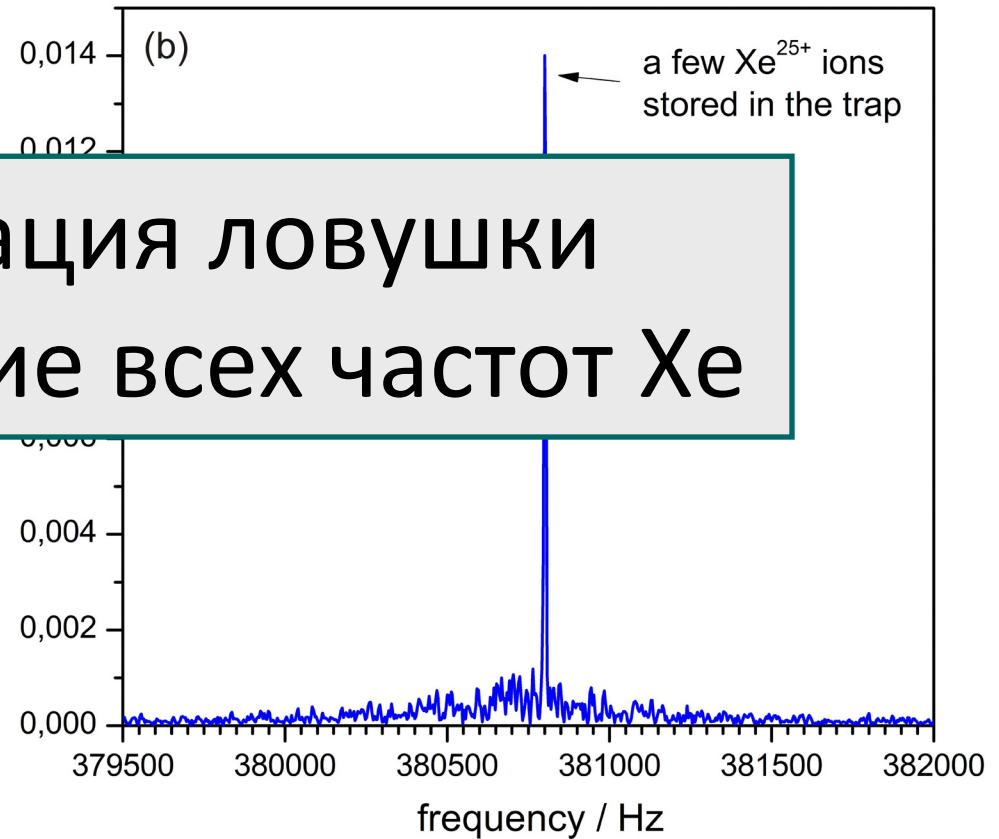
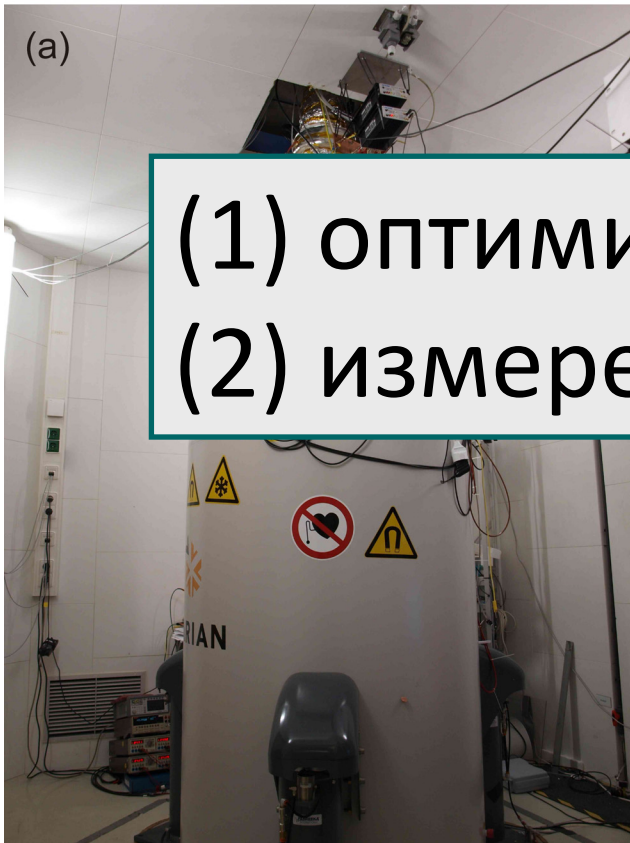
состояние на 31.12.2013

удержание ионов Xe и измерение
их аксиальной частоты



состояние на 31.12.2013

удержание ионов Xe и измерение
их аксиальной частоты



- (1) оптимизация ловушки
- (2) измерение всех частот Xe

измерение Q-значения

β^- -распада ^{187}Re

с точностью **1 эВ**

2015 ?