

Ионные ловушки в фундаментальных исследованиях

Ю.Н. Новиков

*Объединённый семинар ОФВЭ-ОТФ ПИЯФ
10 июня 2021 г.*

Ясновидец (?) с берегов туманного Альбиона

*«There is nothing new to be discovered in physics. All that remains is **more and more precise measurement**».*

William Thompson (Lord Kelvin) (1900)

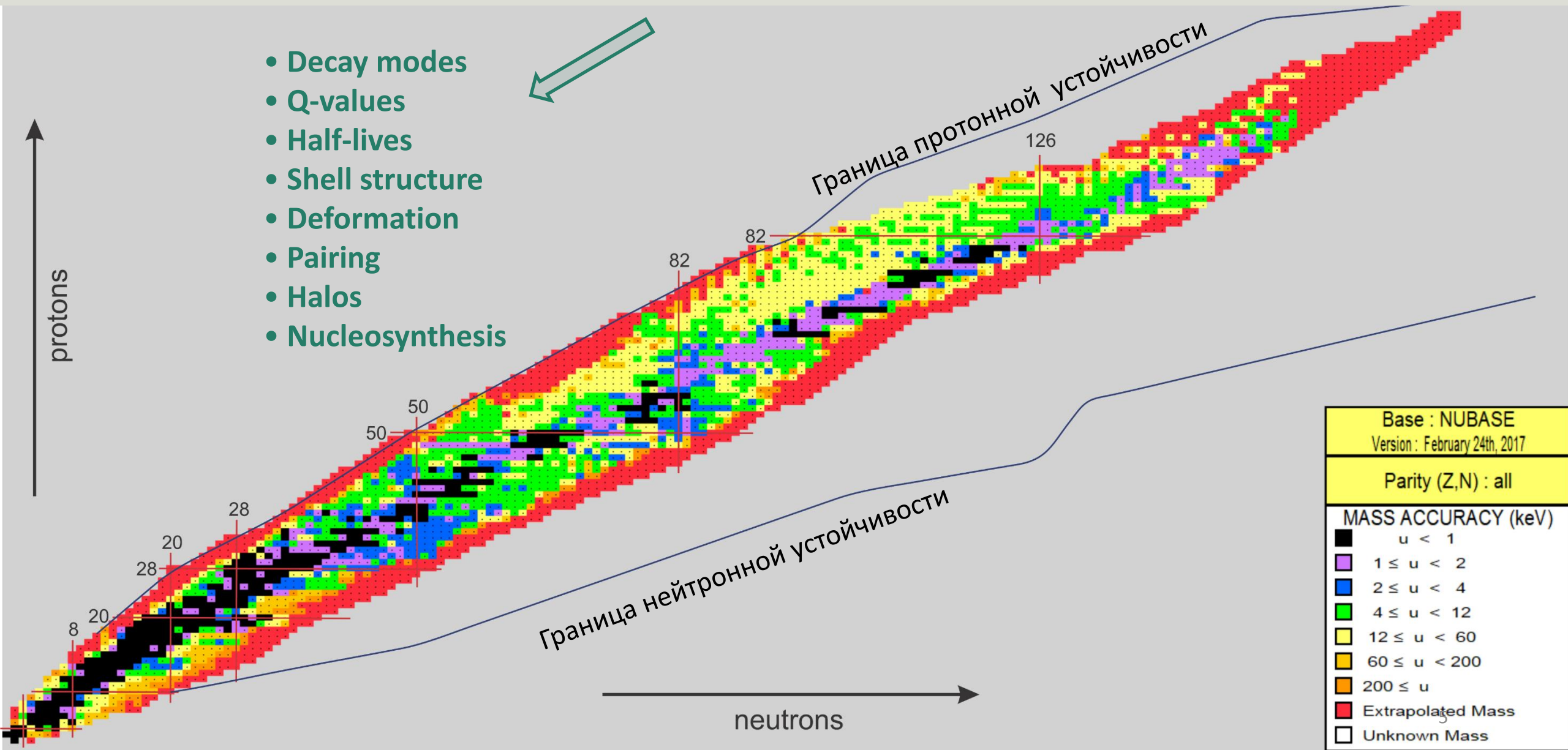
Содержание доклада

- Место ионных ловушек в масс-спектрометрии
- Как устроена ловушка?
- Ионная ловушка и нейтринная физика:
Дираковское или Майорановское нейтрино в двойном электронном захвате?
Нужно ли и как измерить массу нейтрино с помощью ионной ловушки?
- Ионная ловушка и QED:
Массовый ландшафт сверхтяжёлых элементов
Необычное явление высокоэнергичной атомной изомерии
- Ионная ловушка и перечень других проблем фундаментальной физики:
Проверка принципа CPT,
Унитарность матрицы СКМ,
Специальная теория относительности,
Измерения мировых констант
Поиск стерильных нейтрино с массой около 1 кэВ

В настоящем **обзорном** докладе будут
обсуждаться только ионные ловушки **Пеннинга**
и измерения **масс** с их помощью

Массы нуклидов: $M(Z,N) = Z(m_p + m_e) + Nm_n - (B_{nucleus} + B_{atom})/c^2$

- Decay modes
- Q-values
- Half-lives
- Shell structure
- Deformation
- Pairing
- Halos
- Nucleosynthesis

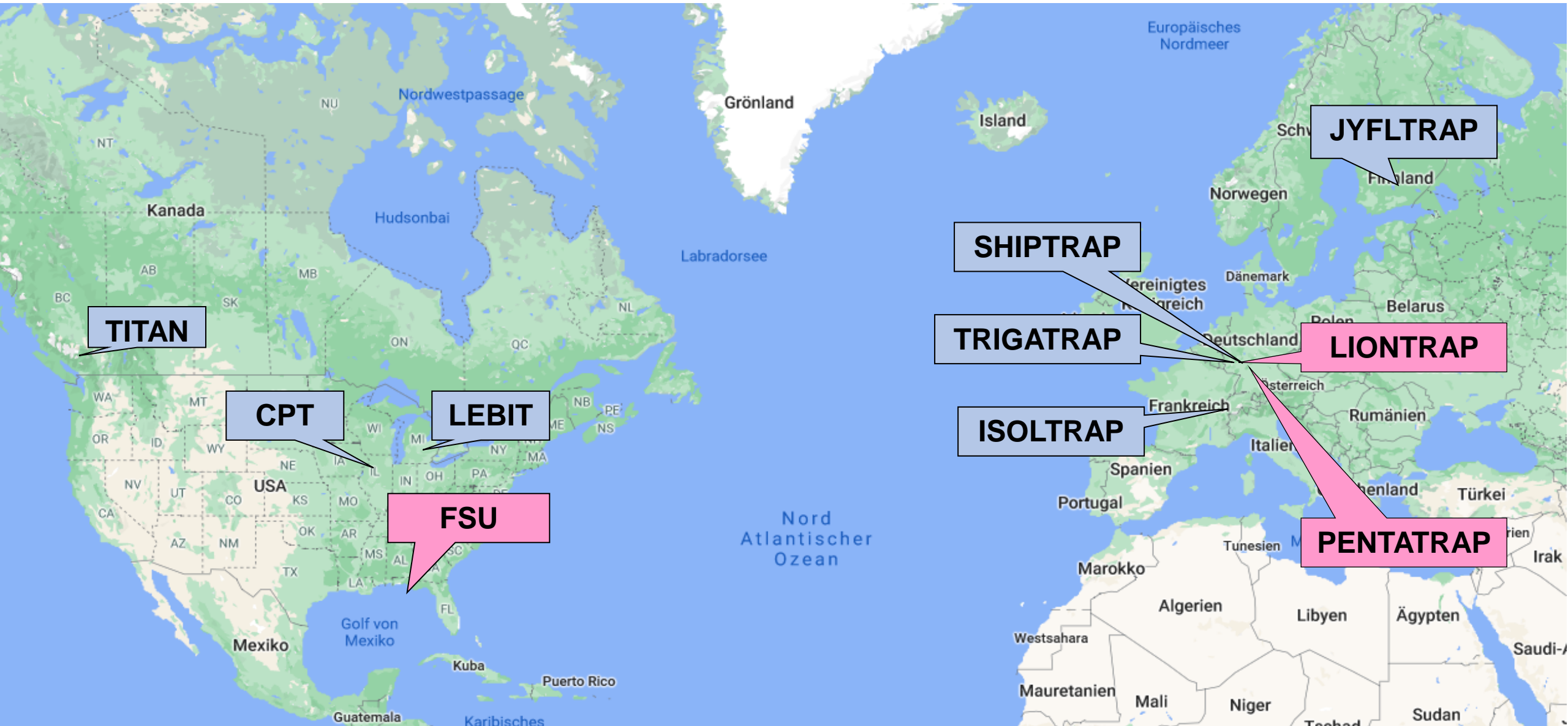


Потребности различных областей науки в точности измерения массы (полной энергия связи системы)

Область науки	Достаточная точность измерения	Действующая ловушка
Химия+биология	10^{-6}	коммерческие
Ядерная физика, астрофизика	10^{-7}	ISOLTRAP, CPT
Атомная и молекулярная физика, QED	10^{-9-11}	SHIPTRAP, JYFLTRAP, LEBIT, TITAN, FSU
Элементарные частицы, CPT, фунд. константы, физика вне СМ	$\leq 10^{-11}$	PENTATRAP

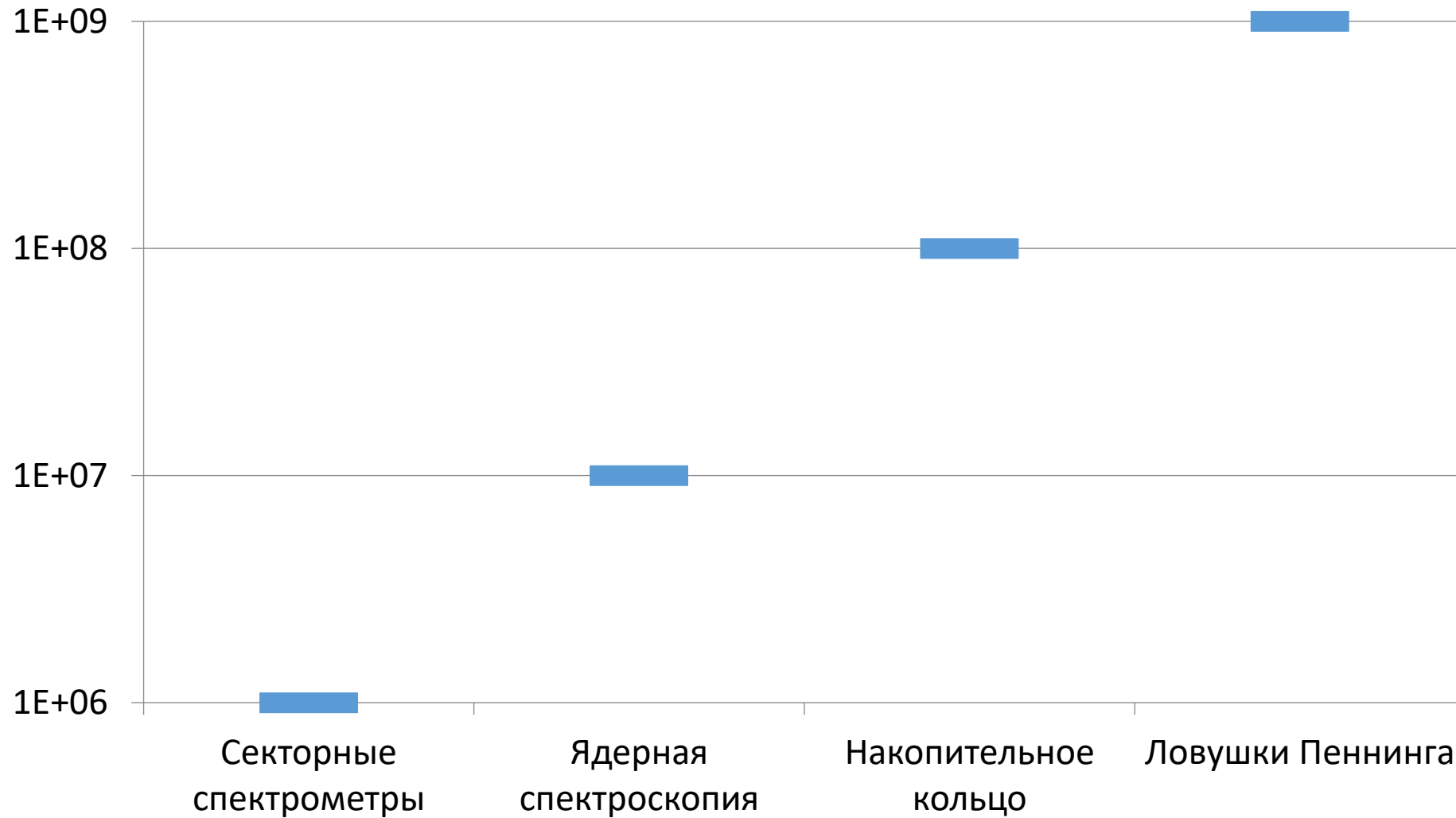
Действующие в мире ионные ловушки Пеннинга

(розовым – офф-лайн, серым – он-лайн)



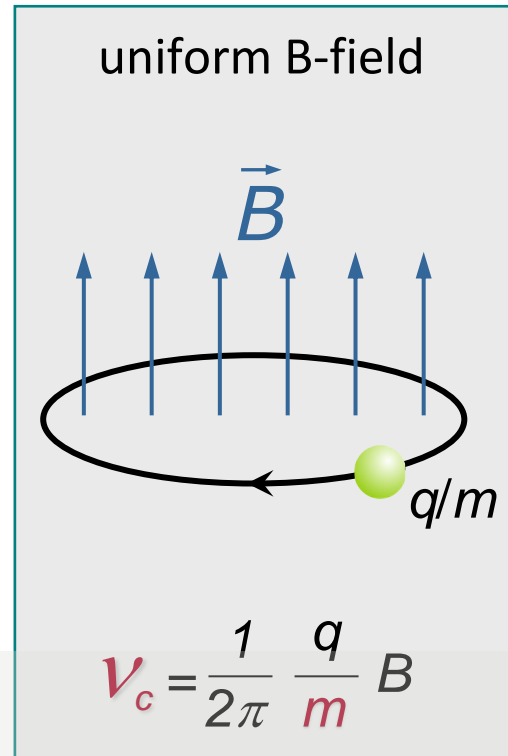
Сравнение точности установок On-Line (M/dM)

Ионные ловушки – новая глава в масс-спектрометрии

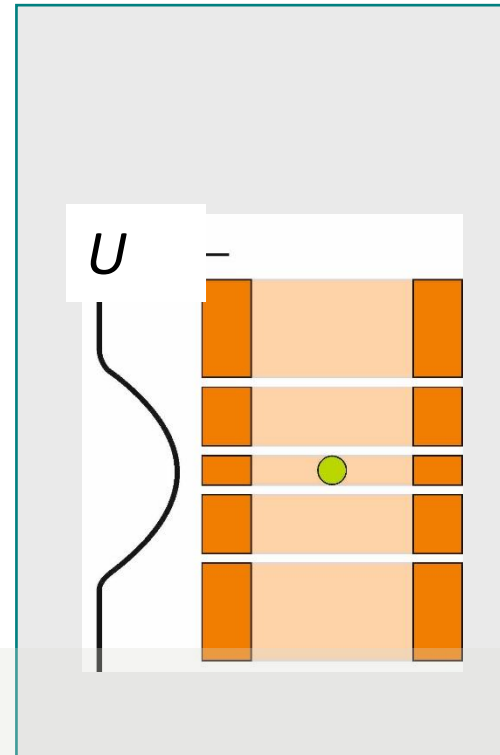


Как устроена ионная
ловушка Пеннинга?

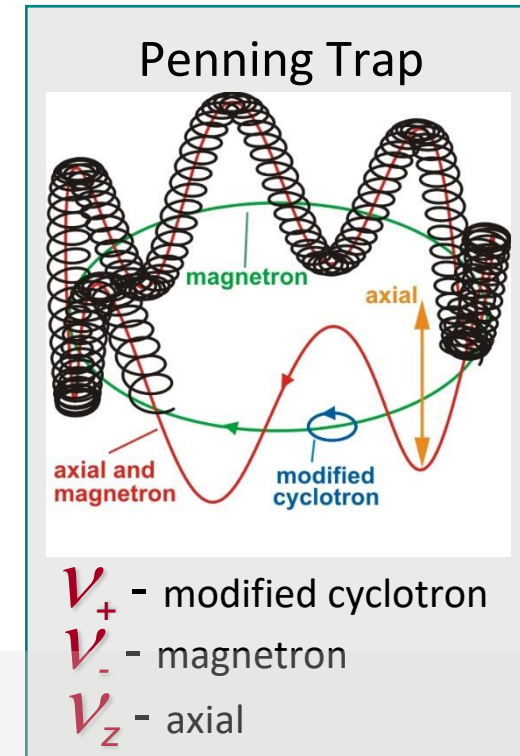
Ионная ловушка Пеннинга с однородным магнитным и электрическим полями



+



=



$$\frac{v_c^{ion_1}}{v_c^{ion_2}} = \frac{m_{ion_2}}{m_{ion_1}}$$

Уравнение движения и частоты осцилляций

plus Lorentz force:

$$\vec{F} = -e_0 \vec{\nabla} \phi(r) + \vec{v} \times \vec{B}$$

equation of motion:

$$\vec{F} = -e_0 (\vec{\nabla} \phi(r) + \vec{v} \times \vec{B}) + m \ddot{\vec{r}} = 0$$

axial oscillation

$$\frac{2e_0 U_0}{m d_0^2} \cdot z + m \ddot{z} = 0$$

$$\omega_z = \sqrt{\frac{2e_0 U_0}{m d_0^2}}$$

z or axial frequency

radial oscillation

substitution:

$$u = x + iy$$

$$\omega_c = \frac{e_0 B}{m}$$

$$u(t) = u_0 e^{-i\omega t}$$

$$i\omega_c \dot{u} - \frac{\omega_z^2}{2} u + \dot{u} = 0$$

$$\omega_+ = \frac{\omega_c}{2} + \sqrt{\frac{\omega_c^2}{4} - \frac{\omega_z^2}{2}}$$

modified cyclotron frequency

$$\omega_- = \frac{\omega_c}{2} - \sqrt{\frac{\omega_c^2}{4} - \frac{\omega_z^2}{2}}$$

magnetron frequency

Модифицированное
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:

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

$$v_+ > v_z > v_-$$

$$v_c^2 = v_+^2 + v_-^2 + v_z^2$$

долгоживущие и стабильные нуклиды

$$\frac{\delta v_c}{v_c} < 10^{-10}$$

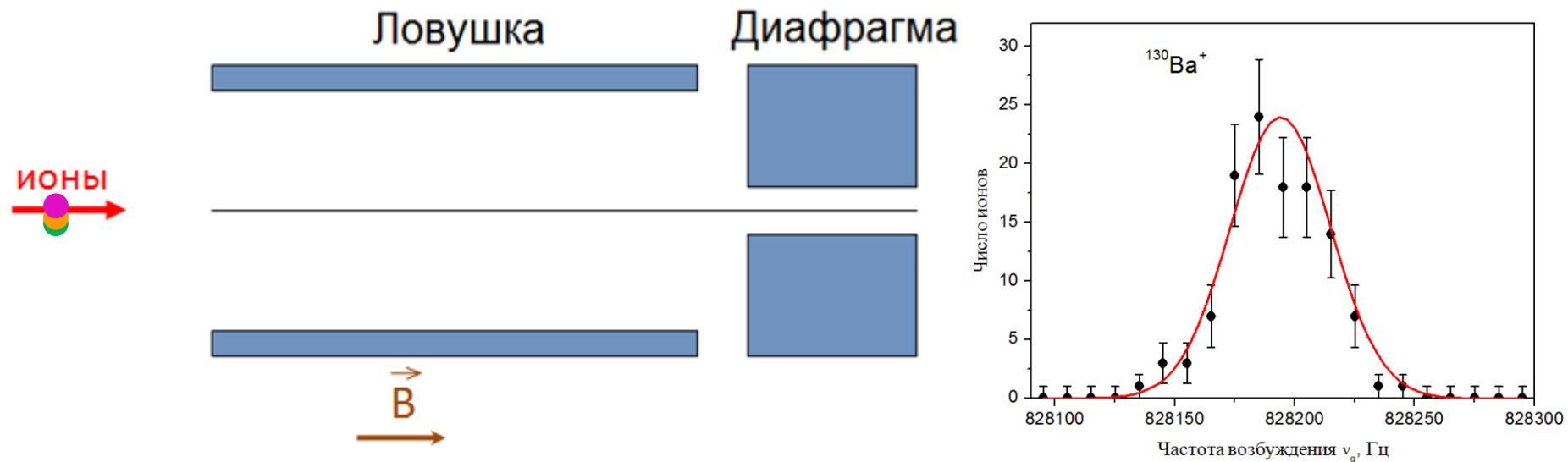
$$v_c = v_+ + v_-$$

короткоживущие нуклиды

$$\frac{\delta v_c}{v_c} > 10^{-10}$$

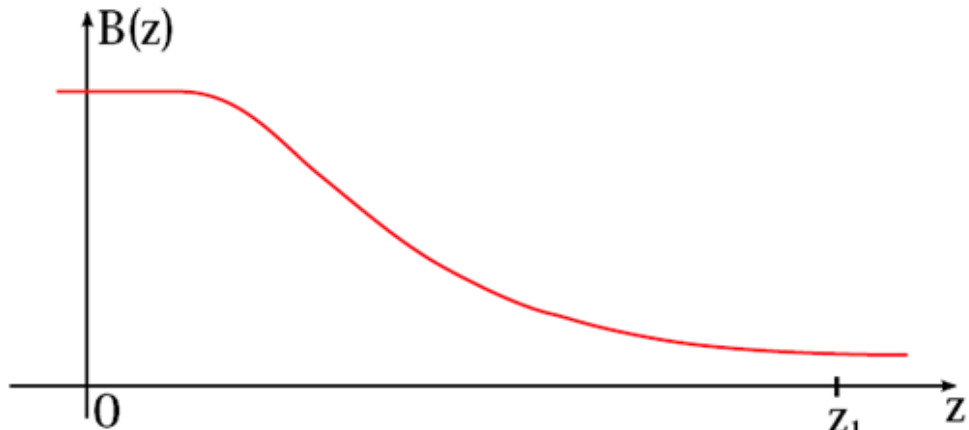
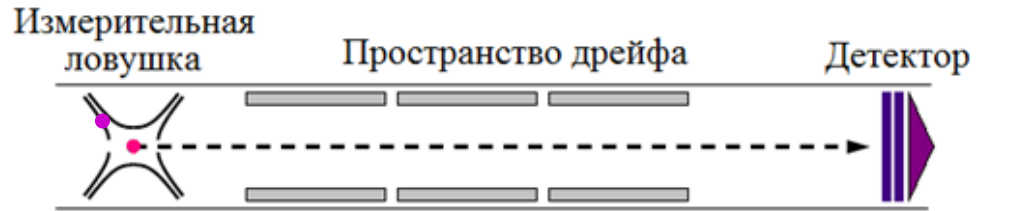
Классическая ионная ловушка состоит из тандема двух отдельных камер : подготовительной (очищающей) ловушки и измерительной ловушки. В большинстве установок эти две камеры располагаются в одном ярме магнита

Подготовительная ловушка Пеннинга: охлаждение в буферном газе



- ◇ Давление буферного газа (гелий) $\approx 10^{-6}$ мбар
- ◇ Время охлаждения ≈ 100 мс
- ◇ Разрешающая способность $\approx 10^5$
- ◇ Число ионов в ловушке < 100
- ◇ Зарядовые состояния ионов: $1+$, $2+$

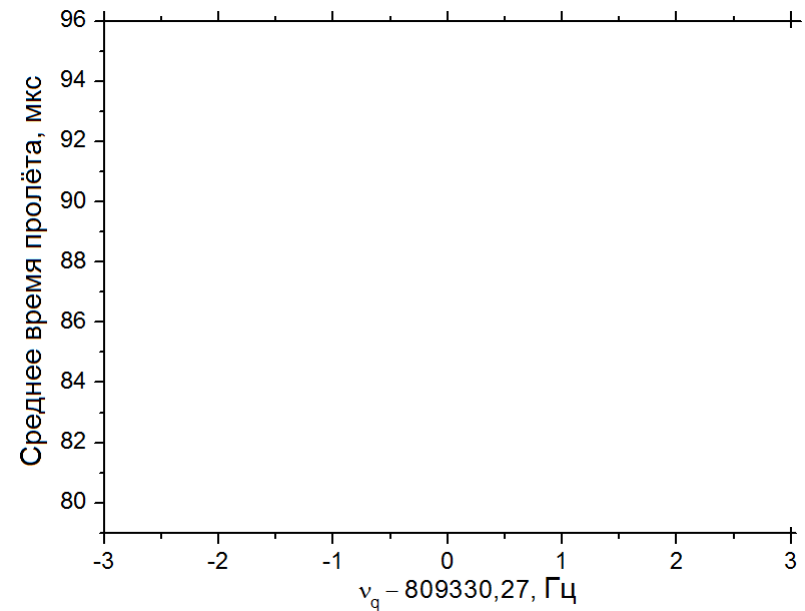
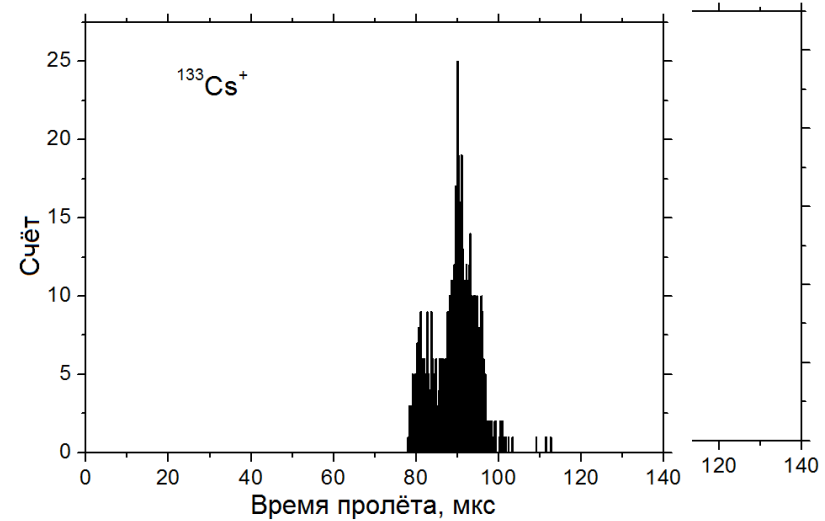
Измерительная ловушка Пеннинга: времяпролётный резонанс



$$\vec{F} = -\mu \frac{\partial V(z)}{\partial z} \hat{e}_z$$

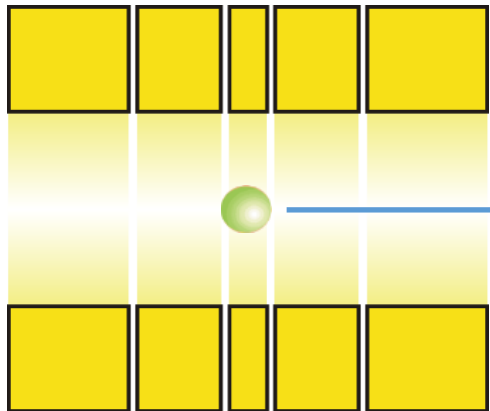
$$d\nu \approx \frac{0,9}{T_{exc}}$$

$$R = \frac{\nu}{\Delta\nu} \approx 10^6, \text{ при } T_{exc} = 1 \text{ с, } m = 100 \text{ у}$$



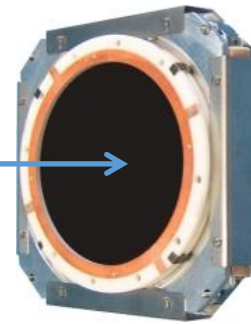
Метод С. Елисеева фазового отображения

Penning trap



projection of ion position

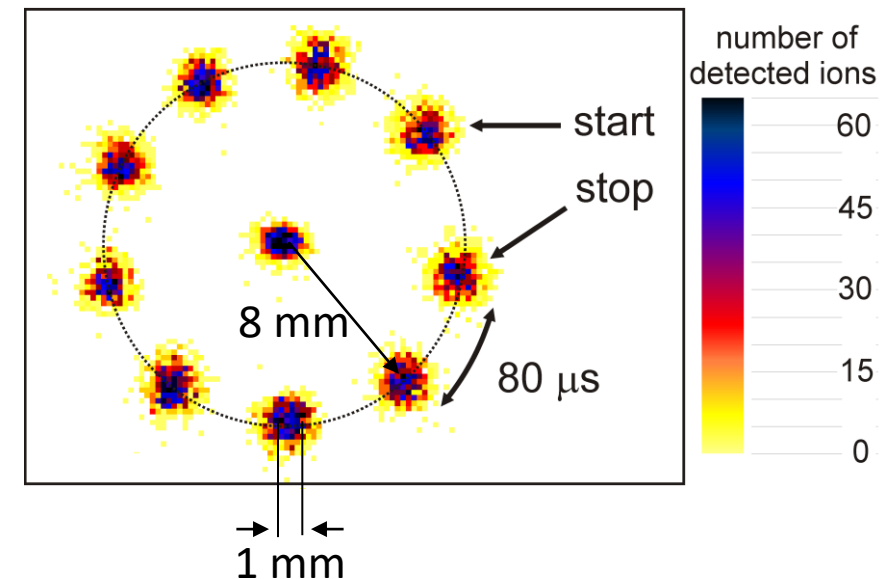
position-sensitive
MCP detector



$$v_{\pm} = \frac{\varphi_{\pm}}{2\pi t} = \frac{\Delta\varphi_{\pm} + 2\pi n}{2\pi t}$$

gain in precision ≈ 5
gain in res. power ≈ 50

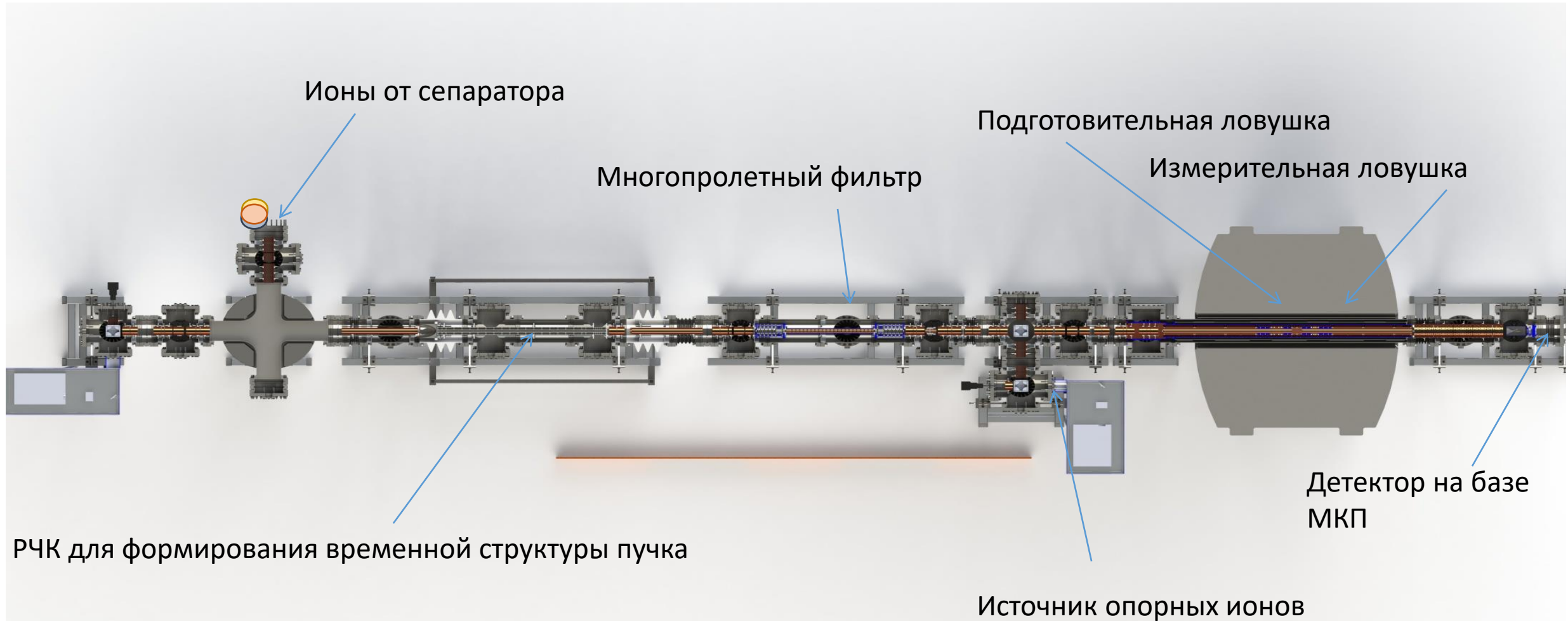
image of magnetron motion ($G \approx 20$)



S. Eliseev et al., PRL 110 (2013) 082501

S. Eliseev et al., Appl. Phys. B 114 (2014) 107

Принцип работы системы с ионной ловушкой он-лайн



Требования к ловушке для прецизионности измерений

Давление в ловушке	$P \leq 10^{-16}$ mbar
Характеристики магнитного поля	$\delta B/B \delta t < 10^{-9}/\text{h}$ $\delta B/B \leq 10^{-8}$ per 1 cm ³
Температура ионов в ловушке	$T \approx \text{mK}$
Стабилизация системы сверхпроводящего магнита	$\Delta T < 10$ mK $\Delta P < 0.05$ mbar

Основные достоинства ионной ловушки Пеннинга

- Высочайшая точность измерения масс, превосходящая измерения всеми другими существующими методами на много порядков
- Непревзойдённая чувствительность на уровне регистрации одной частицы
- Достоверность получаемых данных, откалиброванных во время эксперимента непосредственно углеродом-эталонном массы

Во многих задачах физики требуются разности масс. Их можно просто получить измерением отношений частот R

$$Q = M_i - M_f = (M_f - m_e)(R-1) + RB_f - B_i \approx (M_f - m_e)(R-1)$$

$$\frac{\delta Q}{Q} \approx \frac{\delta R}{R-1} ,$$

где

Q - определяемая разность масс нейтральных атомов,

M_f - масса дочернего атома (известная величина- калибрانت),

B – энергии связи валентных электронов, которыми можно пренебречь

$R = \frac{\nu_f}{\nu_i}$ - отношение циклотронных частот дочернего и материнского ионов (измеряемая величина)

SHIPTRAP

GSI/FAIR, Дармштадт, Германия

Он-лайн «сверхтяжёлый» эксперимент на системе SHIPTRAP

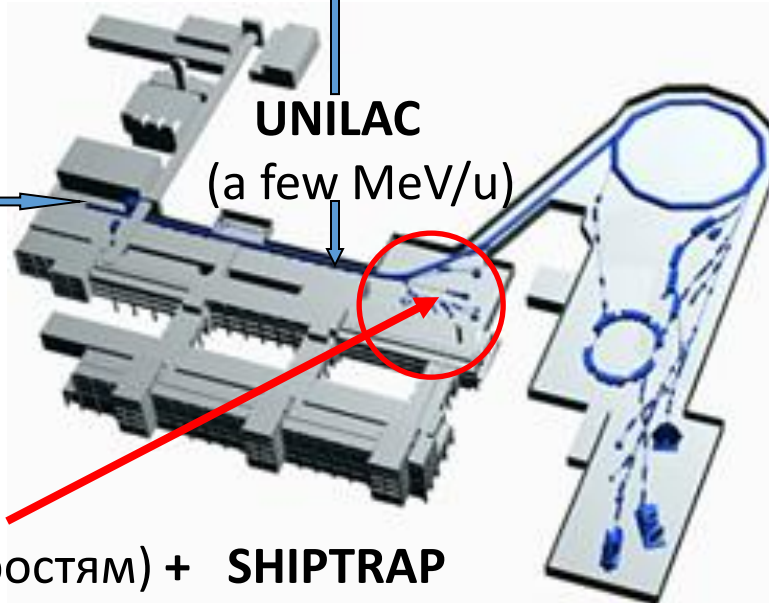
Установка SHIPTRAP GSI (Darmstadt)



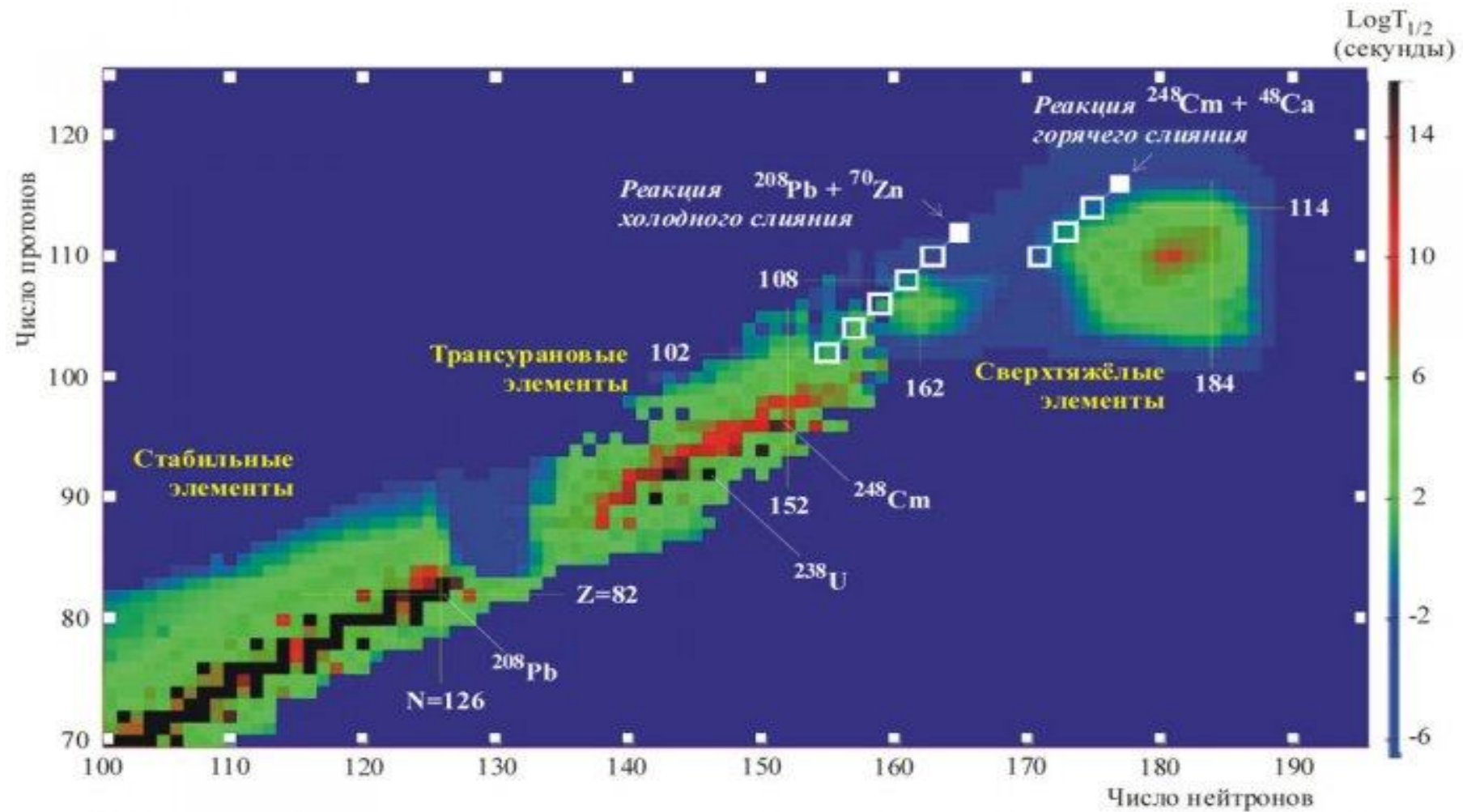
ионные источники
(ICR, Penning)
протоны - уран

UNILAC
(a few MeV/u)

SHIP (фильтр по скоростям) + SHIPTRAP



В поисках острова Сверхтяжёлых элементов

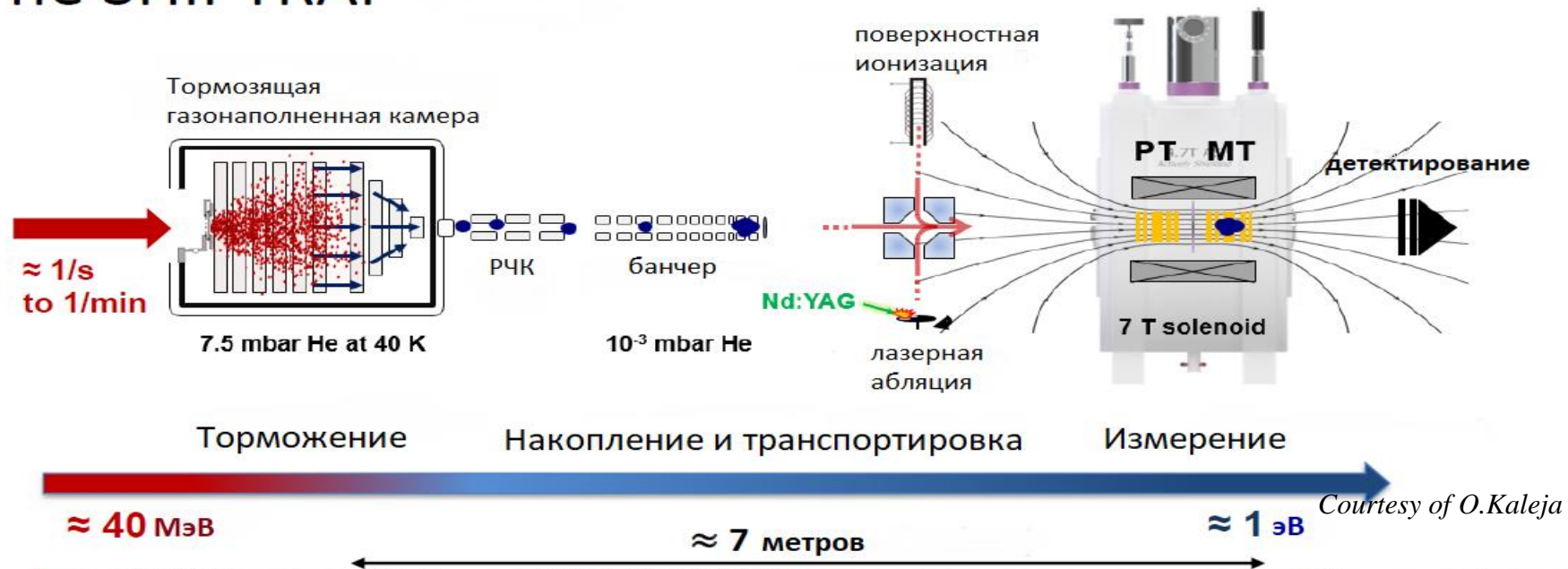


Чем интересны сверхтяжёлые нуклиды?

- Сильный релятивистский эффект ($\sim \alpha Z$), модификация QED,
- “Близость к ядерной материи”,
- Кластерная радиоактивность,
- Появление диковинных форм ядер (ядра-бублики, торроиды и т.д.),
- Проверка закона химической периодичности в таблице элементов,
- Вакуумное рождение позитронов

Модифицированная система SHIPTRAP

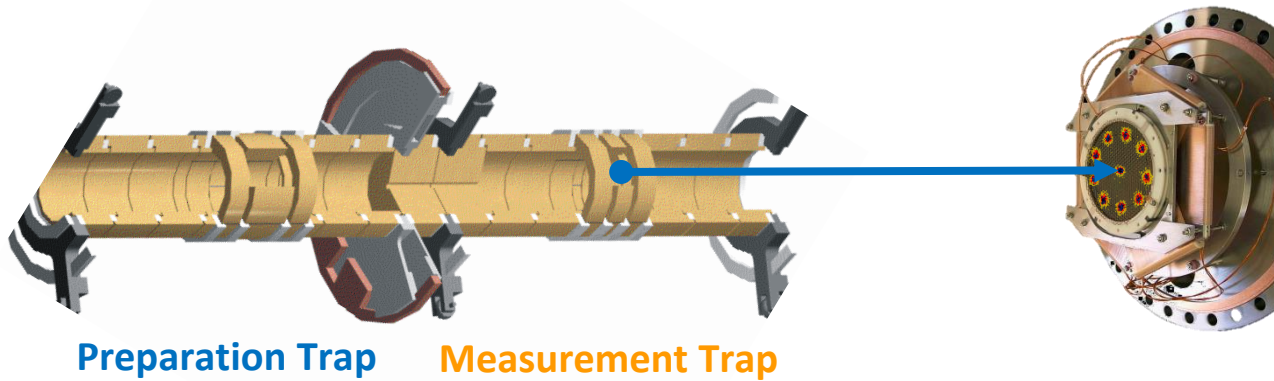
The SHIPTRAP



PI-ICR on $^{255(m)}\text{Lr}^{2+}$ @ SHIPTRAP

measurements of masses of No, Lr, Rf

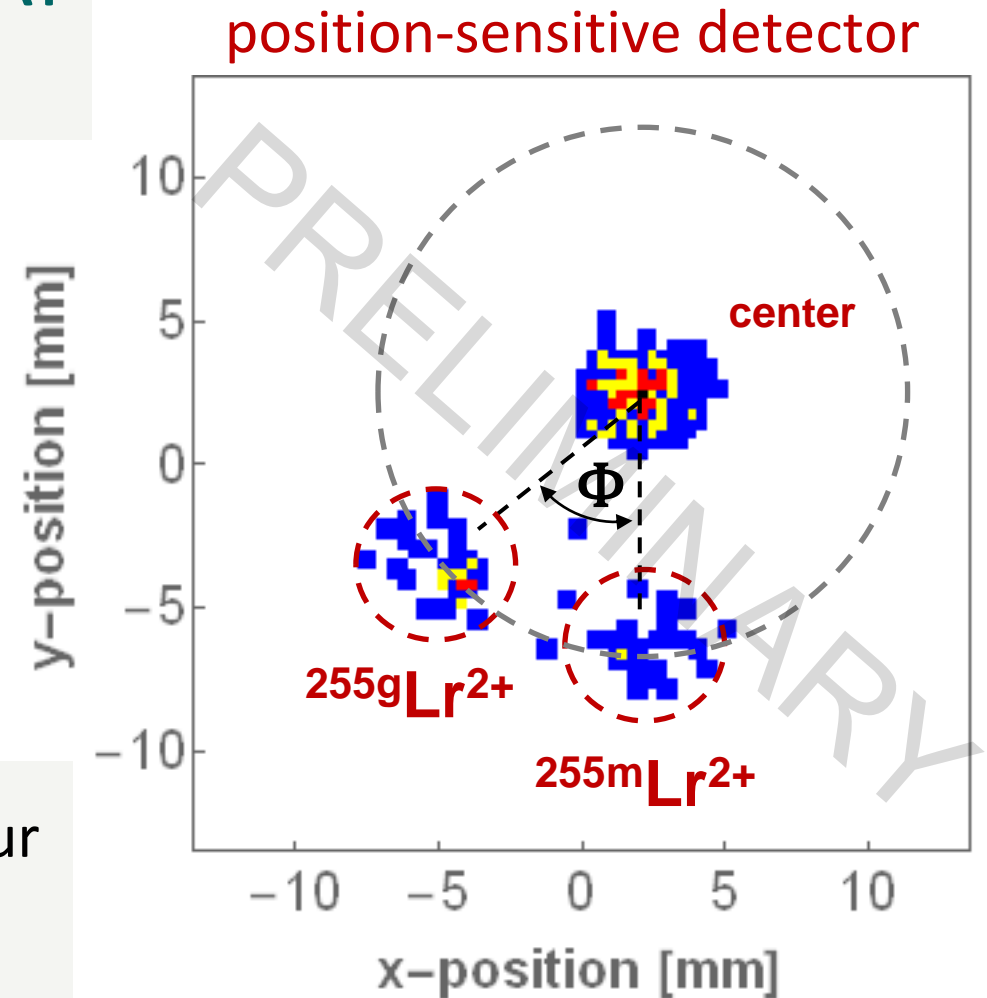
Courtesy: O. Kaleja / M. Block



count rate of $^{255}\text{Lr}^{2+}$ ions on detector: ~ 14 events/hour

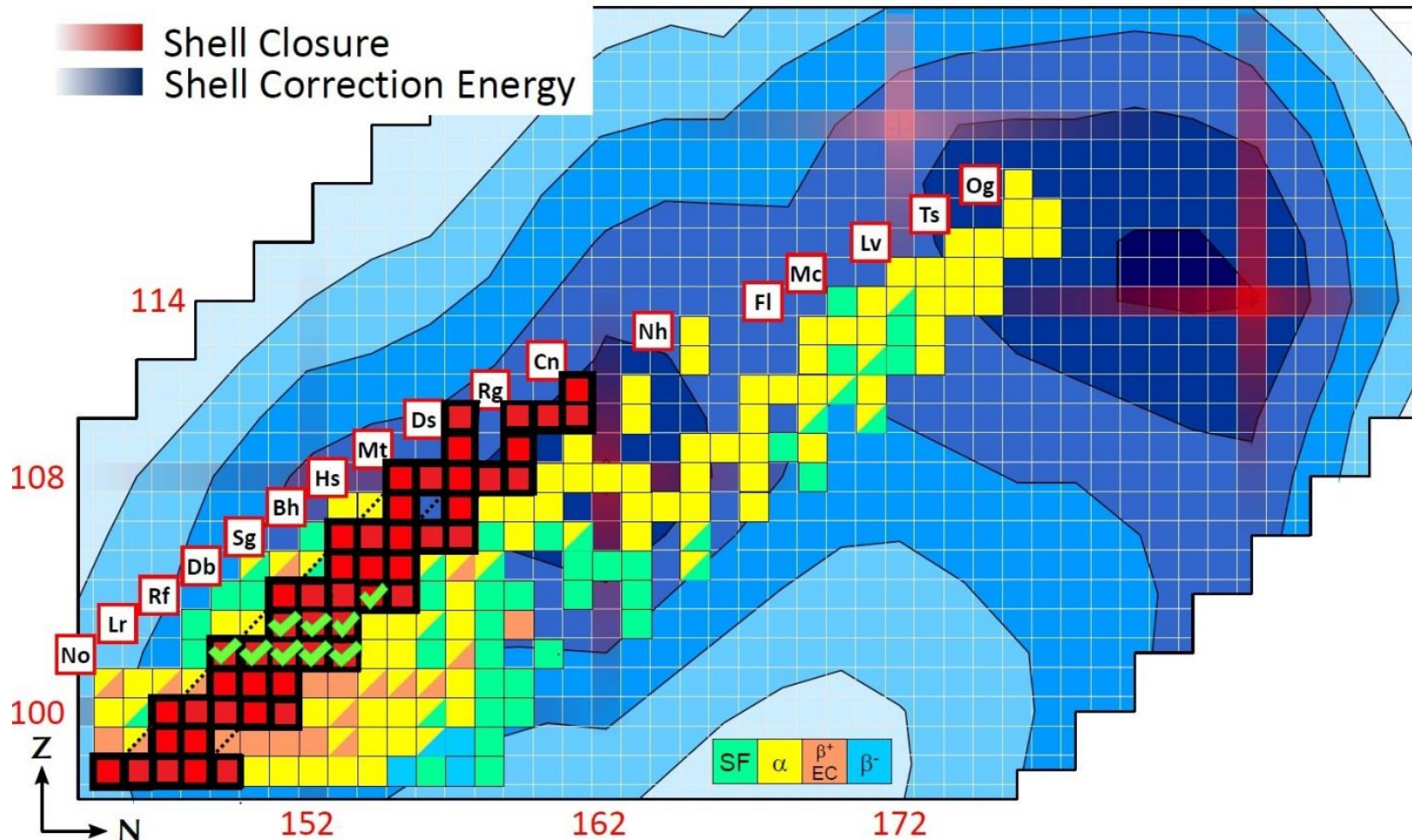
energy of the nuclear isomeric state: ~ 30 keV

mass resolution: $\sim 10^7$



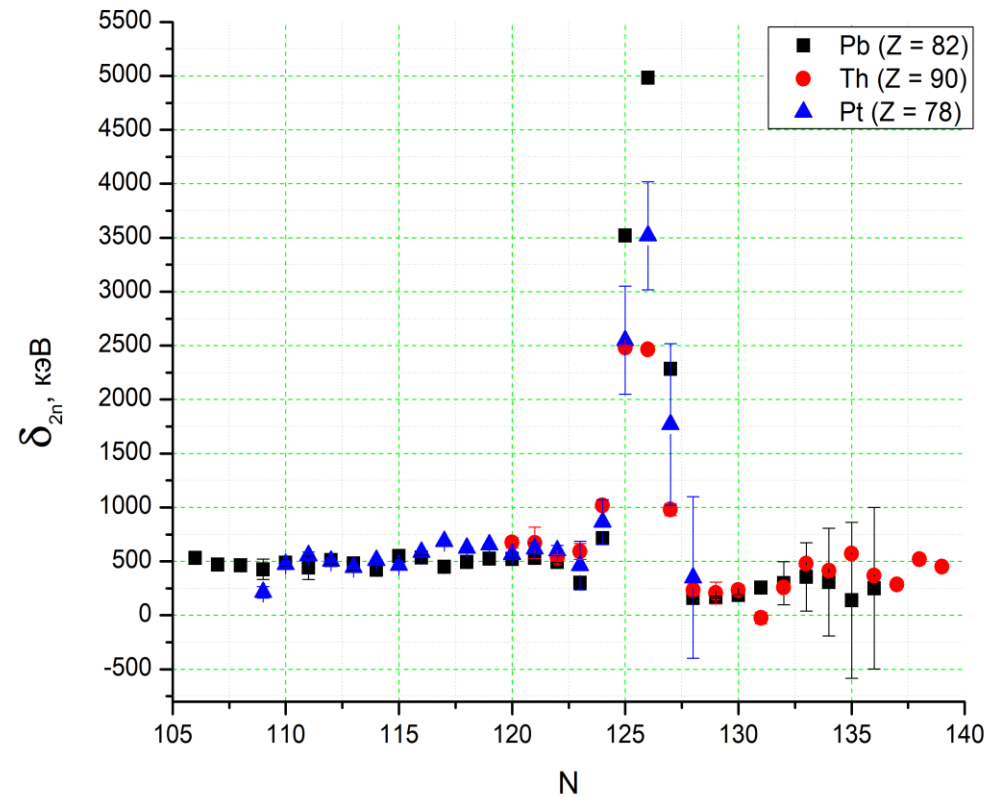
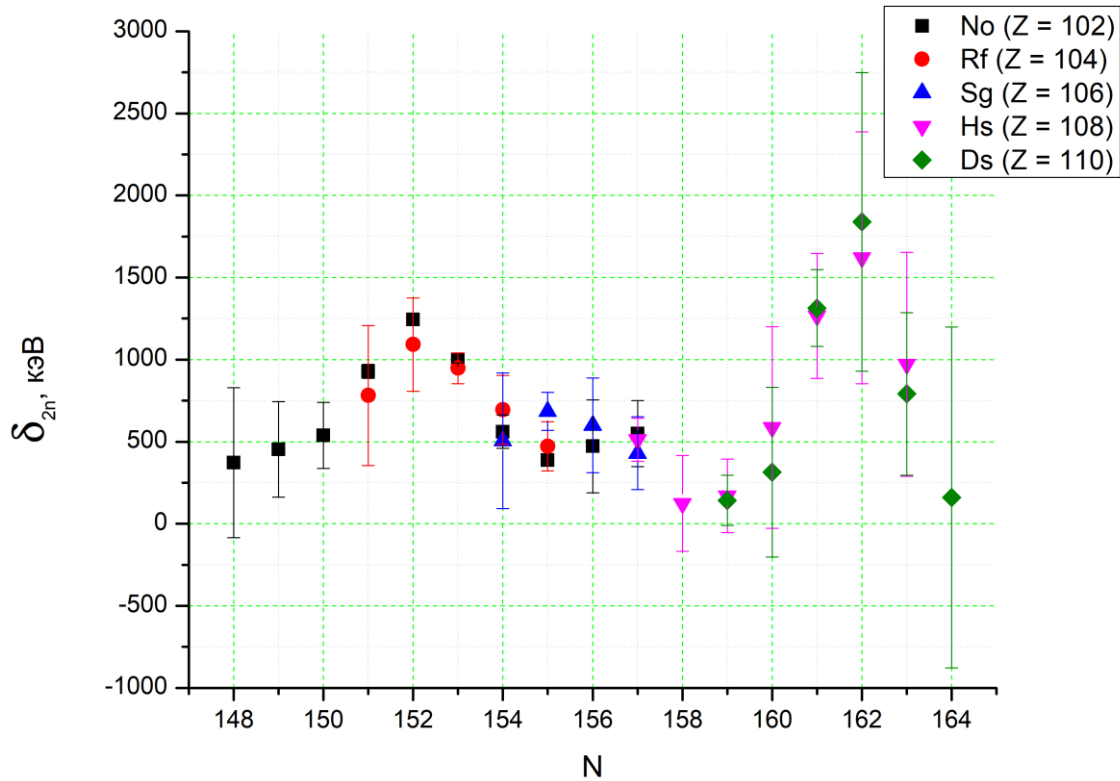
Ландшафт масс трансфермиевых нуклидов, полученный в измерениях с ионной ловушкой SHIPTRAP

Сверхтяжелые элементы



Сравнение оболочечных щелей для нуклидов с N=152, 162 и N=126

$$\delta_{2n} = -2M_{\text{exc}}(N, Z) + M_{\text{exc}}(N-2, Z) + M_{\text{exc}}(N+2, Z)$$



Основной результат «сверхтяжёлого»
эксперимента на ловушке SHIPTRAP:

обнаружение островков стабильности на
пути к большому Острову устойчивости

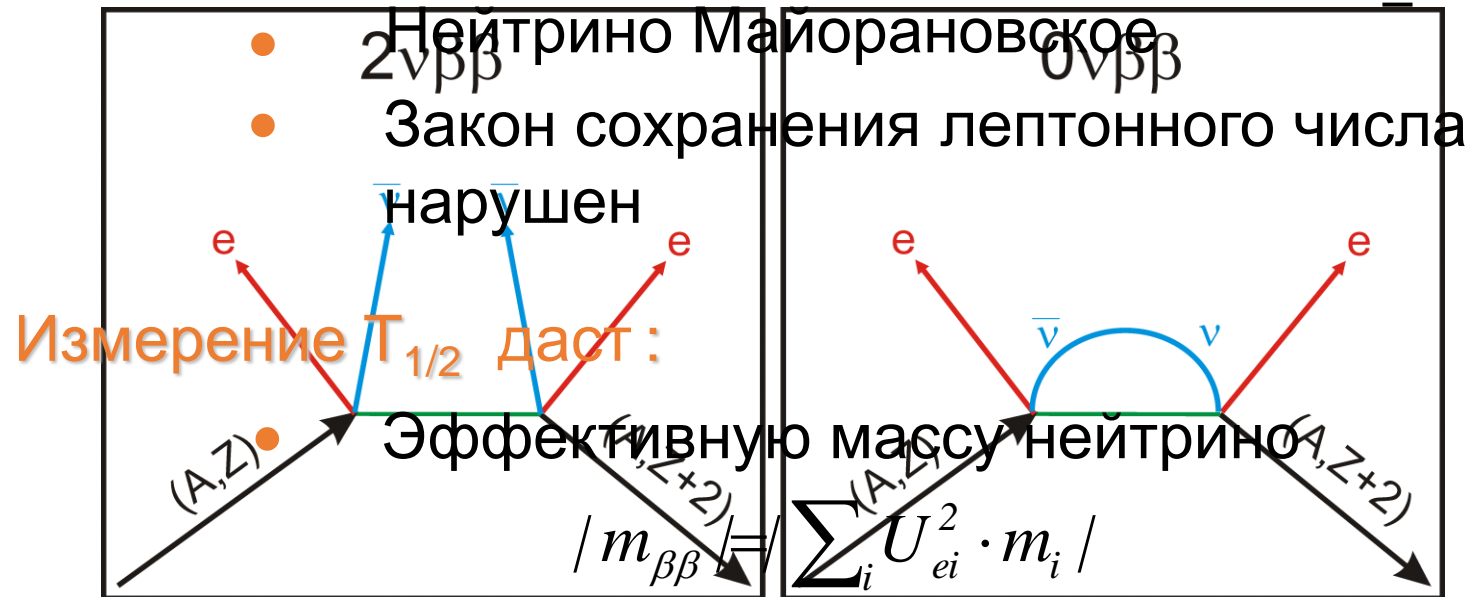
Поиск безнейтринного двойного захвата электронов ядром, выполненный на SHIPTRAP

K. Blaum, S. Eliseev, F. A. Danevich, V. I. Tretyak, S. Kovalenko, M. I. Krivoruchenko, Yu. N. Novikov, J. Suhonen.. “Neutrinoless double-electron capture”, *Rev. Mod. Phys.*, Vol. 92, No. 4 (2020) 1-61.

Безнейтринные бета-превращения

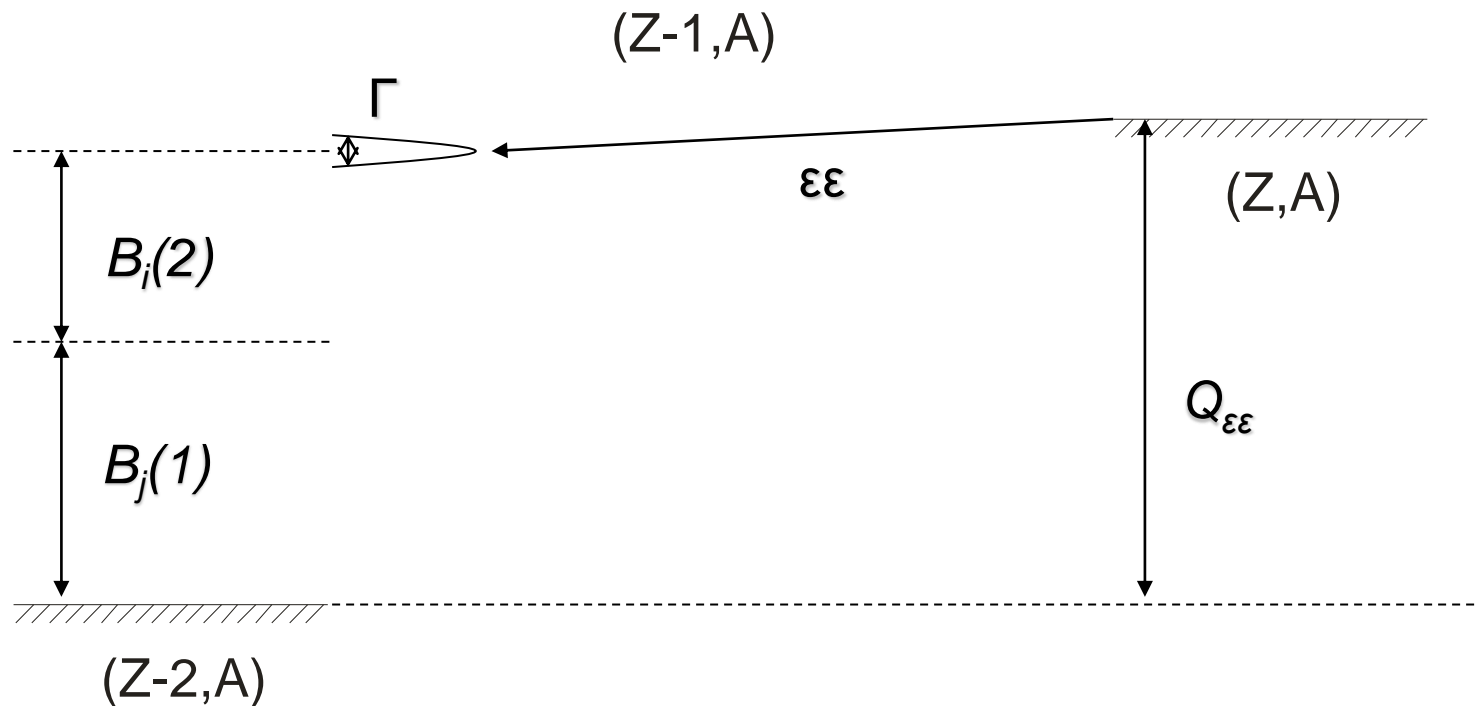
Двойной β^- распад ($\beta\beta$) Двойной e-захват ($2EC$)

Наблюдение безнейтринного процесса покажет, что:



- Иерархию масс нейтрино

Резонансный безнейтринный $\epsilon\epsilon$ -захват (2EC)



$$\lambda_{00\epsilon\epsilon}^{res} = c \cdot |M|^2 \cdot |\psi_{1e}(0) \cdot \psi_{2e}(0)|^2 m_v^2 \frac{\Gamma}{\left(Q_{\epsilon\epsilon} - B_i^{(1)} - B_j^{(2)}\right)^2 + \frac{1}{4}\Gamma^2}$$

Наличие резонанса определяется сравнением величин Q и суммы энергий связи двух захватываемых электронов в атоме. В доловушечной масс-спектрометрии это было невозможно сделать, так как точность Q тех времён (несколько кэВ) была на много порядков хуже точности энергий связи и ширин уровней (эВ).

0+ → 0+ переходы между основными состояниями ядер

2EC-переход	Q (эксп.), keV	Δ (эксп), keV	$T_{1/2} \cdot m_{2EC} ^2$, лет	
$^{152}\text{Gd} \rightarrow ^{152}\text{Sm}$	55.7(0.2)	0.91(0.18)	неск. единиц $\cdot 10^{26}$ S.Eliseev et al, PRL 106, 052504 (2011)	0+ → 0+
$^{164}\text{Er} \rightarrow ^{164}\text{Dy}$	25.07(0.12)	6.81(0.12)	10^{30} S.Eliseev et al. PRL 107, 152501 (2011)	0+ → 0+
$^{180}\text{W} \rightarrow ^{180}\text{Hf}$	143.1(0.2)	12.4(0.2)	неск. Единиц 10^{27} Ch.Doese et al., Nucl. Phys., A 875 , 1 (2012)	0+ → 0+

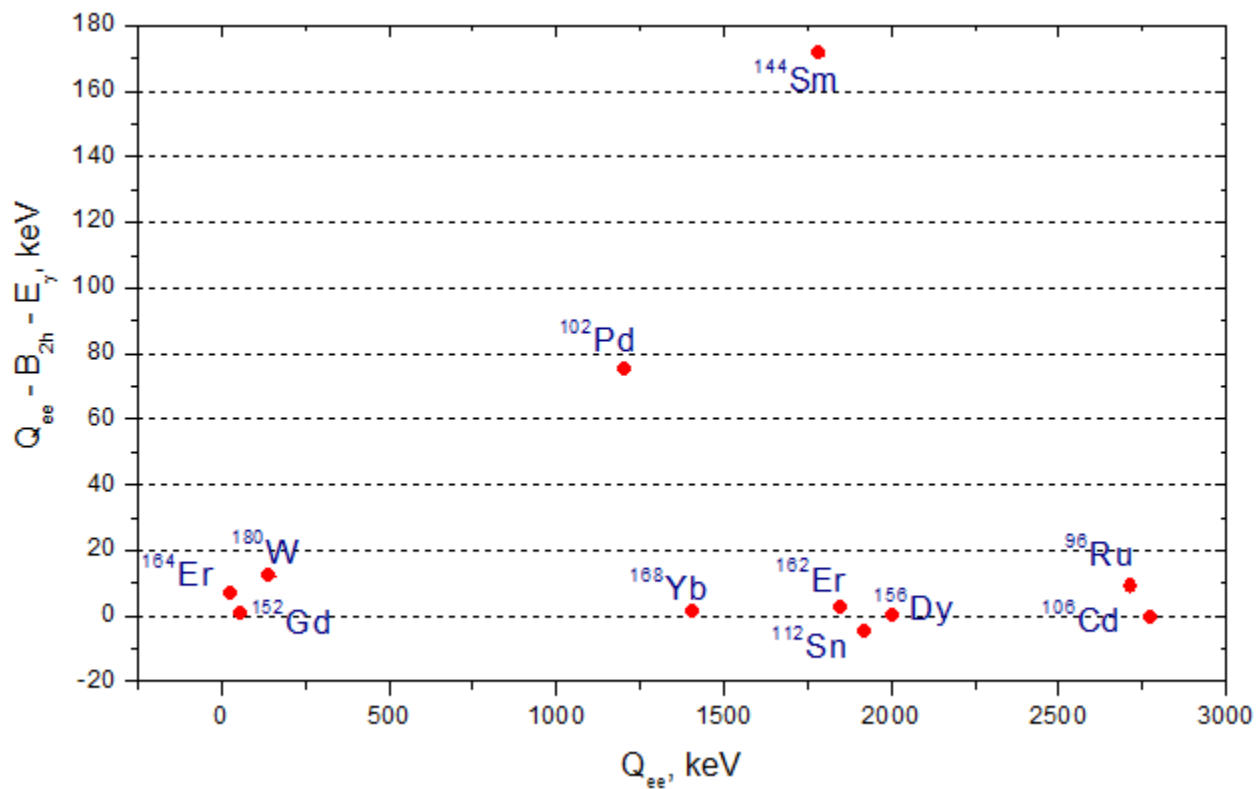
Двойной захват на возбуждённые состояния ядра

Table 2. Transitions to nuclear excited states

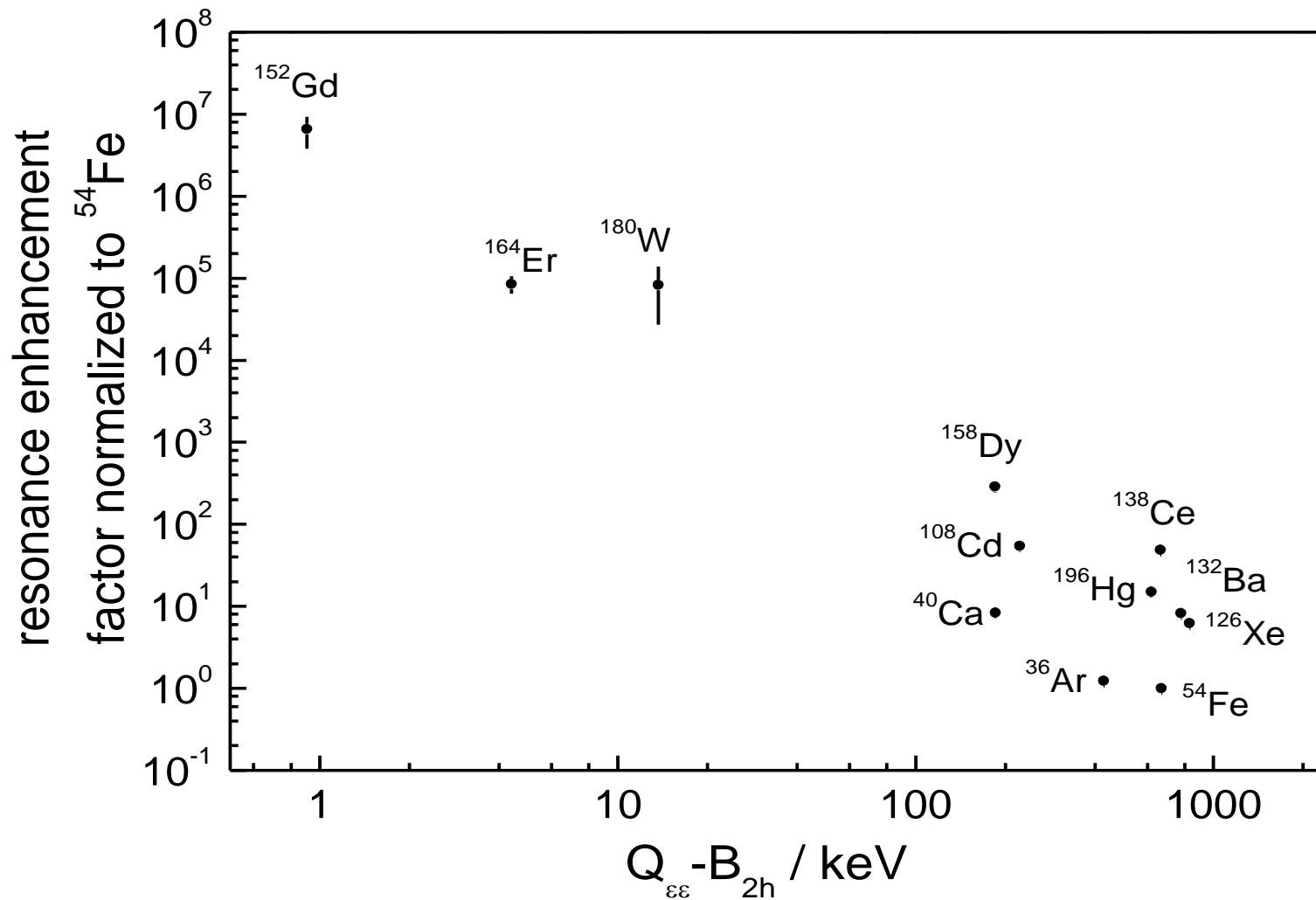
transition	$E_{\beta\beta}$ / keV	$I_{\beta\beta}^{\square}$	electron orbitals	$Q_{\beta\beta}$ / keV	$\delta_{\beta\beta}$ / keV
$^{96}\text{Ru} \rightarrow ^{96}\text{Mo}$	2700.21(6)	2^+	L_2L_2	2714.51(13)	9.05(14)
$^{74}\text{Se} \rightarrow ^{74}\text{Ge}$	1204.205(7)	2^+	L_2L_3	1209.169(49) 1209.240(7)	2.50(5) 2.57(1)
$^{106}\text{Cd} \rightarrow ^{106}\text{Pd}$	2748.2(4)	$(2,3)^-$	KL_3	2775.39(10)	-0.33(41)
$^{112}\text{Sn} \rightarrow ^{112}\text{Cd}$	1871.00(19)	0^+	KK	1919.82(16)	-4.50(25)
$^{124}\text{Xe} \rightarrow ^{124}\text{Te}$	2790.41(9)	$(0^+ - 4^+)$	KK	2856.82(13)	1.96(16)
$^{130}\text{Ba} \rightarrow ^{130}\text{Xe}$	2544.43(8)	$[0^+]$	KK	2623.71(26)	10.15(26)
$^{136}\text{Ce} \rightarrow ^{136}\text{Ba}$	2315.32(7)	0^+	KK	2378.53(27)	-11.67(28)
$^{156}\text{Dy} \rightarrow ^{156}\text{Gd}$	1946.375(6) 1952.385(7) 1988.5(2) 2003.749(5)	1^- 0^- 0^+ 2^+	KL_1 KM_1 L_1L_1 M_1N_3	2005.95(10)	0.75(10) 1.37(10) 0.54(24) 0.04(10)
$^{162}\text{Er} \rightarrow ^{162}\text{Dy}$	1782.68(9)	2^+	KL_3	1846.95(30)	2.69(30)
$^{168}\text{Yb} \rightarrow ^{168}\text{Er}$	1403.7357(23)	$(2)^-$	M_2M_2	1409.27(25)	1.52(25)
$^{184}\text{Os} \rightarrow ^{184}\text{W}$	1322.152(22)	0^+	KK	1453.68(58)	-8.89(58)

1. S.A. Eliseev, **Y.N. Novikov**, K. Blaum, “Search for resonant enhancement of neutrinoless double-electron capture by high-precision Penning-trap mass spectrometry”, J. Phys. **G 39** (2012) 124003. Ю.Новиков –Семинар 10.06.2021

Значения энергетической щели Δ для измеренных нуклидов на SHIPTRAP



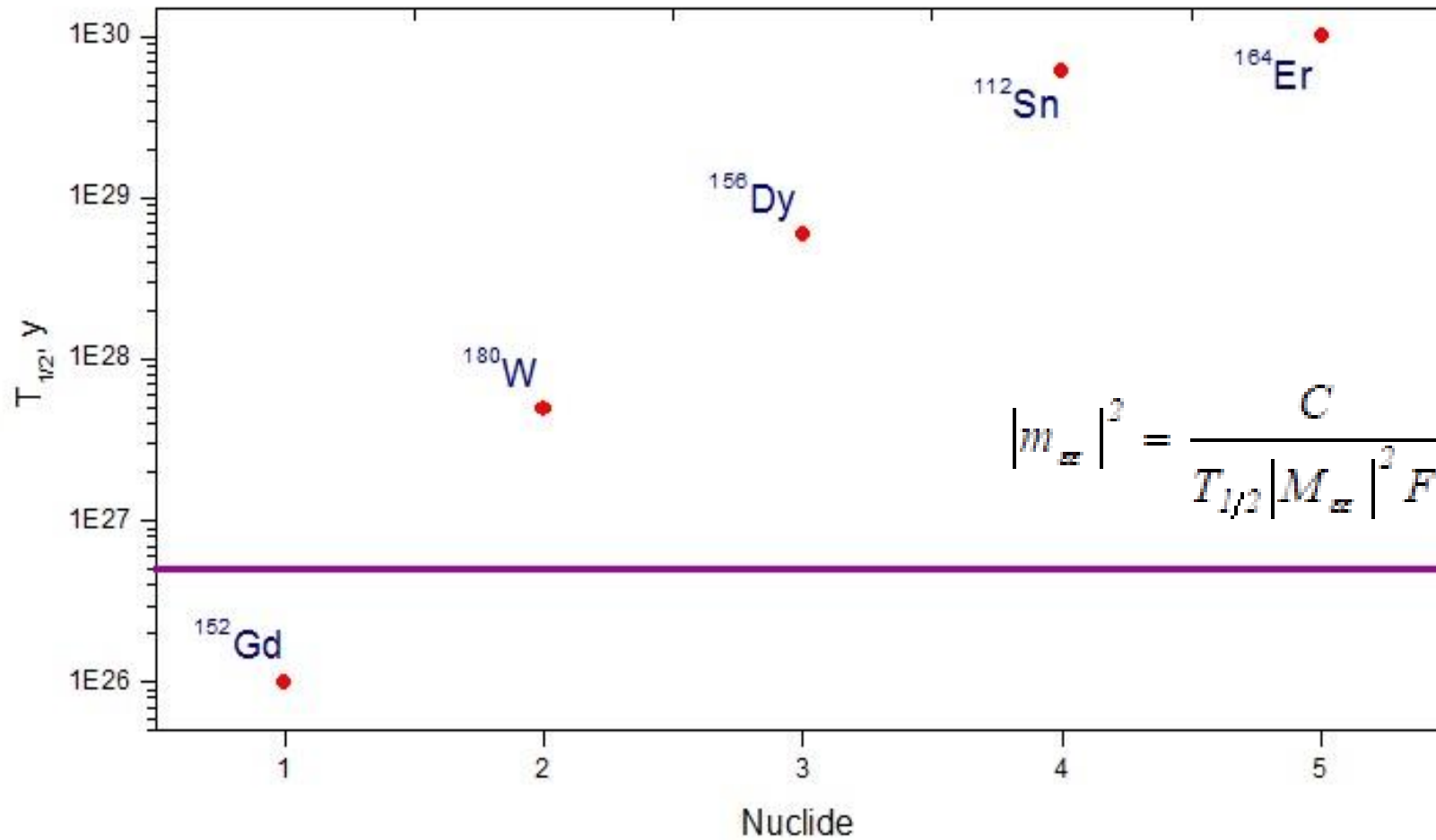
Факторы резонансного усиления $\epsilon\epsilon$ -захвата



Периоды полураспада безнейтринного двойного захвата

($m_\nu=1\text{eV}$)

Горизонтальная линия- предел чувствительности действующих установок



Основной результат поиска кандидатов на безнейтринный процесс на ловушке SHIPTRAP:

пока только один нуклид может претендовать на
крупномасштабный эксперимент.

Поиски кандидатов должны быть продолжены на установке
PENTATRAP



РЕНТАТРАП

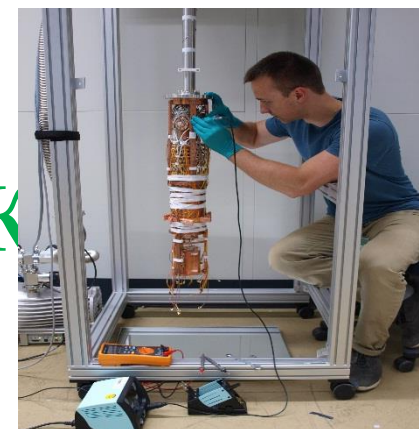


Институт Макса Планка по ядерной физике
Гейдельберг, Германия

Запуск системы из пяти
ионных ловушек-



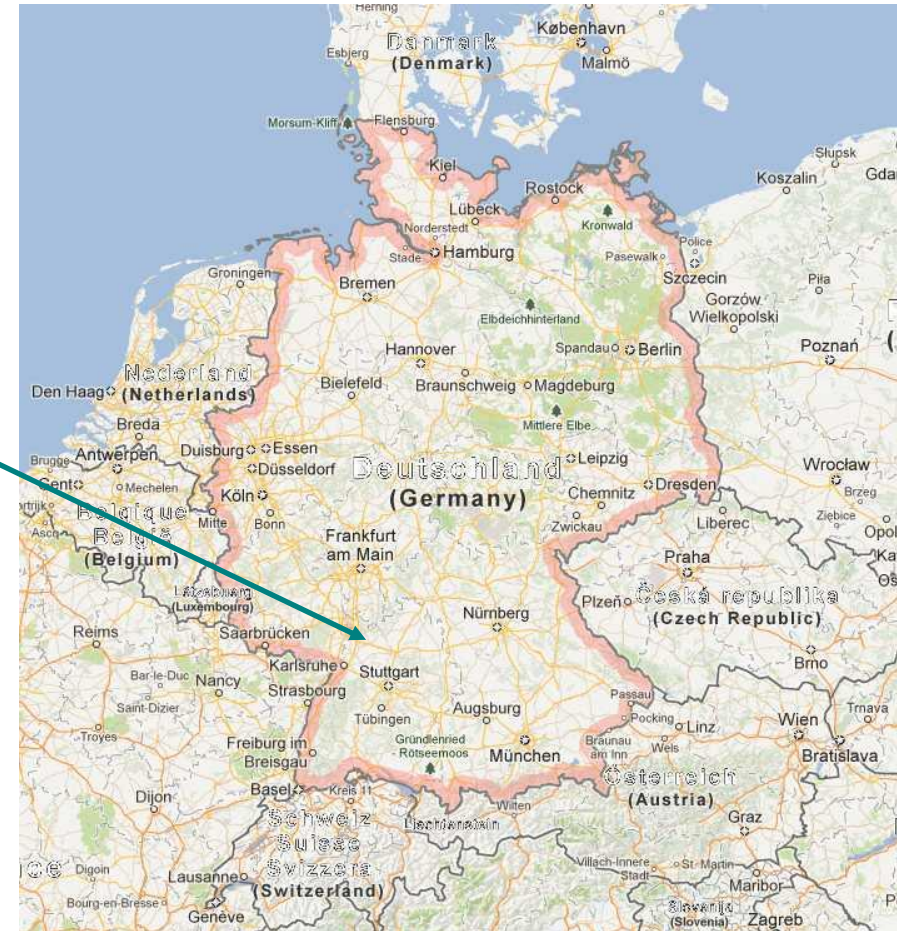
«башня» ловушек



расположение

Max-Planck Institute for Nuclear Physics (Heidelberg)

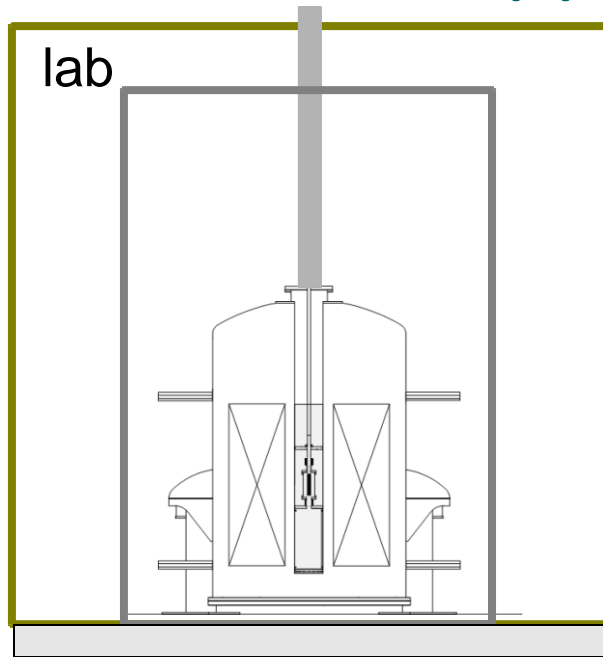
Division “Stored and Cooled Ions”
(Prof. Blaum)



ЗАДАЧА: измерение масс высокозарядных
ИОНОВ С ТОЧНОСТЬЮ $< 10^{-11}$

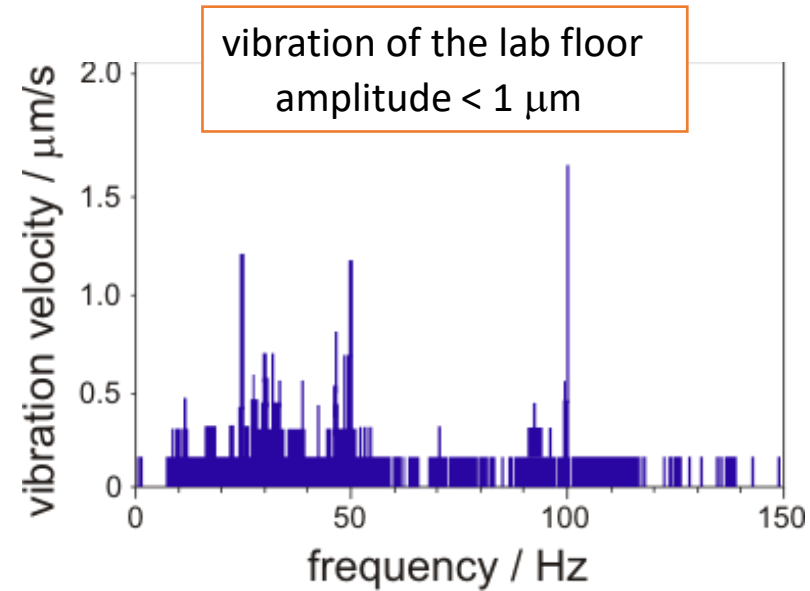
Для достижения минимальной систематической
неопределённости осуществляется строгий
контроль за параметрами среды нахождения
ловушки

подавление вибраций

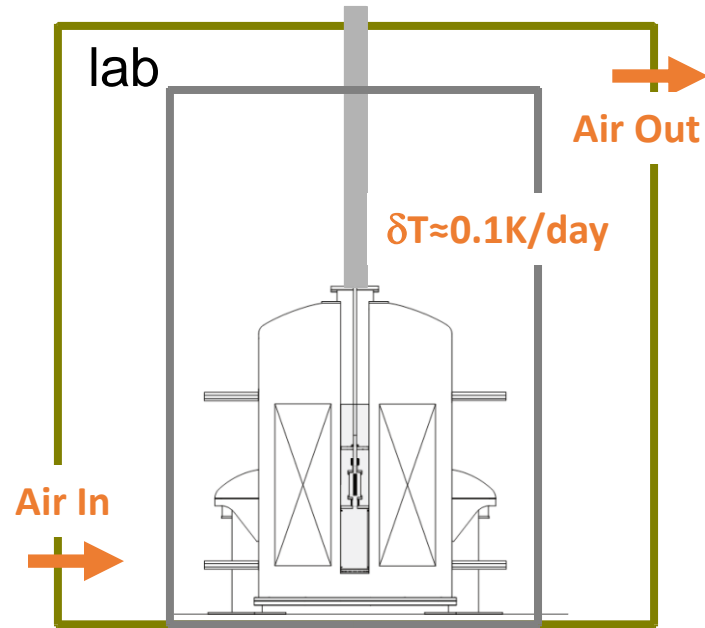


пенопластовые
панели

70 см бетонная подушка

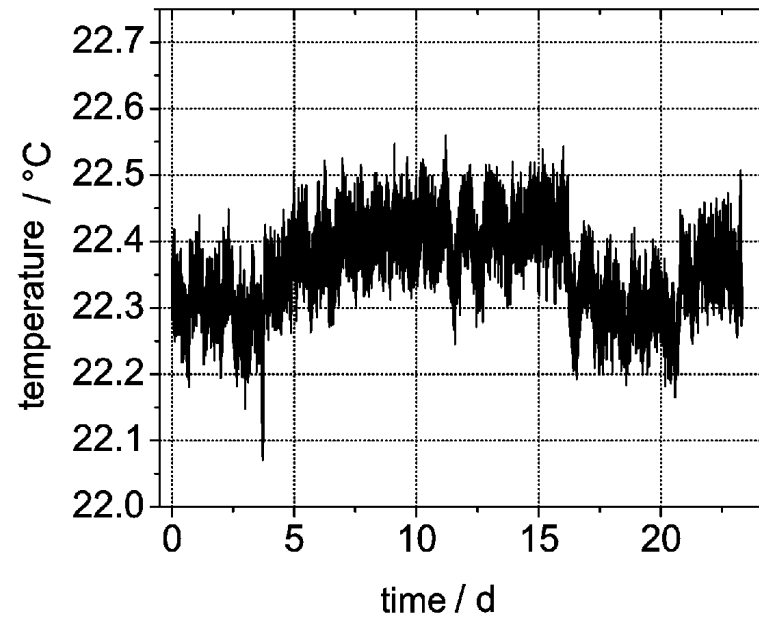


стабилизация температуры

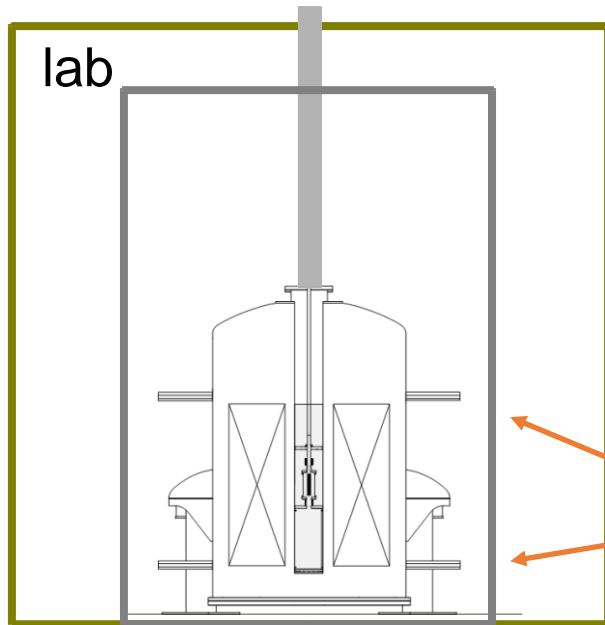


пенопластовые
панели

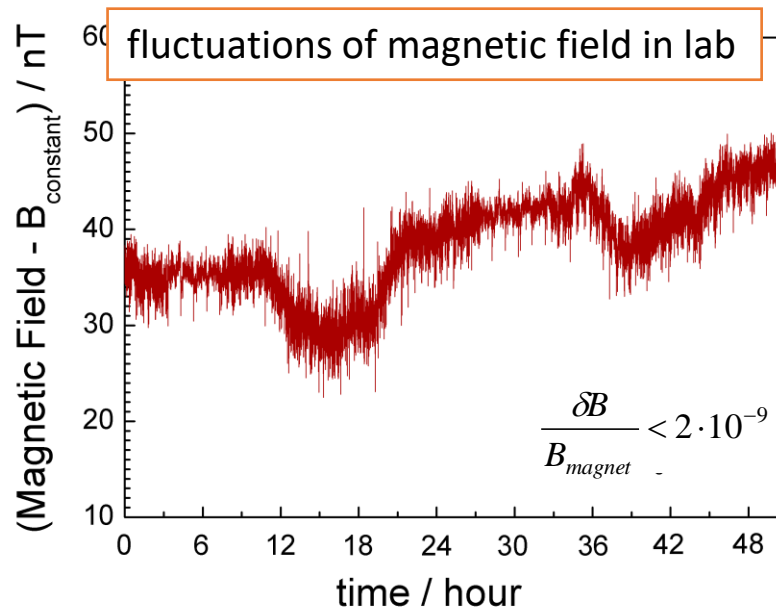
Air In



экранирование ионов от внешних полей



катушки Гемгольца



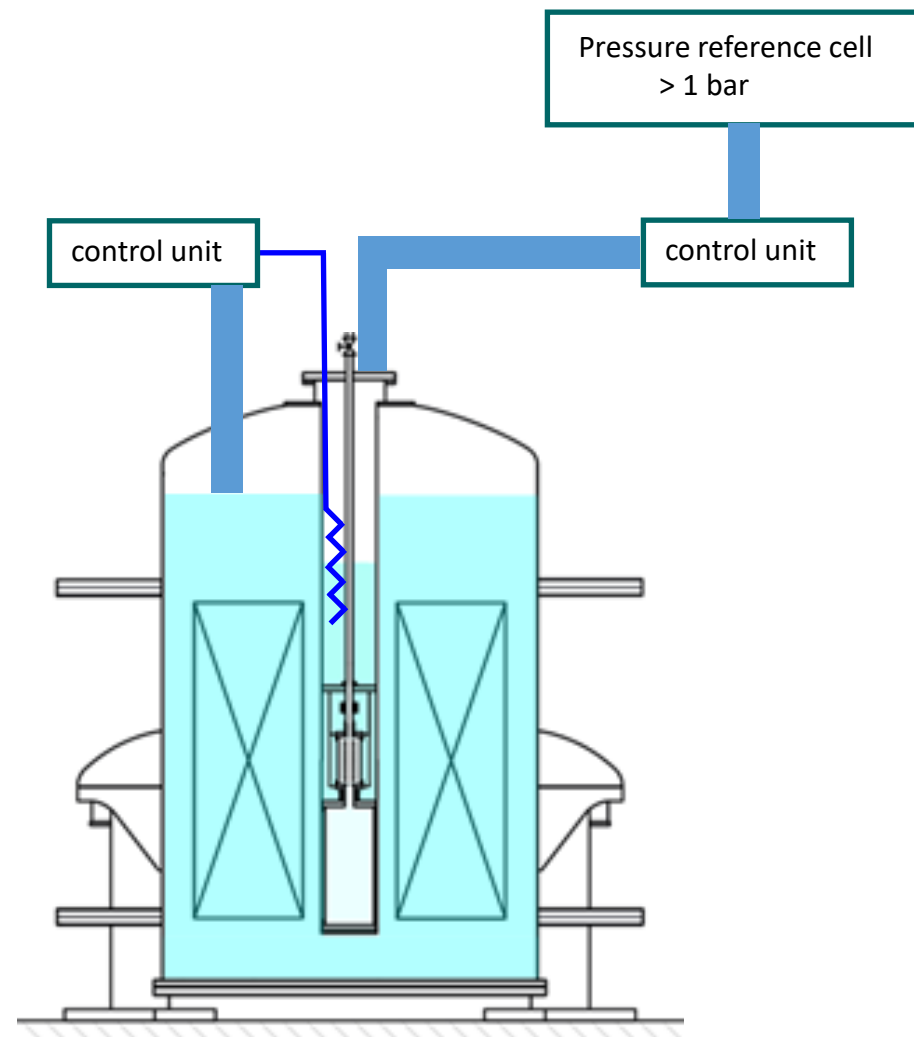
$\delta B/B < 2 \cdot 10^{-9}$ в комнате

→ shielding factor of magnet is ~ 100

→ compensation factor of Helmholtz coils is ~ 10

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

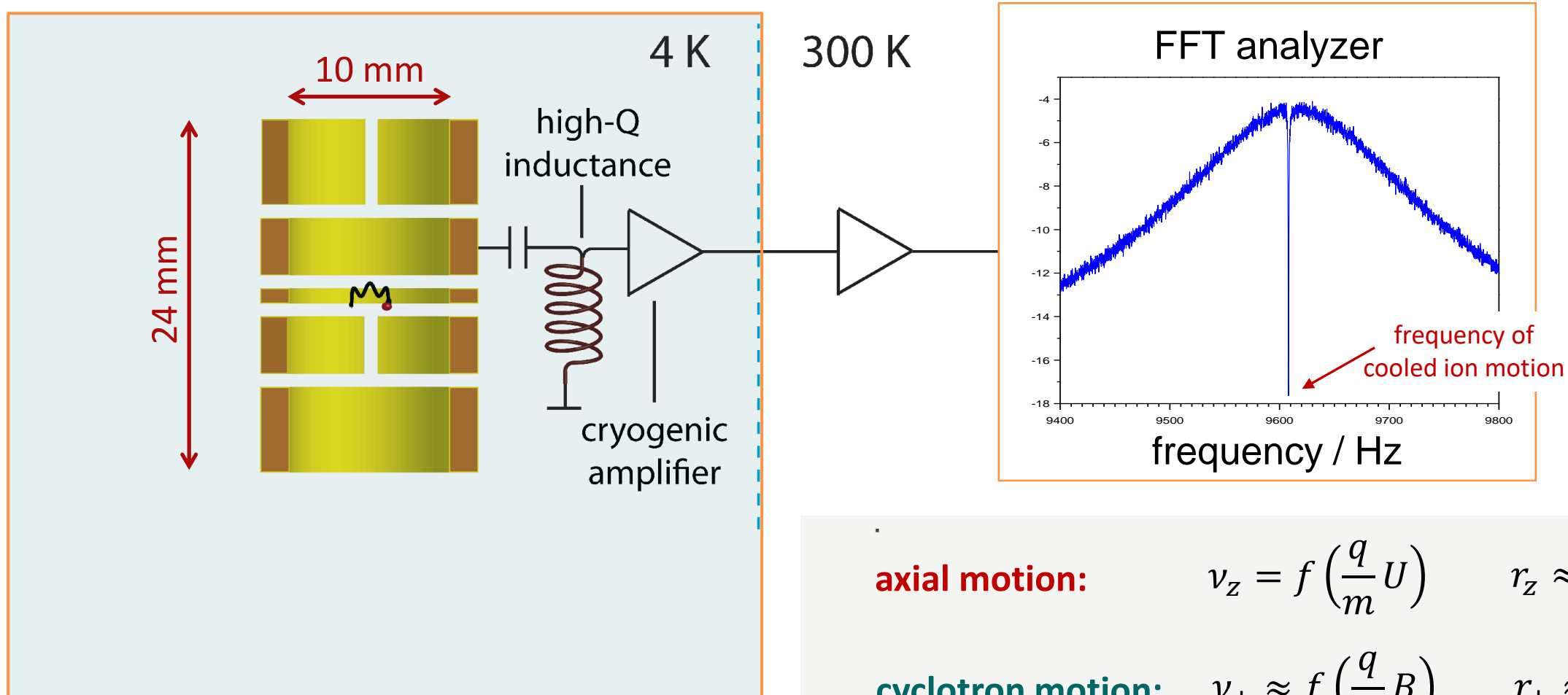
стабилизация давления и уровня гелия



стабилизация давления на уровне **1 μ бар**

стабилизация уровня гелия **0.1 мм**

Измерение частоты на PENTATRAP

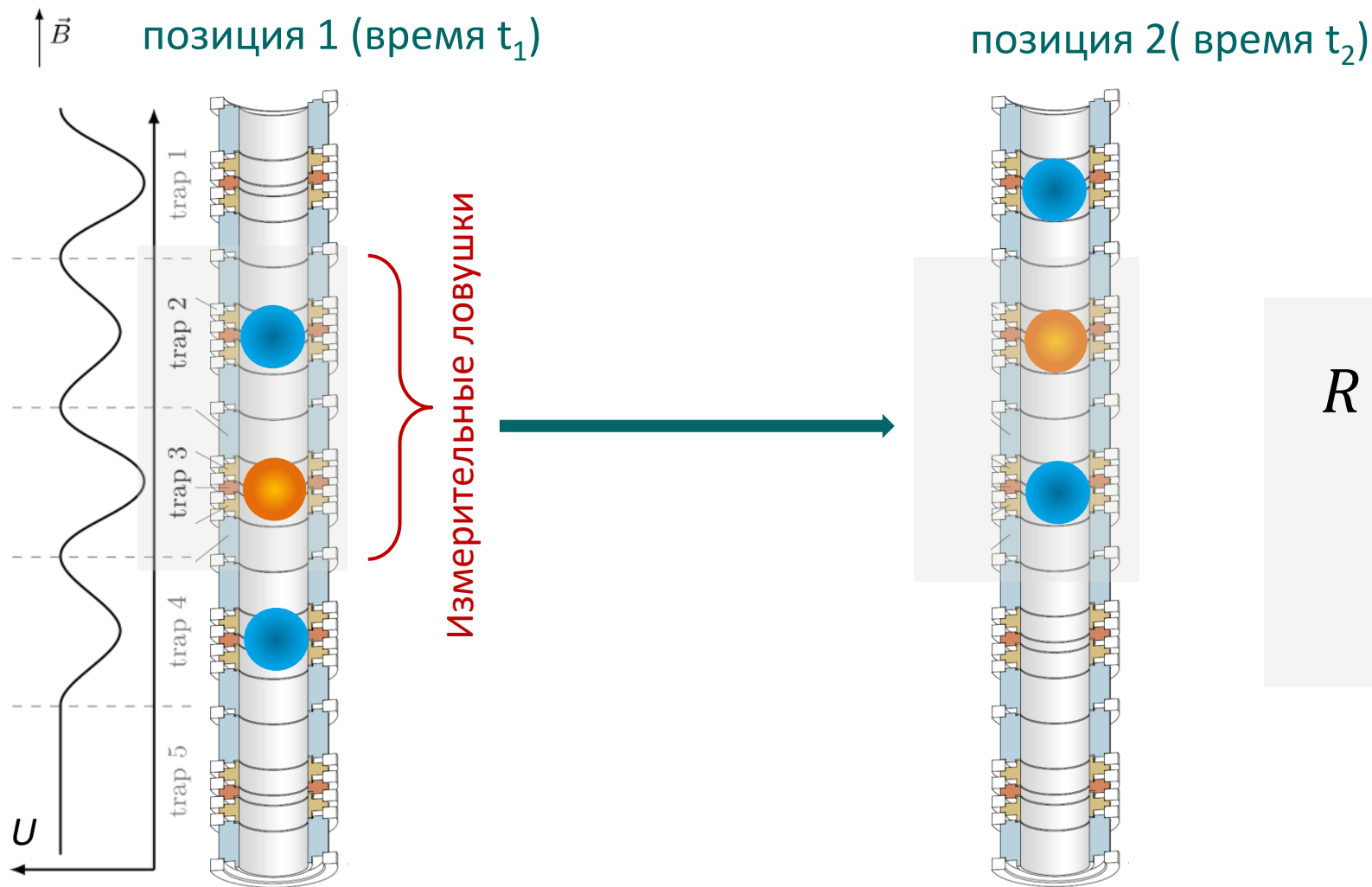


axial motion: $v_z = f \left(\frac{q}{m} U \right)$ $r_z \approx 10 \mu\text{m}$

cyclotron motion: $v_+ \approx f \left(\frac{q}{m} B \right)$ $r_+ \approx 2 \mu\text{m}$

magnetron motion: $v_- \approx f \left(\frac{U}{B} \right)$ $r_- \approx 2 \mu\text{m}$

Метод измерения масс



$$R = \sqrt{R(t_1)R(t_2)} = \frac{m_2}{m_1}$$

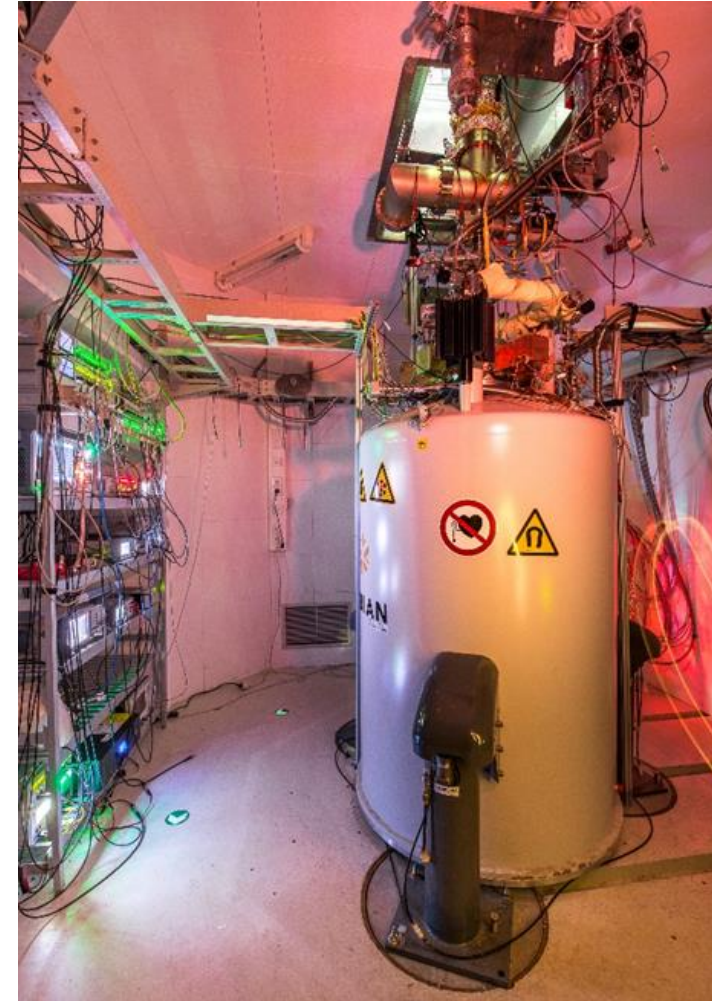
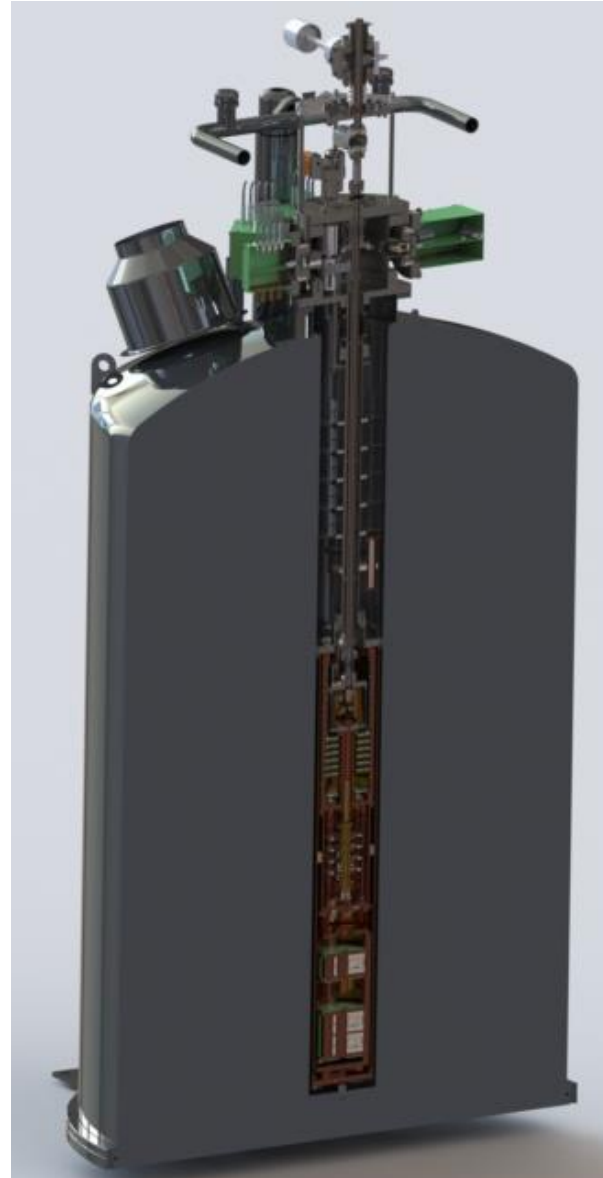
$$\text{if } \frac{B_{\text{trap2}}}{B_{\text{trap3}}} = \text{const}$$

$$R(t_1) = \frac{v_{ion1}}{v_{ion2}}(t_1) = \frac{m_2}{m_1} \frac{B_{\text{trap2}}}{B_{\text{trap3}}}(t_1)$$

$$R(t_2) = \frac{v_{ion1}}{v_{ion2}}(t_2) = \frac{m_2}{m_1} \frac{B_{\text{trap3}}}{B_{\text{trap2}}}(t_2)$$

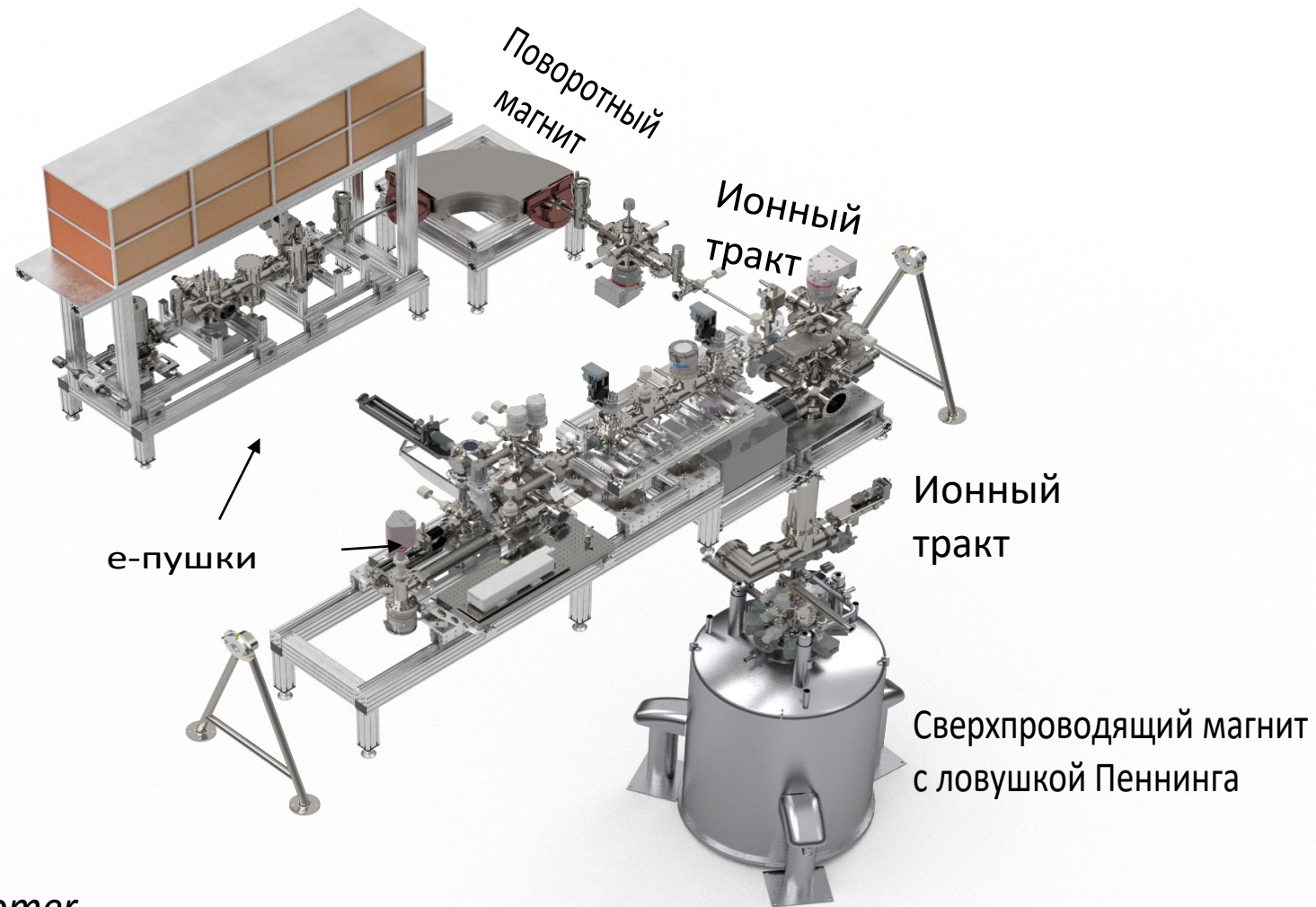
unique features of PENTATRAP:

- Stack of five Penning traps
- Cryogenic environment (4.2 K)
- 7 T superconducting magnet with vertical **cold** bore
- Temperature in the lab is stabilized: ± 0.05 K/day
- LHe-level in the bore is stabilized: ± 35 μm
- He-pressure in the bore is stabilized: ± 1 μbar
- Relative stability of B -field: 10^{-10} / hour
- Ultra-stable voltage source: $\Delta U/U < 10^{-7}$ / 100 s
- Highly charged ions



Repp, J. et al., Appl. Phys. B 107, 983 (2012)
Roux, C. et al., Appl. Phys. B 107, 997 (2012)
Böhm, C. et al., Nucl. Instrum. Meth. A 828, 125 (2016)

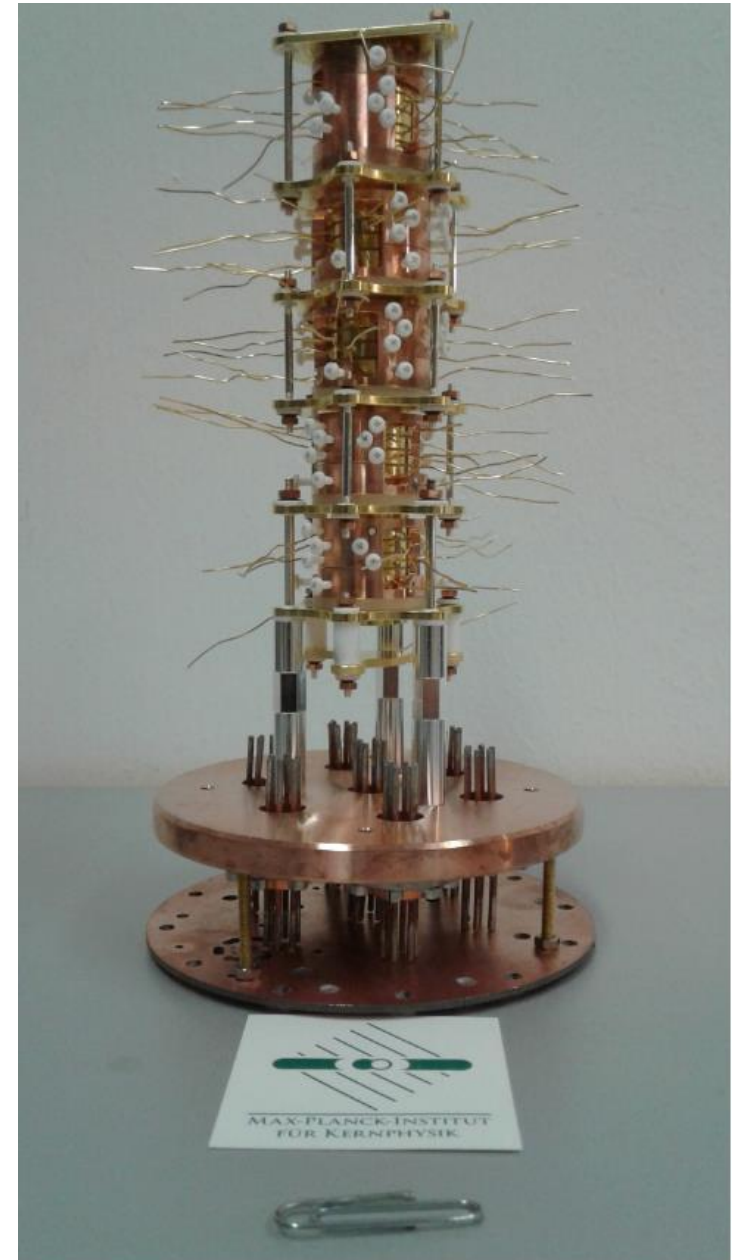
Система PENTATRAP в институте М.Планка в Гейдельберге



K. Kromer

Результат по созданию комплекса PENTATRAP

Установка запущена и точность
определения масс составляет 10^{-11} ,
что на много порядков величины
превосходит все другие методы
масс-спектрометрии

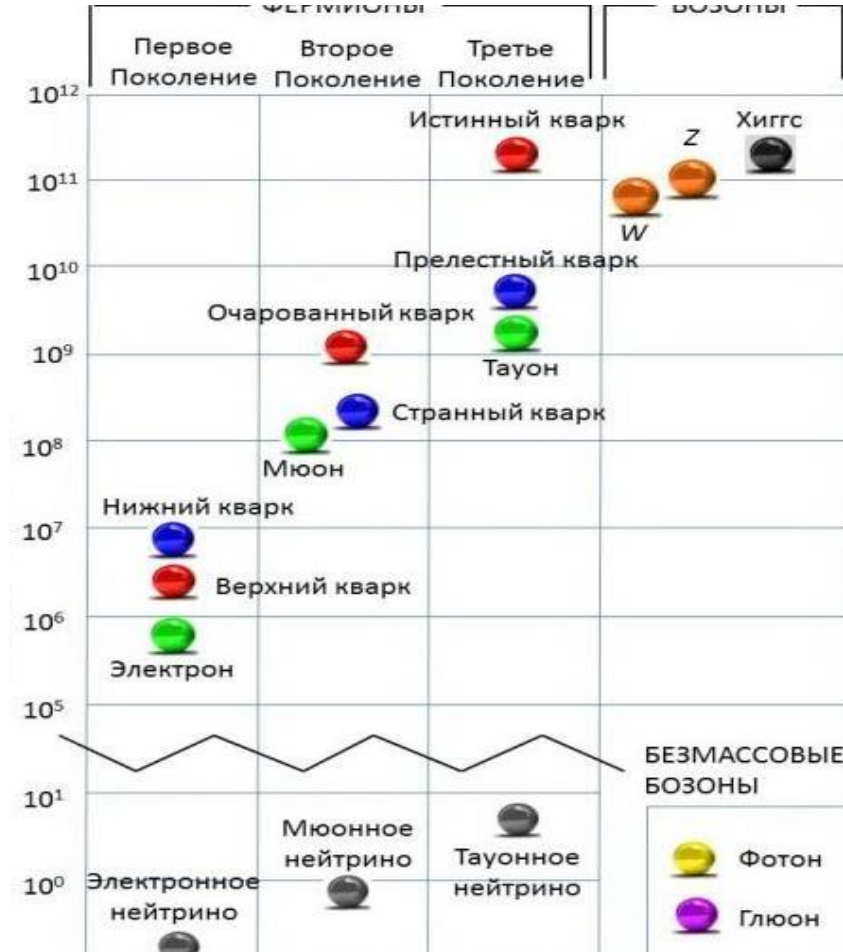


Абсолютная масса нейтрино

Стандартная модель и шкала масс

Standard Model (SM)

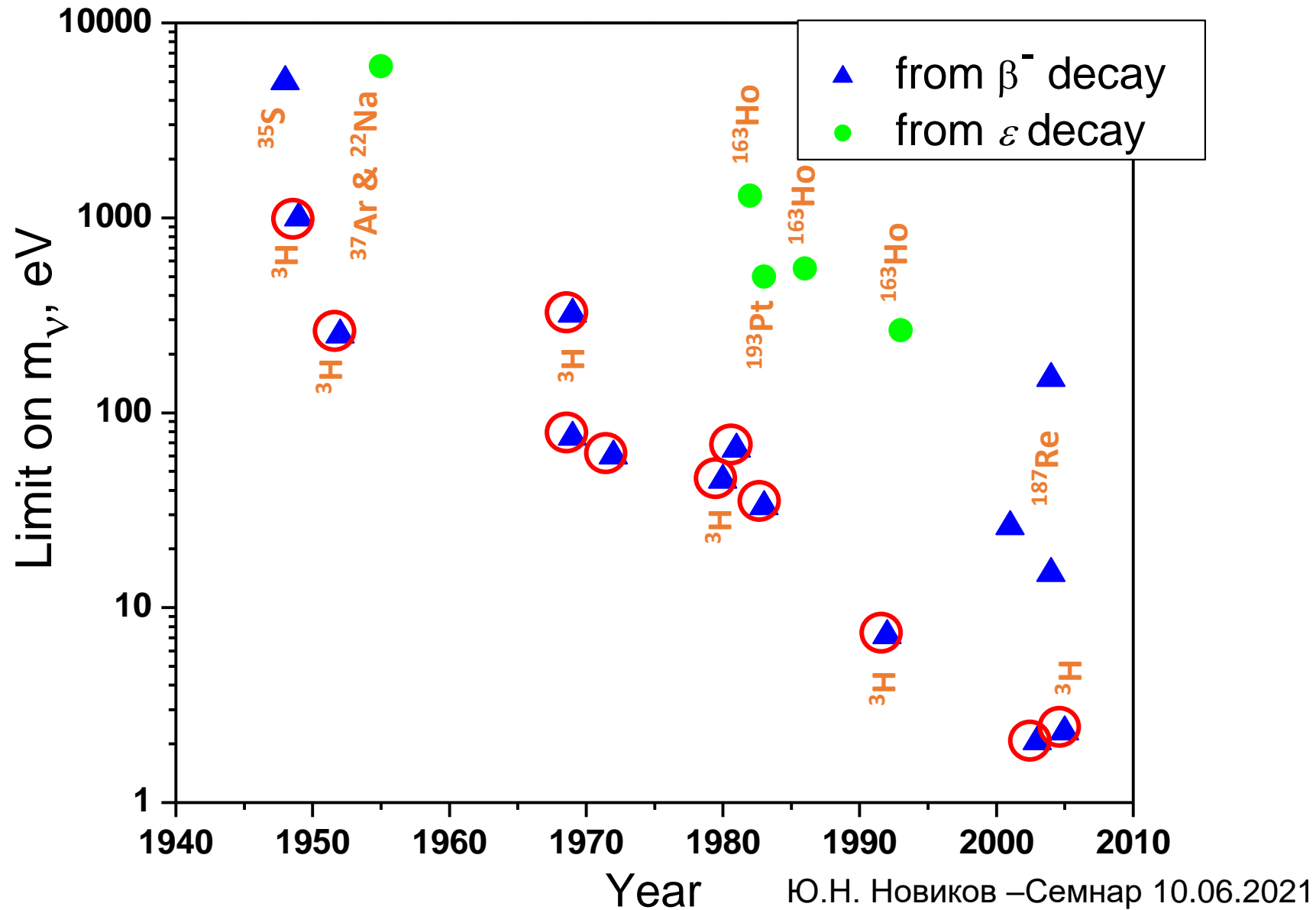
Quarks	2.4 MeV		1.27 GeV		171.2 GeV	
	2/3	Left	Right	2/3	Left	Right
	u	up		c	charm	
	d	down		s	strange	
				b	bottom	
Leptons	< 1 eV		< 1 eV		< 1 eV	
	0	Left	Right	0	Left	Right
	ν_e			ν_μ		
	ν_τ					
	0.511 MeV		105.7 MeV		1.777 GeV	
	-1	Left	Right	-1	Left	Right
	e	electron		μ	muon	
				τ	tau	



Параметры SM

- the coupling constants $e, \alpha_s, \sin^2 \theta_W$,
- the boson masses m_W, m_Z ,
- the lepton masses m_e, m_μ, m_τ ,
- the quark masses m_d, m_s, m_c, m_b, m_t and
- the CKM matrix parameters: three angles and a phase δ .

History of m_ν measurements



Что мы знаем о массе нейтрино?

- Верхний предел на массу **антинейтрино** в эксперименте KATRIN (Германия, 2019 г.) равен **1** эВ.
- Этот предел получен из β -спектра **третия** в 2019 г.
- Верхний предел на массу **нейтрино** равен **150** эВ .
- Он получен из e-захвата ^{163}Ho в эксперименте ECHO в 2020 г. (с измеренной на **SHIPTRAP** энергии распада ^{163}Ho , равной $Q=2833(35)$ эВ).

Вопросы и ответы

- Нужна ли «нетритиевая» нейтринная масс-спектрометрия? **Да**
- Имеются ли, помимо ^{163}Ho , другие удобные кандидаты для **нейтринной масс-спектрометрии** в захватном канале? По нашим экспериментам на ISOLTRAP(CERN) - **Нет**
- Одинаковы ли массы **антинейтрино** и **нейтрино** в электронном флейворе? **????? !!!!!**



Nuclear Physics News

ISSN: 1061-9127 (Print) 1931-7336 (Online) Journal homepage: <http://www.tandfonline.com/loi/gnpn20>

New Promises for the Determination of the Neutrino Mass? (A Brainstorming Meeting at GSI, Darmstadt)

H.-Jürgen Kluge & Yuri Novikov

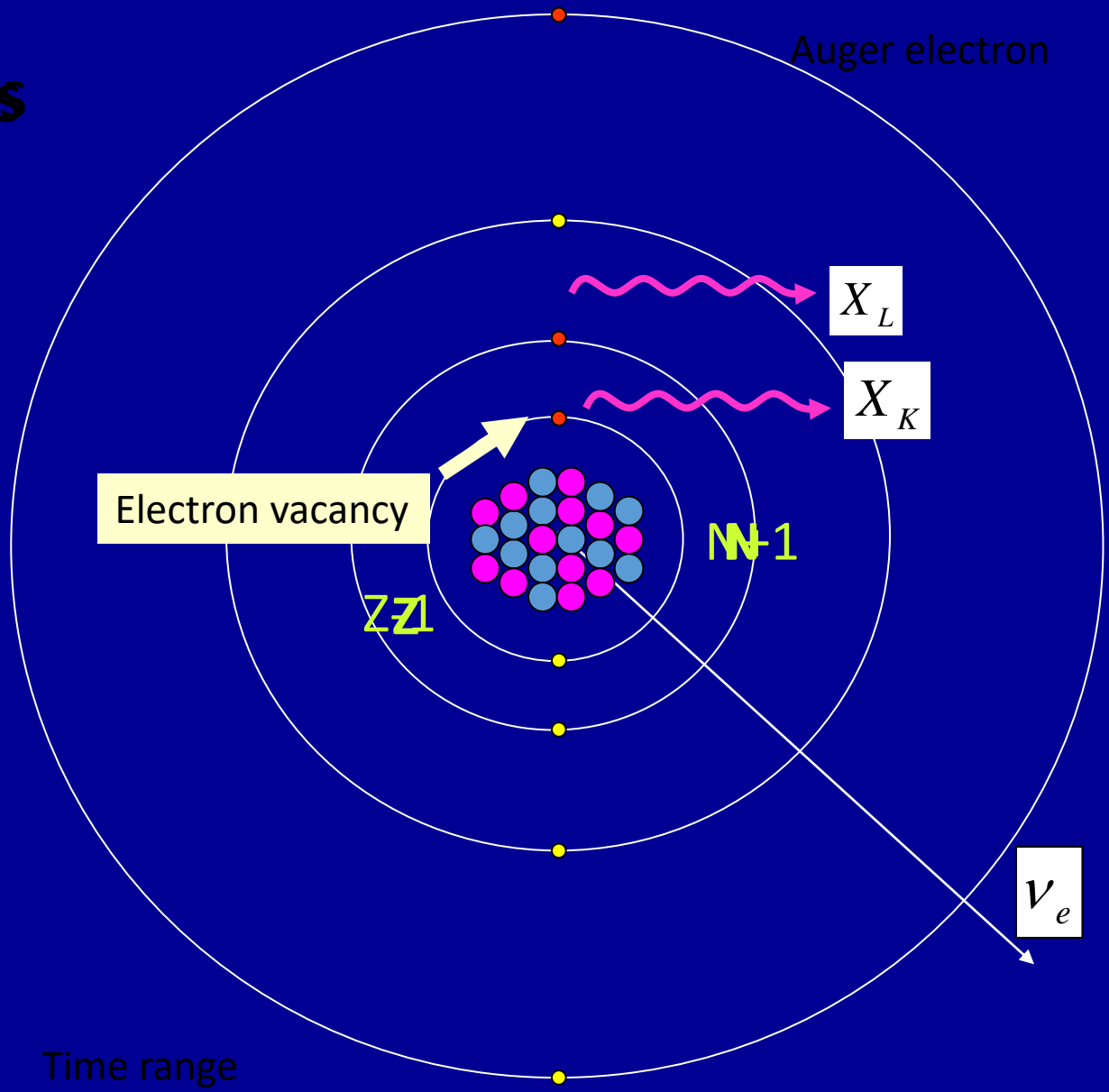
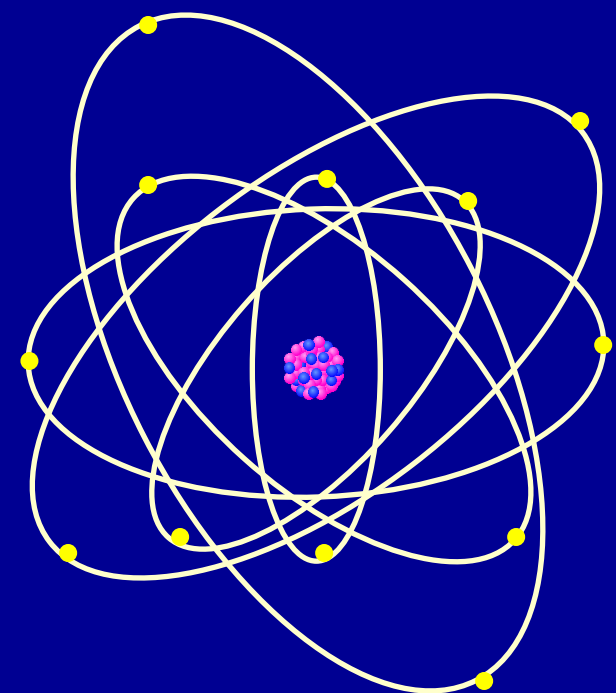
To cite this article: H.-Jürgen Kluge & Yuri Novikov (2007) New Promises for the Determination of the Neutrino Mass? (A Brainstorming Meeting at GSI, Darmstadt), Nuclear Physics News, 17:4, 36-38, DOI: [10.1080/10506890701572291](https://doi.org/10.1080/10506890701572291)

To link to this article: <http://dx.doi.org/10.1080/10506890701572291>



Published online: 20 Feb 2008.

Atomic process



start

Time range

0

$10^{-18}s$

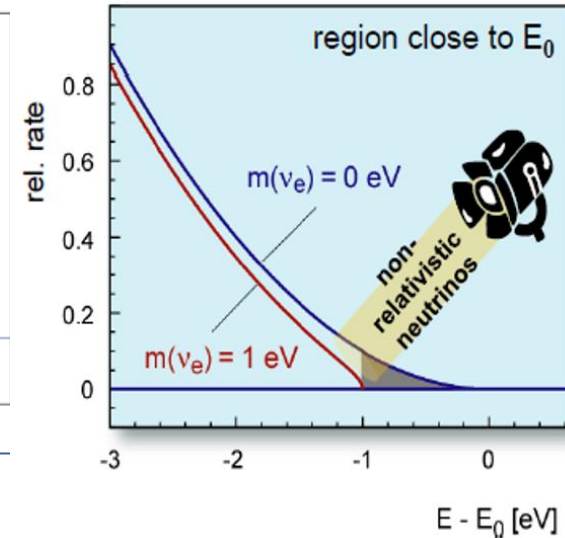
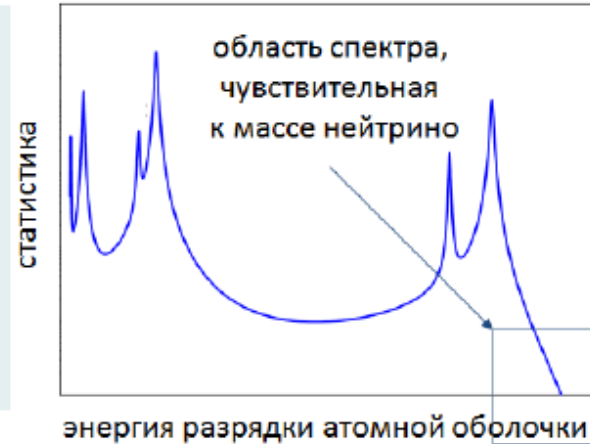
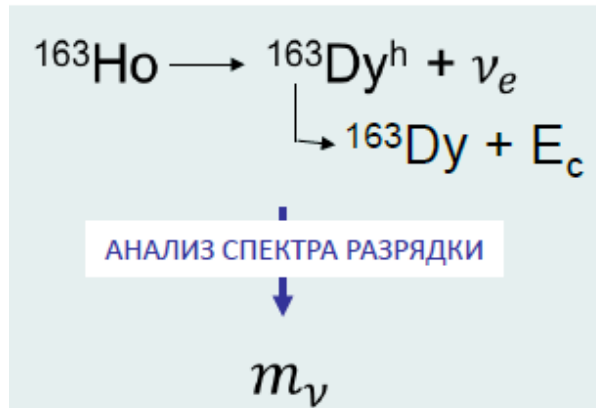
$10^{-10}s$

courtesy of J. Khuyagbaatar (GSI)

Спектр атомной разрядки:

так как зафиксированная полная энергия распада нуклида передаётся двум каналам (нейтрино и атомному девозбуждению) спектр атомной разрядки будет зеркальной копией нейтринного спектра

(A. de Rujula and M. Lusignoli. Phys.Lett. B 118 (1982) 429)



$$\frac{dN}{dE} = A(Q - E)^2 \sqrt{1 - \frac{m_\nu^2}{(Q - E)^2}} \sum C \phi_k^2(0) \frac{\Gamma_k / 2\pi}{(E - B_k)^2 + \Gamma_k^2}$$

Результат рабочего совещания в ГСИ (март 2007 г.) по измерению массы нейтрино в захватном процессе

- Сочетать методы трап-спектрометрии с атомной калориметрией, Создать ультрапрецизионный PENTATRAP, Разработать метод магнитной криогенной микрокалориметрии,
- Разработать методику получения сверхчистого ^{163}No .

Так был сформулирован проект ЕСНО

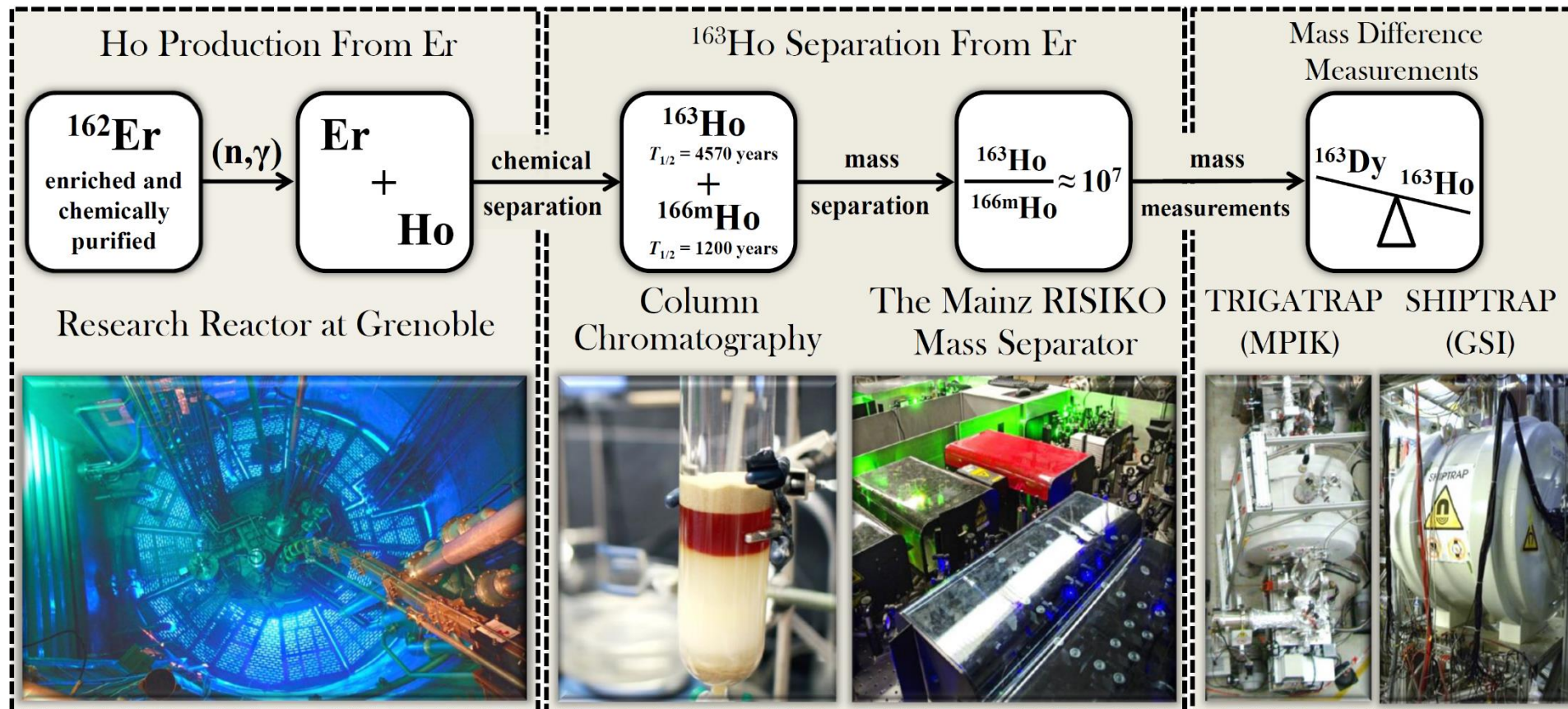
(Инст. М.Планка и Университет в Гейдельберге, ПИЯФ РАН)

В дальнейшем к ним присоединились другие научные центры Германии и Франции

Составные компоненты проекта ЕСНО (Electron Capture in Holmium)

- Разработка технологии получения сверхчистого ^{163}Ho ($\geq 10^{14}$ атомов).
- Создание многодетекторного криогенного комплекса микрокалориметров (ММС) с энергетическим разрешением ≈ 1 эВ,
- Создание нового типа ультра-прецизионной ионной ловушки –тандема пяти ловушек РЕНТАТРАР с массовым разрешением ≈ 1 эВ,

Этапы получения ^{163}Ho и измерения его энергии распада



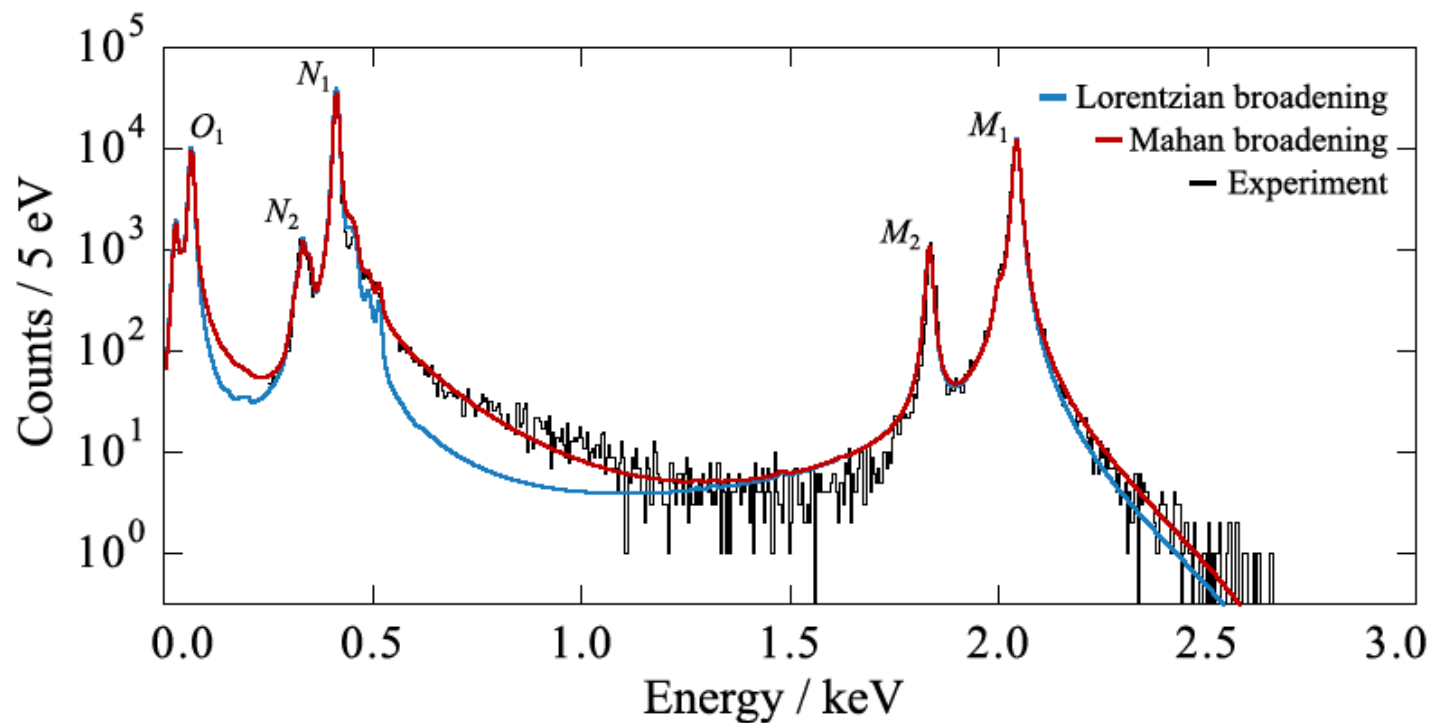
(С.В. Ченмарев)

Что требуется измерить для определения экспериментальной массы нейтрино в электронном захвате?

1. Микрокалориметрический спектр, из которого определяют:
 - Значения энергий связи электронов на орбитах в атоме (E_n),
 - Ширины линий, соответствующих энергиям связи электронов в атоме (Γ_n).
2. Полную энергию распада (разность масс атомов, Q_{EC}), которая адресуетя ионной ловушке, обладающей беспрецедентной точностью (PENTATRAP).

Пилотный спектр атомной разрядки после электронного захвата в ^{163}Ho , измеренный коллаборацией ЕСНО магнитным микрокалориметром в подземной шахте Modane (Французские Альпы)

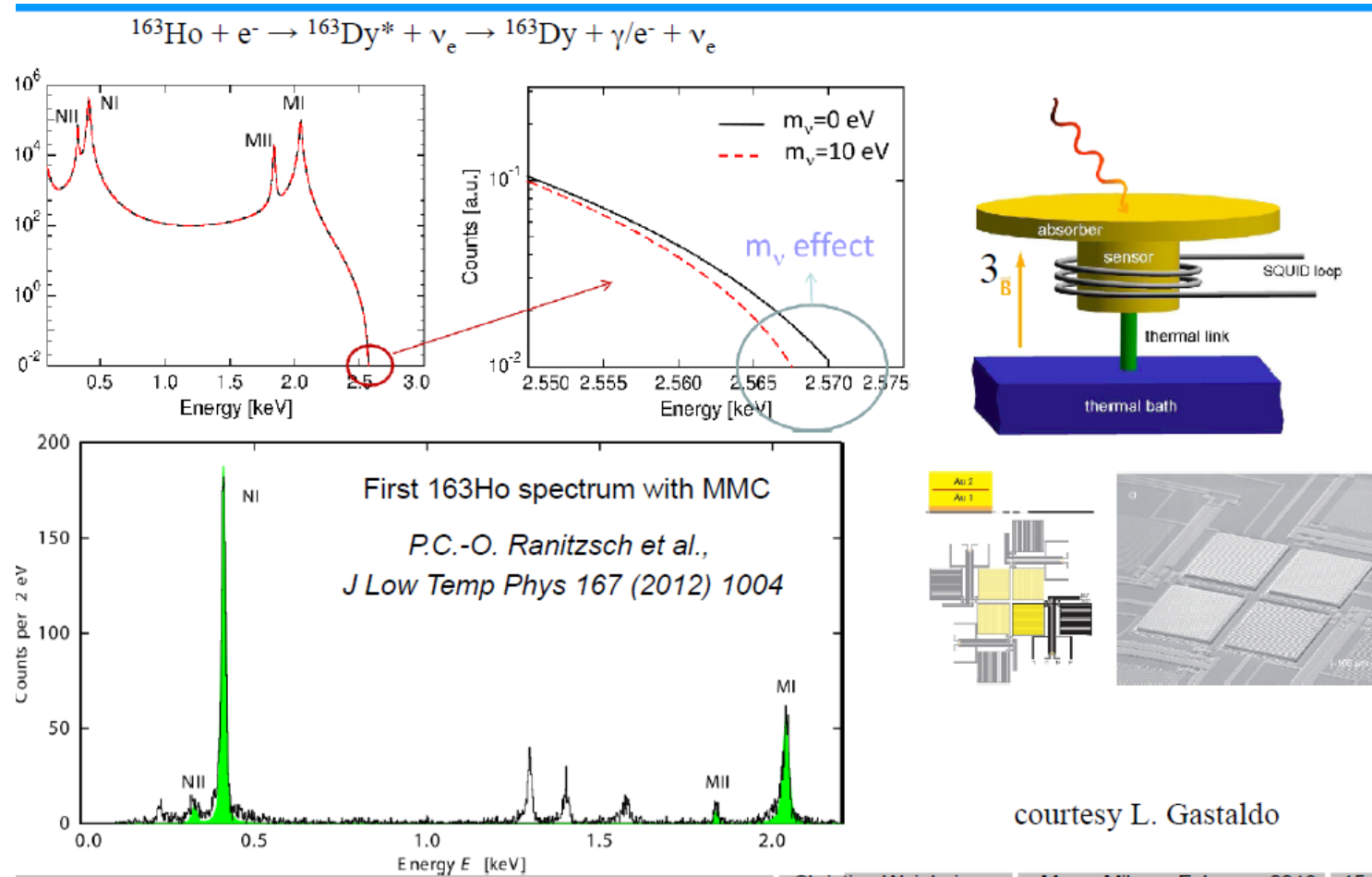
(C Velte et al., *Eur. Phys. J. C* (2019) 79:1026.)



$$m_\nu < 150 \text{ эВ}$$

Результат получен в измерениях с количеством 10^{14} атомов ^{163}Ho и отношением площадей в пилотном спектре

Калориметрический спектр и метод криогенной микрокалориметрии



Матрица нейтринного смешивания

- Открытие осцилляций нейтрино привело к выводу о наличии флейворов (e,μ,τ)- нейтрино и ненулевой массы нейтрино
- Матрица смешивания PMNS, связывающая флейворные собственные функции ν_e , ν_μ и ν_τ и соответствующие собственные значения m_e , m_μ и m_τ с нейтринными значениями в СМ: $\{\nu_1, \nu_2, \nu_3\}$ и $\{m_1, m_2, m_3\}$ имеет общий вид:

$$\begin{pmatrix} \nu_e \\ \nu_\mu \\ \nu_\tau \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} U_{e1} & U_{e2} & U_{e3} \\ U_{\mu1} & U_{\mu2} & U_{\mu3} \\ U_{\tau1} & U_{\tau2} & U_{\tau3} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \nu_1 \\ \nu_2 \\ \nu_3 \end{pmatrix}$$

$$\nu_e = U_{e1}\nu_1 + U_{e2}\nu_2 + U_{e3}\nu_3$$

Constant for massless ν :
mixing is question of convention

$$m(\nu_e)^2 := \sum |U_{ei}|^2 m(\nu_i)^2$$

Угол смешивания	θ_{12}°	θ_{13}°	θ_{23}°
Нейтринный (PMNS)	35	9	49
Кварковый (CKM)	13	0.1	2

Результат экспериментов по измерению абсолютной массы электронного нейтрино

- Установки криогенной микрокалориметрии и ловушки PENTATRAP, входящие в проект ECHO, полностью готовы к измерениям,
- Пробные замеры спектра атомной разрядки выполнены. Полученное значение эффективной массы электронного нейтрино при слабом источнике и значении энергии распада ^{163}Ho , полученной на SHIPTRAP, составило < 150 эВ, что почти в 2 раза улучшает существовавшее значение,
- На PENTATRAP начаты измерения разности масс $^{163}\text{Ho} - ^{163}\text{Dy}$ с планируемой точностью 10^{-11} , соответствующей ≈ 1 эВ. Этот результат позволит выйти на предел на массу нейтрино 1 эВ.