

# Проект PENTATRAN

Сергей Елисеев<sup>1,2</sup>

Klaus Blaum<sup>1</sup>, Christine Böhm<sup>1</sup>, Михаил Гончаров<sup>1</sup>, Ю.Н. Новиков<sup>2</sup>,  
Julia Repp<sup>1</sup>, Christian Roux<sup>1</sup>

<sup>1</sup> *Max-Planck-Institut für Kernphysik, 69117 Heidelberg, Germany*

<sup>2</sup> *Петербургский Институт Ядерной Физики, 188300 Гатчина, Россия*

# Содержание

---

- ◇ Физические задачи для проекта PENTATRAP
- ◇ Наиболее точные измерения масс: статус
- ◇ Принцип работы масс-спектрометра на основе ловушки Пеннинга
- ◇ Проект PENTATRAP

# Физика на PENTATRAP

**Измерение**  
*отношения масс тяжёлых долгоживущих,*  
**высокозарядных нуклидов вплоть до Свинца**

с точностью превышающей  $10^{-11}$

**Измерение Q распада**  
**для определения массы**  
*нейтрино/ антинейтрино*

нейтрино:  $Q = M(^{163}\text{Ho}) - M(^{163}\text{Dy})$   
антинейтрино:  $Q = M(^{187}\text{Re}) - M(^{187}\text{Os})$

$\delta Q < \text{эВ}$

**Проверка квантовой**  
**электродинамики в сильных**  
**электромагнитных полях**

Измерение энергий связи орбитальных  
электронов в  $^{208}\text{Pb}$

$\delta B < \text{эВ}$

**Тест специальной теории**  
**относительности**

$c_{\text{massive matter}} = c_{\text{light}}$   
 $\Delta M(^{37}\text{Cl}, ^{36}\text{Cl}); \Delta M(^{50}\text{Ti}, ^{49}\text{Ti});$   
 $\Delta M(^{153}\text{Gd}, ^{152}\text{Gd}); \Delta M(^{155}\text{Gd}, ^{154}\text{Gd});$

$\delta(\Delta M) < \text{эВ}$

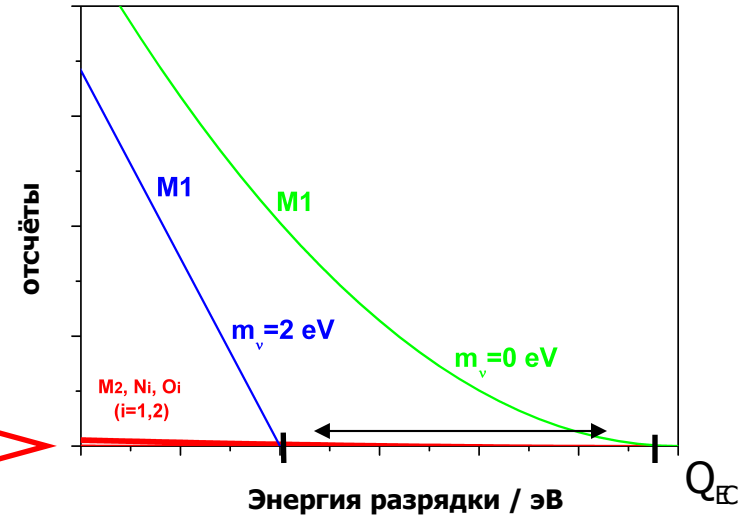
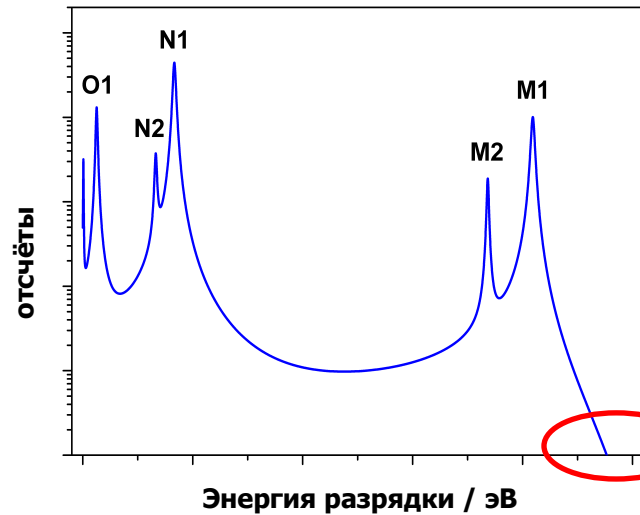
**Измерение Q распада для**  
**поиска резонансного двойного**  
**электронного захвата**

$Q = M(^{152}\text{Gd}) - M(^{152}\text{Sn})$   
 $Q = M(^{164}\text{Er}) - M(^{164}\text{Dy})$

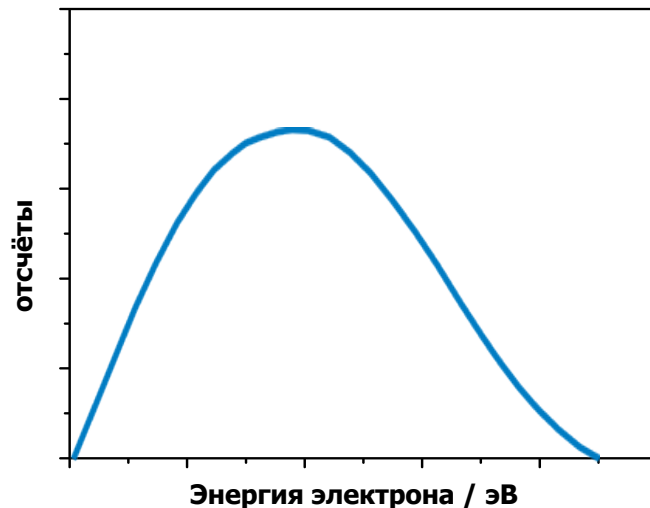
$\delta Q \sim 10 \text{ эВ}$

# Q распада для массы нейтрино / антинейтрино

масса нейтрино: захват орбитального электрона в  $^{163}\text{Ho}$



масса антинейтрино:  $\beta^-$ -распад  $^{187}\text{Re}$  и  $^3\text{H}$



**Криогенные  $\mu$ -калориметры:**

конечная точка спектра  $< 1 \text{ эВ}$

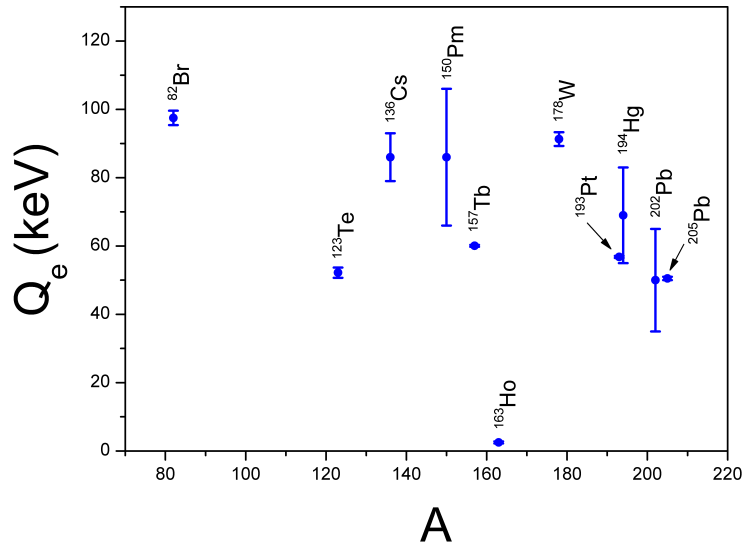
**PENTATRAP:**

Q распада  $< 1 \text{ эВ}$

$m_\nu < 1 \text{ эВ}$



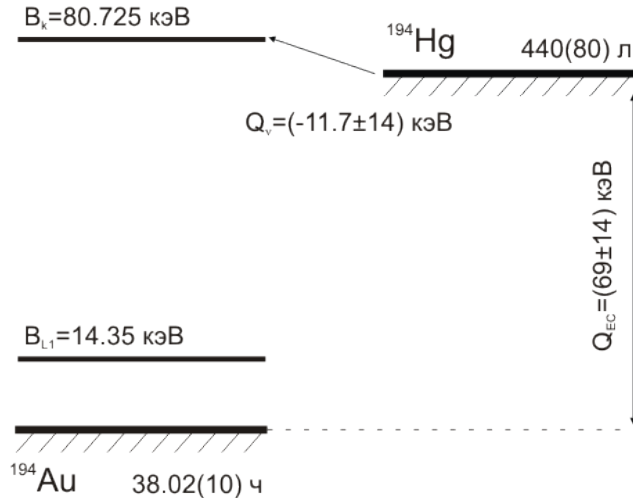
# Поиск кандидатов для определения массы нейтрино



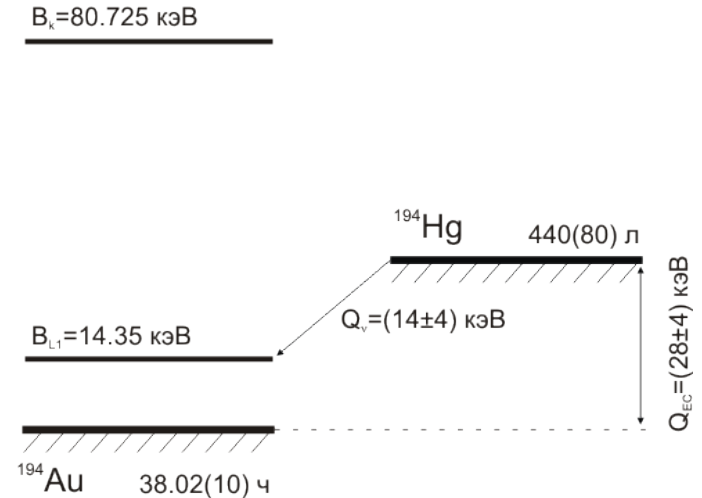
Proposal IS473 to the ISOLDE Committee, CERN (2008)  
**"SEARCH FOR NEW CANDIDATES FOR THE NEUTRINO-ORIENTED MASS DETERMINATION BY ELECTRON-CAPTURE"**

Yu. Novikov, K. Blaum, S. Eliseev et Al.

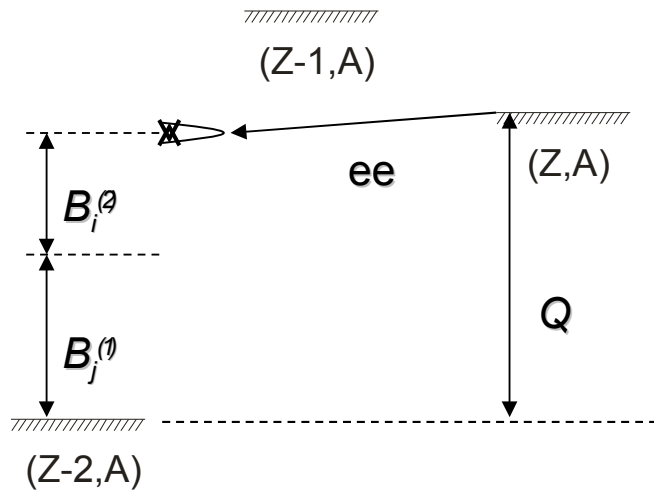
старая схема захвата



новая схема захвата



# поиска резонансного двойного электронного захвата



## 2EC захват:

$(A, Z) + 2e \rightarrow (A, Z-2) + \text{энергия разрядки} + 2\nu$

## безнейтринный 2EC захват:

$(A, Z) + 2e \rightarrow (A, Z-2) + \text{энергия разрядки}$

2EC(2ν) ~ 10<sup>28</sup>-10<sup>31</sup> лет:

2EC(0ν) и 2EC(2ν) не обнаружены до сих пор

$$\lambda^{res} = c \cdot |M|^2 \cdot |\psi_{1e}(0) \cdot \psi_{2e}(0)|^2 m_\nu^2 \frac{\Gamma}{\left(Q - B_i^{(1)} - B_j^{(2)}\right)^2 + \frac{1}{4}\Gamma^2}$$

резонансное увеличение  $\lambda$  до **10<sup>6</sup> раз** если  $Q - B_i - B_j \approx 0 \pm 100$  eV

# поиска резонансного двойного электронного захвата на установке SHIPTRAP

$$^{152}\text{Gd} \rightarrow ^{152}\text{Sm}$$
$$Q_{\text{сраме}} = (54.6 \pm 3.5) \text{ кэВ}$$

$$^{164}\text{Er} \rightarrow ^{164}\text{Dy}$$
$$Q_{\text{сраме}} = (23.3 \pm 3.5) \text{ кэВ}$$

$$Q_{\text{гросе}} = (55,56 \pm 0,14) \text{ кэВ}$$

$$Q_{\text{гросе}} = (25,13 \pm 0,13) \text{ кэВ}$$

$$Q\text{-B}(\text{Sm},\text{K})\text{-B}(\text{Sm},\text{L1}) = (740 \pm 140) \text{ эВ}$$

$$Q\text{-B}(i)\text{-B}(j) > 5 \text{ кэВ}$$

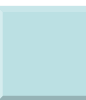
$$\lambda^{res} = c \cdot |M|^2 \cdot |\psi_{1e}(0) \cdot \psi_{2e}(0)|^2 m_v^2 \frac{\Gamma}{\left(Q - B_i^{(1)} - B_j^{(2)}\right)^2 + \frac{1}{4} \Gamma^2}$$

# Проверка квантовой электродинамики в сильных электромагнитных полях

---

Измерение энергий связи орбитальных электронов в  
высокозаряженном  $^{28}\text{Pb}$   
с точностью  $\sim 1$  эВ

- (1) релятивистский случай – область сильных электромагнитных полей
- (2) эффекты, связанные с взаимодействием электрона с ядром, не маскируются электрон-электронным взаимодействием
- (3)  $^{28}\text{Pb}$  – дважды магическое ядро, ядерные поправки считаются наиболее точно
- (4) теоретическая точность  $\sim 1$  эВ





# проверка специальной теории относительности

$${}^A X + n \rightarrow {}^{A+1} X + \gamma \quad \Longrightarrow \quad [\Delta M + m_n]c^2 = \frac{hc_\gamma}{\lambda_\gamma}$$
$$c \stackrel{?}{=} c_\gamma$$

$$(1 - c/c_\gamma) = F(\Delta M, m_n, \lambda_\gamma)$$

$${}^{33}\text{S} \text{ и } {}^{29}\text{Si} \quad \longrightarrow \quad (1 - c/c_\gamma) = (-1.4 \pm 4.4) \cdot 10^{-7} \quad \text{Simon Rainville et al.}$$

**Nature 438**, 1096-1097 (21 December 2005)

$\delta m_n = 0.5 \text{ эВ} \rightarrow$  вклад в ошибку на уровне  $5 \times 10^{-8}$   
 $\delta(\Delta M) < 0.5 \text{ эВ}$  чтобы не вносить дополнительной ошибки  
 $\delta\lambda/\lambda > 10^{-7}$  – определяющий вклад в ошибку

## Многообещающие кандидаты:

$$\Delta M({}^{153}\text{Gd}, {}^{152}\text{Gd}); \Delta M({}^{155}\text{Gd}, {}^{154}\text{Gd}); \Delta M({}^{37}\text{Cl}, {}^{36}\text{Cl}); \Delta M({}^{50}\text{Ti}, {}^{49}\text{Ti});$$

$$\delta(M_1/M_2) / (M_1/M_2) \sim 3 \times 10^{-12}$$

# Наиболее точные измерения масс на сегодняшний день

Нуклид	Точность	Публикация
${}^4\text{He}$	$1.6 \cdot 10^{-11}$	R.S. Van Dyck <i>et al.</i> , Phys. Rev. Lett. 92 (2004) 220802.
${}^{16}\text{O}$	$1.1 \cdot 10^{-11}$	R.S. Van Dyck <i>et al.</i> , Int. J. Mass Spectrom. 251 (2006) 231.
${}^{13}\text{C}_2\text{H}_2 / {}^{14}\text{N}_2$	$7 \cdot 10^{-12}$	S. Rainville <i>et al.</i> , Science 303 (2004) 334.
${}^{29}\text{Si}^+ / {}^{28}\text{SiH}^+$	$7 \cdot 10^{-12}$	Simon Rainville <i>et al.</i> Nature 438, 1096-1097 (21 December 2005)
${}^{28}\text{Si}$	$2.2 \cdot 10^{-11}$	M. Redshaw <i>et al.</i> , Phys. Rev. Lett. 100 (2008) 093002.
${}^{129,132}\text{Xe}$	$\sim 10^{-10}$	M. Redshaw <i>et al.</i> , Phys. Rev. A 79 (2009) 012506.

## Существующие Ловушки

- ✓ стабильные нуклиды
- ✓ лёгкие массы
- ✓ низкозарядные ионы
- ✓ закрытые системы

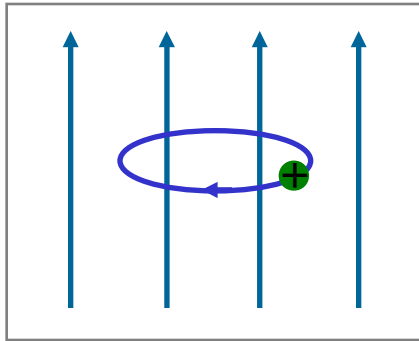


## PENTATRAP

- ✓ радиоактивные тяжёлые нуклиды
- ✓ многозарядные ионы
- ✓ открытая система
- ✓ время удержания иона с  $q=80$   
~ несколько часов

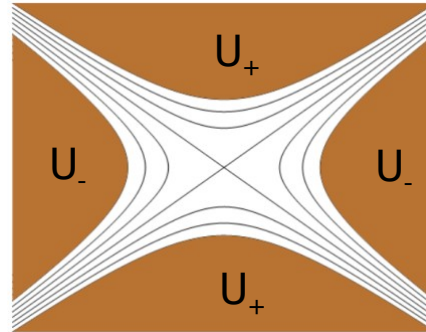
# Принцип работы ловушки Пеннинга

однородное магнитное поле  $\mathbf{B}$

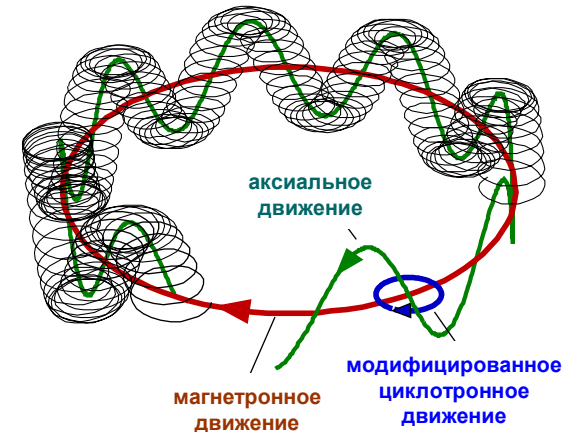


$$v_c = \frac{1}{2\pi} \cdot \frac{q_{\text{ион}}}{m_{\text{ион}}} \cdot B$$

квадрупольное электрическое поле  $\mathbf{E}$



движение иона в ловушке



модифицированное циклотронное движение:

$$v_+ = \frac{v_c}{2} + \sqrt{\left(\frac{v_c}{2}\right)^2 - \frac{v_z^2}{2}}$$

аксиальное движение:

$$v_z = \sqrt{\frac{q_{\text{ион}}}{m_{\text{ион}}} \cdot 2 \cdot (U_+ - U_-) \cdot c_2}$$

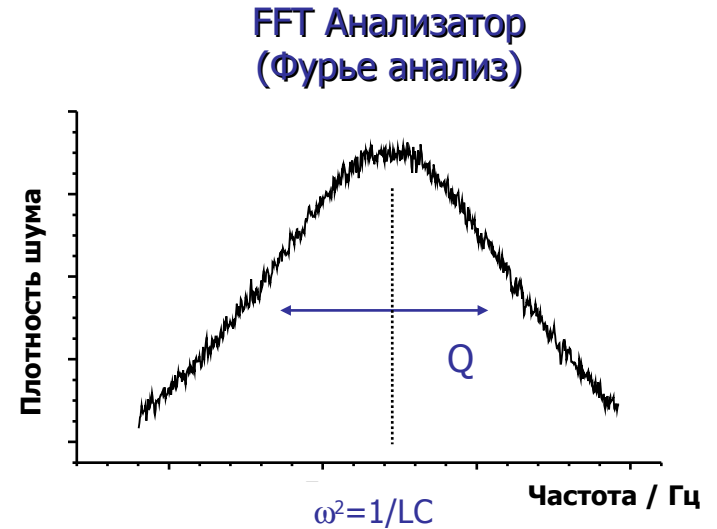
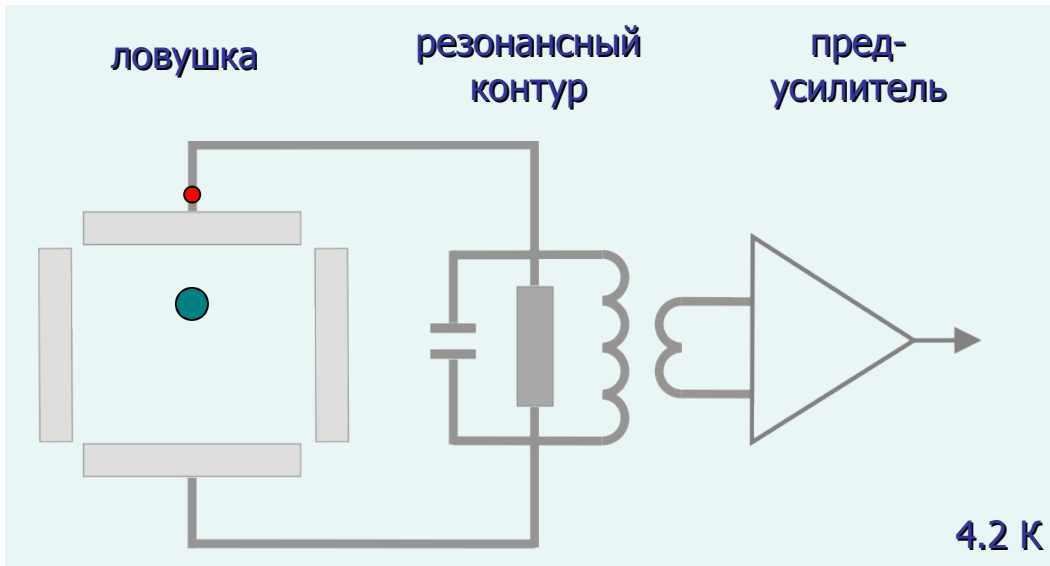
магнетронное движение:

$$v_- = \frac{v_c}{2} - \sqrt{\left(\frac{v_c}{2}\right)^2 - \frac{v_z^2}{2}}$$

Инвариантная Теорема:

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

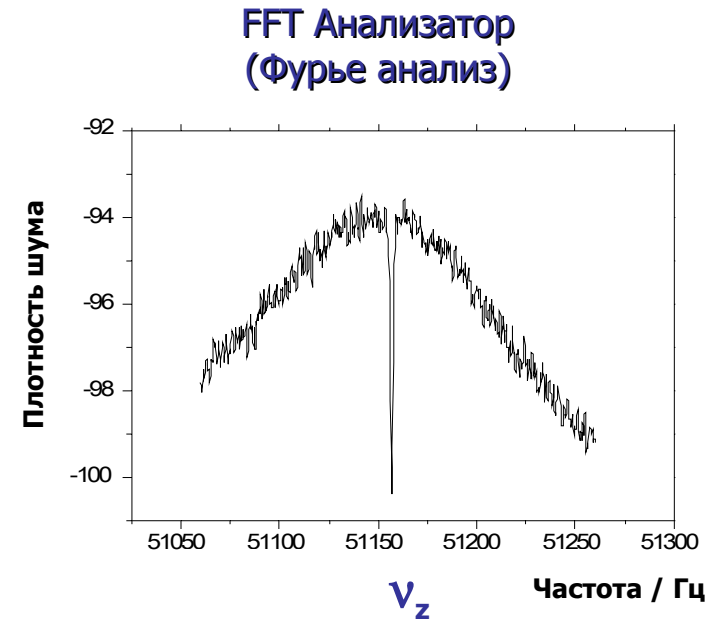
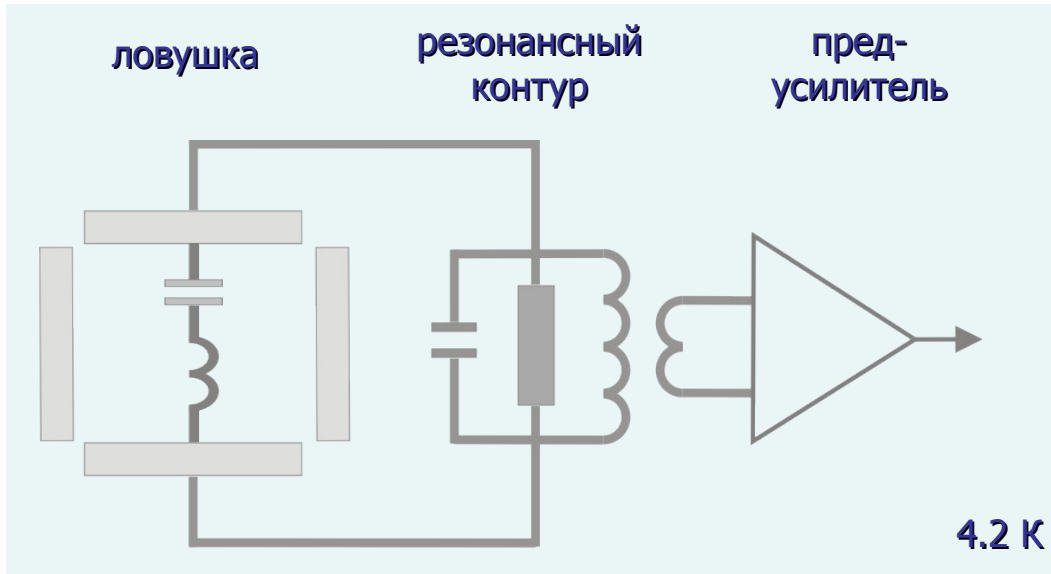
# методика измерения частот движения иона в ловушке



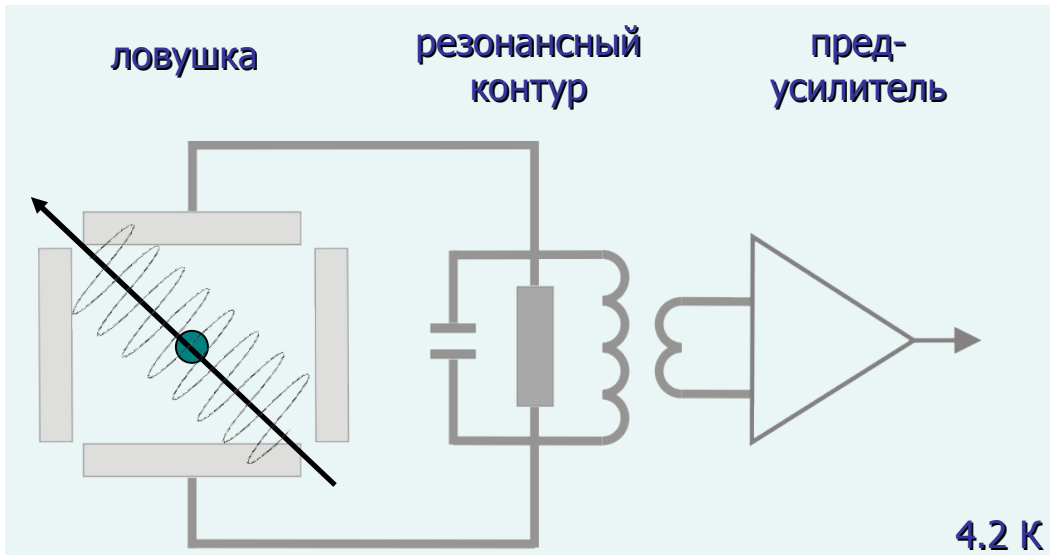
константа охлаждения:  $\tau = \frac{m \cdot d^2}{Q \omega L \cdot q^2} = \frac{2.7}{q^2} [c]$

зарядовое состояние $^{129}\text{Xe} / q$	константа охлаждения / с
1	2.7
27	0.0037
54	<0.001

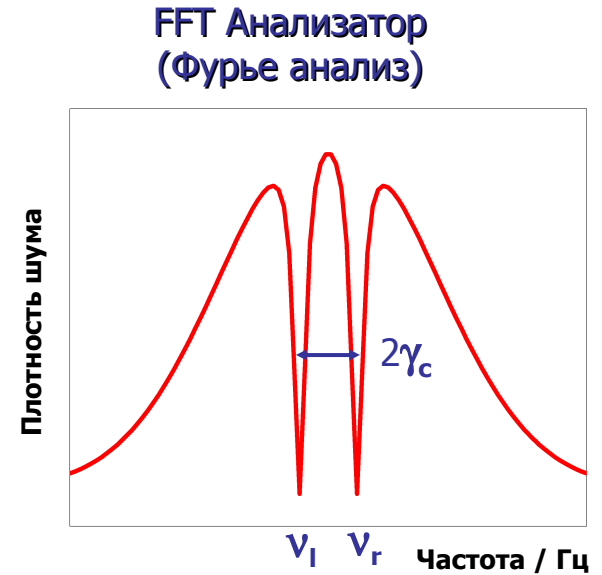
# методика измерения частот движения иона в ловушке



# методика измерения частот движения иона в ловушке



Связь двух движений:  $v_k = v_+ - v_-$

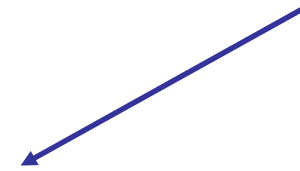
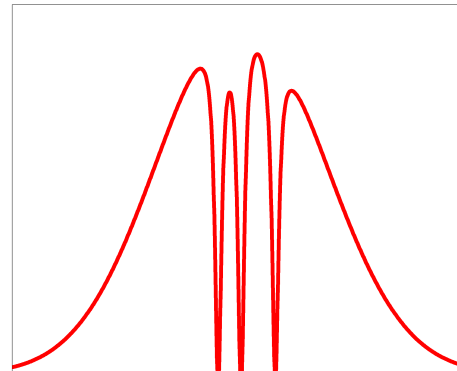
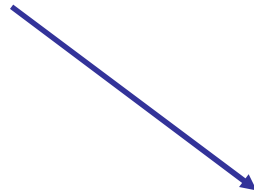
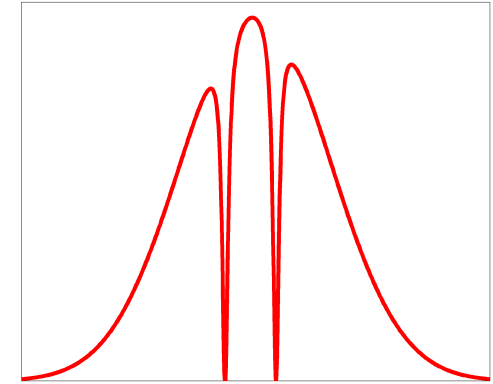
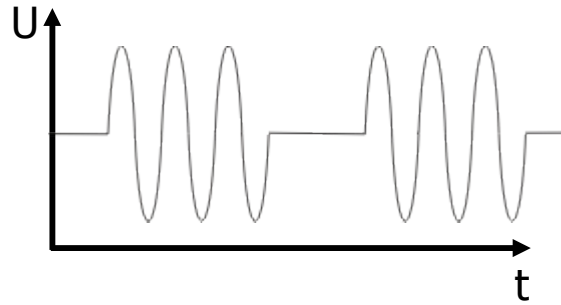
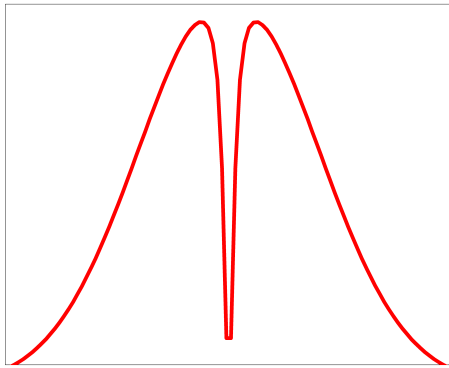


$$z(t) \sim \cos(\gamma_c \cdot t) \cdot \cos(\omega_z \cdot t + \phi) \sim \cos[(\omega_z + \gamma_c) \cdot t + \phi] + \cos[(\omega_z - \gamma_c) \cdot t + \phi]$$

“охлаждение” радиальных мод

детектирование частот радиальных мод

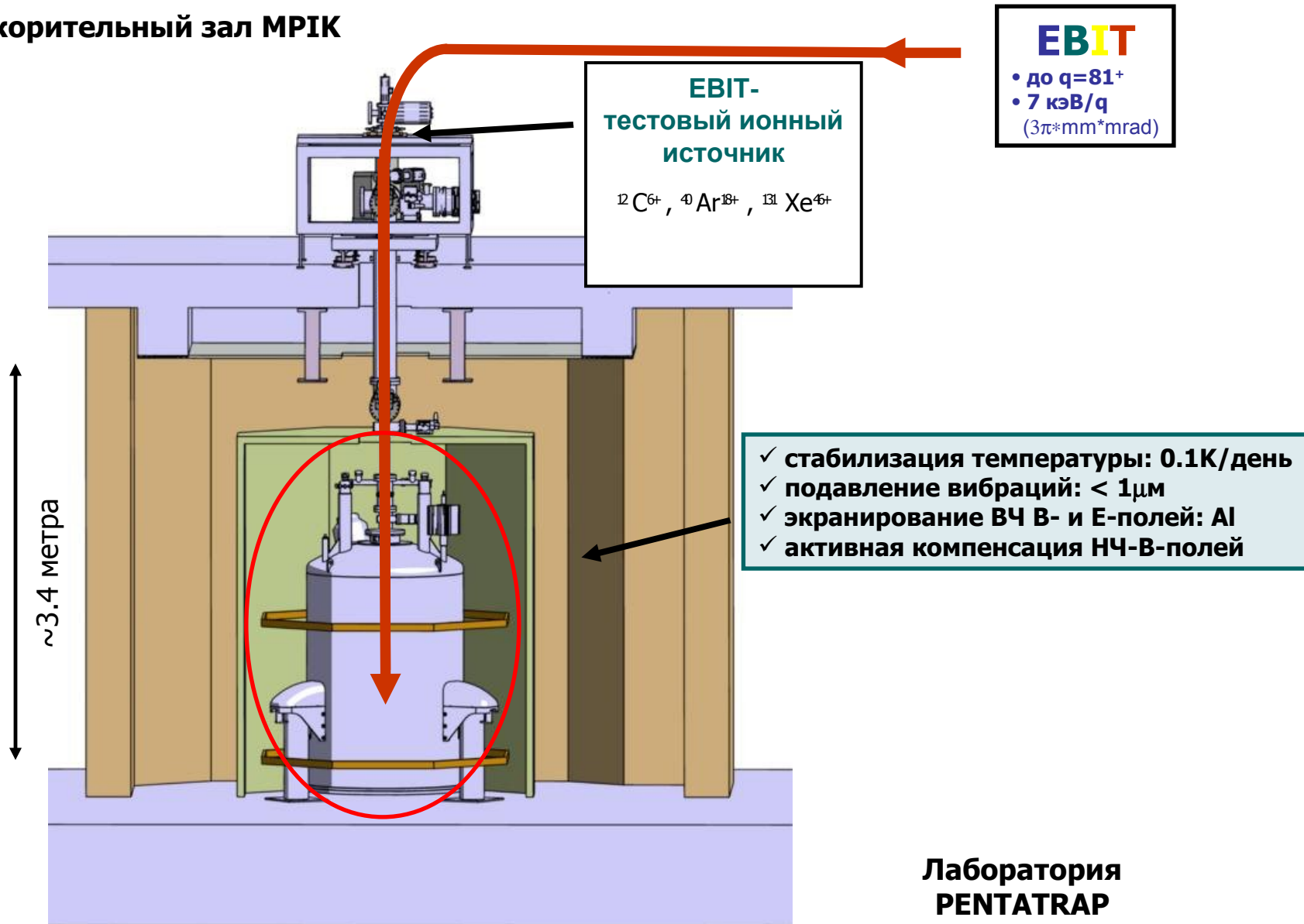
# методика измерения частот движения иона в ловушке



$$\left. \begin{aligned} v_l &= \frac{v_k - [v_+ - v_z]}{2} - \gamma_c \\ v_r &= \frac{v_k - [v_+ - v_z]}{2} + \gamma_c \end{aligned} \right\} \longrightarrow \text{Определение } v_+ \text{ и } v_z \text{ из одного спектра}$$

# Установка PENTATRAP

Ускорительный зал МРІК



**Лаборатория  
PENTATRAP**  
(подвал)

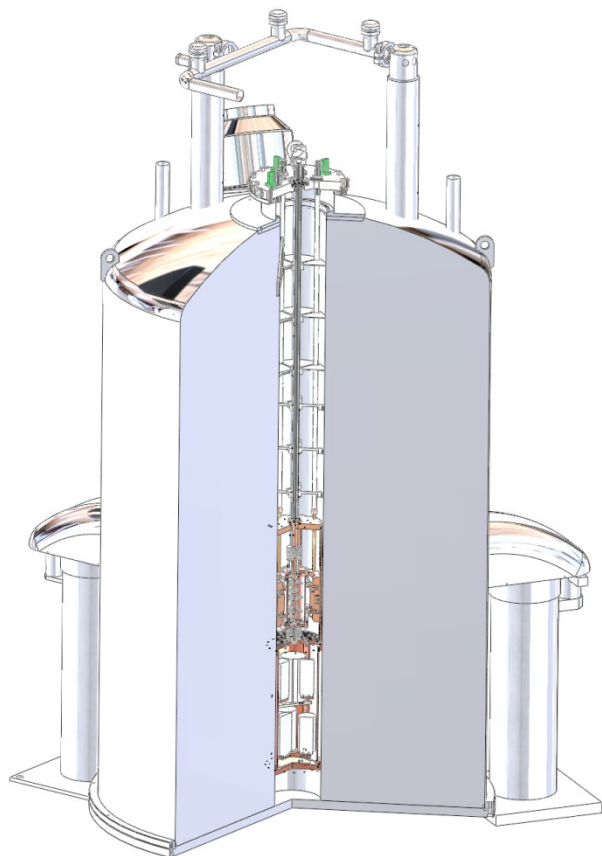


# сверхпроводящий магнит

7 Тесла, 160 мм вертикальный холодный канал



ловушки помещены в жидкий гелий



Однородность поля:

50 ppm вдоль ловушек (120 мм)  
1 ppm в центральном кубическом  
сантиметре



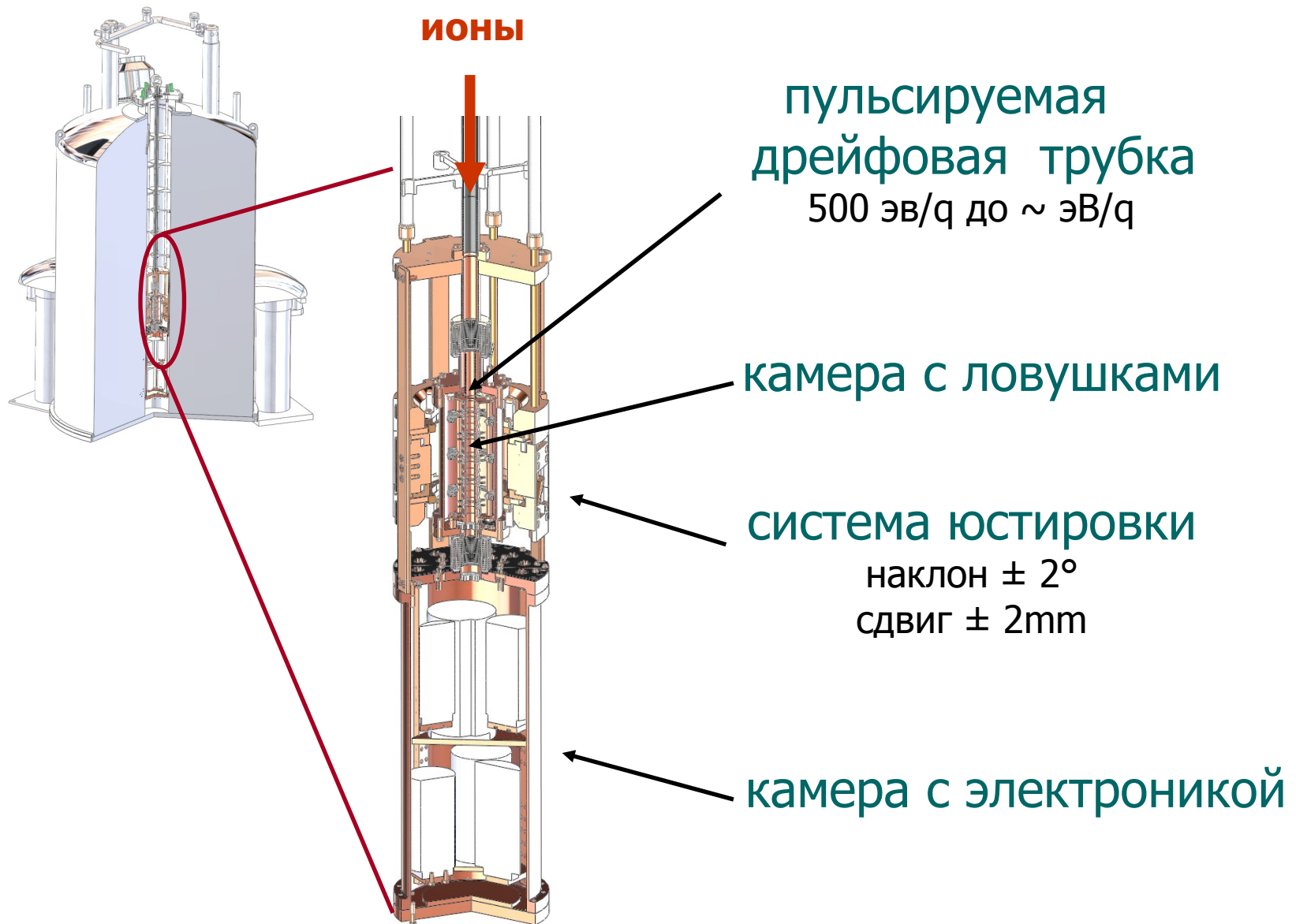
охлаждённые ионы "видят" неоднородность  
В-поля порядка  $10^{-10}$

Временная стабильность В-поля:  
лучше чем  $10^{-10}$  /час

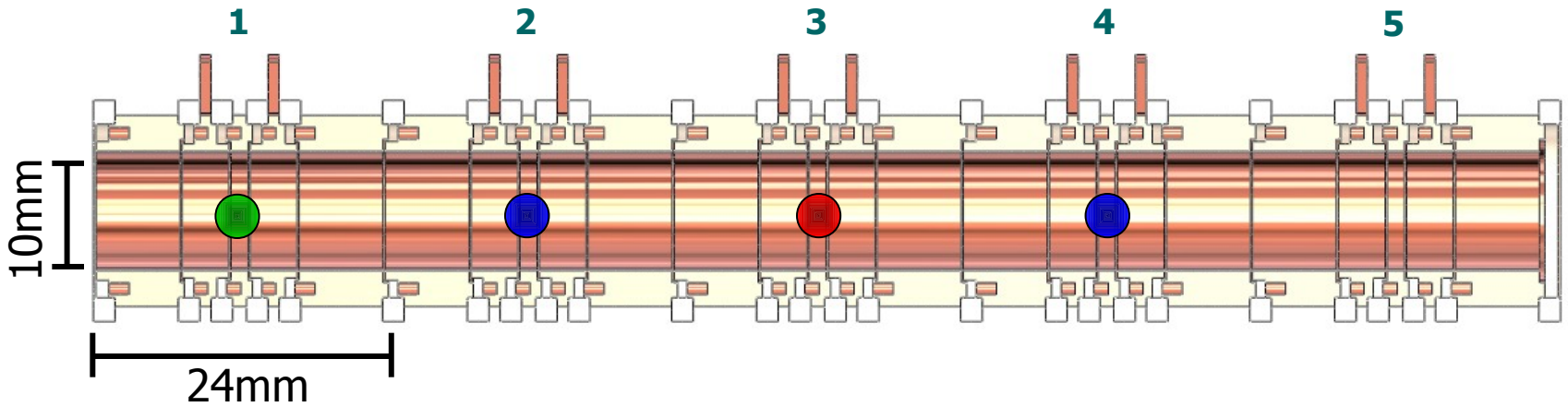


допустимы минутные измерения

# криогенная часть установки



# ЛОВУШКИ И СХЕМА ИЗМЕРЕНИЯ



**Главная Проблема:** непостоянство во времени В-поля и Е-потенциалов

“одновременное” измерение  
двух ионов

быстрый обмен ионов  
между ловушками

мониторинг изменения В-поля

измерение в момент  $t_0$

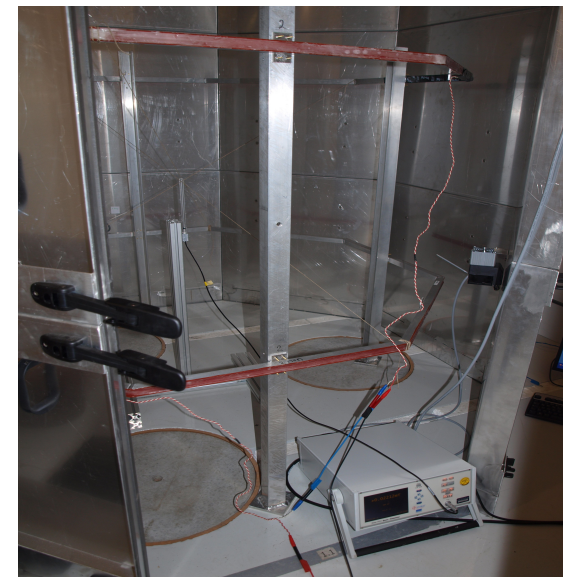
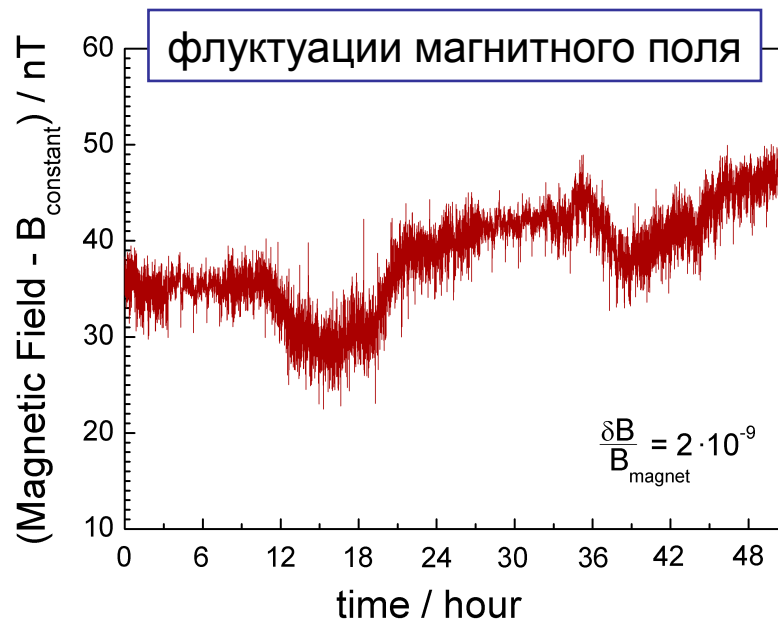
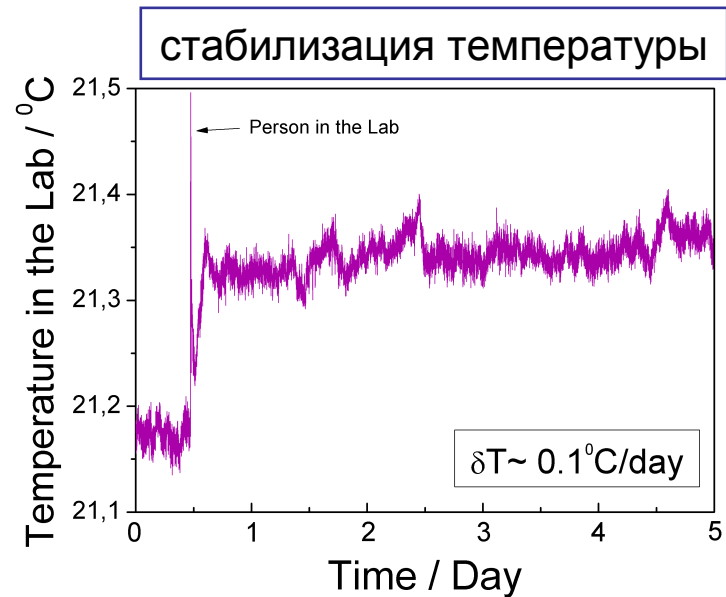
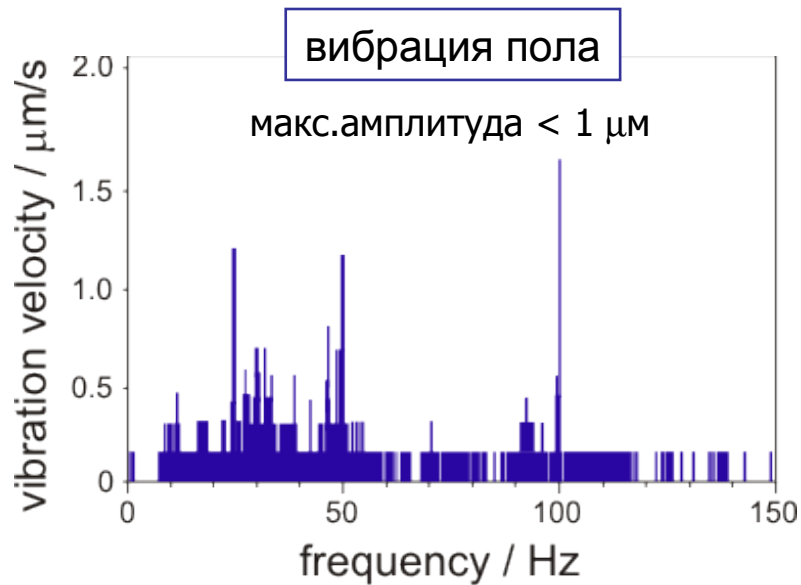
измерение в момент  $t_1$

$$\left( \begin{array}{l} v_1(t_0) = \frac{1}{2\pi} \cdot \frac{q}{m_1} \cdot B_1(t_0) \\ v_2(t_0) = \frac{1}{2\pi} \cdot \frac{q}{m_2} \cdot B_2(t_0) \end{array} \right) \left( \begin{array}{l} v_1(t_1) = \frac{1}{2\pi} \cdot \frac{q}{m_1} \cdot B_2(t_1) \\ v_2(t_1) = \frac{1}{2\pi} \cdot \frac{q}{m_2} \cdot B_1(t_1) \end{array} \right)$$

$$\begin{array}{l} \downarrow \\ \frac{v_1(t_0)}{v_2(t_0)} = \frac{m_2}{m_1} \cdot \frac{B_1(t_0)}{B_2(t_0)} \end{array} \quad \begin{array}{l} \downarrow \\ \frac{v_1(t_1)}{v_2(t_1)} = \frac{m_2}{m_1} \cdot \frac{B_2(t_1)}{B_1(t_1)} \end{array}$$

$$\frac{m_2}{m_1} = \sqrt{\frac{v_1(t_0)}{v_2(t_0)} \cdot \frac{v_1(t_1)}{v_2(t_1)}}$$

# Статус: Лаборатория PENTATRAP



# Статус: магнит и криогенная часть установки

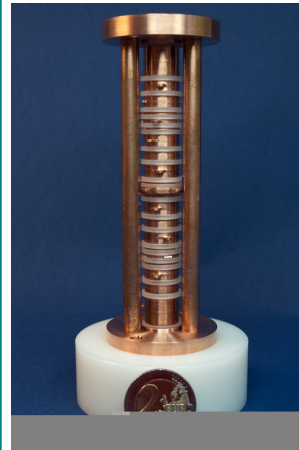
## магнит

установлен в мае 2010

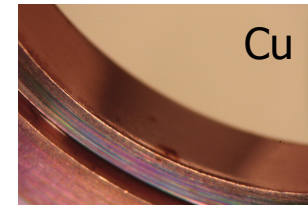


## криогенная часть

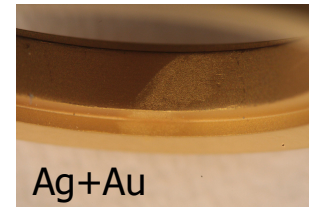
изготавливается;  
окончательная сборка – начало 2011



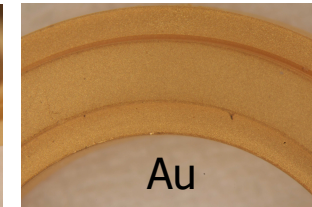
допуск на размеры  
5  $\mu\text{m}$



Cu

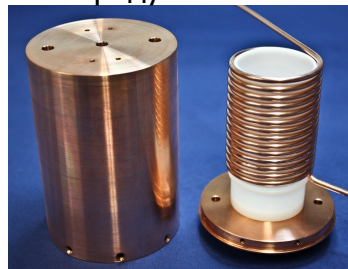


Ag+Au

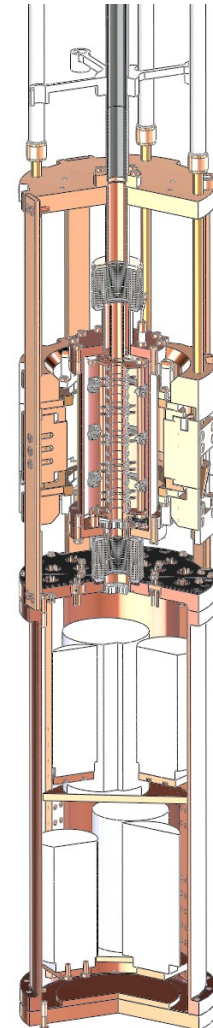
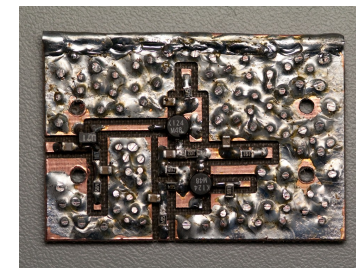
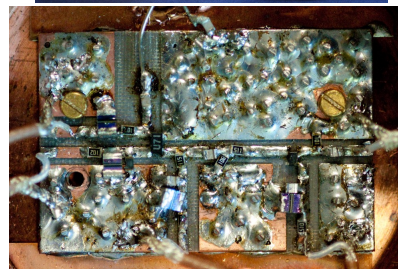


Au

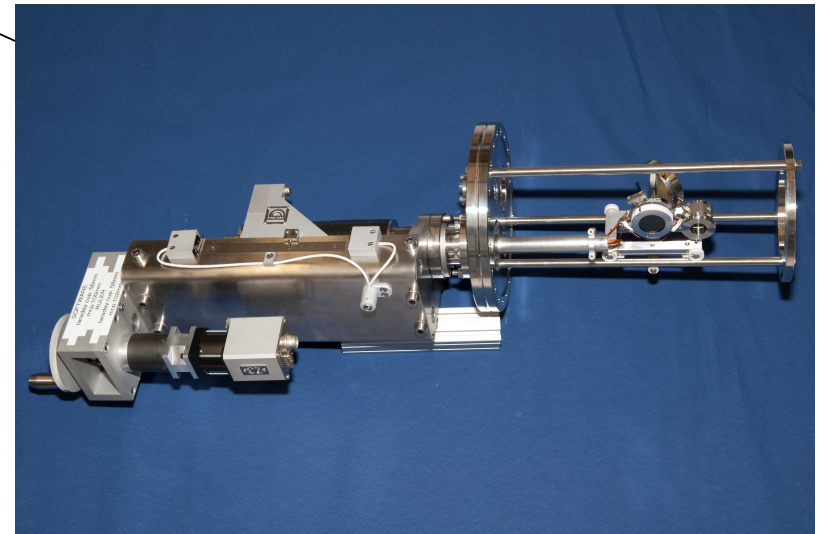
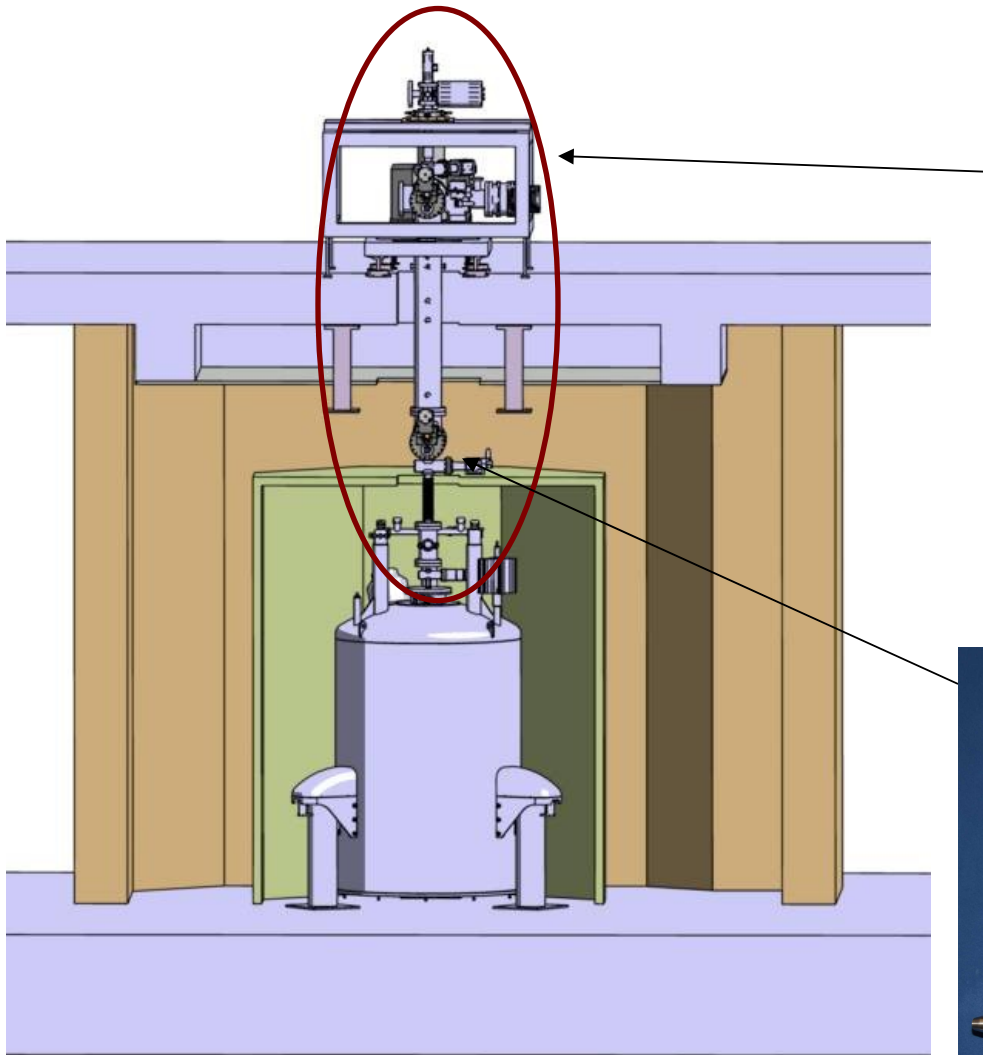
циклотронный резонатор  
и предусилитель



аксиальный резонатор  
и предусилитель



# Статус: ЕВІТ и линия проводки ионов

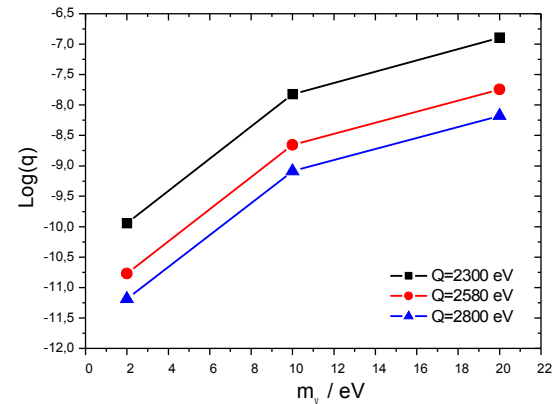
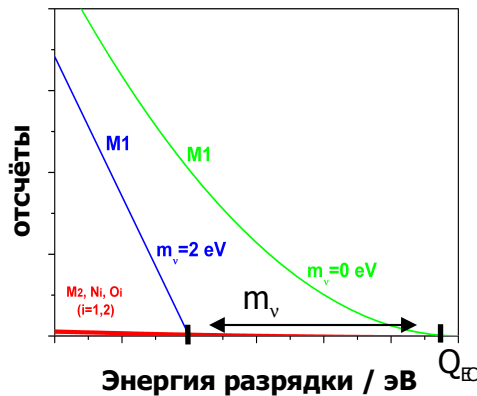
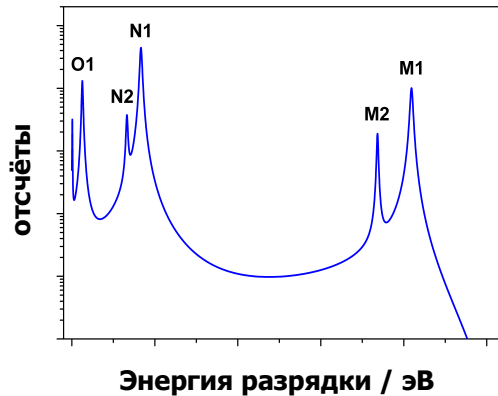


**в конце Октября 2010 начнётся  
сборка**

# Доп.Материал: масса нейтрино

## масса нейтрино: захват орбитального электрона в $^{163}\text{Ho}$

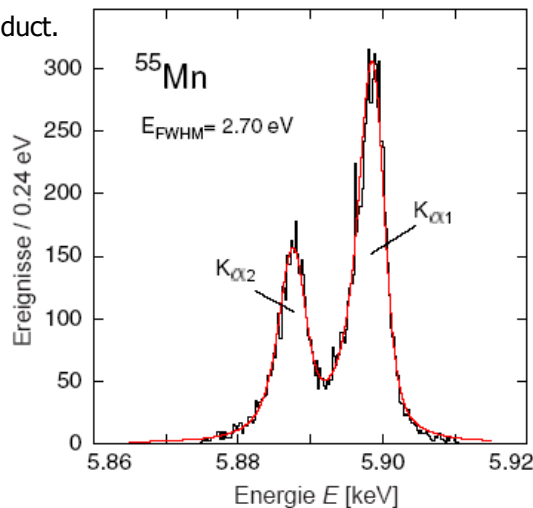
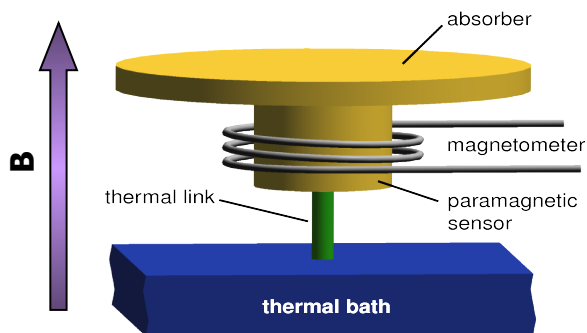
A.D.Rujula, Nucl.Phys. B 188 (1981) 414  
T.Andersen et al., Phys. Lett. B 113 (1982) 72  
P.T.Springer et al., Phys. Rev. A 35 (1987) 679



## криогенный микрокалориметр

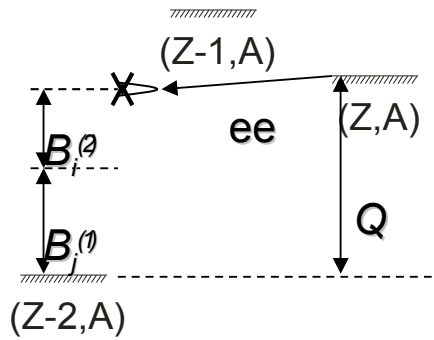
F.Gatti et al., J. Low Temp. Phys. 151 (2008) 603

L.Fleischmann et al., IEEE Trans. Applied Superconduct. 19 (2009) 63



$m_{\nu}$ eV	Figure of merit q	Rate $\times$ n (detectors) / s	expected T, days
2	$10^{-10}$ - $10^{-11}$	$5 \cdot 10^5$	60-600
10	$10^{-8}$ - $10^{-9}$	$5 \cdot 10^5$ $5 \cdot 10^4$ $5 \cdot 10^3$	1-10 6-60 60-600

# Доп.Материал: резонансный двойной электронный захват

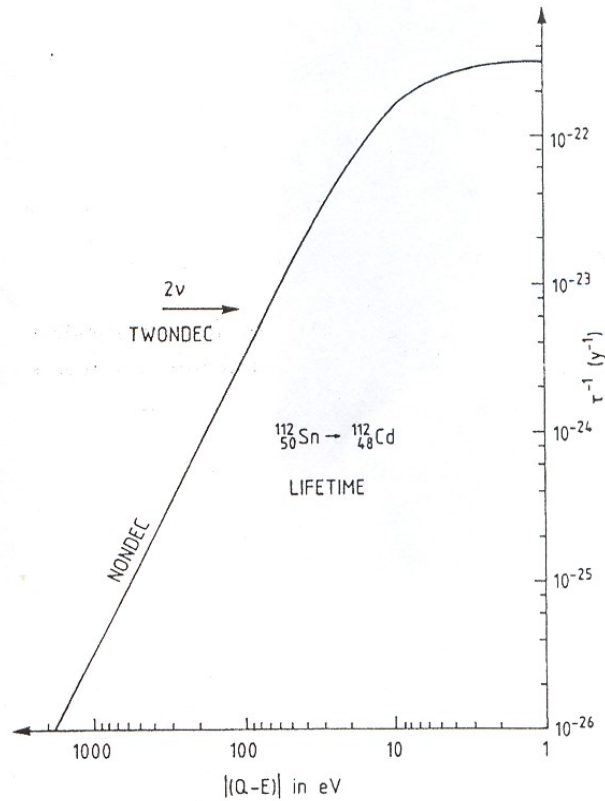


$$\lambda^{res} = A \cdot \frac{\Gamma}{\left(Q - B_i^{(1)} - B_j^{(2)}\right)^2 + \frac{1}{4}\Gamma^2}$$

R.Winter, Phys. Rev. 100 (1955) 142

J.Bernabeu et al., Nucl. Phys. B 223 (1983) 15

Z.Sujkowski et al., Phys. Rev. C 70 (2004) 052501



Nuclei	A, %	$\Delta M$ , keV
<sup>84</sup> Se	0.89	1209.7±2.3 1209.240±0.007 (new!)
<sup>8</sup> Kr	0.35	2846.4±2.0
<sup>6</sup> Ru	5.52	2718.5±8.2
<sup>65</sup> Cd	1.25	2770±7.2
<sup>12</sup> Sn	0.97	1919.5±4.8 1919.82±0.16 (new!)
<sup>30</sup> Ba	0.11	2617.1±2.0
<sup>36</sup> Ce	0.20	2418.9±13
<sup>62</sup> Er	0.14	1843.8±5.6
<sup>52</sup> Gd	0.2	54.6±3.5
<sup>64</sup> Er	1.6	23.3±3.5



# Доп.Материал: СРТ

## эксперименты с протонами / антипротонами

накопительное кольцо LEAR, CERN  
ловушка Пеннинга

$$\left(1 - \frac{m_{\bar{p}}}{m_p}\right) = (9 \pm 9) \cdot 10^{-11}$$

G.Gabrielse et al., Phys. Rev. Lett. 82 (1999) 3198

ATRAP и ATHENA, CERN  
ловушки Пеннинга

$$\left(1 - \frac{f_{1s-2s}^{\bar{H}}}{f_{1s-2s}^H}\right) \sim 10^{-14}$$

G.Gabrielse et al., Phys. Lett. B 507 (2001) 1

M.H. Holzscheiter et al., Hyp. Int. 109 (1997) 1

Mainz и Harvard  
ловушки Пеннинга, магнитная бутылка

$$\left(1 - \frac{\mu_p}{\mu_{\bar{p}}}\right) \sim 10^{-9}$$

W. Quint et al., NIM B 214 (2004) 207

G.Gabrielse, group's home-page

## эксперименты с электронами / позитронами

Вашингтон  
ловушка Пеннинга

$$\left(1 - \frac{\mu_{\bar{e}}}{\mu_e}\right) = (0.5 \pm 2.1) \cdot 10^{-12}$$

R.S. Van Dyck et al., Phys. Rev. Lett. 59 (1987) 26



# Доп.Материал: константа тонкой структуры

Harvard  
ловушка Пеннинга

$$\frac{g}{2} = 1 + C_1 \cdot \left(\frac{\alpha}{\pi}\right) + C_2 \cdot \left(\frac{\alpha}{\pi}\right)^2 + \dots$$

D.Hanneke et al., Phys. Rev. Lett. 100 (**2008**) 120801

$$\frac{\Delta\alpha}{\alpha} = 3.7 \cdot 10^{-10}$$

Washington и MIT  
ловушки Пеннинга

$$\alpha^2 = \left(\frac{2R_\infty}{c}\right) \cdot \left(\frac{h}{m_e}\right) = \left(\frac{2R_\infty}{c}\right) \cdot \left(\frac{h}{m_{Cs}} \cdot \frac{m_{Cs}}{m_p} \cdot \frac{m_p}{m_e}\right)$$

D.L.Farnham et al., Phys. Rev. Lett. 75 (**1995**) 3598

M.P.Bradley et al., Phys. Rev. Lett. 83 (**1999**) 4510

A.Wicht et al., Physica Scripta T102 (**2002**) 82

$$\frac{\Delta\alpha}{\alpha} = 7.4 \cdot 10^{-9}$$

# Доп.Материал: масса электрона

прямое измерение массы электрона

Washington  
ловушка Пеннинга

$$\frac{\Delta m_e}{m_e} = 2.1 \cdot 10^{-9}$$

D.L.Farnham et al., Phys. Rev. Lett. 75 (**1995**) 3598

масса электрона определена из g-factor электрона  
в водородоподобных ионах

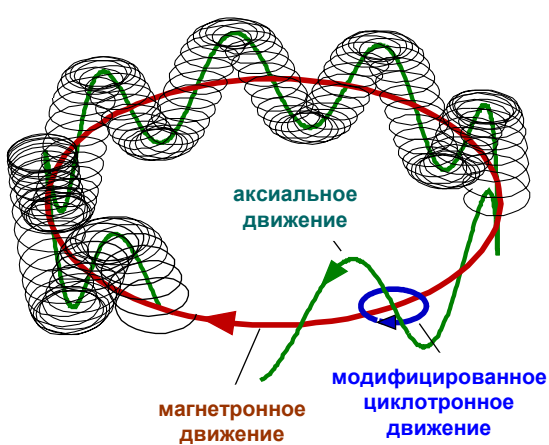
Mainz  
ловушка Пеннинга

$$\frac{\Delta m_e}{m_e} = 4 \cdot 10^{-10}$$

Th.Beier et al., Phys. Rev. Lett. 88 (**2002**) 1

# Доп.Материал: Принцип работы ловушки Пеннинга (1)

движение иона  
в ловушке



$B$



← end electrode

← correction elec.

← ring electrode

5-электродная геометрия:

$d=10\text{мм}$ ,  $l_r=1.457\text{мм}$ ,  $l_c=3.932\text{мм}$ ,  $l_e=7.039\text{мм}$

$$\Phi(r, z) = U_0 \cdot \sum_{j=0}^{\infty} \left( \sum_{i=0}^j \frac{1}{j!} \cdot C_{i,j} \cdot r^i \cdot z^{j-i} \right)$$

$$\Phi(r, z) = \Phi(r, z)_{\text{harm}} + \Delta \Phi(r, z)_4 + \Delta \Phi(r, z)_6 + \dots$$

$$\Phi(r, z) = U_0 \cdot c_2 \cdot \left( z^2 - \frac{r^2}{2} \right) + U_0 \cdot c_4 \cdot \left( z^4 - \frac{1}{2} z^2 r^2 + \frac{r^4}{4} \right) + U_0 \cdot c_6 \cdot O(z^6, r^6, \dots) + \dots$$

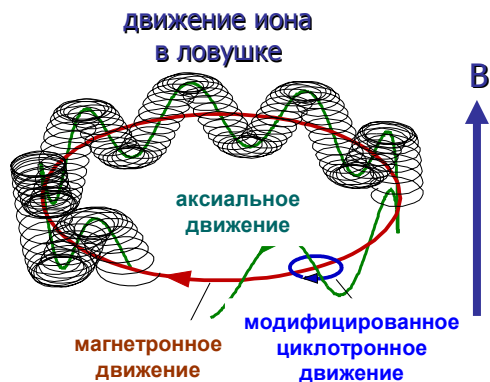
Геометрия электродов подобрана так, что  $C_4=C_6=0$  и  $C_2=f(U_{\text{ax}}/U_0)$

$$\Phi(r, z) = U_0 \cdot c_2 \cdot \left( z^2 - \frac{r^2}{2} \right) + U_0 \cdot c_8 \cdot O(z^8, r^8, \dots) + \dots$$

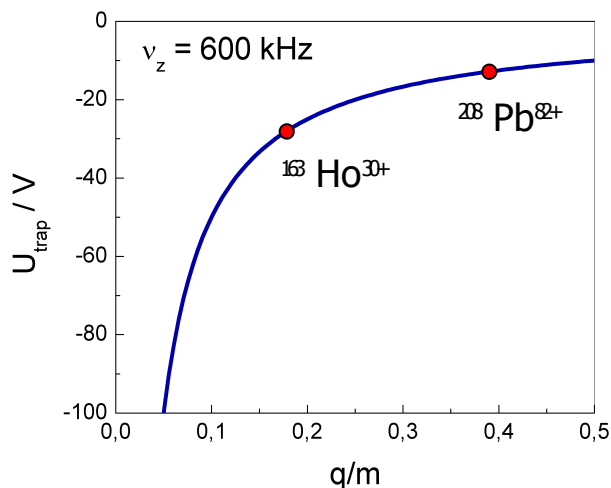


# Доп.Материал: Принцип работы ловушки Пеннинга (2)

ловушка находится в жидком гелии (4К), ( $\text{Xe}^{30+}$ )



частота / Гц	энергия / мэВ	амплитуда / $\mu\text{м}$	квантовое число
$\nu_+ = 25.000.000$	400	6	$> 10^6$
$\nu_z = 600.000$	10	35	
$\nu_- = 10.000$	0.17	6	



Stahl Electronics UM 1-14

- диапазон: 0 до -14 В
- стабильность:  
off-set:  $\pm 2.4 \mu\text{V/K}$   
 $\pm 0.4 \text{ ppm/K}$

$$\frac{\delta U}{U} / 0.1 \text{ K} = \pm 5 \cdot 10^{-8}$$

МРІК эл. мастерская:  
в разработке

- диапазон: 0 до -100 В
- стабильность:

$$\frac{\delta U}{U} / 0.1 \text{ K} \ll \pm 5 \cdot 10^{-8}$$

# Доп.Материал: Принцип работы ловушки Пеннинга (3)

◇ несоосность В и Е: сдвига  $v_c$  нет

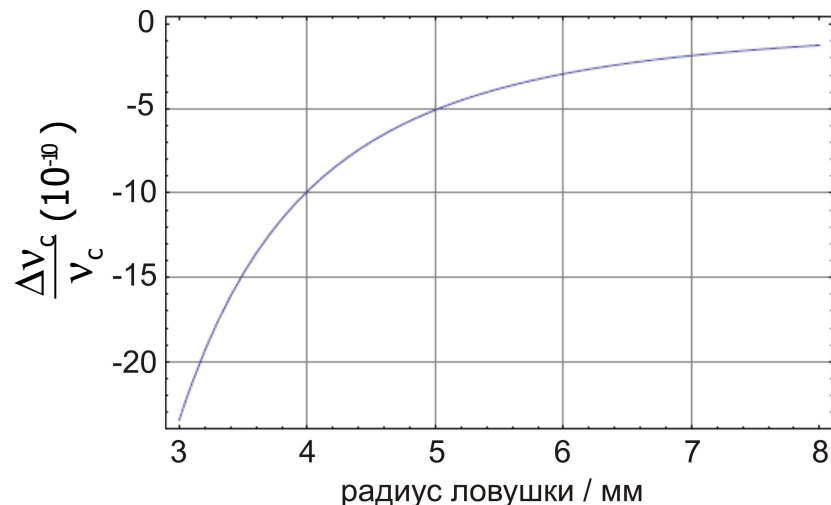
◇  $\beta_2$ -компонента В:  $\frac{\Delta v_c}{v_c} = \frac{\beta_2 \cdot a_z^2}{v_c} < 10^{-12}$

◇ градиент В:  $\frac{\Delta v_z}{v_z} \approx 3 \cdot 10^{-9}$

◇  $C_4$  и  $C_6$ -компонента Е:  $\frac{\Delta v_c}{v_c} \approx \left(\frac{v_z}{v_c}\right)^2 \cdot \frac{\Delta v_z}{v_z} \approx \left(\frac{v_z}{v_c}\right)^2 \cdot \frac{C_6}{C_2^3} \cdot \left(\frac{E}{q}\right)^2 < 10^{-12}$

◇ релятивистский эффект:  $v_c = \frac{1}{2\pi} \cdot \frac{q}{m} B \cdot \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}; \quad \frac{\Delta v_c}{v_c} < 10^{-12}$

◇ наведённый заряд:  $\frac{\Delta v_c}{v_c} \sim \frac{m}{r^2 B^2}$



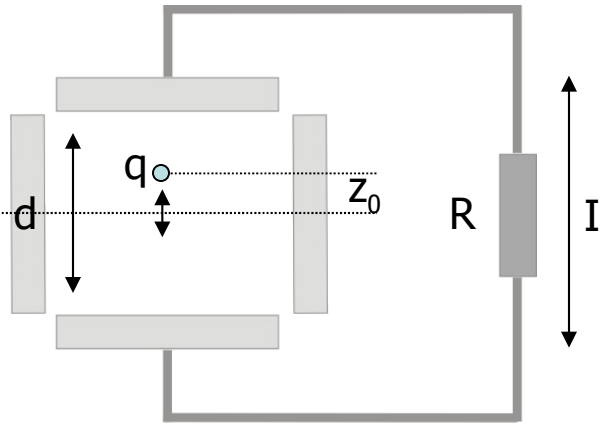
◇ два заряда в соседних ловушках:

$$\frac{\Delta v_c}{v_c} < 10^{-12}$$

◇ разные потенциалы соседних ловушек:

$\frac{\Delta v_c}{v_c} \sim 10^{-11}$  при относительной разности массы к заряду  $\sim 5\%$

# Доп.Материал: измерение частот в ловушке

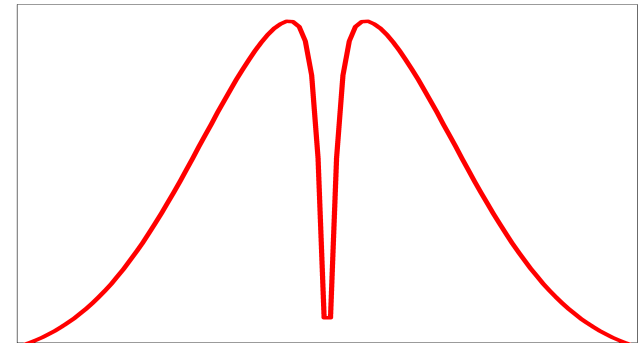
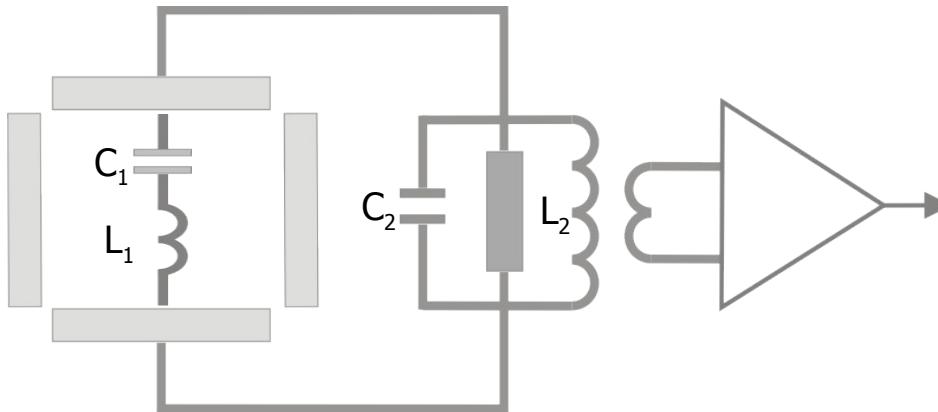


$$I_{\max} = \frac{1}{2\pi} \cdot q \cdot \frac{z_0}{d} \cdot v_z$$

$$I_{\max} (10^{-15} \text{ A}) = q \cdot z_0 (\text{ mm})$$

q	z <sub>0</sub> / mm	I / фА	U (R=100 MΩ)
30	0.035	1	0.1 μВ
30	1	30	3 μВ

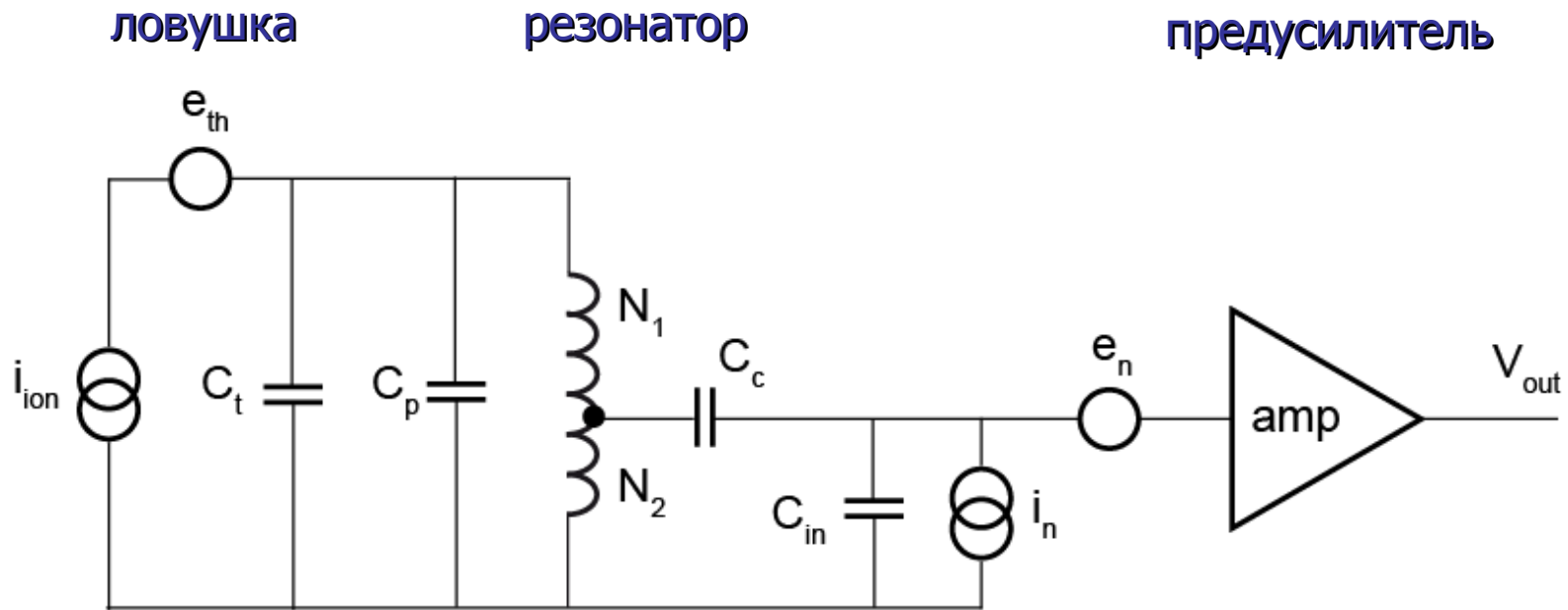
$$F_{\text{ион}} = -m\omega_z^2 \cdot z + q \frac{U(t)}{d} = -m\omega_z^2 \cdot z - q^2 \frac{R}{d^2} \cdot \dot{z} \longrightarrow \tau = \frac{md^2}{Rq^2}$$



$$U(t) = \frac{d \cdot m}{q} \cdot \ddot{z} + \frac{d \cdot m \cdot \omega_z^2}{q} \cdot z = \frac{d^2 \cdot m}{q^2} \cdot \dot{I} + \frac{d^2 \cdot m \cdot \omega_z^2}{q^2} \cdot \int I dt = L_1 \cdot \dot{I} + \frac{1}{C_1} \cdot \int I dt$$



# Доп.Материал: схема включения предусилителя



$$\left(\frac{S}{N}\right)^2 = \frac{4kTR\alpha^2}{e_n^2 + i_n^2 R^2 \alpha^4}$$

$$\alpha = \left[ \frac{N_2}{N_1 + N_2} \right] \left[ \frac{C_c}{C_c + C_i} \right]$$



$$\alpha_{optimum} = \sqrt{e_n / (i_n Q \omega_z L)}$$





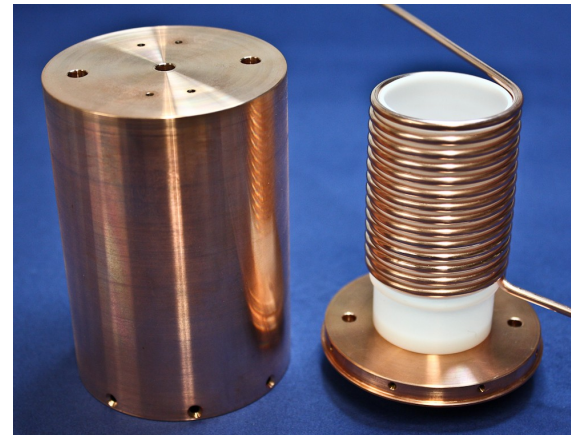
# Доп.Материал: резонаторы

аксиальный резонатор

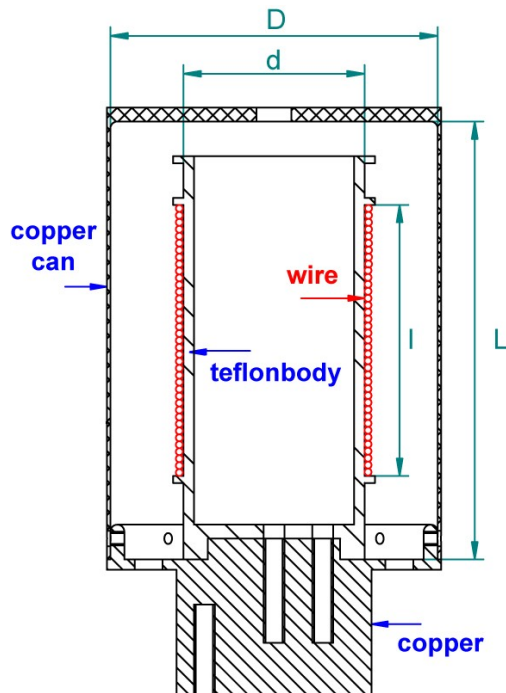


$\phi_{wire} : 75 \mu m$   
 $N = 830$   
 $L = 3.4 mH$   
 $C \approx 7 pF$   
 $Q > 45000$   
 $R_p = 680 M\Omega$

циклотронный резонатор



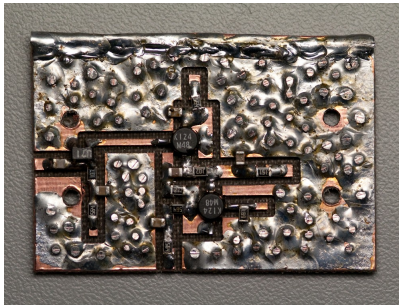
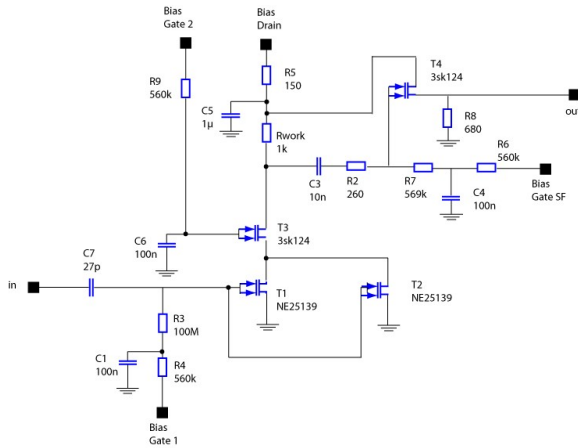
$\phi_{wire} : 1.5 mm$   
 $N = 14$   
 $L = 2.1 \mu H$   
 $C \approx 4.4 pF$   
 $Q \approx 4000$   
 $R_p \approx 1.5 M\Omega$



внутренний диаметр экрана	D
длина экрана L	1.325D
диаметр соленоида d	0.55D
длина соленоида l	0.825D
Оптимальное количество витков	$48.46 \times 10^6 / Dv$

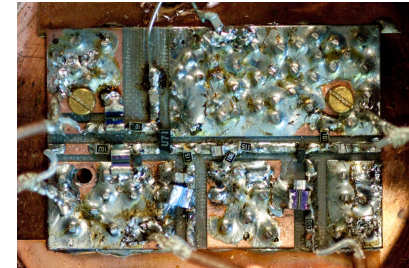
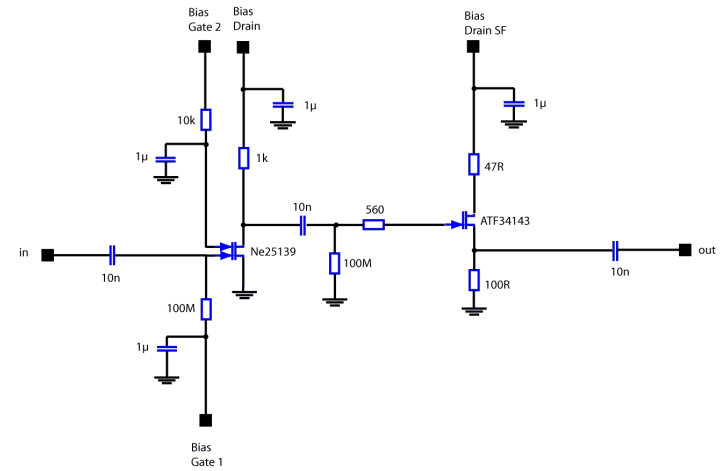
# Доп.Материал: предусилители и усилители

## аксиальный предусилитель



Транзистор NE25139  
GaAs-MESFET

## циклотронный предусилитель



Транзисторы NE25139 и  
ATF34143  
GaAs-MESFET

@ 500kHz:

$$e_n < 700 pV / \sqrt{Hz}$$

$$i_n < 5 fA / \sqrt{Hz}$$

$$R_{in} \approx 20 M\Omega$$

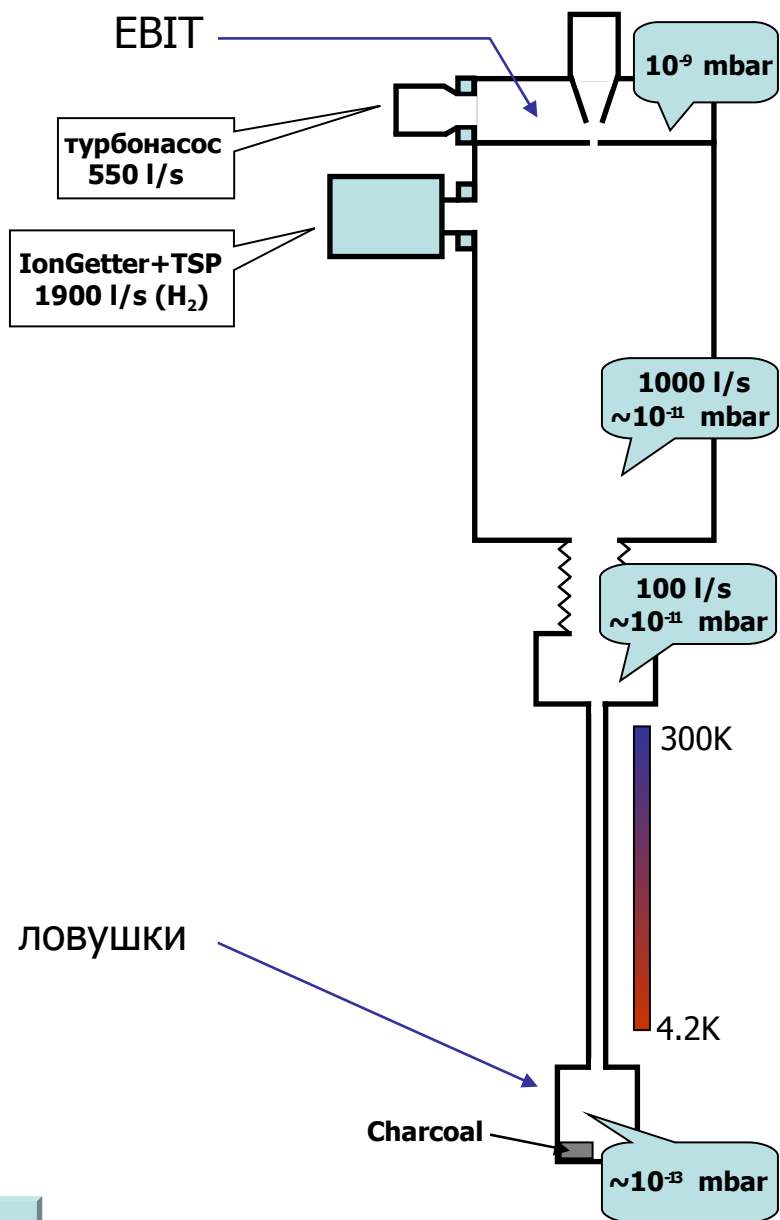
$$C_{in} \approx 7 pF$$

$$G_{amp} = 8 dB$$

$$P < 10mW$$

в процессе тестирования

# Доп.Материал: время удержания ионов в ловушке



$$\sigma_{q,q-1} = 1.43 \cdot 10^{-12} \cdot q^{1.17} \cdot I^{-2.76} [\text{cm}^2]$$

$q$  – заряд иона

$I$  – потенциал ионизации газа

R. Mann, Z. Phys. D 3 (1986) 85.

