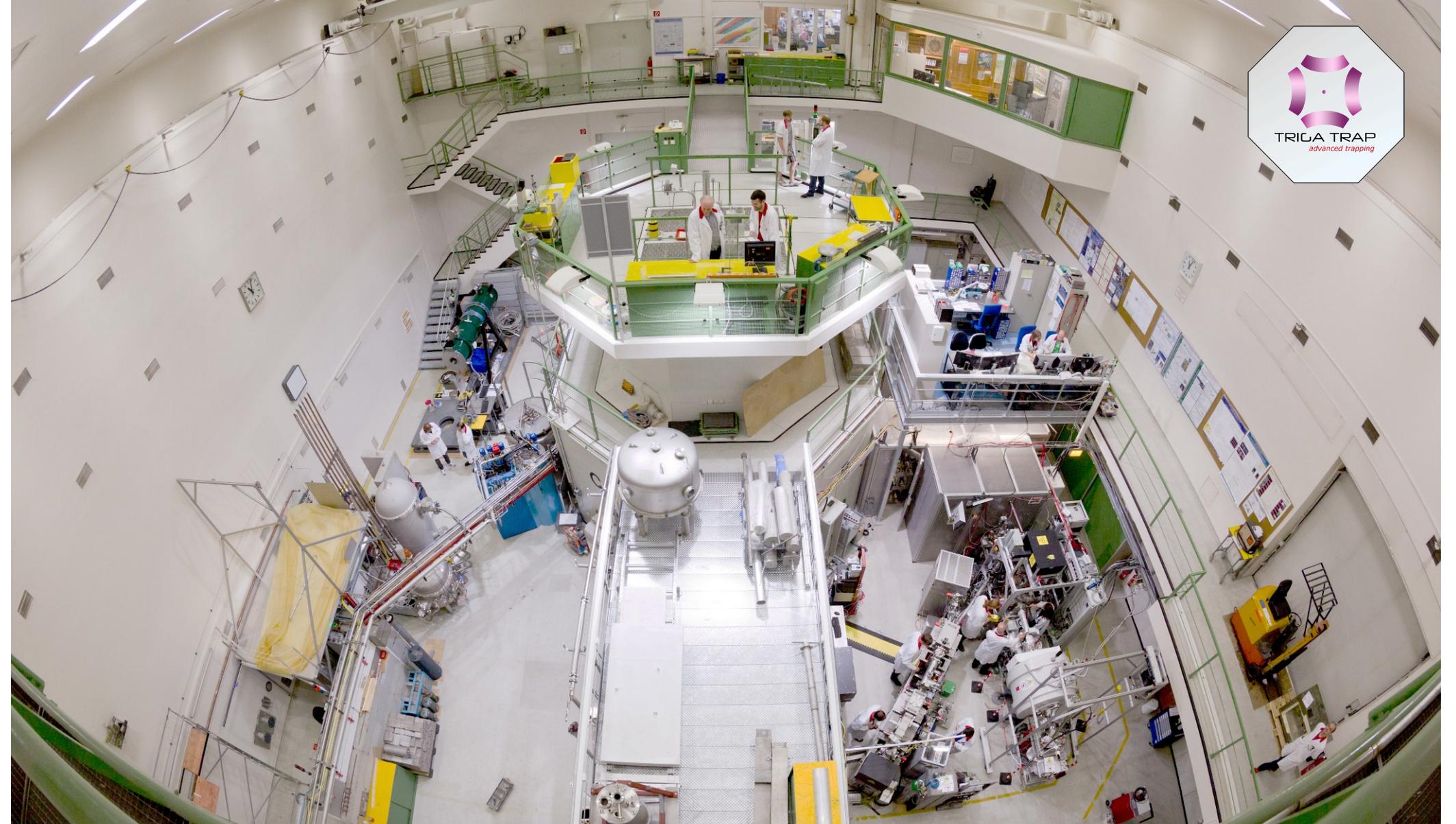


Измерение масс трансурановых элементов в области $N = 152$ на установке TRIGA TRAP

Ченмарев С. В. – ОФВЭ ЛФЭЯ

01.04.2025

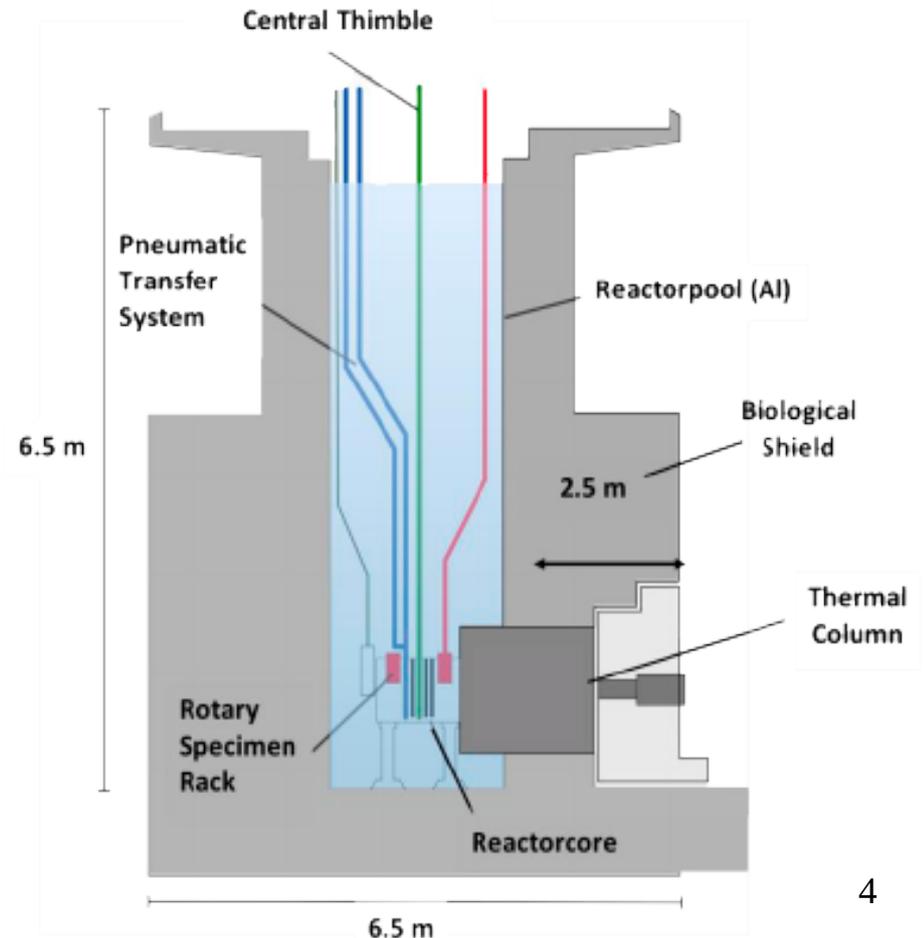


Введение

- Одной из важнейших величин в фундаментальной физике является **масса** нуклида, соответствующая его полной энергии связи.
- Ионные ловушки зарекомендовали себя как универсальный прибор для фундаментальных исследований. Они были успешно использованы для измерений масс электронов, протонов и антипротонов, привнеся информацию о выполнимости СРТ-принципа.
- Установленные на пучках ускорителей и реакторов, ловушки активно используются для масс-спектрометрических измерений экзотических ядер.

Реактор ТРИГА-Майнц

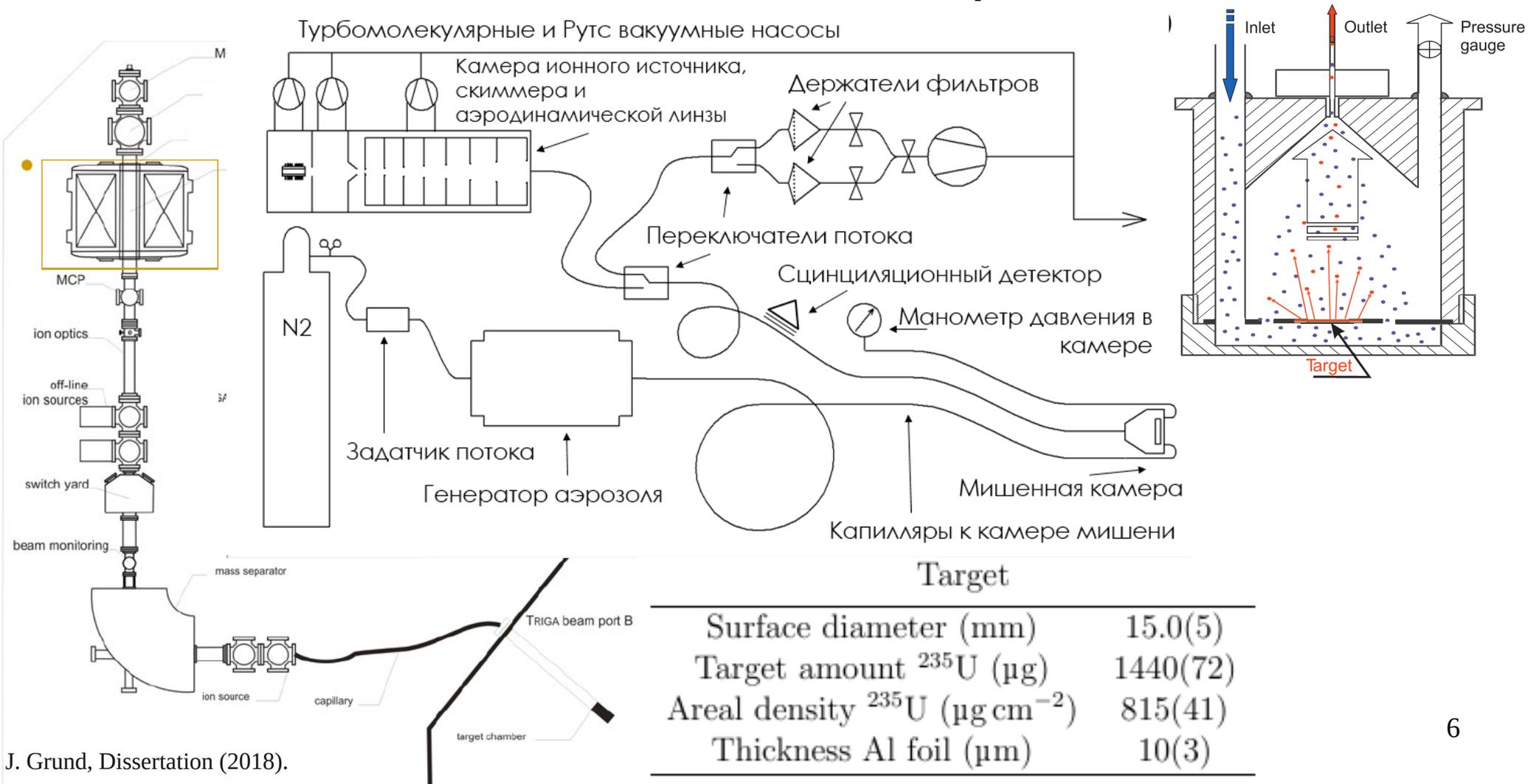
Trainig, **R**esearch, **I**sotopes, **G**eneral **A**tomics – серия исследовательских реакторов, использующих топливо на основе $U Zr H_x$, содержащего 8,5-12% U из которого 20% ^{235}U
Расположен в университете им. Иогана Гутенберга в Майнце



Характеристики реактора ТРИГА в сравнении с реакторами ПИК и ВВР-М в Гатчине

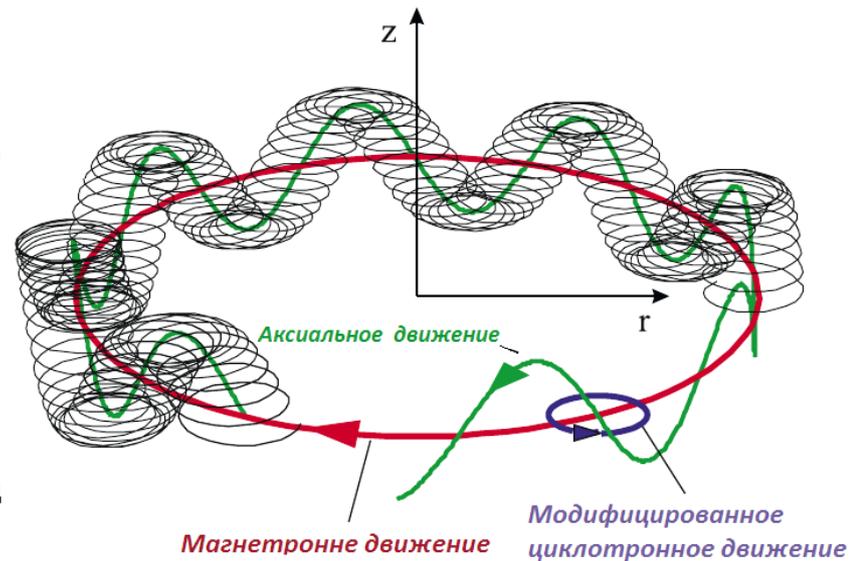
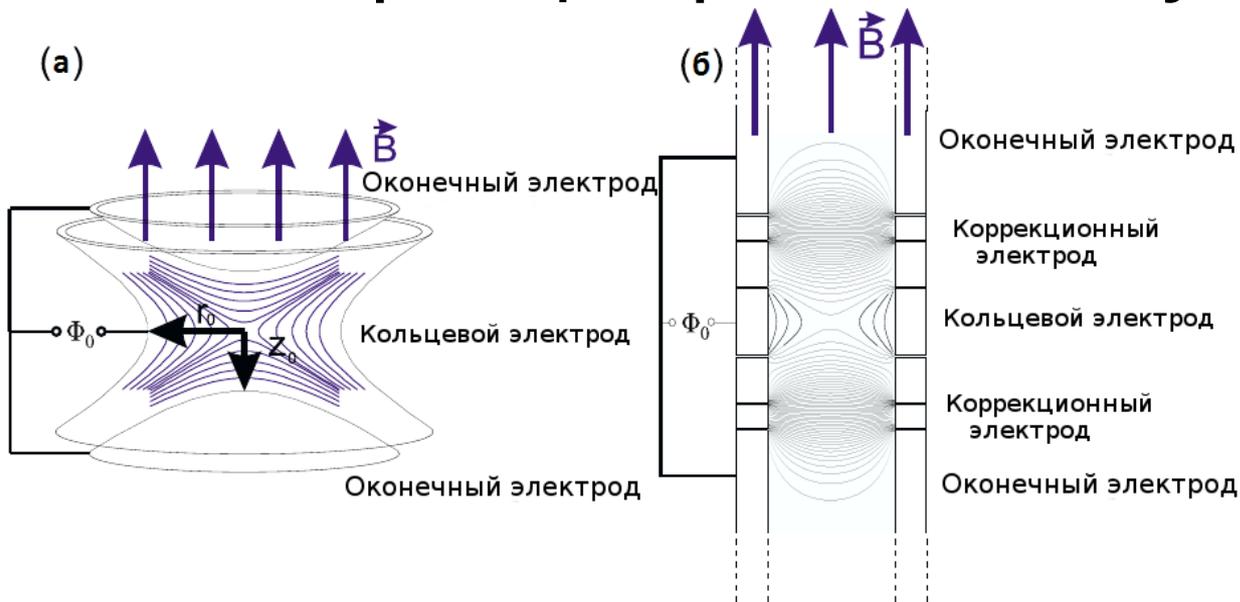
	TRIGA Mainz		ПИК	ВВР-М
Режим	непрерывный	импульсный	непрерывный	непрерывный
Тепловая мощность	100 кВт	250 МВт в течение 30 мс	100 МВт	18 МВт
Плотность потока нейтронов, н/см²с	7x10¹¹	1,75x10¹⁵	5x10¹⁵	4x10¹⁴
Топливо	U ZrH _x		UO ₂ +CuBe	U Al керамика
Степень обогащения топлива по ²³⁵ U	8,5-12% x 20%		90%	90%
Замедлитель	ZrH _x + вода		Вода	Вода
Отражатель	Графит		Тяжелая вода	Металлический Be
Число ГЭК	4		10	17
Число ВЭК	1 + барабан и 2 петли пневмопочты в отражателе		6 + 6 наклонных	15
Ввод в эксплуатацию	1965		2018	1960

Система TRIGA Спец



Target	
Surface diameter (mm)	15.0(5)
Target amount ²³⁵ U (μg)	1440(72)
Areal density ²³⁵ U (μg cm ⁻²)	815(41)
Thickness Al foil (μm)	10(3)

Принцип работы ловушки Пеннинга



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

$$m_{atom} = \frac{\omega_{c,ref}}{\omega_c} (m_{ref} - m_e) + m_e$$

$$\omega_z = \sqrt{\frac{qU_0}{md^2}}$$

$$\omega_c = \omega_+ + \omega_-$$

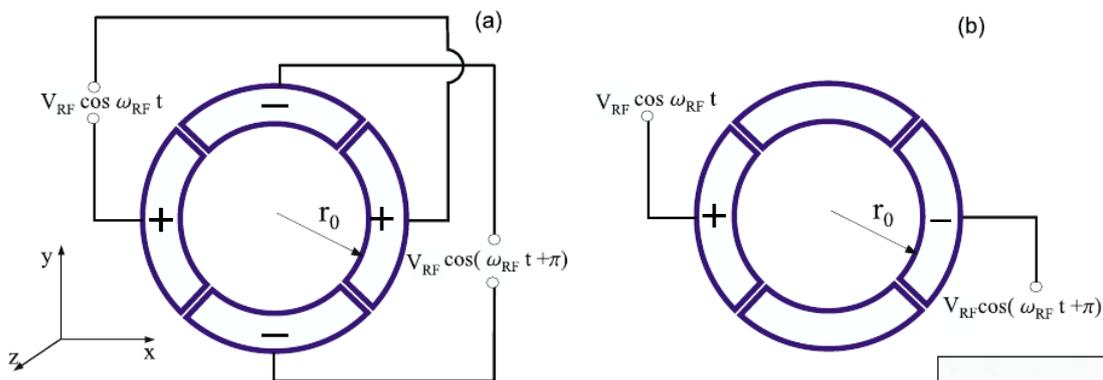
$$\omega_c^2 = \omega_+^2 + \omega_z^2 + \omega_-^2$$

$$\omega_+ = \frac{1}{2} (\omega_c + \sqrt{\omega_c^2 - 2\omega_z^2})$$

$$\omega_- = \frac{1}{2} (\omega_c - \sqrt{\omega_c^2 - 2\omega_z^2})$$

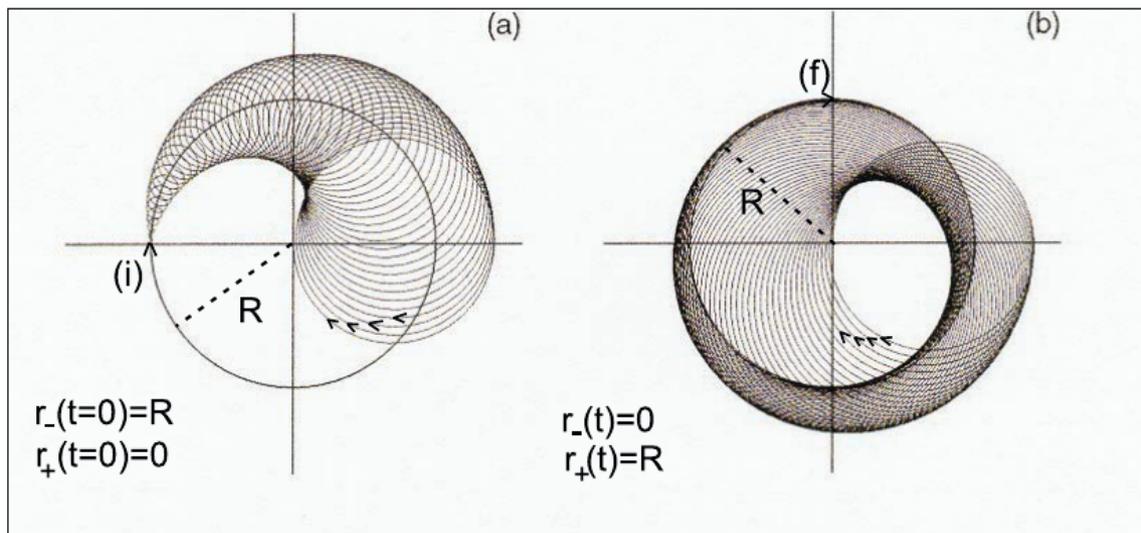
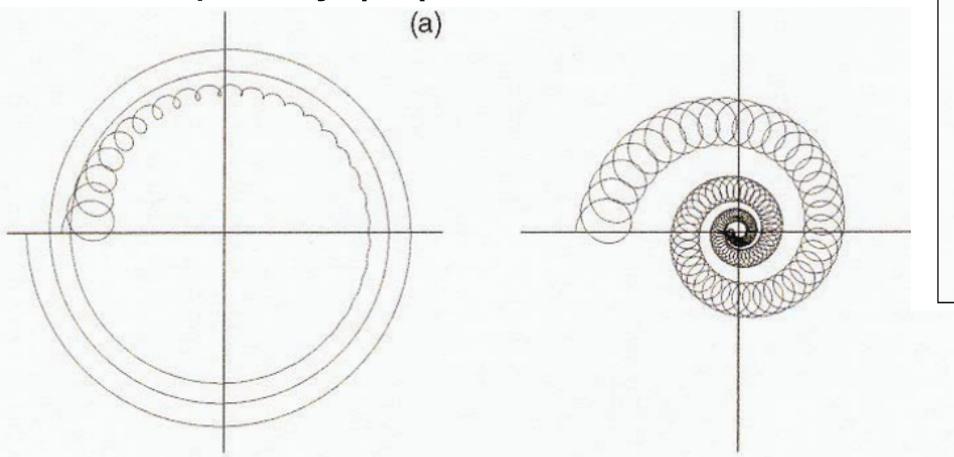
$$\omega_c > \omega_+ \gg \omega_z \gg \omega_-$$

Манипуляция ионами в ловушке



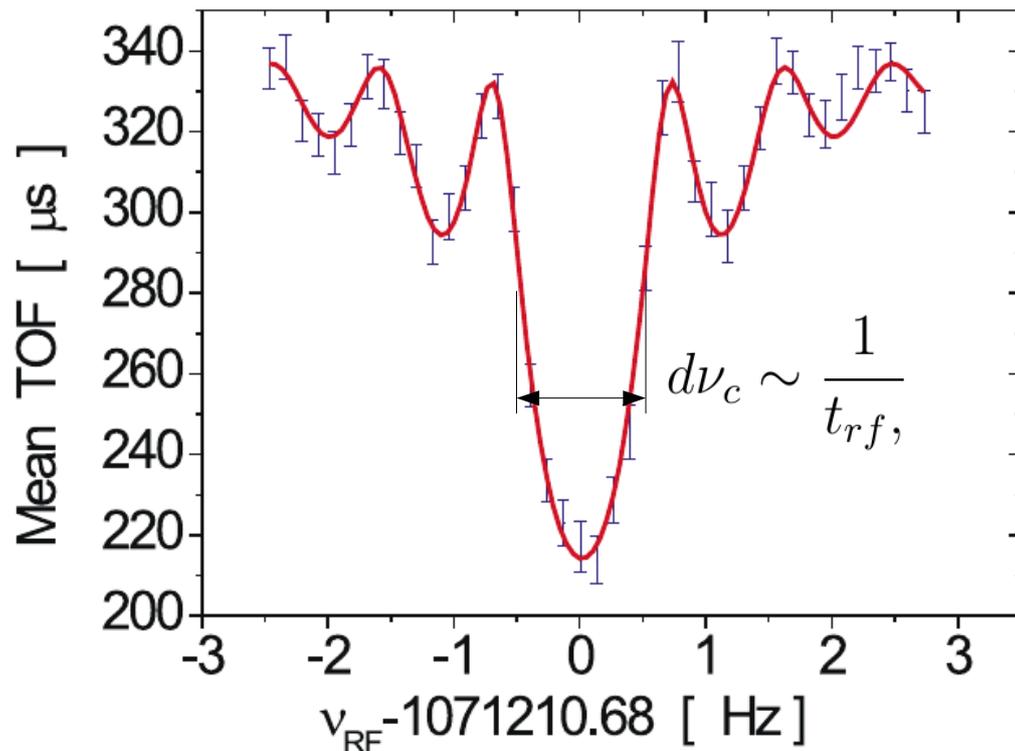
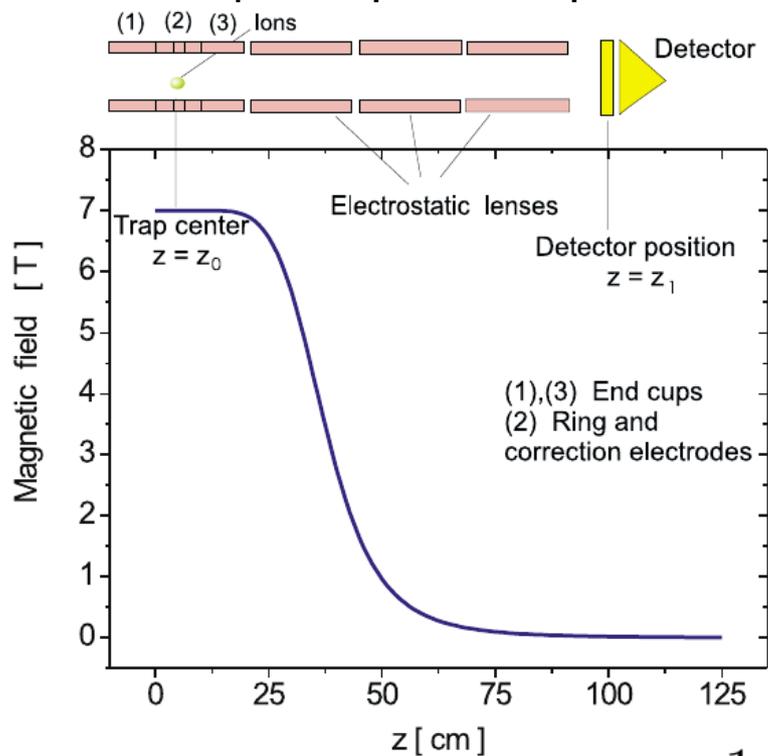
Преобразование магнетронного движения в модифицированное циклотронное и обратно

Резонансное масс-зависимое циклотронное охлаждение с помощью буферного газа



Методы определения циклотронной частоты

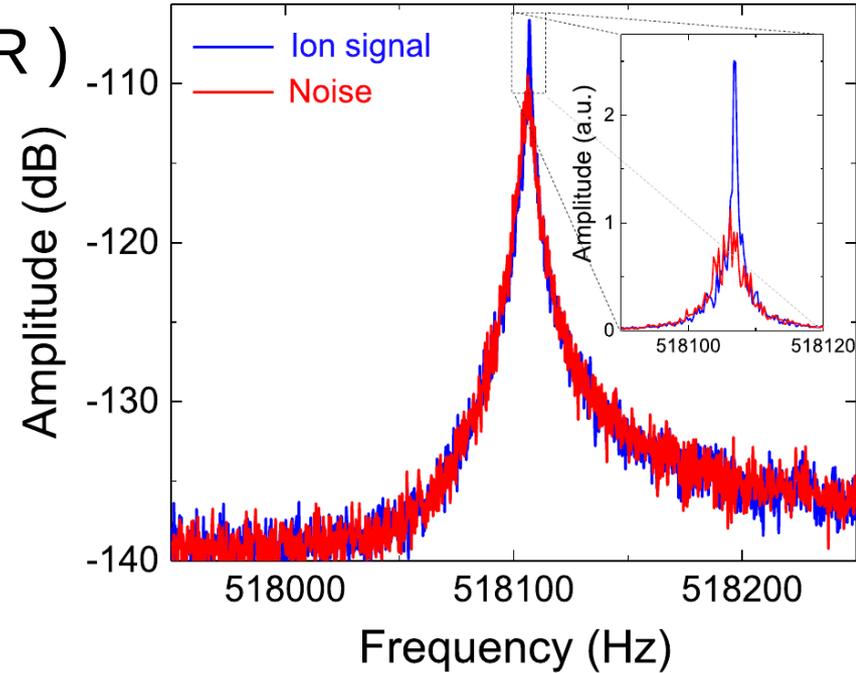
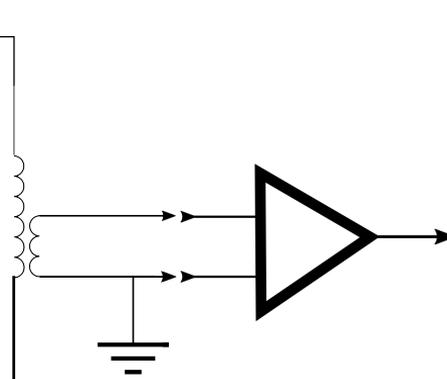
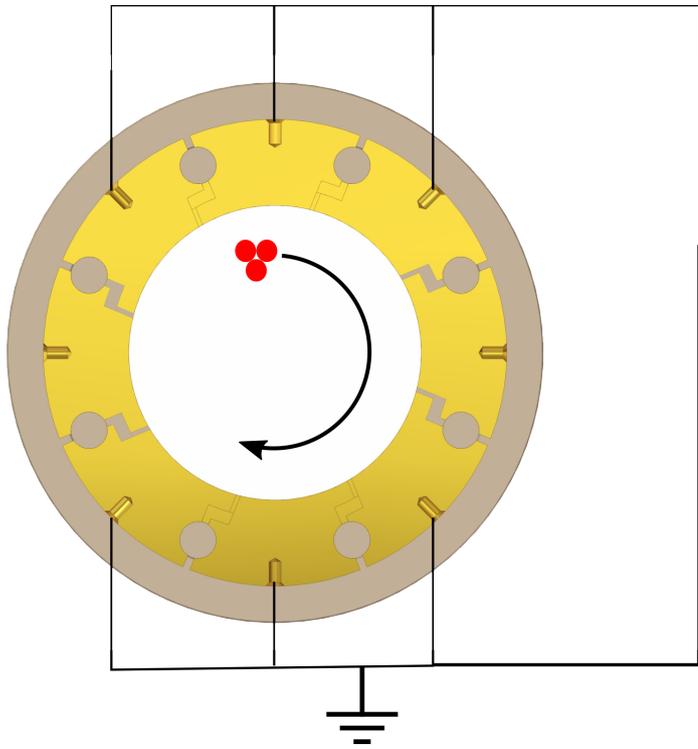
- Метод времяпролётного ионного циклотронного резонанса (ToF-ICR)



$$\vec{F}_z = \mu \frac{\partial B_z}{\partial z} \vec{e}_z \quad \mu_+ = -\frac{1}{2} Q \omega_+ R^2$$

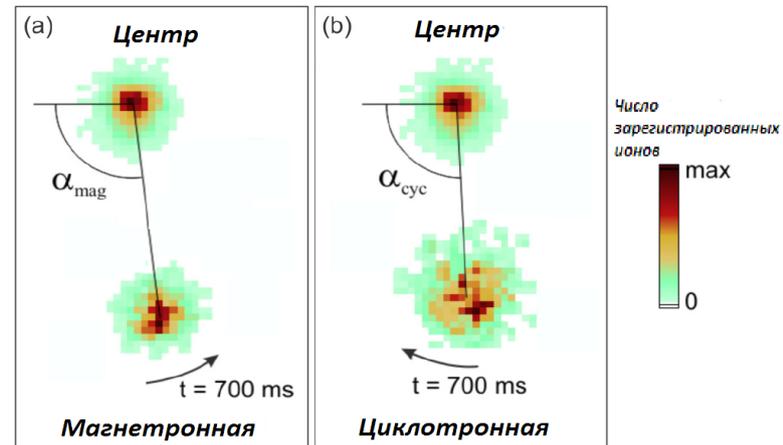
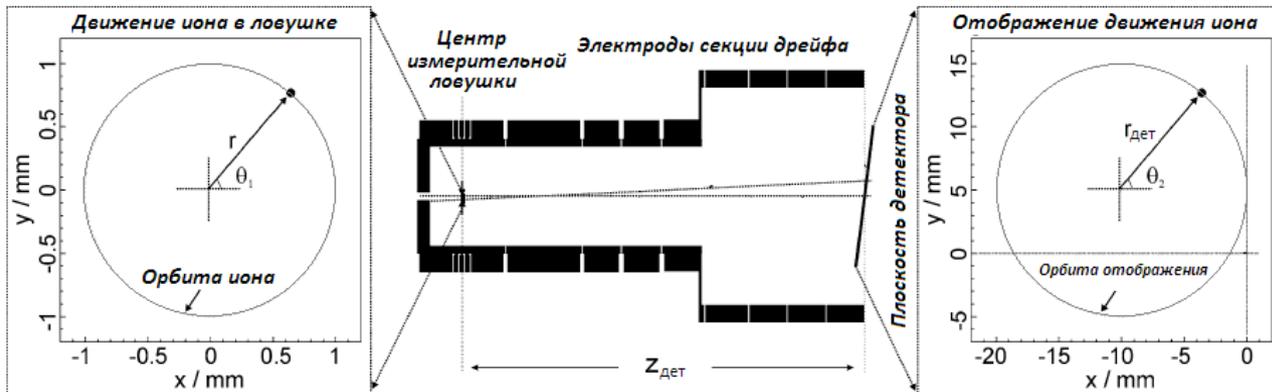
Методы определения циклотронной частоты

- Метод Фурье-преобразования (FT-ICR)



Для высокой чувствительности требуется использовать резонатор на основе сверхпроводника и охлаждения усилителя и ловушек до криогенных температур

Метод фазового отображения



$$G = \frac{r_{\text{дет}}}{r} \sim \sqrt{\frac{B_z(r, 0)}{B_z(r_{\text{дет}}, z_{\text{дет}})}}$$

$$f_i = \frac{\varphi_{\text{tot}}}{t_{\text{acc}}} = \frac{2\pi \cdot n + \varphi_i}{t_{\text{acc}}}$$

Схема 1

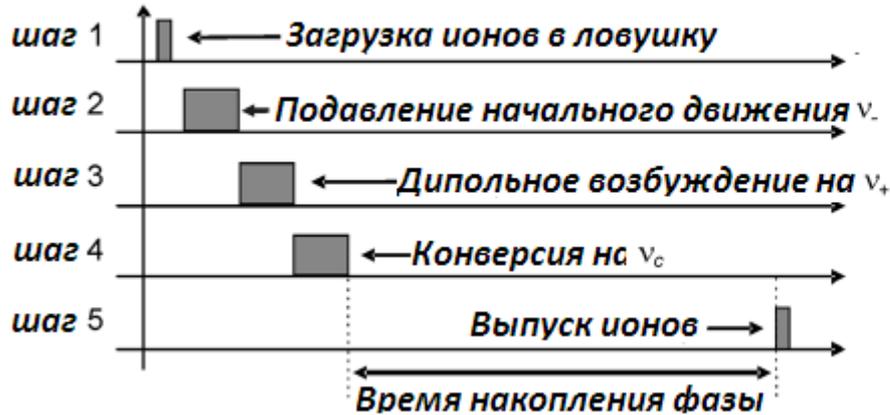
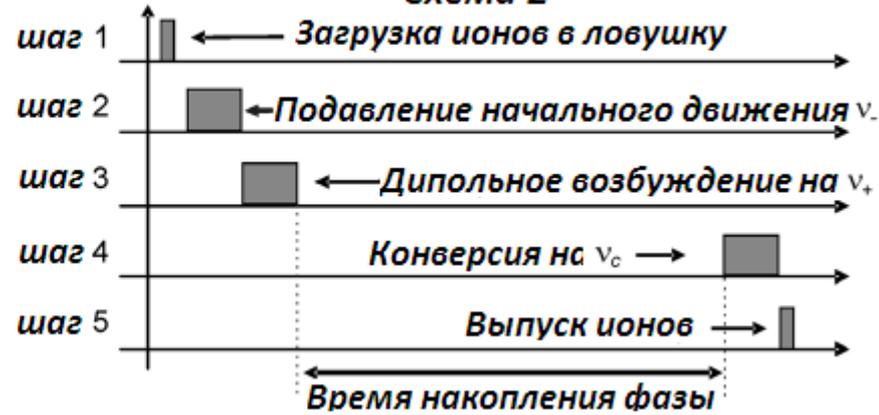
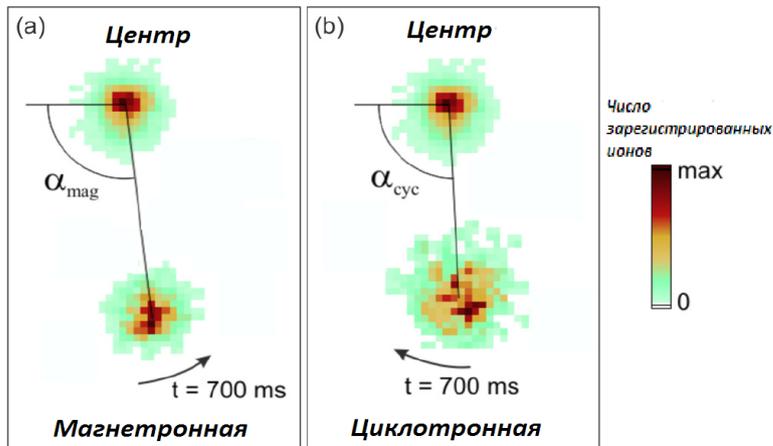
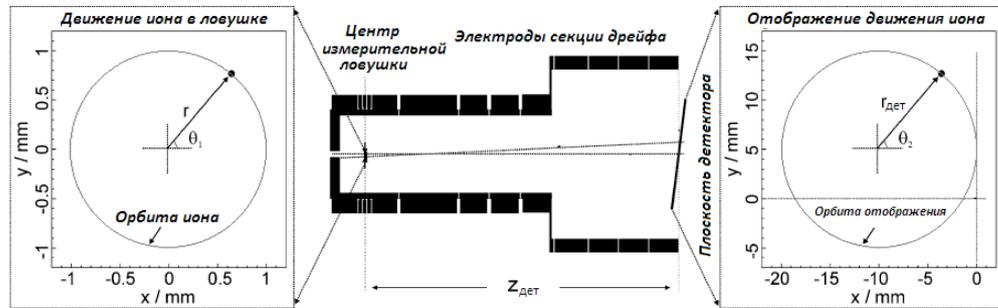


Схема 2



Метод фазового отображения (PI-ICR)



$$f_i = \frac{\varphi_{tot}}{t_{acc}} = \frac{2\pi \cdot n + \varphi_i}{t_{acc}}$$

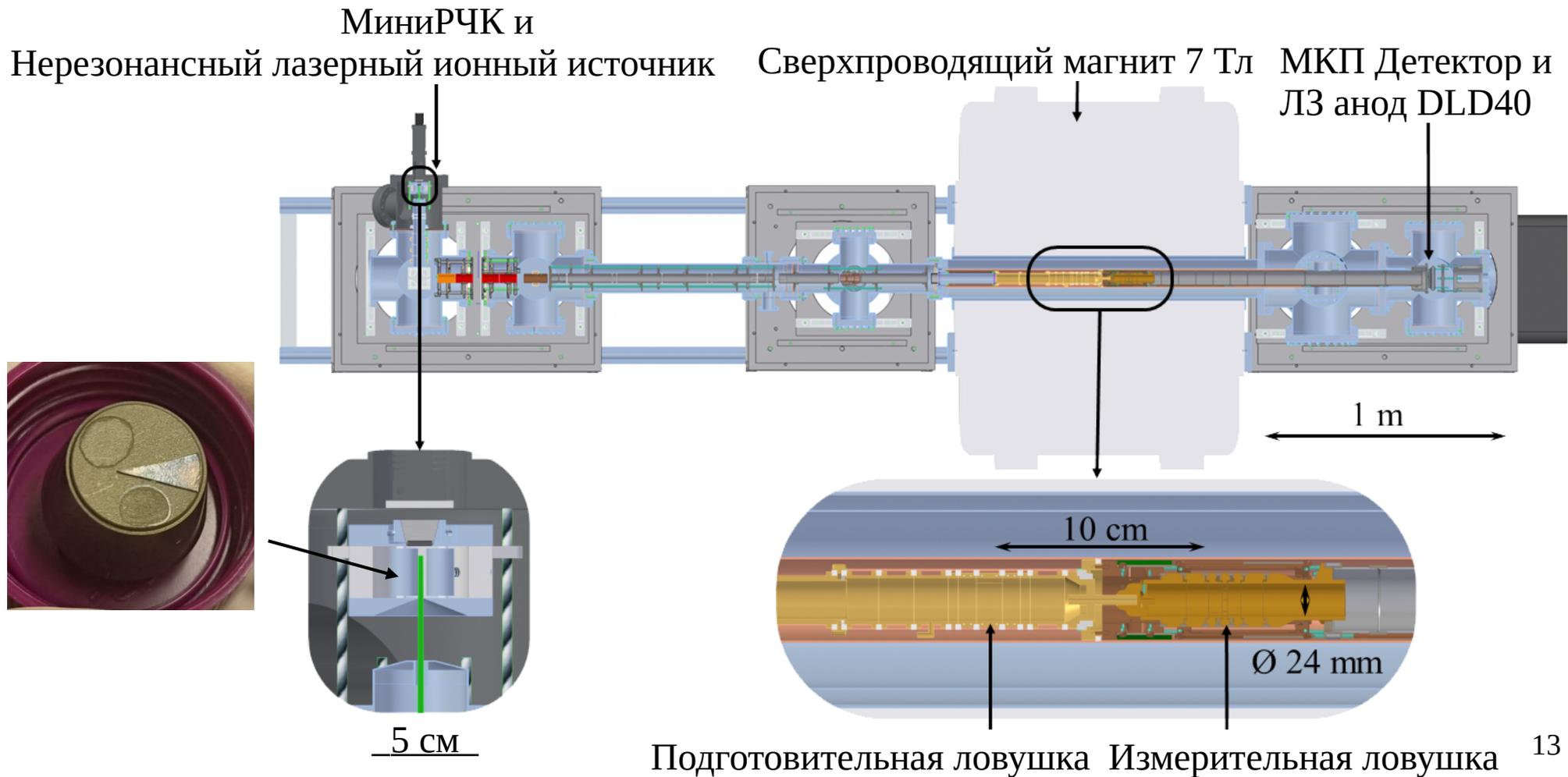
Преимущества относительно ToF-ICR

- Быстрее в 25 раз
- Разрешающая способность в 40 раз выше
- Выше чувствительность
- Мощный метод для настройки гармоничности эл. поля
- Удобный инструмент для выставления соосности электрического и магнитного полей
- Позволяет оценить степень загрязнения

Для полной реализации преимуществ требуется контролировать

- Масс-зависимую поправку
- Неоднородность магнитного поля
- Негармоничность электрического поля
- Число ионов в ловушке
- Перекрывание и положение пятен изображения на детекторе
- Искажения проекции на детекторе
- Влияние давления и температуры в лаборатории
- ...

Установка TRIGA-TRAP

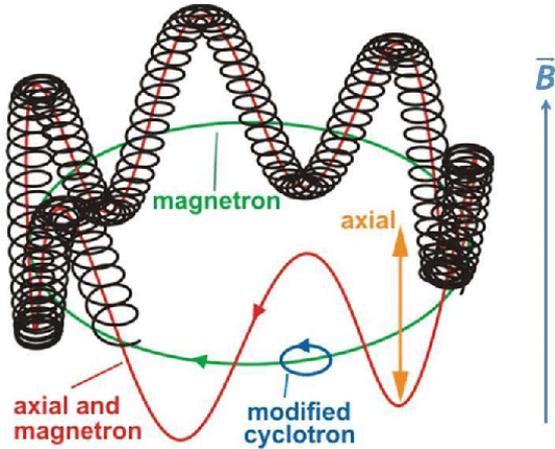


Определение сдвига частоты с помощью теоремы инвариантности

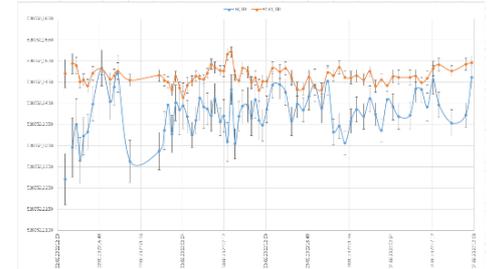
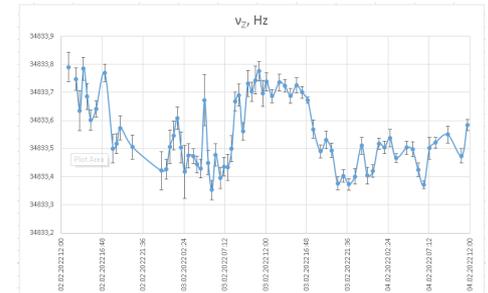
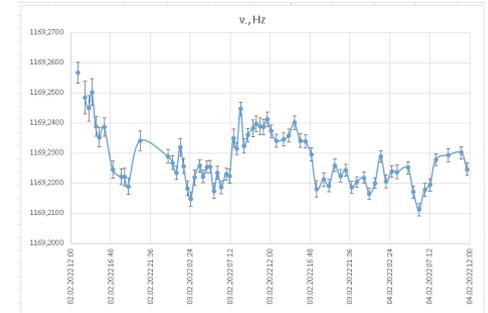
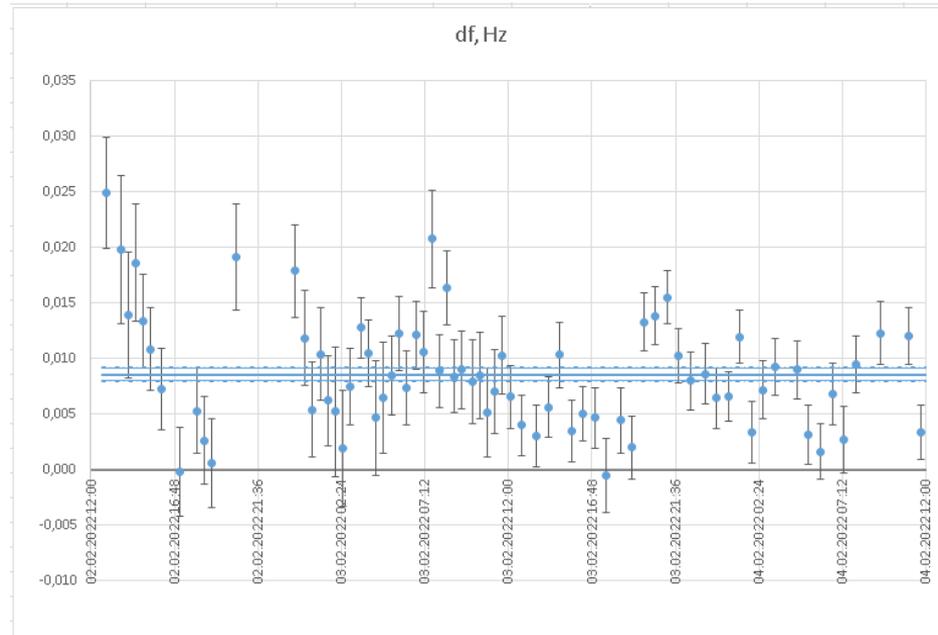
$$\bar{f}_c[\theta, \varphi, \epsilon] \equiv \bar{f}_+[\theta, \varphi, \epsilon] + \bar{f}_-[\theta, \varphi, \epsilon] \equiv f_c + \delta f[\theta, \varphi, \epsilon] \quad \text{но}$$

$$f_c^2 = \bar{f}_+^2[\theta, \varphi, \epsilon] + \bar{f}_-^2[\theta, \varphi, \epsilon] + \bar{f}_z^2[\theta, \varphi, \epsilon]$$

G. Gabrielse, Int. J. Mass Spectrom. **279**(2), 107–112 (2009).

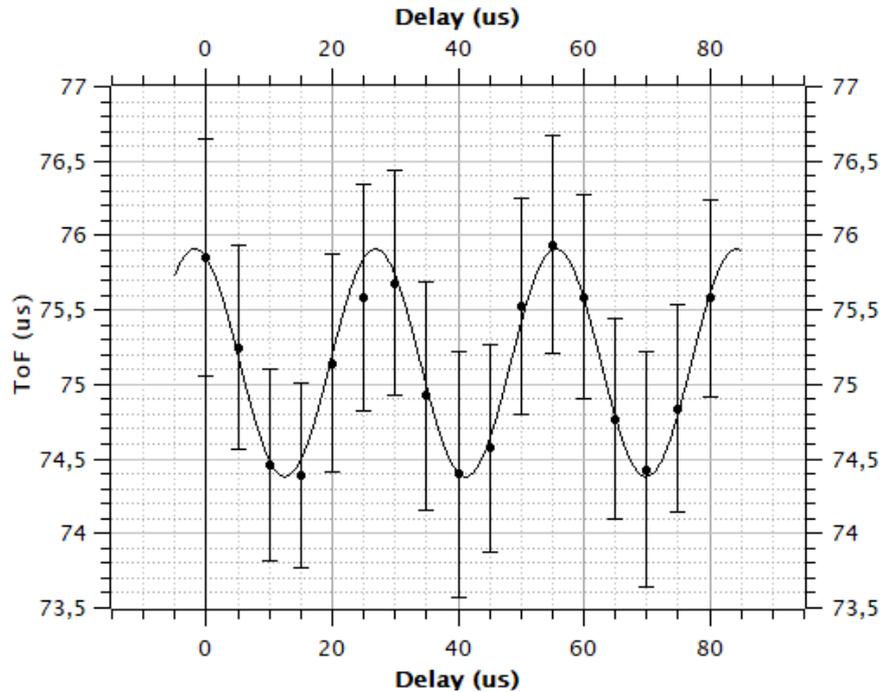


$$\delta f[\theta, \varphi, \epsilon] \approx \bar{f}_- \left(\frac{9}{4} \theta^2 - \frac{1}{2} \epsilon^2 \right)$$

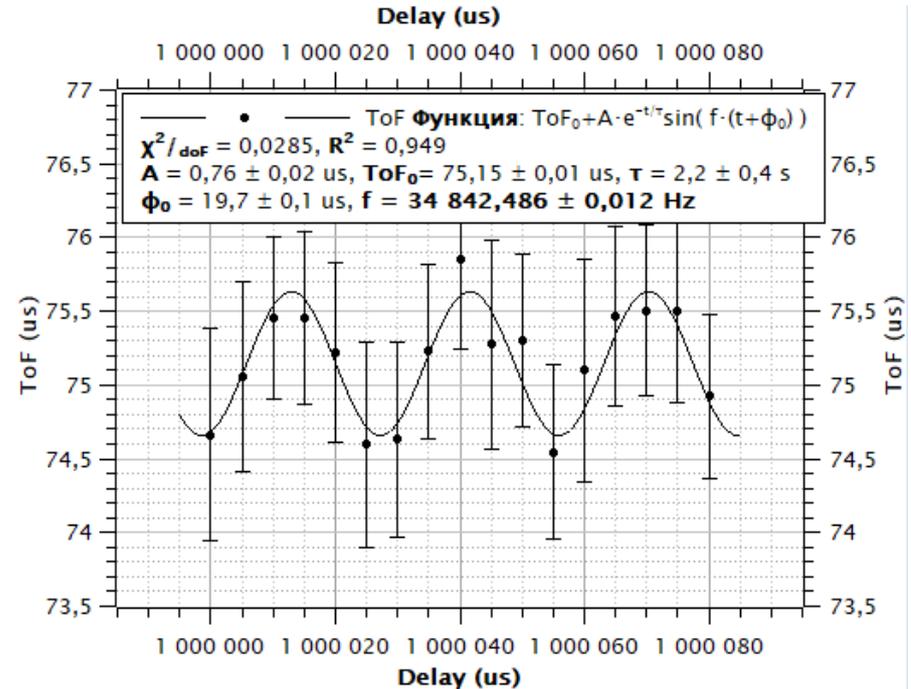
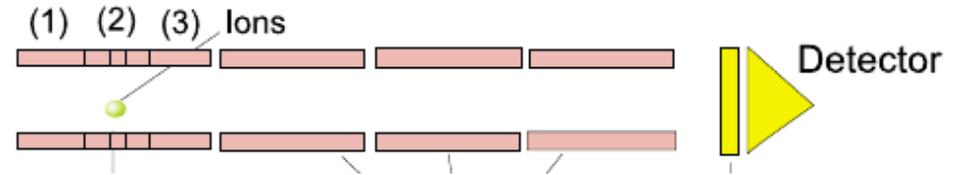


при $\epsilon = 0 \rightarrow \theta \approx 2 \text{ mrad}$ или $0,1^\circ \quad N = 71 \quad \delta f = 8,8 \pm 1 \text{ mHz}$

Время-фазовый метод определения аксиальной частоты



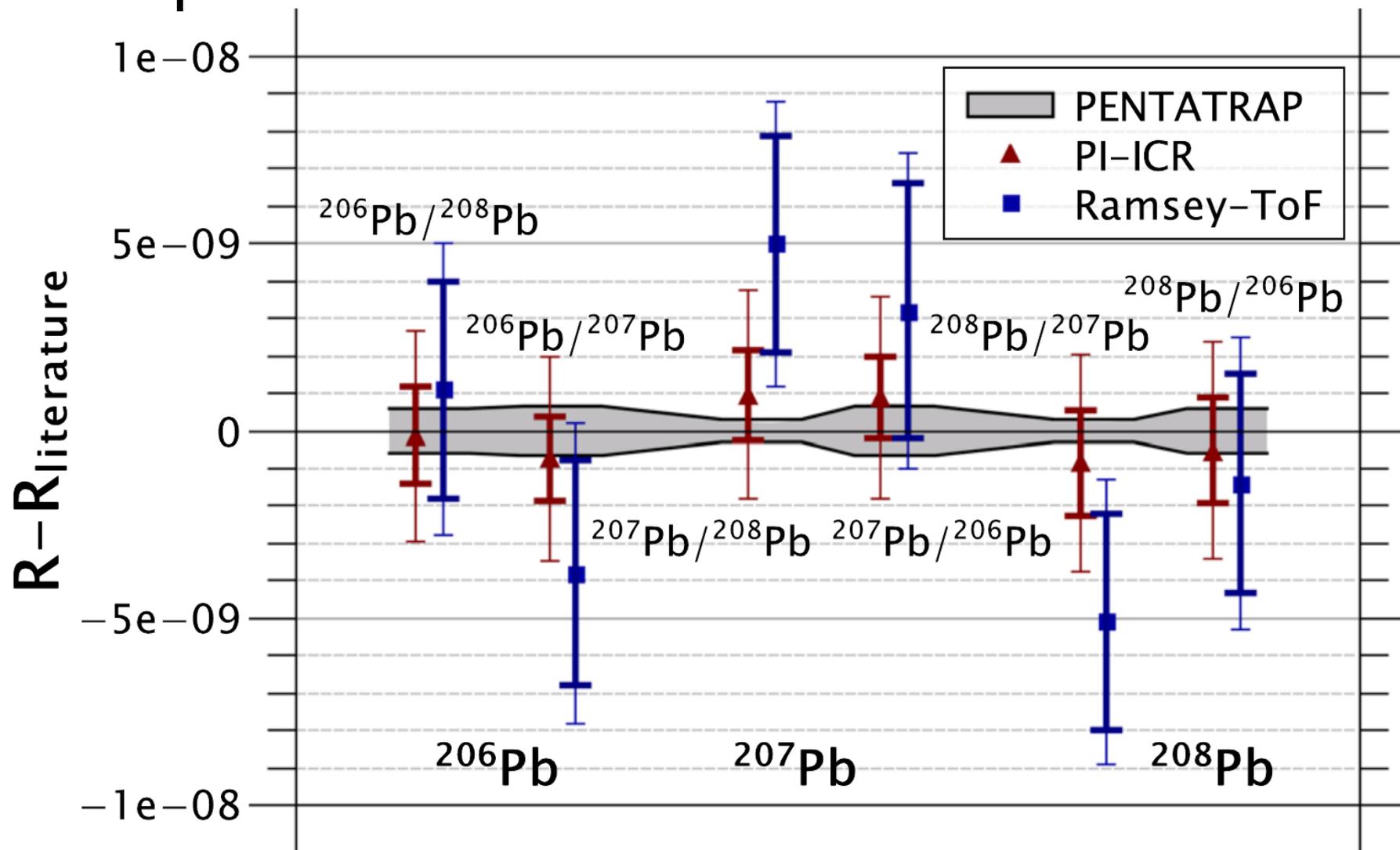
$$f_i = \frac{\varphi_{tot}}{t_{acc}} = \frac{2\pi \cdot n + \varphi_i}{t_{acc}}$$



Систематическая погрешность

Фактор	Δf_c	$\Delta f_c/f_c$
Радиальная неоднородность магнитного поля	$< 0,5 \text{ mHz}$	$< 1 \cdot 10^{-9}$
Радиальная негармоничность электрического поля	$< 0,5 \text{ mHz}$	$< 1 \cdot 10^{-9}$
Осевая неоднородность магнитного поля	$< 0,1 \text{ mHz}$	$< 2 \cdot 10^{-10}$
Влияние числа ионов в ловушке	$< 0,1 \text{ mHz}$	$< 2 \cdot 10^{-10}$
Искажения изображения на детекторе	$< 0,25 \text{ mHz}$	$< 5 \cdot 10^{-10}$
Температура камеры ловушек	$< 1 \text{ mHz}$	$< 2 \cdot 10^{-9}$
Давление над жидким гелием в магните	$< 0,3 \text{ mHz}$	$< 6 \cdot 10^{-10}$
Масс-зависимая поправка	$< 1 \text{ mHz}$	$< 10^{-11} 1/u$
Полная ошибка:		$\sim 2.5 \cdot 10^{-9}$

Измерение масс стабильных изотопов свинца

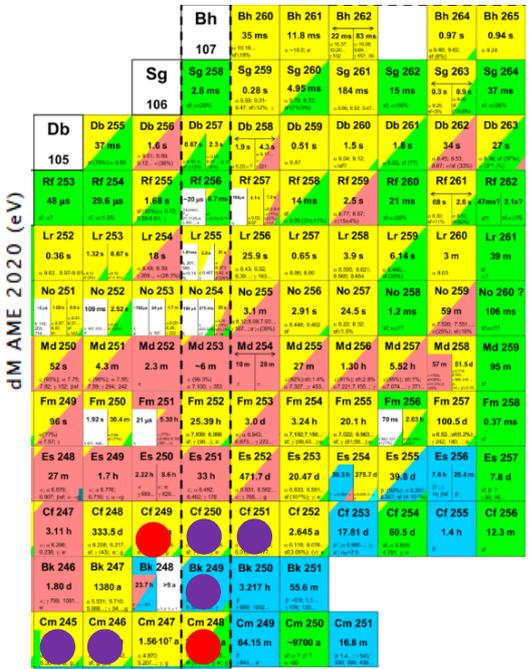
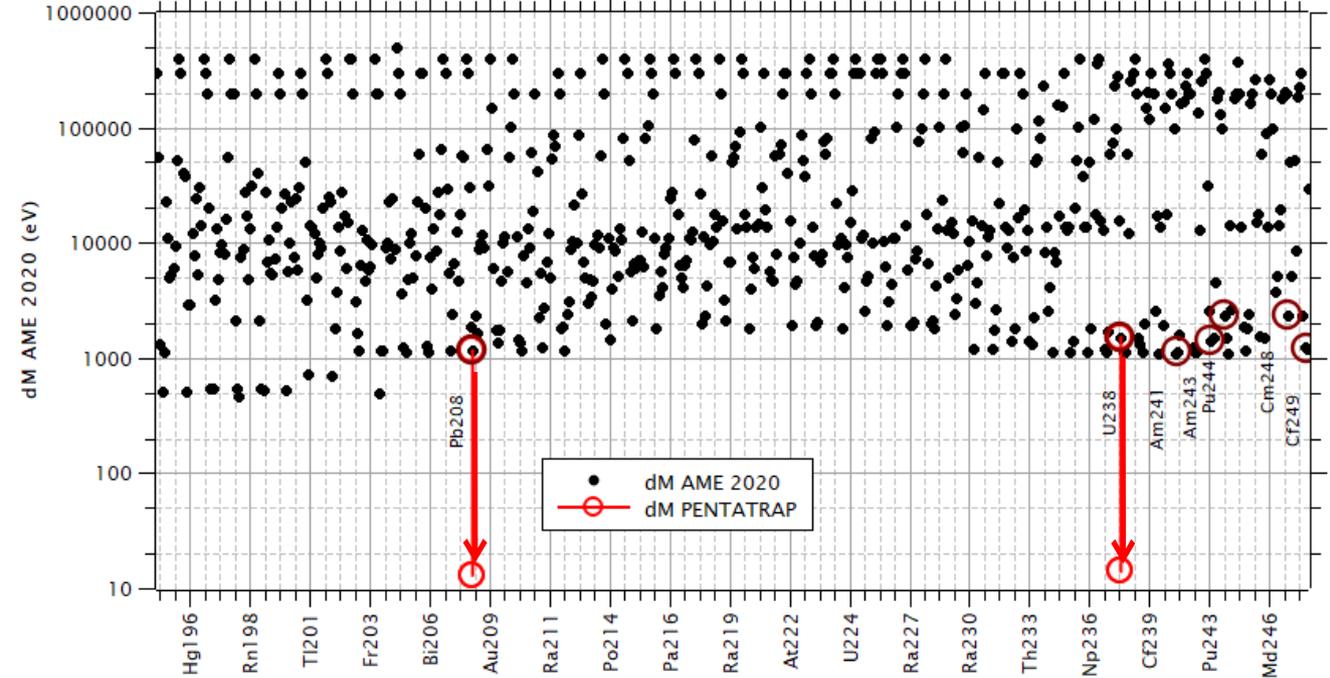


Измеряемые нуклиды

Mass uncertainties

Nuclide

N=152



am 228		Am		Am 230	Am 232	Am 233	Am 234	Am 235	Am 236	Am 237	Am 238	Am 239	Am 240	Am 241	Am 242	Am 243	Am 244	Am 245	Am 246	Am 247			
		95	17 s	1.31 m	3.2 m	2.32 m	10.3 m	2.9 m	3.6 m	73.0 m	1.63 h	11.9 h	50.8 h				26 m	2.05 h	20 m	22 m			
		Pu	Pu 228	Pu 229	Pu 230	Pu 231	Pu 232	Pu 233	Pu 234	Pu 235	Pu 236	Pu 237	Pu 238	Pu 239	Pu 240	Pu 241	Pu 242	Pu 243	Pu 244	Pu 245	Pu 246	Pu 247	
		94	1.1 s	67 s	102 s	8.6 m	33.1 m	20.9 m	8.8 h	25.3 m	1.3 a	8.8 a	45.2 d	87.74 a	2.44 $\cdot 10^4$ a	6545 a	14.35 a	4.956 h	10.5 h	10.85 d	2.27 d		
Np 225		Np 226	Np 227	Np 228	Np 229	Np 230	Np 231	Np 232	Np 233	Np 234	Np 235	Np 236	Np 237	Np 238	Np 239	Np 240	Np 241	Np 242	Np 243	Np 244	Np 245	Np 246	Np 247
7		31 ms	0.51 s	61.4 s	4.0 m	4.6 m	48.8 m	14.7 m	36.2 m	4.4 d	396.1 d	2.14 $\cdot 10^4$ a	2.102 d	2.355 d	7.82 m	13.9 m	2.24 m	8.56 m	1.85 m	2.29 m			
U 224		U 225	U 226	U 227	U 228	U 229	U 230	U 231	U 232	U 233	U 234	U 235	U 236	U 237	U 238	U 239	U 240	U 241	U 242	U 243	U 244	U 245	U 246
0.7 ms		59 ms	0.281 s	1.1 m	9.1 m	58 m	20.8 d	4.2 d	68.9 a	1.592 $\cdot 10^4$ a	2.455 $\cdot 10^8$ a	4.47 $\cdot 10^9$ a											

- Измерено PI-ICR
- Планируется PI-ICR

K. Kromer et al., EPJA. 58(10), (2022)
 K. Kromer et al., Phys. Rev. C 109, (2024).

Одновременная аппроксимация нескольких R

$$R_1 = \frac{m_{ref_1} - m_e}{m_{ion} - m_e}, \quad R_2 = \frac{m_{ref_2} - m_e}{m_{ion} - m_e}, \dots$$

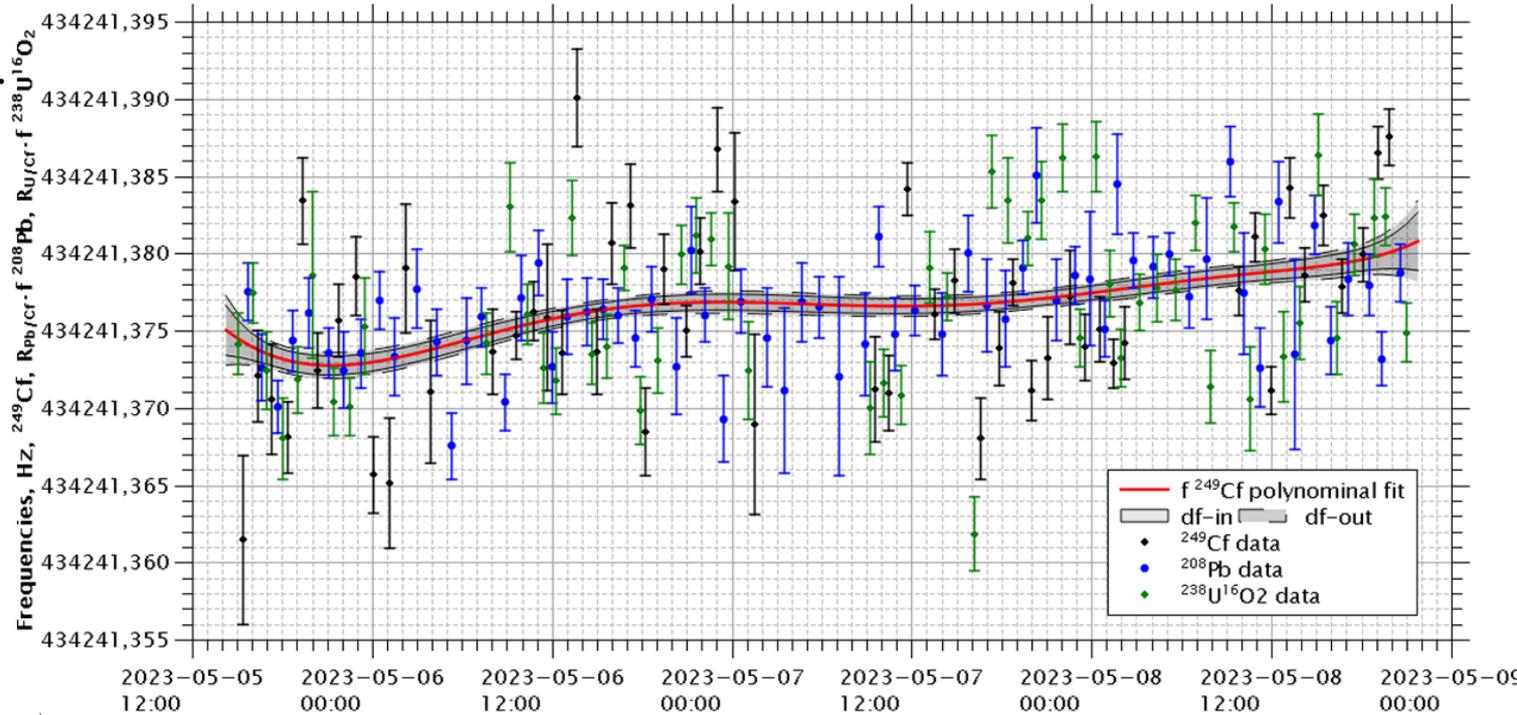
$$f_{ion_i}, \quad R_1 \cdot f_{ref_{1j_1}} \quad \dots \quad R_k \cdot f_{ref_{kj_k}}$$

$$f(t) = \sum_{i=0}^n a_n t^n \quad w_i = \frac{1}{df_i^2}$$

$$\chi^2 = \sum_{i=0} w_i (f(t_i) - f_{ion_i})^2$$

$$+ \sum_{j_1=0}^{J_1} w_{j_1} (f(t_{j_1}) - R_1 \cdot f_{ref_{1j_1}})^2 + \dots$$

$$+ \sum_{j_k=0}^{J_k} w_{j_k} (f(t_{j_k}) - R_k \cdot f_{ref_{kj_k}})^2 \rightarrow \min$$



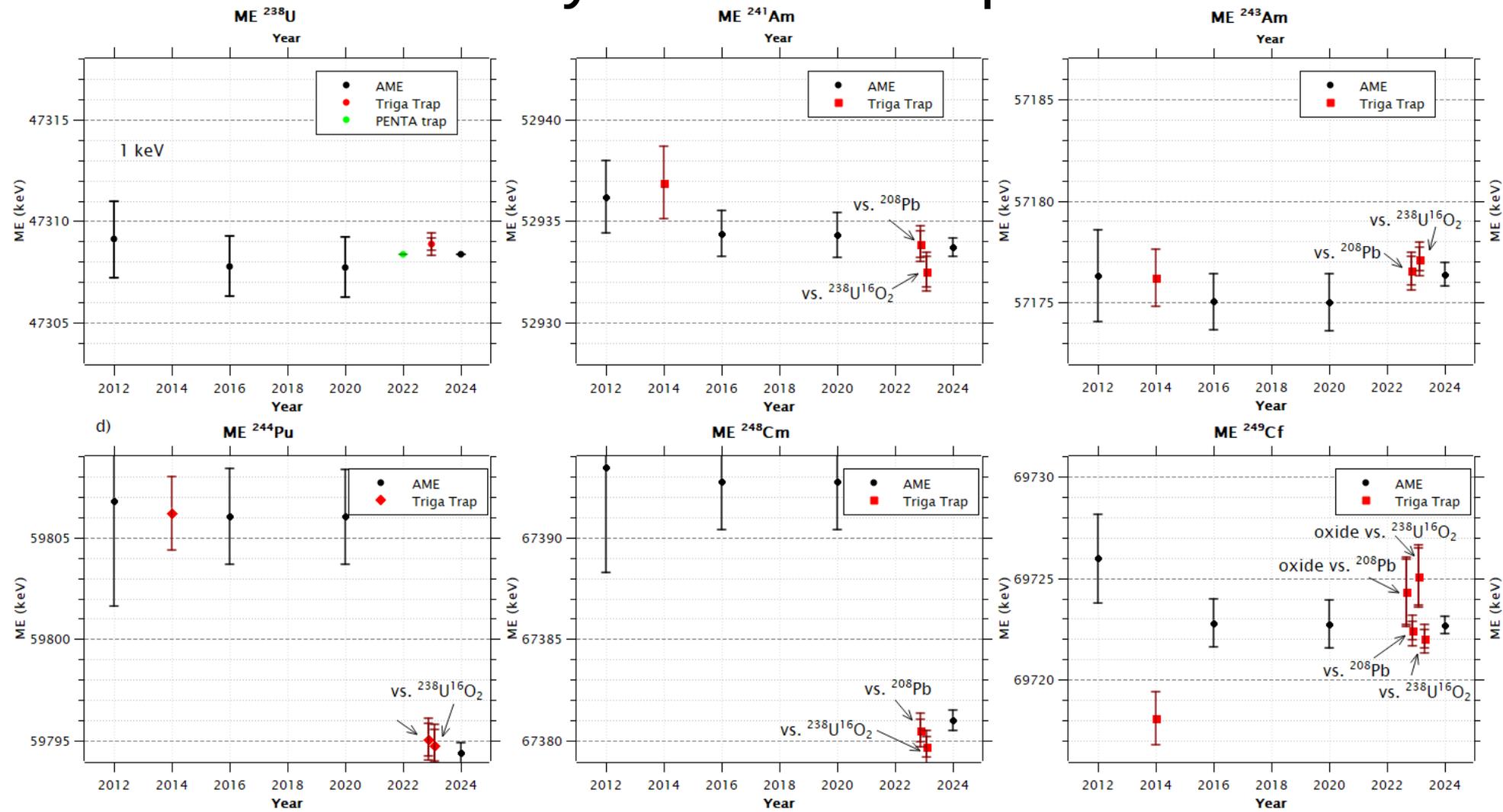
$$\begin{pmatrix} a_0 \\ \vdots \\ a_n \\ R_1 \\ \vdots \\ R_k \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} C_{00} & \cdots & C_{0n} & v_{01} & \cdots & v_{0k} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ C_{00} & \cdots & C_{0n} & v_{n1} & \cdots & v_{nk} \\ v_{01} & \cdots & v_{n1} & q_1 & 0 & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots & 0 & \ddots & 0 \\ v_{0k} & \cdots & v_{nk} & 0 & 0 & q_k \end{pmatrix}^{-1} \times \begin{pmatrix} g_0 \\ \vdots \\ g_n \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \end{pmatrix}$$

$$C_{nm} = \sum_{i=0}^I w_i t_i^{m+n} + \sum_{j_1=0}^{J_1} w_{j_1} t_{j_1}^{m+n} + \dots + \sum_{j_k=0}^{J_k} w_{j_k} t_{j_k}^{m+n} \quad v_{nk} = \sum_{j_k=0}^{J_k} w_{j_k} f_{ref_{kj_k}} t_{j_k}^n$$

$$g_n = \sum_{i=0}^I w_i f_{ion_i} t_i^n \quad q_k = \sum_{j_k=0}^{J_k} w_{j_k} f_{ref_{kj_k}}^2$$

$$F_n = \frac{\chi_{n-1}^2 - \chi_n^2}{\chi_n^2}, \quad F_n < 0,5, \quad F_{n-1} < 0,5$$

Результаты измерений

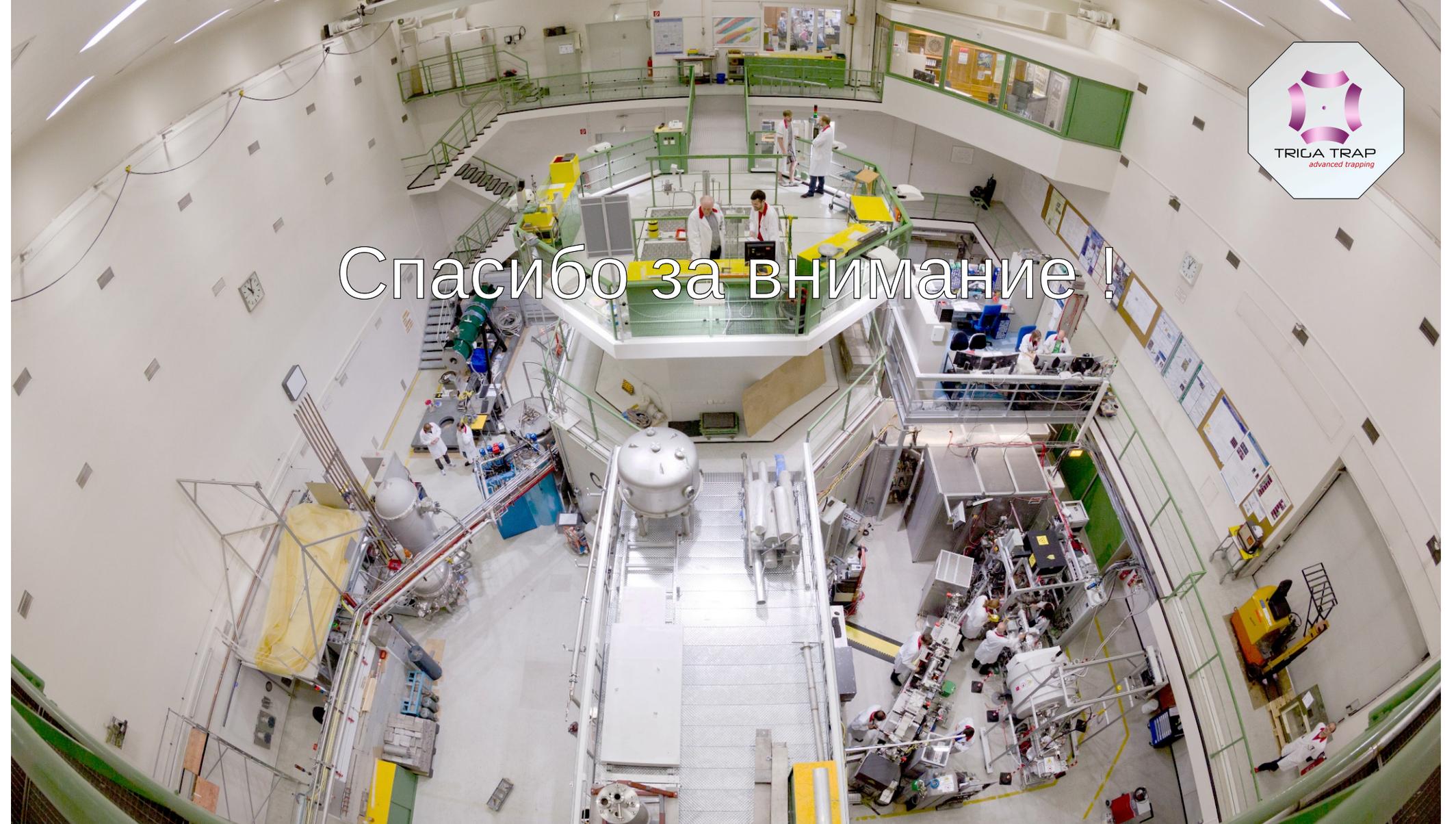


Выводы

- Была проведена модернизация системы ловушек TRIGA Trap и внедрен метод фазового изображения
- С новой ловушкой были оценены и подтверждены систематические погрешности
- Были проведены измерения масс некоторых трансурановых нуклидов, например ^{241}Am и ^{243}Am , ^{244}Pu , ^{248}Cm и ^{249}Cf .
- Полученные значения в основном согласуются с данными АМЕ и уточняют ландшафт масс в районе $N = 152$.

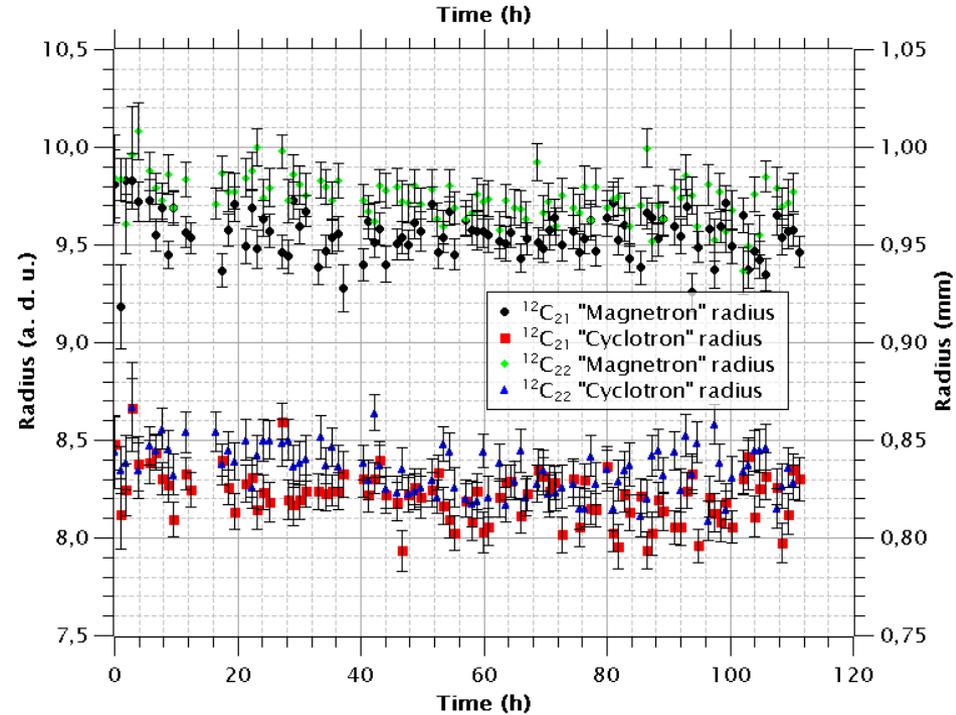
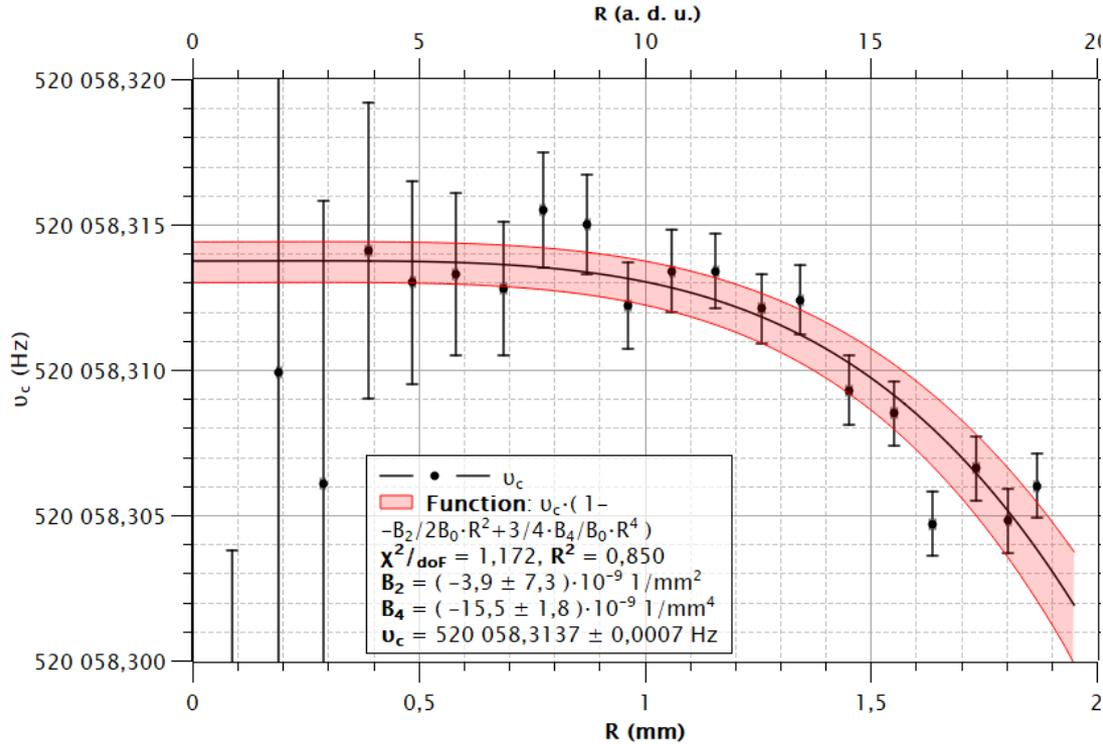


Спасибо за внимание!



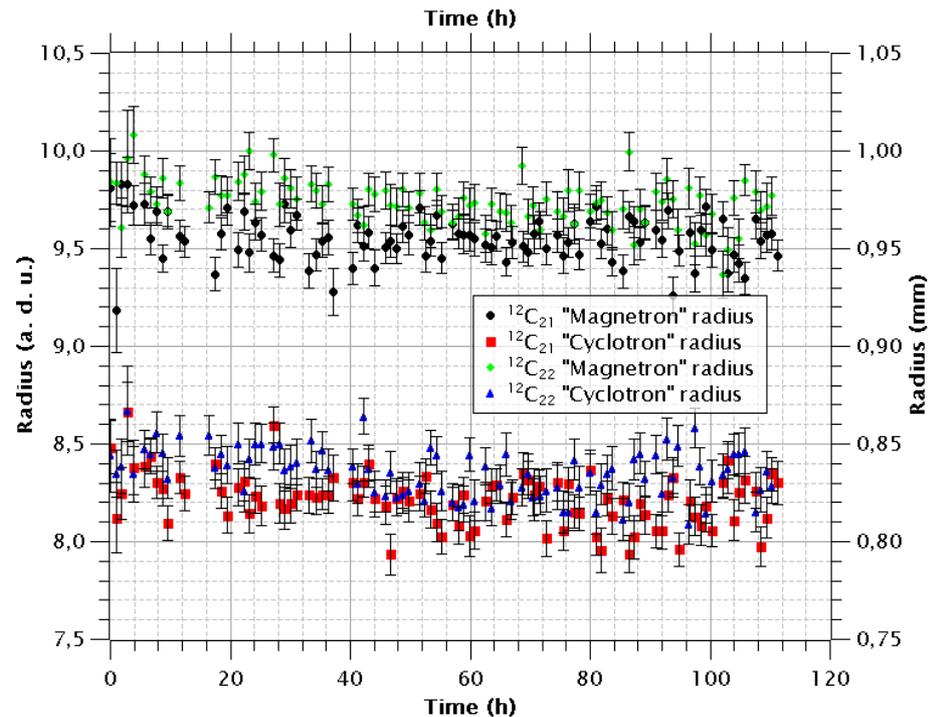
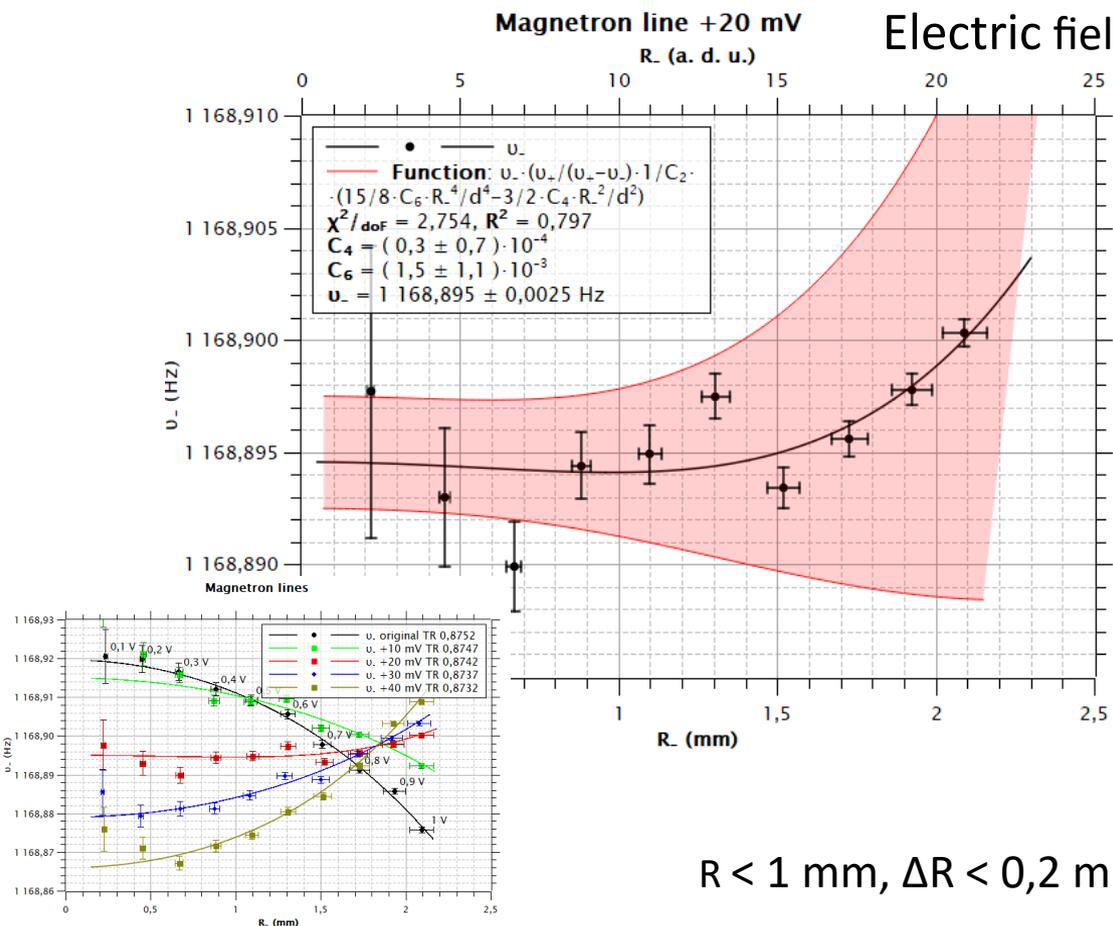
Radius effects

Magnetic field



$$R < 1 \text{ mm}, \Delta R < 0,2 \text{ mm} \rightarrow \Delta f_c < 0,5 \text{ mHz} \rightarrow \Delta f_c/f_c < 1 \cdot 10^{-9}$$

Radius effects

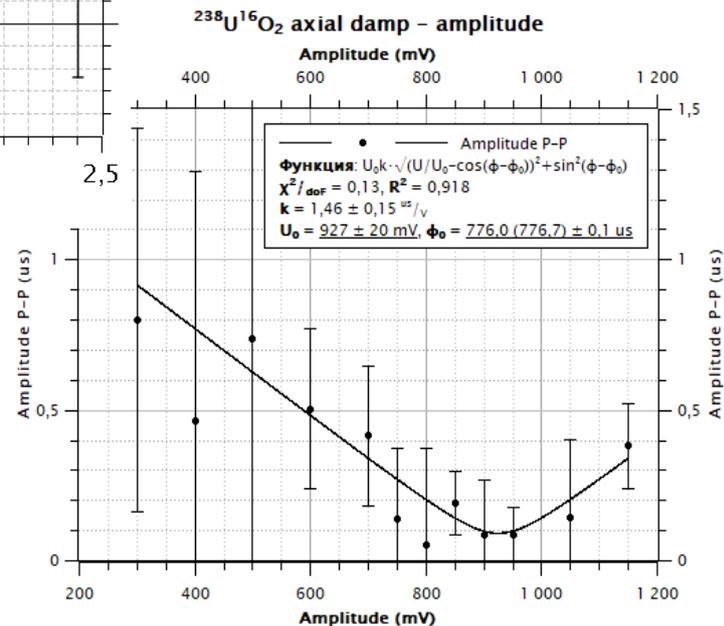
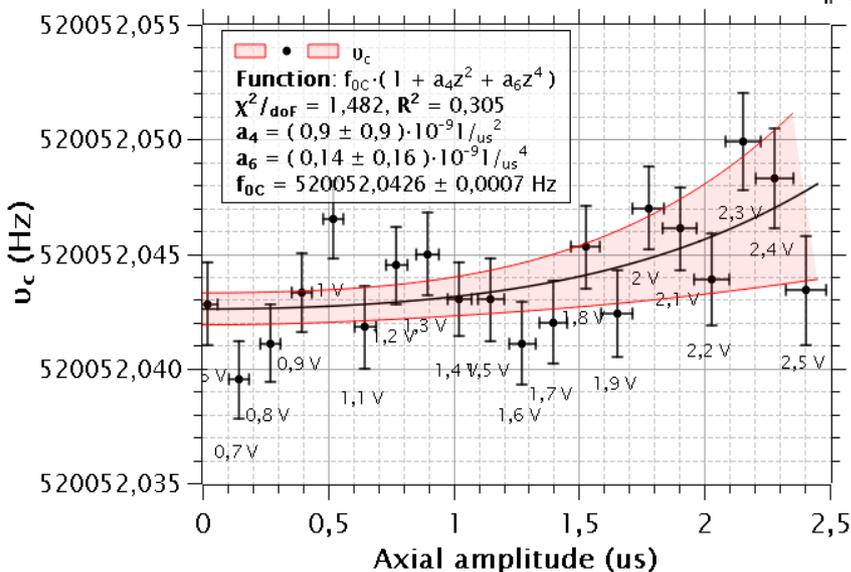
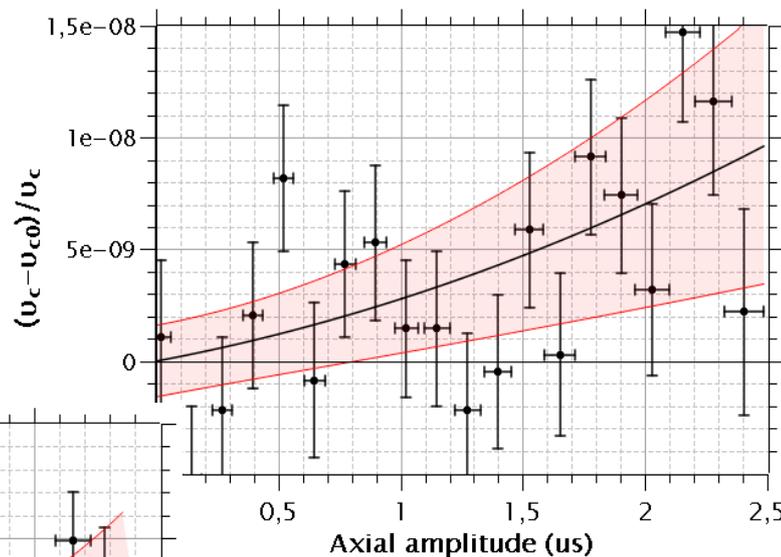


$$R < 1 \text{ mm}, \Delta R < 0,2 \text{ mm} \rightarrow \Delta f_c < 0,5 \text{ mHz} \rightarrow \Delta f_c / f_c < 1 \cdot 10^{-9}$$

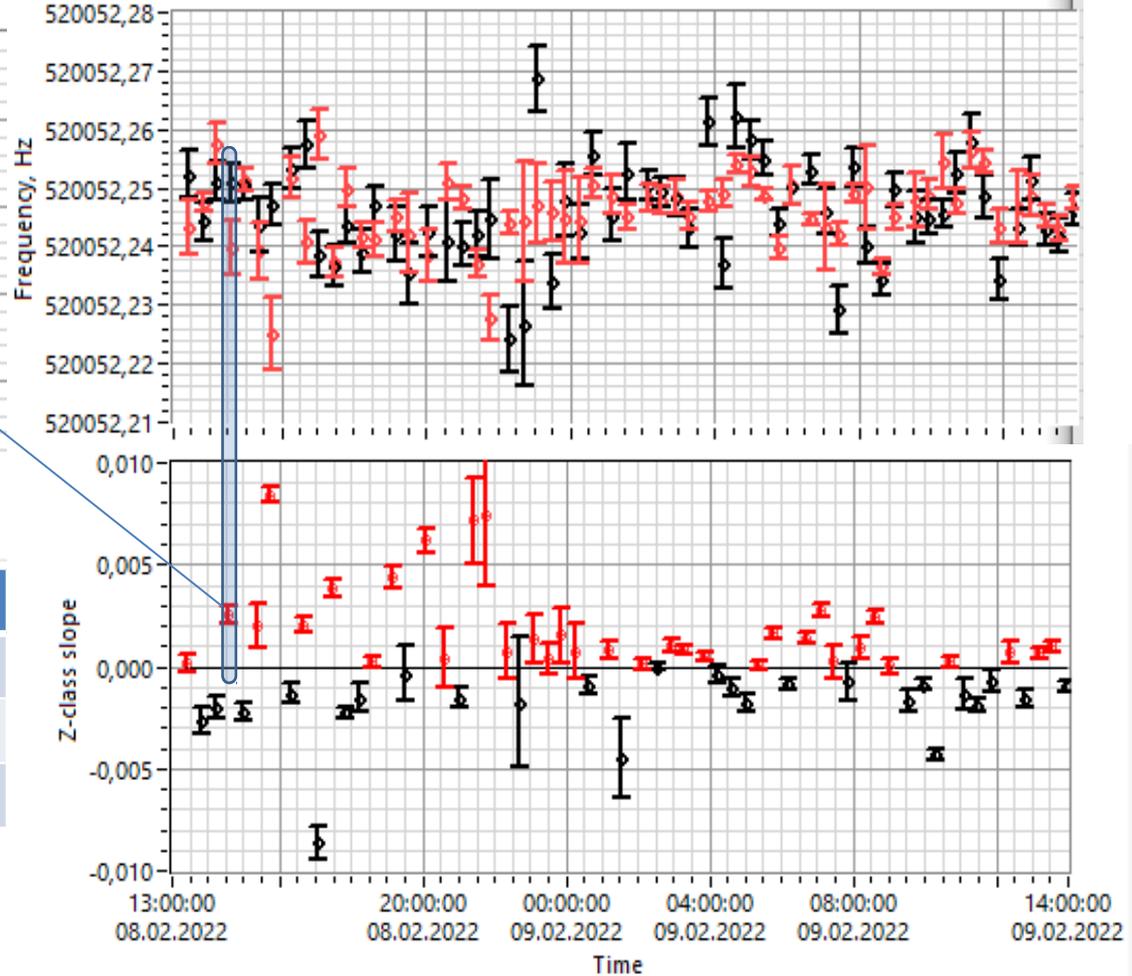
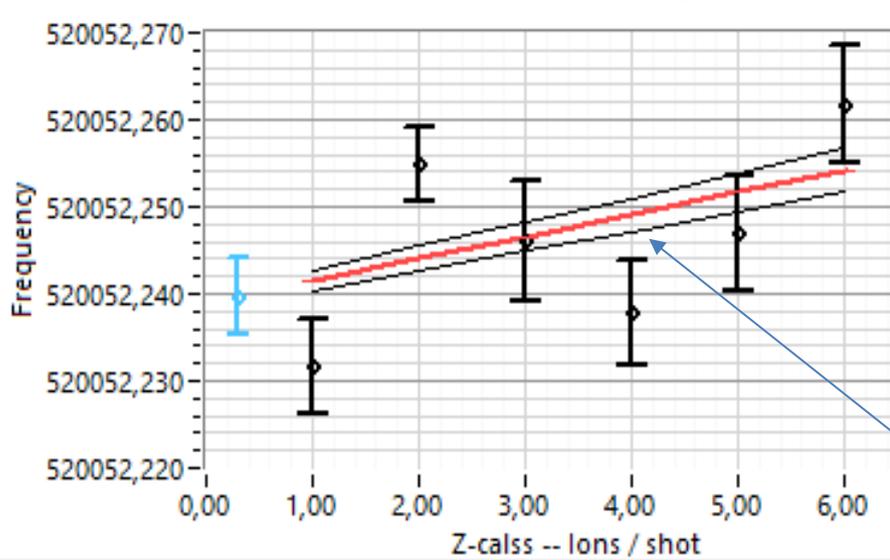
Axial motion effects

$$\Delta A_z < 0,1 \text{ us} \rightarrow \Delta f_c < 0,1 \text{ mHz}$$

$$\rightarrow \Delta f_c / f_c < 2 \cdot 10^{-10}$$



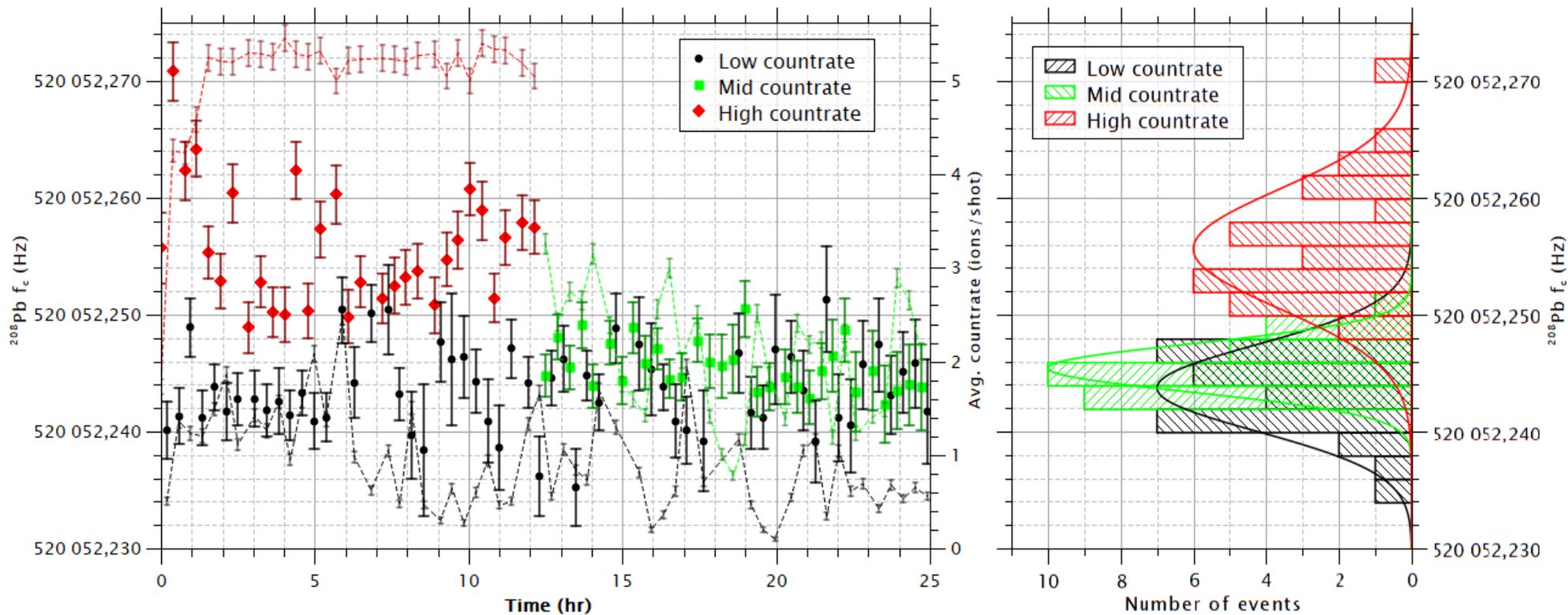
Z-class analysis for medium countrate set



	Frequency, Hz	Δ in	Δ out
Z-class	520052,2463	0,0003	0,0110
1-5 ions/shot	520052,2465	0,0004	0,0078
Δ Z 1-5 i/s	-0,0002	0,0005	0,0135

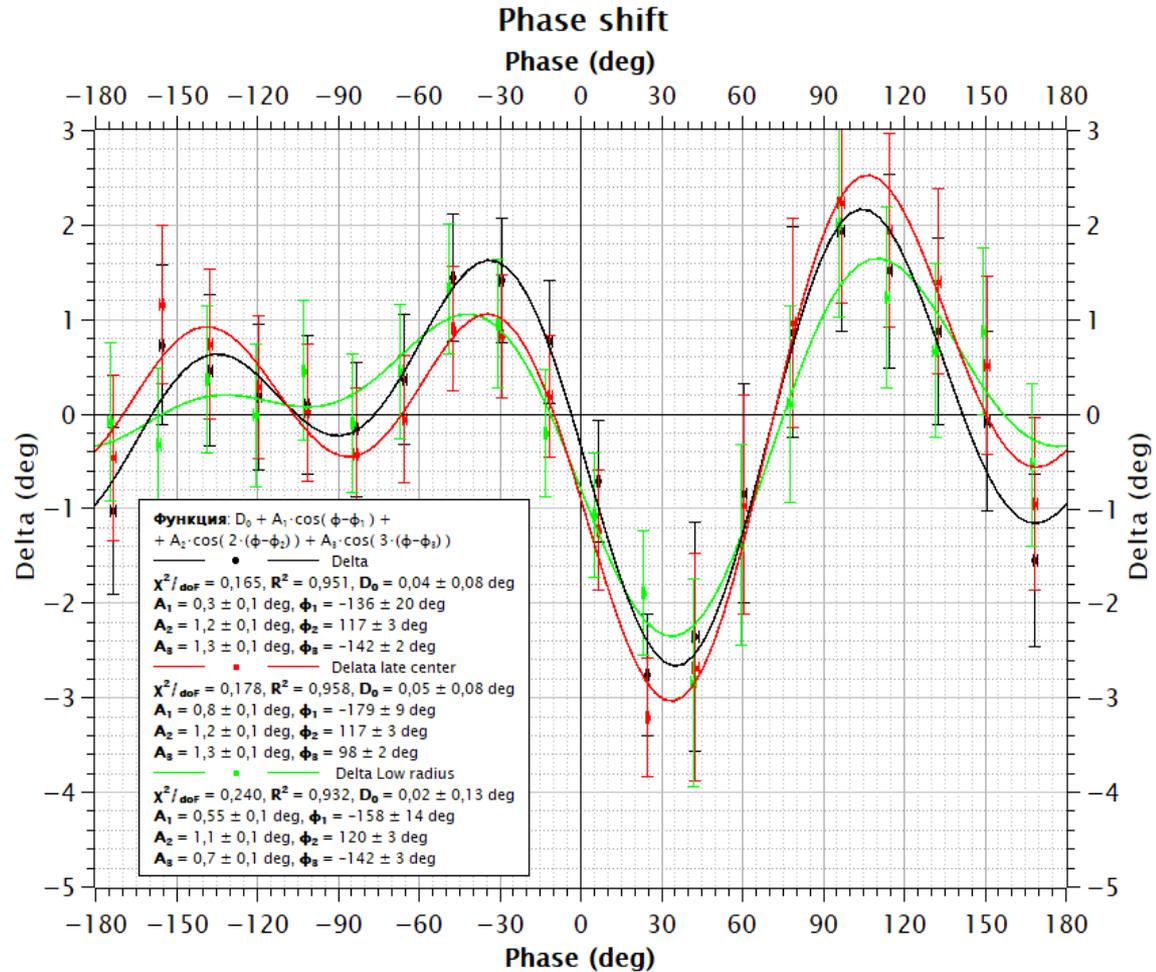
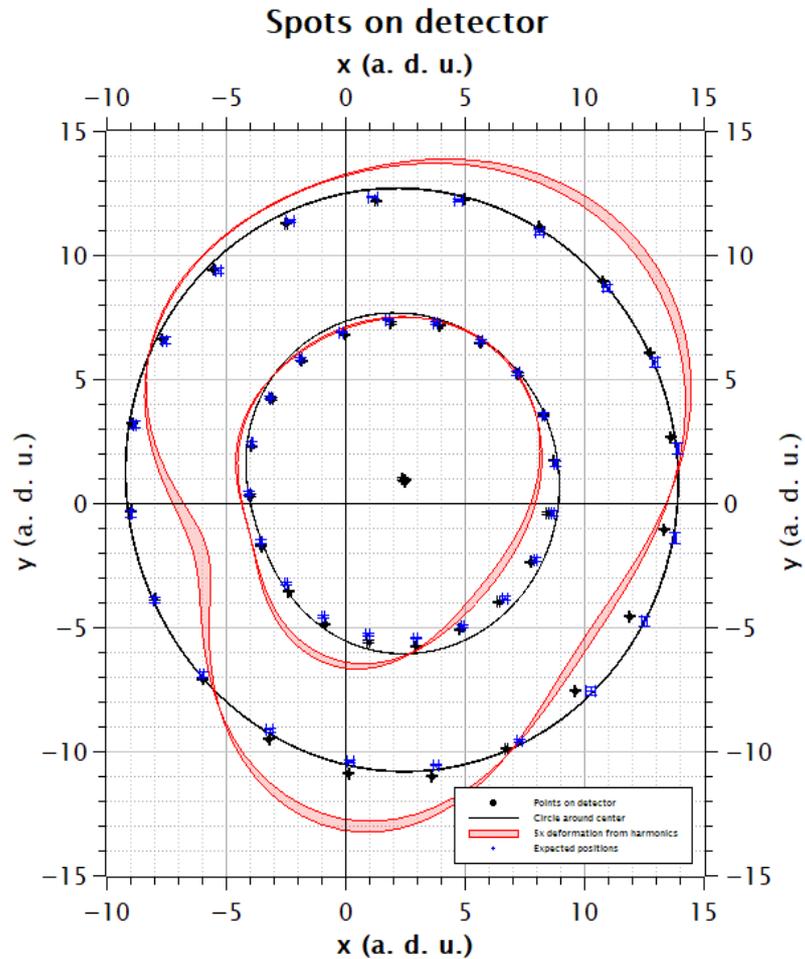
No significant difference...

Countrate dependent frequency shift



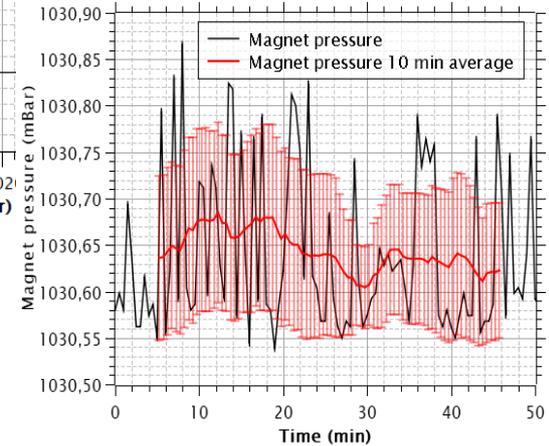
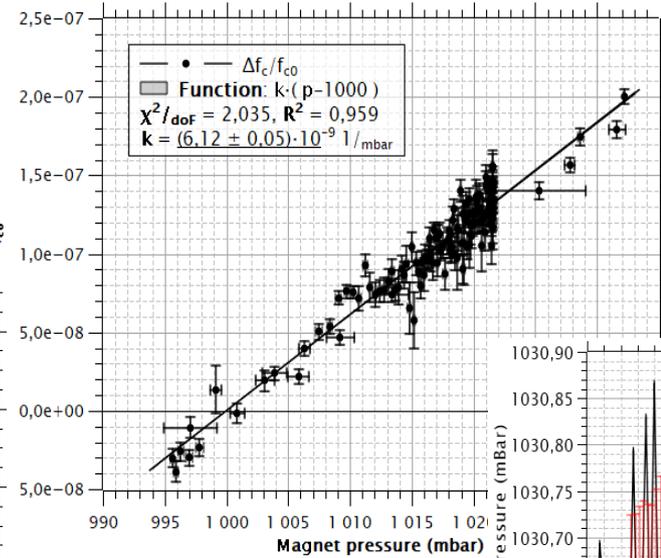
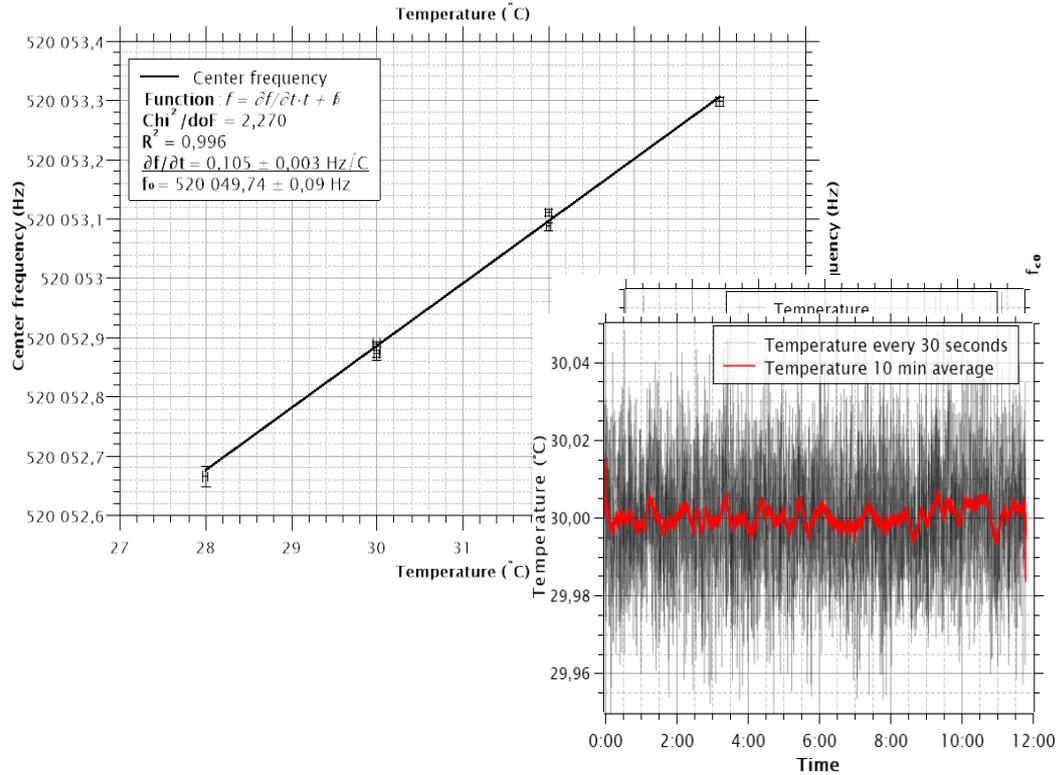
$$N < 5 \text{ ions/shot} \rightarrow \Delta f_c < 2 \text{ mHz} \rightarrow \Delta f_c / f_c < 4 \cdot 10^{-9}_{29}$$

Detector image distortions



Environmental effects

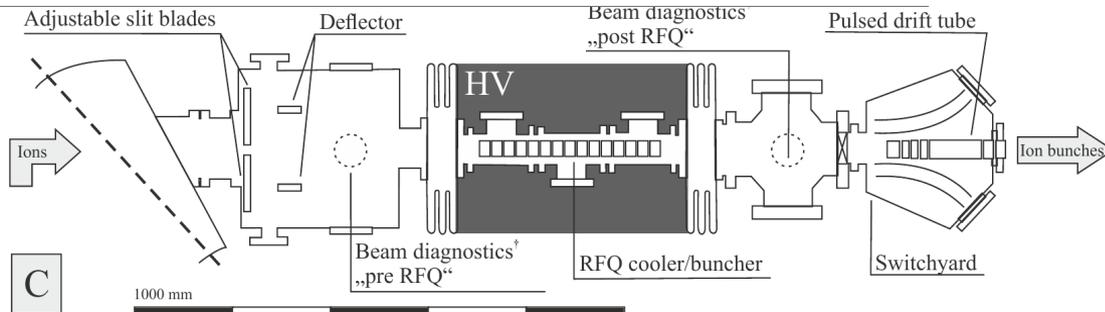
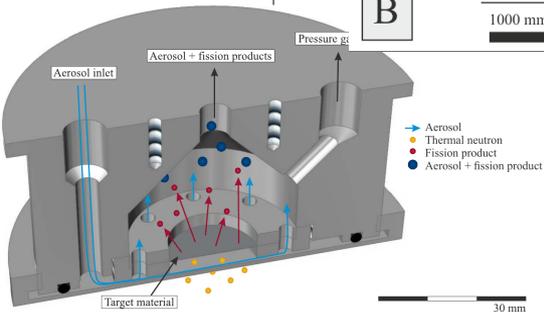
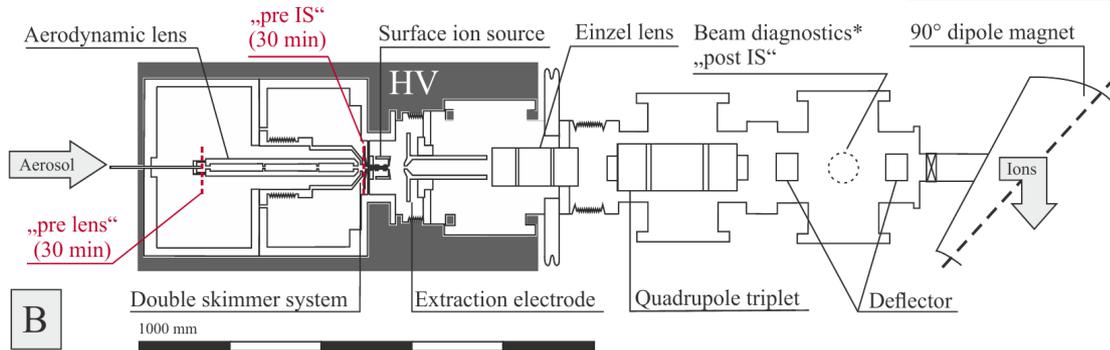
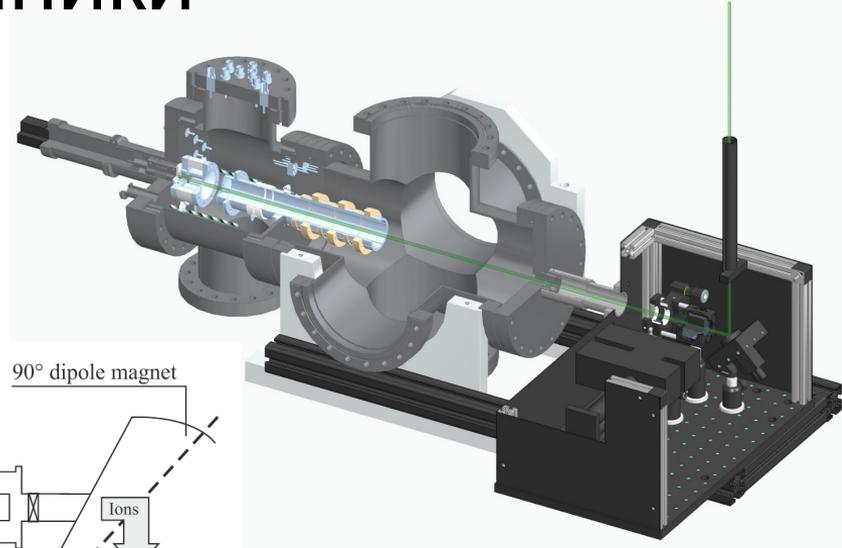
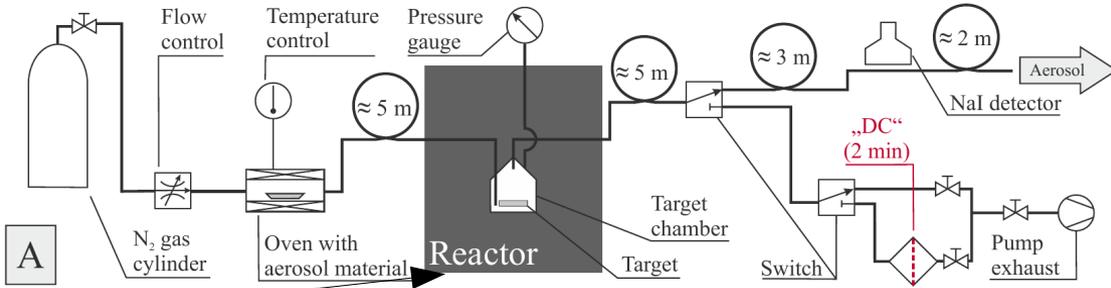
Pb208 temperature dependency



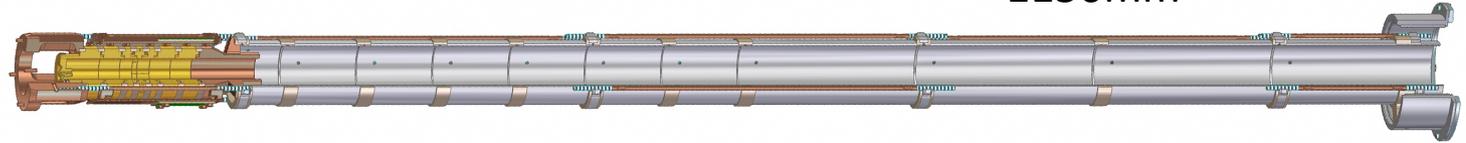
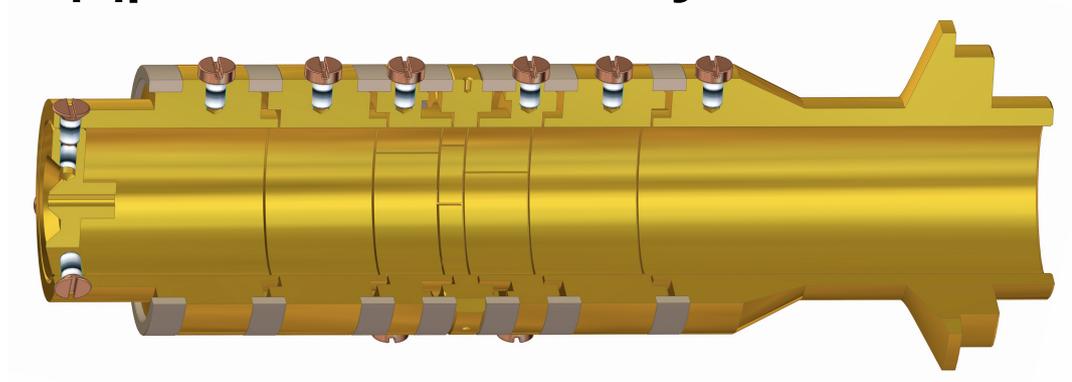
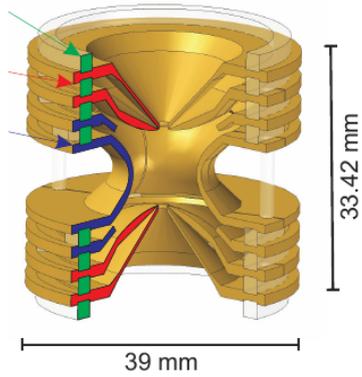
$$\Delta T < 0,01 \text{ K} \rightarrow \Delta f_c < 1 \text{ mHz} \rightarrow \Delta f_c / f_c < 2 \cdot 10^{-9}$$

$$\Delta P < 0,1 \text{ mBar} \rightarrow \Delta f_c < 0,3 \text{ mHz} \rightarrow \Delta f_c / f_c < 6 \cdot 10^{-10}$$

Ионные источники



Новая цилиндрическая ловушка

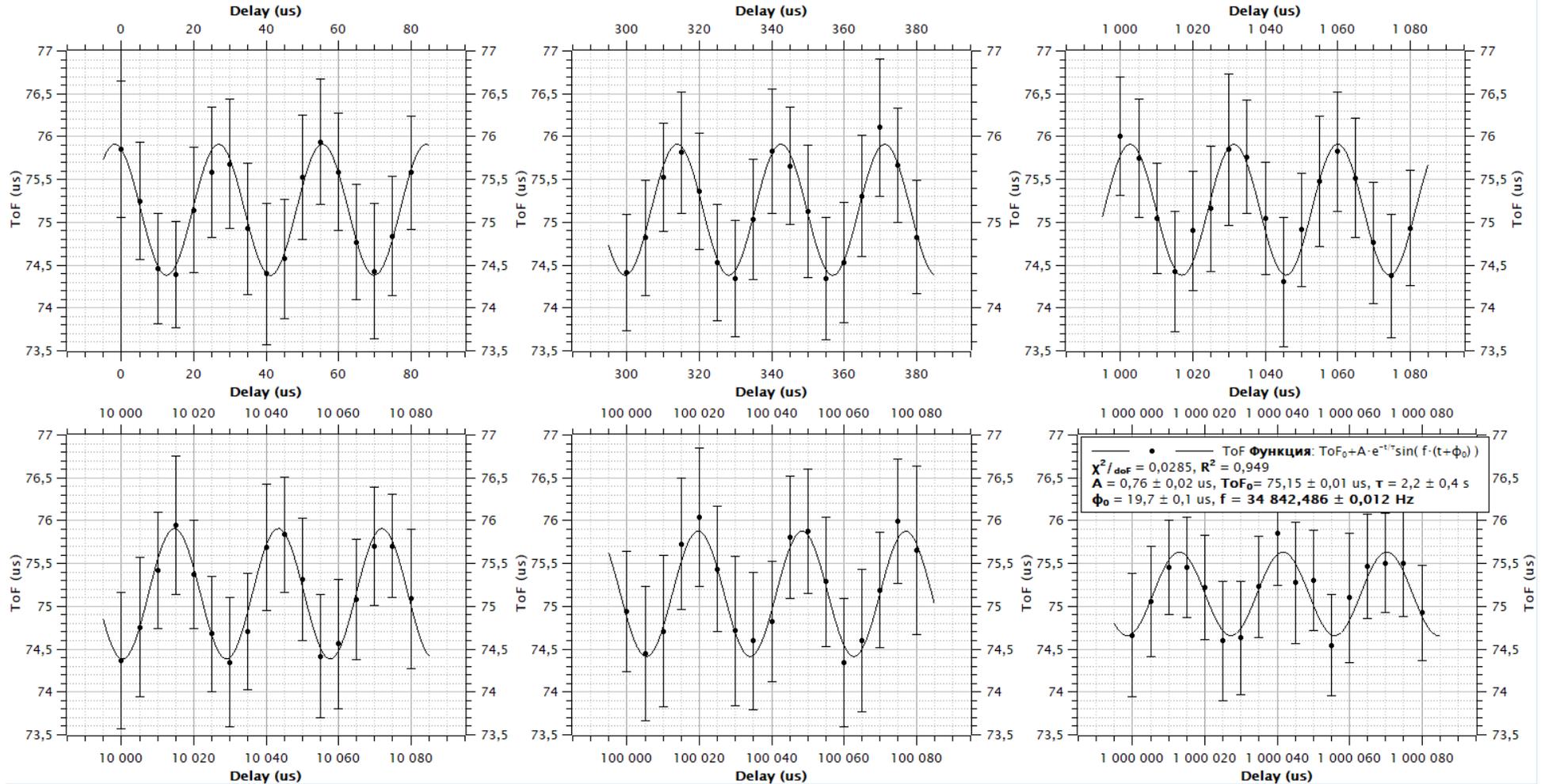


r	12 mm
Lr	3.530mm
Lc1	9.450
d	0.336mm
TR	0.88103729
C4	8.9197e-09
C6	8.6896e-06
D2	-4.4297e-05

Изготовлено в МРІК



Время-фазовый метод определения аксиальной частоты



Triga-Trap setup

MiniRFQ
Laser ablation
ion source

MCP
detector

Pur_T

Pre_T

DLD40
Delay-line
MCP
detector

7T

Beamline height: 1,190m

1m

