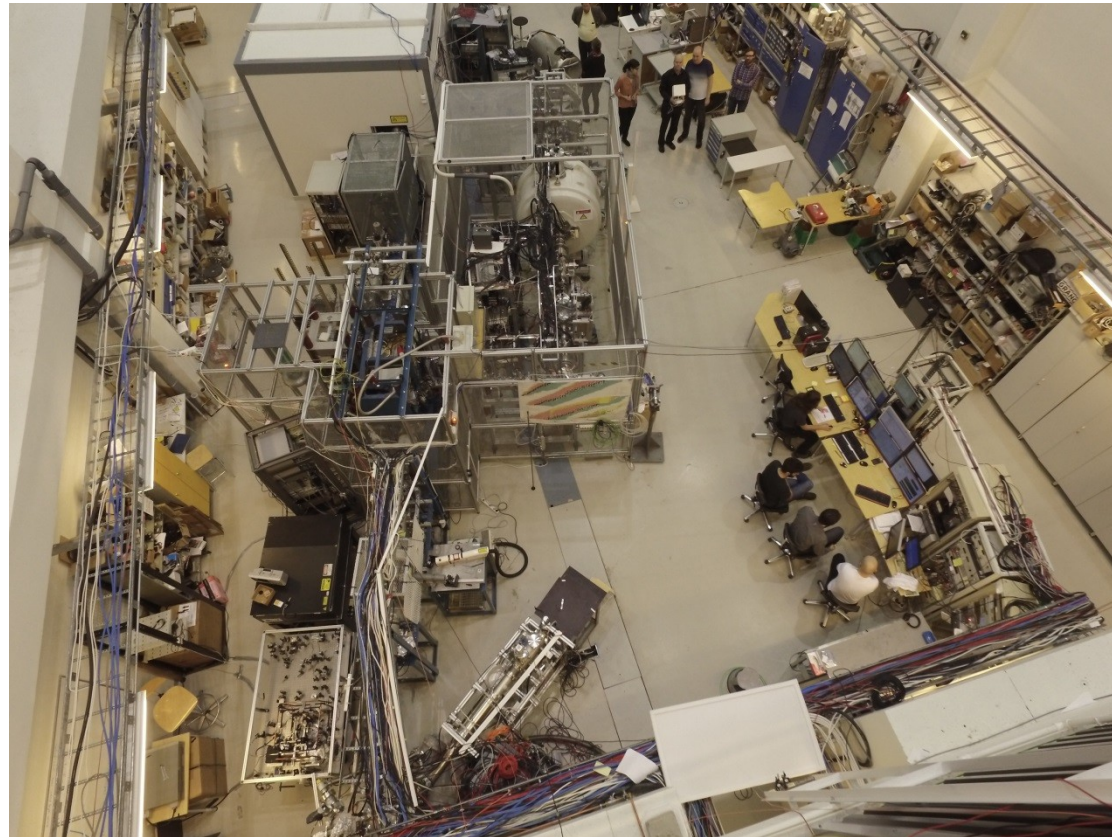


Статус установки JYFLTRAP и текущие эксперименты

Дмитрий Нестеренко

Циклотронная лаборатория Универсиета Ювяскуля,
г. Ювяскуля, Финляндия



План доклада

- Общее описание установки
- Методы очистки ионного пучка и измерений масс в ловушке Пеннинга на JYFLTRAP
- Эксперименты на JYFLTRAP



Расположение IGISOL-4 facility (Ion Guide Isotope Separator On-Line)



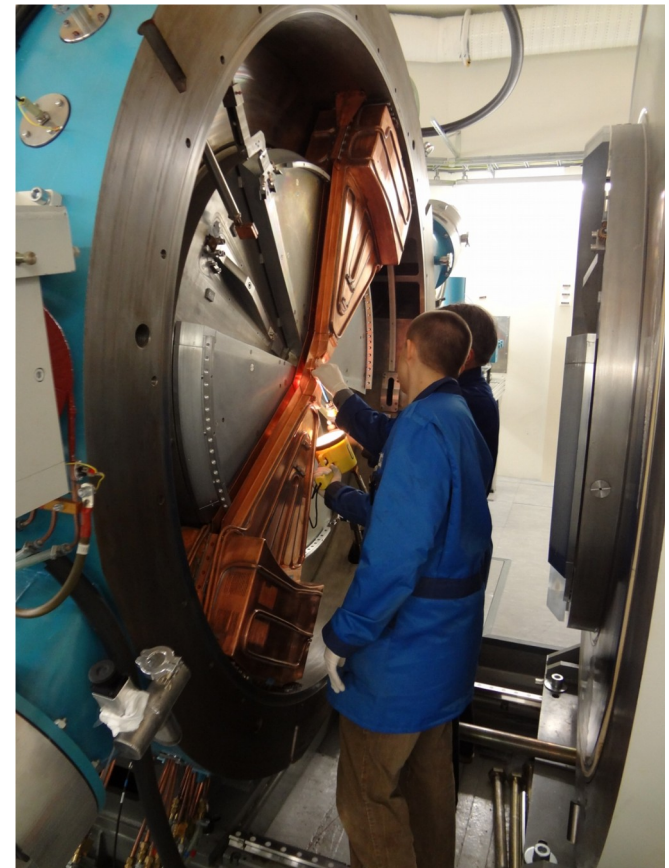
Циклотроны

К130



Ускоряемые элементы: $p - Xe$
Энергия: $E_{\max} = 130 Q^2/A \text{ MeV}$

МСС30/15



Энергия p : 18–30 МэВ
Энергия d : 9 – 15 МэВ
Ток пучка: 200/62 μA

Использование:

- IGISOL
- Нарботка радиоизотопов



Доступные пучки ионов

➤ **Офлайн**

Ионные источники перед банчером:

- Поверхностно-ионизационный источник (ионы стабильных изотопов Cs, Rb, K)
- Лазерный источник (ионы от твердых мишеней – металлы, оксиды, ...)

Ионные источники на втором этаже (перед дипольным магнитом):

- Поверхностно-ионизационный источник (ионы стабильных изотопов Cs, Rb, K)
- Газоразрядный ионный источник (металлы, порошки, газы)

➤ **Онлайн**

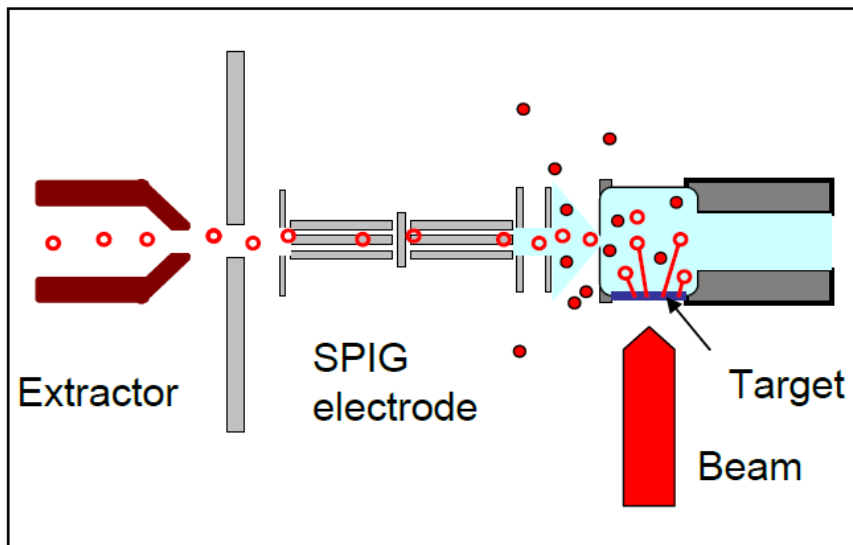
- Продукты деления U, Th с использованием протонных или дейтронных пучков
- Продукты реакций слияния-испарения (лёгкие и тяжёлые ионы)



Получение продуктов реакций (Ion Guide technique)

Разработан на JYFL в 1980-х:

J. Ärje, J. Äystö et al., PRL 54 (1985) 99



- Тонкая мишень
- Ядра отдачи останавливаются в гелии
- Зарядово-обменные реакции в He
 - хорошая фракция 1^+ ионов
 - присутствуют также 2^+ ионы
- Нет необходимости использовать отдельные ионные источники



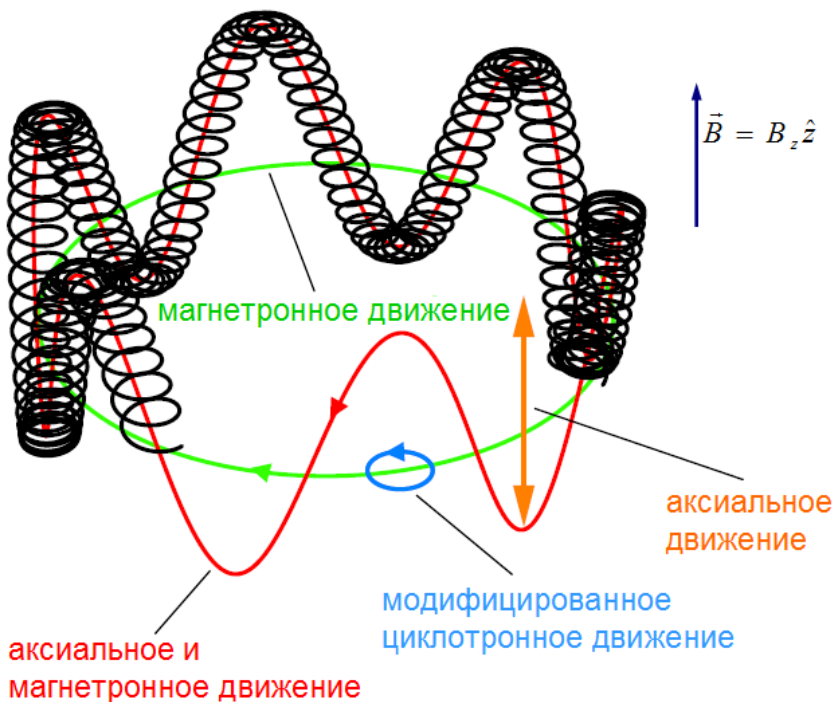
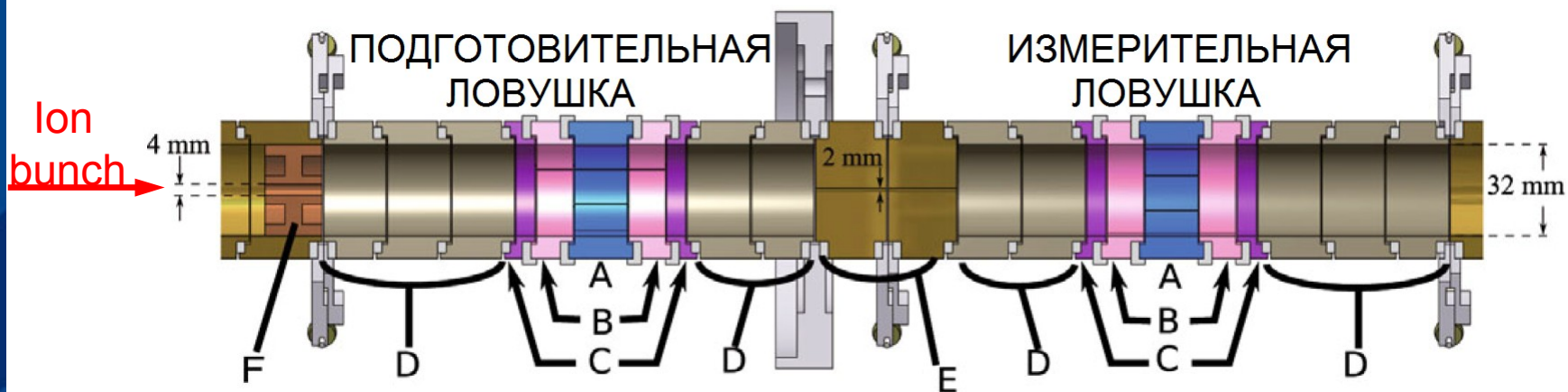
Быстрый и универсальный

Методы получения нуклидов на IGISOL:

- Реакции слияния испарения с лёгкими ионами
- Реакции слияния испарения с тяжёлыми ионами
- Деление U/Th p- и d-пучками

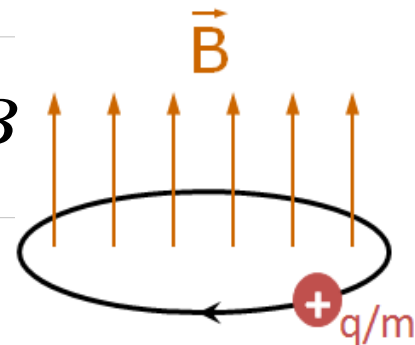


Ловушки Пеннинга ЮФЛТРАР

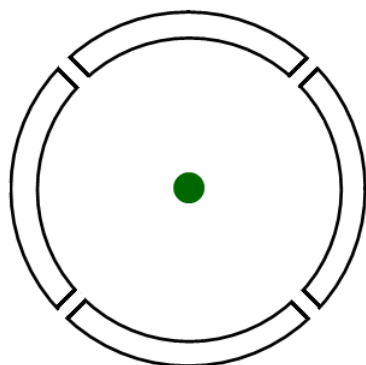


$$v_c = v_+ + v_- \quad (\text{для идеальной ловушки})$$

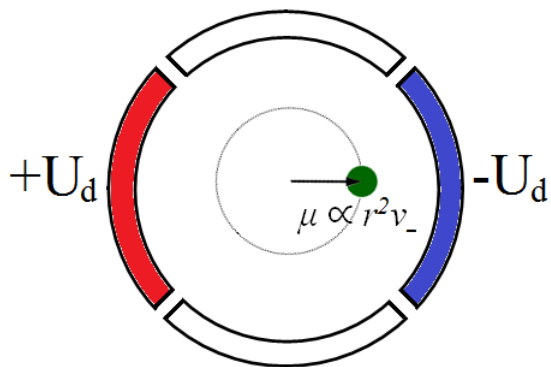
$$v_c = \frac{1}{2\pi} \frac{q}{m} B$$



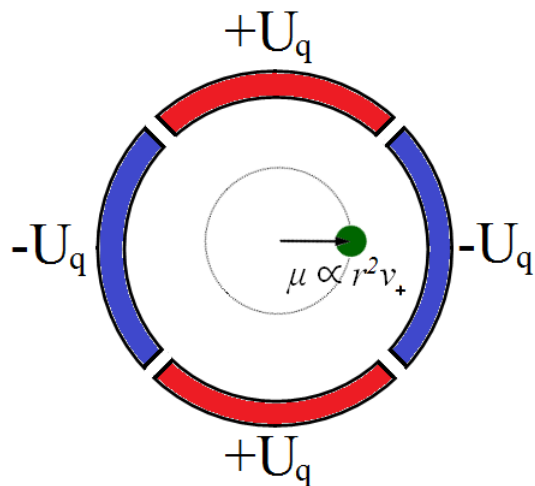
Радиочастотное возбуждение ионов в ловушке



Ионы в центре ловушки

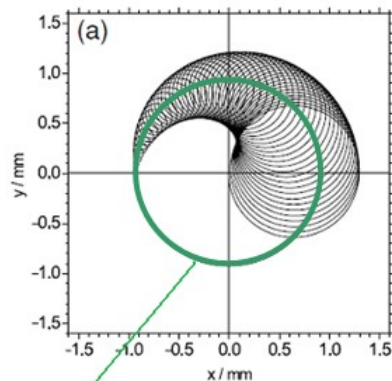


Дипольное РЧ-возбуждение на собственной частоте движения ионов-увеличение радиуса движения

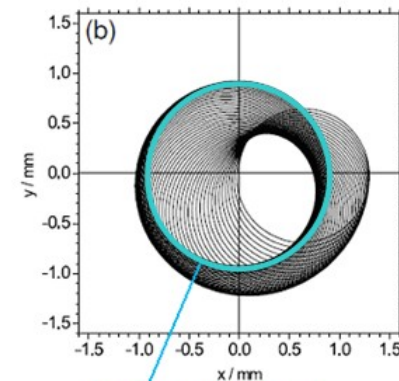


Квадрольное РЧ-возбуждение на собственной циклотронной частоте ионов-конвертация радиальных движений

$$\nu_{\text{РЧ}} = \nu_c$$



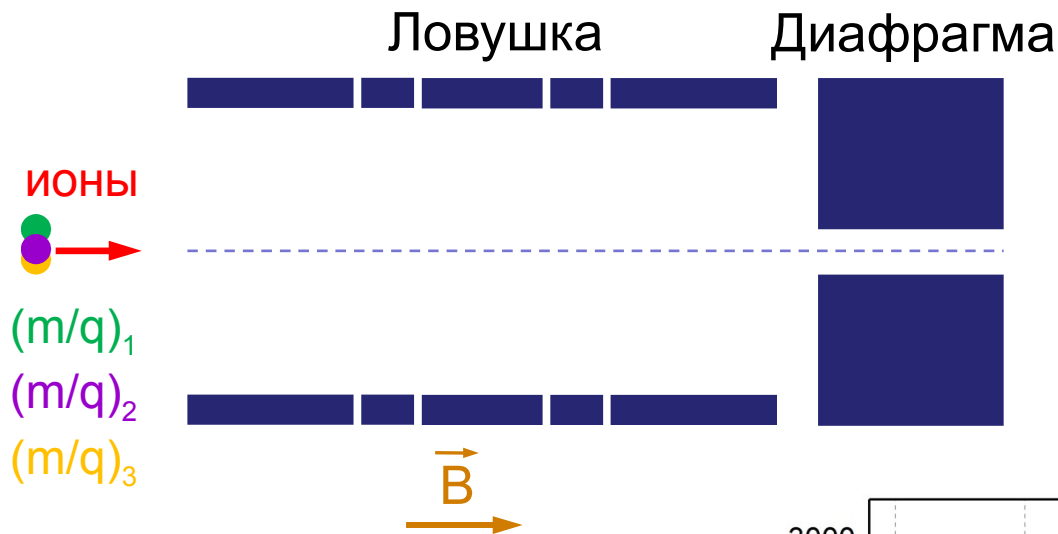
магнетронное движение



модифицированное циклотронное движение



Подготовительная ловушка Пеннинга: масс-селективное охлаждение в буферном газе



$$v_- \approx \frac{1}{2\pi} \frac{U_0}{2Bd^2}$$

$$v_c = \frac{1}{2\pi} \left(\frac{q}{m} \right) B$$

ИЗЛУЧЕНИЕ ИОНОВ



◆ Давление буферного газа

$\approx 10^6$ мбар

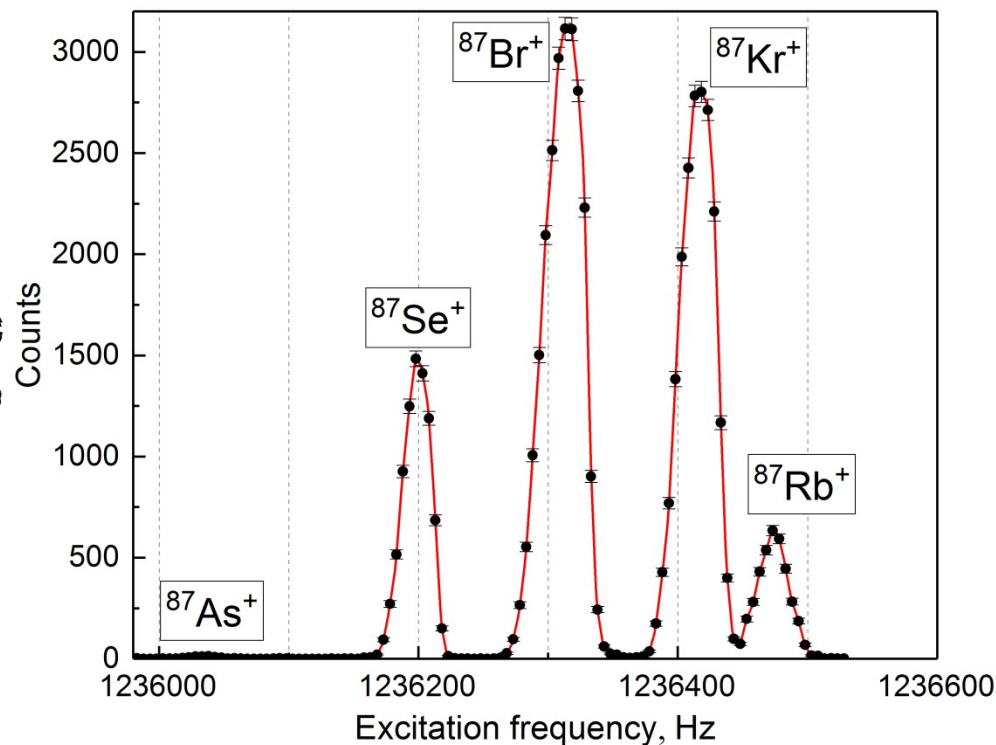
◆ Время охлаждения ≈ 100 мс

◆ Разрешающая способность

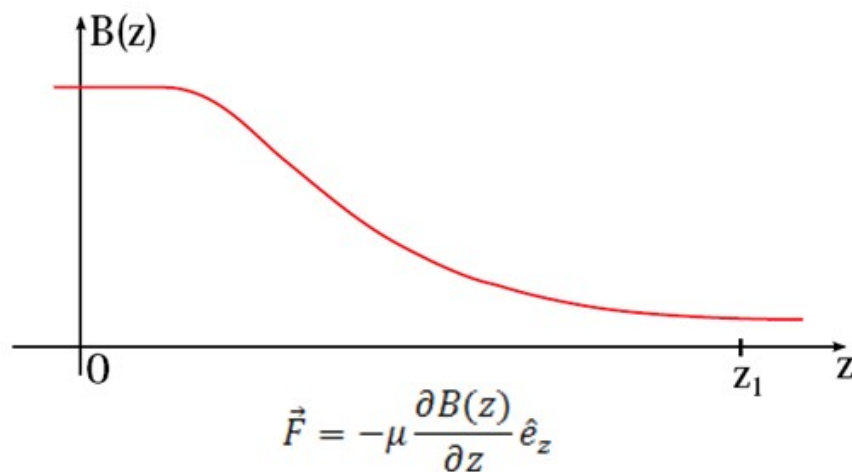
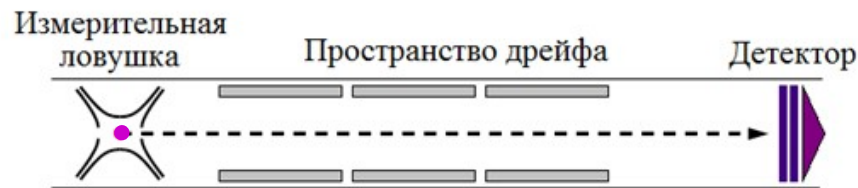
до $R \approx 10^{\frac{\nu_c}{\Delta\nu_c}} \approx 10^5$

◆ Зарядовые состояния

ионов: 1^+ , 2^+



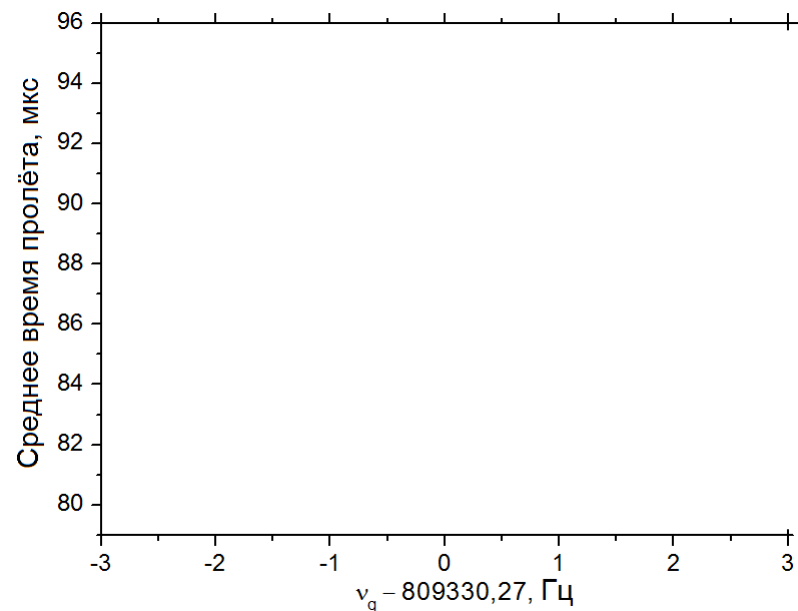
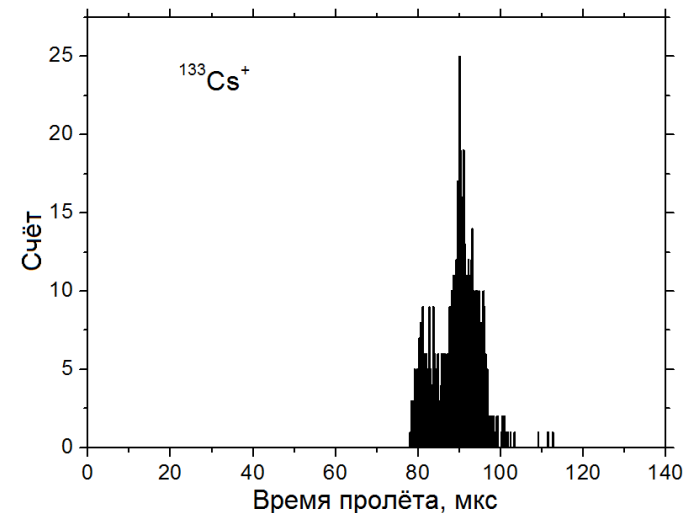
Измерительная ловушка: времяпролётный ионный циклотронный резонанс (ToF-ICR)



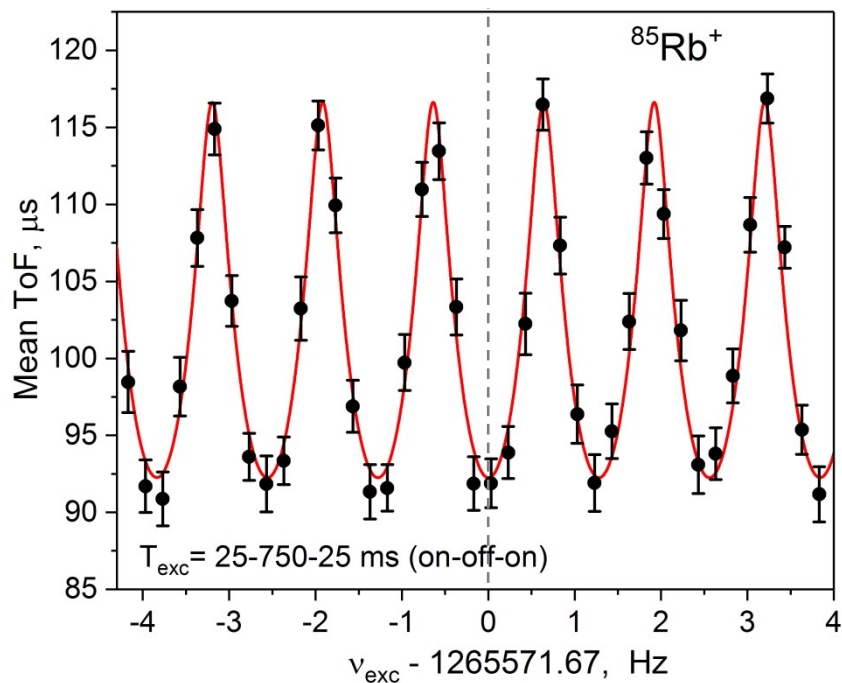
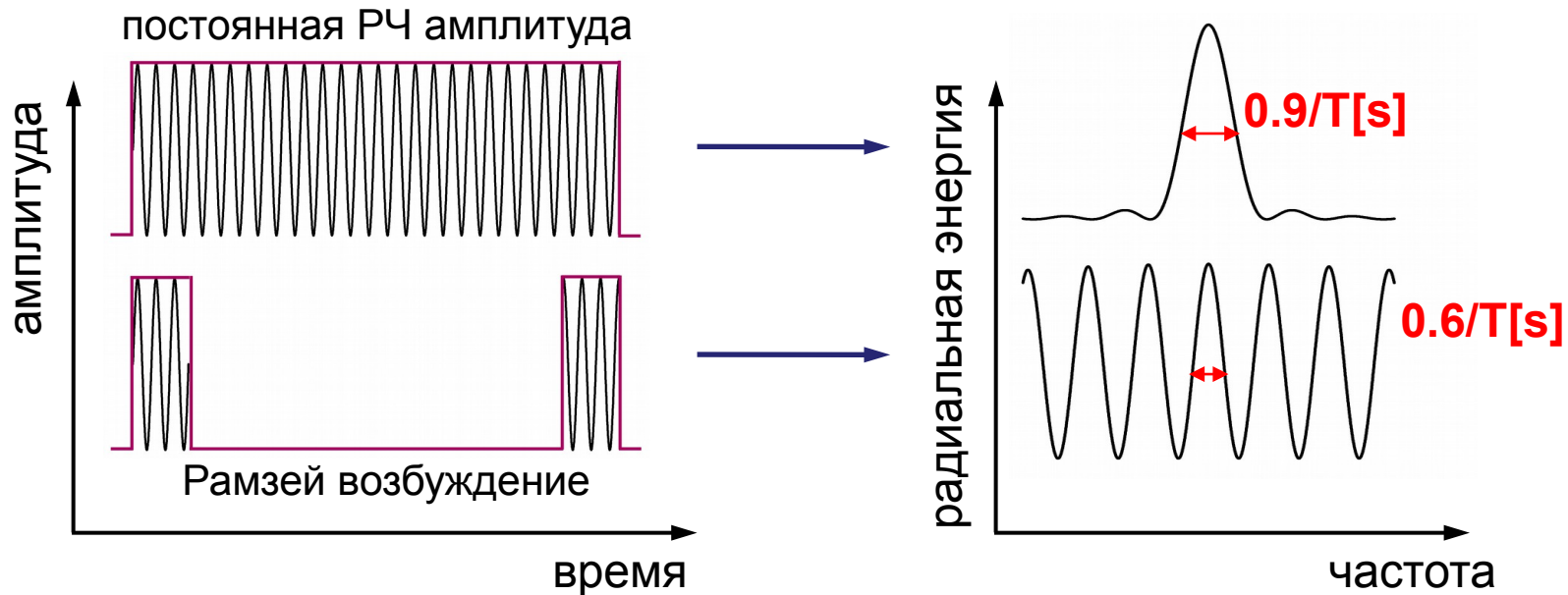
$$\bar{\mu} = \frac{E_r}{B} \hat{n}, \quad E_r \approx \frac{m}{2} \omega_+^2 \rho_+(t)^2$$

$$dv \approx \frac{0,9}{T_{exc}}$$

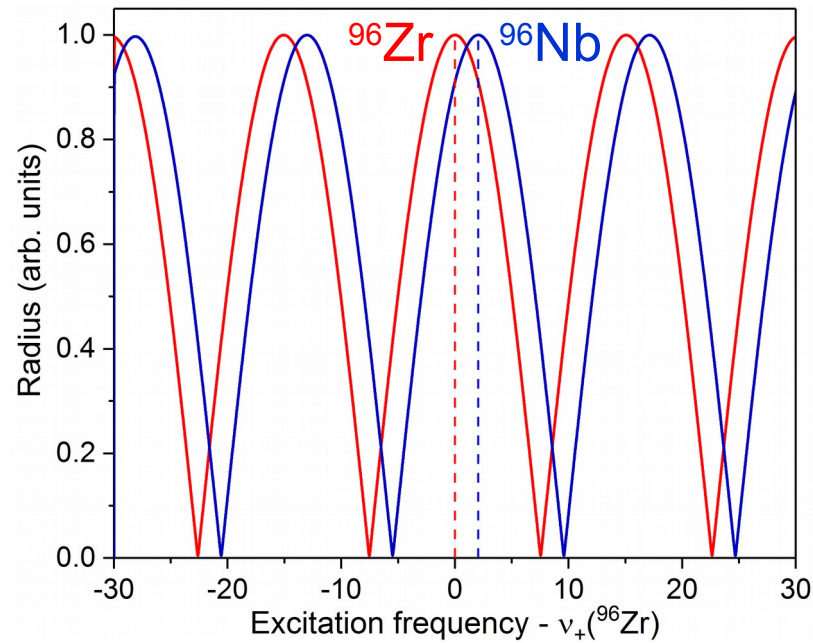
$$R = \frac{v}{\Delta v} \approx 10^6, \quad \text{при } T_{exc} = 1 \text{ с}, m = 100 \text{ у}$$



Рамзей возбуждение

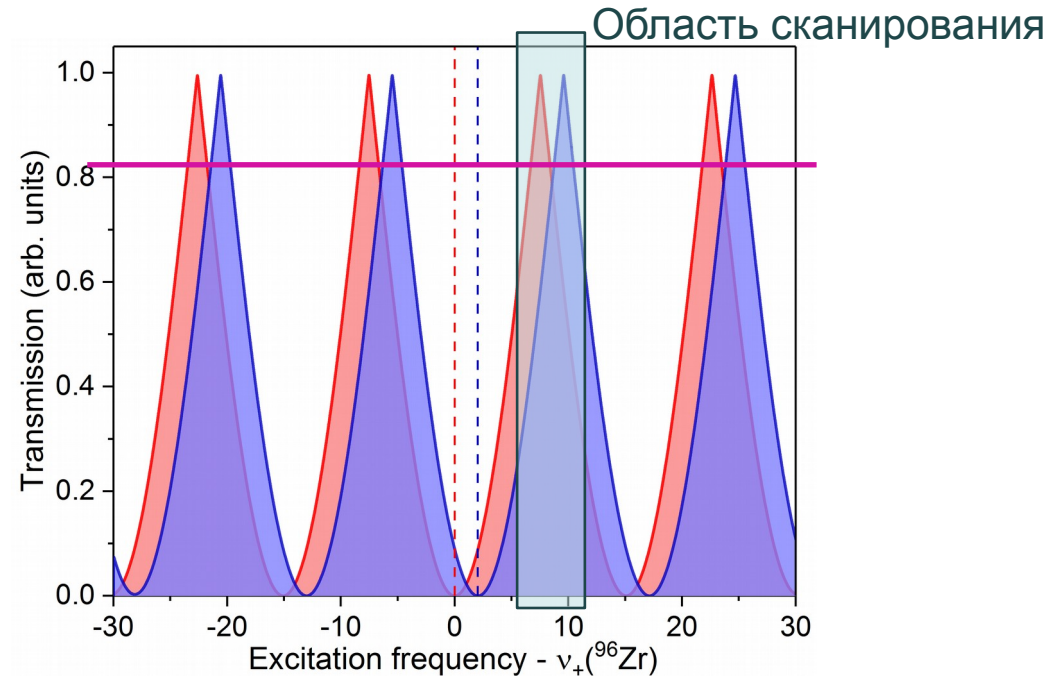


Рамзей очистка пучка

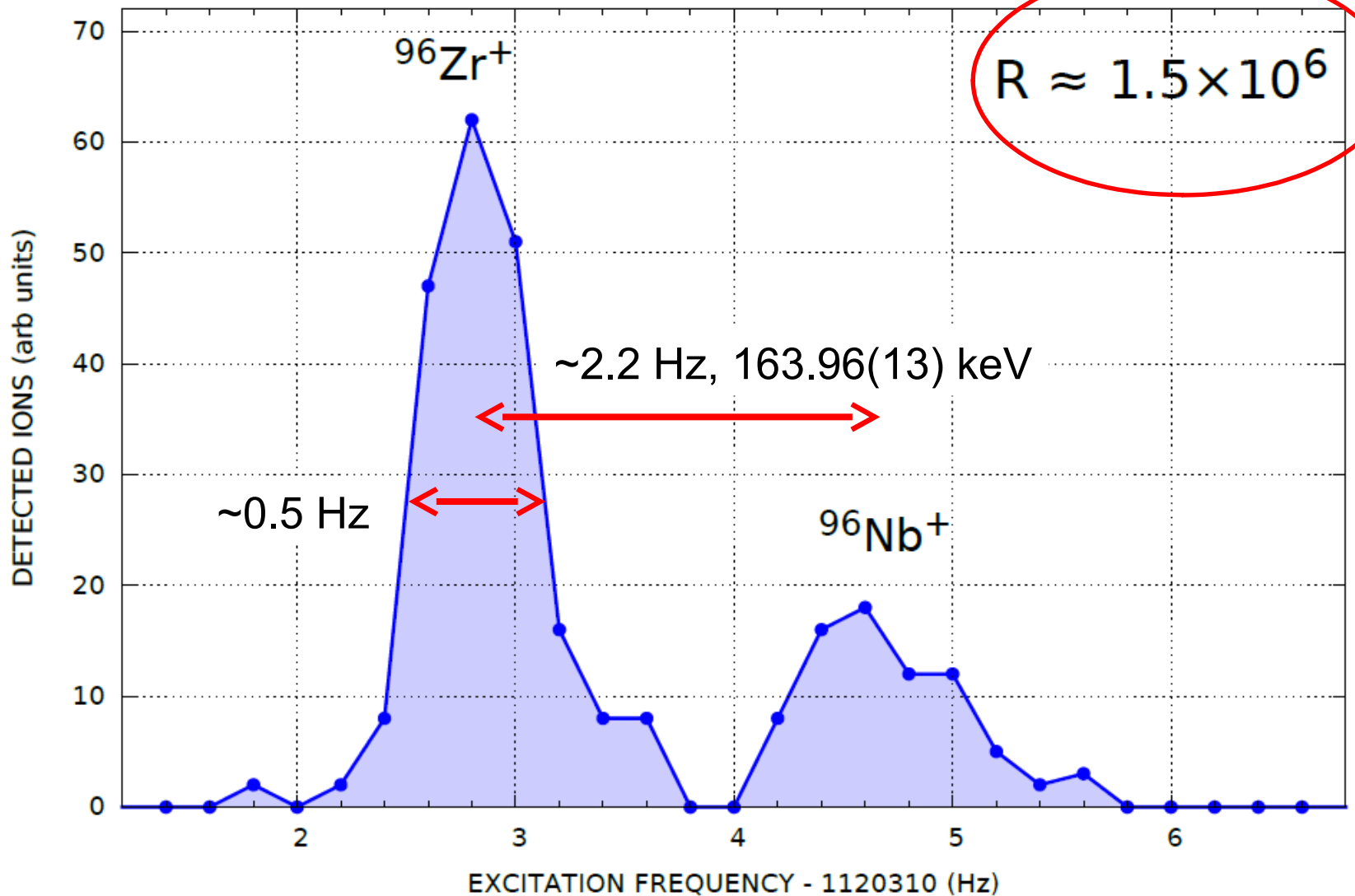


$$\Delta \omega_c = \Delta \nu_+ \approx 2.2 \text{ Hz}$$

Ramsey pattern:
5-60-5 ms



Рамзей очистка пучка

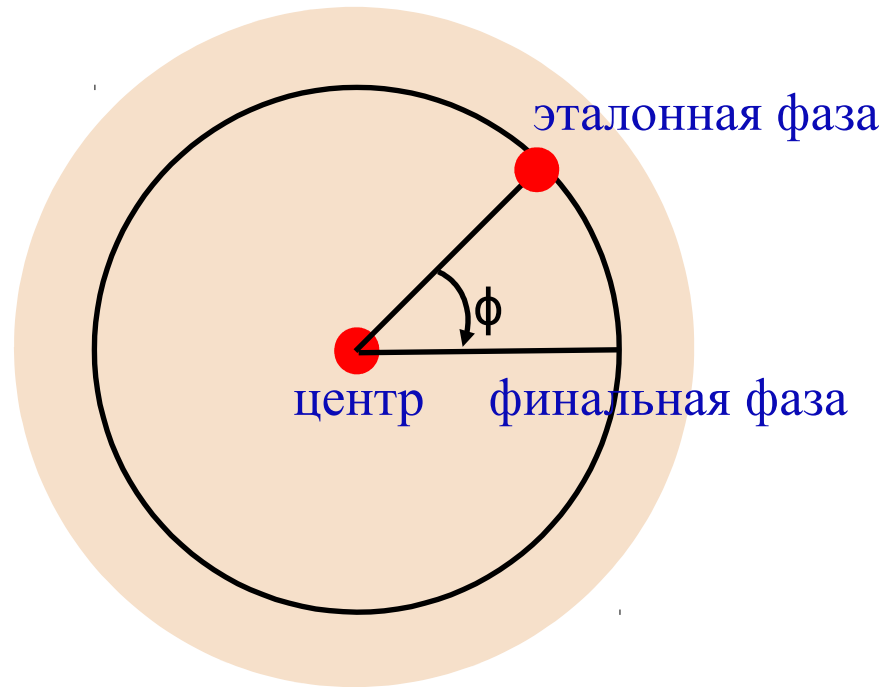


$T_{\text{exc}} = (5-60-5) \text{ мс}$

+ $2 \times 200 \text{ мс}$ для охлаждения



Фазовый метод (Phase-Imaging Ion-Cyclotron resonance)



$$v_- = \frac{\varphi_- + 2\pi n_-}{2\pi t_-}, \quad v_+ = \frac{\varphi_+ + 2\pi n_+}{2\pi t_+}$$

$$v_c = v_- + v_+$$



Фазовый метод (Phase-Imaging Ion-Cyclotron resonance)

Измерительная ловушка



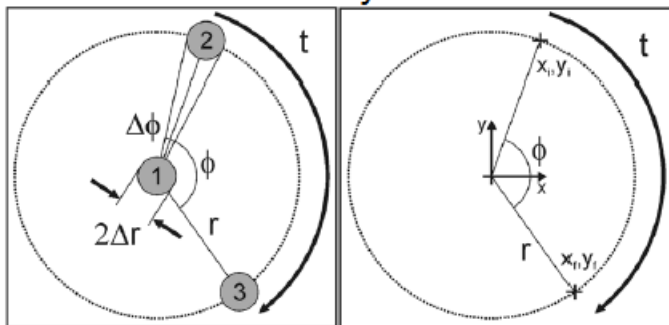
Позиционно-чувствительный детектор



\vec{B}

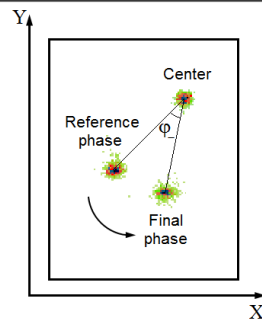
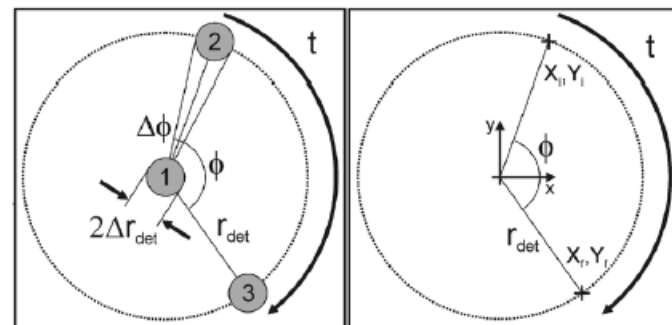


Радиальное движение ионов в ловушке



Увеличенная проекция

Изображение радиального движения ионов на детекторе



Сравнение фазового метода с времяпролётным

◇ Более высокая точность определения циклотронной частоты

частоты: $\frac{(\delta\nu_c)_{TOF-ICR}}{(\delta\nu_c)_{PI-ICR}} \approx 1.6\pi \approx 5$

◇ Более высокая разрешающая способность:

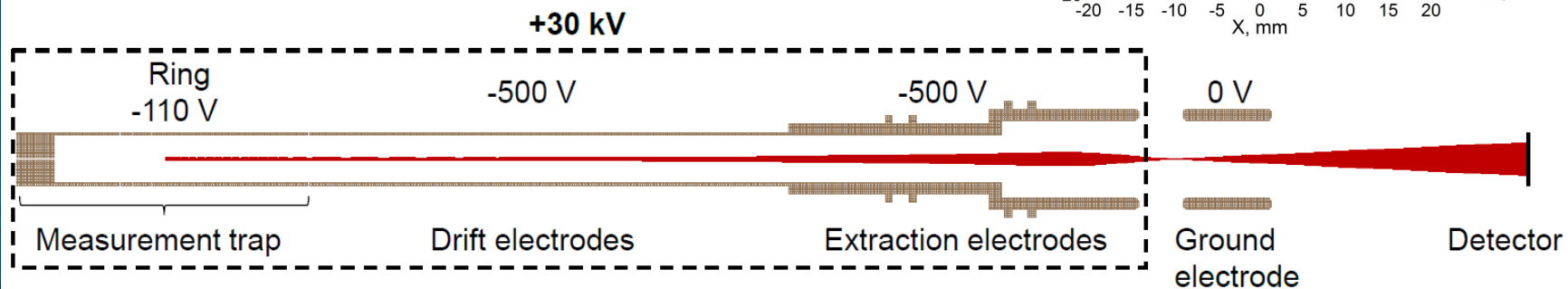
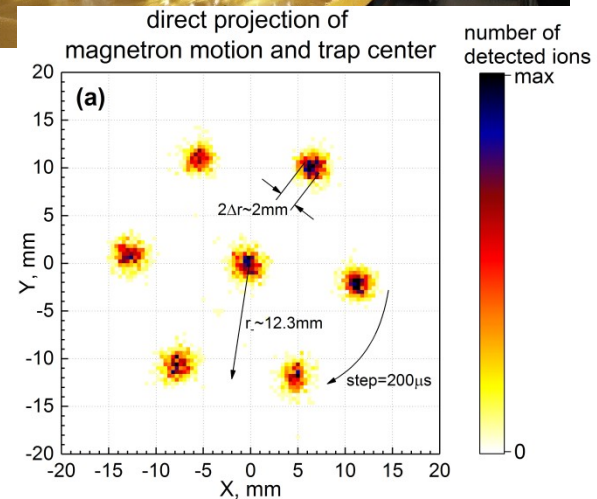
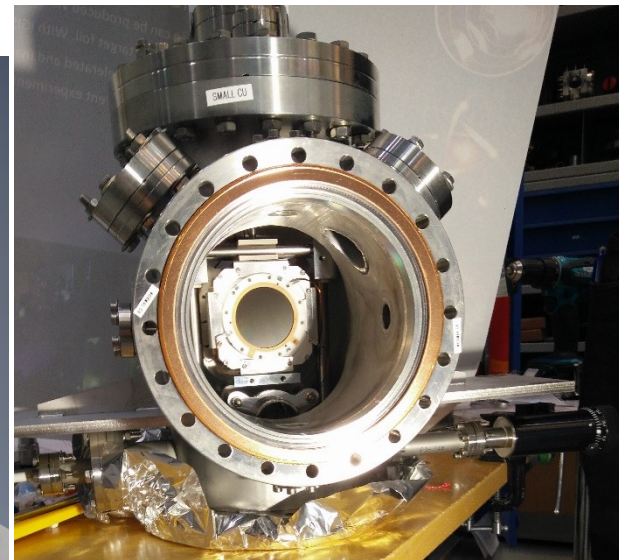
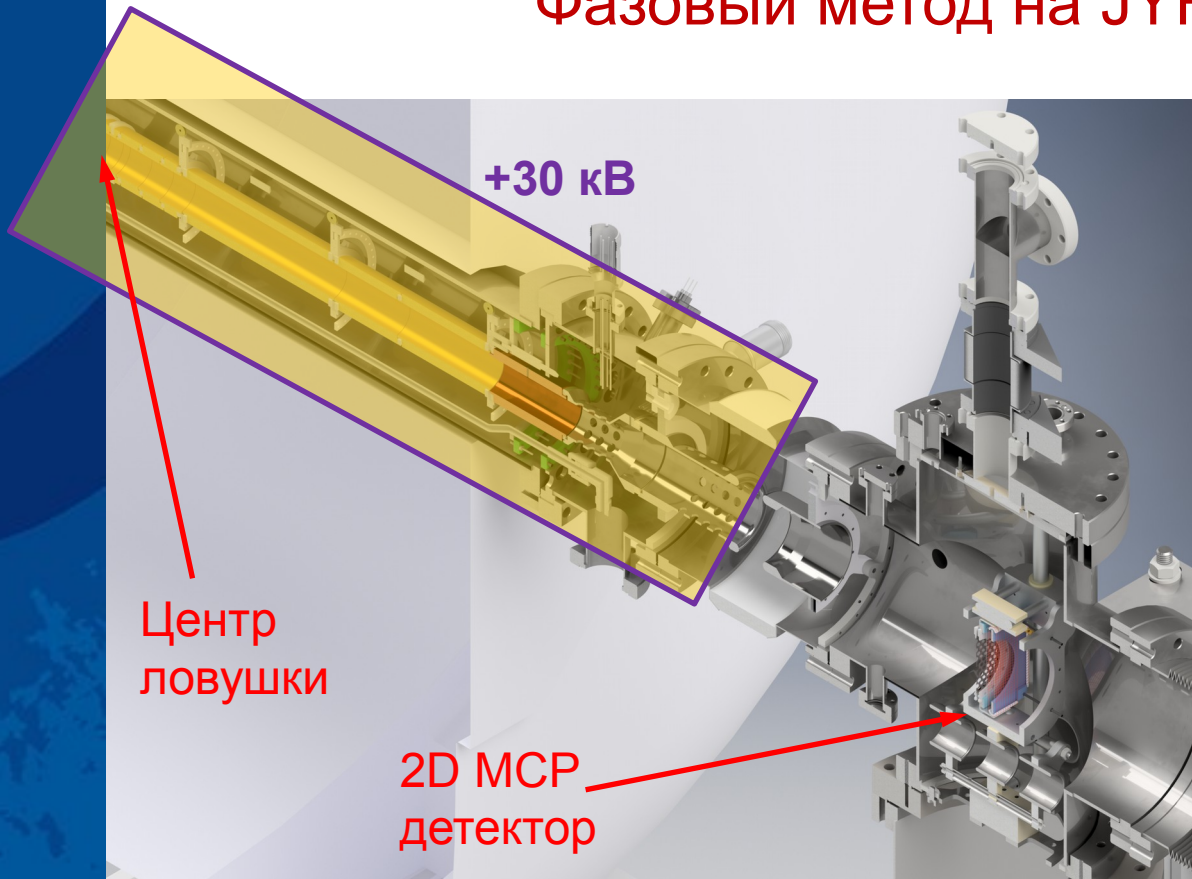
◇ Более высокая разрешающая способность:
(= 1 mm, = 50 μm)

◇ Более высокая чувствительность $\frac{R_{PI-ICR}}{R_{TOF-ICR}} \approx \frac{\pi}{1.6} \frac{r_+}{\Delta r_+} \approx 40$ ($r_+ = 1$ mm, $\Delta r_+ = 50$ μm)

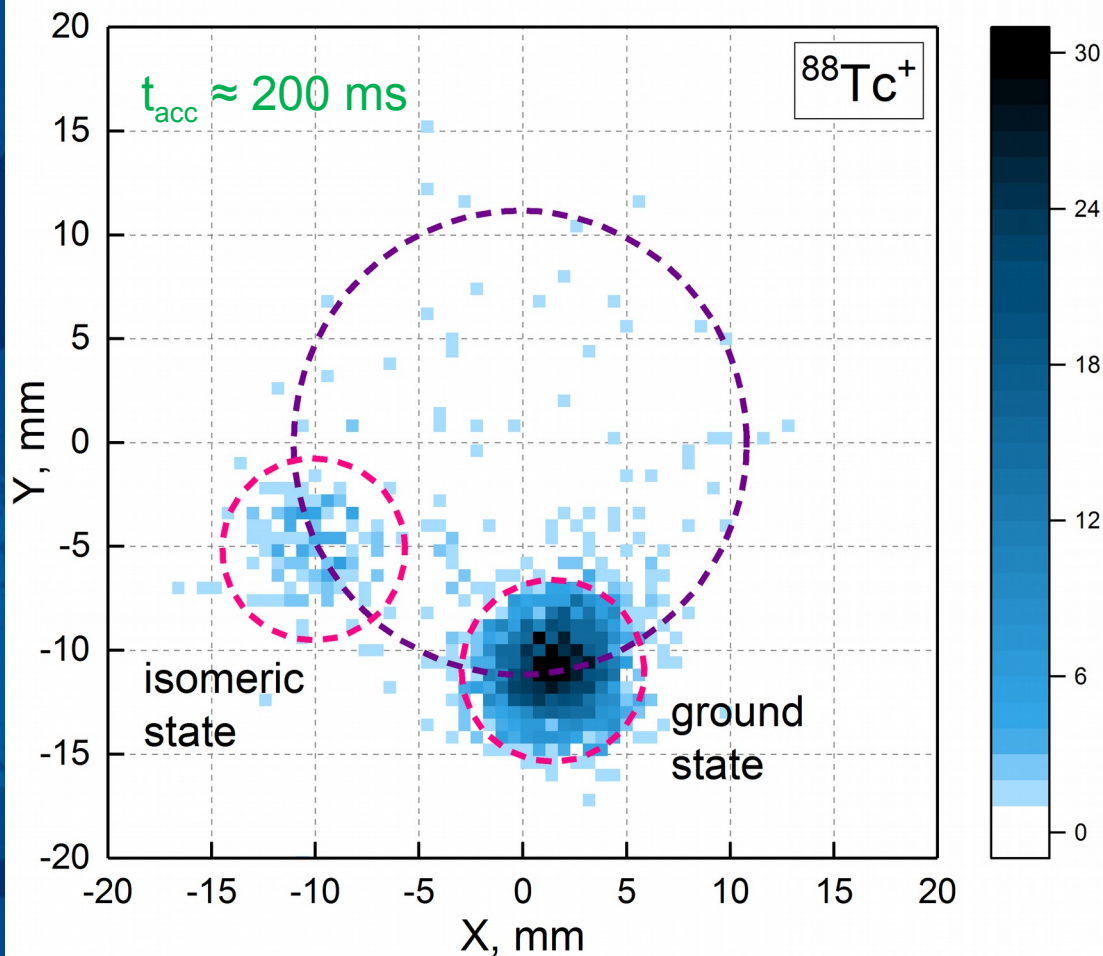
◇ Более высокая чувствительность



Фазовый метод на JYFLTRAP



Использование фазового метода для определения изомерного состояния



$$N(^{88}\text{Tc}^{\text{m}})/N(^{88}\text{Tc}^{\text{gr}}) \approx 7\%$$

$$\underline{J^\pi = (6^+) \quad T_{1/2} = 5.8(2) \text{ s}}$$

$$E^* = 0\#(300\#) \text{ keV}$$

$$\underline{J^\pi = (6^+) \quad T_{1/2} = 6.4(8) \text{ s}}$$

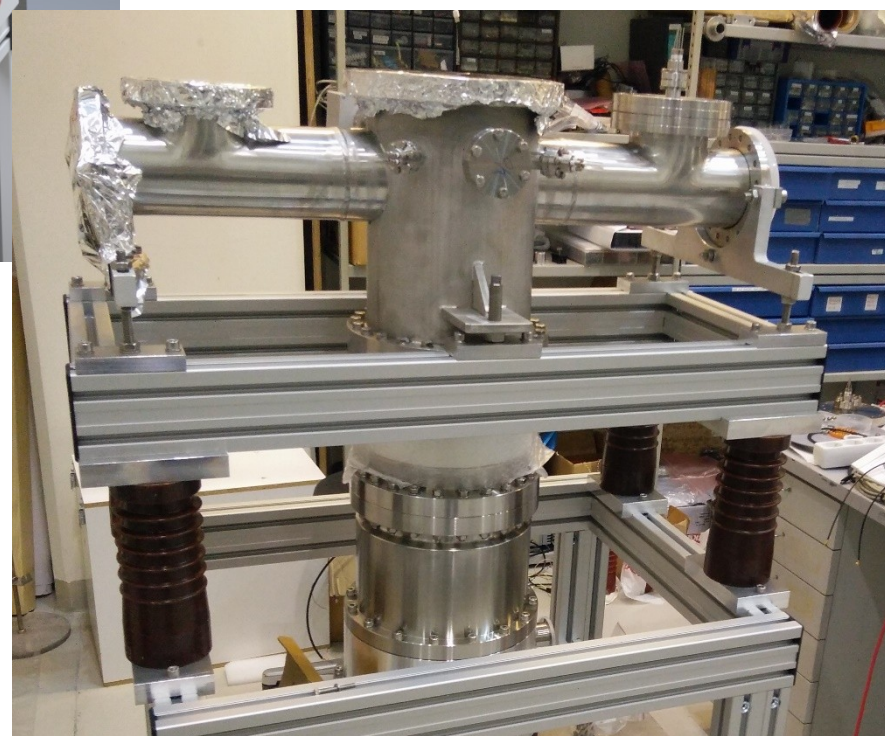
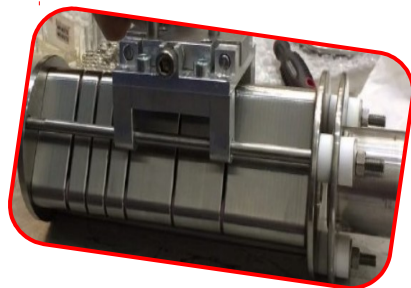
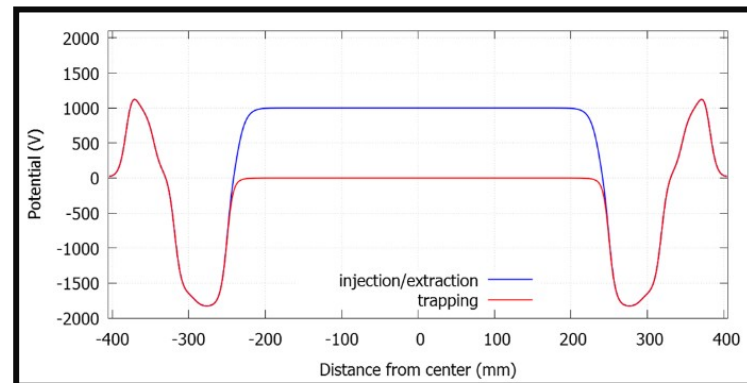
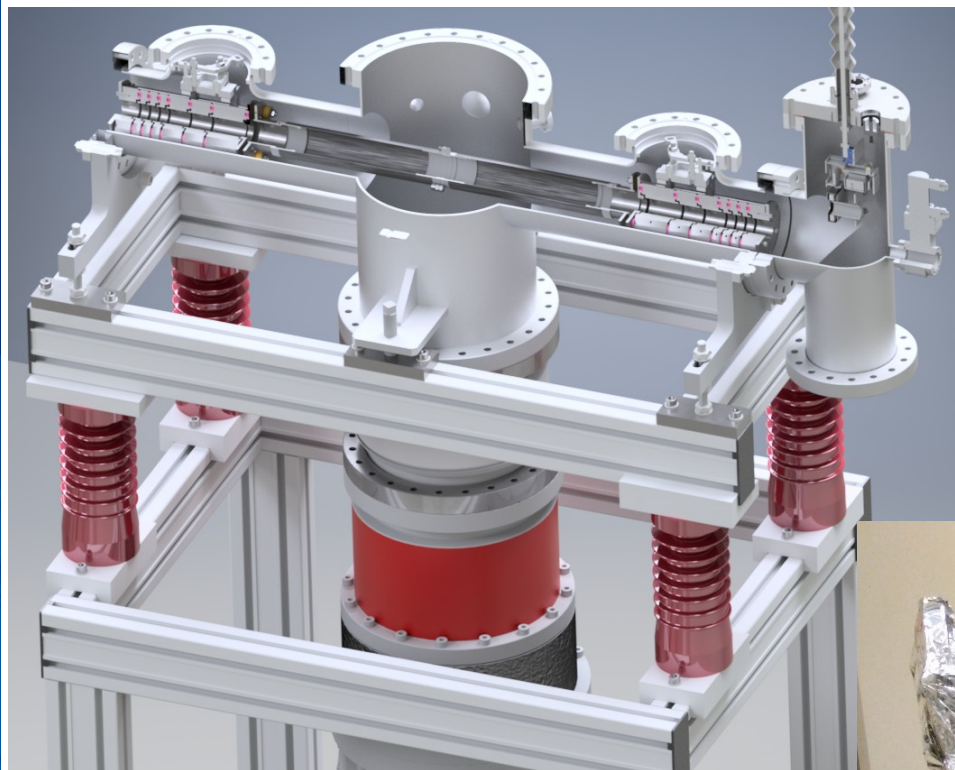
$$ME = 61680(150) \text{ keV}$$

^{88}Tc

reaction: $^{\text{nat}}\text{Ni} + ^{36}\text{Ar}$
 ~ 5 ions/min after the traps

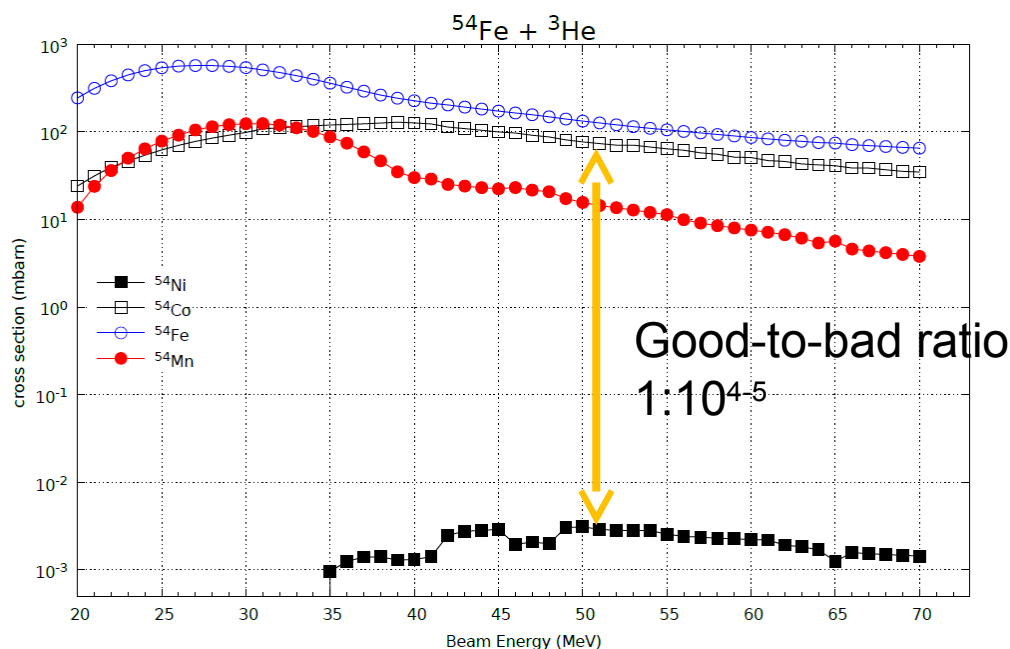


Мульти-времяпролётный (Multi-reflection time-of-flight) масс-анализатор на JYFLTRAP



Мульти-времяпролётный (Multi-reflection time-of-flight) масс-анализатор на JYFLTRAP

- Масс сепаратор/спектрометр
- Более быстрый временной цикл измерения, чем в ловушках Пеннинга
- Способность проводить измерения с более низкими отношениями хороших ионов к плохим
- Хорошая разрешающая способность (до $R \approx 10^5$) неплохая точность для измерений масс



Измерения масс на JYFLTRAP

массы
ядер

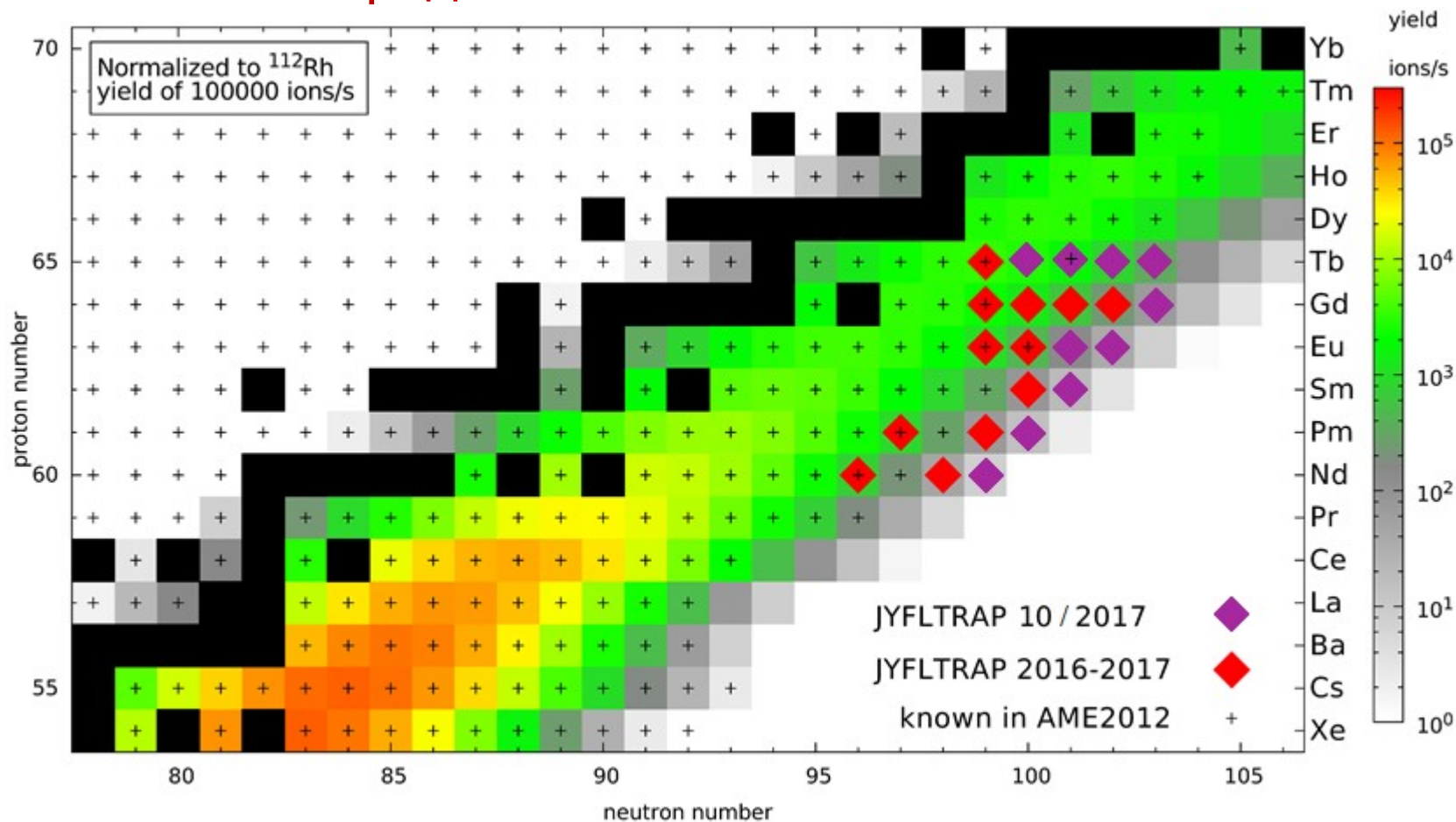
$$M(Z, N) = Z \cdot M_p + N \cdot M_n - B(Z, N)/c^2$$

энергии
связи
нуклонов

- ☐ **Астрофизика** ((n- и p-процесс, точки ожидания)
- ☐ **Нейтронная физика** ((Q-величины для β -и p-процессов)
- ☐ **Изучение структуры ядер** (оболочки, деформации, парные энергии, массовые модели, энергии возбуждения...)



Измерение масс нейтроноизбыточных изотопов редкоземельных элементов

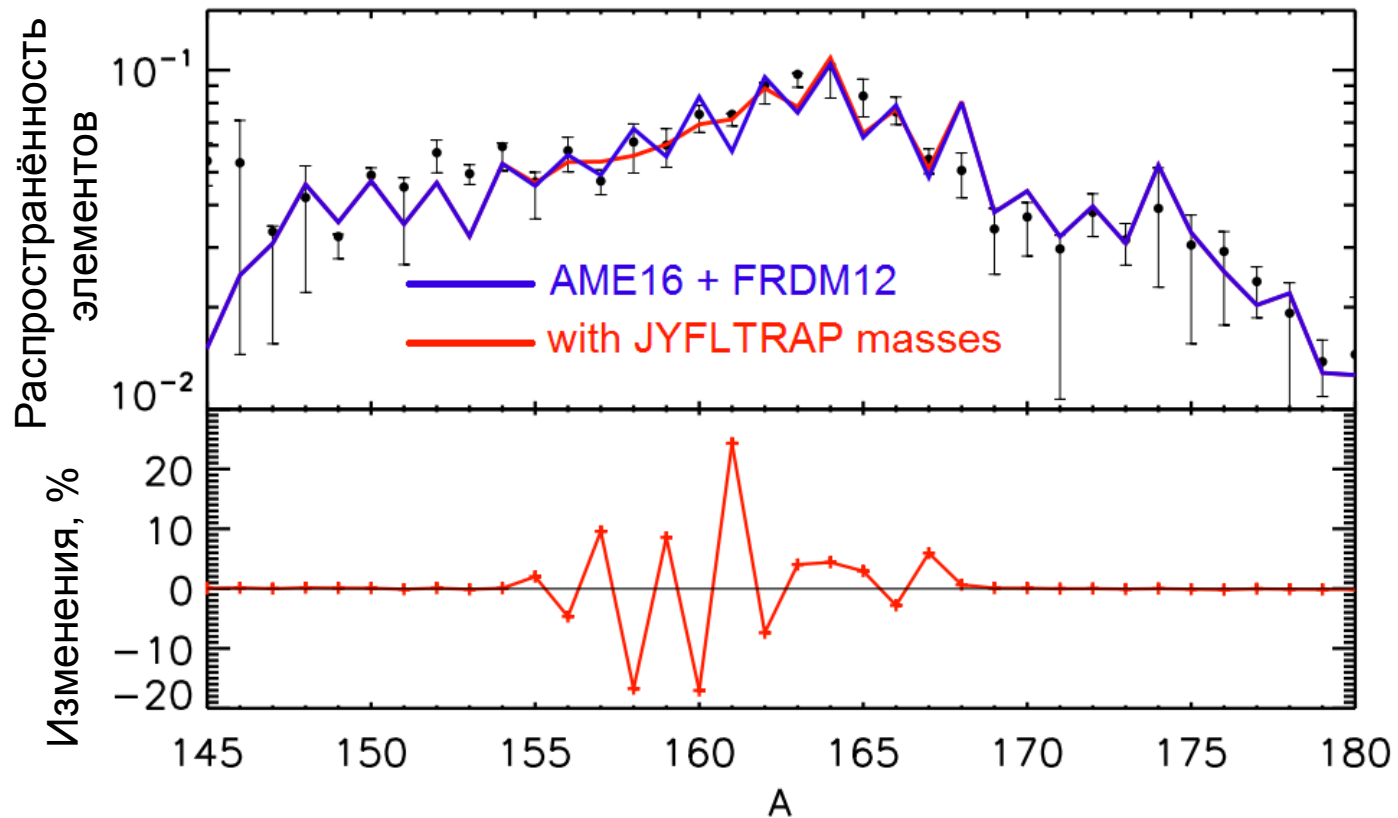


^{156}Nd , ^{158}Nd , ^{158}Pm , ^{160}Pm , ^{162}Sm , ^{162}Eu , ^{163}Eu ,
 ^{163}Gd , ^{164}Gd , ^{165}Gd , ^{166}Gd , ^{164}Tb

^{159}Nd , ^{161}Pm , ^{163}Sm , ^{164}Eu , ^{165}Eu , ^{167}Gd , ^{165}Tb , ^{166}Tb , ^{167}Tb , ^{168}Tb – измерены
 в октябре 2017 г.



Результаты измерений масс нейтроноизбыточных изотопов редкоземельных элементов



- Энергии отделения нейтрона меньше при $N=98$, 100 и 102 , чем предсказывалось теоретическими моделями
- Существование нейтронной деформированной оболочки $N=100$ не подтвердилось



Массы для изобарического квинтета $A=52$, $T=2$

Уравнение масс для изобарического мультиплета (IMME):

$$M(A, T, T_z) = a(A, T) + a(A, T)T_z + c(A, T)T_z^2$$

Необходимы:

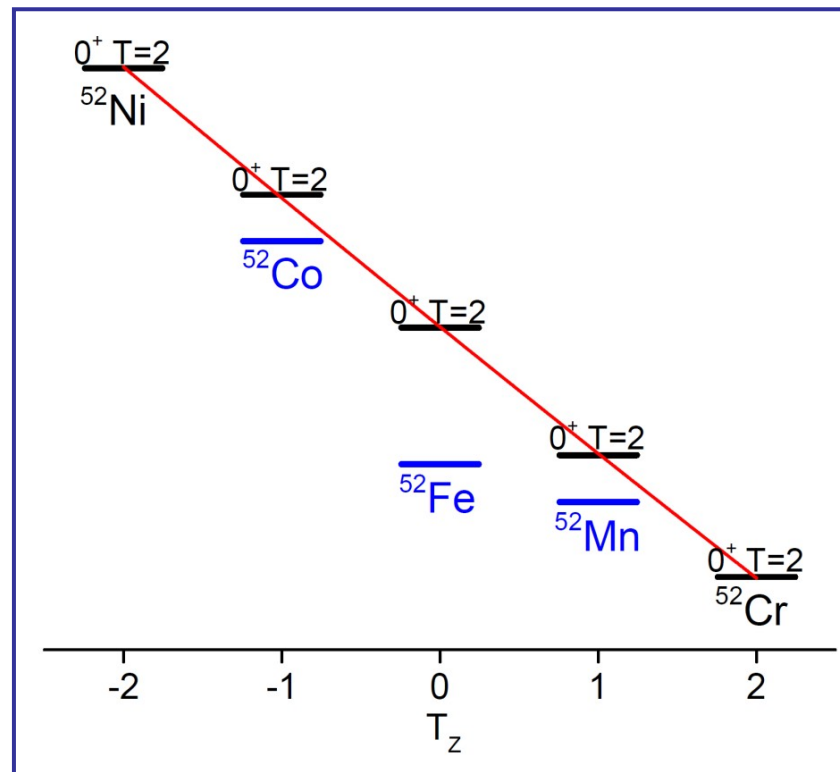
- Массы основных состояний ядер
- Энергии изобарических аналоговых состояния (IAS)

На JYFLTRAP были измерены

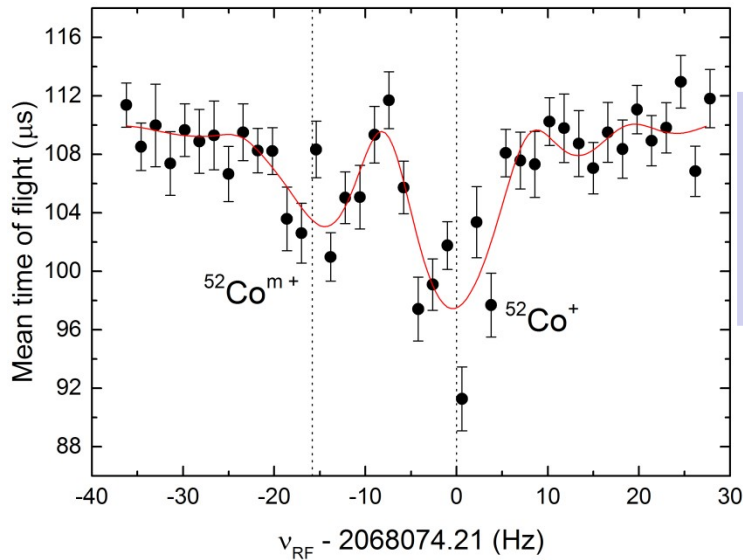
массы:

- ✓ ^{52}Co , $^{52}\text{Co}^m$
- ✓ ^{52}Fe , $^{52}\text{Fe}^m$
- ✓ ^{52}Mn

$^{54}\text{Fe}+p$



Массы ^{52}Co и $^{52}\text{Co}^m$: результаты



- ❖ Первое измерение ^{52}Co в ловушке Пеннинга
- ❖ $T_{1/2}(^{52}\text{Co}) = 104(7)$ мс
- ❖ $^{52}\text{Fe}(p,3n)^{52}\text{Co}$ @ 50 МэВ: $\sigma \approx 3$ мкб (TALYS)

	$ME(^{52}\text{Co}^m)$, кэВ	$ME(^{52}\text{Co})$, кэВ
JYFLTRAP (D.A. Nesterenko, et al., J. Phys. G, 44, (2017) 065103)	-34331.6(66)	-34958(11)
CSRe (X. Xu, et al., PRL 117, 182503 (2016))	-34361(8)	-33974(10)
AME2012/NUBASE2012	-33990(200)#	-33610(220)#

$$E_x(^{52}\text{Mn}) = 377.749(5) \text{ кэВ}$$

$$\text{JYFLTRAP: } E_x(^{52}\text{Co}) = 374(13) \text{ кэВ}$$

$$\text{CSRe: } E_x(^{52}\text{Co}) = 387(13) \text{ кэВ}$$

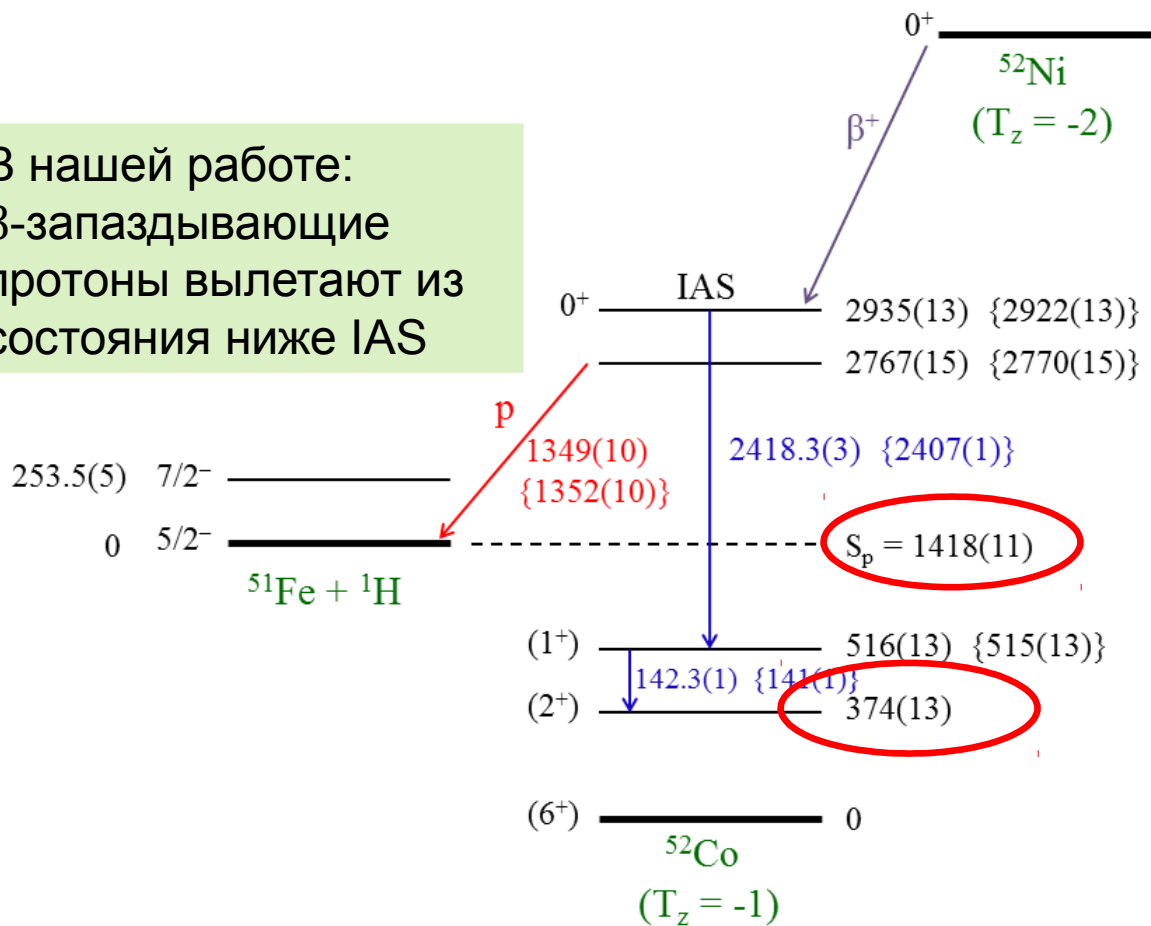


Результаты измерений с ^{52}Co : схема уровней β^+ -распада ^{52}Ni

Ранее при изучении распада ^{52}Ni было предположено, что $T=2, J^\pi=0^+$ IAS состояние распадается через βp и $\beta\gamma$

C. Dossat et al., Nucl. Phys. A 792 (2007) 18; S. Orrigo et al., PRC 93, 044336 (2016)

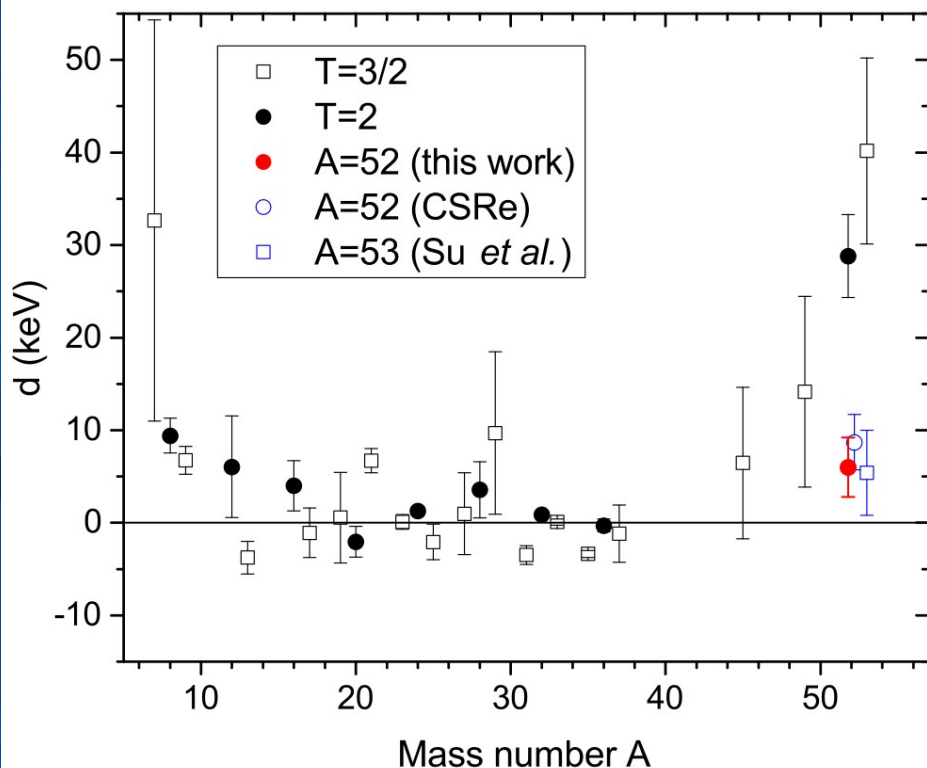
В нашей работе:
 β -запаздывающие
протоны вылетают из
состояния ниже IAS



Проверка уравнения для изобарического мультиплета (IMME) при $A = 52$

Используя измеренные на JYFLTRAP более точные значения масс ^{52}Co , ^{52}Fe , ^{52}Mn (+ табличные массы ^{52}Cr , ^{52}Ni и $E^*(^{52}\text{Fe})$, $E^*(^{52}\text{Mn})$) нашли коэффициенты для IMME

Квадратичный IMME JYFLTRAP фит:
 $\chi^2/n=2.4$.



Кубический коэффициент d

Предыдущее значение:
28.8(45)

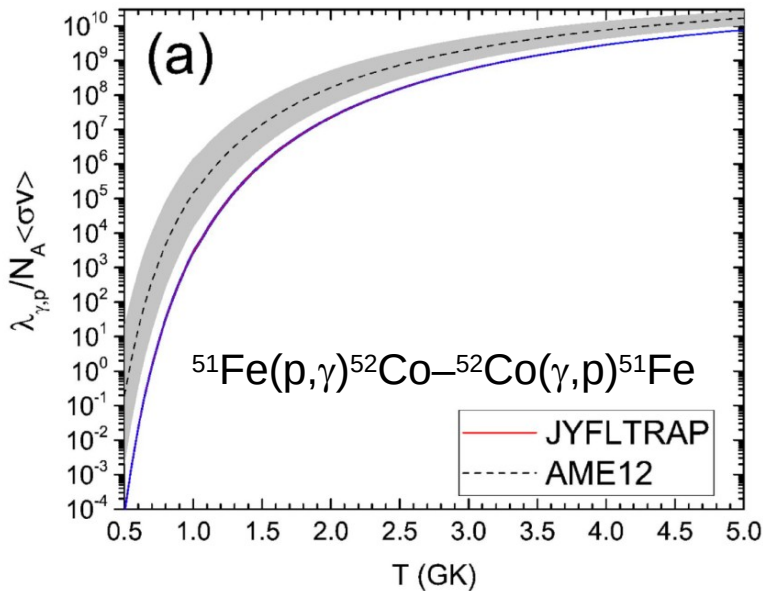
JYFLTRAP(^{52}Co , ^{52}Fe , ^{52}Mn):
6.0(32) кэВ

CSRe (^{52}Co):
6.5(45) кэВ

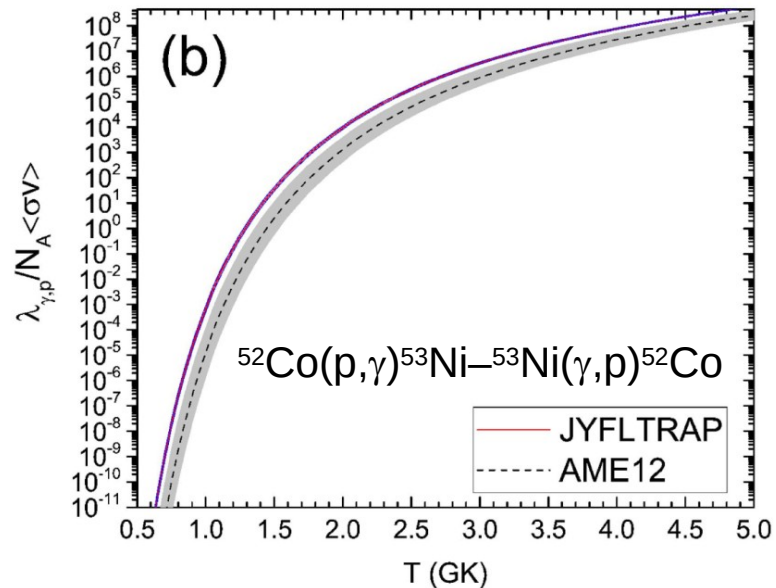


^{52}Co и r -процесс

$S_p(^{52}\text{Co}) = 1418(11) \text{ keV}$
AME12: 1077(196)# keV



$S_p(^{53}\text{Ni}) = 2588(26) \text{ keV}$
AME12: 2930(197)# keV

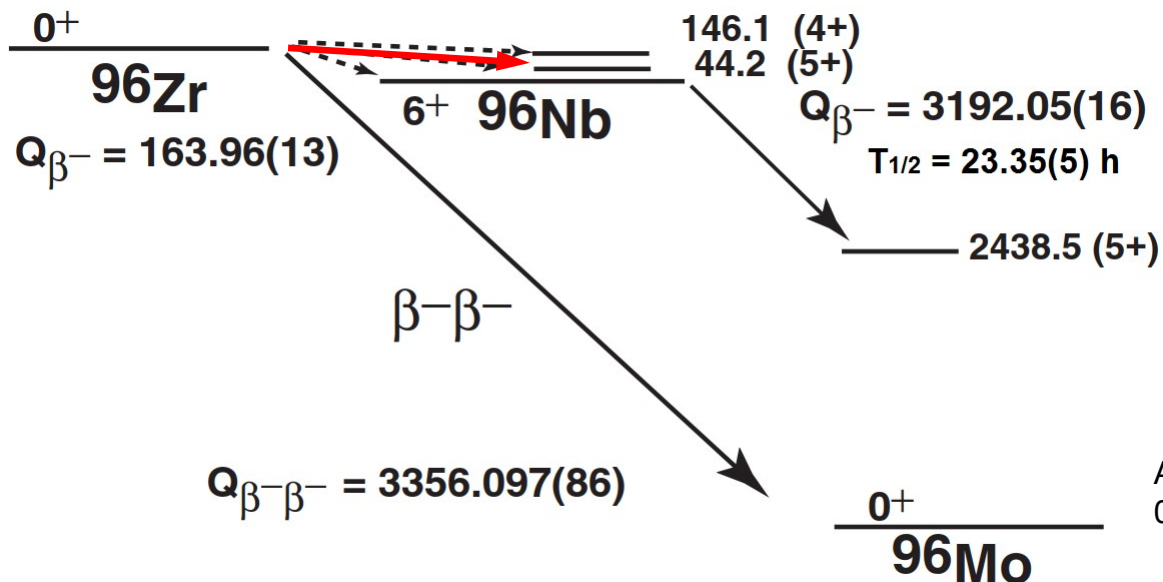


Отношение скорости фоторасщепления к скорости захвата протона

В ^{52}Co протоны более связаны, в ^{53}Ni протоны менее связаны чем предсказывалось AME2012



Q-величины для β^- и $\beta\beta^-$ распадов ^{96}Zr



04-го 5-го порядка
запрещённый
уникальный переход

Alanssari et al., PRL 116,
072501 (2016)

Два периода полураспада:

NEMO-3: $T_{1/2}^{2\nu\beta\beta} = (2.3 \pm 0.2) \times 10^{19}$ лет [1]

гео-хим.: $T_{1/2} = (0.94 \pm 0.32) \times 10^{19}$ лет [2]

Они могут согласоваться, если
присутствует конкурирующий β -распад

$$(T_{1/2})^{-1} = (T_{1/2}^{2\nu\beta\beta})^{-1} + (T_{1/2}^{\beta})^{-1}$$

Ожидаемый

$$T_{1/2}^{\beta} = (1.6 \pm 0.2) \times 10^{19}$$
 лет

Эксперимент

$$T_{1/2}^{\beta} > 2.6 \times 10^{19}$$
 лет [3]

Расчёты (QRPA)

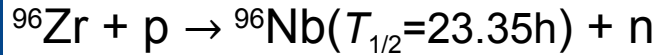
$$T_{1/2}^{\beta} = 24 \times 10^{19}$$
 лет [4]

$$(T_{1/2}^{\beta})^{-1} \propto Q^{13}$$

[1] J. Argyriades et al., Nucl. Phys. A 847, 168 (2010); [2] M. E. Wieser and J. R. De Laeter, PRC 64, 024308 (2001); [3] A. S. Barabash et al, J. Phys. G 22, 487 (1996); [4] H. Heiskanen et al, J. Phys. G 34, 837 (2007).



Q-величины для β^- и $\beta\beta^-$ распадов ^{96}Zr



	JYFLTRAP (Alanssari et al., PRL 116, 072501 (2016))	AME(2012)	JYFLTRAP – AME2012	LEBIT (K. Gulyuz et al., PRC 91, 055501 (2015))
$Q_{\beta\beta^-}$, кэВ	3356.097(86)	3349(2)	7.1(2)	3355.85(15)
Q_{β^-} , кэВ	163.96 (13)	162(4)	2(4)	

Q_{β^-} , кэВ

Новые расчеты (оболочечная модель) с учётом измеренной $Q_{\beta\beta^-}$ величины:

$$T_{1/2}^{\beta^-} = 11 \times 10^{19} \text{ лет.}$$

Пересчёт QRPA значения показал, что новая Q_{β^-} величина вносит только 6.5% изменения в период полураспада.

Расхождение в периодах полураспада (NEMO-3 и гео-хим.) не было устранено

(Необходимо новое измерение $T_{1/2}^{\beta^-}$)



Измерение разницы масс ^{71}Ge – ^{71}Ga

GALLEX, SAGE детекторы: $^{71}\text{Ga}(\nu_e, e^-)^{71}\text{Ge}$

^{71}Ga -аномалия: калибровка детекторов с помощью ^{51}Cr и ^{37}Ar источниками показала меньший поток нейтрино, по сравнению с расчётным

Необходимо точно знать **Q-величину** реакции, чтобы проверить сечение реакции ($ft \propto Q^2$)

- $Q = 232.69(15)$ кэВ – использовалась в расчётах (J. Bahcall, PRC 56, 3391 (1997))
- $Q = 233.5(12)$ кэВ – измерено на TITAN (D. Frekers et al., Phys. Lett. B 722, 233 (2013))
- $Q = 232.443(93)$ кэВ – измерено на JYFLTRAP (M. Alanssari et al., Int. J. Mass Spec. 406, 1 (2016))

в 12 раз более точное значение!

$^{71}\text{Ga} + p \rightarrow ^{71}\text{Ge}(T_{1/2}=11.43\text{d}) + n$

Новое значение Q-величины не устранило аномалию



Благодарности

Группа IGISOL:

L. Canete
T. Eronen
S. Geldhof
A. Jokinen
A. Kankainen
I.D. Moore
D.A. Nesterenko
H. Penttilä
I. Pohjolainen
A. de Roubin
M. Reponen
S. Rinta-Antila
A. Takkinen
M. Vilen
J. Äystö



LUND
UNIVERSITY



MANCHESTER
1824
The University of Manchester



UPPSALA
UNIVERSITET

UNIVERSITY OF
NOTRE DAME



**Спасибо
за внимание!**

