

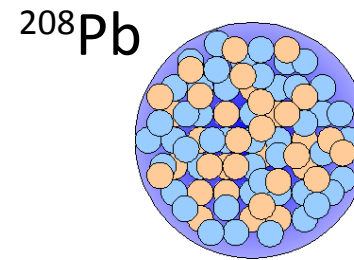
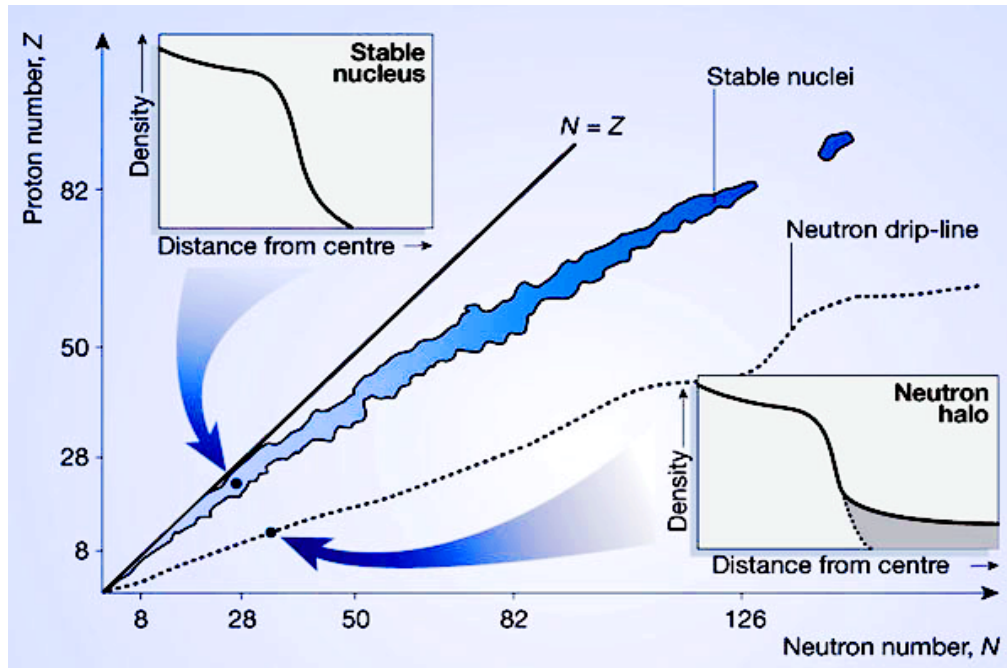
Исследование ^{12}Be , ^{14}Be и ^8B в эксперименте S247 (IKAR)

А. Инглесси

План доклада

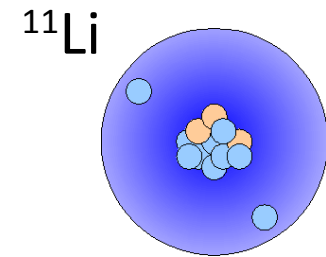
- Введение
- Экспериментальный метод
- Результаты предыдущих экспериментов
- Мотивация
- Схема установки и анализ данных
- Обсуждение результатов
- Заключение

Плотность вещества в атомах



$$R = r_0 A^{1/3}$$

6.58 fm



$$R = r_\theta A^{1/3}$$

5.98 fm

$$r_{rms} = \langle r^2 \rangle^{1/2} = \left(\frac{\int r^2 \rho(r) 4\pi r^2 dr}{\int \rho(r) 4\pi r^2 dr} \right)^{1/2}$$

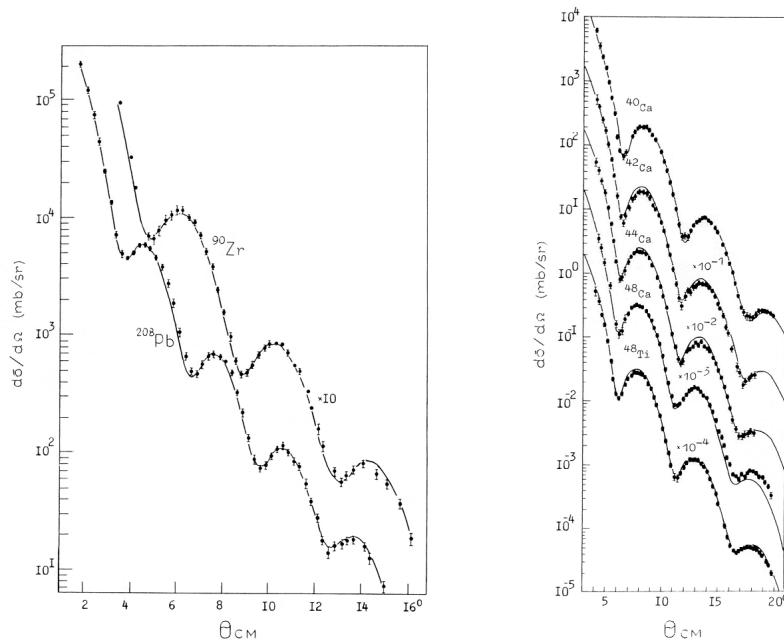
гало-ядра: кор + гало

Экспериментальный метод

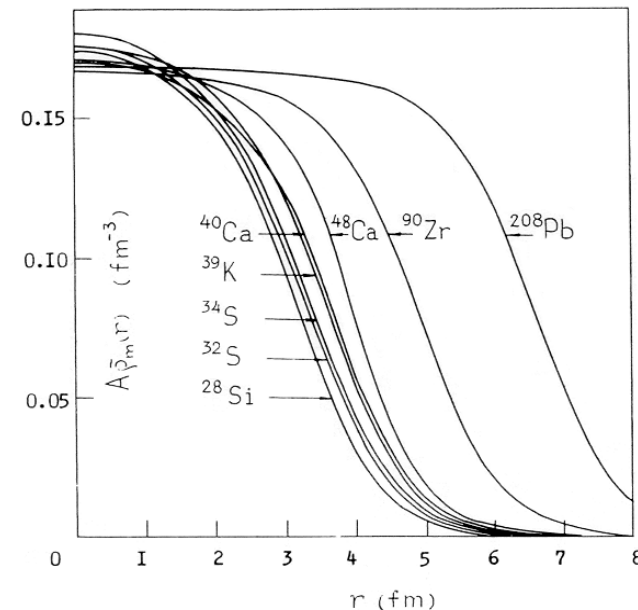
Упругое рассеяние протонов промежуточных энергий – известный метод исследования распределения ядерной материи в стабильных ядрах.

(G. Alkhazov et al., Phys. Rep. 42 (1978) 89)

измеренные дифференциальные сечения



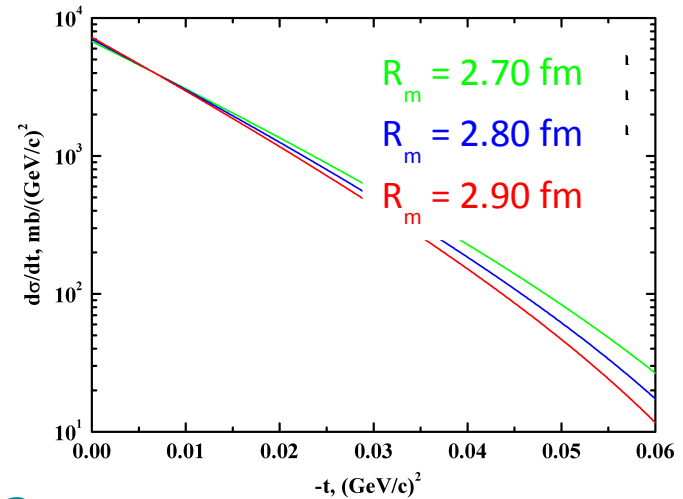
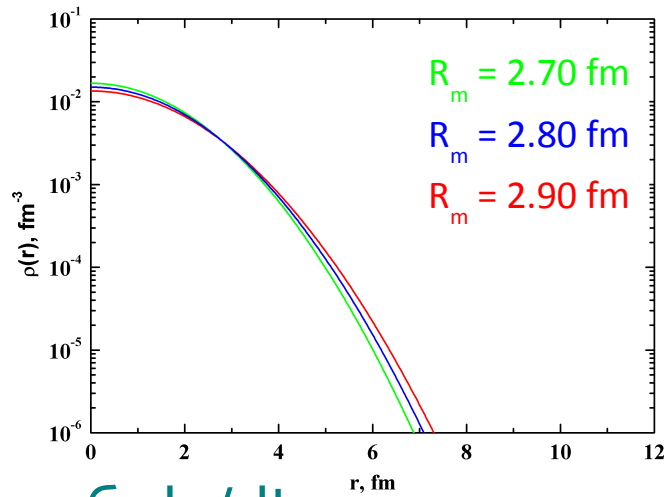
вычисленные распределения ядерного вещества



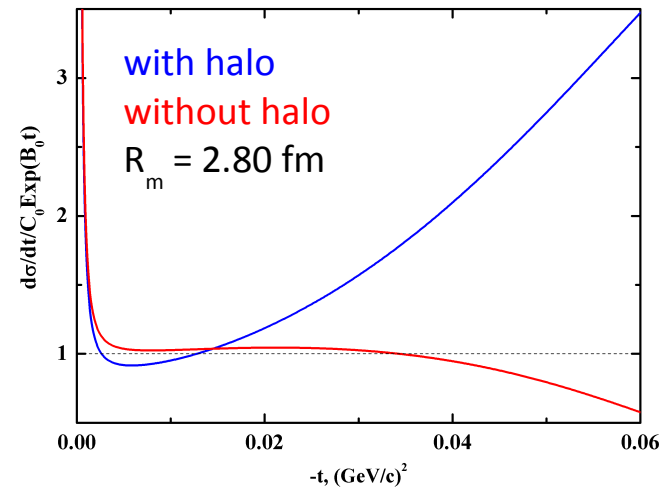
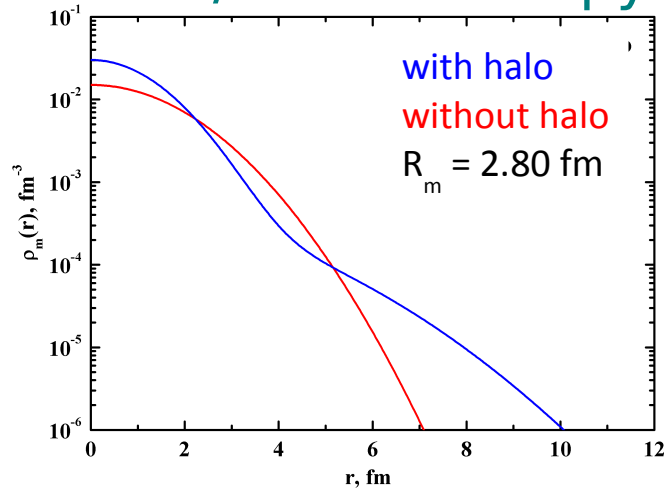
радиоактивные пучки => исследование экзотических ядер
(уже применено к исследованию богатых нейтронами изотопов He и Li)

Форма сечения и гало-структура

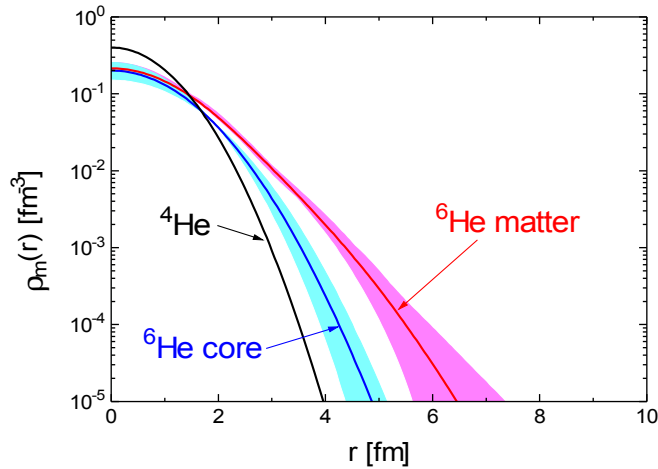
наклон $d\sigma/dt$ - радиус вещества R_m



изгиб $d\sigma/dt$ - гало-структура

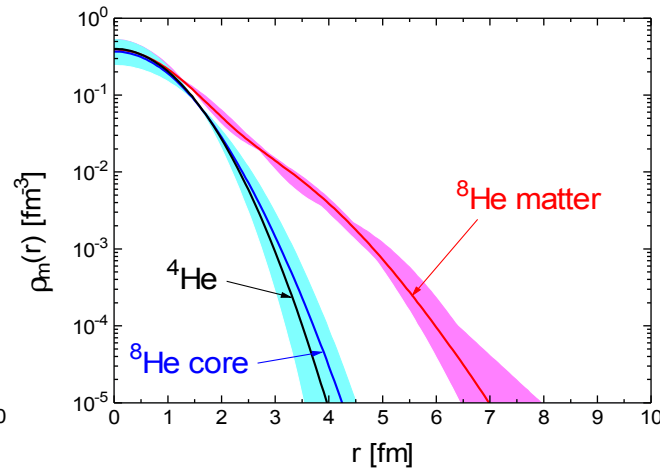


Предыдущие эксперименты



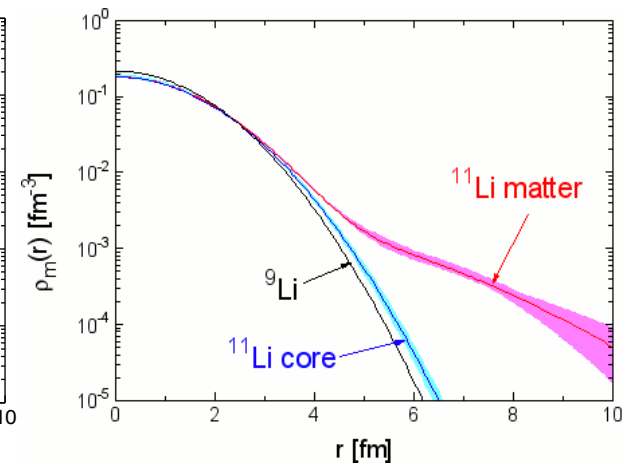
$$R_{\text{halo}} = 2.97 \pm 0.26 \text{ fm}$$

$$R_{\text{core}} = 1.88 \pm 0.12 \text{ fm}$$



$$R_{\text{halo}} = 3.08 \pm 0.10 \text{ fm}$$

$$R_{\text{core}} = 1.55 \pm 0.15 \text{ fm}$$



$$R_{\text{halo}} = 5.98 \pm 0.32 \text{ fm}$$

$$R_{\text{core}} = 2.52 \pm 0.02 \text{ fm}$$

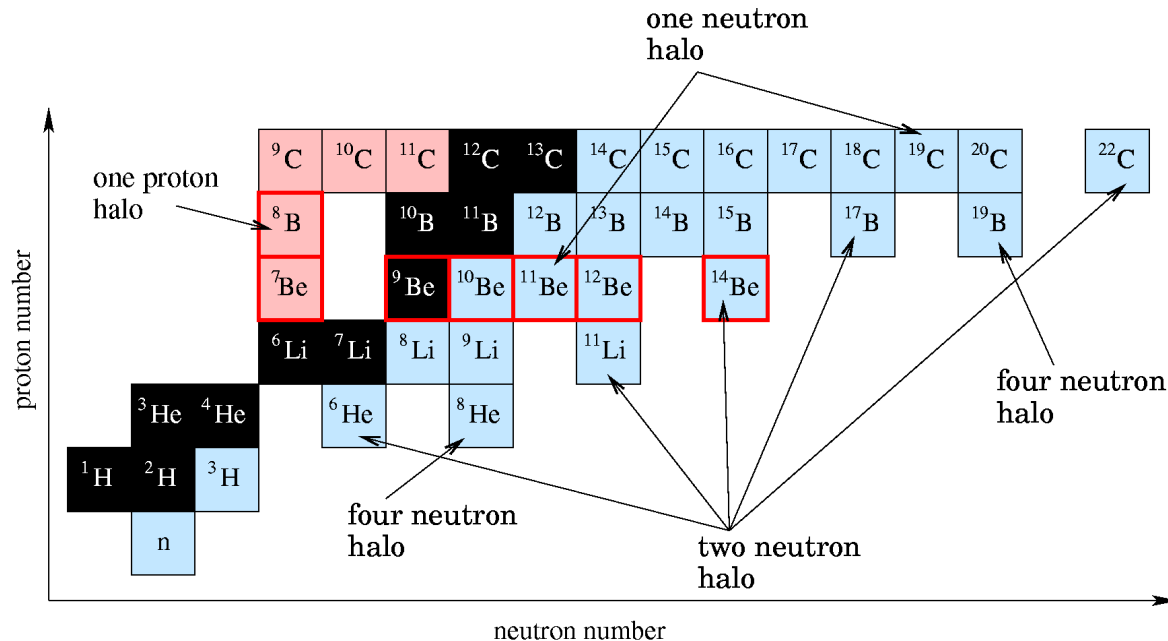
для сравнения: $R_{\text{He}}^4 = 1.49 \pm 0.03 \text{ fm}$, $R_{\text{Li}}^9 = 2.44 \pm 0.06 \text{ fm}$

- ${}^{6,8}\text{He}$ and ${}^{11}\text{Li}$: выраженная гало-структура

S. R. Neumaier et al., Nucl. Phys. A 712 (2002) 247; G. D. Alkharov et al., Nucl. Phys. A 712 (2002) 269

A. V. Dobrovolsky et al., Nucl. Phys. A 766 (2006) 1

Мотивация



2- (или 4-) нейтронное гало и кор из ${}^{12}\text{Be}$ (или ${}^{10}\text{Be}$) / shell model => распределение вещества



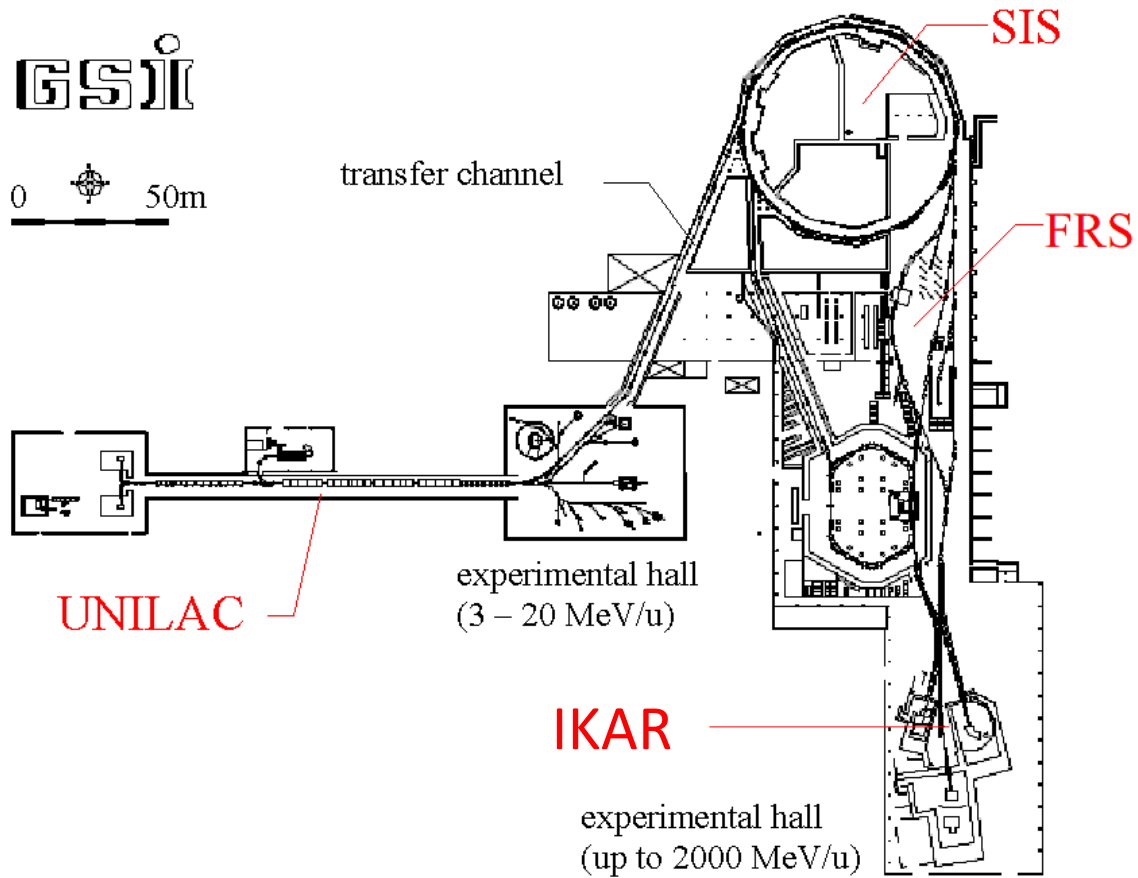
кор ${}^{14}\text{Be}$, нарушение оболочечной структуры, исчезновение $N=8$ => гало-структура



кандидат на 1p-гало

S_{17} -фактор в реакции захвата протона ${}^7\text{Be}(p,\gamma){}^8\text{B}$

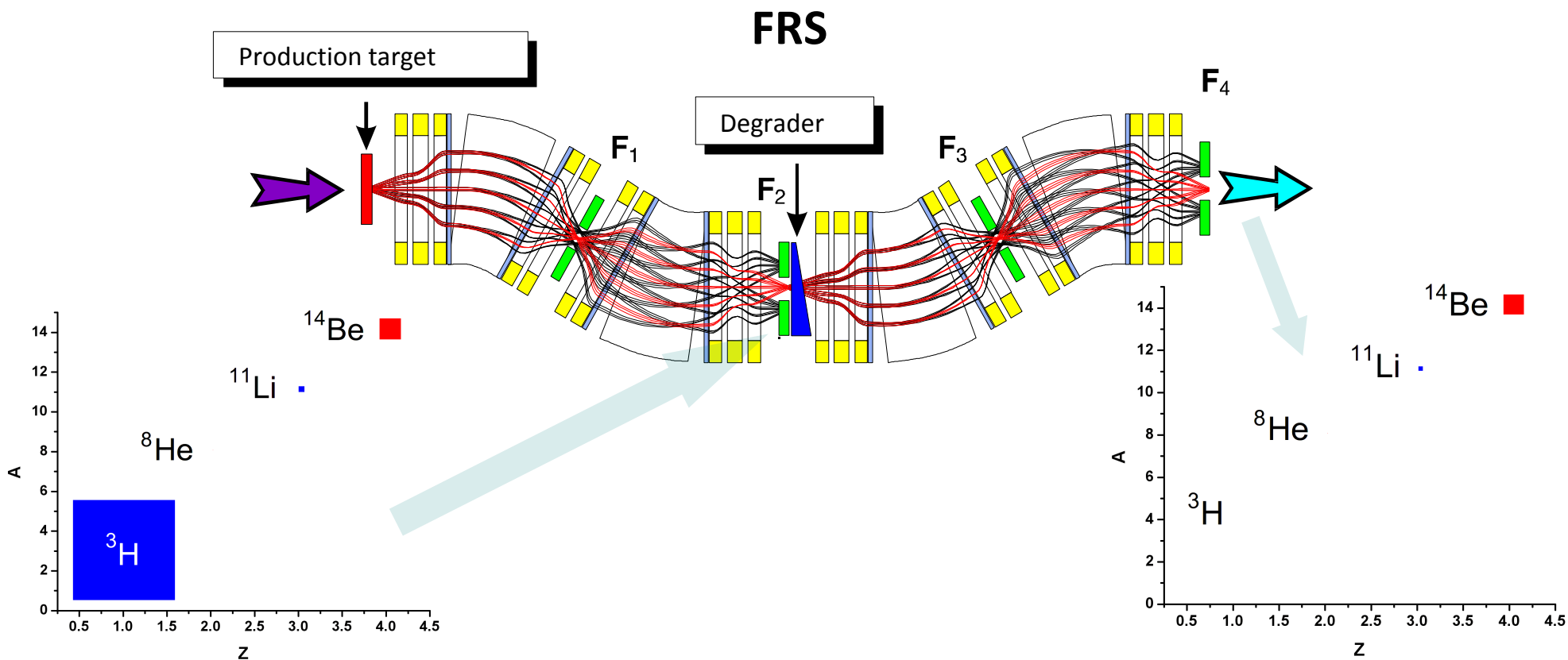
Схема GSI



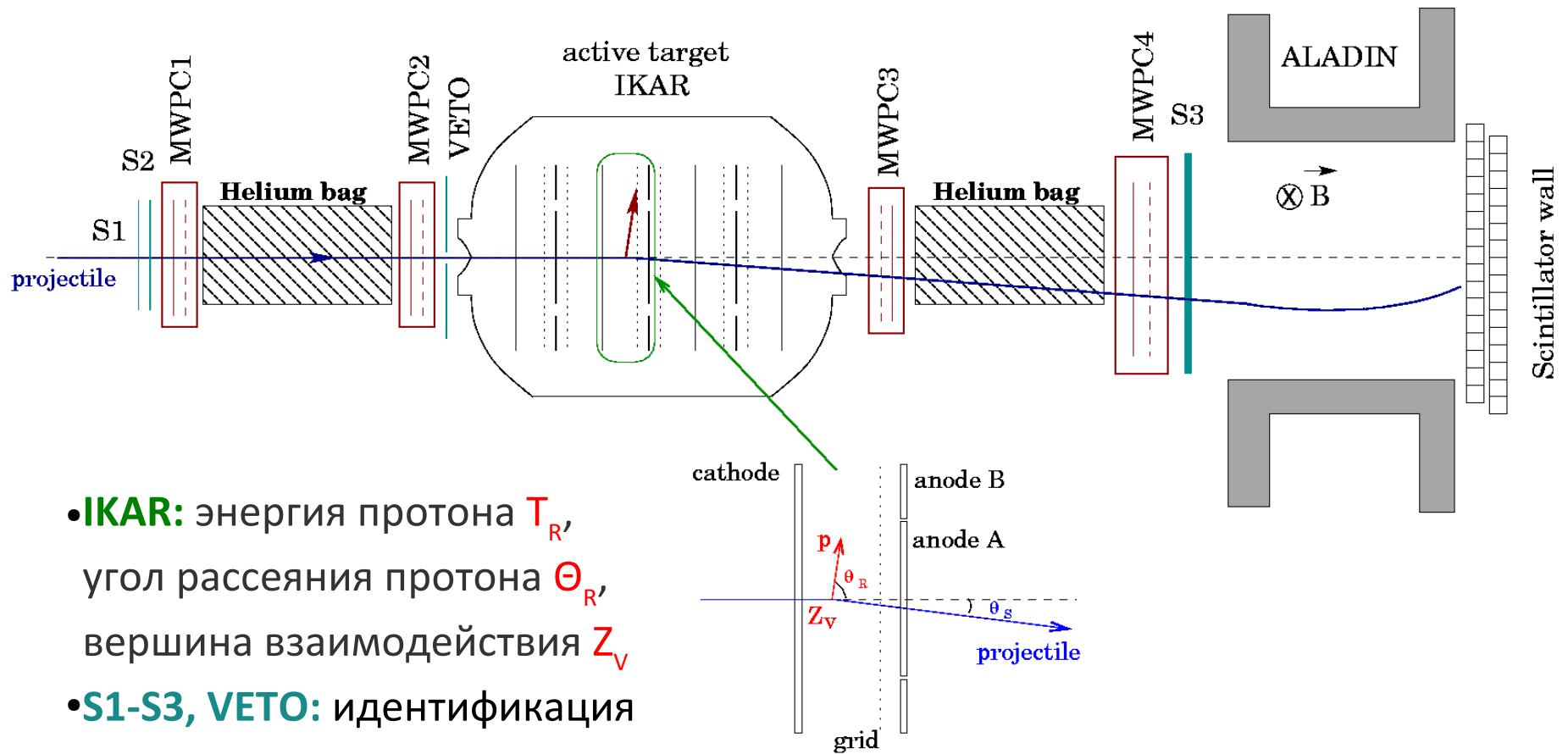
- UNILAC
линейный ускоритель
- SIS
синхротрон
- FRS
фрагмент-сепаратор

Фрагмент-сепаратор FRS

- первичный пучок: ^{12}C
- ^8B
- первичный пучок: ^{18}O
- ^{12}Be , ^{14}Be

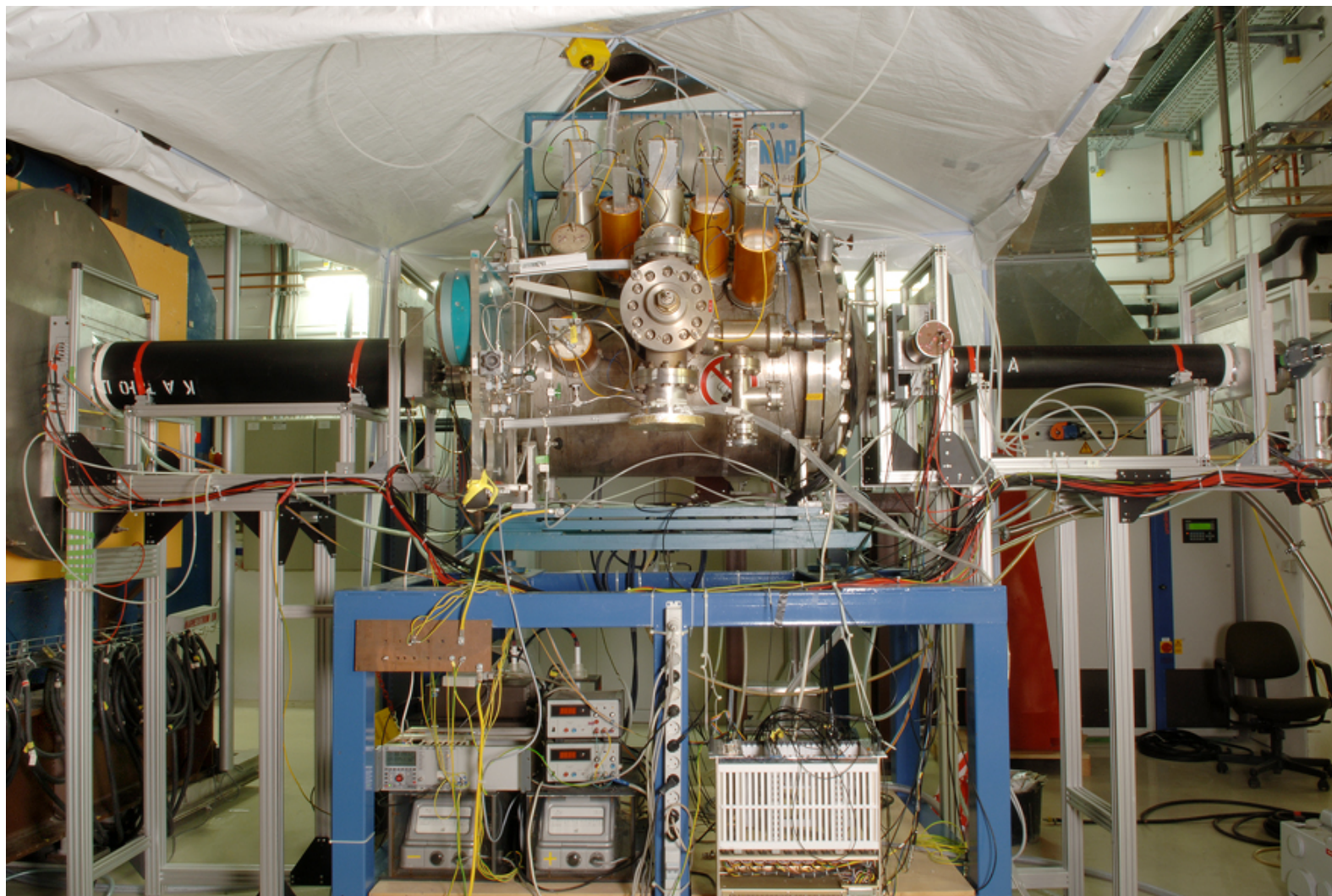


Экспериментальная установка



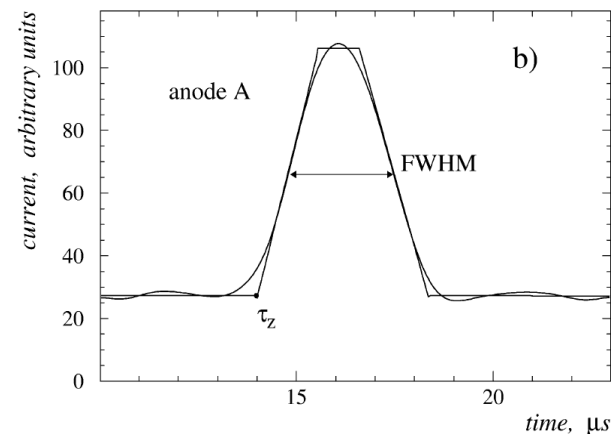
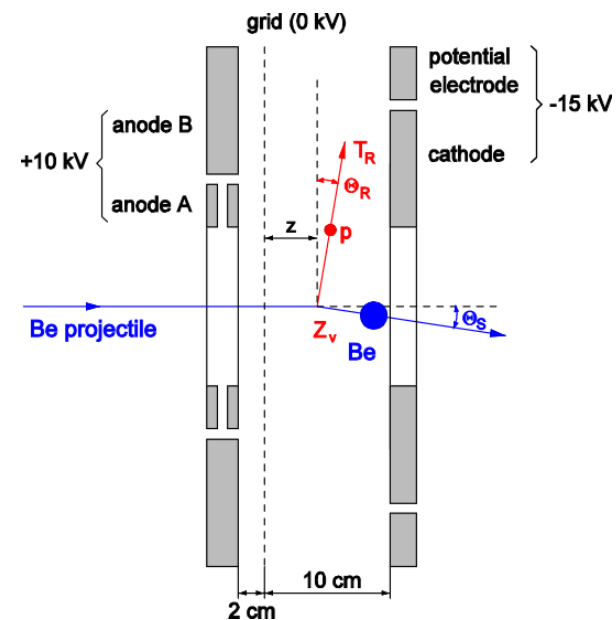
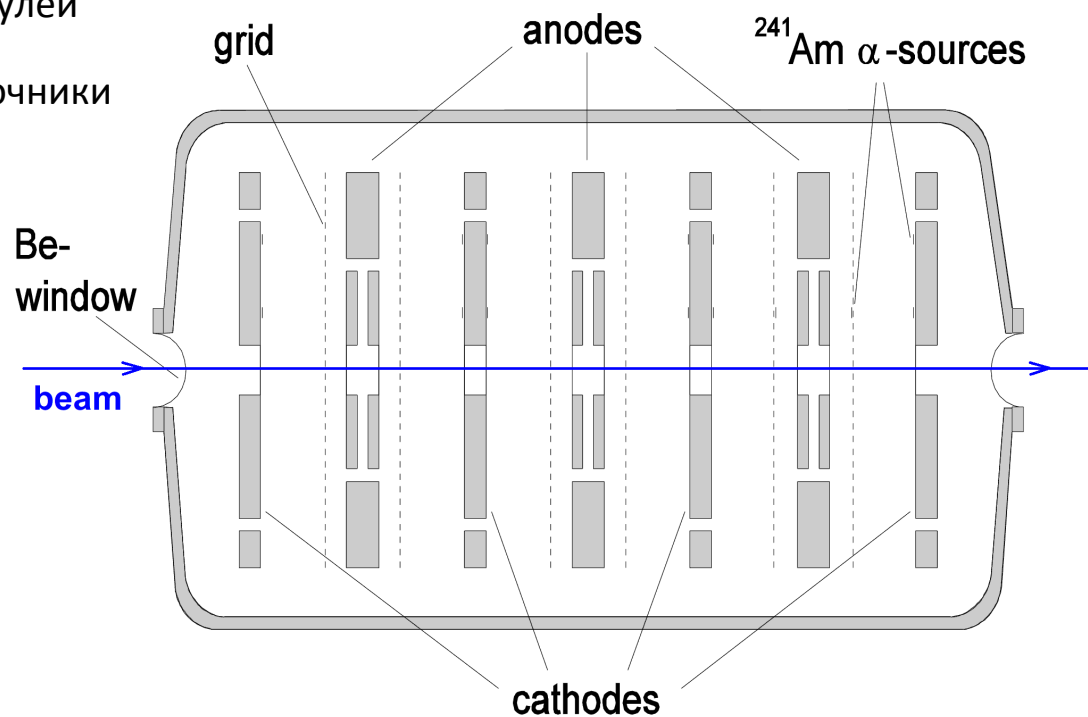
- **IKAR:** энергия протона T_R ,
 угол рассеяния протона θ_R ,
 вершина взаимодействия Z_V
- **S1-S3, VETO:** идентификация
 изотопа, триггер
- **MWPCs:** угол рассеяния налетающей частицы θ_S
- **ALADIN + сцинтиляционная стенка:** выделение продуктов распада

Экспериментальная установка

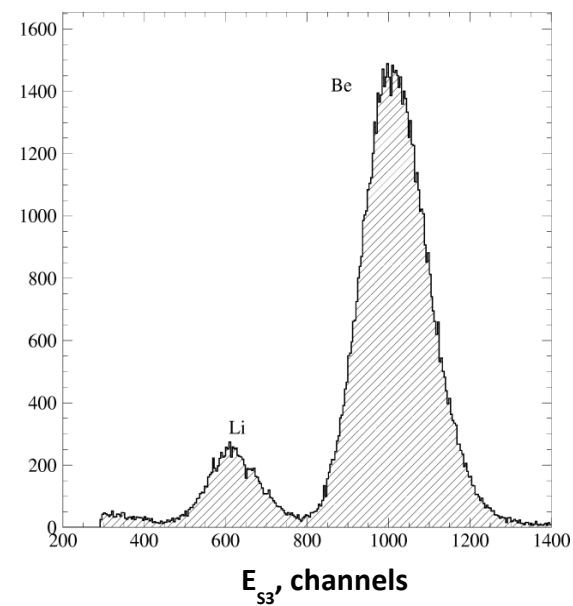
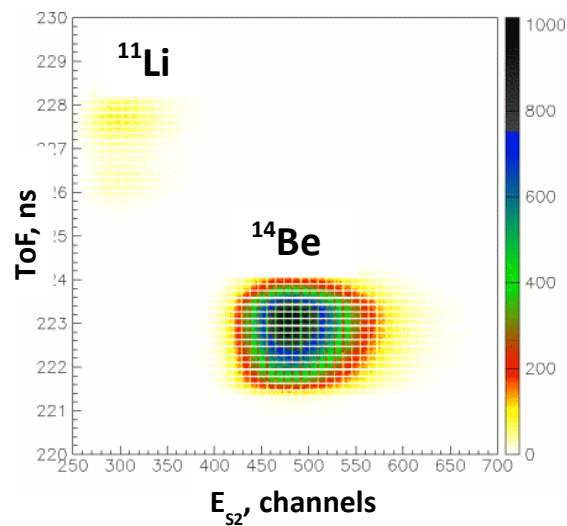
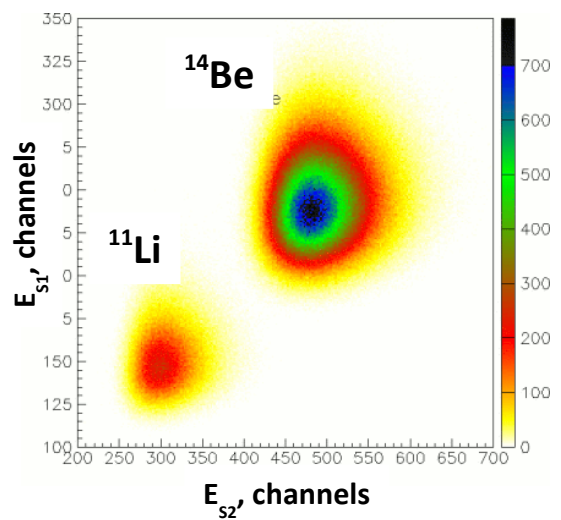


IKAR – активная мишень

- цилиндрически симметричный
- материал - сталь
- давление H_2 : 10 бар
- окна: Be, 0.5 мм
- 6 модулей
- α -источники



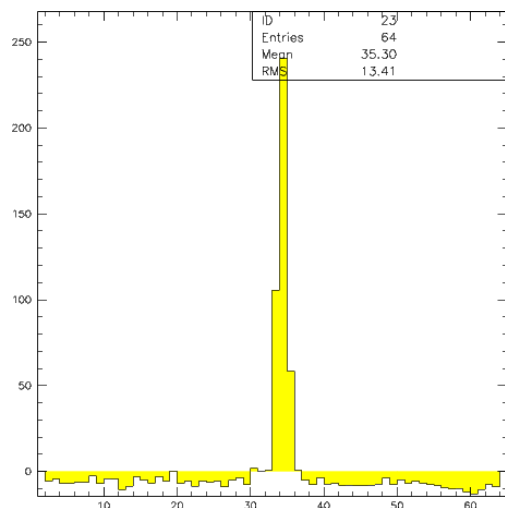
Выделение изотопов



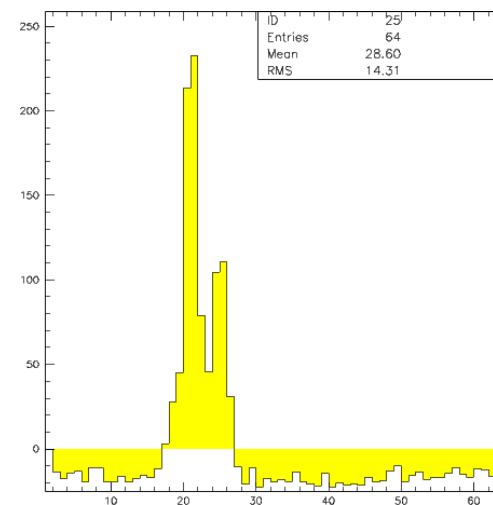
Пропорциональные камеры

3 камеры по 64 стрипа + **1** камера 86 стрипов,
предусилители GASSIPLEX, $\sigma=150$ мкм

«простой» сигнал:
средневзвешенное значение

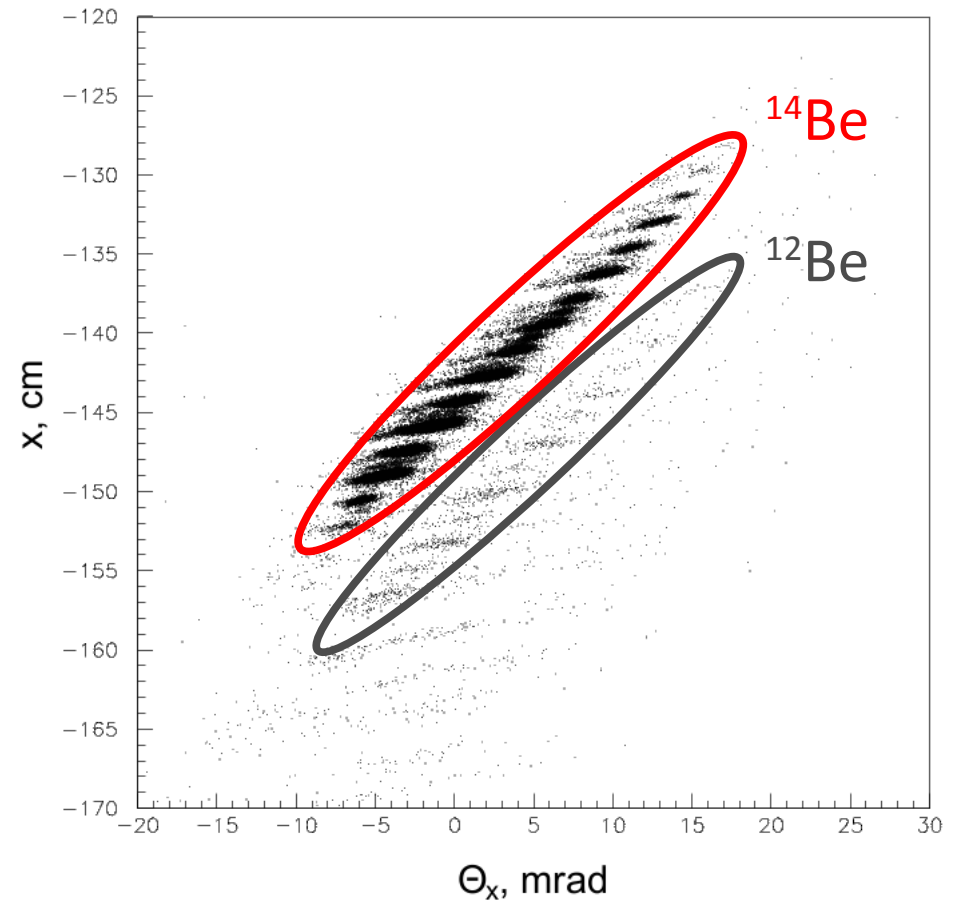
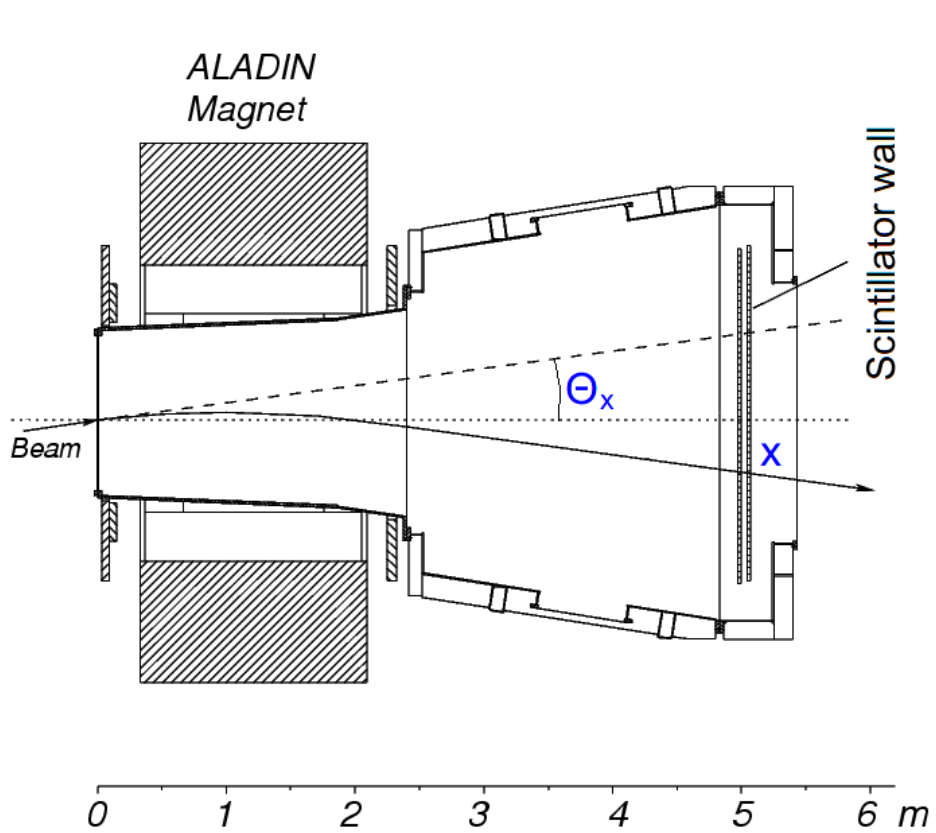


«сложный сигнал»: фитирование
функцией Гатти*



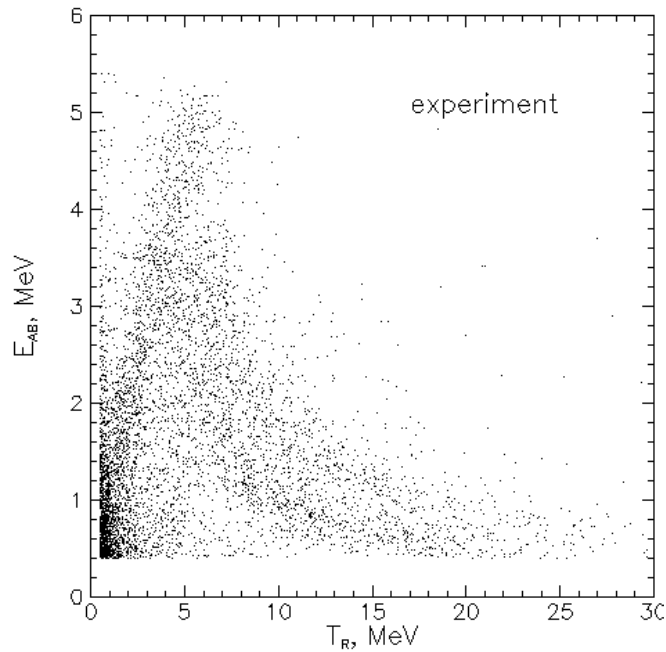
* E. Mathieson, J.S. Gordon NIM 227(1984) 227-282; G. Velichko, CMS NOTE 2000/022

Отделение фона

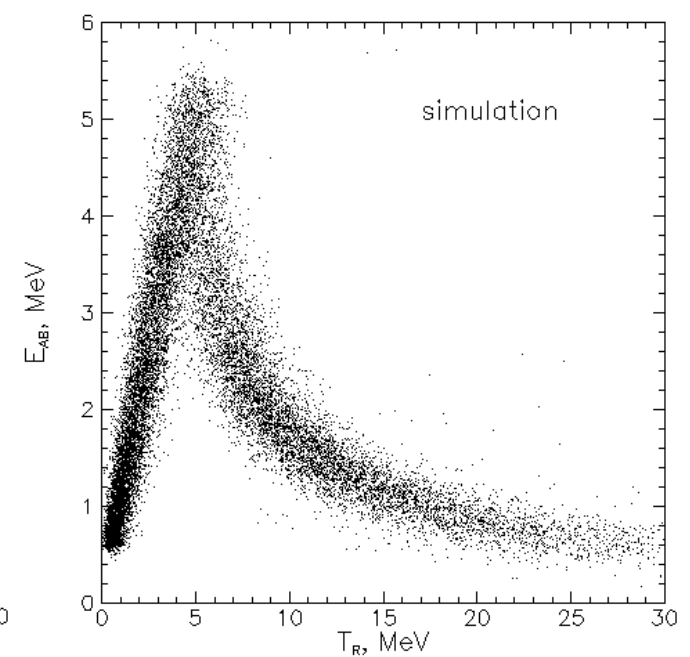
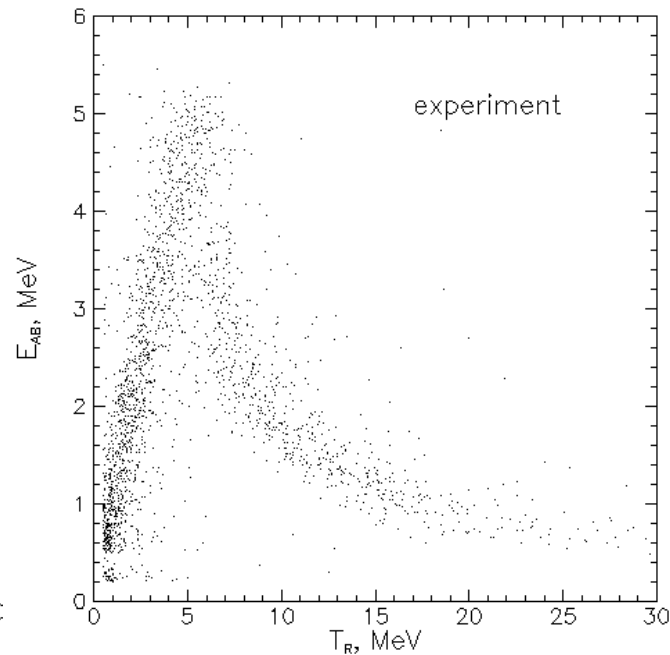


Выделение упругих событий

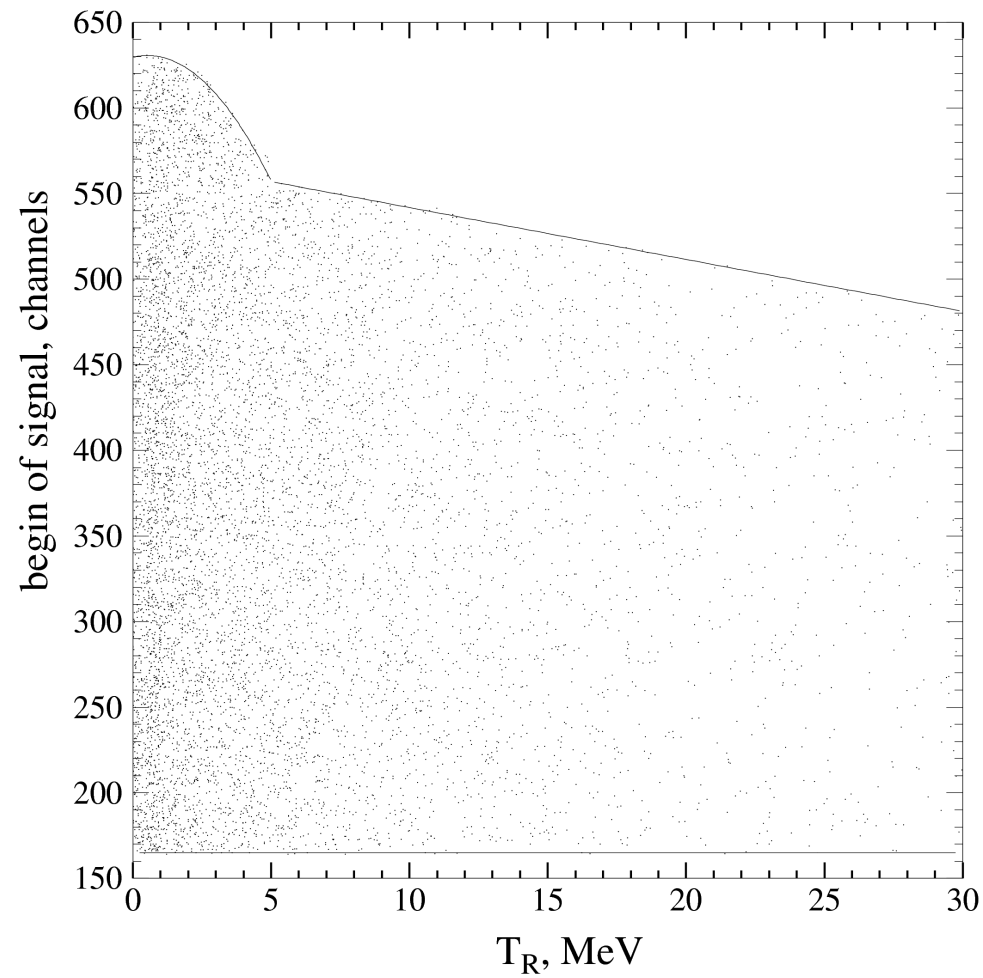
Без выделения
упругих событий



Выделены упругие
события



Эффективная длина мишени



Построение сечения

$$\frac{d\sigma}{dt} = \frac{N_{el}}{dt N_T M (1 - \epsilon)} \quad \text{mb}/(\text{GeV}/c)^2$$

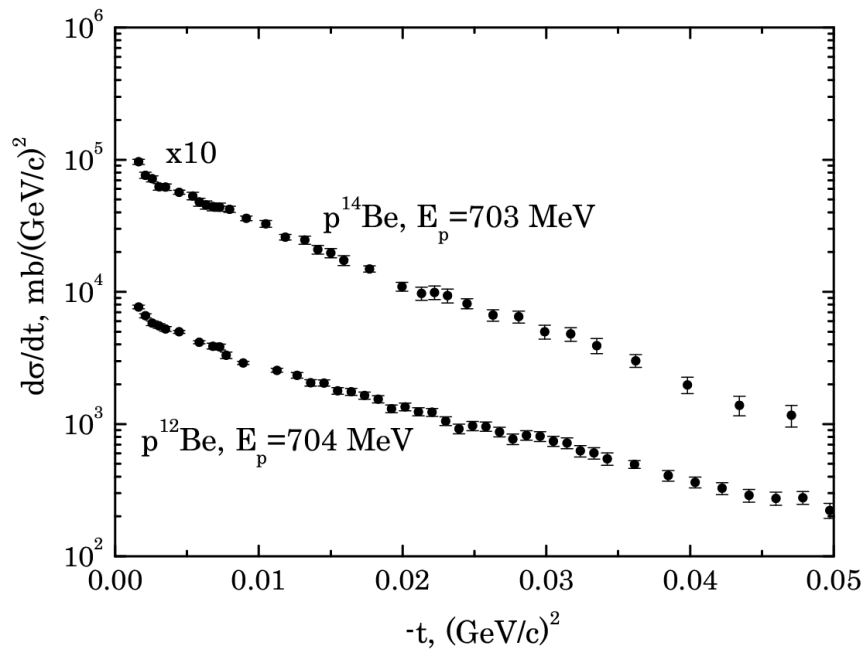
N_{el} – число упругих событий в интервале dt

N_T – толщина мишени, част/см²

M – число налетающих частиц

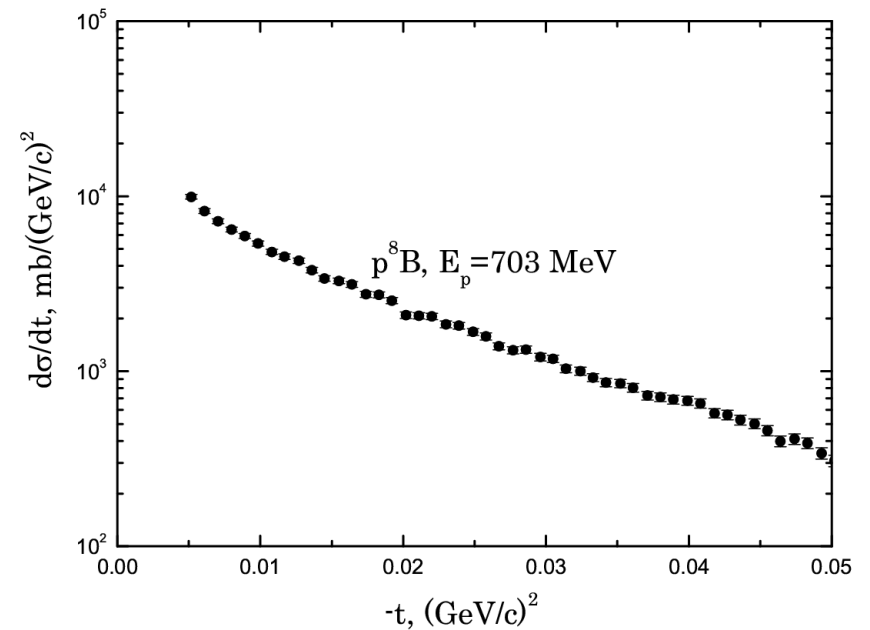
ϵ – поправка на число упругих событий, потерянных при отборе

Сечения рассеяния ^{12}Be , ^{14}Be и ^8B



$$\theta_{\text{cm}} = 0^\circ$$

$$\theta_{\text{cm}} = 10.75^\circ$$



$$\theta_{\text{cm}} = 0^\circ$$

$$\theta_{\text{cm}} = 11.5^\circ$$

Метод анализа

Глауберовская теория многократного рассеяния:

- Эйкональное и адиабатическое приближение
- Амплитуда рассеяния описывается суммой вкладов от одиночных столкновений с A нуклонов (учитывается многократное рассеяние)
- Используются амплитуды свободного p - p и p - n рассеяния
- Амплитуда рассеяния сворачивается с распределением плотности нуклонов

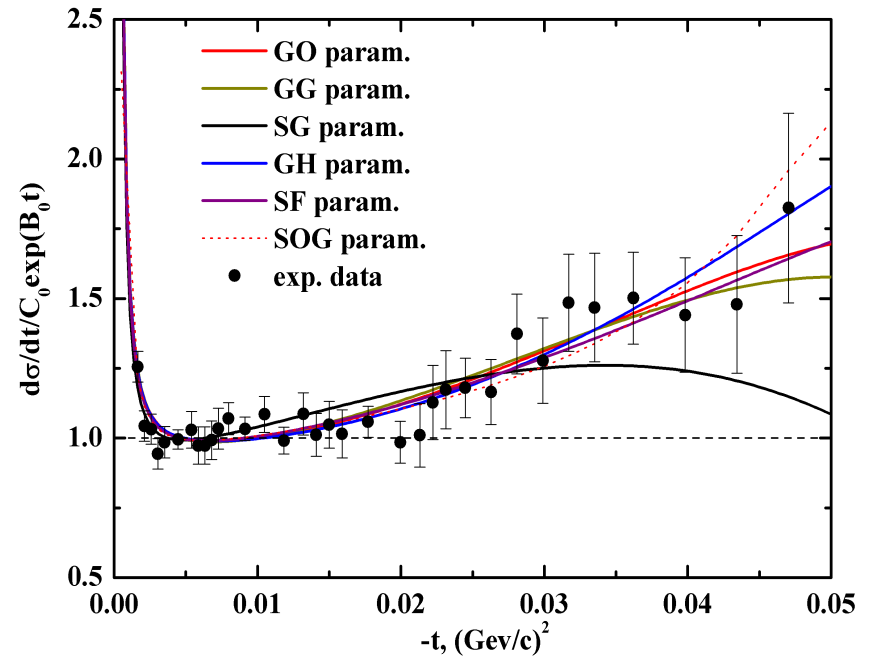
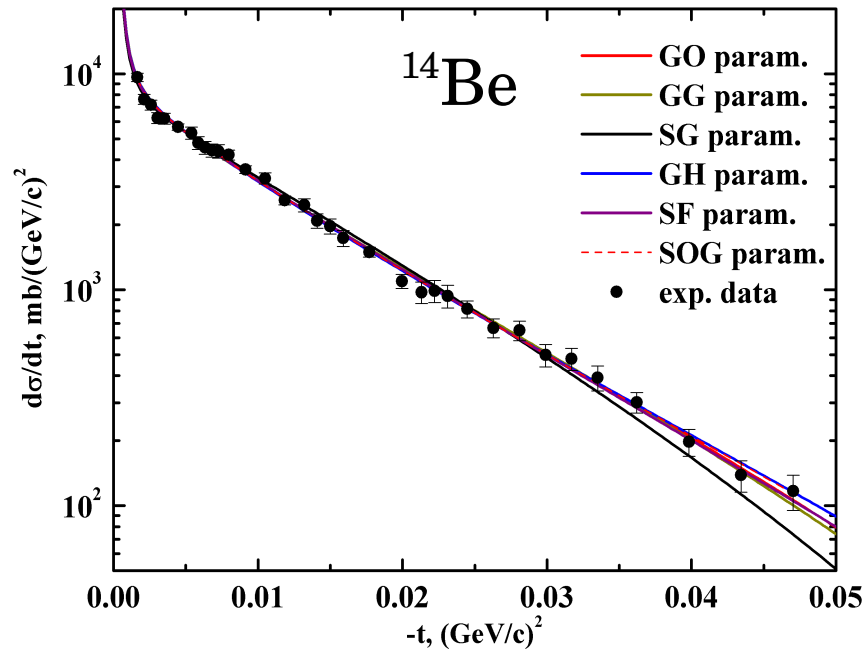
Параметризация плотности:

- Один Гауссиан: Single Gaussian (SG),
- Симметризованное распр. Ферми: Symmetrized Fermi (SF),
- *Гауссиан + гарм. осциллятор: Gaussian + Harmonic oscillator (GO),*
- *Два Гауссиана: Gaussian + Gaussian (GG),*
- Гауссиан + гало-функция: Gaussian + Halo function (GH),
- Сумма Гауссианов: Sum of Gaussians (SOG) – плотность представлена суммой функций Гаусса

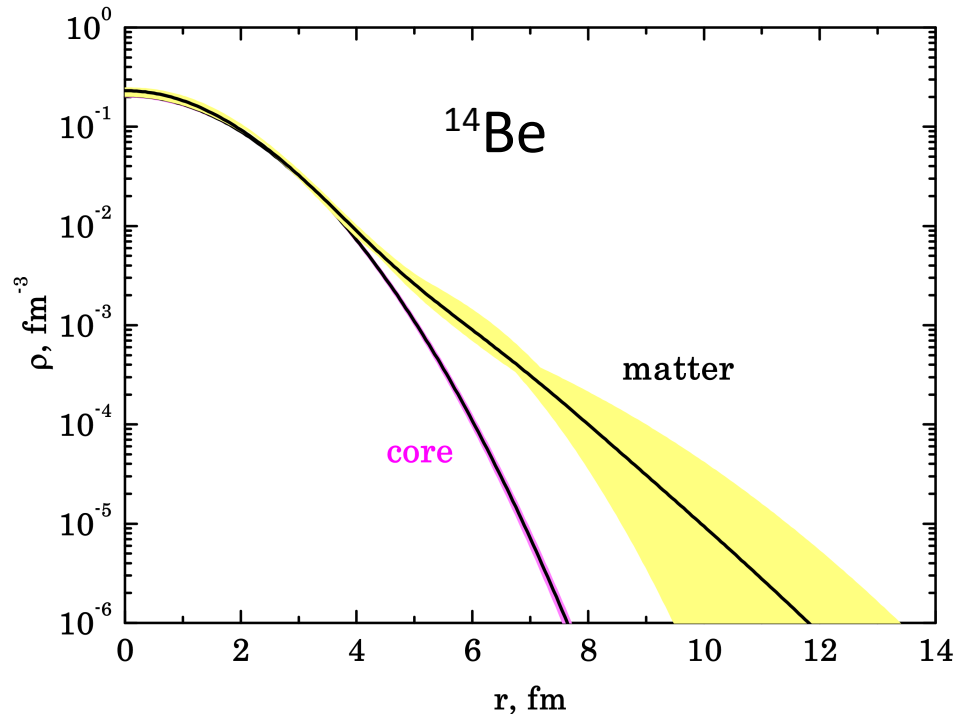
Анализ сечения ^{14}Be

Param.	R_m	R_c	R_h	χ^2
SG	2.86(3)	-	-	1,5
SF	3.06(8)	-	-	0,78
GG	3.20(13)	2.67(3)	5.39(54)	0,88
GO	3.15(10)	2.62(3)	5.30(37)	0,81
GH	3.10(6)	-	-	0,75
SOG	2.95(4)	-	-	0,85

$^{14}\text{Be} \rightarrow ^{12}\text{Be-кор} + 2 \text{ гало-нейтрона}$



Плотность вещества ^{14}Be



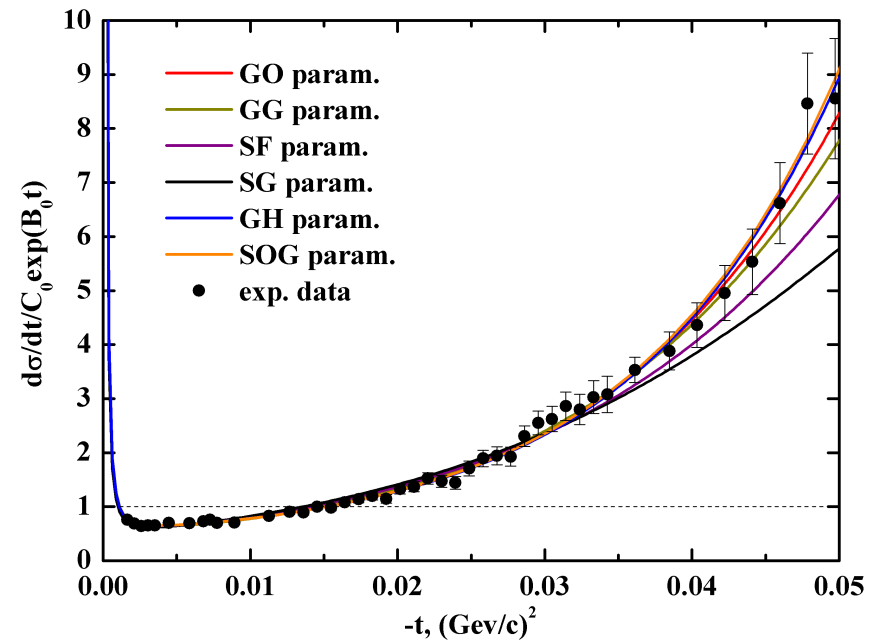
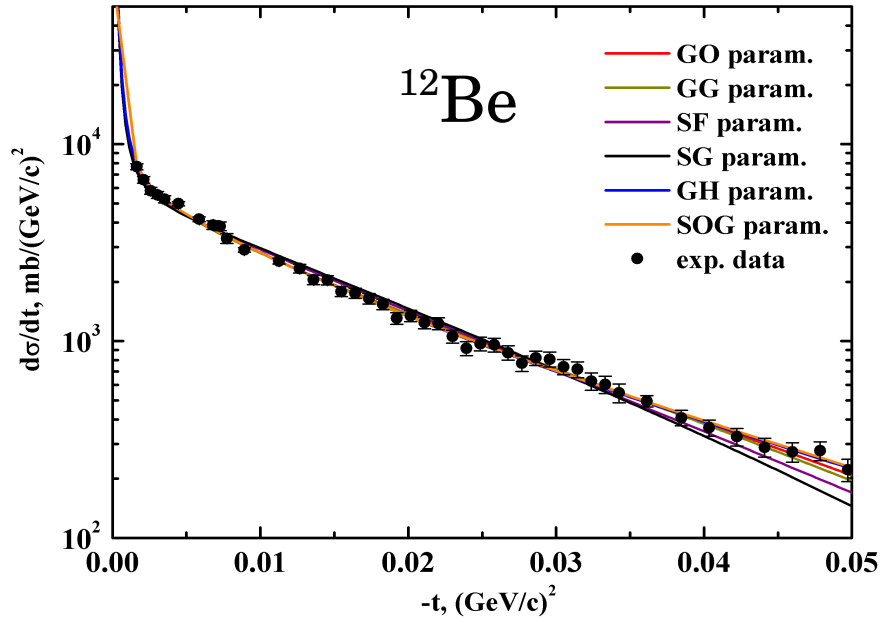
$$R_{\text{rms}} = 3.11 \pm 0.14 \text{ fm}$$

- ^{14}Be : выраженная гало-структура
- невозможно определить число нейтронов в гало (2 или 4)

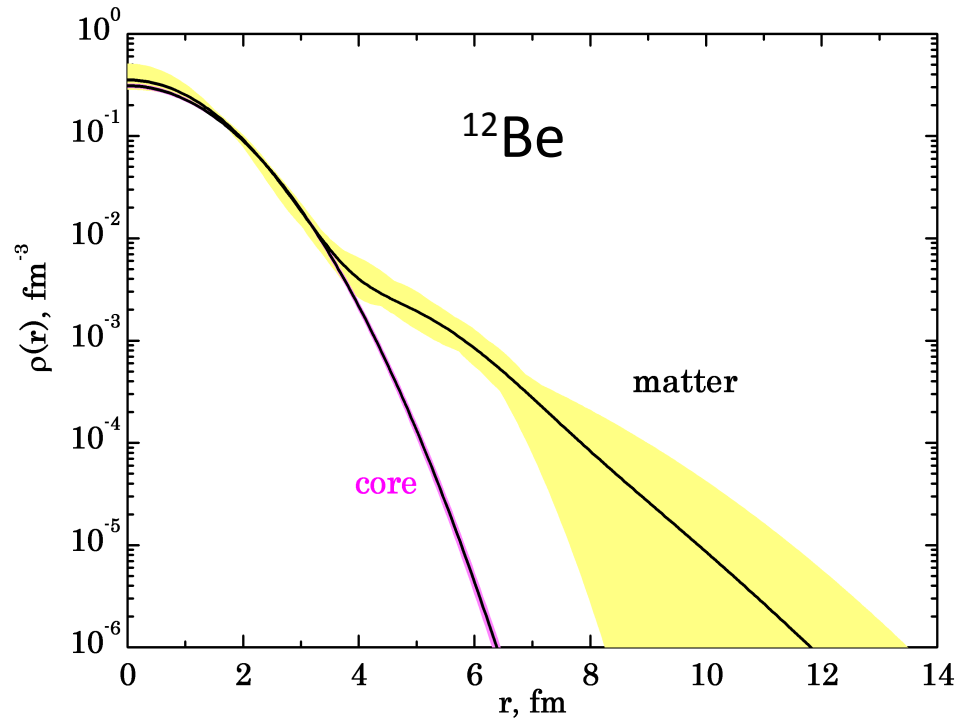
Анализ сечения ^{12}Be

Param.	R_m	R_c	R_h	χ^2
SG	2.43(2)	-	-	3,02
SF	2.55(9)	-	-	1,76
GG	3.00(13)	2.20(2)	5.47(40)	0,9
GO	2.91(9)	2.14(2)	5.28(26)	0,81
GH	2.78(5)	-	-	0,79
SOG	2.80(5)	-	-	1

$^{12}\text{Be} \rightarrow ^{10}\text{Be-кор} + 2 \text{ гало-нейтрона}$



Плотность вещества ^{12}Be

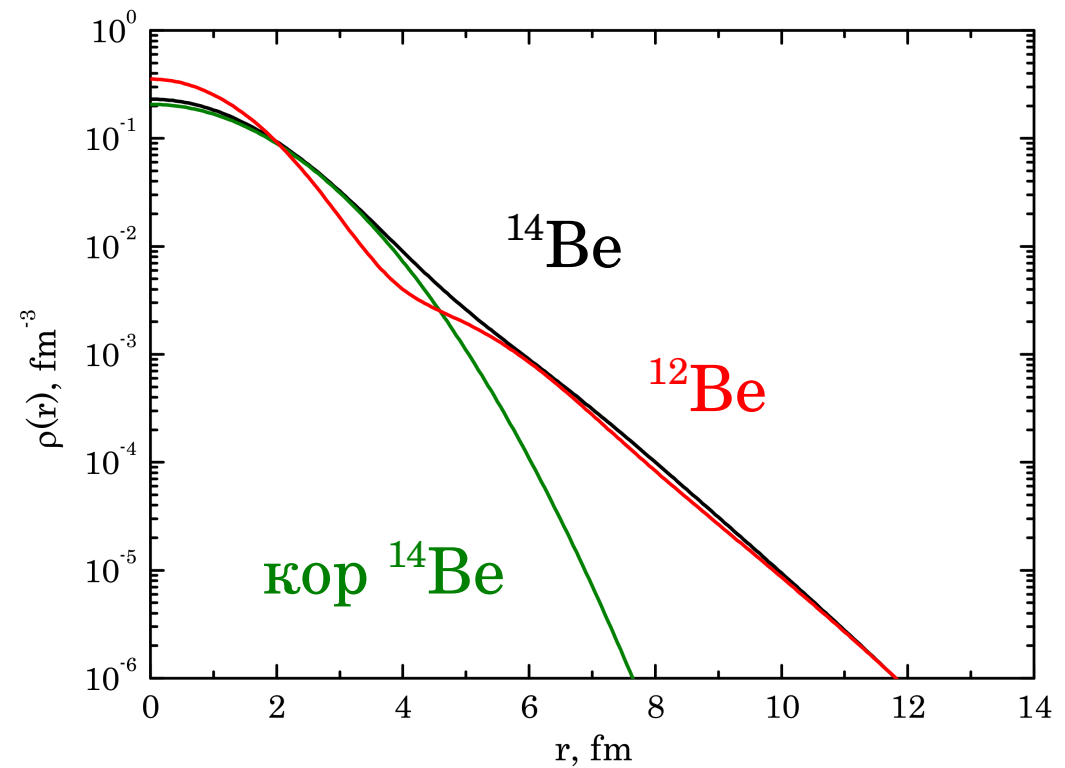


$$R_{\text{rms}} = 2.82 \pm 0.12 \text{ fm}$$

- ^{12}Be : расширенное распределение вещества

Сравнение ^{12}Be и кора ^{14}Be

- Структура свободного ядра ^{12}Be отличается от структуры кора ^{14}Be

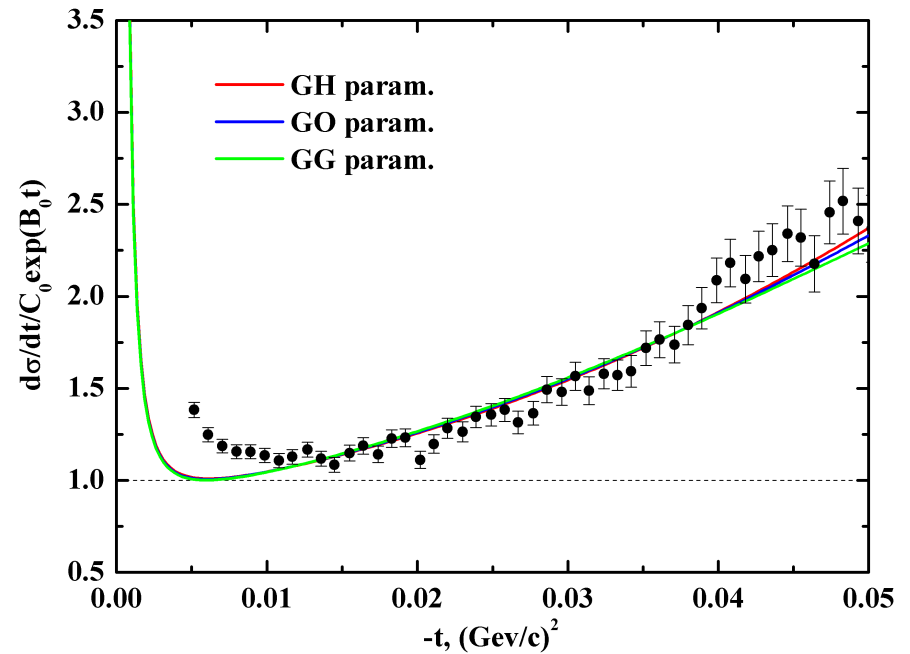
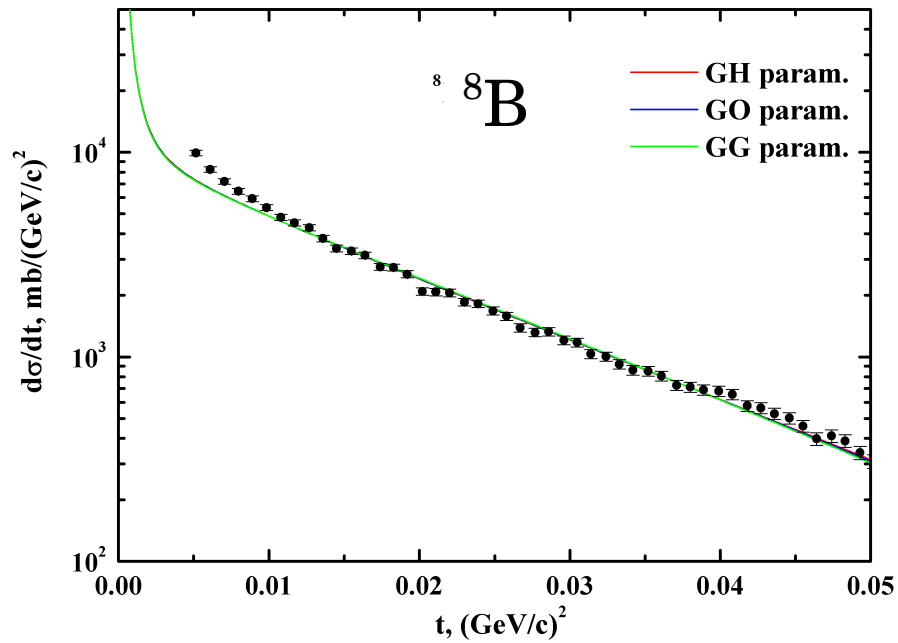


Анализ сечения ^8B

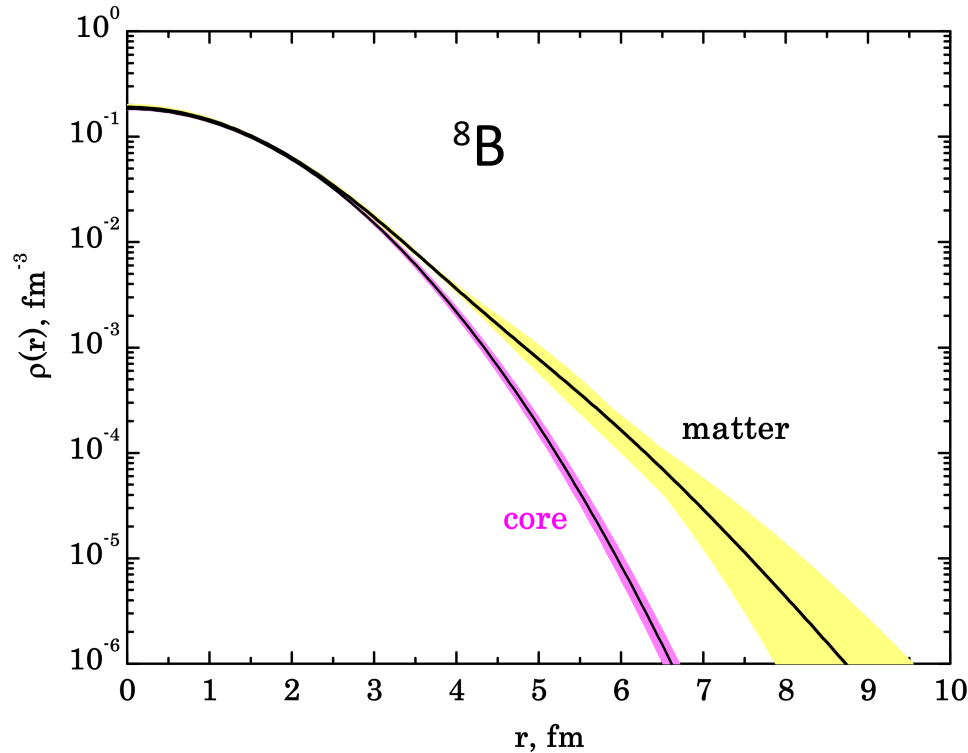
Param.	R_m	R_c	R_h	χ^2
GG	2.57(5)	2.35(1)	3.78(29)	7,85
GH	2.60(3)	-	-	7,7
GO	2.59(4)	2.30(1)	4.06(22)	7,72

$^8\text{B} \rightarrow ^7\text{Be-кор} + 1 \text{ гало-протон}$

(предварительные данные)



Плотность вещества ^8B



$$R_{\text{rms}} = 2.60 \pm 0.26 \text{ fm}$$

- первое исследование протонного гало методом упругого рассеяния
- подтверждена гало-структура ^8B

Радиусы кора и гало

GG, GO и GE: R_c , R_h

Изотоп	R_m , fm	R_c , fm	R_h , fm
^{14}Be	3.11	2.65	5.40
^{12}Be	2.82	2.18	5.41
^8B	2.60	2.33	3.96

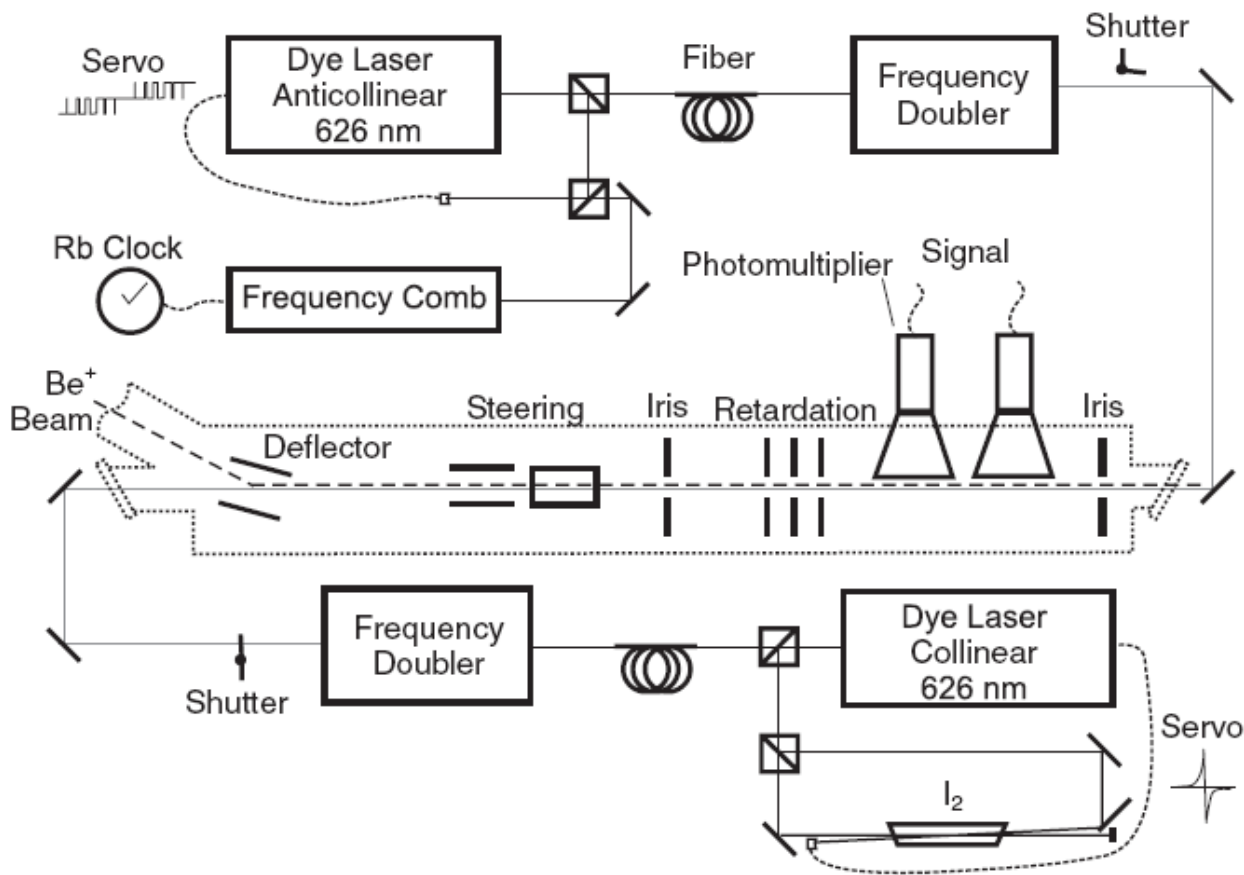
Другие эксперименты

ИЗОТОП	ЭТОТ ЭКСПЕРИМЕНТ	сечение взаимодействия σ_I		сечение реакции σ_R
		Tanihata et al.	Suzuki et al.	Liatard et al.
^{14}Be	3.11 (14)	3.11 (38) 3.16 (38)	3.10 (15) 2.94 (9)	3.36 (19)

ИЗОТОП	ЭТОТ ЭКСПЕРИМЕНТ	сечение взаимодействия σ_I		сечение реакции σ_R
		Tanihata et al.		Liatard et al.
^{12}Be	2.82 (12)	2.57 (5) 2.59 (6)		2.62 (7)

ИЗОТОП	ЭТОТ ЭКСПЕРИМЕНТ	сечение взаимодействия σ_{int}			распределение импульсов	
		Tanihata et al.	Al Khalili et al.	Obuti et al.	Smedberg et al.	Negoita et al.
^8B	2.60 (26)	2.39 (4)	2.50 (4)	2.43 (3)	2.58-2.60	2.6 (1)

Зарядовый радиус изотопов Be



Изотоп Be	r [fm]
7	2.647 (17)
9	2.519 (12)*
10	2.357 (18)
11	2.463 (16)

*Reference isotope: J. A. Jansen *et al.*, Nuclear Physics A **188** (1972) 337

W. Nörtershäuser *et. al*, Phys. Rev. Lett. 102 (2009) 062503

Заключение

- Измерены дифференциальные сечения упругого рассеяния протонов на изотопах $^{12,14}\text{Be}$ и ^8B в обратной кинематике.
- Анализ в рамках глауберовской теории многократного рассеяния показывает широкое распределение ядерного вещества в изотопах $^{12,14}\text{Be}$ и ^8B .
Определены следующие rms-радиусы:
 - ^{12}Be : $R_{\text{rms}} = 2.82 \pm 0.12 \text{ fm}$
 - ^{14}Be : $R_{\text{rms}} = 3.11 \pm 0.14 \text{ fm}$
 - ^8B : $R_{\text{rms}} = 2.60 \pm 0.26 \text{ fm}$ (протонное гало впервые исследовано этим методом).
- Результаты хорошо совпадают с измерениями, выполненными другими методами для изотопов ^{14}Be и ^8B . В случае ^{12}Be наблюдается некоторое расхождение.
- Полученные экспериментальные данные представляют новую информацию о структуре ядра и дают основу для проверки теоретических моделей.

Коллаборация IKAR

F. Aksouh¹, G. D. Alkhazov², K.-H. Behr¹, A. Bleile¹, A. Brünle¹,
L. Chulkov³, A. V. Dobrovolsky², P. Egelhof¹, H. Geissel¹,
G. Ickert¹, S. Ilieva¹, A. Inglessi¹, R. Kanungo¹,
A. V. Khanzadeev², O. Kiselev¹, G. A. Korolev², X. C. Le¹,
Y. Litvinov¹, W. Niebur¹, C. Nociforo¹, D. M. Seliverstov²,
L. O. Sergeev², V. A. Volkov³, A. A. Vorobyov², H. Weick¹,
V. I. Yatsoura², A. A. Zhdanov²

¹ Gesellschaft für Schwerionenforschung (GSI), 64291 Darmstadt, Germany

² Petersburg Nuclear Physics Institute (PNPI), 188300 Gatchina, Russia

³ Kurchatov Institute, 123182 Moscow, Russia