

**Исследование структуры
легких экзотических ядер
методом упругого протонного рассеяния
в инверсной кинематике**

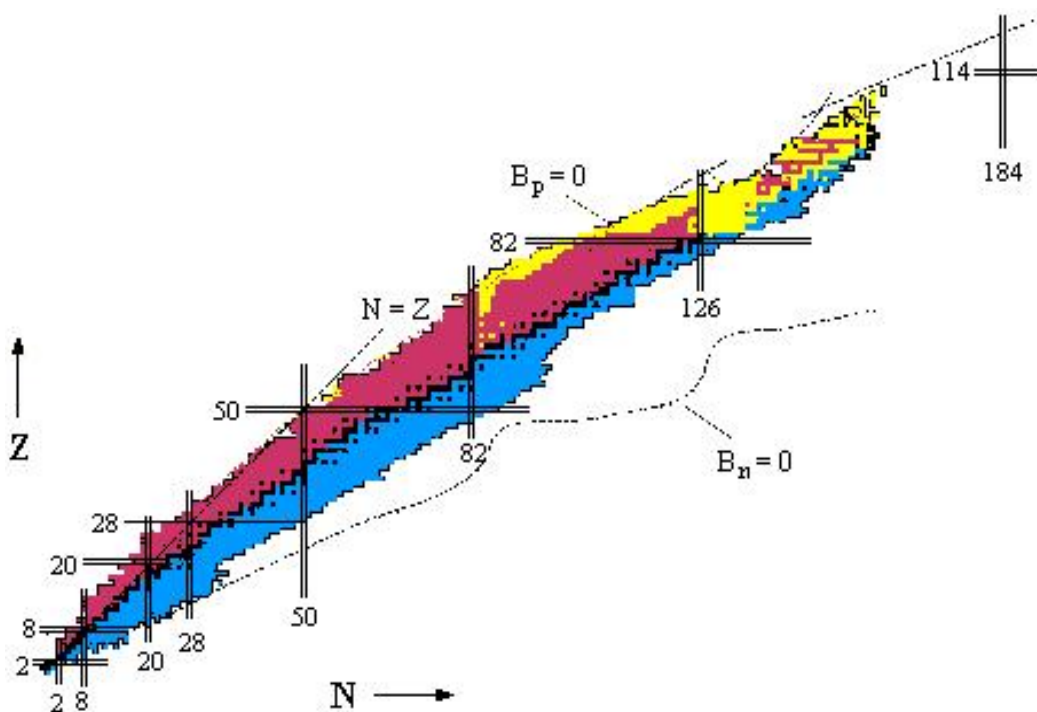
**А.В. Добровольский,
Лаборатория физики элементарных частиц
ОФВЭ ПИЯФ**

**Семинар ОФВЭ
13 июня 2017**

Исследование структуры легких экзотических ядер методом упругого рассеяния в инверсной кинематике

- 1. Упругое протонное рассеяние как метод изучения структуры ядра**
 - чувствительность к форме распределения ядерной материи
- 2. Экспериментальный метод и анализ результатов измерений**
 - идея эксперимента:
 - ионизационная камера ИКАР как активная мишень
 - основные этапы обработки данных
 - анализ сечений в рамках теории Глаубера-Ситенко
- 3. Результаты**
 - радиусы ядер (размеры кора и гало)
 - распределение ядерной материи

Размеры и форма - основные характеристики атомных ядер



Ядра вблизи долины стабильности

$$N/Z = 0.98 + 0.015 \cdot A^{2/3}$$

$$\rho_m(r) = \frac{\rho_0}{1 + \text{Exp}\left(\frac{r - R_0}{\delta}\right)}$$

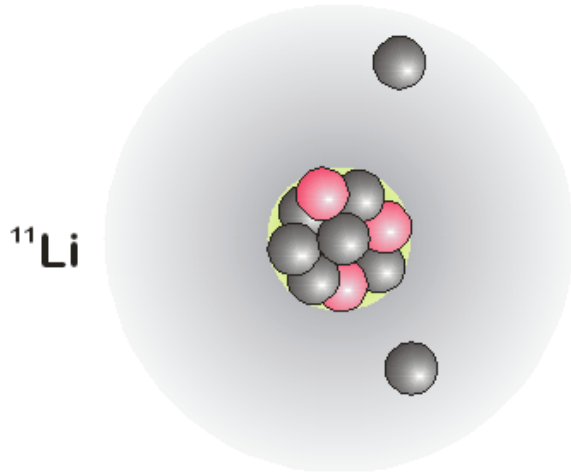
$$\rho_0 \approx 0.17 \text{ нуклон/фм}^3$$

$$R \approx 1.2 \cdot A^{1/3} \text{ фм}$$

$$\delta \approx 0.6 \text{ фм для всех ядер}$$

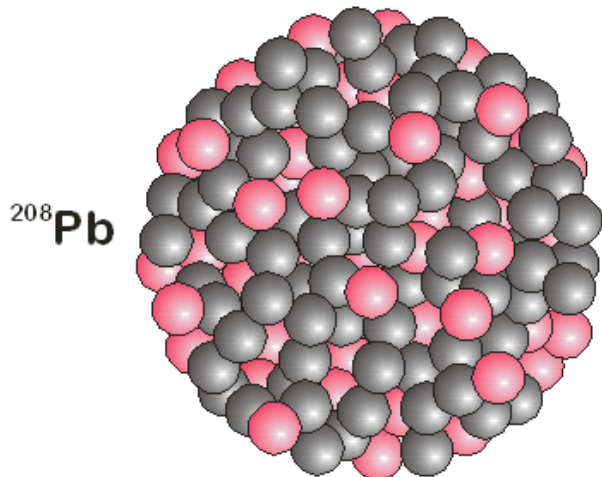
Ядра с гало – новый феномен в изучении структуры ядра

Распределение ядерной материи



Ядра с большим избытком нейтронов:

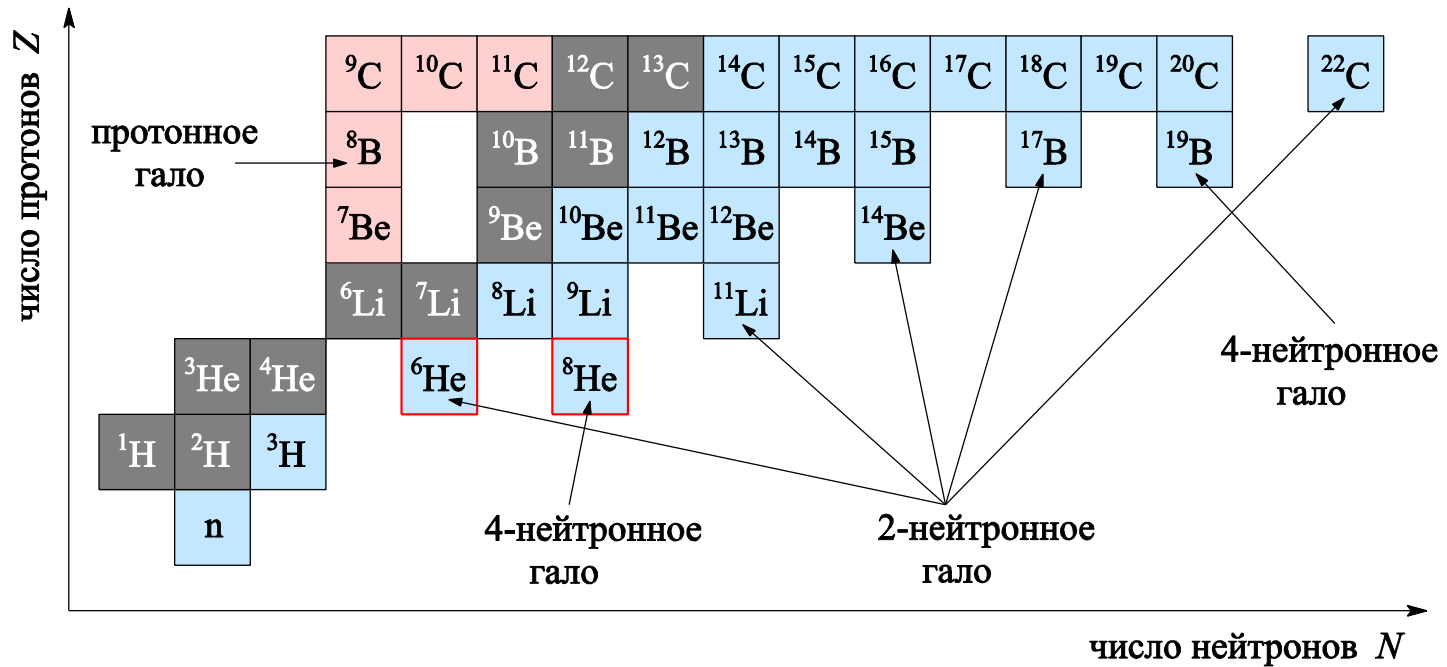
нейтронное гало: $\rho_n \gg \rho_p$



Стабильные ядра:

нейтроны и протоны
распределены примерно одинаково

Исследование структуры легких экзотических ядер методом упругого рассеяния протонов в инверсной кинематике



**Исследование структуры легких экзотических ядер
методом упругого рассеяния протонов
в инверсной кинематике**

**В серии экспериментов, выполненных в GSI - S105, S247, S358 -
измерены дифференциальные сечения упругого рассеяния
протонов на ядрах:**

${}^4\text{He}, {}^6\text{He}, {}^8\text{He}$

${}^6\text{Li}, {}^8\text{Li}, {}^9\text{Li}, {}^{11}\text{Li}$

${}^{12}\text{Be}, {}^{14}\text{Be}, {}^7\text{Be}, {}^8\text{B}$

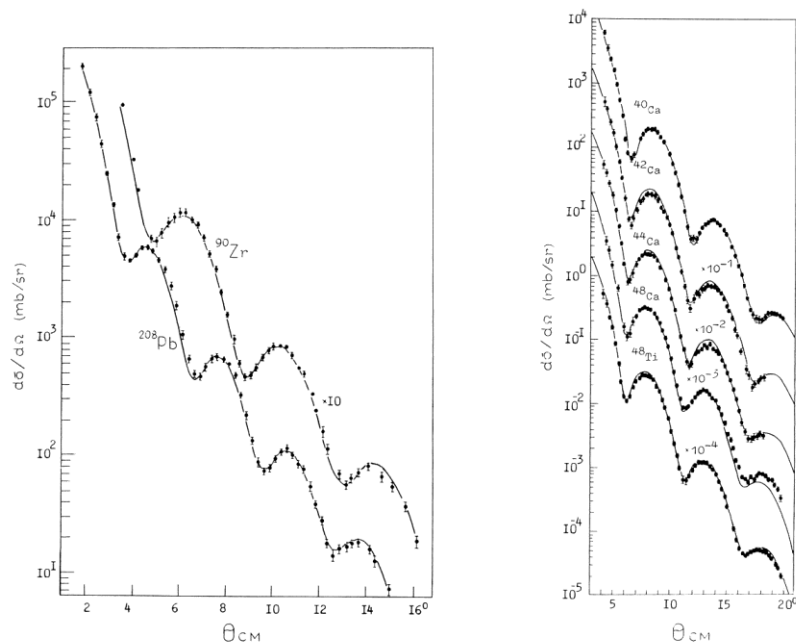
${}^{12}\text{C}, {}^{14}\text{C}, {}^{15}\text{C}, {}^{16}\text{C}, {}^{17}\text{C}$

**и найдены параметры распределения ядерной материи
для этих ядер**

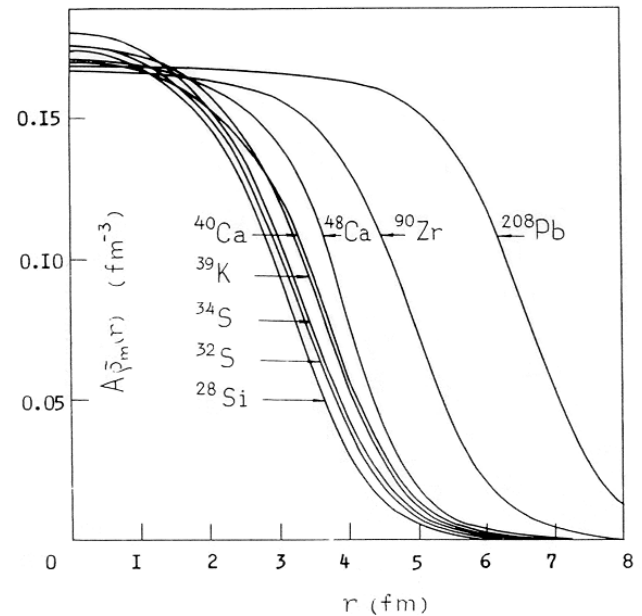
Упругое рассеяние протонов на ядрах при энергии 1 ГэВ

надежный метод изучения распределения ядерной материи
(G.D. Alkhazov, S.L. Belostotski, A.A. Vorobyov, Phys. Rep. 42 (1978) 89)

Измеренные дифференциальные
сечения

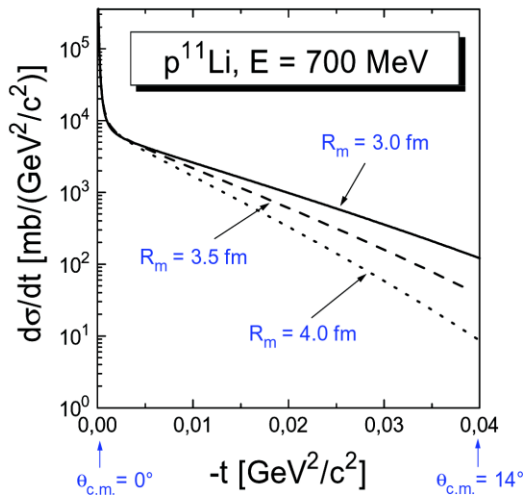
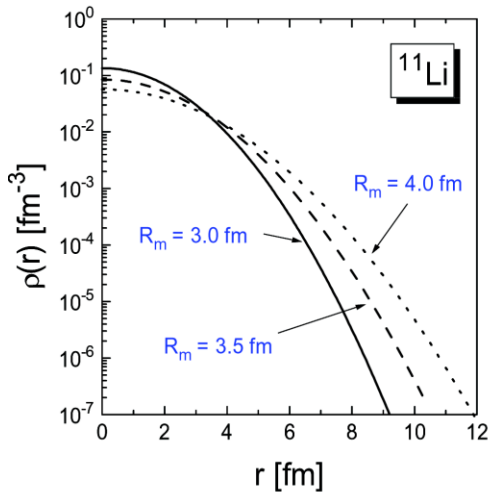


Полученные распределения
ядерной материи

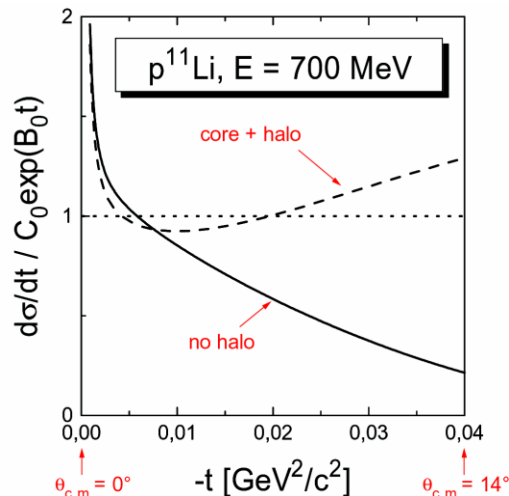
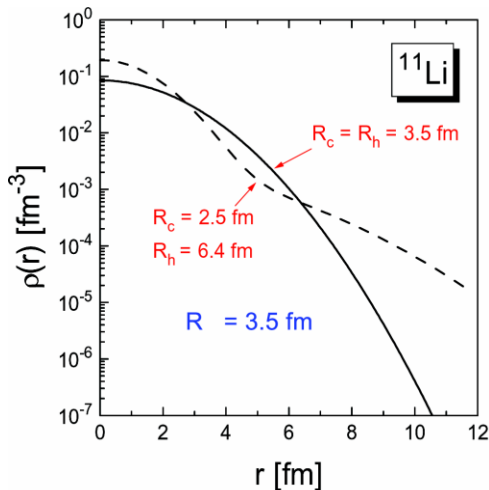


пучки радиоактивных изотопов \Rightarrow изучение экзотических ядер

Чувствительность дифференциального сечения к форме распределения ядерной материи

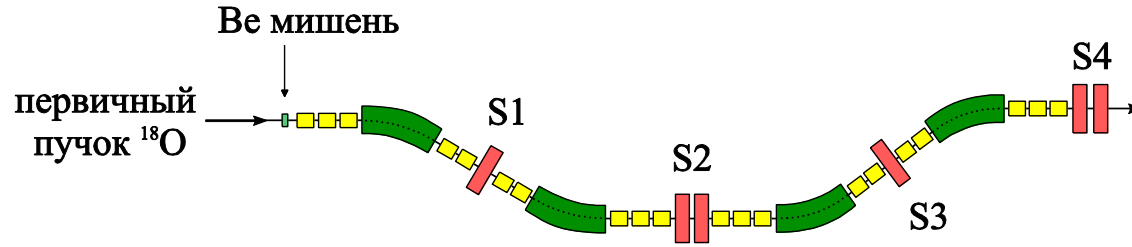


наклон $d\sigma/dt \rightarrow$ радиус материи R_m



кривизна $\log(d\sigma/dt) \rightarrow$ наличие гало

Пучок



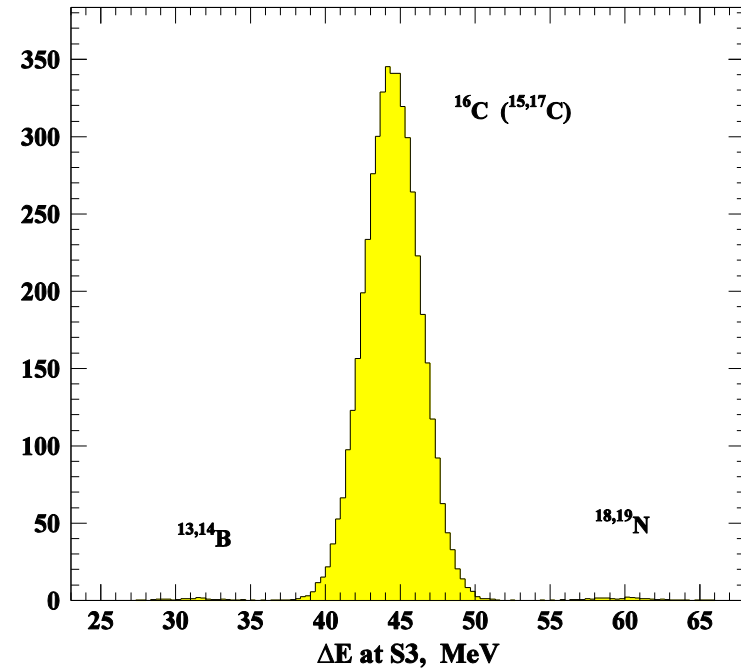
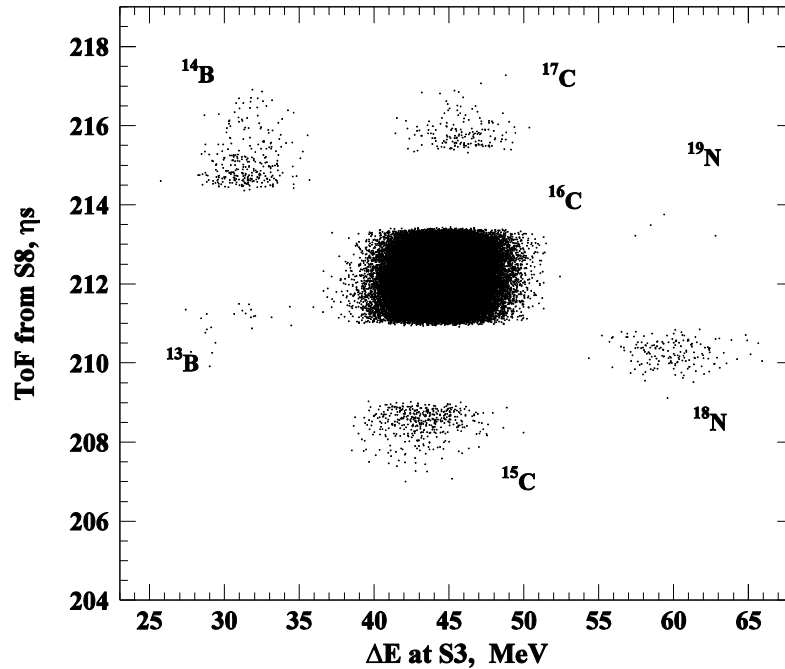
- поворотный магнит
- фокусирующая линза
- область фокусировки

S1 – 1^й предварительный фокус

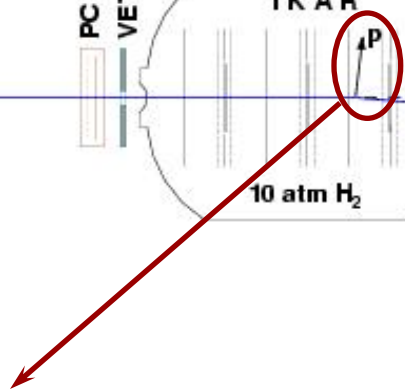
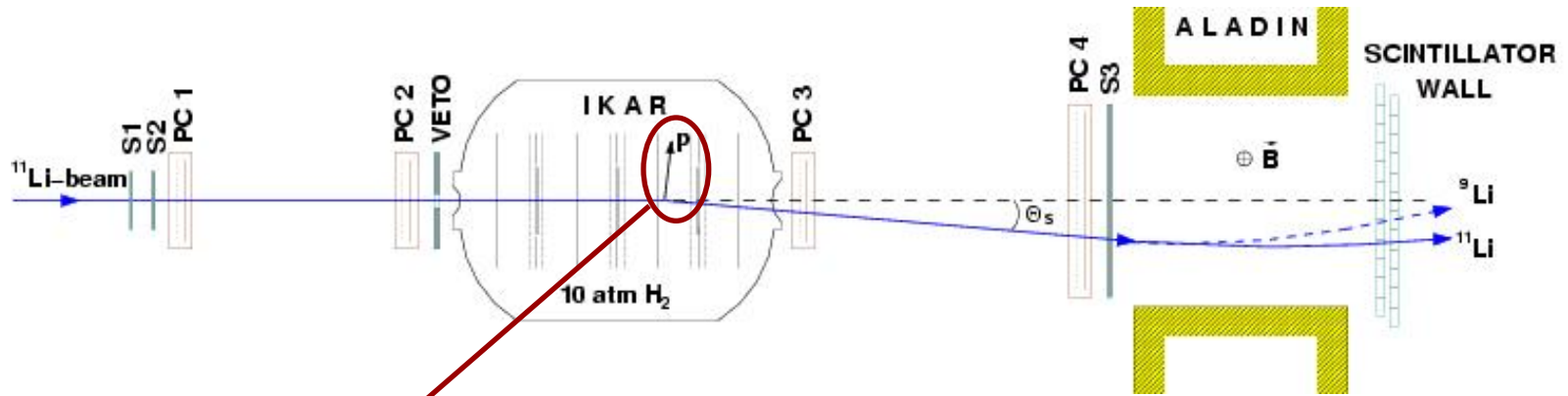
S2 – дисперсионный фокус

S3 – 3^й предварительный фокус

S4 – окончательная фокусировка



Экспериментальная установка



Активная мишень: IKAR

$\Rightarrow T_R, \theta_R, Z_V$

**Трековый детектор: PC 1-4
(пропорциональные камеры)**

} $\Rightarrow \theta_s$

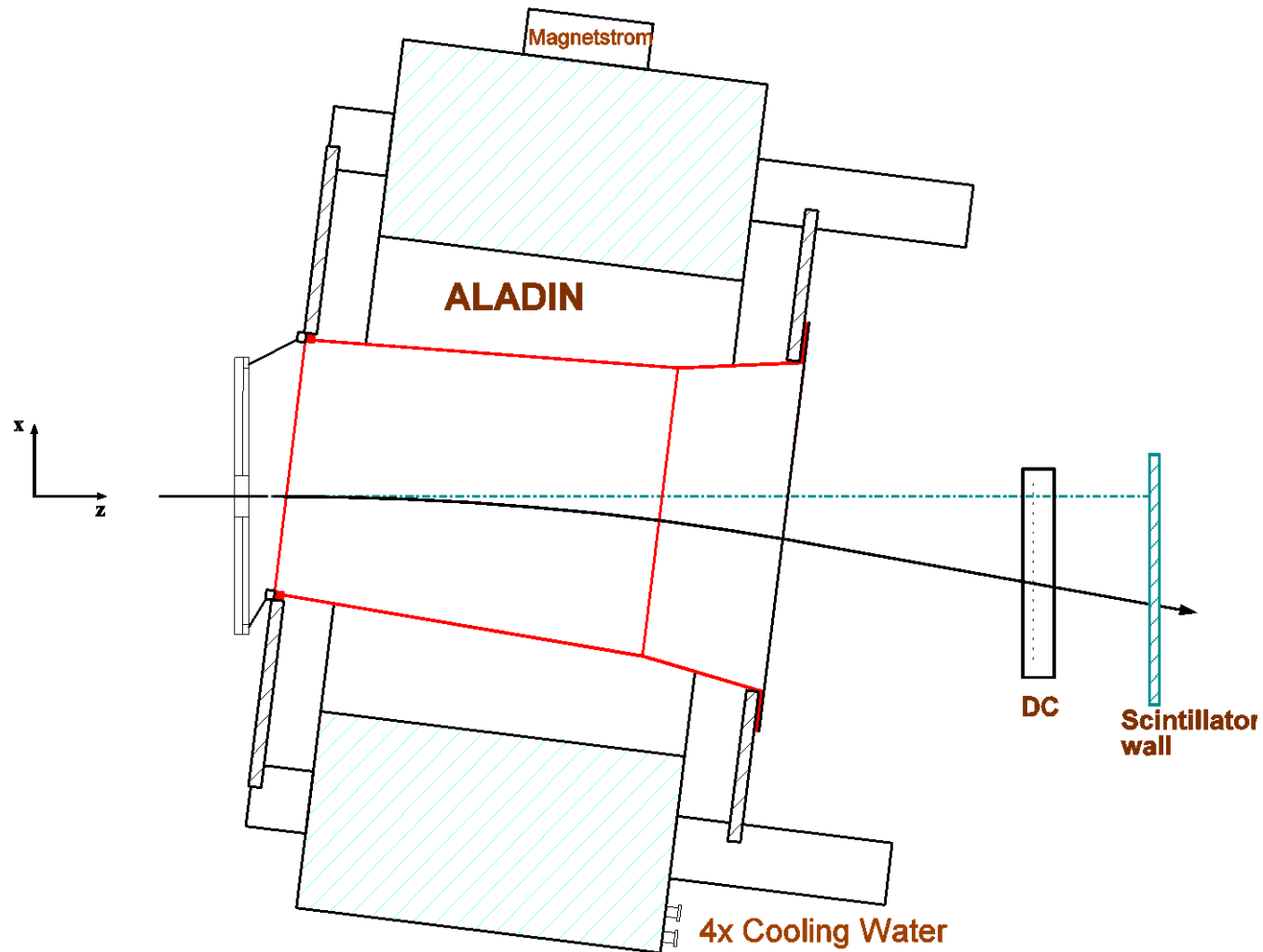
**Идентификация пучковых частиц: S1-S3, Veto
(пластиковые сцинтилляторы)**

} $\Rightarrow \Delta E, \text{TOF}, \text{trigger}$

**Магнит ALADIN + измерение
координаты и заряда (по ΔE)**

} \Rightarrow выделение
упругого канала

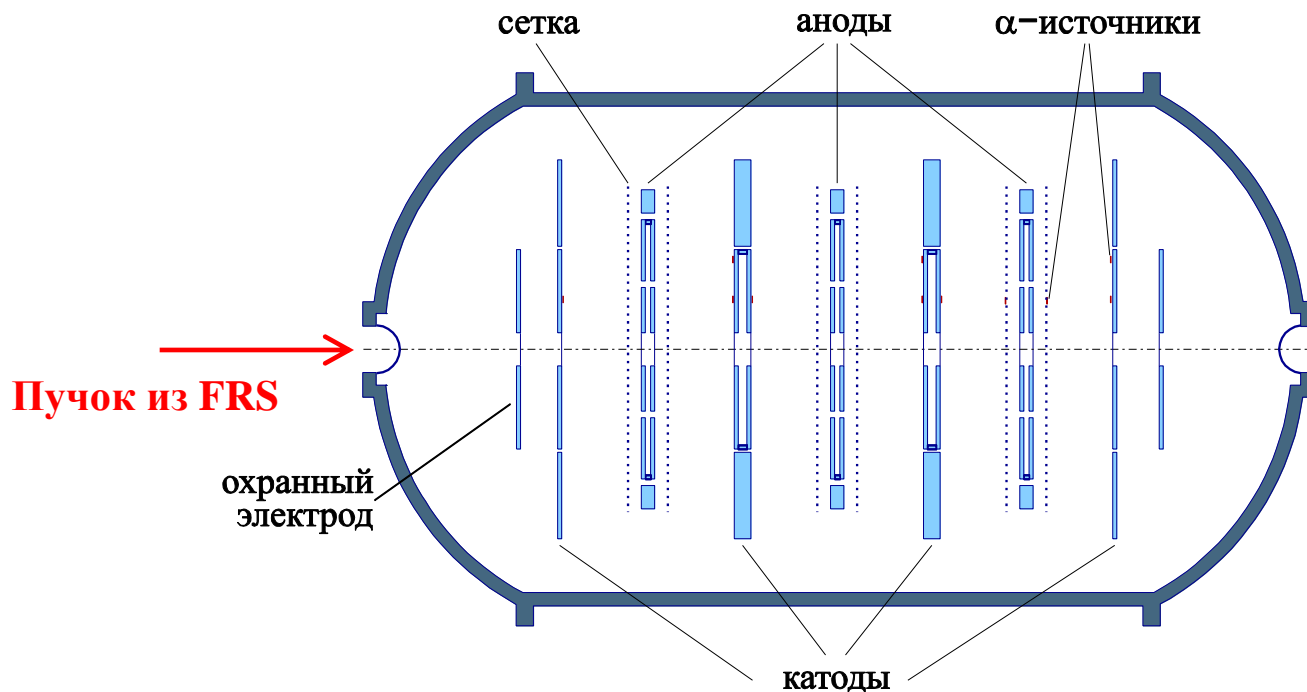
Экспериментальная установка



Экспериментальная установка



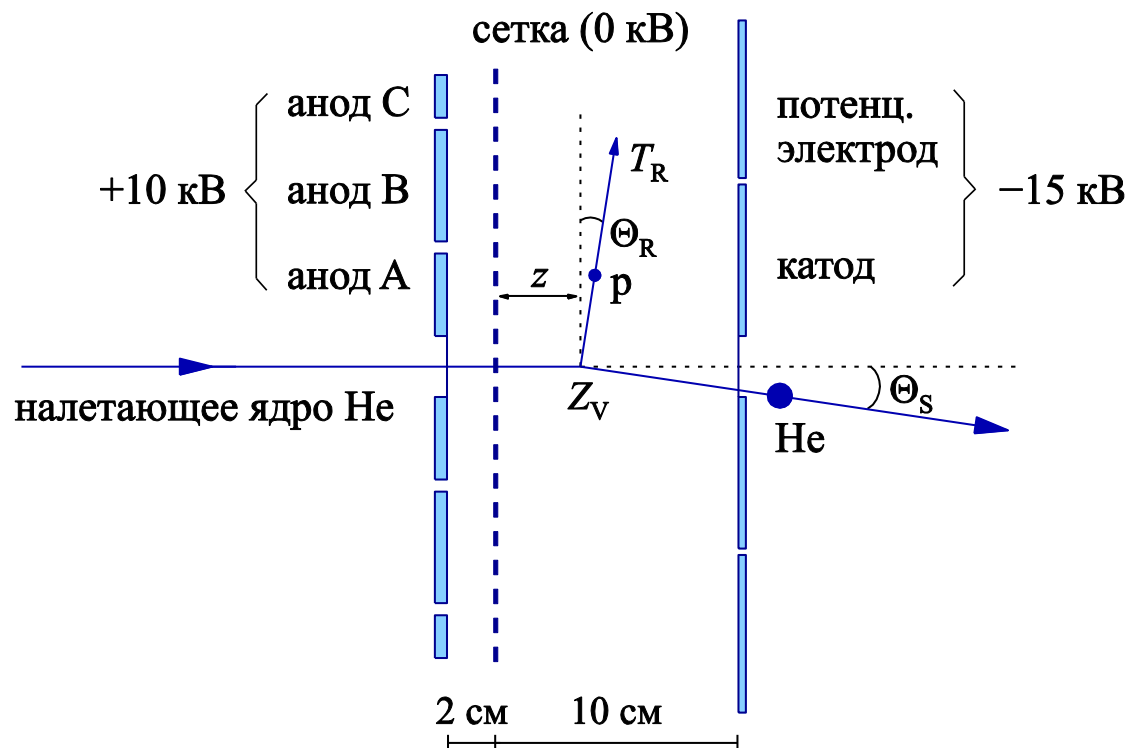
Ионизационная камера ИКАР



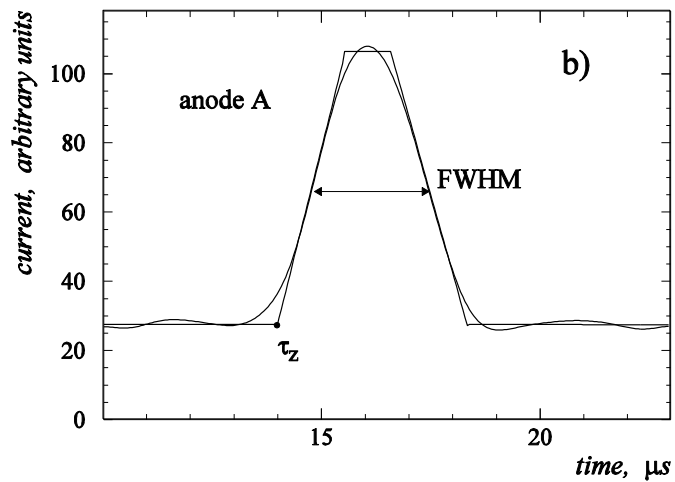
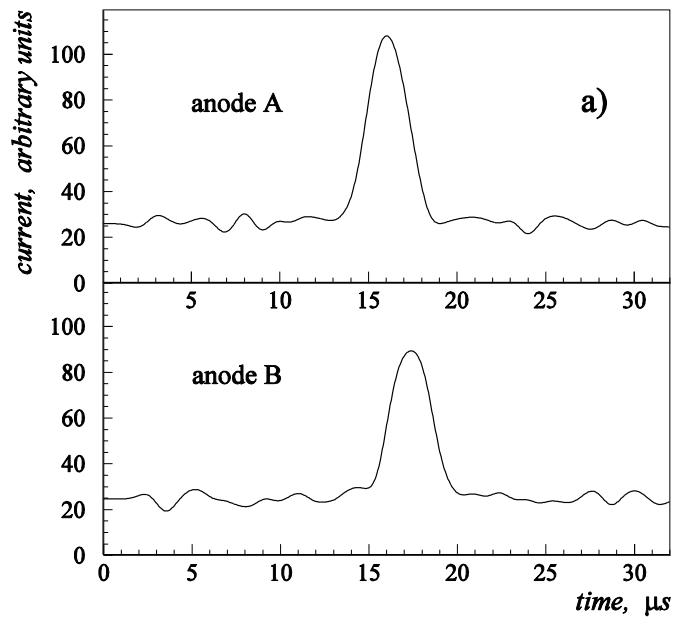
Мишень + детектор протонов отдачи

давление H_2 :	10 атм
толщина окон:	0.5 мм Be
толщина мишени:	30 мг/см ² (6 модулей)
интенсивность пучка:	$\leq 10^4$ сек ⁻¹

Упругое рассеяние в ИКАРе



Сигналы с анодов ИКАРа

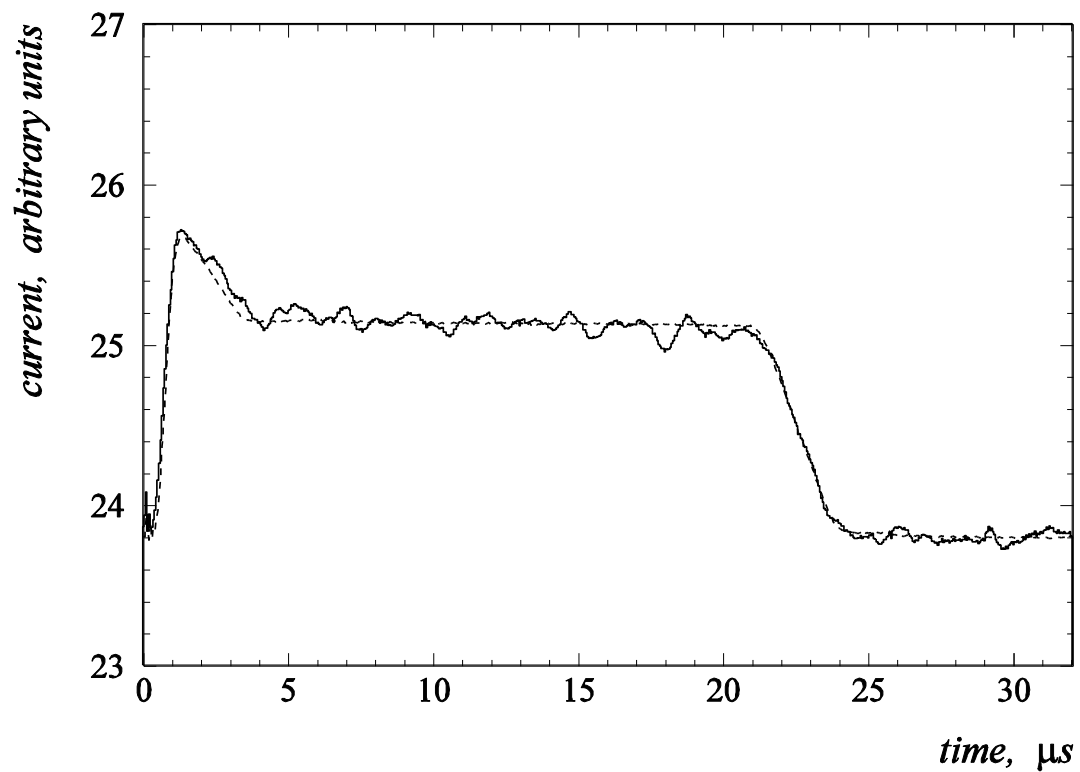


Основные этапы обработки данных

$$\frac{d\sigma}{dt} = \varepsilon \cdot \frac{\Delta N}{\Delta t \cdot M \cdot n \cdot \Delta L}$$

1. Энергетическая и временная (объем) калибровки ИКАРа } \Rightarrow $\sigma_{A(B)} = 40-60$ кэВ
 ΔZ (FWHM) = 1 мм
2. Выстройка и калибровка трекового детектора, полученное разрешение для плоских углов $\Delta\Theta_{x,y} = 0.4-1.0$ мрад
(определяется многократным кулоновским рассеянием)
3. Калибровка дрейфовой камеры и сцинтилляционной стенки и разработка алгоритма идентификации частиц
4. Отбор событий упругого рассеяния

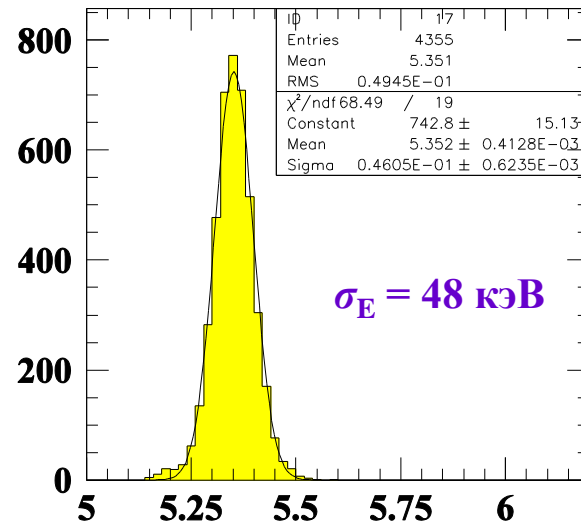
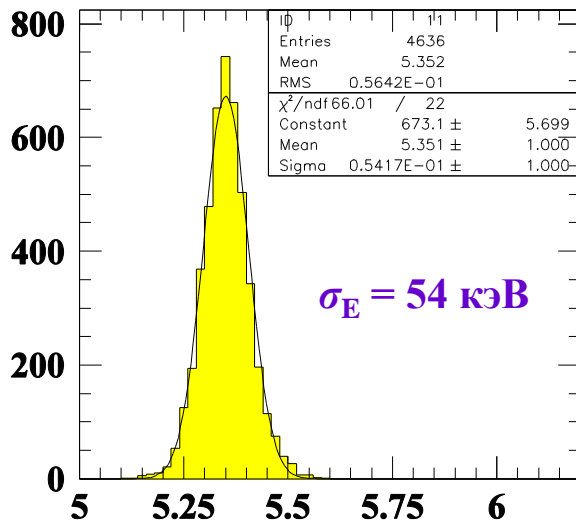
Калибровка обьема



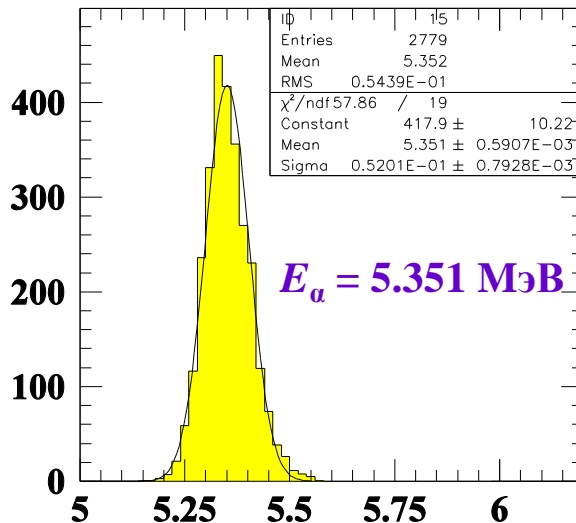
ΔZ (FWHM) = 1 mm

Энергетическая калибровка ИКАРа

^8B

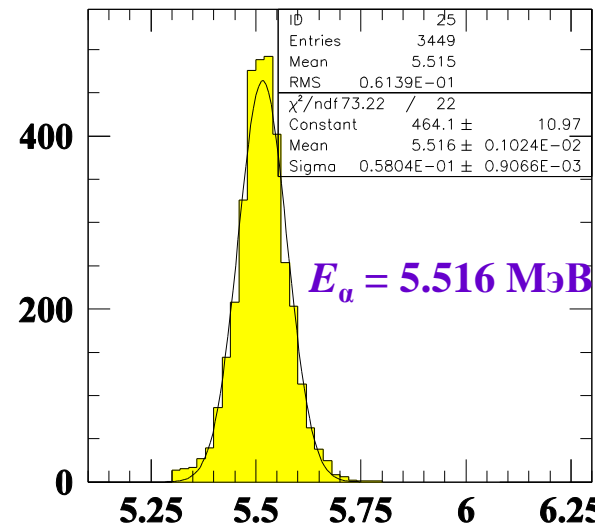


E_α A1



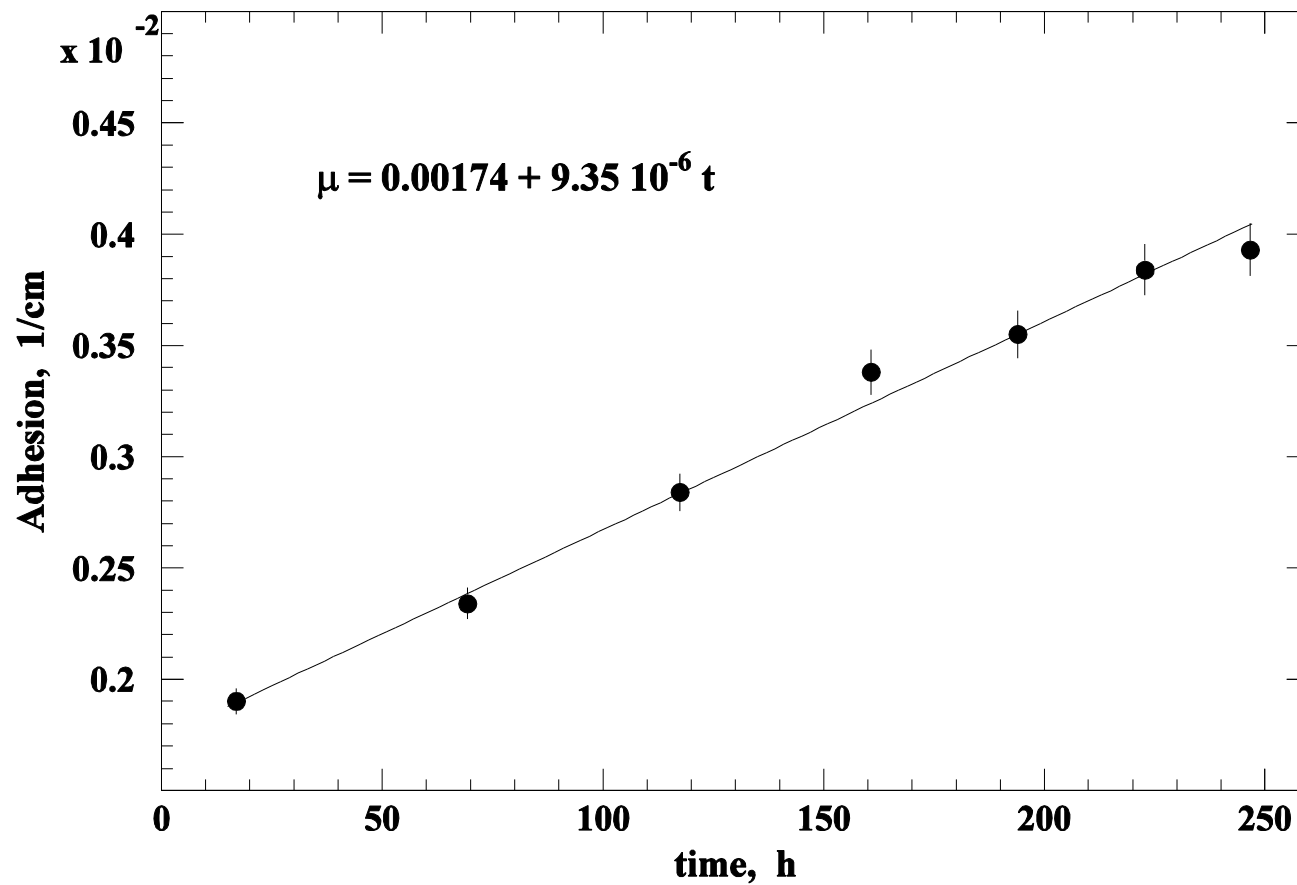
E_α A5. Cathode α

E_α B12



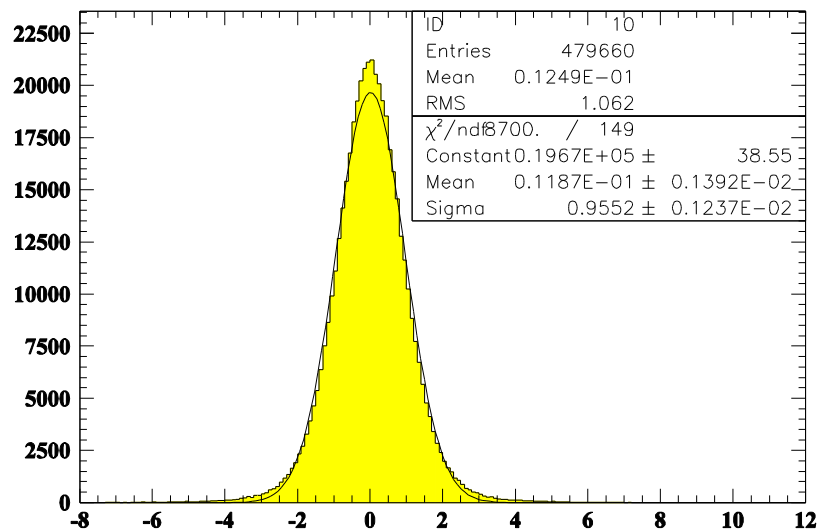
E_α A5. Grid α

Чистота газа

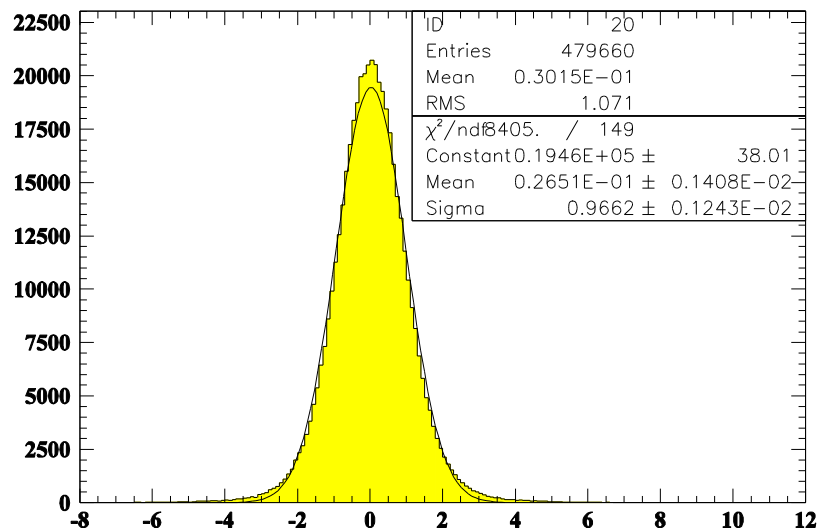


Угловое разрешение трекового детектора

⁸B. Angular resolution



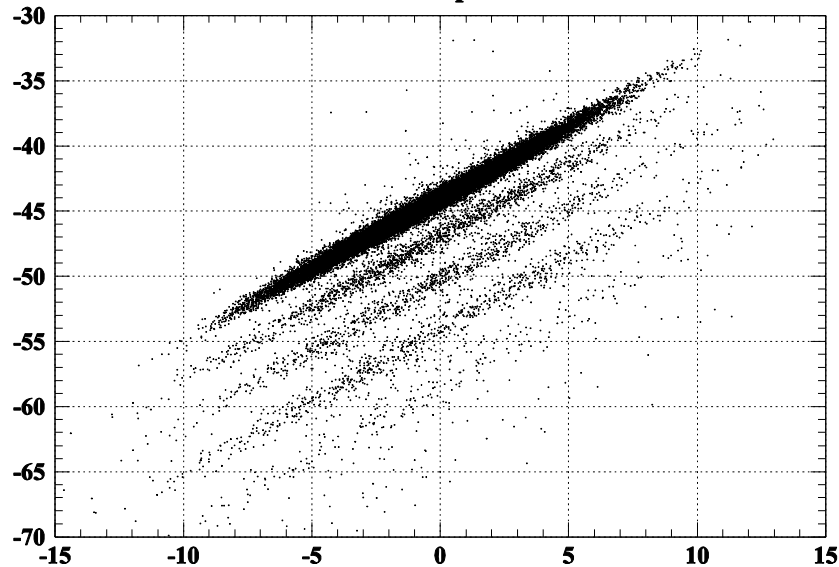
Θ_x , mrad



Θ_y , mrad

Идентификация рассеянной частицы

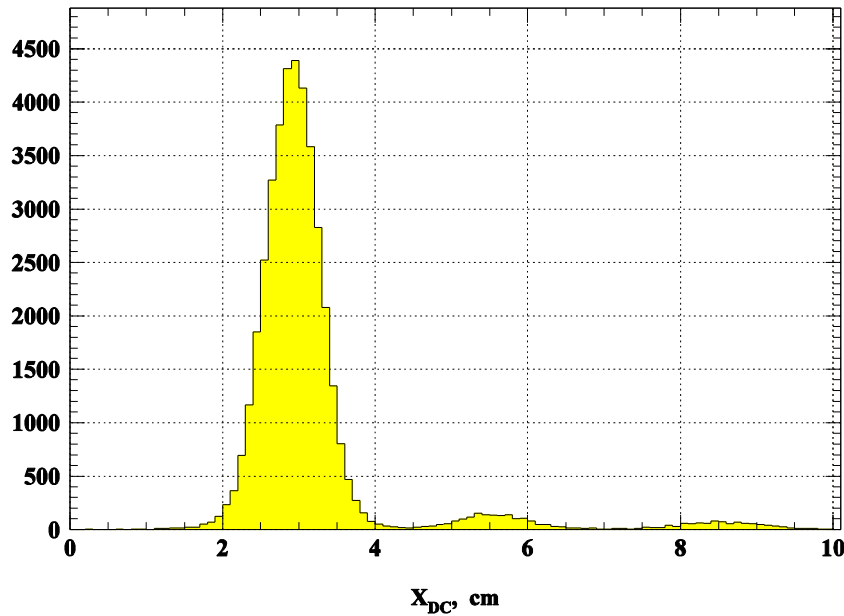
¹⁷C. Mass separation



$$X_{\text{extrap}} = X_4 + \Delta Z \cdot \theta_X$$

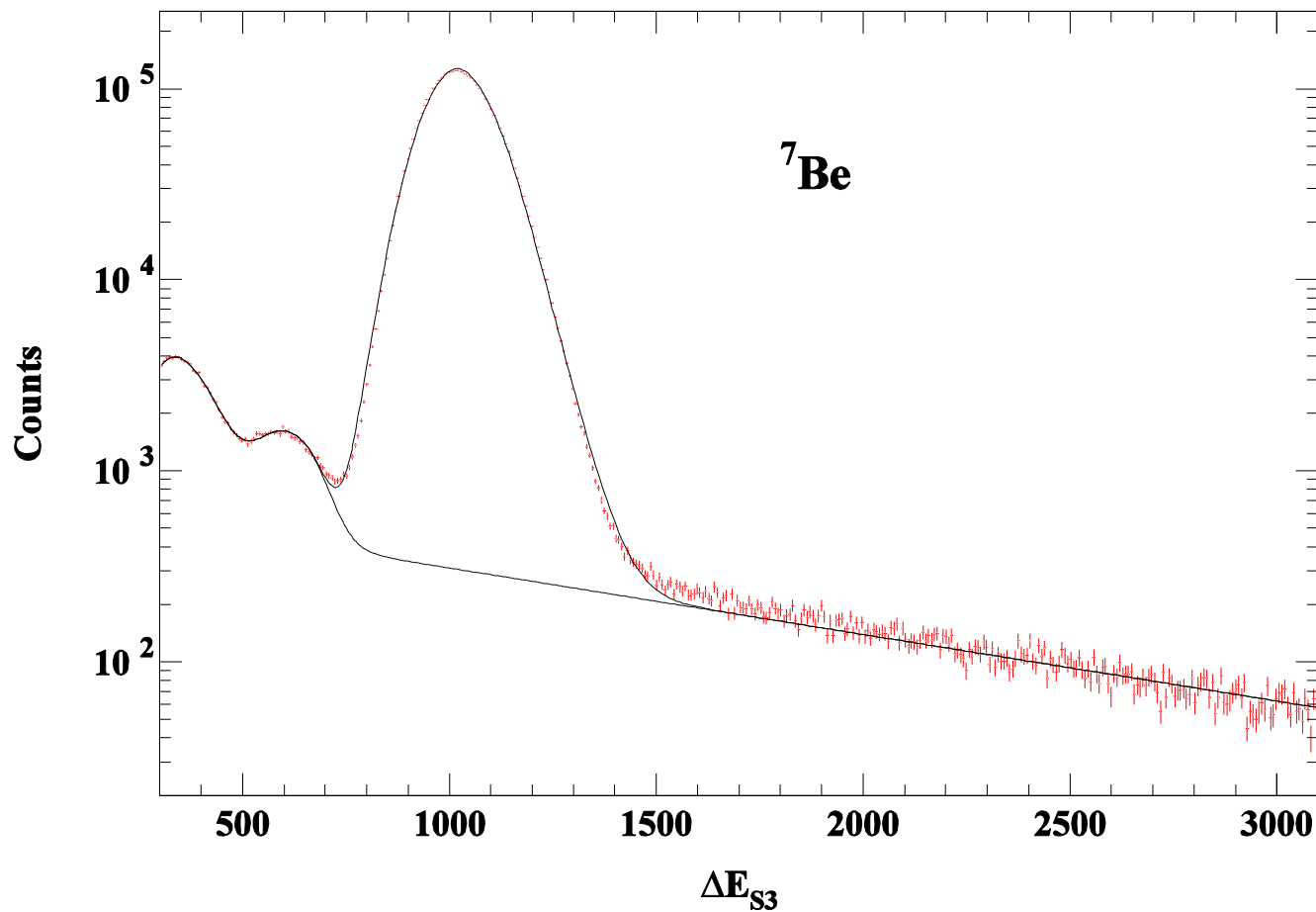
$$\Delta Z = Z_{\text{DC}} - Z_{\text{PC4}}$$

X_{DC} vs X_{extrap}



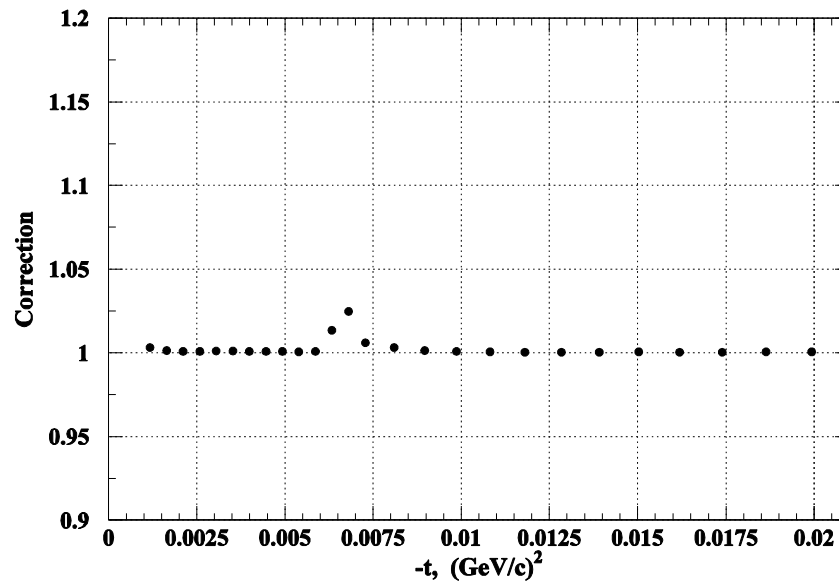
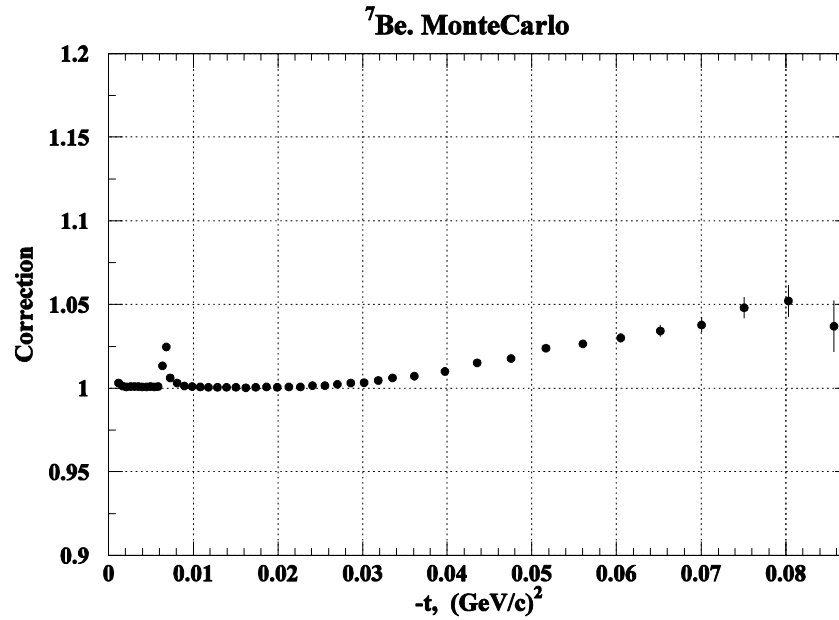
$$X = X_{\text{extrap}} - X_{\text{DC}}$$

Чистота пучка



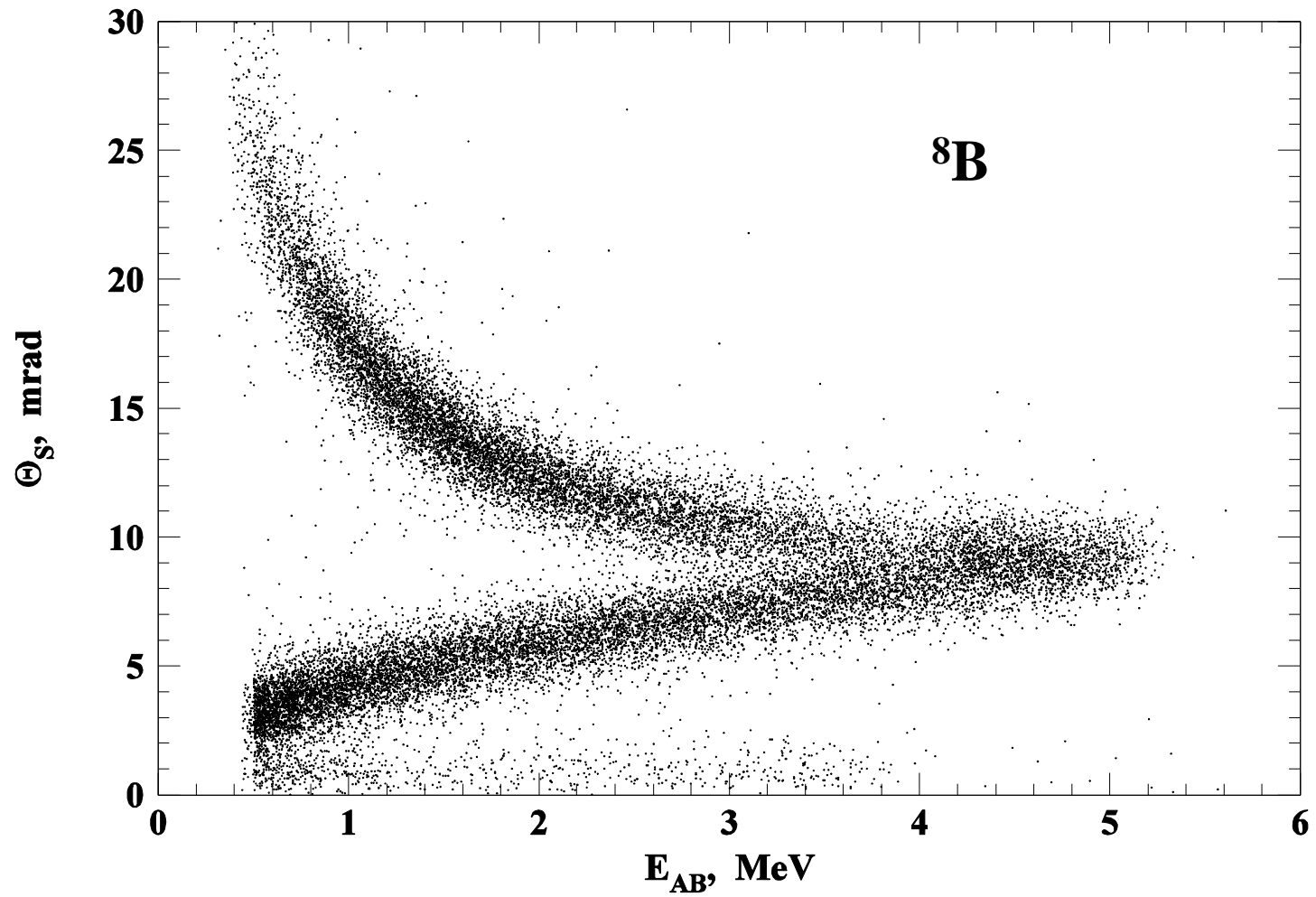
«Фон» под пиком = 0.7 – 1.0%

Эффективность (потери при отборе событий)



Корреляция ИКАР - ПК

используемая для построения сечения



Анализ сечений в рамках модели Глаубера

На входе:

- амплитуды элементарных pp- и pn-взаимодействий
- распределение ядерной материи

pN-амплитуда «сворачивается» с плотностью
распределения ядерной материи



амплитуда
рассеяния

Феноменологические плотности для описания распределения ядерной материи:

SF: Symmetrized Fermi distribution

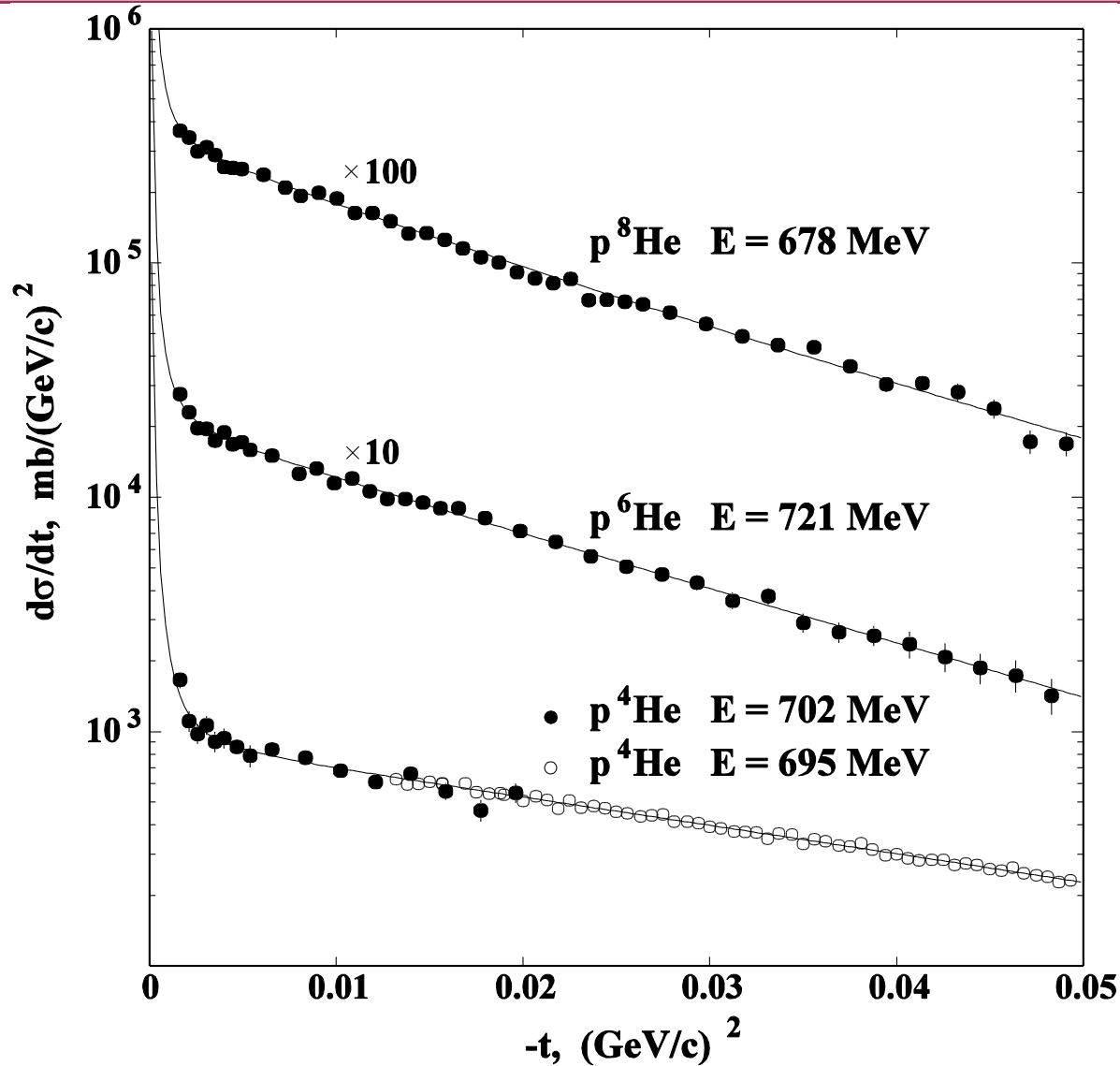
GH: “Gaussian with halo” $F(t) = (1+z^2) \text{Exp}(z)$, $z = t R_m^2/6$

GG: 2 Gaussians

GO: Gaussian + 1p harmonic oscillator

Все модели – с двумя свободными параметрами;
две последние позволяют различать “кор” и “галло”

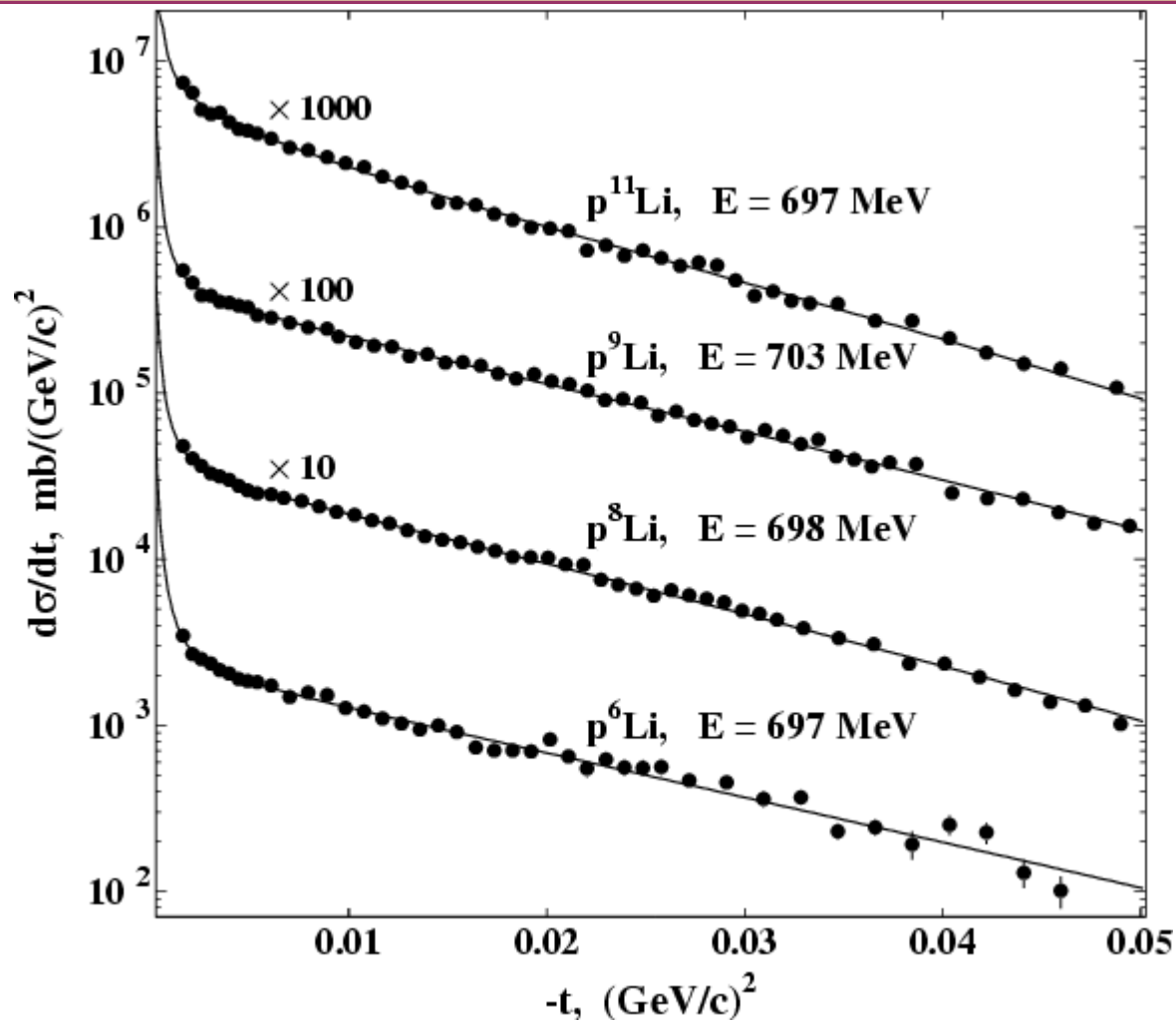
Дифференциальные сечения упругого p-He рассеяния



Phys.Rev.Lett. 78 (1997) 2313

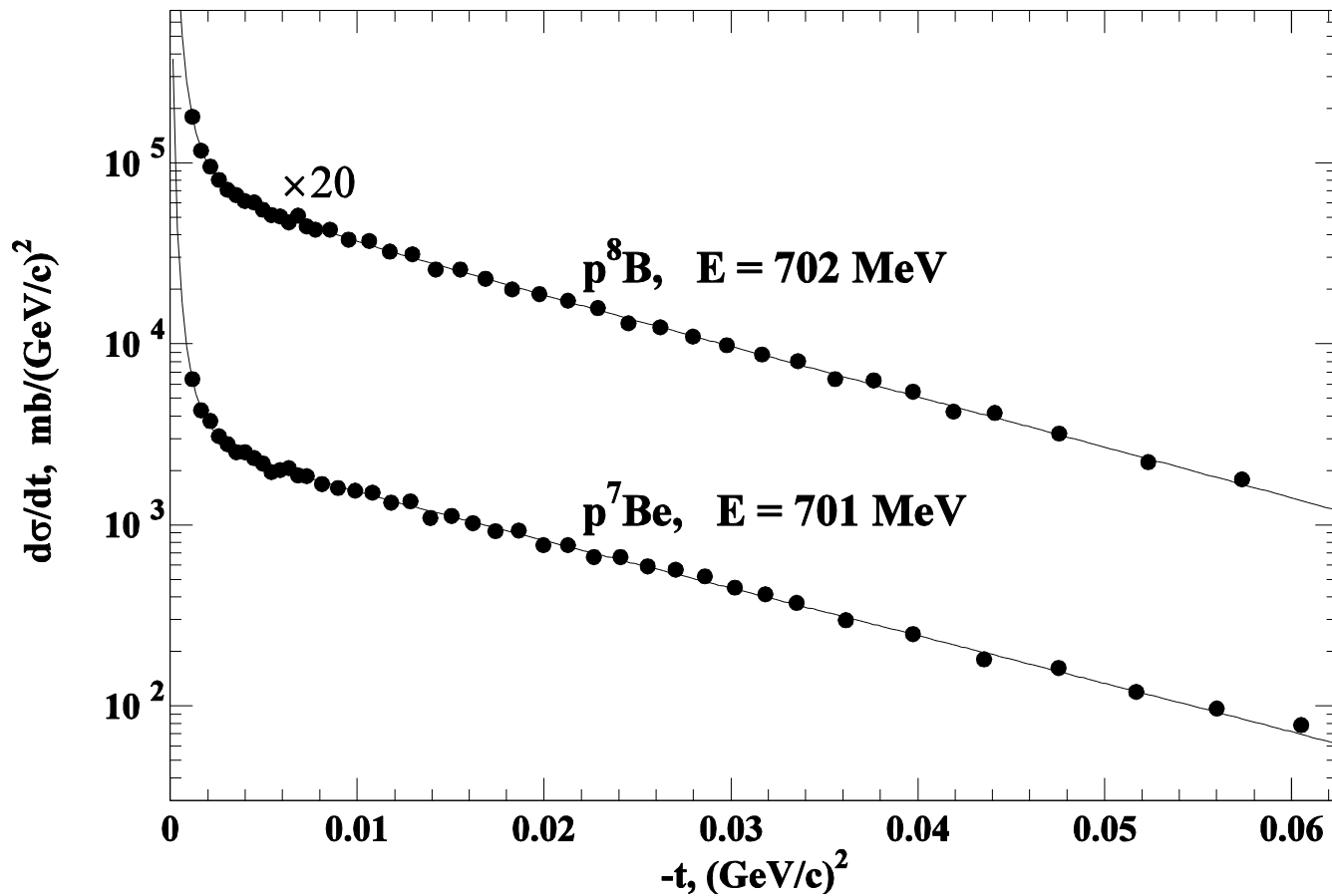
Nucl.Phys. A712, 247 (2002)
A712, 269 (2002)

Дифференциальные сечения упругого p-Li рассеяния

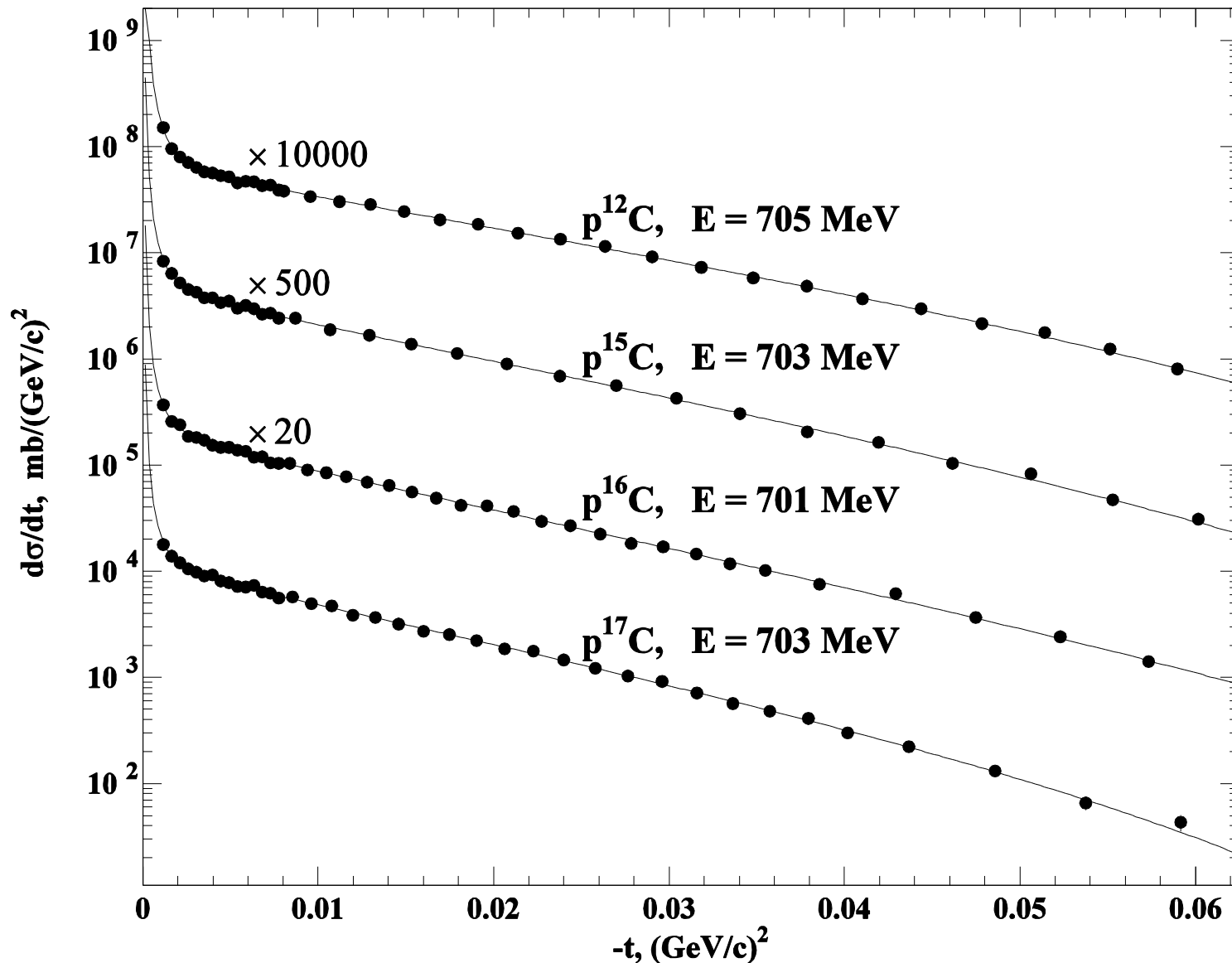


Nucl. Phys. A766, 1 (2006)

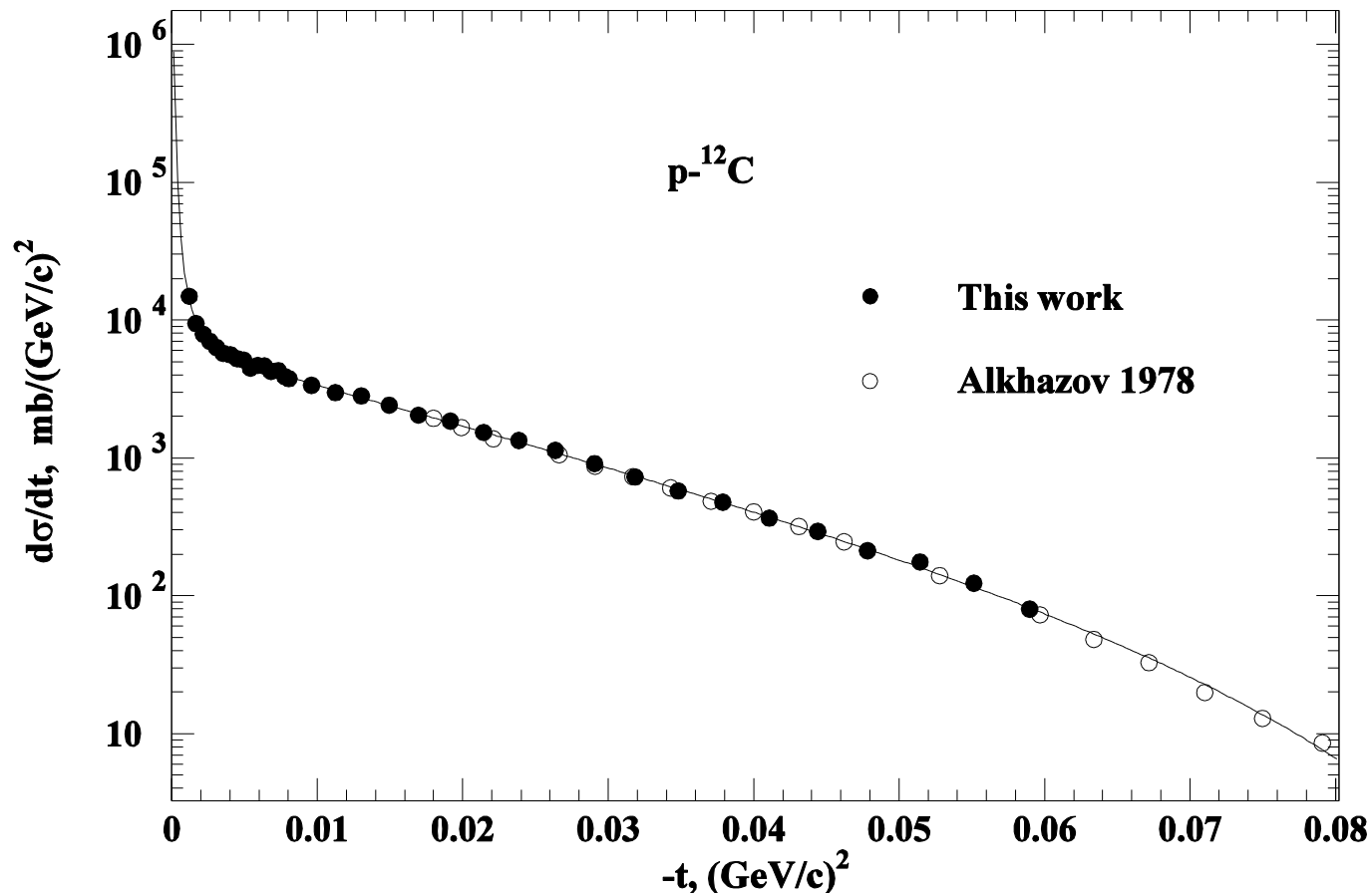
Дифференциальные сечения упругого p-⁷Be и p-⁸B рассеяния



Дифференциальные сечения упругого рассеяния протонов на изотопах С

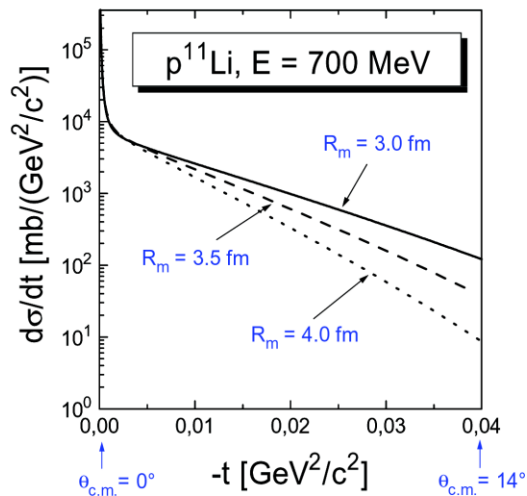
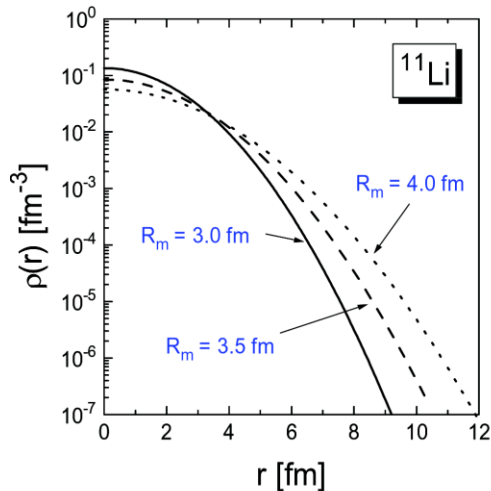


Сравнение с предыдущими измерениями

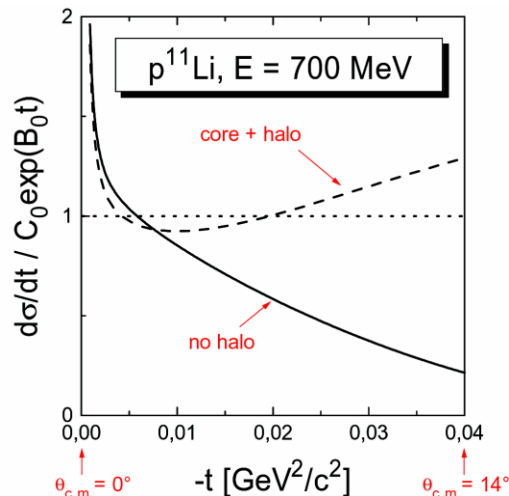
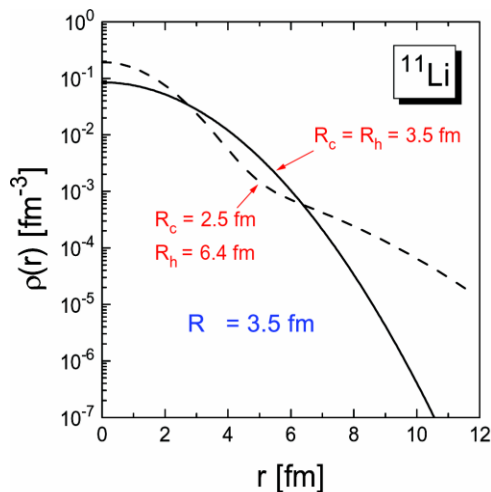


$$^{12}\text{C}: R_m = 2.37 \pm 0.04 \text{ fm}$$

Чувствительность дифференциального сечения к форме распределения ядерной материи

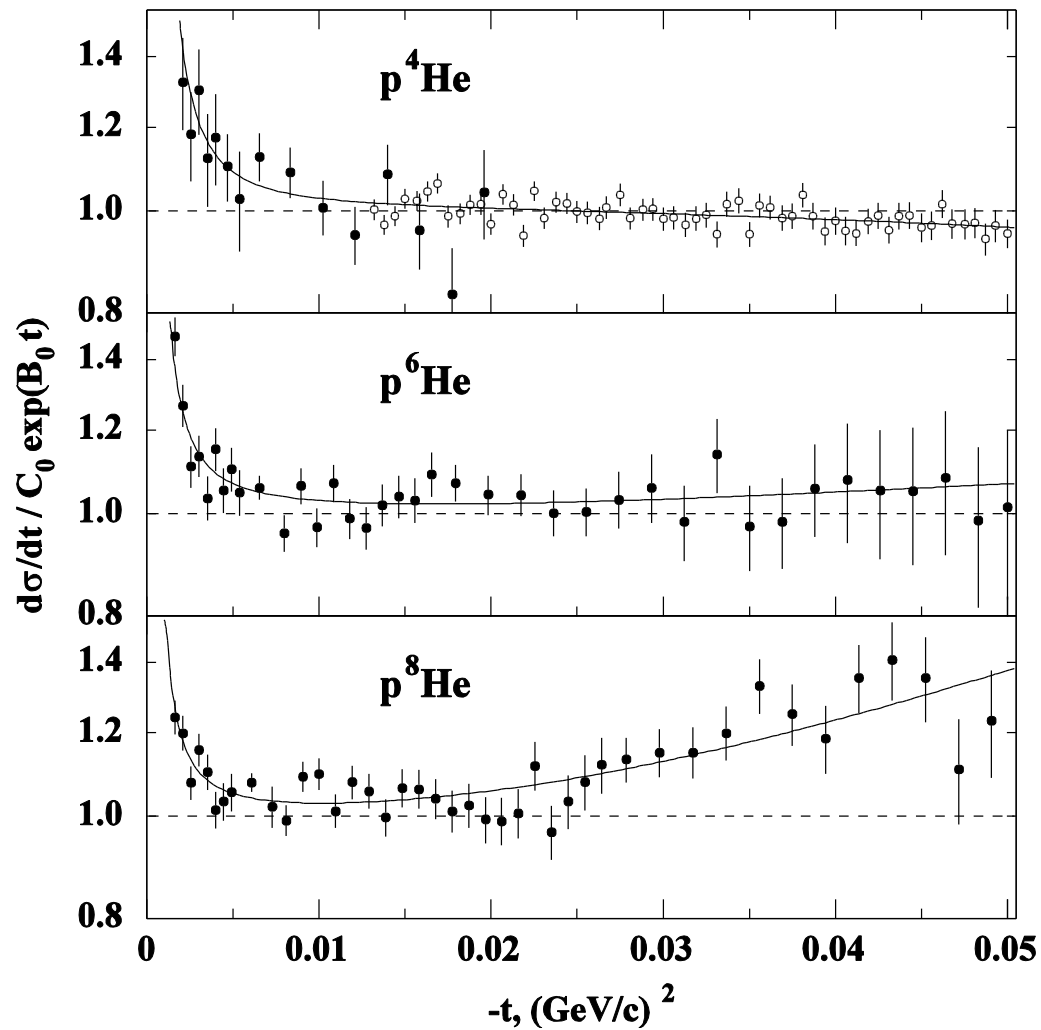


наклон $d\sigma/dt \rightarrow$ радиус материи R_m

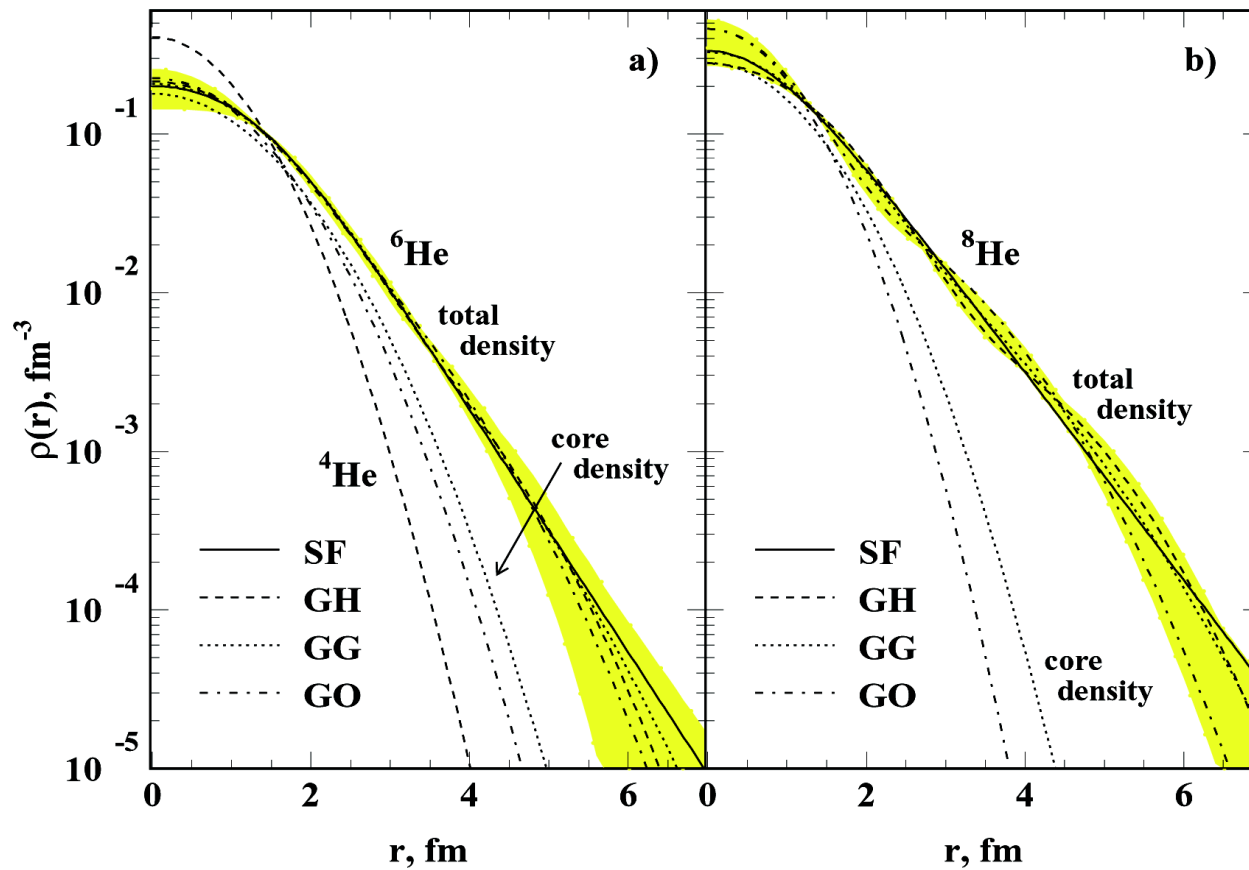


кривизна $\log(d\sigma/dt) \rightarrow$ наличие гало

Чувствительность сечений к форме для ядер He



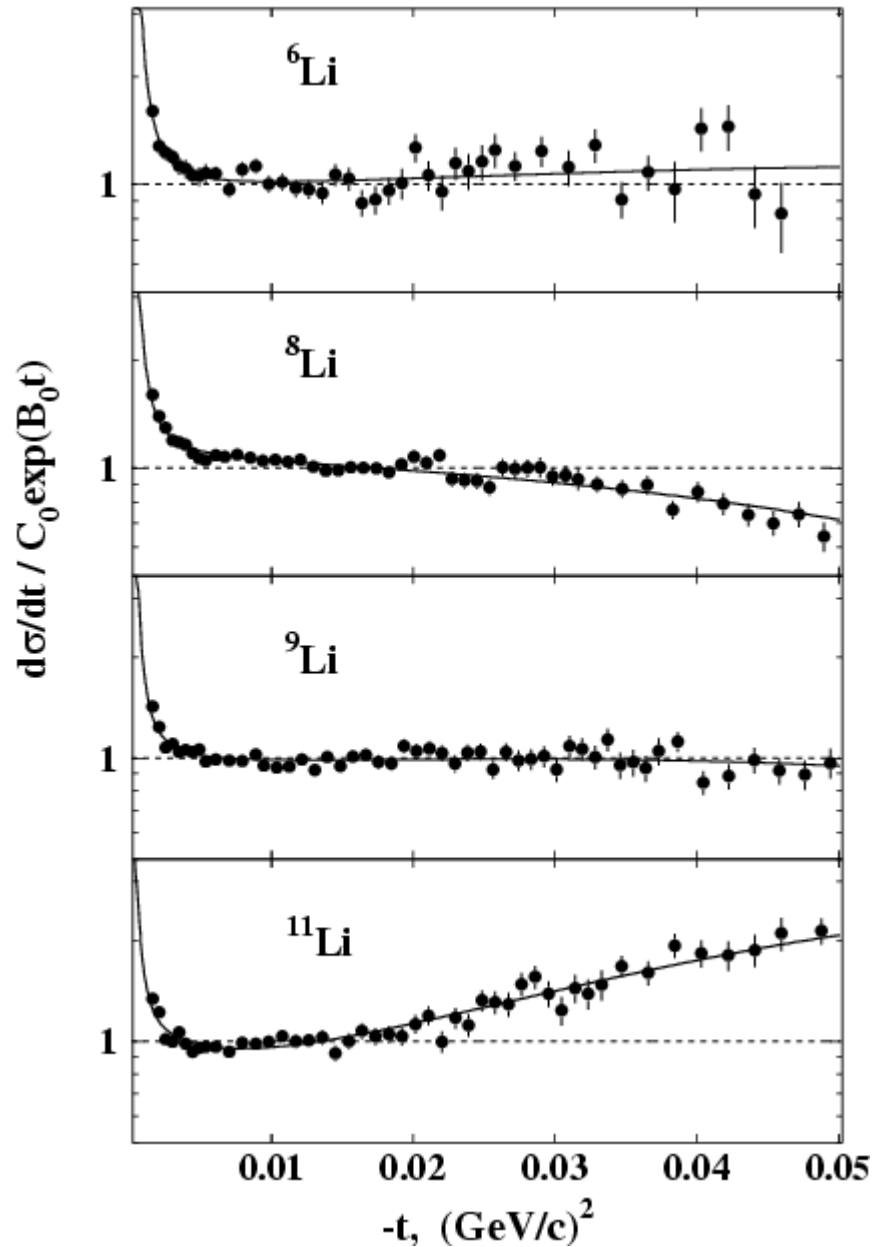
Результаты для ${}^6\text{He}$ и ${}^8\text{He}$



$${}^6\text{He}: R_m = (2.30 \pm 0.07 + 0.15) \text{ fm}$$

$${}^8\text{He}: R_m = (2.45 \pm 0.07 + 0.08) \text{ fm}$$

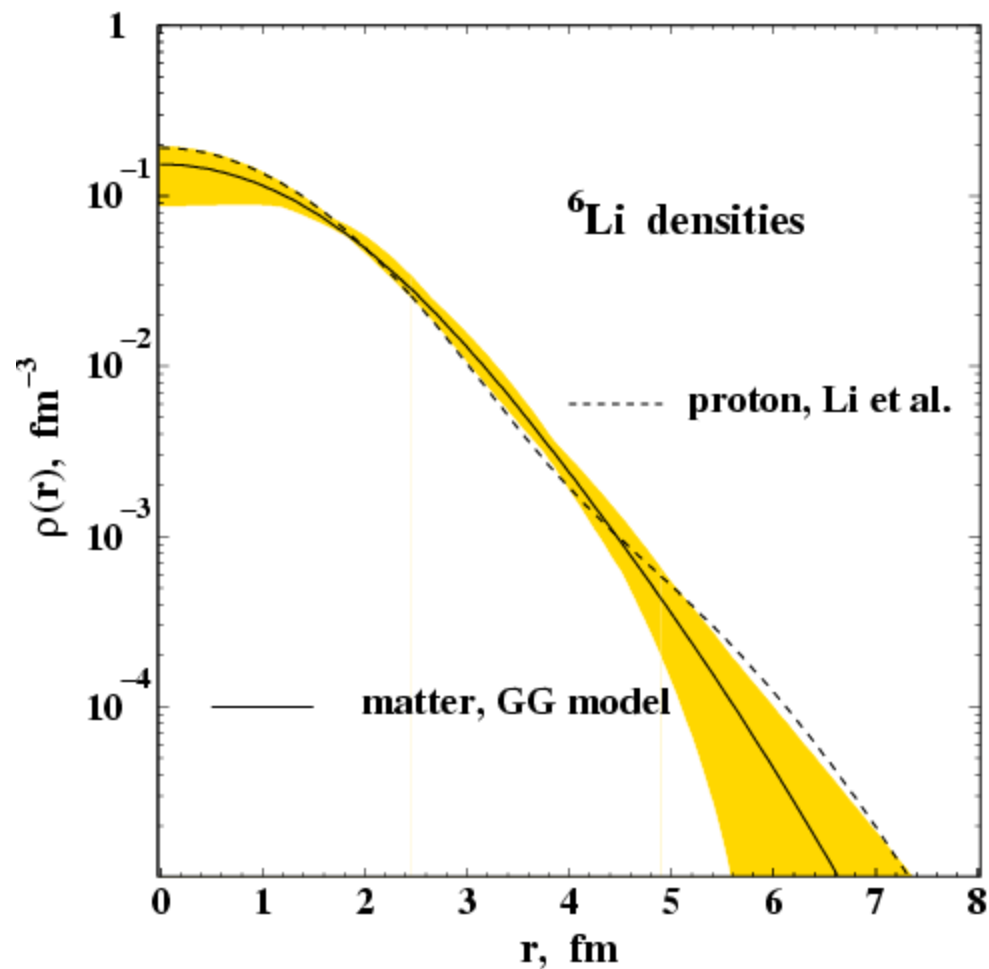
Чувствительность сечений к форме для изотопов Li



указание на
кластерную структуру ${}^6\text{Li}$

ясное свидетельство
наличия гало в ${}^{11}\text{Li}$

Распределение ядерной материи для ${}^6\text{Li}$



Радиус материи R_m для ${}^6\text{Li}$

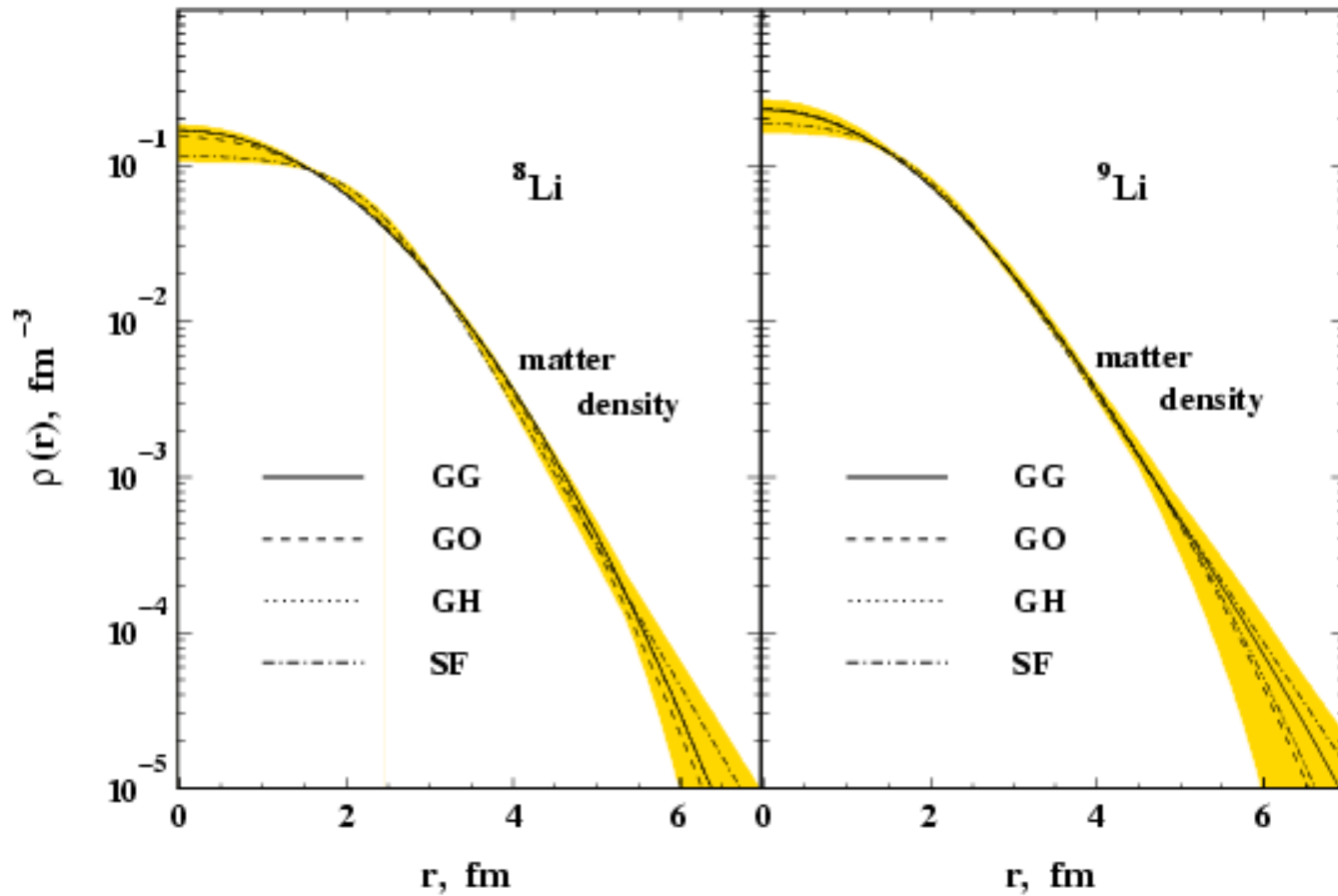
ИЗОТОП	МОДЕЛЬ	χ^2 / ν	R_m , fm	ДРУГИЕ ЭКСПЕРИМЕНТЫ	Reference
${}^6\text{Li}$	SF	45.3 / 41	2.45 (4)	2.42 (5) ^{a)}	Li et al. – $e^6\text{Li}$ -scattering
	GH	44.7 / 40	2.44 (6)	2.29 (7)	Bruge – $p^6\text{Li}$ at 600 MeV
	GG	44.6 / 40	2.44 (6)	2.32 (2)	Tanihata – from σ_{Int}
	GO	44.5 / 40	2.44 (6)		

^{a)} Протонный радиус. Значение получено из зарядового радиуса ${}^6\text{Li}$ с учетом зарядовых радиусов протона и нейтрона.

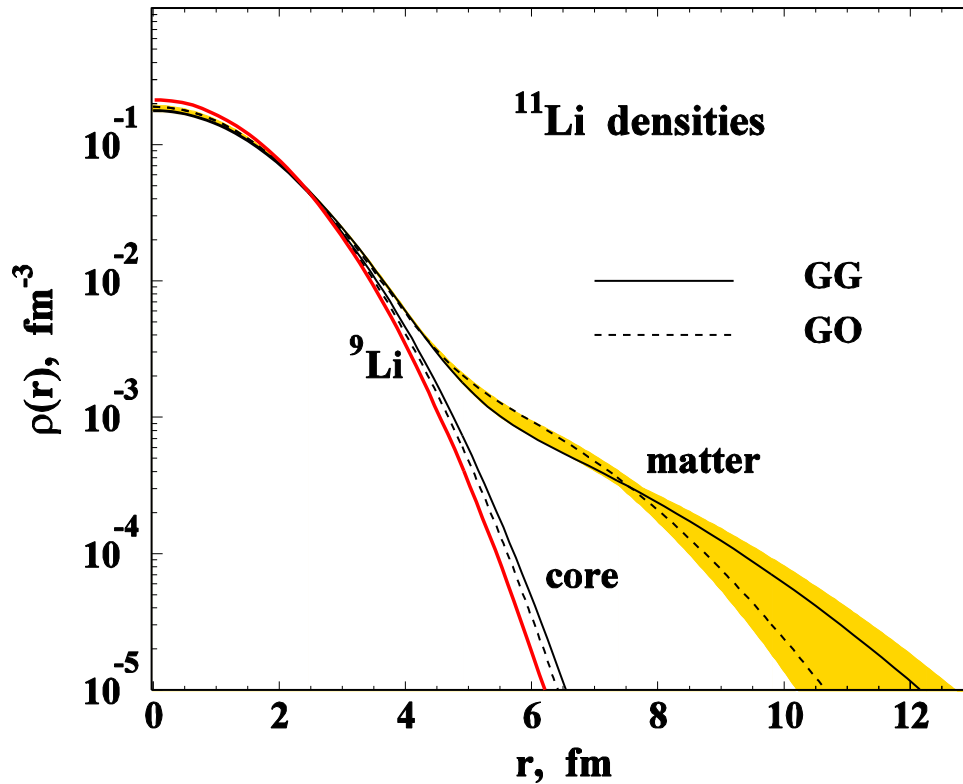
Результат:

$${}^6\text{Li}: R_m = 2.44 \pm 0.07 \text{ fm}$$

Распределение материи в ядрах ${}^8\text{Li}$ и ${}^9\text{Li}$



Результат для ^{11}Li

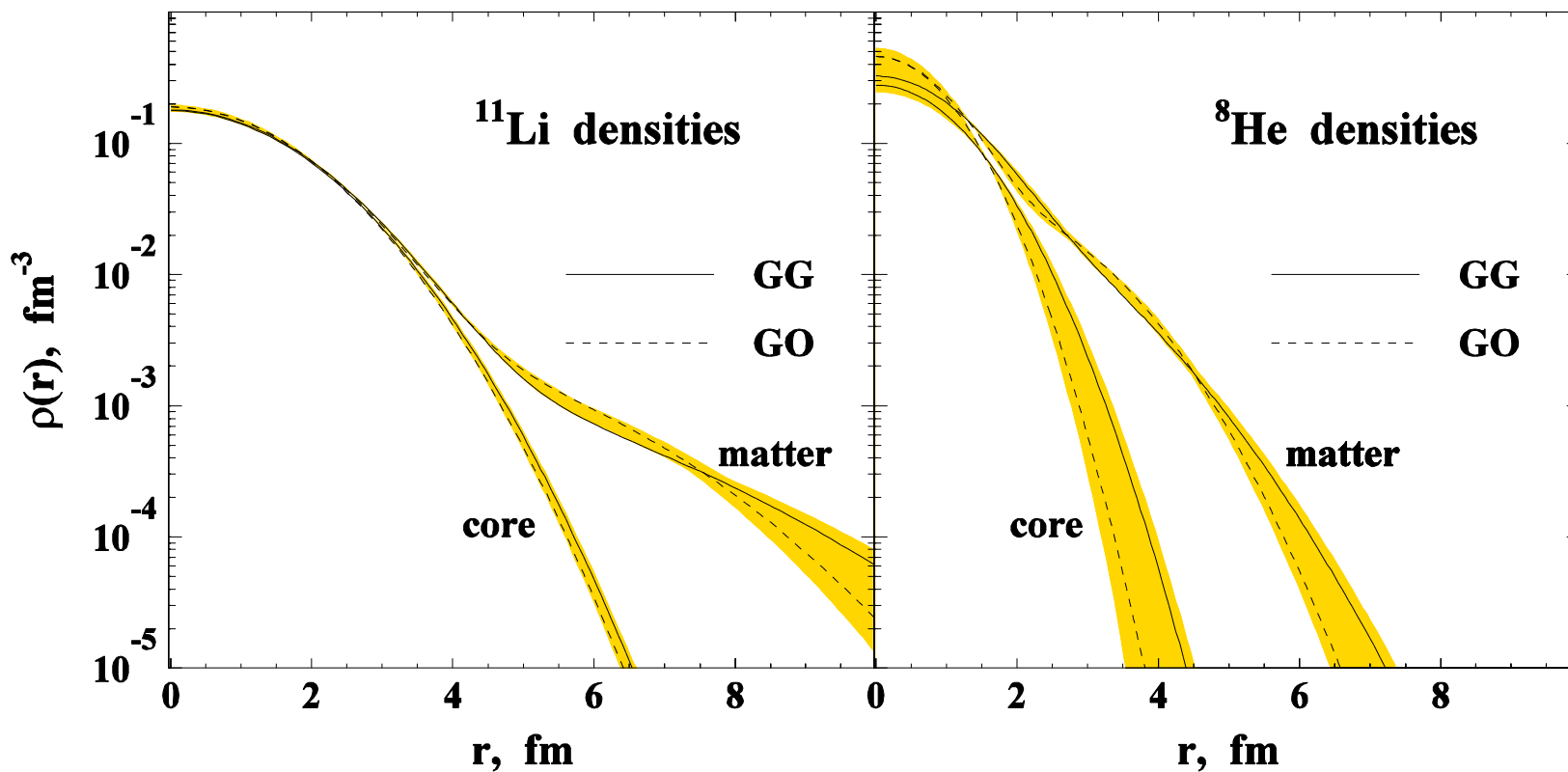


в предположении $^{11}\text{Li} = ^9\text{Li}\text{-core} + 2$ валентных нейтрона
для моделей GG и GO получаем:

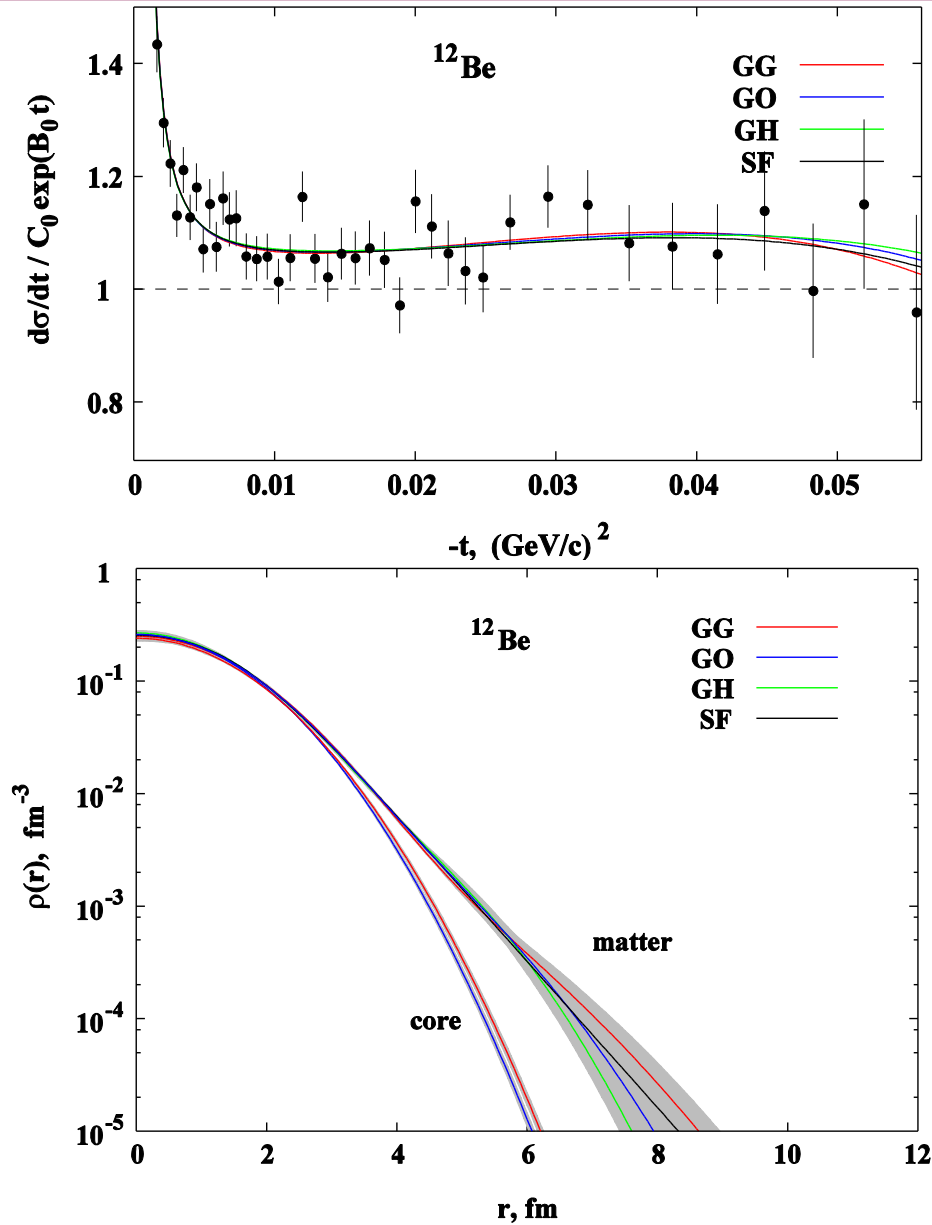
$$R_{\text{halo}} = 6.05 \pm 0.32 \text{ fm}$$
$$R_{\text{core}} = 2.53 \pm 0.04 \text{ fm}$$

для сравнения:
 $R_{^9\text{Li}} = 2.43 \pm 0.06 \text{ fm}$

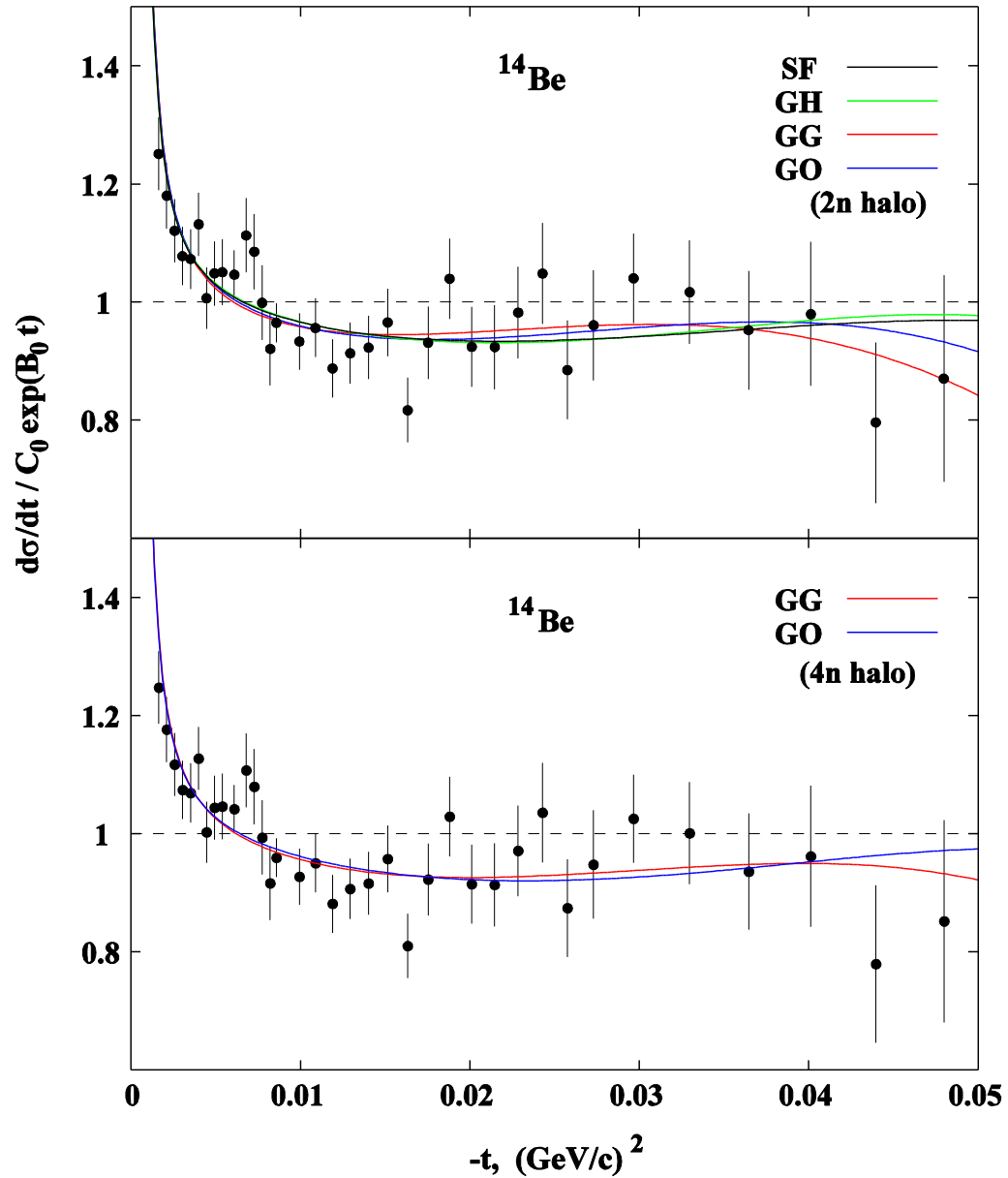
Сравнение распределения материи в ядрах ^{11}Li и ^8He



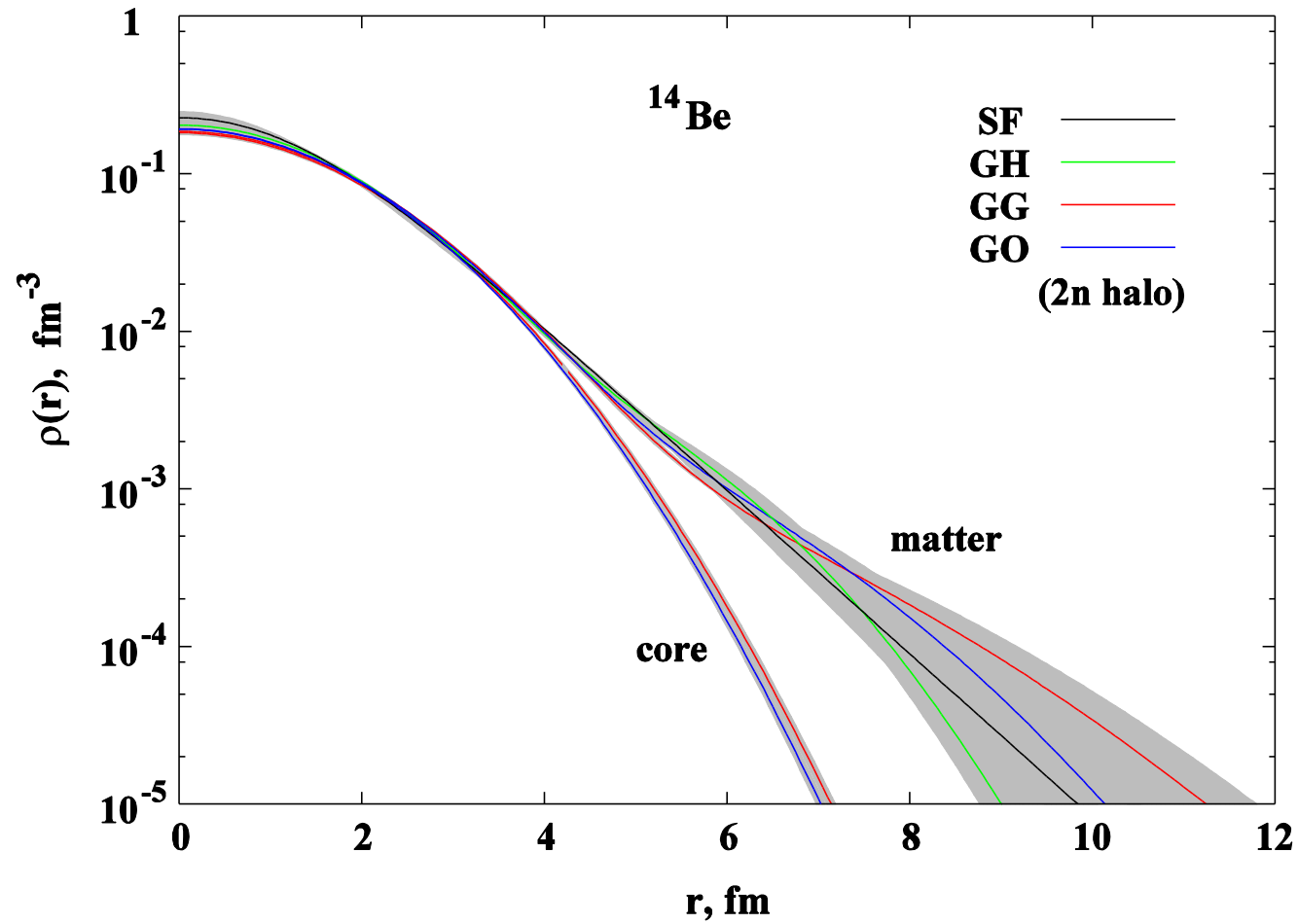
Результаты для ^{12}Be



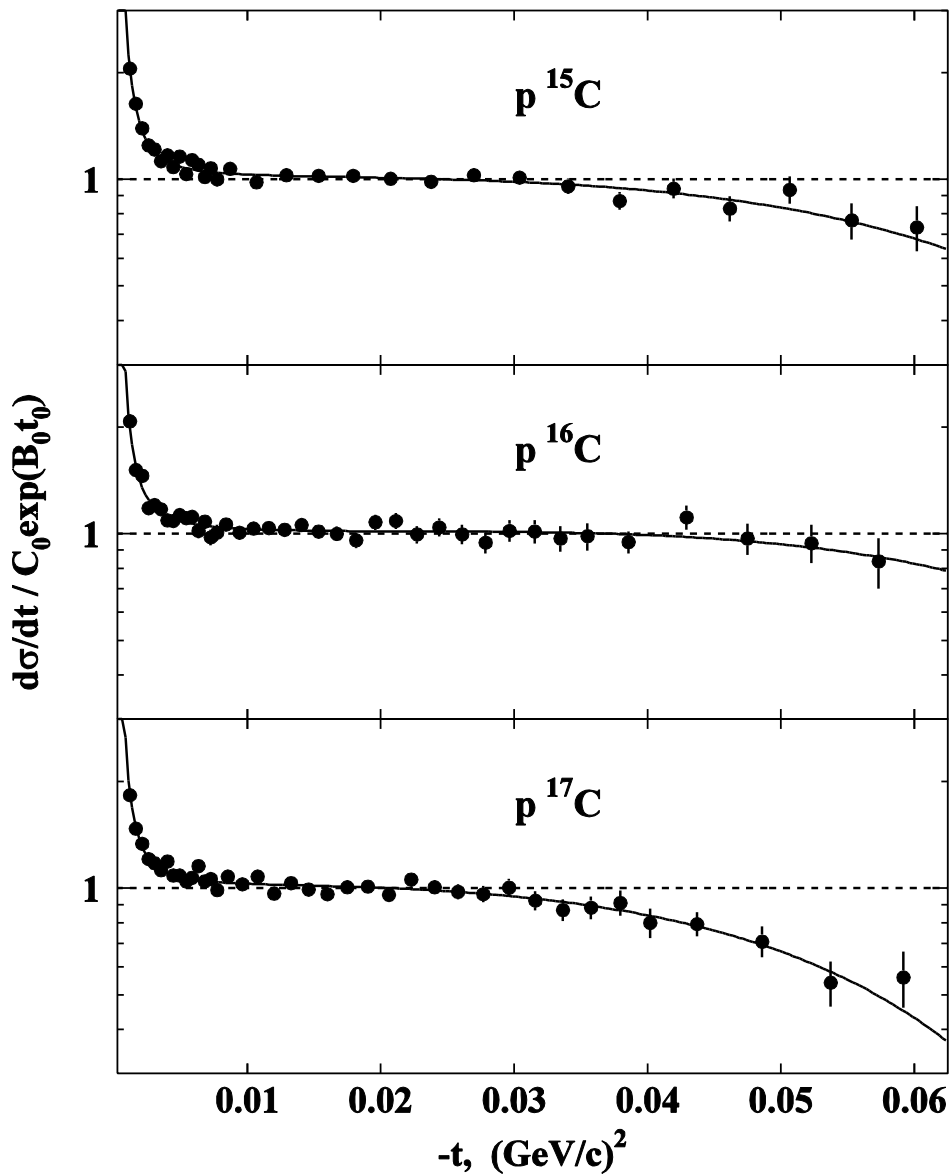
Результаты для ^{14}Be



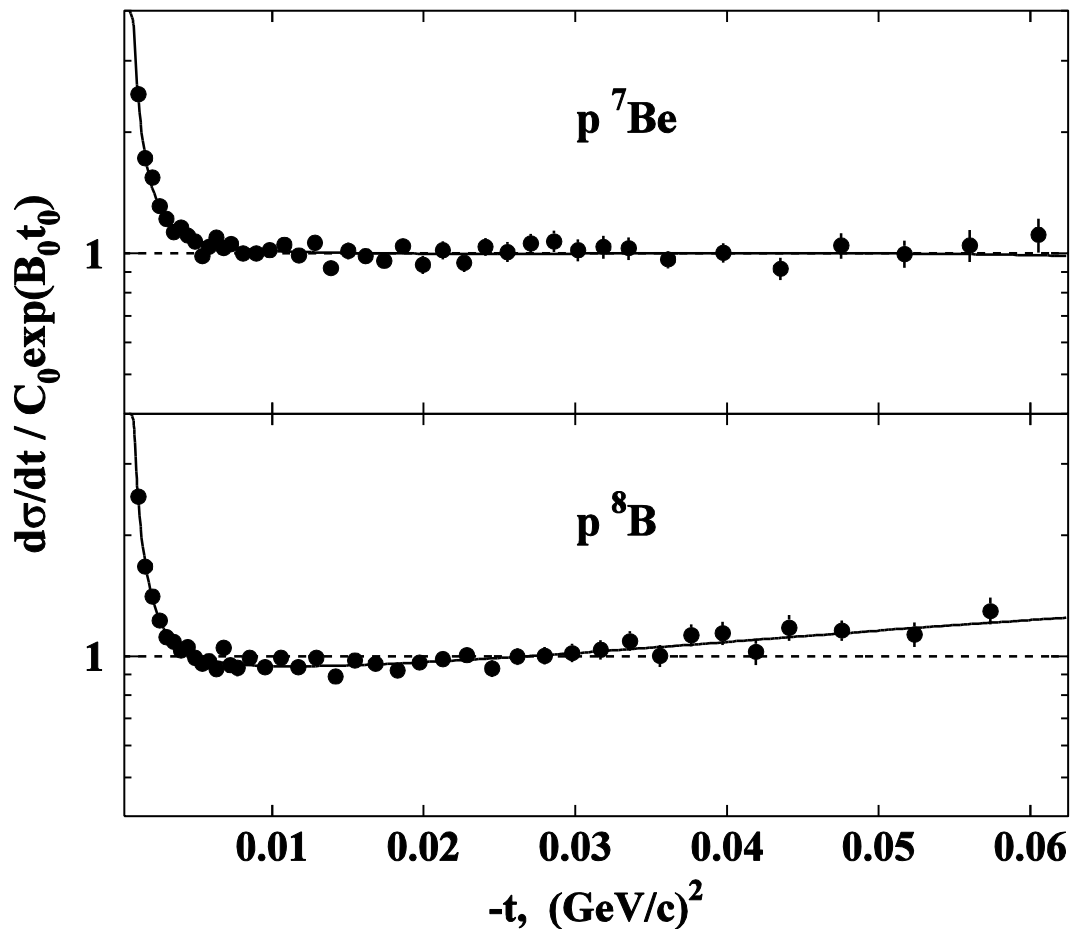
Результаты для ^{14}Be



Чувствительность сечений к форме ядер для изотопов С



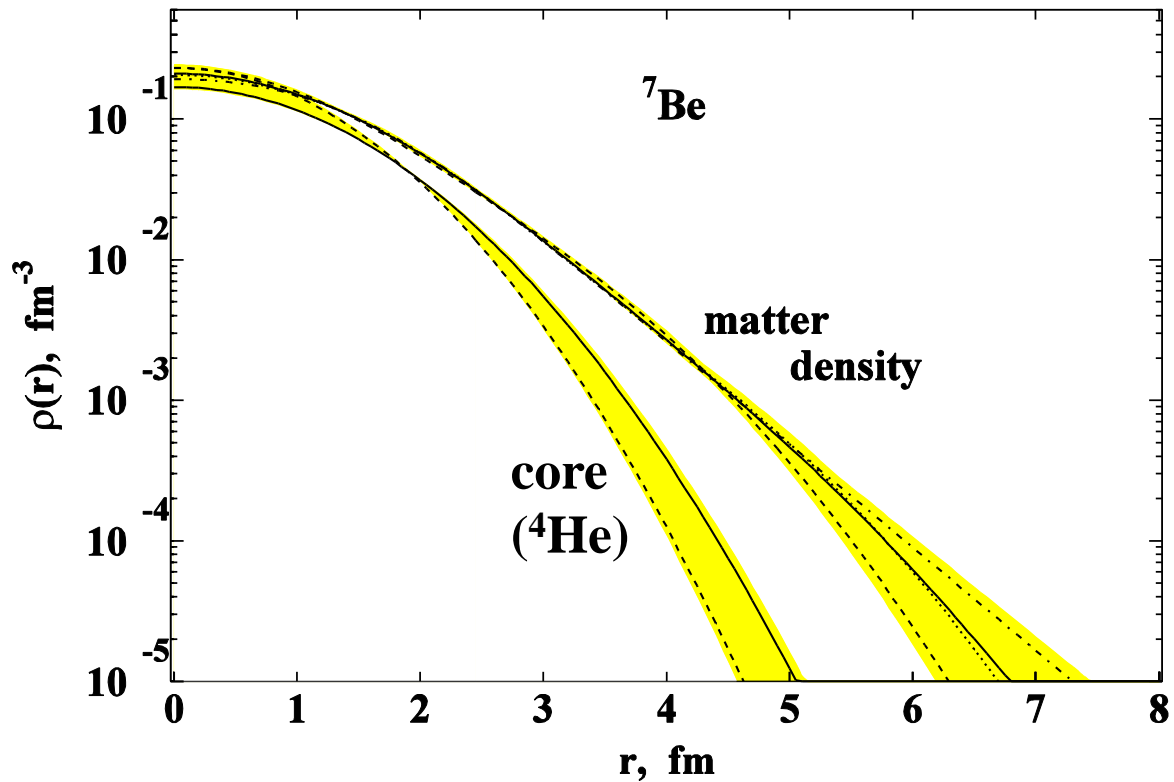
Чувствительность сечений к форме распределения материи для ${}^7\text{Be}$ и ${}^8\text{B}$



указание на
кластерную структуру ${}^7\text{Be}$:
 ${}^4\text{He} + {}^3\text{He}$?

указание на наличие
гало в ${}^8\text{B}$

Распределение материи для ${}^7\text{Be}$



В предположении ${}^7\text{Be} = {}^4\text{He} + {}^3\text{He}$
для моделей GG и GO получаем:

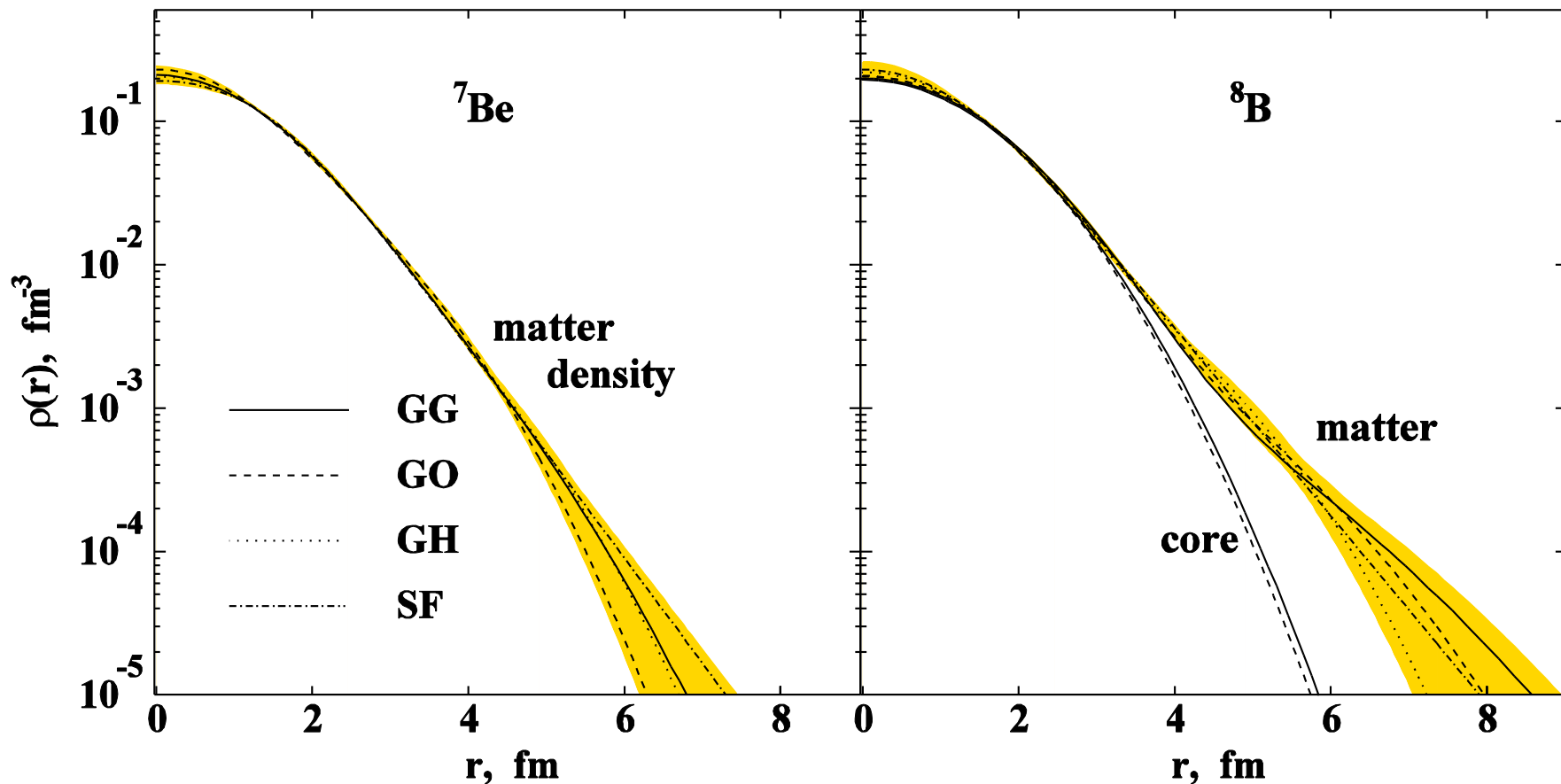
$$R_{{}^4\text{He}} = 1.88 \pm 0.14 \text{ fm}$$

$$R_{{}^3\text{He}} = 2.94 \pm 0.11 \text{ fm}$$

Радиус материи:

$$R_m = 2.41 \pm 0.04 \text{ fm}$$

Сравнение распределения материи в ядрах ${}^7\text{Be}$ и ${}^8\text{B}$



В предположении ${}^8\text{B} = {}^7\text{Be} + p$
 для моделей GG и GO имеем:

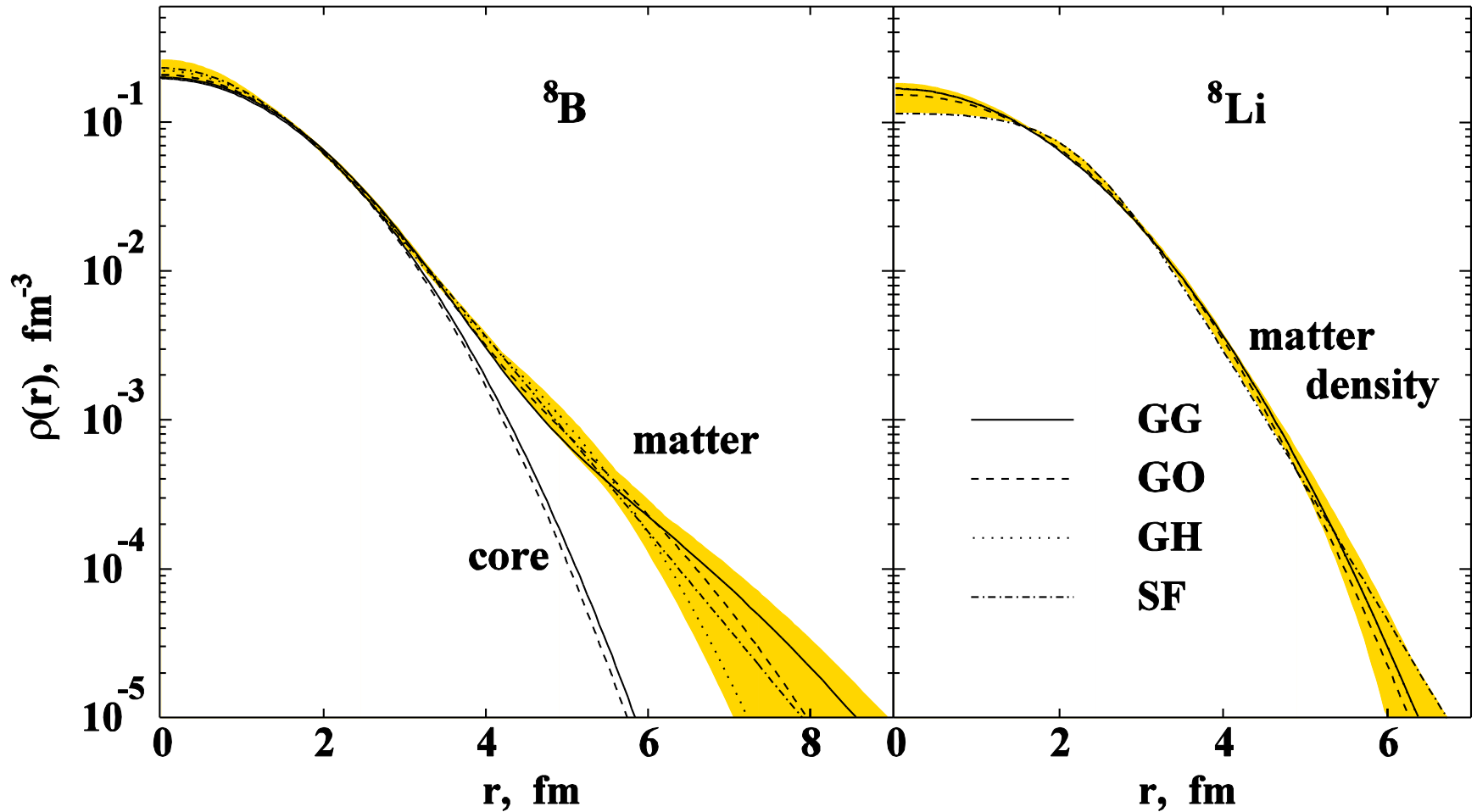
$$R_{\text{core}} = 2.25 \pm 0.03 \text{ fm}$$

$$R_{\text{halo}} = 4.24 \pm 0.24 \text{ fm}$$

→ сравн. для ${}^7\text{Be}$:
 $R_m = 2.41 \pm 0.04 \text{ fm}$

Радиус материи:
 $R_m = 2.58 \pm 0.06 \text{ fm}$

Распределение материи в ядрах ${}^8\text{B}$ и ${}^8\text{Li}$



Радиусы исследованных ядер

Изотоп	R_m , fm	R_c , fm	R_h , fm
${}^6\text{He}$	2.45 (10)	1.88 (12)	3.31 (28)
${}^8\text{He}$	2.53 (8)	1.55 (15)	3.22 (14)
${}^6\text{Li}$	2.44 (7)	2.08 (18)	3.04 (45)
${}^8\text{Li}$	2.50 (6)	--	--
${}^9\text{Li}$	2.44 (6)	--	--
${}^{11}\text{Li}$	3.71 (20)	2.53 (3)	6.85 (58)
${}^{12}\text{Be}$	2.71 (6)	2.36 (6)	4.00 (28)
${}^{14}\text{Be}$	3.25 (11)	2.54 (11)	4.48 (19)
${}^7\text{Be}$	2.41 (4)	1.88 (14)	2.94 (11)
${}^8\text{B}$	2.58 (6)	2.24 (2)	4.24 (25)
${}^{15}\text{C}^*$	2.59 (5)	2.41 (2)	4.36 (38)
${}^{16}\text{C}^*$	2.72 (6)	2.39 (6)	4.45 (26)
${}^{17}\text{C}^*$	2.66 (4)	2.55 (2)	3.99 (48)

$$R_m^2 = \frac{N_c R_c^2 + N_h R_h^2}{A}$$

**) Предварительные данные*

IKAR Collaboration

Г.Д. Алхазов, М.Н. Андроненко, А.А. Воробьев, Г.Е. Гаврилов,
А.В. Добровольский, А.А. Жданов, А.Г. Инглесси, Н.Б. Исаев, О.А. Киселев,
Б.Г. Комков, Г.А. Королев, А.А. Лободенко, Ф.В. Мороз, В.А. Мыльников,
Г.Е. Петров, Д.М. Селиверстов, Л.О. Сергеев,
Н.А. Тимофеев, А.В. Ханзадеев, В.И. Яцюра

F. Aksouh, A. Bauchet, A. Bleile, T. Beha, K.-H. Behr, A. Brühnle, K. Burkhsrdt,
D. Cortina-Gil, P. Egelhof, C. Fischer, S. Fritz, H. Geissel, M. Gorska, C. Gross,
M. Hellström, S. Ilieva, H. Irnich, R. Kanungo, G. Kraus, M. Matoš, G. Münzenberg,
S.R. Neumaier, F. Nickel, C. Nociforo, Yu.A. Litvinov, T. Schäfer,
C. Scheidenberger, A. Shrivastava, W. Schwab, H. Simon, P. Singer,
K. Sümmerer, T. Suzuki, H. Weick, M. Winkler

M. Mutterer, J.P. Theobald

О.В. Бочкарев, В.А. Волков, В.Н. Прибора, Л.В. Чулков

Петербургский институт ядерной физики, Гатчина

Gesellschaft für Schwerionenforschung, Darmstadt, Germany

Institut für Kernphysik, TU Darmstadt, Darmstadt, Germany

Курчатовский институт, Москва