

# **Исследование структуры экзотических ядер на установке с активной мишенью ИКАР методом упругого рассеяния в инверсной кинематике**

## **1. Экзотически ядра**

## **2. Экспериментальный метод и анализ результатов измерений**

- идея эксперимента:**

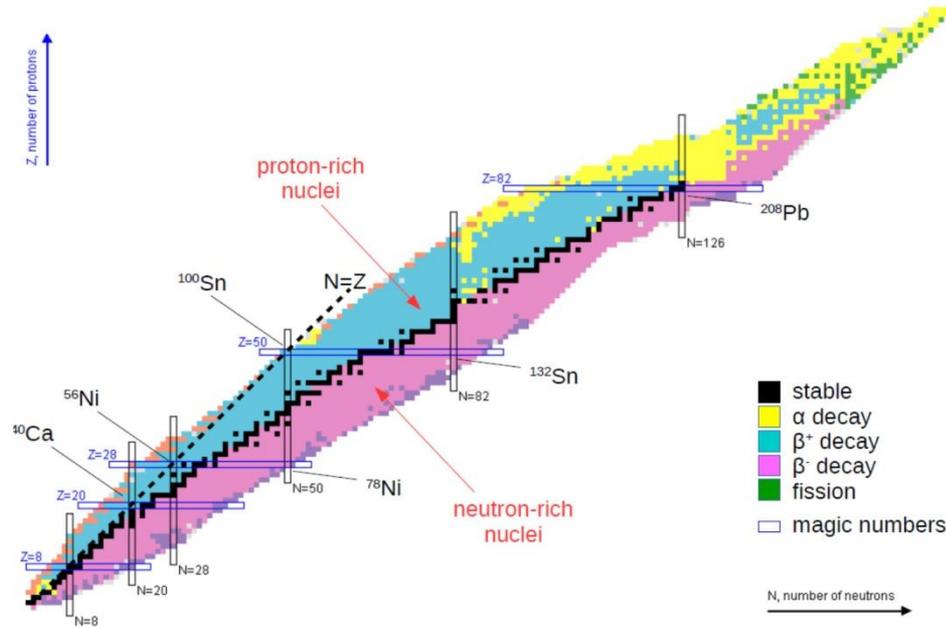
  - ионизационная камера ИКАР как активная мишень**

- основные этапы обработки данных**

- анализ сечений в рамках теории Глаубера**

## **3. Результаты**

# Размеры и форма - основные характеристики атомных ядер



## Ядра вблизи долины стабильности

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

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

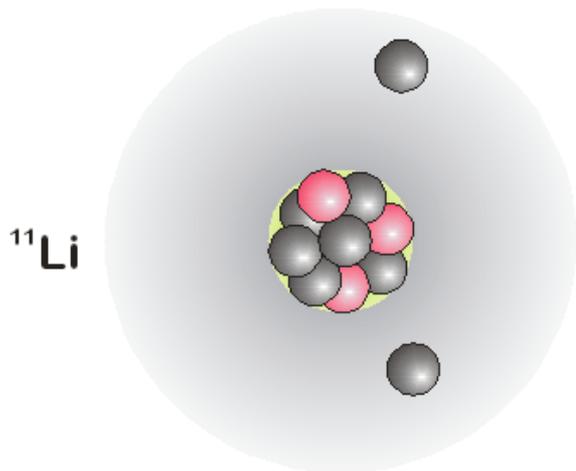
$$\rho_0 \approx 0.17 \text{ нуклон/фм}^3$$

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

$$\delta \sim 0.5 \text{ фм} (\Delta r \approx 2.2 \text{ фм}) \text{ для всех ядер}$$

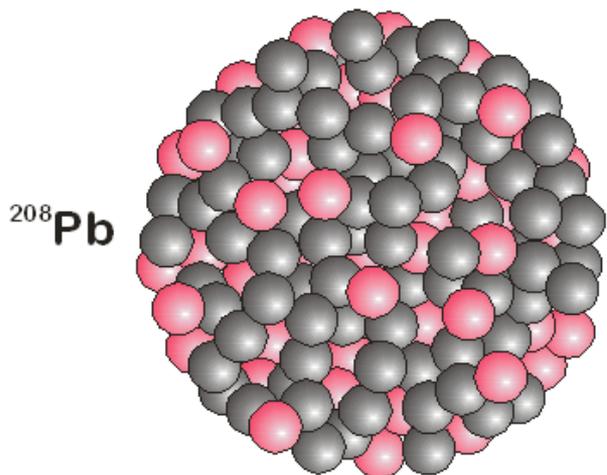
## Ядра с гало – новый феномен в изучении структуры ядра

### Распределение ядерной материи



Ядра с большим избытком нейтронов:

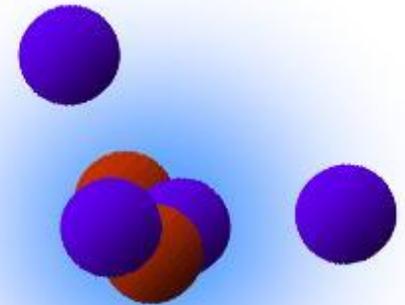
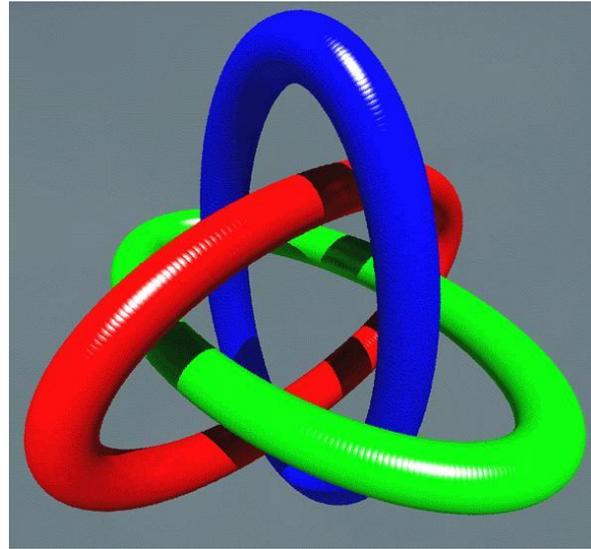
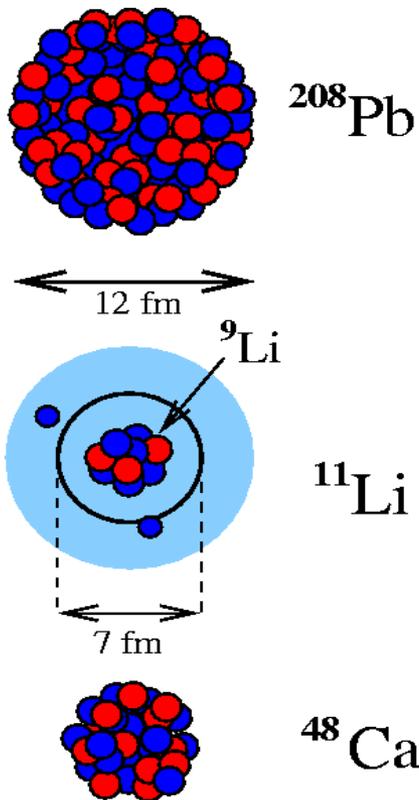
**нейтронное гало**



Стабильные ядра:

**нейтроны и протоны  
распределены равномерно**

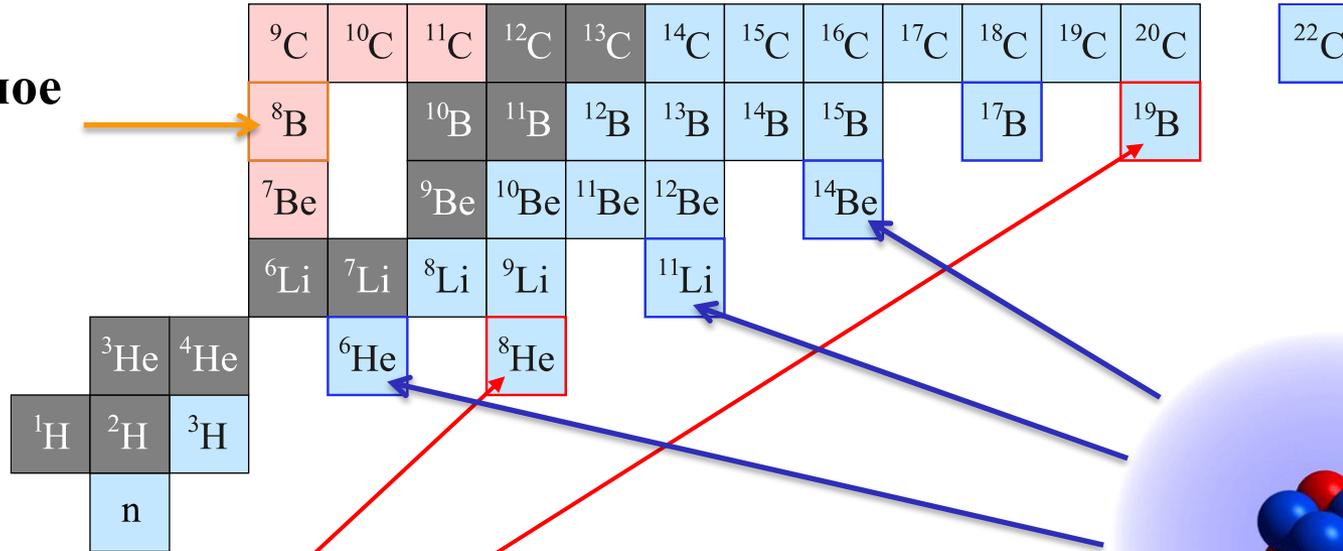
# Ядерное “гало” и ядра Борромео



Halo nuclei are examples of ‘Borromean’ systems, only bound with three interactions... remove any one and the other two fall apart....

## Особенности структуры легких экзотических ядер

**протонное  
гало**



**4-нейтронная  
шуба**

**ядра  
Борромео**

Условия образования гало:

- энергия отделения  $S_n \leq 1$  МэВ
- низкий орбитальный момент валентного нейтрона:  $l = 0, 1$

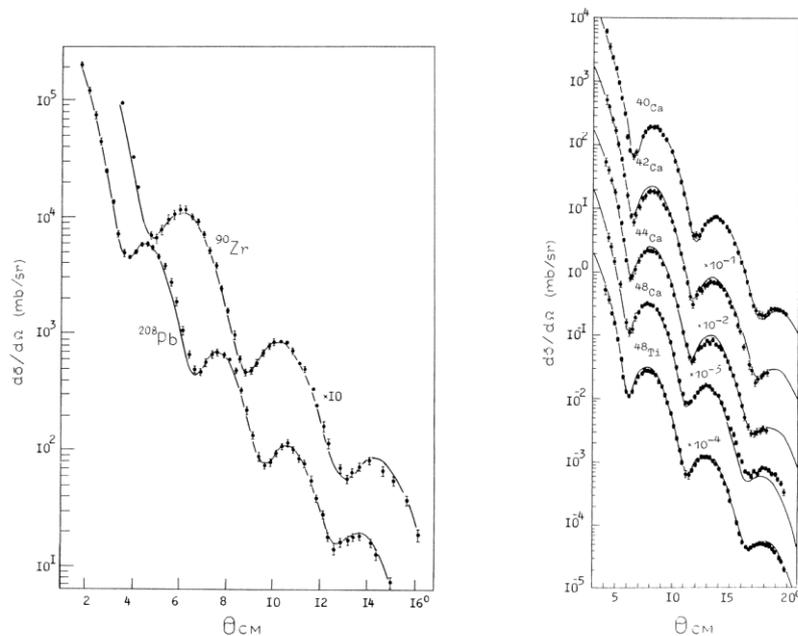
Проявление гало:

- значительный рост сечения  $\sigma_R$  или  $\sigma_I$
- узкое импульсное распределение продуктов реакции при фрагментации
- величина сечения выбивания одного нейтрона

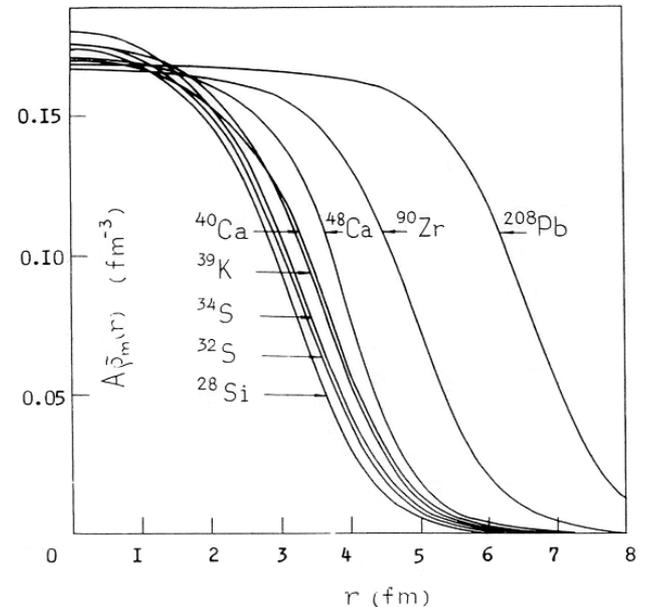
# Упругое рассеяние протонов на ядрах при энергии 1 ГэВ

**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**

**Исследование структуры легких экзотических ядер  
методом упругого рассеяния протонов  
в области малых углов**

$$R_m = [(A_c \cdot R_c^2 + A_v \cdot R_v^2)/A]^{1/2}$$

**В серии экспериментов в инверсной кинематике измерены дифференциальные сечения упругого рассеяния протонов в диапазоне переданных импульсов  $0,002 < |t| < 0,05$  (ГэВ/с)<sup>2</sup> на ядрах:**

**<sup>4</sup>He, <sup>6</sup>He, <sup>8</sup>He**

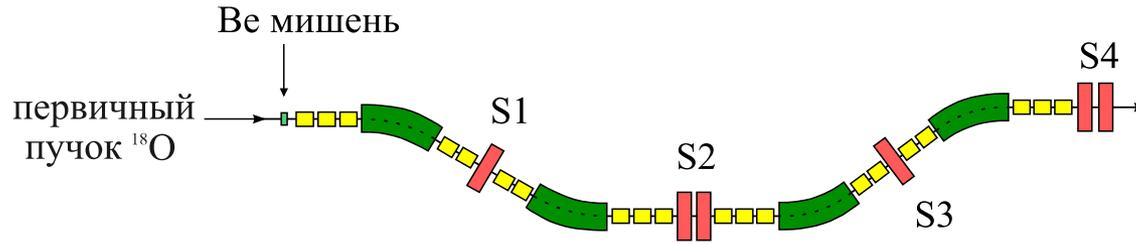
**<sup>6</sup>Li, <sup>8</sup>Li, <sup>9</sup>Li, <sup>11</sup>Li**

**<sup>12</sup>Be, <sup>14</sup>Be, <sup>7</sup>Be, <sup>8</sup>B**

**<sup>12</sup>C, <sup>14</sup>C, <sup>15</sup>C, <sup>16</sup>C, <sup>17</sup>C**

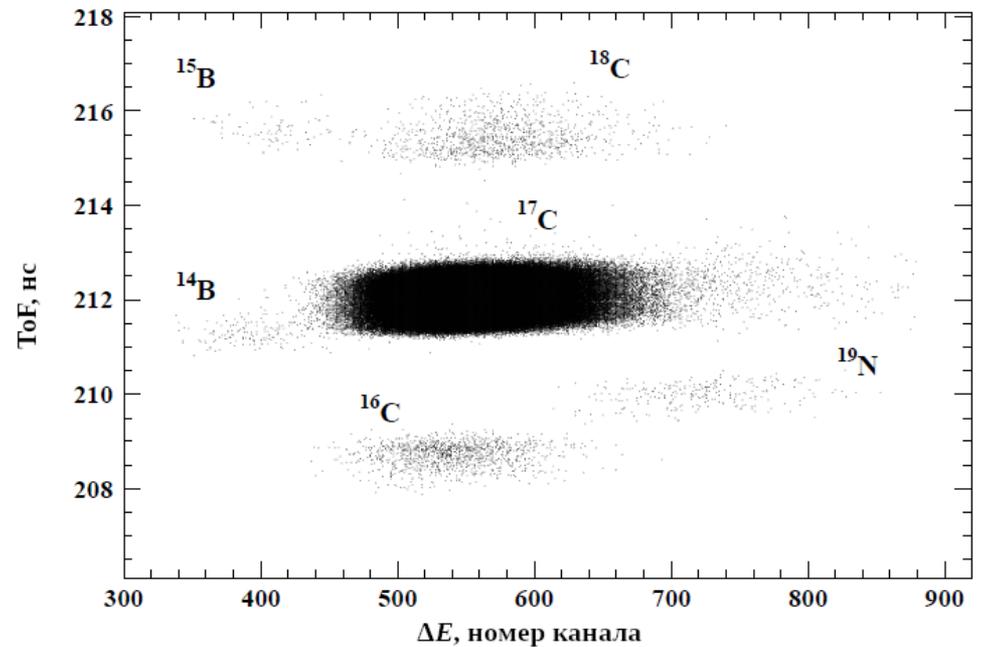
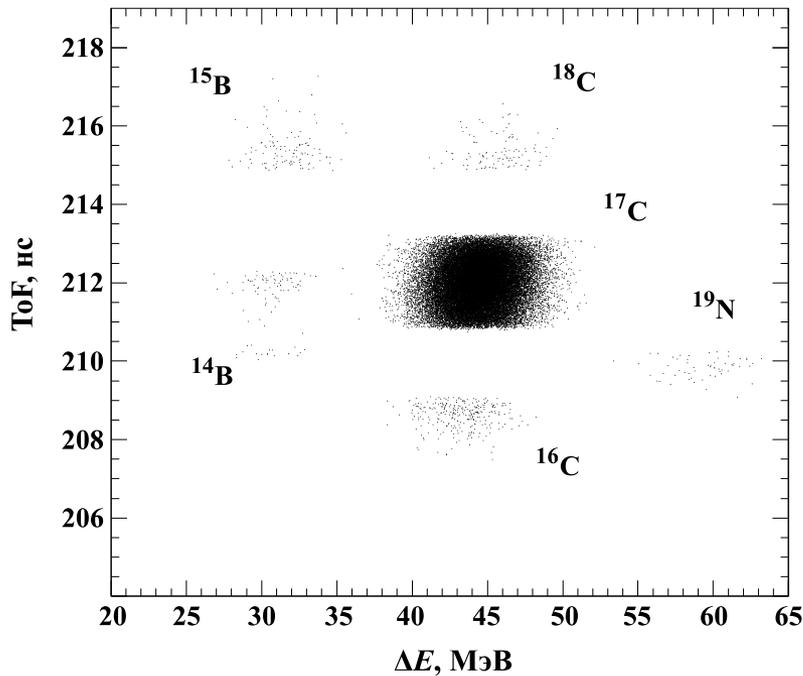
**и найдены параметры распределения ядерной материи  
 $R_m, R_c, R_v$**

# Пучок

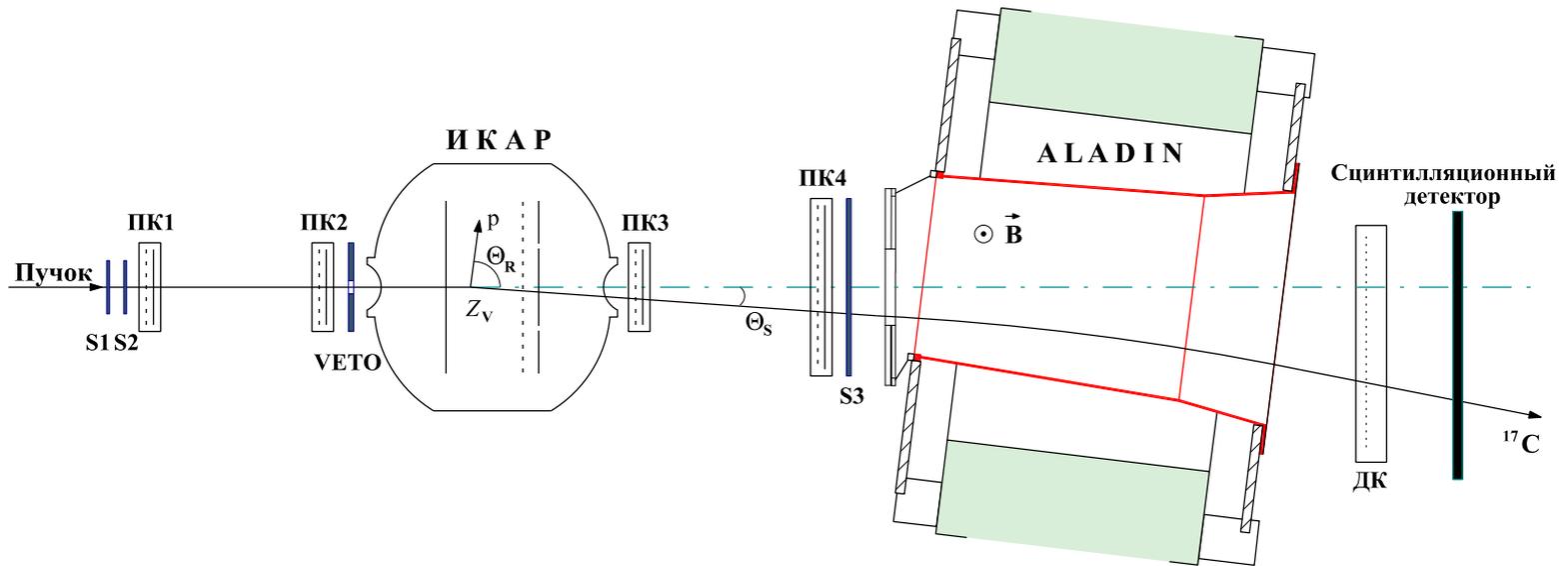


-  поворотный магнит
-  фокусирующая линза
-  область фокусировки

- S1 – 1<sup>й</sup> предварительный фокус
- S2 – дисперсионный фокус
- S3 – 3<sup>й</sup> предварительный фокус
- S4 – окончательная фокусировка



# Экспериментальная установка



**Активная мишень: ИКАР**

$\Rightarrow T_R, \theta_R, Z_V$

**Трековый детектор: РС 1–4  
(пропорциональные камеры)**

$\Rightarrow \theta_S$

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

$\Rightarrow \Delta E, \text{ToF}, \text{триггер}$

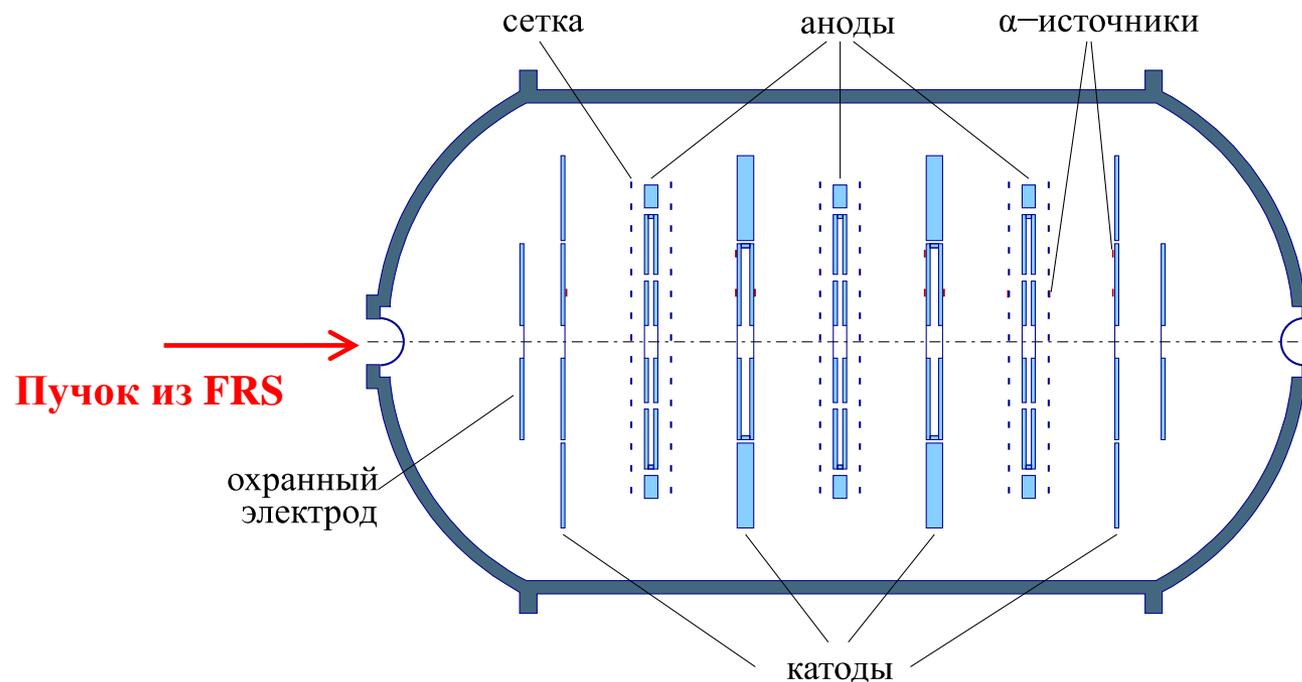
**Магнит ALADIN + измерение  
координаты и заряда (по  $\Delta E$ )**

$\Rightarrow$  выделение  
упругого канала

# Экспериментальная установка

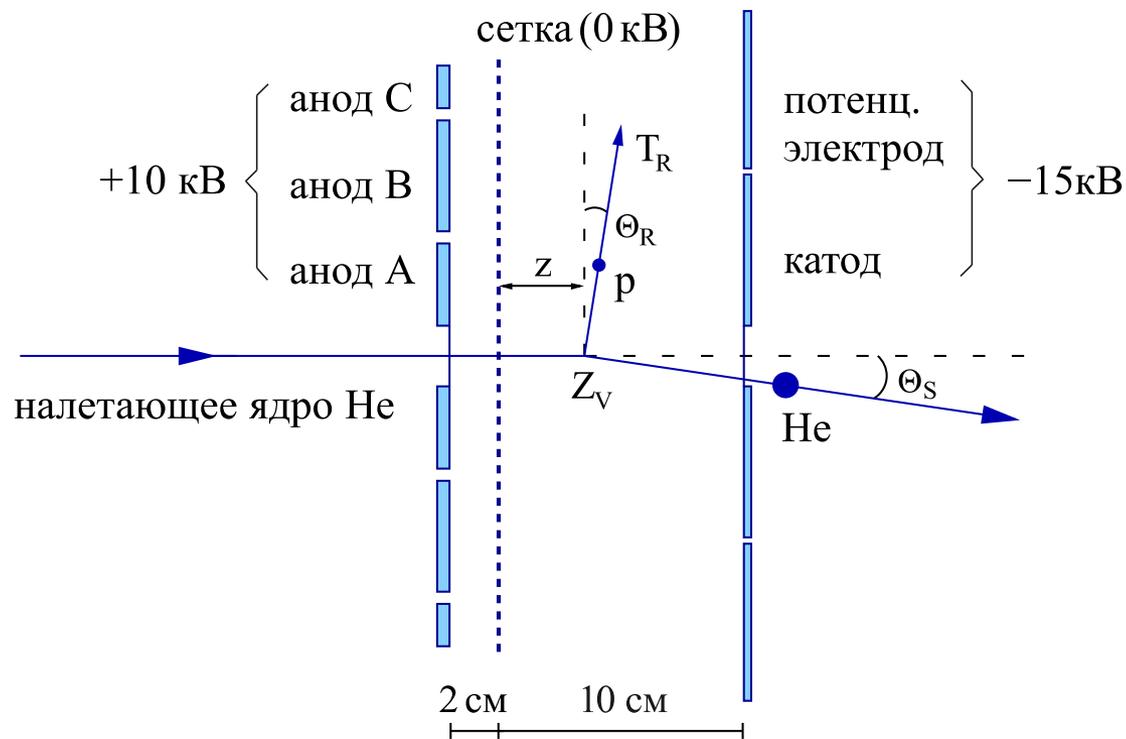


# Ионизационная камера ИКАР

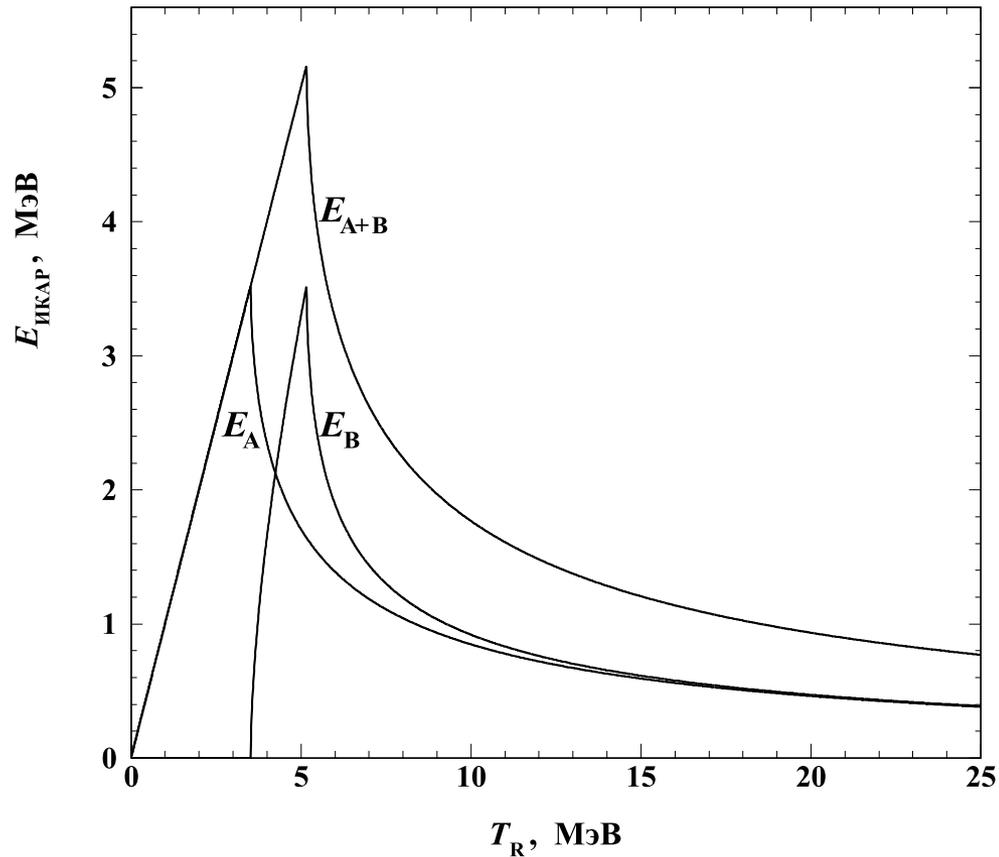


Мишень + детектор протонов отдачи

# Упругое рассеяние в ИКАРе

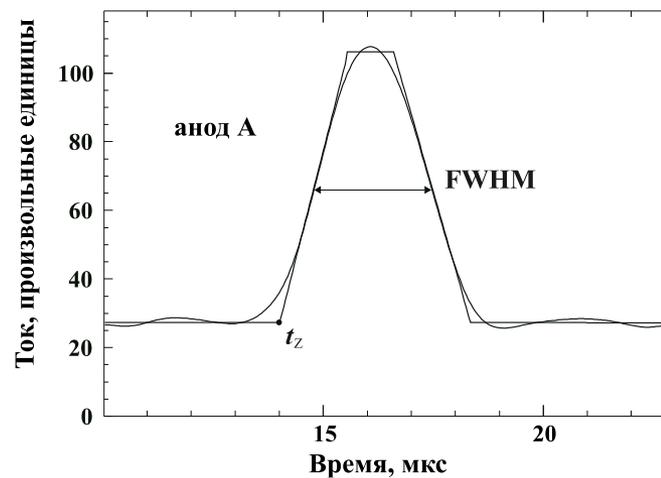
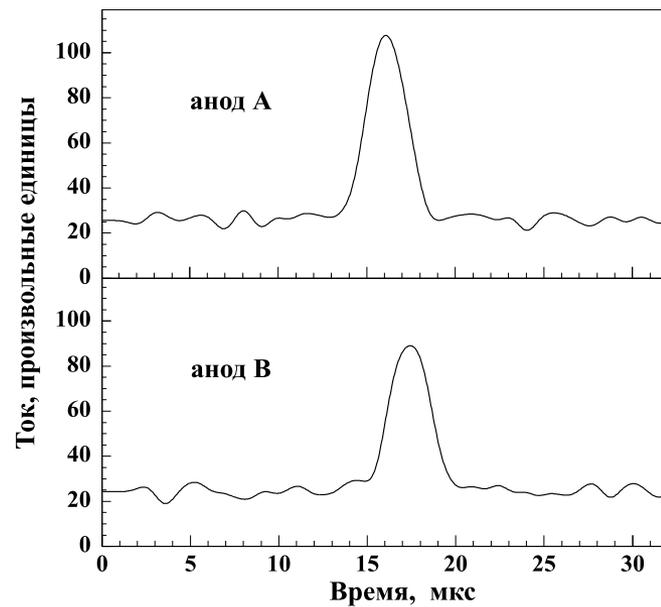


## Энергия протона отдачи, оставляемая в ИК

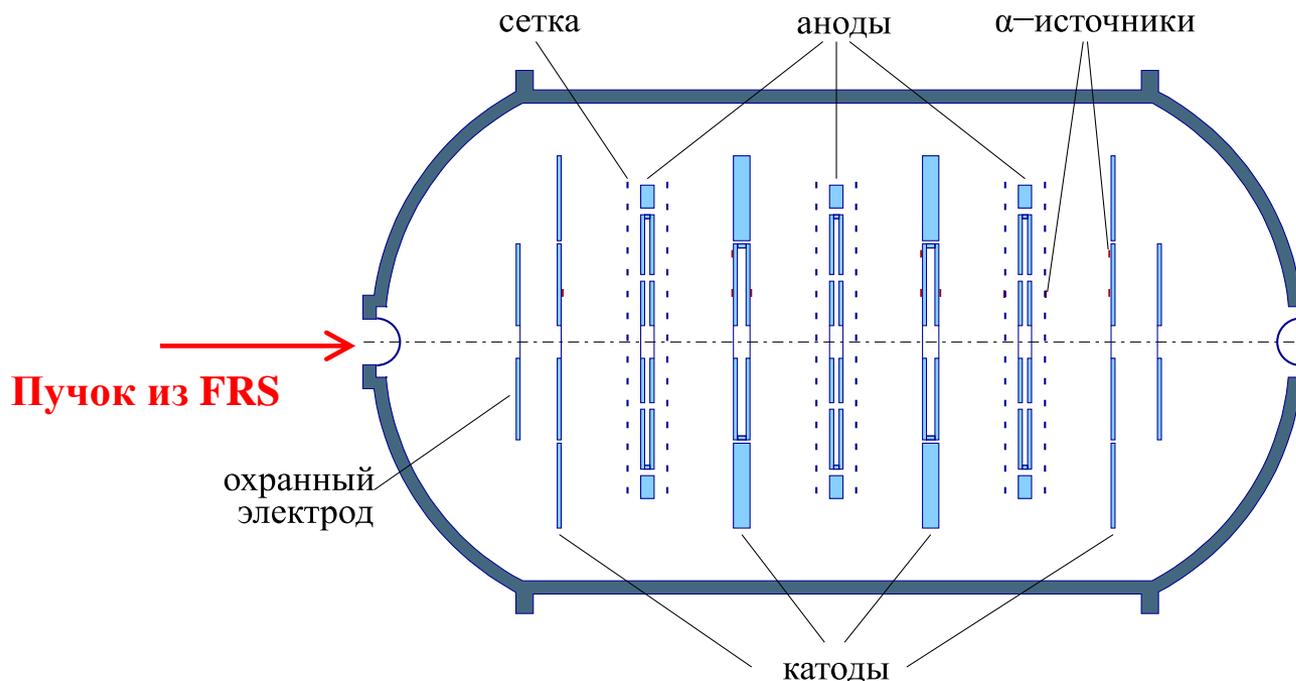


Расчёт выполнен для событий упругого рассеяния ядер  $^8\text{He}$  с энергией 0,7 ГэВ/нуклон в предположении, что пучок ядер  $^8\text{He}$  идёт по осевой линии ионизационной камеры.

# Сигналы с анодов ИКАРа



# Ионизационная камера ИКАР

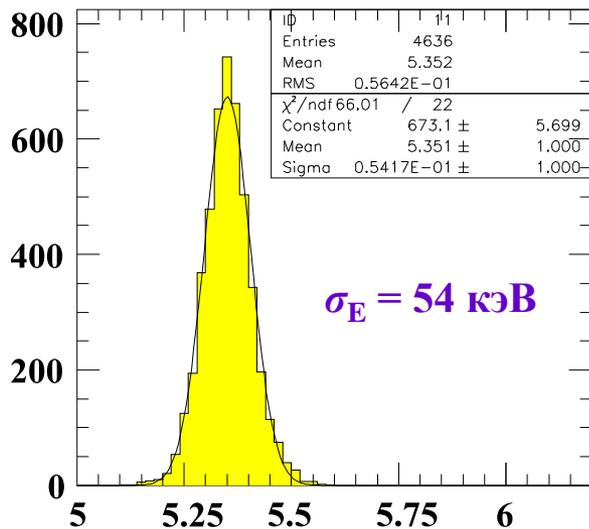


## Мишень.

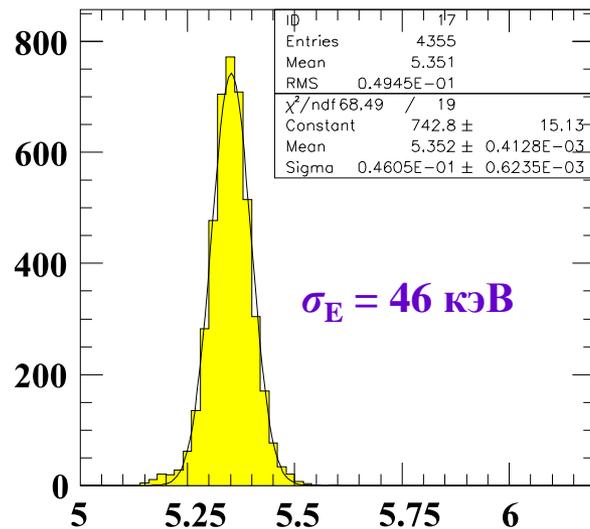
давление $\text{H}_2$ :	10 атм
толщина окон:	0,5 мм Be
толщина мишени:	$3 \cdot 10^{22}$ протонов/см <sup>2</sup> (6 модулей)
интенсивность пучка:	$\leq 10^4$ сек <sup>-1</sup>

# Энергетическая калибровка ИК и чистота газа

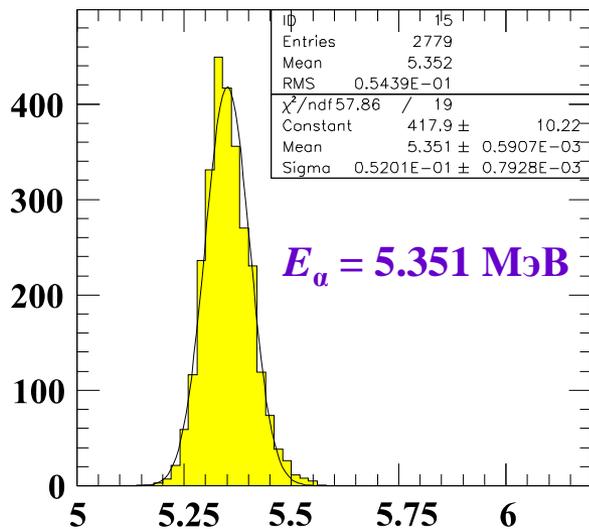
$^8\text{B}$



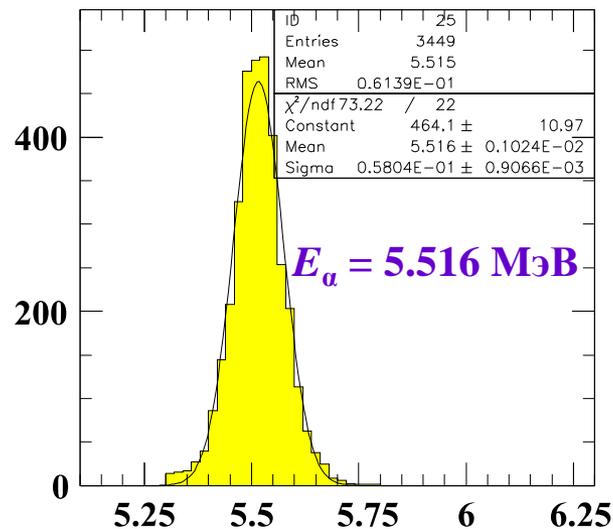
$E_\alpha$  A1



$E_\alpha$  B12

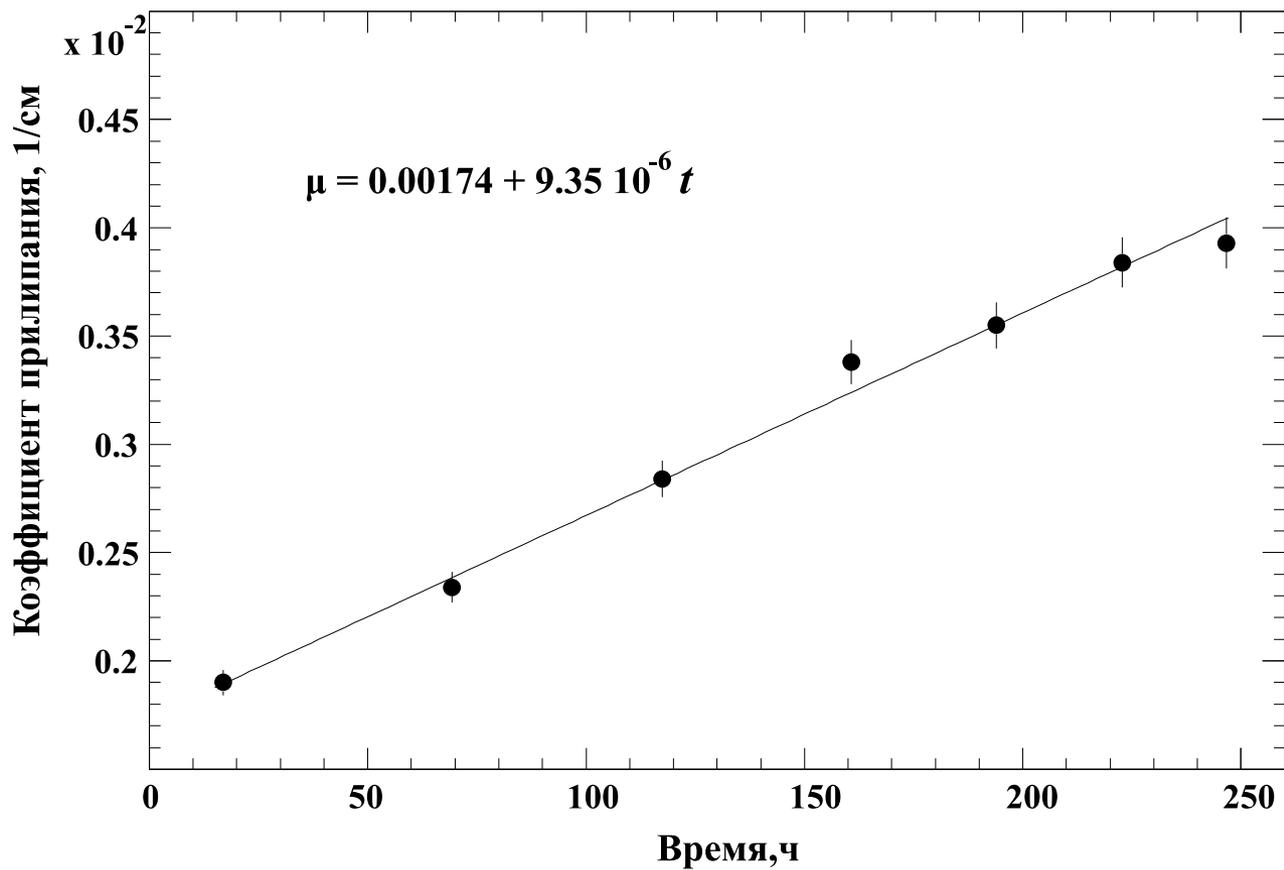


$E_\alpha$  A5. Cathode  $\alpha$



$E_\alpha$  A5. Grid  $\alpha$

## Чистота газа



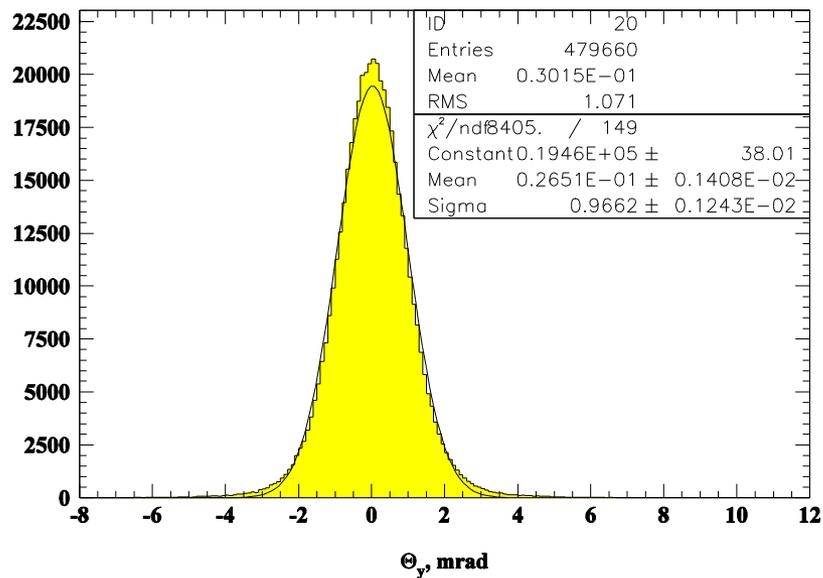
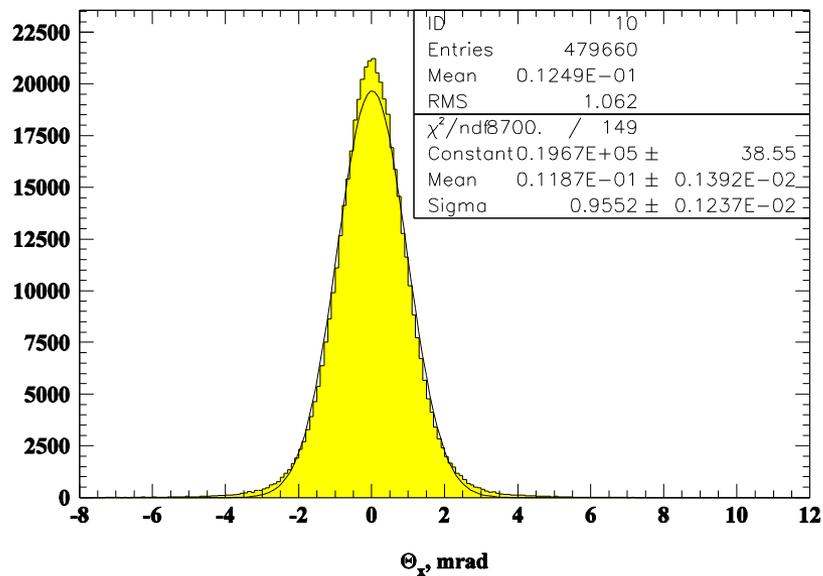
# Измерение дифференциальных сечений

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

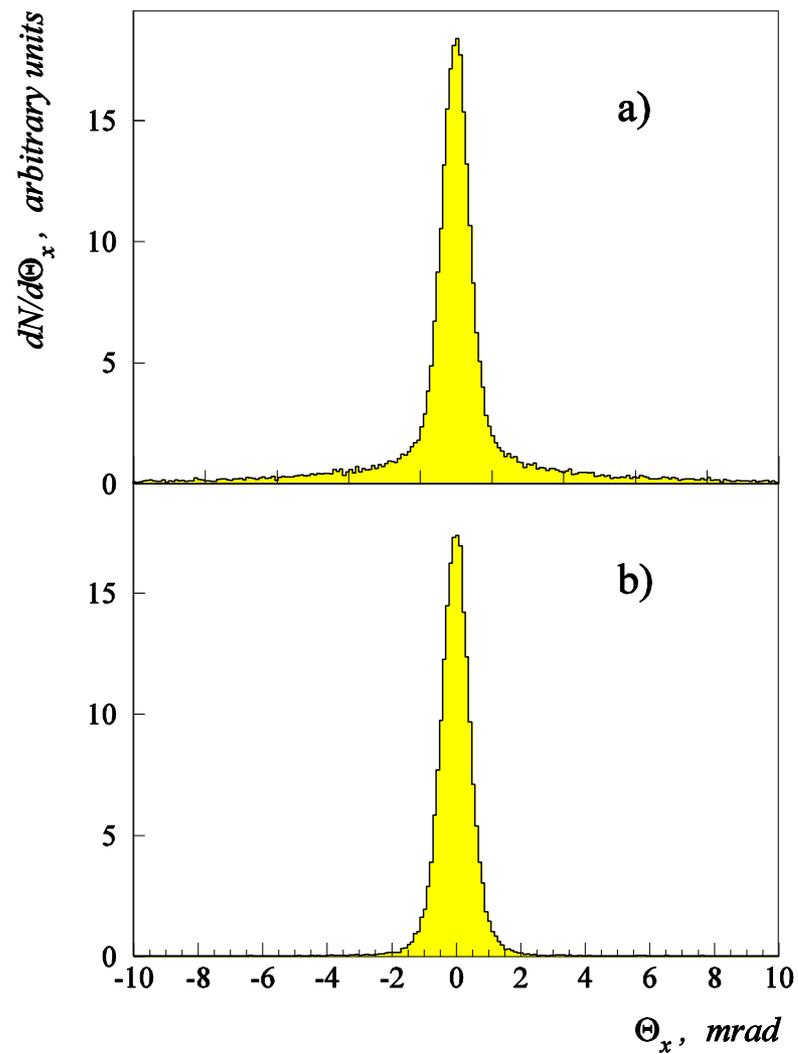
1. Энергетическая и временная (объем) калибровки ИКАРа }  $\Rightarrow$   $\sigma_{A(B)} = 40\text{--}60$  кэВ  
 $\Delta Z$  (FWHM) = 1 мм
2. Выстройка и калибровка трекового детектора, полученное разрешение для плоских углов  $\Delta\Theta_{x,y} = 0.4\text{--}1.0$  мрад  
(определяется многократным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

# Угловое разрешение трекового детектора

## <sup>8</sup>B. Angular resolution

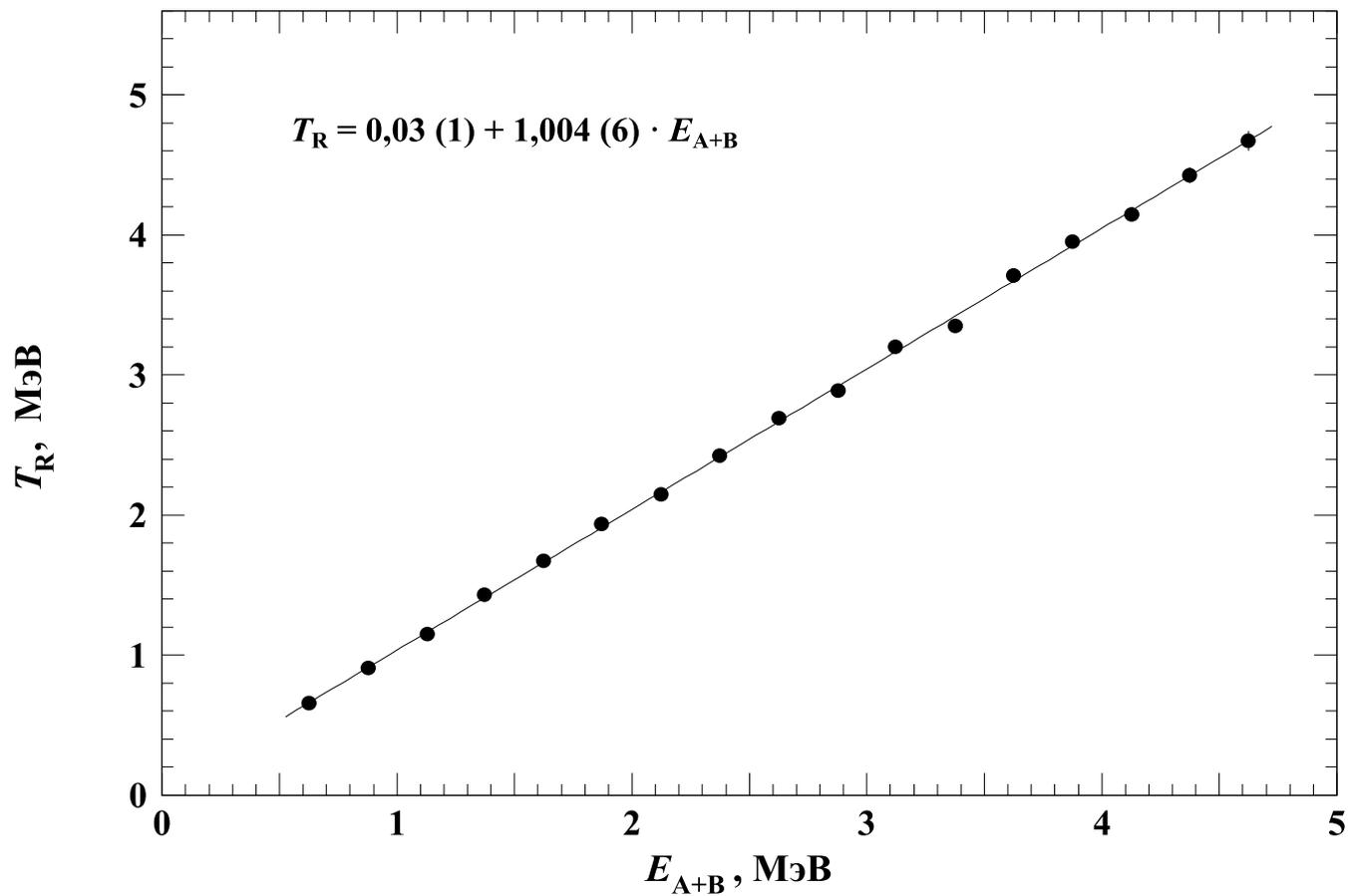


# Угловое разрешение трекового детектора, $p$ -Li рассеяние

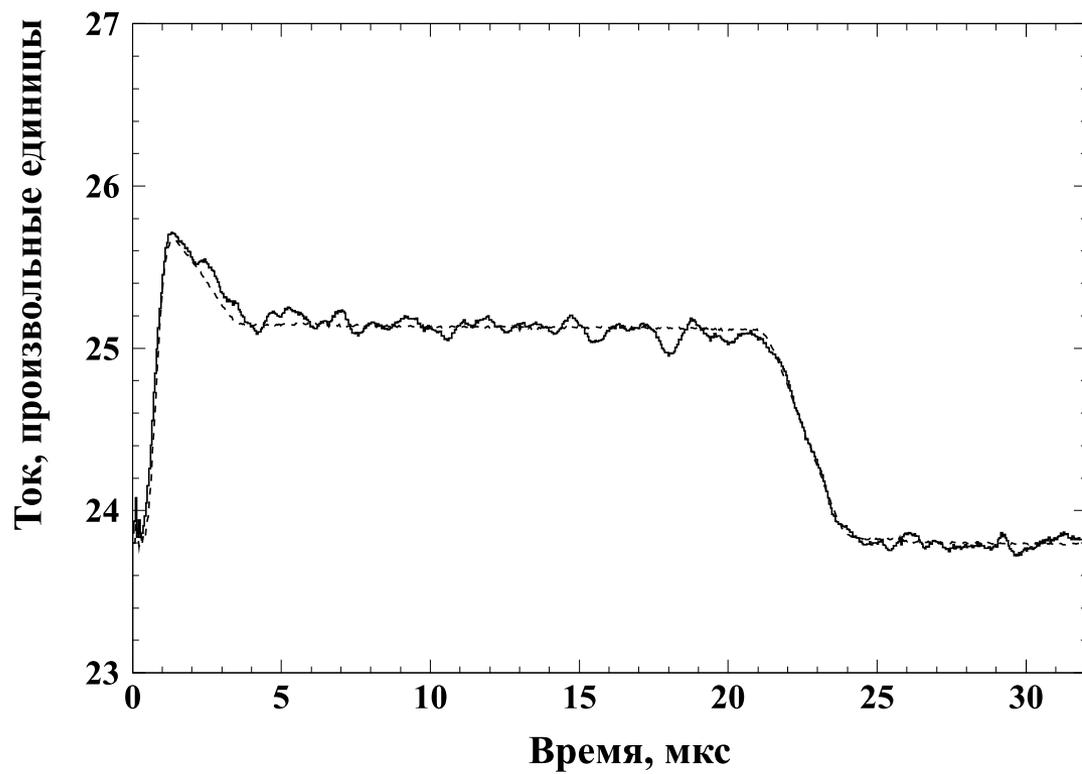


# Корреляция ИКАР - пропкамеры

$p^{15}\text{C}$  рассеяние

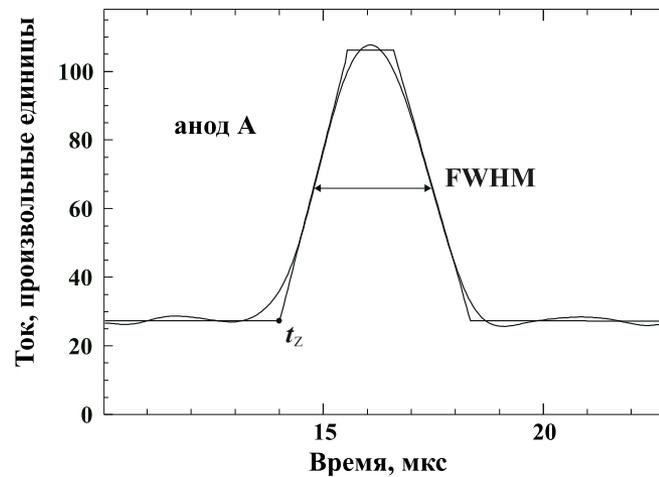
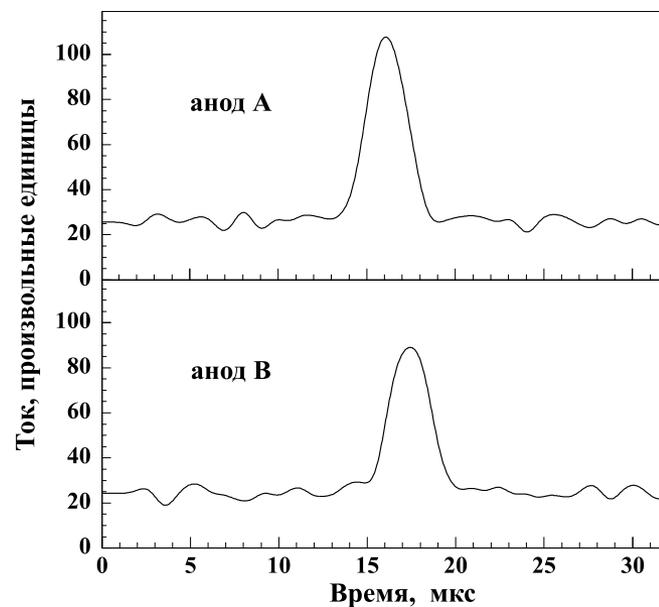


## Калибровка объёма

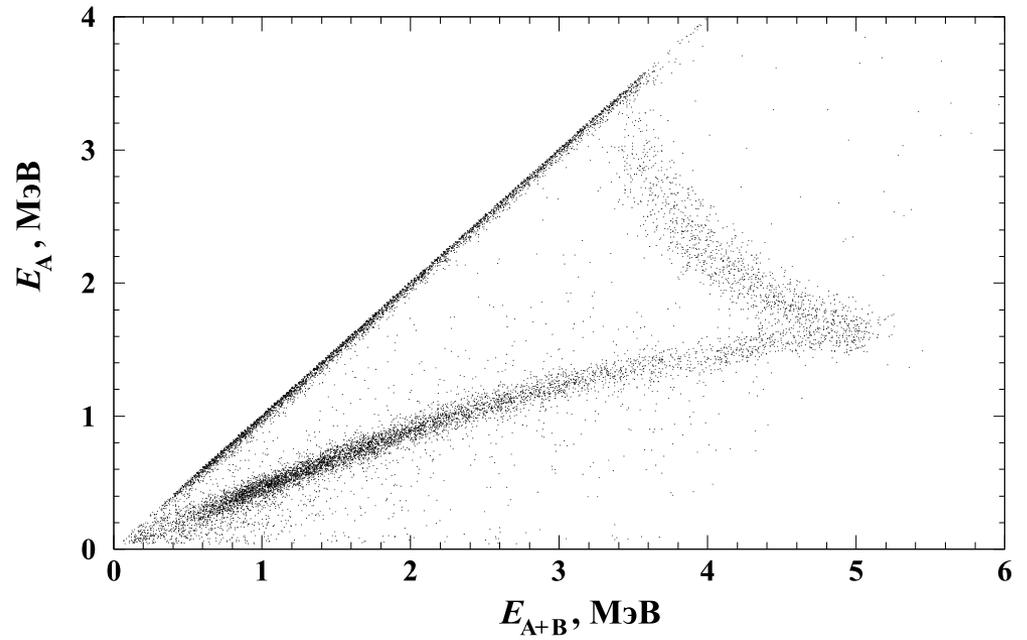
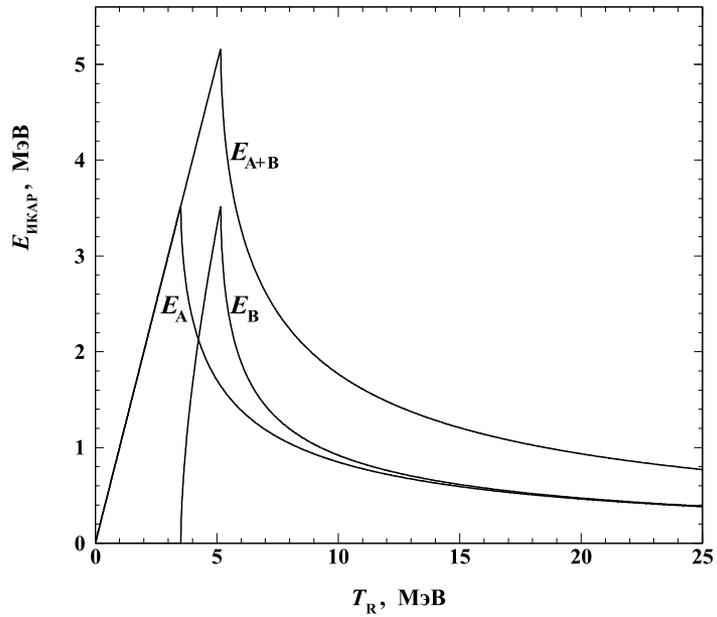


$\Delta Z$  (FWHM) = 1 мм

# Определение положения точки взаимодействия и толщины мишени

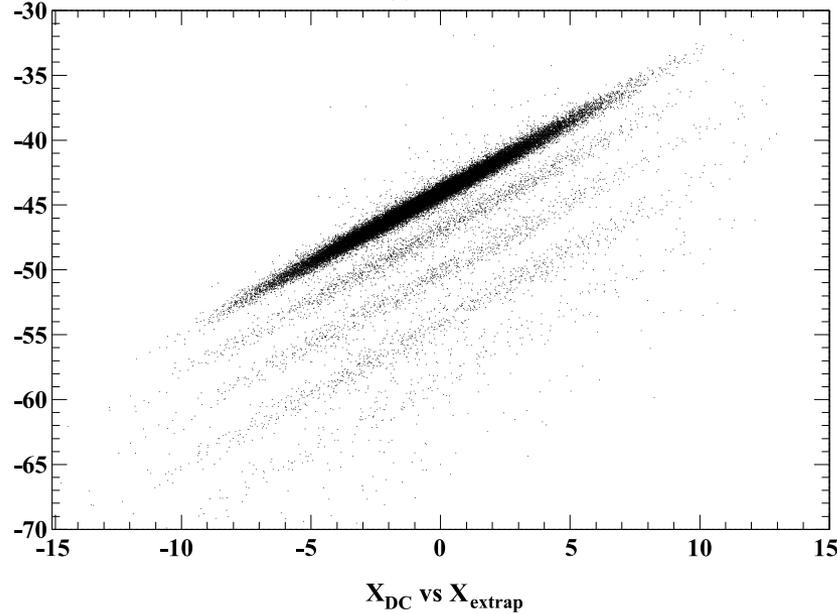


# Отбор полезных событий



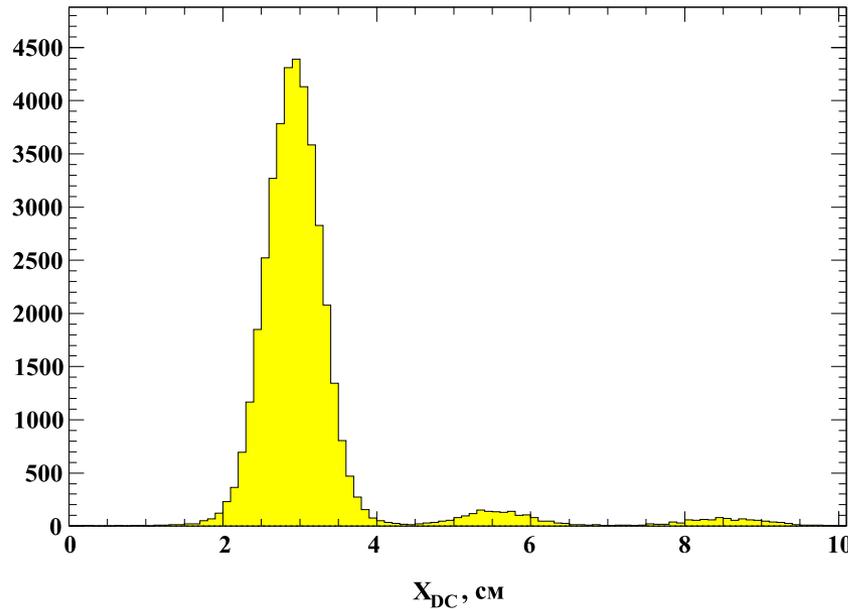
# Отбор полезных событий. Режекция событий развала

<sup>17</sup>C. Разделение изотопов



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

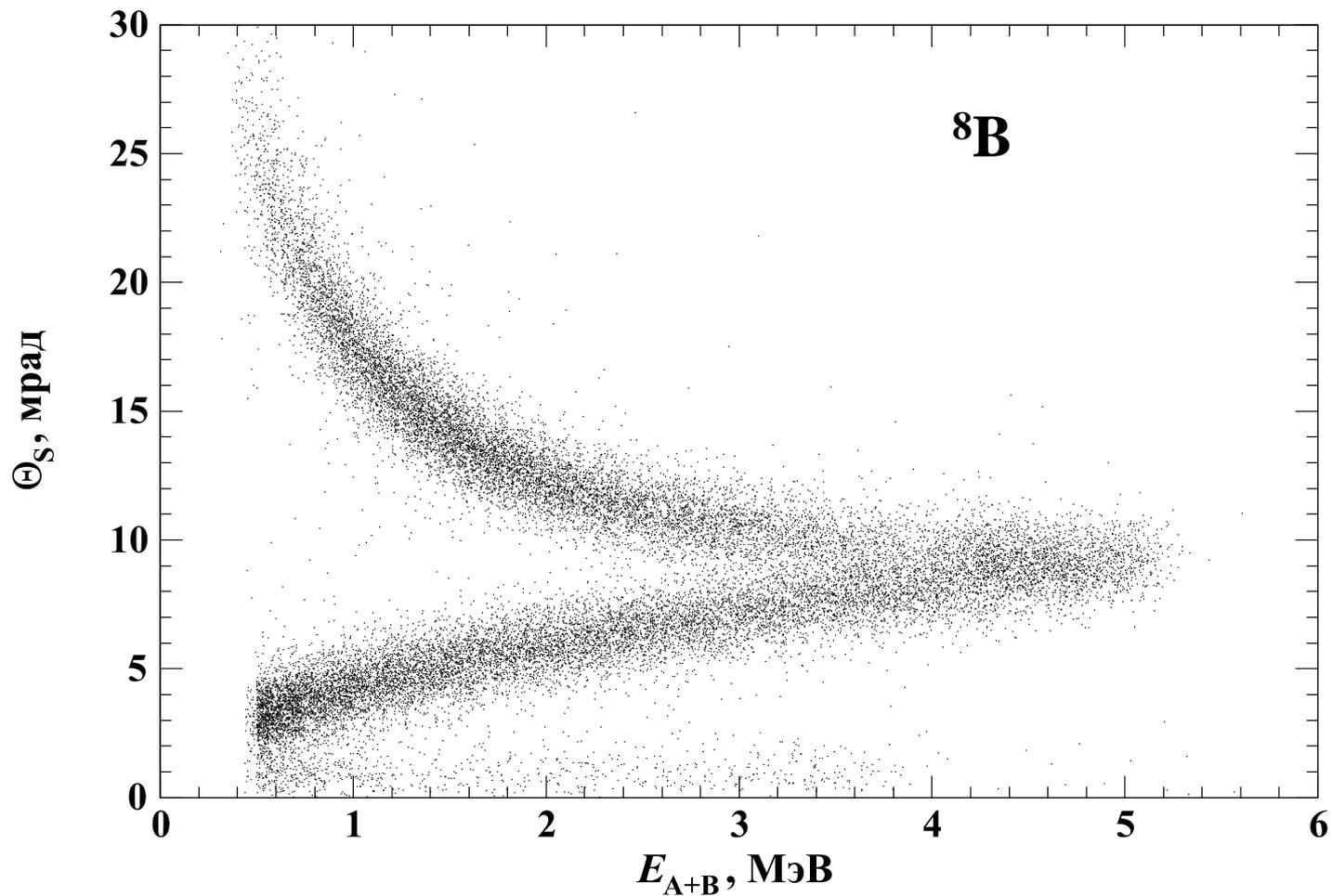
$$\Delta Z = Z_{DC} - Z_{PC4}$$



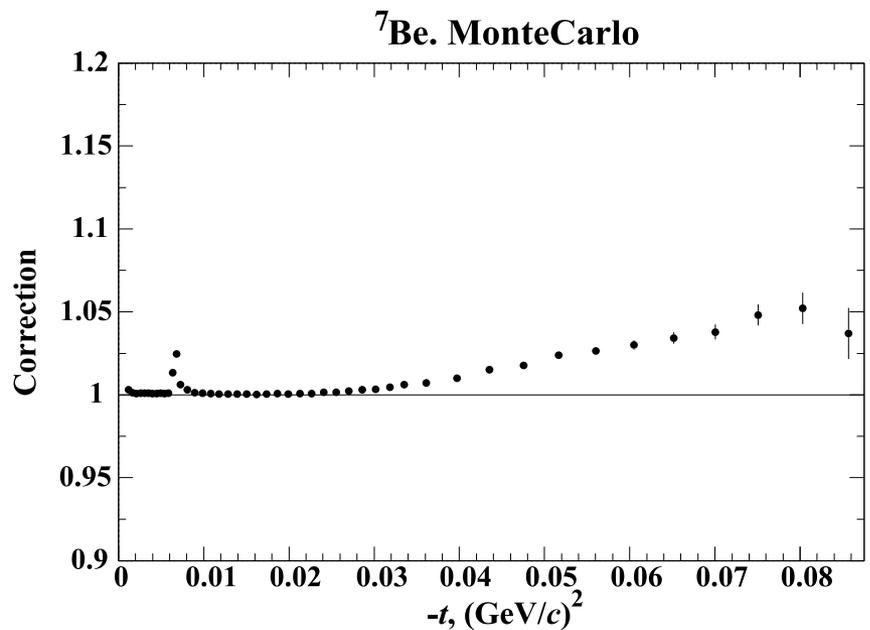
$$X = X_{extrap} - X_{DC}$$

# Корреляция ИКАР - ПК

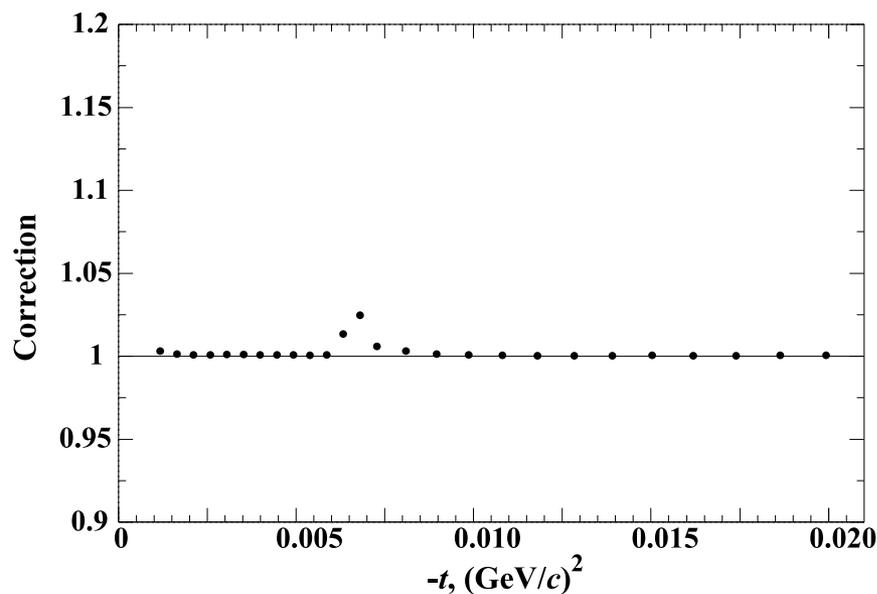
## Вычитание фона случайных совпадений



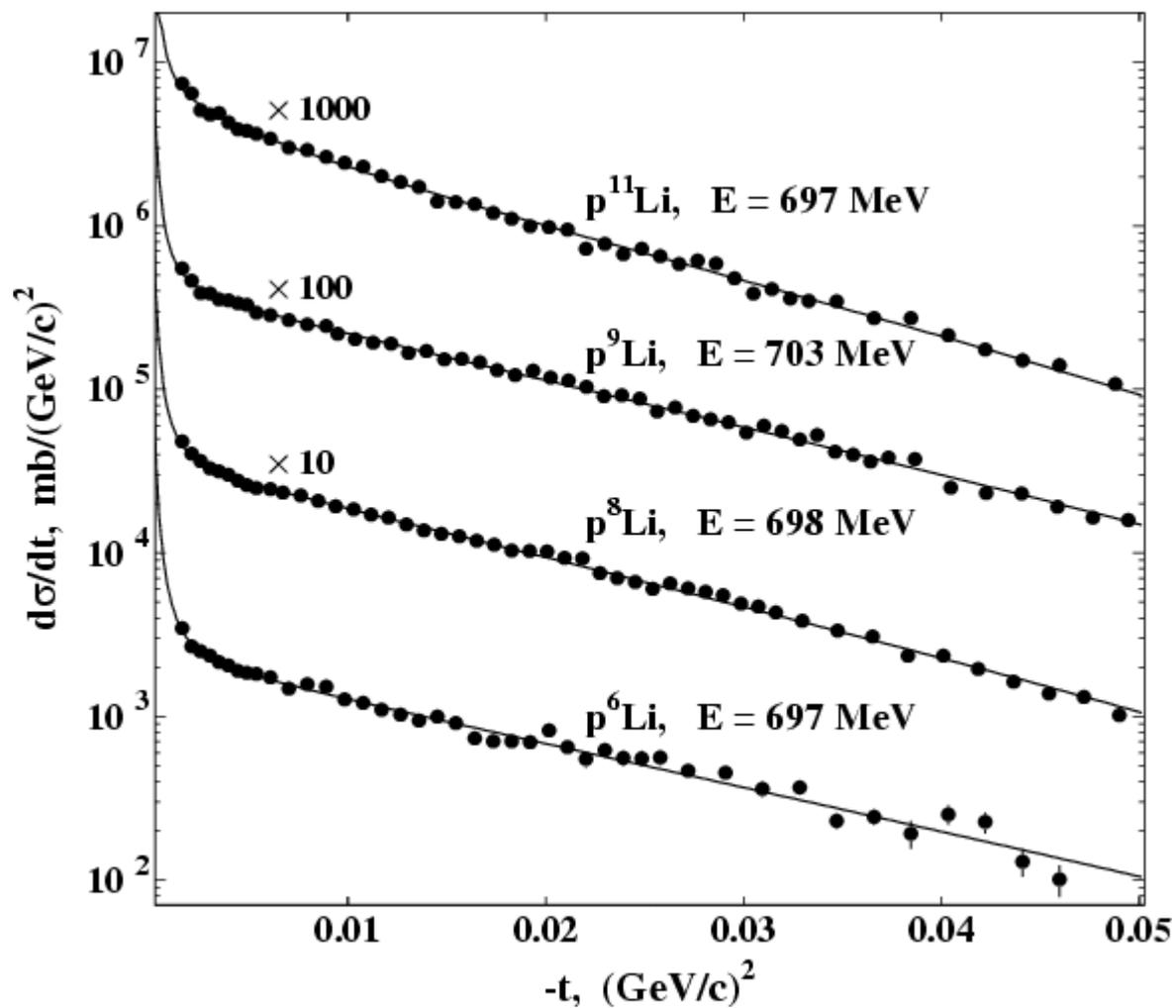
# Эффективность (потери при отборе событий)



Суммарная погрешность абсолютной нормировки составляет 2,5–3%



# Дифференциальные сечения упругого p-Li рассеяния



# Анализ сечений по Глауберу

На входе:

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

pN-амплитуда «сворачивается» с плотностью  
распределения ядерной материи



Глауберовская  
амплитуда

---

Феноменологические плотности для описания распределения ядерной материи:

**SF:** Symmetrized Fermi distribution

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

**GG:** 2 Gaussians

**GO:** Gaussian + 1p harmonic oscillator

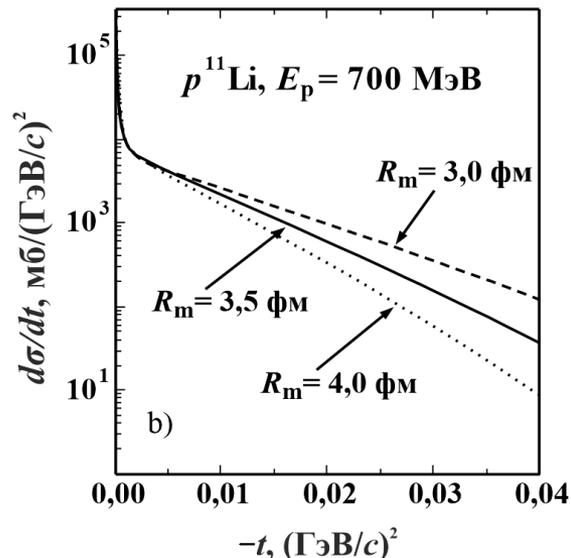
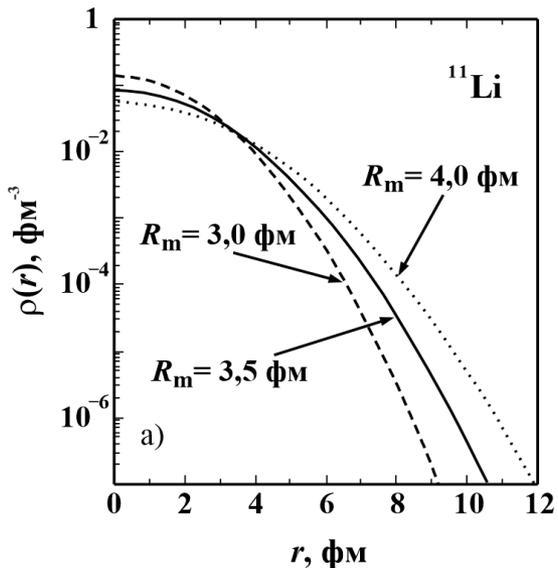
Все модели – с двумя свободными параметрами;  
две последние позволяют различать “кор” и “галло”

$$\langle R^2_{\text{folded}} \rangle = \langle R^2_{\text{unfolded}} \rangle + \langle r^2_{\text{nucleon}} \rangle$$

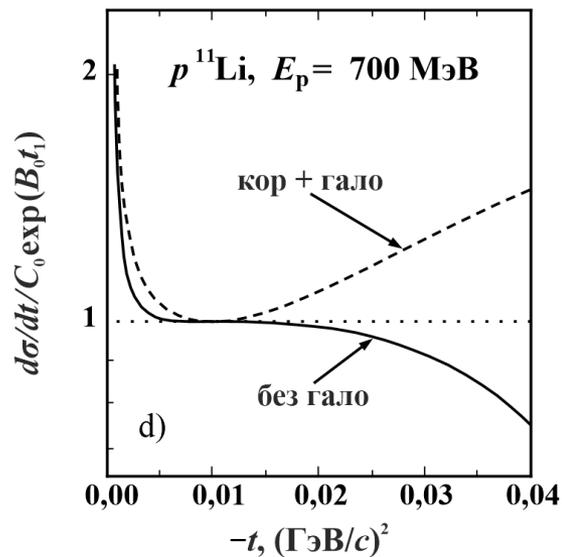
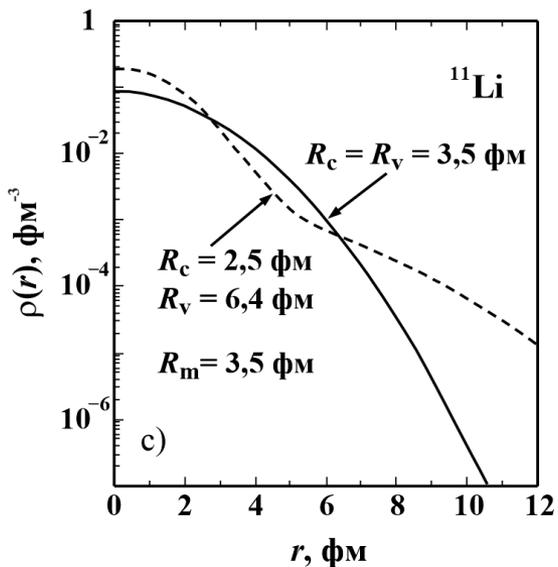
## Конфигурации ядер в анализе

Ядро	кор	валентные нуклоны
${}^6\text{He}$	${}^4\text{He}$	$2n$
${}^8\text{He}$	${}^4\text{He}$	$4n$
${}^6\text{Li}$	${}^4\text{He}$	$p+n$
${}^8\text{Li}$	${}^7\text{Li}$	$1n$
${}^9\text{Li}$	${}^7\text{Li}$	$2n$
${}^{11}\text{Li}$	${}^9\text{Li}$	$2n$
${}^7\text{Be}$	${}^4\text{He}$	$2p+n$
${}^{12}\text{Be}$	${}^{10}\text{Be}$	$2n$
${}^{14}\text{Be}$	${}^{12}\text{Be}$	$2n$
	${}^{10}\text{Be}$	$4n$
${}^8\text{B}$	${}^7\text{Be}$	$1p$
${}^{15}\text{C}$	${}^{14}\text{C}$	$1n$
${}^{16}\text{C}$	${}^{14}\text{C}$	$2n$
${}^{17}\text{C}$	${}^{16}\text{C}$	$1n$

# Чувствительность дифференциального сечения к форме распределения ядерной материи

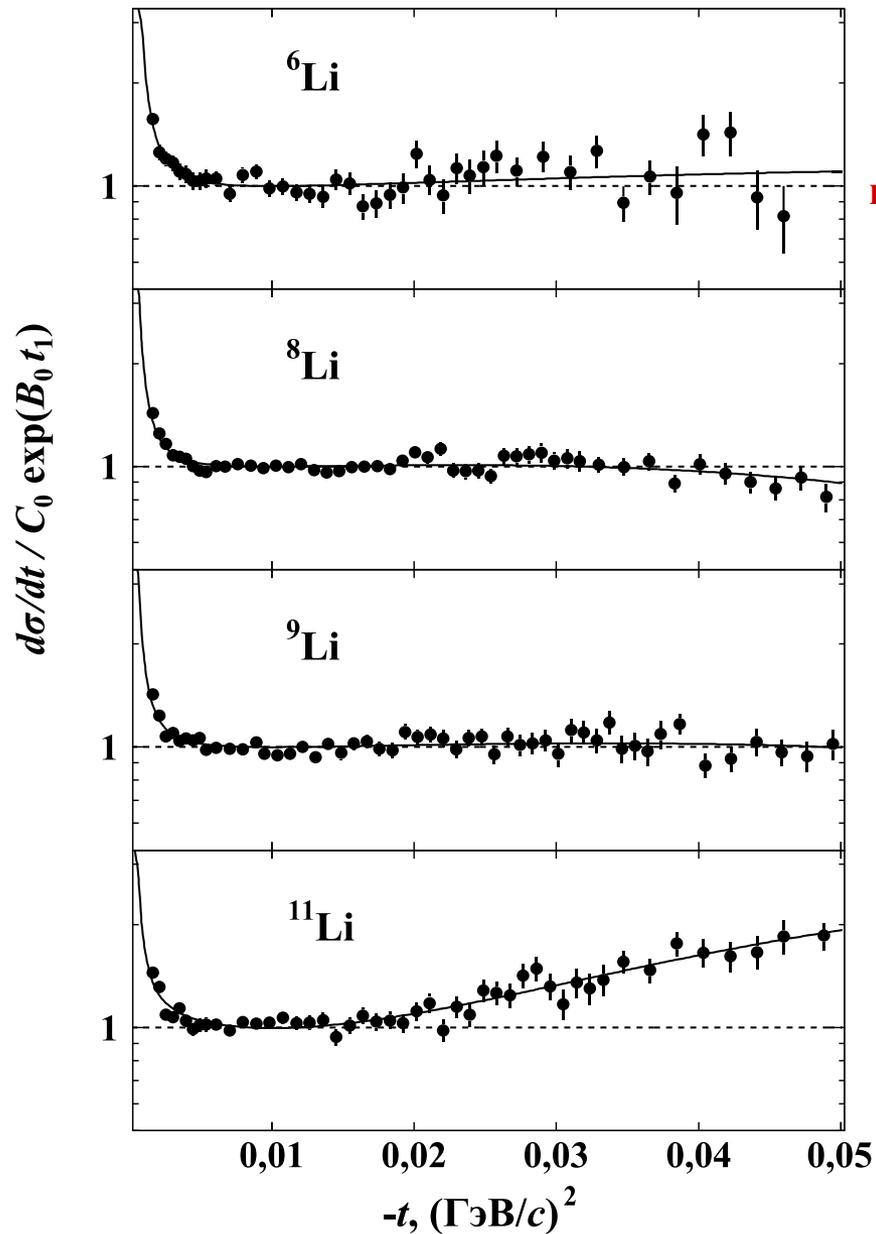


наклон  $d\sigma/dt \rightarrow$   
 радиус материи  $R_m$



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

# Чувствительность к форме распределения



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

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

## Результаты для ${}^6\text{Li}$

Параметризация	$\chi^2/N_{df}$	Результаты анализа данных			$R_m$ , фМ
		$A_n$	Параметры плотности		
SF	44,9/40	0,97 (2)	$R_0 = 1,78$ (47)	$a = 0,55$ (8)	2,45 (4)
GH	45,0/40	0,97 (2)	$R_m = 2,44$ (6)	$\alpha = 0,03$ (6)	2,44 (6)
GG	44,9/40	0,97 (2)	$R_c = 2,19$ (13)	$R_v = 2,89$ (38)	2,44 (6)
GO	44,9/40	0,98 (1)	$R_c = 2,02$ (11)	$R_v = 3,11$ (26)	2,44 (6)

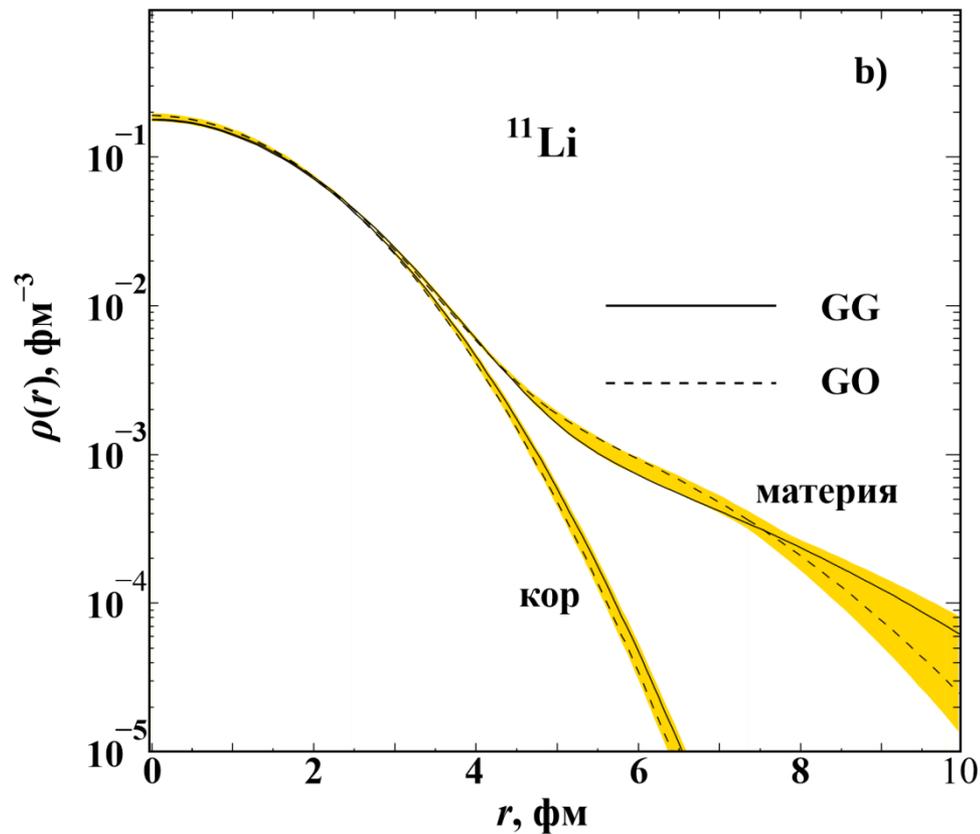
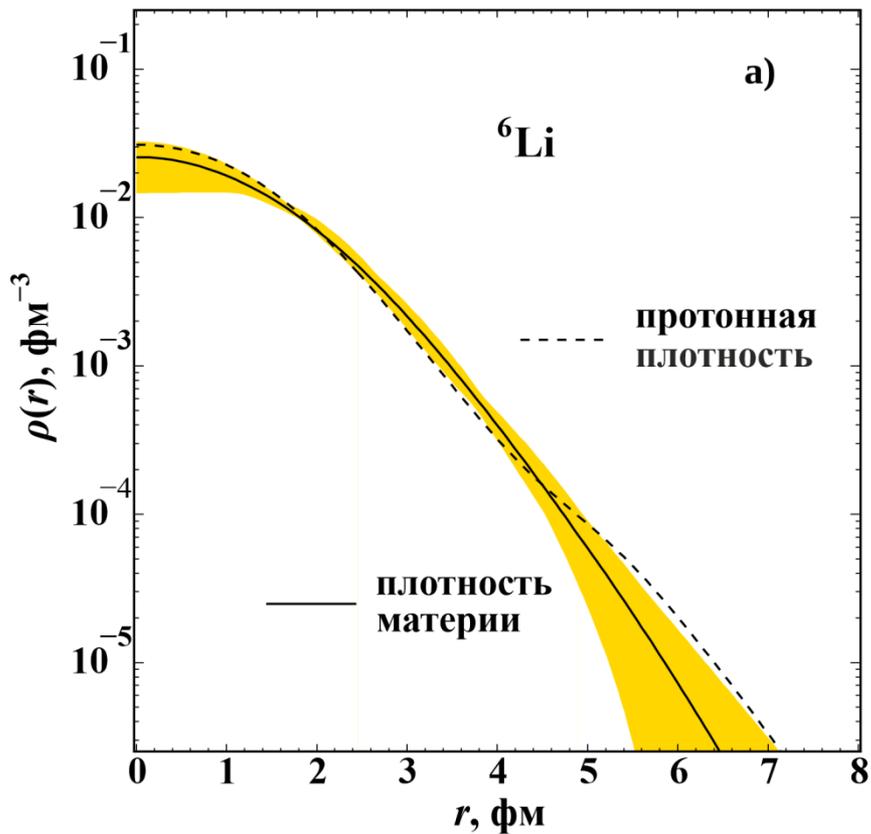
$$R_m = (2,44 \pm 0,07) \text{ фМ}$$

$$R_c = 2,11 (17) \text{ фМ}$$

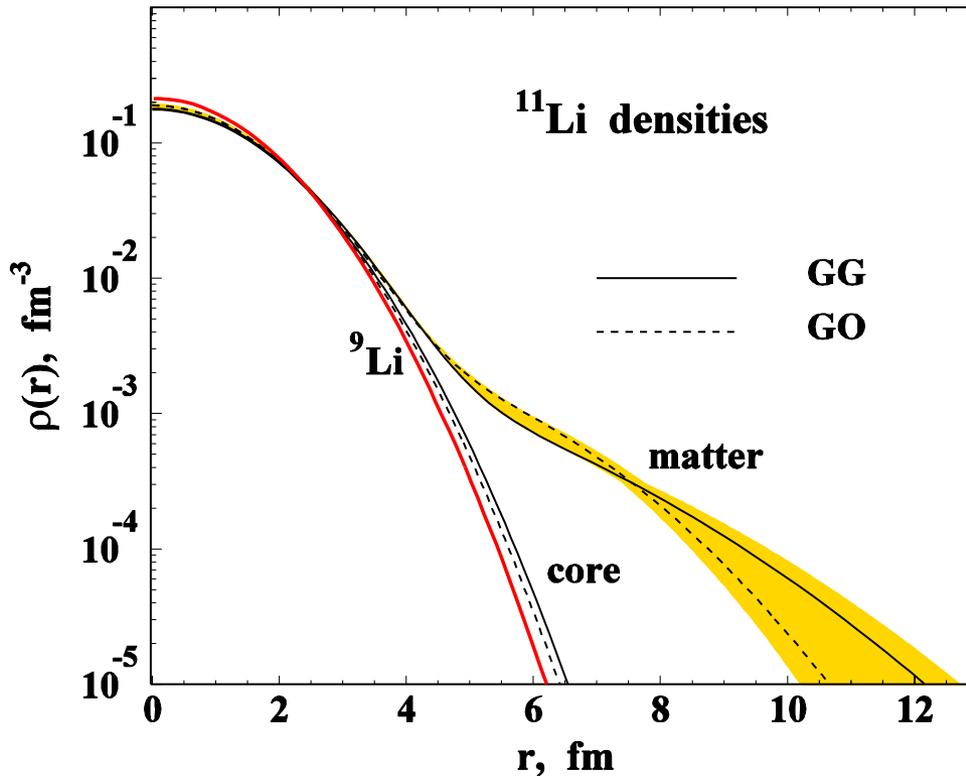
$$R_m = [(A_c \cdot R_c^2 + A_v \cdot R_v^2)/A]^{1/2}$$

$$R_v = 3,00 (34) \text{ фМ}$$

# Распределение ядерной материи для ${}^6\text{Li}$ и ${}^{11}\text{Li}$



## Результат для $^{11}\text{Li}$



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

$$\begin{aligned} R_{\text{halo}} &= 6.05 \pm 0.32 \text{ fm} \\ R_{\text{core}} &= 2.53 \pm 0.04 \text{ fm} \end{aligned}$$

для сравнения:  
 $R_{^9\text{Li}} = 2.44 \pm 0.06 \text{ fm}$

## Результаты для всех ядер

Ядро	Упругое рассеяние протонов				$R_m$ , фм. Сечение реакции
	$R_m$ , фм	$R_c$ , фм	$R_v$ , фм	$\delta_{np}$ , фм	
$^4\text{He}$	1,49 (3)	–	–	0,06 (6)	1,57 (4)
$^6\text{He}$	2,45 (10)	1,88 (12)	3,31 (28)	0,74 (14)	2,50 (5)
$^8\text{He}$	2,53 (8)	1,55 (15)	3,22 (14)	0,83 (10)	2,52 (3)
$^6\text{Li}$	2,44 (7)	2,11 (17)	3,00 (34)	–0,02 (15)	2,36 (3)
$^8\text{Li}$	2,50 (6)	2,48 (7)	2,58 (48)	0,46 (12)	2,39 (6)
$^9\text{Li}$	2,44 (6)	2,20 (6)	3,12 (28)	0,48 (11)	2,34 (6)
$^{11}\text{Li}$	3,71 (20)	2,53 (3)	6,85 (58)	1,72 (26)	3,50 (9)
$^7\text{Be}$	2,42 (4)	1,86 (14)	3,01 (19)	–0,23 (10)	2,31 (2) 2,36 (6)
$^{12}\text{Be}$	2,71 (6)	2,36 (6)	4,00 (28)	0,47 (9)	2,59 (6)
$^{14}\text{Be}$	3,25 (11)	2,77 (6)	5,28 (43)	1,12 (15)	3,10 (15)
$^8\text{B}$	2,58 (6)	2,25 (3)	4,24 (25)	–0,51 (9)	2,38 (4) 2,61 (8)
$^{12}\text{C}$	2,34 (5)	–	–	0,00 (10)	2,35 (2)
$^{14}\text{C}$	2,42 (5)	–	–	0,07 (9)	2,33 (7)
$^{15}\text{C}$	2,59 (5)	2,41 (5)	4,36 (38)	0,36 (9)	2,54 (4)
$^{16}\text{C}$	2,70 (6)	2,41 (5)	4,20 (26)	0,46 (10)	2,74 (3)
$^{17}\text{C}$	2,68 (5)	2,57 (5)	4,05 (47)	0,39 (9)	2,76 (3)

С.к.р. протонов:

$$R_p = (R_{ch}^2 - r_p^2)^{1/2}$$

С.к.р. нейтронов:

$$R_n = [(A \cdot R_m^2 - Z \cdot R_p^2) / N]^{1/2}$$

Размер нейтронной шубы:

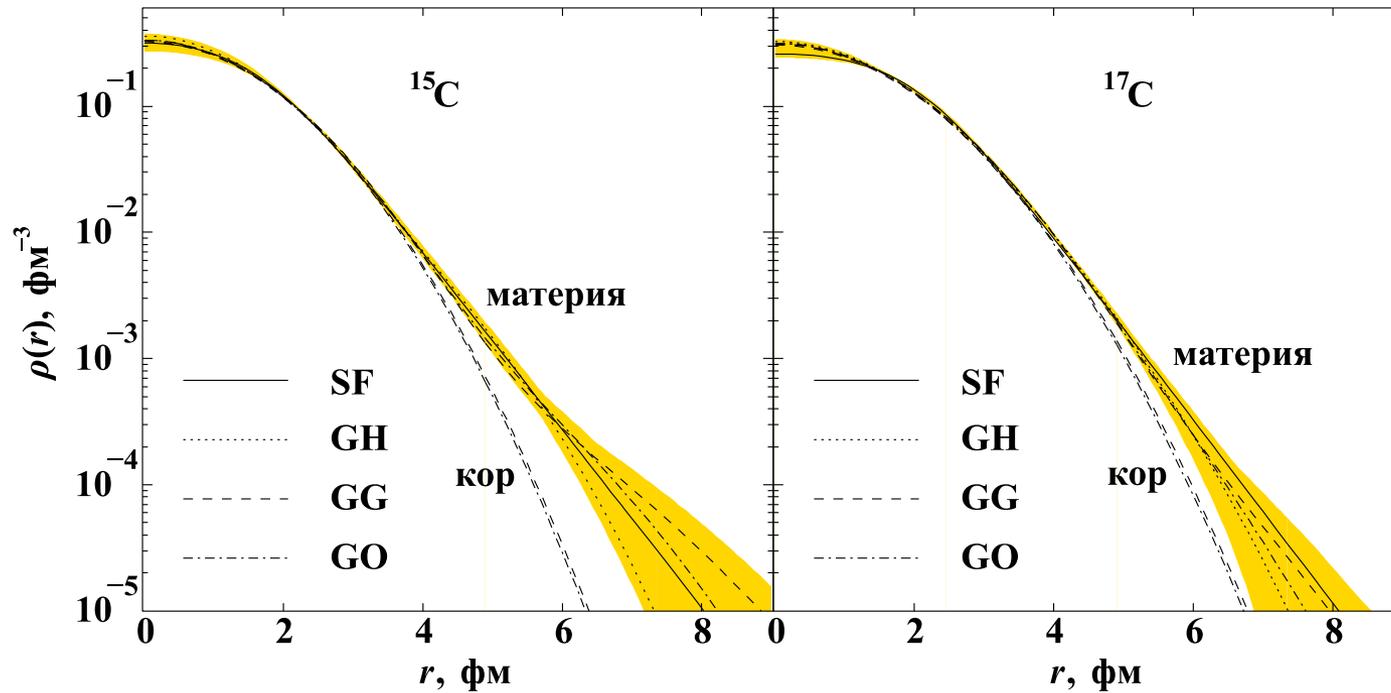
$$\delta_{np} = R_n - R_p$$

## Результаты. Конфигурация (кор + 2n)

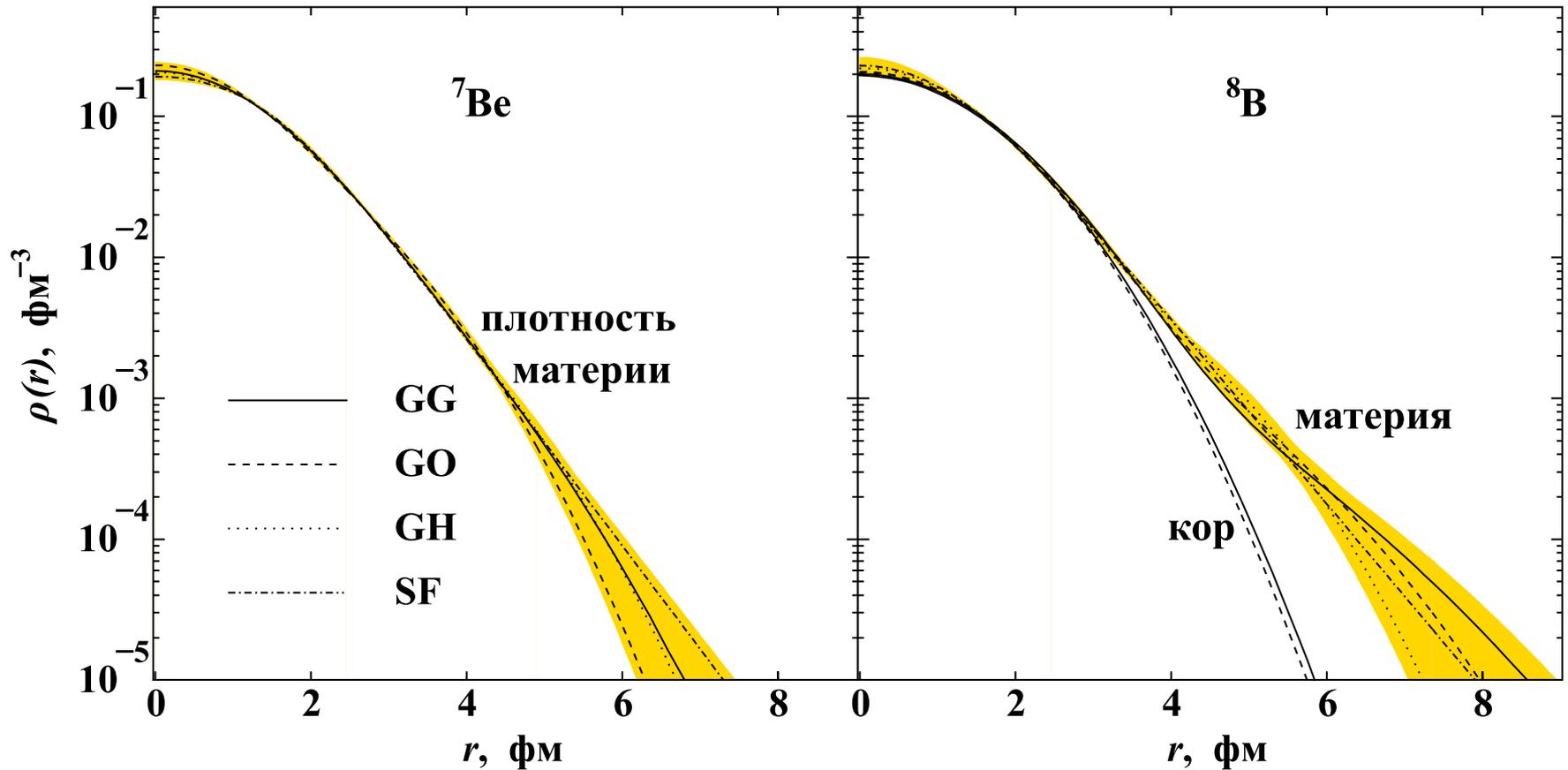
Ядро	$S_{2n}$ , МэВ	$\kappa = R_v/R_c$	$\delta_{np}$ , фМ
$^{11}\text{Li}$	0,369	2,7 (3)	1,72 (26)
$^6\text{He}$	0,973	1,8 (3)	0,74 (14)
$^{14}\text{Be}$	1,336	1,9 (2)	1,13 (15)
$^{12}\text{Be}$	3,670	1,7 (2)	0,47 (9)
$^{16}\text{C}$	5,470	1,7 (1)	0,46 (10)
$^9\text{Li}$	6,097	1,4 (2)	0,42 (11)

## Результаты. Сравнение ядер $^{15}\text{C}$ и $^{17}\text{C}$

Ядро	$S_n$ , МэВ	$\kappa = R_v/R_c$	$\delta_{np}$ , фМ
$^{15}\text{C}$	1,218	1,8 (2)	0,36 (9)
$^{17}\text{C}$	0,728	1,6 (2)	0,39 (9)



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



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

$$R_c = 2.25 \pm 0.03 \text{ фм}$$

$$R_h = 4.24 \pm 0.24 \text{ фм}$$

→ сравн. для  ${}^7\text{Be}$ :  
 $R_m = 2.42 \pm 0.04 \text{ фм}$

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

Радиус протонов:  
 $R_p = (2,76 \pm 0,09) \text{ фм}$

## Заклучение

- **Измерены абсолютные дифференциальные сечения** упругого рассеяния протонов на ядрах  ${}^4,6,8\text{He}$ ,  ${}^6,8,9,11\text{Li}$ ,  ${}^7,12,14\text{Be}$ ,  ${}^8\text{B}$  и  ${}^{12,14,15,16,17}\text{C}$  при энергии около 0,7 ГэВ в диапазоне переданных импульсов  $0,002 < |t| < 0,05$  (ГэВ/с)<sup>2</sup> с точностью 3%
- **Измеренные сечения** позволили получить:
  - радиусы ядерной материи;
  - форму распределения материи в ядрах.
- **Получены:**
  - значения радиусов материи для указанных изотопов;
  - показано, что все исследованные нейтронно-избыточные ядра (кроме  ${}^{14}\text{C}$ ) имеют значительную нейтронную шубу  $\delta_{\text{np}} = (0,4 - 1,7)$  фм, а у нейтронно-дефицитного ядра  ${}^7\text{Be}$  небольшой избыток протонов на поверхности:  $\delta_{\text{np}} = -0,23$  (10) фм;
  - подтверждено наличие выраженного нейтронного гало в ядрах  ${}^6\text{He}$ ,  ${}^{11}\text{Li}$ ,  ${}^{14}\text{Be}$  и протонного гало в ядре  ${}^8\text{B}$ . Наибольшее гало – у ядра  ${}^{11}\text{Li}$  :  $\kappa = 2,7$  (3).
  - в протонно-избыточном ядре  ${}^8\text{B}$  обнаружено протонное гало с  $\kappa = 1,9$  (1).  
Сделана оценка с.к.р. протонного распределения в ядре  ${}^8\text{B}$ . Найденная структура ядра важна для вычисления скорости идущей на Солнце реакции  ${}^7\text{Be}(p, \gamma){}^8\text{B}$ , являющейся одним из источников солнечных нейтрино.

## Результаты опубликованы

${}^6\text{He}$ ,  ${}^8\text{He}$ ,  ${}^4\text{He}$ : **Phys.Rev.Lett. 78 (1997) 2313**  
**Nucl.Phys. A712, (2002) 247**  
**A712, (2002) 269**

**Li isotopes: Nucl.Phys. A766 (2006) 1**

${}^{12}\text{Be}$ ,  ${}^{14}\text{Be}$ : **Nucl.Phys. A875 (2012) 8**

${}^7\text{Be}$ ,  ${}^8\text{B}$ : **Phys.Let B780 (2018) 200–204**  
**Nucl.Phys. A989 (2019) 40**

${}^{12,14-17}\text{C}$ : **Nucl.Phys. A1008 (2021) 122154**

## 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