

# **Исследование структуры легких экзотических ядер методом упругого рассеяния протонов в инверсной кинематике (проект ИКАР)**

- 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
  - анализ данных в рамках теории Глаубера-Ситенко
- 3. Результаты**
  - радиусы ядер (размеры кора и гало)
  - распределение ядерной материи

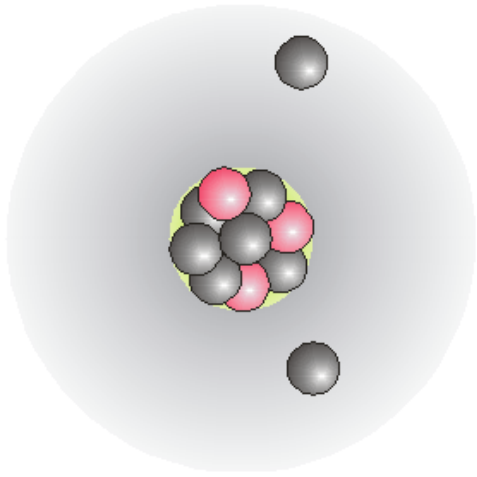
# Ядра с гало – новый феномен в изучении структуры ядра

## Распределение ядерной материи

Ядра с большим избытком нейтронов:

**нейтронное гало**

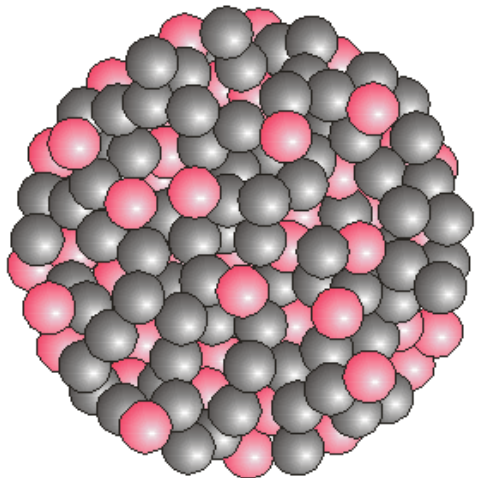
$^{11}\text{Li}$



Стабильные ядра:

**нейтроны и протоны  
распределены равномерно**

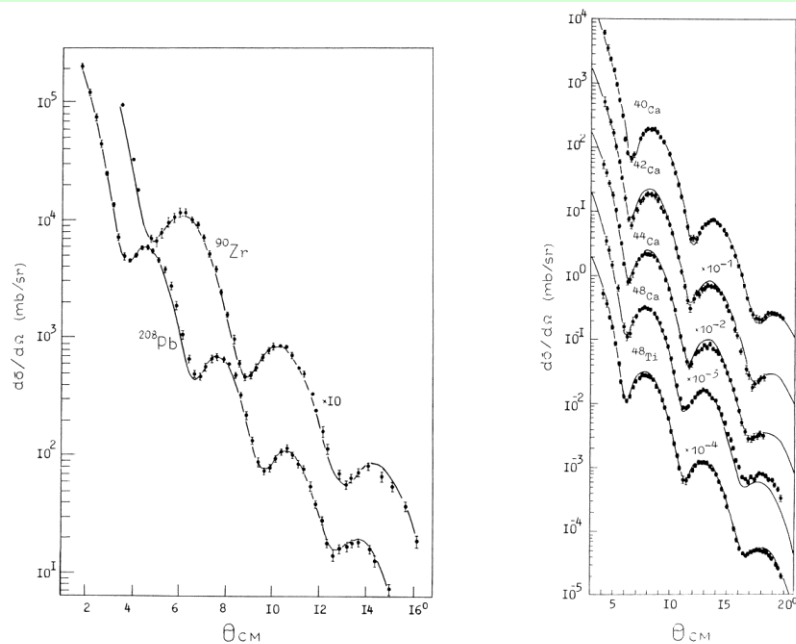
$^{208}\text{Pb}$



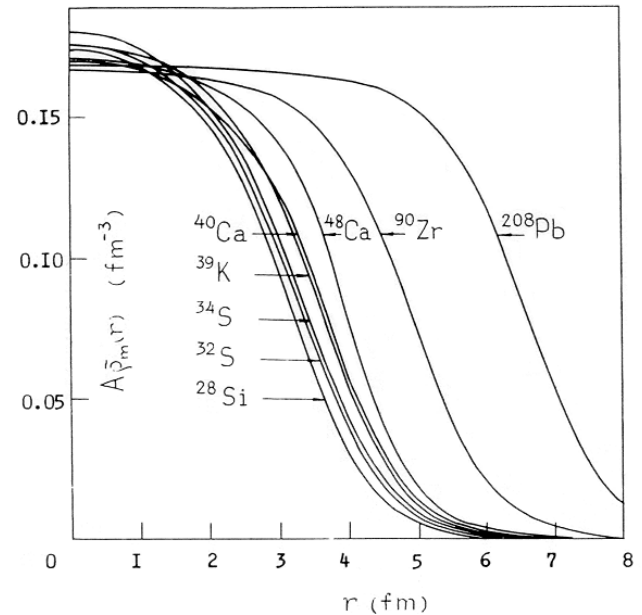
# Упругое рассеяние протонов на ядрах при энергии 1 ГэВ

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

Измеренные дифференциальные  
сечения

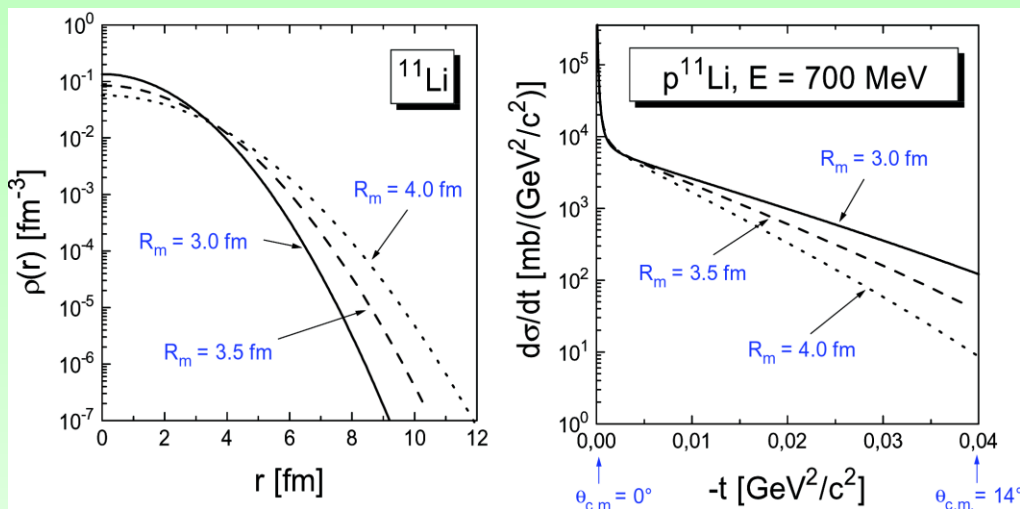


Полученные распределения  
ядерной материи

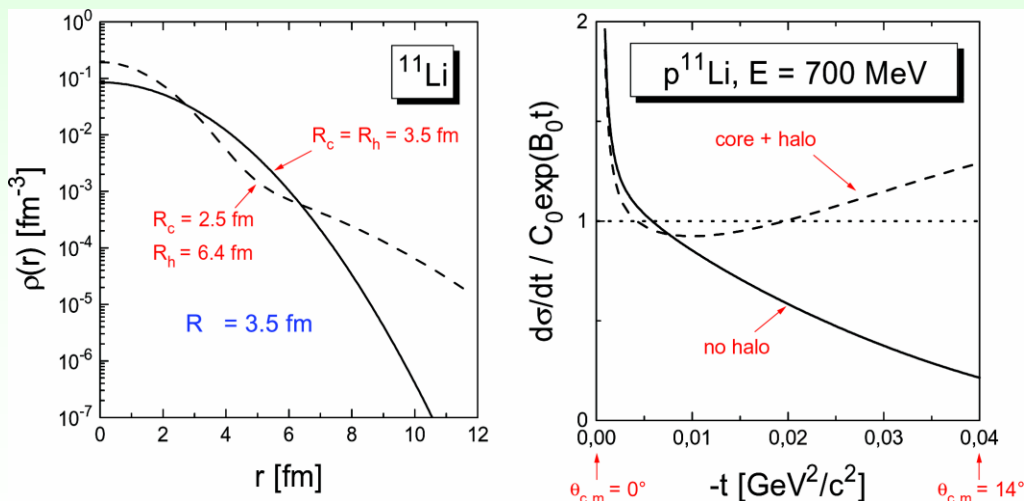


**пучки радиоактивных изотопов  $\Rightarrow$  изучение экзотических ядер**

# 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

**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:**

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

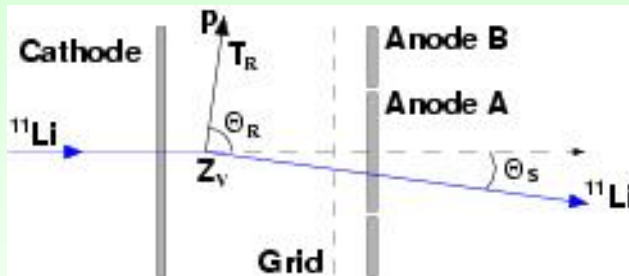
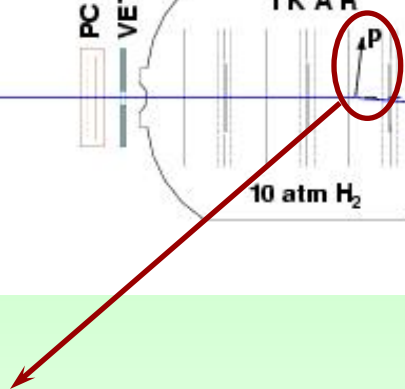
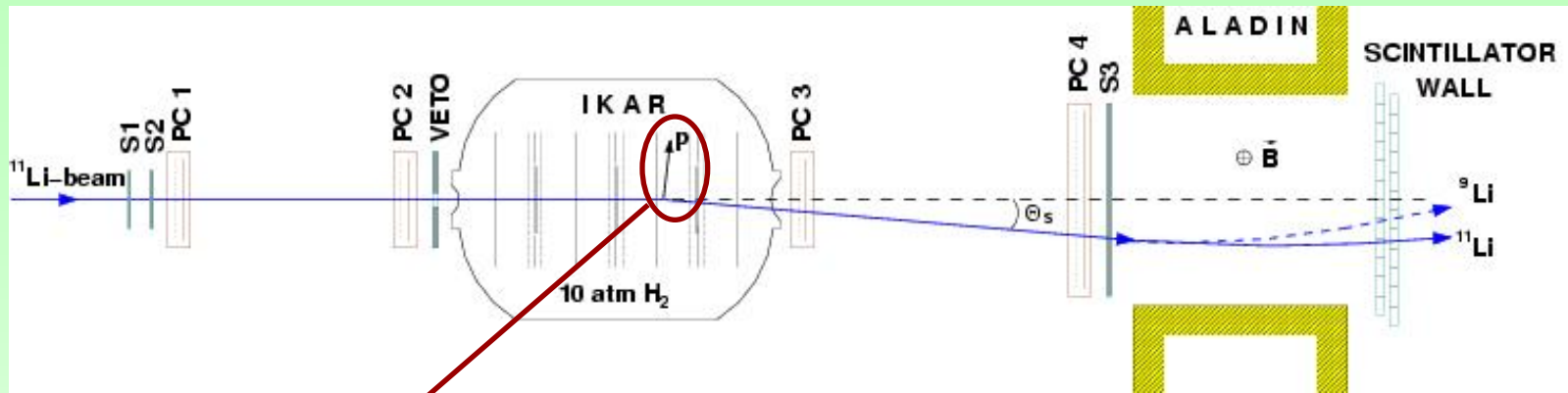
${}^6\text{Li}, {}^8\text{Li}, {}^9\text{Li}, {}^{11}\text{Li}$

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

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

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

# 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)**

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

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

}  $\Rightarrow$  выделение  
упругого канала

# Анализ сечений по Глауберу-Ситенко

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

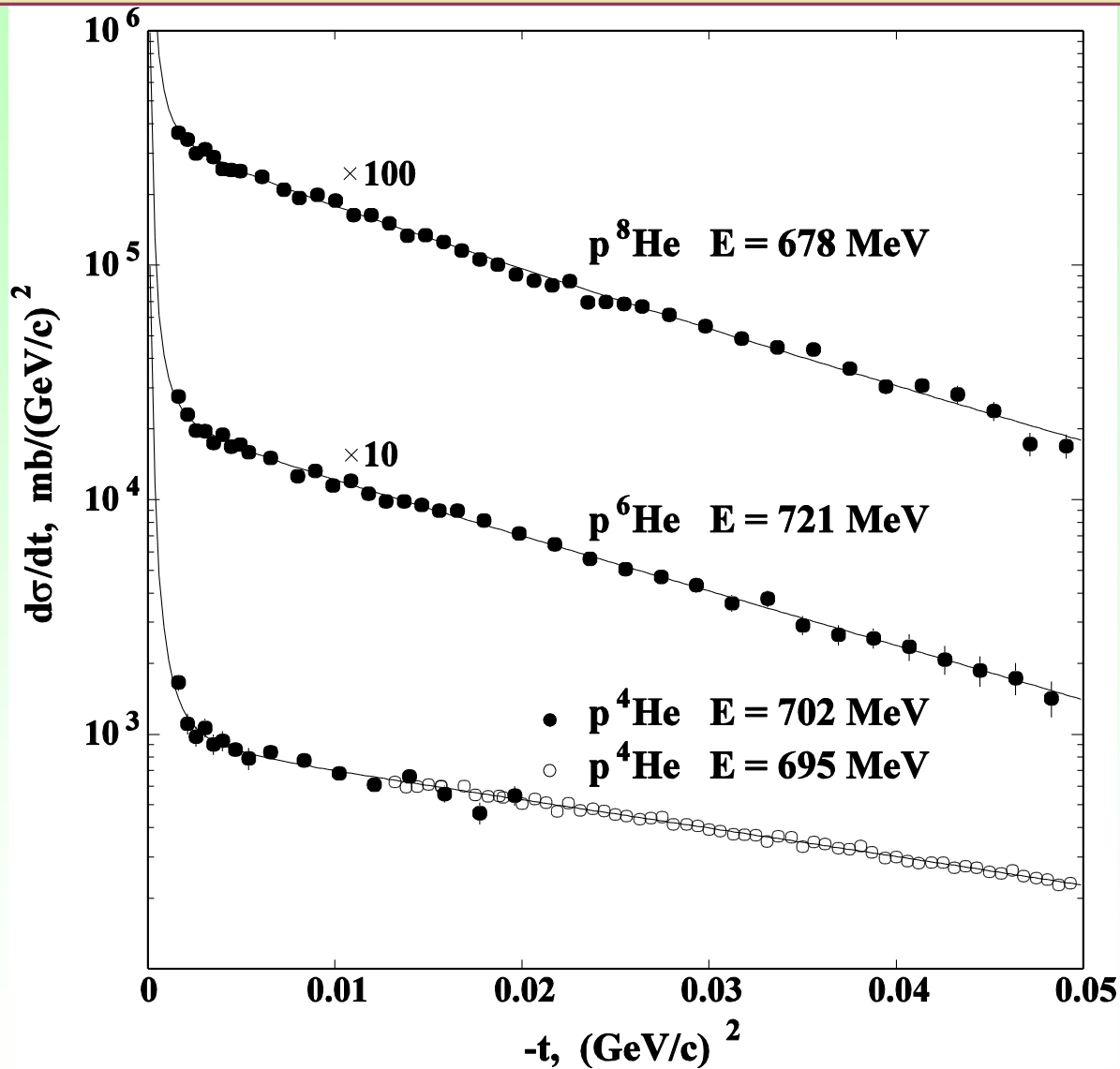
**GH:** “Gaussian with halo”  $F(t) = (1+z^2) \text{Exp}(z)$ ,  $z = t R_m^2/6$

**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

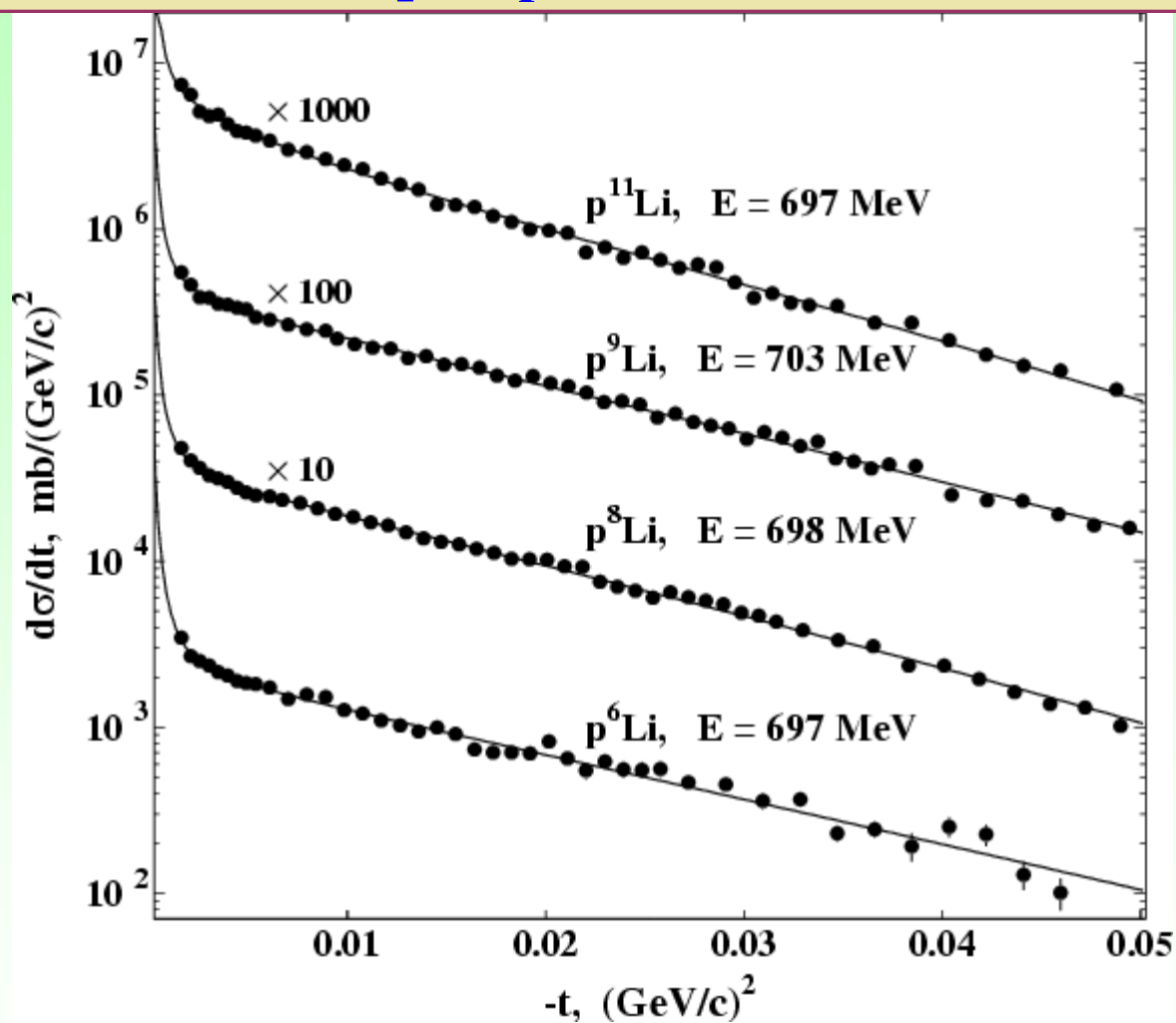


Phys.Rev.Lett. 78 (1997) 2313

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

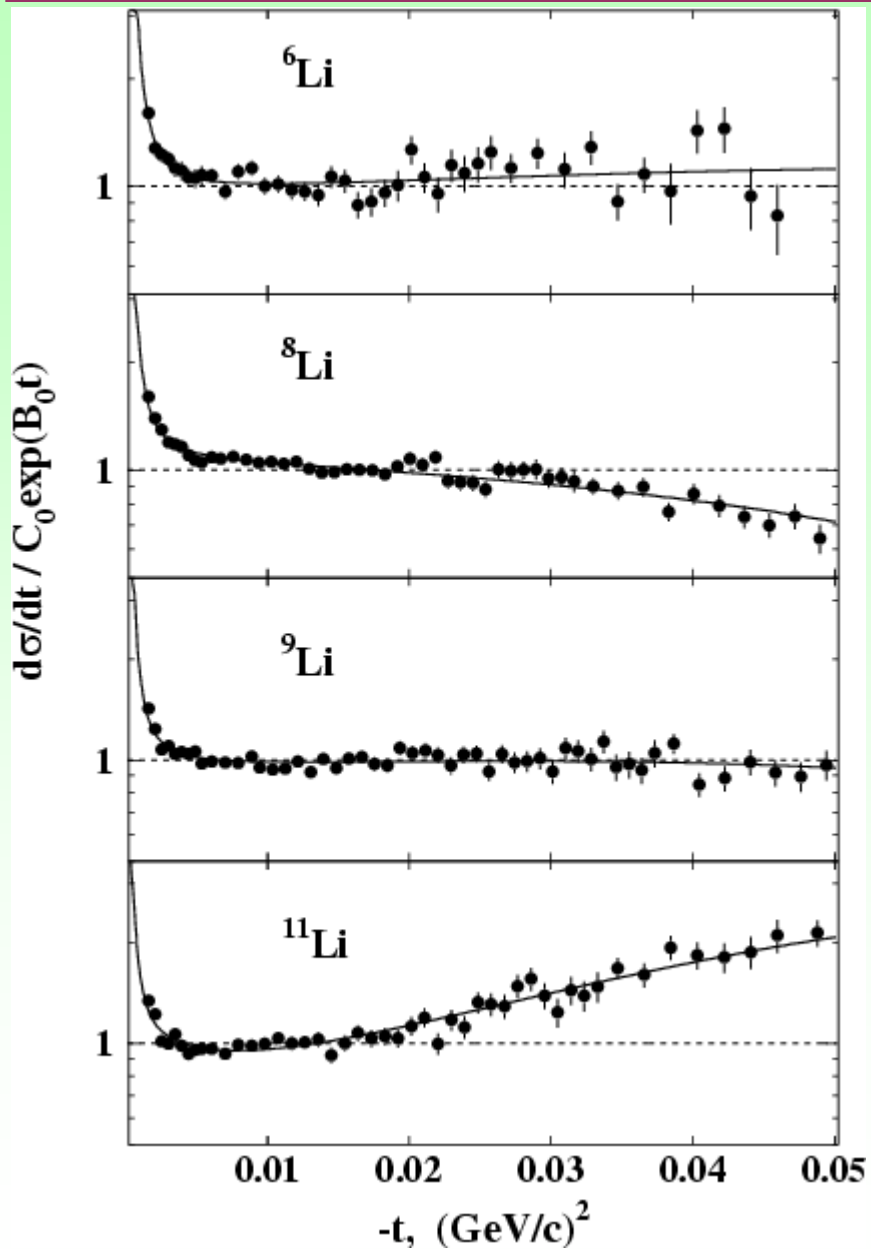


# Дифференциальные сечения упругого p-Li рассеяния



Nucl. Phys. A766, 1 (2006)

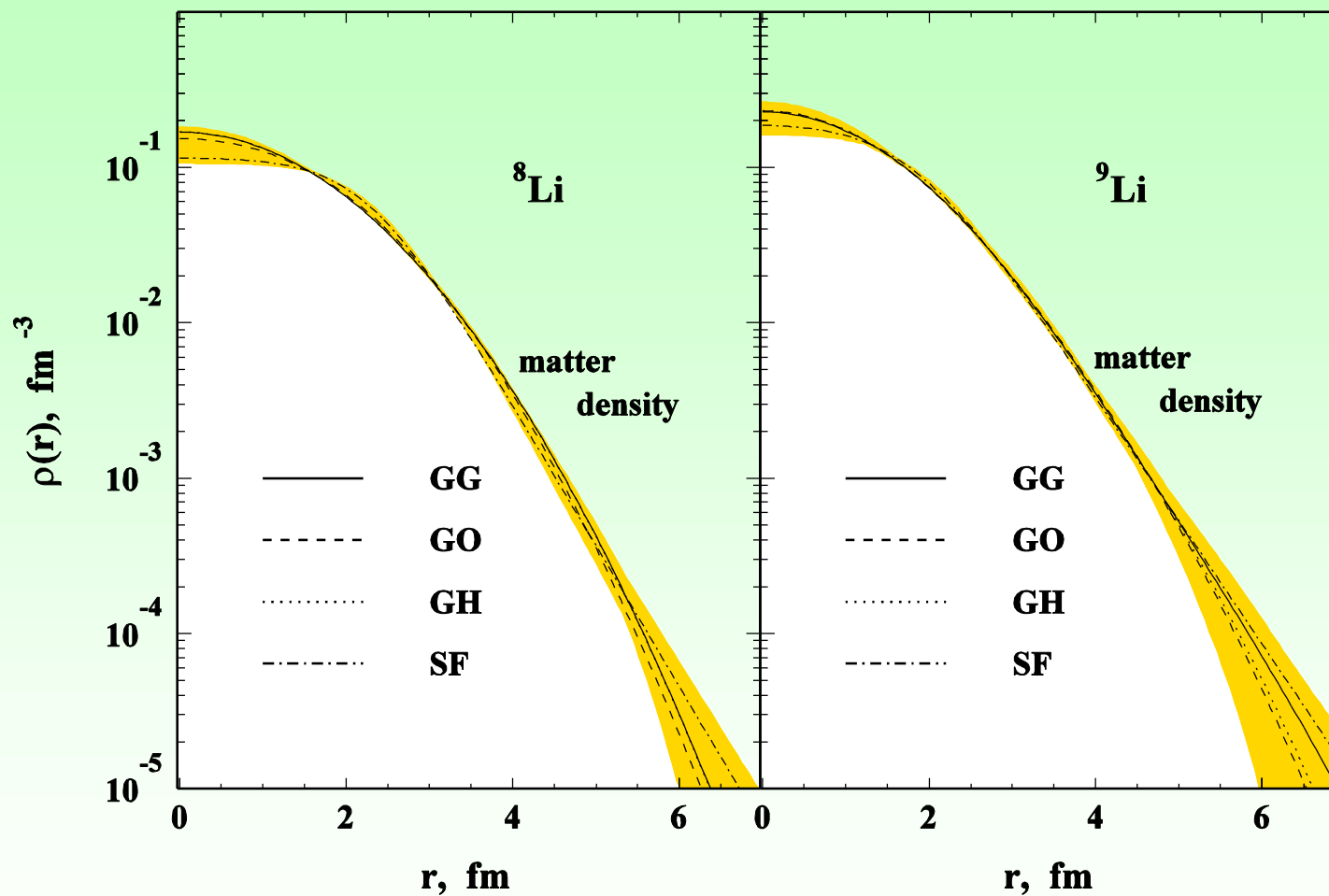
# Чувствительность к форме распределения



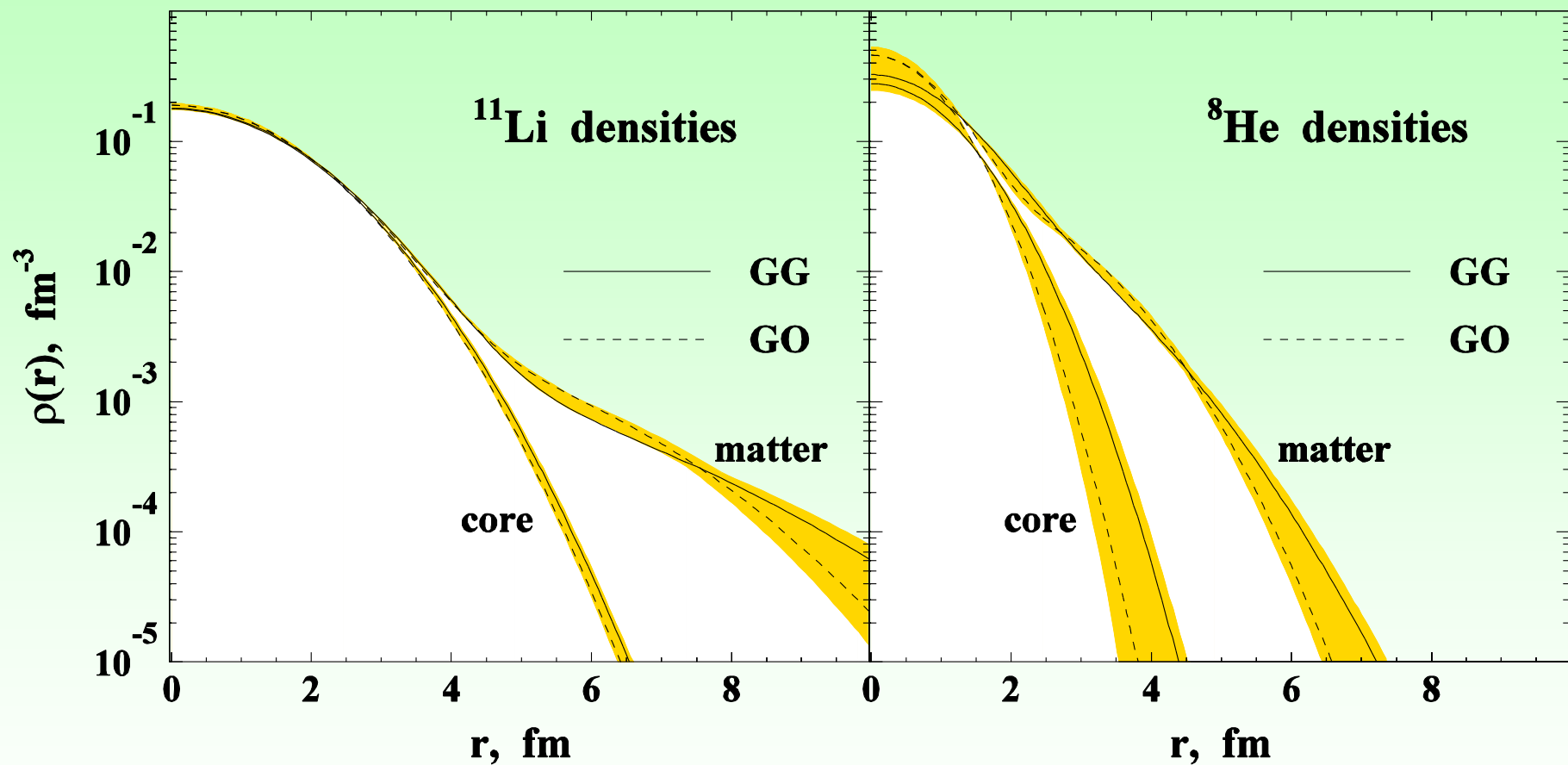
указание на  
кластерную структуру  ${}^6\text{Li}$

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

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



# Сравнение ядер $^8\text{He}$ и $^{11}\text{Li}$



## Радиусы распределения ядерной материи

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)	--	--
${}^{14}\text{Be}$	3.25 (11)	2.54 (11)	4.48 (19)
${}^{16}\text{C}^*$	2.71 (16)	--	--
${}^{17}\text{C}^*$	2.65 (6)	--	--

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

*\*) Предварительные результаты*

## Заключение

- **Упругое протонное рассеяние** при промежуточных энергиях является эффективным методом изучения распределения ядерной материи. Этот метод был впервые применен для изучения экзотических ядер, используя инверсную кинематику и созданную в ПИЯФ активную водородную мишень ИКАР
- **Измерены абсолютные дифференциальные сечения** упругого рассеяния протонов на ядрах:
  - ${}^4\text{He}$ ,  ${}^6\text{He}$ ,  ${}^8\text{He}$
  - ${}^6\text{Li}$ ,  ${}^8\text{Li}$ ,  ${}^9\text{Li}$ ,  ${}^{11}\text{Li}$
  - ${}^{12}\text{Be}$ ,  ${}^{14}\text{Be}$ ,  ${}^7\text{Be}$ ,  ${}^8\text{B}$
  - ${}^{12}\text{C}$ ,  ${}^{14-17}\text{C}$
- **Выполнен анализ измеренных дифференциальных сечений** и получены:
  - радиусы ядер;
  - распределения материи в ядрах.
- **В следующем году** обработка данных будет завершена и опубликованы результаты для изотопов углерода, а также  ${}^7\text{Be}$  и  ${}^8\text{B}$ .