

**Г.А. Королев**

**Изучение гало структуры ядра  $^8\text{B}$   
и изотопов углерода  $^{15,16,17}\text{C}$   
методом упругого рассеяния  
протонов в инверсной  
кинематике**

**Семинар ОФВЭ**

**15 мая 2018г.**

## ИКАР-Коллаборация. Experiment S 358

- Экзотические ядра, гало и скин.
- Чем интересна структура изотопов углерода.
- Существует ли протонное гало в ядре  ${}^8\text{B}$ .
- Результаты измерений с детектором ИКАР.
- Сравнение результатов исследования структуры зеркальных ядер  ${}^8\text{B}$  и  ${}^8\text{Li}$ .
- Определение зарядового радиуса  ${}^8\text{B}$ .
- Возможно ли нейтронное гало в  ${}^{16}\text{C}$ .

# The first proposal. I. Tanihata, "Nuclear Radii" 1983.

## Lawrence Berkeley Laboratory

Фрагментация и пучки радиоактивных ионов, 1979.

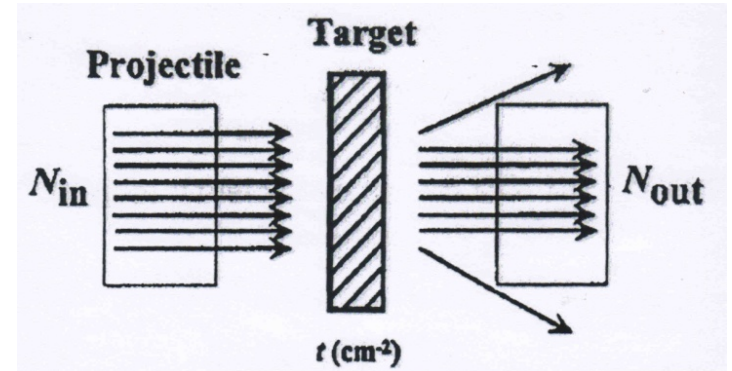
Танихата, измерение  $\sigma_I$ .

Трансмиссионный метод (поглощения)

$$N_{\text{out}} = N_{\text{in}} \exp(-\sigma_I t) \quad \sigma_I = - (1/t) \ln(N_{\text{out}}/ N_{\text{in}})$$

$$\sigma_I = \sigma_R - \sigma_{\text{inelastic}}$$

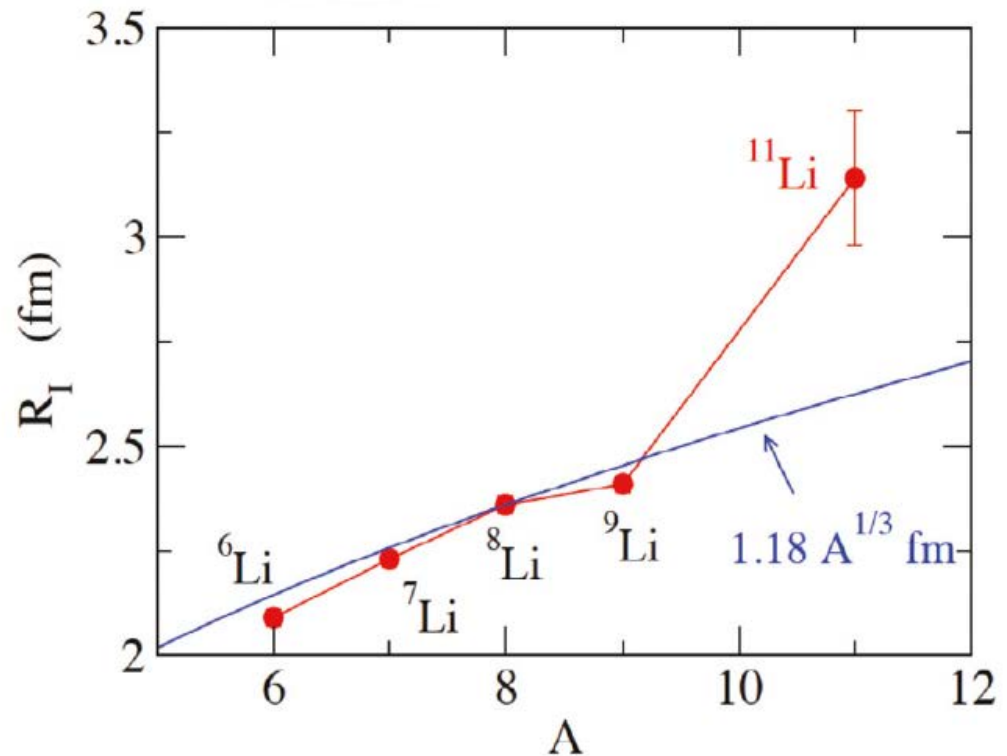
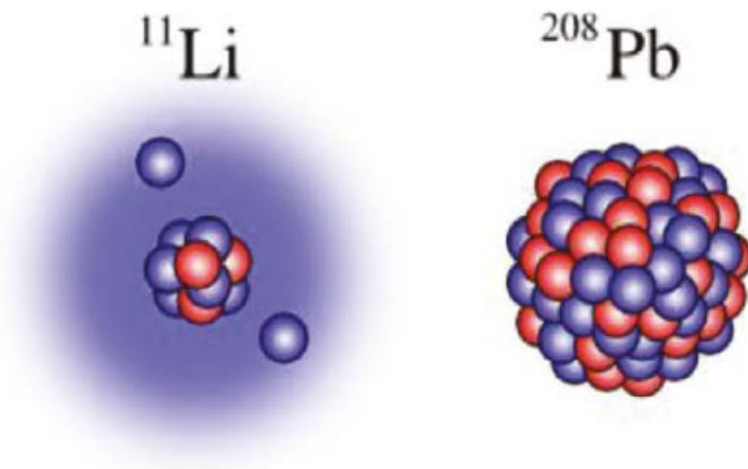
К 2001 г. определены около 100 значений  $R_m$  для экзотических ядер вплоть до изотопов Mg.



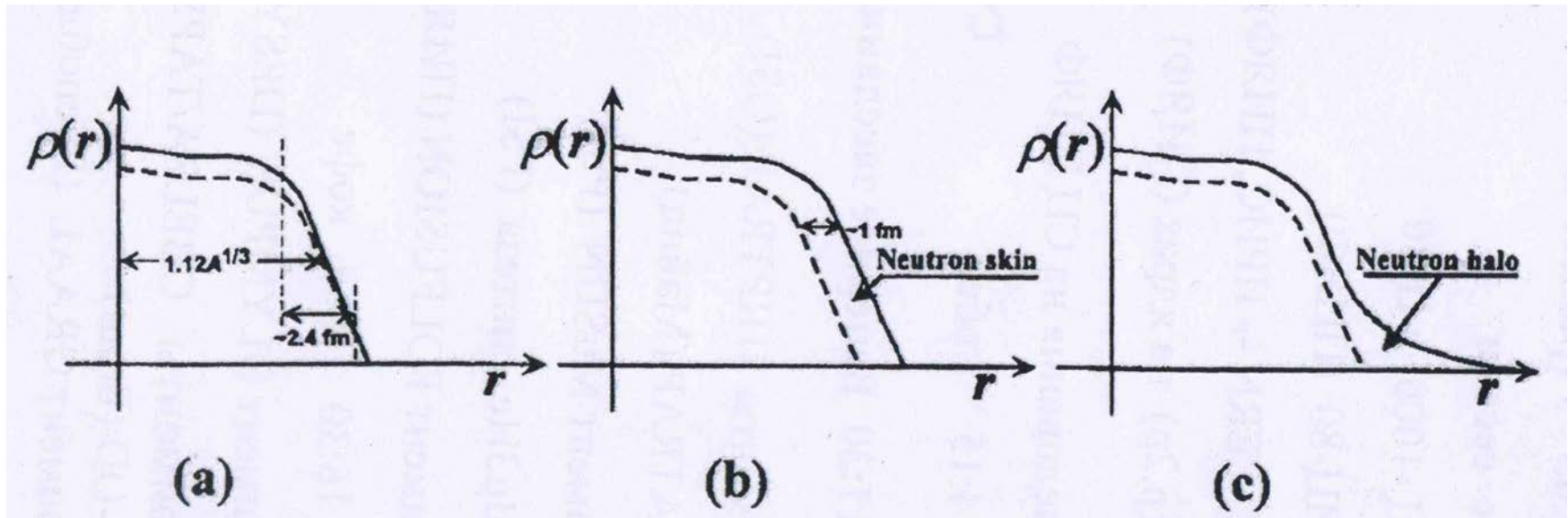
Определение ядра с гало по  
увеличенному радиусу  
распределения материи  $R_m$

Радиусы распределения  
материи  $R_m$  изотопов Li  
определенные из  
измерений сечений  
взаимодействия с  
углеродной мишенью  
при энергии 790  
МэВ/нуклон

Tanihata et al. (1988)



## Новые свойства ядер: гало и скин («шуба»)



В стабильных ядрах

1. Распределение плотности протонов и нейтронов одинаково
2. Диффузность ядерной поверхности одинакова для всех ядер
3. Радиусы ядер пропорциональны  $A^{1/3}$

Гало ядра  ${}^6\text{He}$ ,  ${}^{11}\text{Li}$ ,  ${}^{11}\text{Be}$ ,  ${}^{14}\text{Be}$ ,  ${}^{17}\text{B}$ ,  ${}^{19}\text{C}$

# Измерение скина

$$\Delta R_{np} = R_n - R_p$$

$R_p$  определяется из зарядового радиуса  $R_{ch}$ , величина  $R_n$  – из радиуса материи  $R_m$ .

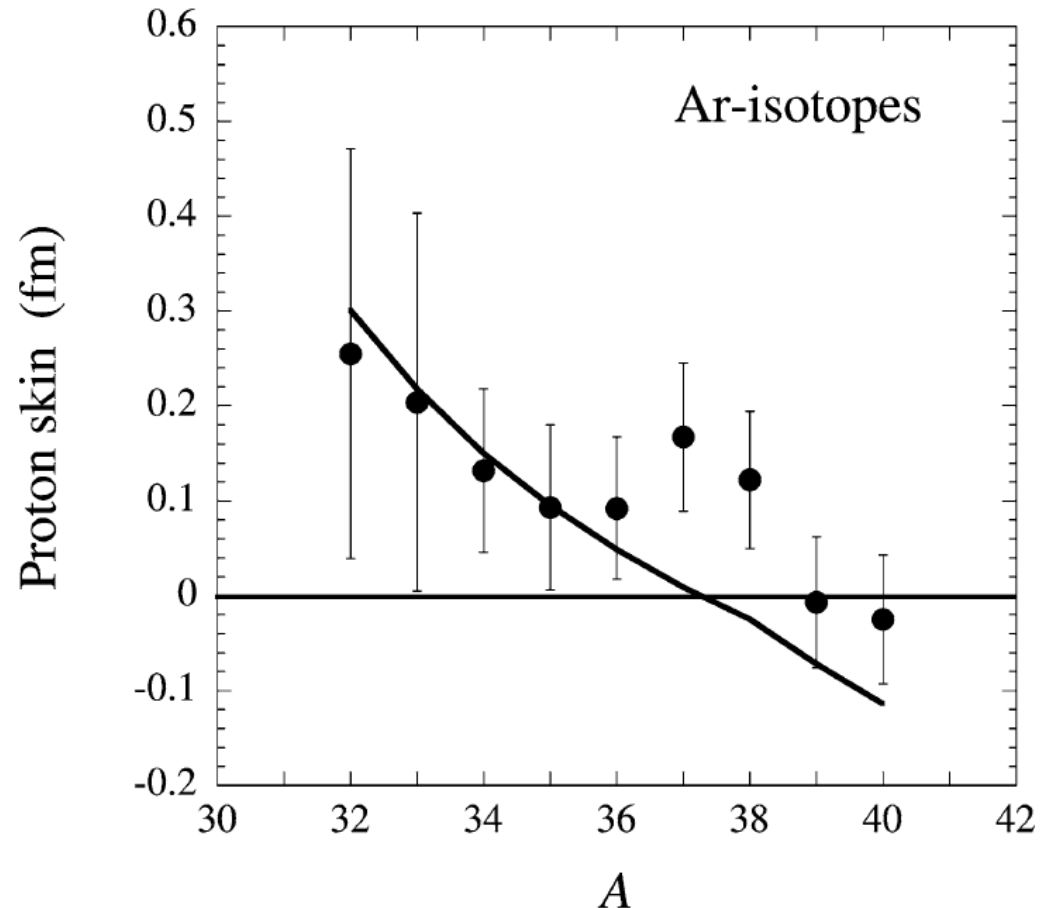
$$AR_m^2 = ZR_p^2 + NR_n^2$$

Измерение  $\sigma_{int}$  для изотопов Ar

A.Ozawa et al., Nucl. Phys. A 727 (2002) 465

Кривая – расчет RMF

# Измерение протонного скина



# Определение радиусов протонных распределений из измерений $\sigma_{\text{CS}}$

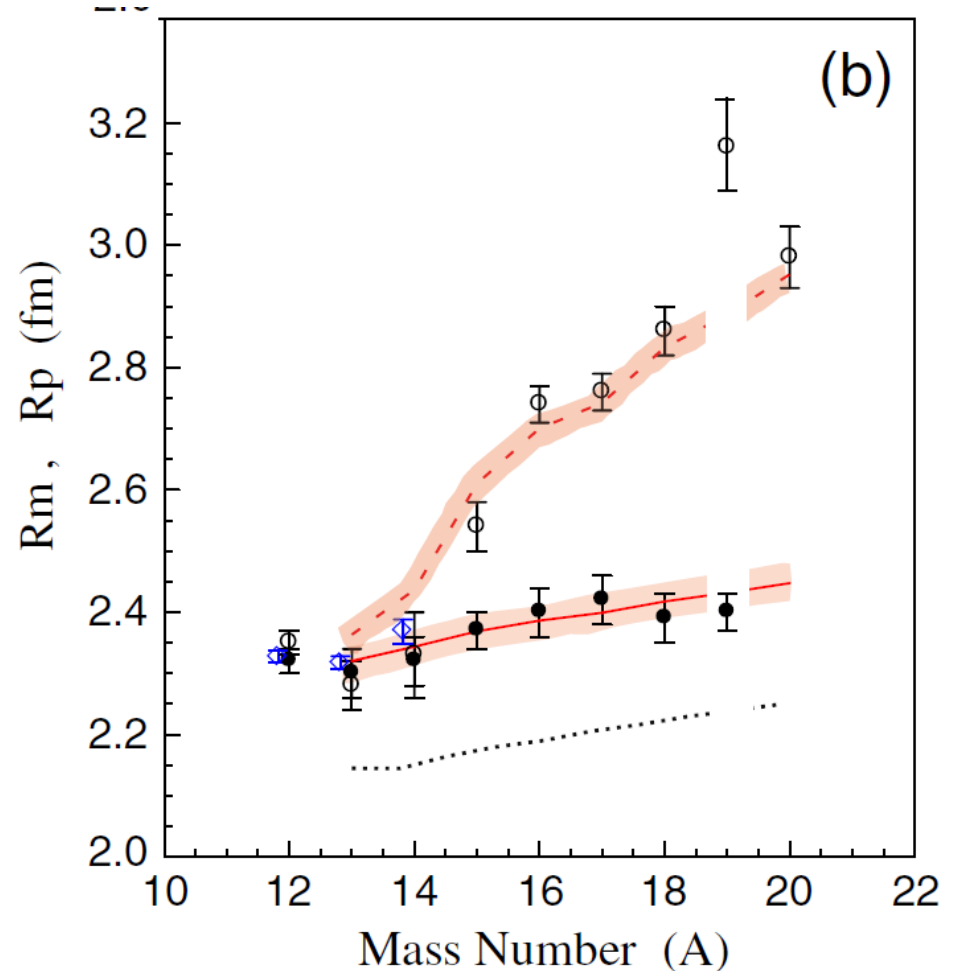
Радиусы протонных  $R_p$  и  
материи  $R_m$  распределений  
изотопов углерода

$R_p$  получено: из измерений  $\sigma_{\text{CS}}$   
(черные точки), из данных по  
рассеянию электронов (синие  
точки)

$R_m$  – анализ старых данных по  $\sigma_1$   
с учетом полученных значений

$R_p$  (белые точки)

R.Kanungo et al. 2016



# Признаки существования гало в ядре

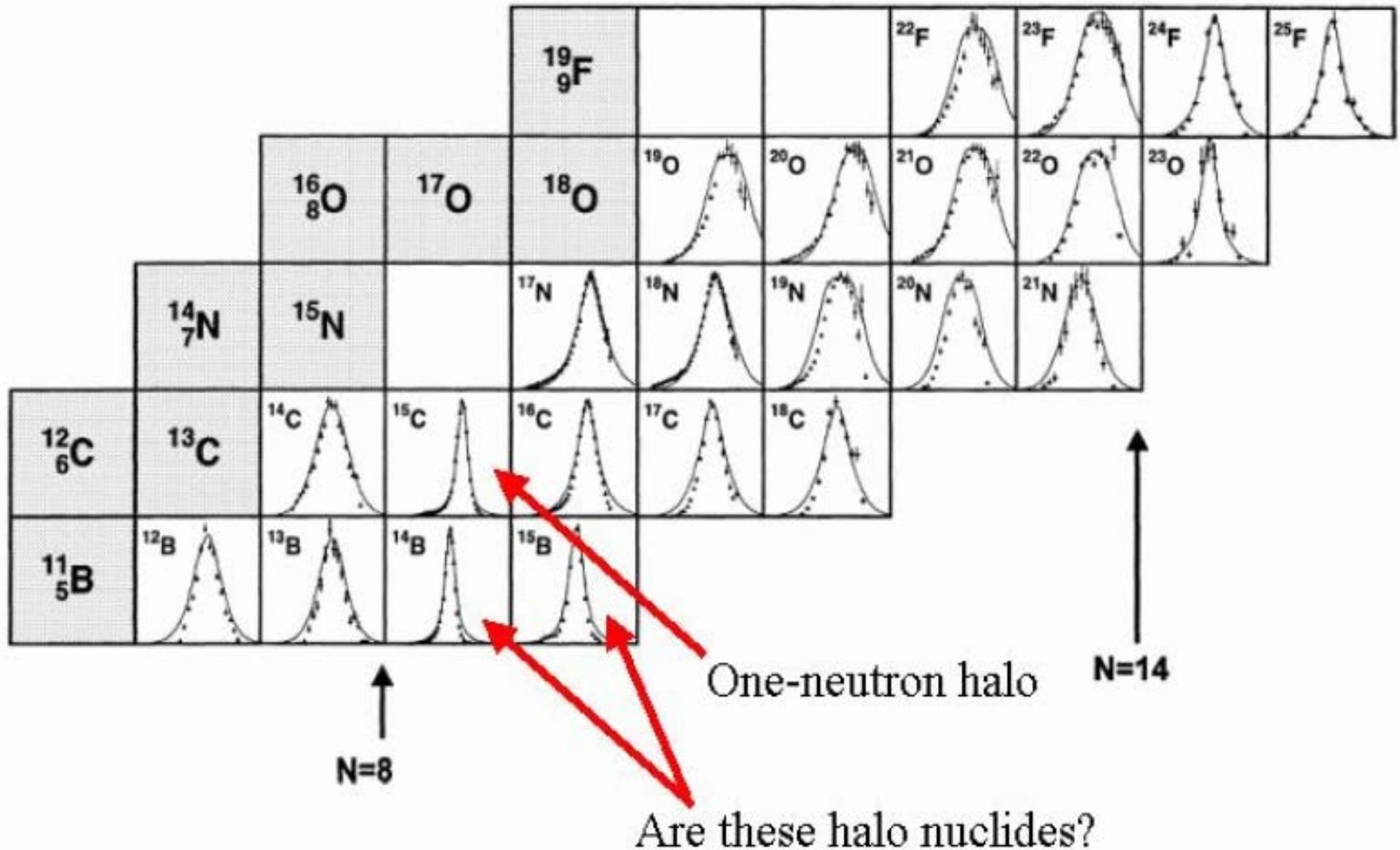
1. Небольшая (менее 2 МэВ) энергия отделения нуклона  $S_n$
2. Орбитальное квантовое число  $\ell = 0, 1$   
s – и p- состояния валентного нуклона
3. Увеличенное сечение реакции  $\sigma_R$  при взаимодействии с мишенью, большой радиус  $R_m$
4. Узкое импульсное распределение (около 50 МэВ/с) фрагментов при развале ядра
5. Большое сечение реакции отделения нуклона  $\sigma_{-n}$
6. Отношение радиуса гало к радиусу кора  $R_h/R_c \geq 2$ .  
Критерий предложен теоретиками. Измерения проведены в основном (IKAR Collaboration) в GSI

$$AR_m^2 = A_c R_c^2 + A_h R_h^2$$



# Ширина импульсного распределения фрагментов при выбивании одного нейтрона

E.Sauvan et al. (2004)



# Изотопы углерода

15,16,17C

Противоречие результатов

Энергия отделения одного нейтрона  $S_n$ , для

14C 8.18 MeV

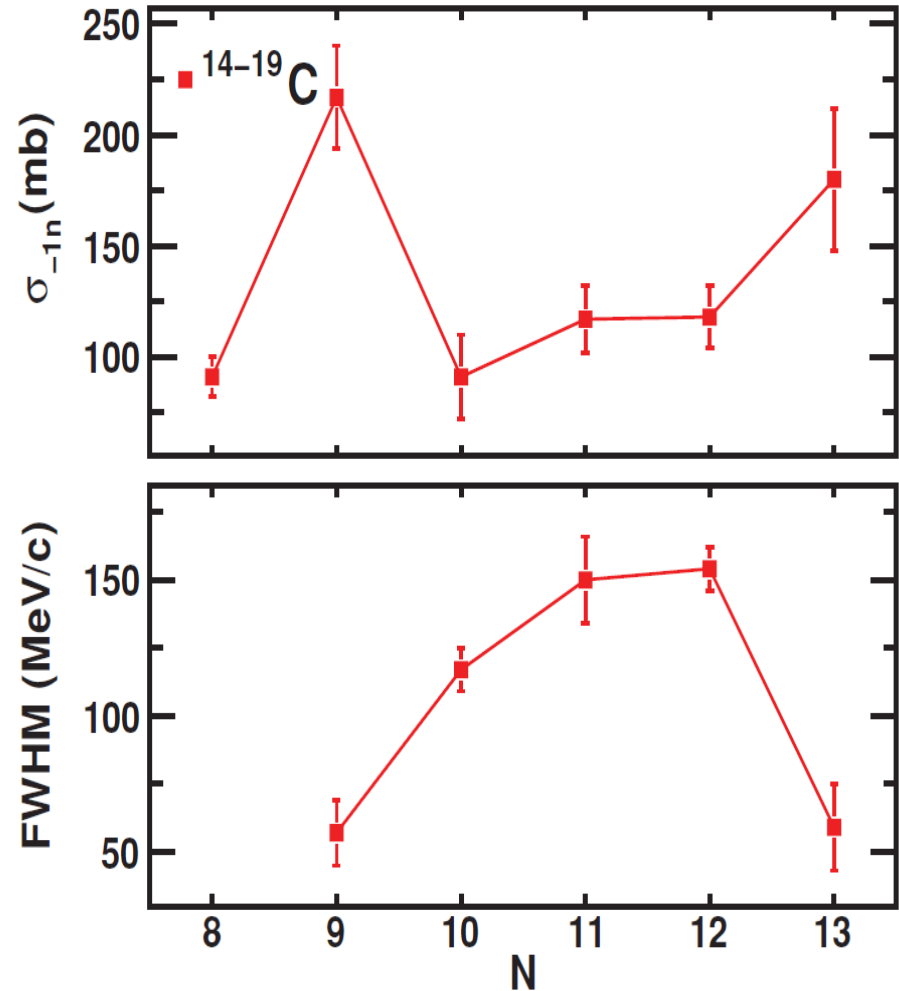
15C 1.22 MeV

16C 4.25 MeV

17C 0.73 MeV

18C 4,18 MeV

19C 0.58 MeV

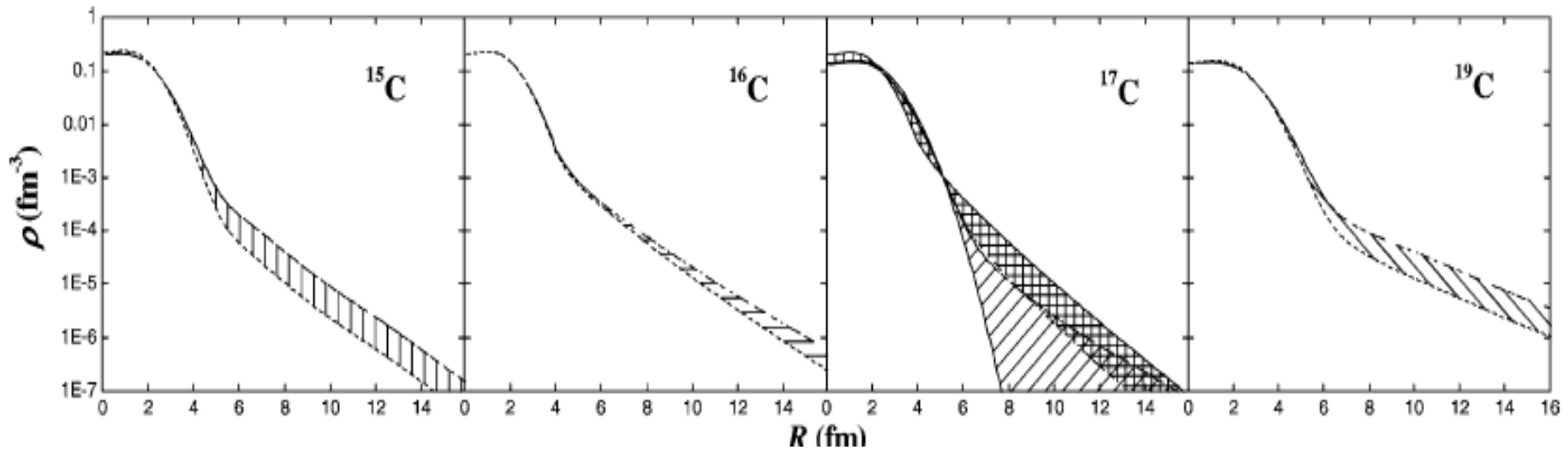


Анализ изотопов  $^{14-19}\text{C}$ . Сечение выбивания одного нейтрона и ширина импульсного распределения остающегося фрагмента. Rodriguez-Tajes et al. (2010)

# Распределение плотности материи для $^{15,16,17,19}\text{C}$ , полученное из $\sigma_R$

*C. Wu et al. / Nuclear Physics A 739 (2004) 3–14*

13



Гало структура  $^{17}\text{C}$  получена из  $\sigma_R$  при  $E = 79$  А МэВ, Wu (2004).

$^{16}\text{C}$  при  $E = 83$  А МэВ, Zheng (2002).

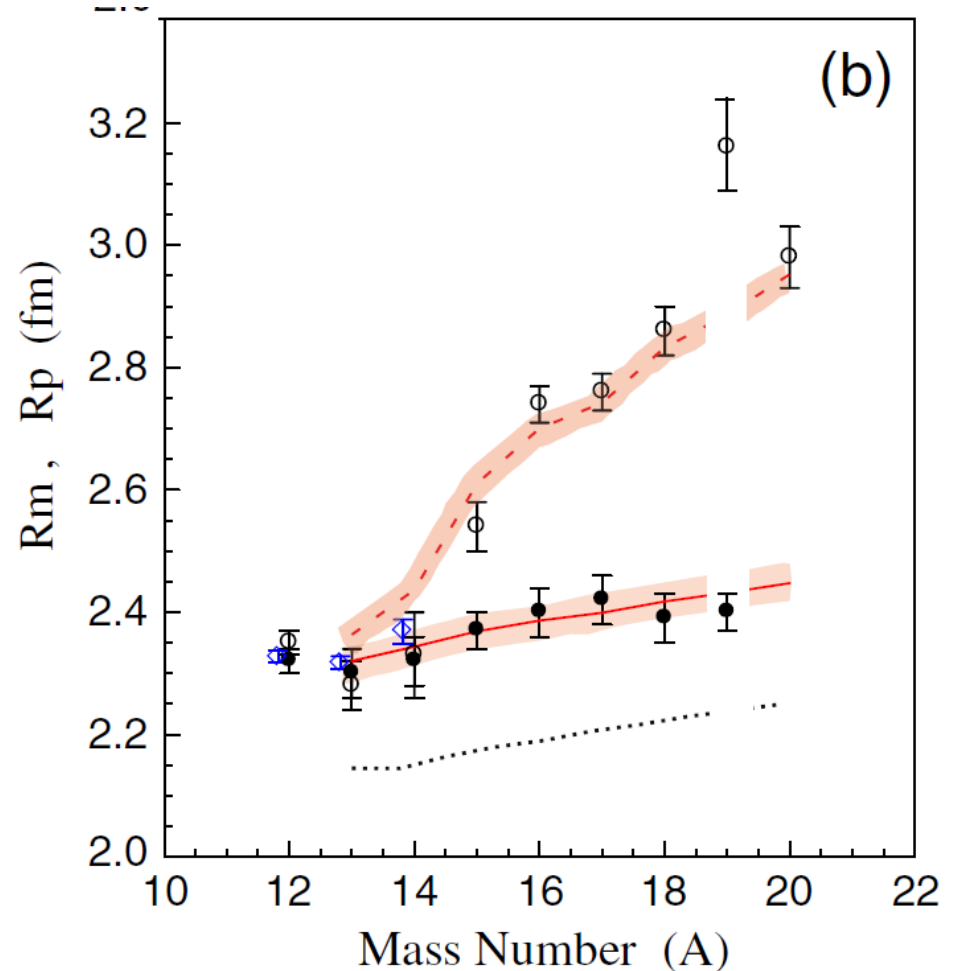
$^{15,17,19}\text{C}$  при  $E = 950$  А МэВ, в  $^{17}\text{C}$  гало нет, Ozawa (2001).

# Радиусы протонных $R_p$ и материи $R_m$ распределений изотопов углерода

$R_p$  получено: из измерений  $\sigma_{CC}$  (черные точки), из данных по рассеянию электронов (синие точки)

$R_m$  – анализ старых данных по  $\sigma_I$  с учетом полученных значений  $R_p$  (белые точки)

R.Kanungo et al. 2016



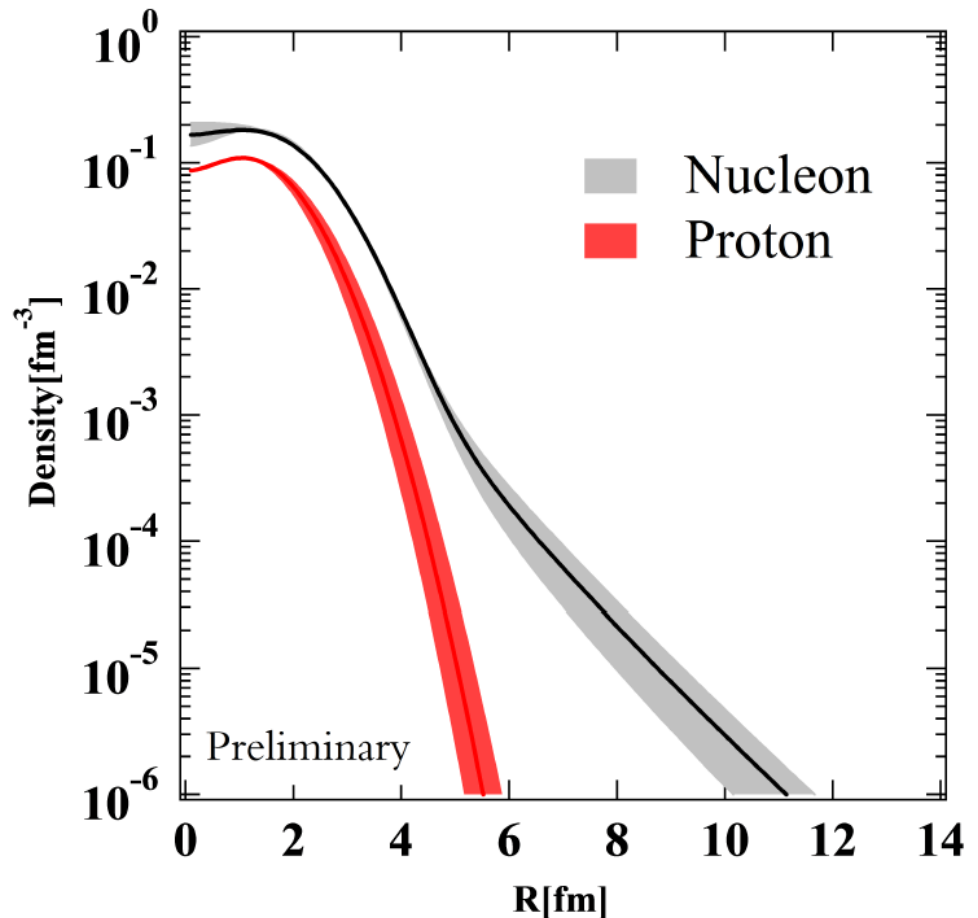
# Распределение плотности материи в ядре $^{16}\text{C}$

Существование гало в ядре впервые было определено по увеличенному значению радиуса материи  $R_m$ .

Измерение  $\sigma_I$  при низких энергиях T.Zheng et al. (2002)

Результаты работы японской группы (H.Du et al. 2017)

$\sigma_R$  при энергии 40 – 140 МэВ/нуклон



Совместный анализ имеющихся данных



# Ядро ${}^8\text{V}$

## Астрофизика.

${}^8\text{V}$  - источник нейтрино высоких энергий



## Ядерная физика.

Протонное гало  ${}^8\text{V}$ ,  ${}^{12}\text{N}$ ,  ${}^{17}\text{Ne}$

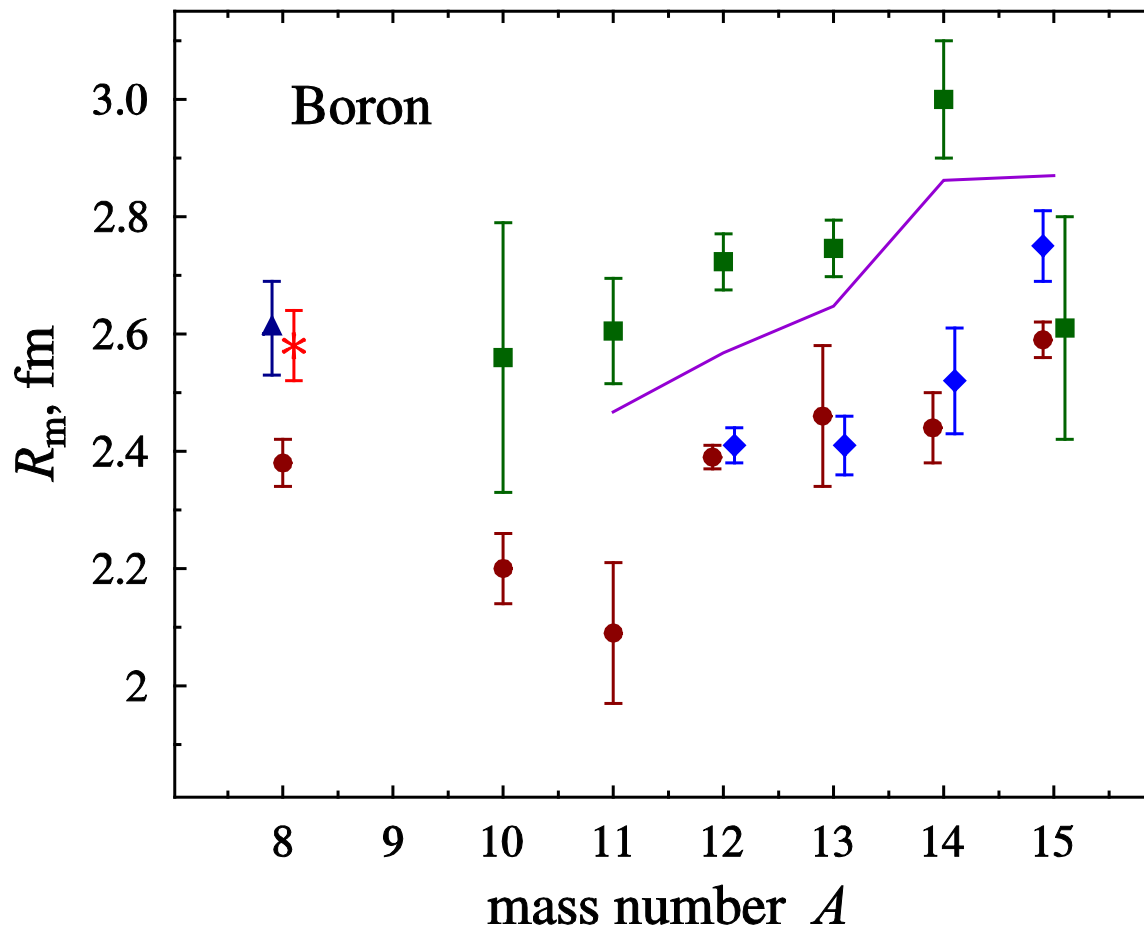
Энергия отделения нейтрона  $S_n = 0.138$  МэВ

Узкое импульсное распределение фрагментов  ${}^7\text{Be}$   
(91МэВ/с)

Кластерная трехчастичная модель Григоренко и др.

$(\alpha + {}^3\text{He} + p)$  дает отношение  $R_n/R_c = 1.75$

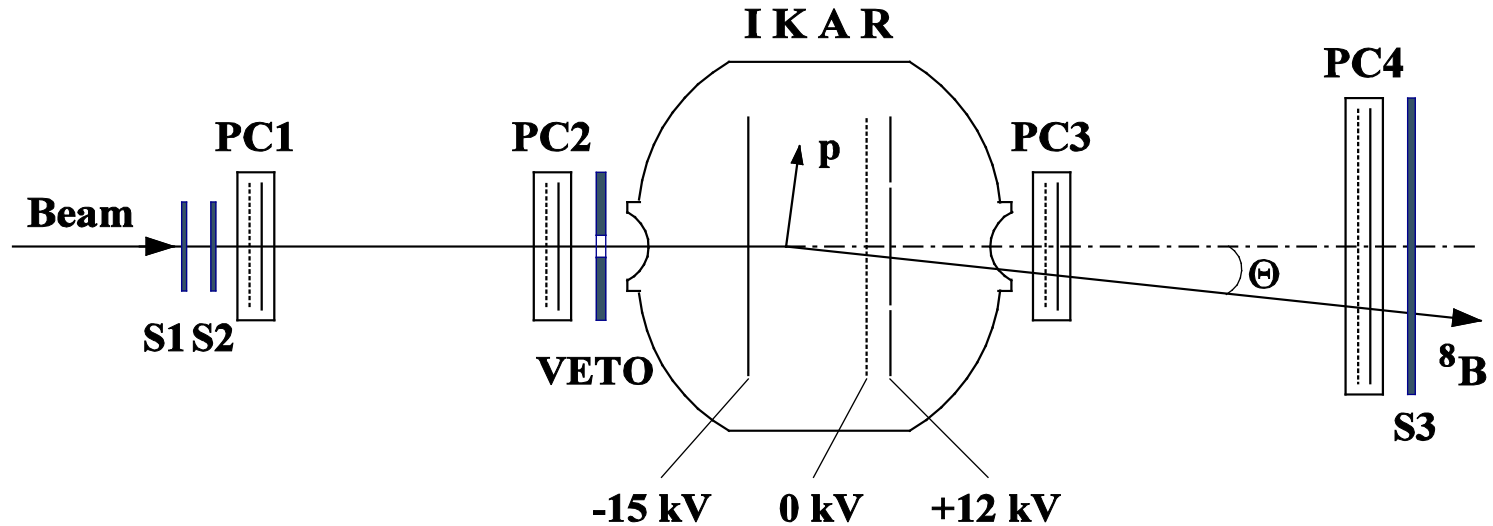
## Радиус распределения плотности материи для изотопов бора



The cross – Experiment S 358, the triangle – Fan (2015), the circles – Ozawa (2001), the squares – Liatard (1990), the diamonds – Estrade (2014)



# Схема экспериментальной установки



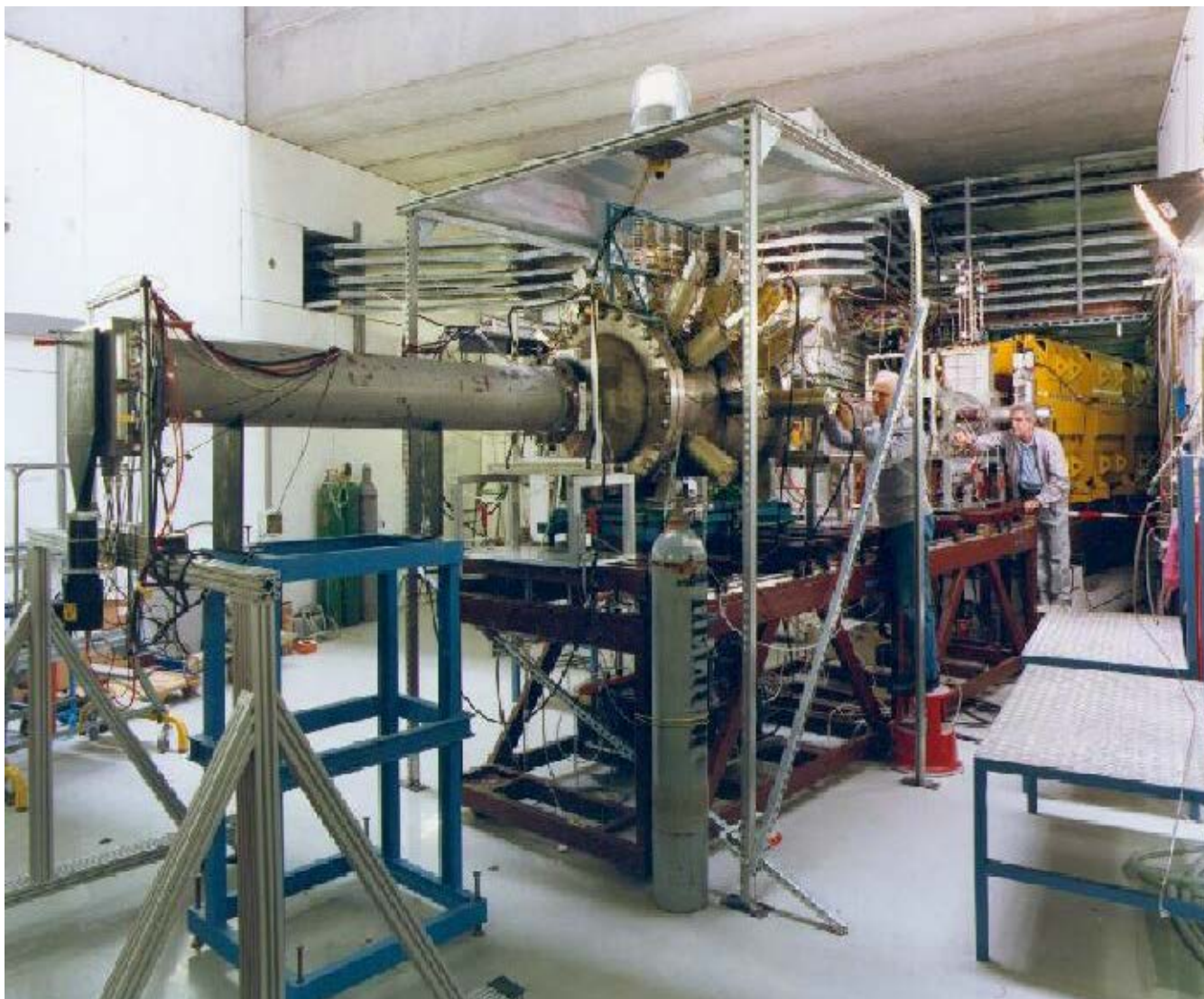
Измеряется дифференциальное сечение  $d\sigma/dt$  упругого pA рассеяния в инверсной кинематике

$$d\sigma/dt = dN/(dt M n \Delta L)$$

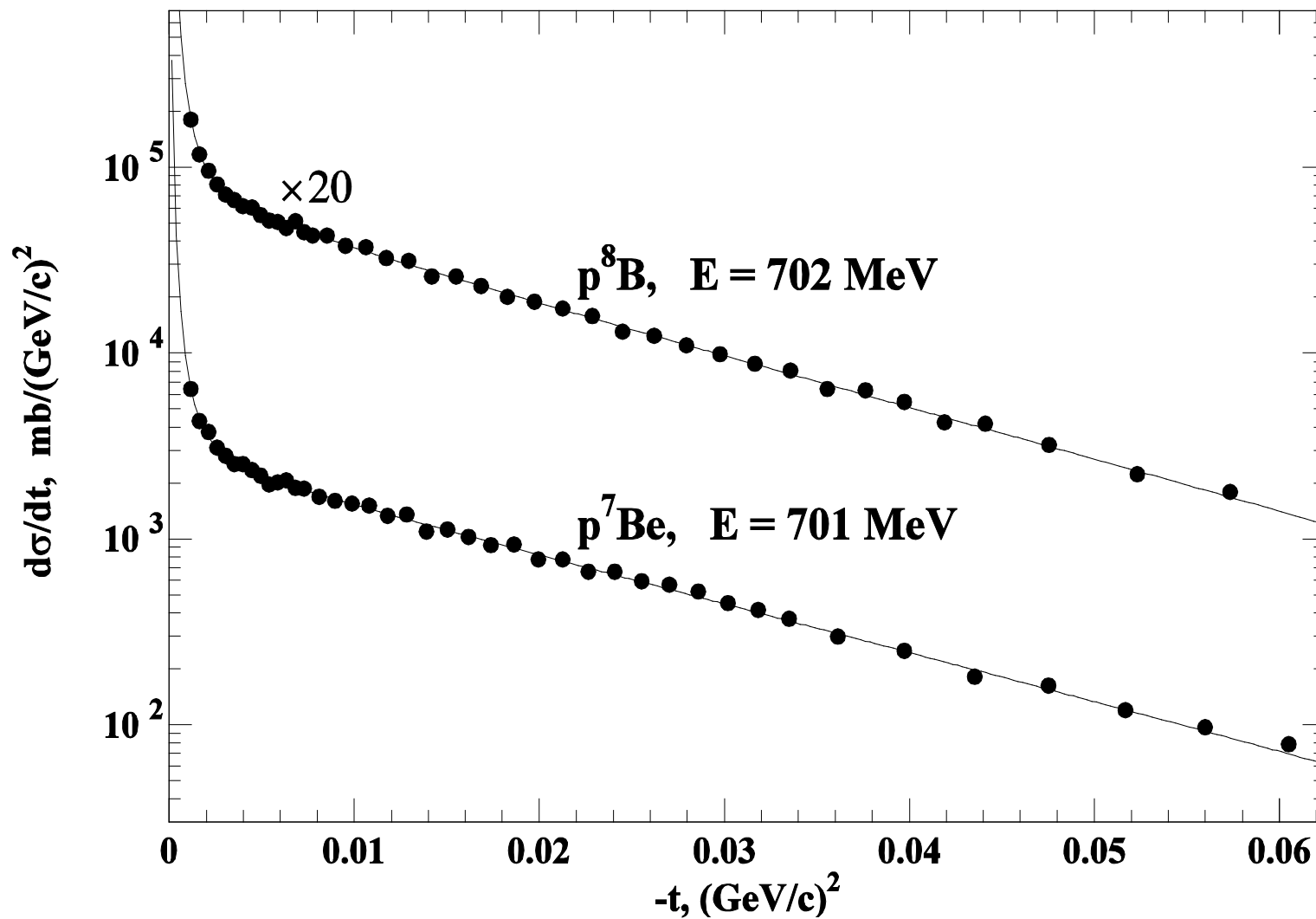
$$-t = 2mT_R, \text{ или}$$

$$-t = p^2\theta^2$$

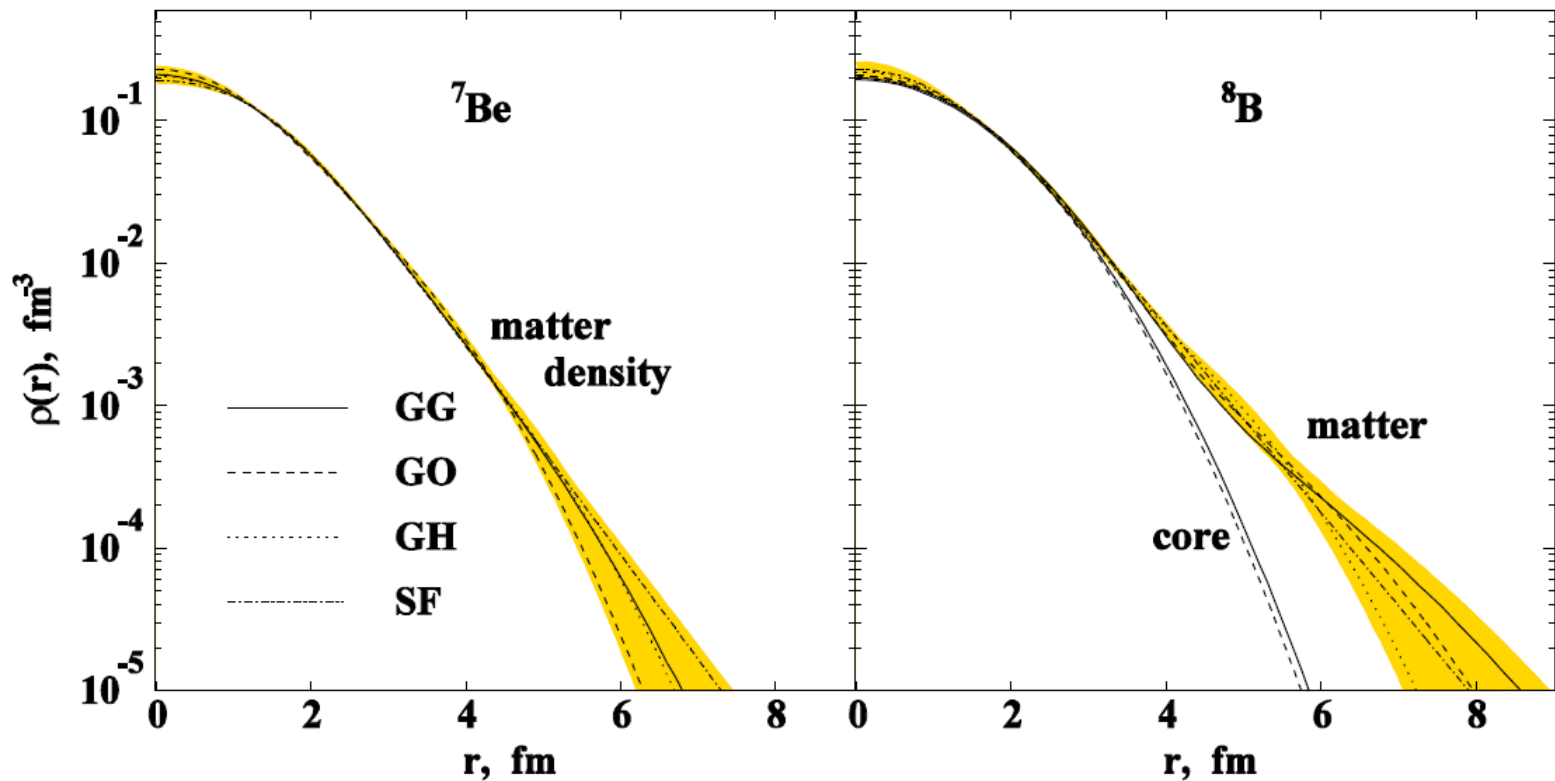
## Экспериментальная установка с детектором ядер отдачи ИКАР



# Абсолютные дифференциальные сечения упругого $p^8\text{B}$ и $p^7\text{Be}$ рассеяния

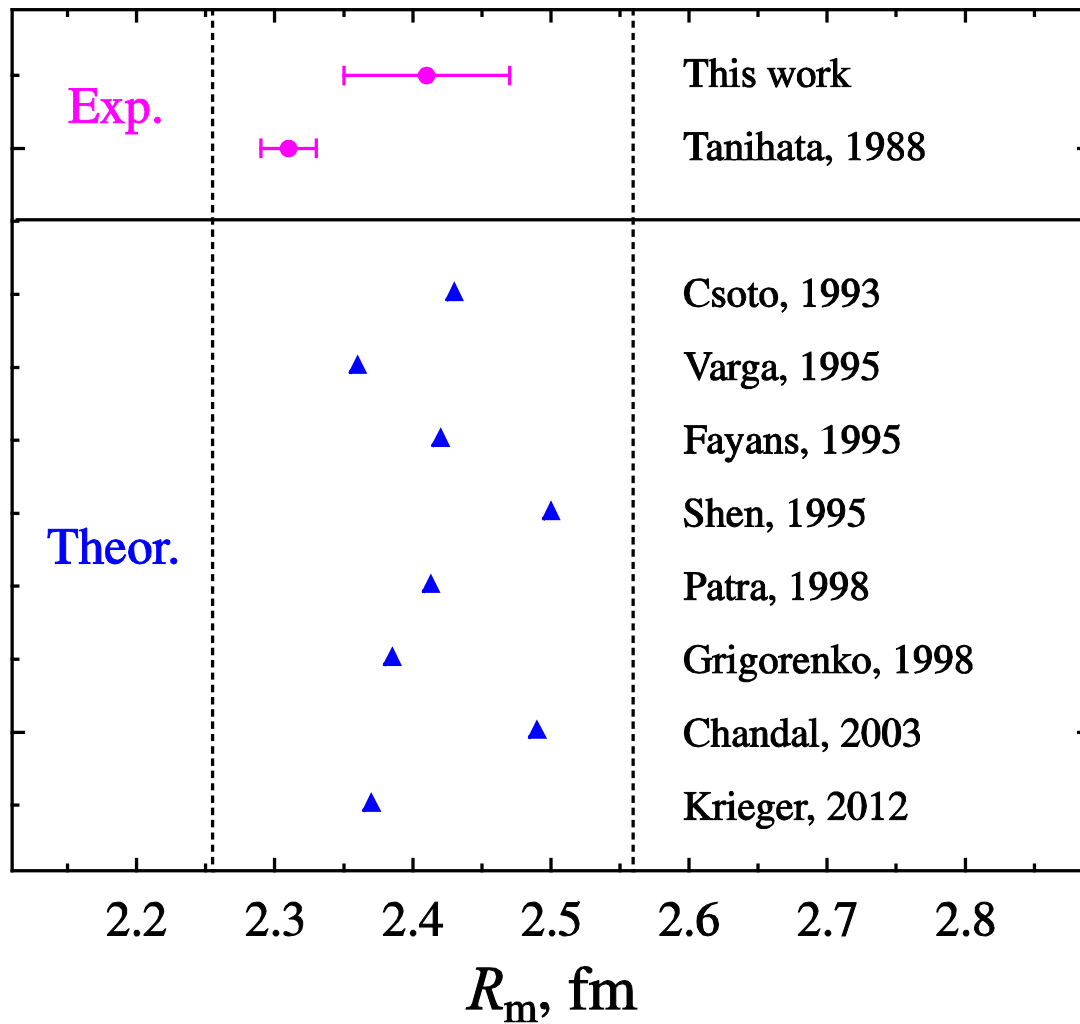


## Распределение плотности материи в ${}^7\text{Be}$ и ${}^8\text{B}$

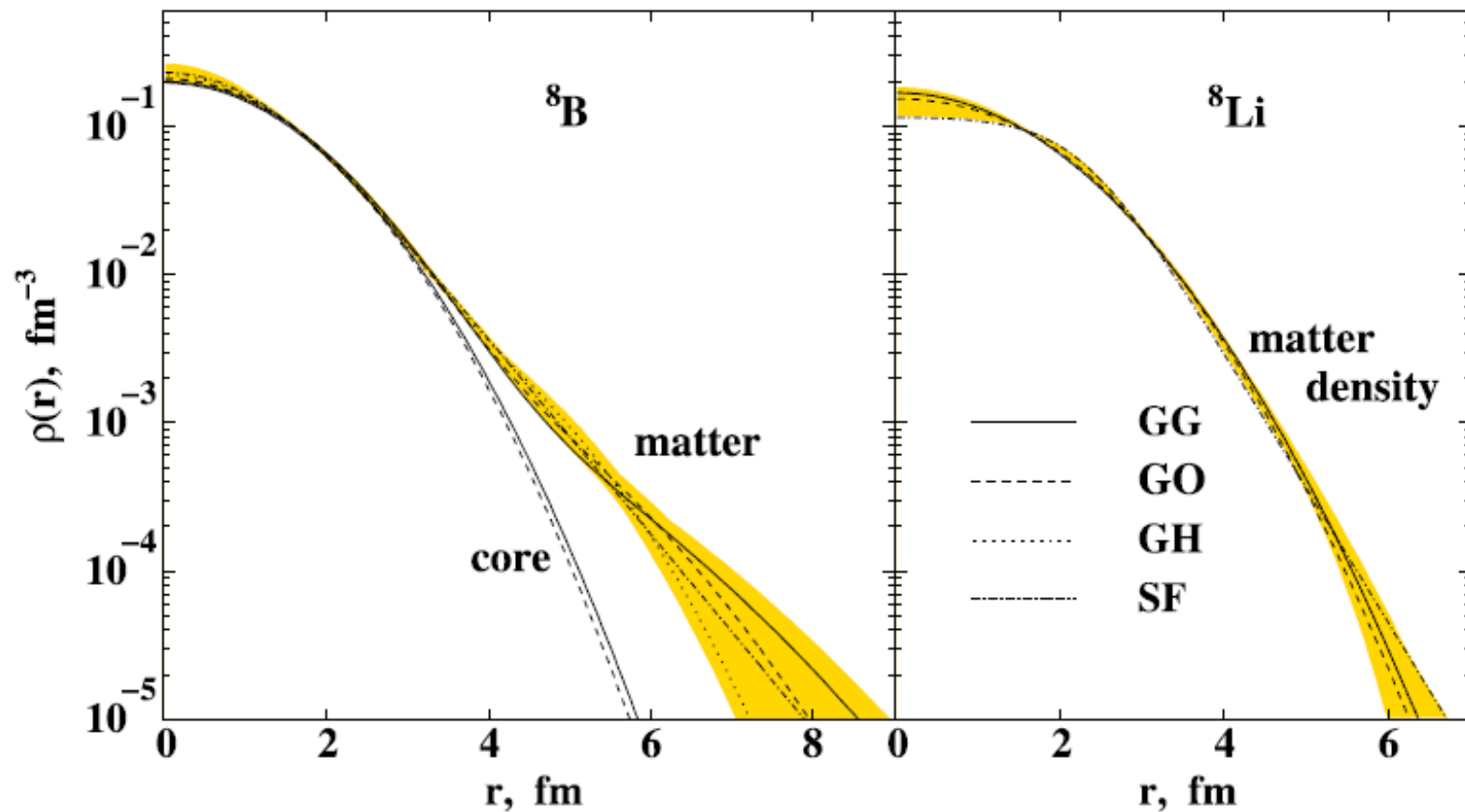


Радиус кора ядра  ${}^8\text{B}$  меньше радиуса распределения плотности материи свободного ядра  ${}^7\text{Be}$

# Сравнение результатов исследования $R_m$ для ядра ${}^7\text{Be}$



## Сравнение распределения плотности материи в зеркальных ядрах ${}^8\text{B}$ и ${}^8\text{Li}$



# Радиус материи $R_m$ ядер ${}^8\text{B}$ и ${}^8\text{Li}$ (в фм)

Experiment		Theory		
${}^8\text{B}$	${}^8\text{Li}$	${}^8\text{B}$	${}^8\text{Li}$	
2.38(4) [10]	2.37(2)[10]	2.740	2.531	[27]
2.43(3) [12]		2.57	2.45	[28]
2.50(4) [11]		2.73	2.64	[29]
2.55(8) [13]		2.56	2.44	[30]
2.45(10) [14]		2.59	2.38	[31]
2.61(8) [15]	2.39(5) [15]	2.627	2.515	[32]
<b>2.58(6) this work</b>	<b>2.50(6) [22]</b>	2.57	2.54	[33]

# Определение величины зарядового радиуса

## $R_{ch}$ в ядре ${}^8\text{B}$

В предположении, что в ядре  ${}^8\text{B}$   $R_n = R_c = 2.25(3)$  фм,

и учитывая  $AR_m^2 = ZR_p^2 + NR_n^2$   $R_m = 2.58(6)$  фм

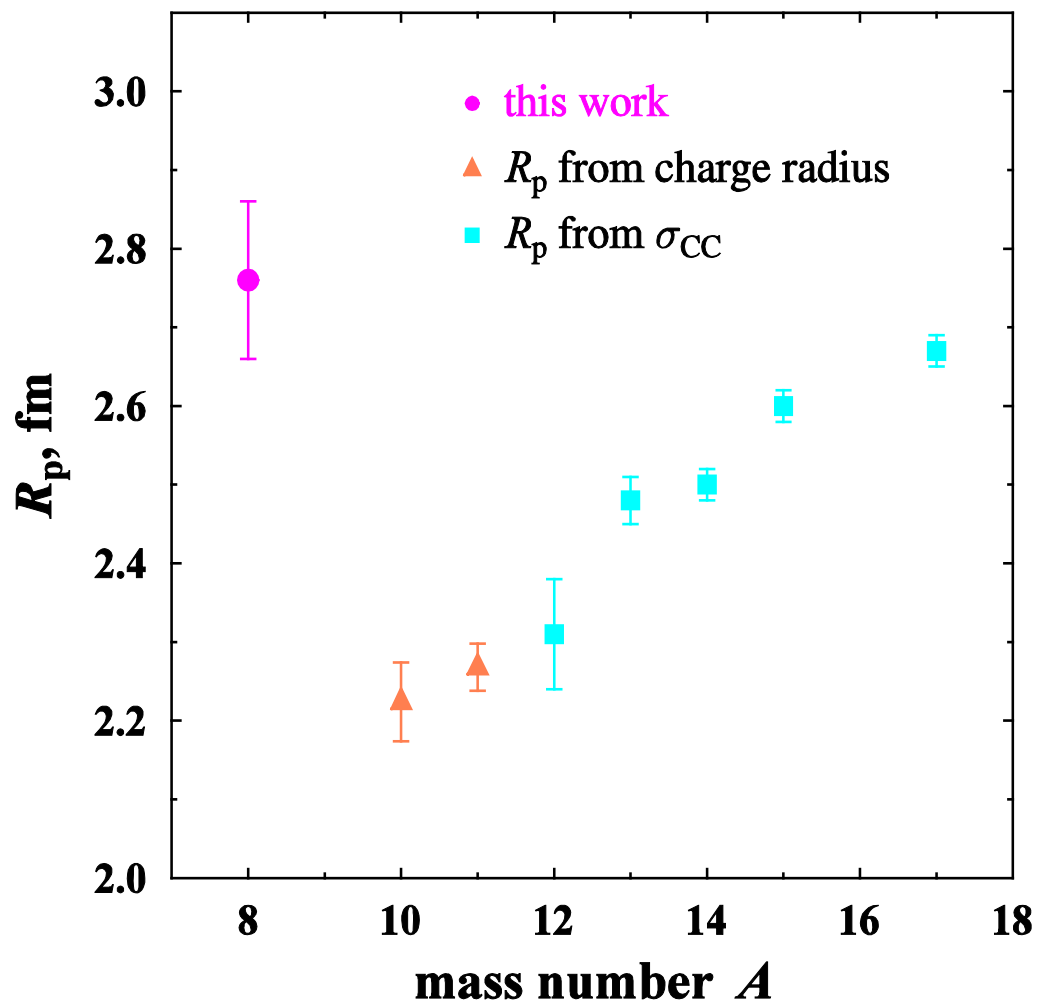
$$R_p = 2.76(9) \text{ фм}, \quad R_{ch} = 2.89(9) \text{ фм}$$

В нейтроноизбыточных ядрах  ${}^{12}\text{Be}$ ,  ${}^{15}\text{C}$ ,  ${}^{16}\text{C}$  можно считать, что  $R_p = R_c$ . Получены значения  $R_p$  (фм)

	ИКАР	другие методы	
${}^{12}\text{Be}$	2.36(6)	2.386(16)	лазерная спектроскопия
${}^{15}\text{C}$	2.41(2)	2.37(3)	$\sigma_{cc}$
${}^{16}\text{C}$	2.39(6)	2.40(4)	$\sigma_{cc}$



# Величина радиуса распределения плотности протонов $R_p$ в изотопах бора



# Результаты, полученные для $^8\text{B}$

	$R_m$ , (fm)	$R_p$ , (fm)	$R_n$ , (fm)	Reference
Experiment <sup>§</sup>	<b>2.58 (6)</b>	<b>2.76 (9)</b>	<b>2.25 (3)</b>	this work <sup>a</sup>
	2.38 (4)	2.45 (5)	2.27 (4)	Tanihata 1988
	2.43 (3)	2.49 (3)	2.33 (3)	Obuti 1996
	2.50 (4)	–	–	Al-Khalili 1996
	2.55 (8)	2.76 (8)	2.16 (3)	Negoita 1996
	2.45(10)	2.53 (13)	2.31 (5)	Fukuda 1999
	2.61 (8)	–	–	Fan 2015
Theory	2.71	2.98	2.20	Minamisoto 1992
	2.57	2.74	2.25	Csótó 1993
	2.73	2.88	2.46	Baye 1994
	2.56	2.73	2.24	Varga 1995
	2.507	2.68	2.19	Fayans 1995
	2.68	2.92	2.21	Brown 1996
	2.59	2.75	2.30	Grigorenko 1998
	2.494	2.654	2.202	Patra 1998
	2.627	2.861	2.181	Kitagawa 1999
	2.57	2.73	2.27	Dhiman 2005
	2.50	2.64	2.24	Furutachi 2009
	2.367	2.537	2.052	Wang 2009
	2.35	2.48	2.11	Pastore 2013
2.262	2.373	2.062	Henninger 2015	

# Публикация в Physics Letters B. Experiment S 358

Physics Letters B 780 (2018) 200–204



Contents lists available at [ScienceDirect](https://www.sciencedirect.com)

Physics Letters B

[www.elsevier.com/locate/physletb](http://www.elsevier.com/locate/physletb)



## Halo structure of $^8\text{B}$ determined from intermediate energy proton elastic scattering in inverse kinematics



G.A. Korolev<sup>a,\*</sup>, A.V. Dobrovolsky<sup>a</sup>, A.G. Inglessi<sup>a</sup>, G.D. Alkhazov<sup>a</sup>, P. Egelhof<sup>b</sup>,  
A. Estradé<sup>b</sup>, I. Dillmann<sup>b</sup>, F. Farinon<sup>b</sup>, H. Geissel<sup>b</sup>, S. Ilieva<sup>b</sup>, Y. Ke<sup>b</sup>, A.V. Khanzadeev<sup>a</sup>,  
O.A. Kiselev<sup>b</sup>, J. Kurcewicz<sup>b</sup>, X.C. Le<sup>b</sup>, Yu.A. Litvinov<sup>b</sup>, G.E. Petrov<sup>a</sup>, A. Prochazka<sup>b</sup>,  
C. Scheidenberger<sup>b</sup>, L.O. Sergeev<sup>a</sup>, H. Simon<sup>b</sup>, M. Takechi<sup>b</sup>, S. Tang<sup>b</sup>, V. Volkov<sup>b</sup>,  
A.A. Vorobyov<sup>a</sup>, H. Weick<sup>b</sup>, V.I. Yatsoura<sup>a</sup>

<sup>a</sup> Petersburg Nuclear Physics Institute, National Research Centre Kurchatov Institute, Gatchina 188300, Russia

<sup>b</sup> GSI Helmholtzzentrum für Schwerionenforschung GmbH, 64291 Darmstadt, Germany

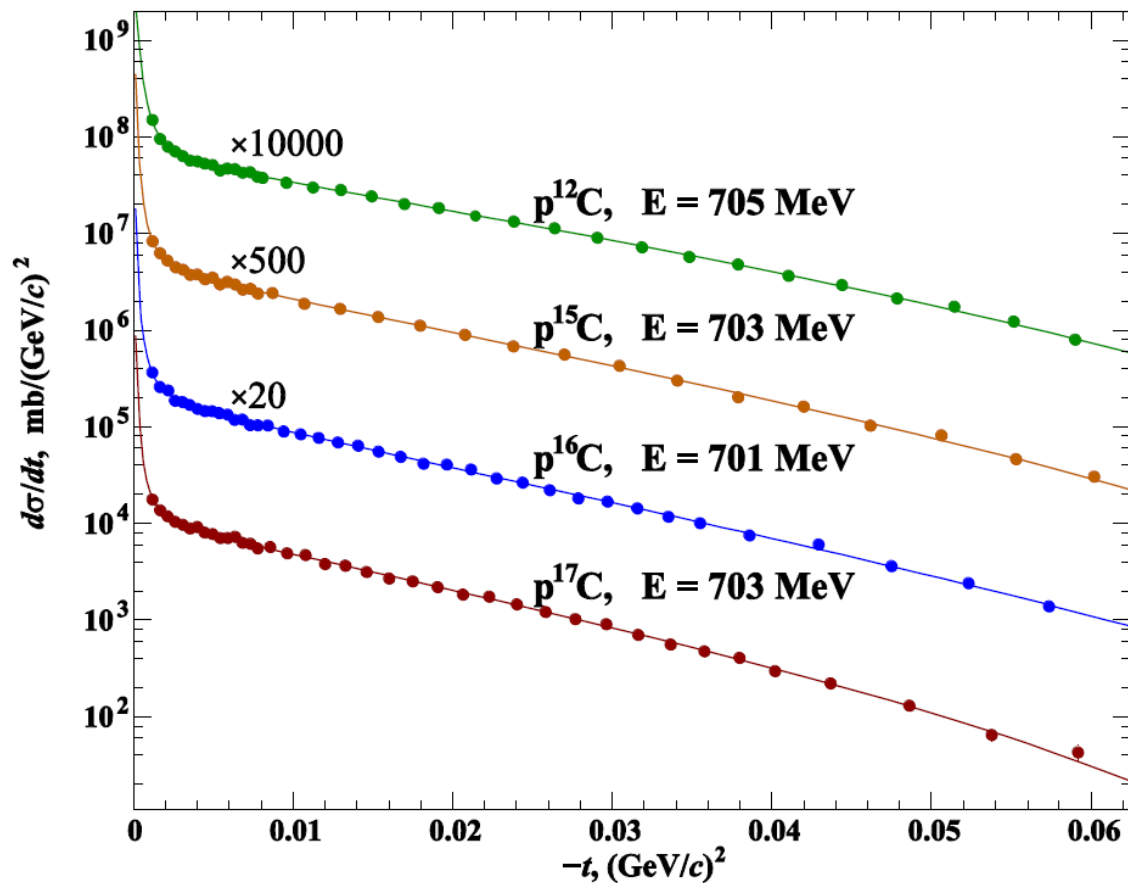
### ARTICLE INFO

*Article history:*  
Received 9 January 2018

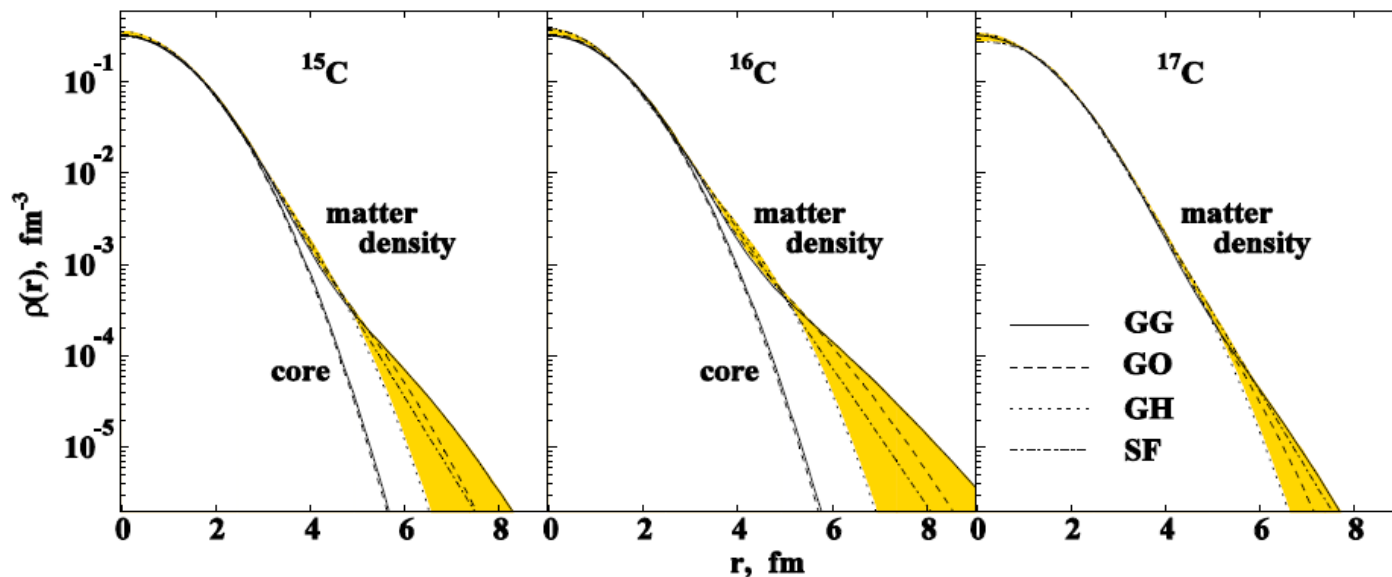
### ABSTRACT

The absolute differential cross section for small-angle proton elastic scattering on the proton-rich  $^8\text{B}$  nucleus has been measured in inverse kinematics for the first time. The experiment was performed

# Experiment S 358. Дифференциальные сечения упругого рассеяния протонов на ядрах углерода



## Распределение плотности материи для изотопов углерода (Experiment S 358)



Summary of preliminary results obtained in the present experiment. The values  $R_m$ ,  $R_c$  and  $R_v$  denote the rms radii of the matter, core and valence nucleon(s) distributions,  $\kappa$  is the ratio  $R_v/R_c$

Isotope	Composition	$R_m$ , fm	$R_c$ , fm	$R_v$ , fm	$\kappa = R_v/R_c$
$^{12}\text{C}$	—	2.37(4)	—	—	—
$^{15}\text{C}$	$^{14}\text{C} + n$	2.59(5)	2.41(2)	4.36(38)	1.81
$^{16}\text{C}$	$^{14}\text{C} + 2n$	2.72(6)	2.39(6)	4.45(26)	1.86
$^{17}\text{C}$	$^{16}\text{C} + n$	2.66(4)	2.55(2)	3.99(48)	1.56
$^7\text{Be}$	$^4\text{He} + ^3\text{He}$	2.42(4)	1.85(14)	3.00(11)	1.62
$^8\text{B}$	$^7\text{Be} + p$	2.58(6)	2.25(3)	4.24(25)	1.88

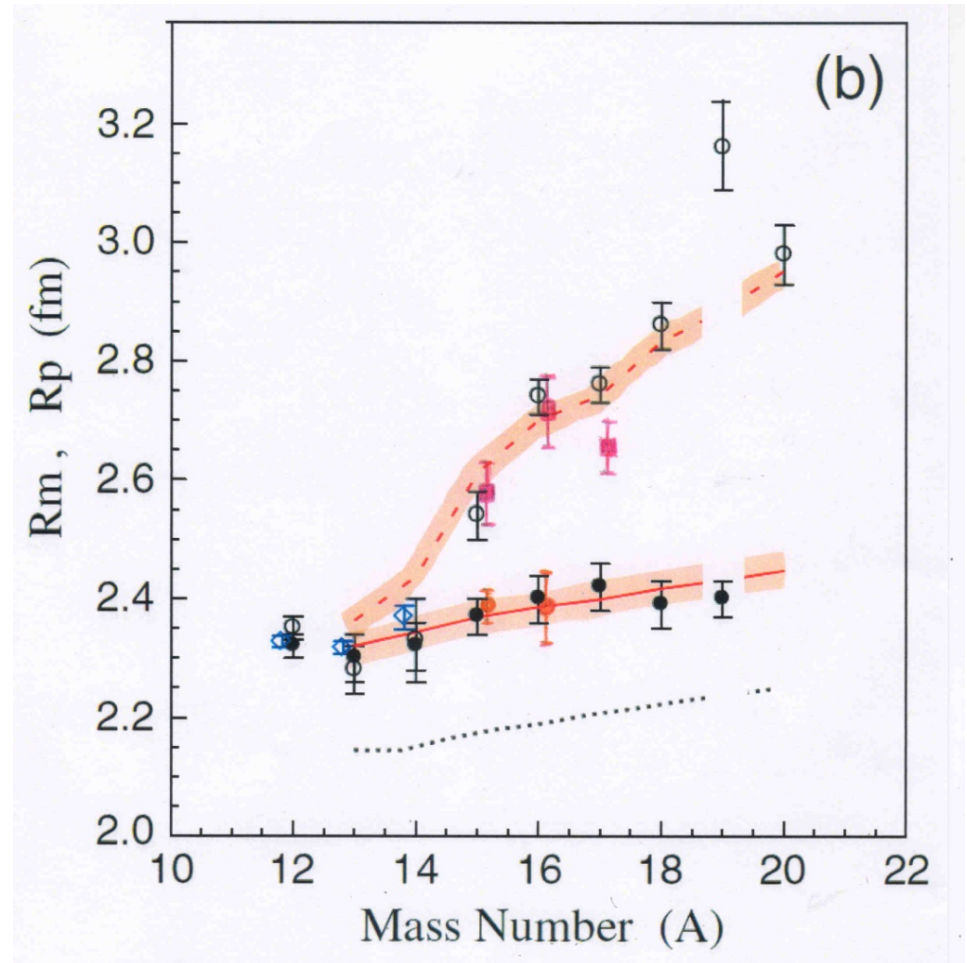
# Результаты измерения изотопов $^{15,16,17}\text{C}$

$R_p$  получено: из измерений  $\sigma_{\text{CC}}$  (черные точки), из данных по рассеянию электронов (синие точки).

Данная работа – **оранжевые точки**

$R_m$  – анализ старых данных по  $\sigma_l$  с учетом полученных значений  $R_p$  (белые точки).

Данная работа – **красные квадраты**



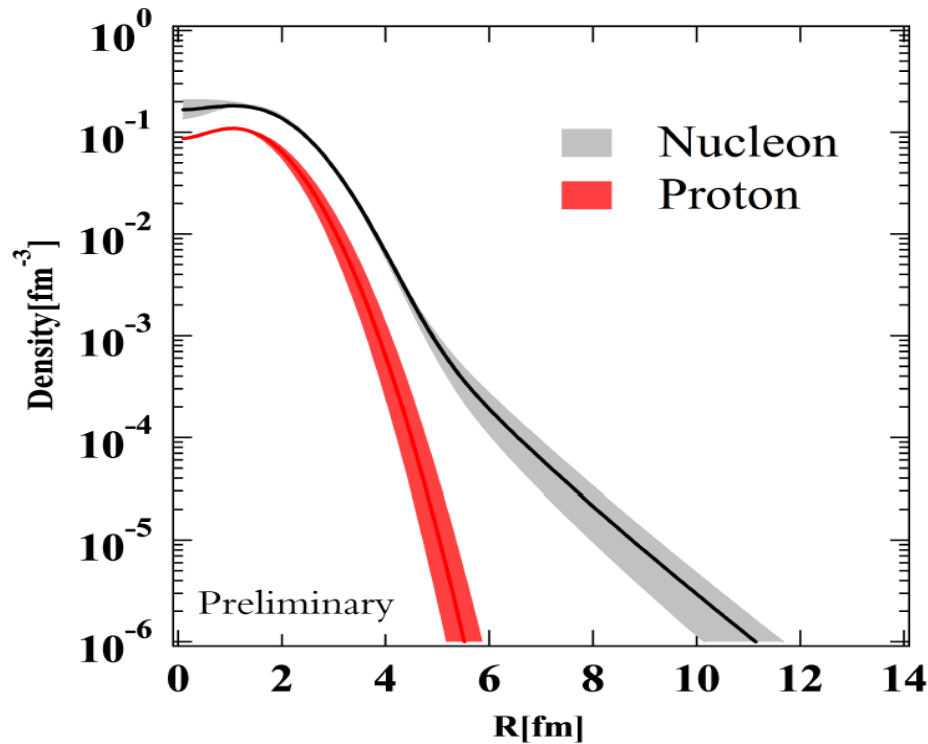
R.Kanungo et al. 2016

# Сравнение результатов измерения распределения плотности в $^{16}\text{C}$

H.Du et al. (2017)

$$R_m = 2.63(6) \text{ фм}$$

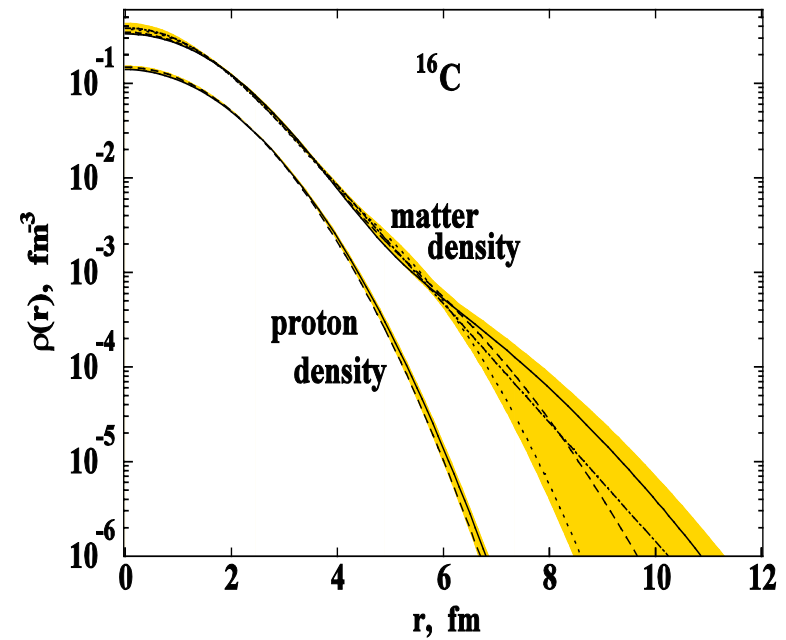
$$R_p = 2.14(20) \text{ фм}$$



Данная работа

$$R_m = 2.72(6) \text{ фм}$$

$$R_p = 2.39(6) \text{ фм}$$



# Структура ядра $^{16}\text{C}$

**Возможна различная форма деформации для протонов и для нейтронов.**

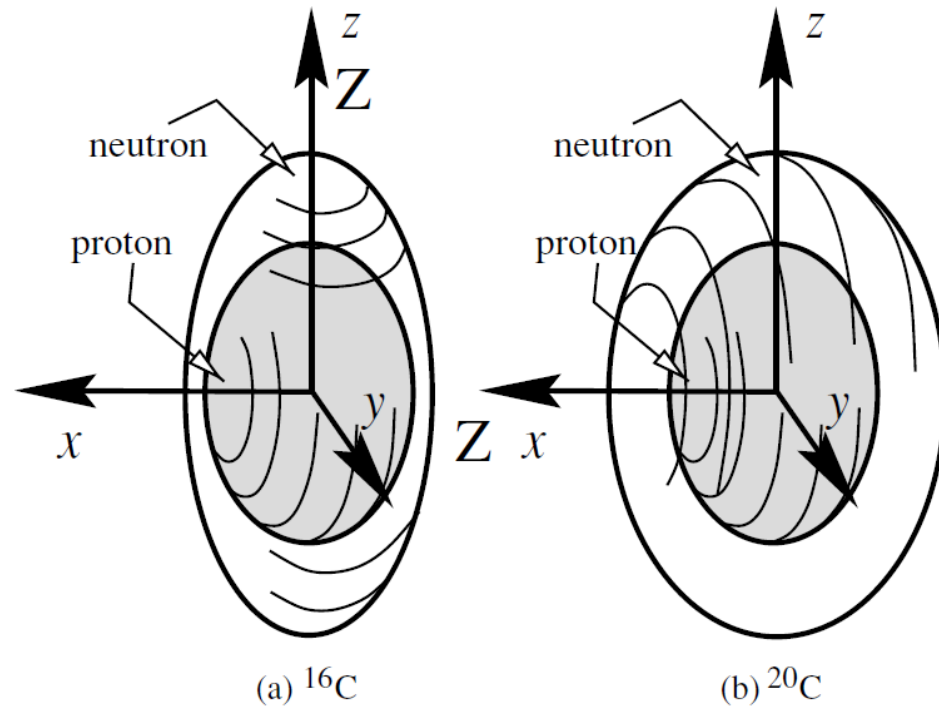


FIG. 4. Schematic figures for intrinsic deformations of the proton and neutron densities. (a) The oblate proton and prolate neutron shapes in  $^{16}\text{C}$ , and (b) the oblate proton and oblate neutron densities

**Y. Kanada-En'yo 2005**



# Результаты эксперимента

1. Измерены дифференциальные сечения упругого рассеяния протонов на ядрах  ${}^8\text{B}$ ,  ${}^7\text{Be}$ ,  ${}^{15,16,17}\text{C}$ .
2. Определена количественная характеристика гало в ядре  ${}^8\text{B}$   $R_h/R_c = 1.88$ .
3. Показано, что размер  ${}^7\text{Be}$  кора в ядре  ${}^8\text{B}$  меньше размера свободного ядра  ${}^7\text{Be}$ .
4. Найдены зарядовые радиусы  ${}^8\text{B}$ ,  ${}^{15}\text{C}$  и  ${}^{16}\text{C}$ .
5. Определен размер гало в ядре  ${}^{15}\text{C}$ .
6. Получен большой скин в ядре  ${}^{16}\text{C}$  ( $\Delta R = 0.51(11)$  фм).
7. Подтверждено отсутствие гало в ядре  ${}^{17}\text{C}$ .