

Исследование неупругой реакции $A(p, p')X$
с ядрами ${}^9\text{Be}$ и ${}^{12}\text{C}$
под углами рассеяния вторичных протонов 21° и 24.5°
при энергии 1 ГэВ

О. Миклухо

Лаборатория малонуклонных систем

тема НИОКР 9.13. : Исследование структуры ядерной материи на малых расстояниях в квазиупругих и неупругих протон-ядерных взаимодействиях при энергии 1 ГэВ

Отчет по теме за 2021 год

Участники работы

Г. Амальский, В. Андреев, С. Волков, Г. Гаврилов,
А. Жданов, А. Изотов*), А. Киселев, Н. Козленко,
П. Кравченко, Д. Майсузенко, О. Миклухо, В.И. Мурзин,
Д. Новинский, В. Степанов, Г. Федотов, В. Федулов,
А. Шведчиков

*) Умер в 2021 году

Experimental setup 2013 - 2021

O. Miklukho et al., arXiv-1103.6113v1 [nucl-ex] 31-Mar-2011

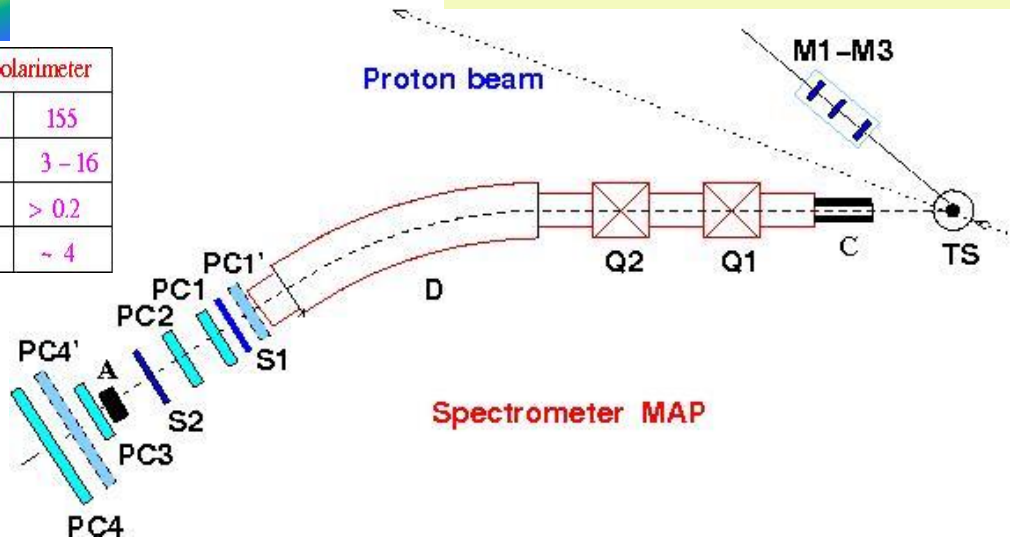
O. V. Miklukho et al., in Proceedings of the 15th Advanced Research Workshop on High Energy Spin Physics, Dubna, October 8–12, 2013 (Dubna, 2014);
 JETP Letters **102** (No. 1) 11 (2015); **106** (No. 2) 69-72 (2017); Pis'ma v ZhETF **106** (iss. 2) 63-64 (2017);

XVII Workshop on High Energy Spin Physics "DSPIN-2017", IOP Conf. Series: Journal of Physics: Conf. Series **938** (2017) 012013;

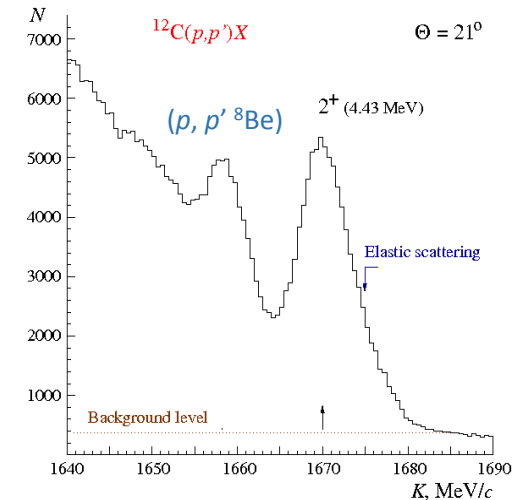
Phys.Atom.Nucl. **80** (No. 2) 299 (2017); **81** (No. 3) 320 (2018); **83** (No. 3) 431 (2020).

$$P = \varepsilon / A$$

Main parameters of the MAP polarimeter	
Carbon block thickness, [mm]	155
Polar angular range, [deg]	3 - 16
Average analyzing power	> 0.2
Efficiency, [%]	~ 4



arXiv:2102.04109v1 [nucl-ex] 8 Feb 2021.



Эксперименты : 2013-dec, 2015-feb, 2015-dec, 2016-dec, 2018-apr, 2019-mar, 2019-nov

Ядра: C,Ca* Si,Ca,Fe* Be,Zr* C,Ca* Be,Si,Fe,Zr** Be,Si,Fe,Zr* C,Ca*

Импульсный интервал – 5, цена канала 0.5 МэВ/с

Target	Dimensions [mm] thickness x width x height	Isotope concentration [%]	Density g/cm ³
CH ₂	4.0 x 10 x 70		1.0
C	4.0 x 10 x 70	98.9	1.60
CH ₂ foil	0.1 x 4 x 10		1.0
¹² C	4.0 x 7 x 10	98.9	1.60
⁴⁰ Ca	4.0 x 7 x 10	97.0	1.55
²⁸ Si	4.0 x 7.5 x 9.5	99.9	2.33
⁵⁶ Fe	3.0 x 5.2 x 10.1	91.7	7.86
⁹ Be	4.0 x 7 x 10	100.	1.85
⁹¹ Zr	2.7 x 5.6 x 9.7	i = 0: 51.46, i = 1: 11.23, i = 2: 17.11, i = 4: 14.4, i = 6: 2.8	6.49

* – Угол рассеяния 21° * – Угол рассеяния 24.5°

Main parameters of the magnetic spectrometer MAP	
Maximum particle momentum K, [GeV/c]	1.7
Horizontal angle acceptance Δθ _H , [deg]	0.8
Vertical angle acceptance Δθ _V , [deg]	1.9
Solid angle acceptance Ω, [sr]	4x10 ⁻⁴
Dispersion in the focal plan DF, [mm/%]	22.0
Momentum acceptance ΔK/K, [%]	8.0
Momentum resolution (FWHM) for the Be target, [MeV/c]	~ 6.7
Momentum resolution (FWHM) for the C target, [MeV/c]	~ 5.8
Momentum resolution (FWHM) for the Si target, [MeV/c]	~ 6.5
Momentum resolution (FWHM) for the Ca target, [MeV/c]	~ 5.5
Momentum resolution (FWHM) for the Fe target, [MeV/c]	~ 10.5
Momentum resolution (FWHM) for the Zr target, [MeV/c]	~ 8.6

Исследовалась инклюзивная реакция $A(p, p')X$ с ядрами ${}^9\text{Be}$, ${}^{12}\text{C}$ и ${}^{40}\text{Ca}$ при энергии протонов пучка 1 ГэВ в области больших импульсов вторичных протонов (K), включающей упругое рассеяние на исследуемых ядрах [1]. В этой области обнаружена структура (рис. 1), возможно связанная с упругим рассеянием на многонуклонных кластерах внутри исследуемых ядер.

[1] O.V. Miklukho et al., arXiv:2102.04109v1 [nucl-ex] 8 Feb 2021

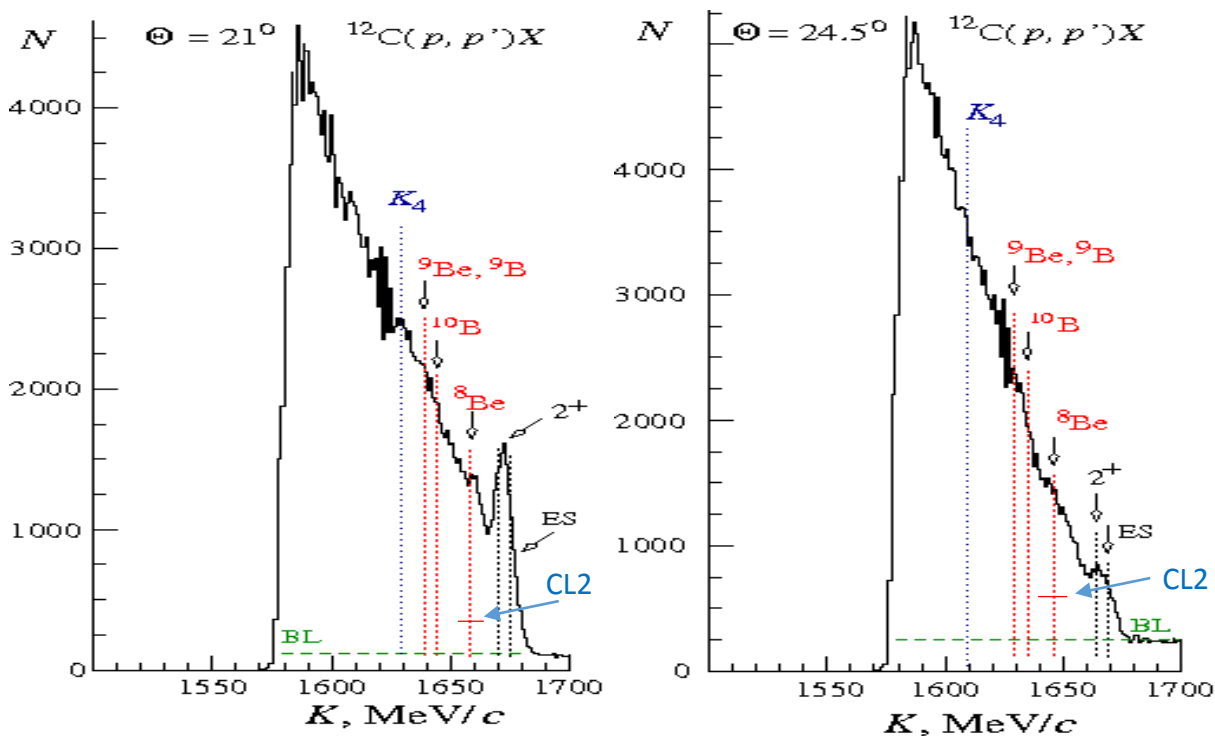


Рис. 1:

Красные точечные прямые указывают на положение максимумов квазиупругих пиков, соответствующих упругому рассеянию на многонуклонных кластерах (${}^9\text{Be}$, ${}^9\text{B}$, ${}^{10}\text{B}$ и ${}^8\text{Be}$) внутри исследуемого ядра ${}^{12}\text{C}$.

Синяя точечная прямая соответствует рассеянию на четырехнуклонном кластере с массой, равной массе свободного ядра ${}^4\text{He}$.

Импульсный интервал – 5, цена канала 1 МэВ/с

В случае рассеяния на ядре ${}^9\text{Be}$, наблюдение относительно узкой области в импульсных спектрах (рис. 2) при $\omega = 9.7 \text{ МэВ}$ и $\omega = 10.6 \text{ МэВ}$ в интервале **CL2** [1, 2] подтверждает модель этого ядра, в рамках которой оно состоит из компактного нуклонного кора (${}^8\text{Be}$) и слабо связанного с ним нейтрона. Впервые измерена поляризация (рис. 3) в рассеянии на этом коре ([2] Г.М. Амальский и др., Основные результаты научной деятельности 2020, НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ, Гатчина, стр. 66, 2021).

O.V. Miklukho et al., Phys.Atom.Nucl. **83** (No. 3) 431 (2020).

arXiv:2102.04109v1 [nucl-ex] 8 Feb 2021.

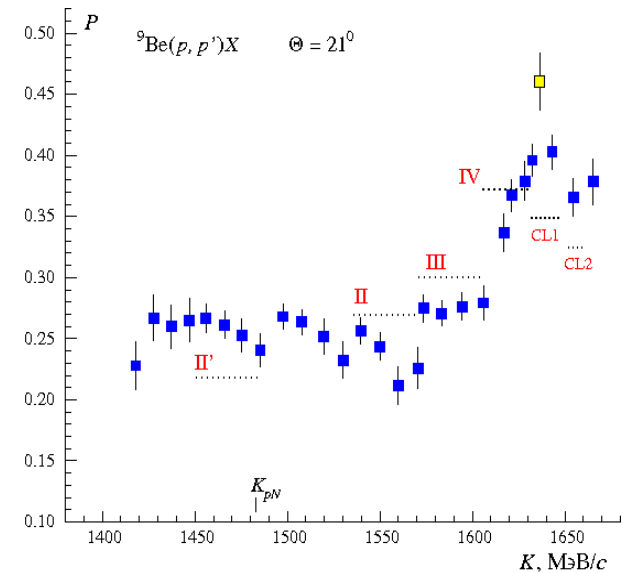
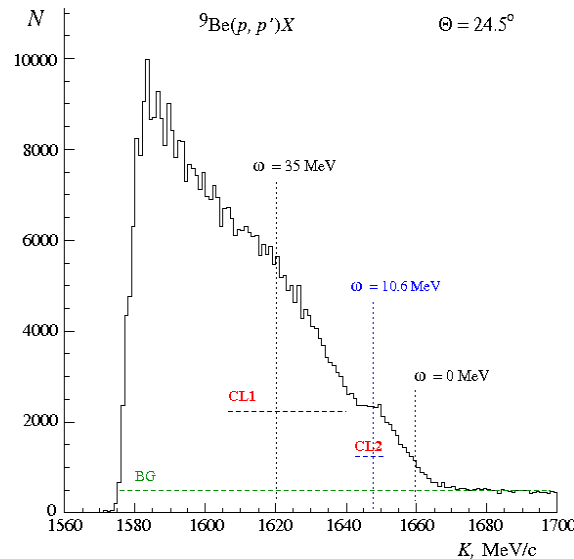
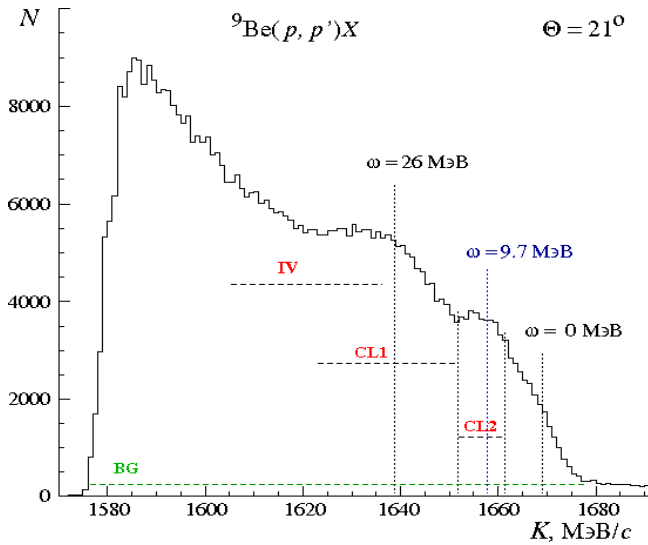


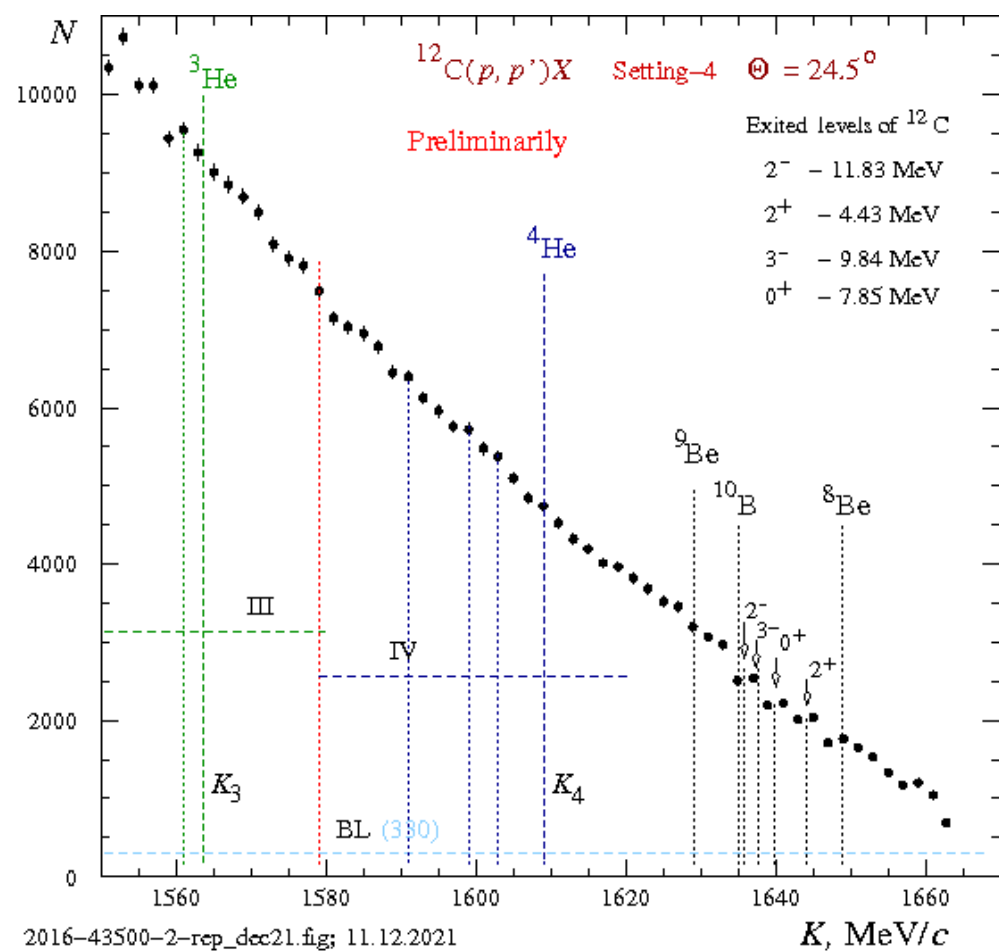
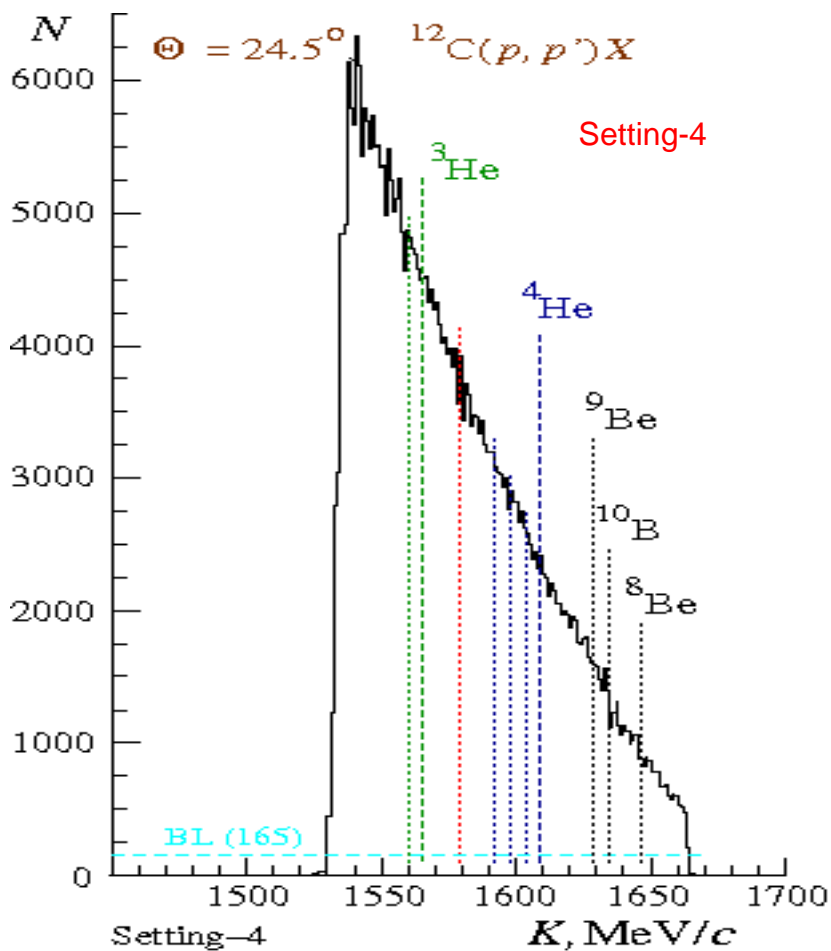
Рис. 2. Импульсные спектры протонов, рассеянных под углами 21° и 24.5° в реакции ${}^9\text{Be}(p, p')X$ при энергии 1 ГэВ.

Рис. 3. Поляризация P протонов, рассеянных под углом 21° в реакции ${}^9\text{Be}(p, p')X$ при энергии 1 ГэВ.

Импульсный интервал – 5, цена канала 1 МэВ/с

Сом: Центры соответствующих областей **CL2** для ядер ${}^9\text{Be}$ и ${}^{12}\text{C}$ совпадают.

Спектры протонов, рассеянных под углом 24.5° в импульсном интервале - 4 с шириной канала 1 и 2 МэВ/с



Импульсный интервал - 4, цена канала 1 МэВ/с

Импульсный интервал - 4, цена канала 2 МэВ/с

Публикации 2021 года

[1] “QUASI-ELASTIC SCATTERING OF PROTON WITH 1 GEV ENERGY ON EIGHT-NUCLEON CLUSTER INSIDE NUCLEUS”.

O.V. Miklukho, A.Yu. Kisselev, G.M. Amalsky, V.A. Andreev, G.V. Fedotov, G.E. Gavrilov, A.A. Izotov, N.G. Kozlenko, P.V. Kravchenko, V.I. Murzin, D.V. Novinskiy, A.V. Shvedchikov, V.A. Stepanov, and A.A. Zhdanov.
arXiv:2102.04109v1 [nucl-ex] 8 Feb 2021.

[2] “Наблюдение структуры в поляризации рассеянных протонов в инклюзивной реакции (p, p') с ядром ${}^9\text{Be}$ при энергии 1 ГэВ”.

Г. М. Амальский, В. А. Андреев, С. Г. Барсов, Г. Е. Гаврилов, А. А. Жданов, А. А. Изотов, Д. С. Ильин, А. Ю. Киселев, Н. Г. Козленко, П. В. Кравченко, Д. А. Майсузенко, О. В. Миклухо, В. И. Мурзин, Д. В. Новинский, А. В. Шведчиков.

Основные результаты научной деятельности 2020, НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ, Гатчина, стр. 66, 2021.

Предварительный план работы в 2022 году:

1. Продолжение исследования реакции $^{12}\text{C}(p, p')X$ с разрешением по импульсу вторичных протонов 2-3 МэВ/с.
2. Модификация спектрометра МАП для испытания прототипа времяпролетного спектрометра для эксперимента ПАНДА (Германия):
 - 2.1. Установка сцинтилляционной пластины прототипа с размером $140 \times 10 \times 2.5 \text{ см}^3$ в фокальной зоне спектрометра.
 - 2.2. Создание лазерного стенда в экспериментальном зале для испытания электроники прототипа в условиях работы ускорителя.
 - 2.3. Установка пропорциональной камеры в фокальной зоне спектрометра с шагом анодных проволочек 1 мм. При регистрации протонов от ускорителя логические сигналы с каждой проволочки подаются на электронику считывания прототипа (расположенную в экспериментальном зале). Эта информация позволяет исследовать разрешение прототипа от размеров протонного пучка.
 - 2.4. Требуется обеспечить быструю надежную связь по интернету между измерительным и экспериментальным залами.
3. Начать испытание прототипа на пучках фотонов и протонов.

Спасибо за внимание

С наступающим Новым Годом !

Вспомогательные слайды по теме доклада

С.Л. Белостоцкий, Ю.В. Доценко, С.С. Волков, А.А. Воробьёв, Л.Г. Кудин, Н.П. Куропаткин, О.В. Миклухо, В.Н. Никулин, О.Е. Прокофьев, М.А. Шуваев. Препринт ЛИЯФ № 826, 1983, с.52.

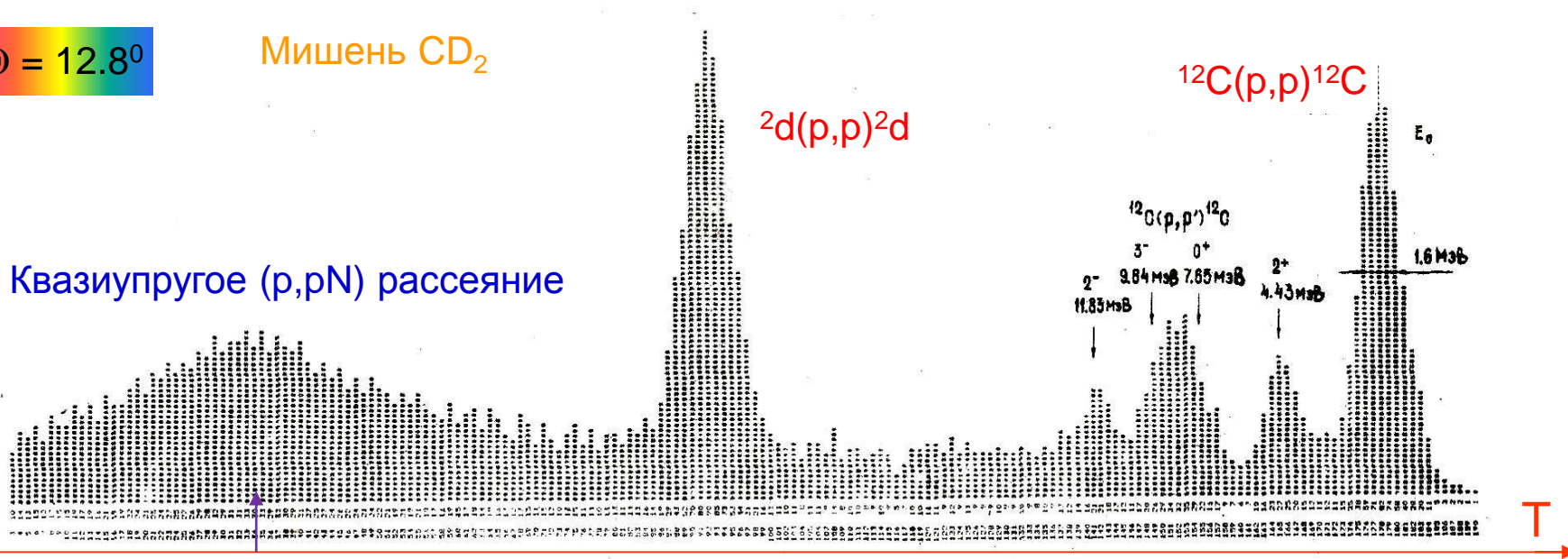
$\Theta = 12.8^\circ$

Мишень CD_2

$^{12}C(p,p)^{12}C$

$^2d(p,p)^2d$

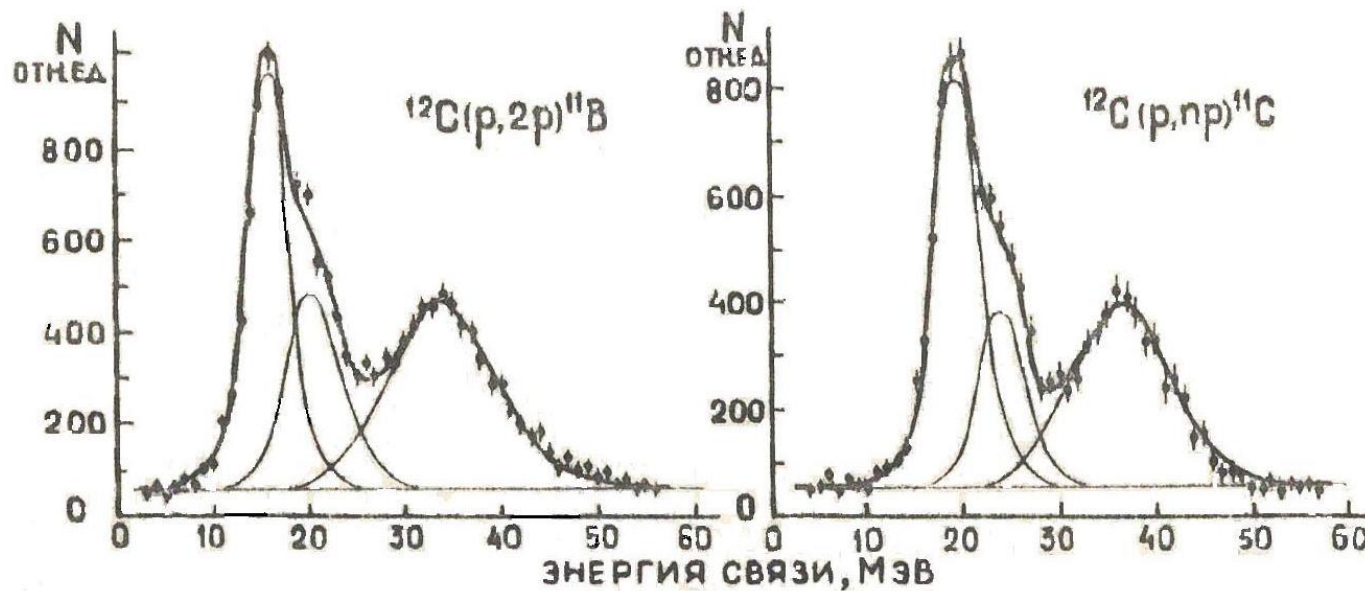
Квазиупругое (p,pN) рассеяние



Энергетический спектр (цена канала 0.5 мм, 0.33 МэВ).

2^+ (4.43 MeV), 0^+ (7.85 MeV), 3^- (9.84 MeV), 2^- (11.83 MeV)

Ю.В. Доценко, В.Е. Стародубский «Деформационная структура легких ядер из реакции (p, 2p), (p, pn)», Препринт ЛИЯФ, № 970, Ленинград, июль 1984, 32 с.



Ю.В. Доценко, В.Е. Стародубский «Деформационная структура легких ядер из реакции (p, 2p), (p, pn)», Препринт ЛИЯФ, № 970, Ленинград, июль 1984, 32 с.

Энергии одночастичных состояний (МэВ)

Ω, π	e_p				e_n			
	экс.	S7	SII	SIII	экс.	S7	SII	SIII
^{12}C 1/2 ⁻	16.1(2)	16.4	16.3	16.6	19.0(2)	19.3	19.5	19.5
^{12}C 3/2 ⁻	20.4(4)	20.3	19.8	20.5	23.3(3)	23.3	23.1	23.5
^{12}C 1/2 ⁺	34.0(8)	35.9	36.9	31.9	36.3(6)	38.8	40.3	34.9
^{11}B 3/2 ⁻	11.7(4)	11.8	12.3	13.3	11.5(5)	10.7	11.9	12.2
^{11}B 1/2 ⁻	17.5(4)	17.6	17.7	17.8	17.2(5)	17.4	17.7	17.5
^{11}B 1/2 ⁺	33.2(9)	34.7	35.9	34.7	33.9(8)	33.7	35.6	30.4
^{10}B 3/2 ⁻	7.3(3)	7.5	8.3	9.7	9.2(4)	9.7	10.6	11.7
^{10}B 1/2 ⁻	17.5(3)	17.9	17.3	17.3	20.5(5)	20.4	21.1	20.9
^{10}B 1/2 ⁺	31.8(8)	31.4	32.7	28.7	32.2(8)	33.9	35.9	31.4
^9Be 3/2 ⁻					2.0(2)	6.1	7.2	8.4
^9Be 1/2 ⁻	17.1(3)	17.0	16.7	17.6	18.1(5)	18.2	18.6	18.6
^9Be 1/2 ⁺	27.7(5)	31.1	32.6	29.4	29.2(8)	30.1	32.2	28.5
^7Li 1/2 ⁻	10.3(3)	10.3	10.0	10.6	8.0(6)	8.0	8.1	8.2
^7Li 1/2 ⁺	23.2(3)	25.5	27.6	25.5	26.0(6)	23.0	25.7	22.8
^6Li 1/2 ⁻	4.9(2)	4.8	4.9	6.6	6.0(3)	6.1	6.6	8.0
^6Li 1/2 ⁺	21.9(8)	20.6	22.9	21.1	23.7(4)	22.1	24.8	22.6

Среднеквадратичные радиусы распределения плотности протонов, нейтронов и материи

	$\langle r^2 \rangle_p^{1/2}, \text{ФМ}$			(e.A)	$\langle r^2 \rangle_n^{1/2}, \text{ФМ}$			$\langle r^2 \rangle_m^{1/2}, \text{ФМ}$
	Sk II	Sk III	Sk 7		Sk II	Sk III	Sk 7	
^{12}C	2.67	2.66	2.60	2.46 ÷ 2.49	2.65	2.64	2.59	2.59
^{11}B	2.55	2.51	2.47	2.42 ÷ 2.46	2.61	2.57	2.54	2.50
^{10}B	2.67	2.56	2.56	2.45(5)	2.61	2.56	2.55	2.55
^9Be	2.52	2.46	2.48	2.46 ÷ 2.52	2.66	2.61	2.64	2.57
^7Li	2.36	2.28	2.34	2.41(5)	2.53	2.42	2.53	2.45
^6Li	2.38	2.30	2.37	2.50(10)	2.36	2.29	2.35	2.36

(e.A), (p.A) - электрон-ядерное и протон-ядерное рассеяния.