

Исследование структуры ядерной материи в инклузивных (p, p') - экспериментах при энергии 1 ГэВ

О. Миклухо

НИЦ “Курчатовский Институт” - ПИЯФ

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

Объектом исследования являются нуклонные корреляции (кластеры) в ядрах.

Цель работы - поиск и исследование корреляций нуклонов в ядрах на синхроциклотроне СЦ-1000 НИЦ КИ – ПИЯФ методом инклузивного (p, p') – рассеяния протонов пучка с энергией ≈ 1 ГэВ ($\sim 995 \div 1005$ МэВ) с использованием магнитного спектрометра (МАП), в фокальной зоне которого расположен протонный поляриметр.

Исследованы ядра ${}^9\text{Be}$, ${}^{12}\text{C}$, ${}^{28}\text{Si}$, ${}^{40}\text{Ca}$, ${}^{56}\text{Fe}$ и ${}^{90}\text{Zr}$ при угле рассеяния 21° . Результаты исследований представлены на LXXV Международной конференции “ЯДРО-2025”.

Аннотация

Исследование структуры ядерной материи в инклюзивных (p, p') - экспериментах при энергии 1 ГэВ

В.А. Андреев, Г.Е. Гаврилов, Н.Г. Козленко, П.В. Кравченко, О.В. Миклухо, Д.В. Новинский

В ПИЯФ исследуется инклюзивная (p, p') – реакция с ядрами ^9Be , ^{12}C , ^{28}Si , ^{40}Ca , ^{56}Fe и ^{90}Zr с использованием магнитного спектрометра, в фокальной зоне которого расположен протонный поляриметр на основе пропорциональных камер и углеродного анализатора [1]. Измеряются сечение реакции и поляризация вторичного протона в зависимости от величины его импульса K [1 - 4]. Область исследования охватывает квазиупругий pN – пик, вплоть до импульса, соответствующего упругому рассеянию на ядре. При угле рассеяния 21° поляризация вторичных протонов ступенчато растет с ростом их импульса [1, 3, 4]. Наблюдается ступенчатое изменение от K отношения сечения рассеяния на ядрах ^{28}Si , ^{40}Ca , ^{56}Fe , ^{90}Zr к сечению рассеяния на ядре ^{12}C [2 - 4]. Эти наблюдения возможно связаны с упругим рассеянием на двухнуклонных (^2H), трехнуклонных (^3He , ^3H) и четырехнуклонных (^4He) корреляциях в ядрах. Обнаружены наплывы в высокоимпульсной части спектров протонов, рассеянных на ядрах ^{12}C и ^9Be [5]. Согласно расчетам положение этих наплывов отвечает упругому рассеянию на нуклонных кластерах: ^8Be , ^9Be и ^9B , ^{10}B и ^8Be , соответственно. Измерена поляризация в рассеянии на нуклонном кластере ^8Be . Широкий пик в рассеянии на ядре ^9Be [4] возможно отвечает рассеянию на кластере ^8Be с возбуждением последнего. При этом энергия возбуждения близка к 17 МэВ. Поляризация в рассеянии с возбуждением кластера ^8Be примерно в два раза больше, чем в рассеянии на невозбужденном кластере.

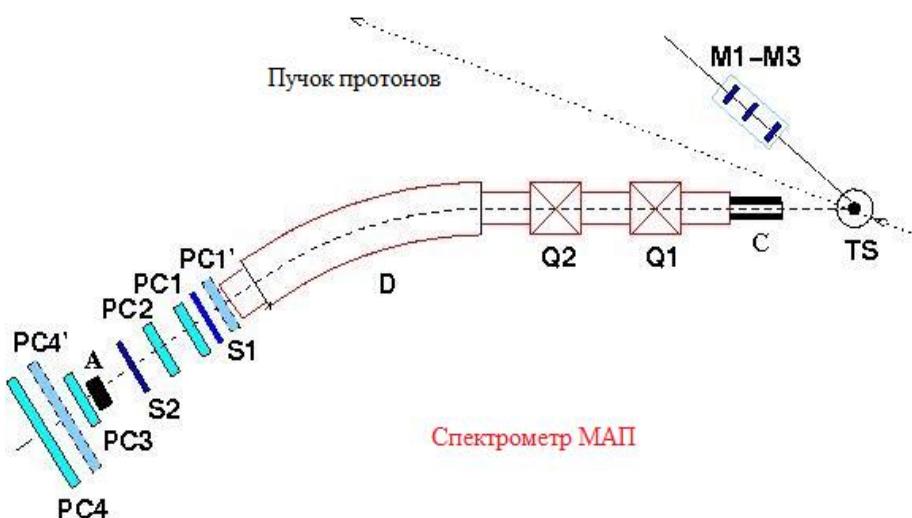
- [1] O.V. Miklukho *et al.*, Phys.Atom.Nucl. **80**, 299 (2017).
- [2] O.V. Miklukho *et al.*, JEPT Letters **106**, 69 (2017).
- [3] O.V. Miklukho *et al.*, Phys.Atom.Nucl. **81**, 320 (2018).
- [4] O.V. Miklukho *et al.*, Phys.Atom.Nucl. **83**, 431 (2020).
- [5] O.V. Miklukho *et al.*, arXiv: 2102.04109v1 [nucl-ex] 8 Feb 2021.

- [6] Миклухо О.В._и др. Исследование структуры ядерной материи в инклюзивных (p, p') – экспериментах при энергии 1 ГэВ. Сборник Тезисов Докладов (ISBN: 978-5-86763-496-4, стр. 39) на LXXV Международной конференции <<ЯДРО -2025. Ядерная физика и физика элементарных частиц. Ядерно-физические технологии>>, Санкт-Петербургский государственный университет, 1 – 6 июля 2025.

ПЛАН ДОКЛАДА

1. Экспериментальная установка и методика исследования инклузивной (p, p') – реакции с ядрами при энергии 1 ГэВ
2. Абсолютные дифференциальных сечения реакции и поляризация рассеянных протонов
3. Отношения дифференциальных сечений рассеяния на ядрах (см. также доп. слайд 19)
4. Поляризация вторичных протонов в (p, p') – реакции с ядрами ^{12}C и ^9Be .
5. Высокоимпульсные спектры вторичных протонов в (p, p') – реакции с ядрами ^9Be и ^{12}C
6. Оценка величины энергии возбуждения (ε^*) нуклонного кластера ^8Be в реакции с ядром ^9Be (с ядром ^{12}C – см. доп. слайд 20)
7. Структура узких пиков в импульсном распределении протонов, рассеянных под углом 21° в (p, p') – реакции с ядром ^{12}C в области квазиупругого pN – пика (см. также доп. слайд 21 - 22)
8. Структура узких пиков в импульсном распределении протонов, рассеянных под углом 21° в (p, p') – реакции с ядром ^9Be в области квазиупругого pN – пика
9. Структура узких пиков в импульсном распределении протонов, рассеянных под углом 21° в (p, p') – реакции с ядром ^{28}Si в области квазиупругого pN – пика. План на 2026 год (см. доп. слайд 23)

В ПИЯФ исследуется инклюзивная (p, p') – реакция с ядрами ^9Be , ^{12}C , ^{28}Si , ^{40}Ca , ^{56}Fe и ^{90}Zr с использованием магнитного спектрометра МАП, в фокальной зоне которого расположен протонный поляриметр на основе пропорциональных камер и углеродного анализатора (Рис. 1).



Экспериментальная установка

Параметры протонного пучка приведены в работе С.Л. Белостоцкий, Ю.В. Доценко, С.С. Волков, А.А. Воробьев, Л.Г. Кудин, Н.П. Куропаткин, О.В. Миклухо, В.Н. Никулин, О.Е. Прокофьев, М.А. Шуваев, “Квазиупругое рассеяние нуклонов при энергии 1 ГэВ. 1. Методика эксперимента”, Препринт ЛИЯФ № 826, 1983, с.52 :

Плотность потока протонов на мишень	$2 \cdot 10^{10} \div 10^{11} \text{ с}^{-1} \text{ см}^{-2}$
Угловая расходимость	$\sim 0,3$ град.
Мгновенный энергетический разброс	~ 300 КэВ
Энергетический ход за время вывода	~ 10 МэВ
Длительность макроимпульса	$7 \div 10$ мс
Макроскважность пучка	~ 45 %
Период микроструктуры	75 нс

Рис. 1. Магнитный спектрометр МАП. TS – мишень магнитного спектрометра; Q1, Q2 – магнитные квадруполи; D – дипольный магнит; С - коллиматор; S1, S2 и M1, M2, M3 – сцинтилляционные счетчики; PC1 - PC4 – пропорциональные камеры, PC1', PC4' – повернутые на 45 градусов пропорциональные камеры; A – углеродный анализатор поляриметра

Основные параметры магнитного спектрометра МАП	
Максимальный импульс частицы K , [ГэВ/с]	1.7
Горизонтальный угловой захват $\Delta\Theta_H$, [Град.]	0.8
Вертикальный угловой захват $\Delta\Theta_V$, [Град.]	1.9
Телесный угловой захват Ω , [sr]	4.0×10^{-4}
Дисперсия в фокальной плоскости Df , [мм/%]	22.0
Импульсный захват $\Delta K/K$, [%]	8.0
Импульсное разрешение (FWHM), [МэВ/с]	~ 5.5

$$P = \varepsilon / A = 2 * <\cos(\phi)> / <A>$$

Основные параметры поляриметра спектрометра МАП	
Толщина углеродного анализатора, [мм]	155
Полярный угловой захват, [Град.]	3 - 16
Средняя анализирующая способность	> 0.2
Эффективность, [%]	~ 4

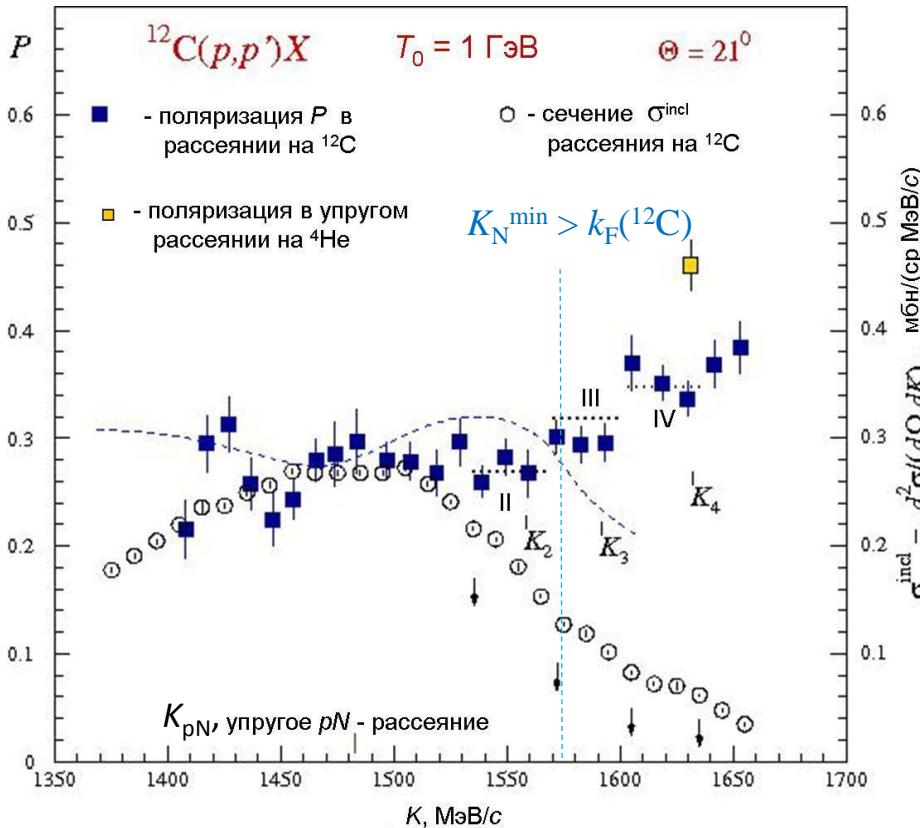
ПОЛЯРИМЕТР магнитного спектрометра МАП



В 2025 году многие элементы поляриметра прошли тестирование

Измеряются сечение реакции σ^{incl} и поляризация вторичного протона P в зависимости от величины его импульса K при угле рассеяния 21° [1 - 4]. Результаты измерений при рассеянии на ядре ^{12}C представлены на Рис. 2 [1]. Голубая вертикальная штрихованная прямая на рисунке указывает на область K ($K > 1575 \text{ MeV}/c$, см. также Рис. 3),

[1] О.В. Миклухо *et al.*, Phys. Atom. Nucl. **80**, 299 (2017).



[6*] Миклухо О.В. Доклад на конференции “ЯДРО -2025”.

где рассеяние на отдельном ядерном нуклоне невозможно [2]. Отрезками пунктирных линий обозначены интервалы импульсов вторичных протонов II, III и IV, в пределах которых поляризация практически одинакова и растет с K от интервала II к интервалу IV. Начало каждого интервала примерно совпадает с импульсом (отмеченном на рисунке стрелкой), соответствующим замедлению падения сечения рассеяния. Такое поведение поляризации и сечения возможно связано с квазиупругим рассеянием на нуклонных корреляциях, состоящих из двух, трех и четырех нуклонов. Расчетные импульсы K_2 , K_3 и K_4 отвечают квазиупругому рассеянию на соответствующем покоящемся кластере.

Рис.2. На рисунке: штриховая кривая - результат расчета поляризации P в рамках импульсного приближения с искаженными волнами с учетом модификации нуклонного спинора Дирака в ядерной среде [1]. Предполагается, что ядро состоит только из нуклонов. **Кинематика реакции:** при $K > K_{pN}$ ($\approx 1480 \text{ MeV}/c$, отвечает максимуму квазиупругого pN - пика) переданный ядру импульс Q слабо меняется и равен $\approx 600 \text{ MeV}/c$ ($Q > 2 \cdot k_F(^{12}\text{C})$, где $k_F(^{12}\text{C})$ - импульс Ферми для ядра ^{12}C , равный $\approx 220 \text{ MeV}/c$). K_N^{\min} - минимальный импульс, который должен иметь ядерный нуклон, чтобы протон пучка рассеялся на нем с импульсом K (Рис. 3) [2]

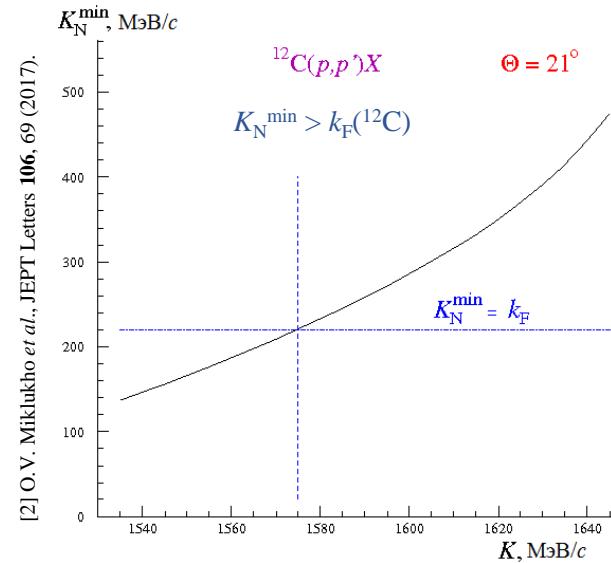


Рис. 3. Зависимость K_N^{\min} от импульса рассеянного протона K [2]

Сечения рассеяния и отношения сечений рассеяния на ядрах

[6*] Миклухо О.В. Доклад на конференции “ЯДРО -2025”.

[4] O.V. Miklukho *et al.*, Phys. Atom. Nucl. **83**, 431 (2020).

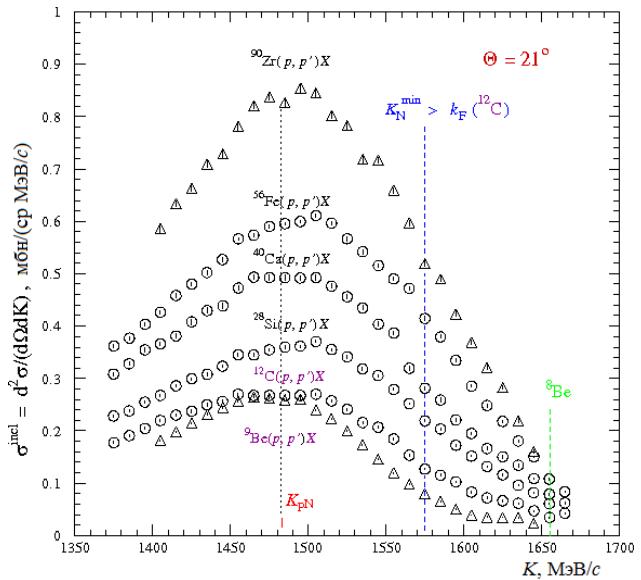


Рис. 4. Сечения рассеяния на ядрах ^{90}Zr , ^{56}Fe , ^{40}Ca , ^{28}Si , ^{12}C и ^9Be .
Ширина канала - 10 МэВ/с

Сечения рассеяния на ядрах ^{12}C и ^9Be (Рис. 4) в области, охватывающей максимум квазиупругого pN – пика практически одинаковы !!!.

Отношения сечений рассеяния на ядрах ^{90}Zr , ^{56}Fe , ^{40}Ca , ^{28}Si (Рис. 5-1) к сечению рассеяния на ядре ^{12}C ступенчато растут с импульсом K !!!.. Отношение же сечения рассеяния на ядре ^9Be (Рис. 5-2) к сечению рассеяния на ядре ^{12}C убывает с ростом K !!!.. Возможная причина: средняя нуклонная плотность в ядре углерода меньше, чем в ядрах с $A > 12$, и больше, чем в ядре бериллия.

Зеленая вертикальная штриховая прямая на Рис. 5 - 1, отмеченная символом ^8Be , соответствует квазиупрятому рассеянию на ядре ^8Be [5].

Зеленая вертикальная штриховая прямая на Рис. 5 - 2, отмеченная символом $^8\text{Be}^*$, возможно соответствует квазиупрятому рассеянию на ядре ^8Be с возбуждением последнего.

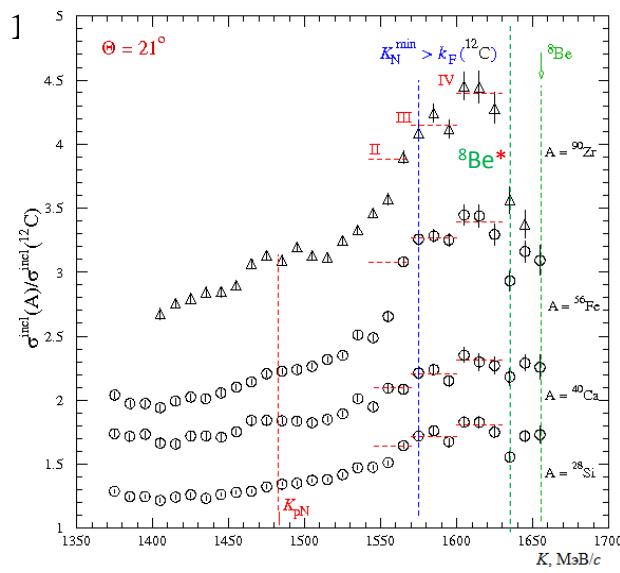
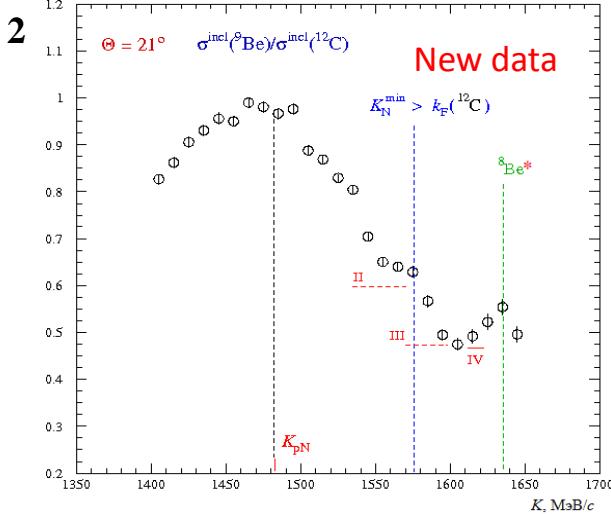


Рис. 5. Отношения сечений рассеяния на ядрах ^{90}Zr , ^{56}Fe , ^{40}Ca , ^{28}Si (1) и ^9Be (2) к сечению рассеяния на ядре ^{12}C



[6*] Миклухо О.В. Доклад на конференции “ЯДРО -2025”

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

Поляризация в рассеянии на ядрах ^{12}C и ^9Be

[6*] Миклухо О.В. Доклад на конференции “ЯДРО -2025”.

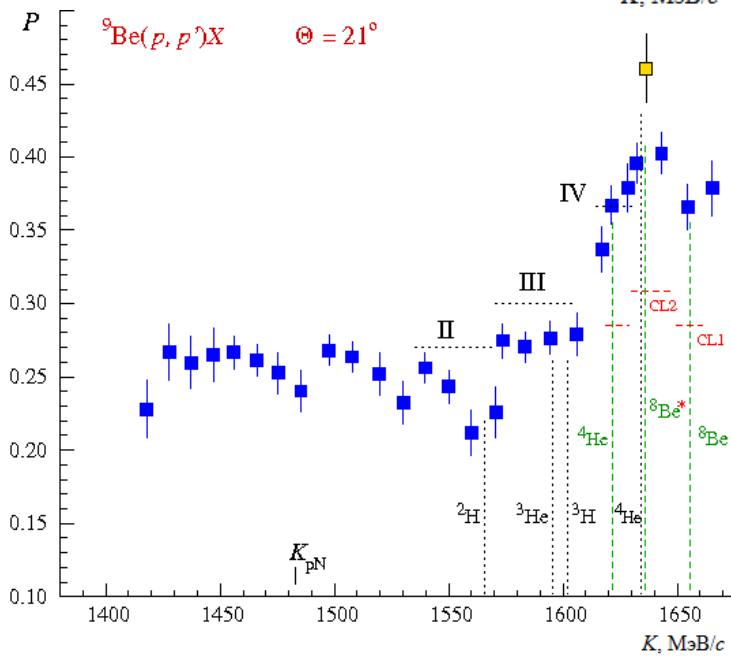
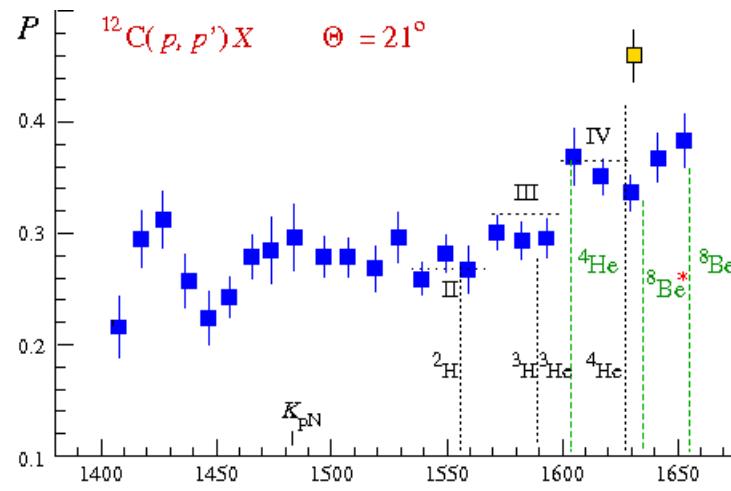


Рис. 7-1. Поляризация рассеянных протонов в (p, p') -реакции с ядром ^{12}C . Ширина канала - 10 МэВ/ c ; зеленые вертикальные штриховые отрезки прямой линии отвечают квазиупругому рассеянию на ядрах ^4He , ^8Be и, возможно, на возбужденном ядре $^8\text{Be}^*$; спин и четность ядра ^{12}C - 0^+

Наблюдение: минимум в поляризации достигается при импульсе K , соответствующем упругому свободному рассеянию на ядре ^4He (желтый квадрат [O. V. Miklukho, et al., Phys. Atom. Nucl. **69**, 452 (2006)]). В случае реакции с ядром ^9Be (Рис. 7-2) в этой кинематике достигается максимум в поляризации.

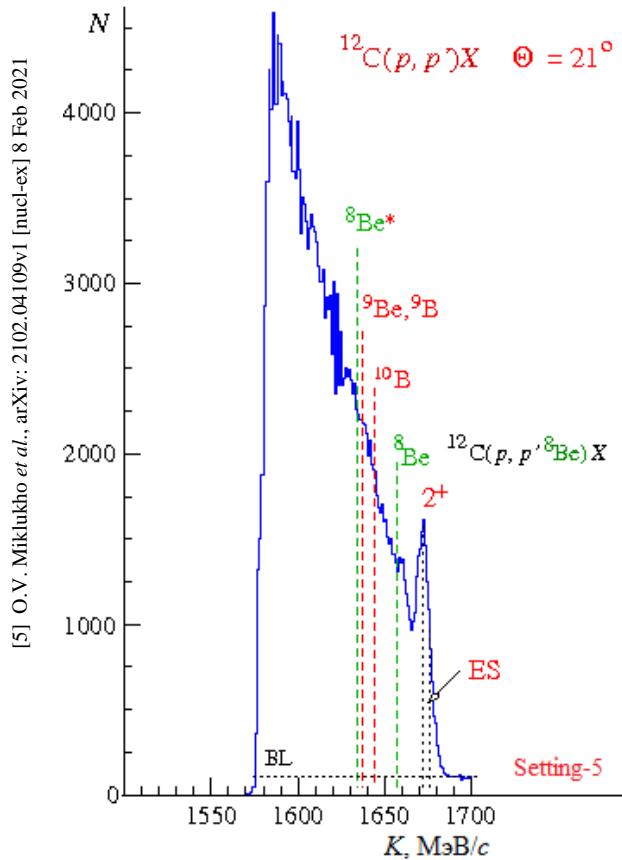
Рис. 7-2. Поляризация рассеянных протонов в (p, p') -реакции с ядром ^9Be . Ширина канала - 10 МэВ/ c ; зеленые вертикальные штриховые отрезки прямой линии отвечают квазиупругому рассеянию на ядрах ^4He , ^8Be и, возможно, на возбужденном ядре $^8\text{Be}^*$; в импульсных интервалах CL1 и CL2 происходит рассеяние на ядрах ^8Be и $^8\text{Be}^*$; спин и четность ядра ^9Be - $3/2^-$

Наплы whole в поляризации (CL2) обусловлен в основном вкладом от рассеяния $[{}^9\text{Be}(p, p' {}^6\text{He}) {}^3\text{He}, {}^9\text{Be}(p, p' {}^6\text{Li}) {}^3\text{H}, {}^9\text{Be}(p, p' {}^7\text{Li}) {}^2\text{H}]$ на ядрах ${}^6\text{He}$, ${}^6\text{Li}$, ${}^7\text{Li}$ – конституентах ядра ${}^9\text{Be}$ [4]. Возможен вклад и от рассеяния $[{}^9\text{Be}(p, p' {}^7\text{He}) {}^2\text{H}]$.

Проведена оценка поляризации (P) в (p, p') -реакции с возбужденным кластером ${}^8\text{Be}^*$ в ядре ${}^9\text{Be}$: $P \approx 72.8 \pm 13.7\%$ (эта величина существенно больше средней поляризации $36.7 \pm 1.0\%$ в рассеянии на кластерах ${}^8\text{Be}$ ($36.6 \pm 1.5\%$) и ${}^4\text{He}$ ($36.7 \pm 1.3\%$) в ядре ${}^9\text{Be}$). При этом анализировался импульсный спектр вторичных протонов с шириной канала 1 МэВ/ c (Рис. 10).

Высокоимпульсные спектры вторичных протонов в (p, p') - реакции с ядрами ^{12}C и ^{9}Be

[6*] Миклухо О.В. Доклад на конференции “ЯДРО -2025”.



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

Рис. 8-1. Импульсный спектр протонов, рассеянных на ядре ^{12}C . Ширина канала - 1 МэВ/с; **настройка спектрометра МАП :** Setting – 5; BL – уровень фона; ES – упругое рассеяние на ядре; $^{8}\text{Be}^*$ - возбужденное ядро ^{8}Be ; уровень фона BL = 97 (14)

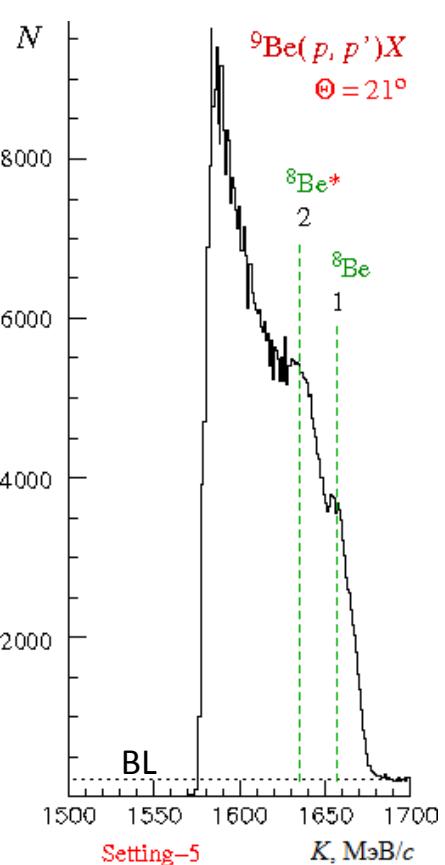


Рис. 8-2. Импульсный спектр протонов, рассеянных на ядре ^{9}Be . Ширина канала - 1 МэВ/с; **настройка спектрометра МАП :** Setting – 5; $^{8}\text{Be}^*$ - возбужденное ядро ^{8}Be ; уровень фона BL = 225 (45)

Обнаружены наплывы в высокоимпульсной части спектров протонов, рассеянных на ядрах ^{12}C (Рис. 8-1) и ^{9}Be (Рис. 8-2) [5]. Согласно кинематическим расчетам, учитывающих связанность нуклонных конституентов в исследуемом ядре, положение этих наплыпов отвечает квазиупругому рассеянию на покоящихся нуклонных кластерах: ^{8}Be , ^{9}Be , ^{9}B , ^{10}B и ^{8}Be , соответственно.

V. Chavchanidze, ”On the theory of the beryllium nucleus”, Russian scientific journal: Uspekhi Fizicheskikh Nauk (UFN) 43, 106 - 119 (1951) [in Russian].

О возможном существовании возбужденного кластера ^{8}Be ($^{8}\text{Be}^*$) отмечено в работе:

A.J. Krasznahorky *et al.*, “An Update on the Hypothetical X17 Particle”, arXiv:2409.16300v1 [nucl-ex] 10 Sep 2024.

В статье анализируются данные эксперимента $^{7}\text{Li}(p, e^+e^-)^{8}\text{Be}$ при энергии 4 МэВ и отмечается о наблюдении возбужденного состояния ядра ^{8}Be ($J^\pi = 2^+$).

Высокоимпульсные спектры вторичных протонов в (p, p') - реакции с ядром ${}^9\text{Be}$ при различных настройках спектрометра МАП: Setting – 5 и Setting - 4

[6*] Миклухо О.В. Доклад на конференции “ЯДРО -2025”.

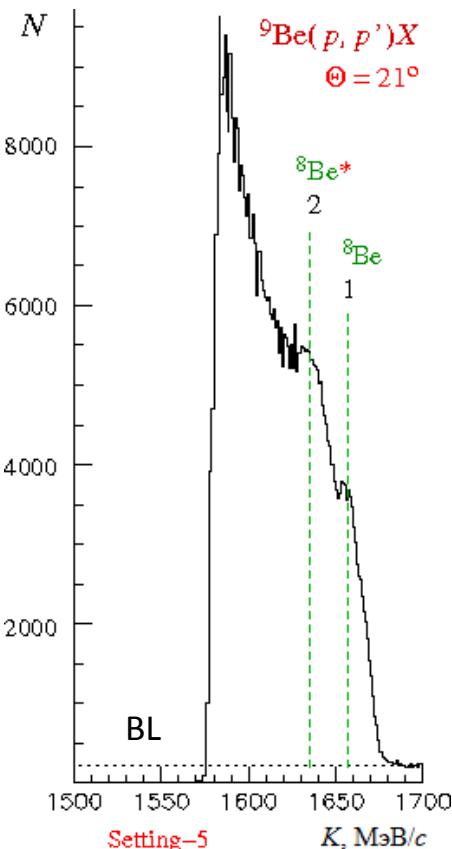


Рис. 8-2. Импульсный спектр протонов, рассеянных на ядре ${}^9\text{Be}$. Ширина канала - 1 МэВ/c; настройка спектрометра МАП: Setting – 5; ${}^8\text{Be}^*$ - возбужденное ядро ${}^8\text{Be}$; уровень фона BL = 225 (45)

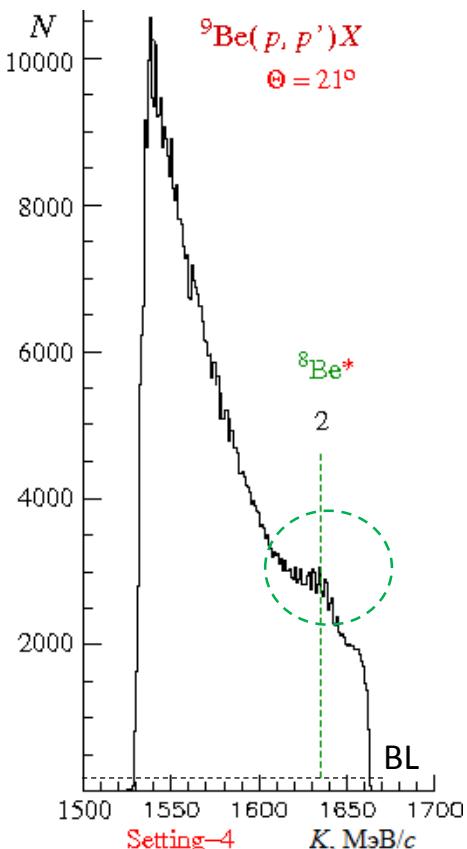


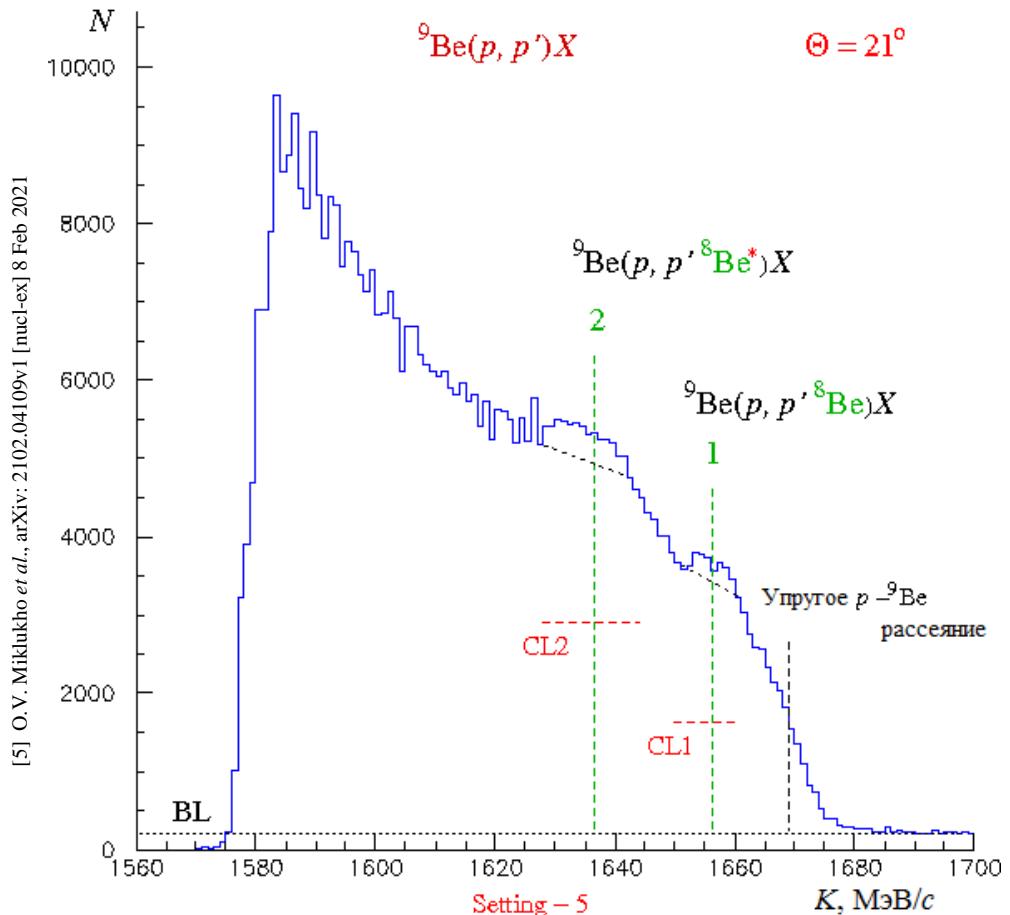
Рис. 9. Импульсный спектр протонов, рассеянных на ядре ${}^9\text{Be}$. Ширина канала - 1 МэВ/c; настройка спектрометра МАП: Setting – 4; ${}^8\text{Be}^*$ - возбужденное ядро ${}^8\text{Be}$; уровень фона BL = 120 (24)

На Рис. 9 представлено импульсное распределение вторичных протонов в (p, p') реакции с ядром ${}^9\text{Be}$, полученное при настройке спектрометра МАП на регистрацию протонов из смежного диапазона импульсов: Setting - 4. Проявление почти эквидистантных узких пиков в области наплыва (зеленый контур) не связано с неопределенностью определения импульса рассеянного протона с помощью пропорциональной камеры спектрометра МАП, шаг намотки анодных нитей в которой составляет 1 мм. Этот размер соответствует ≈ 0.75 МэВ/c, тогда как между наблюдаемыми узкими пиками расстояние $\approx 3 \div 4$ МэВ/c. Эта структура пиков возможно связана с проявлением сопутствующего процесса периферийного малоуглового перерассеяния, в той же мишени на нуклонных кластерах, поляризованных вторичных протонов, образовавшихся в (p, p') – реакции под углом 21° (см. слайд 16).

Отметим здесь, что **систематическая ошибка определения энергии (T) рассеянных протонов в нашем случае составляет $\sigma_{\text{систем.}}(T) \approx 0.2$ МэВ.**

Энергия возбуждения (ϵ^*) ядра ${}^8\text{Be}$ в (p, p') – реакции с ядром ${}^9\text{Be}$ при энергии 1 ГэВ

[6*] Миклухо О.В. Доклад на конференции “ЯДРО -2025”.



Форма пиков 1 и 2 определяется линейным изменением (ростом) энергии протонного пучка при выводе его из ускорителя.

Минимум в пике 1 обусловлен движением внешнего нейтрона в ядре ${}^9\text{Be}$ с орбитальным моментом $l = 1$.

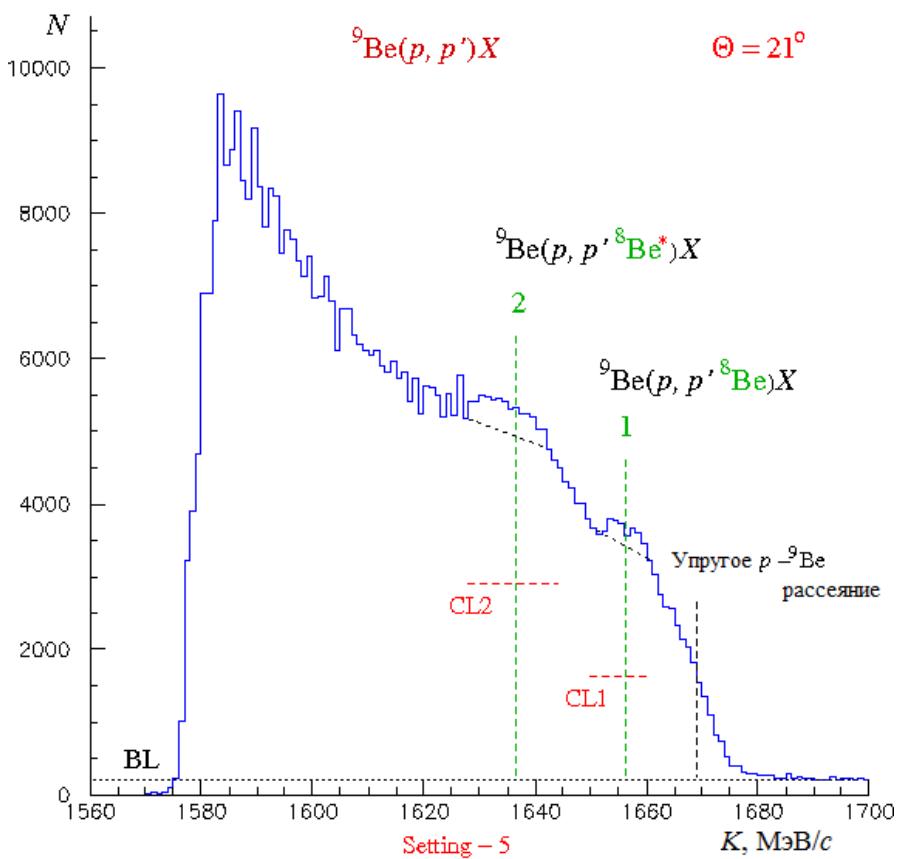
В случае упругого рассеяния на нуклонных кластерах в ядре ${}^9\text{Be}$ энергия возбуждения кластера ${}^8\text{Be}$ (ϵ^*) может быть вычислена по формуле:

$$\epsilon^* = T_1 - T_2, \text{ где } T_1 \text{ и } T_2 \text{ – кинетические энергии рассеянного протона.}$$

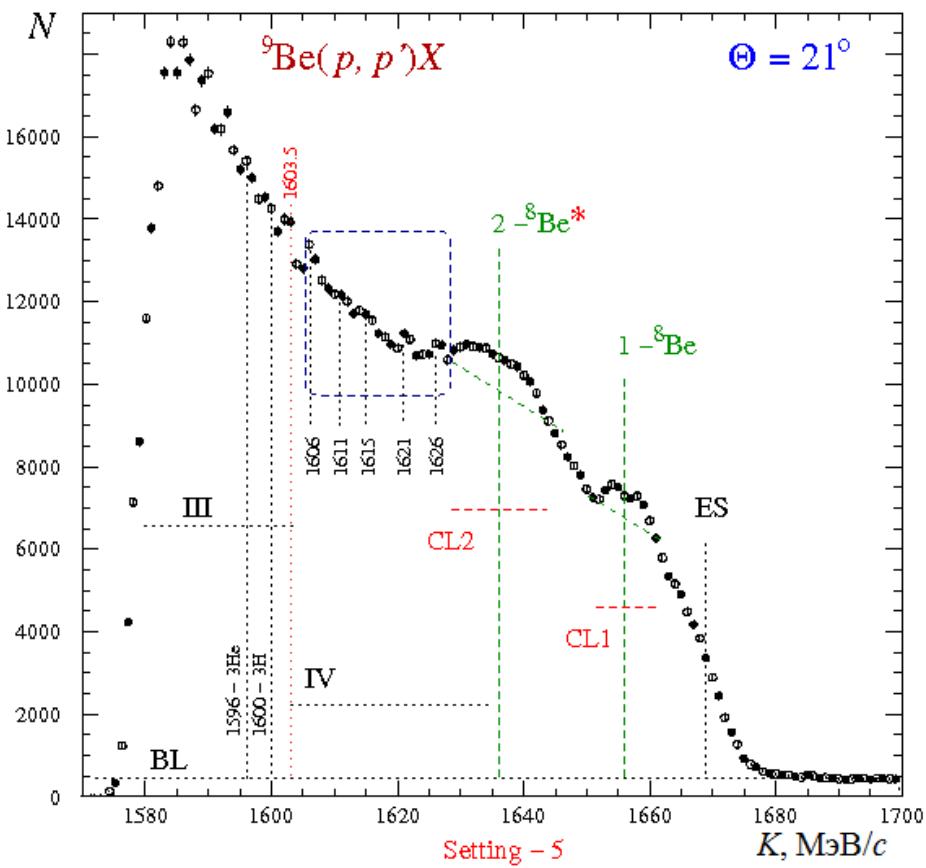
$$\epsilon^* = 17.28 \pm 0.27 \text{ (систем.)} \pm 0.06 \text{ (стат.) МэВ}$$

Рис. 10. Высокоимпульсный спектр рассеянных протонов в (p, p') – реакции с ядром ${}^9\text{Be}$. Ширина канала – 1 МэВ/ c ; настройка спектрометра МАП : Setting – 5; ${}^8\text{Be}^*$ - возбужденное ядро ${}^8\text{Be}$; CL1 и CL2 - см. Рис. 7-2; уровень фона BL = 225 (45)

Энергия возбуждения (ϵ^*) ядра ${}^8\text{Be}$ в (p, p') – реакции с ядром ${}^9\text{Be}$ при энергии 1 ГэВ



$$\epsilon^* = 17.28 \pm 0.27 \text{ (систем.)} \pm 0.06 \text{ (стат.)} \text{ МэВ}$$



Импульсные распределения протонов (●) и (○), рассеянных под углом 21° в (p, p') – реакции с ядром ^{12}C в области квазиупругого pN – пика (Setting – 1) при средней энергии 1 ГэВ

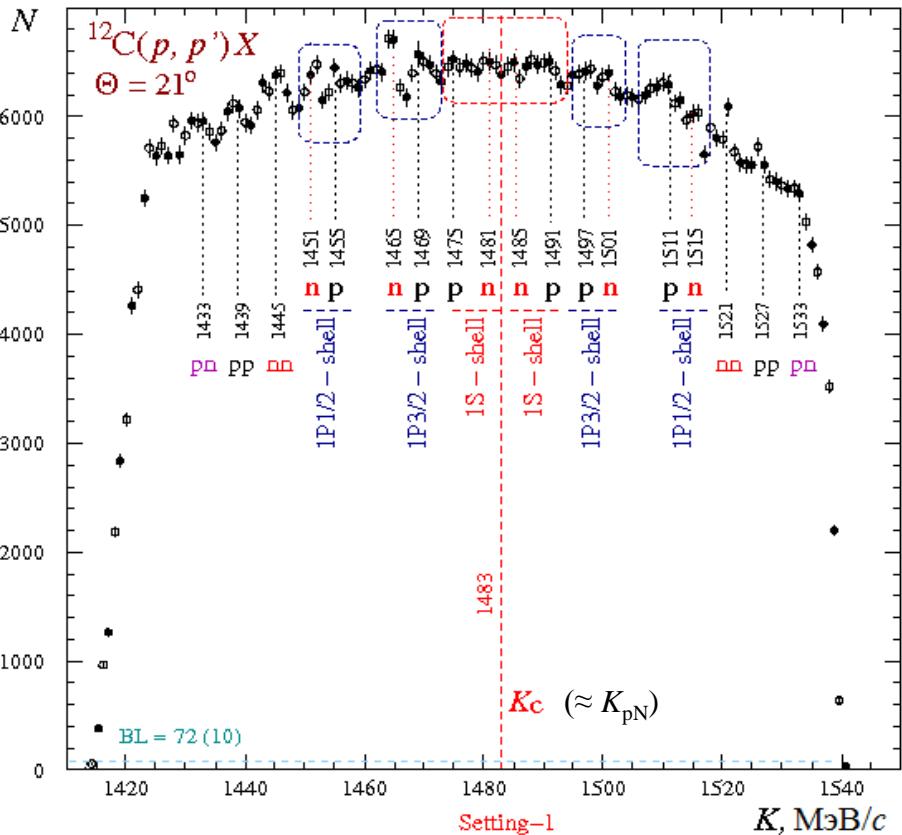
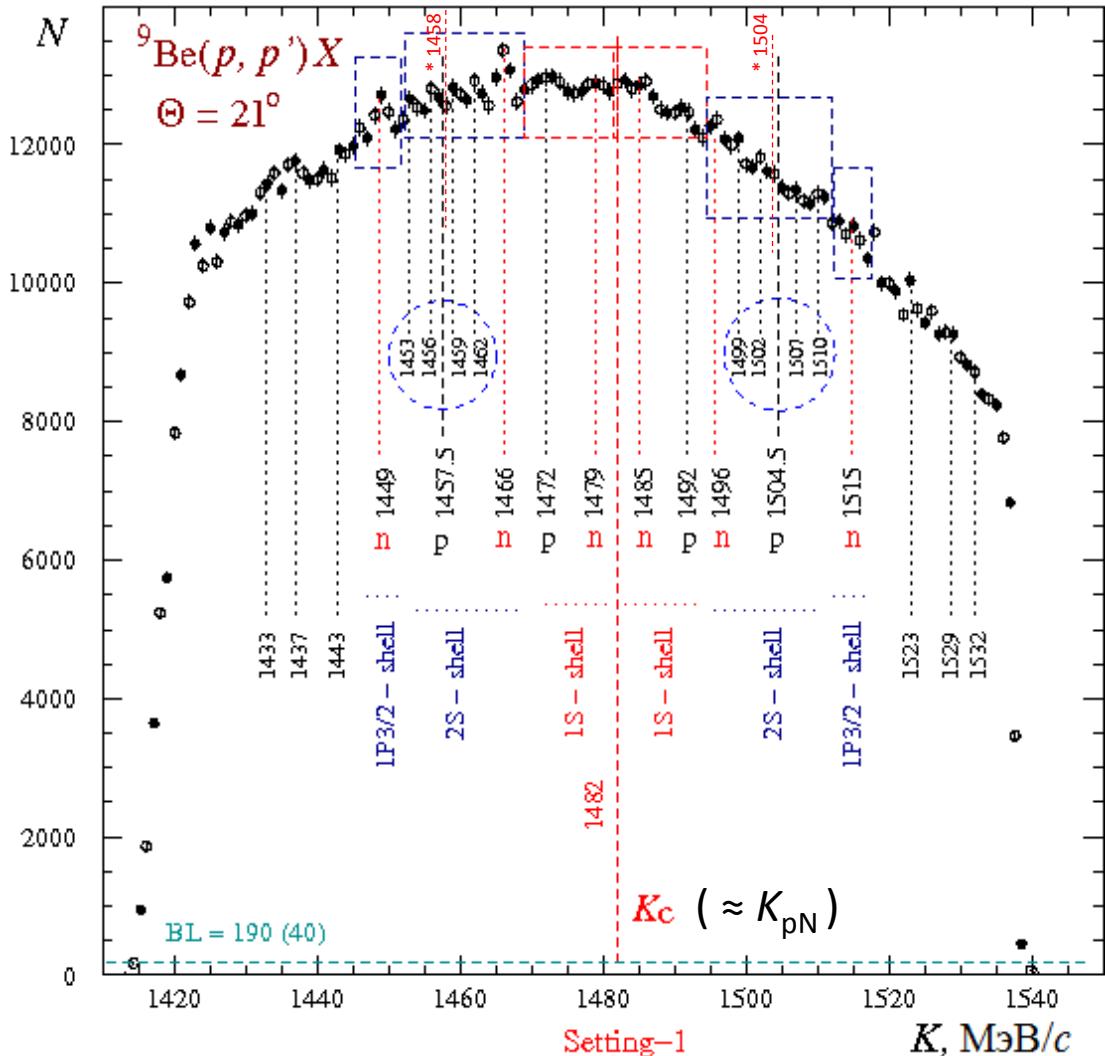


Рис. 12. Ширина канала – 2 МэВ/с; распределение (○) сдвинуто по K на 1 МэВ/с (половина ширины канала) по отношению к распределению (●); спин и четность ядра $^{12}\text{C} = 0^+$; энергия протонного пучка линейно растет при выводе его из ускорителя в интервале $\sim 995 \div 1005$ МэВ; $K_C = 1483$ МэВ/с ($T_C = 817$ МэВ) – ось симметрии наблюдаемой структуры пиков; узкий симметричный по форме пик сопоставляется с рассеянием на нейтроне (n), ассиметричный, более широкий, пик – с рассеянием на протоне (p); пики pp, pr и rp возможно соответствуют рассеянию на двухнуклонных корреляциях

Наблюданная симметричная структура пиков относительно импульса K_C возможно обусловлена сопутствующим процессом периферийного малоуглового (в пределах геометрического горизонтального углового захвата спектрометра МАП: $\pm 0.4^\circ$) упругого перерассеяния в мишени поляризованных вторичных протонов, образовавшимися в (p, p') – реакции под углом 21° . По относительному расположению ‘n’- и ‘p’-пиков в трех цветных контурах можно предположить, что, если красный контур соответствует рассеянию на S-нуклонах в состоянии 0^+ , то синие контура, возможно, соответствуют рассеянию на нуклонах в состоянии 1^- .

В $(p, 2p)$ - и (p, pn) -экспериментах нами было показано, что в деформированном ядре углерода нуклоны находятся в трех одночастичных состояниях, одно (0^+) с положительной и два (1^-) с отрицательной пространственной четностью. Отметим, что наблюдаемая структура в нашем инклузивном (p, p') -эксперименте не определяется фоном (см. Рис. 12), средняя величина которого (BL) мала и структура которого слабо проявляется ($\pm \delta BL$).

Импульсные распределения протонов (●) и (○), рассеянных под углом 21° в (p, p') – реакции с ядром ${}^9\text{Be}$ в области квазиупругого pN – пика (Setting – 1)



V. Chavchanidze, "On the theory of the beryllium nucleus", Russian scientific journal: Uspekhi Fizicheskikh Nauk (UFN) 43, 106 - 119 (1951) [in Russian].

Рис. 13. Ширина канала – 2 МэВ/c; распределение (о) сдвинуто по K на 1 МэВ/c (половина ширины канала) по отношению к распределению (●); спин и четность ядра ${}^9\text{Be} = 3/2^-$

На Рис. 13 наблюдается симметричная структура пиков (относительно импульса рассеянного протона K_c). Эта структура возможно обусловлена периферийным процессом малоуглового упругого перерассеяния поляризованных вторичных протонов на нуклонах ядра мишени с импульсом примерно равным K_c (1482 МэВ/c) в пределах малого геометрического горизонтального углового захвата спектрометра МАП ($\pm 0.4^\circ$).

Предполагается, что узкие симметричные по форме пики на рисунке, отмеченные отрезками красной пунктирной линии, отвечают рассеянию на незаряженном нейтроне (n). Более широкие пики, отмеченные отрезками черной пунктирной линии, сопоставляются с перерассеянием вторичного протона на заряженной частице – протоне (p). По относительному положению 'n' и 'p' – пиков в двух соседних областях, охватываемых на рисунке при $K < K_c$ контурами красного и синего цвета, можно предположить что, если красный контур соответствует рассеянию на нуклонах $1S$ – оболочки ($l=0$) ядра ${}^9\text{Be}$, то синий контур также отвечает рассеянию на нуклонах $2S$ – оболочки ($l=0$) этого ядра. В случае же рассеяния на ядре ${}^{12}\text{C}$ (см. Рис. 12) синий контур соответствует рассеянию на нуклонах в $1P3/2$ – состоянии ($l=1$, четность $-$). На возможное существование двух заполненных нуклонных S – оболочек ($l=0$, четность $+$) в ядре ${}^9\text{Be}$ указывают также близкие значения сечений в (p, p') – реакции с ядрами ${}^9\text{Be}$ и ${}^{12}\text{C}$ в области максимума квазиупругого pN – пика (Рис. 4).

Импульсные распределения протонов (\bullet) и (\circ), рассеянных под углом 21° в (p, p') реакции с ядром ${}^9\text{Be}$ при настройке спектрометра МАП: Setting – 1 (слева) и Setting – 5 (справа)

Рис. 13

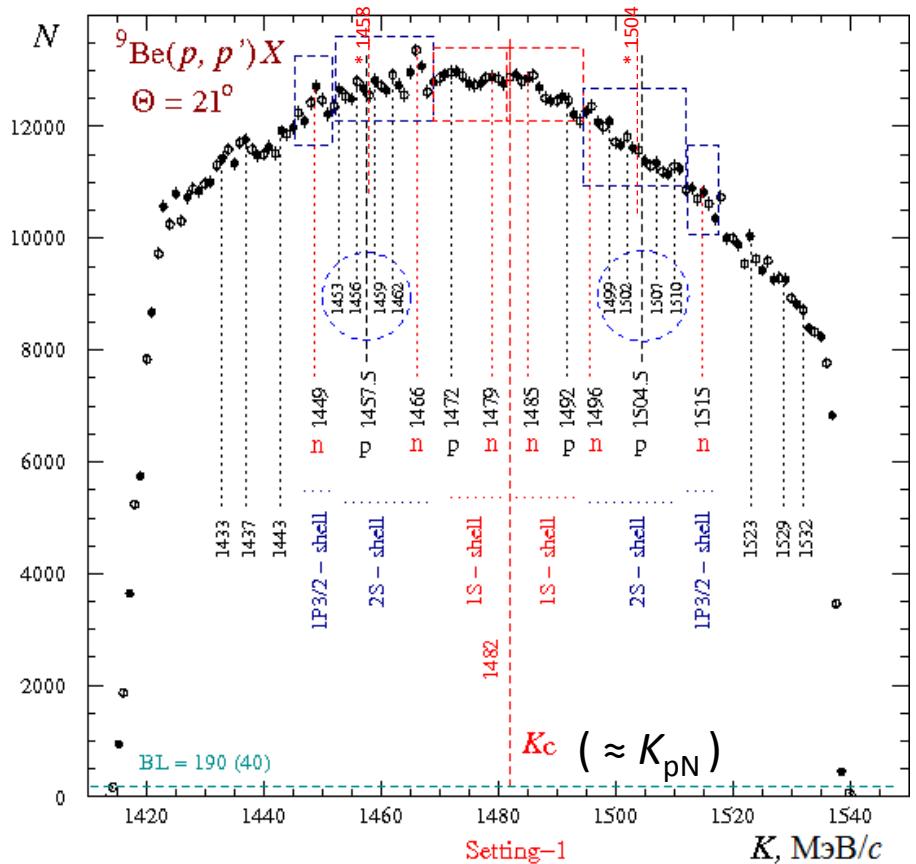
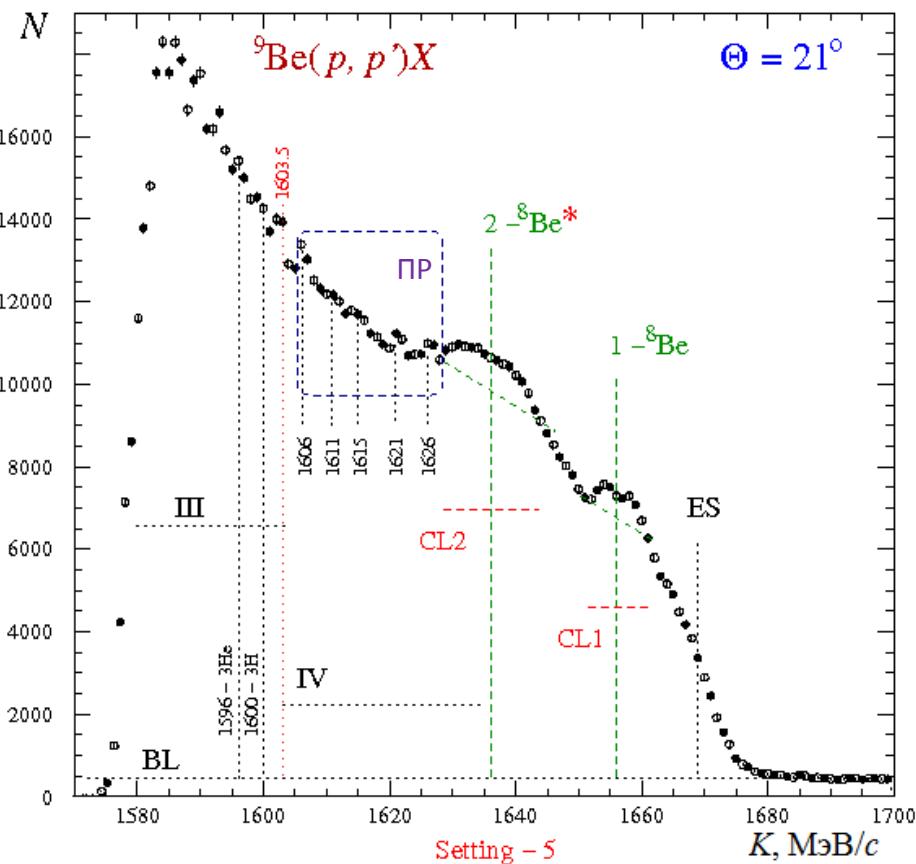


Рис. 10*



PR – область периферийного малоуглового упругого рассеяния на ядерных протонах

Высокоимпульсные спектры протонов, рассеянных под углом 21° в (p, p') -реакции
с ядром ${}^9\text{Be}$ при настройке спектрометра МАП: Setting – 4

О. Миклухо

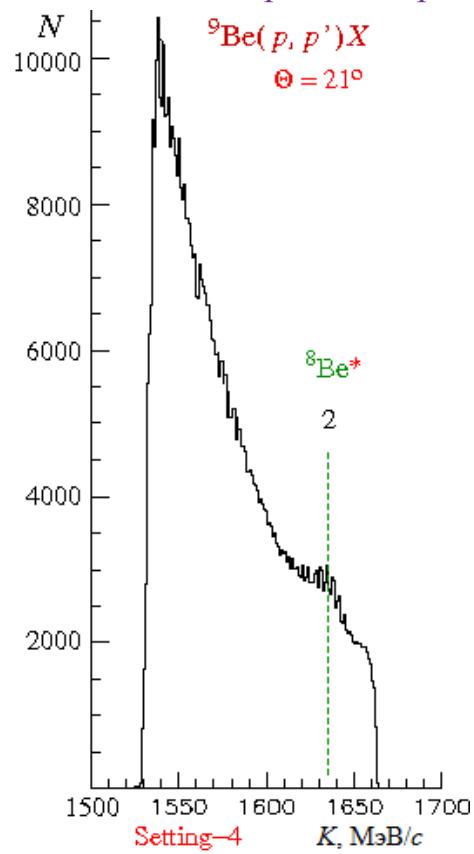


Рис. 9. Импульсный спектр протонов, рассеянных на ядре ${}^9\text{Be}$. Ширина канала – 1 МэВ/c; настройка спектрометра МАП: Setting – 4; ${}^8\text{Be}^*$ – возбужденное ядро ${}^8\text{Be}$; уровень фона BL = 120 (24)

Структура пиков в импульсном интервале 1626 – 1643 МэВ/c обусловлена периферийным малоугловым упругим рассеянием на многонуклонных кластерах в ядре ${}^9\text{Be}$.

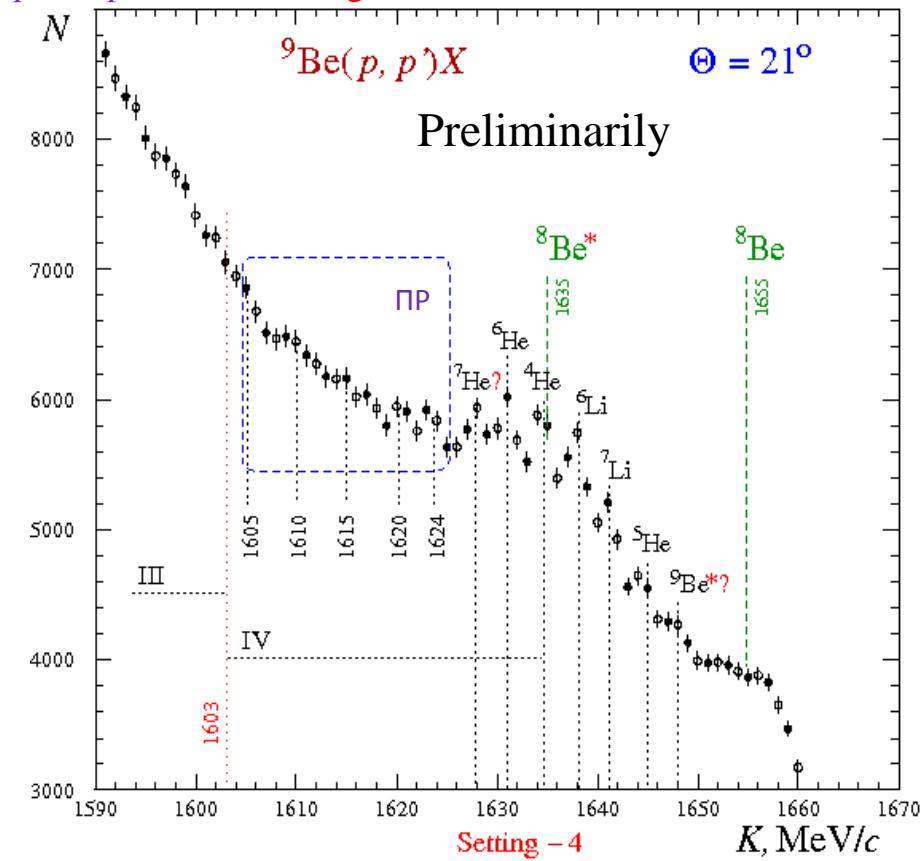


Рис. 9*. Импульсные распределения (•) и (o) вторичных протонов в (p, p') – реакции с ядром ${}^9\text{Be}$. Ширина канала – 2 МэВ/c; распределение (o) сдвинуто по K на 1 МэВ/c (половина ширины канала) по отношению к распределению (•); настройка спектрометра МАП: Setting – 4; уровень фона BL = 240 (48); ${}^8\text{Be}^*$ – возбужденное ядро ${}^8\text{Be}$; ПР – область периферийного упругого малоуглового рассеяния на ядерных протонах (см. слайд 15)

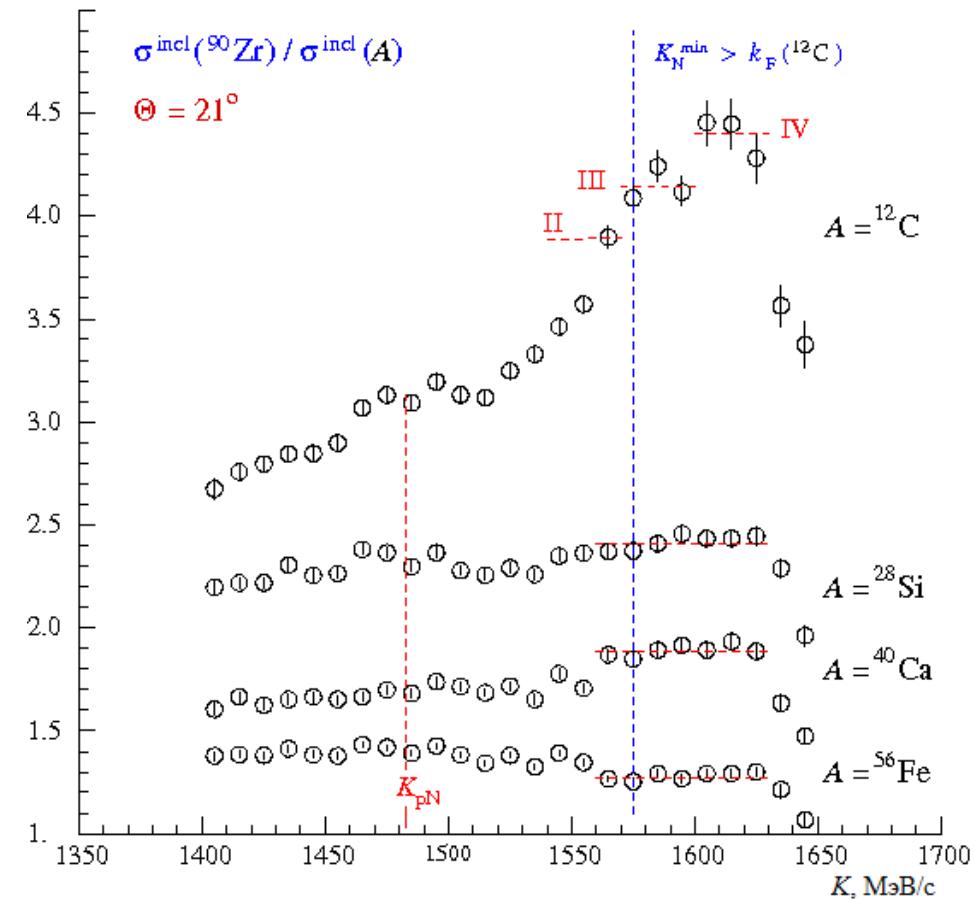
СПАСИБО за внимание

С наступающим НОВЫМ ГОДОМ !!!

ДОПОЛНИТЕЛЬНЫЕ СЛАЙДЫ

Отношения сечений рассеяния на ядрах $\sigma^{\text{incl}}(^{90}\text{Zr}) / \sigma^{\text{incl}}(A)$

[6*] Миклухо О.В. Доклад на конференции “ЯДРО -2025”.



На Рис. 6 представлены отношения сечения рассеяния на ядре ^{90}Zr к сечениям рассеяния на ядрах ^{12}C , ^{28}Si , ^{40}Ca , ^{56}Fe .

В области импульсов $K = 1560\text{--}1630$ МэВ/с, охватывающей импульсные интервалы III и IV наблюдается скейлинговое поведение отношений сечений рассеяния при $A \geq 28$ (величина отношения практически не зависит от импульса K).

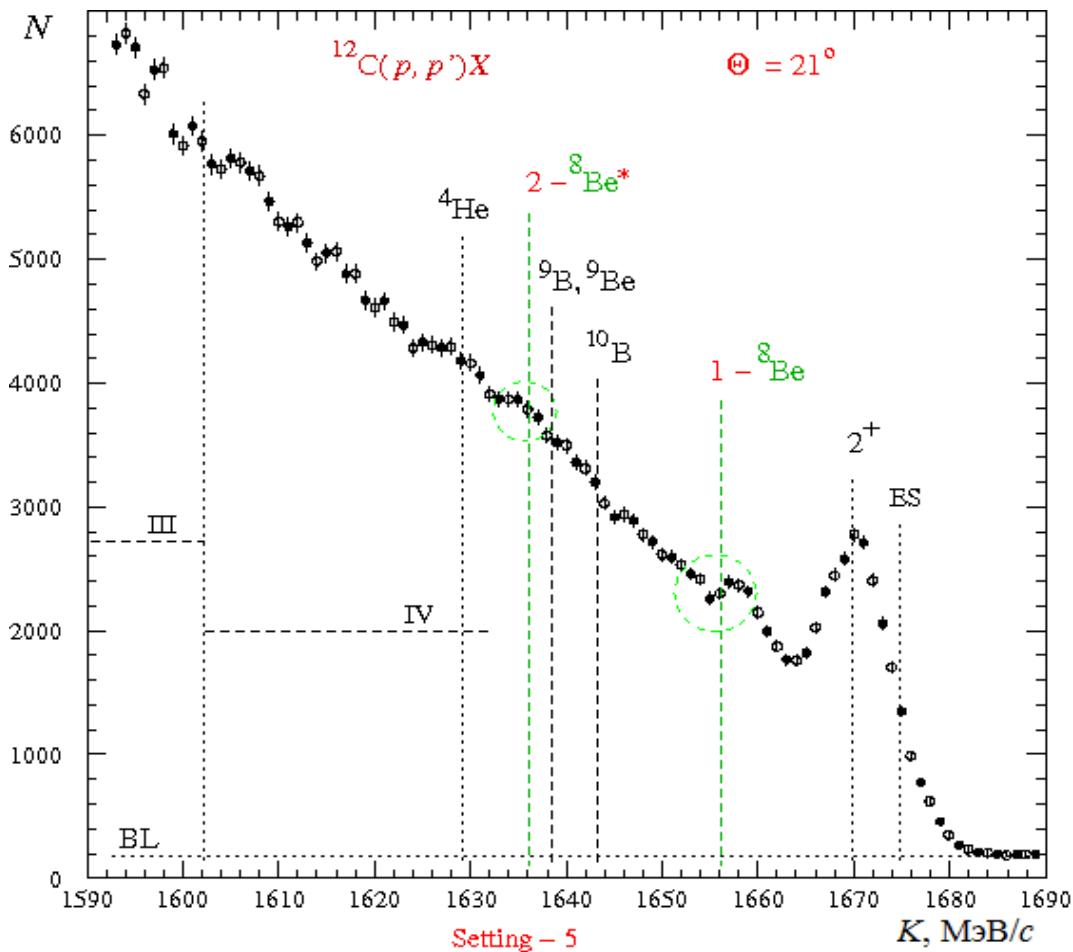
Можно предположить, что уже в ядре ^{28}Si наступает насыщение ядерных сил и средняя нуклонная плотность в ядрах ^{28}Si , ^{40}Ca , ^{56}Fe и ^{90}Zr почти одинакова.

Рис. 6. Отношения сечения рассеяния на ядре ^{90}Zr к сечениям рассеяния на ядрах ^{12}C , ^{28}Si , ^{40}Ca , ^{56}Fe

Высокоимпульсные распределения вторичных протонов в (p, p') – реакции с ядром ^{12}C при энергии 1 ГэВ

О. Миклухо

[6*] Миклухо О.В. Доклад на конференции “ЯДРО -2025”.



Preliminarily

Оценка энергии возбуждения (ε^*) ядра ${}^8\text{Be}$ в (p, p') – реакции с ядром ^{12}C :

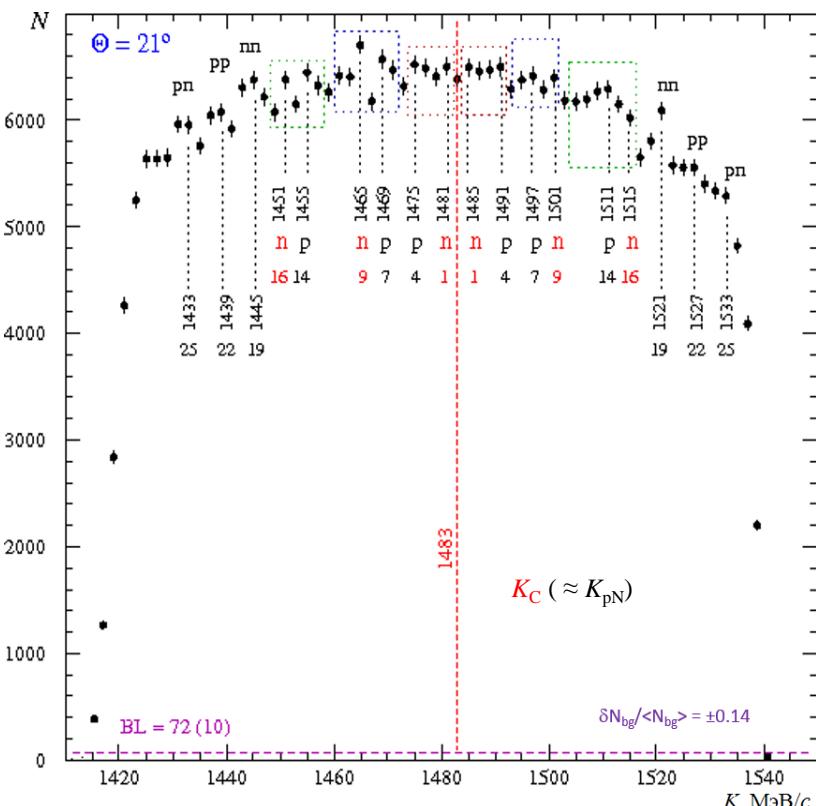
$$\varepsilon^* = T_1 - T_2, \text{ где } T_1 \text{ и } T_2 \text{ – кинетические энергии рассеянного протона.}$$

$$\varepsilon^* = 17.38 \pm 0.27 \text{ (систем.)} \pm 0.10 \text{ (стат.)} \text{ МэВ}$$

Рис. 11. Импульсные распределения (•) и (○) вторичных протонов в (p, p') – реакции с ядром ^{12}C . Ширина канала – 2 $\text{МэВ}/c$; распределение (○) сдвинуто по K на 1 $\text{МэВ}/c$ (половина ширины канала) по отношению к распределению (•); уровень фона BL = 194 (27)

Setting (5) Kmap=1644.0 MeV/c
AP38=1.062 v; AP39=0.816 v; AP-17=1.952 v ; Xol=0.1040 v;
BIC=3.5; M=880/c; M_lt=700/c; Gate=1300/c; Gate_lt=1000/c,
#41454 500 t.s.

Наблюдение структуры узких пиков в импульсном распределении протонов, рассеянных под углом 21° в (p, p') – реакции с ядром ^{12}C в области квазиупругого pN – пика



[6*] Миклухо О.В. Доклад на конференции “ЯДРО -2025”.

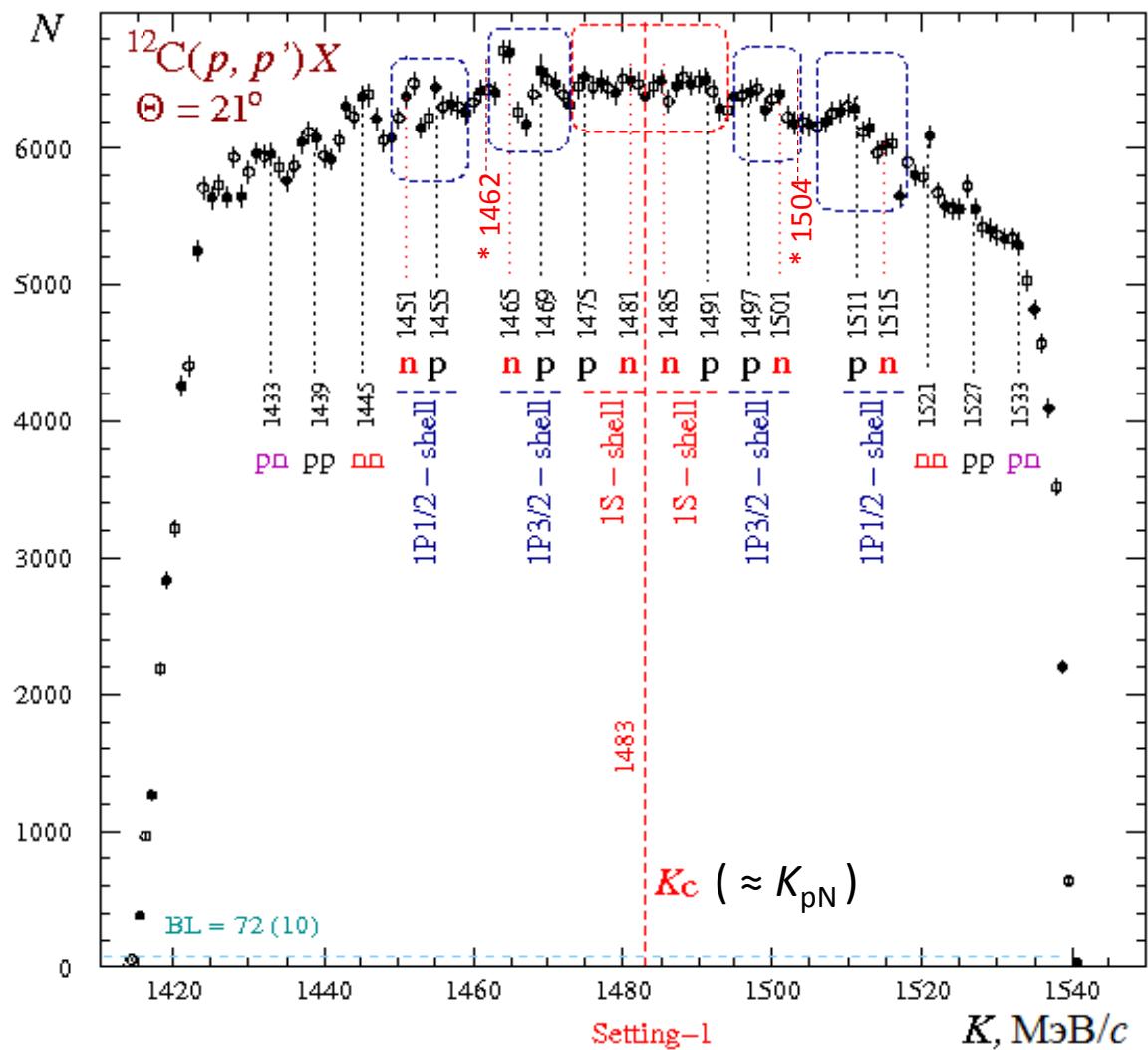
Рис. 12. Импульсное распределение вторичных протонов в реакции $^{12}\text{C}(p, p')X$ при средней энергии протонного пучка ~ 1000 МэВ и угле рассеяния 21° . Ширина канала 2 МэВ/с. Энергия протонного пучка линейно растет при выводе его из ускорителя в интервале $\sim 995 \div 1005$ МэВ. $K_C = 1483$ МэВ/с ($T_C = 817$ МэВ) – ось симметрии наблюдаемой структуры пиков; узкий симметричный по форме пик сопоставляется с рассеянием на нейтроне (n), асимметричный, более широкий, пик – с рассеянием на протоне (p). Пики pp, pn и pn возможно соответствуют рассеянию на двухнуклонных корреляциях

Наблюдаемая симметричная структура пиков относительно импульса K_C возможно обусловлена сопутствующим процессом периферийного малоуглового (в пределах геометрического горизонтального углового захвата спектрометра МАП: $\pm 0.4^\circ$) упругого перерассеяния в мишени поляризованных вторичных протонов, образовавшимися в (p, p') – реакции под углом 21° . По относительному расположению ‘n’- и ‘p’- пиков в трех цветных контурах можно предположить, что, если красный контур соответствует рассеянию на S-нуклонах в состоянии 0^+ , то синий и зеленый контура, возможно, соответствуют рассеянию на нуклонах в состоянии 1^- .

В $(p, 2p)$ - и (p, pn) – экспериментах нами было показано, что в деформированном ядре углерода нуклоны находятся в трех одночастичных состояниях, одно (0^+) с положительной и два (1^-) с отрицательной пространственной четностью.

Отметим, что наблюдаемая структура в нашем инклузивном (p, p') – эксперименте не определяется фоном (см. Рис. 12), средняя величина которого (BL) мала и структура которого слабо проявляется ($\pm \delta BL$).

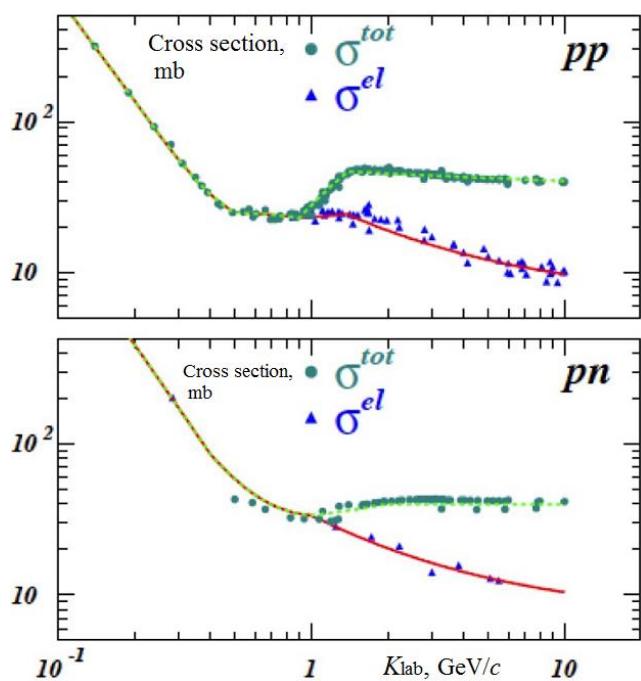
Импульсные распределения протонов (●) и (○), рассеянных под углом 21° в (p, p') – реакции с ядром ^{12}C в области квазиупругого pN – пика (Setting – 1)



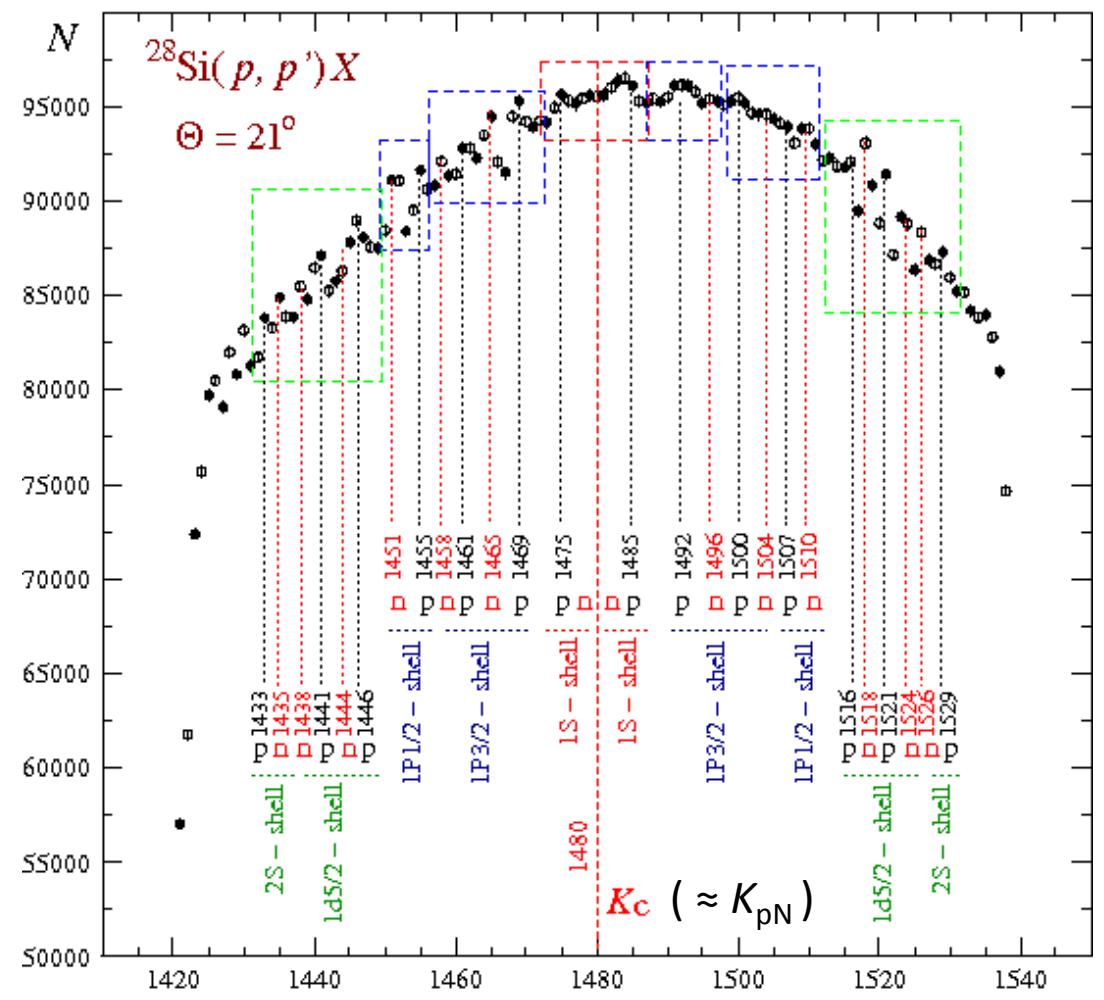
Setting (1) $K_{\text{map}}=1482.0 \text{ MeV}/c$
 AP38=0.957 v; AP39=0.736 v; AP-17=1.635 v ; Xol=0.0933 (4) v
 BIC=3.5 M=910/c; M_It=490/c; Gate=4200/c; Gatel_It=2400/c
 #41450 500 t.s.

Рис. 12. Ширина канала – 2 МэВ/c;
 распределение (○) сдвинуто по K на 1 МэВ/c
 (половина ширины канала) по отношению к
 распределению (●); спин и четность ядра $^{12}\text{C} - 0^+$

Отметим, что кинематические расчеты квазиупругого рассеяния на протонах и нейтронах в ядре ^{12}C дают для основного состояния остаточного ядра в покое значения импульсов $K = 1459.3 \text{ МэВ/c}$ и $K = 1455.8 \text{ МэВ/c}$, соответственно.



Импульсные распределения протонов (●) и (○), рассеянных под углом 21° в (p, p') – реакции с ядром ^{28}Si в области квазиупругого pN – пика (Setting – 1)



Setting (1): $K_{\text{map}}=1482.0 \text{ MeV}/c$
 $\text{AP38}=0.957 \text{ v}; \text{AP39}=0.736 \text{ v}; \text{AP-17}=0.8010 \text{ v}; \text{Xol}=0.0924(3) \text{ v}$
 $M=760/\text{c}; M_{\text{lt}}=520/\text{c}; \text{Gate}=3800/\text{c}; \text{GateL}_{\text{lt}}=2500/\text{c}$
#42065 1 m.l.s.; (6 m 29 s)

Рис. 14. Ширина канала – 2 МэВ/с; распределение (○) сдвинуто по K на 1 МэВ/с (половина ширины канала) по отношению к распределению (●); уровень фона в эксперименте BL = 2300 ($\delta BL = 460$); спин и четность ядра $^{28}\text{Si} = 0^+$

Предварительный анализ структуры спектра на рисунке указывает, что она соответствует данным, полученным при исследовании реакций $(p, 2p)$ и (p, pn) в Гатчине: Воробьев А.А. и др. Препринт ПИЯФ, № 1812, Санкт-Петербург, июль 1992. Согласно работе структура ядра ^{28}Si описывается в рамках оболочечной модели с положительной деформацией (внешние нуклоны находятся в состоянии $2S$). Анализ спектра при угле рассеяния 24.5° , который будет проведен в 2026 году, уточнит структуру ядра ^{28}Si .

В 2026 году планируется начать построение с разрешением 10 МэВ/с абсолютного сечения $^{28}\text{Si}(p, p')X$ - реакции при угле рассеяния 24.5° в зависимости от импульса вторичного протона. Будут также исследоваться импульсные спектры с разрешением 2 МэВ/с в (p, p') - реакции с ядрами ^{28}Si , ^{12}C и ^{9}Be .