

# Исследование структуры ядерной материи в инклюзивных $(p, p')$ - 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 инклюзивного  $(p, p')$  – рассеяния протонов пучка с энергией  $\approx 1$  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  $21^\circ$ . Результаты исследований представлены на LXXV Международной конференции “ЯДРО-2025”.

## 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  $^9\text{Be}$ ,  $^{12}\text{C}$ ,  $^{28}\text{Si}$ ,  $^{40}\text{Ca}$ ,  $^{56}\text{Fe}$  и  $^{90}\text{Zr}$  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  $21^\circ$  поляризация вторичных протонов ступенчато растет с ростом их импульса [1, 3, 4]. Наблюдается ступенчатое изменение от  $K$  отношения сечения рассеяния на ядрах  $^{28}\text{Si}$ ,  $^{40}\text{Ca}$ ,  $^{56}\text{Fe}$ ,  $^{90}\text{Zr}$  к сечению рассеяния на ядре  $^{12}\text{C}$  [2 - 4]. Эти наблюдения возможно связаны с упругим рассеянием на двухнуклонных ( $^2\text{H}$ ), трехнуклонных ( $^3\text{He}$ ,  $^3\text{H}$ ) и четырехнуклонных ( $^4\text{He}$ ) корреляциях в ядрах. Обнаружены наплывы в высокоимпульсной части спектров протонов, рассеянных на ядрах  $^{12}\text{C}$  и  $^9\text{Be}$  [5]. Согласно расчетам положение этих наплывов отвечает упругому рассеянию на нуклонных кластерах:  $^8\text{Be}$ ,  $^9\text{Be}$  и  $^9\text{B}$ ,  $^{10}\text{B}$  и  $^8\text{Be}$ , соответственно. Измерена поляризация в рассеянии на нуклонном кластере  $^8\text{Be}$ . Широкий пик в рассеянии на ядре  $^9\text{Be}$  [4] возможно отвечает рассеянию на кластере  $^8\text{Be}$  с возбуждением последнего. При этом энергия возбуждения близка к 17 МэВ. Поляризация в рассеянии с возбуждением кластера  $^8\text{Be}$  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.

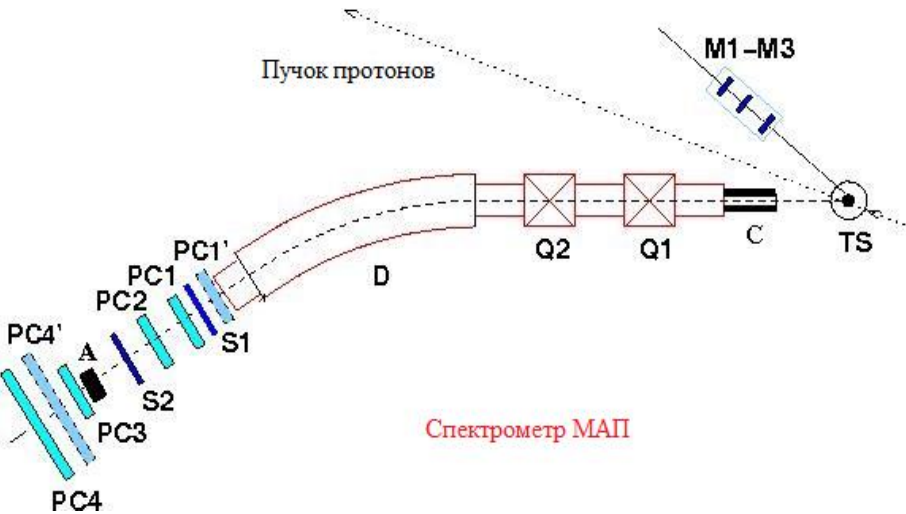
[6] Миклухо О.В. и др. Исследование структуры ядерной материи в инклюзивных  $(p, p')$  – экспериментах при энергии 1 ГэВ. Сборник Тезисов Докладов (ISBN: 978-5-86763-496-4, стр. 39) на LXXV Международной конференции <<ЯДРО -2025. Ядерная физика и физика элементарных частиц. Ядерно-физические технологии>>,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

## ПЛАН ДОКЛАДА

1. Экспериментальная установка и методика исследования инклюзивной  $(p, p')$  – 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  $^{12}\text{C}$  и  $^9\text{Be}$ .
5. Высокоимпульсные спектры вторичных протонов в  $(p, p')$  – реакции с ядрами  $^9\text{Be}$  и  $^{12}\text{C}$
6. Оценка величины энергии возбуждения ( $\epsilon^*$ ) нуклонного кластера  $^8\text{Be}$  в реакции с ядром  $^9\text{Be}$  (с ядром  $^{12}\text{C}$  – см. доп. слайд 20)
7. Структура узких пиков в импульсном распределении протонов, рассеянных под углом  $21^\circ$  в  $(p, p')$  – реакции с ядром  $^{12}\text{C}$  в области квазиупругого  $pN$  – пика (см. также доп. слайд 21 - 22)
8. Структура узких пиков в импульсном распределении протонов, рассеянных под углом  $21^\circ$  в  $(p, p')$  – реакции с ядром  $^9\text{Be}$  в области квазиупругого  $pN$  – пика
9. Структура узких пиков в импульсном распределении протонов, рассеянных под углом  $21^\circ$  в  $(p, p')$  – реакции с ядром  $^{28}\text{Si}$  в области квазиупругого  $pN$  – пика. План на 2026 год (см. доп. слайд 23)

В ПИЯФ исследуется инклюзивная ( $p, p'$ ) – реакция с ядрами  $^9\text{Be}$ ,  $^{12}\text{C}$ ,  $^{28}\text{Si}$ ,  $^{40}\text{Ca}$ ,  $^{56}\text{Fe}$  и  $^{90}\text{Zr}$  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	$2 \cdot 10^{10} \div 10^{11} \text{ c}^{-1} \text{ cm}^{-2}$
Угловая расходимость	$\sim 0,3$ град.
Мгновенный энергетический разброс	$\sim 300$ КэВ
Энергетический ход за время вывода	$\sim 10$ МэВ
Длительность макроимпульса	$7 \div 10$ мс
Макроскважность пучка	$\sim 45\%$
Период микроструктуры	75 нс

Рис. 1. Магнитный спектрометр МАП. TS – мишень магнитного спектрометра; Q1, Q2 магнитные квадруполы; D – дипольный магнит; C - 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 $\Delta\Theta_{\text{H}}$ , [ Град. ]	0.8
Вертикальный угловой захват $\Delta\Theta_{\text{V}}$ , [ Град. ]	1.9
Телесный угловой захват $\Omega$ , [ sr ]	$4.0 \times 10^{-4}$
Дисперсия в фокальной плоскости Df, [ мм/% ]	22.0
Импульсный захват $\Delta K/K$ , [ % ]	8.0
Импульсное разрешение (FWHM), [ МэВ/с ]	$\sim 5.5$

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

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



## ПОЛЯРИМЕТР магнитного спектрометра МАП



В 2025 году многие элементы поляриметра прошли тестирование

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

О. Миклухо

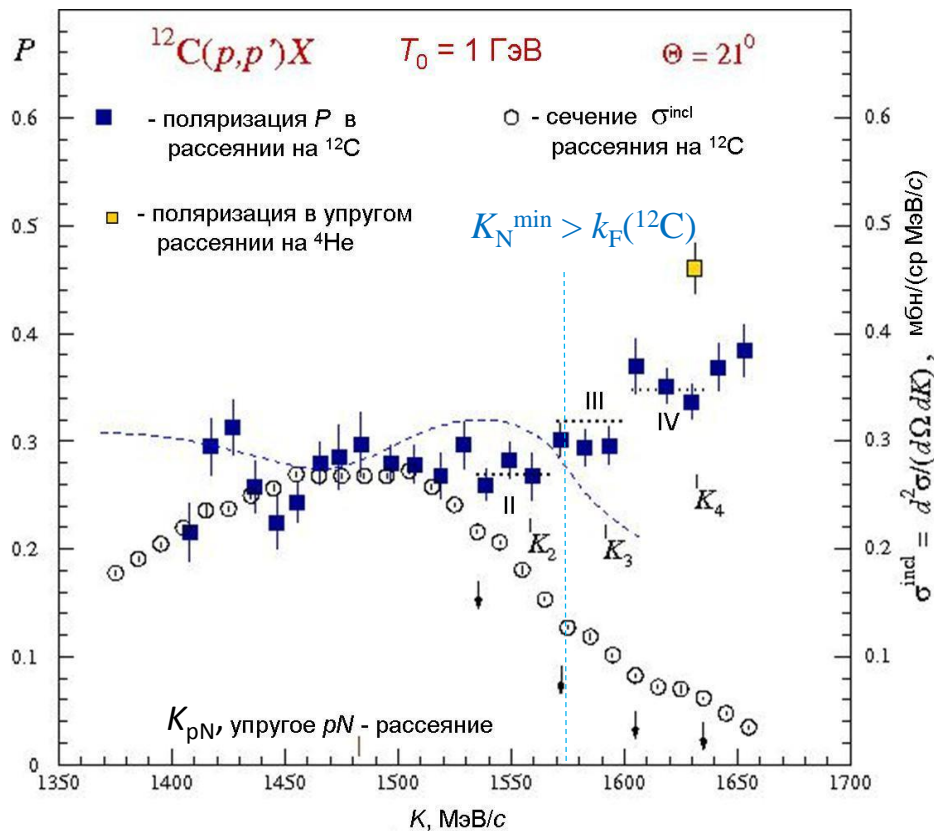


Рис.2. На рисунке: штриховая кривая - результат расчета поляризации  $P$  в рамках импульсного приближения с искаженными волнами с учетом модификации нуклонного спинора Дирака в ядерной среде [1]. Предполагается, что ядро состоит только из нуклонов. Кинематика реакции: при  $K > K_{pN}$  ( $\approx 1480$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

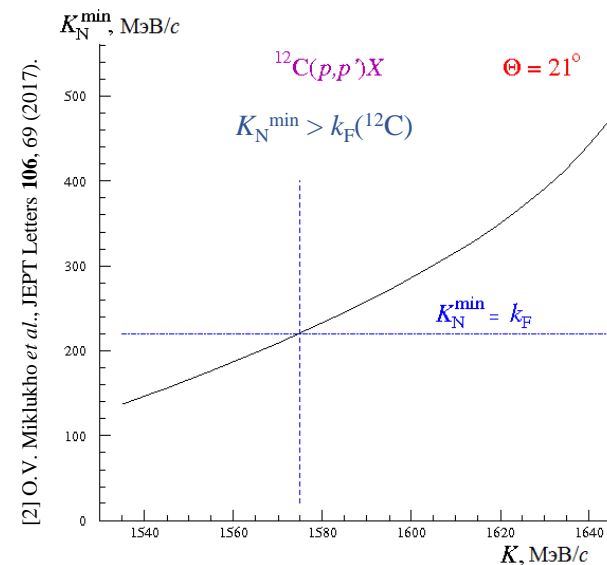
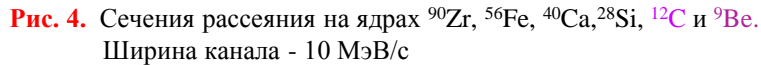


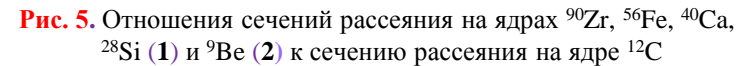
Рис. 3. Зависимость  $K_N^{\min}$  от импульса рассеянного протона  $K$  [2]

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.



Отношения сечений рассеяния на ядрах  $^{90}\text{Zr}$ ,  $^{56}\text{Fe}$ ,  $^{40}\text{Ca}$ ,  $^{28}\text{Si}$  (Рис. 5-1) к сечению рассеяния на ядре  $^{12}\text{C}$  ступенчато растут с импульсом  $K$  !!! . Отношение же сечения рассеяния на ядре  $^9\text{Be}$  (Рис. 5-2) к сечению рассеяния на ядре  $^{12}\text{C}$  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.

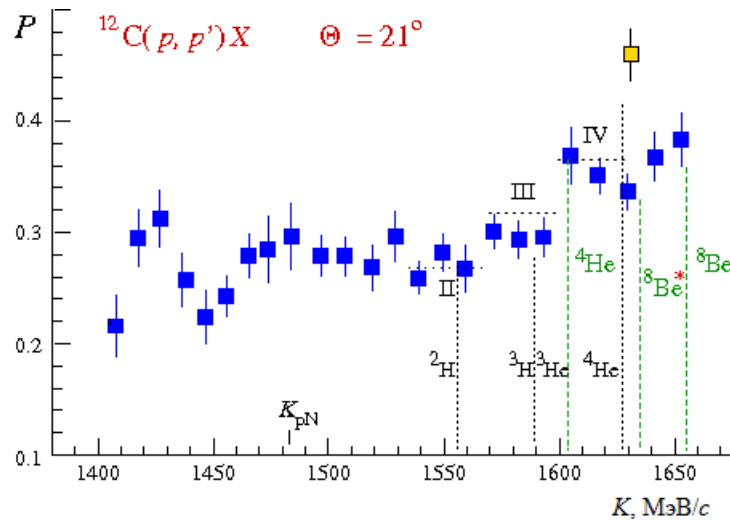
Зеленая вертикальная штриховая прямая на **Рис. 5 - 2**, отмеченная символом  $^8\text{Be}^*$ , возможно соответствует квазиупругому рассеянию на ядре  $^8\text{Be}$  с возбуждением последнего.





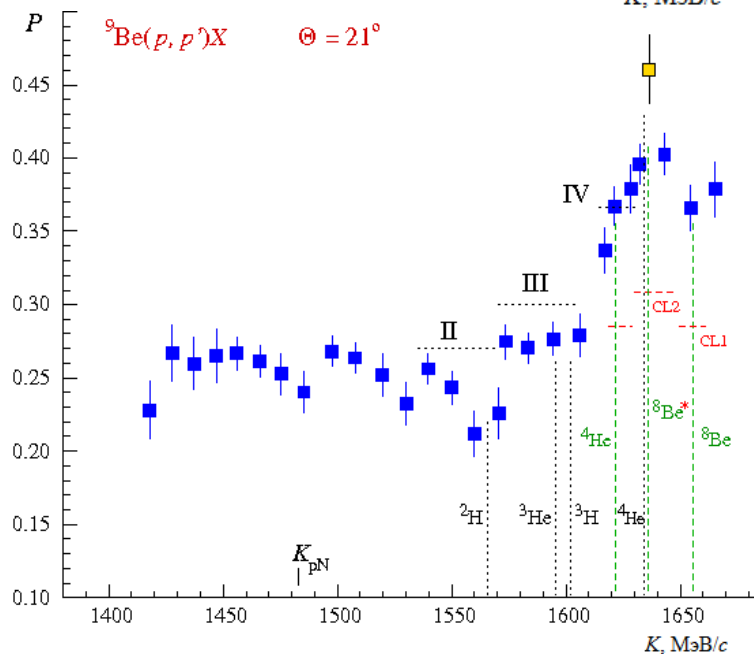
# Поляризация в рассеянии на ядрах $^{12}\text{C}$ и $^9\text{Be}$

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



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

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



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

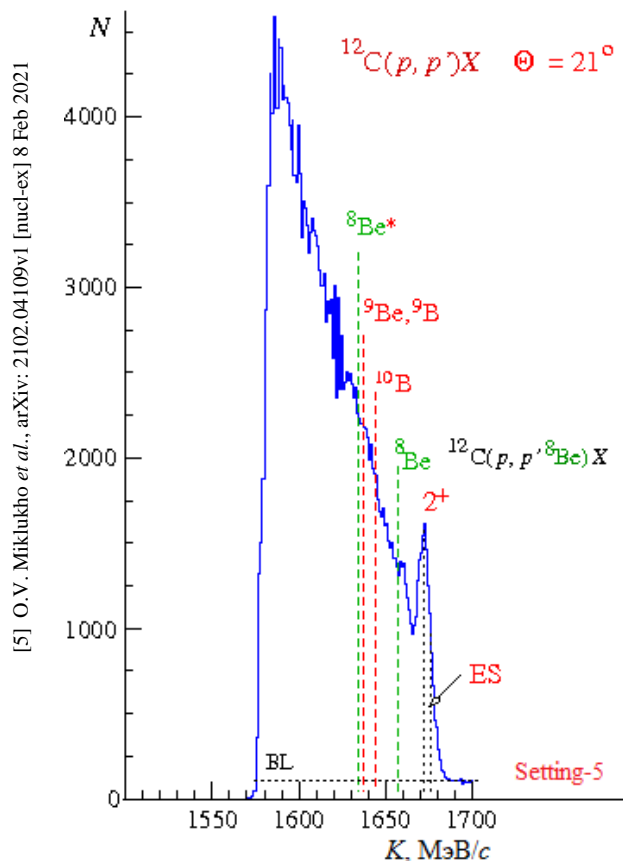
Наплыв в поляризации (**CL2**) обусловлен в основном вкладом от рассеяния [ $^9\text{Be}(p, p' \ ^6\text{He})^3\text{He}$ ,  $^9\text{Be}(p, p' \ ^6\text{Li})^3\text{H}$ ,  $^9\text{Be}(p, p' \ ^7\text{Li})^2\text{H}$ ] на ядрах  $^6\text{He}$ ,  $^6\text{Li}$ ,  $^7\text{Li}$  – конstituентах ядра  $^9\text{Be}$  [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/с (**Рис. 10**).

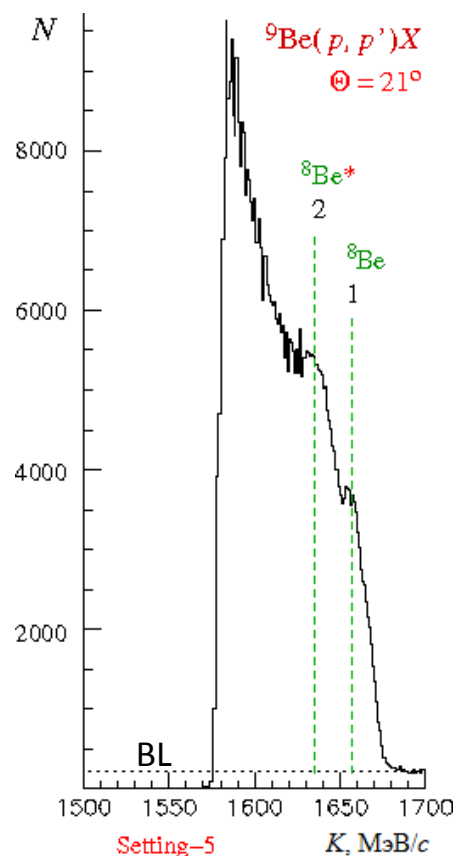


# Высокоимпульсные спектры вторичных протонов в $(p, p')$ - реакции с ядрами $^{12}\text{C}$ и $^9\text{Be}$

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



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



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

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

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

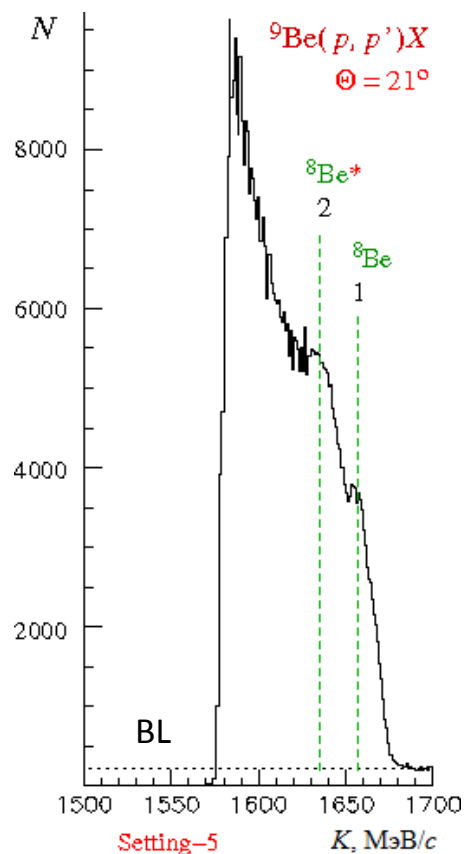
О возможном существовании возбужденного кластера  $^8\text{Be}$  ( $^8\text{Be}^*$ ) отмечено в работе:

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

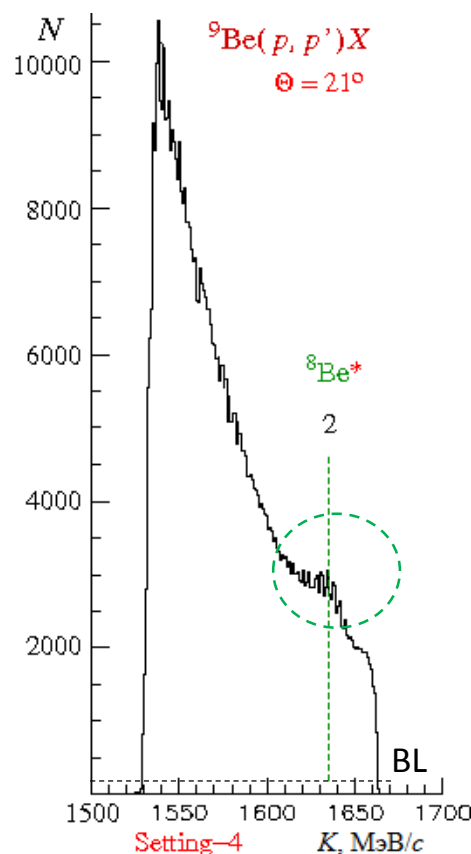
В статье анализируются данные эксперимента  $^7\text{Li}(p, e^+e^-)^8\text{Be}$  при энергии 4 МэВ и отмечается о наблюдении возбужденного состояния ядра  $^8\text{Be}$  ( $J^\pi = 2^+$ ).

# 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/с; настройка спектрометра МАП: Setting – 5;  ${}^8\text{Be}^*$  - возбужденное ядро  ${}^8\text{Be}$ ; уровень фона BL = 225 (45)



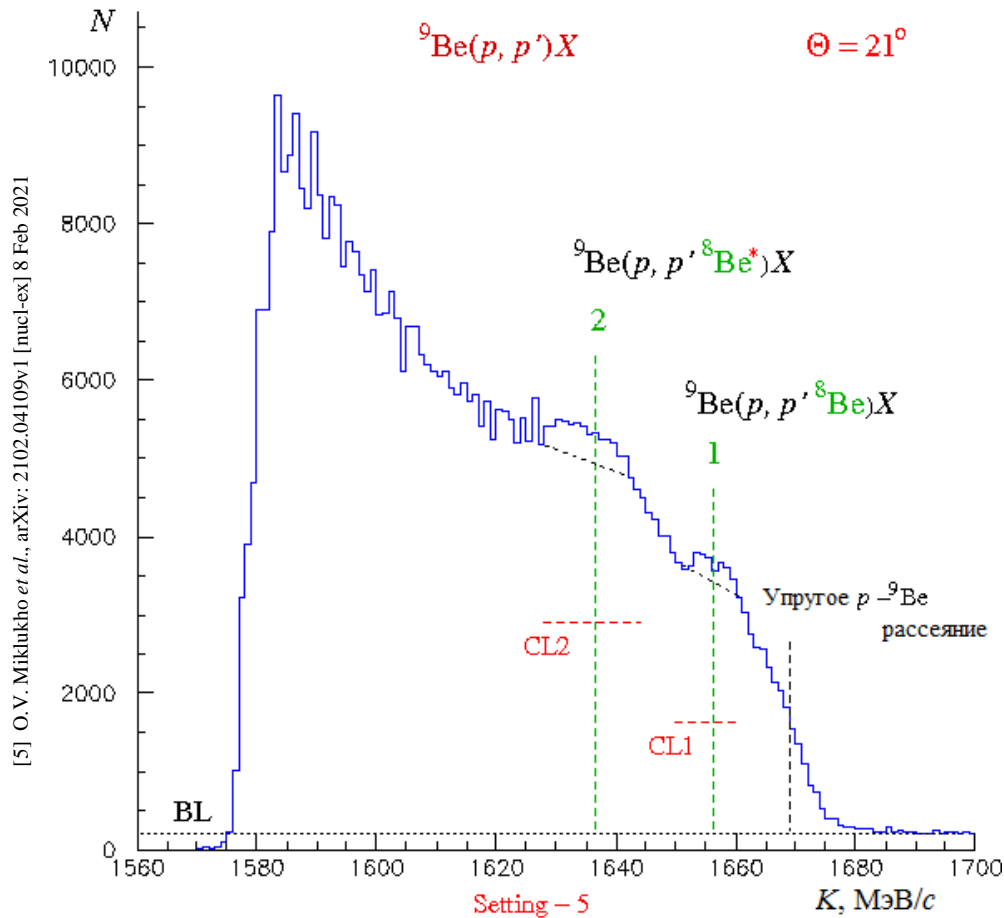
**Рис. 9.** Импульсный спектр протонов, рассеянных на ядре  ${}^9\text{Be}$ . Ширина канала - 1 МэВ/с; настройка спектрометра МАП: Setting – 4;  ${}^8\text{Be}^*$  - возбужденное ядро  ${}^8\text{Be}$ ; уровень фона BL = 120 (24)

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  $\approx 0.75$  МэВ/с, тогда как между наблюдаемыми узкими пиками расстояние  $\approx 3 \div 4$  МэВ/с. Эта структура пиков возможно связана с проявлением сопутствующего процесса периферийного малоуглового перерасеяния, в той же мишени на нуклонных кластерах, поляризованных вторичных протонов, образовавшихся в  $(p, p')$  – реакции под углом  $21^\circ$  (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 ( $\epsilon^*$ ) 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  $l = 1$ .

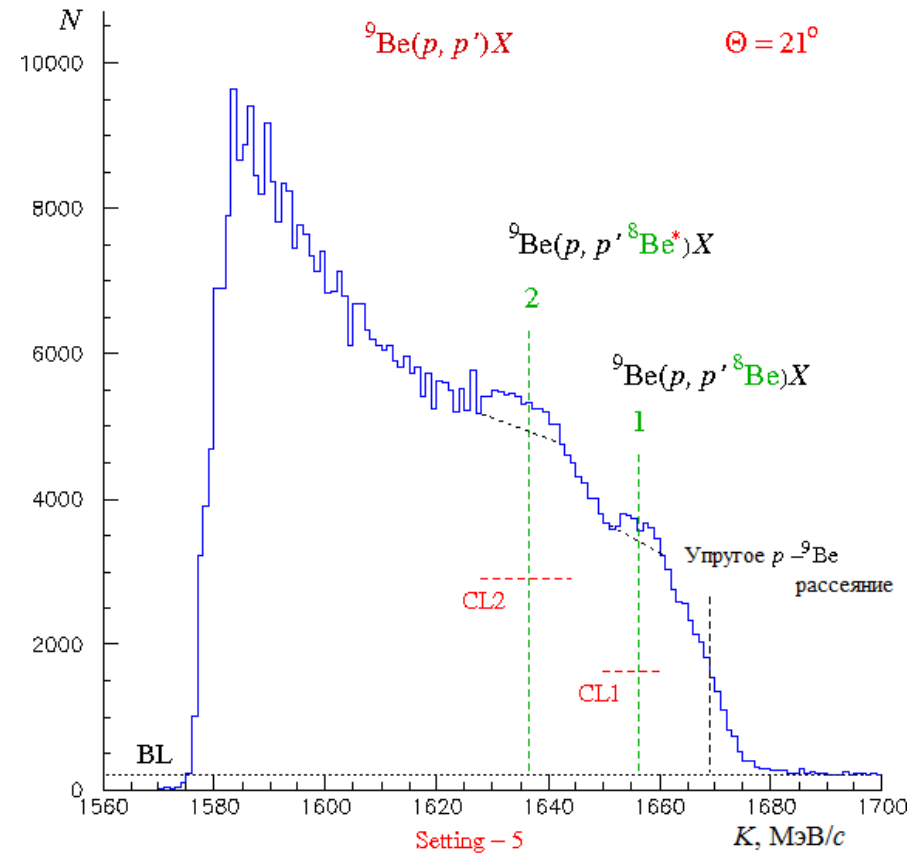
В случае упругого рассеяния на нуклонных кластерах в ядре  $^9\text{Be}$  энергия возбуждения кластера  $^8\text{Be}$  ( $\epsilon^*$ ) может быть вычислена по формуле:

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

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

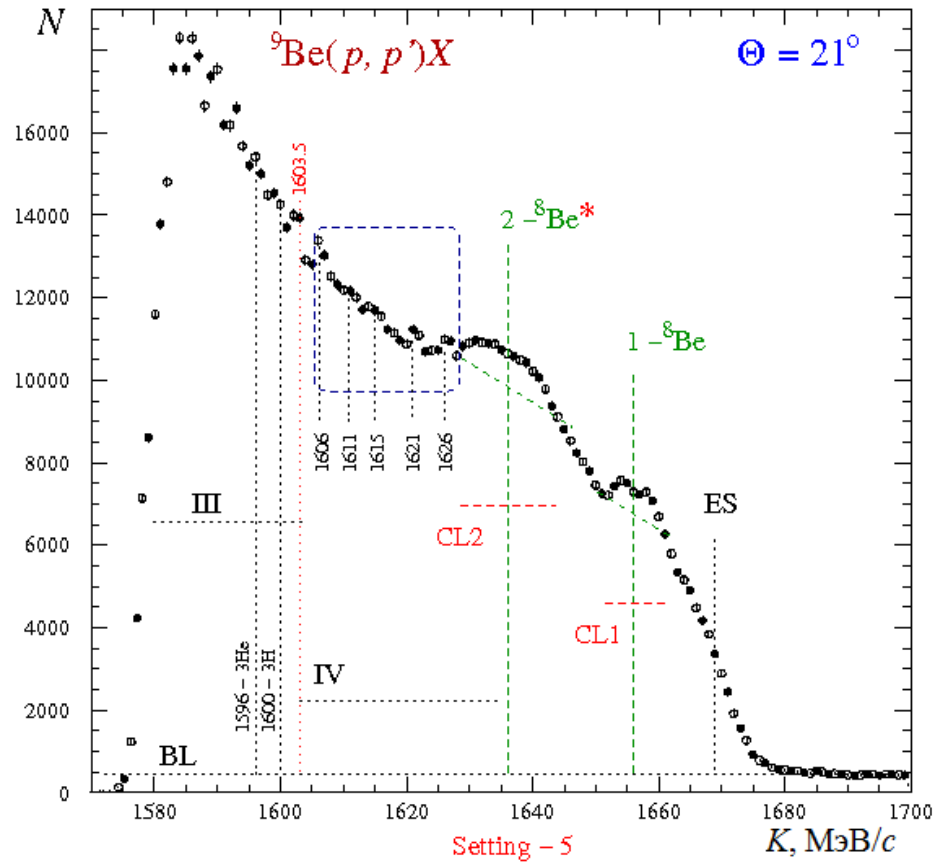
**Рис. 10.** Высокоимпульсный спектр рассеянных протонов в  $(p, p')$  – реакции с ядром  $^9\text{Be}$ . Ширина канала – 1 МэВ/с; настройка спектрометра МАП : Setting – 5;  $^8\text{Be}^*$  - возбужденное ядро  $^8\text{Be}$ ; CL1 и CL2 - см. Рис. 7-2; уровень фона BL = 225 (45)

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



**Рис. 10.** Высокоимпульсный спектр рассеянных протонов в  $(p, p')$  – реакции с ядром  $^9\text{Be}$ . Ширина канала – 1 МэВ/с; 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)

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



**Рис. 10\*.** Импульсные распределения (•) и (o) вторичных протонов в  $(p, p')$  – реакции с ядром  $^9\text{Be}$ . Ширина канала – 2 МэВ/с; распределение (o) сдвинуто по K на 1 МэВ/с (половина ширины канала) по отношению к распределению (•); настройка спектрометра МАП: Setting – 5; уровень фона BL = 450 (90);  $^8\text{Be}^*$  - возбужденное ядро  $^8\text{Be}$ ; CL1 и CL2 - см. Рис. 7-2



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

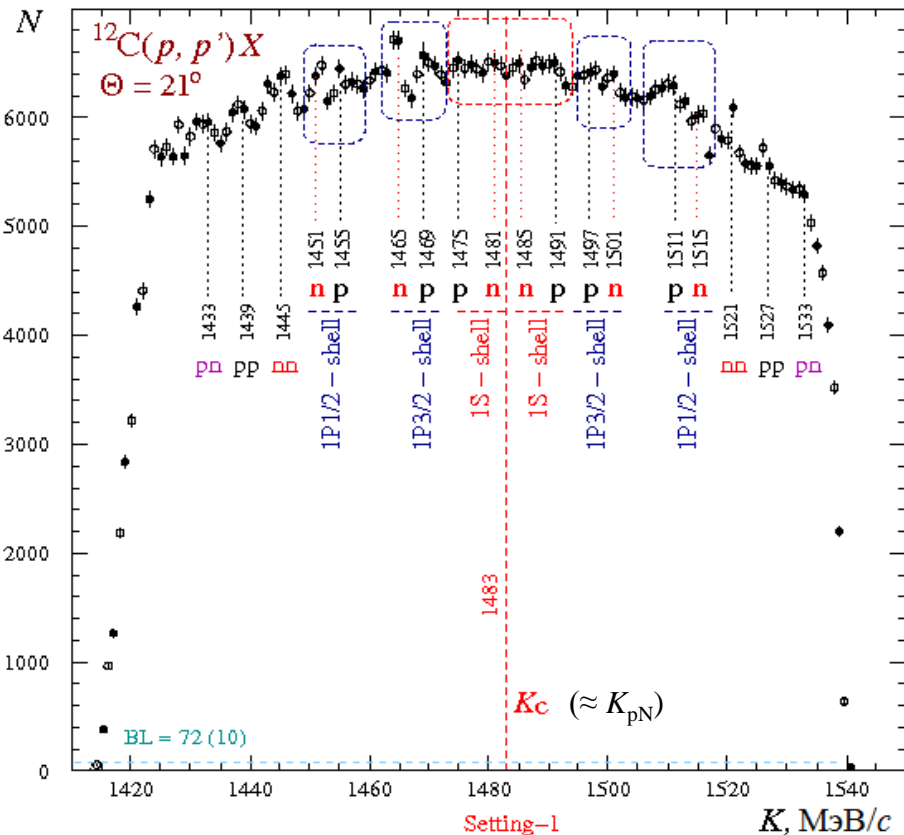
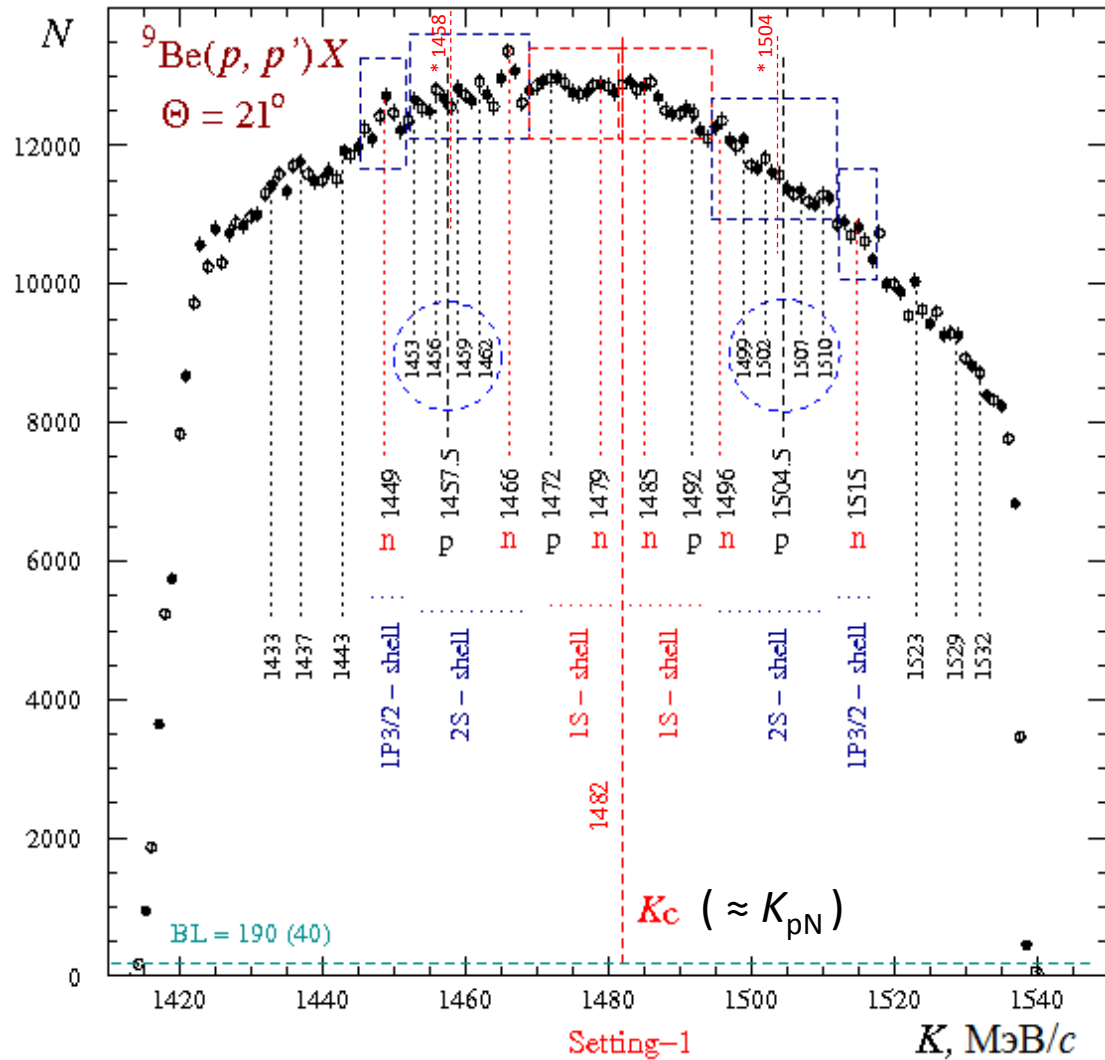


Рис. 12. Ширина канала – 2 МэВ/с; распределение (○) сдвинуто по  $K$  на 1 МэВ/с (половина ширины канала) по отношению к распределению (●); спин и четность ядра  $^{12}\text{C} - 0^+$ ; энергия протонного пучка линейно растет при выводе его из ускорителя в интервале  $\sim 995 \div 1005$  МэВ;  $K_C = 1483$  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, pp и rp 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, образовавшихся в  $(p, p')$  – реакции под углом  $21^\circ$ . 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 инклюзивном  $(p, p')$  – 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  $21^\circ$  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/с; распределение (○) сдвинуто по  $K$  на 1 МэВ/с (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/с) 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 (●) и (○), рассеянных под углом  $21^\circ$  в  $(p, p')$  реакции с ядром  $^9\text{Be}$  при настройке спектрометра МАП: Setting – 1 (слева) и Setting – 5 (справа)

Рис. 13

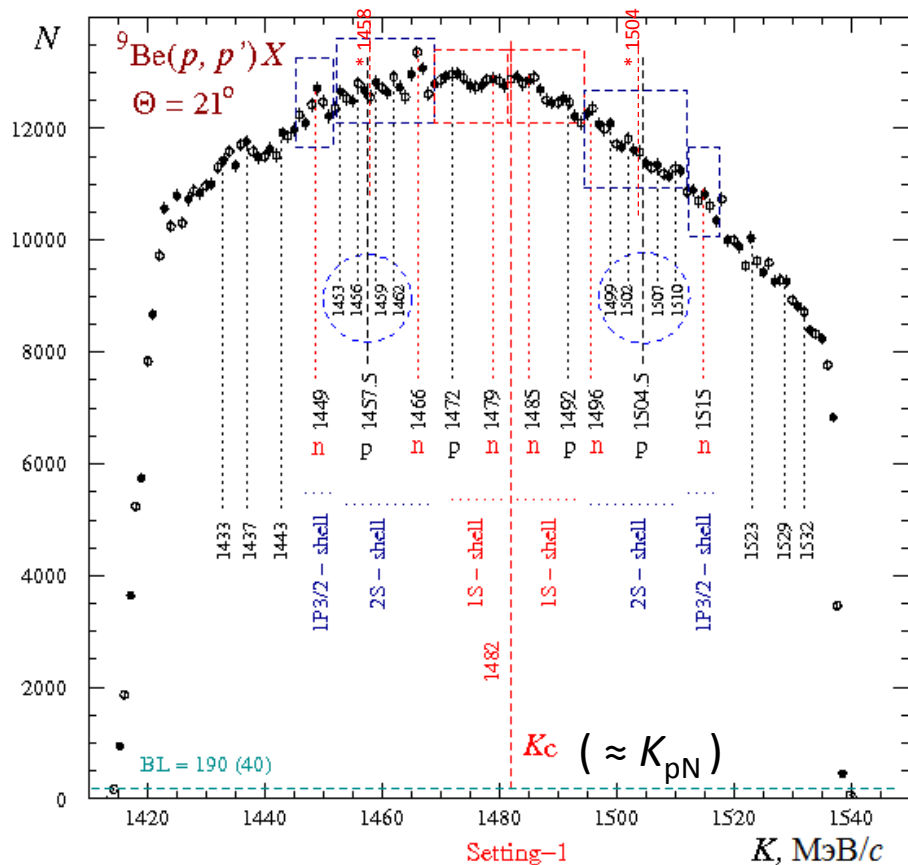
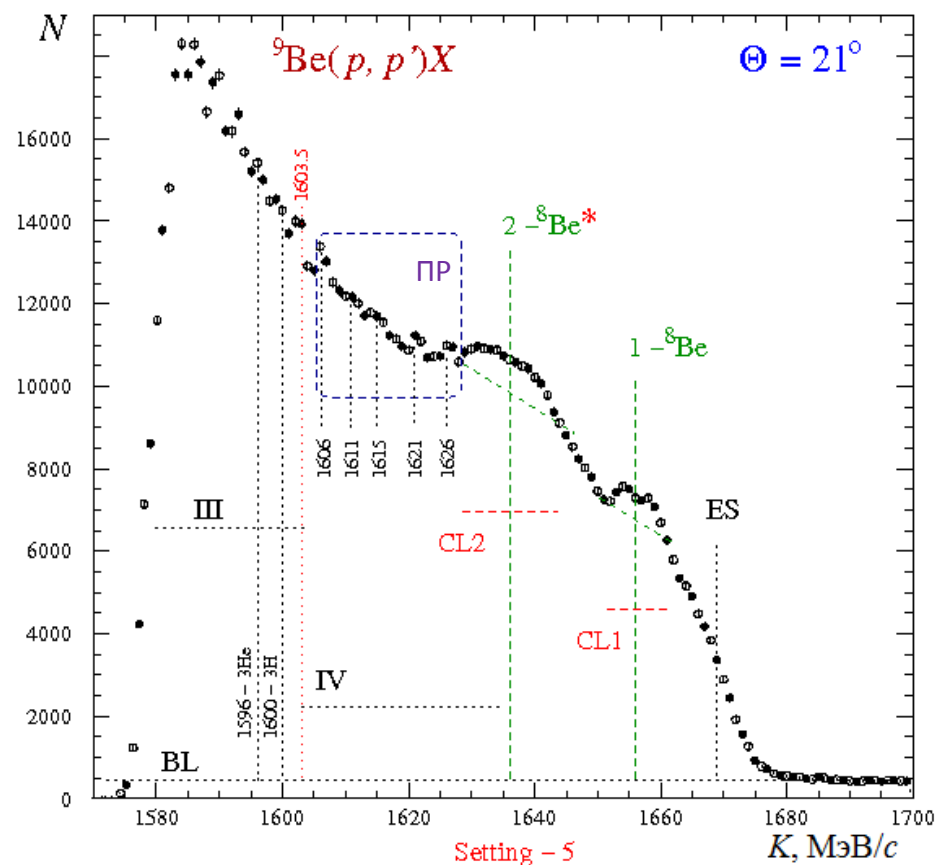
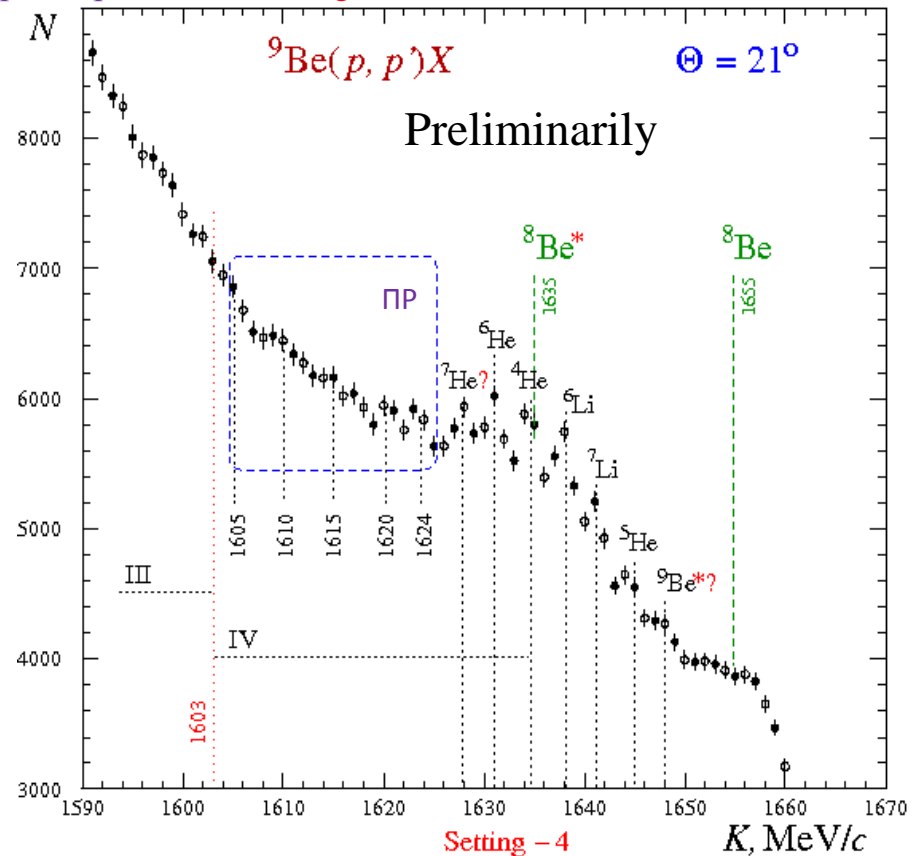


Рис. 10\*



ПР – область периферийного малоуглового упругого рассеяния на ядерных протонах



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

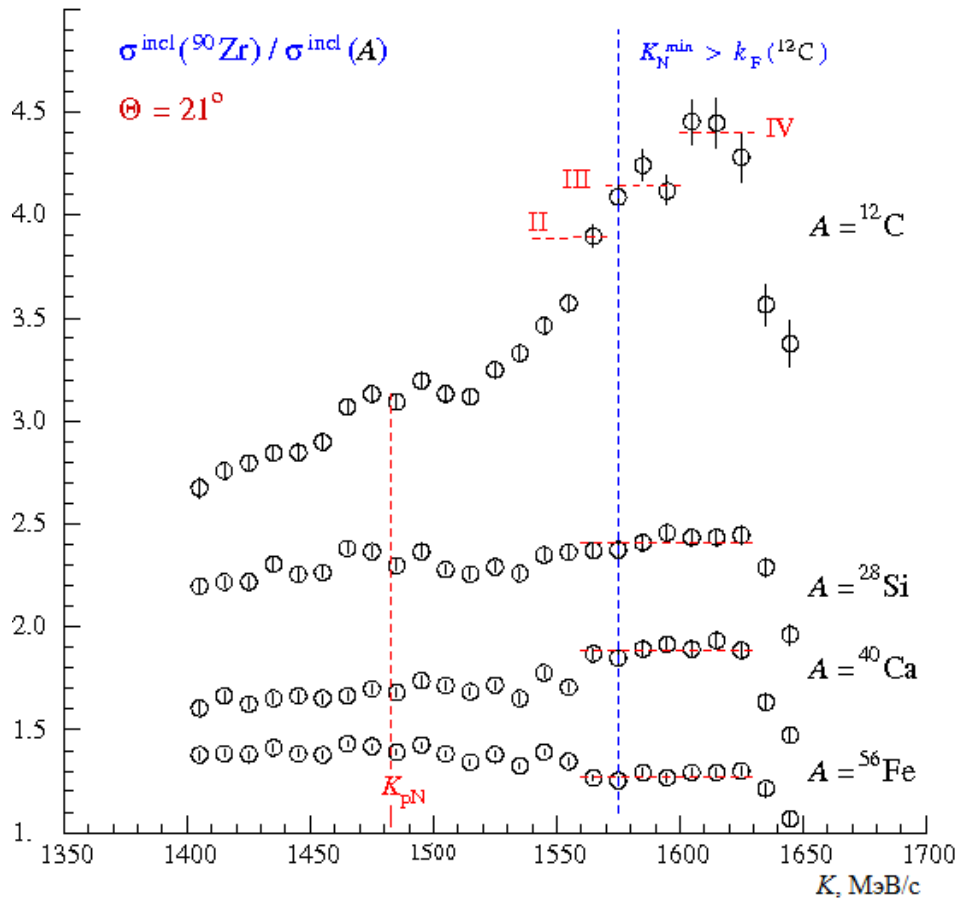
23 декабря 2025



**СПАСИБО ЗА ВНИМАНИЕ**

**С наступающим НОВЫМ ГОДОМ !!!**

# ДОПОЛНИТЕЛЬНЫЕ СЛАЙДЫ



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

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

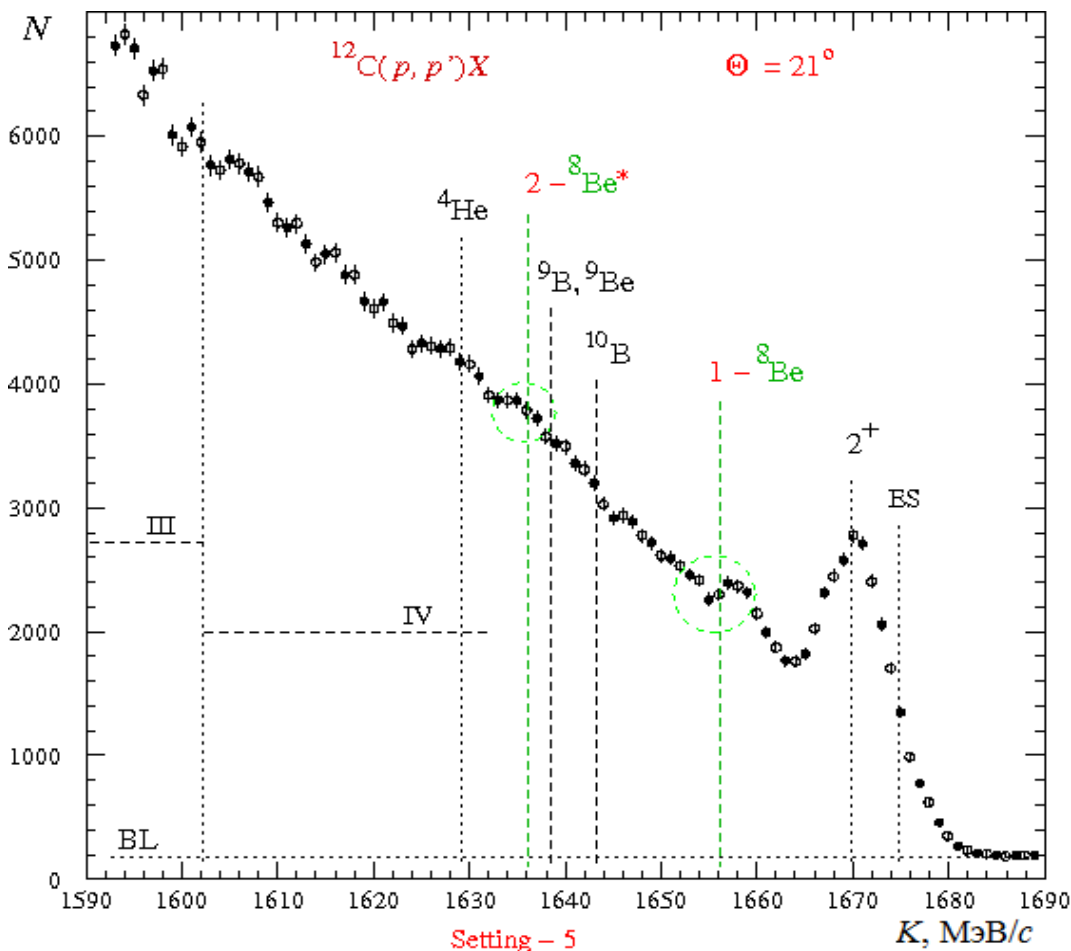
В области импульсов  $K = 1560\text{--}1630 \text{ МэВ/с}$ , охватывающей импульсные интервалы III и IV наблюдается скейлинговое поведение отношений сечений рассеяния при  $A \geq 28$  (величина отношения практически не зависит от импульса  $K$ ).

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

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

О. Миклухо

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



Preliminarily

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

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

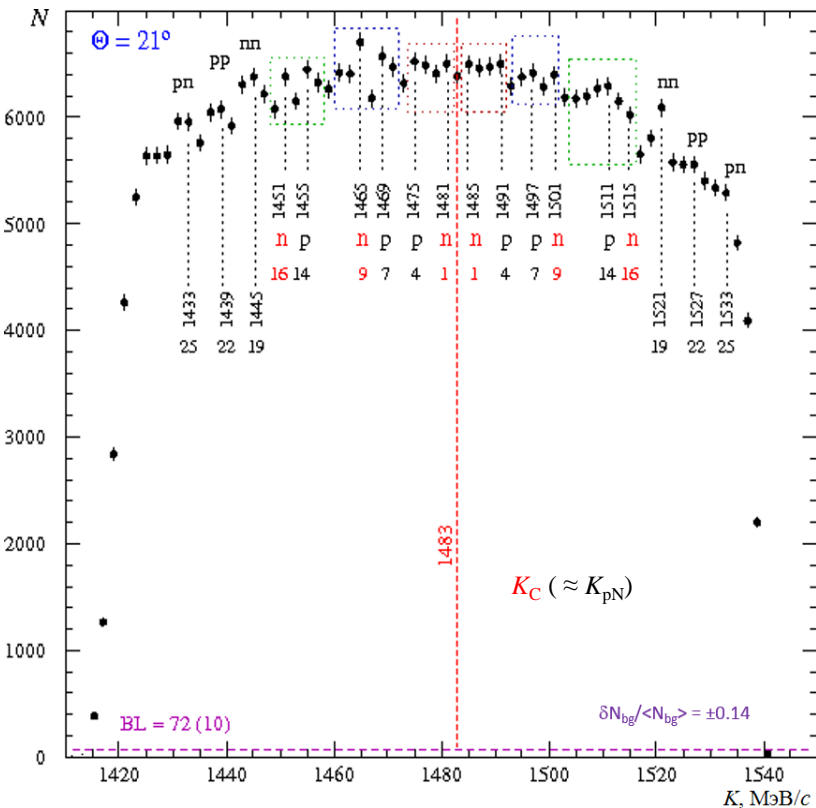
$\epsilon^* = 17.38 \pm 0.27$  (систем.)  $\pm 0.10$  (стат.) МэВ

**Рис. 11.** Импульсные распределения (•) и (○) вторичных протонов в  $(p, p')$  – реакции с ядром  $^{12}\text{C}$ . Ширина канала – 2 МэВ/с; распределение (○) сдвинуто по  $K$  на 1 МэВ/с (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 $21^\circ$ в $(p, p')$ – реакции с ядром $^{12}\text{C}$ в области квазиупругого $pN$ – пика



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

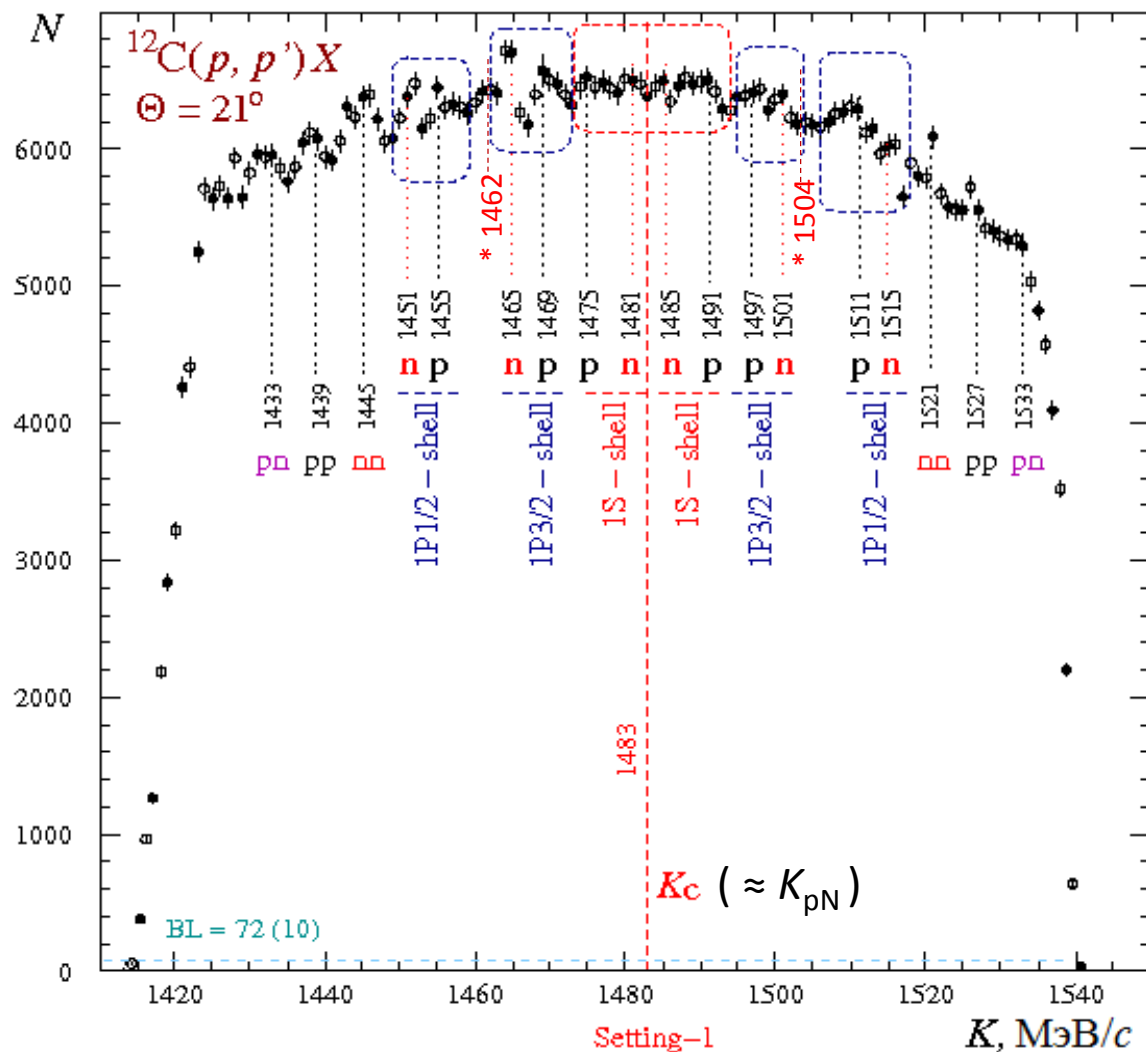
**Рис. 12.** Импульсное распределение вторичных протонов в реакции  $^{12}\text{C}(p, p')X$  при средней энергии протонного пучка  $\sim 1000$  МэВ и угле рассеяния  $21^\circ$ . Ширина канала 2 МэВ/с. **Энергия протонного пучка линейно растет при выводе его из ускорителя в интервале  $\sim 995 \div 1005$  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), ассиметричный, более широкий, пик – с рассеянием на протоне (p). Пики pp, pp и rp 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, образовавшихся в  $(p, p')$  – реакции под углом  $21^\circ$ . 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 инклюзивном  $(p, p')$  – эксперименте не определяется фоном (см. Рис. 12), средняя величина которого (BL) мала и структура которого слабо проявляется ( $\pm \delta BL$ ).

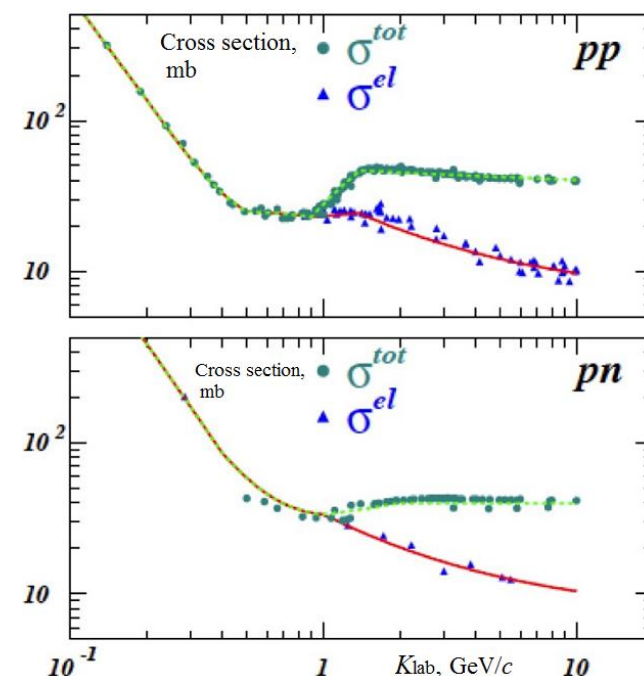
Импульсные распределения протонов (●) и (○), рассеянных под углом  $21^\circ$  в  $(p, p')$  – реакции с ядром  $^{12}\text{C}$  в области квазиупругого  $pN$  – пика (Setting – 1)



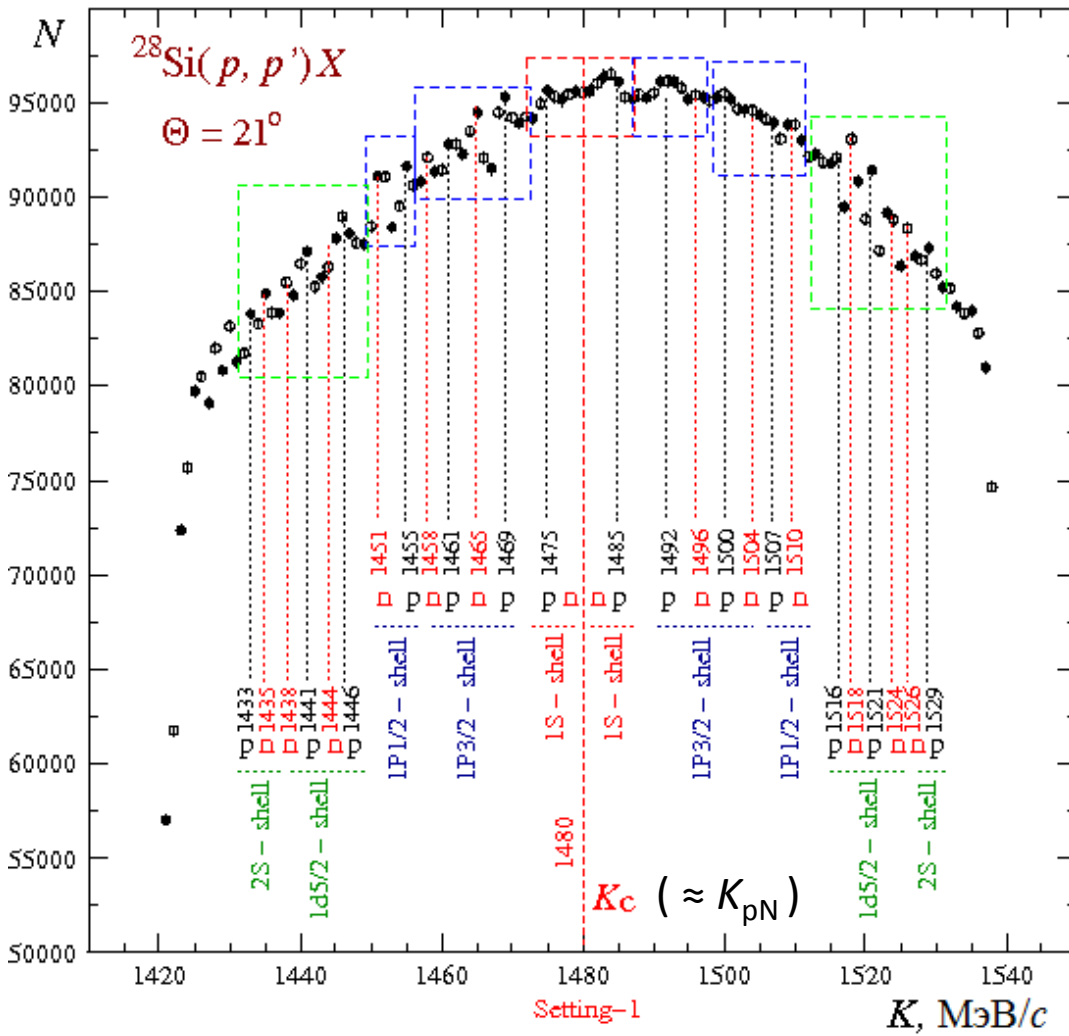
Setting (1)  $K_{\text{map}}=1482.0$  MeV/c  
 $AP38=0.957$  v;  $AP39=0.736$  v;  $AP-17=1.635$  v;  $Xol=0.0933$  (4) v  
 $BIC=3.5$  M=910/c;  $M_{\text{lt}}=490$ /c; Gate=4200/c; Gate $_{\text{lt}}=2400$ /c  
 #41450 500 t.s.

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  $^{12}\text{C} - 0^+$

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



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



Setting (1):  $K_{\text{map}}=1482.0 \text{ MeV}/c$   
 $AP38=0.957 \text{ v}$ ;  $AP39=0.736 \text{ v}$ ;  $AP17=0.8010 \text{ v}$ ;  $Xol=0.0924(3) \text{ v}$   
 $M=760/c$ ;  $M_{\text{lt}}=520/c$ ;  $\text{Gate}=3800/c$ ;  $\text{Gate}_{\text{lt}}=2500/c$   
 #42065 1 ml.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  $^{28}\text{Si}$  описывается в рамках оболочечной модели с положительной деформацией (внешние нуклоны находятся в состоянии 2S). Анализ спектра при угле рассеяния  $24.5^\circ$ , который будет проведен в 2026 году, уточнит структуру ядра  $^{28}\text{Si}$ .

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