

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

О. Миклухо

НИЦ “Курчатовский Институт” – ПИЯФ

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 ${}^9\text{Be}$, ${}^{12}\text{C}$, ${}^{28}\text{Si}$, ${}^{40}\text{Ca}$, ${}^{56}\text{Fe}$ 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° 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.

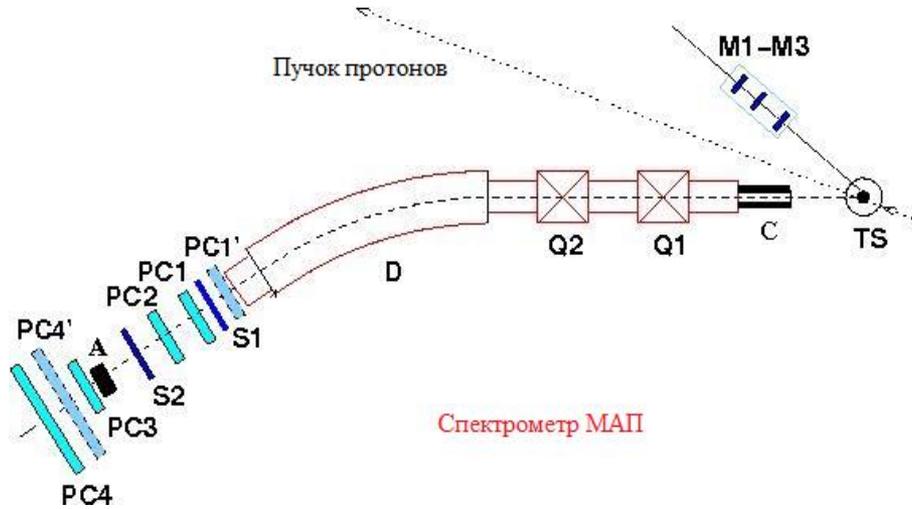
1. O.V. Miklukho *et al.*, Phys.Atom.Nucl. **80**, 299 (2017).
2. O.V. Miklukho *et al.*, JEPT Letters **106**, 69 (2017).
3. O.V. Miklukho *et al.*, Phys.Atom.Nucl. **81**, 320 (2018).
4. O.V. Miklukho *et al.*, Phys.Atom.Nucl. **83**, 431 (2020).
5. O.V. Miklukho *et al.*, arXiv: 2102.04109v1 [nucl-ex]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

ПЛАН ДОКЛАДА

1. Экспериментальная установка и методика исследования инклюзивной (p, p') – реакции с ядрами при энергии 1 ГэВ
2. Дифференциальные сечения реакции и поляризация рассеянных протонов
3. Отношения дифференциальных сечений рассеяния на ядрах
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^*) ядра ^8Be в (p, p') – реакции с ядром ^9Be

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 (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	~ 300 КэВ
Энергетический ход за время вывода	~ 10 МэВ
Длительность макроимпульса	$7 \div 10$ мс
Макроскважность пучка	$\sim 45 \%$
Период микроструктуры	75 нс

Рис. 1. Магнитный спектрометр МАИ. TS – мишень магнитного спектрометра; Q1, Q2 магнитные квадруполь; 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; А – углеродный анализатор поляриметра

Основные параметры магнитного спектрометра МАИ	
Максимальный импульс частицы К, [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

$$P = \varepsilon / A = 2 * \langle \cos(\phi) \rangle / \langle A \rangle$$

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

[1] O.V. Miklukho et al., Phys.Atom.Nucl. 80, 299 (2017)

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 ($K > 1575$ МэВ/с, см. также Рис. 3),

О. Миклухо

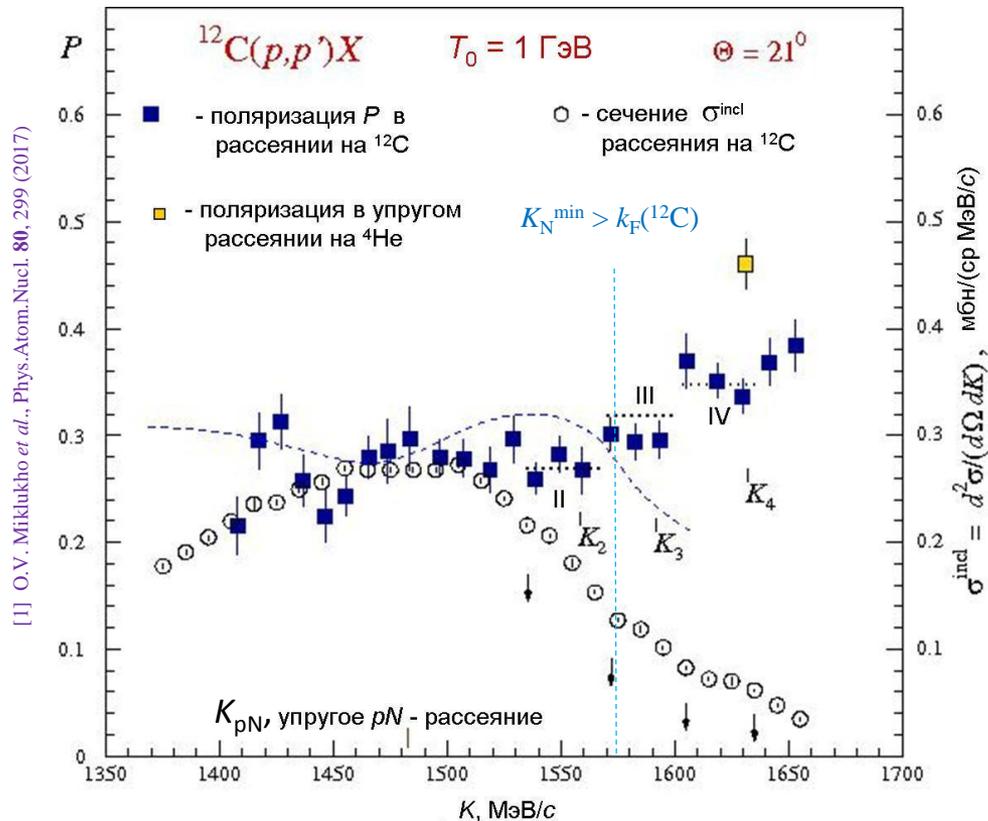


Рис.2. На рисунке: штриховая кривая - результат расчета поляризации P в рамках импульсного приближения с искаженными волнами с учетом модификации нуклонного спинора Дирака в ядерной среде [1]. Предполагается, что ядро состоит только из нуклонов. **Кинематика реакции:** при $K > K_{pN}$ (≈ 1480 МэВ/с, отвечает максимуму квазиупругого pN - пика) переданный ядру импульс Q слабо меняется и равен ≈ 600 МэВ/с ($Q > 2 \cdot k_F(^{12}\text{C})$, где $k_F(^{12}\text{C})$ - импульс Ферми для ядра ^{12}C , равный ≈ 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]

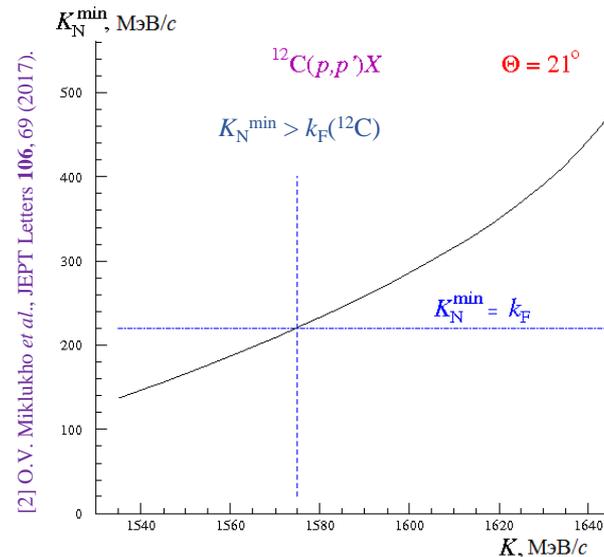


Рис. 3. Зависимость K_N^{min} от импульса рассеянного протона K [2]

где рассеяние на отдельном ядерном нуклоне маловероятно [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.

Сечения рассеяния и отношения сечений рассеяния на ядрах

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

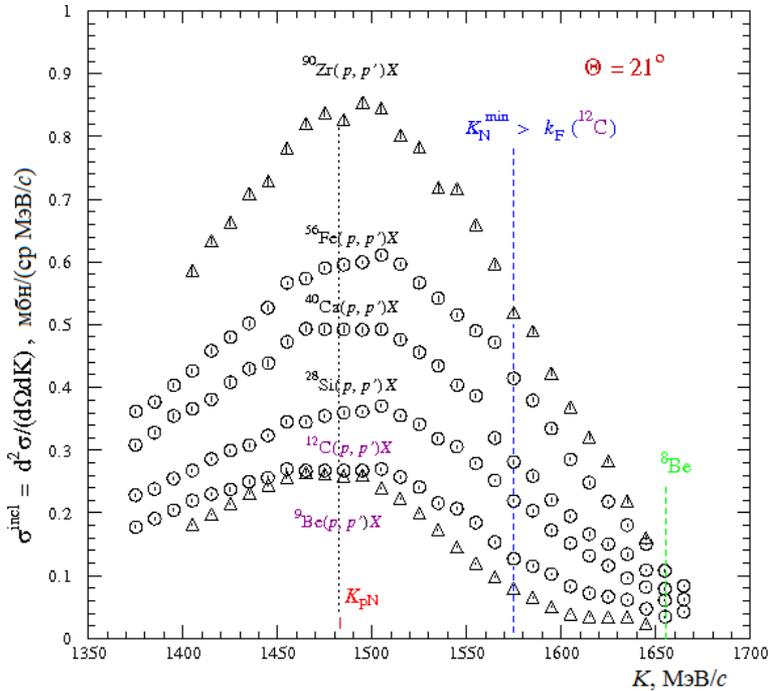


Рис. 4. Сечения рассеяния на ядрах ^{90}Zr , ^{56}Fe , ^{40}Ca , ^{28}Si , ^{12}C и ^9Be .
Ширина канала - 10 МэВ/с

Сечения рассеяния на ядрах ^{12}C и ^9Be (Рис. 4) в области, охватывающей максимум квазиупругого pN – пика практически одинаковы (см. слайд 13).

Отношения сечений рассеяния на ядрах ^{90}Zr , ^{56}Fe , ^{40}Ca , ^{28}Si (Рис. 5-1) к сечению рассеяния на ядре ^{12}C ступенчато растет 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 квазиупругому рассеянию на ядре ^8Be [5].

Зеленая вертикальная штриховая прямая на Рис. 5-2, отмеченная символом $^8\text{Be}^*$, возможно соответствует квазиупругому рассеянию на ядре ^8Be с возбуждением последнего (см. слайд 9).

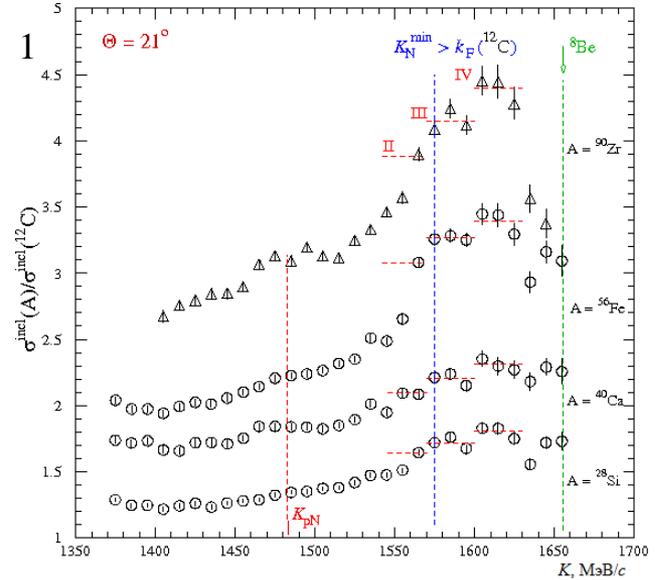
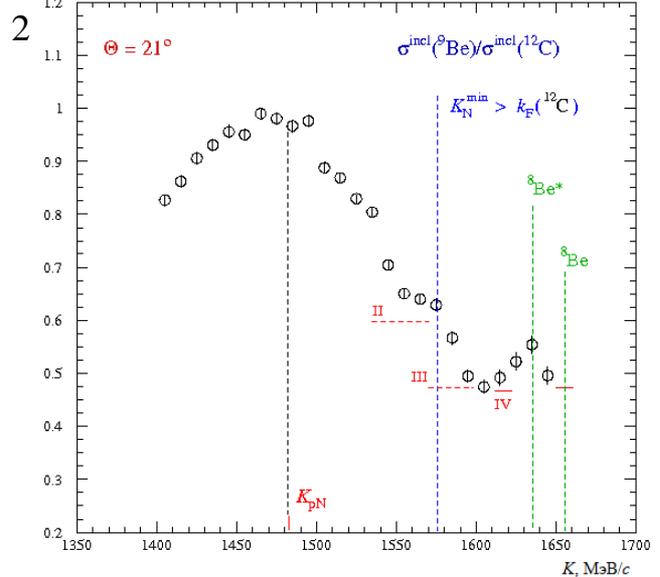


Рис. 5. Отношения сечений рассеяния на ядрах ^{90}Zr , ^{56}Fe , ^{40}Ca , ^{28}Si (1) и ^9Be (2) к сечению рассеяния на ядре ^{12}C



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

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

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

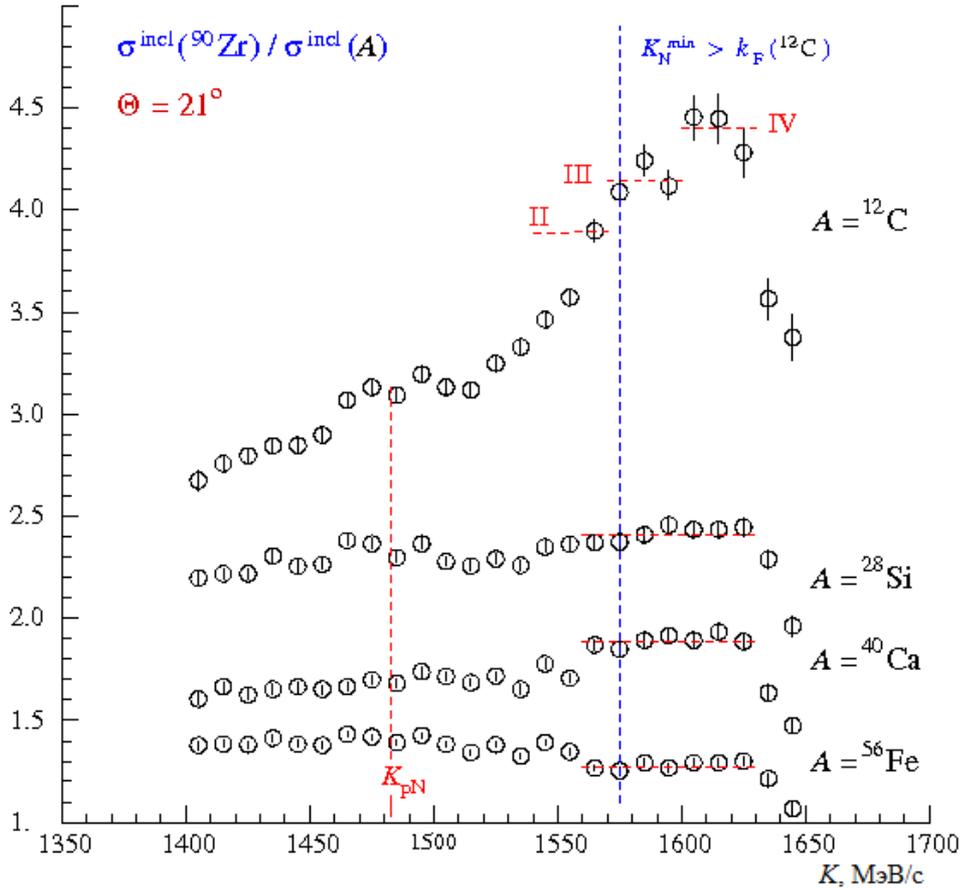


Рис. 6. Отношения сечения рассеяния на ядре ^{90}Zr к сечениям рассеяния на ядрах ^{12}C , ^{28}Si , ^{40}Ca , ^{56}Fe

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 $K = 1560 \div 1630$ 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.

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

1. O.V. Miklukho et al., Phys.Atom.Nucl. **80**, 299 (2017).

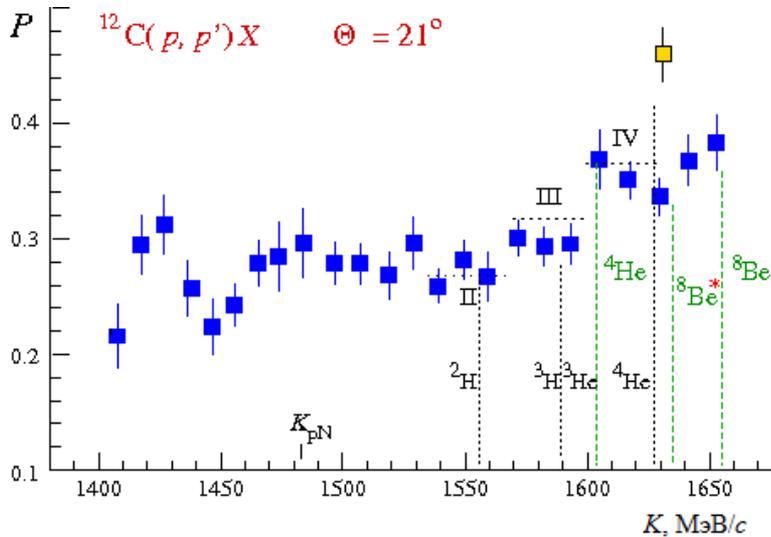


Рис. 7-1. Поляризация рассеянных протонов в (p, p') - реакции с ядром ^{12}C . Ширина канала - 10 МэВ/с; зеленые вертикальные штриховые отрезки прямой линии отвечают квазиупругому рассеянию на ядрах ^4He , ^8Be и, возможно, на возбужденном ядре $^8\text{Be}^*$ (см. слайд 9); спин и четность ядра ^{12}C - 0^+

Наблюдение: минимум в поляризации достигается при импульсе K , соответствующем упругому свободному рассеянию на ядре ^4He (желтый квадрат, [1]). В случае реакции с ядром ^9Be (Рис. 7-2) в этой кинематике достигается максимум в поляризации.

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

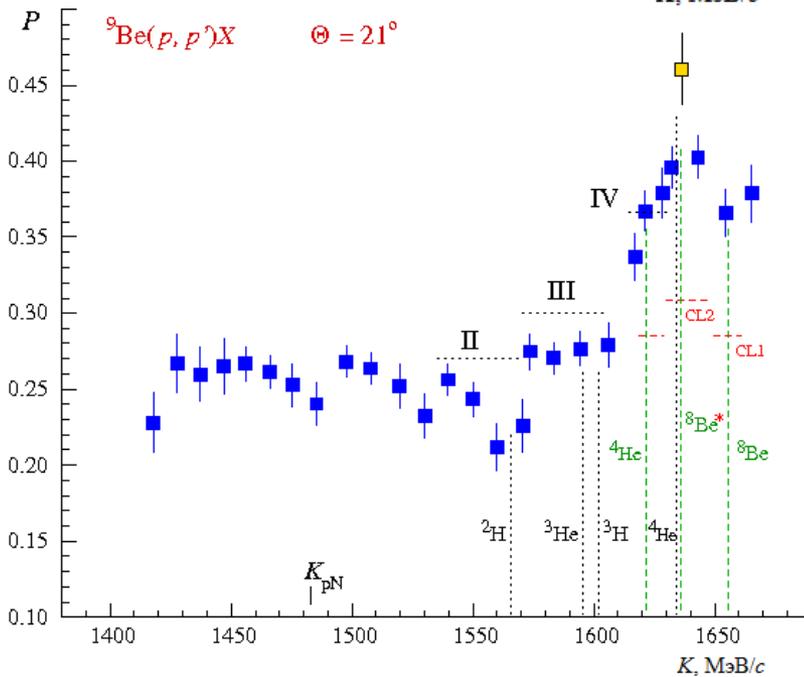


Рис. 7-2. Поляризация рассеянных протонов в (p, p') - реакции с ядром ^9Be . Ширина канала - 10 МэВ/с; зеленые вертикальные штриховые отрезки прямой линии отвечают квазиупругому рассеянию на ядрах ^4He , ^8Be и, возможно, на возбужденном ядре $^8\text{Be}^*$ (см. слайд 9); в импульсных интервалах **CL1**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

Наплыв в поляризации (**CL2**) может быть 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 ^6He , ^6Li , ^7Li – конstituентах ядра ^9Be [4].

Проведена оценка поляризации (P) в (p, p') - реакции с возбужденным кластером $^8\text{Be}^*$ в ядре ^9Be : $P \approx 72.8 \pm 13.7 \%$ (эта величина существенно больше средней поляризации $36.7 \pm 1.0 \%$ в рассеянии на кластерах ^8Be ($36.6 \pm 1.5 \%$) и ^4He ($36.7 \pm 1.3 \%$) в ядре ^9Be). При этом анализировался импульсный спектр вторичных протонов от рассеяния на ядре ^9Be с шириной канала 1 МэВ/с (см. слайд 11).

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

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

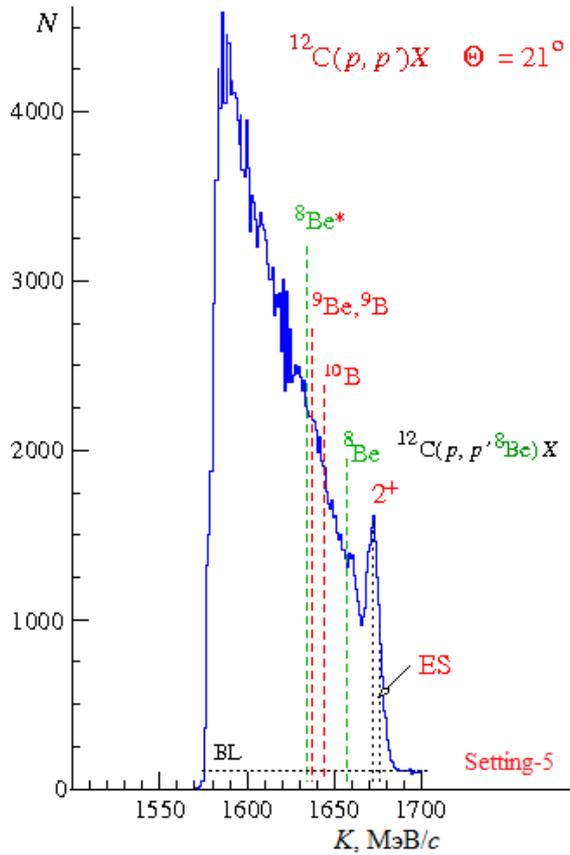


Рис. 8-1. Импульсный спектр протонов, рассеянных на ядре ^{12}C . Ширина канала - 1 МэВ/с; настройка спектрометра МАП : Setting - 5; BL – уровень фона; ES – упругое рассеяние на ядре, $^8\text{Be}^*$ - возбужденное ядро ^8Be

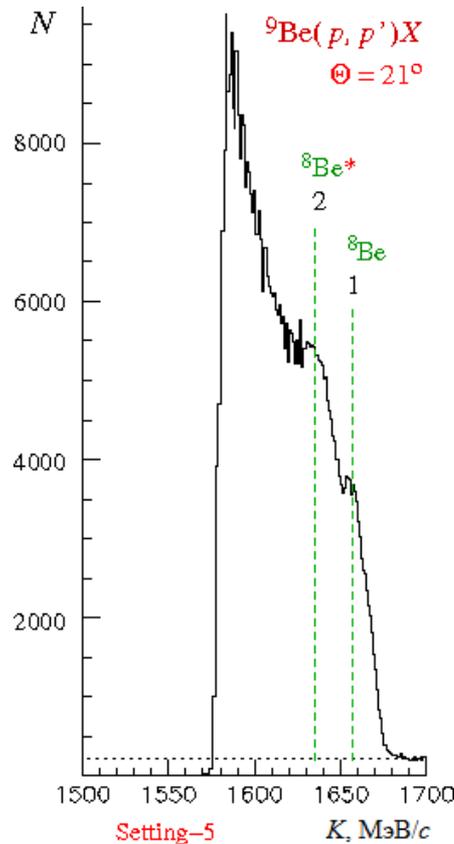


Рис. 8-2. Импульсный спектр протонов, рассеянных на ядре ^9Be . Ширина канала - 1 МэВ/с; настройка спектрометра МАП : Setting - 5; $^8\text{Be}^*$ - возбужденное ядро ^8Be

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

О возможном существовании возбужденного ядра ^8Be ($^9\text{Be}^*$) 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 ^8Be ($J^\pi = 2^+$).

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

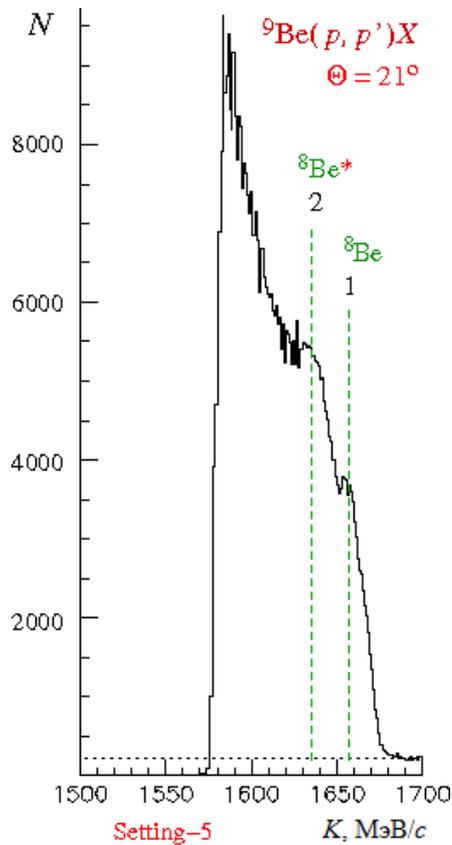


Рис. 8-2. Импульсный спектр протонов, рассеянных на ядре ${}^9\text{Be}$. Ширина канала - 1 МэВ/с; настройка спектрометра МАП : Setting – 5; ${}^8\text{Be}^*$ - возбужденное ядро ${}^8\text{Be}$

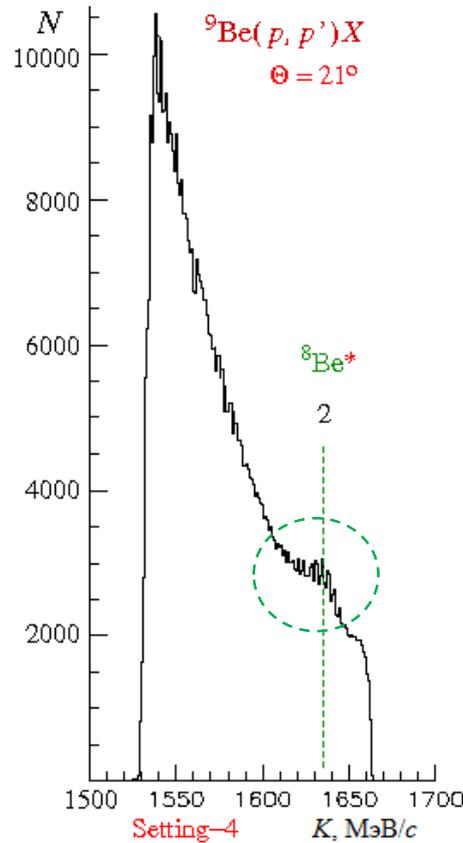
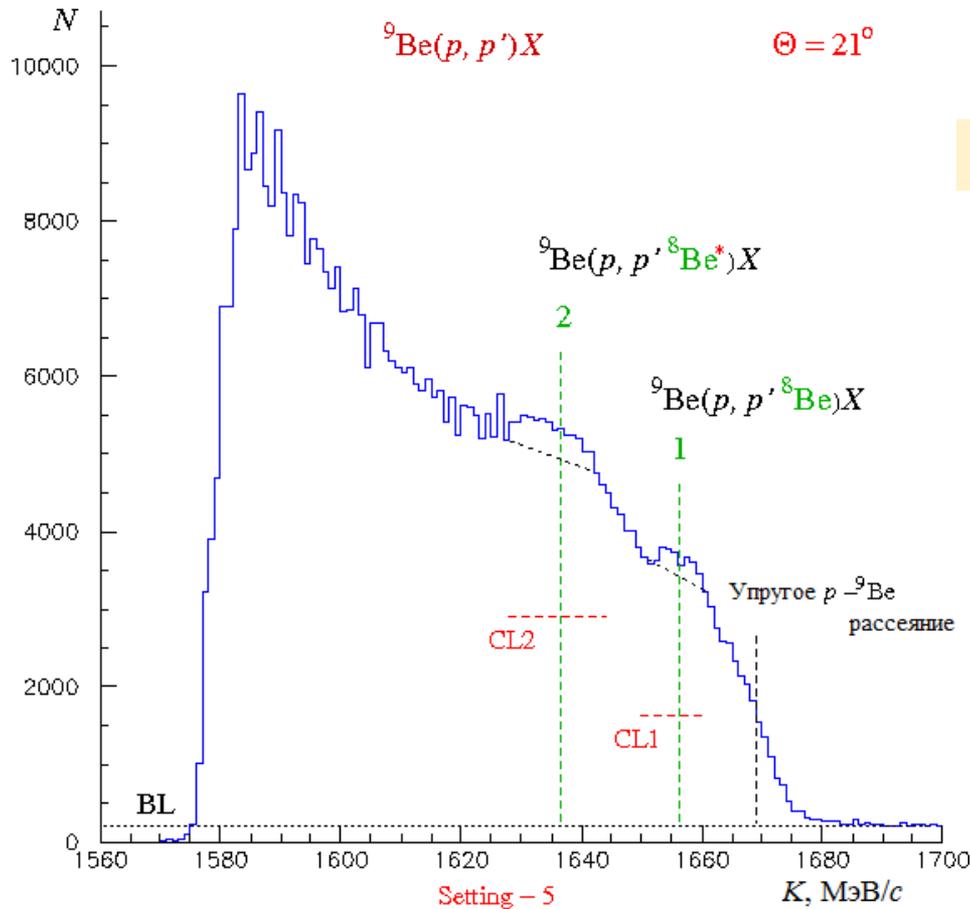


Рис. 9. Импульсный спектр протонов, рассеянных на ядре ${}^9\text{Be}$. Ширина канала - 1 МэВ/с; настройка спектрометра МАП : Setting – 4; ${}^8\text{Be}^*$ - возбужденное ядро ${}^8\text{Be}$

На Рис. 9 представлено импульсное распределение вторичных протонов в (p, p') – реакции с ядром ${}^9\text{Be}$, полученное при настройке магнитного 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/с, тогда как между наблюдаемыми узкими пиками расстояние $\approx 3 \div 4$ МэВ/с. Эта структура пиков возможно связана с сопутствующим периферическим малоугловым рассеянием в мишени вторичных протонов в исследуемой (p, p') – реакции (см. слайд 13).

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

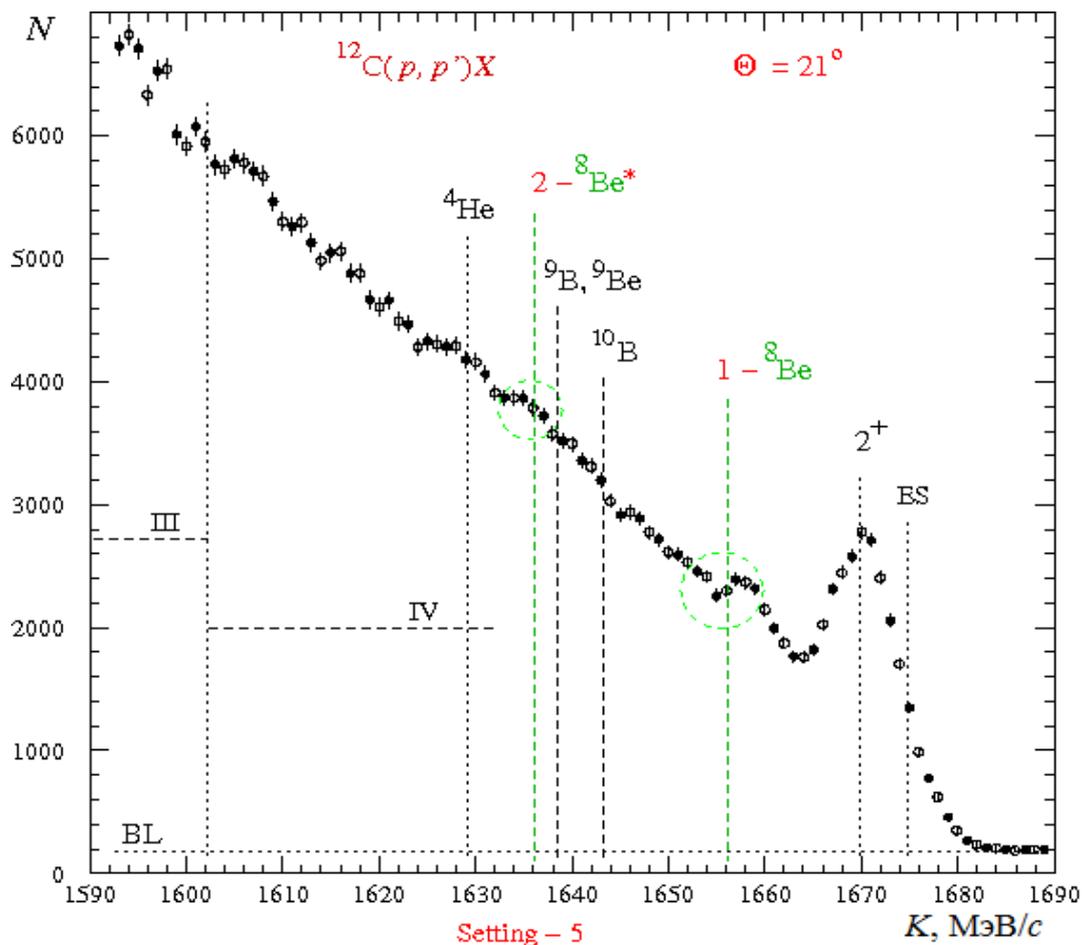
Энергия возбуждения (ε^*) ядра ${}^8\text{Be}$ в (p, p') – реакции с ядром ${}^9\text{Be}$ при энергии 1 ГэВ



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

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

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. слайд 8 (Рис. 7-2)



Preliminarily

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

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

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

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

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

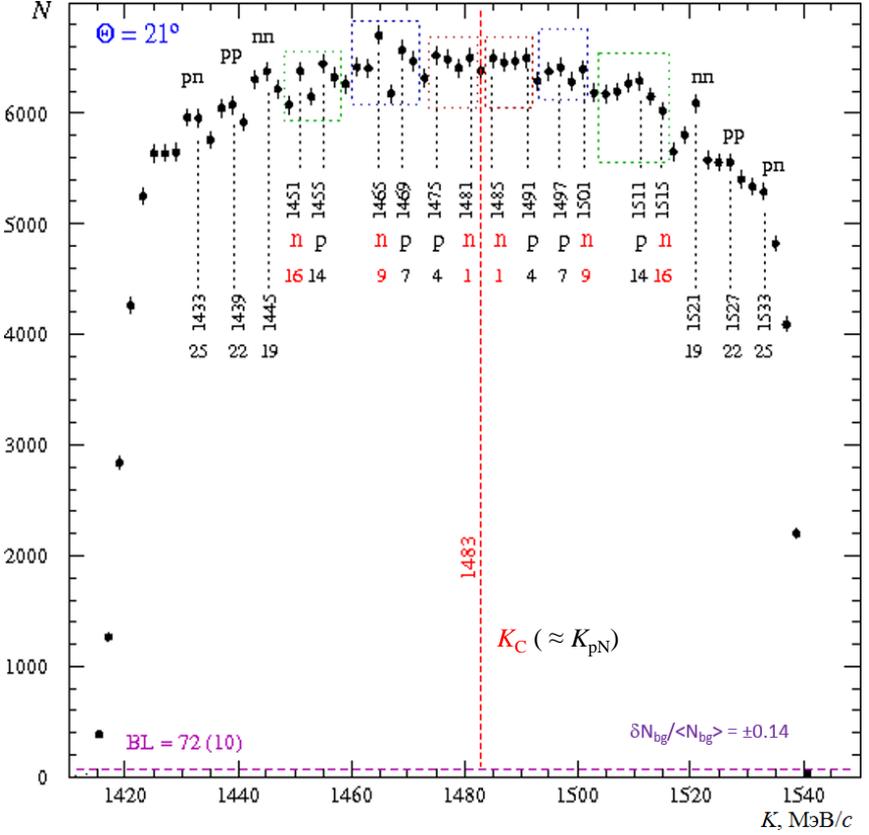


Рис. 12. Импульсное распределение вторичных протонов в реакции $^{12}\text{C}(p, p')X$ при энергии $\sim 995 \div 1005$ МэВ и угле рассеяния 21° . Ширина канала 2 МэВ/с; $K_C = 1483$ МэВ/с ($T_C = 817$ МэВ) – ось симметрии структуры пиков; узкий симметричный по форме пик сопоставляется с рассеянием на нейтроне (n), ассиметричный пик – с рассеянием на протоне (p); пики pp, pp и pn возможно соответствуют рассеянию на двухнуклонных корреляциях; **отметим здесь:** в случае квазиупругого рассеяния протона пучка с энергией ≈ 1000 МэВ на связанных покоящихся ядерных протонах и нейтронах ядра ^{12}C вторичный протон будет иметь импульс ≈ 1459 и ≈ 1456 МэВ/с, соответственно

Наблюдается симметричная структура пиков относительно импульса K_C , который примерно соответствует упругому рассеянию протонов пучка с энергией 1000 МэВ на свободных нуклонах $\{K_C = 1483 \text{ МэВ/с } (T_C = 817 \text{ МэВ})\}$. Слева и справа от оси K_C симметрично расположены три области, охватывающие два пика контурами красного, синего и зеленого цвета. Один из них - узкий пик, имеющий симметричную форму, сопоставляется с рассеянием на нейтроне (n). Другой, более широкий пик, имеющий ассиметричную форму, отвечает рассеянию на протоне (p). Пики, расположенные слева и справа от оси симметрии, возможно отвечают периферическому рассеянию вторичных протонов на нуклонах ядра в диапазоне энергий протонов пучка $995 \div 1000$ МэВ и $1000 \div 1005$ МэВ, соответственно (энергия пучка линейно растет со временем при выводе его из ускорителя). Поляризованные вторичные протоны от $^{12}\text{C}(p, p')X$ - реакции с энергией T_C рассеиваются в мишени на малые углы в пределах геометрического горизонтального углового захвата спектрометра МАП: $\pm 0.4^\circ$. 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 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 ($\pm \delta BL$).

Представляет интерес исследовать выше описанным методом деформированное ядро ^9Be с целью уточнения четности одночастичных состояний. Причина: сечения рассеяния на ядрах ^{12}C и ^9Be практически одинаковы в области квазиупругого pN - пика (см. слайд 6, Рис. 4).

1. Поляризация вторичного протона в (p, p') – реакции с ядрами ^{12}C и ^9Be при энергии 1 ГэВ ступенчато изменяется с ростом его импульса K , превышающем импульс K_{pN} , соответствующий максимуму квазиупругого pN - пика. Эти изменения, возможно, связаны с рассеянием на различных нуклонных кластерах: ^2H , ^3He и ^3H , ^4He , ^8Be и $^8\text{Be}^*$.
2. При импульсе K , примерно отвечающем упругому свободному рассеянию на ядре ^4He , поляризация в (p, p') – реакции с ядрами ^{12}C и ^9Be достигает, соответственно, минимума и максимума в рассеянии на конstituенте ядер - ^8Be с возбуждением последнего.
3. Отношения дифференциальных сечений рассеяния на ядрах ^9Be , ^{28}Si , ^{40}Ca , ^{56}Fe , ^{90}Zr к сечению рассеяния на ядре ^{12}C также свидетельствуют о рассеянии на различных нуклонных кластерах ^2H , ^3He и ^3H , ^4He , ^8Be и $^8\text{Be}^*$ в этих ядрах.
Наблюдается скейлинговое поведение (независимость от K) отношений сечения рассеяния на ядре ^{90}Zr к сечениям рассеяния на ядрах ^{28}Si , ^{40}Ca , ^{56}Fe в области импульсов вторичных протонов, охватывающей интервалы рассеяния на трехнуклонных и четырехнуклонных корреляциях в ядрах.
4. В высокоимпульсной части спектра вторичных протонов в (p, p') – реакции с ядрами ^{12}C и ^9Be наблюдается структура, возможно связанная с рассеянием на многонуклонных кластерах ^8Be , $^8\text{Be}^*$, ^9Be , ^9B , ^{10}B и ^8Be , $^8\text{Be}^*$, соответственно.
5. Проведена оценка величины энергии возбуждения (ε^*) ядра ^8Be в (p, p') – реакции с ядром ^9Be :

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

СПАСИБО ЗА ВНИМАНИЕ