

NAMANGAN DAVLAT
UNIVERSITETI
ILMIY AXBOROTNOMASI, [2026-9]
ISSN:2181-1458
ISSN:2181-0427



01.00.00-FIZIKA-MATEMATIKA
journal.namdu.uz
PHYSICS AND MATHEMATICS

ОБРАЗОВАНИЕ НЕСТАБИЛЬНЫХ ПРОМЕЖУТОЧНЫХ ЯДЕР ^8Be И ^9B В ^{16}O -p-СОУДАРЕНИЯХ ПРИ 3.25 А ГэВ/с

Олимов Косим

д.ф.-м.н. проф., Заведующий Лабораторией Физики Высоких Энергий Физико-технического института имени С.А. Азимова Академии наук Республики Узбекистан.

<https://orcid.org/0009-0006-4345-7088>

olimov@uzsci.net

Абдисалимов Бекзод Набижон угли

Стажёр-исследователь Физико-технического института имени С. А. Азимова Академии Наук Республики Узбекистан.

<https://orcid.org/0009-0002-3707-0769>

bekzodabdisalimov9@gmail.com

Аннотация: Исследуется образование нестабильных промежуточных ядер ^8Be и ^9B в соударениях ядер ^{16}O с протонами при импульсе 3,25 А ГэВ/с. Основное внимание уделяется изучению азимутальной коллинеарности векторов импульсов пар α -частиц при фрагментации ядер. Для анализа экспериментальных данных используется модифицированная феноменологическая модель изотропного фазового пространства, учитывающая рождение и распад промежуточных нестабильных ядер ^8Be и ^9B . Проведено сравнение экспериментальных распределений с результатами моделирования методом Монте-Карло. Показано, что учет образования нестабильных ядер позволяет описать наблюдаемую азимутальную коллинеарность α -частиц. Получены оценки вероятностей образования ядер ^8Be в основном и первом возбужденном состояниях, а также ядра ^9B .

Ключевые слова: ядерная фрагментация, кластеризация ядер, α -частицы, нестабильные ядра, ядро ^8Be , ядро ^9B , метод Монте-Карло.

3.25 А GeV/c IMPULSDA ^{16}O -p TO' QNASHUVLARIDA BEQAROR ORALIQ YADROLAR ^8Be VA ^9B HOSIL BO' LISHI

Annotatsiya: 3.25 А GeV/c impulsda ^{16}O yadrolarining protonlar bilan to' qnashuvlarida beqaror oraliq yadrolar ^8Be va ^9B hosil bo' lishi tadqiq etilgan. Asosiy e'tibor yadrolarning fragmentatsiyasi jarayonida hosil bo' ladigan α -zarralar juftligi impuls vektorlari azimutal kollinearligining o' rganilishiga qaratilgan. Eksperimental ma'lumotlarni tahlil qilish uchun beqaror oraliq yadrolar ^8Be va ^9B ning hosil bo' lishi va parchalanishini hisobga oluvchi izotrop fazo hajmining modifikatsiyalangan fenomenologik modelidan foydalanilgan. Eksperimental taqsimotlar Monte-Karlo usuli yordamida modellash tirish natijalari bilan taqqoslangan. Beqaror yadrolarning hosil bo' lishini hisobga olish α -zarralarning kuzatilgan azimutal kollinearligini tavsiflash imkonini berishi ko' rsatilgan. ^8Be yadrosining asosiy va birinchi uyg' ongan holatlarida, shuningdek, ^9B yadrosining hosil bo' lish ehtimolliklari baholangan.

Kalit so' zlar: Yadro fragmentatsiyasi, yadrolarning klasterlashuvi, α -zarralar, beqaror yadrolar, ^8Be yadrosi, ^9B yadrosi, Monte-Karlo usuli.

PRODUCTION OF UNSTABLE INTERMEDIATE NUCLEI ^8Be AND ^9B IN ^{16}O -p COLLISIONS AT 3.25 А GeV/c

Abstract: The production of unstable intermediate nuclei ^8Be and ^9B in collisions of ^{16}O nuclei with protons at a momentum of 3.25 А GeV/c is investigated. Particular attention is paid to the study of the azimuthal collinearity of the momentum vectors of α -particle pairs during nuclear fragmentation. A modified phenomenological model of isotropic phase space, which takes into account the production and decay of the unstable intermediate nuclei ^8Be and ^9B , is used to analyze the experimental data. The experimental distributions are compared with the results of Monte Carlo simulations. It is shown that accounting for the production of unstable nuclei makes it possible to describe the observed azimuthal collinearity of α -particles. Estimates of the production probabilities of ^8Be in its ground and first excited states, as well as of ^9B , are obtained.

Keywords: Nuclear fragmentation, nuclear clustering, α -particles, unstable nuclei, ^8Be nucleus, ^9B nucleus, Monte Carlo method.

Введение

Исследование взаимодействий релятивистских ядер представляет собой одно из актуальных направлений современной ядерной физики. Изучение процессов фрагментации ядер при высоких энергиях позволяет получать информацию о структуре ядерной материи, характере ядерных взаимодействий и механизмах образования кластерных конфигураций.

Особый интерес представляют легкие ядра, в которых кластеризация нуклонов может проявляться наиболее отчетливо. В таких системах отдельные группы нуклонов способны формировать относительно устойчивые структурные образования, среди которых особое место занимают α -частицы, дейтроны, тритоны и ядра ${}^3\text{He}$.

Исследование процессов фрагментации стабильных и радиоактивных ядер на кластерные фрагменты при релятивистских энергиях позволяет изучать особенности образования возбужденных ядерных состояний, характер ядерных сил и корреляции между внутренней структурой исходного ядра и характеристиками конечных продуктов реакции [1, 2].

Одним из важных направлений подобных исследований является изучение каналов образования нескольких α -частиц в ядерных соударениях. Анализ угловых корреляций между фрагментами позволяет получить дополнительную информацию о механизмах их образования и возможном существовании промежуточных ядерных состояний.

В работе [1] исследовались каналы образования трех и четырех α -частиц в ${}^{16}\text{O}$ -р-соударениях при импульсе 3.25 А ГэВ/с. В экспериментальных данных были обнаружены небольшие азимутальные асимметрии и коллинеарность векторов импульсов пар α -частиц.

Для описания наблюдаемой коллинеарности в рамках феноменологической модели изотропного фазового пространства ранее использовался специальный параметр, характеризующий близость направлений импульсов α -частиц.

Однако физическая природа возникновения подобных корреляций оставалась невыясненной. Одним из возможных механизмов является образование и последующий распад промежуточных нестабильных ядер ${}^8\text{Be}$ и ${}^9\text{B}$.

Теоретическая модель и методика исследования

Для исследования процессов образования α -частиц в ${}^{16}\text{O}$ -р-соударениях при импульсе 3.25 А ГэВ/с используется феноменологическая модель изотропного фазового пространства. Выбор данной модели обусловлен необходимостью описания множественного рождения частиц в условиях, когда динамические механизмы взаимодействия точно не известны, а основную роль играют кинематические ограничения и статистические закономерности. Модель позволяет воспроизвести основные характеристики инклюзивных спектров α -частиц без привлечения сложных динамических расчётов.

В рамках данной модели предполагается, что при взаимодействии исходных частиц образуется многочастичная конечная система, для которой распределение импульсов продуктов реакции формируется с учётом кинематических ограничений и законов сохранения энергии и импульса. Иными словами, все допустимые конфигурации конечных частиц считаются равновероятными в фазовом пространстве, доступном при заданной энергии столкновения. Это приближение хорошо работает для описания процессов, где множественность конечных частиц велика, а корреляции между ними слабы.

Особое внимание в работе уделено образованию α -частиц через промежуточные нестабильные ядра. В частности, рассматриваются следующие каналы:

${}^8\text{Be} \rightarrow \alpha + \alpha$ — распад ядра ${}^8\text{Be}$ на две α -частицы;

${}^9\text{B} \rightarrow \alpha + \alpha + p$ — распад ядра ${}^9\text{B}$ с выходом двух α -частиц и протона.

Для ядра ${}^8\text{Be}$ рассматривались следующие состояния:

основное состояние с энергovyделением 0,1 МэВ;

первое возбуждённое состояние с энергovyделением 3,04 МэВ.

Эти состояния отличаются энергией связи и, соответственно, кинематикой разлёта α -частиц, что влияет на форму инвариантных спектров и угловые корреляции. Учёт двух состояний позволяет более точно описать вклад ${}^8\text{Be}$ в наблюдаемое распределение α -частиц.

Для ядра ${}^9\text{B}$ рассматривался канал распада с энергovyделением 0,3 МэВ. При моделировании рождения ядра ${}^9\text{B}$ учитывались только каналы с тремя α -частицами в конечном состоянии, содержащие не менее одного протонного фрагмента. Это ограничение связано с тем, что именно такие каналы дают основной вклад в образование α -частиц в данной кинематической области и позволяют сопоставить результаты моделирования с экспериментальными данными.

Расчёты выполнялись методом Монте-Карло с использованием модифицированной феноменологической модели изотропного фазового пространства. Модификация модели включает:

учёт конечного размера сталкивающихся ядер и ферми-движения нуклонов;
использование реалистичных волновых функций для описания относительного движения α -частиц в промежуточных ядрах;
введение весовых множителей, учитывающих вероятность образования конкретного промежуточного состояния.

Метод Монте-Карло позволяет генерировать большое число событий, соответствующих различным кинематическим конфигурациям конечных частиц, и затем строить распределения по инвариантной массе, поперечному импульсу и углам разлёта α -частиц. Полученные таким образом теоретические распределения сравниваются с экспериментальными данными, что позволяет проверить адекватность модели и оценить вклад различных каналов в наблюдаемые процессы.

Результаты и их обсуждение

На рисунке 1 исходной публикации представлены экспериментальные распределения по парному азимутальному углу ε_{ij} между i -й и j -й α -частицами. Этот угол характеризует взаимную ориентацию поперечных импульсов α -частиц в азимутальной плоскости и является чувствительным инструментом для проверки наличия промежуточных корреляций. Для сравнения приведены результаты Монте-Карло-моделирования, выполненные в двух вариантах:

Без учёта образования нестабильных ядер ^8Be и ^9Be — то есть все α -частицы считаются образованными непосредственно в акте взаимодействия, без промежуточной кластеризации.

С учётом образования и распада нестабильных ядер ^8Be и ^9Be — то есть модель включает каналы, в которых α -частицы возникают при распаде промежуточных ядер.

Согласно результатам исследования, наилучшее согласие расчётных распределений с экспериментальными данными достигается при учёте образования и распада промежуточных нестабильных ядер. Это указывает на то, что наблюдаемые азимутальные корреляции α -частиц в значительной степени формируются не в результате прямого рождения, а через последовательный распад нестабильных ядерных состояний.

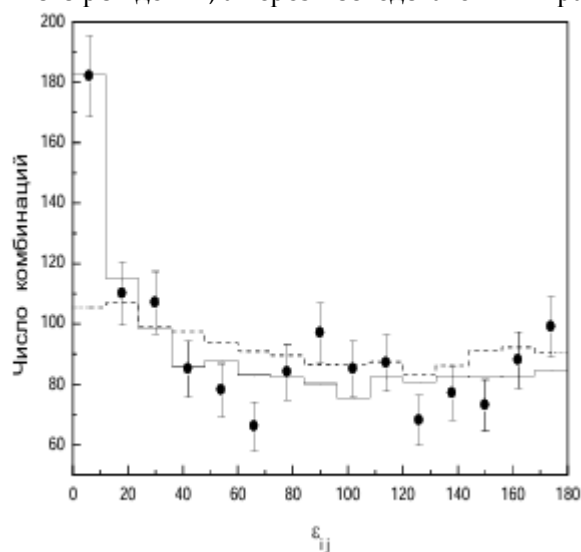


Рис.1. Распределение по парному азимутальному углу (ij) i -ой и j -ой α частице

Получены следующие вероятности образования промежуточных ядер:

Промежуточное ядро	Состояние	Вероятность образования
^8Be	Основное 0.1 МэВ	15.4%
^8Be	Возбужденное 3.04 МэВ	6.6%
^9Be	Состояние с энергосвободой 0.3 МэВ	19%

Эти значения показывают, что вклады различных каналов существенны и сопоставимы по порядку величины. Наибольший вклад даёт канал с образованием ^9Be (19%), затем — основное состояние ^8Be (15.4%). Возбуждённое состояние ^8Be даёт меньший, но заметный вклад (6.6%), что подтверждает необходимость учёта не только основного, но и возбуждённого состояния.

Полученные результаты указывают на существенную роль промежуточных нестабильных ядер в формировании наблюдаемых азимутальных корреляций α -частиц. Без их учёта модель не воспроизводит характерные особенности экспериментальных распределений.

На рисунке 2 исходной публикации приведены распределения по параметру азимутальной коллинеарности β_2 для индивидуальных актов ^{16}O -р-соударений с образованием трёх и четырёх α -частиц. Параметр β_2 количественно описывает степень выстроенности поперечных импульсов α -частиц в азимутальной плоскости: чем ближе его значение к единице, тем более коллинеарна конфигурация.

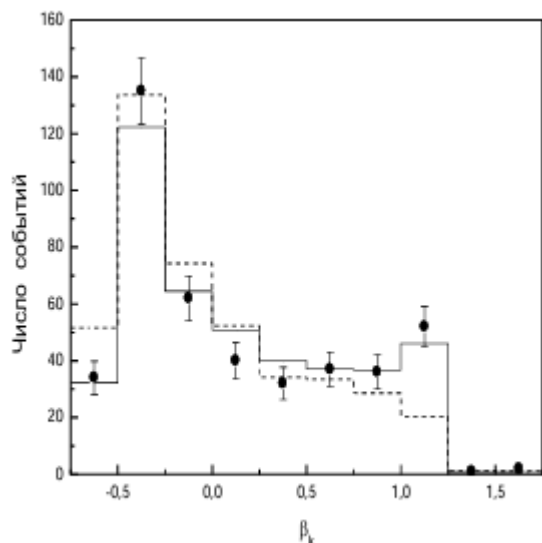


Рис. 2. β_2 -распределение в индивидуальных актах ^{16}O -р-соударений

Гистограммы соответствуют результатам моделирования с учётом и без учёта образования нестабильных ядер ^8Be и ^9B . Сравнение результатов показывает, что включение промежуточных ядер в модель позволяет получить распределение, соответствующее экспериментальным данным.

При учёте образования нестабильных ядер были получены следующие значения:

$$\chi^2 = 3.88 \quad \text{при 10 степенях свободы, что соответствует уровню значимости около 95\%.}$$

Средние значения параметра коллинеарности составили:

$$\langle\beta\rangle_{\text{эксп}} = 0.13 \pm 0.03$$

$$\langle\beta\rangle_{\text{расч}} = 0.13 \pm 0.02$$

Таким образом, расчётное и экспериментальное средние значения согласуются в пределах погрешностей, а значение χ^2 указывает на хорошее описание экспериментального распределения.

Для модели без учёта образования нестабильных ядер получены:

$$\langle\beta\rangle_{\text{расч}} = 0.004 \pm 0.024$$

$$\chi^2 = 21.56.$$

В этом случае уровень значимости составляет менее 2%, что свидетельствует о статистически значимом расхождении с экспериментом. Полученные результаты демонстрируют, что модель без промежуточных нестабильных ядер не обеспечивает удовлетворительного описания экспериментального распределения.

Таким образом, совокупность полученных результатов — как по парным азимутальным углам, так и по параметру азимутальной коллинеарности β_2 — подтверждает ключевую роль промежуточных нестабильных ядер ^8Be и ^9B в формировании наблюдаемых корреляций α -частиц в ^{16}O -р-соударениях при импульсе 3.25 А ГэВ/с. Учёт этих каналов не только улучшает количественное согласие с экспериментом, но и качественно меняет предсказания модели, делая их физически обоснованными.

Заключение

В работе исследовано влияние образования промежуточных нестабильных ядер ^8Be и ^9B на азимутальную коллинеарность α -частиц в ^{16}O -р-соударениях при импульсе 3,25 А ГэВ/с. Для анализа экспериментальных данных использована модифицированная феноменологическая модель изотропного фазового пространства с моделированием методом Монте-Карло.

Основные результаты исследования:

Показано, что учет образования и распада промежуточных нестабильных ядер ^8Be и ^9B позволяет описать наблюдаемую азимутальную коллинеарность α -частиц.

Получено удовлетворительное согласие расчетного и экспериментального распределений по параметру коллинеарности.

Определены вероятности образования промежуточных ядер:

^8Be в основном состоянии — 15.4%;

^8Be в первом возбужденном состоянии — 6.6%;

^9B — 19%.

Установлено, что образование промежуточных нестабильных ядер является возможным механизмом формирования азимутальных корреляций при фрагментации ядер ^{16}O .

Таким образом, результаты моделирования подтверждают важность учета кластерных конфигураций и промежуточных нестабильных состояний при исследовании фрагментации легких ядер.

Foydalanilgan adabiyotlar

1. Базаров Э. Х., Глаголев В. В., Гуламов К. Г. и др. Исследование каналов образования α -частиц в ^{16}O -р-соударениях при высоких энергиях // Ядерная физика. 2004. Т. 67. С. 730.
2. Ajzenberg-Selove F. Energy Levels of Light Nuclei $A = 8, 9$, and 10 // Nuclear Physics A. 1984. Vol. 413. P. 1.