

СЗ46

Щ-61

ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Лаборатория ядерных проблем

Ю.А.Щербаков

792

ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ БЫСТРЫХ ПРОТОНОВ  
И  $\pi^{\pm}$ -МЕЗОНОВ С ЯДРОМ  $\text{He}^4$

Автореферат диссертации, представленной на соискание  
ученой степени кандидата физико-математических наук

Научный руководитель  
доктор физико-математических наук  
профессор

М.С.Козодаев

Дубна 1981 год

Ю.А.Шербаков

СЗ46

Щ-61

792

ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ БЫСТРЫХ ПРОТОНОВ  
И  $\pi^{\pm}$ -МЕЗОНОВ С ЯДРОМ  $\text{He}^4$

79788.  
Автореферат диссертации, представленной на соискание  
ученой степени кандидата физико-математических наук

Научный руководитель  
доктор физико-математических наук  
профессор

М.С.Козодаев

Объединенный институт  
ядерных исследований  
БИБЛИОТЕКА

# 1.

Опыты с частицами высоких энергии (нуклонов и  $\pi$ -мезонов с энергией свыше 100 Мэв) показали, что взаимодействие их с ядрами имеет много интересных качественных особенностей. Эти особенности определяются, с одной стороны, природой сил, действующих между свободными частицами, а, с другой стороны, строением бомбардируемых ядер. В связи с этим в ряде случаев оказывается возможным из такого рода опытов получать новые данные как о характере взаимодействия свободных частиц, так и нуклонов, находящихся в связанном состоянии в ядре. Особенный интерес представляет изучение взаимодействия быстрых нуклонов и  $\pi$ -мезонов с легкими ядрами, где число нуклонов не велико и благодаря этому каскадные процессы не должны сильно вуалировать первичный акт взаимодействия, что имеет место в случае тяжелых ядер. По этой причине поведение вторичных частиц после рассеяния будет в большей степени определяться характером взаимодействия, имеющего место между свободными частицами. Однако, использование легких ядер влечет за собой трудности в проведении опытов из-за меньших величин сечений по сравнению с тяжелыми ядрами.

В данной работе в качестве мишени использовалось ядро  $\text{He}^4$ . Малое число нуклонов и отсутствие связанных возбужденных уровней существенно упрощают характер неупругих процессов, сокращая число возможных каналов реакций, что облегчает задачу анализа экспериментального материала. С методической точки зрения гелий оказывается также весьма удобным. В газообразной форме он является хорошим наполнителем для диффузионных камер, позволяющим работать при высоких давлениях. В свою очередь, наблюдение взаимодействий в камере дает возможность выделять самые сложные процессы, включая и те, в которых вторичные частицы имеют очень малые пробеги.

Опыты, описываемые в данной работе, проводились с пучками частиц от синхротронного ускорителя Лаборатории ядерных проблем Объединенного института ядерных исследований. В качестве бомбардирующих частиц использовались протоны с энергией 630 Мэв, а также положительные и отрицательные  $\pi$ -мезоны с энергией около 300 Мэв. Постановка опытов с протонами таких энергий представляла определенный интерес, так как до настоящего времени наибольшая энергия протонов, при которой проводились опыты с  $\text{He}^4$ , составляла 315 Мэв (Чемберлен и др.) и при этом были получены данные только об угловом распределении упруго рассеянных протонов. В области энергий свыше 100 Мэв совершенно отсутствуют све-

дения о величинах сечений отдельных реакций неупругого рассеяния. Ожидавшийся высокий выход процессов квазиупругого рассеяния протонов на нуклонах  $He^4$  позволял надеяться получить подробные сведения об угловых и энергетических распределениях частиц от таких реакций. Кроме того, исследование импульсных спектров остаточных ядер могло дать сведения о распределении нуклонов по импульсам в ядре  $He^{4/1,2/}$ . Эта возможность представляла определенный интерес, так как до настоящего времени измерения импульсного распределения для нуклонов  $He^4$ , проводившиеся в ряде работ другими методами, не дали определенных результатов.

При изучении упругого рассеяния  $\pi^-$ -мезонов с энергией 330 Мэв на ядре  $He^{4/3/}$  было получено указание на резкую немонотонность дифференциального сечения в области малых углов. Это обстоятельство связывалось с интерференционными эффектами, обусловленными одновременным наличием кулоновского и ядерного взаимодействий. Однако небольшой статистический материал не позволил сделать окончательных выводов. В связи с этим были необходимы дальнейшие опыты с заряженными мезонами разных знаков при одной и той же энергии и с большей статистикой. Относительно неупругих процессов при рассеянии быстрых  $\pi^-$ -мезонов на ядре  $He^4$  известно очень мало. Так, для области энергий мезонов от 100 до 400 Мэв по этому вопросу имеется всего две работы<sup>3,4/</sup>. При детальном изучении отдельных реакций неупругого рассеяния мезонов было весьма интересно получить сведения о квазисвободном рассеянии и попытаться использовать этот материал так же, как и в случае рассеяния протонов, для получения данных о характере внутриядерного движения нуклонов в  $He^4$ .

Диссертация состоит из семи глав. В первой главе дается краткий обзор основных закономерностей, полученных в опытах по рассеянию быстрых частиц на ядрах, и, в частности, на ядре  $He^4$ . Три последующих главы посвящены описанию аппаратуры, использовавшейся в опытах, постановке опытов, а также методике обработки экспериментального материала. В главах У, У1 и У11 излагаются экспериментальные результаты и вытекающие из них выводы. Результаты, полученные в опытах с протонами и  $\pi^-$ -мезонами, анализируются в ряде случаев с единой точки зрения; при идентификации реакций использовалась практически одинаковая методика и это в какой-то мере предопределило совместное изложение дан-

ных как для протонов, так и  $\pi^-$ -мезонов, как в методической части работы, так и при обсуждении результатов экспериментов.

Диссертация основывается на опубликованных работах<sup>5-11/</sup>, выполненных автором совместно с М.С.Козодаевым, Р.М.Суляевым, А.И.Филипповым и М.М.Кулюкиным в период с 1956 по 1960 г.г.

## 11.

Для проведения опытов использовались диффузионные камеры высокого давления. В главе I описываются конструкции и физические характеристики этих установок. Первая камера, применявшаяся в опытах с  $\pi^-$ -мезонами, имела следующие основные параметры: диаметр чувствительного объема - 28 см; рабочее давление газа - 14 атм. (максимальное давление 20 ат); высота чувствительной области - 5-6 см. Вторая камера была использована в опытах с протонами. Конструкция этой установки была разработана с учетом возможности размещения ее в магните-соленоиде МС-4. (К моменту выполнения данного цикла работ магнит еще отсутствовал). Рабочие характеристики этой камеры следующие: диаметр чувствительной области - 30 см; рабочее давление газа - 20 ат (максимальное давление - 25 ат); высота чувствительной области - 6-7 см. В обеих камерах температурное распределение по газу, необходимое для создания чувствительного слоя, задавалось посредством подбора соответствующего распределения по плексигласовому цилиндру, игравшему роль внутренних стенок камеры. Источником пара служил метиловый спирт. Испарители поддерживались при температуре  $+12-16^\circ C$ , температура дна камер составляла обычно  $-63-65^\circ C$ . Следы ионизирующих частиц фотографировались стереофотоаппаратами. Оба аппарата имели одинаковую базу - 120 мм. Расстояние от объекта до аппарата составляло в первом случае 450 мм, во втором - 800 мм. При наладке одной из установок было проведено распределение температур в водороде при высоком давлении. Результаты измерений находятся в согласии с теоретическими оценками для минимального градиента температур, необходимого для создания чувствительной области. Подтверждается также заключение о возможности моделирования в камере, наполненной воздухом (до 1 ат), условий, имеющих место при высоких давлениях.

Для управления работой установок была создана специальная аппаратура, обе-

специальная определенная последовательность операций при фотографировании следов частиц. Для синхронизации с ускорителем использовался электронный блок, задававший число импульсов частиц, выдаваемых синхротронном, и интервал между группами этих импульсов. В обычных условиях число импульсов частиц составляло от одного (в пучке протонов) до 10 (в пучке  $\pi^+$ -мезонов). Интервал между последовательными моментами фотографирования составлял 7-20 секунд, в зависимости от имевшихся условий по постороннему фону.

Экспозиции камер были проведены в пучках протонов со средней энергией  $(630 \pm 15)$  Мэв,  $\pi^-$ -мезонов  $(330 \pm 6)$  и  $\pi^+$ -мезонов  $(273 \pm 7)$  Мэв. В главе III приводятся сведения о выводе указанных пучков и величинах примесей посторонних частиц.

Всего было получено около 22000 фотографий в пучке протонов, по 20000 в пучке  $\pi^-$  и  $\pi^+$ -мезонов. Полученный материал просматривался через стереолупу не менее двух раз. Для оценки величин сечений проводился выборочный дополнительный просмотр отдельных партий пленок. Стереоперефотографии обрабатывались на репродукторе. Разработанный для этих целей репродуктор обладал большой универсальностью и позволял проводить весьма быстро обмер самых сложных событий. В ряде случаев для идентификации событий использовался метод относительного фотометрирования следов.

В главе IV подробно излагается процедура выделения отдельных реакций при рассеянии 630 Мэв протонов и 300 Мэв  $\pi^-$ -мезонов на ядре  $\text{He}^4$ .

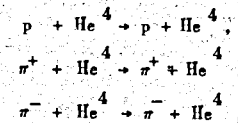
### III.

Измерение полных сечений рассеяния протонов  $\pi^+$  и  $\pi^-$ -мезонов на ядре  $\text{He}^4$  дало следующие величины:

$$\begin{aligned} \sigma_p^+ &= (150 \pm 13) \cdot 10^{-27} \text{ см}^2, & \sigma_{\pi^+}^+ &= (220 \pm 20) \cdot 10^{-27} \text{ см}^2, \\ \sigma_{\pi^-}^+ &= (150 \pm 15) \cdot 10^{-27} \text{ см}^2. \end{aligned}$$

При изучении процессов упругого рассеяния протонов и заряженных  $\pi^-$ -мезонов были получены следующие экспериментальные результаты.

1. Измерены полные сечения процессов упругого рассеяния:



которые оказались соответственно равными  $(24 \pm 5) \cdot 10^{-27} \text{ см}^2$ ,  $(75 \pm 9) \cdot 10^{-27} \text{ см}^2$  и  $(45 \pm 5) \cdot 10^{-27} \text{ см}^2$ .

2. Получено угловое распределение для протонов с энергией 630 Мэв, упруго рассеянных на ядре  $\text{He}^4$ .

3. Проведены измерения угловых распределений упругого рассеяния  $\pi^+$ - (при 273 Мэв) и  $\pi^-$ -мезонов (при 330 Мэв), до углов  $5^\circ$  (в системе центра масс).

Анализ этих данных был проведен на основе оптической модели с комплексным потенциалом в виде прямоугольной ямы. При этом было установлено следующее:

1) Угловое распределение упругого рассеяния протонов в пределах точности экспериментальных данных удовлетворительно описывается при следующих параметрах потенциала:

$$|V_R| = (30 \pm 10) \text{ Мэв}; \quad V_I = -(34 \pm 4) \text{ Мэв} \quad \text{и} \quad R_{He} = (1,45 \pm 0,1) \cdot 10^{-13} \text{ см}.$$

Величина  $V_I$  была найдена из измеренного полного сечения неупругого рассеяния.

2) Из сравнения полученного значения действительной части потенциала с соответствующей величиной для рассеяния протонов на гелии при 315 Мэв можно заключить, что  $V_R$  возрастает по абсолютной величине при переходе от 315 к 630 Мэв.

3) Наилучшее согласие с опытными данными по угловым распределениям упругого рассеяния  $\pi^-$ -мезонов получается для расчетных распределений со следующими значениями параметров оптической модели

$\pi^+$ (273 Мэв)	$V_R = (29 \pm 5)$	$V_I = -(35 \pm 5)$	$R_{He} = 2,1 \cdot 10^{-13} \text{ см}$
$\pi^-$ (330 Мэв)	$V_R = (34 \pm 5)$	$V_I = -(26 \pm 5)$	$R_{He} = 2,1 \cdot 10^{-13} \text{ см}$

4. Наблюдающийся на опыте характер угловых распределений упруго рассеянных  $\pi^-$ -мезонов обуславливается интерференцией кулоновского и ядерного взаимодействий. Это позволит заключить, что при энергии около 300 Мэв действительная часть потенциала имеет положительный знак. Указанный вывод согласуется с энергетической зависимостью действительной части потенциала, рассчитанной в работе Геммеля, Франка и Ватсона<sup>/12/</sup>.

#### IV.

Исследование отдельных реакций, имеющих место при неупругом рассеянии протонов с энергией 630 Мэв и заряженных  $\pi^-$ -мезонов с энергией 300 Мэв, позволило получить следующие основные результаты:

1. Полные сечения неупругого рассеяния  $\pi^-$ -мезонов оказались следующими:

$$\sigma_i^+ = (145 \pm 12) \cdot 10^{-27} \text{ см}^2, \quad \sigma_i^- = (103 \pm 7) \cdot 10^{-27} \text{ см}^2.$$

2. Полное сечение неупругого рассеяния протонов с энергией 630 Мэв на  $\text{He}^4$  составляет  $(126 \pm 14) \cdot 10^{-27} \text{ см}^2$ .

3. Измерены полные сечения реакций с вылетом заряженного мезона при неупругом рассеянии  $\pi^+$  и  $\pi^-$ -мезонов на ядре  $\text{He}^4$ . Эти сечения оказались равными соответственно  $(84 \pm 10) \cdot 10^{-27} \text{ см}^2$  и  $(66 \pm 6) \cdot 10^{-27} \text{ см}^2$ .

4. Получены угловые распределения неупруго рассеянных  $\pi^+$  и  $\pi^-$ -мезонов.

5. Из прямых измерений установлено, что вероятность кратных процессов при рассеянии мезонов на гелии составляет  $\xi_{\pi^+} = (0,24 \pm 0,06)$  для  $\pi^+$  и  $\xi_{\pi^-} = (0,29 \pm 0,05)$  для  $\pi^-$ -мезонов.

6. Измерено угловое распределение протонов из реакции

$$p + \text{He}^4 \rightarrow p + p + \text{He}^3.$$

7. Установлено, что в случае рассеяния протонов на  $\text{He}^4$  вероятность кратных процессов составляет  $\xi_p = 0,22 \pm 0,07$ .

8. Получены данные о сечении рождения  $\pi^-$ -мезонов в квазисвободных  $p$ - $n$ -столкновениях. Величина сечения этого процесса оказалась равной  $(1,3 \pm 0,5) \cdot 10^{-27} \text{ см}^2$  на один нуклон.

При анализе перечисленных выше экспериментальных данных оказалось возможным сделать следующие выводы:

1. Угловые распределения неупруго рассеянных мезонов качественно согласуются с расчетами, проведенными на основе теории Ватсона и Цемаха<sup>/13/</sup>. Большое расхождение наблюдается только в области малых углов. Это может быть объяснено тем, что в теории не учитывается запрет Паули.

2. Из рассмотрения соотношений сечений квазиупругого рассеяния  $\pi^-$ -мезонов разных знаков на нуклонах ядра  $\text{He}^4$  следует, что предсказываемые теорией изотопической инвариантности соотношения между сечениями упругих процессов на нуклонах для  $\pi^+$  и  $\pi^-$ -мезонов приблизительно выполняются и в случае рассеяния  $\pi^-$ -мезонов на связанных нуклонах.

3. Отличие величин полных сечений неупругих процессов при рассеянии  $\pi^-$ -мезонов обоих знаков, а также протонов, от соответствующих сумм полных сечений для свободных нуклонов указывает на значительную роль таких факторов, как экранировка, запрет Паули и др. даже при высоких энергиях налетающих частиц. Этот результат подтверждается также соотношениями, имеющими место между сечениями квазисвободного рассеяния и рассеяния на свободных нуклонах.

4. Форма углового распределения квазиупруго рассеянных протонов из реакции  $p + \text{He}^4 \rightarrow p + p + \text{He}^3$  хорошо согласуется с распределением, полученным из расчета квазиупругого процесса методом случайных испытаний с учетом запрета, накладываемого принципом Паули.

5. При рассеянии быстрых нуклонов и  $\pi^-$ -мезонов на ядре  $\text{He}^4$  заметный вклад дают кратные процессы. Приблизительно с 25% вероятностью в ядре происходит развитие каскада или же налетающая частица взаимодействует с группой нуклонов. Вероятности кратных процессов приблизительно одинаковы как при рассеянии протонов с энергией 630 Мэв, так и  $\pi^-$ -мезонов с энергией около 300 Мэв.

6. Величина полного сечения образования  $\pi^-$ -мезонов в  $p$ - $n$ -столкновениях в ядре  $\text{He}^4$  не противоречит данным, полученным из опытов со свободными нуклонами.

В последней (VII) главе диссертации излагаются результаты, полученные при исследовании угловых и импульсных распределений остаточных ядер от реакций квазисвободных взаимодействий протонов и  $\pi$ -мезонов с нуклонами ядра  $\text{He}^4$ . Так как кинематические характеристики частиц в конечном состоянии зависят от импульса нуклона внутри ядра в момент столкновения с ним быстрой частицы, то был предпринят анализ данных с целью получения сведений о распределении нуклонов по импульсам в ядре  $\text{He}^4$ .

Основные экспериментальные результаты, которые послужили основой для проведения такого анализа, заключаются в следующем:

1. Измерены угловые распределения остаточных ядер из реакций квазисвободного рассеяния протонов и  $\pi$ -мезонов на нуклонах ядра  $\text{He}^4$ . При этом установлено, что остаточные ядра в обоих случаях испускаются преимущественно в переднюю полусферу. Особенно сильная анизотропия наблюдается при рассеянии протонов; она характеризуется коэффициентом  $a_p = \frac{\sqrt{a_{\text{пл}}}}{\sqrt{a_{\text{наз}}}} = (2,17 \pm 0,15)$ . случае рассеяния мезонов эффект выражен более слабо ( $a_\pi = 1,25 \pm 0,13$ ).

2. Получены распределения остаточных ядер по импульсам в тех же процессах.

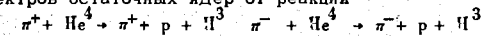
Сопоставление этих экспериментальных данных с проводившимися в работе расчетами позволяет сделать следующие выводы:

1. Неизотропность в угловых распределениях остаточных ядер невозможно объяснить учетом таких факторов, как зависимость полных и дифференциальных сечений от энергии и различная вероятность столкновения при различной относительной скорости сталкивающихся частиц.

2. Наблюдавшийся эффект находит удовлетворительное объяснение, если приближенно учесть обмен импульсами между остаточным ядром и выбиваемым нуклоном при обрыве связи. Это позволяет получить качественное согласие как для случая рассеяния мезонов, так и протонов.

3. В противоположность угловым распределениям импульсные спектры остаточных ядер слабее искажаются за счет взаимодействия при обрыве связи. Тем не менее, при получении сведений о внутриядерном распределении нуклонов по импульсам необходимо учитывать этот эффект.

4. Из импульсных спектров остаточных ядер от реакций



следует, что распределение нуклонов по импульсам в ядре  $\text{He}^4$  может быть описано функцией Гаусса, спадающей до значения  $1/e$  при  $p_0 = (150 \pm 15) \text{ Мэв}/c$  (т.е.  $E_0 = (12 \pm 2) \text{ Мэв}$ ).

5. Аналогичный результат получается из анализа импульсного спектра остаточных ядер из реакции  $p + \text{He}^4 \rightarrow p + p + \text{He}^3$ , что дает дополнительное указание на достоверность найденной формы распределения.

#### Л и т е р а т у р а

1. W.F.Fry. Phys. Rev., 93, 845 (1954).
2. G.Takeda. Phys. Rev., 93, 848 (1954).
3. М.С.Козодаев, Р.М.Суляев, А.И.Филиппов, Ю.А.Шербаков, ЖЭТФ, 31, 701, 1956.
4. Ю.А.Будагов, П.Ф.Ермолов, Е.А.Куширенко, В.И.Москалев, ОИЯИ 645, 1960.
5. М.С.Козодаев, Р.М.Суляев, А.И.Филиппов, Ю.А.Шербаков, ЖЭТФ, 33, 1047, 1957.
6. А.Т.Василенко, М.С.Козодаев, Р.М.Суляев, А.И.Филиппов, Ю.А.Шербаков, ПТЭ, № 6, 34, 1957.
7. М.С.Козодаев, М.М.Кулюкин, Р.М.Суляев, А.И.Филиппов, Ю.А.Шербаков, ПТЭ, № 6, 47, 1958.
8. В.И.Волошук, В.В.Кузнецов, Р.М.Суляев, А.И.Филиппов, Ю.А.Шербаков, ПТЭ, № 3, 34, 1960.
9. М.С.Козодаев, М.М.Кулюкин, Р.М.Суляев, А.И.Филиппов, Ю.А.Шербаков, ЖЭТФ, 38, 409, 1960.
10. М.С.Козодаев, М.М.Кулюкин, Р.М.Суляев, А.И.Филиппов, Ю.А.Шербаков, ЖЭТФ, 38, 708, 1960.
11. М.С.Козодаев, М.М.Кулюкин, Р.М.Суляев, А.И.Филиппов, Ю.А.Шербаков, ЖЭТФ, 39, 929, 1960.
12. R.Frank, J.Gammel, K.Watson. Phys. Rev., 101, 891 (1956).
13. K.Watson, C.Zemach. Nuovo Cimento, 10, 452 (1958).

Рукопись поступила в издательский отдел

5 сентября 1961 года.