

C-195

4-83-779

САПОЖНИКОВ  
Михаил Григорьевич

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ПИОНОВ  
С ИЗОТОПАМИ ГЕЛИЯ  
В РАМКАХ ОПТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ

Специальность: 01.04.16 - физика атомного ядра  
и элементарных частиц

Автореферат диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук

Работа выполнена в Лаборатории ядерных проблем  
Объединенного института ядерных исследований.

Научные руководители:

доктор физико-математических наук старший научный сотрудник	В.Б.Беляев
кандидат физико-математических наук старший научный сотрудник	Р.Мах

Официальные оппоненты:

доктор физико-математических наук старший научный сотрудник	Р.А.Эрамян
кандидат физико-математических наук старший научный сотрудник	Л.А.Кондратьев

Ведущее научно-исследовательское учреждение:

Ленинградский институт ядерной физики им. Б.П.Константинова.

Автореферат разослан "\_\_\_" \_\_\_\_\_ 1983 года.

Защита диссертации состоится "\_\_\_" \_\_\_\_\_ 1984 г.  
на заседании Специализированного совета К 047.01.01 Лаборатории  
теоретической физики Объединенного института ядерных исследований,  
г.Дубна Московской области.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ОИЯИ.

Ученый секретарь Совета кандидат физико-математических наук	В.И.Журавлев
--	--------------

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Исследования механизма пион-ядерного взаимодействия при промежуточных энергиях ( $0 \leq T_{\pi} \leq 300$  МэВ) являются актуальными в связи со следующими обстоятельствами:

1. Введение в строй мощных "мезонных фабрик" дало возможность получить большое количество новой экспериментальной информации о взаимодействии пионов с ядрами. Причем степень точности экспериментальных данных существенно возросла. Поэтому назрела необходимость в разработке таких теоретических моделей, которые не только удовлетворительно описывали бы отдельные качественные характеристики пион-ядерной динамики, но и давали бы точные количественные предсказания. Для осуществления этой программы необходимо выйти за рамки простой стандартной картины рассмотрения  $\pi A$ -рассеяния как процесса взаимодействия пиона с не взаимодействующими, нескоррелированными внутри ядра нуклонами и приступить к изучению таких фундаментальных особенностей пион-ядерной динамики, как отличие пион-нуклонного взаимодействия в среде от свободного  $\pi N$ -взаимодействия, влияние нуклон-нуклонных корреляций на  $\pi A$ -рассеяние, учет эффектов истинного поглощения пионов, а также к учету мезонных степеней свободы ядра. Практически изучение всех этих интересных эффектов начинается с исследования членов, квадратичных по ядерной плотности, и может быть осуществлено в рамках оптической модели с потенциалом второго порядка.

2. Помимо важной самостоятельной задачи исследования механизма пион-ядерного взаимодействия существует не менее важная проблема получения из данных по  $\pi A$ -рассеянию новой информации о структуре ядер. Из этого круга задач в диссертации рассмотрена проблема определения магнитного радиуса  ${}^3\text{He}$  из данных по  $\pi$ - ${}^3\text{He}$ -рассеянию. Интерес к изучению этой проблемы возник после того, как в ряде работ [1-4] появилось утверждение о том, что характеристики  $\pi$ - ${}^3\text{He}$ -рассеяния (в особенности реакции перезарядки пионов на  ${}^3\text{He}$ ) исключительно сильно чувствительны к величине магнитного радиуса  ${}^3\text{He}$ . На основании этого в итоговом докладе на конференции "Будущее исследований взаимодействий пионов с ядрами на мезонных фабриках" в Ванкувере [5] отмечалось, что опыты по изучению  $\pi$ - ${}^3\text{He}$ -рассеяния для определения магнитного радиуса  ${}^3\text{He}$  должны быть отнесены к категории экспериментов "наивысшего приоритета".

Объединенный институт  
ядерных исследований  
БИБЛИОТЕКА

3. Наконец, показано, что, изучая пион-ядерное рассеяние при промежуточных энергиях, можно решить некоторые проблемы, имеющие значение как для физики вообще, так и для физики элементарных частиц в частности. В качестве примеров таких задач можно привести исследование нарушения зарядовой симметрии в сильных взаимодействиях и поиски дибарьонных резонансов в  $\pi d$ -рассеянии. В диссертации показано, что знание некоторых характеристик  $\pi^3\text{He}$ -рассеяния имеет важное значение для решения астрофизических проблем, связанных с возможным существованием антивещества в ранней Вселенной.

Изучение взаимодействия пионов с изотопами гелия имеет то очевидное преимущество, что малое число нуклонов в ядре позволяет рассматривать  $\pi^4\text{He}$ ,  $\pi^3\text{He}$ -реакции достаточно точно, без сильных усложнений, связанных с учетом взаимодействий в начальном и конечном состояниях. Вместе с тем в пион-гелиевом рассеянии можно ясно выделить все основные характеристики пион-ядерной динамики.

Цель работы – детальное исследование относительной роли различных эффектов второго порядка в упругом рассеянии пионов на  $^4\text{He}$ , включая рассмотрение дальнедействующих нуклон-нуклонных корреляций, связанных с отдачей ядра, процессов перезарядки пиона в промежуточном состоянии, поправки к импульсному приближению, учет эффектов истинного поглощения пионов; сравнение во втором порядке результатов расчетов, выполненных в рамках двух подходов в теории многократного рассеяния – Ватсона и Кермана-МакМануса-Талера; объяснение резкой энергетической зависимости расчетов с потенциалом второго порядка и выяснение того, какие эффекты второго порядка доминируют в различных областях энергии налетающего пиона; исследование проблемы определения магнитного радиуса  $^3\text{He}$  из данных по  $\pi^3\text{He}$ -рассеянию; интерпретация с помощью оптической модели результатов фазового анализа  $\pi^4\text{He}$ -рассеяния; демонстрация важности знания характеристик  $\pi^3\text{He}$ -рассеяния для решения ряда астрофизических проблем.

Научная новизна и практическая ценность диссертационной работы заключаются в том, что впервые:

– было проведено детальное исследование относительной роли всех эффектов, возникающих при учете потенциала второго порядка, включая рассмотрение влияния истинного поглощения пионов на упругое  $\pi^4\text{He}$ -рассеяние; показано, какие эффекты вносят доминирующий вклад в расчеты с потенциалом второго порядка, а какими можно пренебречь;

– при рассмотрении потенциала второго порядка учитывалась полная структура пион-нуклонной амплитуды и не делалось никаких дополнительных упрощающих предположений по сравнению с теми, что использовались при вычислении потенциала первого порядка;

– проведено сравнение величины эффектов второго порядка в двух формализмах теории многократного рассеяния – Ватсона и Кермана-МакМануса-Талера;

– показано, что дифференциальные сечения реакции перезарядки пионов на  $^3\text{He}$  очень слабо меняются при варьировании величины магнитного радиуса  $^3\text{He}$ . В явном виде продемонстрировано, в чем состояла ошибка авторов предыдущих работ, утверждавших прямо противоположное;

– обнаружено, что  $\pi^4\text{He}$ -рассеяние становится все более неупругим, начиная уже с энергии  $T_\pi \leq 50$  МэВ, и такое поведение не может быть объяснено усилением относительной роли канала истинного поглощения пионов;

– показано, что энергетическое поведение фазы  $S$ -волн в упругом  $\pi^4\text{He}$ -рассеянии обусловлено главным образом пион-нуклонным взаимодействием в  $P_{33}$ -волне;

– обнаружен эффект подавления сечения реакций неупругого  $\pi^4\text{He}$ -рассеяния в  $S$ -волне при энергиях  $T_\pi = 50-80$  МэВ;

– обоснована важность знания характеристик  $\pi^3\text{He}$ -рассеяния для решения ряда астрофизических проблем, связанных с возможным существованием антивещества в ранней Вселенной.

Исследования по анализу важных эффектов перезарядки пиона в промежуточном состоянии, выполненные в диссертации, подводят количественную базу под экспериментальные поиски распадов виртуальных пионов, которые могут дать ценную информацию о мезонных степенях свободы в ядре. В диссертации приводится и обосновывается наиболее экономная программа экспериментальных измерений, необходимых для решения ряда астрофизических проблем. Эта программа осуществляется в рамках сотрудничества Дубна-Турин на ускорителе LEAR в ЦЕРН/9/.

Для зашиты выдвигаются следующие результаты:

1. Количественно обоснована главенствующая роль процессов перезарядки пионов в промежуточном состоянии среди всех остальных эффектов второго порядка по  $\pi N$ -взаимодействию, вносящих вклад в упругое рассеяние пионов на  $^4\text{He}$  при малых энергиях ( $T_\pi \leq 50$  МэВ).

2. Показано, что пространственные нуклон-нуклонные корреляции в ядре практически не сказываются в упругом рассеянии пионов на  $^4\text{He}$ .

3. Исследованы эффекты перерассеяния пиона на энергетической  $\pi A$ -поверхности. Показано, что они вносят определяющий вклад в упругое рассеяние пионов на легких ядрах. Учет потенциала второго порядка существенно уменьшает степень чувствительности сечений  $\pi^4\text{He}$ -рассеяния к различным продолжениям пион-нуклонной амплитуды рассеяния вне энергетической  $\pi N$ -поверхности.

4. Продемонстрирована необходимость рассмотрения процессов истинного поглощения пионов наряду со всеми остальными эффектами второ-

го порядка, возникающими в упругом рассеянии пионов. Учет истинного поглощения пионов существенно улучшает согласие расчетов с потенциалом второго порядка с экспериментальными данными.

5. Обнаружена более быстрая сходимость ряда многократного рассеяния в подходе Кермана-МакМануса-Талера, чем в подходе Ватсона.

6. Показано, что энергетическое поведение фазы  $S$ -волны в упругом  $\pi^+ \text{He}$ -рассеянии обусловлено главным образом пион-нуклонным взаимодействием в  $P_{33}$ -волне. Обнаружен эффект подавления сечения реакций неупругого  $\pi^+ \text{He}$ -рассеяния в  $S$ -волне при энергиях  $T_{\pi} = 50-80$  МэВ.

7. Найдено, что дифференциальные сечения реакции  ${}^3\text{He}(\pi^+, \pi^0){}^3\text{He}$  слабо меняются при варьировании величины магнитного радиуса  ${}^3\text{He}$ .

8. Обоснована важность знания характеристик  $\pi^+ \text{He}$ -рассеяния для решения ряда астрофизических проблем, связанных с возможным существованием антивещества в ранней Вселенной.

Апробация работы. Результаты, полученные в диссертации, обсуждались на семинарах ЛЯП и ЛТФ ОИЯИ, докладывались на Всесоюзных совещаниях по теории систем с сильным взаимодействием (Ташкент, 1979 г.; Тбилиси, 1980 г.), на Всесоюзных семинарах "Программа экспериментальных исследований на мезонной фабрике ИЯИ АН СССР" (Звенигород, 1981, 1983 гг.), представлялись на IX Международную конференцию по физике элементарных частиц и структуре ядра (Версаль, 1981 г.), на XXI Международную конференцию по физике высоких энергий (Париж, 1982 г.) и на X Международную конференцию по проблеме нескольких тел (Карлсруэ, 1983 г.).

Публикации. По материалам диссертации опубликовано девять работ.

Объем работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав и заключения, содержит 137 страниц машинописного текста, 19 рисунков, 8 таблиц. Библиографический список включает 160 наименований.

#### СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении кратко обсуждается современное состояние исследований пион-ядерного взаимодействия при промежуточных энергиях. Дается критический анализ работ, в которых изучались эффекты второго порядка в  $\pi^+ \text{He}$ -рассеянии. Обсуждаются предложения, выдвинутые в [1-4], по измерению магнитного радиуса  ${}^3\text{He}$  в  $\pi^+ \text{He}$ -рассеянии. Рассмотрена общая структура диссертации.

В первой главе приводятся основные положения теории многократного рассеяния и обсуждаются стандартные приближения, которые обычно делаются в оптической модели. Рассматривается общий вид оптических потенциалов первого и второго порядков. Все основные соотношения за-

писаны в двух формулировках как в подходе Ватсона, так и в подходе Кермана-МакМануса-Талера (КМТ). Проводится сравнение между этими двумя формализмами теории многократного рассеяния.

Во второй главе содержится описание процедуры построения оптического потенциала первого порядка и исследуется вопрос о том, насколько дифференциальные сечения реакции  ${}^3\text{He}(\pi^+, \pi^0){}^3\text{He}$  чувствительны к изменению магнитного радиуса  ${}^3\text{He}$ .

В разделе П.1.1 обсуждается проблема выбора энергии  $\omega$ , при которой необходимо вычислять двухчастичную пион-нуклонную  $t$ -матрицу. Эта задача возникает в импульсном приближении, когда многочастичный оператор  $\mathcal{Q}(E)$ , ответственный за рассеяние пиона на связанном нуклоне ядра, аппроксимируется двухчастичным оператором  $t(\omega)$ , описывающим рассеяние пиона на свободном нуклоне. Рассматривается так называемый трехчастичный выбор энергии  $\omega$ , предложенный в работе [6].

В разделе П.1.2 показано, что учет ферми-движения нуклонов ядра, который необходимо выполнить при усреднении оптического потенциала первого порядка  $U^{(1)}$  по основному состоянию ядра, может быть сделан таким образом, чтобы получить следующее факторизованное выражение:

$$U_{oo}^{(1)}(E) = (A-S) \langle \bar{q}_{f,o} | t(z_o) | \bar{q}_{i,o} \rangle F_{oo}(\bar{q}' - \bar{q}), \quad (1)$$

где  $F_{oo}(\bar{q}' - \bar{q})$  - фактор ядра,  $A$  - число нуклонов ядра, коэффициент  $S$  принимает значение 1 для подхода КМТ и равен 0 в формализме Ватсона. Эффективные импульсы  $\bar{q}_{f,o}$ ,  $\bar{q}_{i,o}$  и энергия  $z_o$ , при которых вычисляется  $t$ -матрица, связаны с соответствующими величинами в системе пион-ядро следующими соотношениями:

$$\bar{q}_{f,o} = \bar{q}' - \frac{A-1}{2A} \frac{\mu}{M} (\bar{q}' + \bar{q}), \quad \bar{q}_{i,o} = \bar{q} - \frac{A-1}{2A} \frac{\mu}{M} (\bar{q}' + \bar{q}), \quad (2)$$

$$z_o = E_{АСМ} - \frac{1}{2M} \frac{\mu}{M} \frac{A-1}{A} (\bar{q}' + \bar{q})^2, \quad (3)$$

где  $\bar{q}'$  и  $\bar{q}$  - импульсы пиона в системе масс пион-ядро (АСМ),  $E_{АСМ}$  соответствующая энергия пиона,  $\mu$  и  $M$  - приведенные массы систем  $\pi N$  и  $\pi A$ ,  $M$  - масса нуклона. Обсуждается степень точности такого приближения и проводится сравнение с другими способами учета ферми-движения и выбора энергии  $\omega$ .

В разделах П.1.3 и П.1.4 рассмотрена параметризация  $\pi N$ -амплитуды, используемой в наших расчетах, а также трансформационные свойства  $\pi N$   $t$ -матрицы и проблема углового преобразования.

В разделе П.1.5 описано разложение оптического потенциала  $U^{(1)}$  по парциальным волнам и рассмотрена процедура решения интегрального уравнения Липмана-Швингера с потенциалом  $U^{(1)}$ .

Учет кулоновских эффектов и конкретные выражения для используемых ядерных формфакторов содержатся в разделах П.1.6 и П.1.7.

Во второй части главы II подробно исследуется проблема определения магнитного радиуса  ${}^3\text{He}$  из данных по рассеянию пионов на  ${}^3\text{He}$ .

В разделе П.2.1 показано, что для решения задачи упругого  $\pi$ - ${}^3\text{He}$ -рассеяния необходимо знать четыре ядерных формфактора. Эти формфакторы можно выразить через зарядовые и магнитные формфакторы  ${}^3\text{He}$  и  ${}^3\text{H}$ , которые извлекаются из данных по рассеянию электронов. Результаты расчетов упругого  $\pi$ - ${}^3\text{He}$ -рассеяния, а также реакции  ${}^3\text{He}(\pi^-, \pi^0){}^3\text{H}$ , которые приведены на рис.1, показывают очень слабую чувствительность дифференциальных сечений этих реакций к варьированию величины магнитного радиуса  ${}^3\text{He}$ , что противоречит выводам, сделанным в работах /1-4/. Подробное рассмотрение приближений, используемых в /1-4/ (раздел П.2.3), показало, что причина завышенной чувствительности сечений реакции  ${}^3\text{He}(\pi^-, \pi^0){}^3\text{H}$  (см. рис.2) к изменению величины магнитного радиуса  ${}^3\text{He}$  состоит в неоправданном пренебрежении примесью  $\mathcal{D}$ -волновой компоненты волновой функции основного состояния трехнуклонной системы.

В разделе П.2.4 результаты нашей работы сопоставляются с расчетами других авторов, подтверждающих нашу точку зрения. Основные выводы главы II содержатся в разделе П.2.5.

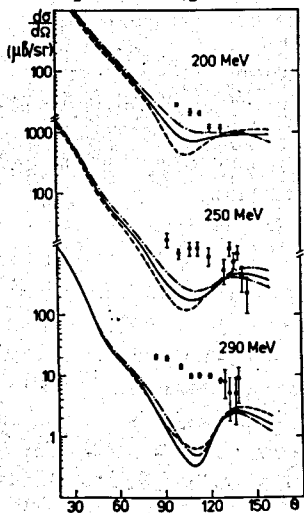


Рис.1 Расчет дифференциальных сечений реакции  ${}^3\text{He}(\pi^-, \pi^0){}^3\text{H}$  при разных значениях магнитного радиуса  $R_m$   ${}^3\text{He}$ .  
—  $R_m = 1,95$  фм, ----  $R_m = 1,75$  фм, - · - · -  $R_m = 2,15$  фм.

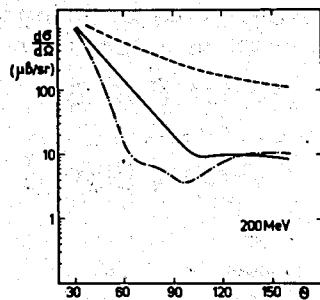


Рис.2 Расчет дифференциальных сечений реакции  ${}^3\text{He}(\pi^-, \pi^0){}^3\text{H}$ . Ядерные формфакторы вычислялись согласно предписаниям работ /1-4/. Обозначения те же, что на рис.1.

В третьей главе рассматривается оптическая модель с потенциалом второго порядка применительно к изучению упругого рассеяния пионов на  ${}^4\text{He}$ .

В разделе III.1 приводится общий вид потенциала второго порядка  $U^{(2)}$ :

$$\langle 0 \tilde{Q} | U^{(2)}(E) | 0 \tilde{Q} \rangle = \frac{1}{(2\pi)^3} \int \left\{ \langle \tilde{q}_{f,2} | t(z_2) | \tilde{q}_{i,2} \rangle \langle \tilde{q}_{f,1} | t(z_1) | \tilde{q}_{i,1} \rangle \right. \\ \left. * (A-1)(A-S) C_{00}(\tilde{Q}' - \tilde{Q}'', \tilde{Q}'' - \tilde{Q}) - (A-S)^2 \langle \tilde{q}_{f,2} | t(z_2) | \tilde{q}_{i,2} \rangle \right. \\ \left. J_{\infty}(\tilde{Q}' - \tilde{Q}'') J_{\infty}(\tilde{Q}'' - \tilde{Q}) \langle \tilde{q}_{f,1} | t(z_1) | \tilde{q}_{i,1} \rangle \right\} \frac{d\tilde{Q}''}{E - E(Q'') + i\epsilon} \quad (4)$$

где эффективные импульсы  $\tilde{q}_{f,2}(\tilde{q}_{f,1})$ ,  $\tilde{q}_{i,2}(\tilde{q}_{i,1})$  и энергии  $z_2(z_1)$  выражаются через импульсы пиона в АСМ  $\tilde{Q}'$  и  $\tilde{Q}''$  ( $\tilde{Q}''$  и  $\tilde{Q}$ ) точно так же, как и импульсы  $\tilde{q}_{f,0}$ ,  $\tilde{q}_{i,0}$  и  $z_0$  (см. соотношения (2)-(3)). Черта над матричными элементами  $t$ -матриц показывает, каким образом осуществляется усреднение по спин-изоспиновым компонентам волновой функции основного состояния. В выражении (4) входит двухчастичная корреляционная функция  $C_{00}(\tilde{q}_1, \tilde{q}_2)$ , процедура построения которой разбирается в разделе III.1.1. В наших расчетах учитывались только дальнедействующие  $NN$ -корреляции, связанные с отдачей ядра. Как показано в работах /7,8/, короткодействующие  $NN$ -корреляции практически не сказываются в упругом пион-ядерном рассеянии.

В разделе III.1.2 описаны процедуры разложения  $U^{(2)}$  по парциальным волнам и вычисления соответствующих интегралов. Отметим, что в отличие от других работ /7,8/ мы учитывали ферми-движение нуклонов и в потенциале  $U^{(2)}$ .

Вторая часть главы III посвящена рассмотрению результатов вычислений упругого  $\pi$ - ${}^4\text{He}$  с потенциалом  $U^{(2)}$ . В разделе III.2.1 рассмотрено, как меняются дифференциальные и полные сечения рассеяния пионов на  ${}^4\text{He}$  при учете  $U^{(2)}$ . Показано, что характер изменений, вносимых потенциалом  $U^{(2)}$ , сильно зависит от энергии пиона.

В разделе III.2.2 обсуждается вопрос о роли корреляций, связанных с отдачей ядра. Показано, что такие корреляции заметно влияют на упругое рассеяние пионов лишь при достаточно больших энергиях ( $T_{\pi} \gg 200$  МэВ).

В разделе III.2.3 обсуждается роль процессов двойного спин-, изо-спин-флипа пионов в промежуточном состоянии. Показано, что при малых энергиях в потенциале второго порядка доминируют процессы с перезарядкой пиона в промежуточном состоянии (см. рис.3).

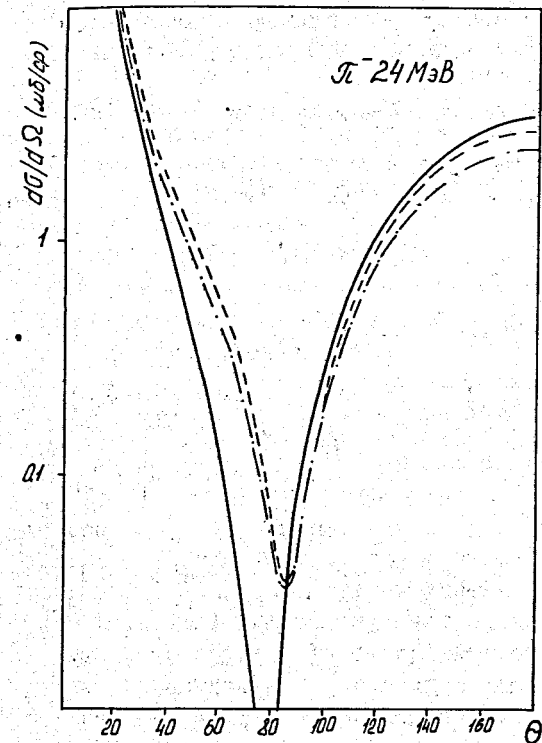


Рис.3 Расчет упругого  $\pi^-$ -рассеяния. Пунктиром показаны результаты вычислений с потенциалом  $U^{(1)}$ , сплошной линией — с  $U^{(1)} + U^{(2)}$ . Если же в  $U^{(2)}$  пренебречь процессами перезарядки в промежуточном состоянии, то получится результат, показанный штрих-пунктирной линией.

Поправка к импульсному приближению, которая содержится в потенциале  $U^{(2)}$ , анализируется в разделе III.2.3. Показано, что величина этой поправки довольно значительна, однако она в большой степени компенсируется поправкой к приближению когерентного рассеяния.

В разделе III.2.5 проводится сравнение результатов расчетов с в двух формализмах теории многократного рассеяния — Ватсона и КМТ. Показано, что сходимость ряда многократного рассеяния в подходе КМТ несколько лучше, чем в формализме Ватсона.

Эффекты схода с энергетической поверхности в упругом рассеянии пионов на ядрах  $^3\text{He}$  и  $^4\text{He}$  рассмотрены в разделе III.2.6. Показано, что основную роль как в потенциале  $U^{(1)}$ , так и в потенциале  $U^{(2)}$  играют процессы перерассеяния пиона на энергетической  $\pi N$ -поверхности. Отмечается, что учет потенциала  $U^{(2)}$  снижает зависимость сечений упругого рассеяния пионов от различных продолжений пион-нуклонной амплитуды вне энергетической  $\pi N$ -поверхности.

В разделе III.2.7 оценивается роль эффектов истинного поглощения. Предполагалось, что основным механизмом поглощения является двухнуклонный механизм и соответствующий абсорбтивный потенциал имеет вид:

$$U^{abs}(\vec{q}', \vec{q}, E(q_0)) = -\frac{2\pi}{m_\pi} A(A-1) \left\{ B_0 \frac{g(q)g(q')}{g^2(q_0)} + C_0 \frac{g(q')g(q)}{g^2(q_0)} \vec{q}' \vec{q} \right\} \hat{\rho}^2(z),$$

где константы  $B_0$  и  $C_0$  определялись из данных по  $\pi^-$ -мезоатомам,  $\hat{\rho}^2(z)$  — фурье-образ квадрата ядерной плотности, а формфакторы  $g(q)$  вводились для того, чтобы компенсировать предположение о чисто локальном характере поглощения пиона.

Как видно из рис.4, добавление  $U^{abs}$  к потенциалу  $U^{(1)} + U^{(2)}$  приводит к существенному заполнению того глубокого минимума, который возникает в расчетах  $d\sigma/d\Omega$  с потенциалом  $U^{(1)} + U^{(2)}$ . Таким образом, то улучшение описания экспериментальных данных по  $d\sigma/d\Omega$  на малые углы, которое дает добавление к  $U^{(1)}$  потенциала второго

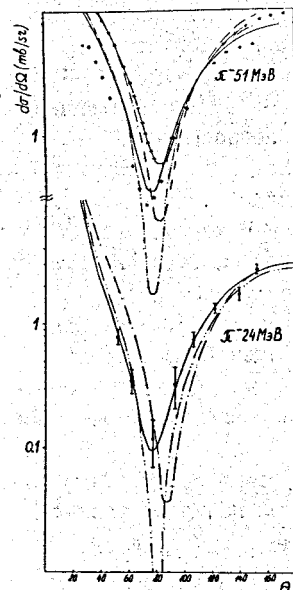


Рис.4 Влияние канала истинного поглощения пиона на упругое рассеяние  $\pi^-$  на  $^4\text{He}$ . Результаты вычислений с потенциалом  $U^{(1)}$  — — —, с  $U^{(1)} + U^{(2)}$  — — — — —, с  $U^{(1)} + U^{(2)} + U^{abs}$  — — — — —, с  $U^{(1)} + U^{abs}$  — — — — —.

порядка  $U^{(2)}$ , сохраняется, а то расхождение с экспериментом, которое получается в расчетах с  $U^{(2)}$  в области минимума, существенно ликвидируется при учете  $U^{abs}$ . Показано также, что добавление  $U^{abs}$  только к потенциалу первого порядка не приводит к улучшению согласия с экспериментом.

В разделе III.2.8 обсуждается энергетическая зависимость потенциала  $U^{(2)}$ . Показано, что она не является следствием каких-то приближений, используемых в модели, а является отражением резонансной природы пион-нуклонного взаимодействия.

Сравнение с результатами расчетов других авторов и основные выводы главы III приведены в разделах III.3 и III.3.1.

В главе IV содержатся результаты применения оптической модели для интерпретации фазового анализа упругого  $\pi^-$  на  $^4\text{He}$ -рассеяния. В качестве иллюстрации тех возможностей, которые предоставляет изучение взаимодействий пионов с легкими ядрами, рассмотрена связь между  $\pi^-$  на  $^3\text{He}$ -рассеянием и некоторыми астрофизическими проблемами.

В разделе IV.1.1 обсуждается процедура выполнения зависящего от энергии фазового анализа  $\pi^+$ He-рассеяния. В разделе IV.1.2 рассмотрена зависимость величины отношения  $\chi = \sigma_{el} / \sigma_{tot}$  от энергии пиона. Показано, что  $\pi^+$ He-рассеяние становится все более неупругим, начиная уже с энергий  $T_\pi \leq 50$  МэВ, причем это обстоятельство не связано с усилением роли истинного поглощения при малых энергиях.

В разделе IV.1.3 с помощью оптической модели проанализирована зависимость фазы  $S$ -волны  $\pi^+$ He-рассеяния от энергии. Показано, что главную роль, определяющую энергетическое поведение парциальной амплитуды  $\pi^+$ He-рассеяния в  $S$ -волне, играет резонансная  $P_{33}$ -волна  $\pi N$ -взаимодействия.

В разделе IV.1.4 обсуждается эффект резкого подавления неупругого  $\pi^+$ He-взаимодействия в  $S$ -волне при энергиях  $T_\pi = 50-80$  МэВ, который был обнаружен в фазовом анализе.

Во второй части главы IV обсуждаются астрофизические аспекты  $\pi^+$ He-рассеяния. В разделе IV.2 дается общая постановка проблемы существования антивещества в ранней Вселенной. Я.Б.Зельдовичем было высказано предположение о том, как можно получить ограничение на количество антивещества, возможно существовавшего в ранней Вселенной (до момента  $t \leq 10^{13}$  с с начала расширения Вселенной). Суть его состоит в том, что аннигиляция антипротонов с  $^4\text{He}$ , которая могла происходить в ранней Вселенной, должна сильно изменять концентрацию легких элементов ( $^3\text{He}$  и дейтерия). Так как наблюдаемые концентрации  $^4\text{He}$  и  $^3\text{He}$  (а также дейтерия) отличаются на три порядка по величине, то достаточно, чтобы во Вселенной существовало относительно небольшое количество антивещества, чтобы создать всю наблюдаемую сегодня концентрацию  $^3\text{He}$  и дейтерия. Таким образом, зная концентрации легких элементов во Вселенной и измеряя эффективные выходы  $^3\text{He}$  и  $d$  в аннигиляции антипротонов с  $^4\text{He}$ , можно получить ограничение на количество антивещества в ранней Вселенной.

В разделе IV.2.1 обсуждается процедура измерения эффективных выходов  $^3\text{He}$  и  $d$  в  $^4\text{He}$ -аннигиляции. Обосновывается наиболее экономная программа экспериментальных измерений, которые надо провести для получения результатов, необходимых для астрофизики. Особое внимание уделено процессам изменения эффективных выходов  $^3\text{He}$  и  $d$  за счет взаимодействия аннигиляционных пионов с трехнуклонным ядром-остатком. Показано, что такое взаимодействие в конечном состоянии может существенно изменять относительную величину эффективных выходов  $^3\text{He}$  и дейтерия. В рамках оптической модели с потенциалом  $U^{(n)}$  рассчитаны полные сечения  $\pi^+$ He-взаимодействия и с их помощью оценено ожидаемое изменение эффективных выходов легких элементов в  $^4\text{He}$ -аннигиляции.

В разделе IV.3 приведены основные выводы главы IV.

В заключении дается перечисление полученных в диссертации результатов и формулируются основные выводы работы.

#### Основные результаты, полученные в диссертации:

I. Проведено детальное исследование эффектов второго порядка, возникающих в упругом рассеянии пионов на  $^4\text{He}$ . Показано, что при малых энергиях основной вклад в потенциал второго порядка  $U^{(2)}$  дают процессы с перезарядкой пиона в промежуточном состоянии. Дальнействующие  $N-N$ -корреляции, связанные с отдачей ядра, практически не влияют на упругое  $\pi^+$ He-рассеяние. Сходимость ряда многократного рассеяния в подходе КМТ несколько лучше, чем в подходе Ватсона. Поправка к импульсному приближению, содержащаяся в потенциале  $U^{(2)}$ , имеет довольно значительную величину, но в большой степени компенсируется поправкой к приближению когерентного рассеяния. Эффекты перерассеяния пиона на энергетической  $\pi$  A-поверхности вносят определяющий вклад в упругое рассеяние пионов на легких ядрах. Учет потенциала второго порядка существенно уменьшает степень чувствительности сечений  $\pi^+$ He-рассеяния к различным продолжениям  $\pi N$ -амплитуды рассеяния вне энергетической  $\pi N$ -поверхности. Учет истинного поглощения пионов существенно улучшает согласие расчетов с экспериментальными данными. Процессы истинного поглощения необходимо рассматривать наряду со всеми остальными эффектами второго порядка. Резкая энергетическая зависимость результатов расчетов с  $U^{(2)}$  не является следствием каких-либо приближений, допущенных в модели, а есть проявление резонансной природы  $\pi N$ -взаимодействия.

2. Дифференциальные сечения реакции  $^3\text{He}(\pi^-, \pi^0)^3\text{He}$  слабо меняются при варьировании величины магнитного радиуса  $^3\text{He}$ .

3. Величина отношения  $\chi = \sigma_{el} / \sigma_{tot}$  для  $\pi^+$ He-рассеяния падает уже при энергиях  $T_\pi \leq 50$  МэВ, причем это усиление вклада неупругих реакций в полное сечение  $\pi^+$ He-рассеяния не связано с повышением относительной роли канала истинного поглощения. Обнаружено подавление сечения неупругих  $\pi^+$ He-реакций в  $S$ -волне при энергиях  $T_\pi = 50-80$  МэВ. Главную роль, определяющую энергетическое поведение фазы  $S$ -волны упругого  $\pi^+$ He-рассеяния, играет резонансная  $P_{33}$ -волна в  $\pi N$ -взаимодействии.

4. Знание характеристик  $\pi^+$ He-рассеяния важно для решения ряда астрофизических проблем, связанных с возможным существованием антивещества в ранней Вселенной.

#### Результаты диссертации опубликованы в работах:

1. Ф.Никитиу, М.Г.Сапожников. "Интерпретация результатов фазового анализа  $\pi^+$ He-рассеяния". Ядерная физика, 1983, т.37, с.1209-1219.
2. Р.Мах, М.Г.Сапожников. "О чувствительности пион-ядерного рассеяния к структуре ядра". В сборнике: Труды II Всесоюзного семинара "Про-



грамма экспериментальных исследований на мезонной фабрике ИИИ АН СССР". Изд-во ИИИ, М., 1982, с.118-121.

3. М.Гмитро, С.С.Камалов, Р.Мах, М.Г.Сапожников. "Эффекты схода пиона с энергетической поверхности в упругом рассеянии  $\pi^-$ -мезонов на ядрах". Препринт ОИЯИ, Р4-83-403, Дубна, 1983.
4. Ф.Балестра, Г.Пираджино, Д.Б.Понтекорво, М.Г.Сапожников, И.В.Фаломкин, М.Ю.Хлопов. "Аннигиляция  $p^+$ He при низких энергиях и ее связь с проблемами современной космологии и моделями великого объединения". Препринт ОИЯИ, I-83-338, Дубна, 1983.
5. R.Mach, M.G.Sapozhnikov. "Nuclear structure sensitivity in the reaction  $^3\text{He}(\pi^-, \pi^0)^3\text{H}$ ". Journal of Physics G., 1982, v.8, p. L117-L120.
6. R.Mach, M.G.Sapozhnikov. "Investigation of second-order optical potential for elastic  $\pi^+$ He scattering". JINR preprint, E4-82-189, Dubna, 1982.
7. V.M.Chechetkin, M.Yu.Khlopov, M.G.Sapozhnikov, Ya.B.Zeldovich. "Astrophysical aspects of antiproton interaction with  $^4\text{He}$ ". Phys.Lett., 1982, v. B118, p.329-332.
8. V.M.Chechetkin, M.Yu.Khlopov, M.G.Sapozhnikov. "Antiproton interaction with light elements as a test of GUT cosmology". Rivista del Nuov. Cim., 1982, v.5, No.10, p.1-79.
9. R.Mach, M.G.Sapozhnikov. "Investigation of effects of second-order optical potential for elastic  $\pi^+$ He scattering". Proc. IX Int. Conf. on High Energy Physics and Nuclear Structure, Versailles, 1981, p.255.

#### Список литературы

1. Landau R. Ann.Phys., 1975, v.92, p.205.
2. Landau R. Phys.Rev., 1977, v. C15, p.2127.
3. Landau R. TRIUMF Workshop on the Future of Pion-Nucleus Interactions, 1979, Vancouver, TRI-79-2, p.5.
4. Landau R. Proc. Int. Conf. on High Energy Physics and Nuclear Structure, Vancouver, 1979.
5. Thomas A.W. TRIUMF Workshop on the Future of Pion-Nucleus Interactions, 1979, TRI-79-2, p.13.
6. Mach R. Preprint JINR, E2-12597, E2-12932, Dubna, 1979.
7. Wakamatsu M. Nucl.Phys., 1978, v. A312, p.427.
8. Lee T.S., Chakravarti S. Phys.Rev., 1977, v. C16, p.273.
9. Balestra F. et al. CERN Report, PSCC/80-78, Geneva, 1980.

Рукопись поступила в издательский отдел  
18 ноября 1983 года.