

С346

М-82

В.И.Москалев

1039

ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ОТРИЦАТЕЛЬНЫХ П-МЕЗОНОВ
С ПРОТОНАМИ И ЯДРАМИ ГЕЛИЯ
ПРИ ЭНЕРГИИ 150 МЭВ
И НЕКОТОРЫЕ РЕДКИЕ ВИДЫ
РАСПАДОВ П-МЕЗОНОВ

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

Научный руководитель
доктор физико-математических наук
профессор

В.П.Джелепов

Дубна 1962 год

В.И.Москалев

1039

С346

М-82

107869.
ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ОТРИЦАТЕЛЬНЫХ П-МЕЗОНОВ
С ПРОТОНАМИ И ЯДРАМИ ГЕЛИЯ
ПРИ ЭНЕРГИИ 150 МЭВ
И НЕКОТОРЫЕ РЕДКИЕ ВИДЫ
РАСПАДОВ П-МЕЗОНОВ

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

Научный руководитель
доктор физико-математических наук
профессор

В.П.Джелепов

Дубна 1962 год

Объединенный институт
ядерных исследований
БИБЛИОТЕКА

В последние годы большое внимание было уделено исследованию основных закономерностей взаимодействия π^- -мезонов с нуклонами и сложными ядрами. В связи с невозможностью применения к сильным взаимодействиям теории возмущений большое значение для анализа экспериментальных данных приобрели методы, устанавливающие свойства системы π^- -мезон-нуклон из общих физических принципов. Так, исходя из требования выполнения условий причинности были выведены дисперсионные соотношения - интегральные соотношения, связывающие действительную и мнимую части амплитуды рассеяния вперед. Важность экспериментальной проверки дисперсионных соотношений обусловлена возможностью непосредственного испытания пригодности положенных в основу их вывода фундаментальных физических предположений и, в первую очередь, принципа микроскопической причинности. Интерес к опытной проверке дисперсионных соотношений был в значительной мере повышен и отмеченным в 1957 г. Пуппи и Стангеллини /1/ несоответствием имевшихся в то время экспериментальных данных по упругому рассеянию отрицательных π^- -мезонов протонами в дорезонансной области энергий и данных, получаемых их дисперсионных соотношений. В связи с этим было необходимо получение новых опытных данных по упругому π^- - p -рассеянию в области энергий 100-200 Мэв и сравнение их с предсказаниями дисперсионных соотношений.

Интересным представлялось и более тщательное изучение взаимодействия π^- -мезонов с ядром He^4 - одним из самых легких и в то же время сравнительно мало изученных ядер, так как оно дает возможность проверки пригодности для ядра гелия модельных представлений, развитых для более тяжелых ядер (оптическая модель и др.). Кроме того, при исследовании соударений быстрых частиц с ядрами, состоящими всего из нескольких нуклонов, особенно четко должны проявляться особенности, связанные с квазисвободным характером взаимодействия налетающей частицы и внутриядерного нуклона.

Широкое развитие в последнее время получили также экспериментальные исследования распадных свойств обычных и странных частиц. Изучение свойств редких видов распадов, происходящих в результате слабого взаимодействия, сыграло большую роль в подтверждении основных положений современной теории слабого взаимодействия и, в частности, универсальной четырехфермионной теории Ферми. Исследования электромагнитных распадов существенны с точки зрения возможности выяснения границ применимости квантовой электродинамики.

В представленной диссертации обобщены результаты экспериментального исследования взаимодействия отрицательных π^- -мезонов с протонами и ядрами

гелия при энергиях около 150 Мэв, а также изучения некоторых редких видов распадов π^- -мезонов, проведенных автором совместно с В.И. Дзепеловым, И.Ф. Ермоловым, Ю.А. Будаговым, Е.А. Кушниренко и С.Виктором в течение 1958-1961 г.г. в Объединенном институте ядерных исследований. Работа выполнена с помощью диффузионной камеры высокого давления, работающей в магнитном поле.

В главе I описана конструкция и основные характеристики диффузионной камеры и других узлов экспериментальной установки, а также методы обработки экспериментальных данных.

В главе II приводятся результаты исследования взаимодействия π^- -мезонов с протонами при энергиях 128 и 162 Мэв. Основное внимание уделено изучению упругого $\pi^- - p$ -рассеяния и сравнению результатов с данными, получаемыми из дисперсионных соотношений. Во второй части главы II описываются результаты поиска тормозного излучения при упругом $\pi^- - p$ -рассеянии.

Глава III посвящена исследованию взаимодействия π^- -мезонов с ядрами гелия при энергии 153 Мэв. Приводится детальный анализ полученного углового распределения упругого $\pi^- - He$ -рассеяния на основе оптической модели с прямоугольным комплексным потенциалом и сравнение с теоретическими данными. Приведены также полные сечения, угловые распределения неупруго рассеянных π^- -мезонов и другие характеристики ряда процессов, протекающих при неупругом $\pi^- - He$ взаимодействии.

Большой статистический материал, набранный в настоящей работе, позволил получить некоторые сведения о редких способах распада π^- и π^0 -мезонов. В главе IV описаны впервые зарегистрированный электронный тип распада отрицательных π^- -мезонов $\pi^- \rightarrow e^- + \bar{\nu}$, первый достоверно наблюдаемый случай распада $\pi^0 \rightarrow e^- + e^+ + e^- + e^+$ и некоторые характеристики распада $\pi^0 \rightarrow e^- + e^+ + \gamma$.

В заключение приведены основные результаты и краткие выводы работы.

Материал настоящей диссертации основан на работах [2-10], опубликованных в ЖЭТФ и Nuclear Physics. Основные результаты работы были доложены на конференциях по физике частиц высоких энергий в Киеве (июль 1959 г.) и Рочестере (август 1960 г.); методика исследований обсуждалась на Совещании по камерам Вильсона, диффузионным и пузырьковым камерам в Дубне (ноябрь 1957 г.).

1.

Исследование проведено с помощью диффузионной камеры, сконструированной и построенной в течение 1956-1957 г.г. в Лаборатории ядерных проблем ОИЯИ для работы в магнитном поле с легкими газами (H_2 , D_2 , He) при давлении до 25 атм. Внутренний рабочий диаметр камеры равен 380 мм, высота чувствительного объема

при температурном градиенте 7 град/см составляла 6-7 см. Камера была помещена в постоянное магнитное поле 9000-12000 эрст с неоднородностью по высоте чувствительного объема не более $\pm 4\%$ и по радиусу не более $\pm 3\%$. Фотографирование производилось стереофотоаппаратом с двумя объективами ГОИ "Гелиос-37", фокусное расстояние которых равно 62 мм, на 35-мм пленку Панхром-X с чувствительностью 1000 ед. ГОСТ. Объективы имеют разрешение 50 линий/мм в центре поля зрения. База стереофотоаппарата равна 120 мм, расстояние съемки около 1 м.

Камера экспонировалась в пучке π^- -мезонов от синхротрона ОИЯИ, причем на каждой фотографии в среднем регистрировалось 20-30 следов π^- -мезонов. Средняя энергия π^- -мезонов в камере и их разброс по энергии измерены по радиусам кривизны треков. Примесь μ^- -мезонов и электронов в пучке определена путем снятия кривых поглощения в меди с помощью телескопа сцинтилляционных счетчиков. Цикл работы камеры составлял 8 сек. Управление рабочими операциями камеры и синхронизация запуска камеры и ускорителя осуществлялась специальными электронными схемами. В серии экспозиций было получено 90.000 стереофотографий при работе камеры с водородом и 30.000 стереофотографий - при работе с гелием. Просмотр фотографий производился с помощью стереоскопов. Для обработки случаев взаимодействия использовался в основном репроекционный метод и в некоторых случаях координатный метод.

II.

1. В экспозициях, проведенных при наполнении камеры водородом, зарегистрировано 379 случаев упругого $\pi^- - p$ -рассеяния при энергии π^- -мезонов (128 \pm 8) Мэв и 1113 случаев при энергии (162 \pm 10) Мэв. Полные сечения упругого рассеяния, определенные путем измерения полной длины треков π^- -мезонов в камере, равны $\sigma_e(128 \text{ Мэв}) = (12,8 \pm 1,0) \cdot 10^{-27} \text{ см}^2$ и $\sigma_e(162 \text{ Мэв}) = (21,4 \pm 1,2) \cdot 10^{-27} \text{ см}^2$. Угловые распределения упругого $\pi^- - p$ -рассеяния в с.и. представлены на рис. 1. Сплошные кривые на рис. 1, полученные методом наименьших квадратов в предположении вклада в рассеяние только S- и P-волн, имеют вид:

$$\frac{d\sigma}{d\Omega}(128 \text{ Мэв}) = (1,00 \pm 0,08) \{ (0,55 \pm 0,07) + (0,34 \pm 0,12) \cos \theta + (1,30 \pm 0,34) \cos^2 \theta \} 10^{-27} \frac{\text{см}^2}{\text{стерад}}$$

$$\frac{d\sigma}{d\Omega}(162 \text{ Мэв}) = (1,00 \pm 0,06) \{ (0,93 \pm 0,07) + (0,51 \pm 0,12) \cos \theta + (2,28 \pm 0,22) \cos^2 \theta \} 10^{-27} \frac{\text{см}^2}{\text{стерад}}$$

Дифференциальные сечения рассеяния вперед равны соответственно $(2,20 \pm 0,32) \cdot 10^{-27} \text{ см}^2/\text{стерад}$ и $(3,73 \pm 0,32) \cdot 10^{-27} \text{ см}^2/\text{стерад}$. Действительные части амплитуды рассеяния вперед (в с.и.) равны (в единицах $\hbar/m\pi c$):

$$D^{\pm}(128 \text{ Мэв}) = 0,281 \pm 0,031 \quad \text{и} \quad D^{\pm}(162 \text{ Мэв}) = 0,216 \pm 0,038.$$

Эти величины согласуются со значениями, рассчитанными Клепиковым, Мешеряко-

вым и Соколовым /11/ из дисперсионных соотношений с константой связи $f^2 = 0,08$ (рис. 2). Таким образом, результаты наших измерений и данные выполненных одновременно работ (рис. 2) устраняют отмеченное Пуппи и Стангеллини противоречие между опытом и теорией для рассеяния π^- -мезонов: они свидетельствуют о том, что экспериментальные данные по упругому рассеянию отрицательных π^- -мезонов на протонах также согласуются с дисперсионными соотношениями при $f^2 = 0,08$, как это было ранее установлено для положительных π^+ -мезонов.

2. Произведены поиски тормозного излучения при упругом рассеянии π^- -мезонов протонами $\pi^- + p \rightarrow \pi^- + p + \gamma$. При специальных измерениях не было найдено ни одного случая, в котором угол испускания протона отдачи превышал бы вычисленный из законов сохранения для упругого рассеяния более чем на 3° . На основании этого результата найден верхний предел сечения реакции $\pi^- + p \rightarrow \pi^- + p + \gamma$ при энергии около 150 Мэв $\sigma_\gamma < 5 \cdot 10^{-29} \text{ см}^2$.

III.

Исследовано взаимодействие π^- -мезонов с энергией (153±9) Мэв с ядрами гелия. Зарегистрировано 1802 случая π^- -He-взаимодействия.

1. Полное сечение π^- -He-взаимодействия, сечение упругого π^- -He-рассеяния и сечения ряда неупругих процессов определены путем измерения полной длины треков π^- -мезонов в камере (табл. 1). Сравнение с другими экспериментальными данными /12,13/ показывает, что ход с энергией полного сечения π^- -He

№	Реакция	$\sigma \cdot 10^{-27} \text{ см}^2$	№	Реакция	$\sigma \cdot 10^{-27} \text{ см}^2$
1.	$\pi^- + \text{He}^4 \rightarrow \pi^- + \text{He}^4$	85,0±8,4	5.	$\pi^- + \text{He}^4 \rightarrow \pi^0 + T + n$	80,6±7,2
2.	$\rightarrow \pi^- + \text{He}^3 + n$	53,4±6,1	6.	$\rightarrow \pi^0 + (p, 3n)$	
3.	$\rightarrow \pi^- + T + p$	11,3±2,3	7.	$\rightarrow T + n$	
4.	$\rightarrow \pi^- + (2p, 2n)$	26,0±3,5	8.	$\rightarrow (p, 3n)$	
σ_1 (реакции 1-8)		288±16	σ_2 (реакции 2-8)		171±12

взаимодействия и почти всех парциальных сечений повторяет в основном энергетическую зависимость сечений элементарных π -N-взаимодействий (максимум при энергиях около 200 Мэв).

2. Угловое распределение упругого π^- -He-рассеяния (521 случай) имеет дифракционный характер с четким первым минимумом (80°) и вторичным максимумом (100°) (рис. 3). Расчеты упругого рассеяния на основе оптической модели

с прямоугольным комплексным потенциалом $V = V_R + iV_I$ показали, что наилучшее согласие с опытными данными может быть получено при значениях параметров $V_R = -(18 \pm 7)$ Мэв, $V_I = -(63 \pm 6)$ Мэв, $r_0 = 1,5 \cdot 10^{-13}$ см. Найденные значения потенциалов хорошо согласуются с величинами, рассчитанными Франком, Гаммелем и Ватсоном (ФГВ) /14/ из соотношения, связывающего оптический потенциал с амплитудой рассеяния вперед для свободного π -p-рассеяния (рис. 4). Таким образом, подтверждается правильность основных положений модели ФГВ, в частности, небольшая роль многочастичных сил при взаимодействии π^- -мезонов с внутриядерными нуклонами и независимость глубины потенциальной ямы от размеров ядра. Существенным является также подтверждение значительного влияния на упругое рассеяние π^- -мезонов ядрами сильного π^- -мезон-нуклонного взаимодействия вблизи резонансной энергии (максимум V_I и прохождение через нуль V_R при резонансной энергии). Хорошее согласие экспериментальных и теоретических значений потенциалов указывает также на небольшую роль в упругом рассеянии таких эффектов, рассмотренных ФГВ, как влияние движения нуклонов в ядре, пространственные корреляции внутриядерных нуклонов и др.

3. Измерены угловые распределения π^- -мезонов в реакциях $\pi^- + \text{He}^4 \rightarrow \pi^- + \text{He}^3 + n$ и $\pi^- + \text{He}^4 \rightarrow \pi^- + T + p$ (рис. 5), а также угловое распределение всех неупруго рассеянных π^- -мезонов (реакции 2-4 табл. 1). Существенное отличие характера этих распределений от угловых распределений свободного π -N-рассеяния, наблюдающееся на малых углах, обусловлено, вероятно, запретом малых передач импульсов внутриядерным нуклонам из-за принципа Паули. Расчеты Ватсона и Цемаха /15/ качественно правильно передают характер изменения углового распределения свободного π -N-рассеяния, обусловленного влиянием ядра (сплошные кривые, рис. 5).

4. Оценена вероятность кратного рассеяния π^- -мезонов в ядре He^4 $\sigma_{кр} = 0,29 \pm 0,06$. Сравнение этой величины с другими опытными данными /12/ указывает на относительно большую и почти не зависящую от энергии и природы налетающих частиц роль кратных процессов в ядре He^4 .

5. Оценки дают для сечения неупругого рассеяния π^- -мезонов с перезарядкой $\sigma_{не}$ величину (18-20) $\cdot 10^{-27} \text{ см}^2$. Это значение находится в согласии с данными Блинова и др. /16/ и противоречит результатам Фаулера и др. /13/, согласно которым $\sigma_{не}$ достигает почти 50% неупругого взаимодействия.

6. Получен верхний предел сечения возбуждения виртуального уровня 22 Мэв ядра He^4 $\sigma_{возб} \leq 3,8 \cdot 10^{-27} \text{ см}^2$.

IV.

В последней главе приведены некоторые сведения о редких способах распада π^- и π^0 -мезонов, полученные при обработке статистического материала, описанного в предыдущих главах.

1. Впервые зарегистрирован электронный распад отрицательного π^- -мезона на $\pi^- \rightarrow e^- + \bar{\nu}$ (три случая). Для относительной вероятности этого распада получено значение:

$$\frac{w(\pi^- \rightarrow e^- + \bar{\nu})}{w(\pi^- \rightarrow \mu^- + \bar{\nu})} = (1,2 \pm 0,7) 10^{-4}.$$

Эта величина согласуется с относительной вероятностью электронного распада положительных π^+ -мезонов и значением, вычисленным на основе универсальной $V-A$ теории слабого взаимодействия.

2. Исследовано 27 случаев зарядово-обменного рассеяния $\pi^- + p \rightarrow \pi^0 + n$ с последующим распадом π^0 -мезона по схеме Далитца $\pi^0 \rightarrow e^- + e^+ + \gamma$. Относительная вероятность этого распада равна

$$\frac{w(\pi^0 \rightarrow e^- + e^+ + \gamma)}{w(\pi^0 \rightarrow 2\gamma)} = 0,0117 \pm 0,0015,$$

что находится в хорошем согласии с вычисленной на основе квантовой электродинамики. Экспериментально найденные энергетические характеристики пар и угловые распределения также удовлетворительно согласуются с теоретическими.

3. Зарегистрирован первый достоверный случай распада $\pi^0 \rightarrow e^- + e^+ + e^- + e^+$. Распавшийся π^0 -мезон образовался в результате зарядово-обменного рассеяния $\pi^- + p \rightarrow \pi^0 + n$. Оценка массы π^0 -мезона для этого случая дает величину 141 ± 8 Мэв. В системе покоя π^0 -мезона углы разлета между электронами и позитронами пар равны 7° и 12° , а угол между плоскостями пар не превышает 37° . Другие возможные интерпретации наблюдаемого случая имеют чрезвычайно малую вероятность.

Л и т е р а т у р а

1. G.Puppi, A.Stanghellini, Nuovo Cim., 5, 1305 (1957).
2. Ю.А. Будагов, С.Виктор, В.П. Джелепов, П.Ф. Ермолов, В.И. Москалев. Материалы совещания по камерам Вильсона, диффузионным и пузырьковым камерам, вып. 2, ОИЯИ, Дубна, 1958 г.
3. Ю.А. Будагов, С.Виктор, В.П. Джелепов, П.Ф. Ермолов, В.И. Москалев, ЖЭТФ, 35, 1575 (1958).
4. Ю.А. Будагов, С.Виктор, В.П. Джелепов, П.Ф. Ермолов, В.И. Москалев, ЖЭТФ, 38, 1080 (1959).
5. Ю.А. Будагов, С.Виктор, В.П. Джелепов, П.Ф. Ермолов, В.И. Москалев, ЖЭТФ, 37, 878 (1959); Nucl. Phys., 14, 339 (1959).
6. Ю.А. Будагов, С.Виктор, В.П. Джелепов, П.Ф. Ермолов, В.И. Москалев, ЖЭТФ, 38, 734 (1960); Nucl. Phys., 22, 226 (1961).

7. Ю.А. Будагов, С.Виктор, В.П. Джелепов, П.Ф. Ермолов, В.И. Москалев, ЖЭТФ, 38, 1047 (1960).
8. Ю.А. Будагов, П.Ф. Ермолов, Е.А. Кушниренко, В.И. Москалев, ЖЭТФ, 40, 1615 (1961).
9. П.Ф. Ермолов, В.И. Москалев, ЖЭТФ, 41, 322 (1961).
10. Ю.А. Будагов, П.Ф. Ермолов, Е.А. Кушниренко, В.И. Москалев, ЖЭТФ, 42, 1191 (1962).
11. Н.П. Клепиков, В.А. Мешеряков, С.Н. Соколов. Материалы Киевской конференции по физике высоких энергий (июль 1959); препринт ОИЯИ Д-584 (1960).
12. М.С. Козодаев, М.М. Кулюкин, Р.М. Суляев, А.И. Филиппов, Ю.А. Шербатов, ЖЭТФ, 38, 407, 708 (1960).
13. E.C.Fowler, W.B.Fowler, R.P.Shutt, A.M.Thorndike and W.L.Whitmore, Phys. Rev., 91, 135 (1953).
14. R.M.Frank, J.L.Gammel and K.M.Watson, Phys. Rev., 101, 891 (1956).
15. K.M.Watson and C.Zemach, Nuovo Cim., 10, 453 (1958).
16. Г.А. Блияев, М.Ф. Ломанов, Я.Я. Шаламов, В.А. Шебанов, В.А. Шеголев, ЖЭТФ, 35, 880 (1958).

Рукопись поступила в издательский отдел
28 июля 1962 года.

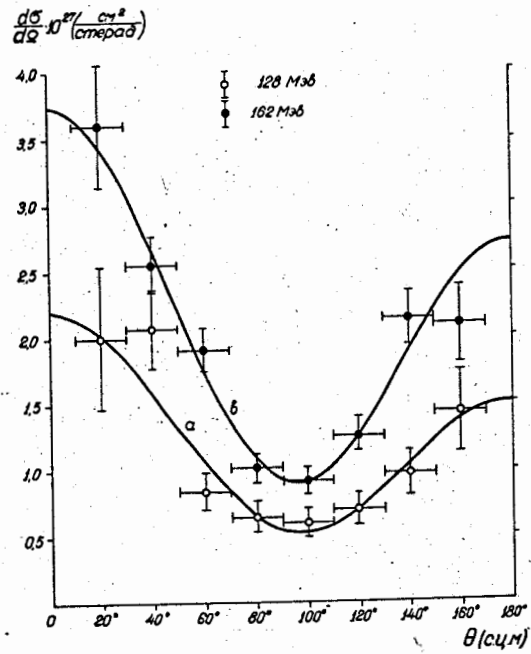


Рис. 1. Угловые распределения упругого π^- - p -рассеяния при энергиях 128 и 162 Мэв. Сплошные кривые получены методом наименьших квадратов с учетом только S и P-волн.

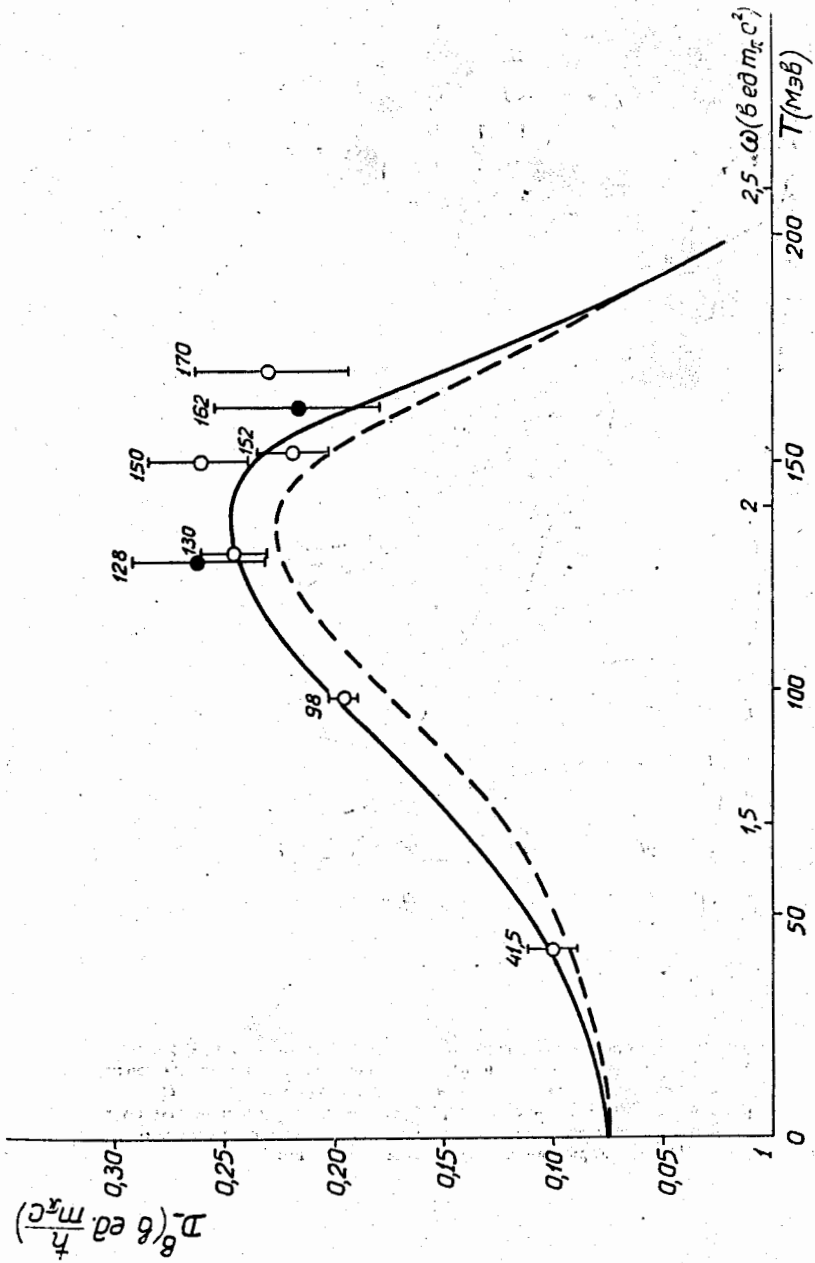


Рис. 2. Зависимость действительной части амплитуды рассеяния вперед D_0^+ от энергии π^- -мезона (ω - полная и T - кинетическая энергия π^- -мезона), Сплошная кривая - кривая Клеппикова и др. для $f^2 = 0,08$, штриховая кривая - кривая Шингера и Сальзмана ($f^2 = 0,08$). Черные точки - данные настоящей работы.

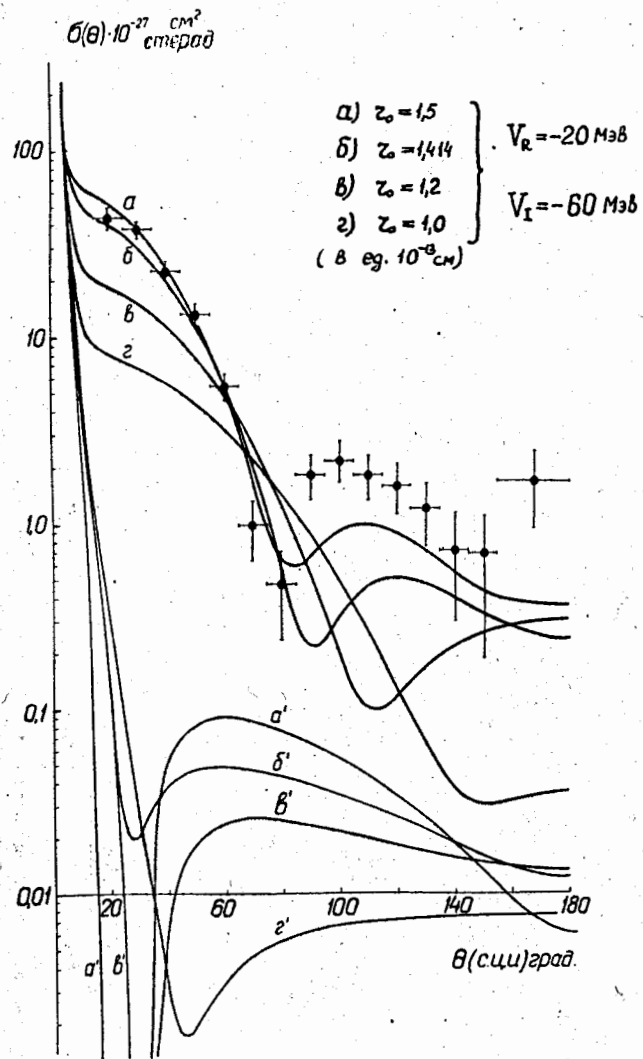


Рис. 3. Угловое распределение упругого π^- -He-рассеяния при энергии 153 Мэв. Кривые $a - \gamma$ и $a' - \gamma'$ иллюстрируют изменение рассчитанного по оптической модели сечения упругого π^- -He-рассеяния ($a - \gamma$) и сечения, обусловленного кулоновским рассеянием и интерференцией кулоновского и ядерного рассеяния ($a' - \gamma'$), при вариации радиуса взаимодействия.

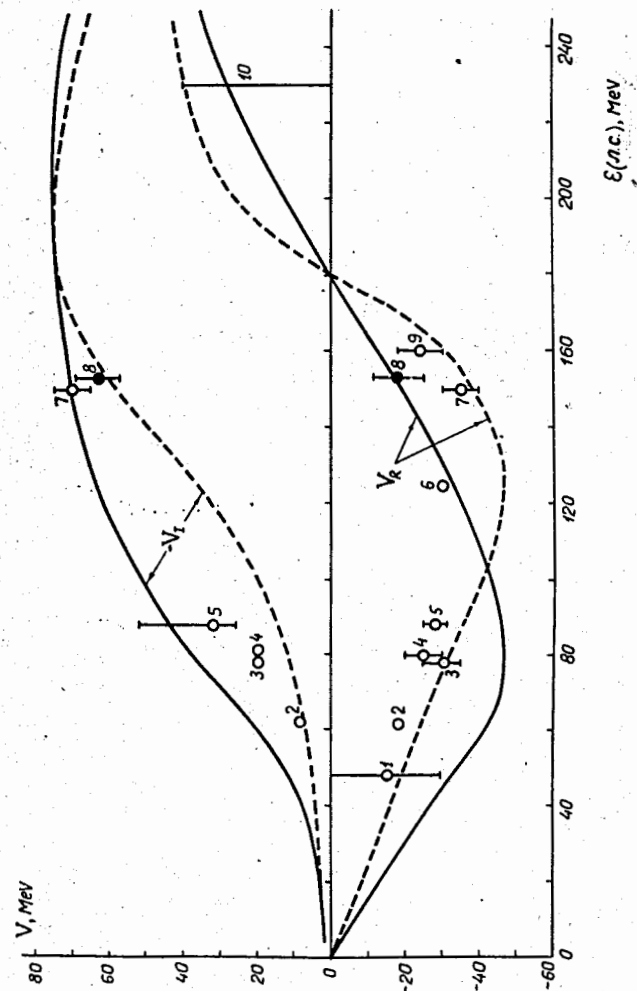


Рис. 4. Энергетические зависимости действительной и мнимой части оптического потенциала, рассчитанные Франком и др./14/ (штриховые кривые - функции от энергии π^- -мезонов внутри ядра, сплошные - от кинетической энергии π^- -мезонов в лаб. системе), Черные точки - данные настоящей работы.

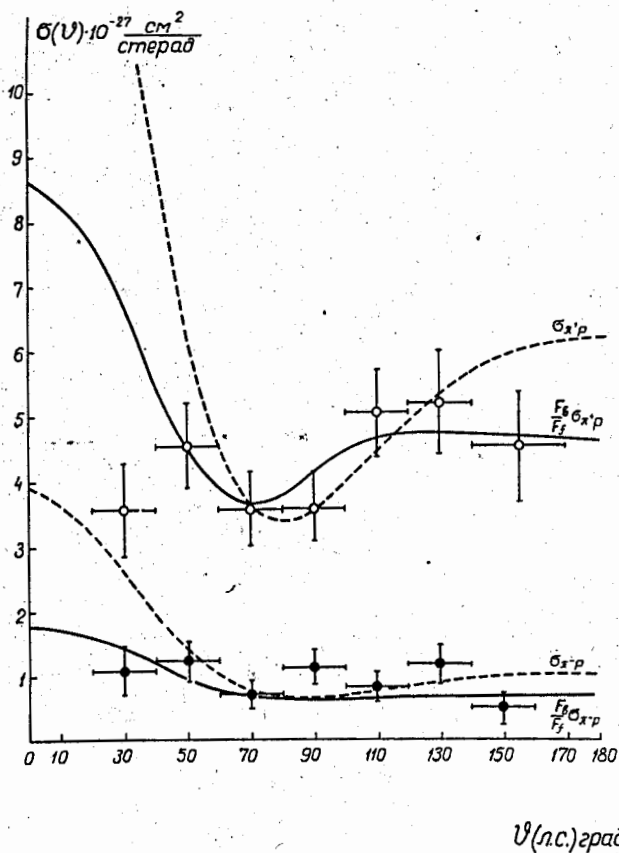


Рис. 5. Угловые распределения π^- -мезонов от реакции $\pi^- + \text{He}^4 \rightarrow \pi^- + \text{He}^3 + p$ (белые точки) и $\pi^- + \text{He}^4 \rightarrow \pi^- + T + p$ (черные точки). Штриховые кривые - угловые распределения свободного π -N-рассеяния, сплошные кривые - те же распределения, умноженные на фактор Ватсона-Цемаха F_b / F_t (в произвольных масштабах).