539.172.5(049.3)

ЗАХВАТ μ-МЕЗОНОВ ЯДРАМИ. ПРОБЛЕМА ДВУХ И ТРЕХ ТЕЛ

H. Überall. Study of Nuclear Structure by Muon Capture.
P. Singer. Emission of Particles Following Muon Capture in Intermediate and Heavy Nuclei.
J. S. Levinger. The Two and Three Body Problem (Springer Tracts in Modern Physics/Ergebnisse der exacten Naturwissenschaften. Ed. G. Höhler. 71.) Berlin — Heidelberg — New York, Springer-Verlag, 1974, 245 p.

Обзорные статьи, помещенные в сборнике, посвящены актуальным вопросам исследования атомного ядра. Первая из них: «Исследование ядерной структуры при захвате мюонов» написана автором известных монографий и обзоров о рассеянии электронов ядрами Г. Юбералем. Предложение об использовании захвата ядрами остановившихся мюонов для получения новых сведений о строении атомных ядер было высказано сравнительно недавно. Однако экспериментальные и теоретические работы в этом направлении показали большую перспективность метода для изучения аналоговых состояний гигантского резонанса. Поэтому статья, в которой кратко изложены результаты последних работ в основном в области легких ядер, представляет собой весьма ценное пособие для ознакомления с проблемой.

В статье обсуждаются различные методы расчета полного сечения поглощения мюонов с использованием некоторых моделей ядра, рассмотрены эффекты, обусловливающие анизотропию угловых распределений высокоэнергетических нейтронов, возникающих вследствие прямого механизма захвата на отдельном протоне ядра. Но основное внимание в статье уделяется резонансному механизму захвата, при котором происходит возбуждение уровней ядерного гигантского резонанса, а затем их распад с испусканием нейтронов и протонов. О справедливости такой картины свидетельствуют экспериментальные данные, которые обнаруживают четкое соответствие пиков в спектре испускаемых нейтронов и пиков, полученных при исследовании фотоядерных реакций (γn) и (γp). Описание спектра нейтронов было проведено с использованием частично-дырочной модели гигантского резонанса. Исследование спектра испускаемых протонов, как подчеркивает автор, может дать информацию о вкладе в гигантский резонанс состояний типа две частицы — две дырки.

Новые возможности в исследовании захвата мюонов появились в последние годы вследствие изготовления Ge (Li)-детекторов γ-излучения высокого разрешения. Регистрация γ-излучения позволяет увеличить точность эксперимента путем идентификации распадающихся состояний и дочерних ядер в процессах с испусканием нейтронов. Кроме того, при возбуждении в результате захвата мюонов уровней, стабильных относительно нейтронного распада, наблюдается возбуждение гигантского магнитного дипольного резонанса, ранее обнаруженного при рассеянии электронов на 180°. Улучшение экспериментальной методики позволит также решить проблему расщепления гигантского резонанса по изоспину в ядрах с неравным числом нейтронов и протонов. Дополнительную информацию об угловых корреляциях испускаемых частиц можно получить из измерения допплеровского уширения γ-линии.

Вторую статью сборника можно считать продолжением первой. В ней рассмотрена эмиссия частиц после захвата мюонов ядрами среднего и тяжелого атомного веса. Автор П. Зингер отмечает увеличение роли испарительных процессов для этой области ядер, что приводит к смазыванию линейчатого спектра нейтронов от распада состояний гигантского резонанса. Действительно, эксперимент дает плавный спектр нейтронов при захвате мюонов ядрами Bi, и его теоретический анализ должен учитывать вклад испарительного, прямого и предравновесного процессов. Оценки множественности образования нейтронов не являются удовлетворительными. Для более последовательной теоретической обработки, по-видимому, необходимо одновременное измерение энергетических спектров и анизотропии испускаемых нейтронов. Выполнено мало экспериментальных работ об испускании протонов, дейтронов и альфа-частиц после мюонного захвата. Качественное согласие получено с псевдодейтронной моделью, т. е. моделью поглощения кластерами на поверхности ядер.

Обе рассмотренные выше статьи удачно акцентируют внимание на тех проблемах, которые должны быть решены в недалеком будущем на интенсивных пучках мезонов на строящихся «мезонных фабриках».

Обзорная статья «Проблема двух и трех тел» написана Дж. Левинджером, автором ряда оригинальных работ по этой тематике. Появление обзора является весьма своевременным, поскольку за последнее десятилетие достигнуты большие успехи как в области экспериментальных, так и теоретических исследований. Были проведены новые измерения рассеяния нейтронов на дейтроне и рассеяния электронов на ядрах ^{3}H и ^{3}He. Очень большое число теоретических работ было посвящено разработке методов расчета энергии связи трития. Те же методы дают волновую функцию трех нуклонов и поэтому позволяют рассчитывать формфакторы и провести сравнение с экспериментами по рассеянию электронов. Достигнут прогресс в расчетах упругого и неупругого nd-рассеяния.

Можно только приветствовать предпринятую автором попытку критического рассмотрения различных теоретических подходов, тем более, что, по мнению автора, в ряде последних расчетов содержится лишь «оценка следующего десятичного знака», поэтому надо сосредоточить усилия на действительно перспективных направлениях. Однако не все теоретические методы изложены в статье с одинаковой полнотой. Более подробно рассмотрены работы, использующие близкую автору методику, например, сепарабельное приближение двухнуклонной t-матрицы, в некоторых случаях только суммированы полученные результаты и приведены ссылки на литературу. Однако другого стиля изложения трудно было бы ожидать от статьи весьма ограниченного объема.

При рассмотрении проблемы двух тел автор постоянно имеет в виду те свойства двухнуклонной системы, которые необходимы для решения задачи трех тел. Известная трудность состоит в том, что из данных для системы двух нуклонов получают сведения о двухнуклонной t-матрице на энергетической поверхности, в то время как для расчета трехнуклонной системы требуются значения этой матрицы вне энергетической поверхности. Использование локальных и нелокальных потенциалов для описания свойств дейтрона и фаз нуклон-нуклонного рассеяния представляет собой метод экстраполяции измеренных значений t-матрицы. Проведено сравнение результатов расчета с различными потенциалами. Три типа потенциалов: Хамада — Джонсона, Рейда с мягким кором, де Туррея и Шпрунга с супермягким кором хорошо

описывают NN-рассеяние до энергии 300 *Мэв*. Кажущееся нарушение теоремы единственности Гельфанда — Левитана происходит из-за неточности экспериментальных данных и ограничения по энергии. В большинстве расчетов в последнее время отдается предпочтение потенциалу Рейда с мягким кором.

Наиболее существенный недостаток в экспериментальных данных о системе двух нуклонов — это отсутствие прямых измерений нейтрон-нейтронного рассеяния. Использование дейтрона в качестве нейтронной мишени ставит прежде всего вопрос о справедливости модели квазисвободного рассеяния. Использование предположения о зарядовой симметрии при извлечении фаз nn-рассеяния из данных измерений pp-рассеяния ставится под сомнение последними расчетами Фабра кулоновской разности энергий связи ядер ^{3}He и ^{3}H. Этот результат согласуется с исследованиями запрещенных по изоспину распадов ρ- и ω-мезонных резонансов.

В последующих двух главах автор дает более подробный анализ рассеяния нуклона на нуклоне. Рассмотрены уравнения Лоу и Липпмана — Швингера для t-матрицы и вытекающее из первого уравнения свойство сепарабельности t-матрицы вблизи связанного состояния. Для построения t-матрицы в этом частном случае использовано унитарное полюсное приближение.

Значительный прогресс в расчете энергии связи трития (E_T) для заданного двухнуклонного потенциала достигнут, по мнению автора, благодаря новой формулировке проблемы трех тел, данной Л. Д. Фаддеевым, разработке формализма для решения уравнений Фаддеева и созданию новой мощной вычислительной техники. В статье приведены вывод уравнений Фаддеева и результаты расчета E_T в приближении сепарабельной двухнуклонной t-матрицы для потенциала Рейда с мягким кором.

Отдельно рассмотрены другие методы расчета с потенциалом Рейда. Это использование теории возмущений для t-матрицы, решение двумерного интегрального уравнения, получаемого из уравнения Фаддеева в случае несепарабельной t-матрицы, вариационные расчеты, использование разложения по гиперсферическим функциям, метод Бете — Бракнера. Различие полученных значений E_T достигает 1 *Мэв* для разных методов, но большинство значений группируется около 7,1 *Мэв* при экспериментальной величине энергии связи 8,48 *Мэв*. Причину расхождения с экспериментом автор видит в наличии вычислительных трудностей, а также в возможности некорректного выбора двухнуклонного потенциала или соответствующей t-матрицы вне энергетической поверхности, необходимости учета релятивистских эффектов и влияния трехчастичных сил.

Наблюдается также расхождение рассчитанного и экспериментального формфакторов ^{3}He при больших переданных импульсах ($q^2 = 8\ \phi^{-2}$). По-видимому, пока нельзя однозначно указать на причину такого расхождения. При больших переданных импульсах ряд эффектов становится весьма существенным: плохо известны двухнуклонные потенциалы, большой вклад дают релятивистские эффекты и малоизвестные трехчастичные силы; необходимо учитывать обмен изобарными конфигурациями.

В заключительной главе собраны результаты ряда расчетов трехнуклонных систем с учетом состояний непрерывного спектра для упругого и неупругого рассеяний нейтронов дейтронами. Экспериментальные данные по nd-рассеянию, хотя они являются достаточно полными лишь при низких энергиях, дают значительно большее количество величин для сравнения с теорией, чем данные о связанном состоянии. Это полные и дифференциальные сечения, поляризация нуклона, векторная и тензорная поляризация дейтрона, дважды и трижды дифференциальные сечения для развала дейтрона. Рассчитанное значение квартетной длины рассеяния хорошо согласуется с последними экспериментальными данными и практически не зависит от выбора сепарабельного потенциала. Значения дублетной длины рассеяния ^2a зависят от деталей нуклон-нуклонного потенциала, при этом имеется взаимосвязь со значениями рассчитанной энергии связи трития E_T. Наблюдаемое отличие от экспериментального значения ^2a для потенциала Рейда может быть объяснено теми же причинами, что и отличие экспериментального и теоретического значений энергии связи трития.

Автор далее рассматривает расчеты полного сечения упругого nd-рассеяния, которое довольно хорошо описывается теорией. Однако вопросы поляризационных явлений остаются нерешенными. Расчет неупругого процесса более сложен, и согласие с экспериментом является только качественным. Кратко рассмотрены возможности расчета более сложных систем, например, альфа-частицы и гиперядер, методами, используемыми в задаче трех тел. В заключение автор вновь подчеркивает те проблемы, которые связаны, как он считает, в «гордиев узел». Это предположение о нерелятивистской t-матрице вне энергетической поверхности, релятивистские эффекты в задаче двух и трех нуклонов, трехчастичные силы, неаддитивные эффекты в рассеянии электронов на трехчастичных ядрах. Изложение достижений в теории двух и трех тел, а также ясное представление о сделанных приближениях и неучтенных эффектах позволяет сконцентрировать внимание читателя обзора на важных проблемах, решение которых имеет большое значение для развития теории не только малонуклонных систем, но и более сложных ядер.

А. Б. Курепин

Успехи физических наук, т. 116, вып. 3

Редактор *В. В. Власов*

Техн. редактор *В. Н. Кондакова* Корректоры *З. В. Автонеева, Н. Б. Румянцева*

Сдано в набор 30/VI 1975 г. Подписано к печати 24/VI 1975 г. Бумага 70×108 1/16.
Физ. печ. л. 11,5+1 вкл. Условн. печ. л. 16,28 Уч.-изд. л. 16,35. Тираж 4595 экз. Т-09462.
Цена 1 р. 20 к. Заказ № 0820.

Издательство «Наука»
Главная редакция физико-математической литературы
117071, Москва, В-71, Ленинский проспект, 15

Ордена Трудового Красного Знамени Московская типография № 7 «Искра революции»
Союзполиграфпрома при Государственном комитете Совета Министров СССР по делам
издательств, полиграфии и книжной торговли.
Москва, К-1, Трехпрудный пер., 9