

5045

СООБЩЕНИЯ  
ОБЪЕДИНЕННОГО  
ИНСТИТУТА  
ЯДЕРНЫХ  
ИССЛЕДОВАНИЙ

Дубна

P4 - 5045



В.Г. Соловьев

ЛАБОРАТОРИЯ ТЕОРЕТИЧЕСКОЙ ФИЗИКИ

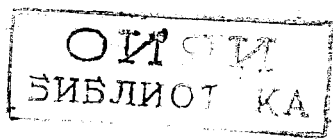
О ПУТЯХ ИЗУЧЕНИЯ  
СТРУКТУРЫ АТОМНОГО ЯДРА

1970

P4 - 5045

В.Г. Соловьев

О ПУТЯХ ИЗУЧЕНИЯ  
СТРУКТУРЫ АТОМНОГО ЯДРА



Работы по физике атомного ядра преследуют две цели: изучение строения атомного ядра как такового и изучение элементарных взаимодействий, проявляющихся в свойствах атомных ядер. Рассмотрим вопросы, связанные с изучением строения атомного ядра.

Изучение атомного ядра имеет принципиальный научный интерес. Это утверждение можно подкрепить двумя доводами. Первый связан с исключительно важной ролью атомных ядер в природе, что особенно ярко проявляется в звездах, где ядерные превращения играют определяющую роль. Второй довод - изучение элементарного акта взаимодействия двух частиц дает недостаточную информацию о свойствах этих частиц, более полные сведения можно получить из изучения систем сильно взаимодействующих частиц, какими являются атомные ядра.

Атомное ядро представляет собой весьма сложную систему, характеризующуюся большим числом степеней свободы. Изучение строения ядра требует применения различных экспериментальных подходов, основанных на физических процессах, связанных с сильным, электромагнитным и слабым взаимодействиями.

Построение теории ядра наталкивается на большие трудности, вызванные тем, что необходимо найти описание системы конечного числа сильно взаимодействующих частиц при отсутствии параметра малости.

В начальный период развитие теории ядра проходило по линии поисков простых моделей. Потом вместо простых моделей стали использовать различные приближенные подходы, в которых учитываются силы, играющие определяющую роль для данных свойств ядер.

В современной теории ядра используется большое число различных приближенных методов, которые условно можно разделить на три типа: феноменологические, полумикроскопические и микроскопические.

При феноменологическом описании структуры сложных ядер вводят коллективные координаты, характеризующие отступления формы ядра от формы шара, и возбуждения ядра связывают с вращением ядра как целого и с колебаниями ядерной поверхности. При таком описании каждое ядро характеризуется несколькими параметрами. Энергии возбужденных состояний, их мультипольные моменты и вероятности электромагнитных переходов выражаются через эти параметры. Значения параметров для каждого ядра определяются из соответствующих экспериментальных данных. Такому чисто феноменологическому описанию присущи серьезные ограничения и недостатки.

Полумикроскопическое описание основано на выборе эффективного ядерного взаимодействия. При полумикроскопическом описании взаимодействия между нуклонами в ядре разделяют на две части: среднее поле ядра и остаточные взаимодействия. Среднее поле — это тот ядерный потенциал, который создается всеми нуклонами ядра. Большая совокупность экспериментальных данных, полученных при изучении  $\alpha$ -,  $\beta$ -,  $\gamma$ -спектров и ядерных реакций, используется для определения параметров потенциала среднего поля. Остаточные взаимодействия — это та часть сил, которая не включена в среднее поле. Остаточные взаимодействия играют в ядре весьма важную роль, они монотонно и медленно меняются от ядра к ядру, они не малы и их нельзя учитывать по теории возмущений. Роль среднего поля ядра весьма велика, среднее поле определяет многие свойства ядер непосредственно, кроме того оно управляет остаточными взаимодействиями, т.е. дает возможность в той или иной мере проявляться действию ядерных сил. Таким образом, среднее поле определяет конкретные свойства каждого ядра, оно ответственно за отличие многих свойств одних ядер от других.

На основе анализа ядерных спектров выбирается вид остаточных сил и проводятся расчеты ряда свойств группы ядер. В результате расчетов объясняется часть экспериментальных фактов и делаются некоторые

предсказания. Эффективные силы имеют много различных компонент и существующий экспериментальный материал дает возможность определить только часть из них. Новые экспериментальные факты позволяют уточнить эффективные силы, далее проводятся новые расчеты и т.д.

Полумикроскопическая теория, в которой учитываются среднее поле ядра, взаимодействия, приводящие к парным корреляциям сверхпроводящего типа, и так называемые мультиполь-мультипольные силы, получила название сверхтекучей модели ядра. В рамках сверхтекучей модели ядра удалось получить довольно хорошее описание низколежащих возбужденных состояний средних и тяжелых ядер.

Микроскопическое описание основано на использовании экспериментальных данных по нуклон-нуклонному рассеянию для вычисления таких основных свойств, как плотность ядерного вещества и энергия связи нуклона в ядре. Развитие этого направления встречает большие трудности. Так, из нуклон-нуклонного рассеяния можно получить только часть необходимых данных, т.е. только значения функций на энергетической поверхности (когда импульсы двух конечных частиц связаны законами сохранения импульса и энергии). Сложность и неоднозначность нуклон-нуклонного потенциала приводит к необходимости использовать в расчетах некоторые эффективные потенциалы, что уменьшает привлекательность этих расчетов с логической точки зрения.

Быстрый прогресс в развитии вычислительной техники стимулировал расширение фронта микроскопических расчетов по линии продвижения к более сложным ядрам и по пути расчетов ядерных спектров.

При изучении строения атомного ядра движение идет в двух направлениях: первое — измерение характеристик основных и все более и более высоких возбужденных состояний, второе — расширение области изучаемых ядер путем удаления от зоны бета-стабильности и продвижения в область сверхтяжелых элементов.

Действительно, для понимания строения ядра нельзя ограничиться изучением одного или ряда ядер. Многие характеристики четно-четных ядер отличаются от таковых для соседних нечетных или нечетно-нечетных ядер. Строение легких ядер отличается от строения средних и тя-

желых ядер. Структура деформированных ядер сильно отличается от структуры сферических ядер и т.д. Большое различие наблюдается даже среди деформированных ядер. Так, по сравнению с ядрами из области  $150 < A < 190$  особенности деформированных ядер в области актинидов проявляются, например, в делении. Ясно, что нельзя изучать деление, основываясь на свойствах редкоземельных изотопов. Если ядра в областях  $150 < A < 190$  и  $228 < A < 254$  имеют форму вытянутого эллипсоида вращения, то часть ядер в областях  $50 < Z$ ,  $N < 82$  и  $28 < Z < 50$ ,  $50 < N < 82$ , возможно, имеет форму сплюснутого эллипсоида вращения и т.д.

Перечисление тех ядерных характеристик, которые меняются при переходе от одних ядер к другим, можно продолжить. Однако уже ясно, что несмотря на то, что силы, действующие между нуклонами, являются одними и теми же во всех ядрах, структура ядер различна и невозможно изучать ее без значительного расширения области исследуемых ядер.

Однако область ядер, обнаруженных в опыте, составляет не более четверти всех возможных ядер. Примерно только у одной десятой части известных ядер изучены низколежащие возбужденные состояния. Создание масс-сепараторов на пучках частиц и широкое применение ускорителей тяжелых ионов дают возможность дальнейшего расширения области изучаемых ядер.

Основное место в ядерной физике занимают работы по определению характеристик основных и все более и более высоких возбужденных состояний атомных ядер. Низколежащие возбужденные состояния в рамках полумикроскопического подхода описываются с помощью квазичастиц и фононов. В деформированных ядрах на основных, квазичастичных и фононных состояниях построены ротационные полосы. С ростом энергии возбуждения взаимодействия квазичастиц с фононами кориолисово взаимодействие и другие силы приводят к усложнению структуры возбужденных состояний.

Рассмотрим, например, сильно деформированные ядра. С помощью бета-, гамма-спектроскопии,  $(n, \gamma)$  - и прямых реакций:

1) изучены ротационные полосы, построенные на основных и низколежащих возбужденных состояниях и получены величины моментов инерции, квадрупольных моментов и значения гиромагнитных отношений;

2) найдены энергии квадрупольных и октупольных состояний и величины  $B(E2)$  и  $B(E3)$  ;

3) определены спины  $I$ , их проекции  $K$  и четности  $\pi$  для большого числа уровней. Кроме этих характеристик необходимо получить более детальные сведения о структуре состояний. Для квазичастичных состояний необходимо определить совокупности асимптотических квантовых чисел. Для вибрационных состояний - их компонентный состав, так как волновые функции вибрационных состояний представляются суперпозицией двухквазичастичных состояний.

Посмотрим, как экспериментально можно определить асимптотические квантовые числа и чистоту квазичастичных состояний. Методы  $\alpha$ -,  $\beta$  -спектроскопии позволяют надежно определить асимптотические квантовые числа в случае разрешенного незамедленного  $\alpha$  и  $\beta$  -распада и благоприятного  $\alpha$  -распада. Однако в области  $150 < A < 190$  имеются  $\alpha$  -переходы только между двумя парами состояний, а в области  $228 < A < 254$  их нет совсем. Число благоприятных  $\alpha$  -переходов также невелико. Поэтому методы  $\alpha$ -,  $\beta$  -спектроскопии дают недостаточные сведения об асимптотических квантовых числах квазичастичных состояний и практически не дают информации об их чистоте.

Обратимся к прямым реакциям передачи одного нуклона. Измерение относительных интенсивностей заселения ротационных полос, построенных на состояниях с одинаковыми значениями  $K^\pi$  в нечетных ядрах, позволяет однозначно приписать этим состояниям соответствующие асимптотические квантовые числа. По изученным распределениям интенсивностей заселения уровней ротационных полос в прямых реакциях передачи одного нуклона получены данные по асимптотическим квантовым числам одно- и двухквазичастичных состояний.

Сочетание методов  $\beta$ -,  $\gamma$  -спектроскопии с прямыми реакциями однонуклонных передач позволило получить характеристики для достаточно

большого числа квазичастичных состояний в деформированных ядрах. Измерение сечений возбуждения однофононных вибрационных состояний позволяет определить их компонентный состав. Первый анализ показал, что теория дает правильные величины наибольших компонент гамма-вибрационных состояний в ряде ядер.

Следует отметить, что комплексное изучение строения ядра методами  $\alpha$ -,  $\beta$ - и  $\gamma$ -спектроскопии и ядерных реакций еще не получило достаточного развития. В ряде случаев можно наблюдать, как трудоемкие работы по изучению  $\beta$ - и  $\gamma$ -спектров фактически не дают новой информации о структуре изучаемого ядра.

Исследования, проведенные с помощью альфа-, бета-, гамма-спектроскопии и ядерных реакций, дали большой экспериментальный материал об энергиях, спинах и многих интегральных характеристиках низколежащих состояний в сферических и деформированных ядрах. На основе этих данных определены параметры потенциалов среднего поля и другие ядерные характеристики (моменты инерции, квадрупольные моменты и т.д.).

Весьма важным является вопрос — насколько точно принятое описание ядерных состояний или каковы примеси высших конфигураций в квазичастичных и фононных состояниях? Наиболее просто ответ на этот вопрос можно получить при изучении ядер, близких к дважды магическим, где роль остаточных взаимодействий минимальна. Первый шаг в этом вопросе сделан в последние годы (см. N. Stein, Монреальская конференция, 1969 год). С помощью ядерных реакций с моноэнергетическими пучками показано, что для дважды магических ядер плюс-минус один нуклон одночастичные состояния до 1,5–2,0 Мэв являются чистыми, у более высоких состояний имеются значительные примеси высших конфигураций. Следующий этап — изучение структуры фононных состояний, нахождение трехквазичастичных состояний и т.п. в околوماгических ядрах представляется достаточно трудным.

Вопросы же о величинах примесей высших конфигураций к квазичастичным состояниям, структуры фононных состояний и т.д. в сферических и деформированных ядрах еще ждут своего решения. Большой интерес представляет изучение поведения квазичастичных и фононных состояний и их взаимного переплетения с ростом энергии возбуждения.

На основе данных по свойствам ядерных состояний можно сделать вывод, что низколежащие состояния ядер оказались существенно более сложными по сравнению с нашими представлениями, сформулированными в последние годы. Поэтому для дальнейшего изучения структуры низколежащих состояний ядер и продвижения к большим энергиям возбуждения необходимо проводить комплексное изучение, сочетающее методы альфа-, бета-, гамма-спектроскопии (включая  $(\nu\gamma)$ -реакции) с прямыми реакциями, использующими монохроматические пучки большого числа частиц вплоть до тяжелых ионов.

Большой круг исследований связан с изучением равновесной формы ядер в основных и возбужденных состояниях. Если равновесная форма основных состояний большинства ядер, находящихся в зоне бета-стабильности, является известной, то изучение равновесных деформаций основных и равновесных деформаций возбужденных состояний ядер находится в начальной стадии. Имеются интересные вопросы, связанные с изучением изомеров формы, особенно структуры спонтанно-делящихся изомеров, ядер с формой сплюснутого эллипсоида и т.д. Весьма важным является изучение деления ядер, в том числе проявление в делении особенностей ядерной структуры.

Изучение строения ядра неразрывно связано с выяснением механизма ядерных реакций. Существенный успех в трактовке прямых ядерных реакций позволил получить ценные сведения о ядерной структуре. Так, с помощью метода искаженных волн получены данные о главных компонентах ядерных волновых функций. Для более полного определения компонентного состава ядерных состояний необходимо провести уточнение механизмов ядерных реакций.

До сих пор обсуждались основные и низколежащие состояния ядер. Посмотрим, как обстоит дело с изучением структуры более высоких возбужденных состояний атомных ядер. Область возбуждения от 2–3 Мэв до энергии связи нуклона в средних и тяжелых ядрах изучена очень слабо.

Большие возможности изучения уровней с энергией возбуждения 2 и более Мэв средних и тяжелых нейтронодефицитных ядер имеются на

масс-сепараторах на пучках частиц типа ISOLDA и ЯСНАП и с помощью протонных излучателей. С удалением от зоны бета-стабильности в сторону нейтронодефицитных изотопов сильно возрастают энергии бета-переходов, что дает возможность изучать уровни с энергией возбуждения 2-5 Мэв. Следует отметить, что представляет интерес изучение структуры как очень короткоживущих изотопов, удаленных от зоны бета-стабильности на 15 и более нейтронов, так и короткоживущих изотопов, удаленных от зоны бета-стабильности на 8-14 нейтронов. Весьма важно, чтобы продвижение к большим энергиям возбуждения было постепенным и проходило широким фронтом.

Методы нейтронной спектроскопии позволили получить сведения об усредненных характеристиках компаунд-состояний вблизи энергии связи нейтрона. Выяснение природы этих состояний (различие структур, уровней с одинаковыми спином и четностью, проявление оболочек и т.д.) является важной научной задачей. Здесь наибольший интерес представляет изучение ( $\nu$ ) и ( $\pi$ ) реакций на резонансах.

В области квазинепрерывного спектра большой интерес представляет изучение аналоговых состояний и разного типа гигантских резонансов. Вряд ли стоит говорить, что изучение аналоговых состояний и тонкой структуры гигантских резонансов находится в начальной стадии.

С каждым годом возрастает количество информации о строении ядра, полученной из опытов по взаимодействию частиц промежуточных и высоких энергий с ядрами. Так, рассеяние быстрых электронов указывает на отклонение плотности электрического заряда в ядрах от фермиевского распределения. Поглощение  $K$ -мезонов ядрами указывает на возможную обогащенность поверхности ядра нейтронами.

Ценную информацию о структуре ядра дает изучение захвата  $\mu$ -мезонов ядрами (определение формы ядер, структура дипольных и квадрупольных возбуждений, парциальные переходы). Взаимодействия  $\pi$ -мезонов с ядрами дают сведения о короткодействующих корреляциях нуклонов в ядрах. Некоторую информацию о кластерах в ядрах дают сечения прямого выбивания быстрых легких ядер при взаимодействии протонов с ядрами. Большой интерес представляет изучение механизма взаимодействия частиц высоких энергий с ядрами.

Для получения данных о плотности распределения в ядрах ядерного вещества, структуры фононных состояний и многих других характеристик необходимы пучки протонов, дейтронов, электронов и других частиц в широком диапазоне энергий с достаточно хорошей моноэнергетичностью. Необходимы также интенсивные пучки  $K$ -мезонов.

Большие надежды возлагаются на изучение гиперядер. В гиперядрах взаимодействия гиперонов с нуклонами и между собой не сильно ослаблены действием принципа Паули и поэтому имеется возможность для изучения новых сторон в строении ядра. В настоящее время при изучении гиперядер основное внимание уделяется определению характеристик нуклон-гиперонного (спин-спиновая зависимость, тензорные компоненты и т.д.) и гиперон-гиперонного потенциалов, роли трехчастичных сил в гиперядрах и т.п. Еще нет достаточных сведений о связанных возбужденных состояниях гиперядер, а продвижение в область более тяжелых гиперядер идет весьма медленно.

Следует отметить, что несмотря на возрастание вклада физики высоких энергий в изучение строения ядра в ближайшие годы этот суммарный вклад по количеству и ценности информации, по-видимому, будет оставаться относительно небольшим.

Рукопись поступила в издательский отдел

15 апреля 1970 года.