

АТОМНОЕ ЯДРО*)

Д. Бромли

В 40-х годах ядерная физика сформировалась как область, богатая многочисленными приложениями, но, к сожалению, весьма слабая с точки зрения понимания основных закономерностей. Исходя из тех предпосылок, которые были созданы бурным развитием ядерной физики в этот период и существовавшим тогда уровнем знаний, в последующие два десятилетия удалось достичь существенного прогресса как в понимании законов, так и в их конкретных приложениях. Была создана богатая следствиями общая картина, на которой во многих местах проступили уже весьма тонкие детали. Многие области на ней все еще остаются абсолютно неясными и ожидают исследования и применения. Помимо того, непрерывно приходилось видоизменять и расширять саму картину в целом. Ядерная физика продолжает идти в одной из передовых линий понимания человеком окружающей его природы. Она вызвала столь важные изменения в современном обществе, как ни одна другая отрасль знания.

Ядерную физику можно охарактеризовать как область квантовой физики, или точнее область физики сильных взаимодействий, которая рассматривает системы с барионным числом, бóльшим единицы.

Существование ядерной физики в виде отдельной дисциплины отражает наличие весьма утонченного баланса в сильных взаимодействиях. На расстояниях, сравнимых с комптоновской длиной волны нуклона, сильные взаимодействия исключительно сильны, порядка $G\text{эв}$, и проявляются только в виде сил между нуклонными парами. Причем эти силы

*) D. Allan Bromley, The Nucleus, Phys. Today **21** (5), 29 (1968). Перевод И. М. Дрёмина.

отталкивательные, что приводит к невозможности образования элементарных частиц с барионным числом, большим единицы.

Область действия сил между двумя нуклонами характеризуется комптоновской длиной волны π -мезона. В ней имеется область со слабым притяжением. Однако это притяжение достаточно сильно для того, чтобы образовывалось связанное состояние из двух нуклонов — дейтрон. Если бы не малая масса π -мезона, то модели, описывающие сложные ядра как состоящие из отдельных нуклонов, оказались бы чересчур плохими приближениями к действительности. При этом средние расстояния между уровнями со все более высокими барионными числами, изотопами естественных элементов, были бы порядка 1 Гэв , как это имеет место в физике элементарных частиц. Однако вследствие большого отличия массы π -мезона от массы нуклона, удастся использовать нерелятивистскую волновую функцию нуклона, и типичное расстояние между уровнями ядер оценивается как меньшее или равное величине $M_N/2M_\pi = 10\text{ Мэв}$. Такое расстояние между уровнями приводит к огромному количеству квантовых явлений, которые могут быть легко подвергнуты детальному исследованию. Ядро, состоящее из ограниченного числа сильно взаимодействующих частиц, представляет собой одну из наиболее интересных многочастичных проблем в физике. Этим как бы перебрасывается мост между задачами с малым числом частиц, характерными для физики элементарных частиц, и существенно многочастичными проблемами, характерными для твердых тел, теории металлов или физики плазмы. В первом случае удастся (по крайней мере в принципе) проводить конкретные расчеты на микроуровне, тогда как в последних — разумные ответы можно искать только при статистическом подходе. Таким образом, заполняя этот промежуток, явления ядерной физики дают надежду получить единое описание всех вместе взятых многочастичных проблем.

В качестве единственной многочастичной системы, в которой одновременно проявляется действие всех известных в природе сил, ядро служит микроскопической лабораторией исследования и проверки фундаментальных законов сохранения и свойств симметрии, лежащих в основе всей физики. Только в последние годы эту возможность начали использовать достаточно полно, многие проблемы еще остаются нерешенными.

ЯДЕРНАЯ МОРФОЛОГИЯ

Мы начнем с рассмотрения размеров и формы ядра. По прошествии двух десятилетий мы все еще продолжаем изумляться большому разнообразию форм ядра. Постоянство плотности ядерного вещества (около $240\text{ млн. тонн на } 1\text{ см}^3$) дает основание считать, что радиус ядра, грубо говоря, пропорционален $A^{1/3}$, где A означает атомное число. Все более точные измерения упругого рассеяния электронов на ядрах, проводимые Робертом Хофштадтером и его группой в Стэнфорде, помогли обнаружить систематические отклонения от общего поведения. В легких ядрах все вещество находится вблизи поверхности, тогда как в очень тяжелых ядрах с относительно тонким поверхностным слоем имеется центральная область с меньшей плотностью, что связано со взаимным электростатическим отталкиванием протонов. Еще более важным является то, что из недавних измерений рассеяния электронов, а также из исследования поглощения, испускаемого мезонами, и в меньшей степени из рассеяния протонов убедительно следует, что все ядра имеют нейтронное гало, т. е. распределение нейтронов в них шире, чем распределение протонов. Исследования рассеяния электронов при очень высоких энергиях ($500\text{—}750\text{ Мэв}$) теперь уже настолько точны, что удастся обнаружить система-

тические изменения заряда и плотности вдоль радиуса ядра. Такая зависимость предсказывается в рамках оболочечной модели ядра, где изменения заряда и плотности соответствуют отдельным орбитальным группам нуклонов. Однако на опыте эта зависимость оказывается значительно более слабой, нежели в оболочечной модели. Этим знаменуется только начало атаки на глубинное внутреннее строение ядер.

СТРОЕНИЕ ЯДРА

В конце 40-х годов развитие новой технологии, создание новых приборов и новое понимание ядерных проблем, достигнутое за время работы над Манхеттенским проектом, привели к весьма оптимистическим взглядам на возможность получения систематической информации о ядерных системах. Более ранние работы носили ограниченный и фрагментарный характер.

К 1949 г. было собрано неимоверно большое количество сведений, чаще всего не связанных друг с другом, об электрических и магнитных моментах ядер, о спинах, о свойствах возбуждения уровней и о спектрах ядер. Одним из наиболее поразительных результатов, полученных из этих данных, было четкое доказательство существования магических чисел — определенных чисел (2, 8, 20, 50, 82 и 126) нейтронов или протонов, которым, очевидно, соответствовали наиболее стабильные ядерные структуры (напоминающие благородные газы в химии). Однако, несмотря на огромное количество затраченного труда, все попытки построить оболочечную теорию строения ядер по аналогии с известными моделями строения атома потерпели полную неудачу. И лишь в 1949 г. удалось продвинуться в этом направлении после того, как Мария Майер и независимо Й. Ханс Д. Йенсен с сотрудниками поняли исключительную важность учета спин-орбитального взаимодействия в ядрах.

Оболочечные модели

После того как это взаимодействие было учтено в предложенных ранее оболочечных моделях, был достигнут существенный прогресс. Наблюдаемые магические числа автоматически появились как следствие энергетических щелей в предсказываемых моделью последовательностях. За малым числом исключений, все данные о спинах основных состояний могли быть объяснены в рамках простейшей возможной оболочечной модели. При этом, когда числа нейтронов и протонов четные, спины и орбитальные моменты спариваются таким образом, что полный спин ядра становится равным нулю. При нечетном числе нейтронов (протонов) и четном числе протонов (нейтронов) спин ядра (так же, как и основной вклад в магнитный дипольный момент) полностью определяется нечетным нуклоном. Более того, в областях, прилежащих к магическим числам, спектры возбуждений можно было понять, если считать, что нечетный нуклон или находится в более высоком состоянии оболочечной модели по отношению к инертному ядру, или отражает нехватку одного нуклона до заполненной оболочки инертного ядра.

Хотя успех этих экстремальных моделей с полностью независимыми частицами был поистине впечатляющим, они, очевидно, были слишком упрощенными и потому были заменены моделями с промежуточной связью, где все нуклоны, находящиеся вне ближайшего магического ядра (валентные нуклоны), рассматриваются на равных основаниях. Эти нуклоны связаны с магическим ядром, а их взаимодействие друг с другом не зависит от взаимодействия с ядром. С этими дополнительными услож-

нениями и благодаря некоторой свободе в выборе параметров оболочечные модели помогли рассортировать огромное количество данных о свойствах ядер и навести некоторый порядок в том хаотическом нагромождении этих данных, которое царило в конце 40-х годов.

Почти сразу же появились указания на возможное противоречие. Однако в атмосфере всеобщего энтузиазма, вызванного наведением порядка в экспериментальных данных, ими просто-напросто пренебрегали. Электрические квадрупольные моменты систематически оказывались намного больше, нежели им следовало быть по оболочечной модели, т. е. не могли быть объяснены только за счет валентных нуклонов. В 1950 г. Джеймс Рейнуотер предположил, что этот факт мог бы означать, что нуклоны магического ядра также играют существенную роль. Это, в свою очередь, означало, что ядро имеет несферическую форму, за исключением тех случаев, когда все оболочки заполнены. Это предположение о коллективном ядерном движении имело первостепенное значение.

К о л л е к т и в н ы е м о д е л и

В своей простейшей и наименее точной форме коллективная модель, развитая Оге Бором и Беном Моттельсоном в Копенгагене, основывалась на том, что равновесная форма ядра получается в результате эффективной конкуренции длиннодействующих и короткодействующих компонент ядерных сил, которые соответственно стремятся придать ядру вытянутую и сферическую формы.

Ярким свидетельством в пользу статически деформированной формы ядра служит формула $E_J = AJ(J + 1)$ для спектра возбуждения квантовомеханического ротатора, справедливость которой уже установлена во многих областях периодической таблицы элементов. Подобное же доказательство существования колебательных спектров было получено из эквидистантного спектра $E_n = (n + 1/2) \hbar \omega$, характерного для некоторых ядер, лежащих в областях между ядрами с заполненными оболочками и теми деформированными ядрами, в которых, как указывает изложенная выше простая модель, еще недостаточно валентных нуклонов для того, чтобы стабилизировать деформацию ядра.

В з а и м о с в я з ь р а з л и ч н ы х м о д е л е й

Простейшие коллективные модели были вскоре существенно улучшены. Новые обобщенные коллективные модели отличались от них тем, что потенциал, определяющий орбитали отдельных нуклонов, имел деформированный вид. Это было сделано с целью получения правильного распределения плотности ядерного вещества, как это следовало из хартри-фоковского, или самосогласованного, рассмотрения данной проблемы.

В результате эти обобщенные, коллективные, ядерные модели дали возможность вновь систематизировать огромное количество экспериментальных данных о свойствах ядер. На их основе были выдвинуты предложения для новых экспериментов. Хотя эти модели разрабатывались вначале только для описания свойств средних и тяжелых ядер, однако в 1957 г. А. Лизерленд с сотрудниками обнаружили, что даже у очень легких ядер имеются поразительные коллективные свойства. Это открытие имело большое значение, поскольку у легких ядер число нуклонов сравнительно невелико и к ним можно применить результаты конкретных вычислений на основе оболочечной модели с промежуточной связью и, следовательно, сравнить друг с другом две разные модели. В 1956 г. Эрик Паул обнаружил замечательный факт, что в случае ядра F^{19} эти

модели согласовались друг с другом значительно лучше, чем с доступными в то время экспериментальными данными. Это, в свою очередь, навело Филиппа Эллиота и Брайена Флауерса на мысль использовать теоретико-групповой подход (группу $SU(3)$) к вычислениям по оболочечной модели. В конечном итоге этот подход позволил выделить определенные линейные комбинации волновых функций оболочечной модели, которые почти нацело перекрывались волновыми функциями коллективной модели и приводили к такой систематической классификации состояний в оболочечной модели, которая соответствовала коллективному поведению.

Хотя эта работа и прояснила взаимосвязь двух модельных подходов к легким ядрам, простые рассуждения на основе оболочечной модели

оказались неприменимыми при попытках воспроизвести характерные «коллективные» явления в тяжелых ядрах. К ним, например, относятся в четно-четных ядрах низкое возбуждение первого возбужденного состояния 2^+ , большая величина электрического квадрупольного матричного элемента, связывающего его с основным состоянием 0^+ , и щель в спектре возбуждений ~ 1 Мэв следующих более сложных уровней. Выявились и две другие очевидные неудачи оболочечной модели. Она не могла воспроизвести наблюдаемые полные энергии ядер и не давала никакого объяснения обнаруженному в эксперименте смешиванию различных конфигураций.

Были предприняты три основные теоретические попытки спасти создавшееся положение. Для того чтобы правильнее описать энергии связи

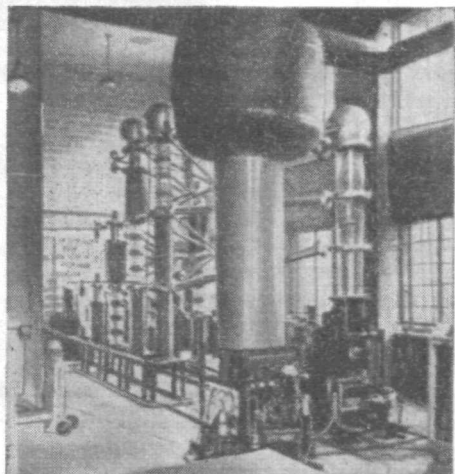


Рис. 1. Ускоритель Ван-де-Граафа на энергию 3,5 Мэв начал действовать в Чок-Ривере в 1948 г.

в ядрах, была развита бракнеровская теория. Если в обычной оболочечной модели силы, действующие между двумя нуклонами, учитываются только в первом порядке, то здесь их учет ведется во всех порядках. Однако взаимодействия, отличные от бинарных, полностью игнорируются, т. е. в итоге бракнеровская теория есть модель независимых пар, в отличие от развитых ранее моделей независимых частиц. Впервые она была применена к описанию постулированных бесконечных систем из ядерного вещества. По ходу дела она многократно усовершенствовалась. Сейчас эта теория приводит к разумному описанию энергий связи ядер, радиусов некоторых ядер с заполненными оболочками, таких, как Ca^{40} и O^{16} , для которых пока и проведены эти расчеты, а также потенциала взаимодействия двух сталкивающихся ядер O^{16} , определенного недавно в опытах по изучению взаимодействий тяжелых ионов, поставленных в Иейле.

Вторая и третья теоретические попытки, теории спаривания и коллективного движения, были предприняты с использованием аналогии с подходами, примененными для описания соответственно сверхпроводимости и плазменных колебаний. При таком подходе основное внимание уделяется относительным энергиям низколежащих возбуждений в ядрах, а не абсолютным значениям энергий связи, как в первом подходе. Хотя такое разделение выглядит чересчур искусственным, оно основывается на достаточно разумных предположениях. Во-первых, предполагается,

что очень сильные, короткодействующие, двухчастичные корреляции несущественны для предсказания таких относительных энергий возбуждения, хотя они весьма важны для определения энергии связи. Во-вторых, предполагается, что смешивание конфигураций, которое играет большую роль для нуклонов с наивысшими энергиями, состоит в перемещении их с орбит из заполненных зон вблизи границы ферми-поверхности на ближайшую доступную орбиту выше этой границы (при этом учитывается и появляющаяся связь частицы с дыркой).

Новые коллективные модели

За очень небольшими исключениями коллективные модели ядра использовались чисто эмпирически. Параметры моделей определялись путем систематического согласования с экспериментальными данными. Боровский коллективный гамильтониан, который используется во многих проводимых сейчас расчетах, был выведен из гидродинамических соображений и содержит семь совершенно произвольных функций от параметров, определяющих форму ядра, которые обычно находятся путем сопоставления с экспериментальными результатами. Совершенно неожиданные данные, полученные на опыте в течение нескольких прошедших лет, заставили применять более микроскопическое описание ядер.

Для колебательных моделей ядер наиболее характерным было предположение о наличии равновесной сферической формы ядра, относительно которой и происходят колебания. В рамках такой модели не может быть и речи об электрическом квадрупольном моменте. Поэтому сообщение о том, что Cd^{111} , рассматривавшийся как один из наилучших примеров таких колебаний ядра, обладает электрическим квадрупольным моментом в возбужденном состоянии 2^+ , вызвало всеобщее удивление. При этом момент оказался сравнимым по величине с моментами хорошо установленных вращательных ядер.

Мишель Беранже и Кришна Кумар предприняли попытку понять этот явно противоречащий всем представлениям результат. Они занялись исследованием микроскопической теории ядер осмия, которые находятся в верхней части области редкоземельных элементов и как бы заполняют переход от сильно деформированных к почти сферическим ядрам. Предположив наличие спаривания плюс квадрупольного нуклон-нуклонного взаимодействия, они вначале вычислили семь параметров в гамильтониане Бора с помощью метода Хартри — Фока. Затем, используя полученный гамильтониан, они предсказали статические и динамические свойства изотопов осмия. В 1967 г. эти предсказания были проверены экспериментально в Ийле, Брукхэйвене и Ок-Ридже. Было найдено, что они блестяще описывают результаты новых измерений. Они служат предвестниками новой эры в ядерной теории сложных ядер, намного более фундаментальной, нежели то, что было возможно ранее. Основным здесь является предположение о виде нуклон-нуклонного потенциала. Используемые приближения все еще чересчур сильны. Внутренняя структура теории не совсем ясна, поскольку затрагивается ряд трудных вычислительных проблем. Однако этим положено весьма многообещающее начало.

Оптические модели

Оптическая модель ядра была предложена Робертом Сербером и его сотрудниками в 1949 г. с целью объяснить возникновение интенсивных потоков нейтронов в направлении падающей частицы при бомбардировке дейтронов. В этой модели предполагается, что налетающая частица попа-

дает в поле, потенциал которого обладает как вещественной, так и мнимой частью. Таким образом удастся естественно объяснить явления отражения, преломления и поглощения. Опыт работы с моделью показал, что это — один из наиболее удобных способов параметризации и описания основных характеристик ядерных взаимодействий. Однако только лишь в последние годы удалось установить параметры вещественных и мнимых частей потенциальных ям для всех легких частиц. Эта область сейчас развита настолько полно, что использование существующих в данный момент наборов параметров дает возможность предсказать поведение сечений рассеяния нейтронов с точностью выше 1% в энергетическом интервале, меньшем 14 Мэв. Этот приводит к колоссальным последствиям, используемым инженерами и физиками-ядерщиками. Из нуклон-нуклонных соударений был определен потенциал взаимодействия нуклона с нуклоном. Затем он был использован для получения потенциала взаимодействия ядра с ядром (даже в случае тяжелых ядер).

Очевидно, что при любой реакции налетающая частица и вылетающие продукты реакции могут просто рассеяться в поле мишени и ядра отдачи соответственно. Поэтому неудивительно, что получающееся в результате этого изменение волн налетающей и выходящей частиц может быть довольно точно описано соответствующими решениями в оптической модели. Так возникает широко используемое борновское приближение с учетом взаимодействия в начальном и конечном состояниях, которое применимо для извлечения ядерно-спектроскопической информации (матричных элементов) из данных о различных реакциях.

Поляризационные явления указали на необходимость добавления специфического спин-орбитального потенциала к основным центральным силам в оптической модели. Недавно было показано, что в потенциал надо добавлять также член, зависящий от изоспина, для того чтобы отразить тот факт, что он является более глубоким для протонов, нежели для нейтронов.

Аналоговые по изоспину состояния

Понятие изоспина было введено в ядерную физику давно, еще в 1932 г., Вернером Гейзенбергом. Это — квантовое число, характеризующее ядерную систему, и отличное от тех, которыми характеризуют атом. В 1937 г. Е. Вигнер указал на связь между изоспином и зарядовой независимостью ядерных сил. Однако в последующие 25 лет изоспиновый формализм применялся только к легким ядрам ($Z \leq 10$), так как было общепринятым считать, что в более тяжелых ядрах кулоновские матричные элементы будут настолько велики, что приведут к почти полному смешиванию состояний с различным изоспином. В 1961 г. Брюс Френч и Малкольм Макферлейн впервые предположили, что изоспин сохраняет свое значение как ядерное квантовое число даже в намного более тяжелых ядрах. Это предположение получило сильное подтверждение в том же году, когда С. А. Андерсоном и Кельвином Уонгом были открыты изобарные аналоговые состояния в тяжелых ядрах.

Как было обнаружено Джоном Фоксом и его сотрудниками в 1964 г., эти состояния можно рассматривать как резонансы, например, в рассеянии протонов. Поэтому вся мощь методики изучения резонансов может быть применена и для исследования практически эквивалентной проблемы строения низколежащих «родительских» состояний. В последние годы изучение изобарных состояний и их использование в качестве проб строения ядер составило значительную долю всех работ в области ядерной физики.

ЯДЕРНЫЕ РЕАКЦИИ

В течение десяти лет после 1948 г. основная часть работ по изучению ядерных реакций и рассеяния проводилась с относительно низкоэнергетическими налетающими частицами (часто с энергией, меньшей 5 Мэв). Поэтому большинство исследований имело дело с изучением резонансных реакций, происходящих с образованием хорошо известных компаунд-систем. Эта спектроскопия привела к появлению огромного количества данных о динамике ядер. При анализе данных об угловых распределениях и всевозможных корреляциях применялись известные методы квантовой теории моментов.

По мере того как росли доступные энергии при достаточно точном разрешении по энергии, необходимом для выделения ядер отдачи в заданном состоянии, основным направлением в изучении ядерных реакций стали прямые взаимодействия, которые соответствуют когерентному суммированию очень большого числа отдельных резонансов промежуточной системы. Конкретное микроскопическое описание, характерное для исследования резонансов, было заменено на более макроскопические оптические аналогии (дифракции Фраунгофера и Френеля и тому подобное) и на другие теории ядерных реакций, содержащие довольно существенные предположения.

В 1960 г. Торлиф Эриксон заметил, что непосредственное применение статистических корреляционных методов к функциям возбуждения реакций при таких условиях (когда используется нечто, аппроксимирующее континуум промежуточных состояний) дает возможность определить усредненную энергетическую ширину, а следовательно, и время жизни этих промежуточных состояний. Это было широко использовано. Недавно была выяснена систематика таких времен жизни в функции от энергии возбуждения и атомного числа.

Прямые реакции, в которых налетающее ядро и ядро мишени обмениваются одним или же каким-то конечным числом нуклонов, были рассмотрены впервые в классической статье Стюарта Батлера в 1952 г. Эти реакции оказались наиболее ценным источником информации о строении ядра.

В тех случаях, когда происходит обмен только одним нуклоном, оказалось возможным непосредственно определить положение и строение одночастичных состояний и состояний с одной дыркой. Когда обмен происходит более чем одним нуклоном, когерентные явления усиливают чувствительность реакции как к малым, так и к большим компонентам волновых функций участвующих в реакции состояний, а также к фазам этих компонент. Эти реакции достаточно хорошо поняты в случае легких налетающих ядер ($A \leq 4$). Однако ситуация с более тяжелыми ядрами пока еще только начинает проясняться как экспериментально, так и теоретически.

НОВЫЕ ИЗОТОПЫ И ЭЛЕМЕНТЫ

В течение примерно 4 миллиардов лет число элементов оставалось равным 92. К 1947 г. оно возросло до 96. Реализация программы изучения трансурановых элементов, составленной Гленом Сиборгом и его сотрудниками в Беркли, привела к росту этого числа до 103 в 1961 г. Затем Г. Н. Флеров с сотрудниками получили 104-й элемент (курчатовий) в Дубне, а совсем недавно (в сентябре 1967 г.) 105-й элемент, пока еще не имеющий названия. Однако сейчас наибольший интерес вызывают намного более тяжелые элементы. Дело в том, что времена жизни только

что открытых новых элементов постепенно уменьшаются с ростом массы. Однако вычисления на основе оболочечной модели показали, что затем с ростом массы могут появиться более стабильные элементы. Вполне возможно, что один из элементов 114 и 126 или оба они могут соответствовать следующему (за числом 82 для свинца) магическому числу протонов. Соответственно следующим возможным магическим числом нейтронов, равным 184, будут обладать изотопы с массой 298 и 310, которые, как можно ожидать, будут иметь особенно стабильное (двойное магическое) строение, и следовательно, их времена жизни, согласно оценкам, будут заключены в интервале от нескольких секунд до нескольких дней.

В 1948 г. число известных изотопов стабильных элементов равнялось примерно пятистам. К 1968 г. это число возросло почти до 1600.

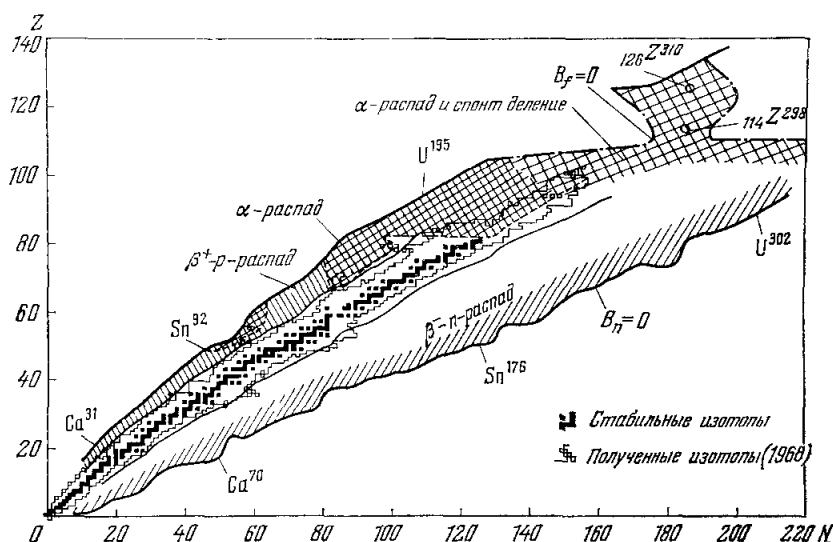


Рис. 2. Ядерная карта.
(Рисунок взят у Г. Н. Флерова.)

Из оценок, проведенных Г. Н. Флеровым, следует, что при бомбардировке урана ионами урана с энергией 3 Гэв будет образовываться по крайней мере 5000 изотопов. Становится очевидным, что изучение далеких краев области стабильности относительно β -распада, изображенной на ядерной карте (рис. 2), даст новый неоценимый вклад в наше понимание строения ядер. В результате процесса деления образуются ядра с преобладанием нейтронов. Эта область на рисунке расположена справа от области стабильных изотопов. В результате же реакций с тяжелыми ионами или вызванного этими ионами деления образуются ядра с избытком протонов. Эта область находится слева от области стабильных изотопов. Такие ядра могут быть весьма полезны для проверки сделанных недавно предсказаний относительно равновесных форм ядер в ранее не доступных для изучения областях, где нейтроны и протоны продолжают заполнять одни и те же орбитали в оболочечной модели.

Впервые полуэмпирические формулы для массы ядра (или энергии связи) были написаны еще в 1935 г. Карлом Ф. фон Вейцзеккером. Затем они неоднократно улучшались и модифицировались. Однако только

в 1966 г. были предложены такие формулы, которые допускали достаточно надежную экстраполяцию в области, удаленные от области стабильных ядер, и давали предсказания о стабильности ядер относительно распадов, вызываемых сильными взаимодействиями (например, относительно мгновенного распада с испусканием нейтрона). Используя эти формулы, можно, например, предсказать, что ядра Sn^{92} и Sn^{178} , а также C^{190} и C^{202} будут стабильными.

ИССЛЕДОВАНИЯ ПРИ ВЫСОКИХ ЭНЕРГИЯХ

Физики, изучающие строение ядра, активно используют все возможности, которые предоставляют им ускорители с энергиями частиц в сотни $M\text{эв}$ и несколько $Г\text{эв}$, для того чтобы исследовать внутреннюю структуру ядра. По-видимому, наиболее важными исследованиями были работы по изучению реакции $(p, 2p)$, в которых пучок, будучи вырван из оболочки, движется сквозь ядро. Первые эксперименты были поставлены в Уинстоне в начале 50-х годов, а затем продолжены и проведены при более высоких энергиях во многих лабораториях. Преимуществом этих исследований является то, что при высоких энергиях становится справедливым импульсное приближение, и это существенно облегчает анализ экспериментальных результатов. Самые важные проблемы, изучением которых занимаются в настоящее время состоят в определении импульсного распределения нуклонов в ядрах и в выяснении вопроса о том, насколько существенны корреляции между нуклонами или же эффекты группирования их. Исследование взаимодействия протонов и α -частиц с энергиями $1 Г\text{эв}$ с ядрами уже дало некоторые указания на то, что нуклоны в легких ядрах группируются парами (в «двухтонах»), а вблизи поверхности средних и тяжелых ядер они группируются в квази- α -частицы. Не существует никакого четкого доказательства того, что в ядрах действуют какие-либо силы, отличные от двухчастичных. Новые эксперименты при высоких энергиях дадут возможность непосредственно оценить величину специфических трехчастичных или многочастичных взаимодействий или же установить новую верхнюю границу этих сил.

Исследование рассеяния и неупругих взаимодействий пионов с ядрами как при низких, так и при высоких энергиях еще только начинается. Здесь существуют большие надежды на возможность изучения внутреннего строения ядер. Мезонная фабрика, сооружаемая сейчас в Лос-Аламосе, откроет новую эру в ядерной физике, эру, о которой раньше можно было только мечтать.

МИКРОСКОПИЧЕСКАЯ ЛАБОРАТОРИЯ

Как уже было отмечено выше, ядро является единственной многочастичной системой, в которой действуют все известные в природе силы. Поэтому оно служит незаменимой микроскопической лабораторией для изучения основных законов сохранения и принципов симметрии.

Наиболее известным примером является использование ядер с целью обнаружения несохранения четности в слабых взаимодействиях. В 1956 г. Т. Д. Ли и Ц. Н. Янг установили, что, несмотря на многочисленность исследований β -распада ядер, не существует никаких экспериментальных данных, которые помогли бы ответить на вопрос о том, сохраняется ли в этом распаде пространственная четность. Они предложили ряд решающих контрольных экспериментов. Вскоре после этого Ву и ее соавторы убедительно показали на основе анализа углового распреде-

ления электронов, возникающих при распаде ориентированных ядер Co^{60} , что пространственная четность не сохраняется в слабых взаимодействиях.

Было замечено, что виновником этого в слабых взаимодействиях может быть нейтрино, если оно обладает определенной спиральностью, равной -1 , или, другими словами, движется подобно левостороннему штопору. Это фундаментальное свойство было проверено в эксперименте, поставленном Морисом Гольдгабером, Ли Гродзинсом и Эндрю Сульямом в 1958 г., по распаду метастабильного Eu^{152} на Sm^{152} с последующим испусканием γ -кванта с энергией 961 кэв. Оказалось, что нейтрино, действительно, обладает таким свойством.

Анализ реакций с участием только сильно взаимодействующих частиц показал, что в этих взаимодействиях нарушение четности намного меньше, нежели в слабых взаимодействиях. Фактически не удавалось обнаружить никакого нарушения четности, а только лишь указывалась верхняя граница такого нарушения. Однако в 1967 г. В. М. Лобашов с сотрудниками провели в Ленинграде эксперименты по измерению круговой поляризации γ -квантов в некоторых переходах Ta^{181} и Lu^{175} . Было обнаружено, что величина F нарушающего четность сильного взаимодействия равна $(2 \div 4) \cdot 10^{-7} *$.

Исследования взаимодействий нуклонов с нуклонами показали, что имеет место определенная зарядовая зависимость части сильных взаимодействий, не нарушающей четности. Например, синглетные длины рассеяния равны $-16,75 \pm 0,15$, $-16,4 \pm 1,9$ и $-23,679 \pm 0,028$ ф для рассеяния протона на протоне, нейтрона на нейтроне и нейтрона на протоне, соответственно. Электромагнитные поправки могут привести к величине порядка 1 ф, тогда как расхождение составляет около 7 ф. Остаток надо интерпретировать как 4%-ное различие между взаимодействием протона с протоном и протона с нейтроном. Пока что нет никаких данных о возможном отличии сил, действующих между двумя протонами и между двумя нейтронами. Полученные результаты качественно согласуются с 3%-ной разницей в массах заряженных и нейтральных пионов и с доминирующей ролью для ядерных сил однопионного обмена. Однако количественно эта разница масс может объяснить всего лишь половину наблюдаемого отличия длин рассеяния.

Возвращаясь вновь к слабым взаимодействиям, подчеркнем, что одним из самых существенных вопросов является проблема относительной величины членов в лагранжиане этого взаимодействия, сохраняющих и не сохраняющих лептонное число. Наиболее прямой экспериментальной проверке эта проблема может быть подвергнута при изучении двойного β -распада ядер. В течение 1967—1968 гг. Ву с сотрудниками, намного улучшив условия эксперимента, изучили двойной β -распад Ca^{48} . Полученный сейчас ими нижний предел для времени жизни, равный 10^{21} лет, соответствует верхнему пределу амплитуды не сохраняющего лептонное число слабого взаимодействия, равному 10^{-3} . Продолжение экспериментов приведет либо к уменьшению этого нижнего предела, либо к обнаружению части слабого взаимодействия, не сохраняющей лептонное число.

В ядерной физике было предложено множество опытов по проверке инвариантности относительно обращения времени. Некоторые из них были проведены в последнее десятилетие. Возможно, наиболее известными из них являются опыты по измерению корреляции электронов с нейтрино в распаде поляризованных нейтронов, проведенные впервые Джоном Робсоном с сотрудниками в 1960 г., а также опыты по измерению разности

*) В оригинале статьи ошибочно указано значение $(2 \pm 4) \cdot 10^{-7}$. (Прим. перев.)

фаз интерферирующих электромагнитных мультиполей при γ -переходах в ядрах. В последнем случае инвариантность относительно обращения времени требовала, чтобы разности фаз интерферирующих мультиполей равнялись точно 0° или 180° . До конца 1967 г. эти фазы были известны с точностью $\pm 5^\circ$. Однако Оттмар Кистнер показал недавно в опытах с Ru^{99} , что разность фаз (по крайней мере в этом случае) интерферирующих $M1$ - и $E2$ -мультиполей равна 180° с точностью $\pm 0,15^\circ$. Таким образом, установлен намного более жесткий верхний предел на возможную амплитуду компоненты, не инвариантной относительно обращения времени.

В качестве последнего примера использования ядра как микроскопической лаборатории мы рассмотрим возможность слабого изменения с течением времени заряда протона e . В 1937 г. П. А. М. Дирак предположил, что e^2 может изменяться с изменением космологического времени t . Недавно Фримен Дайсон предпринял детальное изучение β -распада Re^{187} на Os^{187} и показал, что в течение, скажем, $3 \cdot 10^9$ лет e^2 оставался постоянным с точностью до добавки, которая была примерно в 300 раз меньше, чем получающаяся из предположения Дирака. Другим фактом, отрицающим возможность таких долговременных изменений e^2 , является стабильность тяжелых ядер. Это было отмечено Ашером Пересом. Даже очень небольшое изменение e^2 сместило бы наиболее стабильную изобару с $A = 238$ от U^{238} к Ru^{238} или Sm^{238} . Ядерная физика предоставляет уникальные возможности для проведения соответствующих измерений по проверке таких гипотез.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Ядерная физика достигла уже поры расцвета, когда можно ставить довольно сложные вопросы о строении и поведении ядер. Основные характеристики этой области относительно хорошо известны, хотя непрерывно появляются новые неожиданные результаты. К счастью, новое экспериментальное оборудование и новые теоретические методы, развитые в последнее время, дают надежду найти ответы на возникающие вопросы. Как отвечать на многие из них, еще неясно. На самом деле каждое новое продвижение в той или иной области, кажется, ставит больше новых вопросов, чем решает старых. Это — свидетельство жизнеспособности и активного развития этой области физики.

Только за последнее время в экспериментальных лабораториях во всем мире появилось большое количество новых приборов. В результате этого точность получаемых данных возросла примерно на два порядка по отношению к доступной ранее. Поэтому можно ожидать существенного прогресса, который неизбежно будет сопровождаться новыми удивительными находками и новым пониманием.

Только в последнее время ядро как микроскопическая лаборатория стало использоваться в фундаментальных физических исследованиях, число которых, несомненно, будет возрастать, а точность улучшаться.

Вступающие вскоре в строй ускорители электронов и протонов очень высоких энергий, предназначенные для ядерных исследований, прибавят много нового в изучении ядра. Они позволят проникнуть внутрь ядра еще глубже, чем ранее. Наше наступление на многочастичную проблему в ядрах развивается хорошо. Однако впереди еще долгий путь.