

ОБЗОР ФИЗИКА АТОМНОГО ЯДРА И ЭЛЕМЕНТАРНЫХ ЧАСТИЦ

Атомные ядра

Б. С. Ишханов

*Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова, физический факультет,
кафедра общей ядерной физики;
Научно-исследовательский институт ядерной физики имени Д. В. Скобельцына (НИИЯФ МГУ).
Россия, 119991, Москва, Ленинские горы, д. 1, стр. 2.
E-mail: bsi@depni.sinp.msu.ru*

Статья поступила 25.09.2011, подписана в печать 29.10.2011

Начиная с 1911 г., с момента открытия атомного ядра Э. Резерфордом, физики пытаются разобраться в том, как устроено атомное ядро. Каждое ядро — это сложный уникальный объект, состоящий из конечного числа нейтронов и протонов. В обзоре показано, как по мере накопления большого числа экспериментальных данных, их осмысления и теоретического анализа изменялись представления об атомном ядре. В результате были обнаружены новые типы взаимодействий, ранее не известные в физике, — сильные и слабые взаимодействия, обнаружены новые явления, связанные с взаимным превращением частиц, обнаружены новые типы симметрии, в частности изоспиновая симметрия, разработаны новые экспериментальные методы, созданы ускорители, впервые позволившие наблюдать изменения, происходящие с отдельными атомными ядрами. Изучение свойств атомных ядер открыло новый мир — субатомный квантовый мир. Полученные знания важны в естествознании — от изучения живых систем до астрофизики.

Ключевые слова: атомное ядро, ядерная физика, ядерные реакции.
УДК: 539.1. PACS: 21.10.-k, 24.10.-i, 01.65.+g.

Посвящается 100-летию открытия атомного ядра Э. Резерфордом

1. 1911 г. Резерфорд открывает атомное ядро

В июньском 1911 г. номере журнала «Philosophical Magazine» была опубликована работа Э. Резерфорда «Рассеяние α - и β -частиц веществом и строение атома», в которой впервые было введено понятие «**атомное ядро**».

Э. Резерфорд проанализировал результаты работы Г. Гейгера и Э. Марсдена по рассеянию α -частиц на тонкой золотой фольге, в которой совершенно неожиданно было обнаружено, что небольшое число α -частиц отклоняется на угол больше 90° . Этот результат противоречил господствовавшей в то время модели атома Дж. Дж. Томсона, согласно которой атом состоял из отрицательно заряженных электронов и равного количества положительного электричества, равномерно распределенного внутри сферы радиуса $R \approx 10^{-8}$ см. Для объяснения результатов, полученных Гейгером и Марсденом, Резерфорд разработал модель рассеяния точечного электрического заряда α -частицы $Z_\alpha e$ другим точечным зарядом ядра $Z_{\text{nucleus}} e$ на основе закона Кулона и законов движения Ньютона и получил зависимость вероятности рассеяния α -частиц на угол θ от энергии E налетающей частицы

$$\frac{d\sigma}{d\Omega} = \left(\frac{Z_\alpha Z_{\text{nucleus}} e^2}{4E} \right)^2 \frac{1}{\sin^4 \frac{\theta}{2}}.$$

Измеренное Гейгером и Марсденом угловое распределение α -частиц можно было объяснить только в том случае, если предположить, что атом имеет центральный заряд, распределенный в области разме-

ром $\sim 10^{-12}$ см. Результирующий заряд ядра золота оказался приблизительно равен $\frac{1}{2} A e$, где A — вес атома в атомных единицах массы, e — фундаментальная единица заряда. Точность определения величины заряда ядра золота составила $\sim 20\%$. Так возникла планетарная модель атома, согласно которой атом состоит из массивного положительно заряженного атомного ядра и вращающихся вокруг него электронов. Так как в целом атом электрически нейтрален, положительный заряд ядра компенсировался отрицательным зарядом электронов. Число электронов в атоме определялось величиной заряда ядра Z .

Э. Резерфорд, 1911 г.: «Наиболее простым является предположение, что атом имеет центральный заряд, распределенный по очень малому объему, и что большие однократные отклонения обусловлены центральным зарядом в целом, а не его составными частями. В то же время экспериментальные данные недостаточно точны, чтобы можно было отрицать возможность существования небольшой части положительного заряда в виде спутников, находящихся на некотором расстоянии от центра... Следует отметить, что найденное приближенное значение центрального заряда атома золота ($100e$) примерно совпадает с тем значением, который имел бы атом золота, состоящий из 49 атомов гелия, несущих каждый заряд $2e$. Быть может, это лишь совпадение, но оно весьма заманчиво с точки зрения испускания радиоактивным веществом атомов гелия, несущих две единицы заряда».

Предположение Резерфорда о том, что атомное ядро может состоять из атомов гелия и положительно заряженных спутников ядра, было вполне естественным объяснением открытой им α -радиоактивности. Представления о том, что частицы могут рождаться в результате различных взаимодействий, в это время еще не существовало.

Э. Резерфорд, 1936 г.: *«В результате проведенных в течение столетий усердных работ химии преуспели в разделении и очистке подавляющего большинства элементов, и возникло представление о том, что атомы данного типа вещества все сделаны по одному образцу. Атомы были неизменяемы и неразрушаемы, и такими они должны были оставаться навечно или до тех пор, пока будет существовать наука химия. И хотя от старого представления об атоме, как о твердом «бильярдном шаре», в конце прошлого столетия полностью отказались, химии все еще были уверены, что с точки зрения имеющих в их распоряжении методов атомы неизменны и определенно неразрушаемы. Случалось, что кто-нибудь воображал, что превратил один тип атома в другой, но всегда можно было доказать, что он ошибся.*

Тогда же было развито замечательное обобщение, известное как периодический закон, на основе которого свойства элементов связывались с их положением в ряду по атомным весам. Наиболее мыслящие из химиков инстинктивно чувствовали, что этот закон соответствует представлению о том, что все атомы либо схожи по своей структуре, либо каким-то образом все сделаны из более элементарного материала. Но эти представления были очень смутны, и истинное значение периодического закона было понято лишь через 10 или 15 лет».

2. Конец XIX столетия

Конец XIX столетия был богат неожиданными открытиями, которые изменили существовавшее представление о строении вещества. В конце 1895 г., экспериментируя с излучением, возникающим вблизи анода разрядной трубки, Рентген обнаружил, что излучение, которое он назвал X-лучами, свободно проходит сквозь непрозрачные для света предметы. В настоящее время более употребительный термин — рентгеновское излучение. Большая проникающая способность рентгеновского излучения объясняется их короткой длиной волны. Видимый свет имеет длину волны $(4-8) \cdot 10^{-5}$ см, в то время как длина волны рентгеновского излучения $3 \cdot 10^{-8} - 10^{-7}$ см.

В 1896 г. А. Беккерель обнаружил, что соли урана тоже испускают излучение, которое чем-то было похоже на рентгеновское излучение: оно также проходило через непрозрачные предметы и слабо поглощалось в веществе. Но в отличие от рентгеновского излучения для его получения не нужен был источник высокого напряжения. Соли урана излучали непрерывно, самопроизвольно. На излучение солей урана не влияли никакие внешние воздействия. Излучение урана было вначале названо лучами Беккереля.

В 1897 г. Дж. Томсон, изучая излучение различных газов, заполняющих разрядную трубку, показал, что

независимо от состава газа, заполняющего разрядную трубку, в результате разряда образуются одинаковые мельчайшие частицы, которые имеют отрицательный электрический заряд. Частица была названа электроном. Электрон имеет массу примерно в 2000 раз меньше, чем масса самого легкого атома водорода. 1897-й год стал годом рождения новой элементарной частицы — электрона.

Э. Резерфорд, 1936 г.: *«Это было в 1897 г., когда из экспериментов, проведенных в основном нашим руководителем Дж. Дж. Томсоном, вытекало, что так называемые катодные лучи Крукса состоят из потока частиц очень малой массы, движущихся с очень большой скоростью. Я полагаю, что мы вправе приписать преимущественную роль в этом открытии Дж. Дж. Томсону, поскольку он был первым, кто отклонил эти частицы как в электрическом, так и в магнитном полях, и первым понял, что электрон должен быть составной частью всех атомов, а также придумал методы определения числа электронов в атоме».*

Обнаружение в составе атома электронов, которые можно было отделять от атома, разрушило существовавшее в течение 2.5 тыс. лет со времен Демокрита представление об элементарном и неделимом атоме.

Изучением природы лучей Беккереля, их отличием от рентгеновского излучения, активно занимались многие физики. Резерфорд, воздействуя на излучение урана магнитным полем, исследуя поглощение излучения в фольгах различной толщины, в 1899 г. установил, что оно состоит из частиц двух типов. Короткопробежные положительно заряженные частицы он назвал α -частицами. Отрицательно заряженные частицы, которые имели больший пробег в веществе, он назвал β -частицами. Обнаруженные Резерфордом « β -частицы» являются электронами.

Нейтральное γ -излучение урана было открыто в 1900 г. П. Виллардом. Способность излучения урановых солей ионизировать воздух была использована для определения источников излучения Беккереля. Вскоре было обнаружено, что соединения тория также самопроизвольно испускают лучи Беккереля. По предложению М. Кюри вещества, испускающие лучи Беккереля, стали называть радиоактивными. А само явление — радиоактивностью. Считалось, что радиоактивность — атомное свойство. П. Кюри обнаружил, что радиоактивные вещества имеют температуру выше окружающей среды — испускание радиоактивного излучения веществом приводит к его нагреванию.

Изучая радиоактивность урана, М. Кюри обнаружила, что химически чистый уран имеет гораздо меньшую радиоактивность, чем соли урана. Оказалось, что соли урана содержат два новых, неизвестных ранее химических элемента, которые также обладают свойством радиоактивности. Это были полоний Po и радий Ra. Содержание этих химических элементов в радиоактивных минералах составляло 10^{-7} от содержания урана.

В физике появился новый термин — **активность радиоактивного источника**. В качестве единиц активности источника были выбраны кюри и беккерель:

1 беккерель = 1 распад/с,

1 кюри = $3.7 \cdot 10^{10}$ распад/с.

Активность 1 кюри соответствует распаду 1 грамма радия вместе с продуктами его распада.

Исследуя радиоактивность урана, тория, радия, Резерфорд показал, что радиоактивные вещества, испускающая α -частицы, превращаются в другие химические вещества, отличающиеся от исходных по своим физическим и химическим свойствам. Так, при распаде радия образуется радиоактивный газ — эманация радия (радон Rn), который также испускает α -частицы. Однако радиоактивность радона полностью пропадала в течение нескольких часов. Это противоречило всем случаям неизменной радиоактивности, которая наблюдалась до этого. Оказалось, что радиоактивность вещества может уменьшаться и совсем исчезать. Очень скоро стало ясно, что уменьшение радиоактивности различных веществ происходит с разной скоростью. Число частиц, испускаемых радиоактивным веществом, уменьшается со временем экспоненциально. Для описания этого свойства радиоактивного вещества была введена новая характеристика — **период полураспада**.

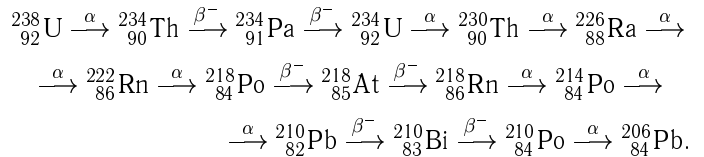
Период полураспада — время, в течение которого количество радиоактивного вещества уменьшается в 2 раза. Период полураспада разных радиоактивных веществ изменяется в очень широких пределах — от 10^{-17} с до 10^{22} лет.

Изучая распад радия, Резерфорд показал, что α -частицы — это атомы гелия, у которых оторвано два электрона. Для этого он собрал образующиеся в результате распада эманации радия α -частицы в разрядной трубке и показал, что при разряде в трубке видны спектральные линии гелия. Так было доказано, что α -частицы — это ионизированные атомы гелия. **В результате экспериментов, выполненных Резерфордом, впервые было показано, что одни химические элементы могут спонтанно превращаться в другие химические элементы.** Химический элемент радий превращался в химические элементы радон и гелий. Эти результаты коренным образом изменили существовавшие до Резерфорда взгляды на неизменную природу химических элементов.

Э. Резерфорд: «На основании полученных в настоящее время данных можно сделать вывод, что начало последовательности химических превращений, протекающих в радиоактивных телах, обусловлено испусканием α -лучей, т. е. вырыванием из атома тяжелой заряженной массы. Остающаяся часть нестабильна и претерпевает дальнейшие химические изменения, которые в свою очередь сопровождаются испусканием α -лучей... Хорошо известный элемент радий происходит от урана и является пятым продуктом в ряду его превращений».

Ф. Содди сформулировал закон радиоактивного смещения, согласно которому при излучении α -частицы один химический элемент превращается в другой, расположенный на два места ниже в Периодической таблице, а β^- -излучение вызывает смещение химического элемента на одно место выше. На основе закона смещения была получена последовательность распада многих радиоактивных элементов. Например, цепочка

последовательных распадов ^{238}U имеет вид



Гамма-излучение непосредственно не связано с превращением элементов. Оно возникает, если в результате α - и β -распада ядро образуется в возбужденном состоянии, которое после испускания γ -кванта переходит в более низко расположенное по энергии состояние. Этот процесс аналогичен испусканию излучения атомом.

Первые экспериментальные данные о существовании изотопов были получены в 1910 г. при изучении продуктов распада радиоактивных ядер. Было обнаружено, что существует несколько различных веществ, которые имеют одинаковые химические свойства, но различаются атомной массой и характеристиками радиоактивного распада. По предложению Ф. Содди такие вещества были названы изотопами.

Э. Резерфорд, 1936 г.: «Многие исследователи при разделении определенных радиоактивных тел натолкнулись на невероятное, почти непреодолимое затруднение. Содди очень заинтересовался этим явлением и обнаружил несколько радиоактивных веществ, которые он не смог разделить. Эти вещества были совершенно различными и обладали характерными радиоактивными свойствами, однако их нельзя было разделить с помощью химических операций. Он обратил также внимание, что в Периодической таблице для большой группы радиоактивных элементов даже нет места, и предположил, что существуют элементы, неотделимые с химической точки зрения, но обладающие с точки зрения радиоактивности различными свойствами. Содди назвал соответствующие элементы такого рода изотопами, и так было положено начало большой области исследований, огромный вклад в которую внес Астон».

Изучение β^- -распада сыграло чрезвычайно большую роль в понимании процессов, происходящих в атомных ядрах. Экспериментальные факты казались несовместимыми с законами сохранения энергии, импульса, момента количества движения. Так, суммарная энергия электрона и ядра, образовавшегося в результате распада, была меньше энергии начального ядра. Для того чтобы спасти законы сохранения энергии, В. Паули в 1930 г. в письме участникам физической конференции в г. Тюбингене высказал предположение, что в процессе β^- -распада наряду с электроном должна рождаться еще одна очень легкая (неуловимая) частица с нулевым электрическим зарядом и спином $J = 1/2$.

В. Паули: «Дорогие радиоактивные дамы и господа. Имея в виду... непрерывный β -спектр, я принял отчаянную попытку спасти обменную статистику и закон сохранения энергии. Именно имеется возможность того, что в ядрах существуют электрически нейтральные частицы, которые я буду называть «нейтронами» и которые обладают спином $1/2$. Масса «нейтрона» по порядку величины должна быть сравнимой с массой электрона и во

всяком случае не более 0.01 массы протона. Непрерывный β -спектр тогда стал бы понятным, если предположить, что при распаде вместе с электроном испускается еще и «нейтрон» таким образом, что сумма энергий «нейтрона» и электрона остается постоянной».

После открытия в 1932 г. нейтрона Э. Ферми предложил называть частицу В. Паули «нейтрино». В 1933 г. на Сольвеевском конгрессе В. Паули выступил с докладом о механизме β -распада с участием нейтральной частицы со спином $J = 1/2$. Были отвергнуты последние сомнения в том, что надежно зарекомендовавшие себя в классической физике законы сохранения в квантовых процессах выполняются. В 1934 г. Э. Ферми построил теорию β -распада, основанную на законе сохранения энергии и предположении, что из ядра одновременно вылетают электрон и нейтрино. Ферми объяснил наблюдаемый энергетический спектр электронов и связал скорость β -распада с максимальной энергией электронов, вылетающих при β -распаде. Наиболее важным элементом теории β -распада Ферми было утверждение, что в ядре нет ни электронов, ни нейтрино. **Электрон и нейтрино возникают в момент распада атомного ядра.** Этот распад аналогичен испусканию света атомом. Световой квант не существует в атоме, а возникает в результате изменения состояния атома. Нейтрино было экспериментально обнаружено в 1956 г. в экспериментах Ф. Райнеса и К. Коэна.

3. Состав атомного ядра

Обстреливая α -частицами атомы водорода, Резерфорд обнаружил, что нейтральные атомы водорода превращаются в положительно заряженные частицы. Резерфорду было известно, что легчайший атом Периодической системы водород состоит из ядра, имеющего единичный положительный заряд, и электрона. Следовательно, при столкновении α -частица подходила достаточно близко к ядру водорода и передавала ему часть энергии и импульса. Резерфорд назвал эти положительно заряженные частицы Н-атомами. Позже за ними укрепилось название «протоны». Одновременно Резерфорд установил, что взаимодействие между α -частицей и ядром водорода не подчиняется обнаруженному им ранее закону рассеяния α -частиц на ядрах золота. При сближении α -частицы с ядром водорода силы взаимодействия между α -частицей и ядром водорода резко возрастали.

Э. Резерфорд, 1920 г.: «В случае атомов с большим ядерным зарядом даже самая быстрая α -частица не может проникнуть в саму структуру ядра, так что мы можем лишь оценить его максимальные размеры. Однако в случае легких атомов, когда заряд ядра мал, при прямом столкновении α -частица приближается так близко к ядру, что мы можем оценить его размеры и составить некоторое представление о действующих силах. Наилучшим образом это видно в случае прямого столкновения α -частицы с атомом водорода. В этом случае Н-атом приходит в столь быстрое движение, что он проходит в четыре раза больший путь, чем сталкивающаяся с ним α -частица, и может быть зарегистрирован по сцинтилляции, вызываемой им

на экране из сернистого цинка... Я показал, что эти сцинтилляции обусловлены атомами водорода, несущими единичный положительный заряд... Соотношение между числом и скоростью этих Н-атомов совершенно отлично от того, которое следовало ожидать, если рассматривать α -частицу и Н-атом как точечные заряды. В результате столкновения с быстрыми α -частицами получают Н-атомы, которые почти с одинаковыми скоростями летят по направлению налетающих α -частиц. Отсюда было выведено, что закон обратной пропорциональности квадрату расстояния становится несправедливым, когда ядра приближаются друг к другу на расстояние меньшее $3 \cdot 10^{-13}$ см. Это служит указанием на то, что ядра имеют размеры этого порядка величины и что силы между ядрами очень быстро меняются по величине и направлению на расстояниях, сравнимых с обычно принятыми размерами диаметра электрона. Было указано, что при таких близких столкновениях между ядрами развиваются огромные силы и что, возможно, при столкновении структура ядер претерпевает значительную деформацию. Тот факт, что ядро гелия, которое, как можно предполагать, состоит из четырех Н-атомов и двух электронов, выдерживает это столкновение, свидетельствует о чрезвычайной устойчивости его структуры».

В результате изучения взаимодействия α -частиц с атомами водорода был обнаружен протон — ядро атома водорода. Резерфорд продолжает эксперименты по исследованию взаимодействия α -частиц с легкими атомами и в 1919 г. обнаруживает, что при облучении α -частицами атомов азота из атома вылетают протоны. Следовательно, протоны входят в состав атомных ядер. Но при этом под действием α -частиц должно было произойти изменение ядра атома азота. Его заряд должен увеличиться на единицу — ядро азота должно превратиться в ядро кислорода. **Впервые Резерфорд сделал то, что на протяжении веков не удавалось алхимикам, — он искусственно превратил один химический элемент в другой.** В течение нескольких последующих лет Резерфорд с учениками осуществил искусственное превращение около десяти легких химических элементов — бора, фтора, лития, натрия, фосфора и других.

Альфа-частица становится не только предметом исследований, но и инструментом, с помощью которого стало возможным изучать изменения, происходящие в отдельных атомах вещества. Для этого Э. Резерфордом с сотрудниками было разработано два метода, с помощью которых можно было регистрировать отдельные α -частицы:

1) метод сцинтилляций, позволяющий наблюдать вспышки от удара отдельной α -частицы в сцинтиллирующие экраны. Одним из первых детекторов α -частиц был экран, покрытый сернистым цинком. Метод счета сцинтилляций был использован Гейгером и Марсденом в эксперименте по рассеянию α -частиц на золоте, который привел к открытию атомного ядра;

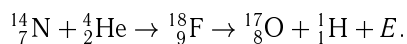
2) Гейгером был разработан метод газоразрядного счетчика. При прохождении заряженной частицы в счетчике возникал электрический разряд, который

можно было зарегистрировать электронными устройствами. Электронные методы счета частиц значительно повысили точность и надежность наблюдений, избавили от утомительного чисто субъективного метода регистрации сцинтилляций. Возможности проведения различных экспериментов расширились с разработанным В. Боте методом совпадений.

В изобретенной Ч. Вильсоном в 1912 г. камере, названной его именем, можно было наблюдать треки заряженных частиц. С помощью камеры Вильсона был сделан ряд фундаментальных наблюдений, сыгравших важную роль в понимании процессов, происходящих в микромире: впервые наблюдалось расщепление атомных ядер, были открыты позитрон, мюон, переносчик ядерного взаимодействия π -мезон и другие частицы.

Благодаря новым методам регистрации радиоактивности стало возможным изучить ряд явлений, которые раньше не поддавались исследованию, и в частности попытаться ответить на вопрос: как устроено атомное ядро? Для ответа на этот вопрос Резерфорд решил использовать столкновение α -частиц с ядрами легких химических элементов.

Э. Резерфорд: «Атомы нескольких легких элементов были подвержены бомбардировке очень большим количеством α -частиц. Выполнив эти опыты, я в 1919 г. получил экспериментальные доказательства того, что небольшое число атомов азота при бомбардировке распалось, испустив быстрые ядра водорода, известные теперь под названием протонов...



Всего лишь одна α -частица из 50 000 приближается к ядру достаточно близко, чтобы быть им захваченной».

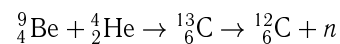
Обнаружив в составе атомного ядра протоны, Резерфорд предложил протон-электронную модель ядра. Протоны определяли массу атомного ядра, а электроны частично компенсировали электрический заряд протонов, что приводило к нужному значению заряда ядра. Так, например, считалось, что ядро, имеющее заряд $+2e$, состоит из четырех протонов и двух электронов. Важным аргументом в пользу протон-электронной модели был β^- -распад атомных ядер. Это явление можно было легко объяснить, если считать, что электроны входят в состав атомного ядра. Протон-электронная модель ядра встречала определенные возражения, основным из которых было то, что она не могла объяснить значение спинов атомных ядер. Однако она просуществовала до 1932 г.

Э. Резерфорд, 1920 г.: «Из изучения радиоактивности известно, что ядра радиоактивных элементов частично состоят из ядер гелия с зарядом $2e$. Кроме того, у нас имеются серьезные основания считать, что ядра атомов наряду с положительно заряженными частицами содержат также и электроны и что положительный заряд ядра соответствует избытку общего положительного заряда над отрицательным. Интересно отметить совершенно различную роль, которую играют электроны вне атома и внутри него. В первом случае они располагаются на расстоянии от ядра, которое несомненно определяется главным образом зарядом ядра и взаимодействием

их собственных полей. Внутри ядра электроны образуют очень тесное и прочное объединение с положительно заряженными единицами и, насколько нам известно, именно вне ядра они находятся в неустойчивом состоянии. Каждый внешний электрон несомненно взаимодействует с ядром как точечный заряд, тогда как о внутреннем электроны этого сказать нельзя. По-видимому, внутренние электроны под влиянием огромных сил сильно деформируются, и силы в этом случае могут совершенно отличаться от тех сил, которые можно ожидать от недеформированного электрона, как, например, вне ядра. Быть может, поэтому электрон может играть столь различную роль в этих двух случаях и даже образовывать стабильные системы».

Представление Резерфорда о том, что может образовываться сильно связанное состояние протона и электрона, было ошибочным. Тем не менее оно сыграло решающую роль в открытии нейтрона. В 1930–1932 гг., облучая α -частицами ядра бериллия, Боте и Беккер обнаружили, что в результате облучения образуется сильно проникающее нейтральное излучение. Все обнаруженные до сих пор излучения сильно поглощались тонкими слоями свинца, в то время как нейтральное излучение из бериллия свободно проходило сквозь толстую свинцовую защиту. Возникло подозрение, что это новый вид электромагнитного излучения.

Решающий эксперимент был выполнен в 1932 г. учеником Резерфорда Дж. Чедвиком. С помощью ионизационной камеры он измерил энергию отдачи ядер водорода и азота под действием нейтрального излучения из бериллия и показал, что в результате реакции



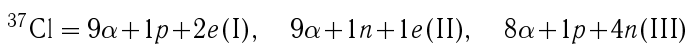
образуются быстрые нейтральные частицы с массой, приблизительно равной массе атома водорода. Эти частицы, названные нейтронами, не имеют электрического заряда, свободно проходят через атомы, не производя ионизацию на своем пути.

Д. Иваненко, 1932 г.: «Объяснение доктором Дж. Чедвиком таинственного излучения бериллия очень привлекательно для физиков-теоретиков. Возникает вопрос: нельзя ли допустить, что нейтроны играют также важную роль и в структуре ядер, считая все ядерные электроны «упакованными» либо в α -частицы, либо в нейтроны? Конечно, отсутствие теории ядер делает это предположение далеко не окончательным, но, может быть, оно покажется не таким уж неправдоподобным, если мы вспомним, что электроны, проникая в ядра, существенно изменяют свои свойства — теряют, так сказать, свою индивидуальность, например свой спин и магнитный момент.

Наибольший интерес представляет вопрос, насколько нейтроны можно рассматривать как элементарные частицы (чем-то подобными протонам или электронам). Нетрудно подсчитать число α -частиц, протонов и нейтронов, имеющих в каждом ядре, и получить таким образом представление об угловом моменте ядра (полагая угловой момент нейтрона равным $1/2$). Любопытно, что в ядрах

бериллия нет свободных протонов, а есть только α -частицы и нейтроны».

Д. Иваненко, 1932 г.: «Вести нейтроны в ядро можно двумя способами: либо не изменяя принятого числа α -частиц в ядре и нейтрализуя не более трех электронов (Перрен и Ожэ), либо нейтрализуя все электроны. Первый способ, по-моему, приводит к прежним трудностям в отношении значений спина. Более того, начиная с некоторого элемента возникает избыток внутриядерных электронов, и отсутствие у ядер соответствующих спинов представляется крайне таинственным. Напротив, второй подход, предложенный нами несколько ранее, по-видимому, позволяет преодолеть указанные трудности. Не будем входить здесь в общие рассуждения о преимуществах этого подхода как обобщения идеи де Бройля о существовании глубокой аналогии между светом и веществом; внутриядерные электроны действительно во многом аналогичны поглощенным фотонам, а испускание ядром β -частицы подобно рождению новой частицы, которая в поглощенном состоянии не обладает индивидуальностью. Укажем строение ядра хлора согласно старой (I) точке зрения и двум новым — Перрена-Ожэ (II) и нашей (III) (α обозначает α -частицу, p — протон, e — электрон, n — нейтрон):



(изотопы данного элемента отличаются друг от друга только числом нейтронов).

Мы рассматриваем нейтрон не как систему из электрона и протона, но как элементарную частицу. Это вынуждает нас трактовать нейтроны как частицы, обладающие спином $1/2$ и подчиняющиеся статистике Ферми-Дирака. Например, ядру ${}^{14}\text{N}(3\alpha + 1p + 1n)$ следует приписать спин 1 , а ядра азота действительно подчиняются статистике Бозе-Эйнштейна. Это становится теперь понятным, так как ${}^{14}\text{N}$ содержит 14 элементарных частиц, т. е. четное число, а не 21, как в старой схеме.

Все эти предположения, какими бы предварительными они ни были, по-видимому, приводят к совершенно новым взглядам на модель ядер».

Открытие нейтронов явилось важным этапом в развитии представлений о строении атомного ядра. На смену протон-электронной модели атомного ядра пришла протон-нейтронная модель ядра, впервые развитая независимо в работах Д. Иваненко, В. Гейзенберга.

В отличие от электронных оболочек атомов, ядра имеют вполне определенные размеры. Радиус ядра R описывается соотношением $R = 1.3A^{1/3}$ фм, A — массовое число, $A = N + Z$. Атомные ядра имеют большую массу и положительный заряд. Размеры атомных ядер обычно измеряют во внесистемной единице длины — ферми (1 ферми = 10^{-13} см). Протон-нейтронная модель ядра объяснила существование изотопов. Изотопы — атомные ядра, имеющие одинаковое число протонов Z и различное число нейтронов N . Известно свыше 3.5 тыс. изотопов.

Все атомные ядра можно разделить на две группы — стабильные и радиоактивные (нестабильные) ядра. Число стабильных изотопов и изотопов, имеющих период

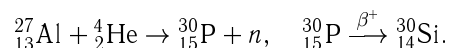
полураспада, сравнимый с временем существования Земли, — 350. Большинство ядер являются нестабильными изотопами. Чтобы радиоактивное вещество удалось обнаружить в природе, период полураспада не должен быть намного меньше возраста Земли или оно должно образовываться в результате распада другого радиоактивного вещества или в ядерной реакции. Наряду с α -, β -, γ -радиоактивностью были открыты новые типы радиоактивного распада.

1932-й год знаменит не только открытием нейтрона, но и другой частицы, которая сыграла важную роль в ядерной физике, — позитрона.

Позитрон был предсказан Дираком в 1930 г. и открыт Андерсоном в космических лучах. Позитрон e^+ является античастицей электрона. Позитрон был первой частицей нового мира — антимира. Вслед за позитроном на ускорителях были получены антипротоны и антинейтроны. Получены ядра антидейтерия, изотопы антигелия ${}^3\overline{\text{He}}$, ${}^4\overline{\text{He}}$, состоящие из антипротонов и антинейтронов. Получены первые атомы антиводорода, состоящего из антипротона и позитрона. Изучение свойств античастиц позволяет глубже понять симметрии, лежащие в основе организации материи.

И. Тамм: «Открытие позитрона нарушило сложившееся за последние 50 лет глубокое убеждение в вечности и неразрушимости электрона... Открытие позитрона и явлений нейтрализации позитрона и электрона, с одной стороны, и возникновение «пар», с другой, ведет к тому, что мы от этого представления о вечности электрона вынуждены отказаться и должны вернуться к исходной форме закона сохранения электричества, относящейся лишь к алгебраической сумме зарядов».

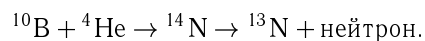
В настоящее время известны не только явления радиоактивного β^- -распада, в которых из ядер вылетают электроны, но и явления позитронного β^+ -распада, в которых из ядер вылетают позитроны. В 1933 г. И. Кюри и Ф. Жолио обнаружили, что при облучении α -частицами алюминия образуется радиоактивный фосфор с периодом полураспада 2.5 мин. Радиоактивный фосфор ${}^{30}_{15}\text{P}$, испуская позитроны, превращается в стабильное ядро ${}^{30}_{14}\text{Si}$ с массовым числом $A = 30$:



И. Кюри, Ф. Жолио: «В настоящей работе удалось впервые с помощью внешнего воздействия вызвать у некоторых атомных ядер радиоактивность, могущую существовать в течение измеряемого времени в отсутствие возбуждающей причины».

Это был первый случай искусственно созданного радиоактивного изотопа.

Э. Резерфорд, 1937 г.: «Если подвергнуть бор в течение некоторого времени бомбардировке α -частицами, а затем исследовать его, то он окажется радиоактивным, т. е. испускающим поток позитронов. Активность его спадает со временем по геометрической прогрессии, убывая наполовину за 11 мин. Природа превращения и его фазы таковы:



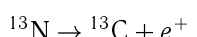
Благодаря избытку энергии ядро ${}^{14}\text{N}$ очень неустойчиво и мгновенно разрушается, превращаясь

Таблица 1

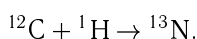
Типы радиоактивного распада ядер

Тип радиоактивного распада ядер	Тип испускаемых частиц. Реакция, в которой обнаружен радиоактивный распад	Год открытия	Авторы открытия
Радиоактивность атомных ядер	Излучение, вызвавшее потемнение фотопластинок	1896	A. Becquerel
Альфа-распад	${}^4_2\text{He}$, ${}^{238}_{92}\text{U} \rightarrow {}^{234}_{90}\text{Th} + {}^4_2\text{He}$	1898	E. Rutherford
β^- -распад	$e^- \tilde{\nu}$, ${}^{234}_{90}\text{Th} \rightarrow {}^{234}_{91}\text{Pa} + e^- + \tilde{\nu}$	1898	E. Rutherford
β^+ -распад	$e^+ \nu$, ${}^{30}_{15}\text{P} \rightarrow {}^{30}_{14}\text{Si} + e^+ + \nu$	1934	I. et F. Joliot-Curie
e -захват	$\nu, p + e^- \rightarrow n + \nu$ Протон ядра захватывает электрон атомной оболочки	1938	L. Alvarez
Гамма-распад	γ -квант, ${}^{238}_{92}\text{U} \xrightarrow{\alpha} {}^{234}_{90}\text{Th} \xrightarrow{\beta} {}^{234}_{91}\text{Pa}$ α -, β -распад на возбужденные состояния	1900	P. Villard
Ядерная изомерия	γ -квант, ${}^{234}_{91}\text{Pa}^* \xrightarrow{\gamma} {}^{234}_{91}\text{Pa}$	1921	O. Hahn
Спонтанное деление	Два осколка сравнимой массы ${}^{238}\text{U}$, ${}^{235}\text{U}$, ${}^{234}\text{U}$	1940	Г. Н. Флёрв, К. А. Петржак
Двойной β -распад	$e^- e^- 2\tilde{\nu}_e$, ${}^{130}_{52}\text{Te} \rightarrow {}^{130}_{54}\text{Xe} + e^- e^- + \tilde{\nu}_e \tilde{\nu}_e$	1950	M. G. Ingram, J. H. Reynolds
Протонная радиоактивность	p , ${}^{151}_{71}\text{Lu} \rightarrow {}^{150}_{70}\text{Yb} + p$	1981	S. Hofmann
Кластерная радиоактивность	${}^{14}\text{C}$, ${}^{223}_{88}\text{Ra} \rightarrow {}^{204}_{82}\text{Pb} + {}^{14}_6\text{C}$	1984	H. Rose, G. Jones, Д. В. Александров
Двухпротонная радиоактивность	$2p$, ${}^{45}_{26}\text{Fe} \rightarrow {}^{43}_{24}\text{Cr} + 2p$	2002	J. Giovinazzo, B. Blank et al.; M. Piutzner, E. Badura et al.

в более устойчивое ядро ${}^{13}\text{N}$. Последнее затем медленно превращается в устойчивое ядро ${}^{13}\text{C}$, испуская позитрон e^+ :



Получение этого “радиоазота” подтверждается тем фактом, что, будучи собран, он ведет себя как радиоактивный газ с химическими свойствами азота. Интересно отметить, что тот же радиоактивный газ может быть получен совершенно иным способом. Если бомбардировать углерод быстрыми протонами, то происходит следующая реакция:



Полученный таким путем радиоазот ${}^{13}\text{N}$ по своим радиоактивным и химическим свойствам идентичен газу, образующемуся при бомбардировке бора α -частицами.

Подобным же образом бомбардируемый α -частицами алюминий порождает радиоактивный фосфор с атомным весом 30 и периодом полураспада 3.2 мин. Радиофосфор, испуская позитрон, превращается в устойчивое ядро кремния с атомным весом 30.

За последние несколько лет получено большое количество радиоактивных веществ путем бомбардировки элементов не только α -частицами, но и быстрыми протонами и дейтронами. Ферми и его со-

трудники показали также, что медленные нейтроны представляют собой весьма эффективное средство образования радиоактивных веществ даже из самых тяжелых элементов. Сейчас известно уже более 50 таких радиоактивных элементов, причем в большинстве случаев они распадаются с испусканием отрицательных электронов (β -частиц). Даже самые тяжелые элементы — уран и торий — преобразуются при бомбардировке медленными нейтронами и в каждом случае порождают ряд новых радиоактивных веществ, но точная интерпретация этих превращений находится еще в процессе обсуждения».

4. Модель атома Бора

Планетарная модель атома, созданная Резерфордом, встретила полное недоумение, так как она противоречила казавшимся тогда незыблемыми основам физики. Нужно было объяснить, почему вращающиеся вокруг ядра электроны не излучают энергию и не падают на атомные ядра. Большое значение в развитии представлений о строении атома сыграла модель Н. Бора (1913 г.), которая представляла собой введение квантовых условий в модель Резерфорда, построенную на основе классических представлений. Н. Бор сформулировал свои знаменитые постулаты.

Н. Бор, 1913 г.: «Квантовая теория строения атомов. Постулаты.

1. Среди мыслимых состояний движения атомной системы имеется ряд так называемых **стационарных состояний**, относительно которых предполагается, что движение частиц в этих состояниях, подчиняясь в значительном объеме классическим механическим законам, отличается, однако, своеобразной механически необъяснимой устойчивостью, в результате которой следует, что всякое остаточное изменение движения системы должно состоять в полном переходе из одного состояния в другое.

2. В самих стационарных состояниях, в противоречие с классической электромагнитной теорией, излучения не происходит, однако процесс **перехода** между двумя стационарными состояниями может сопровождаться электромагнитным излучением, обладающим теми же свойствами, как излучение, посылаемое на основании классической теории электрической частицей, совершающей гармонические колебания с постоянной частотой. Эта частота ν не находится, однако, в простом отношении к движению частиц атома и определяется условием

$$h\nu = E' - E'',$$

где h — постоянная Планка, E' и E'' — значения атомной энергии в двух стационарных состояниях, образующих начальное и конечное состояния процесса излучения. Обратное, освещение атома электромагнитными волнами этой частоты может привести к процессу поглощения, переводящему атом из конечного состояния в начальное».

Согласно Н. Бору, стационарным состояниям в атоме водорода соответствуют разные энергии электронов E_n

$$E_n = -\frac{me^4}{2\hbar^2 n^2} = -\frac{13.6 \text{ эВ}}{n^2}, \quad n = 1, 2, 3.$$

Радиус первой боровской орбиты $\approx 0.53 \cdot 10^{-8}$ см. Электромагнитное взаимодействие электронов и атомных ядер определяет энергию связи и размеры атомов, молекулярных структур.

Э. Резерфорд, 1914 г.: «Из рассмотрения атомов водорода и гелия, где водород имеет один электрон, а гелий — два, очевидно, что число электронов не может быть всегда точно равно половине атомного веса. Это приводит к интересному предположению, которое высказал Ван-де-Брок, что число единиц заряда ядра, а следовательно, число внешних электронов, должно быть равно номеру места, которое занимает элемент по порядку возрастания атомного веса. С этой точки зрения заряды ядер водорода, гелия и углерода должны быть соответственно равны 1, 2, 6 и т.д. для других элементов, если только мы не пропускаем каких-либо элементов. Эта точка зрения была принята Бором в его теории простых атомов и молекул».

Э. Резерфорд, 1936 г.: «В нашей лаборатории преобладало представление о том, что заряд и атомный номер связаны между собой, и как раз тогда Мозли начал свои знаменитые опыты с X-лучами. Он показал, что рентгеновские спектры элементов изменяются регулярно и одинаково при переходе от

одного элемента к следующему. Причем все рентгеновские спектры элементов подобны, но сдвигаются по частоте при переходе от элемента к элементу. Согласно ядерной теории, рентгеновский спектр предположительно связан с движением электронов вблизи ядра, и экспериментальные результаты Мозли приводили к выводу, что характеристики рентгеновских спектров элементов зависят от квадрата целого числа, которое изменяется на единицу при переходе от одного элемента к следующему. Мозли предположил, что атомный номер соответствует заряду ядра и начиная с алюминия-13 он смог объяснить свойства рентгеновских лучей, испускаемых элементами вплоть до золота; в 1932 г. этот ряд был расширен до урана. Эта теория сразу же показала, каких элементов недостает в периодической таблице и куда следует обратить внимание для отыскания новых элементов. Тогда стало ясно, что атомный вес, который химики считали раньше важнейшим показателем в периодической системе, должен быть заменен атомным номером и свойства всех элементов должны объясняться в зависимости от их номера».

5. Квантовая физика

Модель атома Бора была попыткой примирить представления классической физики с формирующимися законами квантового мира.

Э. Резерфорд, 1936 г.: «Как расположены электроны во внешней части атома? Я считаю первоначальную квантовую теорию спектра, выдвинутую Бором, одной из наиболее революционных из всех когда-либо созданных в науке и я не знаю другой теории, которая имела бы больший успех. Он был в то время в Манчестере и, твердо уверовав в ядерную структуру атома, которая выяснилась в экспериментах по рассеянию, старался понять, как надо расположить электроны, чтобы получить известные спектры атомов. Основа его успеха лежит во внесении в теорию совершенно новых идей. Он внес в наши представления идею кванта действия, а также идею, чуждую классической физике, о том, что электрон может вращаться по орбите вокруг ядра, не испуская излучения. Выдвигая теорию ядерного строения атома, я вполне отдавал себе отчет в том, что согласно классической теории электроны должны падать на ядро, а Бор постулировал, что по некоторым неизвестным причинам этого не происходит, и на основе этого предположения он, как вы знаете, сумел объяснить происхождение спектров. Применяя вполне разумные допущения, он шаг за шагом решил вопрос о расположении электронов во всех атомах Периодической таблицы. Здесь было много трудностей, так как распределение должно было соответствовать оптическим и рентгеновским спектрам элементов, но в конце концов Бор сумел предложить такое расположение электронов, которое показало смысл периодического закона».

В результате дальнейших усовершенствований, главным образом внесенных самим Бором, и видоизменений, произведенных Гейзенбергом, Шрёдингером и Дираком, изменилась вся математическая теория

и были введены идеи волновой механики. Совершенно независимо от этих дальнейших усовершенствований я рассматриваю труды Бора как величайший триумф человеческой мысли.

Чтобы осознать значение его работ, следует рассмотреть хотя бы только необычайную сложность спектров элементов и представить себе, что в течение 10 лет все основные характеристики этих спектров были поняты и объяснены, так что теперь теория оптических спектров настолько завершена, что многие считают это исчерпанным вопросом, подобно тому, как это было несколько лет назад со звуком».

К середине 1920-х гг. стало очевидно, что полуклассическая теория атома Н. Бора не может дать адекватное описание свойств атома. В 1925–1926 гг. в работах В. Гейзенберга и Э. Шрёдингера был разработан общий подход описания квантовых явлений — квантовая теория.

Состояние классической частицы в любой момент времени описывается заданием ее координат и импульса $(x, y, z, p_x, p_y, p_z, t)$. Зная эти величины в момент времени t , можно определить эволюцию системы под действием известных сил во все последующие моменты времени. Координаты и импульсы частиц сами являются величинами, непосредственно измеряемыми на опыте. В квантовой физике состояние системы описывается волновой функцией $\psi(x, y, z, t)$. Так как для квантовой частицы нельзя одновременно точно определить значения ее координат и импульса, то не имеет смысла говорить о движении частицы по определенной траектории, можно только определить вероятность нахождения частицы в данной точке в данный момент времени, которая определяется квадратом модуля волновой функции $W \sim |\psi(x, y, z, t)|^2$.

Таблица 2

Состояния в классической и квантовой физике

Классическая физика	Квантовая физика
Описание состояния	
(x, y, z, p_x, p_y, p_z)	$\Psi(x, y, z, t)$
Изменение состояния во времени	
$\dot{r} = \frac{\partial H}{\partial p}, \quad \dot{p} = -\frac{\partial H}{\partial r}$	$i\hbar \frac{\partial \psi}{\partial t} = \hat{H}\psi$
Измерения	
x, y, z, p_x, p_y, p_z	$\Delta x \Delta p_x \sim \hbar, \quad \Delta y \Delta p_y \sim \hbar, \quad \Delta z \Delta p_z \sim \hbar$
Детерминизм	Статистическая теория
	$ \Psi(x, y, z, t) ^2$ $\bar{F} = \int \psi^* \hat{F} \psi dV$
Гамильтониан	
$H = p^2/(2m) + U(r)$	$\hat{H} = \hat{p}^2/(2m) + \hat{U}(r)$

Эволюция квантовой системы в нерелятивистском случае описывается волновой функцией, удовлетворяющей уравнению Шрёдингера

$$i\hbar \frac{\partial \psi}{\partial t} = \hat{H}\psi,$$

где \hat{H} — оператор Гамильтона (оператор полной энергии системы).

В нерелятивистском случае $\hat{H} = \hat{p}^2/2m + \hat{U}(r)$, где m — масса частицы, \hat{p} — оператор импульса, $\hat{U}(x, y, z)$ — оператор потенциальной энергии частицы. Задать закон движения частицы в квантовой механике это значит определить значение волновой функции в каждый момент времени в каждой точке пространства. В стационарном состоянии волновая функция $\psi(x, y, z)$ является решением стационарного уравнения Шрёдингера $\hat{H}\psi = E\psi$. Как и всякая связанная система в квантовой физике, ядро обладает дискретным спектром собственных значений энергии.

Уравнение Шрёдингера играет в квантовой механике такую же роль, как и второй закон Ньютона в классической механике. Самой поразительной особенностью квантовой физики оказался вероятностный характер описываемых ею процессов. **Вероятностный характер процессов, протекающих в микромире, является фундаментальным свойством микромира.**

Э. Шрёдингер: «Обычные правила квантования могут быть заменены другими положениями, в которых уже не вводится каких-либо «целых чисел». Целочисленность получается при этом естественным образом сама по себе, подобно тому как сама по себе получается целочисленность числа узлов при рассмотрении колеблющейся струны. Это новое представление может быть обобщено, и я думаю, что оно тесно связано с истинной природой квантования.

Довольно естественно связывать функцию ψ с некоторым колебательным процессом в атоме, в котором реальность электронных траекторий в последнее время неоднократно подвергалась сомнению. Я сначала тоже хотел обосновать новое понимание квантовых правил, используя указанный сравнительно наглядный путь, но потом предпочел чисто математический способ, так как он дает возможность лучше выяснить все существенные стороны вопроса. Существенным мне кажется, что квантовые правила не вводятся больше как загадочное «**требование целочисленности**», а определяются необходимостью ограниченности и однозначности некоторой определенной пространственной функции.

Я не считаю возможным до тех пор, пока не будут успешно рассчитаны новым способом более сложные задачи, подробнее рассматривать истолкование введенного колебательного процесса.

Прежде всего нельзя не упомянуть, что основным исходным толчком, приведшим к появлению приведенных здесь рассуждений, была диссертация де Бройля, содержащая много глубоких идей, а также размышлений о пространственном распределении «фазовых волн», которым, как показано де Бройлем, всякий раз соответствует периодическое или квазипериодическое движение электрона, если только эти волны укладываются на траектории **целое число** раз. Главное отличие от теории де Бройля, в которой говорится о прямолинейно распространяющейся волне, заключается здесь в том, что мы рассматри-

ваем, если использовать волновую трактовку, стоящие собственные колебания».

М. Лауэ: «Достижения квантовой теории накопились очень быстро. Особенно поражающий успех она имела в применении к радиоактивному распаду при испускании α -лучей. Согласно этой теории, существует «туннельный эффект», т. е. проникновение через потенциальный барьер частицы, энергия которой, согласно требованиям классической механики, недостаточна для перехода через него.

Г. Гамов дал в 1928 г. объяснение испускания α -частиц, основанное на этом туннельном эффекте. Согласно теории Гамова, атомное ядро окружено потенциальным барьером, но α -частицы имеют определенную вероятность его «перешагнуть». Эмпирически найденные Гейгером и Нэттолом соотношения между радиусом действия α -частицы и полупериодом распада получили на основе теории Гамова удовлетворительное объяснение».

Статистика. Принцип Паули. Свойства квантово-механических систем, состоящих из многих частиц, определяются статистикой этих частиц. Классические системы, состоящие из одинаковых, но различных частиц, подчиняются распределению Больцмана

$$\psi_B(E) = \frac{1}{e^{\alpha} e^{E/kT}}.$$

В системе квантовых частиц одного типа проявляются новые особенности поведения, не имеющие аналогов в классической физике. В отличие от частиц в классической физике, квантовые частицы не просто одинаковы, но и неразличимы – тождественны. Одна из причин состоит в том, что в квантовой механике частицы описываются с помощью волновых функций, позволяющих вычислить лишь вероятность нахождения частицы в какой-либо точке пространства. Если волновые функции нескольких тождественных частиц перекрываются, то невозможно определить, какая из частиц находится в данной точке. Так как физический смысл имеет только квадрат модуля волновой функции, из принципа тождественности частиц следует, что при перестановке двух тождественных частиц волновая функция либо изменяет знак (**антисимметричное состояние**), либо не изменяет знак (**симметричное состояние**).

Симметричными волновыми функциями описываются частицы с целым спином — бозоны (пионы, фотоны, альфа-частицы...). Бозоны подчиняются статистике Бозе-Эйнштейна

$$\frac{1}{e^{\alpha} e^{E/kT} - 1}.$$

В одном квантовом состоянии может одновременно находиться неограниченное количество тождественных бозонов.

Антисимметричными волновыми функциями описываются частицы с полуцелым спином — фермионы (протоны, нейтроны, электроны, нейтрино). Фермионы подчиняются статистике Ферми-Дирака

$$\frac{1}{e^{\alpha} e^{E/kT} + 1}.$$

На связь между симметрией волновой функции и спином впервые указал Паули. Для фермионов спра-

ведлив принцип Паули — **два тождественных фермиона не могут одновременно находиться в одном и том же квантовом состоянии.**

Принцип Паули определяет строение электронных оболочек атомов, заполнение нуклонных состояний в ядрах и другие особенности поведения квантовых систем.

С созданием протон-нейтронной модели атомного ядра можно считать завершённым первый этап развития ядерной физики, в котором были установлены основные факты строения атомного ядра. Первый этап начался с фундаментальной концепции Демокрита о существовании атомов — неделимых частиц материи. Установление периодического закона Менделеевым позволило систематизировать атомы и поставило вопрос о причинах, лежащих в основе этой систематики. Открытие электронов в 1897 г. Дж. Дж. Томсоном разрушило представление о неделимости атомов. Согласно модели Томсона, электроны — составные элементы всех атомов. Открытие А. Беккерелем в 1896 г. явления радиоактивности урана и последующее открытие П. Кюри и М. Склодовской-Кюри радиоактивности тория, полония и радия впервые показали, что химические элементы не являются вечными образованиями, они могут самопроизвольно распадаться, превращаться в другие химические элементы. В 1899 г. Э. Резерфордом было установлено, что атомы в результате радиоактивного распада могут выбрасывать из своего состава α -частицы — ионизованные атомы гелия и электроны. В 1911 г. Э. Резерфорд, обобщив результаты эксперимента Гейгера и Марсдена, разработал планетарную модель атома. Согласно этой модели, атомы состоят из положительно заряженного атомного ядра радиусом $\sim 10^{-12}$ см, в котором сосредоточена вся масса атома, и вращающихся вокруг него отрицательных электронов. Размер электронных оболочек атома $\sim 10^{-8}$ см. В 1913 г. Н. Бор развил представление планетарной модели атома на основе квантовой теории. В 1919 г. Э. Резерфорд доказал, что в состав атомного ядра входят протоны. В 1932 г. Дж. Чедвик открыл нейтрон и показал, что в состав атомного ядра входят нейтроны. Созданием в 1932 г. Д. Иваненко, В. Гейзенбергом протон-нейтронной модели атомного ядра завершился первый этап развития ядерной физики. Все составные элементы атома и атомного ядра были установлены.

Ускорители. В качестве пробных частиц α -частицы сыграли уникальную роль в изучении структуры атомных ядер. С их помощью

- в 1911 г. было открыто атомное ядро;
- в 1919 г. было доказано, что протоны входят в состав атомного ядра, и осуществлено первое искусственное превращение химического элемента;
- в 1932 г. был открыт нейтрон;
- в 1934 г. был получен первый искусственный радиоактивный изотоп ^{30}P .

Однако α -источники имели существенный недостаток: α -частицы вылетали из источника во всех направлениях, число их было мало и было невозможно изменить их энергию. Было очевидно, что для дальнейшего продвижения в изучении атомных ядер нужны различные высокоэнергичные пробные частицы, которые могли бы проникать в атомные ядра и вызывать их различ-

ные превращения, возникла необходимость создания интенсивных источников контролируемой энергии.

В 1930 г. Э. Лоуренс построил первую модель циклотрона. В 1931 г. Ван де Графф создал первый электростатический ускоритель протонов. В 1932 г. Д. Кокрофт и Т. Уолтон создали высоковольтный ускоритель и с помощью ускоренного пучка протонов расщепили ядра бора и лития. В 1940 г. Д. Керст построил ускоритель электронов — бетатрон. В 1944 г. В. Векслер открыл принцип автофазировки, который лег в основу создания ускорителей высоких энергий.

В настоящее время в мире насчитывается несколько тысяч ускорителей, которые используются в научных исследованиях и в различных технологиях.

В 2010 г. в ЦЕРНе был запущен самый крупный в мире ускорительный комплекс, в котором планируется столкновение встречных пучков протонов с энергией 7×7 ТэВ. Для того чтобы достичь такой энергии, протоны последовательно ускоряются в нескольких ускорителях.

6. Модели атомных ядер

Атомные ядра являются связанной системой взаимодействующих протонов и нейтронов. В атомном ядре проявляются три типа взаимодействий.

- Сильные взаимодействия между нуклонами приводят к образованию связанного состояния A нуклонов.
- Электромагнитные взаимодействия приводят, с одной стороны, к расталкиванию протонов, что ослабляет связь в атомном ядре, с другой — взаимодействие магнитных моментов нуклонов приводит к большому разнообразию ядерных состояний.
- Слабое взаимодействие между нуклонами приводит к взаимным превращениям нейтронов и протонов в атомном ядре — явлению β -распада атомных ядер.

В основе всех моделей строения вещества до открытия нейтрона господствовала концепция электрического строения вещества. Электрическое взаимодействие связывало атомное ядро и электроны атомных оболочек. Атомное ядро считалось состоящим из протонов и электронов. Факт вылета из ядра электронов при β -распаде считался несомненным доказательством того, что электроны находятся в ядре. Даже предсказанная Резерфордом нейтральная частица, которая была открыта Чедвиком, считалась сильно связанным состоянием протона и электрона.

Ситуация изменилась, когда пришло понимание, что нейтрон является такой же элементарной частицей, как и протон.

Было очевидно, что протон-нейтронную модель ядра по аналогии с моделью атома необходимо создавать на основе законов квантовой теории. Однако оставался открытым вопрос о том, какие силы связывают протоны и нейтроны в ядре. Изучение свойств ядерных сил стало центральной задачей ядерной физики. Было очевидно, что это силы неэлектрической природы, что они действуют на расстоянии меньше 10^{-12} см, что это силы притяжения, о чем свидетельствовало существование связанной системы — дейтрона, состоящего из протона и нейтрона. Дейтрон имеет размер ~ 2.3 фм и энергию связи 2.2 МэВ. Атомные ядра имеют радиусы от 2 до 8 фм. Энергия связи, приходящаяся на один

нуклон, для большинства атомных ядер составляет от 5 до 9 МэВ. Ядерные силы, связывающие протоны и нейтроны в ядре, в тысячи раз превосходят электромагнитные силы на расстояниях ядерных масштабов.

Возникло представление о новом типе взаимодействий — ядерном взаимодействии, которое связывает протоны и нейтроны в атомные ядра.

В 1935 г. Х. Юкава предположил по аналогии с электромагнитным взаимодействием, что ядерные силы обусловлены существованием новой частицы, переносящей ядерное взаимодействие. Массу этой частицы ≈ 150 МэВ он оценил исходя из радиуса действия ядерных сил.

Открытие π -мезона в 1947 г. явилось подтверждением правильности идеи Х. Юкавы. Ядерные силы — новый тип взаимодействий в физике. Ядерные силы оказались гораздо более сложными по сравнению с электромагнитными и гравитационными. Ядерные силы, имеющие характер притяжения на расстоянии $\sim 1 \div 5$ ферми, сменяются силами отталкивания на расстоянии < 0.5 ферми.

Информацию о свойствах ядерных сил можно получить, изучая простейшую ядерную систему дейтрон или в экспериментах по рассеянию нуклона на нуклоне. Казалось, что, имея информацию о ядерных силах, действующих между нуклонами, проблему структуры атомных ядер в принципе можно свести к задаче решения уравнения Шрёдингера для системы A частиц. Однако было очевидно, что такая задача в общем случае не может быть решена. Каждое атомное ядро — уникальный физический объект, имеющий присущие только ему специфические особенности. Во взаимодействии нуклонов в ядре видоизменяется по сравнению с взаимодействием свободных нуклонов. Это различие обусловлено действием принципа Паули — в ядре проявляются такие особенности взаимодействия нуклонов, которых нет во взаимодействии свободных нуклонов. Кроме того, в ядерной системе проявляется многочастичный характер ядерных сил, приводящий к образованию в ядре кластеров. Наиболее яркий пример — образование α -кластеров в ядрах. Характеристики ядер с четным числом протонов и четным числом нейтронов отличаются от характеристик соседних ядер с нечетным числом нейтронов или протонов. Структура и свойства деформированных ядер отличаются от характеристик сферических ядер. Поэтому обычно используют различные модели атомных ядер. Большую роль в моделях атомных ядер играет концепция среднего ядерного поля и остаточного взаимодействия, не включенного в среднее поле. На основе этой концепции удалось объяснить, почему свойства ядер, имеющих близкие значения чисел протонов и нейтронов, сильно различаются друг от друга. В микроскопических расчетах среднее поле выбирается в виде потенциала Вудса–Саксона. Парные взаимодействия между нуклонами объясняют нулевое значение спина всех четно-четных ядер. Спин-орбитальное взаимодействие между нуклонами совместно с принципом Паули объясняют последовательность заполнения нуклонных оболочек.

Существует несколько моделей ядерной структуры, которые, на первый взгляд, кажутся противоречащими друг другу. Однако эти модели вовсе не исключают

ют друг друга, а касаются различных свойств ядра и поэтому дополняют друг друга. Каждая модель ядра основывается на экспериментальных фактах и позволяет объяснить некоторые выделенные свойства ядер. Несмотря на то что ядерные модели имеют ограниченную область применения, тем не менее они играют важную роль в развитии теории ядра и в их рамках получен ряд существенных результатов.

Модель жидкой капли. Одна из первых моделей атомного ядра — модель, в которой атомное ядро рассматривалось как сферическая капля несжимаемой ядерной жидкости радиуса $R \approx 1.3A^{1/3}$ фм. Точные измерения показали, что масса ядра не равна сумме масс входящих в состав ядра нуклонов, а меньше этой величины на несколько десятых процента. Разность этих величин — энергия связи ядра — энергия, необходимая для разделения ядра на отдельные нуклоны. В 1935 г. К. Вайцеккер написал полуэмпирическую формулу для энергии связи ядер, в которой энергия связи ядра представлялась суммой объемной, поверхностной и кулоновской энергий, энергии симметрии и энергии спаривания нуклонов

$$E_{\text{bond}} = \alpha_1 A + \alpha_2 A^{2/3} + \alpha_3 \frac{Z(Z-1)}{A^{1/3}} + \alpha_4 \frac{(N-Z)^2}{A} + \alpha_5 A^{-3/4}.$$

Подбором коэффициентов α_i , $i = 1, 2, \dots, 5$, Вайцеккеру удалось описать энергии связи стабильных ядер с точностью $\sim 0.1\%$.

Капельная модель дает правильное представление о массе и энергии связи ядра. На основе капельной модели можно рассчитать энергии распадов атомных ядер, получить зависимость между числом протонов и нейтронов в стабильных ядрах, грубо оценить области существования атомных ядер. Капельная модель ядра объяснила, почему максимум стабильности атомных ядер находится в районе ^{56}Fe . Наибольшим успехом капельной модели ядра явилась полуколичественная теория деления атомных ядер. Однако капельная модель столкнулась с рядом проблем, в частности она не в состоянии объяснить асимметрию массового распределения осколков деления: капельная модель предсказывает деление ядра на два осколка одинаковой массы. Вне компетенции капельной модели находятся описания спинов и четностей ядер.

Модель оболочек основывается на том, что свойства ядер, подобно свойствам атомов, обнаруживают определенную периодичность при изменении чисел протонов и нейтронов. На фоне довольно плавной зависимости энергии связи ядер от массового числа A встречаются ядра, в которых энергия связи больше, чем в соседних ядрах. В этих ядрах также увеличена энергия отделения нуклона. Они имеют повышенную распространенность в природе. Такие ядра получили название *магических*, а числа протонов и нуклонов в них, соответствующие повышенной стабильности, — магических чисел.

Магические числа: 2, 8, 20, 28, 50, 82, 126.

Ядра с магическим числом нейтронов имеют малое сечение поглощения нейтронов. Попытки построения моделей ядра, в которых нуклоны, подобно электронам в атоме, движутся независимо друг от друга в потенциальной яме, предпринимались неоднократно.

Однако в таких моделях удавалось объяснить только первые три магических числа. Кроме того, независимое движение нуклонов в потенциальной яме казалось совершенно невозможным, так как в ядре, в отличие от атома, нет выделенного силового центра. Короткодействующий характер ядерных сил, казалось, исключал введение результирующего среднего поля. В 1949 г. М. Гёпперт-Майер и Дж. Иенсен сделали решающий шаг в становлении оболочечной модели ядра. Они показали, что в ядерном потенциале необходимо учитывать спин-орбитальное взаимодействие нуклона — взаимодействие спина нуклона с его орбитальным моментом количества движения. Благодаря этому им удалось воспроизвести все магические числа. Они указали также на важность учета принципа Паули при рассмотрении движения нуклонов в ядре. Принцип Паули препятствует потере энергии нуклоном при столкновении, так как низлежащие одночастичные состояния ядра заняты другими нуклонами, поэтому средняя длина свободного пробега нуклона оказывается больше размеров ядра, что позволяет говорить об индивидуальных орбитах нуклонов.

М. Гёпперт-Майер: *«Располагая уровни в надлежащем порядке, мы должны принимать во внимание спин-орбитальную связь. Орбиту отдельного нуклона нельзя уже полностью характеризовать лишь орбитальным импульсом l , нужно кроме l учесть еще и $j = l \pm 1/2 \dots$ Разность энергий двух уровней с одним и тем же l , но с разным j , растет с увеличением l . Предлагаемая модель подразумевает некоторые утверждения, которые можно сравнить с опытными данными. Речь идет о том, что ядро с замкнутой оболочкой протонов и нейтронов обладает равным нулю моментом импульса. Если добавить к ней еще один нуклон, то полный момент будет равен моменту этого одного нуклона. Мы можем предсказать по нашей схеме уровней, что это будет означать. Во всех случаях оказывается полное соответствие между предсказанием и результатами эксперимента».*

Много ценной информации о свойствах атомных ядер дает изучение возбужденных состояний атомных ядер. Средние и тяжелые ядра с достаточно хорошим приближением можно описать как состоящие из нуклонов, расположенных в заполненных оболочках, — кор ядра, и нуклонов, находящихся во внешней незаполненной оболочке. Силы спаривания связывают нуклоны в пары с нулевым угловым моментом. Простейшим возбуждением ядра является одночастичный спектр, который обусловлен переходами неспаренного нуклона между уровнями незаполненной оболочке. Эффект спаривания нуклонов сыграл существенную роль в развитии модели оболочек, так как оказалось возможным объяснить многие свойства нечетных ядер, используя состояние последней нечетной частицы. Такие спектры наблюдаются в тех случаях, когда число нуклонов в незаполненной оболочке мало. Успехом модели оболочек было объяснение вероятности γ -переходов. Было показано, что вероятность γ -переходов увеличивается с увеличением их энергии. Однако в еще большей степени вероятность γ -переходов зависит от значений спинов и четностей состояний, между которыми проис-

ходит переход. Различают электрические и магнитные мультипольные переходы. Модель оболочек предсказала области изомерных состояний атомных ядер — острова изомерии.

По мере заполнения внешней оболочки ядра начинают проявляться коллективные эффекты. Пока еще число нуклонов во внешней оболочке мало, их коллективное взаимодействие проявляется в том, что в ядрах происходят колебания около сферически равновесной формы, наблюдается характерный спектр возбужденных состояний, состоящий из эквидистантных состояний положительной четности $J^P = 0^+, 2^+, 0^+, 2^+, 4^+$, описываемых возбуждением одного, двух, трех и т. д. квадрупольных фононов $J^P = 2^+$.

Увеличение числа нуклонов в незаполненной оболочке вызывает деформацию атомного ядра, что проявляется в характерном вращательном спектре сфероида деформированных ядер

$$E_{\text{rotat}} = \frac{\pi^2 I (I + 1)}{2J},$$

где I — спин ядра, J — момент инерции ядра. Спин возбужденных состояний ядра I имеет характерную последовательность $I = 2, 4, 6, 8, 10...$ Низшие возбужденные состояния вращательных спектров ядер расположены наиболее низко по энергии и легко возбуждаются в реакции под действием тяжелых ионов.

Возбуждение ядерного кора проявляется при более высоких энергиях. Так, во всех ядрах наблюдается гигантский дипольный резонанс, который расположен в районе 25 МэВ в легких ядрах и при 12–15 МэВ — в тяжелых ядрах. Простейшая интерпретация гигантского дипольного резонанса — колебание всех протонов относительно всех нейтронов. Такие колебания возбуждаются в реакциях под действием γ -квантов.

Модель ядерных оболочек столкнулась с проблемами при описании электрических квадрупольных моментов ядер. В модели ядерных оболочек оказалось невозможно объяснить большие квадрупольные моменты ядер, далеких от магических ядер, в частности в ядрах с $A = 140-190$ и в области трансурановых элементов. Для описания таких ядер Дж. Рейнуотер предложил изменить одночастичную модель, основанную на сферически симметричном потенциале, учесть деформацию, вызванную нуклонами внешней незаполненной оболочки. В коллективной модели, развитой Дж. Рейнуотером, О. Бором, Б. Моттelsonом, Б. Нильсоном, исходят из среднего ядерного потенциала, деформированного в ядерный эллипсоид.

Дж. Рейнуотер: «В модели оболочек Майер использует оболочечные волновые функции, основанные на сферическом потенциале. Работа Бора и Уиллера о делении показала, что ядра могут принимать сфероидальную форму, если это энергетически выгодно. Для малых значений отклонений β (разность большой и малой осей, отнесенной к среднему радиусу ядра) при постоянном объеме ядра поверхностная энергия возрастает как β^2 , при этом некоторая компенсация происходит за счет уменьшения кулоновской энергии (для больших Z). Моя модель предполагала постоянную глубину ямы, при искажении ее формы: в направлении оси Z радиус R возрастает до $\left[1 + \frac{2\beta}{3}\right] R_0$ и уменьшается по X и Y до $\left[1 - \frac{2\beta}{3}\right] R_0$ (или соответственно $R_0 e^{2\beta/3}$ и $R_0 e^{-\beta/3}$)... Многие ядра весьма значительно отклоняются от сферической формы и поэтому для этих областей не имеет смысла использовать сферическую модель ядра».

Модель, развитая О. Бором, включает в себя, на первый взгляд, две противоположные модели — капельную и оболочечную. Остов атомного ядра рассматривается как деформированная жидкая капля, в которой возможны различные типы коллективных движений — вращения, колебания. Внешние нуклоны описываются так же, как в модели оболочек. Благодаря связи движения внешнего нуклона и изменению поверхности атомного ядра полный момент ядра складывается из проекции спина нуклона на ось симметрии ядра и коллективного момента остова ядра. В этом случае полный момент нуклона перестает быть хорошим квантовым числом. Энергия состояния нуклона в деформированном эллипсоидальном потенциале зависит от проекции момента на ось симметрии ядра.

О. Бор: «Джеймс Рейнуотер думал о происхождении больших квадрупольных моментов и высказал идею, которая сыграла решающую роль в развитии теории. Он осознал, что если учесть деформированность ядра как целого, то прямым следствием одночастичного движения по анизотропным орбитам будет возникновение несферической равновесной формы... Оказалось, что схема связи, характеризующая сильно деформированные ядра с четко выраженной полосой вращательных состояний реализуется для обширного класса ядер. Кульминацией волнующей весны 1953 г. стало открытие процесса кулоновского возбуждения, представившего возможность систематического изучения вращательных возбуждений».

Многие свойства атомных ядер зависят от деформации ядра, которая в свою очередь зависит от конфигурации нуклонов внешней оболочки. В области заполненных оболочек ядра имеют равновесную сферическую форму, и в таких ядрах наблюдаются как одночастичные степени возбуждения, так и колебания сферически симметричного остова. Вдали от заполненных оболочек ядра приобретают большую деформацию. В этом случае также можно выделить одночастичные возбуждения нуклонов относительно деформированного остова и вращательное состояние деформированного остова.

Разделение возбуждений в ядре на одночастичное и коллективное соответствует предположению, что в общем случае волновая функция Ψ , являющаяся решением уравнения Шрёдингера для ядра, имеет вид

$$\Psi = \Psi_{\text{one-part}} \Psi_{\text{oscill}} \Psi_{\text{rotat}},$$

где $\Psi_{\text{one-part}}$ соответствует одночастичному возбуждению, Ψ_{oscill} — колебанию ядра относительно своей равновесной формы, Ψ_{rotat} — коллективному вращательному движению ядра как целого.

Б. Моттelson: «Картина ядерной динамики включает большое разнообразие различных коллективных возбуждений, которые настолько элементарны, как и сами одночастичные возбуждения, в том смысле, что они остаются приблизительно

независимыми при конструировании ядерного спектра возбуждений... Центральным элементом в анализе элементарных видов возбуждений и их взаимодействий является связь частицы с колебаниями, которая выражает вариации среднего потенциала, связанные с коллективной колебательной амплитудой. Эта связь представляет собой организующий элемент, который генерирует самосогласованные коллективные типы возбуждений из возбуждений частиц. В то же время она приводит к взаимодействиям, которые дают естественный предел для анализа в терминах элементарных видов возбуждений».

Яркий пример образования коллективной степени свободы из одночастичных переходов — электрический гигантский дипольный резонанс в атомных ядрах.

Одночастичные возбуждения, возникающие как результат перехода нуклона между соседними оболочками в результате частично-дырочного взаимодействия, приводят к формированию коллективного состояния, вбирающего в себя всю силу одночастичных переходов и сдвинутого к более высокой энергии по сравнению с одночастичными переходами. В рамках коллективных моделей такое коллективное состояние интерпретируется как когерентные дипольные колебания протонов относительно нейтронов.

7. Ядерные реакции

Большую роль в развитии представлений о структуре ядер сыграло изучение ядерных реакций, что позволило получить обширную информацию о спинах и четностях возбужденных состояний ядер, способствовало развитию модели оболочек. Изучение реакций с обменом несколькими нуклонами между сталкивающимися ядрами позволило исследовать ядерную динамику в состоянии с большими угловыми моментами. В результате были открыты длинные ротационные полосы, что послужило одной из основ создания обобщенной модели ядра. При столкновении тяжелых ядер образуются ядра, которых нет в естественных условиях на Земле. Синтез трансурановых элементов основывается на физике взаимодействия тяжелых ядер. В реакциях с тяжелыми ионами образуются ядра, удаленные от полосы β -стабильности, которые отличаются от стабильных ядер соотношением между числом протонов и числом нейтронов, соотношением между кулоновским и ядерным взаимодействиями, существенным различием в энергиях связи протонов и нейтронов, что проявляется в новых типах радиоактивного распада — протонной и нейтронной радиоактивности и рядом других специфических особенностей атомных ядер.

Ядерные реакции являются эффективным методом исследования ядерной динамики. Ядерные реакции происходят при взаимодействии двух частиц. При ядерной реакции происходит активный обмен энергией и импульсом между частицами, в результате чего образуются одна или несколько частиц, разлетающихся из области взаимодействия. Механизм протекания ядерной реакции зависит от нескольких факторов — от типа налетающей частицы, типа ядра мишени, энергии налетающей частицы и других. Одним из предельных случаев ядерной реакции является **прямая ядерная реакция**. В этом случае налетающая частица передает энергию одному-двум нуклонам ядра, и они покидают ядро, не взаимодействуя с другими нуклонами ядра. Характерное время протекания прямой ядерной реакции 10^{-23} с. Прямые ядерные реакции идут на всех ядрах при любой энергии налетающей частицы, они используются для изучения одночастичных состояний атомных ядер, так как продукты реакции несут информацию о положении уровней, из которых выбивается нуклон. С помощью прямых ядерных реакций была получена детальная информация об энергиях и заполнении одночастичных состояний ядер, которая легла в основу оболочечной модели ядра.

Другим предельным случаем являются реакции, идущие через **образование составного ядра**.

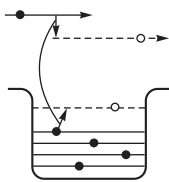
В. Вайскопф: «Что происходит, когда частица входит в ядро и сталкивается с одной из ядерных составных частей? Рисунок иллюстрирует некоторые из этих возможностей.

1. Падающая частица теряет часть своей энергии, поднимая ядерную частицу в более высокое состояние. Это будет результатом неупругого рассеяния, если падающая частица остается с энергией, достаточной для того, чтобы снова покинуть ядро. Этот процесс называют прямым неупругим рассеянием, поскольку он предполагает рассеяние только на одной составной части ядра.

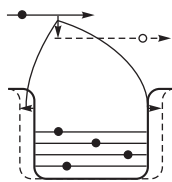
2. Падающая частица передает энергию коллективному движению, как это символически показано на второй схеме рисунка, это также является прямым взаимодействием.

3. На третьей схеме рисунка переданная энергия достаточно велика для того, чтобы вырвать нуклон из мишени. Этот процесс также дает вклад в прямую ядерную реакцию. В принципе он не отличается от процесса 1-го типа, он соответствует «обменной реакции».

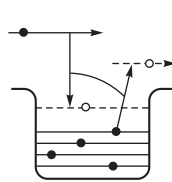
4. Падающая частица может потерять так много энергии, что остается связанной внутри ядра, переданная энергия может быть принята низколе-



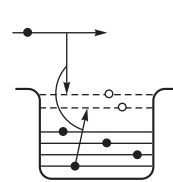
1. Прямое неупругое рассеяние



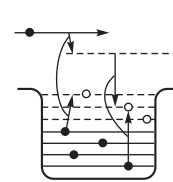
2. Прямое неупругое рассеяние (коллективное возбуждение)



3. Прямая реакция



4. Образование компаунд-ядра (1 шаг)



5. Образование компаунд-ядра (2 шага)

жащим нуклоном таким образом, что он не сможет оставить ядро. Мы получаем тогда возбужденное ядро, которое не может испустить нуклон. Это состояние с необходимостью приводит к дальнейшим возбуждениям нуклонов внутренними столкновениями, в которых энергия на возбужденную частицу в среднем убывает, так что в большинстве случаев нуклон не может покинуть ядро. Следовательно, будет достигнуто состояние с очень большим временем жизни, которое может распасться только в том случае, когда одна частица при столкновениях внутри ядра случайно приобретет достаточную энергию для того, чтобы покинуть ядро. Такую ситуацию мы называем образованием компаунд-ядра. Энергия может быть потеряна также излучением, после которого вылет частицы становится энергетически невозможным: падающий нуклон испытывает радиационный захват.

5. Образование компаунд-ядра может осуществляться в два или более шагов, если после процесса типа 1 или 2 падающий нуклон на своем пути ударяет другой нуклон и возбуждает его таким образом, что вылет из ядра оказывается невозможным для любого нуклона».

Впервые представление о протекании ядерной реакции через стадию составного ядра было высказано Н. Бором. Согласно модели составного ядра, падающая частица после взаимодействия с одним или двумя нуклонами ядра передает ядру большую часть своей энергии и оказывается захваченной ядром. Время жизни составного ядра гораздо больше, чем время пролета налетающей частицы через ядро. Внесенная налетающей частицей в ядро энергия перераспределяется между нуклонами ядра до тех пор, пока значительная ее часть не сосредоточится на одной частице, которая затем вылетает из ядра. Образование долгоживущего возбужденного состояния может в результате деформации привести к его делению.

Н. Бор: «Явление захвата нейтронов заставляет нас предполагать, что столкновение между быстрым нейтроном и тяжелым ядром должно вести прежде всего к образованию сложной системы, характеризующейся замечательной устойчивостью. Возможный последующий распад этой промежуточной системы с вылетом материальной частицы или переход к конечному состоянию с эмиссией кванта лучистой энергии следует рассматривать как самостоятельные процессы, не имеющие непосредственной связи с первой фазой соударения. Мы встречаемся здесь с существенной разницей, ранее еще нераспознанной, между настоящими ядерными реакциями — обычными соударениями быстрых частиц и атомных систем — соударениями, которые до сих пор для нас являлись главным источником сведений относительно строения атома. Действительно, возможность счета посредством таких столкновений отдельных атомных частиц и изучение их свойств обязаны прежде всего «открытости» рассматриваемых систем, которая делает весьма маловероятными обмен энергии между отдельными составляющими частицами в продолжение удара. Однако вследствие тесной упаковки частиц в ядре

мы должны быть готовы к тому, что именно этот обмен энергии играет основную роль в типичных ядерных реакциях».

Вслед за дипольными колебаниями атомных ядер были обнаружены и другие типы коллективных движений в атомных ядрах. Одним из таких проявлений коллективных движений ядерной материи является деление атомных ядер.

8. Деление атомных ядер

В 1934 г. Э. Ферми решил получить трансурановые элементы, облучая $^{238}_{92}\text{U}$ нейтронами: $^{238}_{92}\text{U} + n \rightarrow ^{239}_{92}\text{U}$. Идея Э. Ферми заключалась в том, что в результате β^- -распада изотопа $^{239}_{92}\text{U}$ образуется химический элемент с порядковым номером 93. Однако идентифицировать образование 93-го элемента не удавалось. Вместо этого в результате радиохимического анализа радиоактивных элементов, выполненного О. Ганом и Ф. Штрассманом, было показано, что одним из продуктов облучения урана нейтронами является барий Ва ($Z = 56$) — химический элемент среднего атомного веса. Л. Мейтнер и О. Фриш высказали предположение, что в результате захвата нейтрона ядром урана происходит развал составного ядра на две части:



Процесс деления урана сопровождается появлением вторичных нейтронов ($K > 1$), способных вызвать деление других ядер урана, что открывает потенциальную возможность возникновения цепной реакции деления: один нейтрон может дать начало разветвленной цепи деления ядер урана. При этом число разделившихся ядер должно возрастать экспоненциально. В одном акте деления высвобождается энергия ≈ 200 МэВ (для сравнения, в химических реакциях горения в одном акте реакции выделяется энергия ≈ 10 эВ). Возможность создания условий для цепной реакции деления

Таблица 3

Деление ядер. История

1934 г.	Э. Ферми, облучая уран тепловыми нейтронами, обнаружил среди продуктов реакции радиоактивные ядра.
	Л. Сцилард выдвинул идею цепной ядерной реакции.
1939 г.	О. Ган и Ф. Штрассман обнаружили среди продуктов реакций барий ($Z = 56$).
	Л. Мейтнер и О. Фриш впервые объявили, что под действием нейтронов происходило деление урана.
	Н. Бор и Дж. Уилер дали количественную интерпретацию деления ядра, введя параметр деления.
	Я. Френкель развил капельную теорию деления ядер медленными нейтронами.
1940 г.	Л. Сцилард, Э. Вигнер, Э. Ферми, Дж. Уилер, Ф. Жолио-Кюри, Я. Зельдович, Ю. Харитон обосновали возможность протекания в уране цепной ядерной реакции деления.
	Г. Флёрв и К. Петржак открыли явление спонтанного деления ядер урана U.

открыли перспективы использования энергии цепной реакции для создания атомных реакторов и атомного оружия. Первый ядерный реактор был построен Э. Ферми в США в 1942 г. В СССР первый ядерный реактор был запущен под руководством И. Курчатова в 1946 г. В 1954 г. в г. Обнинске начала работать первая в мире атомная электростанция. В настоящее время электрическая энергия вырабатывается примерно в 440 ядерных реакторах в 30 странах мира.

В 1940 г. Г. Флёрв и К. Петржак открыли спонтанное деление урана. О сложности проведения эксперимента свидетельствуют следующие цифры. Парциальный период полураспада по отношению к спонтанному делению изотопа ^{238}U составляет $10^{16}-10^{17}$ лет. Период полураспада изотопа ^{238}U составляет $4.5 \cdot 10^9$ лет. Основным каналом распада является α -распад. Нужно было регистрировать один акт деления на фоне 10^7-10^8 актов α -распада.

9. Образование атомных ядер

Окружающий нас мир состоит из ~ 100 различных химических элементов. Как они образовались в естественных условиях? Подсказку для ответа на этот вопрос дает относительная распространенность химических элементов. Среди наиболее существенных особенностей распространенности химических элементов Солнечной системы можно выделить следующие.

1. Вещество во Вселенной в основном состоит из водорода: $\sim 90\%$ всех атомов.

2. По распространенности гелий занимает второе место, составляя $\sim 10\%$ от числа атомов водорода.

3. Существует глубокий минимум, соответствующий химическим элементам — литию Li, бериллию Be и бору B.

4. Сразу за глубоким минимумом Li, Be, B следует максимум, обусловленный повышенной распространенностью углерода C и кислорода O.

5. Вслед за кислородным максимумом идет скачкообразное падение распространенности элементов вплоть до скандия ($A = 45$).

6. Наблюдается резкое повышение распространенности элементов в районе железа, ($A = 56$).

7. После $A = 60$ уменьшение распространенности элементов происходит более плавно.

8. Наблюдается заметное различие между химическими элементами с четным и нечетным числом протонов Z . Как правило, химические элементы с четными Z являются более распространенными.

Для объяснения образования химических элементов в 1948 г. Г. Гамовым была выдвинута теория Большого взрыва. Согласно модели Гамова, синтез всех химических элементов происходил во время Большого взрыва в результате неравновесного захвата атомными ядрами нейтронов с испусканием γ -квантов и последующим β^- -распадом образовавшихся ядер. Однако расчеты показали, что в этой модели невозможно объяснить образование химических элементов тяжелее Li. Оказалось, что механизм образования ядер связан с условиями, существовавшими во Вселенной в течение первых трех минут, и ядерными реакциями, происходящими при горении звезд.

Дозвездная стадия образования легчайших ядер.

На этапе эволюции Вселенной через 100 с после Большого взрыва при температуре $\sim 10^9$ К вещество во Вселенной состояло из протонов p , нейтронов n , электронов e^- , позитронов e^+ , нейтрино ν , антинейтрино $\bar{\nu}$ и фотонов γ . Излучение находилось в тепловом равновесии с электронами e^- , позитронами e^+ и нуклонами:

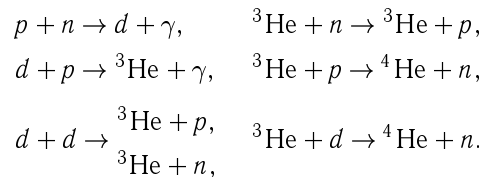
$$e^+ + e^- \longleftrightarrow \gamma + \gamma, \quad p + e^- \longleftrightarrow n + \nu_e, \quad n + e^+ \longleftrightarrow p + \bar{\nu}_e.$$

В условиях термодинамического равновесия вероятность образования системы с энергией E_N , равной энергии покоя нуклона, описывается распределением Гиббса $W_N = A e^{-E_N/kT}$. Поэтому в условиях термодинамического равновесия соотношение между числом нейтронов и протонов будет определяться разностью масс нейтрона и протона

$$\frac{n_n}{n_p} = \frac{A e^{-m_n c^2/kT}}{A e^{-m_p c^2/kT}} = e^{-(m_n - m_p)c^2/kT}.$$

Образование электрон-позитронных пар прекращается при $T < 10^{10}$ К, так как энергии фотонов становятся ниже порога образования e^+e^- -пар (~ 1 МэВ). К концу равновесной стадии на каждый нейтрон приходилось 5 протонов. Так как на этом этапе эволюции Вселенной плотность протонов и нейтронов велика, взаимодействие между ними привело к образованию ^4He .

Основные реакции дозвездного нуклеосинтеза:



Стабильные ядра с $A = 5$ не существуют, поэтому ядерные реакции завершаются в основном образованием ^4He . ^7Be , ^6Li и ^7Li составляют лишь $\sim 10^{-9}-10^{-12}$ от образования изотопа ^4He . Практически все нейтроны исчезают, образуя ядра ^4He . При плотности вещества $\rho \sim 10^{-3}-10^{-4}$ г/см³ вероятность того, что нейтрон и протон не провазаимодействуют за время первичного нуклеосинтеза, составляет менее 10^{-4} . Так как вначале на один нейтрон приходилось 5 протонов, соотношение между числом ядер ^4He и p составляет $\sim 1/10$. Таким образом, соотношение распространенностей водорода и гелия, наблюдаемое в настоящее время, сформировалось в течение первых минут существования Вселенной. Дальнейшее расширение Вселенной привело к понижению ее температуры и прекращению первичного дозвездного нуклеосинтеза.

Образование химических элементов в звездах.

Процесс нуклеосинтеза на ранней стадии эволюции Вселенной закончился образованием водорода, гелия и небольшого количества Li, Be, B, поэтому необходимо было найти механизмы и условия, при которых могли образоваться более тяжелые элементы. Г. Бете и К. Вайцеккер показали, что соответствующие условия существуют внутри звезд. Более тяжелые ядра образовались лишь через миллиарды лет после Большого взрыва в процессе звездной эволюции. Образование химических элементов в звездах начинается с реакции горения водорода с образованием ^4He .

Г. Бете, 1968 г.: «С незапамятных времен люди хотели знать, за счет чего поддерживается свечение Солнца. Первая попытка научного объяснения была предпринята Гельмгольцем около ста лет назад. Она была основана на использовании самых известных в то время сил — сил всемирного тяготения. Если один грамм вещества падает на поверхность Солнца, он приобретает потенциальную энергию

$$E_{\text{pot}} = -\frac{GM}{R} = -1.91 \cdot 10^{15} \text{ эрг/г.}$$

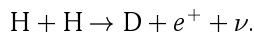
Известно, что в настоящее время мощность излучения Солнца определяется величиной

$$\varepsilon = 1.96 \text{ эрг/(г} \cdot \text{с).}$$

Следовательно, если источником энергии является тяготение, запас гравитационной энергии может обеспечить излучение в течение 10^{15} с, т. е. в период около тридцати миллионов лет...

В конце XIX века Беккерель, Пьер и Мария Кюри открыли радиоактивность. Открытие радиоактивности позволило определить возраст Земли. Несколько позже удалось определить возраст метеоритов, по которому можно было судить, когда в Солнечной системе появилось вещество в твердой фазе. Из этих измерений можно было установить, что возраст Солнца с точностью до 10% составляет 5 млрд лет. Таким образом, тяготение не может обеспечить нужный запас энергии на все это время...

С начала 1930-х годов стали склоняться к тому, что звездная энергия возникла за счет ядерных реакций... Простейшей из всех возможных реакций будет реакция



Сделав разумные предположения о силе реакций на основе общих принципов ядерной физики, я обнаружил в 1938 г., что углеродно-азотный цикл может обеспечить необходимое выделение энергии на Солнце... Углерод служит только катализатором; результатом реакции является комбинация четырех протонов и двух электронов, образующих ядро ${}^4\text{He}$. В этом процессе испускаются два нейтрино, уносящаяся энергия около 25 МэВ на цикл освобождается и поддерживает температуру Солнца неизменной... Это была та основа, на которой Фаулер и другие рассчитали скорости реакции в (CN)-цикле».

Горение водорода. Возможны две различные реакции горения водорода — преобразования четырех ядер водорода в ядро ${}^4\text{He}$, которые могут обеспечить достаточное выделение энергии для поддержания светимости звезды:

- протон-протонная цепочка (*pp*-цепочка), в которой водород превращается непосредственно в гелий;
- углеродно-азотно-кислородный цикл (CNO-цикл), в котором в качестве катализаторов участвуют ядра C, N и O.

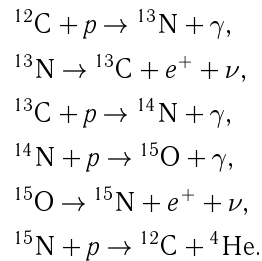
Какая из этих двух реакций играет более существенную роль, зависит от температуры звезды. В звездах, имеющих массу, сравнимую с массой Солнца, и меньше, доминирует протон-протонная цепочка. В более массивных звездах, имеющих более высокую

температуру, основным источником энергии является CNO-цикл. При этом, естественно, необходимо, чтобы в составе звездного вещества присутствовали ядра C, N и O. Температура внутренних слоев Солнца составляет $1.5 \cdot 10^7$ К и доминирующую роль в выделении энергии играет протон-протонная цепочка.

Протон-протонная цепочка. Первая реакция в *pp*-цепочке $p + p \rightarrow d + e^+ + \nu$ происходит в результате слабого взаимодействия и является определяющей в скорости всей *pp*-цепочки ($t = 5.8 \cdot 10^9$ лет). На втором этапе в результате взаимодействия образовавшегося дейтрона с водородом происходит образование изотопа ${}^3\text{He}$ $d + p \rightarrow {}^3\text{He} + \gamma$. Затем с вероятностью 69% происходит реакция ${}^3\text{He} + {}^3\text{He} \rightarrow {}^4\text{He} + 2p$, приводящая к образованию ${}^4\text{He}$.

Выделяемая энергия в результате *pp*-цепочки составляет ~ 25 МэВ.

CNO-цикл. Особенность CNO-цикла состоит в том, что он, начинаясь на ядре углерода ${}^{12}\text{C}$, сводится к последовательному связыванию четырех протонов с образованием в конце CNO-цикла ядра ${}^4\text{He}$:



Основное время эволюции звезды связано с горением водорода. При плотностях, характерных для звездных недр, горение водорода происходит при температуре $(1-3) \cdot 10^7$ К. При этих температурах требуется 10^6-10^{10} лет для того, чтобы значительная часть водорода в центре звезды переработалась в гелий. При дальнейшем повышении температуры в центре звезды могут образовываться более тяжелые химические элементы, $Z > 2$. Звезды главной последовательности сжигают водород в центральной части, где из-за более высокой температуры ядерные реакции происходят наиболее интенсивно. По мере выгорания водорода в центре звезды реакция горения водорода начинает перемещаться к периферии звезды. Температура в центре звезды непрерывно возрастает, и, когда она достигнет 10^6 К, начинаются реакции горения ${}^4\text{He}$. Реакция ${}^3\text{He} + {}^4\text{He} \rightarrow {}^{12}\text{C} + \gamma$ наиболее важна для образования химических элементов. Она требует одновременного соударения трех α -частиц и возможна лишь благодаря тому, что энергия реакции ${}^8\text{Be} + {}^4\text{He}$ совпадает с резонансом возбужденного состояния ${}^{12}\text{C}$. Наличие резонанса резко увеличивает вероятность слияния трех α -частиц. Какие ядерные реакции будут происходить в центре звезды, зависит от ее массы, которая должна обеспечить высокую температуру за счет гравитационного сжатия. Так как теперь в реакциях синтеза участвуют ядра с большим Z , центральная часть звезды сжимается все больше, температура в центре звезды повышается. При температурах несколько миллиардов градусов наряду с образованием ядер с все большим Z происходит разрушение ранее образовавшихся стабильных ядер, образуются протоны, нейтроны, α -частицы, высокоэнергичные фотоны, что

приводит к образованию химических элементов всей Периодической таблицы Менделеева вплоть до железа. Образование химических элементов тяжелее железа происходит в результате последовательного захвата нейтронов и последующего β^- -распада. На этой стадии в ядерных процессах происходит не только выделение энергии, но и ее поглощение. Значительную энергию уносят нейтрино, образующиеся в результате β^- -распада. Массивная звезда теряет устойчивость. Происходит взрыв Сверхновой, при котором значительная часть химических элементов, образовавшихся в звезде, выбрасывается в межзвездное пространство. Если звезды первого поколения состояли из водорода и гелия, то в звездах последующих поколений уже в начальной стадии нуклеосинтеза присутствуют более тяжелые химические элементы.

Е. Бербидж, Г. Бербидж, В. Фаулер, Ф. Хойл в 1957 г. дали следующее описание основных процессов звездной эволюции, в которых происходит образование атомных ядер.

1. Горение водорода, в результате этого процесса образуются ядра ${}^4\text{He}$.

2. Горение гелия. В результате реакции ${}^4\text{He} + {}^4\text{He} + {}^4\text{He} \rightarrow {}^{12}\text{C} + \gamma$ образуются ядра ${}^{12}\text{C}$.

3. α -Процесс. В результате последовательного захвата α -частиц образуются α -частичные ядра ${}^{16}\text{O}$, ${}^{20}\text{Ne}$, ${}^{24}\text{Mg}$, ${}^{28}\text{Si}$...

4. e -Процесс. При достижении температуры $5 \cdot 10^9$ К в звездах в условиях термодинамического равновесия протекает большое количество разнообразных реакций, в результате чего образуются атомные ядра вплоть до Fe и Ni. Ядра с $A \sim 60$ — наиболее сильно связанные атомные ядра. Поэтому на них заканчивается цепочка ядерных реакций синтеза, сопровождающихся выделением энергии.

5. s -Процесс. Ядра тяжелее железа Fe образуются в реакциях последовательного захвата нейтронов. Очень часто ядро, захватившее нейтрон, оказывается β^- -радиоактивным. Прежде чем ядро захватит следующий нейтрон, оно может распасться в результате β^- -распада. Каждый β^- -распад повышает порядковый номер образующихся атомных ядер на единицу. Если интервал времени между последовательными захватами нейтронов больше периодов β^- -распада, процесс захвата нейтронов называется s -процессом (slow). Таким образом, ядро в результате захвата нейтронов и последующих β^- -распадов становится все тяжелее, но при этом оно не отходит слишком далеко от долины стабильности на $N-Z$ -диаграмме.

6. r -Процесс. Если скорость последовательного захвата нейтронов гораздо больше скорости β^- -распада атомного ядра, то оно успевает захватить сразу большое число нейтронов. В результате r -процесса образуются нейтроноизбыточные ядра, сильно удаленные от долины стабильности. Лишь затем они в результате последовательной цепочки β^- -распадов превращаются в стабильные ядра. Обычно считается, что r -процесс происходит в результате взрывов Сверхновых.

7. p -Процесс. Некоторые стабильные нейтронодефицитные ядра (так называемые обойденные ядра) образуются в реакциях захвата протона, в реакциях (γ, n) или в реакциях под действием нейтрино.

В Солнечной системе сохранились лишь те химические элементы, время жизни которых больше возраста Солнечной системы. Это 85 химических элементов. Остальные химические элементы были получены в результате различных ядерных реакций на ускорителях или в результате облучения в ядерных реакторах. Синтез первых трансурановых элементов в лабораторных условиях был осуществлен с помощью ядерных реакций под действием нейтронов и ускоренных α -частиц. Однако дальнейшее продвижение к более тяжелым элементам оказалось таким способом практически невозможным. Для синтеза элементов тяжелее менделевия Md ($Z = 101$) используют ядерные реакции с более тяжелыми многозарядными ионами — углеродом, азотом, кислородом, неоном, кальцием. Для ускорения тяжелых ионов начали строиться ускорители многозарядных ионов.

Э. Резерфорд: «Если существуют элементы более тяжелые, чем уран, то вполне вероятно, что они окажутся радиоактивными. Исключительная чувствительность методов химического анализа, основанная на радиоактивности, позволит опознать эти элементы, даже если они будут присутствовать в ничтожно малых количествах. Поэтому можно ожидать, что число радиоактивных элементов в незначительных количествах гораздо больше, чем три известных в настоящее время радиоактивных элемента. Чисто химические методы исследования окажутся малопригодными на первом этапе изучения таких элементов. Основными факторами здесь являются постоянство излучения, их характеристики и существование или отсутствие эманаций или других продуктов распада».

Большое число радиоактивных изотопов сверхтяжелых элементов было синтезировано в ОИЯИ (г. Дубна). 105-й химический элемент назван дубнием. Химический элемент с максимальным порядковым номером $Z = 118$ был синтезирован в Дубне в сотрудничестве с Ливерморской лабораторией США. Верхняя граница существования химических элементов связана с их нестабильностью относительно радиоактивного распада. Дополнительная устойчивость атомных ядер наблюдается вблизи магических чисел. Так, согласно теоретическим оценкам, должны существовать дважды магические числа $Z = 108$, $N = 162$ и $Z = 114$, $N = 184$. Период полураспада ядер, имеющих такие числа протонов и нейтронов, может составить сотни тысяч лет. Это так называемые «острова стабильности». Проблема образования ядер «острова стабильности» состоит в сложности подбора мишеней и ускоряемых ионов. Синтезированные в настоящее время изотопы 108–112-го элементов имеют слишком малое число нейтронов. Как следует из измеренных периодов полураспада изотопов 108–112-го элементов, увеличение числа нейтронов на 6–10 единиц (т.е. приближение к «острову стабильности») приводит к увеличению периода α -распада в 10^4 – 10^5 раз.

Так как число ядер получаемых сверхтяжелых изотопов исчисляется единицами, были разработаны эффективные методы их идентификации по цепочкам последовательных α -распадов, что увеличивает надежность результатов.

Таблица 4

Реакции, в которых были впервые получены трансурановые элементы

Год открытия	Химический элемент	Z	Реакция
1936	Np, Pu	93, 94	$^{238}_{92}\text{U} + n \rightarrow ^{239}_{92}\text{U} \xrightarrow{\beta^-} ^{239}_{93}\text{Np} \xrightarrow{\beta^-} ^{239}_{94}\text{Pu}$
1945	Am	95	$^{238}_{92}\text{U} + ^4_2\text{He} \rightarrow ^{241}_{94}\text{Pu} + n, \quad ^{241}_{94}\text{Pu} \rightarrow ^{241}_{95}\text{Am} + e^- + \tilde{\nu}_e$
1961	Cm	96	$^{239}_{94}\text{Pu} + ^4_2\text{He} \rightarrow ^{242}_{96}\text{Cm} + n$
1956	Bk	97	$^{241}_{95}\text{Am} + ^4_2\text{He} \rightarrow ^{243}_{97}\text{Bk} + 2n$
1950	Cf	98	$^{242}_{96}\text{Cm} + ^4_2\text{He} \rightarrow ^{245}_{98}\text{Cf} + n$
1952	Es	99	$^{238}_{92}\text{U} + 15n \rightarrow ^{253}_{92}\text{U} \xrightarrow{\beta^-} ^{253}_{93}\text{Np} \xrightarrow{\beta^-} \dots \xrightarrow{\beta^-} ^{253}_{99}\text{Es}$
1952	Fm	100	$^{238}_{92}\text{U} + 17n \rightarrow ^{255}_{92}\text{U} \xrightarrow{\beta^-} ^{255}_{93}\text{Np} \xrightarrow{\beta^-} \dots \xrightarrow{\beta^-} ^{255}_{100}\text{Fm}$
1955	Md	101	$^{253}_{99}\text{Es} + ^4_2\text{He} \rightarrow ^{256}_{101}\text{Md} + n$
1957	No	102	$^{248}_{96}\text{Cm} + ^{13}_6\text{C} \rightarrow ^{257}_{102}\text{No} + 4n$
1961	Lr	103	$^{249}_{98}\text{Cf} + ^{10}_{11}\text{B} \rightarrow ^{255}_{103}\text{Lr} + (4-5)n,$ $^{249}_{98}\text{Cf} + ^{10}_{10}\text{B} \rightarrow ^{256}_{103}\text{Lr} + 3n,$ $^{243}_{95}\text{Am} + ^{16}_8\text{O} \rightarrow ^{255}_{103}\text{Lr} + 4n,$ $^{243}_{95}\text{Am} + ^{18}_8\text{O} \rightarrow ^{256}_{103}\text{Lr} + 5n$
1964	Rf	104	$^{242}_{94}\text{Pu} + ^{22}_{10}\text{Ne} \rightarrow ^{260}_{104}\text{Rf} + 4n$
1967–1970	Db	105	$^{242}_{95}\text{Am} + ^{22}_{10}\text{Ne} \rightarrow ^{262}_{105}\text{Db} + 2n, \quad ^{249}_{98}\text{Cf} + ^{15}_7\text{N} \rightarrow ^{260}_{105}\text{Db} + 4n$
1974	Sg	106	$^{249}_{98}\text{Cf} + ^{18}_8\text{O} \rightarrow ^{263}_{106}\text{Sg} + 4n$
1976	Bh	107	$^{209}_{83}\text{Bi} + ^{54}_{24}\text{Cr} \rightarrow ^{262}_{107}\text{Bh} + n$
1984–1987	Hs	108	$^{208}_{82}\text{Pb} + ^{58}_{26}\text{Fe} \rightarrow ^{265}_{108}\text{Hs} + n$
1982	Mt	109	$^{209}_{83}\text{Bi} + ^{58}_{26}\text{Fe} \rightarrow ^{266}_{109}\text{Mt} + n$
1994	Ds	110	$^{208}_{81}\text{Pb} + ^{62}_{28}\text{Ni} \rightarrow ^{269}_{110}\text{Ds} + n$
1994	Rg	111	$^{209}_{83}\text{Bi} + ^{64}_{28}\text{Ni} \rightarrow ^{272}_{111}\text{Rg} + n$
1996	Cn	112	$^{208}_{82}\text{Pb} + ^{70}_{30}\text{Zn} \rightarrow ^{277}_{112}\text{Cn} + n$
2004		113, 115	$^{243}_{95}\text{Am} + ^{48}_{20}\text{Ca} \rightarrow ^{288}_{113}\text{Nh} + 3n, \quad ^{288}_{113}\text{Nh} \rightarrow ^{284}_{113}\text{Nh} + \alpha,$ $\rightarrow ^{287}_{113}\text{Nh} + 4n, \quad ^{287}_{113}\text{Nh} \rightarrow ^{283}_{113}\text{Nh} + \alpha$
1998		114	$^{244}_{94}\text{Pu} + ^{48}_{20}\text{Ca} \rightarrow ^{288}_{114}\text{Fl} + 4n,$ $\rightarrow ^{289}_{114}\text{Fl} + 3n$
2000		116	$^{248}_{96}\text{Cm} + ^{48}_{20}\text{Ca} \rightarrow ^{293}_{116}\text{Lv} + 3n,$ $^{245}_{96}\text{Cm} + ^{48}_{20}\text{Ca} \rightarrow ^{291}_{116}\text{Lv} + 2n,$ $\rightarrow ^{290}_{116}\text{Lv} + 3n$
2009		117	$^{249}_{97}\text{Bk} + ^{48}_{20}\text{Ca} \rightarrow ^{294}_{117}\text{Ts} + 3n$ $\rightarrow ^{293}_{117}\text{Ts} + 4n$
2006		118	$^{249}_{98}\text{Cf} + ^{48}_{20}\text{Ca} \rightarrow ^{294}_{118}\text{Og} + 3n$

Г. Флёрв: «Устойчивость самых тяжелых ядер определяется главным образом их спонтанным делением, и потому необходимым условием существования таких ядер является наличие у них барьеров относительно деления. Для ядер от урана до фермия оболочечная составляющая в барьере деления, хотя и приводит к некоторым интереснейшим физиче-

ским явлениям, все же не оказывает критического влияния на их стабильность и проявляется в суперпозиции с жидкокапельной составляющей барьера. В области СТЭ капельная составляющая барьера полностью исчезает и стабильность сверхтяжелых ядер определяется проникаемостью чисто оболочечного барьера...

Для экспериментальной проверки такого предсказания требуется знание времени жизни ядер СТЭ относительно спонтанного деления, так как при любой конкретной постановке эксперимента по их поиску невозможно охватить весь диапазон времен жизни — от 10^{10} лет до 10^{-10} с. Выбор методики эксперимента существенно зависит от того, в каком интервале времен жизни проводится исследование...

В качестве направлений экспериментального решения проблемы можно выбрать как поиск СТЭ в природе (на Земле, в объектах космического происхождения, в составе космического излучения и т. д.), так и искусственное получение элементов на ускорителях (в ядерных реакциях между сложными ядрами).

Очевидно, что поиск СТЭ в земных объектах может привести к успеху только при счастливом стечении двух обстоятельств. С одной стороны, должен существовать эффективный механизм нуклеосинтеза, с достаточной вероятностью приводящий к образованию атомных ядер СТЭ. С другой стороны, нужно, чтобы существовал хотя бы один нуклид, принадлежащий к новой области стабильности, который имел бы время жизни, сравнимое со временем жизни Земли, — $4.5 \cdot 10^9$ лет.

Если речь идет о присутствии СТЭ в объектах внеземного происхождения — в метеоритах, космическом излучении и т. п., то такие поиски могут привести к успеху даже в том случае, если время жизни ядер СТЭ существенно меньше 10^{10} лет: такие объекты могут оказаться значительно моложе земных образцов ($10^7 - 10^8$ лет).

10. Структура нуклона

Метод рассеяния пробных частиц для определения структуры микрообъектов, предложенный Резерфордом, является универсальным и эффективно используется и в настоящее время. Современные эксперименты отличаются от опытов Резерфорда в основном своими масштабами — колоссальной энергией пробных частиц, получаемых на ускорителях, гигантскими детекторами, насчитывающими десятки тысяч регистрирующих элементов. Уменьшение длины волны пробной частицы до величины, меньшей чем 10^{-13} см, открыло возможности изучения внутренней структуры протона и нейтрона. В 1970 г. на ускорителе электронов с энергией 20 ГэВ, построенном в Стэнфорде, было получено, что протон и нейтрон имеют размер ~ 0.8 фм и являются составными частицами. Так же как в случае опытов Резерфорда, угловое распределение электронов удалось объяснить, если предположить, что внутри протона имеются более мелкие образования. Р. Фейнман назвал эти неизвестные точечные составные части протона и нейтрона, на которых происходит рассеяние электронов, «партонами». Внутренняя структура протона зависит от пространственного разрешения, определяемого длиной волны виртуального фотона $\lambda = h/q$, где q — импульс виртуального фотона. Энергии современных ускорителей соответствуют разрешению ≈ 0.01 фм.

Результаты исследований показали, что нуклон — это частица, состоящая из трех валентных кварков, виртуальных морских кварков-антикварков и глюонов.

1. Внутри нуклона обнаружены точечные объекты — партоны, в которых сосредоточена вся масса (внутренняя энергия) нуклона. Размер партонов $< 10^{-17}$ см.

2. Заряженные партоны имеют все характеристики кварков — их спин $1/2$, а заряды в единицах e либо $+2/3$, либо $-1/3$.

3. Нейтральные партоны, отождествляемые с глюонами, несут около половины внутреннего импульса (энергии) нуклона.

4. Валентные кварки окружены испускаемыми и поглощаемыми ими виртуальными глюонами, реализующими межкварковое сильное взаимодействие. Глюоны рождают виртуальные кварк-антикварковые пары, аннигилирующие затем вновь в глюоны. Эти виртуальные пары образуют множество морских кварков.

11. Ядерная физика и естествознание

Методы исследований, результаты изучения атомных ядер широко используются в других разделах физики и других областях знаний. Зародившись в недрах химии — науки о свойствах атомов, исследования структуры материи привели к открытию атомного ядра и открытию ядерной динамики. Первые эксперименты с естественными источниками α -излучения сменились экспериментами на ускорителях и реакторах. Изучение строения атомного ядра неизбежно вело к изучению структуры протона, изучению свойств «элементарных» частиц, которые в большом количестве рождаются на ускорителях. В недрах ядерной физики зародилось новое направление исследований — физика элементарных частиц. Физика атомного ядра и физика элементарных частиц имеют между собой много общего как по идеологии выполняемых экспериментов, так и по используемым методам наблюдений.

В. Гольданский: «Открытие атомного ядра Резерфордом и исследование рентгеновских спектров Мозли привели к раскрытию физического смысла номера элемента в менделеевской системе как величины положительного заряда ядер атомов этого элемента. Теория Бора связала планетарную модель атома с квантовой теорией, дала теоретическое истолкование периодичности химических свойств элементов, позволила предсказать структуру шестого периода менделеевской системы и свойства не известных в то время гафния и рения. Но особое, неизмеримо важное значение приобрело другое следствие сопоставления Периодической системы с квантовой теорией — выдвинутый в 1925 г. Паули «принцип исключения». От Менделеева — через принцип Паули — пролегла дорога к статистике Ферми-Дирака и далее к теории всех многообразных явлений, связанных с особыми свойствами фермионов, в том числе теории химической связи, атомных ядер, металлов и полупроводников.

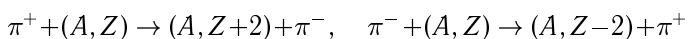
Таким образом, на границе физики и химии возникла и получила сильнейшее развитие современная наука о строении вещества, нашедшая к тому же в последние двадцать лет принципиально новые важнейшие приложения и продолжения в молекулярной биологии».

Атомные ядра имеют характерный спектр возбужденных состояний, распад которых происходит с ис-

пускаянием γ -квантов. Разность энергий между возбужденными состояниями, соответствующая энергии испускаемых γ -квантов, может составлять величину порядка единиц МэВ, что в 10^3 – 10^4 раз больше энергий γ -квантов, испускаемых из возбужденных состояний атомов. Возбужденные состояния атомных ядер могут распадаться с испусканием лептонов. Испускание электрона всегда сопровождается испусканием электронного антинейтрино, испускание позитрона всегда сопровождается испусканием нейтрино. Распад возбужденных состояний ядер может происходить также с испусканием протонов, нейтронов и более сложных фрагментов.

В нуклонах также обнаружены возбужденные состояния. Энергия возбуждения нуклона составляет сотни МэВ. Возбужденный нуклон, так же как и атомное ядро, может переходить в основное состояние с испусканием γ -квантов и лептонов. Однако в большинстве случаев распад возбужденных состояний нуклонов происходит с испусканием мезонов. Чаще всего это π -мезон. В этом проявляется особенность сильных взаимодействий кварков в нуклоне. На смену «элементарным» частицам 40-х гг. XX столетия — протону и нейтрону — пришли новые фундаментальные частицы — кварки — составные части протона и нейтрона.

Атомное ядро — уникальный объект исследований. В атомном ядре были открыты новые типы взаимодействий — сильное и слабое, были открыты новые законы сохранения и симметрии, которые были более детально исследованы во взаимодействиях элементарных частиц. Можно привести множество примеров совместных интересов физики атомного ядра и физики частиц. Один из таких примеров — физика гиперядер — образование ядерной системы из нуклонов и гиперонов. Хорошо известно, какую большую роль играет эффект спаривания тождественных нуклонов в атомных ядрах. Изучение реакций перезарядки π -мезонов



дают интересную информацию о силах спаривания, так как в этих реакциях происходит превращение двух нейтронов в два протона и наоборот.

Несомненна связь между астрофизикой и ядерной физикой. Ядерная физика дала ответы на вопросы:

- почему светят звезды?
- почему звезды умирают?
- как устроены нейтронные звезды — объекты, в которых наряду с сильным взаимодействием между нейтронами необходимо учитывать гравитационное взаимодействие?

В настоящее время известно ~ 3500 атомных ядер. По существующим оценкам число атомных ядер может составлять ~ 7500 . Большинство из не открытых пока ядер — это ядра, перегруженные нейтронами. Изучение свойств этих ядер важно для описания r -процесса нуклеосинтеза. В обычных земных условиях атомные ядра окружены электронными оболочками. Однако при высоких температурах в звездах атомы полностью ионизированы и атомные ядра погружены в плазму. Ядерные процессы в этих условиях тоже важны для нуклеосинтеза.

Атомные ядра играют важную роль в науке о человеке. Все химические элементы, из которых состоит

человек, образовались в ядерных реакциях в звездах. А. Беккерель, М. Кюри, П. Кюри были первыми, кто испытал на себе воздействие радиоактивности. А. Беккерель носил в течение нескольких часов в нагрудном кармане источник радия, что привело к лучевому ожогу, который не заживал в течение нескольких недель. П. Кюри, узнав об этом, решил проверить этот факт и тоже получил ожог на руке. Сегодня последствия радиационного облучения изучены. Они могут иметь как отрицательные последствия — лучевая болезнь, так и положительные. В миллионах случаях радиационное облучение используется в лечебных целях и для диагностики различных болезней. Число различных применений радиоактивных методов огромно. Оно вошло в наш повседневный образ жизни.

Жизнь на Земле возможна благодаря ядерным реакциям, происходящим в недрах Солнца. Солнце дает тепло, согревающее Землю. Но одновременно оно является интенсивным источником радиации, которое могло бы убить все живое на Земле, если бы Земля не имела магнитного поля, защищающего Землю от космического излучения. Магнитное поле обязано разогреву внутренней области Земли за счет распада радиоактивных изотопов, находящихся в центре Земли.

В 1929 г. Э. Хаббл установил расширение Вселенной, обнаружив красное смещение видимого излучения галактик за счет эффекта Доплера. Скорость v разлета двух галактик и расстояние R между ними связаны законом Хаббла

$$v = HR, \quad H = 71 \pm 4 \text{ км/(с} \cdot \text{Мпс)}.$$

Согласно космологической модели Большого взрыва, Вселенная образовалась около 15 млрд лет назад. «Осколки» этого взрыва представляют собой тысячи миллиардов разлетающихся галактик. Вселенная продолжает расширяться и в настоящую эпоху.

Средняя плотность наблюдаемого вещества во Вселенной $(2-5) \cdot 10^{-31} \text{ г/см}^3$, что составляет 2–5% от средней величины критической плотности

$$\rho_{\text{кр}} = \frac{3H^2}{8\pi G} \approx 10^{-29} \text{ г/см}^3.$$

Это вещество состоит из оптически ярких звезд (на их долю приходится лишь около 1/10 массы наблюдаемого вещества), межзвездной пыли и газа, молекулярных облаков, остатков звездной эволюции (включая черные дыры), планет и очень маленьких звезд, массы которых недостаточны для ядерных реакций синтеза. Установлено, что во Вселенной имеется большое количество неизвестной оптически невидимой материи, которую принято называть *темной материей*. Темная материя увеличивает массу Вселенной. Эта материя не участвует в ядерном синтезе, происходящем в звездах, не излучает свет. Астрономические наблюдения показывают, что скорости движения галактик составляют тысячи километров в секунду и удерживать их в наблюдаемых скоплениях галактик можно только при условии, что полная масса вещества в скоплении примерно в десять раз больше видимой звездной массы. В нашей галактике Млечный Путь темного вещества также примерно в 10 раз больше видимого. Оно образует обширное гало вокруг диска Млечного

Пути. Не меньше темной материи и в межгалактическом пространстве. Средняя плотность темной материи приближается к критической плотности Вселенной, т. е. составляет $\approx 10^{-29}$ г/см³, что в несколько раз больше плотности видимого вещества.

Природу темной материи пока не удалось выяснить. Известно лишь то, что это не барионная материя. Это могут быть новые неизвестные пока массивные частицы, массы которых в тысячи раз больше массы протона, практически не взаимодействующие с известной нам материей.

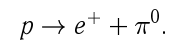
Наибольший вклад в материю Вселенной дает так называемая *темная энергия*, которую интерпретируют как вакуум. Имеется в виду особая форма материи — *физический вакуум*, т. е. наименьшее энергетическое состояние физических полей, заполняющих пространство Вселенной. В начале 1998 г. было экспериментально доказано, что последние пять млрд лет расширение Вселенной не замедлялось, как следует из модели Большого взрыва, а ускорялось. Это открытие сделано из анализа спектров излучения взрывающихся Сверхновых, расположенных от Земли на расстоянии 5–10 млрд световых лет. Было доказано наличие в космосе гравитационного отталкивания, присущего физическому вакууму. По ускорению космологического расширения удалось измерить плотность энергии вакуума. Средняя плотность энергии вакуума в единицах плотности массы

$$\rho_{\text{вакуум}} \approx 0.7 \cdot 10^{-29} \text{ г/см}^3.$$

Эффективная энергия вакуума отрицательна при положительной плотности. Плотность энергии вакуума со временем не изменяется, в то время как плотности обычного вещества и темной материи уменьшаются из-за расширения Вселенной. В отличие от сил гравитации, силы, обусловленные темной энергией, стремятся удалить космические объекты друг от друга. Вакуум создает антигравитацию, которая определяет динамику Вселенной в современную эпоху. В первой половине своего существования Вселенная расширялась вследствие инерции Большого взрыва. Во Вселенной доминировало вещество, и скорость ее расширения замедлялась. Галактики и звезды все дальше удалялись друг от друга, плотность материи во Вселенной падала. Со временем галактики и звезды стали редкими вкраплениями в космологическом вакууме, и Вселенная перешла из состояния доминирования вещества в состояние доминирования вакуума, обеспечившее ей «переключение» в режим дальнейшего ускоренного расширения. Но в отличие от статичного мира Эйнштейна, в котором состояние равновесия достигалось уравниванием сил гравитации и космологического Λ -члена, теперь равновесие достигается постоянной плотностью вакуума. Как образуется космологический вакуум и какова его природа, еще предстоит выяснить. Важно отметить, что физический вакуум — особое состояние квантового поля, в котором при нулевых квантовых числах суммарных зарядов, импульсов и других переменных могут возникать виртуальные частицы. Образовавшиеся виртуальные частицы могут создавать в пространстве ненулевую энергию вакуума. Однозначного ответа на вопрос о тождественности физического вакуума и темной энергии Вселенной пока нет. Другой причиной

обсуждаемых эффектов могут быть дополнительные измерения пространства Вселенной.

Условия, существовавшие в первые мгновения Вселенной, воспроизводятся в релятивистских столкновениях тяжелых ядер на ускорителях RHIC (Relativistic Heavy Ion Collider) и LHC (Large Hadron Collider). В столкновениях ядер Pb + Pb была обнаружена кварк-глюонная плазма — состояние, в котором должна была существовать материя в первые мгновения после образования Вселенной. Характерной особенностью материи в это время было одинаковое число частиц и античастиц. Одним из фундаментальных вопросов является следующий. Если вначале вещество и антивещество присутствовали в одинаковом количестве, почему окружающая нас часть Вселенной состоит из вещества? Куда девалось антивещество? Может быть, отдаленные неисследованные области Вселенной состоят из антивещества и тогда первоначальная симметрия между материей и антиматерией сохранилась и в настоящее время. Однако существует и другое объяснение преобладания вещества над антивеществом. В результате нарушения CP-четности в нестационарной расширяющейся Вселенной образовалось преобладание вещества над антивеществом на уровне 10^{-9} , т. е. на 10^9 частиц антивещества было $10^9 + 1$ частица вещества. В результате последующей аннигиляции вещества и антивещества образовалось реликтовое излучение. Число фотонов превосходит число барионов во Вселенной как раз в 10^9 раз. Такое объяснение предполагает, что протон должен быть нестабильной частицей и может распадаться с нарушением законов сохранения барионного и лептонного зарядов:



Время жизни протона, по оценке, должно быть $> 10^{32}$ лет.

Конец XIX в. ознаменовался рядом крупных открытий, которые радикально повлияли на развитие науки в XX в. Аналогичная ситуация складывается в физике и в настоящее время. Оказывается, что наши знания о процессах, происходящих во Вселенной, основываются на законах о свойствах барионной материи, составляющей ~5% всей материи во Вселенной. ~30% всей материи во Вселенной составляет темная материя, природа которой до сих пор неизвестна. ~70% всей материи во Вселенной составляет темная энергия — еще более загадочное состояние материи.

Достаточно надежно описываемые формы материи, которые хорошо известны, составляют всего несколько процентов от общей плотности космологической материи. Изучение этих новых форм материи, безусловно, важнейшая проблема. Природа бросила очередной вызов человеку.

Список литературы

1. Резерфорд Э. Избранные научные труды. Т. 1; 2. М., 1971; 1972.
2. Бор Н. // Успехи физ. наук. 1923. Вып. 4. С. 417.
3. Бор Н. // Успехи физ. наук. 1936. Вып. 4. С. 425.
4. Бор Н. Избр. науч. труды. Т. 1, 2. М., 1971.
5. Тамм И. // Успехи физ. наук. 1963. **80** (6). С. 191.
6. Шрёдингер Э. // Успехи физ. наук. 1977. **122** (8). С. 621.
7. Ферми Э. Науч. труды. Т. 1. М., 1971.

8. *Лауэ М.* История физики. М., 1956.
9. *Кюри М.* Радиоактивность. М., 1960.
10. *Гейперт-Майер М.* // Успехи физ. наук. 1964. **82** (4). С. 749.
11. *Гейперт-Майер М., Йенсен. И.* Элементарная теория ядерных оболочек. М., 1958.
12. *Рейнуотер Дж.* // Успехи физ. наук. 1976. **120**. С. 529.
13. *Бор О.* // Успехи физ. наук. 1976. **120**. С. 543.
14. *Моттelson О.* // Успехи физ. наук. 1976. **120**. С. 563.
15. *Ишханов Б.С., Капитонов И.М., Юдин Н.П.* Частицы и атомные ядра. М., 2007.
16. Деформация атомных ядер: Сб. ст. М., 1958.
17. *Вайскопф В.Ф.* // Успехи физ. наук. 1962. **76** (1). С. 153.
18. *Бете Г.* // Успехи физ. наук. 1968. **96** (11). С. 393.
19. *Гольданский В.И.* // Успехи физ. наук. 1976. **118** (2). С. 325.
20. *Иваненко Д.Д.* // 50 лет современной ядерной физике: Сб. ст. / Под ред. Б. М. Кедрова. М., 1982. С. 18.
21. *Гейзенберг В.* // 50 лет современной ядерной физике: Сб. ст. / Под ред. Б. М. Кедрова. М., 1982. С. 35.
22. *Тамм И.* // 50 лет современной ядерной физике: Сб. ст. / Под ред. Б. М. Кедрова. М., 1982. С. 57.
23. *Юкава Х.* // 50 лет современной ядерной физике: Сб. ст. / Под ред. Б. М. Кедрова. М., 1982. С. 58.
24. *Петержак К.А., Флёров Г.Н.* // 50 лет современной ядерной физике: Сб. ст. / Под ред. Б. М. Кедрова. М., 1982. С. 105.
25. *Чедвик Дж.* // 50 лет современной ядерной физике: Сб. ст. / Под ред. Б. М. Кедрова. М., 1982. С. 6.
26. *Герлах В.* // 50 лет современной ядерной физике: Сб. ст. / Под ред. Б. М. Кедрова. М., 1982. С. 86.
27. *Блатт Дж., Вайскопф В.* Теоретическая ядерная физика. М., 1954.
28. *Бете Г., Моррисон Ф.* Элементарная теория ядра. М., 1958.

Atomic nuclei

B. S. Ishkhanov

*Department of General Nuclear Physics, Faculty of Physics; M. V. Lomonosov Moscow State University; D. V. Skobel'syn Reserch Institute of Nuclear Physics (MSU SINP), Moscow 119991, Russia.
E-mail: bsi@depni.sinp.msu.ru.*

Beginning in 1911, with the discovery of atomic nucleus by E. Rutherford, physicists have been trying to sort out the structure of the nucleus. Each nucleus is a complex unique object consisting of a finite number of neutrons and protons. The review shows how the accumulation of a large number of experimental data, their interpretation and theoretical analysis has varied views on the atomic nucleus. The result was the discovery of new types of interactions, not previously known to physics — the strong and weak interactions, the discovery of new phenomena associated with the mutual transformation of particles, the discovery of new types of symmetry, in particular, the isospin symmetry, the development of new experimental techniques, the development of particle accelerators which for the first time allowed to observe changes in individual nuclei. Studying the properties of atomic nuclei has opened a whole new world — the subatomic quantum world. The obtained knowledge is important in the natural sciences from the study of living systems to astrophysics.

Keywords: atomic nucleus, nuclear physics, nuclear reactions.

PACS: 21.10.-k, 24.10.-i, 01.65.+g.

Received 25 September 2011.

English version: *Moscow University Physics Bulletin* 1(2012).

Сведения об авторе

Ишханов Борис Саркисович — докт. физ.-мат. наук, профессор, зав. кафедрой, гл. науч. сотрудник;
тел.: (495) 939-50-95, e-mail: bsi@depni.sinp.msu.ru.