

ГЛАВА XVII

СОСТАВ, СТРОЕНИЕ И ПРЕВРАЩЕНИЯ АТОМНЫХ ЯДЕР

§ 61. Бомбардировка ядер быстрыми заряженными частицами

Периодический закон Менделеева и практическая целочисленность атомных весов указывали на сложность строения атома и общность структурных элементов всех атомов. Установление электронно-ядерного строения атома привело к переносу этих косвенных доказательств сложности структуры на ядро. Электрические заряды ядер оказались целыми кратными заряду ядра водорода — протона, а массы изотопов (см. т. II, § 37) — близкими к целым кратным массы того же протона. Эти обстоятельства привели к возрождению старой гипотезы Проута в несколько измененной форме — предположению, что протоны являются структурными элементами всех ядер.

Наличие общих структурных элементов подтверждается фактом взаимных превращений одних ядер в другие при радиоактивном распаде. Однако при естественном распаде радиоактивных элементов не наблюдалось вылета протонов — из этих ядер выбрасываются лишь α - и β -частицы. α -частица имеет $Z=2$ и $A=4$ и не может являться единственным структурным элементом ядер. С одной стороны, есть много тяжелых ядер с массовым числом A , не кратным четырем. С другой стороны, имеются и более легкие ядра с $A < 4$. В частности, кроме обычного водорода, известен его тяжелый изотоп — дейтерий, ядро которого с $Z=1$ и $A=2$ является как бы половинкой α -частицы.

Для выяснения структуры ядра необходимо было научиться воздействовать искусственным путем на скорость и направление радиоактивных превращений. Известные методы воздействия на скорости химических и физических процессов оказались для этой цели недостаточными, так как ядро надежно экранировано от внешних воздействий электронной оболочкой атома. Давления до тысяч атмосфер лишь в слабой степени деформируют внешние электронные оболочки. Нагревание до нескольких тысяч градусов приводит лишь к частичной ионизации атома. Такая же частичная

ионизация наблюдается в электрическом разряде при напряжениях в десятки и сотни тысяч вольт. Видимое излучение воздействует лишь на внешние электроны. Даже более жесткие рентгеновские лучи, воздействуя на электроны внутренних оболочек, обладают энергией кванта, как правило недостаточной, чтобы воздействовать на ядро.

Для того чтобы «заглянуть» внутрь ядра, необходимо было применить более мощные методы воздействия, бомбардировать ядра «снарядами», достаточно малыми по своим размерам, чтобы они могли проникнуть внутрь ядра, и обладающими энергией, достаточно большой для его расщепления. Открытие радиоактивности помогло и в этом — продукты радиоактивного распада обладают энергиями, достигающими до 10—15 Мэв. В первую очередь такими снарядами, позволившими не только расшифровать строение атома (§ 43), но и проникнуть внутрь ядра, явились α -частицы.

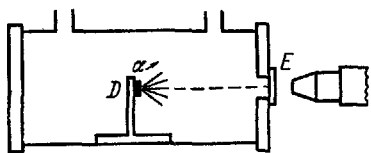


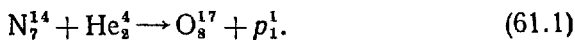
Рис. 3 13.

Используя испускаемые Po_{84}^{214} (RaC') α -частицы с энергией 7,58 Мэв, Резерфорд в 1919 г. впервые осуществил искусственное

превращение ядер. Схема прибора представлена на рис. 3.13. Радиоактивный препарат наносится на держатель D , сцинтилляции наблюдаются на экране E через микроскоп. Известно, что α -частицы указанной энергии имеют в воздухе при нормальных условиях длину пробега в 7 см. При тех давлениях, которые создавались в камере, α -частицы не могли достигнуть экрана. Однако при наполнении камеры азотом на экране возникли сцинтилляции. При наполнении камеры другими газами, например кислородом, сцинтилляции не наблюдались. Таким образом, было доказано, что при обстреле ядер азота α -частицами возникают какие-то новые частицы. Дальнейшие опыты показали, что эти частицы — быстрые протоны с длиной пробега в воздухе при нормальных условиях в 28 см, что отвечает энергии протонов в 6 Мэв.

Оставался неясным характер тех превращений, которые испытывало ядро. Поглощается ли при столкновении α -частица ядром азота или просто при ударе выбивает из него протон? Ответ на этот вопрос был получен в результате наблюдений Блэкетта, произведенных с помощью камеры Вильсона. Автоматизировав съемку и делая парные снимки, позволившие восстановить пространственную форму следов (см. § 57), он произвел 23 000 снимков. При этом было обнаружено некоторое число раздваивающихся следов — в и л о к. Большая часть их регистрировала сильное взаимодействие с ядром, в результате которого α -частица отклонялась резко

в сторону, а ускоренное ядро производило ионизацию на своем пути. Некоторое число вилок имело иной вид (рис. X в конце книги). Одно из разветвлений — короткий жирный след ускоренного удара ядра. Длинный след, идущий влево, явно не принадлежит уже α -частице, это след быстрого протона (p). След α -частицы в точке разветвления исчезает— α -частица поглощается ядром. Следовательно, в точке разветвления произошла ядерная реакция:



Правильность этого вывода подтверждалась расчетом: зная скорость α -частицы и вылетавшего при превращении протона, можно было по данным стереоскопического снимка вычислить массу ядра, испытавшего отдачу (из законов сохранения энергии и количества движения). Масса ядра оказалась равной 17 аеи— в соответствии с формулой (61.1).

Аналогичные (61.1) ядерные реакции наблюдались при обстреле α -частицами бора, фтора, натрия, алюминия и фосфора. При всех этих искусственных превращениях из ядер вылетали быстрые протоны, подтверждая наличие последних в составе различных ядер.

Однако использование одних α -частиц в качестве орудий исследования оказалось недостаточным. Обладая двойным положительным зарядом, α -частица отталкивается бомбардируемым ядром. Для того чтобы подойти вплотную к ядру на расстояние $R \sim 10^{-13}$ см и иметь возможность проникнуть внутрь ядра, α -частица должна обладать кинетической энергией

$$\epsilon_\alpha > \frac{2eZe}{R}. \quad (61.2)$$

Отсюда следует, что α -частицы с энергией $\epsilon_\alpha = 6$ Мэв не могут проникать в ядра с атомным номером $Z > 20$. Для превращений более тяжелых ядер необходимо иметь снаряды с меньшим зарядом и большей энергией.

Использование для этих целей однозарядных протонов, получающихся при реакциях типа (61.1), практически неосуществимо. Поскольку сечение ядра составляет примерно одну стомиллионную площади поперечного сечения атома, то из потока летящих α -частиц основная масса успеет раньше растратить всю свою энергию на ионизацию атомов, чем попадет в столь малую мишень. Лишь одна из десятка тысяч α -частиц будет при этом полезно использована для получения быстрого протона по реакции типа (61.1). В свою очередь, по аналогичным причинам лишь один из десятка тысяч полученных протонов сможет быть полезно использован для дальнейших ядерных превращений.

Поскольку получение протонов за счет ионизации водорода не представляет практических трудностей, перед физиками стала задача искусственного ускорения таких протонов в электрических полях с достаточно большой разностью потенциалов. Осуществление такой задачи стало возможным лишь при достаточно высоком уровне развития техники высоких напряжений, вакуумной техники и электроники начиная с 30-х годов XX в. Перечислим кратко основные направления развития современных ускорителей заряженных частиц.

1. В т. II (§ 9, рис. 1.40) приведена схема электростатического генератора Ван-де-Граафа. Прибор этот, значительно усовершенствованный, применяется и поныне. Уменьшение габаритов без опасности пробоя достигается тем, что весь прибор монтируется в толстом стальном кожухе, наполненном воздухом или другим газом под давлением. Это позволяет при сравнительно небольших размерах ускорять протоны до энергий в 5—7 Мэв.

2. Линейный каскадный ускоритель. Этот тип ускорителя, схема которого была впервые предложена Видерозе, сыграл большую роль в дальнейшем развитии техники ускорителей. Идея ускорителя состоит в том, чтобы ускоряемые частицы не нуждались в источнике высокого напряжения, возможности которого ограничены (утечкой зарядов, пробоем), а многократно ускорялись бы от источника переменного и сравнительно невысокого напряжения. Схема такого линейного ускорителя (т. е. ускорителя, в котором траектории ускоряемых частиц прямые) показана на рис. 3.14

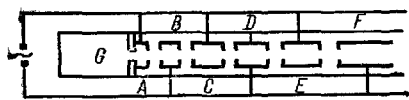


Рис. 3.14.

Ряд металлических трубок переменной длины — A, B, C, D, \dots расположен вдоль одной оси. Первая, третья и т. д. — все нечетные — присоединены к одному полюсу источника переменного напряжения; вторая, четвертая и т. д. — все четные — присоединены к другому полюсу. Ионы, возникающие в области G под действием тока, протекающего через газ, проникают в цилиндр A и, двигаясь далее, ускоряются электрическим полем между A и B . Частота источника напряжения должна быть такой, чтобы за то время, пока ионы пройдут цилиндр B , напряжение на цилиндрах изменило знак. Тогда в поле между B и C ионы опять испытывают ускорение и т. д. При частоте поля ν время пролета каждого цилиндра должно составлять $\frac{T}{2} = \frac{1}{2\nu}$. В силу того, что скорость частиц возрастает, путь, проходимый за $\frac{T}{2}$, удлиняется, что и

приводит к необходимости увеличения длины цилиндров. Это обстоятельство ограничивает возможность получения достаточно большого числа ступеней ускорения, а следовательно, и конечную энергию ускоряемых частиц.

3. Ц и к л о т р о н. Лоуренсу принадлежит идея обратить с помощью магнитного поля траекторию ускоряемой частицы в спираль. Прибор, основанный на этой идее, носит название циклотрона. Он описан в томе II курса (§ 36, рис. 3.41 и 3.42). С помощью циклотрона можно получать тяжелые частицы с энергией до 10 Мэв. Предел этот обусловлен тем обстоятельством, что при больших энергиях становится заметным релятивистское возрастание массы частиц. При этом возрастает период обращения этих частиц в магнитном поле

$$T = 2\pi \frac{m_0}{eH} \quad (61.3)$$

(см. т. II, формулу (36.22)), в то время как частота переменного электрического поля между дуантами прибора, ускоряющего частицы, остается неизменной.

С помощью подобных ускорителей могли быть получены достаточно интенсивные пучки протонов, ядер тяжелого водорода и гелия (искусственных α -частиц) с энергией до 10—15 Мэв, достаточной для осуществления различных ядерных превращений.

В дальнейшем для детального изучения свойств и структуры составных элементов ядра, таких как протоны и другие элементарные частицы, потребовалось превзойти указанные пределы и создавать «снаряды» с энергией в тысячи раз большей.

Идея ускорителей нового типа, позволивших значительно расширить пределы достижимых энергий частиц, была предложена в 1945 г. советским физиком В. И. Векслером и, несколько позже, независимо, американцем Мак-Милланом. Идея эта состоит в постепенном изменении магнитного поля, или частоты электрического поля, или, наконец, того и другого вместе так, чтобы рост массы ускоряемой частицы не выводил ее из режима ускорения. В соответствии с тремя возможностями изменения полей новые ускорители делятся на три типа.

4. С и н х р о т р о н. Представляет собой усовершенствованный бетатрон (т. II, § 41). Как и в бетатроне, ускоряемые электроны движутся все время по траектории одного и того же радиуса. Однако, в отличие от бетатрона, ускорение реализуется не столько за счет электрического поля индукции, сколько за счет электрического поля, введенного в одном или нескольких ускоряющих промежутках на траектории. Цикл ускорения начинается, как в обычном бетатроне. Когда энергия электронов достигает 2 Мэв, их скорость равна уже 0,97 *c*. Дальнейшее «ускорение» почти не

меняет их скорости. Непрерывно возрастает лишь кинетическая энергия, а значит, и масса электронов. Следовательно, с этого момента период обращения практически уже не меняется, и на ускоряющих промежутках создается переменное электрическое поле постоянной частоты. С этого момента изменение магнитного поля имеет целью лишь удерживать электроны на постоянной орбите. Роль электрического поля индукции становится второстепенной. Затем ускорение прекращается, и небольшое дальнейшее увеличение (или ослабление) магнитного поля сжимает (или увеличивает) радиус орбиты электронов, наводя их на мишень. С помощью синхротронов можно получить электроны с энергией в десятки и даже сотни $Mэв$, и при обстреле мишени — рентгеновские лучи с фотонами таких же энергий. Размеры прибора сравнительно невелики. В качестве примера укажем, что один из синхротронов при радиусе орбиты 29,3 см и максимальном напряжении магнитного поля в 8100 эрст дает электроны с энергией в 70 $Mэв$ (заметьте, что масса таких электронов примерно в 140 раз превышает массу покоя электрона).

5. Ф а з о т р о н. Используется для ускорения тяжелых частиц (протонов, ядер гелия и т. д.). Отличается от циклотрона тем, что частота ускоряющего электрического поля между дуантами убывает в процессе ускорения в соответствии с ростом T (обусловленным увеличением m). Это приводит, однако, к тому, что ускорение каждой группы частиц может начаться лишь после того, как закончен весь цикл ускорения предшествующей группы. Как и циклотрон, фазотрон имеет большие полюсные наконечники, так как траектория частиц — разворачивающаяся спираль. Фазотроны дают тяжелые частицы с энергией в несколько сотен $Mэв$. Дальнейшее увеличение энергии потребовало бы слишком больших магнитов. Фазотрон в Москве дает протоны с энергией 680 $Mэв$.

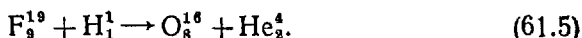
6. С и н х р о ф а з о т р о н (иногда бэватрон, космотрон). Предназначен для ускорения тяжелых частиц. В отличие от фазотрона в синхрофазотроне траектория частиц имеет постоянный радиус. Магнит имеет кольцеобразную форму. Ускорение производится в ряде промежутков на траектории с помощью электрического поля, частота которого меняется в процессе ускорения. Напряженность магнитного поля меняется, с тем чтобы удерживать частицы на постоянной траектории. Синхрофазотрон в Дубне при радиусе орбиты около 30 м и весе магнитов 35 000 т дает пучок протонов с энергией 10 $Бэв$. В настоящее время проектируются и строятся приборы, рассчитанные на ускорение протонов до энергии в десятки $Бэв$. В результате некоторых усовершенствований дальнейшее увеличение веса магнитов, вероятно, не потребует.

Первой ядерной реакцией, полученной с помощью искусственно ускоренных протонов, было превращение Li_3^7 . Эту реакцию осуществили Кокрофт и Уолтон:



Для осуществления реакции достаточно сообщить протонам сравнительно малую энергию, порядка десятка *кэв*. Кокрофт и Уолтон располагали протонами с энергией 0,6 *Мэв*. Превращение легко наблюдать в камере Вильсона, где по длине пробега образовавшихся α -частиц можно судить о выделившейся при реакции энергии. Она оказалась огромной: 17,3 *Мэв* на каждое превращенное ядро лития!

Протон большей энергии нужен для превращений фтора:



Эта реакция также идет с выделением энергии в 8 *Мэв*. Иногда выделяющаяся энергия (отдаваемая в виде кинетической энергии продуктов превращения — ядер кислорода и гелия) составляет всего 1,7 *Мэв*. В этом случае ядро кислорода оказывается возбужденным. Как правило, весьма скоро оно отдает энергию возбуждения с испускаемым γ -квантом. Энергия γ -кванта $h\nu$ равна 8,0—1,7=6,3 *Мэв*.

Применение ускорителей позволило осуществить целый ряд других ядерных реакций. Тем самым была экспериментально доказана возможность искусственного превращения одних химических элементов в другие. Измерения пробегов показали, что сумма кинетических энергий продуктов ядерной реакции может быть как больше, так и меньше кинетической энергии исходных частиц. В отличие от естественного радиоактивного распада, идущего всегда с выделением энергии, искусственные ядерные реакции могут быть как экзoэнергетическими (с выделением энергии), так и эндoэнергетическими (с затратой энергии). Абсолютные значения энергетических эффектов при этом порядка 1—10 *Мэв* на элементарный акт и в сотни тысяч раз превышают энергии, выделяющиеся или поглощаемые при химических превращениях.

Практическое использование ядерных реакций, осуществляемых с помощью ускорителей, при бомбардировке α -частицами оказалось затруднительным. Как указывалось выше, эти реакции идут с исключительно низким выходом. Для осуществления одного элементарного акта надо, кроме одной исходной частицы, затратить энергию на ускорение многих тысяч других таких же снарядов, не попадающих в мишень и растрачивающих эту энергию бесполезно на ионизацию встречных атомов.

Не удалось с помощью ускорителей с энергией частиц 10—15 Мэв решить задачу о структурных элементах ядра. Поскольку протон и α -частица сами являются ядрами определенных химических элементов (водорода и гелия), то процессы типа (61.1) и (61.5) представляют собой реакции обмена, а не расщепления ядер на составные элементы.

Это положение в ядерной физике существенно изменилось лишь с открытием нейтрона. Изучение свойств нейтронов позволило в основном расшифровать структуру ядра (§ 64) и осуществить практическое использование ядерной энергии (гл. XVIII).

§ 62. Открытие нейтрона. Состав атомных ядер

Когда выяснилось, что не все легкие ядра, обстреливаемые α -частицами, испускают протоны, возник вопрос о том, что происходит в этих случаях. Происходит ли поглощение α -частицы ядром без выбрасывания других частиц или происходит выбрасывание каких-то частиц, отличных от протонов? Вопрос этот был решен в 1932 г.

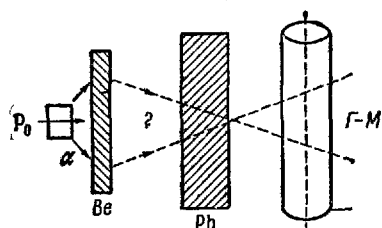


Рис. 3.15.

Одним из элементов, обстрел которых α -частицами не приводил к появлению протонов, был бериллий. Боте и Беккер, ставя соответствующие опыты с этим элементом, обратили особое внимание на чистоту используемого излучения. Источником α -частиц служил чистый полоний Po_{84}^{210} , имеющий то существенное преимущество, что он испускает α -лучи, превращаясь в устойчивый элемент—свинец; следовательно, кроме α -частиц, препарат полония никакого уже излучения не дает. Правда, энергия его α -частиц меньше, чем у RaC' , составляя 5,25 Мэв, но для проникновения в ядра выбранного для опытов легкого бериллия ($Z=4$) этого вполне достаточно.

При обстреле бериллия α -частицами было обнаружено возникновение сильно проникающего излучения. Схема опыта приведена на рис. 3.15. Было найдено, что новое излучение теряет всего 13% интенсивности при прохождении 2 см свинца. Очевидно, что это не поток заряженных частиц. Вначале предположили, что это жесткие γ -кванты; судя по поглощению, им следовало приписать энергию в 7 Мэв. Дальнейшие исследования французских ученых Ф. Жолио-Кюри и его жены Ирэн Кюри (дочери Склодовской-Кюри) показали, что новое излучение весьма интенсивно выбивает протоны из водородсодержащих веществ, например парафина.

При обстреле бериллия α -частицами было обнаружено возникновение сильно проникающего излучения. Схема опыта приведена на рис. 3.15. Было найдено, что новое излучение теряет всего 13% интенсивности при прохождении 2 см свинца. Очевидно, что это не поток заряженных частиц. Вначале предположили, что это жесткие γ -кванты; судя по поглощению, им следовало приписать энергию в 7 Мэв. Дальнейшие исследования французских ученых Ф. Жолио-Кюри и его жены Ирэн Кюри (дочери Склодовской-Кюри) показали, что новое излучение весьма интенсивно выбивает протоны из водородсодержащих веществ, например парафина.