

Хоть простота приятней людям,  
Но сложное доступней им.

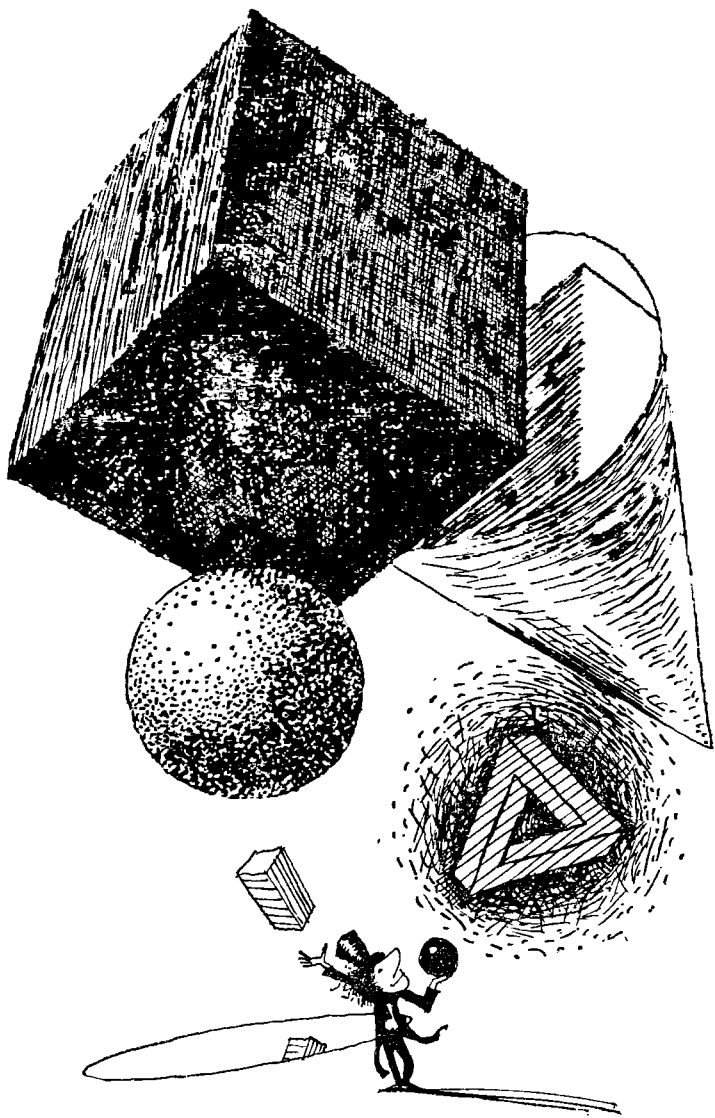
*Б. Пастернак*

### Симметрия нейтрона и протона

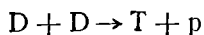
Современная теория рассматривает протон и нейтрон как сложные объекты, состоящие из «более элементарных» составляющих — *кварков*. Именно свойства кварков и их взаимодействий определяют в конечном счете наблюдаемые свойства протона и нейтрона и их превращений. Только переход к кварковому уровню строения материи позволил выявить единство в описании всех фундаментальных сил природы. Но о кварках будет сказано позже, а исторически первым шагом на пути к такому единству стала попытка единого описания свойств протона и нейтрона.

Нейтрон и протон — различные частицы. У протона есть электрический заряд, у нейтрона его нет. Но во всем остальном эти частицы схожи. Эти частицы имеют спин  $1/2$ . У них близкие массы. И та и другая частица входит в состав ядра. Наблюдаются пары так называемых «зеркальных ядер». Это два разных ядра с одним и тем же полным числом нейтронов и протонов, но число нейтронов одного ядра равно числу протонов второго. (Примеры этих пар ядер:  ${}^3\text{H} - {}^3\text{He}$ ,  ${}^{14}\text{C} - {}^{14}\text{O}$ .) У таких разных ядер оказывается очень много общих свойств. Это указывает на сходство сил, действующих на нейтроны и протоны в ядре, и наводит на мысль, что эти частицы в ядре во многом взаимозаменяемы.

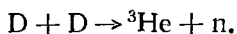
Они и в самом деле взаимозаменяемы, что наблюдается в симметрии ядерных реакций, отличающихся заменой нейтрона и протона. Например, ядро  ${}^3\text{He}$  (состоящее из двух протонов и нейтронов) отличается от ядра  $\text{T} \equiv {}^3\text{H}$  (состоящего из двух нейтронов и протонов) заменой нейтронов и протонов. Эти ядра — зер-



кальные. И в ядерных реакциях их образования наблюдается много сходных черт. Так, очень схожи реакции



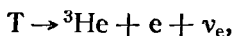
и



Более того, наблюдается и симметрия  $\beta$ -распадов зеркальных ядер. В зависимости от энергии возможны либо  $\beta^+$ -, либо  $\beta^-$ -распады. В первом случае в ядре происходит превращение  $p \rightarrow n$ , во втором  $n \rightarrow p$ . В этих превращениях также наблюдается определенная симметрия. Например, в распадах  ${}^{12}\text{B}$  и  ${}^{12}\text{N}$ :



Однако полной симметрии все же нет. Наблюдают распад



а ядро  ${}^3\text{He}$  стабильно и в ядро трития  $T$  не превращается. Наблюдают распад свободного нейтрона  $n \rightarrow p + e^- + \bar{\nu}_e$ , но не распад свободного протона. Это нарушение симметрии связано с тем, что свободный нейтрон немного тяжелее свободного протона. Поэтому, например, ядро  $T$  (состоящее из двух нейтронов и одного протона) чуть тяжелее ядра  ${}^3\text{He}$ , состоящего из одного нейтрона и двух протонов.

Есть также различие в электрическом заряде нейтрона и протона. Оно вызывает различие в действующих на протон и нейтрон силах. На протон дополнительно действует еще и кулоновская сила, а на нейтрон — нет.

В смысле ядерного взаимодействия протон и нейтрон ведут себя как одна и та же частица. Удобно считать их одной и той же частицей ядра — *нуклоном* (от латинского nucleus — «нуклеус» — ядро), но в разных зарядовых состояниях.

Нуклон в состоянии с электрическим зарядом  $+1$  мы называем протоном, а нуклон в состоянии с электрическим зарядом  $0$  — нейтроном.

Возникает аналогия. У электрона два разных спиновых состояния: состояние с направлением спина вниз и состояние с направлением спина вверх (или вправо и влево, см. выше). Это одна и та же частица — электрон. Но у нее два разных состояния. По этой аналогии мы можем сказать, что есть одна и та

же частица — нуклон — и у нее два разных состояния, подобных двум разным *спиновым состояниям*. Спиновые состояния — это состояния с различным направлением спина в обычном пространстве. У нуклона разные *зарядовые состояния*, будем называть их состояниями с разными направлениями спина в зарядовом пространстве.

То, что мы называли протоном, есть состояние нуклона со спином вверх в зарядовом пространстве. То что мы называли нейтроном — состояние нуклона со спином вниз в этом пространстве.

Для спина в зарядовом пространстве было придумано неудачное название *изотопический спин*. Неудачное потому, что напоминает про изотопы — ядра с одинаковым зарядом и разными массовыми числами (разным числом нуклонов). В действительности протон и нейтрон — простейший пример так называемых *изобар* — ядер с одинаковым массовым числом, но разными зарядами. Чтобы избежать неудачной аналогии с изотопами, изотопический спин называют сокращенно «изоспин». Можно было бы говорить «изобарический спин», но это слово сочетание не привилось.

Гипотеза об изоспине снова приводила к экономии в числе независимых частиц. До открытия нейтрона была только одна элементарная частица ядра — протон. Но оказалось, что есть две равно фундаментальные частицы ядра — протон и нейтрон. Если же ввести изоспин, мы снова остаемся с одной элементарной частицей ядра — нуклоном. Просто у нуклона два разных изоспиновых состояния, состояния «изоспин вверх», которое было обнаружено первым и названо протоном, и состояние «изоспин вниз», которое нашли только в 1932 г. и называли нейтроном.

В отсутствие магнитного поля у электрона имеются два разных спиновых состояния, но мы не знаем, в каком именно состоянии он находится — он может находиться в одном состоянии, а может и в другом. У электрона появляется *спиновая степень свободы*.

Так и у нуклона, не учитывая разности масс протона и нейтрона и не включая электрического поля, нельзя сказать, в каком именно «изоспиновом» состоянии он находится. Нельзя сказать, протон это или нейтрон. У нуклона имеется *изоспиновая степень свободы*.

Изоспиновая симметрия приближенная: массы нейтрона и протона отличаются на 0,13%. Наличие электрического заряда у протона нарушает симметрию энергии в нуклонных системах с несколькими протонами.

Важнейшую роль изоспин (как и спин электрона в строении атома и в химии) играет при применении принципа Паули.

На одной и той же орбите атома могут находиться два электрона с полностью скомпенсированными спинами. Суммарный спин их должен быть строго равен нулю, независимо от того, как они направлены:  $\uparrow\downarrow$  или  $\rightleftharpoons$ , принцип Паули требует, чтобы направления спинов электронов были противоположными.

Аналогично в случае изоспина происходит заполнение ядерных оболочек. Только здесь, помимо спиновой степени свободы в «обычном» пространстве, появляется еще и изоспин, т. е. изоспиновая степень свободы в зарядовом пространстве. На одном и том же энергетическом уровне ядра два нуклона могут находиться только с полным спином или изоспином равными нулю. Поэтому принцип замены нейтрона на протон ограничен принципом Паули.

Полное число различных состояний нуклона равно 4 (2 различных спиновых и 2 различных изоспиновых состояния). Ядерная система, в которой заполнены все эти четыре состояния, максимально упакована и обладает наибольшей энергией связи, приходящейся на нуклон. Такой системой, в которой все нуклоны находятся в основном энергетическом состоянии, является ядро  ${}^4\text{He}$  —  $\alpha$ -частица.

Переверот спина электрона в обычном пространстве есть квантовый переход из состояния со спином вниз в состояние со спином вверх (рис. 9). Переверот изоспина нуклона в зарядовом пространстве — это квантовый переход нуклона на состояния «изоспин вниз» в состояние «изоспин вверх». Нуклоны в состоянии «изоспин вниз» — это нейтроны; в состоянии «изоспин вверх» — протоны. Переверот изоспина нуклона — это превращение нейтрона в протон.

На языке квантовой теории поля переверот спина электрона есть процесс, в котором электрон в состоянии «спин вниз» уничтожается, а электрон в состоянии «спин вверх» рождается. Это превращение может происходить, например, в электромагнитном поле.

При таком переходе может рождаться электромагнитный квант.

Перевороту изоспина нуклона — уничтожению нейтрона и рождению протона тоже можно сопоставить какое-то поле. Поле взаимодействия, вызывающего такое превращение.

Переворот спина электрона отвечает взаимодействию с квантом электромагнитного поля. В этом квантовом переходе электрический заряд частицы, испытывающий квантовое превращение, не меняется: был электрон и остался электрон. Квант электромагнитного поля взаимодействует с зарядом, но сам заряда не несет. Электромагнитный квант — электрически нейтральная частица. Поле, соответствующее электромагнитным квантам, само электронейтрально.

При перевороте изоспина нуклона его заряд меняется: был электрически нейтральный нуклон, остался положительно заряженный протон. И родился квант поля, связанного с таким превращением. Квант, который уносит отрицательный электрический заряд. Поле, связанное с превращением нейтрона в протон, электрически заряженное. Его кванты несут электрический заряд. Это совсем другое поле, в чем-то похожее на электромагнитное, но не электромагнитное. (Аналогия неполная, закон взаимодействия не в точности одинаков, сильно различаются и свойства самих квантов. Однако обо всем этом позже, чтобы не отвлекаться от главного.)

Теперь процессы слабого взаимодействия действительно описываются аналогично электромагнитным процессам. Например, электромагнитный процесс рождения электрон-позитронной пары в квантовом

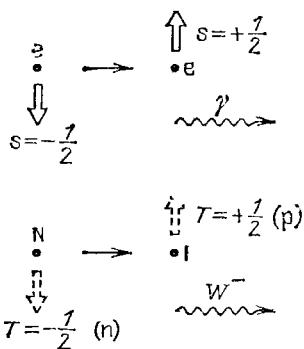


Рис. 9. В электромагнитном переходе, в котором электрон в состоянии «спин вниз» уничтожается, а электрон в состоянии «спин вверх» рождается, рождается электромагнитный квант  $\gamma$ . Аналогично уничтожение нуклона в состоянии «изоспин вниз» (нейтрона) и рождение нуклона в состоянии «изоспин вверх» (протона) сопровождается рождением кванта поля  $W^-$ , называемого  $W^-$ -бозон

переходе между протонами ядра происходит в два этапа. На первом уничтожается протон в начальном состоянии, рождаются протон в конечном состоянии и электромагнитный квант. На втором электромагнитный квант уничтожается, порождая пару электрон — позитрон. Процесс  $\beta$ -распада происходит аналогично в два этапа. На первом уничтожается нейтрон, рождается протон и квант слабого поля  $W^-$ . На втором этапе квант  $W^-$  уничтожается, порождая пару электрон — антинейтрино.

Поле  $W$  отличается от электромагнитного не только зарядом. Квант электромагнитного поля — фотон — безмассовая частица. Квант  $W$ -поля —  $W$ -бозон обладает массой почти в 100 раз большей, чем масса протона. Из-за большой массы  $W$ -бозона слабое взаимодействие происходит на очень малых даже по сравнению с размером ядра расстояниях. Это выделяет очень малую область, в которой происходят  $\beta$ -процессы, отсюда и «слабость» слабого взаимодействия. Электромагнитные волны распространяются на большие расстояния. Из-за большой массы  $W$ -бозонов  $W$ -поле действует на расстояниях, меньших  $10^{-16}$  см. Такое короткодействие  $W$ -взаимодействия приводит к тому, что при малых по сравнению с  $m_W c^2$  энергиях вызываемые им процессы оказываются на 10—20 порядков менее вероятными, чем процессы ядерного (сильного) или электромагнитного взаимодействия, если последние возможны.

Между  $p$  и  $n$  действуют разные силы, разные поля. Мы рассматриваем сейчас те поля, которые связаны с превращением  $p \rightleftharpoons n$  в  $\beta$ -распадах и похожи на электромагнитное поле. В строении ядра, в энергии связи они совсем не главные!

Развитие идеи симметрии между нейтроном и протоном привело к единой теории слабого и электромагнитного взаимодействия. Но главные силы между нуклонами в ядрах связаны с сильным взаимодействием. Какова же природа ядерных сил?

### Теория Юкавы. Мезоны

В 1935 г. японский физик Х. Юкава предложил свою теорию ядерных сил. Он использовал симметрию между нейтроном и протоном и идею о взаимопревращениях протона и нейтрона в ядре.