

УСПЕХИ ФИЗИЧЕСКИХ НАУК

ВОЗБУЖДЕННЫЕ НУКЛОНЫ *)

С. Ф. Поуэлл

В течение последнего года были накоплены данные, свидетельствующие о существовании нового типа ядерного возбуждения, обусловленного, повидимому, присутствием внутри ядра нейтрального гиперона**). Эта частица, обозначаемая символом Λ^0 , вероятно, может соединяться с другими нуклонами ядра, создавая относительно устойчивое образование. Распад подобного ядра в конечном счёте вызывается распадом Λ^0 -частицы.

Существование Λ^0 -частицы (до последнего времени называвшейся тяжёлой нейтральной V-частицей) было установлено при помощи камеры Вильсона при исследовании космических лучей. Было показано, что среди различных нейтральных частиц, способных вызвать «нейтральные V-события», открытые Рочестером и Батлером¹ в 1947 г., чаще всего встречаются гипероны. Большинство упомянутых процессов вызывается частицами двух типов: 1) Λ^0 , распадающимися на протон и отрицательный π -мезон ($\Lambda^0 \rightarrow p + \pi^-$) с выделением энергии в 35—40 Мэв², и 2) θ^0 , тяжёлыми нейтральными мезонами, превращающимися в два лёгких мезона, вероятно, в π -частицы ($\theta^0 \rightarrow \pi^+ + \pi^-$) с выделением энергии 210 Мэв^{3,4}. Соответствующие средние времена жизни равны $t_{\Lambda^0} \sim 3 \cdot 10^{-10}$ сек и $t_{\theta^0} \sim 2 \cdot 10^{-10}$ сек.

В настоящее время установлено, что Λ^0 -частицы могут образоваться в таких ядерных реакциях, при которых кинетическая энергия участвующих частиц меньше энергии, соответствующей массе покоя гиперона^{5,6}. Поэтому предполагают, что последний возникает при столкновении в результате превращения нуклона. Отмеченный факт, а также обнаруженное превращение Λ^0 -частицы в протон при её распаде указывают, что эту частицу целесо-

*) С. F. Powell, Nature, 173, № 4402, 469 (1954).

**) Применяемая терминология была предложена Амальди и др. (Nature 173, 123 (1954); см. УФН 53, 289 (1954)). Гиперон — частица, имеющая массу, промежуточную между массой нейтрона и дейтона.

образно рассматривать как «возбуждённый» нуклон. Как известно, возбуждённый атом возвращается в своё нормальное энергетическое состояние путём испускания кванта излучения — фотона; по аналогии можно допустить, что возбуждённый нуклон дезактивируется путём испускания «тяжёлого кванта» ядерного поля, т. е. π -мезона.

В последнее время удалось весьма точно измерить массу Λ^0 -частицы фотографическим методом. В стопке фотоэмульсий, экспонированных на большой высоте, Фридландер, Киф, Менон и Мерлин⁷ нашли 8 случаев распада Λ^0 -частиц, причём во всех случаях вторичный протон и отрицательный π -мезон останавливались внутри стопки. Таким образом, удалось измерить пробег, а следовательно, и энергию частиц. Эти данные, а также измеренная величина угла между следами обеих испущенных частиц позволили с хорошей точностью определить количество выделенной энергии. Полученная величина $37,2 \pm 0,5$ Мэв хорошо согласуется со значением, получаемым при измерениях в камере Вильсона. Масса Λ^0 -частицы оказывается равной $2182 \pm 2m$. Приведённая величина погрешности в значении для энергии получена из разброса результатов отдельных измерений. Возможно, что при уточнении соотношения между пробегом и энергией протонов окончательное значение придётся несколько исправить.

Первое наблюдение, которое указывало, что гипероны могут существовать не только в виде свободных частиц, но и в связанном состоянии внутри ядра, было сделано Данишем и Пниевским⁸. В фотографической пластинке, экспонированной в космических лучах, эти авторы нашли след тяжёлого ядерного осколка, имевшего заряд $5e$. У конца своего пробега осколок распался с испусканием трёх или четырёх заряженных частиц.

Замечательная особенность этого случая состояла в том, что распад произошёл у конца пробега осколка, и, следовательно, эта родительская частица покоилась или двигалась с очень небольшой скоростью. Второе превращение, таким образом, не могло быть обусловлено столкновением осколка с другим ядром. В связи с этим было высказано предположение о том, что второе превращение обусловлено самопроизвольным распадом осколка. Это допущение встречает, однако, следующую трудность. Известно, что при столкновении ядерной частицы, например протона, с ядром последнему может передаваться большое количество энергии, вследствие чего ядро сильно возбуждается. Дело представляется так, что нуклоны приходят в состояние быстрого движения — происходит «термическое возбуждение» — и в результате часть нуклонов «испаряется», т. е. ядро распадается. Принято считать, что такой процесс происходит за время порядка 10^{-20} сек. В опи-

сываемом же случае время полёта, считая от момента испускания осколка до момента его остановки, составляло более $3 \cdot 10^{-12}$ сек. Таким образом, время существования осколка оказалось в миллион раз больше того времени жизни, которое можно было бы ожидать на основании наших обычных представлений о ядерном возбуждении.

Для разрешения этой трудности Даниш и Пниевский предположили, что наблюдаемое явление обусловлено присутствием возбуждённого нуклона (т. е. гиперона) среди нуклонов осколка. В этом случае наблюдаемый распад приписывается распаду гиперона.

Допускалась и другая возможность, заключающаяся в том, что при первоначальном распаде вместе с осколком вылетает и мезон, вращающийся около осколка на связанной орбите. В таком случае распад осколка можно было бы объяснить захватом мезона и передачей нуклонам энергии, соответствующей массе покоя мезона.

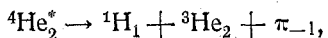
Такие расщепления, вызываемые захватом свободных π -мезонов ядрами, часто наблюдаются в фотопластинках, экспонированных космическими лучами.

Вскоре Тидман и др.⁹ обнаружили второй подобный случай, причём заряд вылетающего ядерного осколка равнялся 2 или 3. Важность этого наблюдения заключается в том, что оно практически устранило возможность (и без того маловероятную), что в первом случае имело место независимое расщепление, случайно происходившее у конца пробега ядерного осколка.

Несколько месяцев спустя Круссар и Мореле¹⁰ и Фрейер¹¹ наблюдали ещё два подобных события, говорящих против предположения о том, что обсуждаемое явление обусловлено π -мезоном, находящимся на замкнутой орбите. В каждом из этих двух случаев было установлено, что у конца своего пробега ядерный осколок (обладавший небольшим зарядом) распался, испустив три заряженные частицы, из которых одна являлась π -мезоном. Это явление невозможно объяснить захватом π -мезона ядром, так как на распад нехватает энергии. Трудность устраняется, если предположить, что захваченный мезон имел большую массу, например был χ -мезоном.

Между тем и в этих двух случаях количество выделенной кинетической энергии было порядка 40 Мэв, что как раз согласуется с первоначальным предположением о присутствии Δ^0 -частицы среди нуклонов испущенного осколка. Два ещё более поздних наблюдения также убедительно говорят в пользу этого последнего объяснения. Простота участвующих ядерных систем позволяет анализировать эти два случая с весьма хорошей точностью.

В событии, наблюденном Хиллом и др.¹², испущенная частица представляла собой, вероятно, ядро с массовым числом 4 и зарядом 2. У конца своего пробега этот осколок распался на π -мезон и две другие заряженные частицы. Если превращение описывается уравнением



то сумма количества движения вторичных заряженных частиц оказывается равной нулю и количество выделенной энергии $\sim 33,8$ Мэв. Детальный анализ с использованием точного значения m_{Δ^0} показывает, что если внутри начального осколка находилась Δ^0 -частица, то энергия связи последней ~ 4 Мэв. Интересно сравнить это значение с энергией, требуемой для удаления нейтрона из α -частицы, равной, как известно, около 20 Мэв.

Событие, недавно описанное Бонетти и др.¹³, может быть подвергнуто ещё более подробному анализу. Удалось определить массу испущенного осколка, заряд которого e ; эта масса оказалась равной $\sim 5500m_e$, т. е. приблизительно массе тритона. У конца своего пробега частица распалась на две заряженные частицы, имеющие противоположные направления движения, т. е. оба следа были коллинеарны. Одной из вторичных частиц оказался π^- -мезон с большим пробегом; при остановке в стопке фотопластинок мезон был захвачен ядром и вызвал распад последнего. Другая частица создала короткий трэк отдачи. Если эта последняя частица является ядром гелия-3, что приходится допускать для сохранения массового числа и заряда, то по пробегу частицы получаем, что её количество движения было равно количеству движения π -мезона.

Таким образом, превращение можно описать уравнением



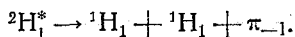
Полное количество выделяемой энергии равно 41,5 Мэв. Соответственно этому энергия связи Δ^0 -частицы с двумя другими нуклонами возбуждённого тритона должна быть порядка 1,5 Мэв.

Последние два из числа рассмотренных случаев, повидимому, окончательно исключают возможность объяснения рассматриваемого явления захватом мезона, движущегося по орбите вокруг ядра. В случае лёгких (π)-мезонов такое объяснение опровергается наблюдаемым испусканием π^- -мезонов из распадающегося осколка. Остаётся возможность участия тяжёлого мезона. Однако в последних двух наблюдениях количество движения всех заряженных частиц оказывается равным нулю и полное количество выделяемой кинетической энергии равно около 40 Мэв. Если же предположить, что наблюдаемые расщепления были вызваны захватом

тяжёлого отрицательного мезона ядром, то остаётся неопределённой судьба энергии порядка 300 Мэв . В этом случае пришлось бы допустить вылет одной или нескольких нейтральных частиц, имеющих высокую энергию и большое количество движения. Но тогда необходимо считать случайными описанный Бонетти и др. баланс количества движения, а также и то значение энергии связи Λ^0 -частиц, которое так легко объясняется при альтернативном предположении. Такое случайное совпадение совершенно неправдоподобно и настолько мало вероятно, что может быть отвергнуто. Таким образом, мы приходим к выводу, что единственно приемлемым объяснением является предположение об участии Λ^0 -частицы.

Учитывая, что в настоящее время многие лаборатории работают над рассматриваемой проблемой, можно быть уверенным в том, что в скором времени будут открыты новые случаи, допускающие детальный анализ. Со временем возможно будет определить и энергию связи Λ^0 -частиц в различных ядрах.

Честон и Примаков¹⁴ указывали, что особенный интерес представлял бы случай (ещё не обнаруженный на опыте) возбуждённого дейтона:



Однако неизвестно, достаточно ли сильна связь между Λ^0 -частицей и протоном для того, чтобы такая система обладала необходимой для наблюдения устойчивостью.

Выше говорилось о том, что целесообразно рассматривать Λ^0 -частицу как возбуждённый нуклон. Однако уже теперь ясна ограниченность такого представления. Напомним, что возбуждённый атом водорода состоит из протона и электрона, находящегося в состоянии с более высокой энергией, чем в нормальном атоме. По аналогии можно было бы предположить, что возбуждённый нуклон состоит из протона и связанного π^- -мезона, т. е. Λ^0 является сложной частицей. Пока имеющиеся сведения относились к распаду свободных Λ^0 -частиц, такая картина была ещё приемлема. Однако относительная устойчивость Λ^0 -частиц, являющихся составными частями ядер, говорит против этой возможности. Дело в том, что при захвате π^- -мезона ядром время взаимодействия мезона с нуклонами мало по сравнению с 10^{-12} сек и энергия распада получается за счёт массы покоя; между тем в событии, обнаруженном Бонетти и др., ядерный осколок просуществовал без распада более $2 \cdot 10^{-10} \text{ сек}$. Если Λ^0 -частица состоит из π^- -мезона, связанного с протоном, то трудно понять причину относительно большой длительности существования ядерного осколка. Следовало бы ожидать, что связанный π^- -мезон вызовет такое же расщепление ядра, как и при его захвате извне.

Приведённые соображения указывают, что Δ^0 -частицу можно рассматривать как возбуждённый нуклон, но в смысле, отличном от того, который следует из наших обычных представлений. Мы вступаем в новую область, для которой должны быть установлены принципиально новые понятия; тем не менее представляется разумным рассматривать переход нуклона в возбуждённое состояние как результат изменения его внутренней структуры. Если это так, то мы начинаем проникать в то, что Максвелл назвал «странными слоями материального мира», т. е. начинаем проникать в мир нуклона. Представляется, что этот мир неисчерпаем.

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. Rochester and Butler, *Nature* **163**, 855 (1947).
2. См. дискуссию в Bagneres Conf. Report (1953).
3. Barker, *Proc. Roy. Soc. A*, **221**, 328 (1954).
4. Thompson, Buskirk, Cohn, Karzmark and Rediker, Bagneres Conf. Report, стр. 30 (1953).
5. Fretter, Gregory, Johnston, Lagarrigue, Meyer, Muller and Peyrou, Bagneres Conf. Report, стр. 26 (1953).
6. Fowler, Shutt, Thorndike and Whitmore, *Phys. Rev.* (в печати).
7. Friedlander, Keefe, Menon and Merlin, *Phil. Mag.* (в печати).
8. Danysz and Pniewski, *Phil. Mag.* **44**, 348 (1953).
9. Tidman, Davis, Herz and Tennant, *Phil. Mag.* **44**, 350 (1953).
10. Crussard and Morellet, *C. R. Acad. Sci. Paris*, **236**, 64 (1953).
11. Freier, сообщено Ney, Bagneres Conf., мимеографический отчет, стр. 253 (1953).
12. Hill, Salant, Widgoff, Osborne, Pevener, Ritson, Crussard and Walker, *Bull. Amer. Phys. Soc.* **29**, 60 (1954).
13. Bonetti, Levi, Setti, Panetti, Scarsi and Tomasini, *Nuovo Cimento* **11**, 210 (1954) и частное сообщение.
14. Cheston and Primakoff, *Phys. Rev.* **92**, 1537 (1953).