

УСПЕХИ ФИЗИЧЕСКИХ НАУК

ВОЗБУЖДЕННЫЕ НУКЛОНЫ*)

С. Ф. Поуэлл

В течение последнего года были накоплены данные, свидетельствующие о существовании нового типа ядерного возбуждения, обусловленного, по видимому, 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 счете вызывается распадом Λ^0 -частицы.

Существование Λ^0 -частицы (до последнего времени называвшейся тяжелой 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 $Mэв^2$, и 2) θ^0 , тяжелыми нейтральными мезонами, превращающимися в два легких мезона, вероятно, в π -частицы ($\theta^0 \rightarrow \pi^+ + \pi^-$) с выделением энергии 210 $Mэв$ ^{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 образовываться 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 $2182 \pm 2m_e$. 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.

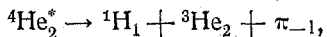
Такие расщепления, вызываемые захватом свободных π -мезонов ядрами, часто наблюдаются в фотопластинках, экспонированных космическими лучами.

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 κ -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



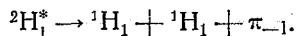
Полное количество выделяемой энергии равно 41,5 Мэв. Соответственно этому энергия связи Δ^0 -частицы с двумя другими нуклонами возбуждённого тритона должна быть порядка 1,5 Мэв.

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 Λ^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* **161**, 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.*, mimeографический отчёт, 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).