

УСПЕХИ ФИЗИЧЕСКИХ НАУК

АНТИНЕЙТРОНЫ, ПОЛУЧЕННЫЕ ПУТЕМ ПЕРЕЗАРЯДКИ АНТИПРОТОНОВ*)

Б. Корк, Г. Ламбертсон, О. Пиччиони, В. Вензел

Принцип инвариантности относительно зарядового сопряжения получил убедительное подтверждение открытием антипротонов, образуемых в беватроне¹⁻³. Другим ожидавшим экспериментальной проверки предсказанием этой теории было утверждение о существовании антинейтрона. Дополнительный интерес к этой частице связан с тем фактом, что зарядовое сопряжение, будучи примененным к нейтральной частице, является несколько менее наглядным, чем в случае, когда оно применяется к частицам, обладающим электрическим зарядом.

Целью данного эксперимента было обнаружение аннигиляции антинейтронов, образованных из антипротонов путем их перезарядки. Поскольку ожидался малый выход антинейтронов, требовался относительно большой поток антипротонов. Протоны с энергией 6,2 Бэв бомбардировали внутреннюю бериллиевую мишень беватрона (рис. 1). С помощью системы из двух отклоняющих магнитов и пяти магнитных линз был получен пучок отрицательных частиц с импульсом 1,4 Бэв/с. Установка из шести сцинтилляционных счетчиков, включенных в схему совпадений, позволяла различать антипротоны от отрицательных мезонов по времени пролета.

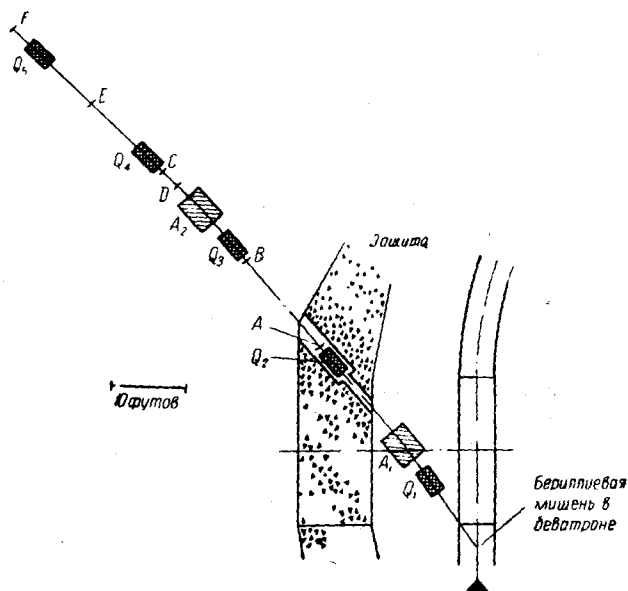


Рис. 1. Селектор антипротонов: Q_1-Q_5 — фокусирующие линзы; A_1-A_2 — магнитные анализаторы; A, B, C, D, E, F — сцинтилляторы размерами $4 \times 4 \times 1/4$ дюйма.

*) B. Cork, G. R. Lambertson, O. Piccioni, W. A. Wenzel, Phys. Rev. 104, 1193 (1956). Перевод Ю. В. Орлова.

Приводимая статья американских физиков Корка, Ламбертсона, Пиччиони и Вензеля представляет собой первую серьезную публикацию об открытии антинейтрона. Существование антинейтрона так же, как и существование антипротона, предсказывалось современной теорией элементарных частиц. Согласно теории, античастицы могут существовать не только у частиц, обладающих электрическим зарядом, но также и у нейтральных частиц. В этом случае, вообще говоря, различие

На рис. 1 и 2 F — последний счетчик этой системы, который регистрировал от 300 до 600 антипротонов в час.

В результате взаимодействия антипротонов с веществом в толстом конвертере X (рис. 2) иногда образуются антинейтроны, которые проходят через сцинтилляторы S_1 и S_2 без регистрации и, наконец, взаимодействуя с веществом в черенковском счетчике C из свинцового стекла, вызывают в нем световой импульс, большая величина которого указывает на то, что он обусловлен аннигиляцией нуклона и антинуклона.

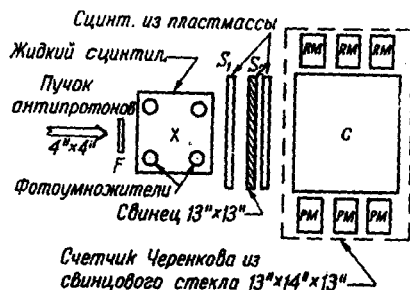


Рис. 2. Регистратор антинейтронов: X — сцинтиллятор, в котором происходит перезарядка антипротонов; S_1 и S_2 — сцинтилляционные счетчики; C — черенковский счетчик из свинцового стекла (в другой серии опытов заменен большим сцинтиллятором).

1 дюйм для поглощения γ -лучей высокой энергии, которые можно было бы спутать с антинейтронами. Нейтроны и нейтральные мезоны (более тяжелые, чем π -мезоны) могли регистрироваться черенковским счетчиком, но величина среднего светового импульса от них намного меньше величины импульса, обусловленного аннигиляцией антинейтрона. Однако даже относительно малый фон от этих побочных нейтральных продуктов исказил бы спектр импульсов от антинейтронов. Для отделения

частиц и античастиц проявляется во взаимодействиях неэлектромагнитной природы. Нейтрон и антинейтрон должны различаться, однако, также и по знаку взаимодействия с электромагнитным полем, поскольку нейтрон обладает магнитным моментом, а знаки магнитных моментов частицы и античастицы противоположны (магнитный момент нейтрона отрицателен, т. е. направлен против спина, тогда как магнитный момент антинейтрона положителен — направлен в ту же сторону, что и спин). Взаимодействие антинуклона с антинуклоном с большой степенью точности (с точностью до так называемых слабых взаимодействий) должно быть таким же, как и взаимодействие нуклонов друг с другом. Однако взаимодействие нуклон — антинуклон может отличаться, и притом существенно, от взаимодействия нуклонов друг с другом. Это происходит за счет того, что нуклон и антинуклон при встрече могут аннигилировать, т. е. превращаться в другие частицы — π -мезоны, или, со значительно меньшей вероятностью, в кванты электромагнитного поля. Процесс аннигиляции, благодаря которому и были открыты антинуклоны, может происходить не только реально, но и виртуально: нуклон и антинуклон исчезают лишь на очень короткое время, а потом опять «возрождаются». При этом в процессе виртуальной аннигиляции они могут «обменяться» импульсами местоположением в пространстве, а также ориентацией спинов. Таким образом, возможность аннигиляции приводит к появлению дополнительного обменного взаимодействия, свойственного системе нуклон — антинуклон и не имеющего места при взаимодействии нуклонов друг с другом. Экспериментальное обнаружение антинуклонов дает возможность в дальнейшем количественно изучить процесс их аннигиляции и обусловленное им специфическое дополнительное взаимодействие — в этом состоит главный интерес экспериментов с антинуклонами.

Содержание экспериментов, приведших к открытию антинейтрона, ясно из помещаемой статьи и не требует комментариев. Поясним только, что под термином «перезарядка антипротона» в дальнейшем подразумеваются процессы типа $p + p \rightarrow \bar{n} + n$, $p + n \rightarrow n + n + \pi^-$, где через p и $\bar{n}$ обозначены антипротон и антинейтрон. Отметим, что несмотря на, казалось бы, малую статистическую точность экспериментальных данных Корка, Ламбертсона, Пиччиони и Вензеля, факт обнаружения антинейтронов благодаря убедительным контрольным опытам представляется несомненным.

этих побочных нейтральных частиц конвертер X был сделан из сцинтилирующего толуол-терфенилового раствора, просматриваемого четырьмя фотоумножителями, соединенными в параллель. Таким образом, импульсы, порождаемые нейтральными частицами в черенковском счетчике («нейтральные события»), могли быть разделены соответственно тому, возникли ли они при аннигиляции антипротонов, чему соответствует большой импульс в X , или в менее бурном процессе образования антинейтрона в результате перезарядки антипротона. Количественный критерий для такого разделения получается из сравнения спектров импульсов в X , показанных на рис. 3. Пунктирная кривая, полученная в специально выполненном эксперименте, есть спектр импульсов, образованный антипротонами, прошедшими через X , но не испытывавшими в нем ядерного

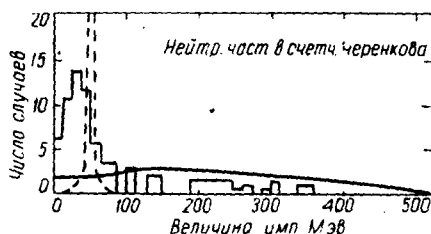


Рис. 3. Спектр импульсов в сцинтиляторе X , служащем для перезарядки, для 74 «нейтральных событий», зарегистрированных счетчиком со свинцовым стеклом. Гистограмма охватывает все зарегистрированные случаи. Сплошная гладкая кривая служит для определения величин импульсов от антипротона, не вызвавших срабатывания счетчиков S_1 или S_2 . Сплошная пунктирная кривая относится к антипротонам, не испытывавшим ядерных взаимодействий в X . Обе кривые нормированы к гистограмме (по площади).

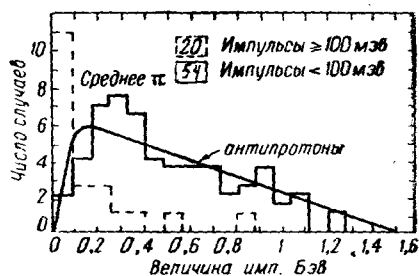


Рис. 4. Спектр импульсов, вызванных нейтральными частицами в свинцовом стекле черенковского счетчика. Сплошная гистограмма охватывает 54 случая аннигиляции антинейтрона (величина импульса в сцинтиляторе X меньше 100 Мэв). Пунктирная гистограмма охватывает 20 импульсов, вызванных другими нейтральными частицами. Сплошная кривая относится к антипротонам и нормирована к сплошной гистограмме.

взаимодействия. Острый пик в спектре и обеспечивает возможность калибровки (легко подсчитать, что ионизационные потери в X для антипротонов должны составлять 50 Мэв). Гладкая сплошная кривая на рис. 3, полученная в геометрических условиях, изображенных на рис. 2, охватывает случаи всех взаимодействий антипротонов в X , при которых не наблюдается импульса в S_1 и S_2 и появляется или не появляется импульс в C . Гистограмма на рис. 3 дает распределение высот импульсов для тех событий, когда нейтральная частица образует импульс в C . Разница между сплошной кривой и гистограммой замечательна тем, что она показывает, что редкие взаимодействия, порождающие нейтральные частицы, детектируемые черенковским счетчиком, освобождают в X значительно меньшую энергию, чем другие неотобранные таким образом взаимодействия. Фактически пик гистограммы расположен при импульсах, меньших, чем импульсы, соответствующие ионизационным потерям протонов, не испытывавших ядерного взаимодействия (50 Мэв). Именно этого и следует ожидать, если нейтральные частицы являются антинейтронами, так как в этом случае аннигиляция нуклонов не могла бы иметь места в X . Наоборот, образование других энергичных нейтральных частиц давало бы характерный большой импульс аннигиляции в X . Гистограмма указывает, таким образом, что аппаратура регистрирует малый фон событий этого

последнего типа. Высота импульсов в 100 Мэв на рис. 3 была избрана в качестве границы, отделяющей этот фон от импульсов, вызванных антинейтронами. На рис. 4 изображено распределение высот импульсов для событий, вызывающих в X импульсы, меньшие чем 100 Мэв (сплошная гистограмма) и большие 100 Мэв (пунктирная гистограмма). Огромная разница между гистограммами как в отношении средней высоты импульса, так и формы, подтверждает нашу интерпретацию, по которой ней-

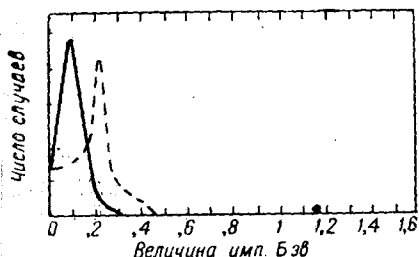


Рис. 5. Спектр импульсов в черенковском счетчике для π -мезонов (пунктирная кривая) и для протонов (сплошная кривая). Кривые нормированы.

тральные события разделяются на антинейтронные и фоновые. Калибровка оси абсцисс на рис. 4 в шкале энергий получается путем сравнения высот импульсов, образуемых проходящими сквозь стекло π -мезонами, с вычисленными ионизационными потерями энергии в 240 Мэв. Такая градуировка повторялась каждый день. Стандартом для аннигиляционных импульсов является гладкая кривая на рис. 4, представляющая собой распределение высот импульсов для аннигиляции антипротонов, проникающих в свинцовое стекло, когда S_1 , S_2 и свинцовая пластинка убраны. Сравнение сплошной гистограммы с этой антипротонной кривой подтверждает предположение о том, что сплошная гистограмма порождена аннигиляцией антинейтронов. Для сравнения с аннигиляционными спектрами рис. 4, на рис. 5 изображены спектры, полученные при падении на стеклянный счетчик C протонов (сплошная кривая) с энергией 750 Мэв и отрицательных π -мезонов с энергией 600 Мэв. Эти спектры указывают, что большие импульсы редко возникают от частиц таких энергий. Отсюда следует, что даже нейтроны с высокой энергией не могли бы образовывать спектра, подобного сплошной гистограмме на рис. 4.

Чтобы определить число γ -квантов, падающих на S_1 , был убран свинец между S_1 и S_2 . Число нейтральных событий, приходящихся в этом случае на падающий антипротон, возросло в 7 раз. При известной вероятности того, что отдельный γ -квант высокой энергии пройдет через один дюйм свинца без поглощения (3% для γ -луча с энергией в 300 Мэв), наблюдаемое увеличение показывает, что до отбора по высоте импульса в X по крайней мере 20% наблюдавшихся нейтральных событий обусловлено фоном γ -лучей. Счетчик C из свинцового стекла очень чувствителен к γ -лучам и не чувствителен к ионизационным потерям медленных частиц. Желательность сравнения спектров антинейтронов и антипротонов, полученных с детекторами совершенно различных типов, привела нас к повторению эксперимента с заменой счетчика C жидким сцинтиллятором. Этот сцинтиллятор 28 дюймов толщины и 5 куб. футов в объеме был достаточно велик, чтобы

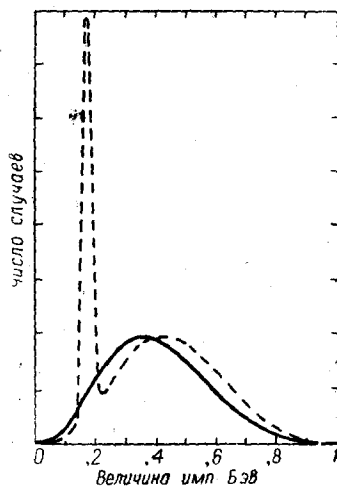


Рис. 6. Спектр импульсов от антипротонов в большом сцинтилляторе. Пунктирная кривая относится ко всем антипротонам. Сплошная кривая относится только к антипротонам, испытывавшим ядерные взаимодействия, и содержит поправку, позволяющую использовать эту кривую для сравнения со спектром импульсов от антинейтронов.

регистрировать существенную часть энергии, выделяющейся при аннигиляции. Для этого эксперимента толщина свинцового поглотителя между S_1 и S_2 была увеличена до 1,5 дюйма. Как и прежде, антинейтронный детектор калибровался по аннигиляции антипротонов. Распределение высот импульсов от аннигиляции антипротонов в большом сцинтилляторе дается на рис. 6. Антипротоны, не испытавшие ядерного взаимодействия, образуют острый пик.

Сплошная кривая на рис. 7 тождественна со сплошной кривой рис. 6, содержащей поправку на ионизационные потери энергии антипротонами до попадания их в сцинтиллятор (распределение сдвинуто на 70 Мэв по направлению к малым энергиям). После отбора (с прежним критерием по величине импульса в X) было получено (рис. 7) 60 событий. Полученные таким образом спектры от нейтральных частиц и спектр от антипротонов находятся в согласии, хотя и не столь точном, как в случае детектора со свинцовым стеклом. 60 отобранных событий несомненно содержат некоторый посторонний фон. Это подтверждается формой спектра в X для всех нейтральных событий (рис. 8). В этом случае имеется намного больше вторичных нейтральных частиц, появляющихся при неупругих столкновениях антипротонов с нуклонами, чем в эксперименте со свинцовым стеклом, и отделение импульсов фона от импульсов, вызванных антинейтронами, оказывается худшим. Бóльшее число наблюдаемых нейтральных вторичных частиц, вероятно, определяется бóльшей чувствительностью сцинтиллятора к нейтронам.

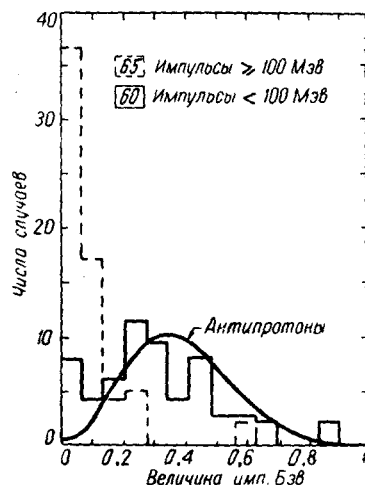


Рис. 7. Спектр импульсов, вызванных в большом сцинтилляторе нейтральными частицами. Сплошная гистограмма относится к 60 антинейтронам (величина импульса в сцинтилляторе X меньше 100 Мэв). Пунктирная гистограмма охватывает 65 импульсов, вызванных другими нейтральными частицами. Сплошная гладкая кривая перенесена с рис. 6.

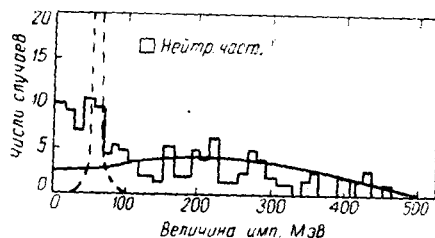


Рис. 8. Спектр импульсов в сцинтилляторе X для 125 импульсов в большом сцинтилляторе, вызванных нейтральными частицами. Гладкие сплошная и пунктирная кривые те же, что и на рис. 3. Обе кривые нормированы к гистограмме.

Свинцовое стекло и сцинтиллятор обладают почти одинаковой эффективностью регистрации антинейтронов. Наблюдаемый выход от ~ 20 г/см² толуола составляет $0,0030 \pm 0,0005$ антинейтронов на антипротон в случае свинцового стекла и $0,0028 \pm 0,0005$ в случае жидкого сцинтиллятора.

Потери в эффективности детектора вследствие ослабления потока в S_1 , S_2 и свинцовом поглотителе, а также вследствие прохождения частиц через детектор без взаимодействия могут быть вычислены в предположении, что сечение взаимодействия для антинейтронов такое же, как для антипротонов, и оказываются равными примерно 50%. Из наблюдаемого антинейтронного выхода следует, что свободный пробег антинуклонов по отношению к перезарядке составляет около 2300 г/см^2 толуола (C_7H_8), или, другими словами, сечение перезарядки составляет приблизительно 2% от аннигиляционного сечения для этого материала. Это соответствует сечению в углероде, равному приблизительно 8 мбарн.

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. Chamberlain, Segré, Wiegand and Ypsilantis, Phys. Rev. **100**, 947 (1955).
 2. Brabant, Cork, Horwitz, Moyer, Murray, Wallace and Wenzel, Phys. Rev. **101**, 498 (1956).
 3. Chamberlain, Chupp, Ekspong, Goldhaber, Lofgren, Segré, Wiegand, Amaldi, Baroni, Castagnoli, Franzinetti and Manfredini, Phys. Rev. **102**, 921 (1956).
-