

## НАБЛЮДЕНИЕ АНТИПРОТОНОВ

О. Чемберлен, Э. Сегрэ, К. Виганд, Т. Инсилантис \*)

Одной из поразительных особенностей дираковской теории электрона является то, что уравнения теории имеют решения, требующие существования античастицы, позднее отождествленной с позитроном.

Расширение теории Дирака на протон требует существования антипротона, частицы, находящейся в таком же отношении к протону, как позитрон к электрону. Однако до получения экспериментальных доказательств существования антипротога можно было сомневаться в том, является ли протон дираковской частицей в том же смысле, что и электрон. Например, аномальный магнитный момент протона указывает на то, что простое уравнение Дирака не даёт полного описания протона.

Экспериментальное обнаружение существования антипротона было поэтому одной из задач, запланированных для бэватрона. Минимальная (лабораторная) кинетическая энергия для образования антипротона в нуклон-нуклонном столкновении равна 5,6 Бэв. Если нуклон мишени находится в ядре и имеет некоторый импульс, то порог понижается. Предполагая, что фермиевская энергия равна 25 Мэв, можно показать, что порог образования протонно-антипротонной пары приблизительно равен 4,3 Мэв. Другой (двухступенный) процесс, который был рассмотрен Фельдманом<sup>1</sup>, имеет даже меньший порог.

При исследовании космического излучения были зарегистрированы<sup>2-4</sup> несколько случаев, которые могли быть вызваны антипротонами, но в настоящее время эти опыты не позволяют сделать однозначные выводы. Обладая такими исходными данными, мы осуществили эксперимент, целью которого было получение и обнаружение антипротона. Этот опыт основан на определении масс отрицательно заряженных частиц, возникающих в мишени бэватрона. Он заключался в одновременном измерении импульса и скорости

\*) Лаборатория излучений физического факультета Калифорнийского университета, Беркли, Калифорния, Phys. Rev. 100, № 3. 947 (1955).

частиц. Так как антипротоны должны быть отобраны на большом фоне  $\pi$ -мезонов, было желательно измерять скорость более чем одним методом. К настоящему времени наблюдается шестьдесят антипротонов.

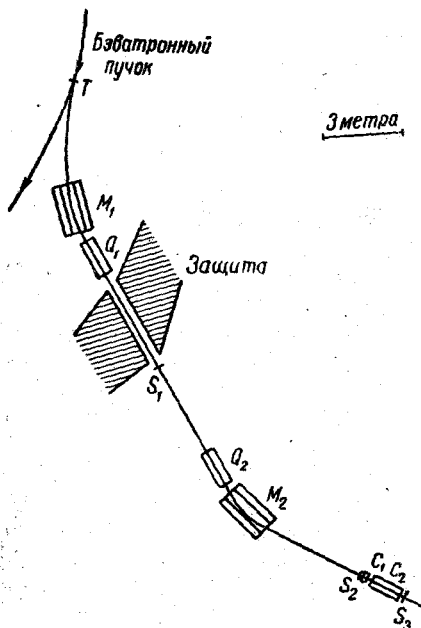


Рис. 1. Схема опыта.

Характеристики отдельных узлов установки.  $S_1$ ,  $S_2$  — пластические сцинтилляционные счётчики диаметром 5,6 см и толщиной 1,5 см.

$C_1$  — черенковский счётчик из фторохимиката 0 — 75 ( $C_8F_{16}O$ ).  $\mu_d = 1,276$ ,  $\rho = 1,76$  г/см<sup>3</sup>. Диаметр 7,5 см, толщина 5 см.

$C_2$  — черенковский счётчик из плавящего кварца.  $\mu_d = 1,458$ ,  $\rho = 2,2$  г/см<sup>3</sup>, диаметр 5,9 см, длина 6,25 см.

$Q_1$ ,  $Q_2$  — квадрупольные фокусирующие магниты, фокусное расстояние 300 см, апертура 10 см.

$M_1$ ,  $M_2$  — отклоняющие магниты длиной 150 см. Апертура  $30 \times 10$  см<sup>2</sup>,  $B \approx 13700$  гаусс.

На рис. 1 показана схема опыта. Протонный пучок бэватрона падал на медную мишень, и отрицательные частицы с импульсом 1,19 Бэв/с двигались по орбите, показанной на рисунке. Эти частицы отклонялись на  $21^\circ$  полем бэватрона и дополнительно на  $32^\circ$  магнитом  $M_1$ . С помощью квадрупольного фокусирующего магнита  $Q_1$  (состоящего из трёх последовательно расположенных квадрупольных магнитов) эти частицы собирались в фокусе, на счётчике  $S_1$ , который был первым сцинтилляционным счётчиком. Пройдя счётчик  $S_1$ , частицы опять фокусировались (с помощью  $Q_2$ ) и дополнительно отклонялись ( $M_2$ ) на угол в  $34^\circ$ , после чего они опять собирались в фокусе, расположенном на счётчике  $S_2$ . Частицы, сфокусированные на счётчике  $S_2$ , имели в пределах 2%-ной погрешности одинаковый импульс.

Счётчики  $S_1$ ,  $S_2$  и  $S_3$  были обычными сцинтилляционными счётчиками. Счётчики  $C_1$  и  $C_2$  — черенковскими счётчиками. Частицы с массой протона и импульсом 1,19 Бэв/с, приходящие в счётчик  $S_2$ ,

имеют скорость  $v/c = \beta = 0,78$ . Ионизационные потери энергии при прохождении счётчиков  $S_2$ ,  $C_1$  и  $C_2$  уменьшают среднюю скорость таких частиц до  $\beta = 0,765$ . Счётчик  $C_1$  регистрирует все заряженные частицы, для которых  $\beta > 0,79$ .  $C_2$  представляет собой черенковский счётчик специального устройства, который регистрирует

только частицы, скорости которых лежат в узком интервале  $0,75 \leq \beta \leq 0,78$ . Эти счётчики будут описаны в специальной работе. В принципе они аналогичны некоторым из счётчиков, описанных Маршаллом<sup>5</sup>. Регистрация частицы таким счётчиком и представляет собой один способ определения её скорости.

Скорость частиц определялась также ещё одним методом, а именно по времени пролёта расстояния между счётчиками  $S_1$  и  $S_2$ , равного 120 м. Измерения времени пролёта дают возможность весьма эффективно отделить  $\pi$ -мезоны от частиц с массой протона. Мезоны с импульсом 1,19 Бэв/с имеют  $\beta = 0,99$ , тогда как для частиц с тем же импульсом и массой протона  $\beta = 0,78$ . Соответствующие времена пролёта для базы в 120 м равны 40 и 51 ммксек.

Пучок, проходящий через систему, состоит почти исключительно из  $\pi$ -мезонов. Одной из главных трудностей опыта был отбор небольшого числа антипротонов на подавляющем фоне  $\pi$ -мезонов. Это было достигнуто отбором совпадений между счётчиками  $S_1$ ,  $S_2$ ,  $C_2$  и  $S_3$ . Совпадения отсчётов в  $S_1$  и  $S_2$  указывали на то, что частицы с импульсом 1,19 Бэв/с проходили систему за время пролёта, приблизительно равное 51 ммксек. Следующее требование совпадения с  $C_2$  означало, что частицы имеют скорость в интервале  $0,75 < \beta < 0,78$ . Далее, условие совпадения с  $C_2$ , соответствует измерению скорости частицы, совершенно независимо от грубого её определения по времени пролёта, выполняемого с помощью электроники. Наконец, совпадение со счётчиком  $S_3$  необходимо, чтобы быть уверенным в том, что частица прошла по оси кварцевого радиатора в  $C_2$  и не испытала рассеяния на большой угол.

Из предыдущего ясно, что при измерении скорости частиц нашей установкой возможны некоторые ошибки. Прежде всего, некоторые мезоны могут регистрироваться благодаря случайным совпадениям  $S_1$  и  $S_2$ , даже если отдельный мезон полностью исключается из-за того, что его время пролёта слишком мало. Во-вторых, черенковский счётчик  $C_2$  может быть возбуждён мезоном (для которого  $\beta = 0,99$ ), если он испытал ядерное рассеяние в радиаторе счётчика. Около 3% мезонов, которые в идеальном случае не должны регистрироваться в  $C_2$ , регистрируются таким образом. Обе эти погрешности исключаются наличием охранного счётчика  $C_1$ , который регистрирует частицы с  $\beta > 0,79$ . Импульс от  $C_1$  указывает на то, что частица (мезон) движется слишком быстро, чтобы быть антипротоном с отбираемым импульсом, и, следовательно, такой случай должен быть отброшен.

Импульсы от счётчиков  $S_1$ ,  $S_2$  и  $C_1$  разворачиваются осциллографически и фотографируются. Время пролёта частицы может быть измерено по расстоянию между импульсами от счётчиков  $S_1$  и  $S_2$  с точностью до 1 мсек. Осциллограмма позволяет также измерить величину импульса в охранном счётчике  $C_1$ . На рис. 2 показаны три осциллографических снимка с импульсами от  $S_1$ ,  $S_2$  и  $C_1$ .

На рис. 2,а показаны импульсы, вызванные проходящим через систему мезоном. Этот случай был зарегистрирован при настройке системы (в целях калибровки) на мезонное время пролёта. На рис. 2,б зарегистрированы импульсы от антипротона. Расстояние между импульсами от  $S_1$  и  $S_2$  точно соответствует времени пролёта антипротона, а отсутствие импульса от  $C_1$  указывает на то, что через счётчик  $C_1$  не прошёл мезон. На рис. 2,в зарегистрировано случайное совпадение между двумя мезонами, происшедшее с такой разностью во времени, что оно было отмечено электронной схемой. Наличия импульса от  $C_1$  или многократных импульсов от  $S_1$  и  $S_2$

достаточно, чтобы считать, что этот снимок вызван одним или двумя мезонами.

Полное испытание установки было произведено изменением положения мишени в бэватроне и переменной знака магнитного поля в  $M_1$ ,  $M_2$ ,  $Q_1$  и  $Q_2$ . При этом регистрировались положительно заряженные протоны.

Каждый осциллографический снимок типа, показанного на рис. 2, может быть использо-

Рис. 2. Осциллограммы, на которых, слева направо, видны импульсы от счётчиков  $S_1$ ,  $S_2$  и  $C_1$ : (а) — мезон, (б) — антипротон, (в) — случайное совпадение.

ван для приблизительного определения массы частицы, так как магнитные поля определяют импульс частицы, а расстояние между импульсами  $S_1$  и  $S_2$  определяет время пролёта. Для протонов с отбавившимся нами импульсом при измерениях только этим методом масса определяется с точностью около 10%.

Наблюдаемым временам пролёта антипротонов можно придавать решающее значение благодаря тому, что электронное время пропускания значительно больше, чем наблюдаемый разброс во временах пролёта антипротонов. Электронные устройства регистрируют явления, заключённые в пределах  $\pm 6$  мксек от истинного времени пролёта антипротона, тогда как снимки, полученные при прохождении антипротонов, показывают, что разброс времён пролёта не превышает  $\pm 1$  или 2 мксек. На рис. 3,а показана гистограмма мезонных времён пролёта, на рис. 3,б приведена аналогичная гистограмма для антипротонов. Большое число снимков (около  $2/3$ ), произведённых при регистрации антипротонов, вызвано случайными совпадениями. Гистограмма кажущихся времён пролёта для случайных совпадений показана на рис. 3,в. Следует отметить, что случайные совпадения не обнаруживают группировки времён пролёта около одного значения, характерной для времён пролёта антипротонов или мезонов.

Измерения масс. Дальнейшая проверка установки производилась настройкой на частицы различных масс в области масс

протона. Проверкой реальности существования вновь обнаруженных отрицательных частиц является то, что максимум их интенсивности приходится на массу протона при малом фоне в прилегающих областях масс. Изменяя только значения магнитного поля в  $M_1$ ,  $M_2$ ,  $Q_1$  и  $Q_2$ , можно отбирать частицы различных импульсов. Если при

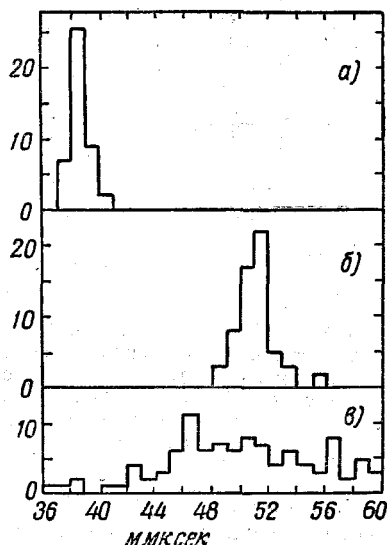


Рис. 3. (а) Гистограмма времён пролёта мезонов, использованных для калибровки. (б) Гистограмма времён пролёта антипротонов. (в) Кажущиеся времена пролёта для группы случайных совпадений. Время пролёта в  $10^{-9}$  сек., ординаты указывают число случаев на временном интервале  $10^{-10}$  сек.

этом отбор по скоростям остается без изменения, то установка тем самым настраивается на частицы различной массы. Такие испытания были выполнены для положительных и отрицательных частиц с массами вблизи массы протона. На рис. 4 показана кривая, полученная для положительных протонов, которая представляет собой кривую разрешения по массам в нашем приборе. На рис. 4 приведены также экспериментальные точки, полученные с антипротонами. Эти наблюдения указывают на существование максимума интенсивности для протонной массы и на отсутствие фона, когда установка настроена на массы, ощутимо большие или меньшие массы протона. Такая проверка является одной из наиболее важных для установления реальности наших наблюдений, так как фон, если он существует, должен проявиться в различных областях масс, регистрируемых прибором. На основании полученного протонного максимума

можно утверждать, что масса новых частиц с точностью до 5% совпадает с массой протона. Главным образом на этом основании новые частицы должны быть отождествлены с антипротонами.

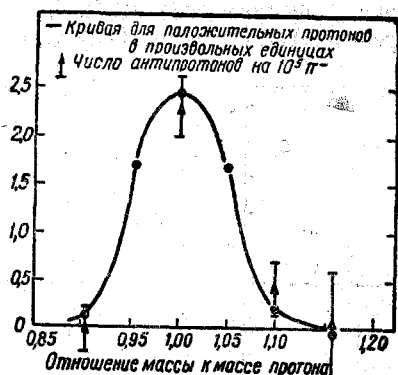


Рис. 4. Сплошная кривая даёт вид протонной линии в установке. Показаны также экспериментальные точки, полученные с антипротонами.

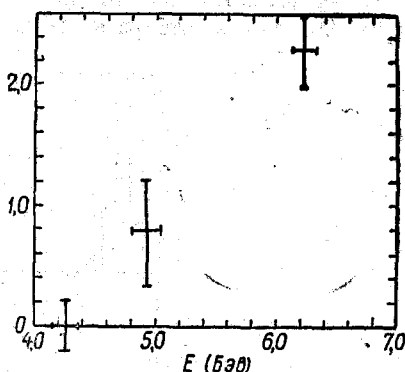


Рис. 5. Кривая возбуждения, дающая отношение сечений образования антипротонов к сечению образования мезонов, в зависимости от энергии пучка бэватрона. По оси ординат — число антипротонов на  $10^5 \pi$ -мезонов.

**Функция возбуждения.** Было произведено весьма грубое определение зависимости сечения образования антипротонов от энергии протонного пучка бэватрона. Более точное изучение этой зависимости является делом будущего, так как до сих пор нет возможности надёжно определять интенсивность пучка, падающего на мишень. Далее, телесный угол регистрирующей системы зависит от энергии бэватрона, так как форма орбиты, на которой испускаются антипротоны, несколько зависит от величины магнитного поля в магните бэватрона. Можно, однако, измерить отношение числа антипротонов к числу мезонов (те и другие с импульсом  $1,19 \text{ Бэв}/c$ ), испущенных в направлении вперёд из мишени, в зависимости от энергии бэватрона. Полученная таким способом приблизительная кривая возбуждения показана на рис. 5 тремя экспериментальными точками. Даже при  $6,2 \text{ Бэв}$  один антипротон приходится на 44 000  $\pi$ -мезонов. Если учесть распад  $\pi$ -мезонов в регистрирующей системе, это число будет соответствовать 62 000  $\pi$ -мезонов, генерированным в мишени. На рис. 5 следует, что при малых энергиях заметного рождения антипротонов нет. Несмотря на то, что образование антипротонов не обнаруживает столь быстрого роста с энергией, которого можно было бы ожидать, полученные данные свидетельствуют о наличии разумного порога образования антипротонов. Следует ещё раз отметить, что на рис. 5 приведено отношение функции возбуждения антипротонов к функции возбуждения мезо-

нов и что истинная функция возбуждения в настоящее время неизвестна. Как только станет известной функция возбуждения для образования мезонов, данные, подобные представленным на рис. 5, дадут возможность получить истинную функцию возбуждения для антипротонов. Следует также отметить, что угол испускания из мишени несколько меняется с изменением энергии бэватрона. При 6,2 Бэв он равен  $3^\circ$ , при 5,1 Бэв —  $6^\circ$  и при 4,2 Бэв он составляет  $8^\circ$  с направлением вперёд из бэватронной мишени.

Возможные источники ошибок. Возможность того, что отрицательные водородные ионы будут приняты за антипротоны, может быть отброшена на основании следующих доводов. Крайне невероятно, чтобы такой ион прошёл через все счётчики, не потеряв своего электрона. Следует добавить, что за исключением нескольких футов вблизи мишени вся траектория частицы в установке проходит через газ при атмосферном давлении либо через воздух, либо (вблизи магнитных линз) через гелий, введённый для уменьшения многократного рассеяния.

Никакие из известных тяжёлых мезонов или гиперонов не обладают массами, которыми можно было бы объяснить полученные результаты. Кроме того, неизвестны подобные частицы с временем жизни, достаточно большим для того, чтобы пройти через установку, не распавшись. Действительно, для частицы с протонной массой время пролёта через установку равно  $10,2 \cdot 10^{-8}$  сек. Однако такая возможность не может быть полностью отброшена. При отождествлении новых частиц с антипротонами следует иметь в виду возможность существования в настоящее время неизвестных отрицательных частиц с массой, очень близкой к 1840 электронным массам.

Наблюдение величины импульсов в счётчиках  $S_1$  и  $S_2$  показывает, что новые частицы однократно заряжены. Многократно заряженные частицы не могут объяснить полученные результаты.

В настоящее время в нашей лаборатории и в Риме, в Италии, с помощью эмульсий, облучённых на бэватроне, производятся поиски явлений, имеющих место в конце пробега антипротона. До сих пор, однако, не получены положительные результаты. Вместе с другими физиками подготавливается опыт для регистрации энергии, выделяющейся при остановке антипротона в большом счётчике Черенкова из свинцового стекла. Планируется также наблюдение аннигиляционных процессов с участием антипротона в камере Вильсона, причём описанную здесь установку предполагается использовать для управления камерой.

#### ОТ ПЕРЕВОДЧИКА

Авторы статьи пишут, что «в настоящее время с помощью эмульсий, облучённых на бэватроне, производятся поиски явлений, имеющих место в конце пробега антипротона». В Science News Letter от 24 декабря 1955 г. приведена фотография первой звезды, возникшей

в результате попадания антипротона, находящегося на излёте, в тяжёлое ядро эмульсии. Эта звезда (рис. 6) была обнаружена римской группой физиков, рассматривавших эмульсии, облучённые в пучке антипротонов бэватрона. След антипротона обозначен *L*. Следы *a* и *b*, повидимому, принадлежат мезонам, остальные, «чёрные» следы — протонам и  $\alpha$ -частицам,

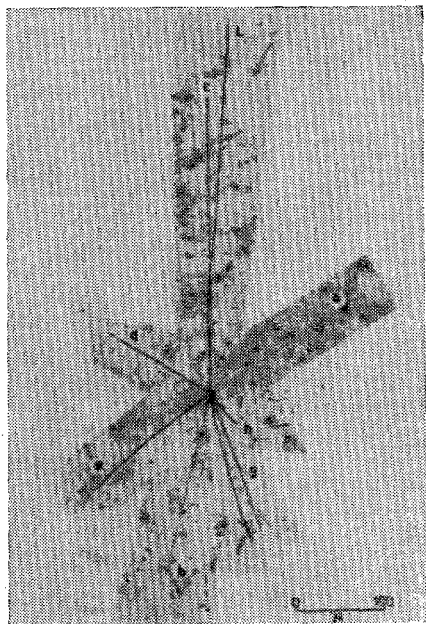


Рис. 6. Фотография звезды, возникшей в результате попадания антипротона, находящегося на излёте, в ядро эмульсии.

вылетевшим из ядра в результате процесса «испарения». По приведённой фотографии трудно оценить энергию, выделившуюся при аннигиляции антипротона, однако наличие среди частиц звезды двух релятивистских мезонов и 7 частиц «испарения» говорит о том, что энергия эта порядка *Бэв*.

#### ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. G. Feldman, Phys. Rev. **95**, 1967 (1954).
2. E. Hayward, Phys. Rev. **72**, 937 (1947).
3. Amaldi, Castagnoli, Cortini, Franzinetti and Manfredini, Nuovo Cimento **1**, 492 (1955).
4. Bridge, Courant, De-Staebler and Rossi, Phys. Rev. **95**, 1101 (1954).
5. J. Marshall, Ann. Rev. Nuc. Sci. **4**, 141 (1954).