

6. Антипротон

Первой обнаруженной античастицей был позитрон. Открытие позитрона, частицы по своим характеристикам идентичной электрону, но с противоположным (положительным) электрическим зарядом, было исключительным событием в физике. Открытие позитрона позволило решить одну из фундаментальных проблем физики: почему существует легкая отрицательно заряженная частица (электрон), а частица с положительным зарядом (протон) имеет массу в 2000 раз больше электрона? Релятивистское уравнение для электрона было предложено П. Дираком в 1928 г. Уравнение Дирака имеет два решения: одно с положительной энергией, другое – с отрицательной. Состояние с отрицательной энергией описывает частицу аналогичную электрону, но имеющую положительный электрический заряд.

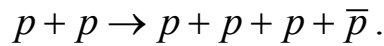
Из концепции существования античастиц следует, что протон, так же как электрон, может иметь античастицу – частицу такой же массы, как и протон, но заряженную отрицательно. Однако такое утверждение не является очевидным. Дело в том, что протон имеет собственный магнитный момент $\mu = 2,79$ ядерного магнетона, в то время как теория Дирака предсказывала для точечной частицы значение магнитного момента $\mu = +1$, т.е. уравнение Дирака не даёт полного описания протона. Протон не является точечной частицей подобно электрону, а имеет размер $\sim 0,8$ фм. Известно, что протон является связанной системой трех цветных кварков.

Эксперименты по поиску антипротонов начались в Беркли (США) на специально построенном для этой цели ускорителе протонов с энергией 6,3 ГэВ, что превышало порог реакции образования нуклон-антинуклонной пары в протон-протонных соударениях. Антипротон должен был иметь массу такую же, как и протон, но, в отличие от протона, должен иметь отрицательный электрический заряд. Поэтому для доказательства существования антипротона необходимо было обнаружить частицу с единичным отрицательным зарядом $-e$ и массой, равной массе протона. Для этого необходимо было измерить электрический заряд и массу антипротона. Измерив импульс p антипротона и его скорость v , массу антипротона можно получить из соотношения

$$p = mc\beta\gamma,$$

где $\beta = v/c$, $\gamma = \frac{1}{\sqrt{1-v^2/c^2}}$, c — скорость света.

Из законов сохранения электрического и барионного зарядов следует, что антипротоны могут образовываться в реакции



Пороговая энергия этой реакции в лабораторной системе равна 5.63 ГэВ.

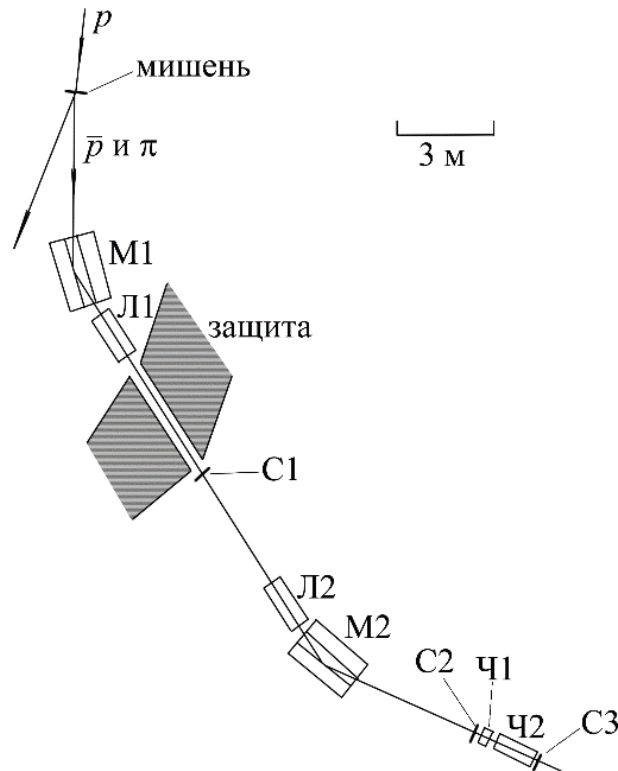


Рис. 6.1. Схема эксперимента по регистрации антипротонов.

Антипротоны образовывались при бомбардировке медной мишени протонами, ускоренными до энергии 6.2 ГэВ. Кинетическая энергия нуклонов в ядре около 25–40 МэВ. Поэтому протон, находящийся в ядре, имеет отличный от нуля импульс, что приводит к уменьшению порога реакции рождения антипротона до 4,3 ГэВ на протоне, находящемся в ядре меди Cu. Чем больше энергия встречного движения протона мишени, тем ниже порог рождения $p\bar{p}$ -пары. Схема эксперимента показана на рис. 6.1. С помощью отклоняющих магнитов М1 и М2 из всех вторичных частиц, образующихся при взаимодействии ускоренного пучка протонов с мишенью, выделялись частицы с единичным отрицательным зарядом и импульсом 1.19 ГэВ/с. Такими частицами, помимо антипротонов, являются отрицательные пионы π^- и в гораздо меньшем количестве отрицательно заряженные каоны K^- . Скорость антипротона с импульсом 1,19 ГэВ/с равна 0,78 с, в то время как скорость π^- -мезона с таким же импульсом равна 0,99 с. Для выделения антипротонов из большого фона отрицательных пионов (1 антипротон на $\approx 10^5$ пионов) использовалось их разное время пролета расстояния ≈ 12 м между быстродействующими сцинтилляционными счетчиками

С1 и С2. Так как масса антипротона больше массы пиона при одинаковом импульсе антипротонов и отрицательно заряженных пионов, скорость антипротона меньше скорости пионов π^- . Антипротон пролетает расстояние между счетчиками С1 и С2 за большее время. Для антипротонов оно составляло $51 \cdot 10^{-9}$ с, а для пионов – $40 \cdot 10^{-9}$ с.

На рис. 6.2 показаны гистограммы времени пролёта π^- -мезоном (рис. 6.2а) антипротоном (рис. 6.2б) расстояния 12 м. На рис. 6.2в показаны случайные совпадения в интервале времен пролёта, где расположены сигналы от антипротонов.

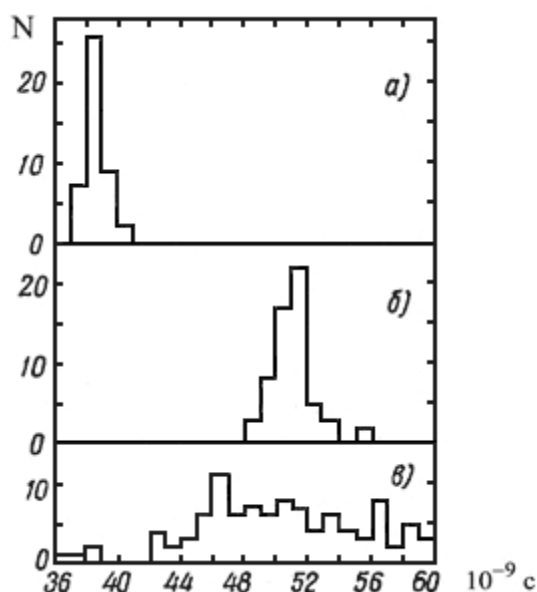


Рис. 6.2. Временная диаграмма пролета расстояния между счетчиками С1 и С2 частиц с единичным отрицательным зарядом. (а) Гистограмма времен пролета π -мезонов. (б) Гистограмма времен пролета антипротонов. (в) Времена пролета для группы частиц, наблюдаемых в результате случайных совпадений.

Для более надежного выделения сигналов от антипротонов дополнительно использовалось два черенковских счетчика Ч1 и Ч2. Черенковские счетчики позволяют измерять скорость пролетающей частицы. Счетчик Ч2 регистрировал частицы со скоростями $0,75 < \frac{v}{c} < 0,78$, соответствующими антипротонам с импульсами $1,19 \text{ ГэВ}/c$. Счетчик Ч1 регистрировал частицы со скоростями пионов ($v/c = 0,99$). События, вызывающие срабатывание счетчика Ч1, отбрасывались. Сцинтилляционный счетчик С3 служил для того, чтобы убедиться в том, что регистрируемая частица не отклонилась от заданной траектории. Счетчики С1, С2, С3 и Ч2 были включены на совпадения, а счетчик Ч1 – на антисовпадения. Такая схема детектирования пролетающих через систему детекторов отрицательно заряженных частиц

выделяла отрицательно заряженные частицы, имеющие массу протона, и тем самым надежно идентифицировала антипротоны.

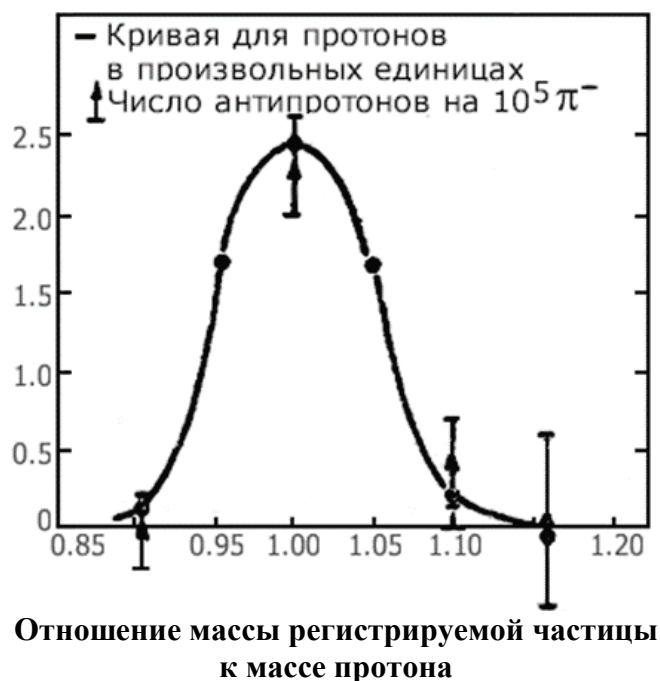


Рис. 6.3. Сплошная кривая даёт вид протонной линии в установке. Показаны также экспериментальные точки, полученные при регистрации антипротонов.

Дополнительным критерием того, что установка регистрировала антипротоны, было измерение масс различных частиц в области масс протона. Изменяя значения магнитного поля в магнитах М1 и М2 исследователь настраивал установку на измерение частиц различной массы. На рис. 6.3 показан спектр масс отрицательно заряженных частиц в области масс, соответствующих массе протона. В спектре масс частиц наблюдается максимум, соответствующий массе протона, и практически отсутствует фон вне протонного максимума. На основе измеренного максимума, соответствующего регистрации протонов, был сделан вывод, что массы обнаруженных частиц с точностью до 5% совпадают с массой протона. Ещё одним критерием, подтверждающим наблюдение антипротонов, было измерение выхода отрицательно заряженных частиц с массой, равной массе протона, в зависимости от энергии падающего на мишень пучка ускоренных протонов. Измеренное пороговое значение выхода реакции 4,3 ГэВ соответствовало порогу рождения антипротонов на протонах ядра-мишени из меди Cu (рис. 6.4). На основании всех контрольных измерений был сделан вывод о том, что обнаруженные отрицательные частицы являются антипротонами. Всего за время сеанса, который длился около 7 суток, было зарегистрировано 60 антипротонов.

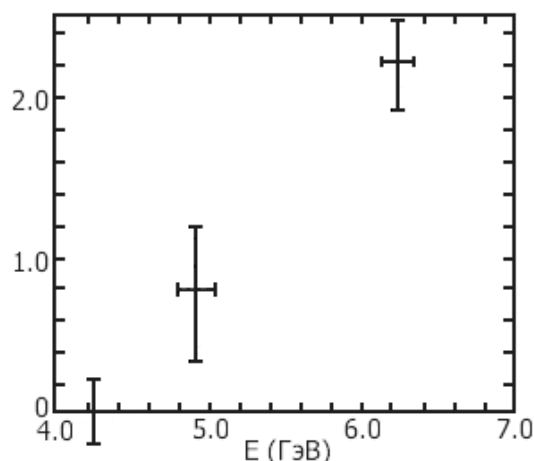


Рис. 6.4. Кривая возбуждения, дающая отношение сечений образования антипротонов к сечению образования мезонов, в зависимости от энергии пучка бэватрона. По оси ординат – число антипротонов на 10^5 π -мезонов.

Главной отличительной особенностью античастиц является их аннигиляция. При аннигиляции исчезают начальная частица и античастица и образуются другие частицы, рождение которых разрешено законами сохранения. Это обстоятельство также было использовано для подтверждения надёжности наблюдения антипротонов.

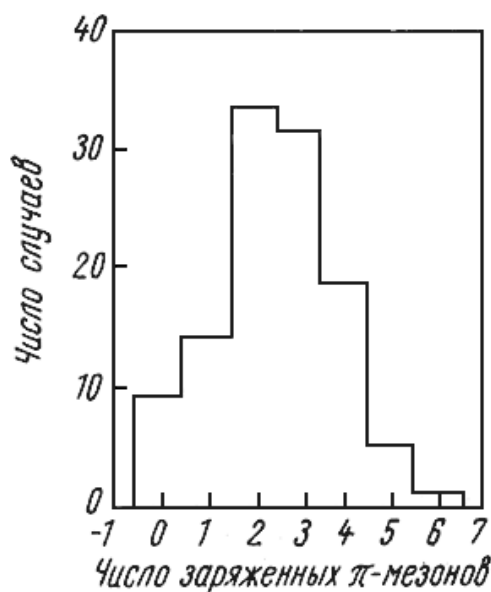


Рис. 6.5. Число заряженных π -мезонов, образующихся при аннигиляции антипротонов в фотоэмульсии.

Аннигиляция антипротонов с протонами происходит в результате сильного взаимодействия. При $p\bar{p}$ -аннигиляции при низких энергиях в основном рождаются более лёгкие сильно взаимодействующие частицы π - и K -мезоны. Так как энергия покоя π -мезона $m(\pi) \approx 140$ МэВ существенно меньше энергии покоя K -мезона

$m(K) \approx 500$ МэВ, образование K -мезонов наблюдается примерно в 5% случаев. Вероятность образования различного числа заряженных π -мезонов, образующихся при $p\bar{p}$ -аннигиляции, показана на рис. 6.5. Наряду с заряженными π -мезонами образуются нейтральные π^0 -мезоны. Число нейтральных π^0 -мезонов примерно в 1,5 раза меньше, чем заряженных. На рис. 6.6 показано распределение по энергии заряженных π -мезонов, образующихся в результате аннигиляции антипротонов с протонами в пузырьковой пропановой камере и в фотоэмульсии.

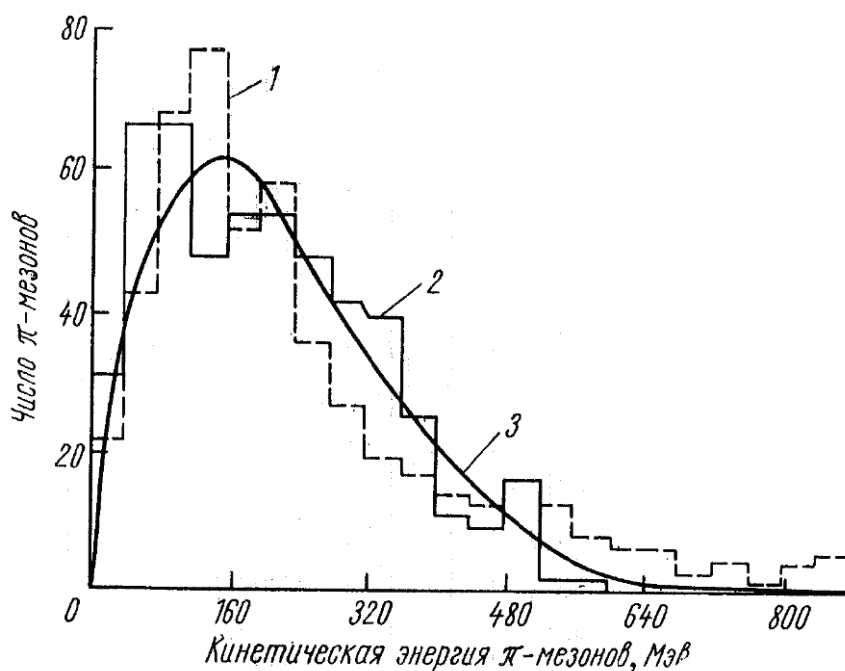


Рис. 6.6. Спектры заряженных π -мезонов, образующихся при аннигиляции антипротонов с протонами. 1 — в пузырьковой камере; 2 — в фотоэмульсии; 3 — спектр Ферми.

Для более надёжного подтверждения того, что действительно образуются антипротоны, было необходимо убедиться в том, что обнаруженные антипротоны действительно аннигилируют с одним из нуклонов вещества с выделением энергии вдвое превышающей энергию покоя протона. Для этого было решено после сцинтилляционного счетчика СЗ поместить ещё один черенковский счетчик, с помощью которого можно было зарегистрировать аннигиляцию антипротона в материале черенковского счетчика.

При аннигиляции нуклона и антипротона в покое будет выделяться энергия, равная удвоенной энергии покоя нуклона $E = 2m_N c^2 \approx 2 \cdot 940$ МэВ = 1,9 ГэВ. При аннигиляции пары нуклон-анти-нуклон в основном образуются положительные, отрицательные и

нейтральные пионы, которые, в свою очередь, также распадаются. Заряженные пионы распадаются на мюоны и нейтрино, мюоны распадаются на электроны, позитроны и нейтрино. Нейтральные пионы распадаются на 2 γ -кванта.

$$\pi^+ \rightarrow \mu^+ + \nu_\mu, \quad \pi^- \rightarrow \mu^- + \tilde{\nu}_\mu, \quad \pi^0 \rightarrow 2\gamma,$$

$$\mu^+ \rightarrow e^+ + \tilde{\nu}_\mu + \nu_e, \quad \mu^- \rightarrow e^- + \nu_\mu + \tilde{\nu}_e.$$

В веществе позитроны аннигилируют с электронами.

$$e^+ + e^- \rightarrow 2\gamma.$$

Таким образом, в течение нескольких микросекунд суммарная энергия покоя образовавшегося антипротона и протона превращается в энергию частиц с нулевой массой покоя, за исключением случая аннигиляции пары антипротон-нейтрон, когда в конечном состоянии наряду с частицами нулевой массы остается электрон.

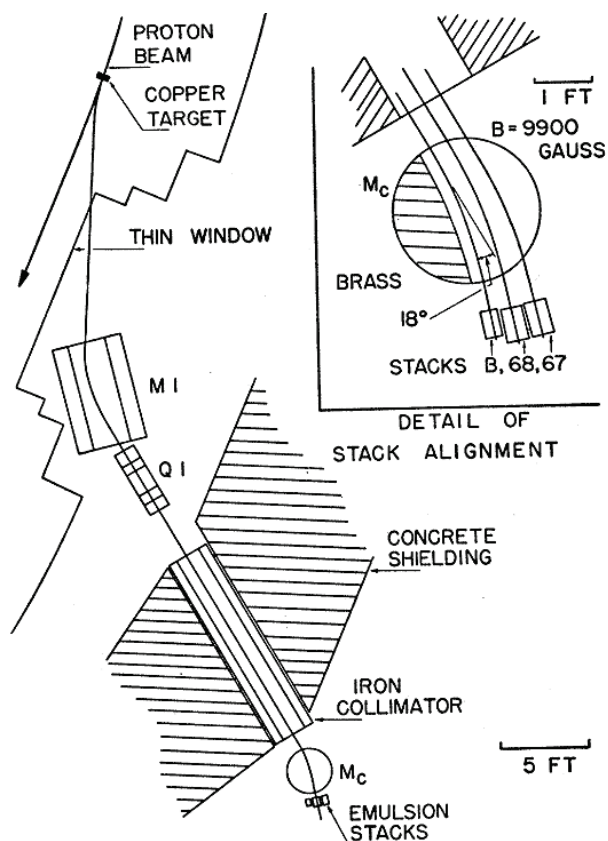


Рис. 6.7. Схема эксперимента по облучению эмульсий пучком антипротонов.

Было обнаружено, что при прохождении антипротонов через детектирующую систему в черенковском счетчике выделяется сигнал, амплитуда которого превышала 1 ГэВ. Более надежная идентификация образования антипротонов была получена в эксперименте Г. Гольдхабера, который зафиксировал аннигиляцию антипротона с одним из

нуклонов эмульсионной камеры, состоящей из нескольких слоев фотоэмульсии, в которых можно было после проявления непосредственно наблюдать следы заряженных частиц, образующихся в результате аннигиляции антипротона. Для этого пучок антипротонов замедлялся с помощью медного поглотителя и останавливался в стопке фотоэмульсии Emulsion Stacks (рис. 6.7). Частица, помеченная p^- , входила в стопку эмульсии и после пробега ≈ 12 см в эмульсии аннигилировала с образованием звезды из 8 частиц с одним из нуклонов ядер эмульсии (рис. 6.8). По ионизации, создаваемой частицей p^- , угловому рассеянию в материале эмульсии была независимо измерена её масса и получена величина

$$M(p^-) / M(p) = 1,013 \pm 0,034.$$

Результаты аннигиляции антипротона с одним из ядер фотоэмульсии показаны на рис. 6.8.

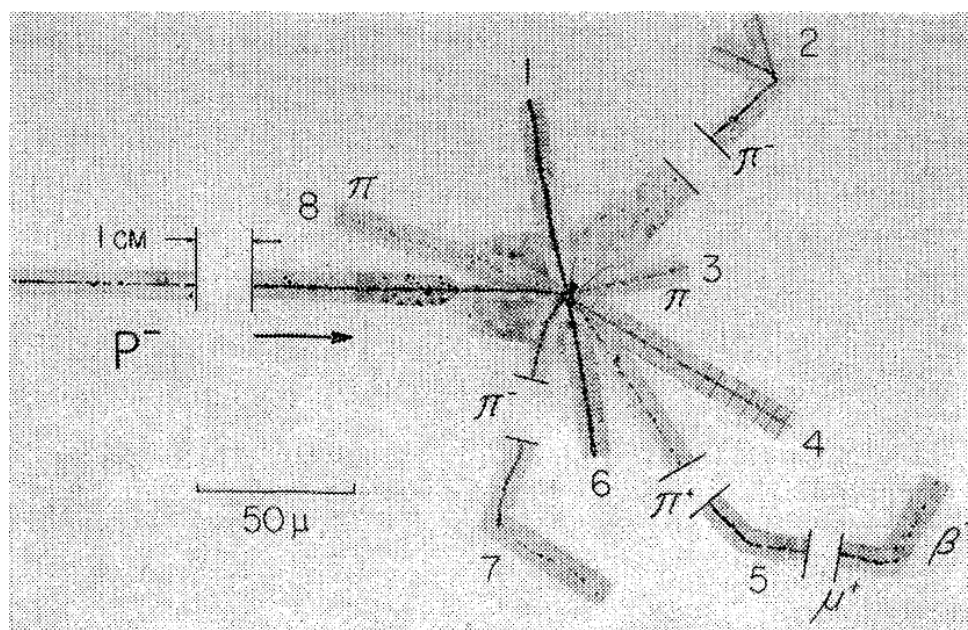


Рис. 6.8. Аннигиляция антипротона с протоном в ядерной эмульсии.

Была проанализирована энергия каждой из 8 частиц, образовавшихся в результате аннигиляции, и определена их природа. Так, например, частица N5, которая являлась π^+ -мезоном, распалась в фотоэмульсии, образовав видимый след мюона μ^+ ,

$$\pi^+ \rightarrow \mu^+ + \nu$$

который затем распался с образованием позитрона, электронного и мюонного антинейтрино

$$\mu^+ \rightarrow e^+ + \tilde{\nu}_\mu + \nu_e.$$

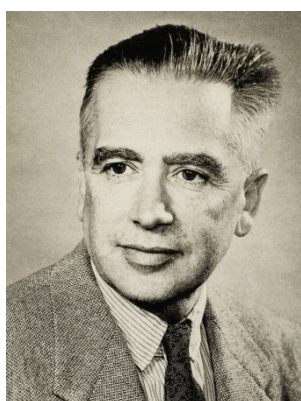
Общая измеренная энергия, выделившаяся в результате аннигиляции \bar{p} составила $\approx (1400 \pm 50)$ МэВ. В таблице 6.1 приведены номера треков частиц и идентифицированные частицы, образовавшиеся при аннигиляции антипротона.

Два протона, которые наблюдаются в звезде, образовались при распаде ядра, на нуклоне которого происходила аннигиляция антипротона. Поэтому часть энергии аннигиляции пошла на распад ядра эмульсии и была унесена протонами и нейтронами. Нейтроны в фотоэмульсии следов не оставляют. Часть энергии унесена нейтрино. Измеренная суммарная энергия аннигиляции служит надёжным доказательством того, что действительно в пучке образовывались антипротоны, которые затем аннигилировали.

Таблица 6.1

**Идентификация треков аннигиляции антипротонов
в эмульсии**

| Номер трека | Пробег в эмульсии, мм | Число пройденных слоев в фотоэмульсии | Тип частицы | Измеренная энергия, МэВ |
|-------------|-----------------------|---------------------------------------|-------------|-------------------------|
| 1 | 0,59 | 2 | p (?) | 18 |
| 2 | 27,9 | 11 | π^- | 183 |
| 3 | > 50 | 81 | π (?) | 314 |
| 4 | > 14,2 | 16 | p (?) | 78 |
| 5 | 6,2 | 3 | π^+ | 170 |
| 6 | 9,5 | 15 | ? | 98 |
| 7 | 18,6 | 30 | π^- | 174 |
| 8 | 22,3 | 16 | π | 265 |
| | | | | $\Sigma 1300 + 50$ МэВ |



Эмилио Сегре
(1905 – 1989)



Овен Чемберлен
(1920 – 2006)

В 1959 г. Э. Сегре и О. Чемберлену была присуждена Нобелевская премия по физике «за открытие антипротона».

Связь между характеристиками частиц и античастиц показана в таблице 6.2.

Таблица 6.2

Связь между характеристиками частицы и античастицы

| Характеристика | | Частица | Античастица |
|------------------------|----------------|---|---|
| Масса | | m | |
| Спин | | J | |
| Чётность | <i>фермион</i> | $+(-)1$ | $-(+)1$ |
| | <i>бозон</i> | $+(-)1$ | $+(-)1$ |
| Электрический заряд | | $+(-)Q$ | $-(+)Q$ |
| Магнитный момент | | $+(-)\mu$ | $-(+)\mu$ |
| Барионное число | | $+B$ | $-B$ |
| Лептонное число | | $+L_e, +L_\mu, +L_\tau$ | $-L_e, -L_\mu, -L_\tau$ |
| Изоспин | | I | |
| Проекция изоспина | | $+(-)I_3$ | $-(+)I_3$ |
| Странность | | $+(-)s$ | $-(+)s$ |
| Очарование (Charm) | | $+(-)c$ | $-(+)c$ |
| Bottom | | $+(-)b$ | $-(+)b$ |
| Топ | | $+(-)t$ | $-(+)t$ |
| Время жизни | | τ | |
| Схема распада (пример) | | $d \rightarrow u + e^- + \tilde{\nu}_e$ | $\bar{d} \rightarrow \bar{u} + e^+ + \nu_e$ |