

9. Антиводород

Антиматерия – это расширение основных идей физики античастиц на организацию антивещества. Антиматерия образуется так же, как обычная материя. Однако составляющие её «частицы» являются античастицами по отношению к обычной материи. Так, например, атом антиводорода состоит из антипротона \bar{p} и позитрона e^+ подобно тому, как атом водорода состоит из протона p и электрона e . Интерес к образованию и изучению антиматерии связан с тем, что позволяет проверить справедливость основных положений Стандартной модели, общей теории относительности. Согласно СРТ-инвариантности, антиводород должен иметь такую же массу, абсолютную величину магнитного момента, как и обычный атом водорода. Энергетические спектры атомов водорода и антиводорода должны быть полностью идентичны. Атомы антиводорода должны в результате гравитационного взаимодействия с одинаковой силой притягиваться к частицам как материи, так и антиматерии. Эти утверждения, кажущиеся на первый взгляд очевидными, должны быть проверены и подтверждены экспериментально. Поэтому образование и изучение свойств наиболее простого атома антиматерии – атома антиводорода – происходит в течение длительного времени в нескольких коллаборациях.

Впервые антиводород был получен в эксперименте, который проведен в ЦЕРН на накопительном кольце антипротонов LEAR [G. Baur et al, Phys. Lett. B368, 251 (1996)].

Сфокусированный пучок протонов протонного синхротрона (PS) с энергией 26 ГэВ падал на цилиндрическую (3×50 мм) иридиевую мишень. Образующиеся в мишени антипротоны с энергией 3.57 ГэВ поступали в накопительное кольцо LEAR (Low Energy Antiproton Ring). Антипротоны из накопительного кольца падали на внутреннюю струйную ксеноновую мишень. При взаимодействии антипротона с ядром ксенона происходило образование электрон-позитронной пары, причем позитрон рождался в одном из связанных состояний в поле антипротона. В эксперименте, который длился два месяца, было получено 11 атомов антиводорода с энергией ~ 1 ГэВ. Измеренное сечение процесса образования атомов антиводорода ~ 6×10^{-33} см².

Позже 30 атомов антиводорода были получены в аналогичном опыте в Лаборатории им. Э. Ферми — FermiLab.

Однако полученные как в ЦЕРНе, так и в Фермилабе атомы антиводорода имели слишком высокие энергии и плохо подходили для исследований их свойств. Проблема в том, что для удержания антипротонов в ловушках, их энергия должна быть порядка десятков

кэВ, а для удержания антиатомов – порядка десятков эВ. Таким образом, необходимо было решить задачу замедления антипротонов и получить холодные атомы антиводорода.

В 2000 г. в ЦЕРН был запущен замедлитель антипротонов **AD** (Antiproton Decelerator), на котором удалось снизить энергию антипротонов с 3.5 ГэВ до 5.3 МэВ. Образующиеся при облучении протонами протонного синхротрона мишени-конверторе антипротоны с импульсами 3.57 ГэВ/с поступают в **AD**, где замедляются в три этапа

$$3.57 \rightarrow 2.0 \rightarrow 0.3 \rightarrow 0.1 \text{ ГэВ/с.}$$

На первом этапе применяется стохастическое охлаждение пучка, на последующих используется электронное охлаждение.

Стохастическое охлаждение, предложенное Ван дер Меером (1972), основано на введении затухания с помощью систем обратной связи. Измерительные электроды определяют отклонение частицы по какому-либо направлению. Сигнал, пропорциональный этому отклонению, через систему обратной связи воздействует на частицу, вызывая затухание колебаний по соответствующему направлению. Например, для уменьшения разброса по импульсам Δp_{\parallel} измеряется радиальное отклонение частиц, которое пропорционально Δp_{\parallel} . Сигнал измерительного электрода подаётся на ускоряющий зазор в момент прихода частицы, ускоряя или затормаживая её.

Электронное охлаждение – снижение эффективной температуры пучка ионов или протонов, циркулирующих в вакуумной камере ускорителя или накопителя, происходит в результате столкновений с электронами, движущимися вместе с ионами и имеющими меньшую температуру. Г. И. Будкер предложил в 1960 г. использовать электронное охлаждение для уменьшения эмиттанса пучков тяжёлых частиц. В одном из прямолинейных промежутков вакуумной камеры накопителя, в которой циркулирует пучок тяжёлых частиц, например, протонов, параллельно протонному пучку пропускается интенсивный пучок электронов, имеющих ту же среднюю скорость и малый разброс по импульсам (малую температуру). На общем участке траектории «горячий» газ протонов обменивается энергией с «холодным» электронным газом в результате кулоновских взаимодействий и охлаждается, что ведёт к уменьшению фазового объёма протонного пучка, при этом пучок протонов сжимается. Охлаждение продолжается до тех пор, пока температура протонов не станет равной температуре электронного пучка.

На выходе AD образуется $\sim(25-30)\times 10^6$ антипротонов в коротких импульсах длительностью $\sim 100-500$ нс каждые ~ 100 с. Пучок антипротонов AD затем использовался в нескольких экспериментах

- ATHENA,
- ATRAP (Antihydrogen TRAP),
- ASACUSA (Atomic Spectroscopy And Collisions Using Slow Antiprotons),
- ACE (Antiproton Cell Experiment),
- ALPHA (Antihydrogen Laser PHysics Apparatus),
- AEGIS (Antihydrogen Experiment: Gravity, Interferometry, Spectroscopy).

В конце 2002 г. коллаборация ATHENA сообщила, что они получили «холодный» антиводород.

Для того, чтобы получить антиводород, необходимо иметь источники антипротонов и позитронов, ловушку для антипротонов, накопитель позитронов и ловушку-смеситель антипротонов и позитронов, в котором происходит образование атомов антиводорода. Обычно в качестве ловушек используются различные модификации ловушки Пеннинга, в которых удержание в радиальном направлении осуществляется с помощью сильного магнитного поля, а в аксиальном — с помощью электрического потенциала, приложенного к цилиндрическим электродам. На рис. 9.1 показана схема эксперимента ATHENA (2004 г.).

Прежде чем попасть в ловушку, антипротоны проходят через алюминиевую фольгу, в которой их энергия уменьшается до энергий ≤ 10 кэВ. Ловушка, в которой поддерживается сверхвысокий вакуум, находится внутри сверхпроводящего магнита, стенки ловушки охлаждены до ~ 10 К. На рис. 9.1а показано, как «ловятся» антипротоны.

На выходе ловушки устанавливается высокий потенциал, препятствующий вылету антипротонов (рис. 9.1б). Когда сгусток антипротонов попадает в ловушку, высокий потенциал устанавливается и на входе ловушки (рис. 9.1в). Антипротоны оказываются запертыми в ловушке. На следующем этапе происходит охлаждение антипротонов. Для этого антипротоны смешиваются с электронами, предварительно охлажденными до более низких температур, чем антипротоны. В результате кулоновского рассеяния происходит выравнивание температур антипротонов и электронов, т.е. охлаждение антипротонов (рис. 9.1г).

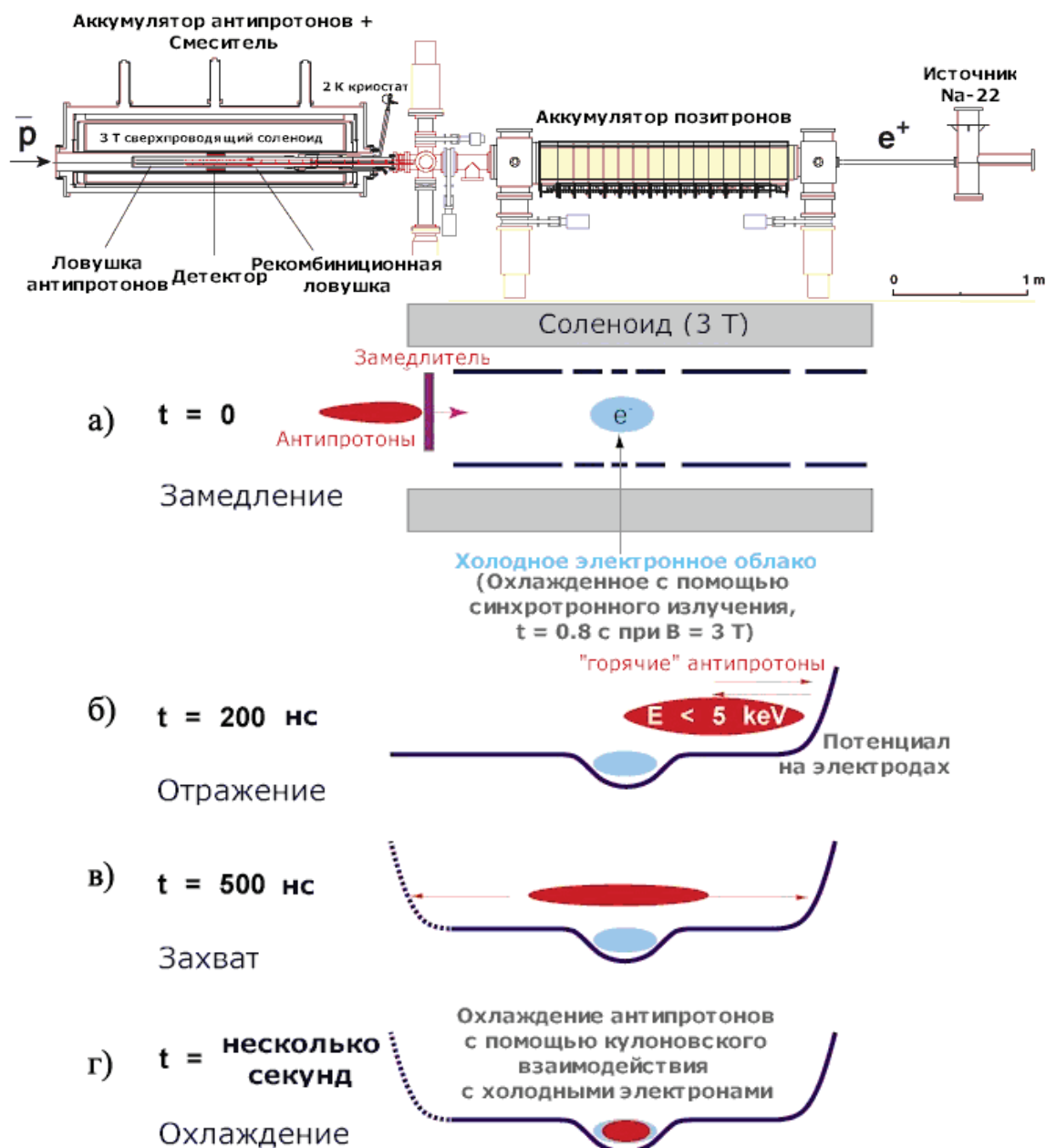


Рис. 9.1. Упрощенная схема образования холодных антипротонов.

Источником позитронов является β^+ -радиоактивный изотоп ^{22}Na . Однако позитроны, прежде чем попасть в ловушку –накопитель позитронов, должны быть замедлены и иметь небольшой разброс по энергии. Замедление осуществляется с помощью азота N в твердой фазе. Для этого источник позитронов поддерживался при температуре $\sim 5\text{--}6$ К. После замедления энергия квазимонохроматических позитронов составляет ~ 2 эВ. При активности источника 40 мКи поток позитронов после замедления составлял $\sim 5 \times 10^6$ с^{-1} . Так как пучок позитронов непрерывный, метод, который использовался для ловушки антипротонов, для ловушки-аккумулятора позитронов неприменим. Позитроны поступают в модифицированную ловушку Пеннинга-Малберга, в которой потенциал и давление газа N_2 изменяются

ступенчато (рис. 9.2). В области I позитроны испытывают неупругие взаимодействия с газом, теряют энергию (А) и не могут вылететь из ловушки, а попадают в область II, а затем и в область III, где и накапливаются.

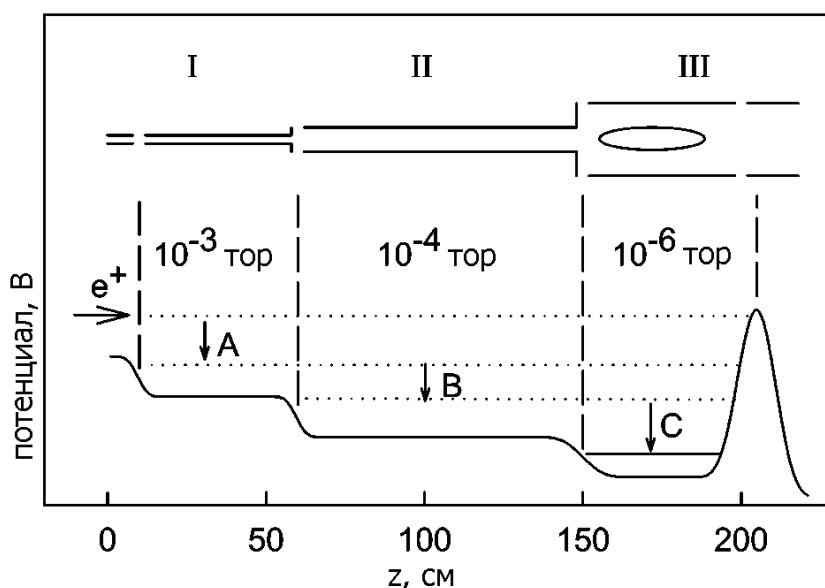


Рис. 9.2. Схема ловушки Пеннинга-Малберга, в которой происходит замедление и накопление позитронов.

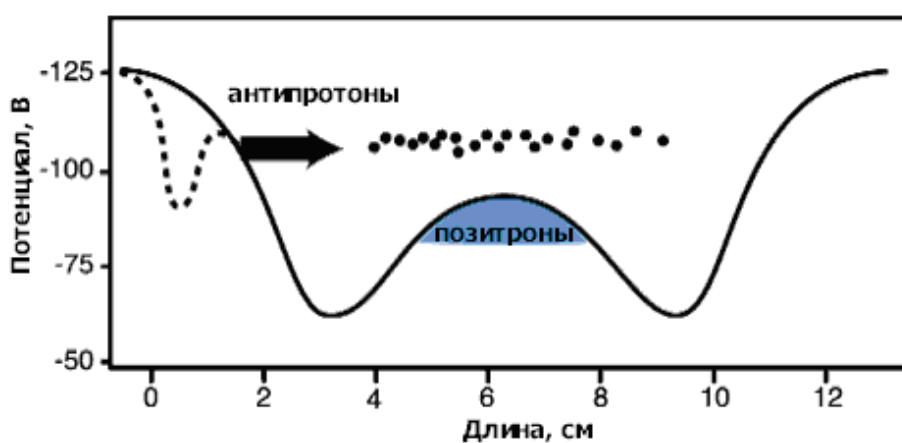


Рис. 9.3. Распределение потенциалов в рекомбинационной ловушке, в которой образуются атомы антиводорода.

В то время как антипротоны охлаждаются в первой ловушке, позитроны, которые формируются в накопителе позитронов, инжектируются в рекомбинационную ловушку (рис. 9.3). Распределение потенциала в рекомбинационной ловушке такое, что позволяет находиться в ней одновременно и антипротонам, и позитронам. В центре – ловушка для позитронов, по бокам – для антипротонов.

Когда антипротоны охладятся до нужной температуры, их смесь с электронами также перемещается в рекомбинационную ловушку. Теперь необходимо убрать все электроны, с помощью которых

происходило охлаждение пучка позитронов. Это необходимо, чтобы в рекомбинационной части ловушки не происходила e^+e^- -аннигиляция. Электроны удаляются с помощью серии быстрых изменений потенциала рекомбинационной ловушки. В результате кулоновского взаимодействия между антипротонами и более холодными позитронами происходит дальнейшее охлаждение антипротонов. При достижении теплового равновесия начинают образовываться атомы антиводорода, которые, будучи нейтральными, не чувствуют магнитных полей ловушки, покидают ловушку и аннигилируют на стенках рекомбинационной ловушки или на остаточном газе.

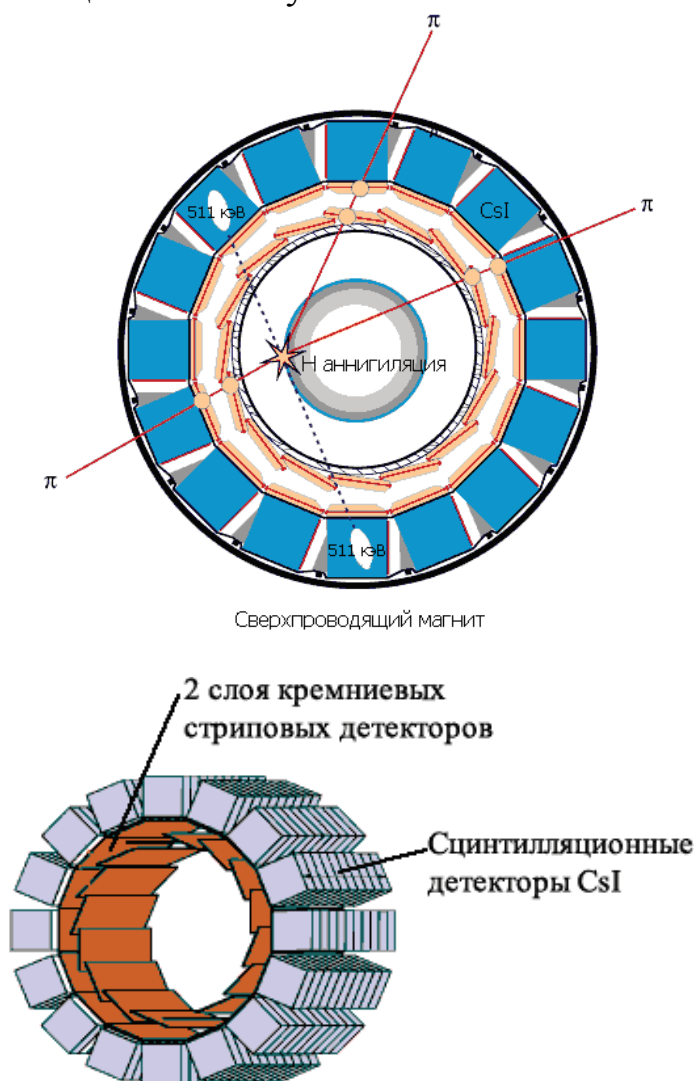


Рис. 9.4. Детектор аннигиляции позитронов и антипротонов. Пионы (сплошные линии), образующиеся при $p\bar{p}$ -аннигиляции, 2 γ -кванта (пунктирные линии), образующиеся при e^+e^- -аннигиляции.

Детектор (рис. 9.4) регистрирует продукты аннигиляции как антипротона, так и позитрона, которые происходят практически одновременно и в одном месте. В результате аннигиляции антипротона

на нуклоне образуется 3–4 заряженных пиона с энергиями 50–900 МэВ. Пионы регистрируются системой из двух слоев кремниевых стриповых детекторов, что позволяет фиксировать две точки на каждой траектории. В каждом слое 16 детекторных модулей. В каждом модуле 128 стрипов с одной стороны и 128 с другой. Место аннигиляции антипротона определяется пересечением экстраполированных линий, построенных по точкам, полученным с помощью стриповых детекторов. Позитроны фиксируются по аннигиляционным γ -квантам. Они детектируются 192 сцинтилляционными детекторами CsI, которые расположены в 16 рядов по 12 детекторов в каждом и окружают стриповые детекторы. Индикатором образования антиводорода является регистрация двух гамма-квантов с энергией 511 кэВ в течение ~ 2 мкс вслед за аннигиляцией антипротона. Прямая линия, соединяющая геометрические центры двух кристаллов CsI, зафиксировавших γ -кванты с энергией 511 кэВ, должна проходить через точку, полученную в результате регистрации пионов.

В результате холодного синтеза было получено ~ 50000 атомов антиводорода. При этом полное число холодных антипротонов на входе ловушки составляло $\sim 1,5 \cdot 10^6$. Полученные результаты позволяют идентифицировать квантовые состояния образующихся атомов антиводорода и уже могут рассматриваться как доказательство возможности образования холодных атомов антиводорода в достаточно большом количестве.

В частности, в эксперименте ALPHA-2 удалось увеличить время существования антиводорода свыше 1000 секунд, что позволило измерить расщепление уровней $1s-2s$ в атоме антиводорода, измерить сверхтонкое расщепление уровня основного состояния атома антиводорода, обусловленное взаимодействием магнитного момента позитрона с магнитным моментом антипротона — ядра атома антиводорода. Полученные величины в пределах точности эксперимента совпали с соответствующими величинами атома водорода. Этот результат явился еще одним подтверждением СРТ-инвариантности, следующей из общих принципов квантовой теории поля. Смысл СРТ-инвариантности можно свести к утверждению: «Наш мир и мир, полученный из нашего путем зарядового сопряжения, пространственной инверсии и обращения времени, идентичны».