

ANTIHYDROGEN: PRODUCTION, ACCUMULATION, AND STORAGE

L. A. MELNIKOV,
I. M. UMANSKII

The current state of the problem of the anti-matter synthesis is described. The different methods of anti-hydrogen atoms formation, including laser stimulation are discussed. The principles of the traps for accumulation and long-term storage of anti-protons, positrons and neutral antihydrogen atoms are considered.

Изложено современное состояние проблемы синтеза antimатерии. Обсуждены различные пути формирования атомов антиводорода, в том числе с помощью лазерного излучения. Рассмотрен принцип действия ловушек, позволяющих аккумулировать и сохранять в течение длительного времени как антипротоны и позитроны, так и нейтральные атомы антиводорода.

© Мельников Л.А., Уманский И.М., 1999

АНТИВОДОРОД: ПОЛУЧЕНИЕ, НАКОПЛЕНИЕ И СОХРАНЕНИЕ

Л. А. МЕЛЬНИКОВ

Саратовский государственный университет

И. М. УМАНСКИЙ

Саратовский государственный аграрный университет

– Ну как, хочешь жить в зеркале, Китти?
Интересно, дадут тебе там молока?
Впрочем, не знаю, можно ли
пить зеркальное молоко?
Льюис Кэрролл “Алиса в стране чудес”

Введение. В 1931 году П. Дирак впервые предсказал возможность существования античастиц, то есть элементарных частиц, отличающихся от соответствующих им обычных частиц знаком электрического заряда и магнитного момента. Спустя год первая такая античастица – антиэлектрон, также называемый позитроном e^+ , была обнаружена в космических лучах. В 1955 году был открыт антипротон \bar{p} .

Любители научной фантастики могут без труда вспомнить огромное количество сюжетов, где увлекательно описывается как жизнь в антимирах, так и катализмы при столкновении вещества с антивеществом. Как известно, в результате такого столкновения происходит аннигиляция, при которой как частица, так и античастица исчезают и одновременно выделяется энергия в виде γ -квантов. Все эти фантазии занимали человечество так долго, что к ним привыкли относиться как к сказке, не вкладывая в них реального содержания. Тем неожиданнее было сообщение о том, что в сентябре 1996 года в Европейском центре ядерных исследований (ЦЕРН) получены первые атомы антиводорода \bar{H} [1]. В отличие от обычного атома водорода, состоящего из протона и электрона, атом антиводорода представляет собой антипротон с вращающимся вокруг него позитроном (рис. 1). Это событие трудно переоценить.

Девять атомов антиводорода. Создание первых атомов \bar{H} было осуществлено интернациональной

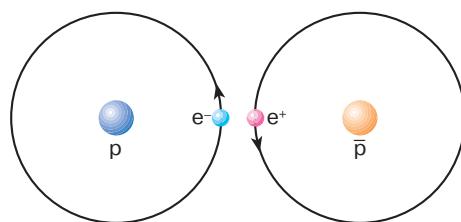


Рис. 1. Атомы – антиподы: водород и антиводород

МЕЛЬНИКОВ Л.А., УМАНСКИЙ И.М. АНТИВОДОРОД

командой физиков с помощью кольца-накопителя антипротонов с низкой энергией (LEAR – Low Energy Antiproton Ring) в ЦЕРНе. Предварительно накопленные антипротоны двигались в этом кольце, совершая 3 000 000 оборотов в секунду (рис. 2). На своем пути антипротонный пучок пересекал струю атомов ксенона. Хотя и очень редко, но при торможении отдельных антипротонов вблизи ядер ксенона выделялась энергия, достаточная для рождения из вакуума электрон-позитронной пары. В еще более редких случаях скорость рожденного позитрона оказывалась близкой к скорости антипротона, и тогда, соединившись, они образовывали атом антиводорода – антипод атома обычного водорода. Продолжавшись примерно 40 нс и пролетев за это время около 10 м со скоростью, близкой к скорости света, такие атомы погибали в результате аннигиляции при столкновениях с обычным веществом. Наблюдение продуктов аннигиляции и послужило доказательством реальности существования атомов \bar{H} . В ходе трехнедельного эксперимента было зарегистрировано девять таких событий. Этот эксперимент заложил первый камень в строительство “периодической системы антиэлементов”.

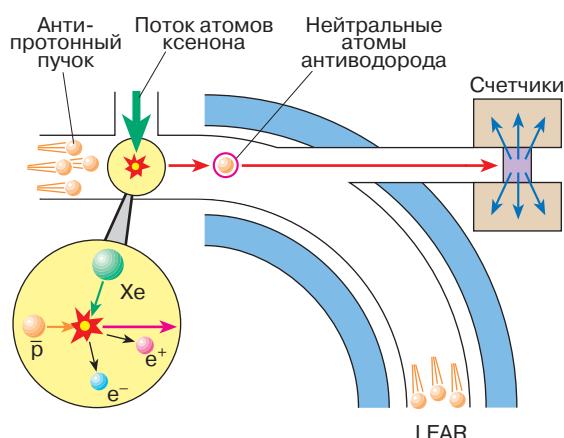


Рис. 2. Схема установки, позволившей впервые зарегистрировать атомы антиводорода

Атомов \bar{H} должно быть много. Для того чтобы детально изучить свойства антиводорода, необходимо научиться производить антиводород в достаточно больших количествах. Очевидно, что описанный выше метод, в котором на изготовление одного атома (существующего к тому же стомиллионные доли секунды) уходит в среднем более двух суток, этой проблеме не решает. Существуют различные подходы к увеличению эффективности формирования атомов антиводорода.

Рождение в полете. Создание антиводородных атомов в эксперименте [1] происходит в результате совпадения довольно редких событий. Первое со-

стоит в появлении электрон-позитронной пары в результате практически лобовых столкновений антипротонов с атомами ксенона, а второе – в том, что скорость образующегося позитрона должна быть близка к скорости антипротонного пучка. Для того чтобы увеличить скорость образования атомов \bar{H} , была предложена следующая технология. Если пучок позитронов и пучок антипротонов соединить так, чтобы они летели в одном направлении с одинаковыми скоростями, то при этом вероятность объединения позитронов и антипротонов в атомы \bar{H} становится значительной. Вариант этой схемы, предложенный российскими физиками И.Н. Мешковым и А.Н. Скрипником [2], позволит, по их оценкам, генерировать пучки с интенсивностью от 30 до 30 000 атомов в секунду. Эти атомы, однако, будут двигаться в направлении образующих их пучков со скоростью, заданной типом накопительного кольца (ускорителя) и составляющей от 0,03 до 0,3 скорости света. Эксперименты на атомах, движущихся с релятивистскими скоростями, весьма сложны. В то же время в атомной физике известны методы спектроскопии быстрых атомов. Очевидно, что перспективы изложенного подхода связаны с развитием и реализацией этих методов.

Холодный антиводород в бутылке. Другой заманчивый путь решения проблемы заключается в том, чтобы производить “поштучно” малоподвижные атомы \bar{H} , накапливать их в ограниченном объеме. Для этого нужно решить следующие задачи: во-первых, обеспечить значительную концентрацию антипротонов и позитронов в рабочей камере, во-вторых, создать оптимальные условия для их соединения в антиатомы (рекомбинации) и, в-третьих, защитить образуемые атомы \bar{H} от аннигиляции в результате столкновений со стенками. Поскольку в настоящее время усилия экспериментаторов сосредоточены главным образом на этом направлении, остановимся на нем подробнее.

Ловушки для античастиц. В качестве источника позитронов может быть выбран радиоактивный изотоп натрия ^{22}Na . Позитроны, выделяющиеся при его распаде, имеют очень высокие кинетические энергии порядка МэВ. Для их охлаждения предполагается использовать твердый замедлитель, представляющий собой замороженный при 8 К неон. Попадая в неоновую матрицу, подавляющая часть позитронов (99,9%) аннигилирует при столкновениях с электронами атомов неона. Оставшиеся позитроны, избежавшие аннигиляции, диффундируют обратно в вакуум, отдав большую часть своей энергии неону. Остаточная кинетическая энергия (порядка 50 эВ) все еще достаточно велика и нуждается в дальнейшем понижении. С этой целью позитроны засасываются в трехсекционную ловушку, изображенную на рис. 3, заполненную азотом. Давление азота и потенциал цилиндрических электродов убывают от первой к последующим секциям. “Протискиваясь” через азот, позитроны теряют

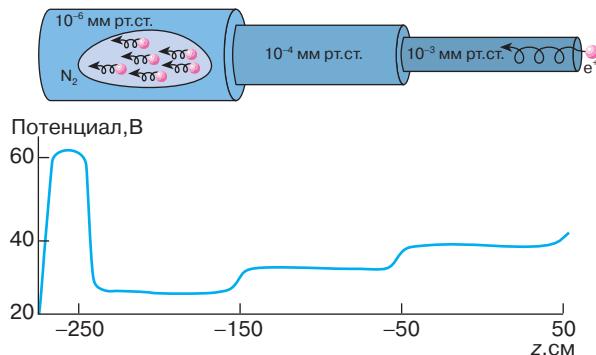


Рис. 3. Позитронная ловушка

энергию и, добравшись до последней секции, оказываются плененными электрическим полем специально подбранной конфигурации (см. рис. 3). Вся камера расположена в магнитном поле с индукцией около 0,1 Т, направленном вдоль распространения пучка. Это поле закручивает траектории движения позитронов, препятствуя их контакту со стенками. Таким образом удается получить пространственно-ограниченное облако спирально движущихся позитронов, содержащее около 10^8 частиц. Позитроны в этом облаке будут дополнительно терять энергию вследствие так называемого синхротронного излучения. Это излучение, называемое также магнитно-тормозным [3], наблюдается при движении заряженных частиц по круговым траекториям под действием постоянного магнитного поля напряженностью H . Потери энергии за единицу времени составляют

$$\frac{d\mathcal{E}}{dt} = -\frac{2q^4 H^2}{3m^4 c^7} (\mathcal{E}^2 - m^2 c^4). \quad (1)$$

Здесь q , m , \mathcal{E} – соответственно заряд, масса и энергия частицы, c – скорость света. Таким образом удается охладить позитронное облако до энергий в десяти тысячные доли эВ, что соответствует температуре в несколько К.

Охлаждение и аккумуляция антiproтонов, получаемых от антiproтонного замедлителя, могут быть осуществлены примерно по такой же схеме. Различие состоит в том, что на этот раз магнитное поле должно иметь значительно большую напряженность (3 Т), а ловушку вместо молекул азота заполняют электронами. Отбирая у антiproтонов энергию при столкновениях, электроны в дальнейшем высвечивают ее в виде синхротронного излучения. Энергия, теряемая при синхротронном излучении самими антiproтонами, незначительна ввиду большой массы частицы (см. формулу (1)). Этот подход позволит накопить при температуре около 4 К примерно 10^7 антiproтонов.

Теперь, когда антiproтоны и позитроны получены, возникает задача их соединения для рекомби-

нации в атомы антиводорода. Несмотря на то что позитроны и антiproтоны имеют заряды разных знаков, их удержание в локализованном объеме возможно благодаря особым образом подобранный конфигурации электрического поля (рис. 4).

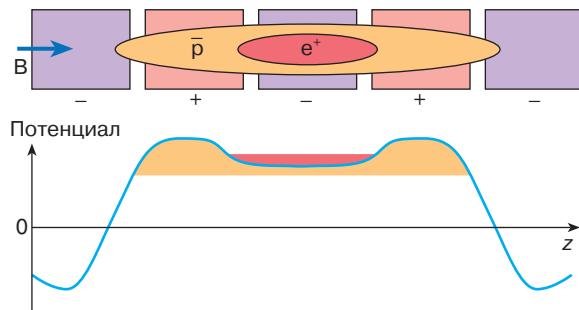


Рис. 4. Одновременное удержание антiproтонов и позитронов электрическим полем в рекомбинационной камере

Суммарная энергия свободных элементарных частиц превышает энергию атома, образованного этими частицами. Поэтому при объединении позитрона \bar{e} и антiproтона \bar{p} в атом антиводорода \bar{H} избыточная энергия должна быть выделена в виде кванта электромагнитного излучения. Этот процесс, описываемый уравнением

$$\bar{e} + \bar{p} = \bar{H} + \hbar\omega,$$

называется спонтанной рекомбинацией. Вероятность рекомбинации сильно зависит от температуры и существенно возрастает при ее уменьшении. Вот почему так важно понизить, насколько это возможно, температуру антiproton-позитронного газа.

Объединению античастиц помогает лазер. Даже при соединении холодных антiproтонов с позитронами они объединяются в атомы крайне неохотно, и, по самым оптимистическим оценкам, скорость рекомбинации составляет несколько сотен атомов в секунду при концентрациях позитронов и антiproтонов в ловушках в 10^8 и 10^7 см⁻³ соответственно. В рекомбинационной ловушке антiproton и позитрон находятся в среднем на расстоянии 10^{-3} см, то есть по атомным меркам (размер атома порядка 10^{-8} см) очень далеко друг от друга. При этом потенциальная энергия взаимодействия этих частиц будет поистине гигантской, а это значит, что позитрон, облетая антiproton, будет иметь настолько большую скорость, что окажется не в состоянии удержаться вблизи антiprotona и вернется в первоначальное положение, подобно комете, движущейся вокруг Солнца по очень вытянутой эллиптической орбите. Для того чтобы осуществить захват позитрона, необходимо отобрать у него значительную часть энергии. При спонтанной рекомбинации этот избыток энергии уносится квантумом света. Ее

можно было бы передать и третьей частице, например еще одному позитрону, но случаи одновременного столкновения сразу трех частиц чрезвычайно редки. Более того, атом, родившийся в результате такого тройного столкновения, находился бы в высоковозбужденном (так называемом ридберговском) состоянии, которое может легко разрушиться при столкновениях с другими позитронами.

Что можно сделать для увеличения эффективности рекомбинации? На помощь приходит лазер. Интенсивное лазерное излучение способно заставить позитрон занять нужную орбиту вокруг антипротона. Это может показаться странным: ведь, казалось бы, позитрон должен приобретать дополнительную энергию в лазерном поле, а не терять ее. Дело заключается в том, что лазер в состоянии стимулировать излучение самого атома с гораздо большей вероятностью, чем вероятность спонтанного излучения. Для понимания этой ситуации уместна следующая механическая аналогия. Представим себе колеблющийся маятник. Действуя на него периодической внешней силой с частотой собственных колебаний можно не только раскачать, но и затормозить маятник в зависимости от фазы воздействия. В рассматриваемой ситуации, подчиняющейся законам квантовой механики, фазовые соотношения выполняются автоматически: квантовый маятник будет всегда раскачиваться, если первоначально он был неподвижен, и останавливаться, если совершил колебания.

В 1991 году явление лазерно-стимулированной рекомбинации электронов и протонов, приводящей к образованию атомов водорода,

$$e + p + n\hbar\omega = H + (n+1)\hbar\omega,$$

наблюдалось экспериментально. При этом использовалось излучение либо непрерывного CO₂-лазера, либо длинный импульс лазера на красителе. Эффективность этого процесса на один-два порядка превысила вероятность спонтанной рекомбинации. Очевидно, что по той же схеме можно стимулировать рекомбинацию антипротонов и позитронов, результатом которой будет образование антиводорода. Это, однако, не предел. Выигрыш может быть существенно большим при правильно подобранных параметрах лазерного излучения.

Действительно, энергии позитронов в ловушке в условиях теплового равновесия неодинаковы. Большинство из них имеют энергию порядка kT . Лазерное излучение стимулирует рекомбинацию позитронов, энергия E которых удовлетворяет соотношению

$$E + \hbar\omega_{0n} = \hbar\omega,$$

где $k = 1,38 \cdot 10^{-23}$ Дж/К – постоянная Больцмана, ω_{0n} – энергия ионизации \bar{H} из n -го стационарного состояния. Поэтому частота лазера должна быть подобрана так, чтобы она попадала в максимум энергетической заселенности позитронов, но и при этом в процессе индуцированного захвата участвует лишь

малая часть позитронов, энергии которых распределены в интервале порядка ширины лазерной линии.

Кроме того, заметим, что возможности увеличения скорости лазерно-стимулированной рекомбинации за счет роста мощности лазера принципиально ограничены. Процесс рекомбинации антипротонов с позитронами всегда сопровождается обратным процессом фотоионизации антиатомов. Пока этих атомов мало, доля актов ионизации незначительна, но по мере возрастания числа антиатомов растет и та часть из них, которая разрушается лазерным излучением. Поэтому, начиная с некоторого предела, когда число образующихся антиатомов сравняется с числом распадающихся, дальнейшее увеличение мощности излучения не будет приводить к увеличению количества произведенного антиводорода.

Дополнительного увеличения эффективности лазерного воздействия на процесс позитрон-антипротонной рекомбинации можно добиться, используя короткие лазерные импульсы.

Схема такого воздействия представлена на рис. 5. Несущая частота лазерного импульса соответствует переходу (показанному красной стрелкой) в некоторое возбужденное состояние атома антиводорода. Удобно выбрать состояние с $n = 3$, для которого частота перехода попадает в ближнюю инфракрасную область, и легко подобрать нужную лазерную систему. Как известно, чем короче импульс, тем менее он монохроматичен. Ширина спектра частот, генерируемых импульсом, обратно пропорциональна его длительности: $\Delta\omega \propto \frac{1}{\Delta t}$. Современная лазерная техника позволяет создавать импульсы с длительностью 10^{-14} с, накрывающие значительный диапазон энергий. Такие импульсы будут взаимодействовать практически со всеми позитронами, что приведет к

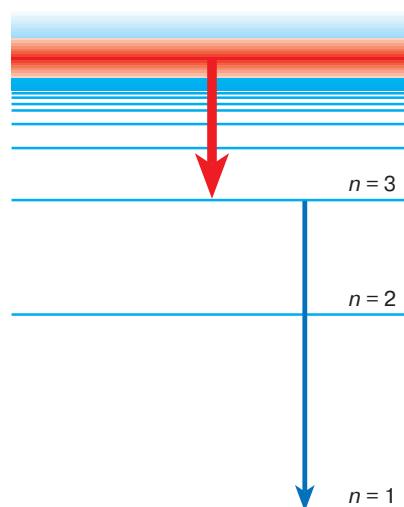


Рис. 5. Лазерно-стимулированная рекомбинация

увеличению числа образующихся атомов антиводорода при любой разумной температуре позитронного газа. Этим короткие импульсы выгодно отличаются от стационарного излучения, эффективность которого высока только в условиях почти нулевых температур.

Другое преимущество коротких импульсов заключается в том, что при правильно подобранной длительности они позволяют избежать процесса реионизации. Для этого импульс следует оборвать в тот момент, когда максимальное количество позитронов окажется захваченным в связанное состояние. Далее следует подождать до тех пор, пока это состояние не опустошится вследствие спонтанных переходов на нижележащие уровни за время порядка 10^{-8} с (такой переход показан на рис. 5 синей стрелкой). После этого может быть послан второй импульс и т.д. В результате будет происходить накопление атомов антиводорода в основном состоянии.

Теперь необходимо решить проблему сохранения полученных атомов. Поскольку они нейтральны, то решить эту задачу только с помощью электрического и магнитного полей, используемых в позитронной и протонной ловушках, невозможно.

Как сохранить антиводород. Как известно, нейтральный атом (антиатом) обладает магнитным моментом. Он представляет собой векторную сумму орбитального магнитного момента, создаваемого при движении электрона (позитрона) вокруг ядра и собственного магнитного момента самого электрона (позитрона). В результате взаимодействия магнитных моментов атомов водорода (антиводорода) с внешним магнитным полем происходит их ориентация преимущественно в направлении магнитного поля и против этого направления. Если приложенное поле неоднородно, то атомы первой группы будут втягиваться в ту область пространства, где поле сильнее, а атомы второй группы будут, напротив, из этой области выталкиваться. Если конфигурация поля такова, что поле имеет минимум в геометрическом центре ловушки, то атомы, магнитные моменты которых “смотрят” против поля (то есть примерно половина всех атомов), будут удерживаться вблизи этого минимума, не испытывая столкновений со стенками ловушки. Глубина потенциальной ямы, в которой находятся антиводородные атомы, очень невелика, всего 0,35 К, и это значит, что только самые холодные атомы могут быть сохранены.

Таким образом, устройство, предназначенное для изготовления и хранения антиводорода, довольно сложно и представляет собой совокупность пози-

тронной и антипротонной ловушек и рекомбинационной камеры, помещенной в неоднородное магнитное поле. Тем не менее такая конструкция, получившая название магнитной бутылки, имеет весьма скромные размеры — около 3 м в длину и около 40 см в диаметре. В такой бутылке, погруженной для охлаждения в жидкий гелий, атомы антиводорода могут храниться продолжительное время — от суток до нескольких недель. Этого времени более чем достаточно для проведения подробных исследований полученного антивещества.

Заключение. Статья не претендует на полноту изложения вопросов, связанных с формированием антиводородных атомов и тем более методов их исследования. Мы ставили себе цель лишь познакомить читателя с проблемами в одной из интереснейших областей современной физики, так, как они представляются на сегодняшний день. По сути дела, наука делает только первые шаги в изучении antimатерии, и нет сомнения, что уже в недалеком будущем мы станем свидетелями многих увлекательных открытий на этом пути. Дверь в антимир пока лишь чуть-чуть приоткрылась.

ЛИТЕРАТУРА

1. Bauer G., Boero G., Oelert W. et al. // Phys. Lett. B. 1996. Vol. 368. P. 251–254.
2. Мешков И.Н., Скринский А.Н. // Nucl. Instrum. and Meth. 1996. Vol. A379. P. 41–50.
3. Ландау Л.Д., Лишинец Е.М. Теория поля. М.: Наука, 1973.

* * *

Леонид Аркадьевич Мельников, доктор физико-математических наук, зав. кафедрой лазерной и компьютерной физики Саратовского государственного университета. Область научных интересов — лазерная физика, лазерная спектроскопия, нелинейная динамика, спектроскопия экзотических систем. Автор более 150 научных и методических работ.

Игорь Маркович Уманский, доктор физико-математических наук, профессор кафедры инженерной физики Саратовского государственного аграрного университета. Область научных интересов — молекулярная спектроскопия, динамика волновых пакетов, спектроскопия экзотических систем. Автор более 80 научных и методических работ.