

Падают ли антиматерия вниз? Эксперимент ALPHA-g впервые измерил действие гравитации на антиводород



Дата публикации: 08.07.2026

Почти сто лет один из самых необычных вопросов современной физики оставался без экспериментального ответа: падает ли антиматерия вниз так же, как обычная материя, или гравитация действует на нее иначе? С момента появления теории антиматерии, предложенной Полем Дираком в 1928 году, физики могли лишь строить гипотезы. Одни ожидали полного совпадения с предсказаниями общей теории относительности, другие допускали существование совершенно новой физики, в которой антиматерия могла бы даже испытывать гравитационное отталкивание. Лишь в 2023 году коллаборация ALPHA в ЦЕРН впервые напрямую измерила влияние гравитации на нейтральную антиматерию. Полученный результат оказался историческим: антиводород действительно падает под действием силы тяжести, однако центральное значение измеренного ускорения составило около 0,75 ускорения свободного падения обычного вещества, оставаясь совместимым с предсказанием общей теории относительности в пределах экспериментальной

погрешности.

Выбор именно антиводорода оказался принципиально важным. Измерять гравитацию для отдельных антипротонов или позитронов практически невозможно, поскольку даже чрезвычайно слабые электрические и магнитные поля создают силы, многократно превосходящие гравитационное притяжение Земли. Любая попытка наблюдать свободное падение заряженных античастиц неизбежно оказывается подавлена электромагнитными эффектами. Антиводород, состоящий из антипротона и позитрона, электрически нейтрален, поэтому влияние электромагнитных сил значительно уменьшается, позволяя исследовать именно гравитационное взаимодействие.

Получение антиводорода само по себе представляет выдающееся технологическое достижение. Антипротоны производятся на Антипротонном замедлителе ЦЕРН, где сначала рождаются при столкновениях высокоэнергетических протонов с мишенью, а затем постепенно охлаждаются и замедляются. После этого они объединяются с облаком позитронов, образуя нейтральные атомы антиводорода. Поскольку при контакте с обычным веществом антиматерия мгновенно аннигилирует, удерживать такие атомы можно исключительно с помощью сложных магнитных систем, не позволяющих им соприкоснуться со стенками установки.

Именно для решения этой задачи был создан эксперимент ALPHA-g. Его основой стала вертикальная магнитная ловушка высотой около двух метров, представляющая собой модифицированную ловушку Пеннинга-Мальмберга. Главной особенностью установки стало вертикальное расположение. Магнитные катушки создают потенциальные барьеры сверху и снизу, удерживая облако антиводорода в центре установки. Такое расположение позволяет непосредственно наблюдать влияние земной гравитации вдоль оси ловушки.

После накопления достаточного количества атомов исследователи начинают очень медленно, примерно за двадцать секунд, уменьшать магнитное поле. По мере ослабления удерживающих сил антиводород постепенно покидает ловушку. Если бы гравитация не оказывала никакого влияния, вероятность выхода атомов вверх и вниз была бы одинаковой. Однако при наличии земного притяжения возникает небольшая асимметрия распределения аннигиляций.

Каждое столкновение антиводорода со стенкой установки сопровождается аннигиляцией, в результате которой возникают характерные потоки вторичных частиц. Их положение с высокой точностью регистрируют радиальная время-проекционная камера и сцинтилляционные детекторы. Благодаря этому удается определить, где именно завершился движение каждый атом антиводорода.

Особую роль в эксперименте играет так называемый bias — искусственно создаваемая магнитная асимметрия, измеряемая в единицах ускорения свободного падения. Исследователи многократно повторяли эксперимент, изменяя величину этой асимметрии. При определенном значении магнитная сила полностью компенсировала влияние гравитации, и распределение аннигиляций становилось симметричным. Именно такое состояние наблюдалось при bias около $-1g$, что позволило оценить эффективное ускорение свободного падения антиводорода.

Хотя результат совместим с общей теорией относительности в пределах существующей неопределенности, его центральное значение оказалось ниже ожидаемого и составило примерно $0,75g$. Это обстоятельство вызвало большой интерес научного сообщества. Современная статистическая точность пока недостаточна, чтобы утверждать о существовании отклонения, однако сама возможность подобных различий делает дальнейшие исследования исключительно важными.

Если будущие измерения подтвердят, что антиводород действительно падает с ускорением, отличающимся от обычной материи, последствия окажутся революционными. Это будет означать нарушение слабого принципа эквивалентности — одного из фундаментальных положений общей теории относительности Альберта Эйнштейна. Согласно этому принципу, все тела независимо от состава и внутреннего строения должны двигаться в одном и том же гравитационном поле с одинаковым ускорением. Именно эта идея лежит в основе современной теории гравитации и огромного числа астрофизических моделей.

Подобное открытие сразу сделало бы необходимым создание принципиально новой теории, объединяющей гравитацию с квантовой физикой. Одной из наиболее обсуждаемых концепций сегодня является гипотеза гравитационной поляризации квантового вакуума. Она предполагает, что виртуальные пары частица-античастица могут вести себя подобно гравитационным диполям. Если материя и антиматерия обладают противоположными гравитационными зарядами, вакуум начинает поляризоваться в присутствии обычной массы, создавая дополнительное гравитационное поле.

Такая идея выглядит необычной, однако она способна предложить единое объяснение сразу нескольким крупным космологическим загадкам. В частности, дополнительная поляризация вакуума потенциально могла бы воспроизводить эффекты, которые сегодня объясняются существованием темной материи. Аналогичные механизмы обсуждаются и применительно к темной энергии, напряжению Хаббла, а также неожиданно быстрому формированию первых галактик в молодой Вселенной.

Разумеется, нынешний результат ALPHA-g нельзя считать подтверждением подобных гипотез. Точность измерений пока недостаточна, чтобы говорить о нарушении принципа эквивалентности. Однако впервые появилась возможность проверять такие идеи не только с помощью космологических наблюдений, но и в контролируемом лабораторном эксперименте с отдельными атомами антиматерии.

Именно здесь возникает удивительная философская сторона открытия. Еще недавно изучение антиматерии казалось исключительно задачей физики элементарных частиц, тогда как происхождение темной материи или эволюция Вселенной относились к космологии. Сегодня становится очевидно, что эксперименты с единичными атомами антиводорода и наблюдения за крупнейшими структурами Вселенной могут исследовать одни и те же фундаментальные законы природы. Возможно, именно на пересечении этих направлений скрывается новая физика, способная изменить наше понимание пространства, времени и самой гравитации.

Историческое значение эксперимента ALPHA-g заключается уже в самом факте первого прямого измерения действия силы тяжести на нейтральную антиматерию. Независимо от окончательного результата будущих экспериментов, человечество впервые получило инструмент для проверки одного из фундаментальных принципов современной физики. Следующее поколение измерений с использованием адиабатического охлаждения, более совершенной магнитометрии и новых методов удержания антиводорода позволит значительно повысить точность определения ускорения свободного падения. Эти эксперименты либо окончательно подтвердят справедливость принципа эквивалентности для антиматерии, либо откроют дверь в совершенно новую область физики. В любом случае антиматерия перестает быть лишь экзотическим объектом спектроскопии и превращается в один из важнейших инструментов исследования фундаментальной природы Вселенной, напоминая, что даже самые надежные законы науки могут оказаться лишь приближением к более глубокой и пока еще неизвестной реальности.