

Почему квантовые эффекты темной материи могут навсегда остаться невидимыми для науки



Дата публикации: 22.05.2026

Темная материя остается одной из самых больших загадок современной физики. Ученые уверены, что она составляет большую часть массы Вселенной, влияет на движение галактик и формирование космических структур, однако напрямую обнаружить ее до сих пор не удалось. Несмотря на десятилетия экспериментов, человечество по-прежнему не знает, из чего именно состоит эта загадочная субстанция.

Одним из наиболее перспективных кандидатов на роль темной материи считается аксион — гипотетическая сверхлегкая частица, существование которой предсказывается рядом теоретических моделей. Аксионы привлекают особое внимание физиков благодаря тому, что они потенциально могут объяснить сразу несколько фундаментальных проблем современной науки: природу темной материи, особенности квантовой хромодинамики и поведение ранней Вселенной.

Новое исследование ученых из Чикагский университет, Национальная

лаборатория имени Лоуренса в Беркли и Калифорнийский университет в Беркли показало, что внутренние квантовые свойства аксионной темной материи, вероятно, принципиально недоступны для прямого наблюдения. Работа опубликована в журнале *Physical Review Letters* и уже вызвала большой интерес среди специалистов по фундаментальной физике и космологии.

Темная материя практически не взаимодействует с обычным веществом. Она не излучает свет, не отражает его и не поглощает электромагнитное излучение. Именно поэтому ее невозможно увидеть напрямую даже самыми мощными телескопами. О существовании темной материи ученые судят только по ее гравитационному воздействию на звезды, галактики и крупномасштабную структуру Вселенной.

Аксионы считаются особенно необычным кандидатом на роль темной материи из-за своей чрезвычайно малой массы. По современным теориям, огромное количество таких частиц может вести себя скорее как гигантская квантовая волна, чем как набор отдельных частиц.

Именно поэтому в большинстве моделей аксионная темная материя описывается как классическое поле, напоминающее электромагнитное поле. Однако оставался открытым важный вопрос: действительно ли аксионы ведут себя классически, или же внутри них скрываются квантовые эффекты, которые просто пока не удалось обнаружить?

Для ответа на этот вопрос исследователи разработали полностью квантово-механическую модель обнаружения аксионов и сравнили ее с традиционным классическим подходом. Их задача заключалась в том, чтобы определить, способен ли хоть какой-либо эксперимент различить истинно квантовую природу аксионной темной материи.

Результаты оказались весьма неожиданными. Расчеты показали, что даже если аксионы обладают внутренними квантовыми свойствами, современные детекторы практически неизбежно будут воспринимать их как классическое поле.

Причина заключается сразу в нескольких фундаментальных ограничениях. Во-первых, аксионы взаимодействуют с обычной материей чрезвычайно слабо. Во-вторых, в космосе присутствует колоссальное количество аксионов, и эффекты отдельных квантовых состояний начинают усредняться.

Фактически огромное количество аксионных волн накладывается друг на друга таким образом, что любые квантовые особенности становятся практически незаметными. Остаются лишь крайне слабые статистические отклонения более высокого порядка, которые невозможно зафиксировать существующими

технологиями.

Особенно впечатляющим оказался вывод о временных масштабах. По расчетам исследователей, даже идеально спроектированный эксперимент должен был бы работать значительно дольше возраста Вселенной, чтобы накопить достаточно данных для регистрации внутренних квантовых эффектов аксионной темной материи.

Это означает, что для практической физики аксионы почти всегда будут выглядеть как классическое поле, независимо от их истинной квантовой природы.

Работа помогает решить давний спор внутри сообщества исследователей темной материи. В последние годы активно обсуждался вопрос о том, могут ли современные квантовые технологии — сверхпроводящие сенсоры, квантовые резонаторы, сверхточные магнитометры — дать доступ к квантовым свойствам темной материи.

Новое исследование показывает, что проблема гораздо глубже технических ограничений. Даже самые совершенные приборы сталкиваются с фундаментальной границей, связанной с самой природой взаимодействия аксионов с материей.

Интересно, что аналогичные выводы могут относиться и к другим ультралегким кандидатам на роль темной материи. Это означает, что значительная часть скрытой материи Вселенной может оставаться квантово «невидимой» для человечества даже при дальнейшем развитии технологий.

Исследование также имеет важное значение для будущих проектов поиска темной материи. Сегодня в мире работают десятки экспериментов, пытающихся обнаружить аксионы: ADMX, MADMAX, HAYSTAC, ORGAN и другие установки. Новая работа помогает уточнить, какие именно сигналы стоит искать и какие ожидания являются реалистичными.

При этом исследователи подчеркивают, что результаты не делают поиск аксионов бессмысленным. Напротив, они подтверждают, что классические модели аксионного поля хорошо описывают поведение темной материи в экспериментальных условиях и могут использоваться для дальнейших исследований.

Современная космология предполагает, что темная материя составляет около 85% всей материи во Вселенной. Без нее невозможно объяснить вращение галактик, формирование скоплений галактик и структуру космической паутины. Однако человечество до сих пор не знает, что именно скрывается за этим

названием.

Аксионы остаются одним из главных кандидатов на решение этой загадки. Они могут быть буквально повсюду, проходя сквозь Землю, людей и всю материю почти без взаимодействия. При этом их существование способно определять эволюцию всей Вселенной.

Работа американских физиков показывает еще одну удивительную особенность современной науки: некоторые свойства природы могут существовать объективно, но при этом быть практически недоступными для наблюдения. Квантовые эффекты аксионной темной материи, возможно, принадлежат именно к таким явлениям — фундаментально существующим, но скрытым за пределами возможностей любых реальных экспериментов.

Исследование также подчеркивает, насколько тесно сегодня связаны квантовая механика, астрофизика, космология и теория информации. Поиск темной материи постепенно превращается не только в задачу экспериментальной физики, но и в исследование пределов самого человеческого познания.

Ссылка: «Внутренние квантовые эффекты аксионной темной материи необнаружимы» DOI: [10.1103/9mff-p5k6](https://doi.org/10.1103/9mff-p5k6).