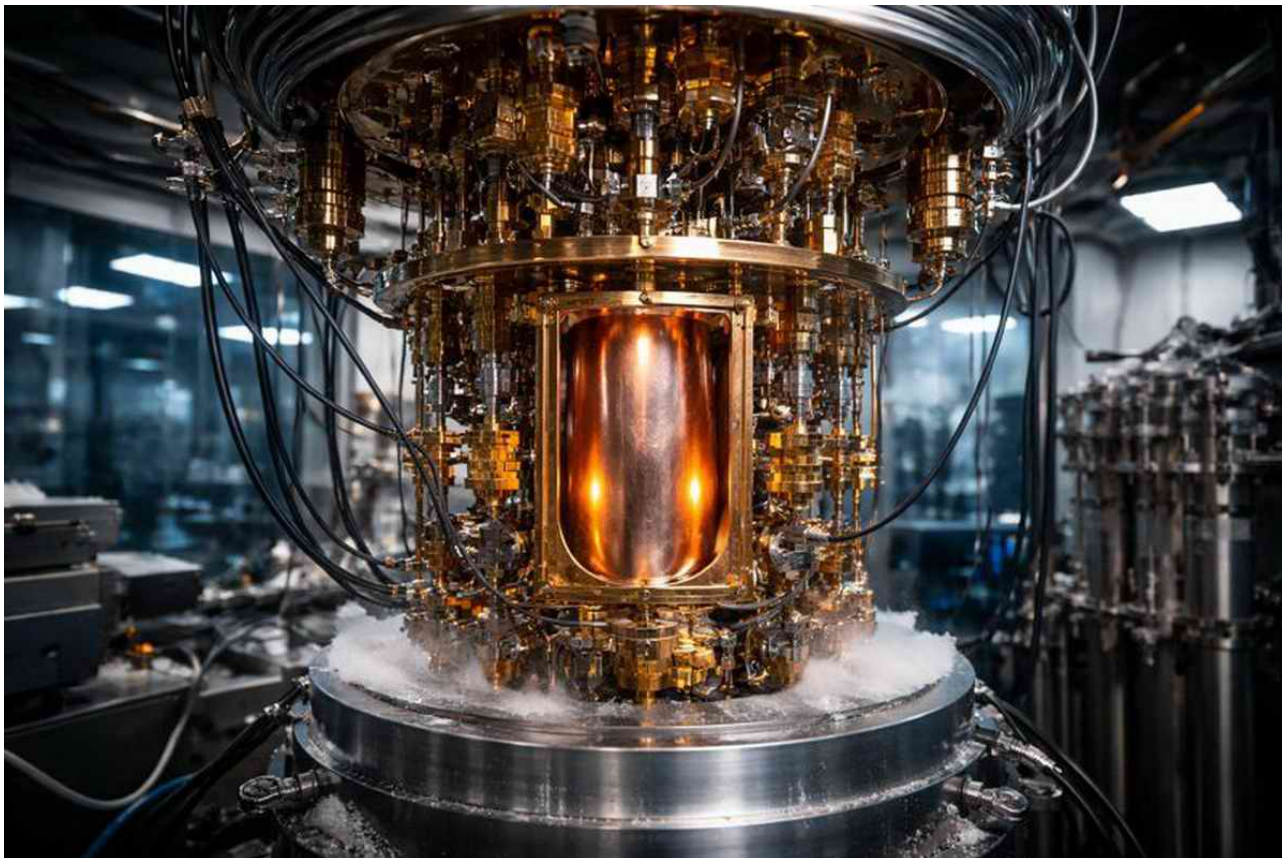


Квантовый галоскоп и охота за темной материей: как физики ищут аксионы при сверхнизких температурах



Дата публикации: 31.12.2025

Одна из главных загадок современной физики заключается в природе темной материи — невидимой формы вещества, которая не излучает и не поглощает свет, но оказывает решающее влияние на эволюцию галактик и структуру Вселенной. Среди множества гипотетических частиц, предложенных в качестве кандидатов на роль темной материи, особое место занимают аксионы — чрезвычайно легкие бозоны, которые одновременно могут объяснять отсутствие нарушения CP-симметрии в сильных ядерных взаимодействиях и составлять значительную долю космической скрытой массы.

Согласно теоретическим моделям, аксионы возникли в ранней Вселенной и продолжают существовать сегодня в виде холодного, почти неуловимого фона. Их ключевое свойство заключается в крайне слабом взаимодействии с обычной материей, однако в присутствии сильного магнитного поля аксионы могут спонтанно превращаться в фотоны микроволнового диапазона. Именно на этом эффекте основан метод галоскопов — специализированных детекторов,

предназначенных для поиска аксионной темной материи.

Коллаборация QUAX, объединяющая исследователей из различных институтов Италии, разрабатывает и эксплуатирует галоскопы нового поколения в Национальных лабораториях Легнарo и Фраскати. Их эксперименты ориентированы на высокочастотный диапазон выше 10 ГГц, что соответствует поиску аксионов с относительно большой массой, превышающей 40 микроэлектронвольт — области, которая до недавнего времени оставалась слабо исследованной.

В основе эксперимента лежит микроволновый резонатор из меди, помещённый в мощное магнитное поле и охлаждённый до температур порядка десятков миллиКельвинов с помощью криогенного холодильника с мокрым разбавлением. Многоступенчатая система охлаждения позволяет поэтапно снижать температуру от комнатной до примерно 70 мК, резко уменьшая тепловой шум и повышая чувствительность измерений. Магнит при этом полностью охватывает резонатор, не контактируя с ним напрямую, что обеспечивает стабильность и однородность поля.

Принцип работы галоскопа основан на регистрации сверхслабого сигнала мощности, возникающего при преобразовании аксионов в реальные фотоны внутри резонаторной полости. Ожидаемая мощность этого сигнала чрезвычайно мала и находится значительно ниже фонового шума, поэтому для его выделения используется квантово-ограниченная цепь усиления. Настройка резонатора позволяет сканировать частоты и, следовательно, исследовать различные возможные массы аксионов. При каждом положении полости измеряется спектр шума, который затем анализируется на предмет наличия статистически значимого избытка сигнала.

Особенностью установки QUAX является механически настраиваемая медная полость, конструкция которой напоминает раскрывающуюся раковину. Изменяя геометрию резонатора, исследователи плавно сдвигают его резонансную частоту, расширяя диапазон поиска без необходимости полной перестройки системы. Такой подход повышает эффективность эксперимента и позволяет проводить длительные автоматизированные измерения.

Пока эксперименты не выявили сигналов, которые можно было бы однозначно интерпретировать как преобразование аксионов в фотоны. Тем не менее полученные результаты имеют большое значение: они демонстрируют работоспособность высокочастотного квантового галоскопа, подтверждают возможность стабильной и точной настройки резонатора, а также позволяют наложить новые ограничения на параметры аксионных моделей. Отсутствие сигнала не означает неудачу, а последовательно исключает часть теоретических

сценариев, сужая пространство возможных свойств темной материи.

В ближайших планах коллаборации — дальнейшее повышение чувствительности детекторов, расширение диапазона исследуемых масс и внедрение нескольких резонаторных полостей с улучшенными характеристиками. Одновременно ведётся работа над полной автоматизацией системы, что позволит галоскопу длительное время работать в автономном режиме и накапливать статистику без постоянного вмешательства операторов.

Поиск аксионов с помощью квантовых галоскопов остаётся одним из самых технологически сложных и концептуально чистых подходов к проблеме темной материи. Успешное обнаружение аксионного сигнала стало бы первым прямым свидетельством существования темной материи как конкретной частицы, а даже отрицательные результаты играют важную роль, направляя теорию и эксперимент к более точному пониманию скрытой материи, заполняющей Вселенную.

Ссылка: «Поиск постинфляционных КХД-аксионов с помощью квантово-ограниченного перестраиваемого микроволнового приемника» DOI: [10.1103/4dv9-72t5](https://doi.org/10.1103/4dv9-72t5).