

Ученые научились получать более точные карты глюонов внутри атомных ядер с помощью квантовой интерференции



Дата публикации: 18.06.2026

Современная физика все глубже проникает в структуру материи, пытаясь понять, из чего состоит окружающий мир на самых фундаментальных уровнях. Если еще сто лет назад ученые только открывали существование атомного ядра, то сегодня они стремятся составить подробные карты частиц и полей, скрытых внутри протонов и нейтронов. Одним из главных объектов такого исследования являются глюоны — элементарные частицы, которые выполняют роль своеобразного клея, удерживающего кварки внутри ядерной материи. Новое исследование международной коллаборации STAR, работавшей на Релятивистском коллайдере тяжелых ионов RHIC в Брукхейвенской национальной лаборатории США, позволило сделать важный шаг к созданию наиболее точных изображений распределения глюонов внутри атомных ядер.

Полученные результаты опубликованы в журнале *Physical Review Letters* и уже рассматриваются как важная подготовка к работе будущего электронно-ионного коллайдера EIC, который станет одним из самых совершенных

инструментов для изучения структуры материи в XXI веке.

Обычно исследования на ускорителях частиц ассоциируются с мощными столкновениями атомных ядер, разгоняемых почти до скорости света. Однако новое открытие связано не с прямыми ударами, а с событиями, когда ядра проходят чрезвычайно близко друг к другу, практически не сталкиваясь. На первый взгляд такие события могут показаться менее интересными, однако именно они создают уникальные условия для изучения внутреннего устройства материи.

Когда тяжелые ионы движутся по ускорительному кольцу с околосветовой скоростью, вокруг них возникает мощное электромагнитное поле. С точки зрения квантовой физики это поле можно рассматривать как облако фотонов — частиц света. При близком прохождении двух ядер фотоны одного из них способны взаимодействовать с глюонами внутри другого ядра. Такие взаимодействия становятся своеобразным микроскопом, позволяющим исследовать структуру ядер без их разрушения.

Принцип напоминает использование рентгеновских лучей в медицине. Как рентген помогает увидеть скрытые структуры человеческого тела, так и фотоны позволяют заглянуть внутрь атомного ядра. Разница лишь в масштабе: если медицинская визуализация работает на уровне миллиметров, то здесь речь идет о расстояниях в миллиарды раз меньших.

Особый интерес к глюонам связан с тем, что именно они отвечают за сильное взаимодействие — одну из четырех фундаментальных сил природы. Несмотря на то что глюоны не обладают массой покоя, именно их энергия и взаимодействия обеспечивают большую часть массы протонов и нейтронов. По сути, значительная часть массы обычного вещества во Вселенной возникает благодаря динамике глюонов.

Для изучения этих процессов физики использовали частицы, возникающие при взаимодействии фотонов и глюонов. Ранее в аналогичных экспериментах исследовались ро-мезоны и их распады на пионы. Однако такая методика имела ограничения, поскольку относительно легкие частицы быстро распадались и создавали неопределенность в интерпретации результатов.

В новом исследовании ученые сосредоточились на более тяжелых и компактных частицах — мезонах J/ψ . Эти частицы существуют дольше и позволяют получать значительно более детальную информацию о происходящих процессах. Кроме того, продукты их распада обладают важным квантовым свойством — спином, которое играет ключевую роль в новом методе визуализации.

Одним из наиболее интересных результатов работы стало обнаружение так называемой перевернутой квантовой интерференции. Обычно интерференция ассоциируется с наложением волн, при котором одни области усиливаются, а другие ослабляются. В случае частиц J/ψ исследователи зафиксировали необычный эффект: картина интерференции оказалась инвертированной по сравнению с тем, что наблюдалось в предыдущих экспериментах.

Если представить интерференционную картину как чередование пиков и впадин на поверхности воды, то новый результат выглядит так, словно вершины и углубления поменялись местами. Это переворачивание связано со спиновыми свойствами дочерних частиц — электронов и позитронов, возникающих при распаде J/ψ -мезонов.

Особенно важно, что аналогичная картина наблюдалась при экспериментах с несколькими типами атомных ядер: золотом, цирконием и рутением. Совпадение результатов с теоретическими предсказаниями подтвердило правильность интерпретации наблюдаемого эффекта и существенно повысило доверие к новому методу исследования.

Однако обнаружение необычной интерференции стало лишь промежуточным этапом. Главная цель ученых заключается в создании максимально точных карт распределения глюонов внутри ядер. Для этого используются данные о направлениях движения, импульсах и спиновых характеристиках частиц, возникающих после взаимодействия фотонов с глюонами.

Фактически исследователи научились определять местоположение отдельных глюонов внутри ядра с беспрецедентной точностью. Такой подход можно сравнить с высокотехнологичной системой навигации, способной определить координаты объекта на уровне отдельных миллиардных долей метра. Только в данном случае речь идет о масштабах, которые еще на много порядков меньше.

Полученные результаты имеют огромное значение для будущего электронно-ионного коллайдера EIC. Эта установка будет использовать электроны в качестве источников виртуальных фотонов для получения еще более детальных изображений внутренней структуры протонов и атомных ядер. Новый метод фактически стал экспериментальной проверкой технологий, которые будут лежать в основе будущей научной программы EIC.

Одной из главных задач будущих исследований станет поиск признаков насыщения глюонов. Согласно современным теориям квантовой хромодинамики, при экстремально высоких энергиях количество глюонов внутри ядра может становиться настолько большим, что процессы их рождения и исчезновения

начинают уравнивать друг друга. В результате может возникнуть новое состояние материи, известное как конденсат цветного стекла.

Существование такого состояния предсказывается теорией уже много лет, однако прямых экспериментальных доказательств пока не получено. Более точная визуализация глюонов может стать ключом к решению этой задачи и открыть новую страницу в изучении фундаментальных взаимодействий.

Исследование демонстрирует, насколько далеко продвинулась современная физика в понимании микромира. Используя фотоны, квантовую интерференцию, спиновые эффекты и сложнейшие методы анализа данных, ученые получают возможность буквально заглядывать внутрь атомных ядер и наблюдать процессы, происходящие на расстояниях, недоступных никакому классическому микроскопу. Эти результаты не только расширяют представления о структуре материи, но и создают основу для будущих открытий, которые помогут объяснить происхождение массы, свойства сильного взаимодействия и фундаментальное устройство Вселенной.

Ссылка: «Доказательства эффектов спиновой интерференции при эксклюзивном фоторождении $\gamma/\gamma \rightarrow \pi^+\pi^-$ в ультрапериферийных столкновениях тяжелых ионов» DOI: [10.1103/tcdb-ldh8](https://doi.org/10.1103/tcdb-ldh8).