

Эксперимент ЦЕРН показал неожиданное поведение глюонов внутри атомных ядер



Дата публикации: 12.08.2026

Большой адронный коллайдер позволил физикам заглянуть внутрь атомного ядра с разрешением значительно меньше размера протона и получить новые данные о поведении глюонов — частиц, которые обеспечивают сильное взаимодействие между кварками. Результаты эксперимента ALICE в ЦЕРНе показывают, что традиционная модель ядерного затенения может быть недостаточной для объяснения происходящего при высоких энергиях. Наблюдения оказались совместимы с другим эффектом, предсказанным квантовой хромодинамикой, — насыщением глюонов.

Исследование опубликовано в *Physical Review Letters*. Его ключевой результат — первое многомерное измерение некогерентного фотоядерного рождения J/ψ одновременно в зависимости от энергии взаимодействия и передаваемого импульса. За сложным названием скрывается своеобразный способ сделать снимок внутренней структуры атомного ядра, причем менять масштаб такого изображения физики могут непосредственно во время анализа эксперимента.

Чтобы понять значение работы, необходимо вспомнить, что протон или нейтрон нельзя представить просто как три неподвижных кварка. Внутри них существует динамическая квантовая среда из кварков, антикварков и глюонов. Глюоны переносят сильное взаимодействие и связывают кварки между собой. Энергия этих полей и взаимодействий вносит решающий вклад в массу обычной материи, поэтому исследование глюонов связано с фундаментальным вопросом о происхождении структуры видимого вещества.

Особенно сложной ситуация становится внутри тяжелого атомного ядра, где множество протонов и нейтронов находятся рядом. При высоких энергиях количество доступных глюонов может становиться очень большим. Физики пытаются понять, продолжается ли рост их плотности практически независимо или в какой-то момент глюоны начинают настолько сильно взаимодействовать друг с другом, что дальнейшее увеличение плотности замедляется.

Для исследования этого режима команда ALICE использовала ядра свинца, разогнанные Большим адронным коллайдером почти до скорости света. В данном случае ученых интересовали не обычные лобовые столкновения. Ядра проходили рядом друг с другом, не соприкасаясь непосредственно. При таких ультрапериферических столкновениях чрезвычайно сильное электромагнитное поле быстрого ядра можно рассматривать как источник высокоэнергетических фотонов.

Один из таких фотонов способен взаимодействовать с другим ядром и породить J/ψ — короткоживущую частицу, состоящую из очарованного кварка и его антикварка. Для физиков J/ψ ценна не сама по себе: особенности ее рождения чрезвычайно чувствительны к распределению глюонов. Поэтому частица становится зондом, с помощью которого можно исследовать структуру ядра, недоступную прямому наблюдению.

Важную роль играет различие между когерентным и некогерентным рождением J/ψ . В первом случае взаимодействие в большей степени отражает усредненную структуру всего ядра. Некогерентный процесс чувствителен к локальным изменениям и флуктуациям плотности глюонов. Это позволяет перейти от общей картины к поиску небольших областей повышенной плотности — своеобразных глюонных горячих точек.

Разрешение такого квантового микроскопа определяется передаваемым импульсом. Изменяя исследуемый диапазон, физики фактически рассматривают ядро на разных пространственных масштабах. В работе ALICE удалось изучить характерные размеры около 0,6, 0,3 и 0,2 фемтометра. Один фемтометр равен одной квадриллионной метра, а максимальное достигнутое разрешение соответствует структурам примерно в четыре раза меньше диаметра протона.

Исследование охватило широкий диапазон энергий взаимодействия фотона с ядром — примерно от 20 до 633 миллиардов электронвольт. Одновременное изучение энергетической зависимости и передаваемого импульса позволило проверить модели значительно строже, чем измерения, в которых эти параметры рассматриваются менее детально.

Именно на самых малых исследованных масштабах появилась наиболее интересная особенность. Скорость некогерентного рождения J/ψ заметно снижалась. Статистическая значимость наблюдаемого подавления составила около трех стандартных отклонений. Это еще не тот уровень, который в физике частиц принято считать окончательным открытием, но результат достаточно выражен, чтобы серьезно проверять его происхождение.

Традиционное объяснение уменьшения количества доступных глюонов в тяжелом ядре связано с ядерным затенением. Упрощенно его можно представить как перекрытие глюонных распределений: структура ядра изменяет эффективное количество глюонов, участвующих во взаимодействии, по сравнению с простой суммой отдельных протонов и нейтронов. Подобные модели успешно описывали многие предыдущие экспериментальные данные.

Однако новые результаты ALICE показывают, что одного ядерного затенения может оказаться недостаточно, особенно когда эксперимент начинает различать очень маленькие структуры. Наблюдаемое подавление лучше согласуется со сценарием, в котором существенную роль играет насыщение глюонов.

Идея насыщения возникает из квантовой хромодинамики — фундаментальной теории сильного взаимодействия. При увеличении энергии число глюонов с определенными характеристиками быстро растет. Но этот рост не может бесконечно продолжаться без взаимного влияния частиц. При достаточно высокой плотности начинают усиливаться нелинейные взаимодействия и процессы рекомбинации. В результате появляется режим, в котором глюонное поле ведет себя коллективно, а увеличение его плотности ограничивается собственными взаимодействиями.

Такой режим особенно интересен потому, что находится на границе между поведением отдельных квантовых частиц и коллективной динамикой чрезвычайно плотного глюонного поля. Его исследование может помочь понять начальное состояние тяжелых ядер непосредственно перед их столкновением, а значит, повысить точность интерпретации других экспериментов Большого адронного коллайдера.

Новые данные важны и для будущих ускорителей. Одной из ключевых задач строящегося в США Electron-Ion Collider станет детальное картирование

распределения кварков и глюонов внутри протонов и ядер. Результаты ALICE показывают, какие пространственные масштабы и энергетические режимы особенно перспективны для поиска эффектов насыщения.

При этом говорить об окончательном опровержении ядерного затенения пока преждевременно. Затенение и насыщение не обязательно являются полностью взаимоисключающими явлениями, а интерпретация данных зависит от конкретных теоретических моделей. Главный результат эксперимента состоит в другом: точность измерений достигла уровня, при котором разные представления о глюонной структуре ядра начинают давать экспериментально различные прогнозы.

Физики получили возможность исследовать не просто среднюю плотность глюонов, а ее локальные флуктуации на масштабах существенно меньше протона. Это превращает тяжелое атомное ядро из условно однородного объекта в сложную динамическую систему, внутреннее устройство которой меняется с масштабом наблюдения и энергией взаимодействия.

Следующие измерения должны показать, насколько устойчив обнаруженный эффект и можно ли однозначно связать его с насыщением глюонов. Если такая интерпретация подтвердится с большей статистической значимостью, физики получат важное экспериментальное свидетельство коллективного режима сильного взаимодействия, который теоретически обсуждается уже много лет. А вместе с ним появится более точная картина того, как кварки и глюоны формируют атомные ядра и в конечном счете обычную материю окружающего мира.

Ссылка: «Доказательства подавления J/ψ при некогерентном фотоядерном производстве» DOI: [10.1103/jmwb-75m7](https://doi.org/10.1103/jmwb-75m7).