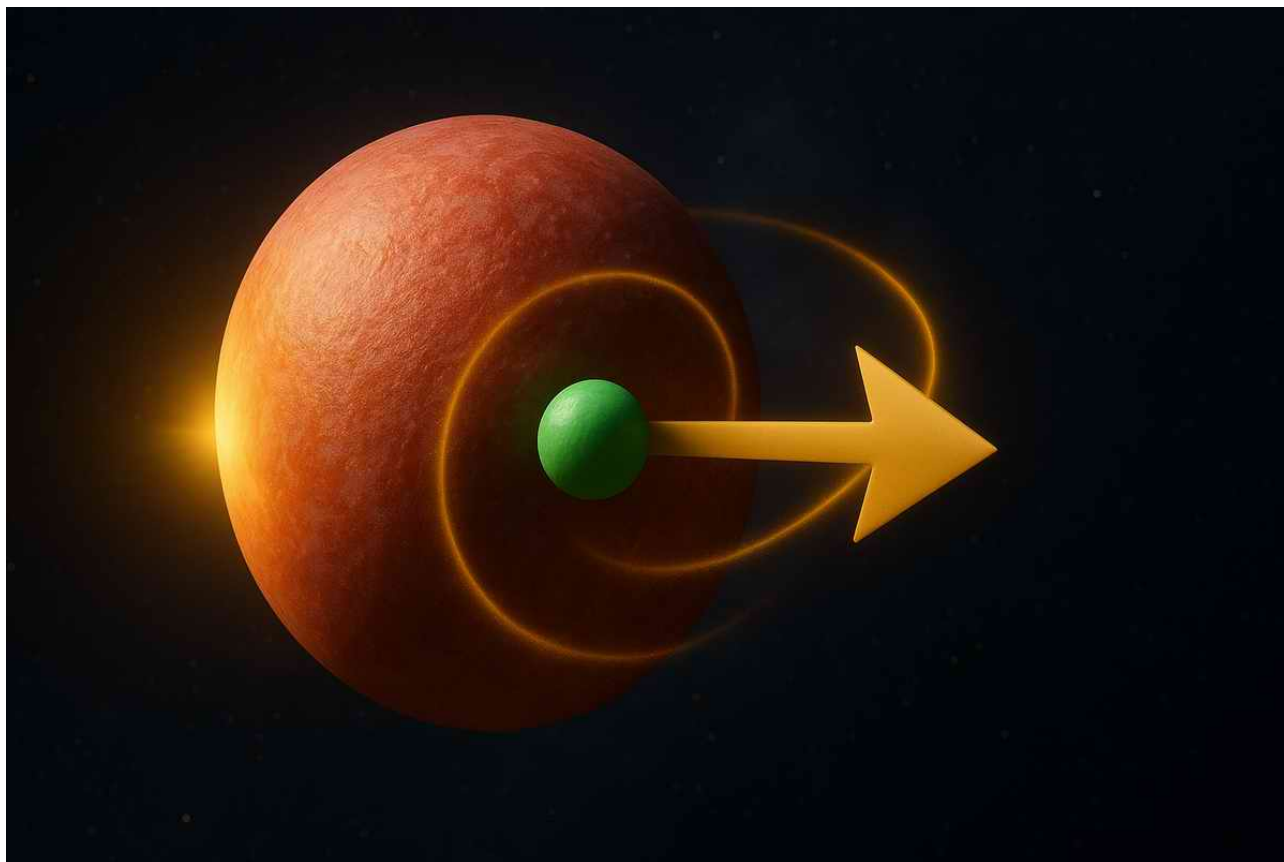


Как протон скрывает своё внутреннее движение: новая теория раскрывает динамику кварков



Дата публикации: 13.11.2025

Новая работа физиков-ядерщиков предлагает наиболее точное на сегодня представление о том, как именно движутся кварки внутри протона. Хотя сами кварки невозможно наблюдать напрямую — они никогда не существуют в свободном состоянии — их движение определяет массу, структуру и спин всей адронной материи. Чтобы приблизиться к ответу на давний вопрос о том, что происходит в недрах каждого протона, учёные разработали теоретический подход, позволяющий вычислить ключевую величину, связанную с поперечным импульсом кварков.

Фундаментальной задачей было понять, как именно ведут себя кварки при вращении протона и как их движение меняется при различных энергиях взаимодействий. Раньше физикам удавалось получить лишь приблизительные оценки благодаря моделям и интерпретации данных столкновений частиц. Но теперь появилась возможность проводить расчёты практически «с нуля», опираясь на строгие методы квантовой хромодинамики — теории, описывающей сильные взаимодействия. Новый подход делает возможным построение более

реалистичной трёхмерной картины движения кварков, особенно в области малых поперечных импульсов, где классические методы часто давали слишком большие неопределённости.

Исследователи из Брукхейвенской и Аргоннской национальных лабораторий сосредоточились на вычислении ядра Коллинза–Сопера — параметра, который определяет, как распределение поперечного импульса кварков зависит от энергии столкновения. Для этого они использовали решеточную квантовую хромодинамику, представляя пространство-время в виде четырёхмерной решётки и моделируя взаимодействия кварков и глюонов в условиях, максимально близких к реальным. Такой метод требует колоссальных вычислительных ресурсов, и до недавнего времени именно сложность расчётов ограничивала точность результатов.

Новый теоретический подход позволил существенно упростить процедуру и повысить точность в наиболее «проблемной» области небольших поперечных движений, где проявляются нелинейные и сильно связанные эффекты сильного взаимодействия. Полученные данные не только подтвердили предыдущие результаты, но и значительно улучшили их, уменьшив неопределённости и расширив применимость метода. Впервые стало возможным надёжно оценить поведение кварков в тех режимах, которые ранее были труднодоступны для расчётов.

Сравнение с реконструкциями, основанными на физических моделях, показало высокую степень согласия: новая теория воспроизводит известные данные и одновременно помогает точнее предсказывать поведение кварков при других энергиях. Это особенно важно в преддверии экспериментов на электронно-ионном коллайдере, где столкновения поляризованных протонов с электронами позволят исследовать структуру материи с беспрецедентной детализацией. Усовершенствованные расчёты помогут интерпретировать будущие данные, связать движение кварков и глюонов со спином протона и уточнить фундаментальные представления о строении адронов.

Понимание динамики внутри протона — не просто вопрос академического интереса, а ключ к объяснению того, как формируется спин и структура всей видимой материи. Новый метод позволяет отказаться от чрезмерно сложных моделей сильных взаимодействий в области малых импульсов и перейти к систематическим вычислениям, основанным на принципах КХД. Это открывает путь к созданию полной трёхмерной картины движения элементарных частиц внутри протонов и нейтронов и даёт мощный инструмент для анализа данных следующих поколений коллайдеров.

В конечном счёте, комбинация решёточных расчётов, новых теоретических

идей и высокоточных экспериментов позволит физикам понять, почему протоны обладают именно таким спином, как распределяются импульсы между кварками и глюонами и какие механизмы лежат в основе динамики сильного взаимодействия. Новая теория — важный шаг к тому, чтобы увидеть скрытую структуру материи в её истинном трёхмерном движении.

Ссылка: «Распределения партонов из усиленных полей в кулоновской калибровке» DOI: [10.1103/PhysRevD.109.094506](https://doi.org/10.1103/PhysRevD.109.094506).