

Призраки порядка в эпицентре ядерного хаоса: как Большой адронный коллайдер подтвердил незыблемость квантовых законов

Дата публикации: 09.01.2026

Когда на гигантских скоростях внутри Большого адронного коллайдера сталкиваются два протона, окружающее пространство на мгновение превращается в бурлящий океан первобытной материи. Это событие со стороны выглядит как абсолютный хаос, где мириады субатомных частиц разлетаются во все стороны, рождаясь из чистой энергии столкновения. Долгое время считалось, что ранняя стадия этого процесса, когда протоны распадаются на свои составляющие — кварки и глюоны, — гораздо сложнее и запутаннее, чем финальный этап, когда из этого «супа» формируются новые стабильные частицы. Однако последние данные, полученные в ходе совместной работы ученых из Польши и Швеции, перевернули это представление, обнаружив удивительный математический порядок там, где раньше видели лишь беспорядок.

Чтобы понять суть открытия, нужно обратиться к понятию энтропии, которая в физике служит мерой хаоса или количества возможных состояний системы. По всем правилам классического мира, сложная система из множества взаимодействующих компонентов должна обладать огромной энтропией, которая меняется по мере охлаждения и упрощения структуры. В момент удара протоны, которые сами по себе являются сложными кластерами партонов, превращаются в плотную сеть глюонных взаимодействий. Казалось бы, количество информации, необходимое для описания этого момента, должно быть колоссальным. Но исследователи обнаружили, что энтропия на этой сверххранной «партонной» стадии практически идентична энтропии адронов, которые регистрируют детекторы спустя мгновения. Это означает, что несмотря на внешнюю неразбериху, система сохраняет строгую информационную преемственность.

Это открытие стало возможным благодаря существенному улучшению так называемых дипольных моделей. В этих математических конструкциях глюоны представляются как пары из кварка и антикварка, обладающие особым квантовым свойством — цветовым зарядом. Физики Кшиштоф Кутак и Шандор Локос смогли модифицировать существующие модели, объединив их с теорией сложности, что позволило описывать поведение частиц не только при рекордных, но и при относительно низких энергиях. Проверка этой модели на данных четырех крупнейших экспериментов ЦЕРН — ALICE, ATLAS, CMS и LHCb — показала поразительную точность. Теория идеально совпала с практикой в

диапазоне энергий от 0,2 до 13 тераэлектронвольт, подтвердив, что информация внутри протонного столкновения не исчезает и не берется из ниоткуда.

Для мира науки этот результат имеет глубокое философское и прикладное значение, так как он напрямую подтверждает принцип унитарности квантовой механики. Унитарность гласит, что суммарная вероятность всех возможных исходов любого процесса всегда должна быть равна единице, а информация о начальном состоянии системы должна теоретически позволять восстановить её прошлое или предсказать будущее. Если бы энтропия в процессе столкновения резко менялась, это могло бы указывать на «утечку» информации в неведомые измерения или фундаментальную ошибку в нашем понимании квантовой хромодинамики. Тот факт, что порядок сохраняется даже при таких экстремальных нагрузках, доказывает: законы микромира работают безупречно даже в самых суровых условиях, которые только может создать человек.

В ближайшее десятилетие исследователи намерены провести еще более детальные проверки своей модели. После запланированной модернизации ускорителя БАК и запуска новых детекторов ученые смогут заглянуть в области еще более плотных глюонных систем, где частицы упакованы так тесно, что начинают проявлять коллективные эффекты, напоминающие поведение жидкости. Параллельно с этим в США строится Электронно-ионный коллайдер, который позволит «просвечивать» протоны элементарными электронами, словно рентгеном, предоставляя еще более чистые данные о внутреннем устройстве материи. Эти исследования не просто расширяют наше понимание микромира, но и закладывают фундамент для будущих технологий, основанных на манипулировании фундаментальными свойствами вещества.

Ключевые аспекты исследования включают следующие важные пункты: эксперименты подтвердили сохранение энтропии на всех стадиях столкновения частиц; усовершенствованная дипольная модель точно описывает данные в широком диапазоне энергий; принцип унитарности квантовой механики получил прямое экспериментальное подтверждение; данные четырех детекторов ЦЕРН позволили создать единую картину квантового порядка.

Разгадка того, как информация кодируется внутри протона и как она передается продуктам столкновения, может стать ключом к пониманию первых мгновений существования Вселенной после Большого взрыва. Тогда вся материя находилась в состоянии той самой кварк-глюонной плазмы, которую физики сегодня воссоздают в лабораториях. Если порядок существует в крошечной капле плазмы внутри коллайдера, значит, он был заложен в саму ткань мироздания с самого начала, и человечество только начинает учиться читать этот сложный, но гармоничный код природы.

Ссылка: «Энтропия и множественность адронов в пределе высоких энергий в рамках моделей дипольного каскада» DOI: [10.1103/23wn-66np](https://doi.org/10.1103/23wn-66np).