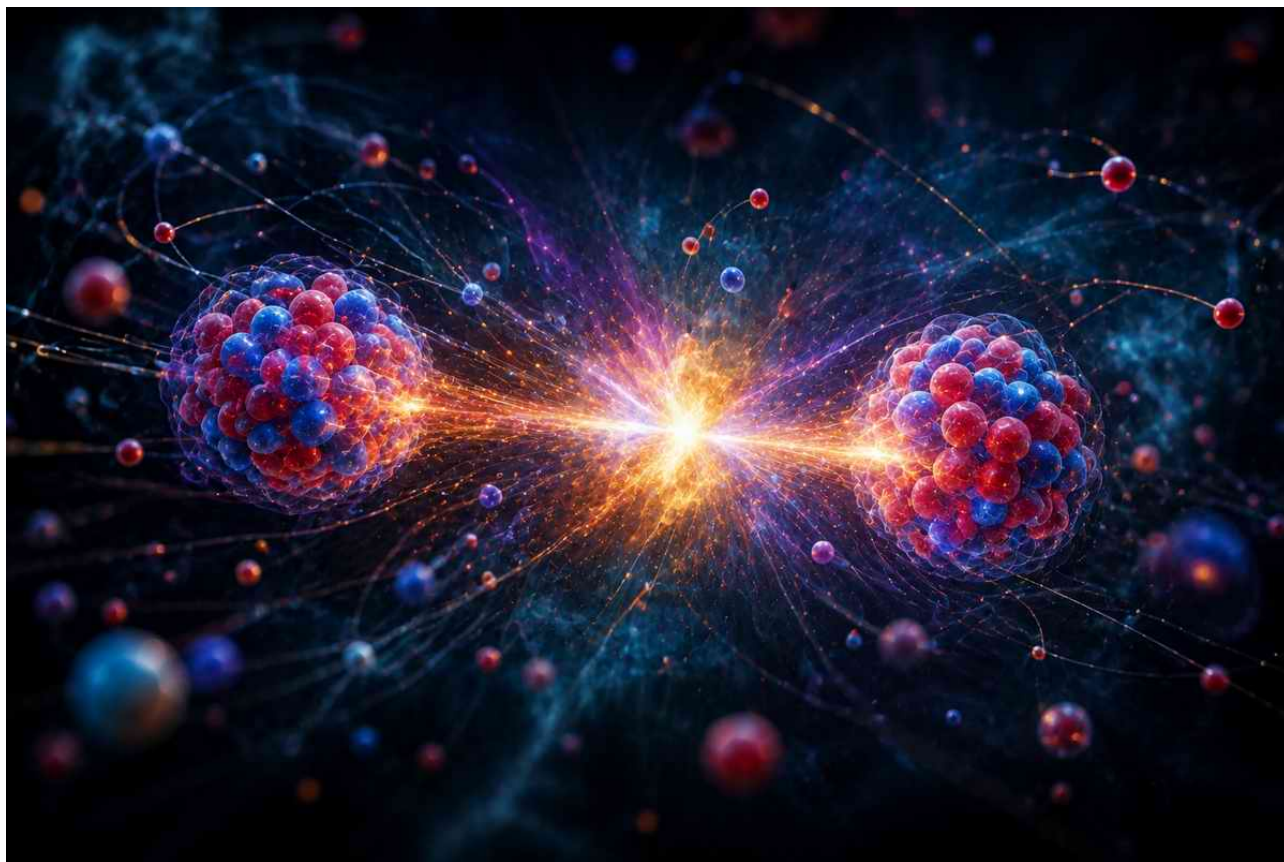


Столкновения ядер кислорода показали, как рождается кварк-глюонная плазма



Дата публикации: 28.08.2026

В первые миллионные доли секунды после Большого взрыва привычных протонов и нейтронов еще не существовало. Вселенная была заполнена чрезвычайно горячей смесью свободных кварков и глюонов — кварк-глюонной плазмой. Сегодня такое состояние материи можно на мгновение воссоздать в мощных ускорителях, сталкивая атомные ядра почти со скоростью света. Новое исследование показало, что особенно интересным инструментом для изучения рождения этой необычной материи могут стать ядра кислорода.

Физики давно исследуют кварк-глюонную плазму при столкновениях тяжелых ядер, например свинца. В таких экспериментах возникает достаточно большой объем сверхгорячей материи, которая демонстрирует неожиданное коллективное поведение. Несмотря на микроскопические размеры и колоссальную температуру, она способна течь подобно жидкости.

Однако остается фундаментальный вопрос: насколько маленькой может быть система, прежде чем подобное коллективное поведение исчезнет? Некоторые

его признаки обнаруживаются даже при столкновениях протонов, хотя там количество образующейся материи намного меньше. Кислород занимает удобное промежуточное положение между одиночными протонами и тяжелыми ядрами.

Исследователи из Токийского университета науки под руководством Тэцуфуми Хирано смоделировали столкновения кислорода с кислородом при энергии 5,36 ТэВ, соответствующей условиям Большого адронного коллайдера. Их интересовало, какая часть возникшей материи успевает приблизиться к локальному тепловому равновесию.

Тепловое равновесие в данном случае не означает, что вся система имеет одну температуру и спокойно находится в сосуде. Кварк-глюонная материя существует лишь чрезвычайно короткое время и стремительно расширяется. Однако внутри небольших областей распределение энергии и частиц может стать достаточно упорядоченным, чтобы дальнейшую эволюцию описывали уравнения релятивистской гидродинамики.

Ученые использовали модель DCC12, разделяющую систему на два условных компонента — ядро и корону. Ядро представляет материю, приблизившуюся к локальному равновесию и участвующую в коллективном расширении. Корона состоит из частиц, которые не успели полностью стать частью этой среды и сохраняют неравновесный характер.

Такое разделение позволяет избежать слишком простого предположения, будто все вещество после столкновения мгновенно превращается в единую жидкость. В действительности даже внутри одного события могут одновременно существовать области с выраженным коллективным поведением и частицы, практически не участвующие в нем.

Расчеты выявили своеобразный порог. Когда количество заряженных частиц, возникающих в центральной области столкновения, превышало примерно 20, вклад равновесного ядра становился больше вклада короны. Это означает, что при достаточно активных столкновениях жидкоподобная составляющая начинает доминировать.

Но полного перехода к равновесию не происходило. Даже в наиболее центральных столкновениях кислорода, когда два ядра максимально перекрываются, корона обеспечивала около 30% общего выхода адронов. Следовательно, значительная часть системы продолжала вести себя иначе, чем предполагает чисто гидродинамическая модель.

Различия обнаружились и в импульсах рождающихся частиц. При относительно небольших импульсах преобладал вклад ядра, тогда как на

высоких импульсах все заметнее становилась корона. Для более тяжелых частиц граница между этими режимами смещалась в сторону больших импульсов.

Такую закономерность можно связать с коллективным расширением. В гидродинамически эволюционирующей среде частицы получают дополнительный импульс от общего движения вещества. Более тяжелые частицы особенно чувствительны к этому эффекту, поэтому их спектры несут информацию о том, насколько сильным было коллективное течение.

Еще одним индикатором стали странные барионы — частицы, содержащие странные кварки. При увеличении активности столкновений их количество относительно заряженных пионов возросло. Подобное усиление образования странных частиц считается одним из характерных признаков формирования горячей плотной среды.

Однако значения оставались ниже уровня, ожидаемого при полном химическом равновесии. Это стало дополнительным свидетельством того, что кислород-кислород представляет переходный режим: система уже достаточно велика для появления выраженного коллективного поведения, но еще недостаточно велика, чтобы неравновесные процессы стали незначительными.

Результат важен и для исследования самих атомных ядер. Существуют модели, согласно которым ядро кислорода-16 можно рассматривать как структуру из четырех альфа-кластеров. Физики надеются искать признаки такой внутренней геометрии по распределению частиц после высокоэнергетических столкновений.

Но подобная реконструкция требует понимания того, каким образом первоначальная структура ядра превращается в наблюдаемый поток частиц. Если считать всю возникшую материю идеальной жидкостью, игнорируя значительную корону, можно получить искаженную картину. Новая работа показывает, насколько существенной может оставаться эта поправка.

Столкновения кислорода поэтому превращаются в своеобразную лабораторию переходного масштаба. Они позволяют наблюдать, как по мере увеличения количества взаимодействующих частиц хаотическая неравновесная система постепенно приобретает коллективные свойства. Следующим шагом может стать применение аналогичного подхода к другим ядрам, включая неон.

Ссылка: «Равновесная доля КХД-материи в высокоэнергетических столкновениях кислород-кислород» DOI: [10.1103/r39m-l6gz](https://doi.org/10.1103/r39m-l6gz).