

Частицы начали «преследовать» друг друга: физики получили движущуюся материю из неподвижных микросфер



Дата публикации: 10.08.2026

Представьте две микроскопические частицы, каждая из которых сама по себе совершенно не способна куда-либо плыть. Теперь соедините их — и пара неожиданно начинает двигаться. Добавьте тысячи таких частиц, и вместо неподвижного скопления возникает постоянно меняющаяся структура: одни группы собираются, другие распадаются, частицы перестраиваются и снова приходят в движение.

Именно такое необычное поведение получили физики Токийского университета науки. В эксперименте участвовало более 10 000 коллоидных частиц, а наблюдать их коллективную динамику удалось более часа. Результаты опубликованы в *Physical Review Letters*.

В основе явления лежат так называемые нереципрокные взаимодействия. В привычной механике взаимодействие двух тел ассоциируется с третьим законом Ньютона: действие сопровождается равным и противоположно направленным

противодействием. Если один объект толкает другой, он одновременно испытывает ответное воздействие.

Однако в неравновесных системах ситуация может выглядеть значительно необычнее. Если между частицами присутствует окружающая среда, постоянно получающая энергию извне, эффективное воздействие одного объекта на другой может оказаться несимметричным.

Именно такую систему создали японские исследователи. Для эксперимента использовались полистирольные частицы двух размеров — радиусом примерно 1 и 1,5 микрометра. Для сравнения: один микрометр равен тысячной доле миллиметра, поэтому отдельные элементы системы невозможно увидеть невооруженным глазом.

Частицы поместили в воду между двумя прозрачными электродами из оксида индия-олова. Затем к электродам приложили переменное электрическое поле. Оно не превращало микросферы в миниатюрные машины с собственными двигателями, но создавало вокруг них электрогидродинамические потоки жидкости.

Именно эти потоки стали ключом ко всему эксперименту. Их интенсивность зависела от размера частиц: более крупная микросфера создавала более сильное течение, чем маленькая.

В результате взаимодействие переставало быть симметричным. Большая частица эффективнее притягивала маленькую, чем маленькая — большую. Возникла ситуация, которую условно можно представить как погоню: одна частица словно сильнее тянется к соседке, чем соседка к ней.

Когда частицы разных размеров оказывались рядом, они образовывали асимметричную пару. У нее появлялись условные передняя и задняя стороны, а вместе с ними — направление движения.

Самое удивительное заключалось в том, что ни один участник пары отдельно двигаться таким способом не мог. Способность к направленному перемещению появлялась только благодаря взаимодействию двух неодинаковых частиц и окружающей их жидкости.

Это один из примеров так называемой активной материи — систем, компоненты которых способны поддерживать движение за счет постоянного притока энергии. В природе похожие коллективные процессы встречаются на самых разных масштабах: от внутриклеточных структур и колоний микроорганизмов до косяков рыб и стай птиц.

Однако лабораторные системы особенно ценны для физиков, поскольку позволяют менять отдельные параметры и наблюдать, как из относительно простых правил взаимодействия появляется сложное коллективное поведение.

Когда самодвижущихся пар в эксперименте становилось много, происходил следующий переход. Они начинали объединяться в более крупные кластеры.

Можно было бы ожидать, что притягивающиеся частицы в конце концов соберутся в один огромный неподвижный комок. Именно так зачастую ведут себя обычные пассивные частицы: небольшие агрегаты постепенно растут, соединяются и формируют крупную структуру.

Но здесь этого не происходило. Кластеры росли лишь некоторое время, после чего начинали разрушаться. Части структуры отделялись, перемещались, присоединялись к другим группам, а затем процесс повторялся.

Система словно отказывалась окончательно успокоиться. Причиной оказались движущиеся пары внутри кластеров. Они постоянно создавали внутреннее движение, которое мешало всей конструкции превратиться в стабильный агрегат. Получался динамический баланс между притяжением частиц и непрерывной перестройкой структуры.

Контрольные эксперименты подтвердили эту картину. Когда исследователи использовали частицы одинакового размера, взаимодействия становились значительно более взаимными. В таком случае система постепенно формировала статические кристаллические скопления.

Разница была принципиальной: одинаковые частицы стремились к упорядоченному покою, тогда как смесь двух размеров поддерживала продолжительную динамику.

Ученые дополнительно воспроизвели наблюдаемое поведение с помощью компьютерного моделирования. Расчеты показали, что нересципрокного движения пар уже достаточно, чтобы возникла устойчивая динамика постоянно образующихся и распадающихся кластеров.

Это делает эксперимент интересным далеко за пределами конкретной суспензии полистирольных микросфер. Если один и тот же принцип работает в разных неравновесных системах, он может оказаться одним из общих механизмов возникновения динамического порядка.

Особенно интересны возможные аналогии с живыми системами. Биологические объекты далеко не всегда взаимодействуют строго симметрично. Один организм может преследовать другой, клетки способны реагировать на

химические сигналы с разной интенсивностью, а поведение отдельных участников группы зависит от действий соседей.

Разумеется, полистирольные частицы не являются моделью стаи птиц или клеточной колонии в буквальном смысле. Однако физика пытается найти минимальный набор правил, способный породить похожие формы коллективной динамики.

Новая система дает редкую возможность изучать такой процесс сразу на тысячах объектов в контролируемых лабораторных условиях. Исследователи могут изменять электрическое поле, размеры частиц и другие параметры, наблюдая, как перестраивается вся система.

В перспективе этот принцип интересен и для создания программируемых материалов. Обычный материал имеет заранее заданную структуру, тогда как активная материя теоретически способна постоянно перестраиваться в ответ на внешний сигнал.

Еще одно возможное направление — микроробототехника. Вместо управления каждым микроскопическим устройством по отдельности инженеры пытаются разрабатывать простые правила, благодаря которым тысячи элементов смогут самостоятельно организовываться под воздействием внешнего поля.

В таком случае коллектив может собираться, перемещаться, разделяться и снова формировать структуры без индивидуального «мозга» у каждого элемента. Возможные направления применения можно перечислить в одну строку: программируемые материалы, микророботы, управляемые коллоидные системы, микроустройства, самоорганизующиеся структуры.

До практических технологий еще далеко. Нынешняя работа прежде всего относится к фундаментальной физике и показывает, каким образом нарушение взаимности взаимодействий способно изменить поведение большого количества частиц.

Но именно фундаментальный результат здесь наиболее необычен. Для возникновения организованного движения отдельным частицам не обязательно иметь собственные двигатели. Иногда достаточно создать такие условия, при которых их взаимодействие становится асимметричным.

Тогда две неподвижные частицы могут превратиться в движущуюся пару, тысячи пар — в постоянно перестраивающиеся кластеры, а простое микроскопическое правило неожиданно порождает сложное поведение всей системы. Такие эксперименты помогают физикам понять один из главных

вопросов науки о самоорганизации: как порядок и движение возникают там, где никто не управляет каждым элементом по отдельности.

Ссылка: «Остановленное укрупнение в активных коллоидных суспензиях, обусловленное нересипрокными электрогидродинамическими взаимодействиями» DOI: [10.1103/96ky-d1p9](https://doi.org/10.1103/96ky-d1p9).