

## ФАЗОВЫЕ ПЕРЕХОДЫ В СИСТЕМЕ КИРАЛЬНОЙ АКТИВНОЙ МАТЕРИИ НА ОСНОВЕ СКОПЛЕНИЯ РОБОТОВ

Молодцова А.А. (Университет ИТМО), Розенблит А.Д. (Университет ИТМО), Дмитриев А.А. (Университет ИТМО)

Научный руководитель – к.ф.-м.н. Олехно Н.А. (Университет ИТМО)

Данная работа посвящена экспериментальному исследованию системы активной материи на основе скопления из вращающихся роботов, расположенных на ограниченной барьером поверхности. Нами показано, что в ходе изменения размера барьера (при сохранении числа роботов в нём) наблюдается фазовый переход при достижении скоплением роботов критической плотности. Исследовано поведение ключевых характеристик системы вблизи точки фазового перехода.

**Введение.** Физика активной материи – молодое, но интенсивно развивающееся направление на стыке физики конденсированного состояния, механики и гидродинамики, посвященное исследованию свойств скоплений частиц, которые могут преобразовывать внутренние запасы энергии в направленное механическое движение. Неравновесный характер таких систем приводит к ряду интересных физических явлений. Системы активной материи включают как макроскопические примеры – стаи птиц, косяки рыб и толпы людей, так и микроскопические, от колоний бактерий до коллоидных микрочастиц. В данной работе мы рассматриваем скопление из роботов, параметрами которых можно гибко управлять.

**Основная часть.** Рассматриваемая система представляет собой скопление из 40 роботов, заключённых в ограничительный барьер круговой формы диаметром  $D$ . Каждый робот представляет собой пластиковую шайбу диаметром  $d=55$  мм, корпус которой распечатан из пластика PLA с помощью 3D-принтера Raise 3D, внутри которой расположена плата управления, включающая вибромотор QX-6A, микроконтроллер ATtiny13, ИК-фотоприёмник, аккумулятор и необходимую электронику для сопряжения этих компонентов. Колебания вибромотора преобразуются во вращательное движение робота с помощью эластичных щетинок, расположенных на дне робота под углом к поверхности, на которой он движется. Угол наклона щетинок также определяет направление вращения робота по часовой стрелке (clockwise, CW) либо против часовой стрелки (counter-clockwise, CCW). Ограничительные барьеры различного диаметра также изготавливаются на 3D-принтере и собираются из отдельных сегментов.

В ходе экспериментов проводилось исследование движения системы из роботов для различных диаметров ограничительного барьера  $D=40, 40.5, 41, 42, 47, 53$  см в течение трёх минут с усреднением по трём реализациям, отвечающим различным начальным расстановкам роботов в барьере, выполненным случайным образом. Во время таких исследований, в системе было 20 роботов с CW-киральностью и 20 роботов с CCW-киральностью. Далее, рассматривалось различное соотношение CW- и CCW-киральностей роботов. Движение системы записывалось с помощью видеокамеры с

последующим извлечением положений и угловых ориентаций всех роботов средствами программного пакета OpenCV.

Ключевой из рассмотренных характеристик является среднее число роботов в связанных кластерах. При построении зависимости этой величины от плотности заполнения системы роботами в дважды логарифмическом масштабе показано, что она подчиняется степенному закону  $\sim |p-p_c|^\alpha$ , где значение критической плотности заполнения  $p_c=0.76$  отвечает диаметру барьера  $D=40.25$  см, а критический индекс  $\alpha$  равен  $-0.8$ . При достижении критической плотности заполнения происходит фазовый переход jamming transition, при котором подвижность отдельных роботов резко снижается, и скопление роботов в целом из активной “жидкости” превращается в твёрдое тело. Данный результат согласуется с общей физикой фазовых переходов, одной из ключевых рассматриваемых характеристик в которой является как раз степенное поведение среднего размера кластеров из частиц, но в то же время представляет собой первый пример извлечения критических индексов для системы активной материи на основе ансамблей роботов в эксперименте. Степенному закону  $\sim |p-p_c|^\beta$  с критическим индексом  $\beta=0.5$  подчиняется также и средняя угловая скорость вращения роботов.

**Выводы.** В данной работе исследованы зависимости размера кластеров из нескольких вращающихся роботов и угловой частоты вращения роботов от плотности скопления роботов. Экспериментальные исследования показывают наличие фазового перехода при достижении критического значения плотности скопления  $p_c=0.76$ , в окрестности которого как размер кластеров, так и угловая скорость вращения роботов быстро изменяются и подчиняются степенным законам.