

Аномальная упругость двумерных кристаллических мембран и спин изгибного фонона

И.С. Бурмистров

Возникающий при уменьшении толщины пластины до одного атомарного слоя объект принято называть двумерной кристаллической мембраной. Самый известный пример — это графен, который представляет собой один слой атомов углерода, расположенных в узлах шестигранных (сотовых) ячеек. Кроме растяжения или сжатия в плоскости у мембран возникает возможность изгиба [1]. Энергия, связанная с изгибом, определяется величиной изгибной жесткости. Тепловые колебания могут вызывать изгибные деформации мембраны. Оказывается, что для всех исследуемых в лабораториях образцах графена тепловые изгибные флуктуации оказываются принципиально важны. Более того, оказывается, что для мембран микронного размера игнорировать взаимодействие изгибных флуктуаций между собой оказывается принципиально неправильным. Их взаимодействие приводит к тому, что изгибная жесткость мембраны начинает расти степенным образом с увеличением продольного размера, то есть чем больше размер мембраны, тем все труднее становится ее изогнуть [2]. Этот эффект — аномальной упругости — был теоретически предсказан в середине 80-х годов прошлого века. Как следствие в области малых продольных деформаций нарушается закон Гука: деформация мембраны как целого становится степенной функцией приложенной силы со значением показателя степени меньше единицы, который к тому же не зависит от типа атомов мембраны, то есть является универсальным. Линейный закон Гука восстанавливается только при достаточно больших значениях деформации. Недавно такой нелинейный закон Гука для графена был измерен экспериментально в группе К. Болотина в Берлине.

Оказывается, что для фонона можно ввести понятие спин также как для других квазичастиц со статистикой Бозе. Несмотря на то, что для обычных оптических фононов это обсуждалось еще в 60е годы прошлого века [3], недавно интерес к спину фонона появился опять [4, 5]. В исследовательско проекте планируется изучить как последовательно определить спин изгибного фонона и изучить с какими физическими объектами (например, магнитными атомами) спин фонона может взаимодействовать.

Рекомендуемая литература для начального чтения: учебник [1] параграфы §1-5, §10, §11, статья [2], статья [3] и обзоры [4, 5].

-
- [1] L. Landau and E. Lifshitz, *Theory of Elasticity*, Vol. 7 (FIZMALIT, 2005).
 - [2] I. S. Burmistrov, I. V. Gornyi, V. Y. Kachorovskii, M. I. Katsnelson, and A. D. Mirlin, Quantum elasticity of graphene: Thermal expansion coefficient and specific heat, *Phys. Rev. B* **94**, 195430 (2016).
 - [3] S. V. Vonsovskii and M. S. Svirskii, On spin of phonon, *Fizika Tverdogo Tela* **3**, 2160 (1961).
 - [4] S. Gupalov, Classical problems of elasticity theory and quantum theory of angular momentum, *Physics Uspekhi* **190**, 63 (2020).
 - [5] J. Ren, From elastic spin to phonon spin: Symmetry and fundamental relations, *Chinese Physics Letters* **39**, 126301 (2022).