

Впервые измерена сила отталкивания в эффекте Казимира–Лифшица

21.01.09 | [Физика](#), [Нанотехнологии](#), [Юрий Ерин](#)



Квантовая механика предсказывает, что на расстояниях порядка нанометра между телами должна наблюдаться сила притяжения. Такое явление называют эффектом Казимира, и его существование подтверждено экспериментально. Однако при определенных условиях притяжение тел на таких масштабах может смениться их отталкиванием. В этом случае наблюдается обобщенный эффект Казимира, или эффект Казимира–Лифшица. Группе американских ученых впервые удалось измерить силу такого отталкивания между телами на больших (по меркам наномира) расстояниях, и полученные данные хорошо согласуются с теорией. Результаты эксперимента,

вероятно, могут быть использованы для создания нано- и микромеханизмов с очень маленькой силой трения между деталями.

Оказывается, левитация объектов возможна не только благодаря сверхпроводимости (а точнее, идеальному диамагнетизму сверхпроводников, или [эффекту Мейсснера](#)), но и вследствие сугубо квантовых эффектов. Обложку одного из последних выпусков журнала *Nature* украшает рисунок, на котором изображен золотой шарик, зависший над кремниевой плоскостью, и такой же шарик, но уже «прилипший» к плоскости из золота (см. рис. 1). «Квантовая левитация» — гласит подпись к рисунку, а посвящен он статье американских ученых [Measured long-range repulsive Casimir-Lifshitz forces](#) (в открытом доступе статью можно посмотреть [здесь](#), PDF, 248 Кб). Интересно, что один из авторов этой статьи — Федерико Капассо, руководитель группы, которая занималась разработкой терагерцевого лазера, работающего при комнатной температуре (читатели «Элементов» с ним знакомы по заметке [Терагерцевый лазер заработал при комнатной температуре](#)).

И хотя словосочетание «квантовая левитация» звучит довольно устрашающе, разобраться в этом явлении не так уж и сложно. В основе «квантовой левитации» лежит [эффект Казимира](#) (см. также [здесь](#)), предсказанный уже более 60 лет назад голландским физиком-теоретиком [Хендриком Казимиром](#). («Элементы» уже писали об эффекте Казимира, см.: [Обнаружена ошибка в расчетах эффекта Казимира для микромеханических устройств](#), 28.12.2005; [Эффект Казимира не может приводить к расталкиванию симметричных тел](#), 24.10.2006).

Изучая [коллоидные растворы](#), Казимир пришел к выводу, что между двумя очень близко расположенными параллельными гладкими плоскостями должна возникать сила притяжения, обусловленная только квантовыми эффектами в вакууме. Под вакуумом здесь имеется в виду не пустота, где абсолютно ничего нет, а «океан» постоянно рождающихся и исчезающих виртуальных частиц, в частности фотонов электромагнитного поля. Эти частицы, хоть и виртуальные, но давление на гладкие параллельные поверхности оказывают. Так вот, выяснилось, что чем ближе расположены эти поверхности, тем меньше в зазоре между ними рождается виртуальных фотонов. Извне рождение фотонов ничем не ограничено. Получается, что количество фотонов снаружи больше, чем количество фотонов

между поверхностями. Из-за такого вот неравенства давлений в итоге и получаем силу притяжения.

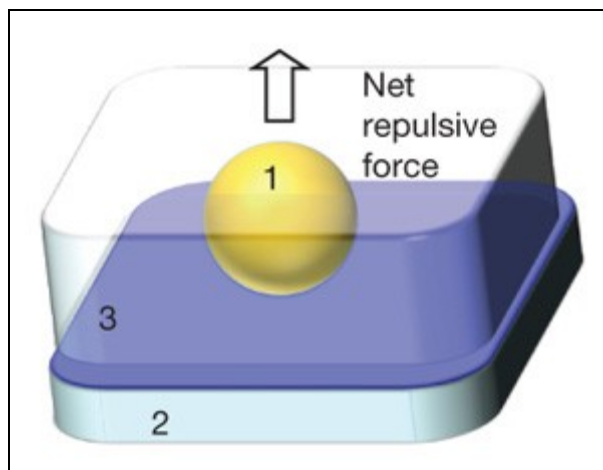
Казимир показал, что при нулевой температуре возникающая сила притяжения прямо пропорциональна площади взаимодействующих плоскостей и обратно пропорциональна четвертой степени расстояния между ними (гравитация и электростатическое взаимодействие убывают с квадратом расстояния). И всё. Больше в формулу казимировского притяжения, за исключением фундаментальных констант (постоянная Планка и скорость света), никаких других величин не входит.

Насколько значительна данная сила? Можно рассчитать, что две пластины, расстояние между которыми составляет 10 нм, благодаря эффекту Казимира будут создавать давление, сравнимое с атмосферным. Но, увеличив расстояние между объектами в 10 раз, получим ослабление силы притяжения в 10 000 раз. Казимировское притяжение проявляется лишь в нанометровых масштабах, и при конструировании различных нано- и микромеханических устройств оно весьма нежелательно (из-за эффекта Казимира детали будут «слипаться»).

Спустя 8 лет после открытия данного явления [Евгений Лифшиц](#) выяснил, что эффект Казимира на самом деле является всего лишь проявлением ван-дер-ваальсовых, или [межмолекулярных](#), сил, и, более того, если зазор между поверхностями заполнить специально подобранным веществом, то притяжение между поверхностями может смениться отталкиванием. Такое обобщение эффекта Казимира получило название «эффект Казимира–Лифшица».

Рис. 2. При взаимодействии между золотым шариком (1), погруженным в бромбензол (3), и пластиной (2) происходит отталкивание, если $\epsilon_1 > \epsilon_3 > \epsilon_2$. Рис. из обсуждаемой статьи в *Nature*

Качественно переход от притяжения к отталкиванию двух тел выглядит так. Предположим, что казимировское взаимодействие поверхностей с диэлектрической проницаемостью ϵ_1 и ϵ_2 происходит не в вакууме (который тоже, в принципе, можно считать диэлектриком, но с проницаемостью, равной 1), а в среде с проницаемостью ϵ_3 . Если выражение — $(\epsilon_1 - \epsilon_3)(\epsilon_2 - \epsilon_3)$ меньше нуля, то наблюдаем притяжение между поверхностями. В противном случае, будет иметь место отталкивание. Такая ситуация реализуется, например, когда выполняется соотношение $\epsilon_1 > \epsilon_3 > \epsilon_2$.



Экспериментальное подтверждение эффекта Казимира проводилось неоднократно — сила притяжения между телами согласуется с теорией практически на 100% (в системе с двумя параллельными плоскостями, а также шаром и плоскостью). Однако публикаций с экспериментальным подтверждением эффекта Казимира–Лифшица до настоящего времени не появлялось. А потому обсуждаемая работа в *Nature* является первой по экспериментальной проверке такого эффекта (по крайней мере, авторы осторожно утверждают, что не знают подобных статей).

Итак, чтобы понять, насколько теория эффекта Казимира–Лифшица согласуется с экспериментом, ученые изучали вначале взаимодействие полистирольного шарика диаметром почти 40 микрон, покрытого золотой пленкой, с зафиксированной кремниевой пластиной (см. рис. 2), а затем взаимодействие того же шарика с золотой пластиной.

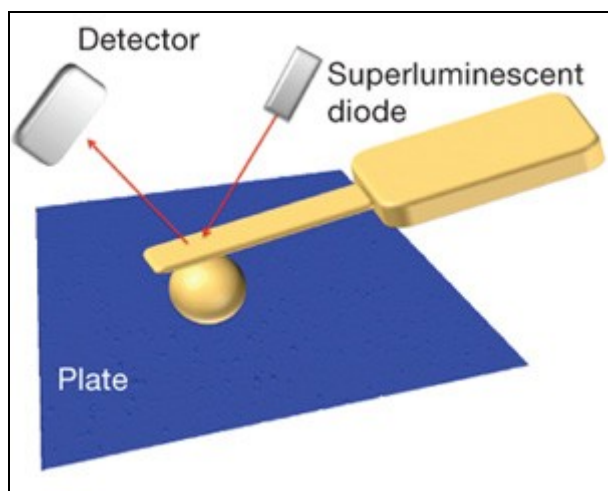


Рис. 3. Схема экспериментальной установки по измерению эффекта Казимира–Лифшица. Рис. из обсуждаемой статьи в *Nature*

Пространство между шариком и пластиной заполнялось жидкостью — [бромбензолом](#). Перемещение шарика, прикрепленного к [кантилеверу](#) атомно-силового микроскопа, контролировалось с помощью системы из [суперлюминесцентного диода](#) («почти что» лазер) и специального детектора (см. рис. 3).

Необычность такого набора веществ объясняется тем, что целью авторов

исследования было наблюдение именно отталкивания тел, а для этого необходимо было подобрать диэлектрические проницаемости таким образом, чтобы выражение $-(\epsilon_1 - \epsilon_3)(\epsilon_2 - \epsilon_3)$ было больше нуля. Ну а упомянутое выше золотое напыление на шарик необходимо для наблюдения «обычного» эффекта Казимира: когда $\epsilon_1 = \epsilon_2$ и соотношение диэлектрических проницаемостей становится положительным, шарик притягивается к плоскости.

Результаты измерений силы Казимира–Лифшица, действующей в системе «шарик — кремниевая пластина» и «шарик — золотая пластина», показаны на рис. 4. Изменение силы отталкивания между золотым шариком и кремниевой пластиной показано на рис. 4а синей кривой, а изменение силы притяжения между тем же шариком, но уже золотой пластиной, — желтой кривой.

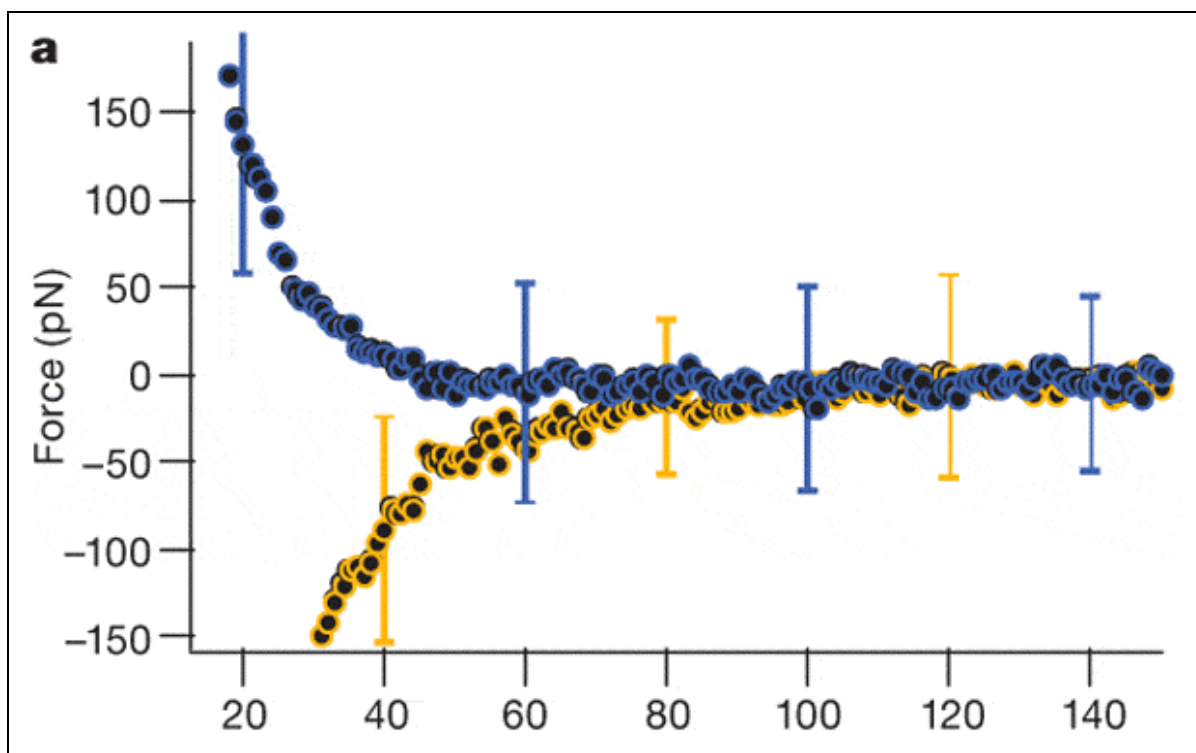
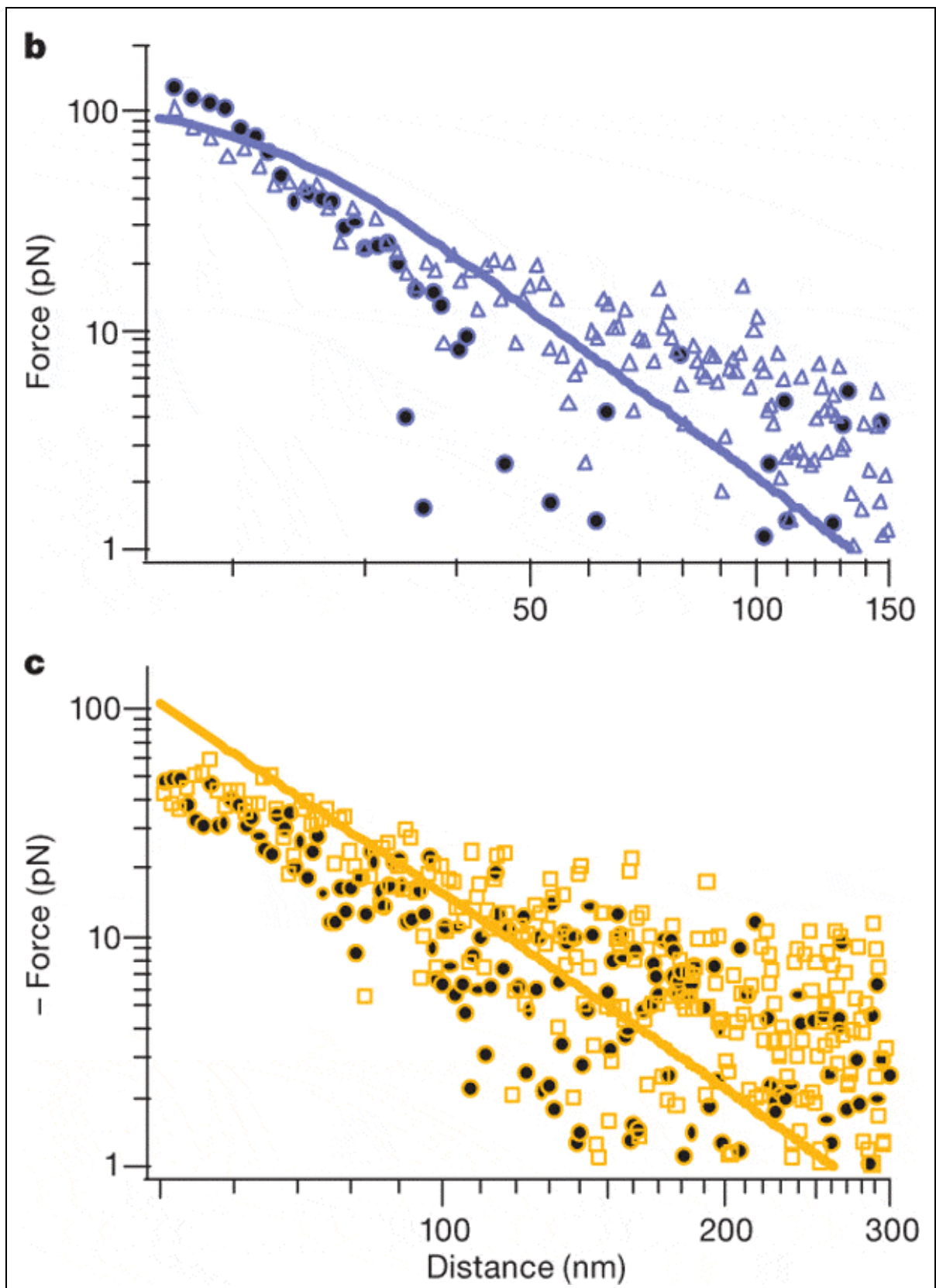


Рис. 4. а. Синие (желтые) круги на графике представляют собой результат 50 измерений силы Казимира–Лифшица, действующей между золотым шариком, погруженным в бромбензол, и кремниевой (золотой) пластиной на разных расстояниях. **б.** Зависимость измеренной силы отталкивания между золотым шариком, находящимся в бромбензоле, и кремниевой плоскостью, построенная в логарифмическом масштабе (синие круги), и такая же зависимость, рассчитанная согласно теории Казимира–Лифшица. Голубые треугольники означают те же данные, полученные в результате измерения силы Казимира–Лифшица между таким же (номинально) золотым шариком и кремниевой пластиной. **с.** Аналогичная зависимость для притягивающейся системы «золотой шарик — золотая пластина». Рис. из обсуждаемой статьи в *Nature*



Как и ожидалось, проведенные измерения силы Казимира–Лифшица в пределах погрешностей согласуются с теорией: сила притяжения, как и сила отталкивания, быстро убывает с увеличением расстояния между телами. Это отражено в виде графиков на рис. 4b и 4c, на которых набор экспериментальных данных показан синими и желтыми квадратами и кругами, равномерно распределенными по обе стороны от соответственно сплошных линий такого же цвета, рассчитанных согласно теории Казимира–Лифшица.

Может возникнуть вопрос, почему измерения проводились не для двух параллельных плоскостей? Дело в том, что сделать две большие плоскости на нанометровых расстояниях параллельными технологически сложно.

В процессе измерения силы Казимира–Лифшица между шариком и плоскостью экспериментаторы столкнулись с еще одной проблемой. Система не является статической, поскольку вследствие отталкивания или притяжения шарик движется в жидкости с некоторой скоростью, а значит, неизбежно возникнет сила вязкого трения, направленная в противоположную сторону от направления перемещения шарика и пропорциональная скорости его движения. Получается, что сила вязкого трения препятствует «чистому» измерению эффекта Казимира–Лифшица, поэтому необходимо понять, насколько значительное возмущение оказывает вязкость на эксперимент, а после этого откалибровать саму экспериментальную установку с учетом силы вязкости.

Авторы ссылаются на свою предыдущую работу [Precision measurement of the Casimir-Lifshitz force in a fluid](#) (в открытом доступе статью можно посмотреть [здесь](#), PDF, 163 Кб) в журнале *Physical Review A*, в которой проводились подобные измерения, только в качестве жидкости, заполнявшей пространство между золотым шариком и золотой плоскостью (то есть $\epsilon_1 = \epsilon_2$, а значит, измерялась только сила притяжения), был этанол, чья вязкость практически такая же, как и у бромбензола. В этих экспериментах ученые выяснили, что при скорости движения шарика 45 нм/с в этаноле сила вязкости составляла 12 пиконьютонов (пико = 10^{-12}).

Как видно из графиков на рис. 4, сила отталкивания между телами может достигать 150 пН, а потому какого-либо влияния вязкость жидкости при конструировании вышеупомянутых нано- и микромеханических устройств оказывать не должна. Сила Казимира–Лифшица на очень близких расстояниях просто на порядок больше силы вязкого трения.

Таким образом, эксперимент по измерению эффекта Казимира–Лифшица указывает на то, что, разделив два объекта на расстояниях порядка 10–100 нм специально подобранной жидкостью, возможно наблюдать зависание, или левитацию одного из них над другим (см. рис. 1). Возможно, что в недалекой перспективе это позволит создавать нано- и микромеханизмы с очень малой силой трения и отсутствием «слипания» между деталями таких устройств.

Источник: J. N. Munday, Federico Capasso, V. Adrian Parsegian. [Measured long-range repulsive Casimir–Lifshitz forces](#) (полный текст — [PDF, 248 Кб](#)) // *Nature*. V. 457. P. 170–173 (8 January 2009).