

Почему отскакивающие капельки являются удачной моделью для квантовой механики

Р. Брэди и Р. Андерсон (Великобритания)

Реферат подготовил М.Х. Шульман (shulman@dol.ru, www.timeorigin21.narod.ru)

arXiv:1401.4356v1 [quant-ph] 16 Jan 2014

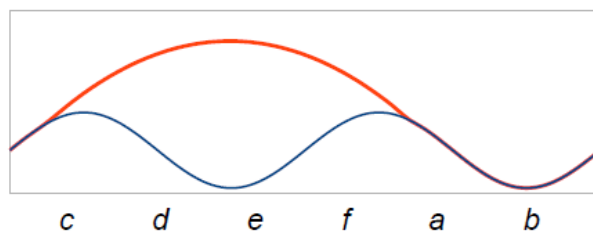
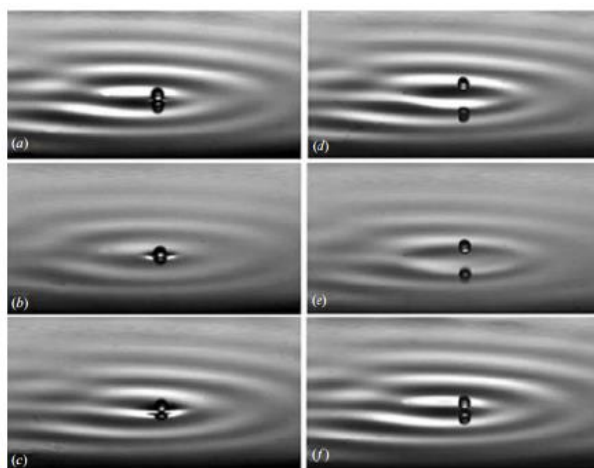
Why bouncing droplets are a pretty good model of quantum mechanics

Robert Brady (frobert.brady@cl.cam.ac.uk) and
Ross Anderson (ross.andersong@cl.cam.ac.uk)

University of Cambridge Computer Laboratory
JJ Thomson Avenue, Cambridge CB3 0FD, United Kingdom

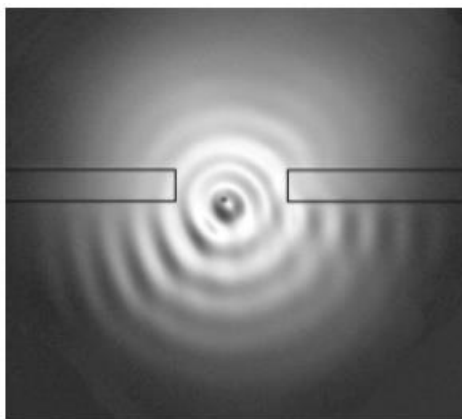
January 20, 2014

В 1978 году Walker сообщил, что капелька мыльного водянго раствора может в течение нескольких минут подскакивать на вибрирующей тарелке с той же жидкостью. В 2005 году Couder, Protière, Fort и Badouad (Франция) показали, что капельки силиконового масла, отскакивающие от вибрирующего поддона с таким же маслом, при правильном подборе амплитуды и частоты вибрации могут перемещаться в боковых направлениях, т.е. “блуждать”. Тонкая пленка воздуха между капелькой и поверхностью предотвращает их слияние (коалесценцию). При этом блуждающие капельки могут демонстрировать нелокальное взаимодействие, напоминающее корпускулярно-волновое поведение объектов в квантовой механике; в частности, они могут перемещаться, притягиваться, отражаться и вращаться относительно друг друга.

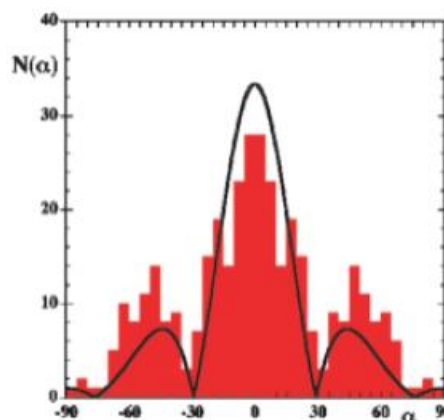


Шесть последовательных фотографий капелек на поверхности вибрирующего поддона с силиконовым маслом (c,d,e,f,a,b) и фазы соответствующих вертикальных колебаний капельки (красная линия) и поверхности (синяя линия).

Последующая экспериментальная работа Couder, Fort, Protière, Eddi, Sultan, Moukhtar, Rossi, Moláček, Bush и Sbitnev установила, что отскоки капель имитируют дифракцию на одной и двух щелях, туннельный эффект, квантование уровней энергии, локализацию Андерсона и рождение/уничтожение пар капелька/пузырь.



Капелька, проходящая через апертуру погруженного барьера.



Гистограмма (более 125 значений) для угла отклонения α от нормали.

Эксперименты были повторены во многих лабораториях всего мира и даже были показаны по телевидению. Они вызвали большой интерес, так как их поведение было удивительно похоже на поведение квантовомеханических частиц.

В настоящей работе ее авторы приводят объяснение, почему так происходит:

- Во-первых, поверхностные волны, управляющие движением капелек, являются Лоренц-инвариантными относительно характеристической скорости распространения поверхностной волны.
- Во-вторых, пары отскакивающих капелек испытывают силу притяжения или отталкивания, обратно пропорциональную квадрату расстояния в зависимости от их относительной фазы, по аналогии с силой магнитного поля.
- В третьих, поведение отскакивающих капелек подчиняется аналогу уравнения Шрёдингера, в котором вместо постоянной Планка фигурирует подходящая константа движения.
- В четвертых, движущиеся одна вокруг другой капельки обладают симметрией спина 1/2 и выравниваются антисимметрично согласно принципу запрета Паули.

В частности, если начальное положение капельки точно неизвестно, и оно эволюционирует со временем, то существует диапазон возможных финальных положений, которые можно рассчитать вероятностно. Анализ авторов воспроизводит объяснения Дэвида Бома, решившего эту задачу в 1952 году.

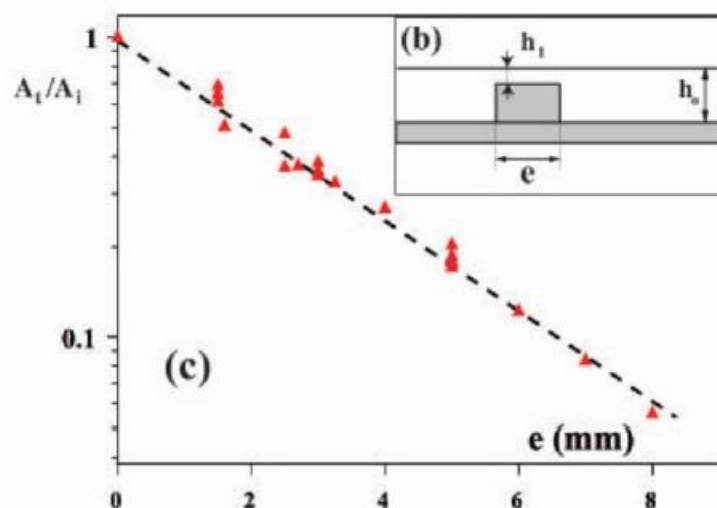
Используя экспоненциальное представление для волновой функции, можно получить соотношение

$$\frac{\partial R^2}{\partial t} + \nabla(R^2 \mathbf{v}) = 0$$

где $\mathbf{v}$ - скорость капельки. Это уравнение допускает простую интерпретацию. Когда скорость сжимаемой среды, например, воздуха, меняется в функции положения, ее плотность (которую с учетом нормировки можно заменить квадратом модуля R^2 волновой функции) подчиняется уравнению непрерывности.

Это уравнение допускает простую интерпретацию. Когда скорость сжимаемой среды, например, воздуха, меняется в функции положения, ее

плотность (которую с учетом нормировки можно заменить квадратом модуля волновой функции) подчиняется уравнению непрерывности. Нижеприведенный график подтверждает, что вероятность для капельки пересечь барьер экспоненциально уменьшается с ростом ширины барьера, что в точности соответствует результату решения уравнения Шрёдингера, а также постулату, принимаемому в Копенгагенской интерпретации квантовой механики.



При прохождении капелькой области с уменьшенной глубиной она испытывает отталкивание. Ось x соответствует ширине барьера, а ось y – вероятности туннелирования капельки через барьер, отложенной в логарифмическом масштабе.

Предвосхищающие расчеты были проделаны в 1952 году, более чем за 50 лет до первых экспериментов с каплями. Они привели Бома к гипотезе о существовании микрочастицы, движущейся со скоростью v и управляемой волнами, которые подчиняются уравнению Шрёдингера с соответствующей плотностью вероятности. И оно в точности совпадает с уравнением для блуждающей капельки, движущейся с небольшой скоростью! Для Бома этот замечательный подход представлял собой чисто абстрактное упражнение; он не располагал моделью капельки в качестве вдохновляющего источника для вывода своего соотношения из уравнения Эйлера. Основываясь на этих уравнениях, Бом показал, что получающаяся отсюда механика неотличима от Копенгагенской интерпретации квантовой механики. Он последовательно вывел то, что Луи де Бройль аналогичным образом предположил в 1920-х годах; теперь эта модель называется интерпретацией де Бройля – Бома квантовой механики.

Проведенный в статье анализ объясняет сходство между экспериментами с отскакивающими каплями и поведением квантовомеханических частиц. Он также позволяет выявить некоторые различия и предсказать некоторые неожиданные явления, которые могут быть проверены в подходящих экспериментах.

Ссылки

- [1] J. Walker. Drops of liquid can be made to oat on the liquid. What enables them to do so? Sci. Am, 238(6):123-129, 1978.
- [2] Y. Couder, S. Proti_ere, E. Fort, and A. Boudaoud. Dynamical phenomena: Walking and orbiting droplets. Nature, 437(7056):208-208, 2005.

- [3] J. Moláček and J. W. M. Bush. Drops bouncing on a vibrating bath. Submitted to J. Fluid Mech., 2013.
- [4] Y. Couder. television programme.
<https://www.youtube.com/watch?v=W9yWv5dqSKk#t=14> , cited January 2014.
- [5] S. Protiere, A. Boudaoud, and Y. Couder. Particle-wave association on a liquid interface. *Journal of Fluid Mechanics*, 554(10):85-108, 2006.
- [6] T. B. Benjamin and F. Ursell. The stability of the plane free surface of a liquid in vertical periodic motion. *Proc. Roy. Soc. London. A.*, 225(1163):505-515, 1954.
- [7] A. Eddi, E. Sultan, J. Moukhtar, E. Fort, M. Rossi, and Y. Couder. Information stored in Faraday waves: the origin of a path memory. *Journal of Fluid Mechanics*, 674:433, 2011.
- [8] A. U. Oza, R. R. Rosales, and J. W. M. Bush. A trajectory equation for walking droplets: hydrodynamic pilot-wave theory. *Journal of Fluid Mechanics*, 737:552-570, 2013.
- [9] F. Dubois, E. Duceau, F. Mar_echal, and I. Terrasse. Lorentz transform and staggered finite differences for advective acoustics. *arXiv:1105.1485v1*, 2011.
- [10] J. Moláček and J. W. M. Bush. Drops walking on a vibrating bath: towards a hydrodynamic pilot-wave theory. Submitted to J. Fluid Mech., 2013.
- [11] T. E. Faber. *Fluid dynamics for physicists*. Cambridge University press, Cambridge, UK, 1995.
- [12] Y. Couder and E. Fort. Single-particle diffraction and interference at a macroscopic scale. *Phy. Rev. Lett.*, 97(15):154101, 2006.
- [13] D. Bohm. A suggested interpretation of the quantum theory in terms of `hidden' variables. *Physical Review*, 85(2):166, 1952.
- [14] A. Eddi, E. Fort, F. Moisy, and Y. Couder. Unpredictable tunneling of a classical waveparticle association. *Physical review letters*, 102(24):240401, 2009.
- [15] E. Fort, A. Eddi, A. Boudaoud, J. Moukhtar, and Y. Couder. Path-memory induced quantization of classical orbits. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 107(41):17515-17520, 2010.
- [16] V. I. Sbitnev. Droplets moving on a fluid surface: interference pattern from two slits. *arXiv:1307.6920v1*, 2013.
- [17] V. Leroy, J. C. Bacri, T. Hocquet, and M. Devaud. Simulating a one-half spin with two coupled pendula: the free Larmor precession. *European journal of Physics*, 27(6):1363, 2006.
- [18] R. Brady and R. Anderson. *Emergent Quantum Mechanics*. In preparation, 2014.