

В присутствии магнитного поля поверхность феррожидкости становится турбулентной

18.02.09 | [Физика](#), [Юрий Ерин](#)

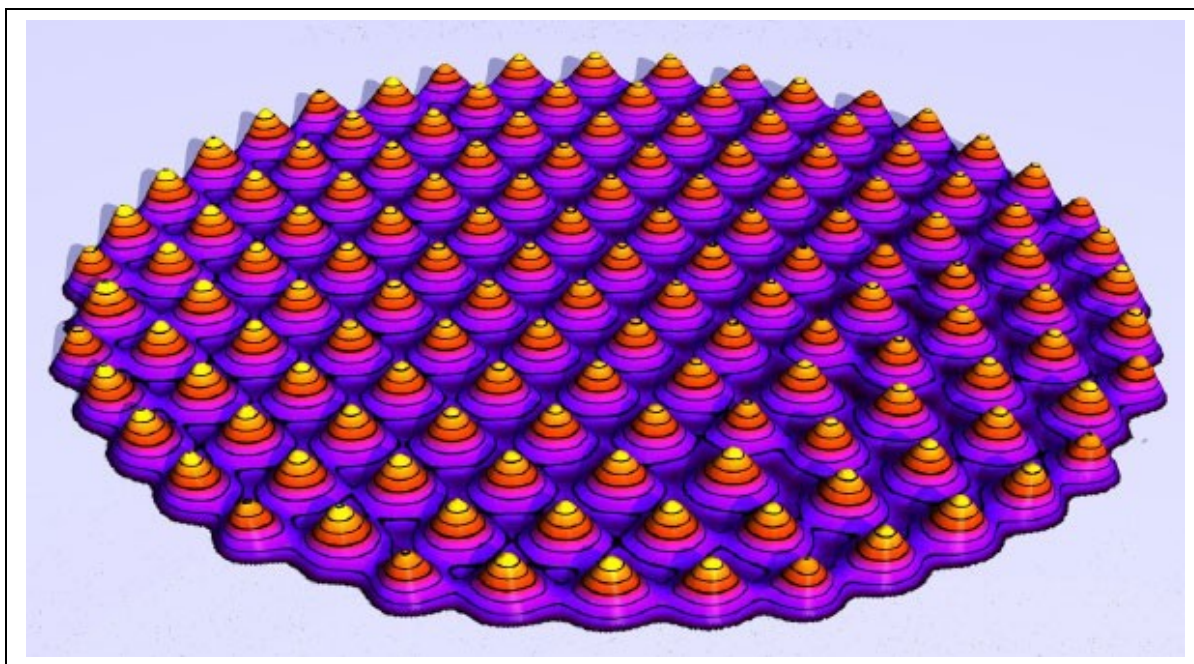


Рис. 1. Трёхмерная визуализация неустойчивости Розенцвейга на поверхности феррожидкости. Рис. из статьи С. Gollwitzer, G. Matthies, R. Richter, I. Rehberg, L. Tobiska. [The Relief of the Rosensweig Instability — a Quantitative Comparison between Experiment and Numerical Simulation](#) (PDF, 1,7 Мб)

Французские физики экспериментальным образом установили, что в феррожидкости может наблюдаться режим магнитной волновой турбулентности — хаотическое образование поверхностных волн с различной амплитудой. Такая ситуация возможна, когда индукция внешнего магнитного поля, перпендикулярно ориентированного к поверхности феррожидкости, превышает некоторое значение. Результаты эксперимента хорошо согласуются с разработанной ранее теорией магнитной волновой турбулентности в феррожидкостях и являются первым прямым ее подтверждением.

Обычно, когда говорят о [турбулентности](#), имеют в виду неупорядоченное, хаотическое движение среды — жидкости, газа, плазмы. Но в наши дни понятие «турбулентность» уже имеет более широкий смысл. Есть «привычная» турбулентность с вихрями, которую называют сильной турбулентностью, а есть волновая (или слабая) турбулентность. Этот второй вид неупорядоченного движения наблюдается, грубо говоря, там, где есть волны — это могут быть волны на поверхности океана во время шторма, альфвеновские волны в солнечной плазме (см. новость на «Элементах» [В солнечной короне наконец обнаружены альфвеновские волны](#), 04.09.2007), [спиновые волны](#) в твердом теле, [ленгмюровские волны](#). Существует даже оптическая турбулентность — связанная с распространением световых волн в сильно нелинейной среде.

Однако экспериментов по изучению волновой турбулентности очень мало, и большинство из них связано с изучением этого явления на поверхности жидкости, где волновую турбулентность можно условно разделить на два вида — капиллярную и гравитационную. Капиллярную турбулентность (когда длина волн на поверхности жидкости мала и их появление связано с поверхностным натяжением) уже наблюдали с помощью оптических методов. Гравитационную же турбулентность, имеющую место для волн большей длины, когда уже становятся существенными эффекты силы тяжести, можно изучать только методами *in situ* — то есть на месте, в режиме реального времени, следить за поведением волн на поверхности океана, моря или больших водоемов.

В 2007 году в журнале *Physical Review Letters* была опубликована статья французских исследователей [Observation of Gravity-Capillary Wave Turbulence](#) (в открытом доступе с ней можно ознакомиться [здесь](#)), в которой экспериментально исследовался переход из режима капиллярной волновой турбулентности в гравитационную на поверхности ртути.

На это раз физики из Франции усложнили свою задачу, замахнувшись на изучение волновой турбулентности на поверхности не обычной, а магнитной жидкости — так называемой феррожидкости. Полный текст их статьи [Wave Turbulence on the Surface of a Ferrofluid in a Magnetic Field](#), опубликованной в *Physical Review Letters*, доступен в виде [препринта](#).

Что же представляет собой феррожидкость? По своим магнитным свойствам жидкости делятся на диамагнетики, ослабляющие магнитное поле, и парамагнетики, которые это поле усиливают. Но только усиливают они его очень и очень незначительно. Своеобразным рекордсменом по увеличению индукции магнитного поля следует считать такую экзотическую жидкость, как сжиженный кислород при температуре 90 К — он усиливает внешнее магнитное поле в 1,0034 раза. Как видим, это усиление всё равно чрезвычайно мало — настоящих ферромагнетиков, усиливающих магнитное поле во много раз, среди жидкостей нет. Тем не менее получить жидкую среду с *почти* ферромагнитными свойствами реально. Для этого достаточно в обычную жидкость накрошить очень мелкие частицы ферромагнетика (размером порядка нанометра и с концентрацией 10^{16} – 10^{18} частиц на 1 см^3). Получившуюся смесь и назвали феррожидкостью. Благодаря малым размерам взвешенных частиц и мерам, предотвращающим их слипание, магнитные жидкости демонстрируют высокую стабильность, практически не разлагаясь, и после того, как магнитное поле убрано, восстанавливают свои прежние свойства.

Самые удивительные свойства феррожидкости проявляются, когда к ней начинают прикладывать внешнее магнитное поле, направленное перпендикулярно к ее поверхности. Тогда получается, что поверхность феррожидкости формируется не только под воздействием силы тяжести и силы поверхностного натяжения, как обычная жидкость, но еще и под воздействием магнитной силы. По мере увеличения индукции магнитного поля на поверхности феррожидкости начинает образовываться рябь, а затем, когда магнитное поле достигло некоего критического значения B_c , возникают неподвижные пики — или, говоря научным языком, правильная гексагональная решетка из вершин застывших волн (см. рис. 1). Такая структура нестабильна и носит название «неустойчивость Розенцвейга», по имени ученого, который первым ее наблюдал.

Вообще говоря, при определенных условиях неустойчивость Розенцвейга можно превратить в целое искусство, создавая на поверхности феррожидкости самые замысловатые фигуры и даже скульптуры (см. [видео](#)).

Также, справедливости ради скажем, что название для такого вида жидкости было выбрано не очень удачно, поскольку, в отличие от ферромагнетика, никакой остаточной намагниченности при снятии внешнего магнитного поля, так же как и спонтанной намагниченности, в феррожидкости не наблюдается. Если не прикладывать магнитное поле, то перед нами будет находиться самая обычная жидкость с взвешенными в ней частицами ферромагнетика.

Так вот, французские ученые были первыми, кто наблюдал и изучал волновую турбулентность на поверхности феррожидкости. Схема их экспериментальной установки показана на рис. 2.

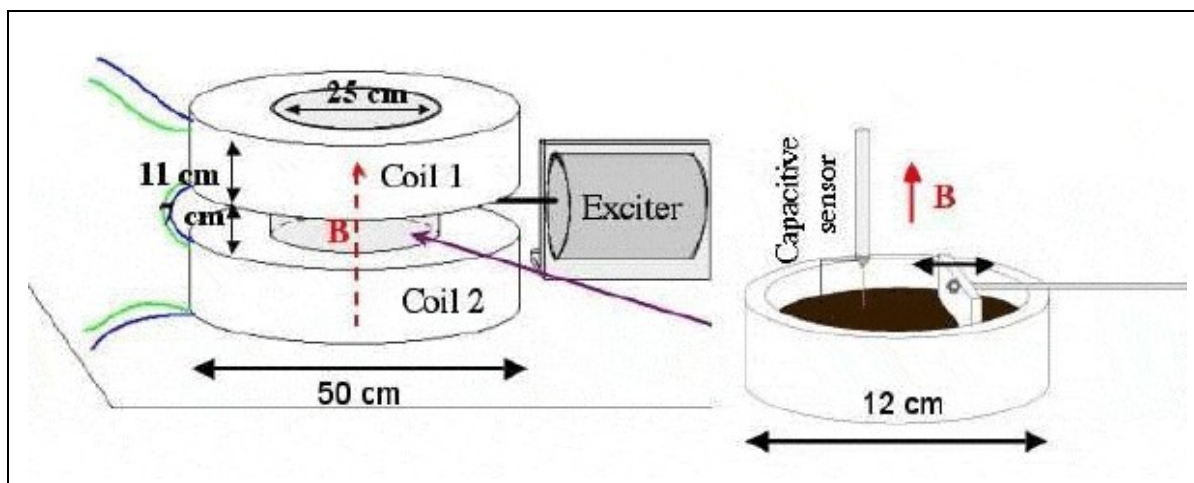


Рис. 2. Схема экспериментальной установки. Рис. из обсуждаемой статьи в *Phys. Rev. Lett.*

Установка состоит из цилиндрического контейнера (внутренний диаметр 12 см, высота 4 см), заполненного на глубину 2 см феррожидкостью, представляющей собой раствор с частицами оксида железа размером приблизительно 7,6 нм. Контейнер помещается в пространство между двумя катушками (зазор между катушками равен 7 см). Протекающий по катушкам постоянный ток генерирует магнитное поле между ними с максимальным значением индукции 0,078 Тл. Чтобы иметь возможность наблюдать волновую турбулентность в феррожидкости, ученые подвели к контейнеру возбудитель колебаний, который создавал низкочастотные (1–5 Гц) случайные «встряски» на поверхности жидкости. Амплитуда η возникающих турбулентных волн в феррожидкости фиксировалась с помощью специально прокалиброванного конденсатора. Измерения показали, что неустойчивость Розенцвейга (образование стационарных пиков на поверхности) для такой феррожидкости наступает при значении индукции магнитного поля около $0,0294 \pm 0,0002$ Тл, и прекрасно согласовывается с теоретическими предсказаниями (0,02923 Тл).

Несколько слов о методике исследования. Поскольку волновые процессы на поверхности феррожидкости являются хаотическими (турбулентными), фиксировать изменяющиеся случайным образом амплитуды η рождающихся волн при заданном значении индукции магнитного поля и в дальнейшем их визуализировать в виде графика функции $\eta(t)$, сложно и неудобно для дальнейшего анализа. Поэтому при изучении случайных процессов (это касается исследования не только волновой турбулентности, но и турбулентности вообще) ученые прибегают к спектральному анализу. Функцию $\eta(t)$ от времени возводят в квадрат и трансформируют с помощью Фурье-преобразования в функцию, называемую спектральной плотностью мощности «сигнала» (в данном случае сигнал — это волновой процесс на поверхности феррожидкости) и зависящую от обратного времени или от частоты.

Для чего это делается? Поясним на примере уже упоминавшейся статьи 2007 года [Observation of Gravity-Capillary Wave Turbulence](#). Экспериментальная установка, которая использовалась французами в более ранней работе, идентична установке в обсуждаемом здесь исследовании. На рис. 3 слева приведен график зависимости амплитуды рождающихся турбулентных волн $\eta(t)$ в обычной (не магнитной) жидкости.

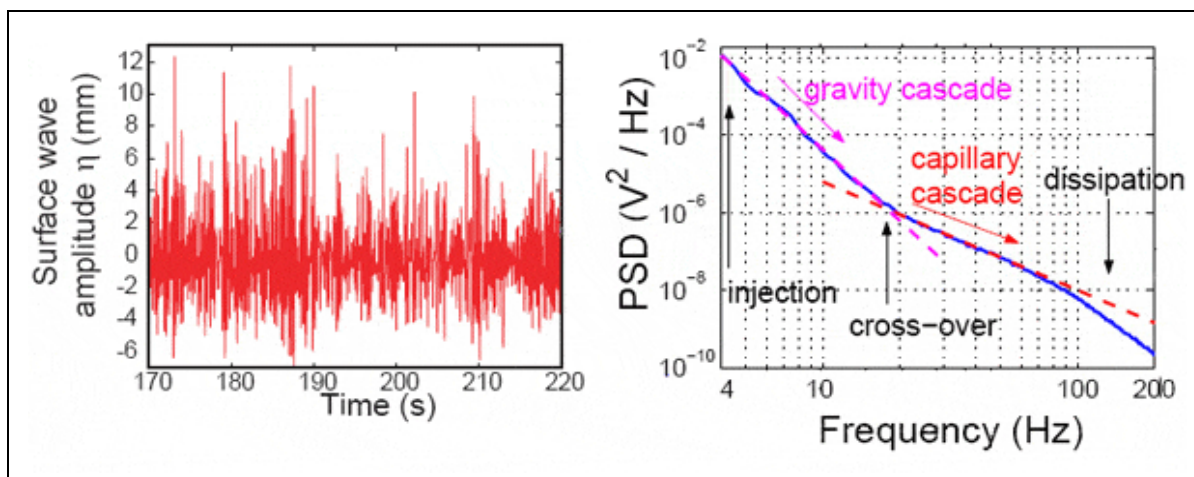


Рис. 3. Слева: измеренная экспериментальным образом временная зависимость амплитуды поверхностных волн ртути. Справа: график спектральной плотности мощности амплитуды поверхностных волн; отсутствие пиков на графике указывает на волновую турбулентность на поверхности ртути. При некоторой частоте (17 Гц) происходит переход (кроссовер) из режима гравитационной волновой турбулентности в режим капиллярной, где становятся существенными эффекты вязкости среды. Рис. из статьи Eric Falcon, Claude Laroche, Stéphan Fauve. [Observation of Gravity-Capillary Wave Turbulence](#) в *Phys. Rev. Lett.*

График не очень информативный и, как говорят физики, «шумящий», что, в принципе, неудивительно для случайного процесса. Но чтобы точно удостовериться, что данный процесс истинно случайный и хаотический, необходимо визуализировать спектральную плотность мощности функции $\eta(t)$, то есть зависимость амплитуды поверхностных волн от времени. Если график этой функции не будет иметь явно выделенных пиков, то процесс действительно случайный. График на рис. 3 справа показывает, что образующиеся поверхностные волны действительно являются волновой турбулентностью, так как явных всплесков на графике не наблюдается. Правда, одна особенность — изгиб на частоте 17 Гц — на приведенном графике спектральной плотности мощности есть, однако эта особенность связана с переходом (кроссовером) от режима гравитационной волновой турбулентности к капиллярной.

Такой же анализ был проведен французскими учеными и для феррожидкости в присутствии магнитного поля: спектральная плотность мощности сигнала — функции зависимости образующихся волн от времени — приведена на рис. 4. На вставке показана та же зависимость, но уже в отсутствие внешнего поля (график подобен графику на рис. 3 справа).

Пожалуй, главным результатом исследователей стал график эволюции режимов волновой турбулентности в феррожидкости при возрастании индукции внешнего магнитного поля (см. рис. 5) в различных частотных диапазонах функции спектральной плотности мощности. Нетрудно увидеть, что по сравнению с обычной жидкостью (см. рис. 3 справа) на графике появилась новая область — режим магнитной волновой турбулентности. Особенно он (режим) заметен, когда индукция внешнего магнитного поля перешагнула порог неустойчивости Розенцвейга (на рис. 5 — точечная линия, перпендикулярная оси абсцисс). Уточним еще раз на всякий случай, что речь здесь идет не о частоте возбудителя колебаний (у него она изменялась от 1 до 6 Гц), а о частоте, относящейся к функции спектральной плотности мощности волнового процесса на поверхности феррожидкости.

Результаты исследований, представленные в виде графика на рис. 5, можно пояснить так. При очень малых значениях индукции магнитного поля в области малых частот доминирующим процессом на поверхности феррожидкости является гравитационная волновая турбулентность, соответственно при больших частотах — капиллярная.

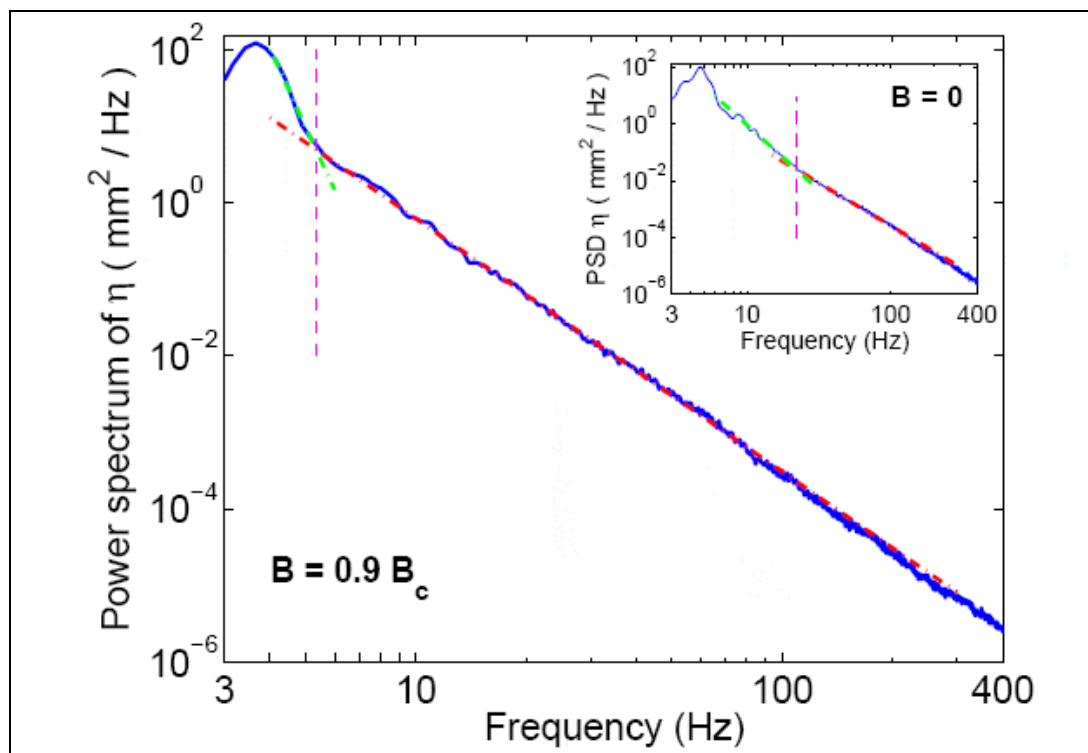


Рис. 4. График спектральной плотности мощности функции $\eta(t)$ для двух значений индукции внешнего магнитного поля. График во вставке соответствует значению $B = 0$. Основной график получен при $B = 0,9B_c$, где B_c — индукция магнитного поля, при которой появляется неустойчивость Розенцвейга. Вертикальные пунктирные линии — переходы от режима магнито-гравитационной волновой турбулентности к магнито-капиллярной: 5 Гц для $B = 0,9B_c$ и 20 Гц для $B = 0$. Рис. из обсуждаемой статьи в *Phys. Rev. Lett.*

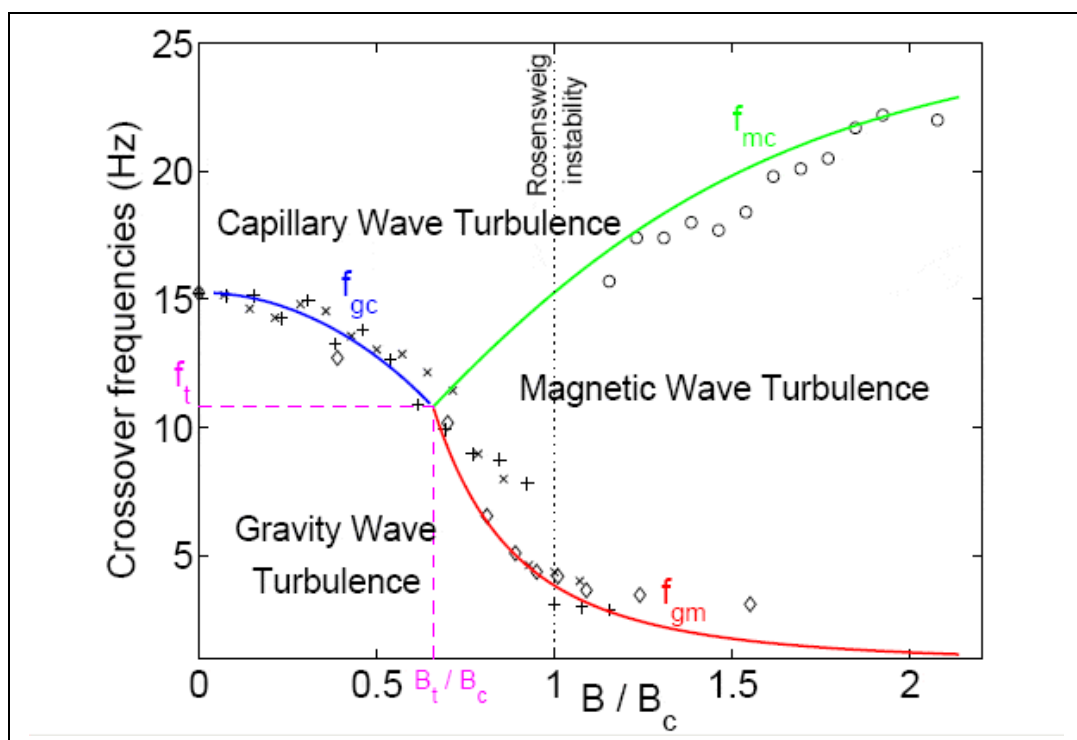


Рис. 5. Эволюция режима волновой турбулентности на поверхности феррожидкости при возрастании магнитного поля. Сплошными линиями показаны теоретические кривые, крестик, плюсики, кружок и ромб — точки, полученные опытным путем. Крестик соответствует частотному диапазону 1–4 Гц изменения случайной силы (возбудитель колебаний), ромб — 1–5 Гц и плюсики или кружок — диапазону 1–6 Гц. B_t — индукция магнитного поля, выше которой проявляется магнитная волновая турбулентность, f_t — соответствующее B_t значение частоты перехода гравитационной/капиллярной волновой турбулентности к магнитной. Для данной феррожидкости $B_t = 0,65B_c$ и $f_t = 10,8$ Гц. Рис. из обсуждаемой статьи в *Phys. Rev. Lett.*

Проще говоря, когда поле слабое, феррожидкость ничем не отличается от жидкости обычной. Магнитная волновая турбулентность начинает проявляться, когда магнитное поле достигнет некоторого значения B_t (для данной феррожидкости $B_t = 0,65B_c$, где B_c — индукция магнитного поля неустойчивости Розенцвейга) и в зависимости от частотного диапазона можно даже говорить либо о магнито-гравитационной турбулентности (малые частоты), либо о магнито-капиллярной в диапазоне высоких частот.

Ну и напоследок авторы приводят график распределения амплитуды «гуляющих» по поверхности феррожидкости волн (рис. 6) для разных значений индукции магнитного поля.

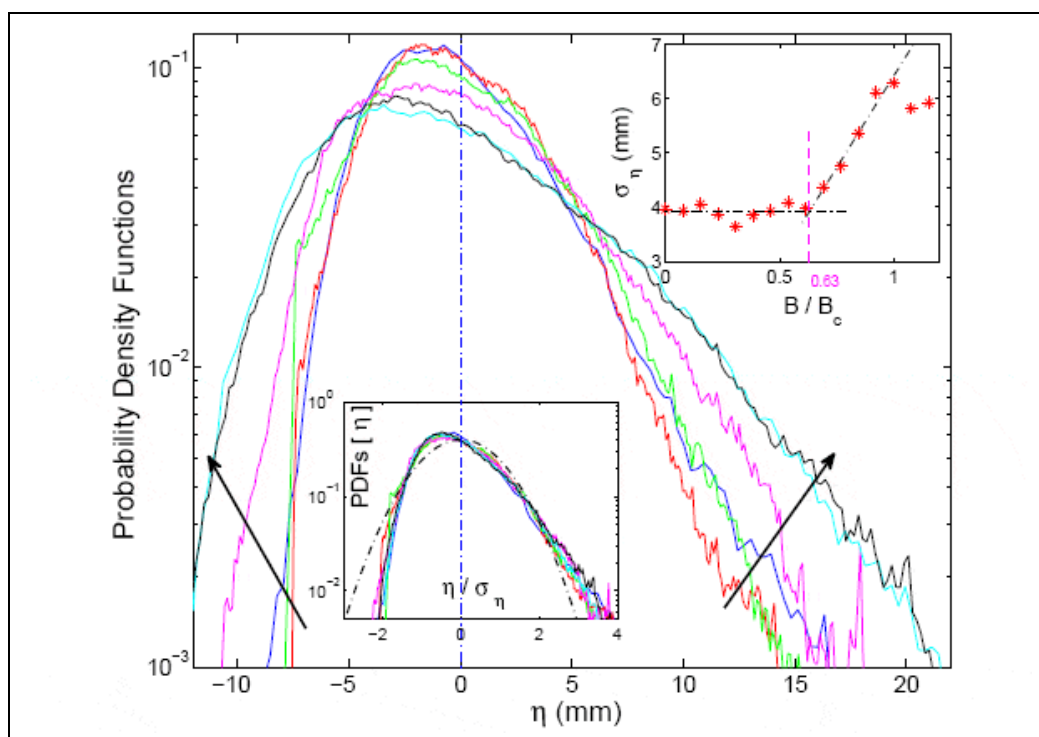


Рис. 6. Функция распределения амплитуды η поверхностных волн для различных возрастающих значений магнитного поля: $B/B_c = 0, 0,3, 0,54, 0,77, 0,92$ и $1,2$ (стрелками указано направление возрастания). Частотный интервал работы внешнего воздействия (возбудителя колебаний) 1–4 Гц. Рис. из обсуждаемой статьи в *Phys. Rev. Lett.*

Большинство образующихся турбулентных волн имеют амплитуду от -5 до 5 мм (знак минус означает впадины на поверхности магнитной жидкости). Однако в поле, превышающем поле неустойчивости Розенцвейга, существует вероятность наблюдать волну с амплитудой 2 см.

Источник. François Boyer, Eric Falcon. [Wave Turbulence on the Surface of a Ferrofluid in a Magnetic Field](#) // *Physical Review Letters*, 101, 244502 (2008).