

Применение концепции самоорганизованной критичности к динамике магнитного потока в дискретных сверхпроводниках.

С.Л. Гинзбург, Н.Е. Савицкая

Петербургский Институт Ядерной Физики им. Б.П.Константинова РАН, 188300, Гатчина, Россия.

Вскоре после того, как Бином была предложена модель критического состояния жесткого сверхпроводника второго рода [1], Де Жен [2] заметил сходство картины поведения магнитного поля внутри сверхпроводника в данной модели с динамикой кучи песка. Тогда же он высказал утверждение, которое опередило свое время примерно на тридцать лет. Он предположил, что, как при превышении наклоном кучи критического значения, песок начинает соскальзывать вниз, образуя лавину, так и в сверхпроводниках в надкритическом состоянии должны возникать связки, состоящие из десятков и сотен вихрей, движущихся с поверхности сверхпроводника к центру образца. При этом неявно предполагалось, что возникающие лавины имеют различные размеры. Однако прецизионные эксперименты по обнаружению этого явления и изучению функции распределения размеров возникающих лавин, появились сравнительно недавно (см., например, обзор [3]) Попытки теоретического объяснения данного феномена были предприняты в [4,5], где появление лавин связывалось с дискретным и случайным характером центров пиннинга в сверхпроводнике.

Параллельно с названными исследованиями возникла и развивалась чисто академическая наука о самоорганизации критического состояния, которая призвана была объяснить общие особенности в поведении гигантских диссипативных динамических систем [6]. Согласно основным положениям концепции самоорганизованной критичности (СОК), такие системы под влиянием малых внешних воздействий приходят в критическое состояние, которое является самоподдерживающимся. Самоорганизованное критическое состояние представляет собой набор метастабильных критических состояний, по которым блуждает система в процессе эволюции. Неотъемлемой частью динамики самоорганизованной системы являются лавины, возникающие после очередного возмущения системы и переводящие ее в очередное метастабильное состояние. Размеры возникающих в системе лавин подчиняются при этом степенному распределению с показателем близким к единице. Основной моделью для иллюстрации концепции СОК является реальная куча песка и математическая модель на основе клеточного автомата, также названная «моделью кучи песка».

Таким образом, наблюдается сходство явлений, возникающих в жестких сверхпроводниках второго

рода и в самоорганизованных системах. Оно отмечалось и в упомянутых выше работах по исследованию критического состояния сверхпроводников, где имеются ссылки на статьи, посвященные СОК, но не делалось попыток связать критическое состояние, возникающее в сверхпроводниках с самоорганизованной критичностью на уровне первых принципов. Впервые это было сделано нами (см., например,[7]).

В своих работах мы опирались на тот факт, что практически все свойства обычного сверхпроводника второго рода воспроизводятся в так называемом слабом сверхпроводнике — большом джозефсоновском контакте. С другой стороны уравнения, описывающие эту систему, гораздо более просты для анализа, чем уравнения для объемного сверхпроводника.

В наших работах мы рассмотрели двумерную дискретную систему малых джозефсоновских контактов [7]. Основным параметром в такой системе является безразмерная величина $V \sim j_c a^3 / \phi_0$ (a - среднее расстояние между контактами, j_c - плотность критического тока контактов, ϕ_0 - квант потока магнитного поля). В случае $V \ll 1$, переходом к континуальному пределу, уравнения для дискретной системы сводятся к уравнениям, описывающие большой джозефсоновский контакт без пиннинга. Если же $V \gg 1$, то дискретная система контактов представляет собой большой джозефсоновский контакт с очень сильным пиннингом. Также мы показали, что при $V \gg 1$ уравнения, описывающие дискретный сверхпроводник, эквивалентны алгоритмам, описывающим модели систем с самоорганизацией.

Мы также исследовали квазиодномерные модели дискретных сверхпроводников со случайным расположением контактов как при $V \gg 1$, так и при $V \sim 1$. Все эти системы демонстрируют самоорганизованное поведение. При этом важно, что лавины в дискретных сверхпроводниках проявляют себя как импульсы напряжения, возникающие после очередного изменения внешнего магнитного поля. Интегральная величина этих импульсов и является аналогом размера лавины — основной величины, которая изучается при рассмотрении математических моделей «кучи песка».

Однако измерение интегрального напряжения в эксперименте является довольно сложной задачей, так же как, например, подсчет всех актов соскальзывания песчинок в реальной куче песка. Эти характеристики являются «внутренними». «Внешней» же характеристикой для кучи песка, за которой наблюдали экспериментально [8], является масса системы. Аналогом этой величины для случая дискретных сверхпроводников является полный магнитный поток в системе. Именно эта характеристика и ее изменение за время лавины изучаются обычно в эксперименте. Так, например, решетка джозефсоновских контактов, подобная рассмотренной нами, изучалась в работе [9], где было показано, что скачки магнитного потока подчиняются степенному распределению.

Мы в своих работах рассматривали поведение обеих величин и в результате оказалось, что при $V \gg 1$ и флуктуации напряжения и флуктуации скачков потока описываются степенными функциями распределения, а при $V \sim 1$ степенная зависимость сохраняется только для скачков потока. Таким образом, можно сделать вывод о том, что в дискретных сверхпроводниках действительно реализуется критическое состояние, подобное самоорганизованному, которое можно изучать экспериментально.

Кроме того, работа важна и с точки зрения развития концепции СОК. Несмотря на то, что данная концепция претендует на всеобщность и применимость в различных областях естествознания, таких как экономика, геология, биология, физика, до сих пор математические модели систем с самоорганизацией описывались клеточными автоматами, в то время, как поведение реальных объектов описывается системами дифференциальных уравнений. Мы в нашей работе представляем физическую систему, описываемую дифференциальными уравнениями и демонстрирующую СОК. Анализ структуры этих уравнений может дать ответ на вопрос, какой должна быть система уравнений, чтобы она описывала объект с самоорганизацией. Это может привести к обнаружению новых физических систем, демонстрирующих СОК.

[1] Bean C.P., Phys.Rev.Lett., 8, 250, 1964
 [2] Де Жен П.Г., Сверхпроводимость металлов и сплавов, «Мир», Москва, 1968.
 [3] E.Altshuler, T.N.Johansen, Rev.Mod.Phys, 76, 471 (2004)
 [4] Pla O., N.K.Wilkin, H.J.Jensen, Europhys.Lett, 33, 297, 1996.
 [5] Plourde, B. F.Nori, M.Bretz, Phys.Rev.Lett., 71, 2749, 1993.
 [6] P.Bak, C.Tang, K.Wiesenfeld, Phys.Rev.Lett., 59,381(1987).

[7] S.L.Ginzburg, N.E.Savitskaya, Journal of Low Temperature Physics, 130, N 3/4, 333 (2003).
 [8] Held G.A. et al, Phys.Rev.Lett., 65, 1120, 1990.
 [9] С.М.Ишикаев, Э.В.Матизен, В.В.Рязанов, В.А.Обознов, А.В.Веретенников, Письма в ЖЭТФ, 72, 39(2000).