

ДИНАМИКА МАГНИТНОГО ПОТОКА В КРИТИЧЕСКОМ СОСТОЯНИИ В ДИСКРЕТНОМ СВЕРХПРОВОДНИКЕ

С.Л.Гинзбург, А.В.Накин, Н.Е.Савицкая
 Петербургский институт ядерной физики им.Б.П.Константинова РАН
 188300, Гатчина, Россия.

Проведенные в последнее время эксперименты по изучению критического состояния жестких сверхпроводников второго рода и решеток джозефсоновских контактов (см. обзор[1]) показали, что в данных системах возможна лавинообразная динамика. В связи с этим, в названных работах проводятся параллели с явлением самоорганизованной критичности (СОК)[2].

Однако в работах, посвященных магнитной динамике сверхпроводников, не было сделано попытки связать явления, наблюдаемые в сверхпроводниках, и самоорганизованную критичность, исходя из уравнений, описывающих сверхпроводники и модели самоорганизованных систем.

В настоящей работе мы рассматриваем такую связь на простом примере одномерного дискретного сверхпроводника (многоконтактного СКВИДа), который является большим дискретным джозефсоновским контактом. Данная система представлена на рисунке 1. Контакты расположены вдоль оси x , расстояние между i -ым и $(i+1)$ -ым контактами является случайной величиной b_i . Система бесконечна по оси y и помещена в медленно меняющееся магнитное поле H_{ext} , также направленное вдоль оси y .

Такая решетка описывается системой уравнений для калибровочно-инвариантной разности фаз на контактах φ_i :

$$V \sin \varphi_i + \tau \frac{\partial \varphi_i}{\partial t} = [J_i \varphi_{i+1} - (J_i + J_{i-1}) \varphi_i + J_{i-1} \varphi_{i-1}]; \quad i \neq 1, N; \quad V \sin \varphi_1 + \tau \frac{\partial \varphi_1}{\partial t} = [J_1 \varphi_2 - J_1 \varphi_1] - h_{ext}; \quad (1)$$

$$V \sin \varphi_N + \tau \frac{\partial \varphi_N}{\partial t} = [-J_{N-1} \varphi_N + J_{N-1} \varphi_{N-1}] + h_{ext}; \quad V = \frac{16\pi^2 a l \lambda_L j_c}{\Phi_0}; \quad \tau = \frac{8\pi a l \lambda_L}{\rho}; \quad J_i = \frac{a}{b_i}; \quad h_{ext} = \frac{4\pi \lambda_L a}{\Phi_0} H_{ext}$$

где a — среднее расстояние между контактами, ρ — поверхностное сопротивление контакта, Φ_0 — квант потока, λ_L — глубина проникновения магнитного поля, l — размер контакта, j_c — плотность критического тока контактов. Коэффициенты J_i характеризуют внутреннюю собственную стохастичность системы, которая всегда присутствует в реальных сверхпроводниках. Только в случае разупорядоченной системы, когда имеется некоторый разброс в коэффициентах ($\Delta J \neq 0$) в системе может реализовываться самоорганизованное критическое состояние [3].

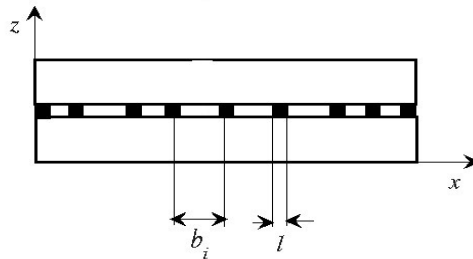


Рисунок 1. Сечение многоконтактного СКВИДа плоскостью (x, z)

Основным параметром, определяющим магнитную динамику рассматриваемой системы является величина V . В случае $V \gg 1$ уравнения (1) эквивалентны алгоритмам, описывающим системы с самоорганизацией [4].

Мы исследовали описанную решетку методом компьютерного моделирования при различных значениях параметра V , как больших ($V=40$), так и для переходных ($V=1.2$), и для малых ($V=0.6$).

Для всех рассмотренных значений параметра V , через некоторое время система достигала состояния, которое представляло собой набор метастабильных состояний, переходящих друг в друга посредством лавин. Лавина в этом случае представляла собой вхождение в решетку большого числа квантов магнитного потока и его распределение по ячейкам. Мы изучали полный магнитный поток в системе, величину, которая обычно измеряется экспериментально [1] и определяется формулой: $\Phi_n(t) = \frac{\Phi_0}{2\pi} (\varphi_n^N(t) - \varphi_n^1(t))$; а также изменение этой величины: $\Delta\Phi_n = \Phi_n(t_{en}) - \Phi_n(t_{bn})$, где t_{bn}, t_{en} — времена начала и конца n -ой лавины.

Мы рассмотрели поведение этих двух величин в зависимости от величины внешнего магнитного поля для двух значений параметра V . Результаты представлены на рисунке 2. Мы видим, что магнитный поток в системе меняется скачкообразно в случайные моменты времени, и данные скачки имеют различные размеры.

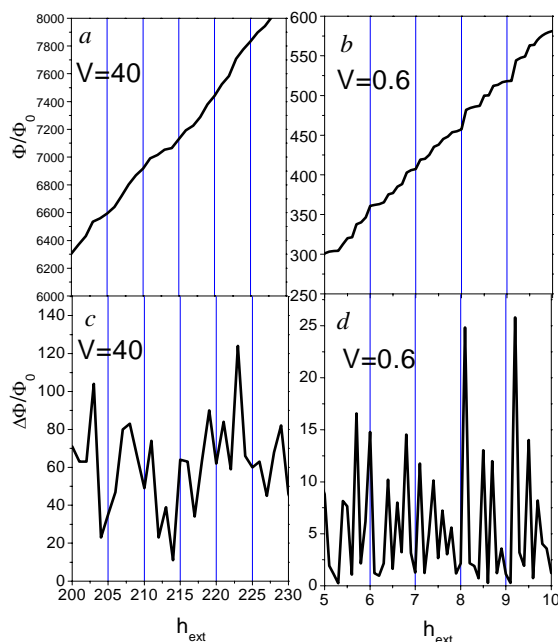


Рисунок 2. Изменение полного магнитного потока (a,b) и скачки магнитного потока (c,d) в СКВИДе в зависимости от величины внешнего магнитного поля при различных значениях параметра V .

Мы также изучили плотности вероятности величины $\Delta\Phi_n$ для различных значений параметра V . Из рисунка 3 видно, что данная величина имеет участок степенного поведения, что хорошо согласуется с данными экспериментов, см., например, [5]-[7].

Таким образом мы дали теоретическое описание лавинообразной динамики магнитного потока в критическом состоянии жестких сверхпроводников второго рода, используя модель одномерного дискретного сверхпроводника, адекватно отражающую все основные физические свойства реальных сверхпроводников. Мы показали, что в исследуемой системе реализуется самоорганизованное критическое состояние в обобщенном смысле. Это означает, что критическое состояние состоит из большого числа метастабильных состояний, переходящих друг в друга посредством лавин, которые представляют собой вхождение в систему большого числа квантов магнитного потока и перераспределение их внутри системы. Плотность вероятности скачков полного магнитного потока системы при этом является степенной функцией. Результаты не зависят от величины основного параметра системы V . Полученные нами теоретические результаты хорошо согласуются с наблюдаемыми ранее в экспериментах.

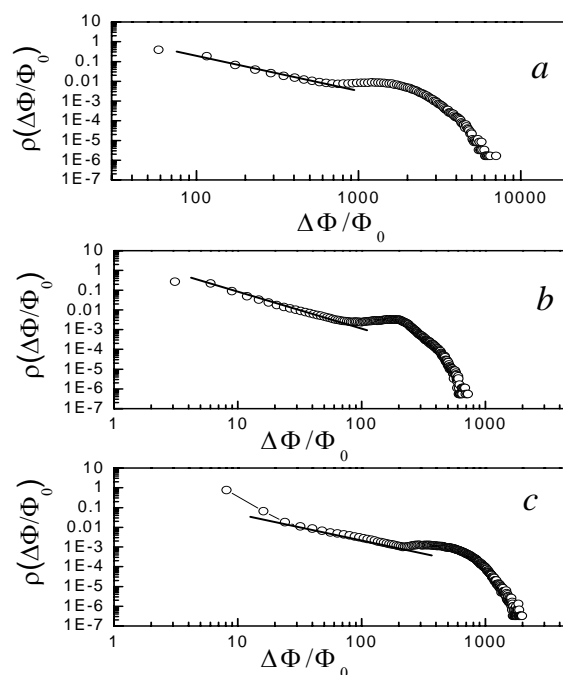


Рисунок 3. Плотности вероятности скачков магнитного потока в СКВИДе размером $N=501$, $\Delta J = 0.5$ для различных значений параметра V : а) $V=40$, наклон фитирующей прямой $\alpha = -1.01$, б) $V=1.2$, $\alpha = -1.26$, в) $V=0.6$, $\alpha = -1.59$.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (грант № 05-02-17626), а также Научного Совета «Сверхпроводимость» и Государственных программ «Квантовая макрофизика» и «Сильно-коррелированные электроны в полупроводниках, сверхпроводниках и магнитных материалах»

ЛИТЕРАТУРА

1. E. Altshuler and T.N. Johansen, Rev. Mod. Phys., **76**, 471 (2004)
2. P. Bak, C. Tang, K. Wiesenfeld, Phys. Rev. Lett., **59**, 381 (1987).
3. S.L. Ginzburg and N.E.Savitskaya, Journal of Low Temperature Physics, **130**, 333 (2003).
4. S.L. Ginzburg, JETP, **79**, 334 (1994).
5. S. Field, J. Witt, F.Nori, X.Ling, Phys. Rev. Lett., **74**, 1206 (1995).
6. C.M. Aegerter, M.S. Welling, R.J.Wijngaarden, Europhys. Lett., **65**, 753 (2004).

7. S.M. Ishikaev, E.V. Matizen, V.V.Ryazanov, V.A.Oboznov, A.A.Veretennikov, JETP Lett., **72**, 39 (2000).