

Магнитные свойства квадратных джозефсоновских решеток 100x100. Самоорганизованная критичность и асимметрия в динамике магнитного потока

С.М. Ишикаев, Э.В. Матизен

Институт неорганической химии им. А.В. Николаева СО РАН, 630090, Новосибирск, Россия

В.А. Обознов

Институт физики твердого тела РАН, 142432, Черноголовка, Московская область, Россия

Представлены результаты измерения магнитного момента квадратных решеток джозефсоновских переходов (J-решеток). Целью работы было изучение динамики магнитного потока в J-решетке при различных температурах. Для SIS-решеток наблюдались две температурные области, отличающиеся различным характером кривых намагничивания. В низкотемпературной области обнаружены лавины магнитного потока. Спектр зависит степенным образом от частоты: $1/f^\alpha$. Распределение лавин по размерам носит степенной характер $P \sim A^{-n}$ с кроссовером, когда показатель степени резко меняется от $n \approx -0.7$ при малых размерах лавин, до $n \approx -9$ при больших. Степенное распределение характерно для самоорганизованной критичности (СОК). В SNS-решетках лавины не наблюдались, но обнаружена асимметрия магнитной динамики.

Имеется большое количество теоретических работ (например, [1]), посвященных динамике магнитного потока в регулярных J-решетках. Однако мы обнаружили только одну работу других авторов [2], посвященную прямым измерениям магнитных свойств J-решеток, опубликованную уже после нашего первого сообщения [3].

Особый интерес представляет проблема существования самоорганизованной критичности (СОК) в J-решетках. СОК наблюдается в сложных интерактивных системах. Несмотря на хаотизацию движения, такие системы самоорганизуются: появляется некий постоянный (в среднем) параметр, например, у кучи песка - угол ее склона. В состоянии СОК возникают лавины совершенно различного размера, поддерживающие в среднем критическое состояние системы, и не зависящие от величины внешнего воздействия или флуктуации, и даже совершенно ничтожное воздействие может привести к лавине громадного размера (катастрофе). Распределение лавин по размеру имеет степенной характер с отрицательным показателем, что является "визитной карточкой" СОК [4].

Однако в последнее время опубликованы исследования, в которых подвергается сомнению степенной характер распределения амплитуд лавин при реализации СОК. Ревизия и эксперимент [5] показывают, что функция распределения имеет скорее экспоненциальный характер $P(x) \sim \exp(-(x/x_0)^\mu)$, где μ - некоторая константа. Очевидно, в этом случае нет масштабной инвариантности функции распре-

деления, поскольку имеется характерный размер лавины x_0 . Это противоречит "классическому" СОК, предполагающему скейлинг в наблюдении лавин всех размеров.

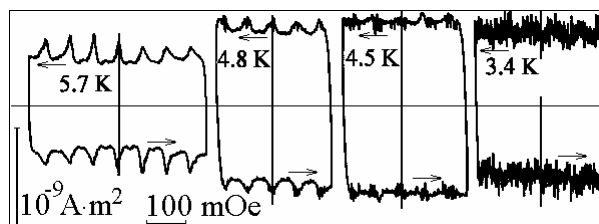


Рис.1. Семейство петель гистерезиса SIS-решетки

Нами изучались квадратные J-решетки, состоящие из 100×100 ячеек. В SIS-решетках наблюдаются две температурные области с разной динамикой кривых намагничивания. Кривые $M(H)$ выше 5.3 K полностью воспроизводимы. Пики при целочисленных фрустрациях (с периодом 59 мЭ) отражают увеличение тока депиннинга, когда распределение флюксонов в решетке наиболее регулярное и устойчивое.

При достаточно высоких температурах, когда $LI_C \ll \Phi_0$ (L - индуктивность ячейки, I_C - критический ток джозефсоновского контакта, Φ_0 - квант потока), каждый флюксон простирается на множество ячеек, и магнитную динамику джозефсоновских вихрей можно описывать в непрерывном пределе. Это подтверждается тем, что экспериментальные кривые даже в деталях согласуются с кривыми, рассчитанными для больших значений джозефсоновской глубины проникновения [1, рис. 14].

Ниже 5.1 K наблюдаются скачки магнитного потока (сначала на вершинах пиков), случайные по интервалу между ними и амплитуде, растущей с понижением температуры - возникает своеобразный "хаос". Скачки соответствуют лавинам из десятков и сотен флюксонов.

При низких температурах $LI_C > \Phi_0$, и в каждой ячейке может находиться лишь целое число квантов потока. Динамику движения флюксонов в данном режиме можно описывать как движение дискретных квазичастиц. Как было предположено в [6] в J-решетке при этом может реализоваться СОК.

Амплитудное распределение для массива 16000 лавин имеет два участка степенной зависимости с резким кроссовером, когда показатель степени резко

ко изменяется от -0.7 до -9 с увеличением амплитуды скачков.

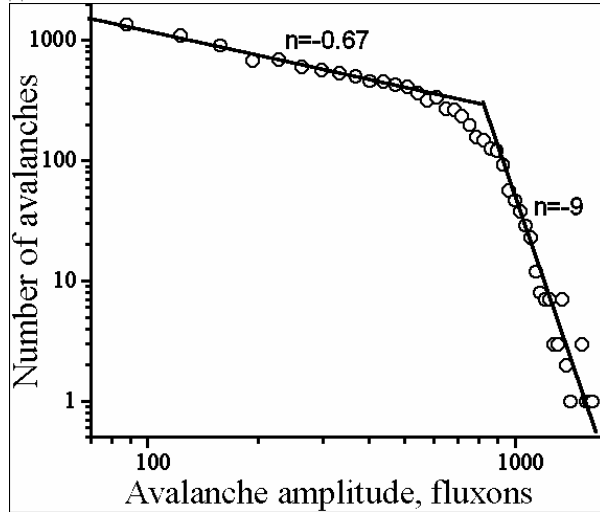


Рис. 2. Гистограмма лавин потока при $T=2.1$ К.

На петлях гистерезиса SNS-решеток лавины потока не наблюдались даже при больших критических токах контактов, когда заведомо выполняется необходимый для реализации СОК критерий $LI_C \gg \Phi_0$. Их отсутствие в решетке можно объяснить значительной диссипацией при прохождении вихрей сквозь нормальный металл джозефсоновских переходов, в результате чего флюксоны, по-видимому, не могут накопить кинетическую энергию, необходимую для развития лавин.

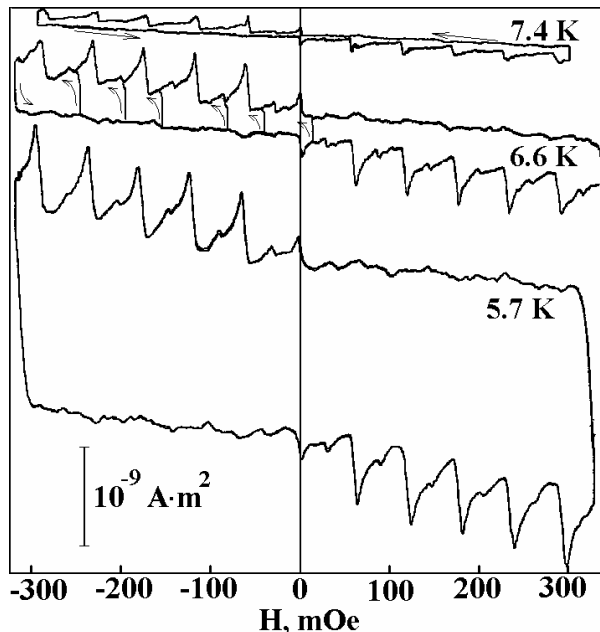


Рис. 3. Семейство петель гистерезиса SNS-сетки.

На кривых намагничивания $M(H)$ [7], в той части, где наблюдаются периодические пики, их форма прекрасно согласуется с расчетами [1].

В SNS - решетках наблюдается необычное явление, противоречащее теоретическим описаниям свойств джозефсоновских решеток: существенная

асимметрия динамики магнитного потока. Острые регулярные пики на петлях гистерезиса наблюдаются лишь при увеличении абсолютного значения поля, в то же время при его уменьшении они практически не выражены и появляются снова лишь после прохождении поля через нуль.

Поскольку пики на кривой намагничивания являются отражением упорядоченного заполнения J-решеток магнитным потоком, их отсутствие при уменьшения поля указывает, очевидно, на неупорядоченность в распределении потока в джозефсоновской структуре. Таким образом, вход флюксонов в решетку сопровождается образованием регулярных структур в их распределении, в то время как выход из нее происходит довольно беспорядочно. Данное явление имеет общий характер, асимметрию можно наблюдать также на SIS-решетках (рис.1, 5.7 К), но она выражена в них весьма слабо. Таким образом, асимметрию можно признать общим свойством кинетического движения джозефсоновских вихрей в J-решетках, не зависящим от типа контактов.

Асимметрия не претерпевает заметного изменения при деструкции части ячеек решетки вблизи ее границ. Из этого можно делать вывод, что процессы упорядочения потока определяются в первую очередь взаимодействием флюксонов вдали от границ.

Мы полагаем, что существенную роль играет то, что в исследованной нами структуре размеры джозефсоновских контактов ($\sim 4-6 \mu\text{m}$) в принципе нельзя считать пренебрежимо малыми с размерами ячеек СДП ($20 \mu\text{m}$). При моделировании вихревой динамики в джозефсоновских сетях в известных нам работах размеры контактов не учитываются, и видимо, в этом кроется причина того, что подобное асимметричное поведение не предсказывалось ни в одной из теоретических работ.

Работа поддержана грантом РФФИ 02-02-16564, а также Госконтрактом №40.012.1.1.1356.

1. D. Dominguez and J. V. Jose, Phys. Rev. B 53, 11692 (1996); D.-X. Chen, J.J. Morreno and A. Hernando, Phys. Rev. B 53, 6579 (1996); D. Reinel, W. Dieterich, A. Majhofer, T. Wolf, Physica C, vol.193, c.243-200 (1995); B. В. Брыксин, А. В. Гольцев, С. Н. Дороговцев. Письма в ЖЭТФ, 51, 53 (1990); F.M. Araujo-Moreira, P. Barbara, A.B. Cawthorne, C. J. Lobb, Phys. Rev. Lett. 78, 4625 (1997)
2. W. Maluf Jr., G. M. Cecato, P. Barbara et.al. J. of Magn. and Magn. Materials 226-230, 290 (2001)
3. S.M. Ishikaev, E.V. Matizen, V.V. Ryazanov et.al., JETP Lett. , 72, 39 (2000)
4. P. Bak, C. Tang, K. Wisenfeld, Phys. Rev. Lett. 59, 381 (1987); P. Bak, K. Chen, M. Creutz, Nature 342, 780 (1989)
5. E. Laherrere, D. Sornette Eur. Phys. B, 2, 525 (1998); K. Behnia, C. Capan, D. Mailly, B. Etienne Phys. Rev. B 61, R3815 (2000)
6. С. Л. Гинзбург ЖЭТФ, 106, 607-626 (1994)
7. С.М.Ишикаев, Э.В.Матизен, В.В.Рязанов, В.А.Обознов Письма в ЖЭТФ 76 39 (2002).