

КОНФЕРЕНЦИИ И СИМПОЗИУМЫ

**НАУЧНАЯ СЕССИЯ ОТДЕЛЕНИЯ ОБЩЕЙ ФИЗИКИ И АСТРОНОМИИ
РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК**

(29 апреля 1992 г.)

29 апреля 1992 г. в Институте физических проблем им. П.Л. Капицы РАН состоялась научная сессия Отделения общей физики и астрономии РАН. На сессии были заслушаны доклады:

1. А.К. Звездин, А.Ф. Попков, М.В. Четкин. Динамика солитонов в доменной границе ферромагнетика.

2. С.Н. Уточкин. Новые магнитные структуры и фазовые переходы в магнитных сверхрешетках и многослойных пленках.

Краткое содержание одного доклада публикуется ниже.

А.К. Звездин, А.Ф. Попков, М.В. Четкин. Динамика солитонов в доменной границе ферромагнетика. Изучение блоховских линий (БЛ), разделяющих между собой участки доменной границы Блоха с различным направлением разворота спинов, имеет принципиальное значение для понимания динамических процессов в магнетиках [1]. Блоховские линии интересны также для микроэлектроники в связи с разработкой памяти со сверхвысокой информационной плотностью [2].

С топологической точки зрения БЛ представляет собой линейный дефект векторного поля намагниченности — магнитный вихрь. Вихревые свойства БЛ определяют гиротропное взаимодействие ее с доменной границей (ДГ), в которой она движется. Структура движущейся БЛ является довольно сложной. Она имеет компактное ядро, в котором происходит быстрое изменение ориентации спинов, и протяженную "оболочку", которая представляет собой изгиб доменной границы в месте нахождения БЛ [3—5]. Ядро движущейся БЛ является носителем ее топологического заряда, определяющего степень закрученности спинов в ДГ. Прогиб в ДГ возникает лишь при движении БЛ под действием гироскопической силы, действующей на ДГ по нормали к ее плоскости. В статике прогиб практически отсутствует и возможно лишь незначительное изменение толщины доменной границы и небольшой скос в месте нахождения БЛ. Прогиб особенно важен с экспериментальной точки зрения для наблюдения движущихся БЛ, хотя в настоящее время разрабатываются и другие возможности наблюдения БЛ. Амплитуда прогиба от одной движущейся БЛ невелика, и

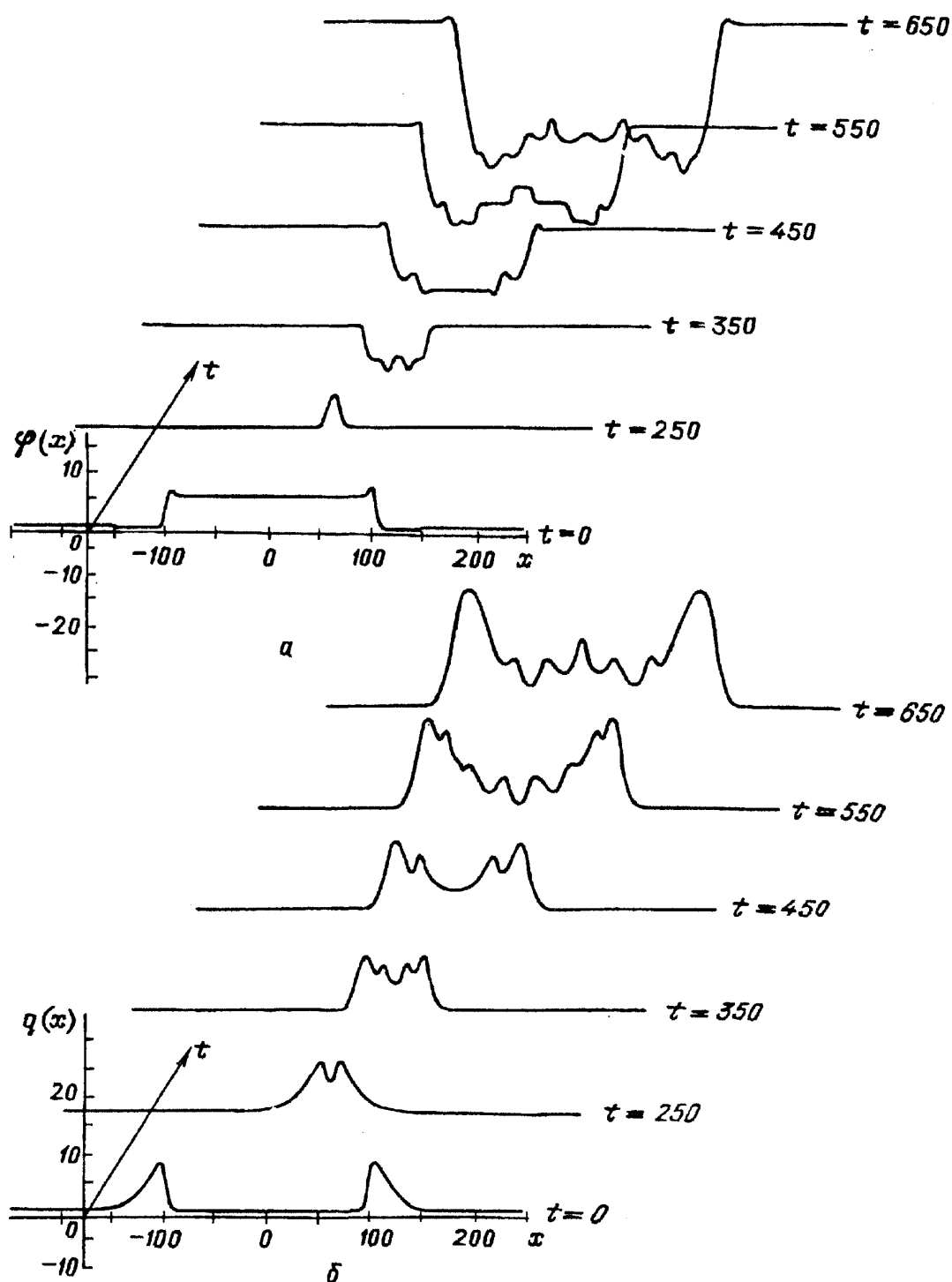
экспериментально легче исследовать кластеры БЛ, содержащие N БЛ, где N — топологический заряд кластера, равный полному углу закрученности спинов, деленному на π .

В одноосном сильноанизотропном ферромагнетике БЛ и их кластеры можно описать при помощи уравнений Слончевского [1], которые представляют собой, по сути дела, надлежащим образом редуцированные уравнения Ландау — Лифшица, в которых движущаяся одиночная БЛ описывается решением солитонного типа. Естественно допустить, что кластерам БЛ можно поставить в соответствие многосолитонные математические структуры. Хотя уравнения Слончевского не относятся к известным классам интегрируемых систем, такая ассоциация является достаточно содержательной, тем более, что уравнения Слончевского обладают важной асимптотикой, в которой они переходят в обобщенное уравнение синус-Гордона [3]. С учетом затухания и внешней накачки эта асимптотика полностью изоморфна уравнениям распределенного перехода Джозефсона, в котором солитонные решения хорошо исследованы теоретически и экспериментально. Это говорит о том, что в динамике БЛ и их кластеров, особенно в процессах их столкновений, можно ожидать проявления солитонных свойств.

В работах [6,7] представлены результаты экспериментальных исследований динамики кластеров БЛ, подтверждающие эти соображения. В частности, было показано, что достаточно быстрые кластеры БЛ при встречном столкновении проходят друг через друга с сохранением их индивидуальных топологических зарядов, в то время как медленные кластеры аннигилируют. Классическая теория солитонов дает лишь наводящие соображения для постановки и интерпретации подобных экспериментов. Необходимо исследовать реальную ситуацию с учетом накачки, диссипации, деформируемости ДГ и т.д. Результаты этого исследования представлены в настоящем докладе.

Мы показали, что динамические свойства БЛ в доменной границе одноосного ферромагнетика напоминают в известной степени свойства топологических солитонов, что особенно ярко проявляется при лобовом столкновении индивидуальных БЛ и кластеров. Следует отметить, что система динамических уравнений, описывающих БЛ, не относится к известным классам интегрируемых уравнений даже в пренебрежении диссипацией и накачкой. Такое поведение БЛ, по-видимому, связано с наличием компактного ядра БЛ, в котором происходит быстрое изменение спинов в пространстве. Предсказан новый эффект частичной (поэтапной) аннигиляции кластеров БЛ в области критической скорости [8]. В численных экспериментах по столкновению БЛ нами обнаружено недавно новое свойство обсуждаемых солитонов. При больших скоростях поступательного движения ДГ, близких к пиковой скорости $v \propto v_p$, столкновение БЛ инициирует непрерывную генерацию новых пар БЛ, как показано на рисунке, которая заканчивается только если скорость ДГ становится меньше критической. Подобное явление также недавно наблюдалось в эксперименте.

Можно отметить весьма близкую аналогию в поведении БЛ и многосоли-



Генерация блоховских линий в движущейся доменной границе после столкновения изолированных БЛ. *a* — Эволюция угла $\varphi(x, t)$ выхода намагниченности из плоскости доменной границы. *б* — Эволюция профиля доменной границы $q(x, t)$

тонных возбуждений распределенного перехода Джозефсона. Но есть и существенные различия, связанные, в частности, с тем, что в случае БЛ добавляется дополнительный фактор (кроме накачки и диссипации), разрушающий интегрируемость системы и солитонное поведение, а именно — прогиб ДГ, обусловленный гироскопической силой при движении БЛ, т.е. вихревой природой БЛ. Этот фактор открывает новые возможности экспериментального исследования

динамического взаимодействия кластеров БЛ. Здесь речь идет о столкновениях кластеров, движущихся в одном направлении (столкновениях "вдогонку"), — явления, по-видимому, неизвестного в распределенном переходе Джозефсона. Такая возможность появляется благодаря тому, что из-за прогиба ДГ коэффициент вязкого трения, действующего на кластер (или другими словами, его подвижность), зависит от его скорости и величины топологического заряда. Следовательно, в ДГ при наличии накачки можно создать одновременно несколько кластеров, обладающих различными топологическими зарядами и движущихся с различными скоростями [9], т. е. создать условия для их однонаправленного столкновения. Эти соображения, а также результаты численных расчетов по неполному прохождению кластеров БЛ при столкновении, экспериментальные данные [10] по частичной аннигиляции кластеров БЛ делают обсуждаемую ситуацию более общей, чем это следует из классической теории солитонов.

Результаты представленного здесь теоретического анализа находятся в хорошем качественном соответствии с опытными данными [6,7,9]. Для более детального анализа динамического взаимодействия БЛ и их кластеров, особенно в области критических скоростей, где возможна частичная аннигиляция кластеров, нужно, по-видимому, более точно учитывать магнитодипольное взаимодействие (по сравнению с использованным в настоящей работе приближением). Важным является также количественный анализ роли "скрученности" ДГ в явлениях столкновения БЛ, но выяснение этого вопроса увеличивает размерность задачи [11].

В пленках с перпендикулярной анизотропией со скрученной структурой доменной границы пиковая скорость u_p движения вертикальных блоховских линий определяется формулой $u_p \propto (sv_p)^{1/2} Q^{1/4} (\pi/2)^{1/2}$, где s — скорость изгибных колебаний доменной границы (ДГ), v_p — пиковая скорость ДГ, Q — фактор качества материала. Механизм ограничения скорости БЛ обусловлен преобразованием ее в кластер из пяти и более БЛ [12]. Для ультратонких пленок $u_p \propto s = \gamma(8\pi A)^{1/2}$ [4,13].

Проведенные нами расчеты показывают, что БЛ могут взаимодействовать с солитонами огибающей малоамплитудных спиновых волн, локализованных на ДГ, аналогично взаимодействию джозефсоновских вихрей с плазменными солитонами бризерного типа в сверхпроводящем туннельном контакте. Это взаимодействие описывается двухчастичным гамильтонианом с притягивающим одноямым потенциалом. Однако аналога связанных состояний бризерного типа большой амплитуды и с малой частотой, которые могут существовать в распределенном джозефсоновском переходе в доменной границе, не существует даже в отсутствие диссипации. Это является следствием отсутствия полной интегрируемости магнитодинамических уравнений, описывающих динамику спинов в закрепленной ДГ. Малоамплитудные солитоноподобные колебания ДГ метастабильны. Они могут стабилизироваться, однако, переменным магнитным полем путем прямой либо параметрической накачки на частоте, согласованной

с частотой и амплитудой стабилизируемого солитона [14].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] *Малоземов А., Слонзуски Дж.* Доменные стенки в материалах с цилиндрическими магнитными доменами. — М.: Мир, 1982.
2. *Konishi S., Matsuyama K., Shida I. et al.*// IEEE Trans.Magn. 1984. V. MAG-20. P. 1141.
3. *Звездин А.К., Попков А.Ф.*//Письма ЖЭТФ. 1985. Т. 41. С. 90.
4. *Звездин А.К., Попков А.Ф.*//ЖЭТФ. 1986. Т. 91. С. 1789.
5. *Четкин М.В., Смирнов В.Б., Парыгина И.В. и др.*// Письма ЖЭТФ. 1987. Т. 45. С. 59.
6. *Четкин М.В., Парыгина И.В., Смирнов В.Б. и др.*// Письма ЖЭТФ. 1989. Т. 49. С. 174.
7. *Chetkin M.V., Parygina I.V., Smirnov V.B. et al*// Phys.Lett.A. 1989. V. 140. P. 428.
8. *Звездин А.К., Попков А.Ф., Ярема И.П.*//ЖЭТФ. 1990. Т. 98. С. 1070.
9. *Четкин М.В., Смирнов В.Б., Попков А.Ф. и др.*// ЖЭТФ. 1988. Т. 94. С. 164.
10. *Четкин М.В., Парыгина И.В., Смирнов В.Б., Гадецкий С.Н.*//ЖЭТФ. 1990. Т. 976. С. 337.
- [11] *Звездин А.К., Попков А.Ф., Сереченко В.А.*// ФММ. 1988. Т. 65. С. 877.
12. *Звездин А.К., Попков А.Ф.*// ЖЭТФ. 1991. Т. 100. С. 564.
13. *Кулагин Н.Е., Попков А.Ф.*// Письма ЖЭТФ. 1986. Т. 43. С. 147.
14. *Попков А.Ф.*//Письма ЖЭТФ. 1991. Т. 54. С. 97.