

# Гироскопическая динамика антиферромагнитных вихрей на доменных границах ортоферрита иттрия

М. В. Четкин<sup>1)</sup>, Ю. Н. Курбатова, Т. Б. Шапаева

Физический факультет МГУ им. М. В. Ломоносова, 119899 Москва, Россия

Поступила в редакцию 12 февраля 2001 г.

Экспериментально установлено, что магнитное поле вдоль оси  $b$  слабо влияет на скорости антиферромагнитных вихрей на доменной границе ортоферрита иттрия и не объясняет существования значительной гироскопической силы, действующей на эти вихри. Существование такой силы вызвано динамическим скосом магнитных подрешеток, пропорциональным скорости доменной границы. Указанный скос обуславливает квадратичную на начальном участке зависимость скорости антиферромагнитных вихрей от скорости доменной границы, обнаруженную экспериментально. Динамика антиферромагнитных вихрей в доменных границах ортоферрита иттрия является гироскопической и квазирелятивистской с предельной скоростью 20 км/с, равной скорости спиновых волн на линейном участке их закона дисперсии.

PACS: 75.60.Ch

Возможность существования антиферромагнитных вихрей в доменных границах редкоземельных ортоферритов была предсказана теоретически Фарзтиновым с сотрудниками [1] и Малоземовым со Слончевским [2]. Экспериментальные наблюдения генерации, динамики и результатов парных встречных соударений антиферромагнитных вихрей в доменных границах ортоферрита иттрия были осуществлены в работах авторов [3–5]. Было установлено, что полная скорость движения антиферромагнитных вихрей и антивихрей на доменной границе, движущейся со скоростью 12 км/с, очень близки к предельной скорости движения доменной границы, равной скорости спиновых волн на линейном участке их закона дисперсии. Отсюда следовал вывод, что гироскопическая сила в условиях эксперимента весьма велика. Теория гироскопической силы в ортоферритах, развитая к настоящему времени на основе лагранжиана Андреева и Марченко [6], предсказывала, что эта сила отлична от нуля только при условии выхода вектора антиферромагнетизма из плоскости  $ac$  в магнитном поле вдоль оси  $b$  ортоферрита [7, 8]. Результат справедлив при малых скоростях по сравнению с предельной. Данная статья посвящена исследованиям квазирелятивистской динамики антиферромагнитных вихрей в доменных границах ортоферрита иттрия методом двукратной высокоскоростной фотографии в реальном времени.

В связи со сказанным выше представляло интерес провести экспериментальное исследование скоростей

Рис.1. Двукратная высокоскоростная фотография движущейся доменной границы в пластинке ортоферрита иттрия с движущимися вдоль нее уединенными изгибными волнами, сопровождающими антиферромагнитный вихрь и антивихрь

движения антиферромагнитных вихрей и антивихрей во внешнем магнитном поле вдоль оси  $b$  ортоферрита иттрия. В условиях эксперимента это внешнее магнитное поле  $H_b$  было равно  $\pm 400$  Э.

Исследования проводились методом двукратной высокоскоростной фотографии с использованием эффекта Фарадея и двух лазерных импульсов красного света длительностью 250 пс, задержанных друг относительно друга на 6–10 нс. Двукратная высокоскоростная фотография движущейся доменной границы в пластинке ортоферрита иттрия толщиной 40 мкм с движущимися вдоль нее уединенными изгибными волнами представлена на рис.1. Уединенные изгиб-

<sup>1)</sup>e-mail: chetkin@magn145.phys.msu.ru

ные волны сопровождают антиферромагнитные вихри, в которых имеет место фазовый переход  $G_z F_x \leftrightarrow G_y$  [4, 5].

Доменная граница движется снизу вверх. Левая ее часть имеет скорость, равную скорости поперечного звука, правая – сверхзвуковую скорость. Переход от светлой части к темной – первое положение динамической доменной границы, переход от темной части к светлой – второе положение доменной границы через 10 нс после первого. Из фотографии видно, что вдоль доменной границы в разные стороны распространяются пары уединенных изгибных волн с резкими передними и затянутыми задними фронтами, отстающие как целое от доменной границы. С помощью таких фотографий, полученных в реальном масштабе времени, можно определить скорости доменной границы  $v$ , антиферромагнитных вихрей и antivихрей  $u$  вдоль доменной границы, а также полные их скорости.

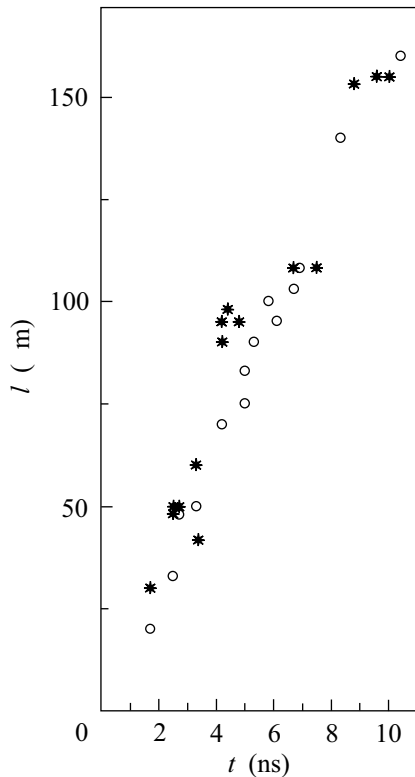


Рис.2. Экспериментальная зависимость расстояний, пройденных антиферромагнитными вихрями (о) и antivихрями (+) вдоль доменной границы, от времени в магнитном поле  $\pm 400$  Э вдоль оси  $b$

Зависимость расстояний, пройденных вихрями и antivихрями вдоль доменной границы от времени, представлена на рис.2. Данные этого рисунка получены из двукратных высокоскоростных фотографий, подобных представленным на рис.1. Из этих зависи-

мостей следует, что скорости движения антиферромагнитных вихрей и antivихрей в магнитном поле  $H_b = \pm 400$  Э отличаются не более чем на 15%. Следовательно, эффективное магнитное поле, снимающее лорентц-инвариантность динамики топологических магнитных солитонов и приводящее к существованию гироскопической силы, значительно больше использованного в эксперименте.

Для проверки сделанного заключения был осуществлен эксперимент по исследованию зависимости скорости антиферромагнитного вихря от скорости доменной границы. С этой целью после генерации антиферромагнитных вихрей скорость доменной границы, равная первоначальной 12 км/с, изменялась с помощью магнитного поля добавочной катушки, питаемой от отдельного импульсного генератора, замедляющего или ускоряющего границу.

Экспериментальная зависимость  $u(v)$  показана на рис.3. Из рисунка видно, что в начальной части зависимости в интервале  $v$  от 6 до 9 км/с имеет место квадратичная зависимость  $u(v)$ . Затем, с ростом  $v$  на зависимости наблюдается перегиб, а при более высокой скорости доменной границы, равной 12 км/с, скорость антиферромагнитных вихрей достигает максимальной величины 16 км/с, что соответствует полной скорости, равной предельной скорости движения  $c = 20$  км/с, а затем начинает уменьшаться, стремясь к нулю при  $v \rightarrow c$ . В районе максимума зависимости  $u(v)$  строго выполняется соотношение  $u^2 + v^2 = c^2$  для всех наблюдавшихся экспериментально амплитуд уединенных изгибных волн от 1 до 10 мкм, сопровождающих антиферромагнитные вихри. Это же соотношение выполняется и при более высоких скоростях вплоть до  $v = c = 20$  км/с. Правда, эту часть зависимости экспериментально наблюдать трудно из-за уменьшения амплитуд изгибных волн при  $v \rightarrow c$ . Начальный участок экспериментальной зависимости  $u(v)$  хорошо описывается соотношением  $u = 0.11v^2$ .

Полученная экспериментальная зависимость  $u(v)$  значительно проще, чем экспериментальная зависимость скорости доменной границы от магнитного поля. На последней, помимо областей постоянства скорости доменной границы при ее равенстве скоростям продольного и поперечного звука, есть еще дополнительные особенности, связанные с торможением доменной границы на винтеровских магнонах.

Исследована экспериментальная зависимость полной скорости антиферромагнитного вихря от скорости доменной границы. На начальной части кривой имеет место квадратичный закон, затем наблюдается перегиб с последующим плавным выходом на скорость насыщения 20 км/с, равной скорости спиновых

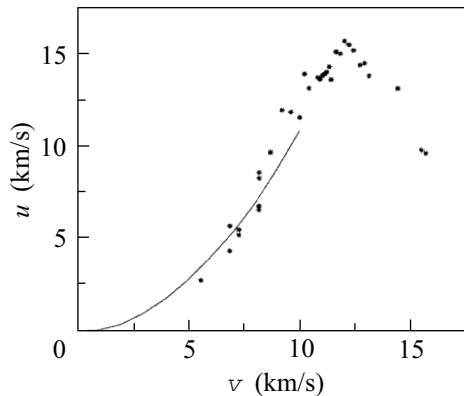


Рис.3. Экспериментальная зависимость скорости антиферромагнитных вихрей вдоль доменной границы  $u$  от ее скорости  $v$ . Сплошной линией представлена зависимость  $u(v) = 0.11v^2$

волн на линейном участке их закона дисперсии. Таким образом, из эксперимента следует, что динамика антиферромагнитных вихрей является квазирелятивистской и гироскопической.

Для объяснения существования гироскопической силы и начального участка зависимости  $u(v)$  необходимо принять во внимание динамический скос подрешеток ортоферрита [9–11]. В свое время этим скосом была объяснена квазирелятивистская динамика доменных границ в ортоферритах [9–11]. Выражение для динамического скоса подрешеток ортоферрита следует из лагранжиана, полученного в [6]. Компонента слабого ферромагнитного момента  $m_b$  в движущейся со скоростью  $v$  доменной границе  $ac$  типа, вычисленная Барьяхтаром с сотрудниками [11, 12], имеет следующий вид:

$$m_b = \frac{v/g\delta M_o \Delta_{01}(v)}{\text{ch}(x - vt/\Delta_{01}(v))}. \quad (1)$$

Здесь  $M_o$  – намагниченность подрешеток ортоферрита,  $\Delta_{01}(v)$  – ширина движущейся доменной границы,  $\delta$  – постоянная однородного обмена,  $g$  – гиромагнитное отношение. Впоследствии похожие результаты были получены и в [13].

Этот скос сравним со скосом из-за поля Дзялошинского. Отношение величины (1) к аналогичной, получающейся из-за скоса подрешеток в магнитном поле вдоль оси  $b$ , также велико:

$$\frac{m_{b\text{дин}}}{m_{b\text{стат}}} = \frac{\sqrt{H_A H_E}}{H_b} = 10^2 \div 10^3.$$

Здесь  $H_A$  – поле анизотропии в плоскости  $ac$ ,  $H_E$  – обменное поле,  $H_b$  – магнитное поле вдоль оси  $b$ . Так что основной причиной, приводящей к возникновению гироскопической силы в ортоферритах является, по-видимому, динамический скос магнитных подре-

шеток, пропорциональный  $v/c$ . В то же время, гироскопическая сила пропорциональна  $v$ .

Из сказанного следует, что гироскопическая сила, действующая на антиферромагнитные вихри в ортоферритах, должна быть пропорциональна квадрату отношения скорости доменной границы к предельной скорости ее движения  $v^2/c^2$ . [14] Эта величина в условиях нашего эксперимента не мала. Гироскопическая сила, пропорциональная  $v^2/c^2$ , не следует из [6] и требует теоретического анализа. Полученные к настоящему времени теоретические выражения для величины гироскопической силы в ортоферритах справедливы для  $v/c \ll 1$ . [7, 8, 15]. При стационарном движении антиферромагнитных вихрей сила торможения должна уравниваться гироскопической силой. Если основной вклад в силу торможения дает передний фронт уединенной волны, то этот вклад пропорционален  $u$ . Поэтому должно быть справедливо соотношение  $u \cong b(v/c)^2$ , наблюдавшееся на эксперименте.

Авторы благодарят А. М. Балбашова за представленные монокристаллы ортоферрита иттрия, А. К. Звездина, А. Ф. Попкова и С. В. Гомонова за обсуждение результатов работы.

1. М. М. Фарзтдинов, М. А. Шамсутдинов, А. А. Халфина, ФТТ **21**, 1522 (1979).
2. A. P. Malozemov and J. C. Slonczewski, *Magnetic Domain Walls in Bubbles Materials*, Academic Press, NY, 1979.
3. М. В. Чёткин, Ю. Н. Курбатова, В. Н. Филатов, Письма в ЖЭТФ **65**, 760 (1997).
4. М. В. Чёткин, Ю. Н. Курбатова, А. И. Ахуткина, Т. Б. Шапаева, ЖЭТФ **115**, 2160 (1999).
5. M. V. Chetkin and Yu. N. Kurbatova, Phys. Lett. **A260**, 108 (1999).
6. А. Ф. Андреев, В. И. Марченко, УФН **130**, 39 (1980).
7. Ю. В. Мелехов, О. А. Переход, ФТТ **26**, 924 (1984).
8. М. М. Фарзтдинов, М. А. Шамсутдинов, Е. Г. Екомасов, ФТТ **30**, 1866 (1988).
9. М. В. Чёткин, А. де ла Кампа, Письма в ЖЭТФ **27**, 168 (1978).
10. А. К. Звездин, Письма в ЖЭТФ **29**, 605 (1979).
11. В. Г. Барьяхтар, Б. А. Иванов, М. В. Чёткин, УФН **146**, 417 (1985).
12. V. G. Bar'jakhtar, M. V. Chetkin, B. A. Ivanov, and S. N. Gadetskiy, *Dynamics of Topological Magnetic Solitons. Experiment and Theory*, Berlin, Springer tracts in modern physics, vol. **129**, 1994.
13. N. Papanicolaou, Phys. Rev. **B55**, 18, 12290 (1997).
14. М. В. Чёткин, Ю. Н. Курбатова, ФТТ **43**, в печати.
15. А. К. Звездин, Краткие сообщения по физике ФИАН № 6 (1999).