

В. С. ЛЬВОВ

НЕЛИНЕЙНЫЕ СПИНОВЫЕ ВОЛНЫ

$e^{-i\omega t}$



МОСКВА "НАУКА"
ГЛАВНАЯ РЕДАКЦИЯ
ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1987

Львов В.С. **Нелинейные спиновые волны.** — М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1987. — 272 с.

Посвящена динамике и кинетике взаимодействующих спиновых волн. Приведены основные экспериментальные факты и объясняющие их физические модели. Последовательно изложен классический гамильтонов метод описания нелинейных волн (их релаксации, самофокусировки, автоколебаний, коллапса и т.д.). Построена нелинейная теория параметрического и кинетического возбуждения волн, проведено ее подробное сравнение с экспериментами в ферро- и антиферромагнетиках.

Круг предполагаемых читателей весьма широк. Это — теоретики и экспериментаторы, изучающие физику магнетиков, нелинейные волновые процессы в конденсированных средах и плазме. Это — преподаватели, аспиранты, студенты университетов, приступающие к изучению новой области науки — физики нелинейных явлений.

Табл. 3. Ил. 39. Библиогр. 238 назв.

Рецензент

член-корреспондент АН СССР *В.Е. Захаров*

ПРЕДИСЛОВИЕ

”Все счастливые семьи похожи друг на друга, каждая несчастливая семья несчастлива по-своему.” Все равновесные системы схожи тем, что подчиняются распределению Гиббса. Вдали от положения равновесия возникает удивительное разнообразие процессов и явлений. Действительно, что общего между океаном в шторм, проводником с током и живым существом? Это разнообразие связано, во-первых, с различием источников неравновесности и, во-вторых, с особенностями внутреннего устройства систем, которые проявляются тем ярче, чем дальше система от равновесия.

Неуклонно возрастающий в последние два десятилетия интерес к сильно неравновесным системам связан прежде всего с изучением поведения веществ при высоких уровнях мощности внешнего воздействия: диэлектриков в поле мощной лазерной волны, магнетиков в сильных СВЧ полях, плазмы, нагреваемой до термоядерных температур, и т.д. Фактически появилась новая физическая дисциплина — физика нелинейных волн. Ее задача — изучать явления и процессы, возникающие при возбуждении, распространении и взаимодействии волн конечной амплитуды в различных средах по возможности с общей точки зрения. При этом выясняется, например, что образование ”девятого вала” в штормовом море и самофокусировка света — весьма похожие явления, имеющие общую физическую причину.

В физике нелинейных волновых процессов спиновые волны занимают особое положение, связанное с удобством их исследования. Эксперименты часто можно проводить при комнатной температуре, в хорошо освоенном диапазоне частот на монокристаллах отличного качества. Спиновые волны легко возбуждаются СВЧ магнитным полем до существенно нелинейного уровня, когда их поведение целиком определяется взаимодействием между собой. Богатый экспериментальный материал, нуждающийся в интерпретации, привлекает в эту область теоретиков, занимавшихся ранее другими проблемами. Для них и для начинающих исследователей написана эта книга. Она может оказаться полезной также экспериментаторам, занимающимся физикой твердого тела, и всем тем, кто хочет познакомиться с идеями и методами теории нелинейных волн. Помимо теории, в книге содержится обзор экспериментальных результатов исследования нелинейных спиновых волн.

Логически эта книга не является линейно упорядоченной цепочкой умозаключений и экспериментальных фактов, хотя именно в таком виде она отображена на бумаге. Поэтому я попытался на рисунке, расположенном на форзаце книги, отразить логические связи между ее главами для того,

чтобы каждый читатель мог легче найти в ней то, что его интересует. Одинадцать глав книги разбиты на четыре раздела. В первой, вводной главе дан краткий обзор необходимых сведений из физики магнитоупорядоченных диэлектриков. Во второй и третьей главах описываются нелинейные динамические процессы в системе взаимодействующих спиновых волн с учетом фазовых соотношений между ними. Главы 4–6 посвящены явлениям, которые можно эффективно описывать в приближении самосогласованного поля, когда роль взаимодействия волн сводится к изменению коэффициентов в линейных уравнениях движения для каждой волны. Идеологически центральное место в этом разделе занимает нелинейная теория параметрического возбуждения волн — S -теория Захарова, Львова, Старобинца. Наиболее сложным для первого чтения, по-видимому, является четвертый раздел книги (главы 7–11), в котором описывается кинетика спиновых волн вдали от равновесия. Этот раздел ориентирован главным образом на теоретиков и в меньшей степени — на экспериментаторов, изучающих спиновые волны.

Я обязан многим людям. Это, прежде всего, авторы работ, процитированных или изложенных в книге. Среди них я особенно хотел бы отметить В.Е. Захарова, С.С. Старобинца, Г.А. Мелкова, В.В. Зауткина, Л.А. Прозорову, В.Б. Черепанова и Г.Е. Фальковича, многочисленные обсуждения и совместная работа с которыми сделали возможным появление этой книги. За постоянную помощь и содействие я признателен моим коллегам И.В. Колоколову, Е.В. Подивиллову, А.А. Родишевскому и другим. Хочу поблагодарить также Е.В. Янкайтис за неоднократную перепечатку разделов рукописи. И наконец, я хочу выразить особую благодарность моей жене Людмиле, чья поддержка и сочувственное отношение сыграли важную роль в работе над этой книгой.

СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ

В скобках приведен номер параграфа (главы), в котором впервые встречается данное сокращение.

ФМ	– ферромагнетик (§ 1)
АФМ	– антиферромагнетик (§ 1)
ЛО, ЛП	– "легкая ось", "легкая плоскость" – типы кристаллографической анизотропии в одноосных ФМ и АФМ (§ 3)
ЖИГ	– железо-иттриевый гранат (§ 1)
СВ	– спиновые волны (гл. 2)
ЯСВ	– ядерные спиновые волны (§ 14)
ПСВ	– параметрические (параметрически возбужденные) СВ (§ 15)
ПВ	– параметрические (параметрически возбужденные) волны (§ 15)
ТСВ	– тепловые (термически возбужденные) СВ (§ 50)
ТВ	– тепловые (термически возбужденные) волны (§ 50)
ВСВ	– вторичные (возникающие в результате развития кинетической неустойчивости) СВ (§ 56)
НСВ	– неравновесные СВ (§ 29)
ОП	– однородная прецессия намагниченности (§ 6)
ФМР	– ферромагнитный резонанс (§ 22)
КдВ	– уравнение Кортевега–де-Вриза (13.3) (§ 13)
МКдВ	– модифицированное уравнение КдВ (13.4) (§ 13)
СТВ	– сверхтонкое взаимодействие (§ 14)
КК	– коллективные колебания (§ 23)
АК	– автоколебания (§ 31)

СПИСОК НАИБОЛЕЕ УПОТРЕБИТЕЛЬНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ С КОММЕНТАРИЯМИ

$M_i, i = 1, 2, \dots$	– намагниченность (плотность магнитного момента) подрешеток.
$M = \sum_i M_i$	– суммарная намагниченность магнетодиэлектрика.
M_x, M_y, M_z	– проекции намагниченности.
$M_{\pm} = M_x \pm iM_y$	– круговые переменные для намагниченности.
μ_j, μ_a	– намагниченность иона в узле R_j, R_a .
$R_{ab} = R_a - R_b$	– расстояние между атомами (ионами) в узлах R_a и R_b .
$\mathcal{H}_{ex} = -JS_aS_b$	– гамильтониан обменного взаимодействия между узлами a и b (гейзенберговский гамильтониан).
J	– обменный интеграл. В ферромагнетиках (ФМ) $J > 0$, в антиферромагнетиках (АФМ) $J < 0$.

$\mathcal{H}_{dd}, W_{dd}$	— гамильтониан и энергия магнитного диполь-дипольного взаимодействия.
$\mathcal{H}_{s0}, W_{s0}$	— гамильтониан и энергия спин-орбитального взаимодействия.
$\mathcal{H}_a, W_a$	— гамильтониан и энергия кристаллографической анизотропии.
$\mathcal{H}$	— оператор или функция Гамильтона, именуемая для краткости гамильтонианом.
$q, p; Q, P$	— канонические переменные — обобщенные координаты и импульс.
k	— волновой вектор (спиновых) волн.
$a_k = a(k), b_k,$	
c_k, d_k	— канонические переменные — комплексные амплитуды бегущих (спиновых) волн. Они же — классические аналоги бозе-операторов, т.е. числа.
$\mathcal{H}_2$	— квадратичная по каноническим переменным часть гамильтониана.
$\mathcal{H}_{\text{int}} = \mathcal{H}_3 + \mathcal{H}_4 + \dots$	— гамильтониан взаимодействия.
$\mathcal{H}_3, \mathcal{H}_4$	— части $\mathcal{H}_{\text{int}}$ кубические и четвертого порядка по каноническим переменным. Они описывают процессы с участием трех или четырех волн соответственно.
$\mathcal{H}_p$	— гамильтониан взаимодействия (спиновых) волн с накачкой.
$\mathcal{H}_{\text{el}}$	— гамильтониан взаимодействия волн с дефектами и другими случайными неоднородностями. В магнетиках он описывает упругие двухмагнонные процессы.
H	— постоянное магнитное поле, как правило, пространственно однородное. Не путать с гамильтонианом $\mathcal{H}$.
μ_0	— магнетон Бора.
$g = \mu_0/\hbar$	— магнетомеханическое отношение для электрона. Это размерная величина, равная примерно $2\pi \cdot 2,8$ МГц/Э. Не путать с безразмерным g -фактором, равным примерно двойке у электрона.
$\omega_0 = gH$	— круговая частота прецессии магнитного момента электрона во внешнем поле H .
ω_{ex}	— "Обменная частота". По порядку величины $\hbar\omega_{\text{ex}} \approx T_c$, где T_c — температура Кюри.
$\omega_M = 4\pi gM$	— характерная частота диполь-дипольного взаимодействия.
N_x, N_y, N_z	— размагничивающие факторы: $N_x + N_y + N_z = 1$.
$H_i = H - 4\pi N_z M$	— внутреннее магнитное поле в эллипсоиде ($H \parallel M \parallel z$).
$\omega_D = gH_D$	— частота и поле, характеризующие взаимодействие Дзялошинского-Мория в АФМ.
$\omega_a = gH_a$	— частота и поле, характеризующие кристаллографическую анизотропию.
ω_n	— частота, характеризующая взаимодействие электронных спинов в АФМ с ядерными.
$\omega(k) = \omega_k,$	
$\omega_j(k) = \omega_{jk}$	— зависимость собственной частоты волн бесконечно малой амплитуды от волнового вектора k — закон дисперсии волн. j — индекс поляризации или типа волн.
$\tilde{\omega}_k$	— частота волн конечной амплитуды, перенормированная на их взаимодействие между собой.
$\Omega_p(\kappa)$	— частота коллективных колебаний (КК) системы параметрически возбужденных (спиновых) волн — ПСВ с волновым вектором κ . p — номер моды.
$\Omega_p(0) = \Omega_p$	— частота пространственно-однородных КК ($\kappa = 0$).
Δ_p	— частота пространственно-однородных КК системы ПСВ в отсутствие затухания.
$\Omega = \theta, \varphi$	— Ω — телесный угол; θ и φ — полярный и азимутальный углы в системе координат, ориентированной по намагнитченности.
$\gamma(k) = \gamma_k$	— параметр затухания волн (декремент).
$\gamma_k^\gamma = \gamma_0(k)$	— декремент волн вблизи термодинамического равновесия.