

# КВАНТОВАЯ МОДЕЛЬ МАГНИТНОЙ ДИНАМИКИ ОДНОДОМЕННЫХ ЧАСТИЦ ДЛЯ ОПИСАНИЯ КРИВЫХ НАМАГНИЧИВАНИЯ И МЁССБАУЭРОВСКИХ СПЕКТРОВ МАГНИТНЫХ НАНОМАТЕРИАЛОВ В СЛАБОМ МАГНИТНОМ ПОЛЕ

И.Н.Мищенко, М.А.Чуев

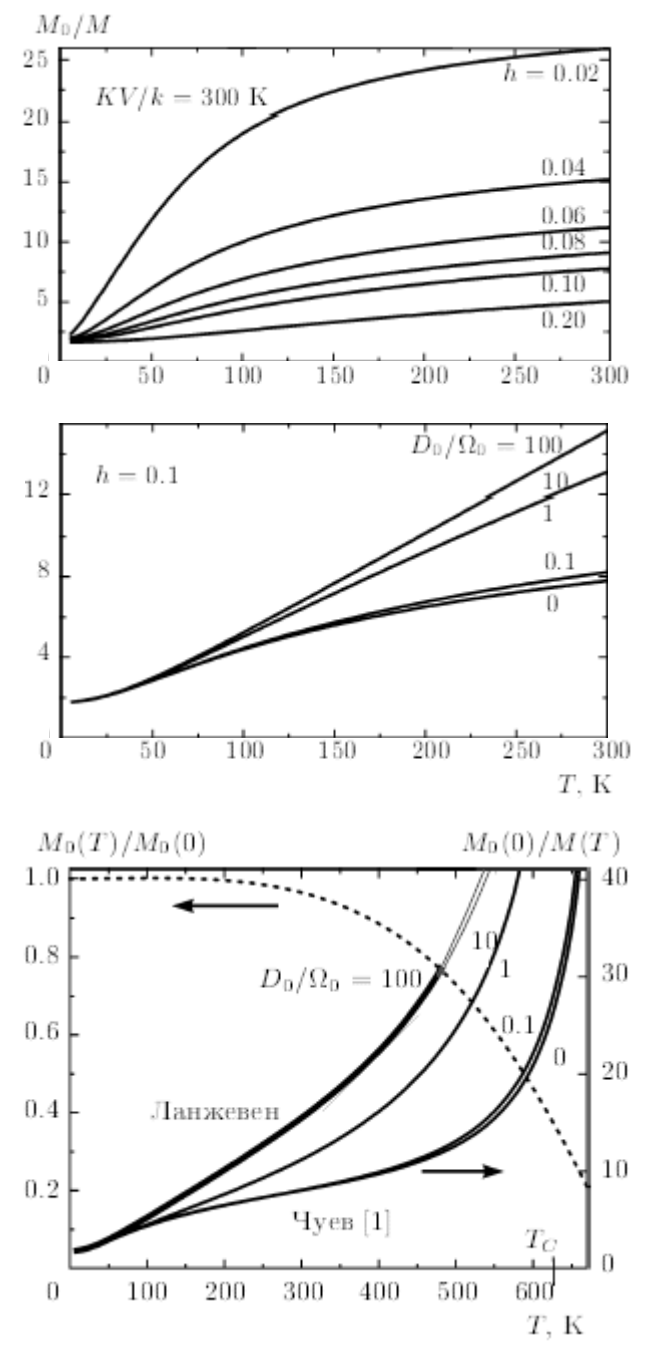
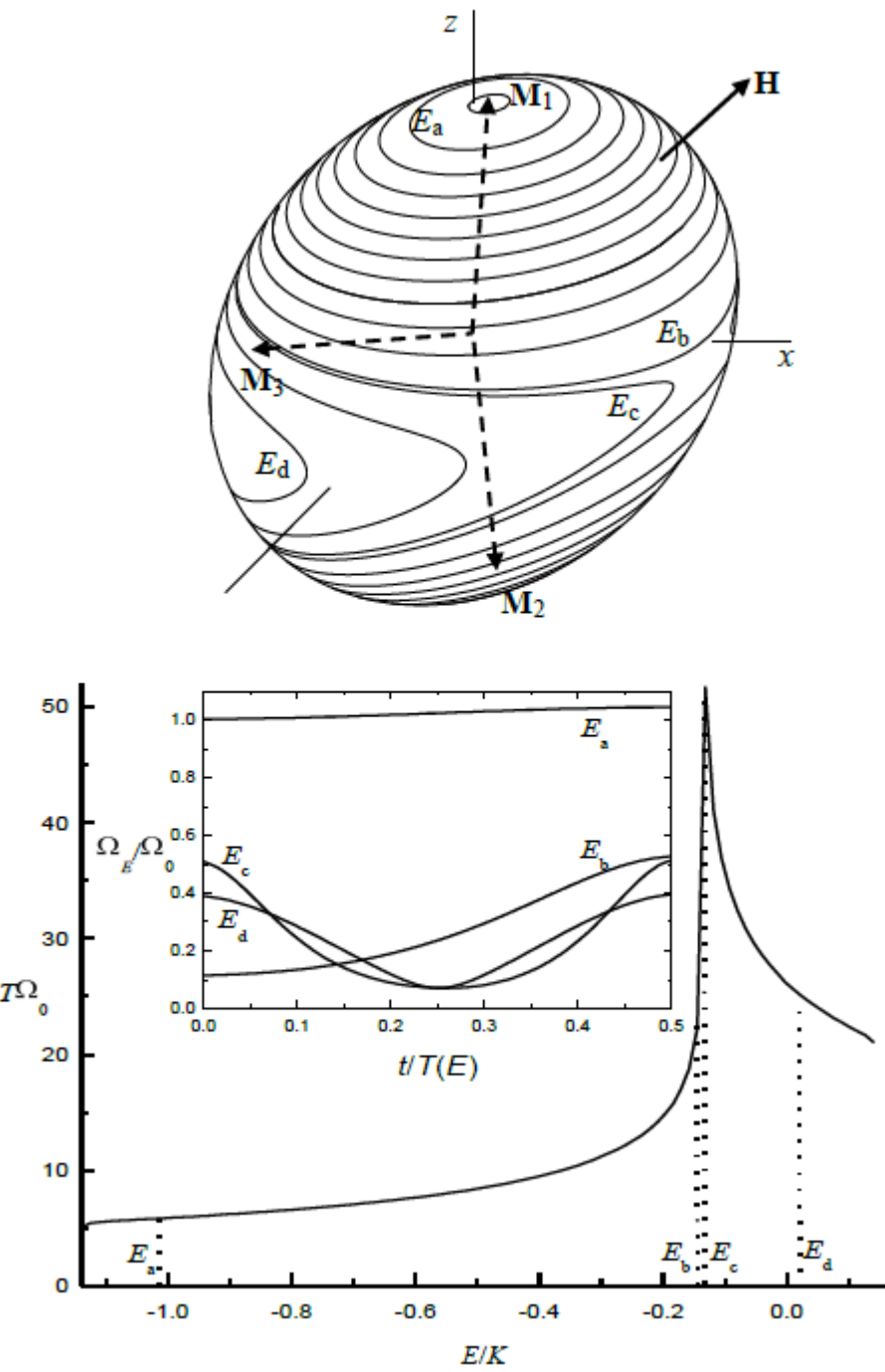
Физико-технологический институт Российской академии наук, Москва, Россия

IlyaMischenko@rambler.ru

## Магнитная динамика однодоменных частиц. Макроскопическое описание.

Магнитные наночастицы играют всё большую роль в современной технологии, что настоятельно требует совершенствования средств и методик их диагностики. В то же время интерпретация результатов даже равновесных магнитных измерений до сих пор проводится почти исключительно на основе классической формулы Ланжевена (1905), не учитывающей собственной магнитной анизотропии частиц. Включение в рассмотрение внутренней магнитной энергии частицы с учётом наведённых случайных полей окружения [1] приводит к кинетическому уравнению для вероятных ориентаций её магнитного момента на поверхности сферы, эффективные общие методы решения которого до настоящего времени не найдены.

Недавно был предложен феноменологический подход [2], позволивший факторизовать решаемую задачу и сводящийся к выделению стационарных состояний частицы в виде эквипотенциальных орбит прецессии (слева вверху) в суммарном собственном и приложенном поле в отсутствие диссипации. Скорость прецессии непрерывно меняется вдоль каждой траектории (слева внизу), а значения физических наблюдаемых в том или ином состоянии вычисляются как криволинейные интегралы вдоль соответствующей орбиты с учётом различного времени прохождения разных участков пути. Статистическое усреднение по состояниям с разной энергией позволяет рассчитывать равновесные макроскопические характеристики исследуемой системы (например, намагниченность, справа вверху), а влияние диффузии сводится к перенормировке угловых скоростей прецессии и приводит к выравниванию равновесных заселённостей разных участков сферы (справа в центре). Температурная зависимость коэффициента диффузии может приводить к реализации для одной системы как высокотемпературного ланжевенского поведения, так и описанной специфичной термодинамики в области низких температур (справа внизу).

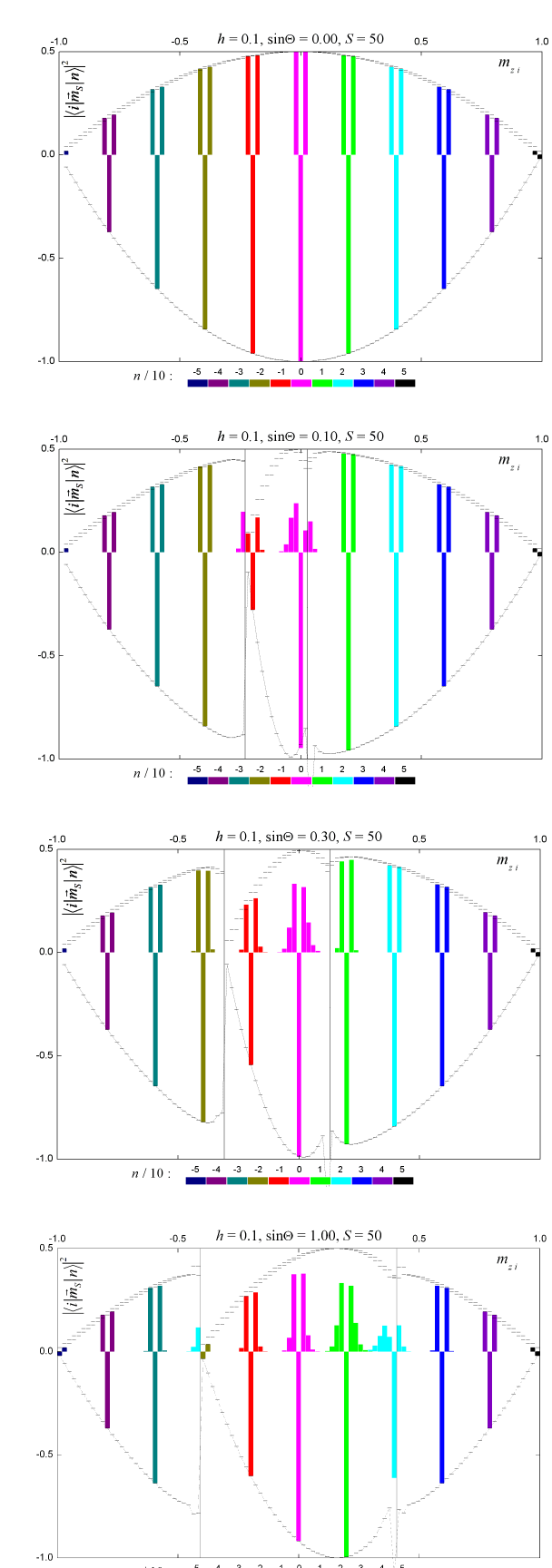
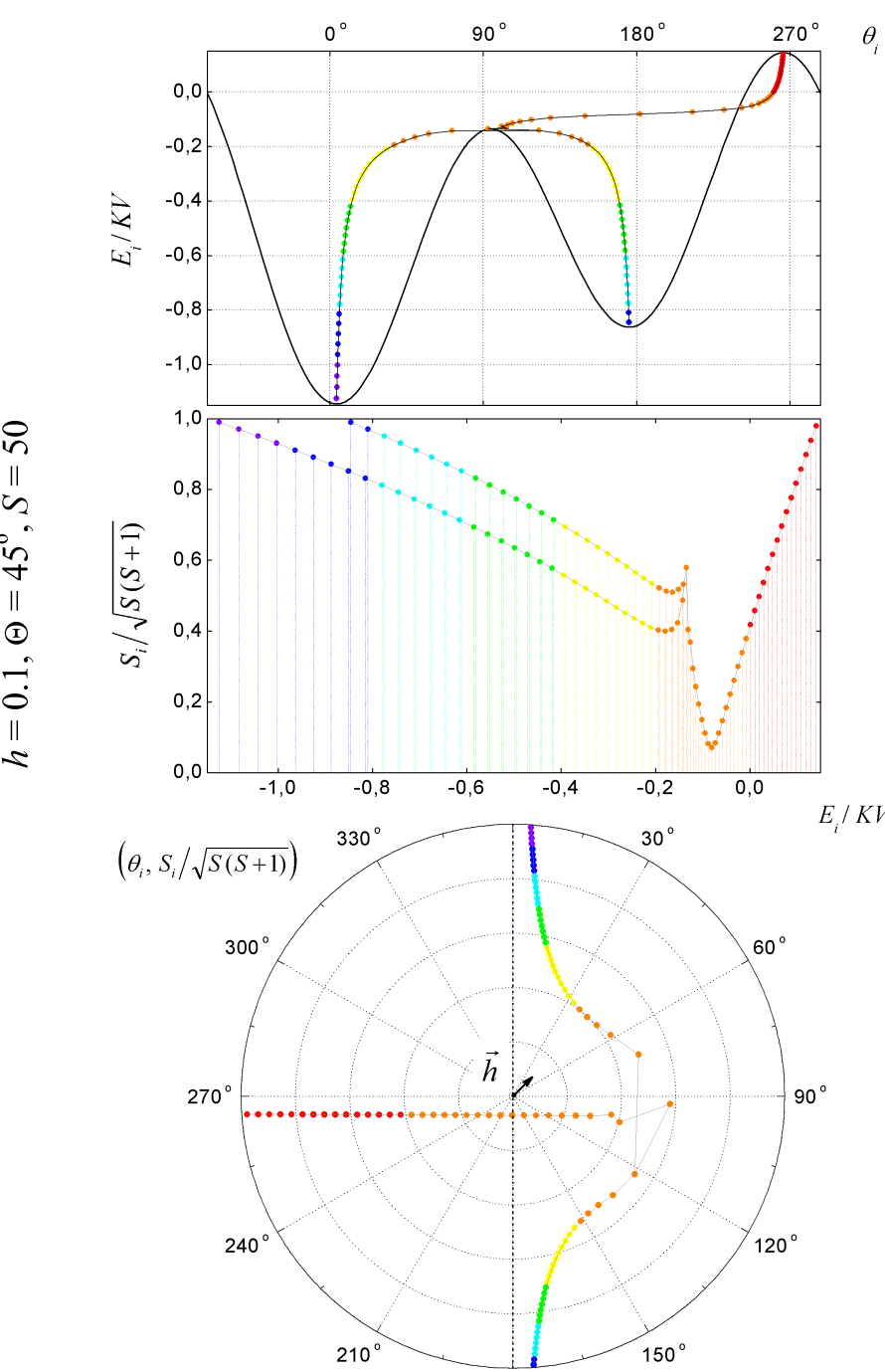
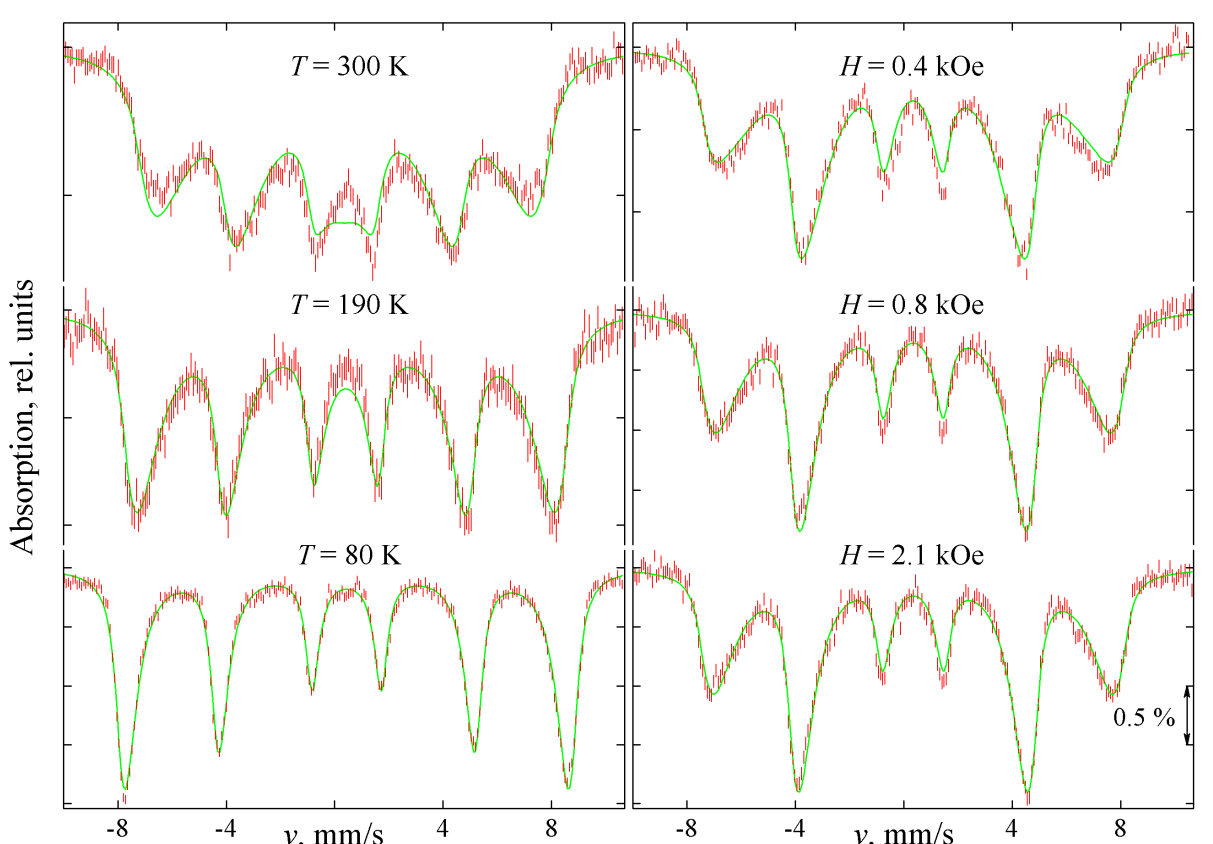
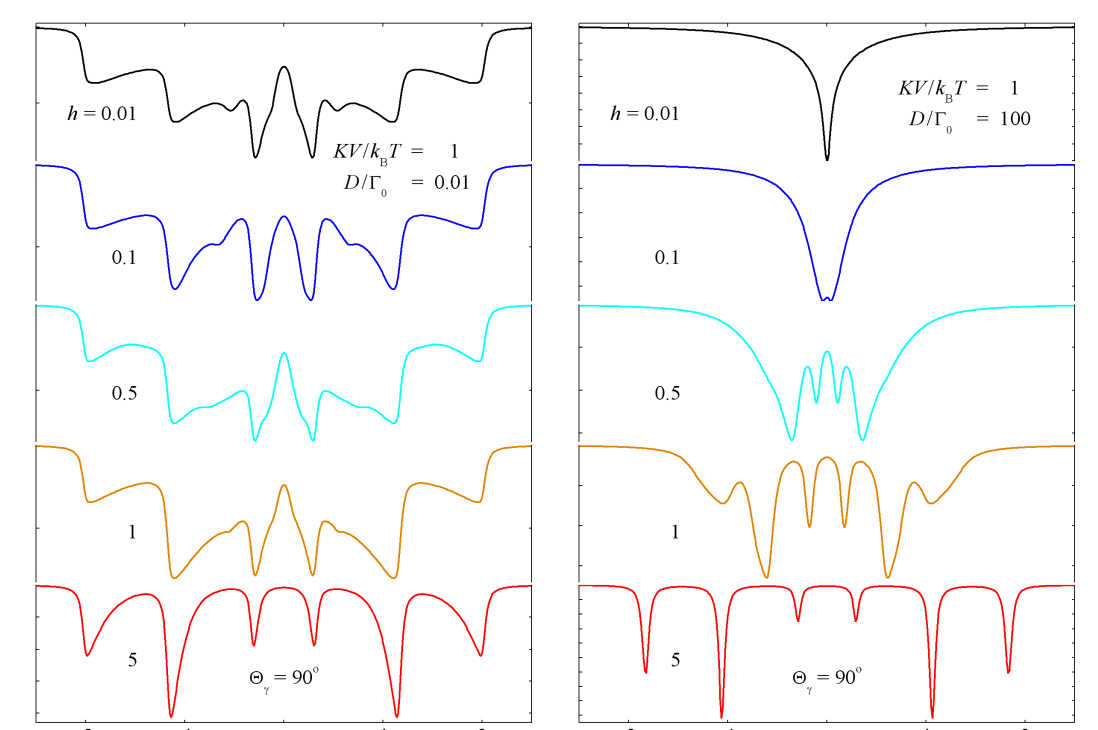
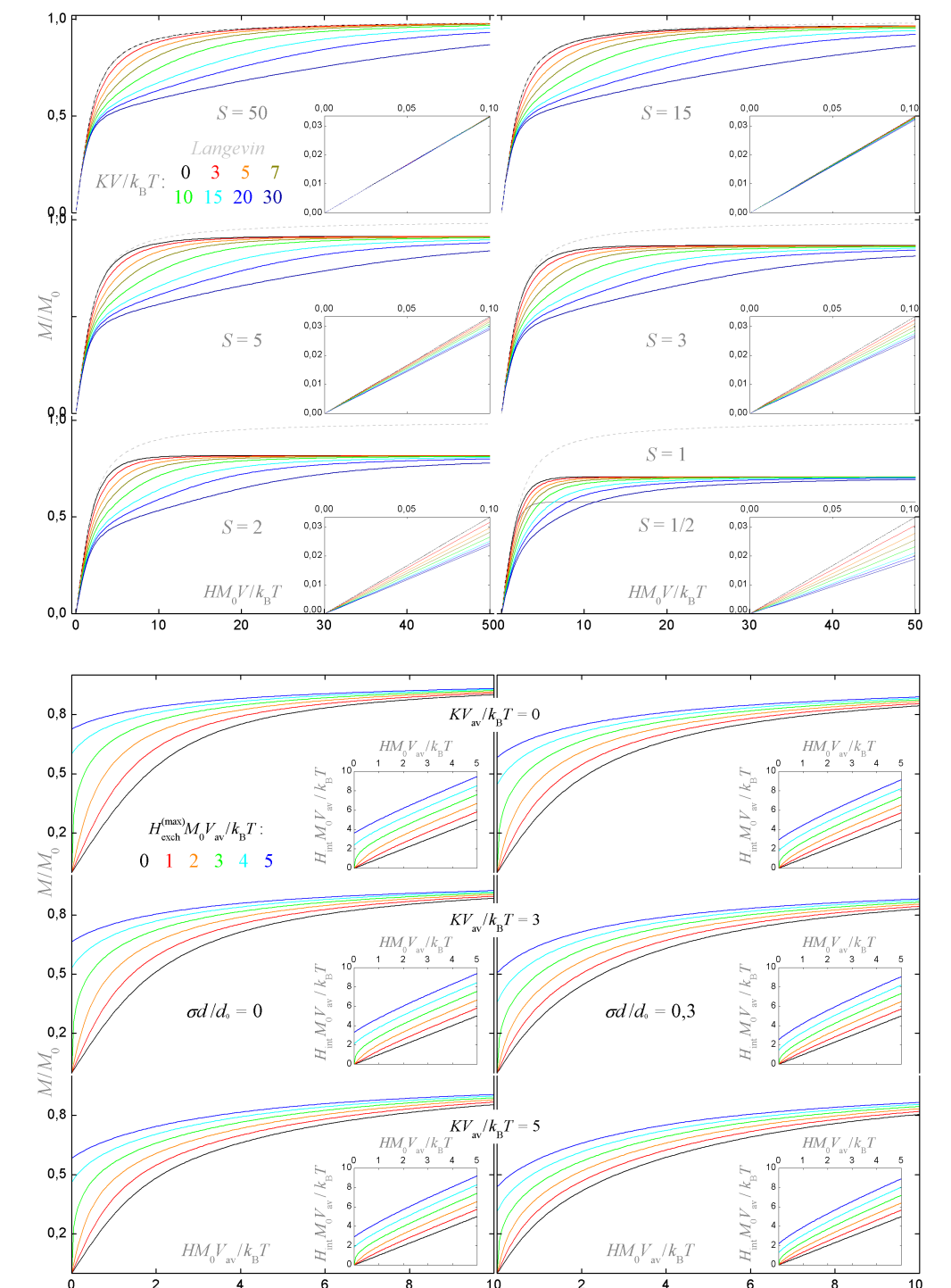


## Квантовая статистика магнитных наночастиц.

Релаксационные эффекты в равновесных кривых намагничивания проявляются лишь при скоростях диффузии, сравнимых с характерными частотами прецессии магнитных моментов частиц, для реальных материалов обычно лежащими в гигагерцовом диапазоне. Если интенсивность броуновского блуждания существенно меньше скорости прецессии, расчёт намагниченности образца можно провести, не привлекая динамического описания, а ограничиваясь лишь усреднёнными по времени характеристиками системы. В этой ситуации наиболее естественным представляется квантовое рассмотрение задачи [3], при котором расчёт стационарных состояний сводится к решению полной задачи на собственные значения для спина частицы в комбинированном внутреннем и внешнем поле (слева). Простота предложенного подхода обусловлена как трёхдиагональной формой полного гамильтониана, так и быстрым выходом решения на макроскопический предел (справа вверху), что позволяет описывать равновесное поведение реальных нанокматериалов во внешних полях с учётом как естественного разброса размеров частиц, так и их взаимодействия с другими частицами ансамбля (справа внизу).

## Релаксационные мёссбауэровские спектры во внешнем поле

Случайная переориентация магнитного момента частицы под действием окружения, слабо влияющая на равновесные кривые намагничивания, может оказаться критической при других методах исследования, например, в мёссбауэровской спектроскопии [4], где основным временным масштабом служит период полураспада возбуждённого состояния ядра, для наиболее распространённых изотопов составляющий доли микросекунды. В этом случае приходится принимать во внимание возможные переходы между стационарными состояниями частицы (слева), конкретное представление которых существенно зависит от упорядоченности базового набора состояний. В качестве критерия упорядочения удобно выбирать квазиклассическое описание [3], согласно которому переходы возможны лишь между ближайшими соседями, образующими три ветви релаксации вблизи двух минимумов и одного максимума энергии. Более того, само это приближение оказывается в достаточной степени оправданным, чтобы использовать его как для моделирования, так и для анализа экспериментальных данных (справа), с восстановлением физических характеристик исследуемых систем (внизу).



| $K\bar{V}/k_B, K$ | $\sigma_d/\bar{d}$ | $D (T = 80, 190, 300 K), \text{МГц}$ | $h (H = 0.4, 0.8, 2.4 \text{кЭ})$ |
|-------------------|--------------------|--------------------------------------|-----------------------------------|
| 360 (20)          | 0.31 (2)           | 2.5 (6), 5.7 (8), 12.3 (5)           | 0.95 (1), 1.33 (2), 1.50 (2)      |

## Пути дальнейшего развития

Разработанный подход носит универсальный характер и может применяться для описания широкого круга динамических эффектов в магнитных наночастицах, например, магнитного гистерезиса с характерными временами установления равновесия от секунд до миллисекунд. Другим важным аспектом дальнейшего развития метода должна стать разработка теории, применимой для описания специфичной термо- и магнитной динамики неферромагнитных частиц [5, 6], кристаллическая структура которых приводит к формированию нескольких магнитных подрешёток, связанных друг с другом обменным взаимодействием и находящихся в поле собственной магнитной анизотропии.

Благодарим В.М. Черепанова и М.А. Поликарпова (НИЦ КИ) за предоставленные экспериментальные данные. Работа выполнена при поддержке РНФ, грант № 14-15-01096.

1. Brown W.F. Thermal fluctuations of a single-domain particle. Phys. Rev., 130, 5, 1963.
2. М.А. Чуев. Неланжевенская высокотемпературная намагниченность наночастиц в слабом магнитном поле. ЖЭТФ, 135, 2, 2009.
3. М.А. Чуев. Многоуровневая релаксационная модель для описания мёссбауэровских спектров наночастиц в магнитном поле. ЖЭТФ, 141, 4, 2012.
4. D. H. Jones, K. K. P. Sivasava. Many-state relaxation model for the Mossbauer spectra of superparamagnets. Phys. Rev. B, 34, 1986.
5. М.А. Чуев. О термодинамике антиферромагнитных частиц на примере мёссбауэровской спектроскопии. Письма в ЖЭТФ, 95, 6, 2012.
6. М.А. Чуев. Нугации намагниченностей подрешёток и их роль в формировании мёссбауэровских спектров антиферромагнитных наночастиц. Письма в ЖЭТФ, 103, 3, 2016.