

КРАТКИЕ СООБЩЕНИЯ

ФИЗИКА ТВЕРДОГО ТЕЛА

УДК 538.955; 537.62; 537.621

МЕТОД РЕДУКЦИИ ИЗМЕРЕНИЙ В ЗАДАЧЕ ОБНАРУЖЕНИЯ ФАЗОВОГО ПЕРЕХОДА «ПАРАМАГНЕТИЗМ – ИНДУЦИРОВАННЫЙ СУПЕРПАРАМАГНЕТИЗМ»

В. И. Николаев, О. П. Третьякова

(кафедра общей физики)

E-mail: tretyakova_op@mail.ru

Проведено изучение возможностей метода редукции измерений в задаче обнаружения фазового перехода «парамагнетизм – индуцированный суперпарамагнетизм» на примере системы наночастиц с логарифмически-нормальным распределением по размерам. Показано, что использование метода позволяет преобразовать исходные экспериментальные данные к такому виду, как если бы это соответствовало улучшению имевшихся реальных условий опыта (и прежде всего существенно меньшему разбросу частиц по размерам). Все основные особенности «технологии» применения метода редукции измерений иллюстрируются на конкретном примере температурно-полевых зависимостей магнитной восприимчивости для ансамбля наночастиц в области точки Кюри.

Одна из главных трудностей исследований магнитных свойств систем наночастиц связана, как известно, с разбросом изучаемых частиц по размерам. Это обстоятельство нельзя устранить даже при использовании современных методов синтеза и сепарации наночастиц, вследствие чего некоторые принципиально важные задачи, касающиеся особенностей свойств систем наночастиц, остаются до сих пор не решенными. Примером может служить задача обнаружения и идентификации магнитного фазового перехода в системе ультрамалых частиц «парамагнетизм – индуцированный суперпарамагнетизм».

В такой ситуации весьма эффективными могут оказаться методы «реставрации и повышения качества изображений» [1] в применении для обработки исходных экспериментальных данных. Взятые в совокупности, эти методы имеют главной своей целью преобразование исходных экспериментальных данных к такому виду, как если бы это соответствовало улучшению имевшихся реальных условий опыта. Данная статья посвящена изучению возможностей применения одного из таких методов, метода редукции измерений [2], для исследования магнитного фазового перехода «парамагнетизм – индуцированный суперпарамагнетизм» в системе наночастиц.

Согласно [3], механизм этого полевого фазового перехода связан с упорядочивающим влиянием внешнего магнитного поля на систему спинов частиц на фоне конкурирующего действия теплового движения в области температур выше точки Кюри ($T > T_C$). На рис. 1 показана магнитная фазовая диаграмма для системы суперпарамагнитных частиц, поясняющая смысл сказанного. Штриховкой выде-

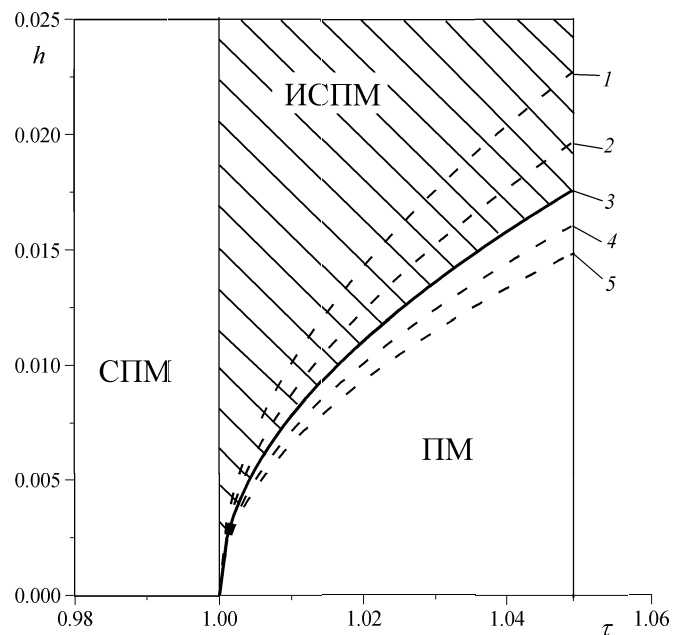


Рис. 1. Магнитная фазовая диаграмма для системы суперпарамагнитных частиц различной дисперсности в области точки Кюри ($T_C = 300$ К): 1 — $N = 300$, 2 — 400, 3 — 500, 4 — 600, 5 — 700; h — приведенное поле, τ — приведенная температура

лена область, соответствующая состоянию индуцированного суперпарамагнетизма (ИСПМ). Границей раздела парамагнитной (ПМ) и суперпарамагнитной (СПМ) фаз на диаграмме является температурная зависимость приведенного критического поля перехода [3]

$$h_{\text{crit}} \left(\equiv \frac{H_{\text{crit}}}{H'} \right) = \sqrt{\frac{3\tau(\tau - 1)}{N}}, \quad (1)$$

рассчитанная для системы одинаковых невзаимодействующих суперпарамагнитных частиц на основе теории молекулярного поля, дополненной моделью Ланжевена [4]. Здесь H_{crit} — критическое поле для фазового перехода «парамагнетизм — индуцированный суперпарамагнетизм», $H^l (\equiv k_B T_C / \mu_B)$ — характеристическое поле, k_B и μ_B — соответственно константа Больцмана и магнетон Бора, N — «номинальный» магнитный момент частицы в единицах μ_B , $\tau (\equiv T/T_C)$ — приведенная температура.

Как было впервые показано в [3], фазовый переход «парамагнетизм — индуцированный суперпарамагнетизм» происходит как фазовый переход второго рода. При этом полевая зависимость намагниченности $\sigma(H)$ имеет излом в поле $H = H_{\text{crit}}$ и соответствующий ему скачок магнитной восприимчивости $\Delta\chi \neq 0$, величина которого тем меньше, чем ближе температура T к T_C . Наличие разброса частиц по размерам приводит к неизбежному «размытию» как излома на зависимости $\sigma(H)$, так и скачка восприимчивости $\Delta\chi$.

Мы применили метод редукции измерений для того случая, когда разброс частиц по размерам описывается логарифмически-нормальным законом распределения. Выбор этого распределения был продиктован двумя обстоятельствами. Во-первых, логарифмически-нормальный закон довольно часто оказывается применимым на практике для описания распределения частиц по размерам. Во-вторых, что особенно важно, простота варьирования «экспериментальных» данных $\xi(H)$ [3, 4] и условий их обработки обеспечивает в этом случае возможность на всех ее этапах сравнивать получаемые результаты не только с этим «оригиналом», но и с имеющимся «идеалом» $\chi(H)$ (рис. 2).

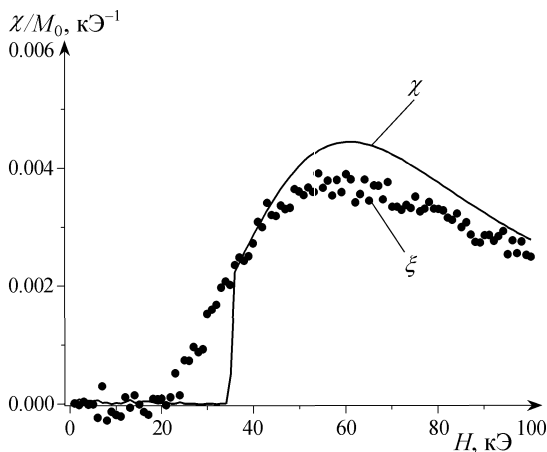


Рис. 2. Полевая зависимость приведенной магнитной восприимчивости χ/M_0 (M_0 — удельная намагниченность при $T = 0$) для системы суперпарамагнитных частиц в области фазового перехода «парамагнетизм — индуцированный суперпарамагнетизм» для $\tau = 1.01$: χ — зависимость, соответствующая идеальному случаю ($T_C = 300$ К, $N = 500$), ξ — «экспериментальная» зависимость (случай логарифмически-нормального распределения частиц по размерам при $N_0 = 500$, $\Delta = 0.5$, $T_C = 300$ К, уровне шума 3% от максимального значения χ)

Следуя [2], воспользуемся линейной моделью измерения удельной магнитной восприимчивости χ (в дискретном представлении)

$$\xi = A\chi + \nu, \quad (2)$$

где ξ — искаженный шумом ν выходной сигнал «магнитметра» A , на который поступил сигнал от исследуемой системы наночастиц. «Магнитметру» A соответствует в данном случае линейный оператор, определяемый функцией распределения частиц по размерам $f(N)$, а значит, двумя ее параметрами: средним значением N_0 и стандартным отклонением (в логарифмических единицах) Δ . Методом редукции измерений необходимо, таким образом, решить вариационную задачу

$$\min_{\chi} \max_i \left| \xi(H_i) - \sum_j \chi(H_i, N_j) f(N_j, N_0, \Delta) \right|, \quad (3)$$

в которой в роли весовой функции выступает логарифмически-нормальное распределение $f(N, N_0, \Delta)$, а величина $\xi(H_i)$ — «экспериментальное» значение восприимчивости системы частиц в i -м магнитном поле H_i .

Как видно из рис. 3, вариационная задача (1) оказывается разрешимой. На этом рисунке показаны результаты реставрации зависимости $\chi(H)$ с помощью метода редукции измерений по исходным «экспериментальным» данным $\xi(H)$ (2) для условий, близких к тем, которые встречаются на опыте: $T_C = 300$ К, $N = 500$, $\Delta = 0.5$, уровень шума 3% (в пересчете на приведенную восприимчивость χ/M_0). Значения

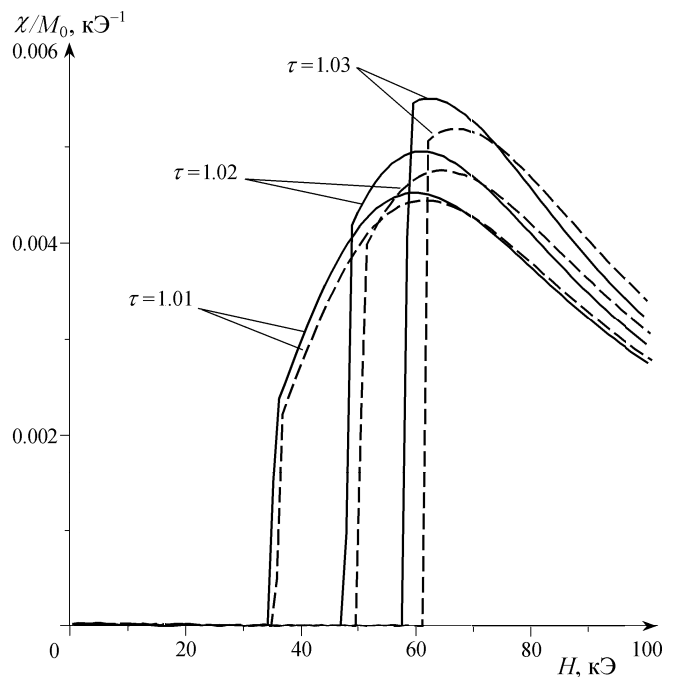


Рис. 3. Результаты реставрации полевой зависимости приведенной магнитной восприимчивости при температурах выше точки Кюри. Штриховые линии соответствуют идеальному случаю ($T_C = 300$ К, $N = 500$), сплошные — результату реставрации

температуры τ были выбраны в обсуждаемом примере (рис. 2 и 3) близкими к точке Кюри — с тем, чтобы величина критического поля H_{crit} (1) оказалась для большинства наночастиц вполне достижимой в условиях лабораторного эксперимента.

Судя по результатам реставрации, метод редукции измерений позволяет в применении к задаче исследования полевой зависимости магнитной восприимчивости $\chi(H)$ системы наночастиц в области температур, близких к их точке Кюри, получить важную информацию сразу о двух магнитных фазовых переходах — «парамагнетизм – индуцированный суперпарамагнетизм» и «суперпарамагнетизм–парамагнетизм», а именно:

1) обнаружить скачок магнитной восприимчивости $\Delta\chi$ при фазовом переходе «парамагнетизм — индуцированный суперпарамагнетизм»;

2) оценить величину соответствующего этому переходу поля H_{crit} ;

3) выяснить, действительно ли переход «супер-

парамагнетизм – парамагнетизм» является более «мягким», чем обычные фазовые переходы 2-го рода в классификации Эренфеста (коль скоро он характеризуется скачком $\Delta\chi = 0$).

Литература

1. *Пытьев Ю.П.* // ДАН СССР. 1979. **245**. С. 42; С. 315; 1980. **255**. С. 540.
2. *Кириллов К.В., Чуличков А.И.* // Вестн. Моск. ун-та. Физ. Астрон. 1999. № 2. С. 62 (Moscow University Phys. Bull. 1999. N 2. P. 62).
3. *Николаев В.И., Бушина Т.А., Ким Ен Чан.* // Вестн. Моск. ун-та. Физ. Астрон. 1996. № 4. С. 107 (Moscow University Phys. Bull. 1996. N 4. P. 93).
4. *Авраамов Ю.С., Белова В.М., Николаев В.И., Стучебников В.М.* // ФТТ. 1974. **16**, № 10. С. 3180.

Поступила в редакцию
08.07.05