Физика низких температур, 1996, т. 22, № 4, с. 400–401 УДК 537.6

Изменение поляризации, обусловленное переменным магнитным полем при низких спиновых температурах

А. И. Абашидзе

Телавский государственный педагогический институт им. Гогебашвили, Грузия, г. Телави

Л. Л. Буишвили, Т. Л. Буишвили, Р. Р. Хомерики

Тбилисский государственный университет, Грузия, 380028, г. Тбилиси, пр. Чавчавадзе, 3

Статья поступила в редакцию 6 сентября 1995 г.

Рассмотрено насыщение линии ЯМР высокочастотным магнитным полем при произвольных значениях поляризации спин-системы. Показано, что при поляризациях близких к единице изменение насыщения со временем происходит по степенному закону, в отличие от высокотемпературного случая, где динамика изменения поляризации носит экспоненциальный характер.

Розглянуто насичення лінії ЯМР високочастотним полем при довільних значеннях поляризації спін-системи. Показано, що при поляризаціях близьких до одиниці зміна насичення з часом відбувається згідно з степеневим законом, на відміну від високотемпературного випадку, де динаміка зміни поляризації носить експоненціальний характер.

Процесс высокотемпературного насыщения линии ядерного магнитного резонанса (ЯМР) в твердых телах хорошо изучен [1] и описывается уравнениями Провоторова [2]. В точке резонанса данные уравнения расцепляются и изменение поляризации p со временем, обусловленное переменным магнитным полем, можно представить в виде

$$dp/dt = -2W(0)p\,, \qquad (1)$$

где $W(\Delta)$ — вероятность стимулированных высокочастотным (ВЧ) полем переходов между зеемановскими уровнями; $\Delta = \omega_0 - \omega$ — расстройка резонанса; ω_0 — ларморовская частота; ω — частота ВЧ поля;

$$W(\Delta) = \frac{1}{2}\pi\omega_1^2 g(\Delta)\,; \qquad (2)$$

$g(\Delta)$ — функция формы линии; ω_1 — амплитуда ВЧ поля в частотных единицах.

В высокотемпературном случае ($p \ll 1$) форма линии в резонансе не зависит от p и поляризация убывает со временем по экспоненциальному закону до нулевого стационарного значения.

Уравнение (1) носит универсальный характер независимо от величины поляризации, однако, когда нарушается условие высокотемпературного приближения ($p \ll 1$), в правой части уравнения (1) появляется нелинейная зависимость от p. Это обусловлено тем, что ширина линии зависит от поляризации. В частности, при не очень близких к единице величинах поляризации ширина линии определяется вторым моментом и [1]

$$g(0) = \left(2\pi M_2\right)^{-1/2}, \qquad (3)$$

где $M_2 = M_2^{(0)}(1 - p^2)$; $M_2^{(0)} = 9/4 \sum\limits_j A_{ij}^2$; A_{ij} — константы диполь-дипольного взаимодействия. (Здесь предполагается, что образец сферической формы и кристалл имеет кубическую симметрию, следовательно, первый момент $M_1 = 3/2\, p \sum\limits_j A_{ij}$ равен нулю.)

Подставляя выражение (3) в (2) и затем в (1), получаем нелинейное уравнение

$$\frac{dp}{dt} \approx -\frac{\omega_1^2}{\sqrt{M_2^{(0)}}}\frac{p}{\sqrt{1-p^2}}\,, \qquad (4)$$

которое легко интегрируется, и решение в неявном виде записывается следующим образом:

$$\frac{1}{2}\ln\left[\frac{1-(1-p^2)^{1/2}}{1+(1-p^2)^{1/2}}\right] + \left(1-p^2\right)^{1/2} \approx$$

$$\approx -\frac{\omega_1^2}{(M_2^{(0)})^{1/2}}(t - t_{10}) +$$

© А. И. Абашидзе, Л. Л. Буишвили, Т. Л. Буишвили, Р. Р. Хомерики, 1996

$$+\frac{1}{2}\ln\left[\frac{1-(1-p_{10}^2)^{1/2}}{1+(1-p_{10}^2)^{1/2}}\right]+\left(1-p_{10}^2\right)^{1/2}, \quad (5)$$

где p_{10} — поляризация в момент $t = t_{10}$.

Как отмечалось, выражение (3) справедливо при не очень близких к единице величинах поляризации. Если $1 - p << 1$, то (3) заменяется лоренцевой формой в резонансе [1]:

$$g(0) = \left(1/\pi\right)\tau_0, \quad (6)$$

где $\tau_0^{-1} = \sqrt{\pi/2}\,(M_2/\mu)^{1/2}$; $\mu = M_4/M_2^2$, M_4 — четвертый момент и $M_4 \simeq (M_2^{(0)})^2(1-p^2)$ (предполагается, что $p \simeq 1$). Подставляя (6) в (2) и затем в (1), получаем нелинейное уравнение иного рода*

$$\frac{dp}{dt} \approx -\frac{\omega_1^2}{(M_2^{(0)})^{1/2}}\frac{p}{1-p^2}, \quad (7)$$

которое имеет решение

$$\ln p - \frac{p^2}{2} \approx -\frac{\omega_1^2}{(M_2^{(0)})^{1/2}}t - \frac{p_0^2}{2} + \ln p_0 \quad (8)$$

с начальным условием $p = p_0$ при $t = 0$.

Как следует из анализа выражения (8), если в начальный момент $p_0 = 1$, то убывание поляризации идет по закону $1 - p \propto (t^{1/2})$. По мере нарушения условия $1 - p << 1$ изменение поляризации описывается формулой (5), и если p близка к единице, то из (5) следует, что $1 - p \propto (t^{2/3})$. В дальнейшем степенная зависимость от t растет и при $p \to 0$ динамика изменения поляризации принимает экспоненциальный характер, как и в высокотемпературном приближении.

Для рассмотрения насыщения линии ЯМР с учетом спин-решеточной релаксации следует добавить в правую часть уравнения (1) релаксационный член $(p_0 - p)/T_1$ (T_1 — время продольной релаксации). Тогда из уравнения

$$2W(0)p_{st} + \left(p_{st} - p_0\right)/T_1 = 0, \quad (9)$$

с учетом того, что при больших поляризациях $W(0)$ зависит от поляризации, можно получить самосогласованное решение для стационарного значения p_{st}. Отметим, что, как показывают вычисления, уравнение (9) имеет только один действительный корень (так же, как и в высокотемпературном приближении) в области $0 \le p_{st} \le p_0$, так что при низких температурах с учетом зависимости $W(\Delta)$ от p в определении стационарного состояния не возникает никаких особенностей.

В заключение заметим, что проведение исследований, описанных в настоящей публикации, стало возможным во многом благодаря гранту № MXK000, полученному от Международного научного фонда.

1. А. Абрагам, М. Гольдман, *Ядерный магнетизм: порядок и беспорядок*, Мир, Москва (1984).
2. Б. Н. Провоторов, *ЖЭТФ* 29, 1582 (1961).
3. Э. Б. Фельдман, А. Е. Хитрин, *ЖЭТФ* 98, 967 (1990).

Variation of polarization caused by alternating magnetic field at low spin temperatures

A. I. Abashidze, L. L. Buishvili,
T. L. Buishvili, and R. R. Khomeriki

Saturation of the NMR line by a high frequency magnetic field is considered for arbitrary values of polarization. It is shown that for polarization $p \simeq 1$ it varies with time according to a power law, in contrast to the high-temperature case, where the variation of polarization has the exponential form.

* Такое же уравнение получается при рассмотрении очень низких спиновых температур в спин-волновом приближении [3].