

В. СИНИБЕЕ

АНАЛИЗ ЯДЕРНОГО ЭФФЕКТА ОВЕРХАУЗЕРА В СИСТЕМЕ АВ

Измерение интенсивностей линий в нескольких спектрах ядерного магнитного двойного резонанса, различающихся выбором возмущаемой полем H_2 линии, позволяет определить относительные величины коэффициентов релаксации спиновой системы. В одном спектре системы АВ достаточно измерить интенсивности двух линий. Из двух спектров можно определить два относительных коэффициента релаксации. Для определения всех пяти относительных коэффициентов релаксации необходимы четыре спектра. Расположение измеряемой линии относительно возмущаемой на схеме уровней энергии определяет тип спектральной линии. По равенству эффектов на однотипных линиях определенных спектров можно сделать заключение о равенстве некоторых коэффициентов релаксации. Незнание знака константы непрямого спин-спиновой связи влечет за собой неопределенность в отнесении полученных относительных коэффициентов релаксации к определенным парам уровней энергии.

Определение входящих в уравнение Редфильда [1] коэффициентов релаксации $R_{aa'bb'}$ (или родственных им величин) необходимо при приложении методов ядерного магнитного резонанса к исследованию молекулярных и внутримолекулярных движений в жидкостях. Основной практический интерес представляют здесь молекулы со многими ядерными спинами. Однако традиционные методы определения времени релаксации в случае многоспиновых систем имеют лишь ограниченную применимость. Поэтому необходима разработка новых методов определения коэффициентов релаксации на основе экспериментальных данных.

П. С. Хабар [2] и Дж. Х. Ногл [3] исследовали с этой целью процесс изменения населенностей уровней энергии. Недавно К. Ф. Кулман и Дж. Д. Бальдешвилер [4] использовали ядерный эффект Оверхаузера (в сочетании с процессом релаксации населенностей) для исследования механизмов релаксации. Применяя формулу, описывающую изменение интенсивностей только тех линий, которые не имели общих уровней энергии с возмущаемой линией, они ограничивались решением прямой задачи: по предположенному механизму релаксации вычислить ожидаемую величину эффекта Оверхаузера. В работе [5] было показано, что при увеличении H_2 вышеупомянутая формула интенсивностей применима и для линий, имеющих общий уровень энергии с возмущаемой линией. Там же было указано на вытекающую из этого возможность решения обратной задачи: исходя из полученных в эксперименте величин эффекта Оверхаузера, определить относительные величины коэффициентов релаксации. Темой настоящей работы является решение этой задачи на примере системы АВ.

1. Условия опыта и условия, налагаемые на исследуемое вещество:
 - а. Возмущающее радиочастотное поле H_2 и коэффициенты релаксации малы по сравнению с любой разницей уровней энергии спиновой системы. В частности, все спектральные линии хорошо разделены.
 - б. Площади спектральных линий (интенсивности линий) в спектрах двойного и монорезонанса сравнивают при одной и той же величине

напряженности «измерительного» поля $H_1 \ll H_2$. Частота поля H_2 точно настроена на возмущаемую линию, а частота поля H_1 изменяется линейно во времени.

в. Напряженность поля H_2 увеличивают до тех пор, пока интенсивности всех линий больше не изменяются. Эти предельные интенсивности применяются в расчетах.

г. Согласно общим условиям применимости теории Редфильда все измерения относятся к бесконечному разведению, а возмущаемая и измеряемая линии принадлежат спектру одной и той же спиновой системы. Наше рассмотрение не относится к интермолекулярному двойному резонансу [6].

Вводим следующие обозначения: уровни энергии (в порядке их возрастания) — $a < b < c < d$; произвольные уровни — p, r ; уровни энергии, принадлежащие возмущаемой линии, — $s > t$ (если не имеются в виду конкретные уровни). Спектральные линии и относящиеся к ним величины обозначаем буквенными индексами соответствующих уровней энергии. Условимся первой писать букву, относящуюся к высшему уровню энергии. Измеряемые интенсивности линий зависят от выбора возмущаемой линии. Относим нижний индекс к измеряемой линии, а верхний — к возмущаемой. Так, например, I_{ba}^{ca} обозначает интенсивность спектральной линии ba в спектре, где ca является возмущаемой линией. В работах [5, 7] показано, что с увеличением H_2 интенсивности всех линий стремятся к предельному значению I_{pr}^{st} . Отношение этой величины к интенсивности той же линии в спектре монорезонанса I_{pr}^0 выражается формулой

$$\frac{I_{pr}^0 - I_{pr}^{st}}{I_{pr}^0} = \frac{T_{pr1}^{st}}{T_{st1}} = O_{pr}^{st}, \quad (1)$$

где

$$T_{pr1}^{st} = T_p^{st} - T_r^{st}, \quad (2)$$

а величины T_p^{st} определяются из системы уравнений

$$\sum_r W_{sr} (T_r^{st} - T_s^{st}) = 1 \quad (3)$$

$$\sum_r W_{tr} (T_r^{st} - T_t^{st}) = -1 \quad (4)$$

$$\sum_r W_{pr} (T_r^{st} - T_p^{st}) = 0, \text{ если } p \neq s, t \quad (5)$$

$$\sum_r T_r^{st} = 0. \quad (6)$$

В уравнениях (3)–(6) величины W_{pr} являются коэффициентами релаксации

$$W_{pr} = R_{pprr} = \int_{-\infty}^{+\infty} \langle\langle p | \mathbf{G}(t) | r \rangle \langle \overline{p | \mathbf{G}(t - \tau) | r} \rangle \rangle_{AV} e^{i(p-r)\tau} d\tau, \quad (7)$$

где $\mathbf{G}(t)$ — оператор стохастических взаимодействий спиновой системы.

2. В системе АВ мы можем образовать шесть величин типа T_{pr1}^{st} . Из них три принадлежат измеряемым спектральным линиям. Вследствие соотношения (6) из четырех величин типа T_p^{st} только три являются независимыми. Поэтому в одном спектре независимыми могут быть только три величины типа T_{pr1}^{st} . Принимаем за независимые те из них, которые соответствуют измеряемым линиям в данном спектре. В соответствии с (2) имеем, однако, соотношения

$$T_{dcl}^{ba} + T_{ca1}^{ba} = T_{db1}^{ba} + T_{ba1}, \quad (8)$$

откуда согласно (1) получаем соотношение между эффектами в спектре с возмущаемой линией ba

$$O_{dc}^{ba} + O_{ca}^{ba} = O_{db}^{ba} + 1. \quad (9)$$

Соотношениям типа (9) можно придать общий вид, если ввести понятие типа спектральной линии в данном спектре. Если выбрана возмущаемая линия, то среди остальных трех линий одна линия типа $\Lambda = 0$, другая типа $\Lambda = 2$ (по [8]) и третья не имеет общего уровня энергии с возмущаемой линией. Чтобы выразить принадлежность измеряемой величины (1) к одному из этих типов, применяем вместо нижних буквенных индексов числа 0, 2 или 1 соответственно. Тогда формула (9) принимает следующий обобщенный вид:

$$O_1^{st} + O_0^{st} - O_2^{st} = 1. \quad (10)$$

Согласно формуле (10) в одном спектре st только два измеряемых эффекта являются независимыми.

3. Если известны коэффициенты релаксации, то с помощью двух уравнений (5) и соотношения (10) можно вычислить все измеряемые эффекты O_{pr}^{st} в данном спектре st . Для этого выражаем зависимые величины типа T_{pr1}^{st} через независимые. Подставляя полученные выражения в уравнение (5) и деля его на T_{st1} , получим [совместно с (10)] три уравнения для определения трех неизвестных O_{pr}^{st} .

Эти уравнения можно также написать как уравнения между эффектами на линиях определенных типов. В результате получаем уравнения

$$W_0^{st} O_0^{st} + W_{cb} O_2^{st} - (W_{cb} + W_1^{st}) O_1^{st} = 0, \quad (11)$$

$$W_{ca} O_0^{st} + W_2^{st} O_2^{st} + (W_{da} + W_1^{st}) O_1^{st} = 0. \quad (12)$$

Обозначение коэффициентов релаксации по типам в уравнениях (11), (12) имеет тот же смысл, что и при обозначениях эффектов в соотношении (10). Один и тот же коэффициент в разных спектрах принадлежит к разным типам. Так, например,

$$W_{ca}^{ba} = W_0^{ba}, \quad \text{но} \quad W_{ca}^{db} = W_1^{db}. \quad (13)$$

Система уравнений (11), (12), (10) позволяет вычислить измеряемые эффекты O_{pr}^{st} для любого спектра, если известны коэффициенты релаксации и если детерминант системы (11), (12), (10)

$$D^{st} = (W_0^{st} + W_{cb}) (W_2^{st} + W_{da}) + W_1^{st} (W_2^{st} + W_0^{st} + W_{ca} + W_{cb}) \neq 0. \quad (14)$$

При желании величины T_{pr1}^{st} можно вычислить также исходя из величин O_{pr}^{st} , из определения (1) и из соотношения

$$\frac{1}{T_{st1}^{st}} = W_{st} + [1 + O_2^{st}] W_{da} + W_0^{st} O_0^{st}. \quad (15)$$

Формула (15) получается из уравнений (3), (4), (10). Итак,

$$T_0^{st} = O_0^{st} T_{st1}^{st}; \quad T_2^{st} = O_2^{st} T_{st1}^{st}; \quad T_1^{st} = O_1^{st} T_{st1}^{st} \quad (16)$$

$$T_{ca1} = (1 + O_2^{st}) T_{st1}^{st} \quad (17)$$

$$T_{cb1} = \pm (O_0^{st} - 1) T_{st1}^{st}. \quad (18)$$

В формуле (18) следует поставить положительный знак, если $st = ba$, dc и отрицательный знак, если $st = ca$, db .

4. Решения системы уравнений (11), (12), (10) в детерминантной форме имеют вид

$$O_0^{st} = \frac{D_0^{st}}{D^{st}}, \quad O_2^{st} = -\frac{D_2^{st}}{D^{st}}, \quad O_1^{st} = \frac{D_1^{st}}{D^{st}}, \quad (19)$$

где

$$D_0^{st} = W_1^{st} W_2^{st} + (W_2^{st} + W_1^{st} + W_{da}) W_{cb} \quad (20)$$

$$D_1^{st} = W_0^{st} W_2^{st} - W_{da} W_{cb} \quad (21)$$

$$D_2^{st} = W_0^{st} W_1^{st} + (W_0^{st} + W_1^{st} + W_{cb}) W_{da} \quad (22)$$

$$D^{st} = D_0^{st} + D_1^{st} + D_2^{st}. \quad (23)$$

Последняя формула равносильна выражению (14), откуда видно, что

$$D^{st} \geq 0. \quad (24)$$

Предполагая неравенство (14) выполненным, получаем из (19) — (24) неравенства

$$O_0^{st} > 0 \quad \text{и} \quad O_2^{st} < 0. \quad (25)$$

Знак эффекта O_1^{st} совпадает со знаком выражения (21). В частности, если релаксационный механизм, допускающий двухфотонный переход (внутримолекулярное диполь-дипольное взаимодействие), не имеет значения, т. е. $W_{ca} = 0$, то $O_1^{st} > 0$ и согласно (1) наблюдается уменьшение интенсивности линии типа $\Lambda = 1$.

На основании формул (20) — (23) можно сделать следующие заключения, характеризующие зависимость эффекта Оверхаузера от коэффициентов релаксации:

1. Если $W_{dc} = W_{ba} = W_{db} = W_{ca}$, то измеряемый эффект на линии данного типа не зависит от выбора возмущаемой линии. От этого выбора зависит только тип данной линии. Если дополнительно $W_{ca} = 0$, то

$$O_1 = -O_2. \quad (26)$$

Если же дополнительно к равенству вышеуказанных коэффициентов еще и $W_{cb} = 0$, то

$$O_1 = O_0. \quad (27)$$

При одновременном $W_{da} = W_{cb} = 0$ получаем

$$O_1 = O_0 = -O_2 = \frac{1}{3}. \quad (28)$$

2. Если $W_{dc} = W_{ba}$ и $W_{db} = W_{ca}$, то измеряемые эффекты на линиях одного типа будут равными в спектрах dc , ba и в спектрах db , ca . Если дополнительно $W_{cb} = W_{da}$, то

$$O_0^{st} = -O_2^{st}. \quad (29)$$

3. Если $W_{dc} = W_{ca}$ и $W_{ba} = W_{db}$, то измеряемые эффекты на однотипных линиях будут равными в спектрах dc , ca и в спектрах ba , db . Если дополнительно $W_{cb} = 0$, то

$$O_1^{st} = O_0^{st}. \quad (30)$$

5. Рассмотрим проблему определения относительных коэффициентов релаксации на основе экспериментально измеренных эффектов O_{pr}^{st} . Будем называть уровни энергии s , t возмущенными, а остальные уровни невозмущенными в данном спектре st .

Три неизвестных W_{pr} в одном из уравнений (5) относятся к невозмущенному уровню p в спектре st . Если существуют еще другие спектры, содержащие тот же p в качестве невозмущенного уровня, то получим дополнительные уравнения типа (5) с теми же тремя неизвестными W_{pr} . В системе АВ можно выбирать два спектра $s > t$, $s' > t'$, имеющие один общий невозмущенный уровень p (возможные пары таких спектров приведены в табл. 2). Тем самым на основе двух спектров получим два уравнения типа (5) для определения трех неизвестных W_{pr} . Выражая в этих уравнениях зависимые величины T_{rp1}^{st} и $T_{rp1}^{s't'}$ через независимые и разделяя на T_{st1} или $T_{s't'1}$ соответственно, выражаем коэффициенты перед неизвестными W_{pr} через экспериментально определяемые эффекты типа O_{pr}^{st} и $O_{pr}^{s't'}$.

Эти пары уравнений можно также выразить в виде соотношений между величинами определенных типов. Если общим невозмущенным уровнем p для двух спектров st и $s't'$ является уровень b или c , то из табл. 1, 2 видно, что

$$W_0^{s't'} = W_1^{st} \quad \text{и} \quad W_1^{s't'} = W_0^{st}. \quad (31)$$

Из уравнения (11) получаем тогда

$$O_0^{st} W_0^{st} - O_1^{st} W_1^{st} = (1 - O_0^{st}) W_{cb} \quad (32)$$

$$- O_1^{s't'} W_0^{s't'} + O_0^{s't'} W_1^{s't'} = (1 - O_0^{s't'}) W_{cb}. \quad (33)$$

Если же общим невозмущенным уровнем является a или d , то

$$W_2^{s't'} = W_1^{st} \quad \text{и} \quad W_1^{s't'} = W_2^{st}. \quad (34)$$

Уравнение (12) дает тогда

$$O_2^{st} W_2^{st} + O_1^{st} W_1^{st} = -(1 + O_2^{st}) W_{ca} \quad (35)$$

$$O_1^{s't'} W_2^{st} + O_2^{s't'} W_1^{st} = -(1 + O_2^{s't'}) W_{ca}. \quad (36)$$

Решая уравнения (32), (33) или (35), (36), можем из двух спектров определить два относительных коэффициента релаксации. Так, на основе спектров dc , ca можно определить из (32), (33) величины $\frac{W_0^{st}}{W_{cb}} =$

$$= \frac{W_{db}}{W_{cb}} \quad \text{и} \quad \frac{W_1^{st}}{W_{cb}} = \frac{W_{ba}}{W_{cb}},$$

если

$$O_0^{st} O_0^{s't'} - O_1^{st} O_1^{s't'} \neq 0. \quad (37)$$

Таблица 1

Классификация коэффициентов релаксации по типам в зависимости от выбора возмущаемой линии

Возмущаемая линия	W_0^{st}	W_2^{st}	W_1^{st}
dc	W_{cb}	W_{ca}	W_{ba}
ba	W_{ca}	W_{db}	W_{dc}
db	W_{dc}	W_{ba}	W_{ca}
ca	W_{ba}	W_{dc}	W_{db}

Таблица 2

Возможные пары спектров с общим невозмущенным уровнем

Общий невозмущенный уровень	Возмущенные линии	Коэффициенты релаксации, принадлежащие невозмущенному уровню
a	db, dc	W_{ba}, W_{ca}, W_{da}
d	ba, ca	W_{db}, W_{dc}, W_{da}
b	dc, ca	W_{db}, W_{ba}, W_{cb}
c	db, ba	W_{dc}, W_{ca}, W_{cb}

Для определения всех пяти относительных коэффициентов релаксации необходимо четыре спектра. Решая, например, две пары уравнений

типа (32), (33), получаем четыре относительных величины. Подстановка двух из них в уравнение (35) или (36) дает нам пятую величину.

6. На основе уравнений (10), (11), (12), (32), (33), (35), (36) и табл. 1, 2 можно доказать следующие утверждения, являющиеся в основном обратными заключениями пункта 4:

1. Если измеряемые эффекты на всех однотипных линиях равны во всех четырех спектрах, то

$$W_{dc} = W_{ba} = W_{db} = W_{ca}. \quad (38)$$

Если дополнительно $O_1 = -O_2$, то $W_{da} = 0$. Если же дополнительно к равенству однотипных эффектов мы имеем также $O_1 = O_0$, то $W_{cb} = 0$.

2. Если измеряемые эффекты на всех однотипных линиях равны в спектрах ba , dc или в спектрах db , ca , то одновременно

$$W_{dc} = W_{ba} \quad \text{и} \quad W_{ca} = W_{db}. \quad (39)$$

Если дополнительно только в одной из вышеуказанных пар спектров $O_0^{st} = -O_2^{st} \neq 1$, то

$$W_{cb} = W_{da}. \quad (40)$$

3. Если измеряемые эффекты на всех однотипных линиях равны в спектрах ca , dc или в спектрах db , ba , то одновременно

$$W_{dc} = W_{ca} \quad \text{и} \quad W_{ba} = W_{db}. \quad (41)$$

Если дополнительно только в одной из вышеуказанных пар спектров

$$O_0^{st} = O_1^{st} \neq 0, \quad \text{то} \quad W_{cb} = 0.$$

7. Отметим неоднозначность определения коэффициента релаксации, связанную со знаком постоянной непрямой спин-спиновой связи. Пусть гамильтониан АВ-системы определен как

$$\mathbf{H}_0 = -\{\omega_A \mathbf{I}_{ZA} + \omega_B \mathbf{I}_{ZB} + J(\mathbf{I}_A \cdot \mathbf{I}_B)\}. \quad (42)$$

Пронумеруем спектральные линии в спектре в порядке возрастания резонансных частот цифрами 1, 2, 3, 4. В зависимости от знака J , получаем следующие два возможных соответствия между спектральными линиями и уровнями энергии:

	1	2	3	4
при $J > 0$	dc	ba	db	ca
при $J < 0$	ba	dc	ca	db

Нетрудно убедиться, что выбор некоторой линии с определенным номером в качестве возмущаемой определяет распределение остальных пронумерованных линий по типам независимо от знака J . Поэтому невозможно заключить, принадлежит ли, например, линия 1 к переходу dc , или ba . По той же причине коэффициенты релаксации, полученные путем анализа эффекта Оверхаузера, относятся на деле к линии с определенным номером, но остается неопределенным, какому именно переходу на схеме уровней энергии они принадлежат.

8. Применимость формулы (1) была доказана в [5, 7] для случая спиновых систем, не имеющих вырожденных уровней энергии и равных разниц энергии. Поэтому методика расчета, описанная в начале п. 5, в принципе применима и для более сложных систем, чем система АВ. Успех анализа зависит от того, сколько хорошо разделенных линий, пригодных для возмущения и для измерения, имеется в спектре исследуемого соединения. Однако нет необходимости измерять все линии в данном спектре, и можно вычислить только часть относительных коэффициентов релаксации из ограниченного числа спектров. В одном спектре системы АВХ, например, можно измерить до 11 линий. Однако только шесть эффектов являются независимыми. По схеме уровней энергии можно выбрать шесть возмущаемых линий в шести спектрах системы АВХ так, чтобы они имели два общих невозмущенных уровня энергии. Тогда измерение 36 интенсивностей в шести спектрах двойного резонанса (и шести интенсивностей в спектре монорезонанса) позволяет вычислить 12 относительных коэффициентов релаксации. Расчет всех 27 относительных коэффициентов потребовал бы 12 спектров.

Измерение интенсивностей в спектрах двойного резонанса предъявляет к спектрометру более высокие требования, чем в случае монорезонанса [9]. Ограниченная точность измерения интенсивностей не позволяет определить отношение коэффициентов релаксации, отличающихся по величине больше, чем на один порядок. Определение абсолютных значений коэффициентов релаксации требует дополнительного эксперимента для установления шкалы времени [4].

Несмотря на эти ограничения, измерение эффекта Оверхаузера может быть полезным методом при прямом определении коэффициентов релаксации.

ЛИТЕРАТУРА

1. Redfield A. G., Journ. Res. Developm. IBM, **1**, 19 (1957).
2. Hubbard P. S., J. Chem. Phys., **42**, 3546 (1965).
3. Noggle J. H., J. Chem. Phys., **43**, 3304 (1965).
4. Kuhlmann K. F., Baldeschwieler J. D., J. Chem. Phys., **43**, 572 (1965).
5. Sinivee V., Lippmaa E., ENSV TA Toimet., Füüs.-mat. ja tehn. tead. seeria, **15**, 64 (1966).
6. Kaiser R., J. Chem. Phys., **42**, 1838 (1965).
7. Sinivee V., Lippmaa E., ENSV TA Toimet., Füüs.-mat. ja tehn. tead. seeria, **14**, 564 (1965).
8. Freeman R., Anderson W. A., J. Chem. Phys., **37**, 2053 (1962).
9. Липпмаа Э., Пускар Ю., Алла М., Сюгис А., Изв. АН ЭССР. Сер. физ.-матем. и техн. наук, **14**, 306 (1965).

Институт кибернетики
Академии наук Эстонской ССР

Поступила в редакцию
13/I 1966

V. SINIVEE

TUUMSE OVERHAUSERI EFEKTI ANALÜÜS AB-SÜSTEEMI JUHUL

Lähtudes varasemates töödes [5, 7] saadud valemitest, uuritakse katseliselt mõõdetavate efektide alusel suhteliste relaksatsioonikoefitsientide arvutamise küsimust AB-süsteemi juhul. Uhes topeltresonantsispektris on ainult kaks sõltumatut efekti. Kahe spektri mõõtmise põhjal on võimalik arvutada kaks suhtelist relaksatsioonikoefitsienti. Kõigi viie suhtelise koefitsiendi määramiseks on vaja neli spektrit. Mõõdetava spektraaljoone asend energianivoode skeemil häiritava joone suhtes määrab mõõdetava joone tüübi antud spektris. Mõõdetavate efektide võrdsusest ühetüübilistel joontel teatud spektrites järeldub mõnede relaksatsioonikoefitsientide võrdsus.

V. SINIVEE

ANALYSIS OF NUCLEAR OVERHAUSER EFFECT IN AB SYSTEM

The formula for Overhauser effect derived in an earlier work is used to calculate relative relaxation coefficients in the case of AB system. Only two effects in a given double resonance spectrum are independent. Two relative relaxation coefficients may be determined from a pair of spectra. Four spectra are needed to calculate all the five relative relaxation coefficients. The position of a given line (relative to the perturbed line) in the energy level scheme defines the type of this line. Equality of measured effects on lines of the same type in certain spectra enables to draw a conclusion on the equalities of several relaxation coefficients.

Эта формула для эффекта Оверхаузера, полученная в предыдущей работе, используется для расчета относительных коэффициентов релаксации в системе АВ. Только два эффекта в данном спектре двойного резонанса являются независимыми. Два относительных коэффициента релаксации могут быть определены по паре спектров. Для определения всех пяти относительных коэффициентов релаксации необходимы четыре спектра. Положение данной линии (относительно возмущенной линии) в энергетической схеме определяет тип этой линии. Равенство измеренных эффектов на линиях одного типа в определенных спектрах позволяет сделать вывод о равенстве нескольких коэффициентов релаксации.

3. Если в спектре двойного резонанса измерены коэффициенты релаксации ρ_{11} и ρ_{22} для двух линий, принадлежащих к одному типу, то можно сделать вывод о равенстве коэффициентов ρ_{11} и ρ_{22} .

Вывод: Если в спектре двойного резонанса измерены коэффициенты релаксации ρ_{11} и ρ_{22} для двух линий, принадлежащих к одному типу, то можно сделать вывод о равенстве коэффициентов ρ_{11} и ρ_{22} .

ЛИТЕРАТУРА

1. Redfield A. G. Journ. Res. Developm. IBM, 1, 19 (1957).
2. Hahn E. Journ. Chem. Phys. 42, 2076 (1965).
3. Slichter W. Journ. Chem. Phys. 42, 2076 (1965).
4. Slichter W. Journ. Chem. Phys. 42, 2076 (1965).
5. Slichter W. Journ. Chem. Phys. 42, 2076 (1965).
6. Slichter W. Journ. Chem. Phys. 42, 2076 (1965).
7. Slichter W. Journ. Chem. Phys. 42, 2076 (1965).
8. Slichter W. Journ. Chem. Phys. 42, 2076 (1965).
9. Slichter W. Journ. Chem. Phys. 42, 2076 (1965).
10. Slichter W. Journ. Chem. Phys. 42, 2076 (1965).

Институт химической физики АН УССР, Киев

В. Синивее

ТРУДЫ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОГО ИНСТИТУТА ХИМИЧЕСКОЙ ФИЗИКИ АН УССР