

**ОБЪЕДИНЕННЫЙ
ИНСТИТУТ
ЯДЕРНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ
ДУБНА**

P8-85-880

Э.Фишер

**НИЗКОТЕМПЕРАТУРНЫЕ АНОМАЛИИ
АМОРФНОГО ВЕЩЕСТВА –
ПРОЯВЛЕНИЕ УНИВЕРСАЛЬНЫХ СВОЙСТВ
ТВЕРДЫХ ТЕЛ**

Направлено на XXIV конференцию стран СЭВ
по физике и технике низких температур,
ГДР, 1985 г.

1985

Исследование аморфных веществ в настоящее время представляет собой одну из центральных проблем физики твердого тела. Такой большой интерес к этим веществам проявляется, с одной стороны, из-за большого спектра возможностей их практического использования в самых разных сферах науки и техники, а с другой стороны, из-за их удивительных физических свойств при низких температурах.

Несмотря на постоянно возрастающий интерес к изучению низкотемпературных свойств аморфных или сильно дефектных твердых тел, и в настоящее время нельзя говорить о подлинном понимании физических причин различных аномальных по отношению к теории Дебая эффектов, которые наблюдаются в их тепловых, упругих, диэлектрических и др. свойствах (рис. I).

Существующие теоретические модели носят главным образом феноменологический характер и описывают только отдельные элементы общей проблемы. Согласие расчетов в экспериментальными данными остается неудовлетворительным, требует нередко дополнительных постулатов, что приводит в рамках комплексного рассмотрения к явным противоречиям.

Общность этих низкотемпературных аномалий для самых различных веществ свидетельствует о наличии широкого спектра локализованных низкоэнергетических возбуждений, характерные параметры которого мало зависят от конкретного материала. Одинаковые величины эффекта для самых разных аморфных веществ и сложная структура этих материалов существенно затрудняют дальнейшее продвижение по этим вопросам. Выход из этой ситуации представляет собой поиск и изучение аналогичных эффектов в упорядоченных, кристаллических структурах. У таких веществ легче целенаправленно повлиять на определенные структурные ха-

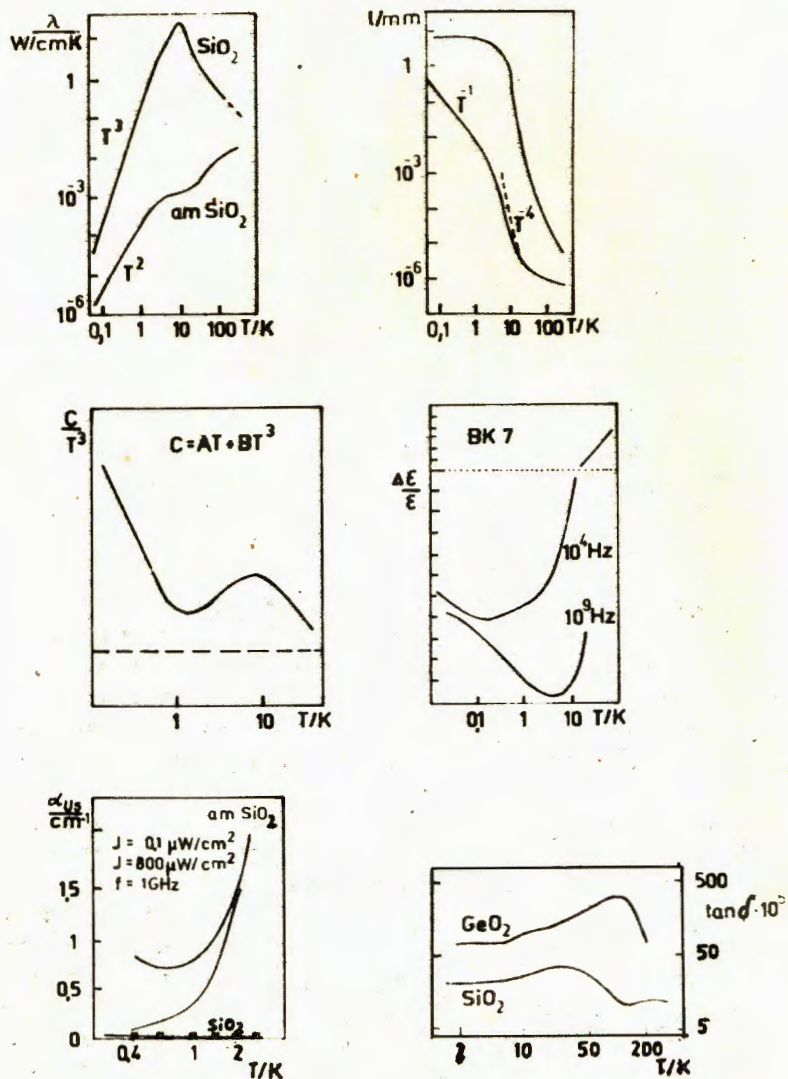


Рис.1. Низкотемпературные аномалии аморфных веществ /8/.

характеристики и тем самым варьировать величину аномальных эффектов в широком интервале. Это способствует выявлению конкретных микроскопических механизмов и проверке различных теоретических концепций. Было показано, что с этой точки зрения сегнетоэлектрические кристал-

лы представляются весьма эффективными модельными веществами /1/. Появление полярных структур и их доминирующая роль в энергетическом спектре кристалла при низких температурах позволяют целенаправленно манипулировать аномалиями при помощи электрических полей и существенно повышают чувствительность диэлектрических измерений.

Соответствующие низкотемпературные аномалии найдены для самых разных типов сегнетоэлектрических монокристаллов /1/. На рис. 2 и 3 представлены, например, результаты измерения теплопроводности и теплоемкости на монокристалле $Sr_{1-x}Ba_x(Nb_2O_6)$ – сегнетоэлектрике релаксационного типа. Типичный для аморфных веществ минимум в температурной зависимости реальной части диэлектрической восприимчивости

$\Delta\epsilon/\epsilon = \frac{\epsilon(T) - \epsilon(T_0)}{\epsilon(T_0)}$ также был обнаружен (рис.4,5). Аналогичные результаты получены на монокристаллах $SrTi_2O_7$ (квантовый параэлектрик)

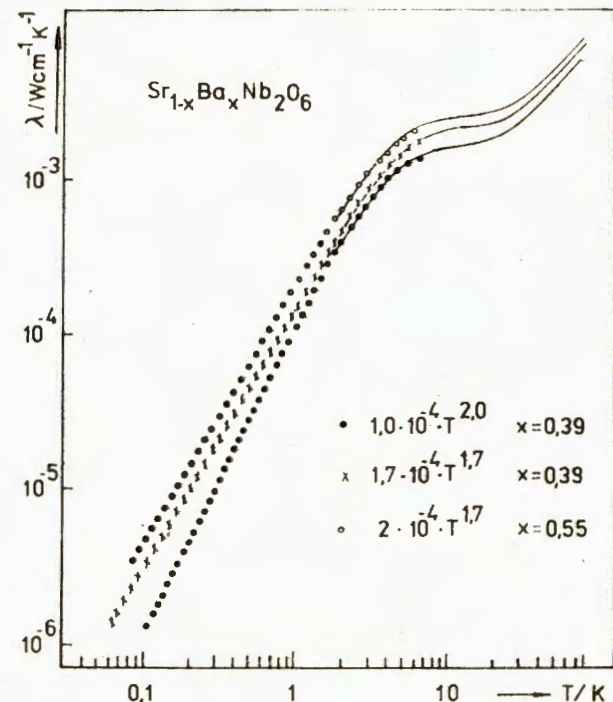


Рис.2. Теплопроводность монокристаллов $Sr_{1-x}Ba_x(Nb_2O_6)$ (x-1. измерение, · 2. измерение через 1/2 года, - из /7/).

и KN_2PO_4 (сегнетоэлектрик типа порядок-беспорядок) (рис. 6,7). Но более того, общий ход температурной зависимости комплексной диэлектрической постоянной весьма интересен (рис.8). Выше минимума можно различить три температурных интервала с разной зависимостью $\frac{\Delta \epsilon}{\epsilon}$ (T): $\frac{\Delta \epsilon}{\epsilon} \sim \ln T$ ($0,1 \text{ K} < T < 2 \text{ K}$), $\frac{\Delta \epsilon}{\epsilon} \sim T^k$ ($k \approx 2, 10 \text{ K} < T < 20 \text{ K}$), $\frac{\Delta \epsilon}{\epsilon} \sim T^{-1/2}$ ($T > 30 \text{ K}$).

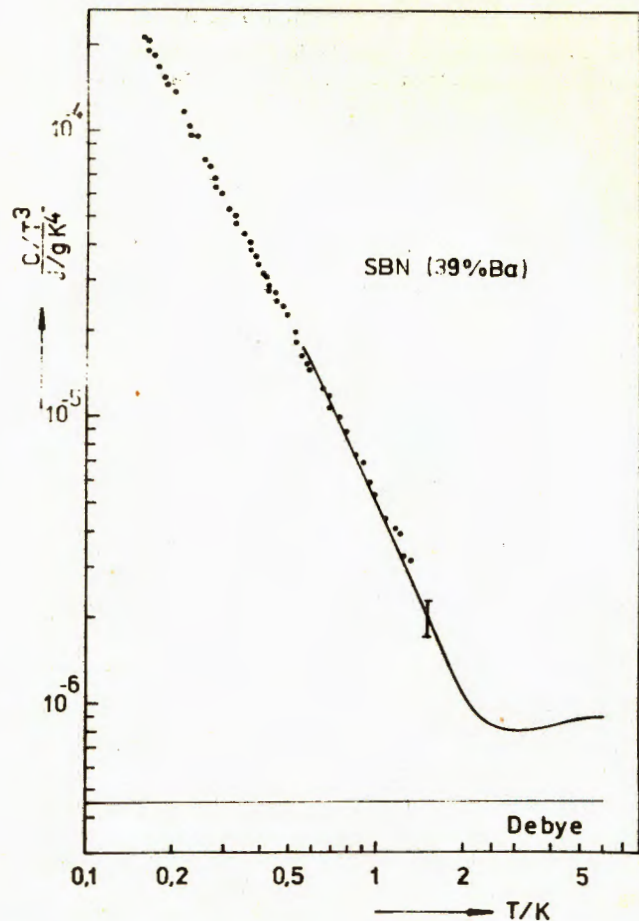


Рис.3. Отклонение удельной теплоемкости монокристалла **SBN (39% Ba)** от закона Дебая, — из [9].

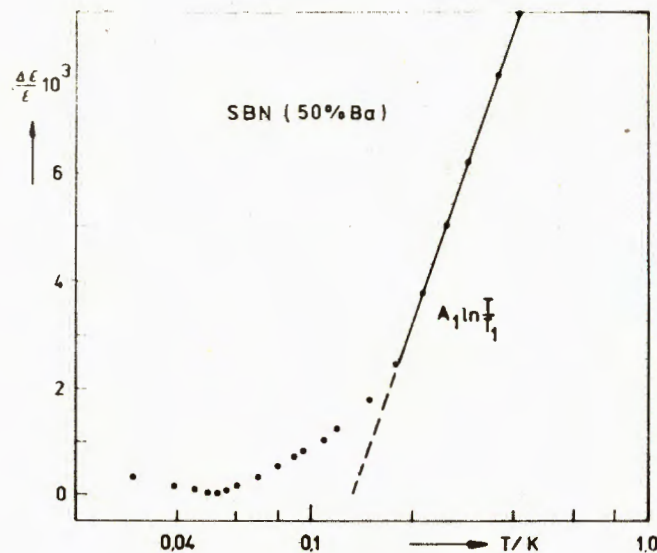


Рис. 4.
SBN (50% Ba)
— минимум в $\frac{\Delta \epsilon}{\epsilon}$.

Такое поведение сопряжено с проявлением процесса, вызывающего широкий максимум диэлектрических потерь при $10 \text{ K} < T < 100 \text{ K}$. Интересно заметить, что крутой рост диэлектрических потерь около 10 K совпадает с зависимостью $\frac{\Delta \epsilon}{\epsilon} \sim T^k$, а также с температурным интервалом, в котором наблюдается "плато" теплопроводности. Определяя среднюю температуру "плато" как T_p , обнаруживаем удивительно четкое совпадение этой величины с температурой T_2 , полученной из аналитического представления экспериментальных данных диэлектрической постоянной в верхней области температур [1]. Оказывается, что такая корреляция существует для всех изученных с этой точки зрения веществ (табл. I) и, видимо, является универсальной.

Аналогичная корреляция известна между T_p и средней температурой дополнительного максимума теплоемкости C/T^3 аморфных веществ [2].

Тем самым обширный экспериментальный материал свидетельствует об удивительно сильной качественной и количественной связи между различными тепловыми, упругими и диэлектрическими аномалиями, комплексный характер которой приводит к заключению, что эти эффекты базируются на некотором едином универсальном механизме взаимодействия, не зависящем от конкретного вещества.

Решающая роль при конкретизации данного представления принадлежит физической интерпретации представленного выше широкого макси-

ма диэлектрических потерь. Общепринятое до сегодняшнего дня описание таких эффектов на основе процесса релаксации дебаевского типа требует наличия широкого спектра энергии активации $g(E_a)$, не находящего удовлетворительного микроскопического подтверждения. Следовательно, такая процедура означает не что иное, как перевод экспериментальных результатов на язык условного спектра $g(E_a)$ без получения какой-либо дополнительной физической информации.

Можно, однако, анализировать такие эффекты на основе физически более убедительной и эффективной концепции "универсальной диэлектрической релаксации". Было показано^{/3/}, что диэлектрические свойства самых разных твердых веществ обнаруживают удивительно однообразное, универсальное поведение, сильно отличающееся от предсказаний теории Дебая. Этот факт можно характеризовать общей эмпирической зависимостью диэлектрических потерь типа

$$\chi''(\omega) \sim \omega^{n-1} \quad (\omega > \omega_p, 0 < n < 1) \quad (1)$$

или, учитывая термическую активацию,

$$\chi''(\omega, T) \sim \frac{1}{T} \left[\left(\frac{\omega}{\omega_p} \right)^{1-n} + \left(\frac{\omega}{\omega_p} \right)^{-m} \right]^{-1}, \quad (2)$$

причем

$$\omega_p = 1/\tau_p = \omega_0 \exp(-\bar{E}_a/k_B T).$$

Первые теоретические рассмотрения данного явления указывают на то, что такое поведение обусловлено неким универсальным механизмом многочастичного взаимодействия^{/4,5/}.

Сила взаимодействия между поляризуемыми единицами (диполи, подвижные ионы и т.д.) и тем самым степень отклонений диэлектрической релаксации от теории Дебая характеризуется величиной n . Эта величина n определяется непосредственно из эксперимента и позволяет систематизировать различные вещества относительно их диэлектрических свойств.

Критический пересмотр экспериментальных данных и теоретических концепций, относящихся к низкотемпературным свойствам аморфных веществ, с одной стороны, и диэлектрической релаксации твердых тел, с другой, приводит к заключению, что все обнаруженные аномалии по отношению к теории Дебая являются следствиями одного и того же единого "универсального" механизма^{/1/}. Так, например, анализ диэлектрической аномалии монокристалла SbN (рис.8) на основе (2) представлен на рис. 8. Видно, что экспериментальные результаты хорошо описываются при помощи только одной единственной энергии активации \bar{E}_a .

Было показано^{/6/}, что имеющая физический смысл энергия активации E_a определяется по формуле $E_a = (1-n) \cdot \bar{E}_a$.

Учитывая сильную корреляцию между температурной зависимостью теплопроводности и диэлектрической восприимчивости (т.е. $T_p \approx T_2$), можно заключить, что "плато" в теплопроводности обусловлено рассеянием фононов на уровнях энергии возбуждения E_a .

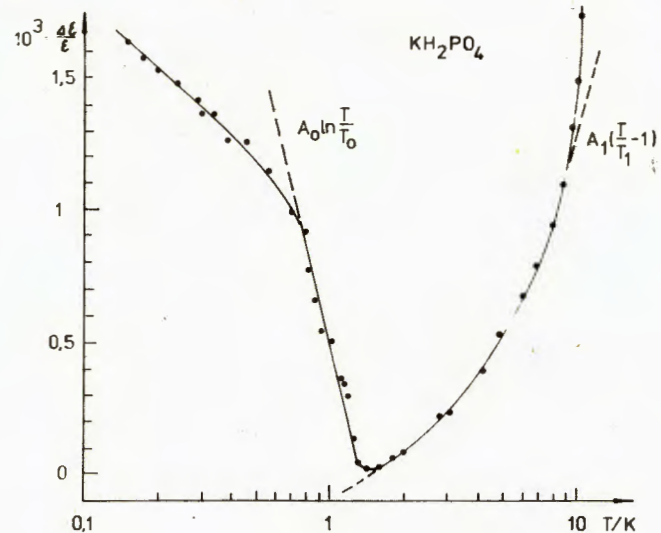


Рис.5. KH_2PO_4 минимум в $\Delta\epsilon/\epsilon$.

Длина свободного пробега фононов l определяется тогда^{/1/}:

$$l^{-1} \sim \left[\exp\left(\frac{E_a}{k_B T}\right) - 1 \right]^{-1} \cdot \chi''(\omega, T). \quad (3)$$

Результаты первых подсчетов теплопроводности на основе (3) демонстрируют явные преимущества данной интерпретации. Особенно наглядно проясняется физическая причина плато в λ в приближении доминирующих фононов, ибо

$$\hbar\omega_{dom}(T_p) \approx E_a \quad !$$

т.е. при температуре плато T_p энергия доминирующих фононов равняется характерной энергии возбуждения E_a .

Одновременно объясняются дополнительные вклады в теплоемкость C , обуславливающие максимум в C/T^3 при тех же температурах. Некоторые заключения на основе указанной здесь концепции позволяют принципиально отличить её от других моделей, исходящих из некоторого аддитивного спектра отдельных возбуждений (напр., модель двухуровне-

вых систем и т.д.), а проведенные соответствующие эксперименты подтвердили новый подход убедительным образом [1].

Помимо этого можно показать [1], что поведение теплопроводности и диэлектрической постоянной аморфных веществ, данное при $T < 1$ К, принципиально не согласуется с концепцией двухуровневых систем или аналогичными моделями, а характерные аномалии являются следствием того же общего механизма взаимодействия, как и при высоких температурах. Следовательно, уравнения (1) и (3) сохраняют силу и при $T < 1$ К. Найдена новая температурная зависимость, которая предположительно является результатом квантовых эффектов: $\chi''(\omega, T) \sim \omega^{n-1} \cdot T$.

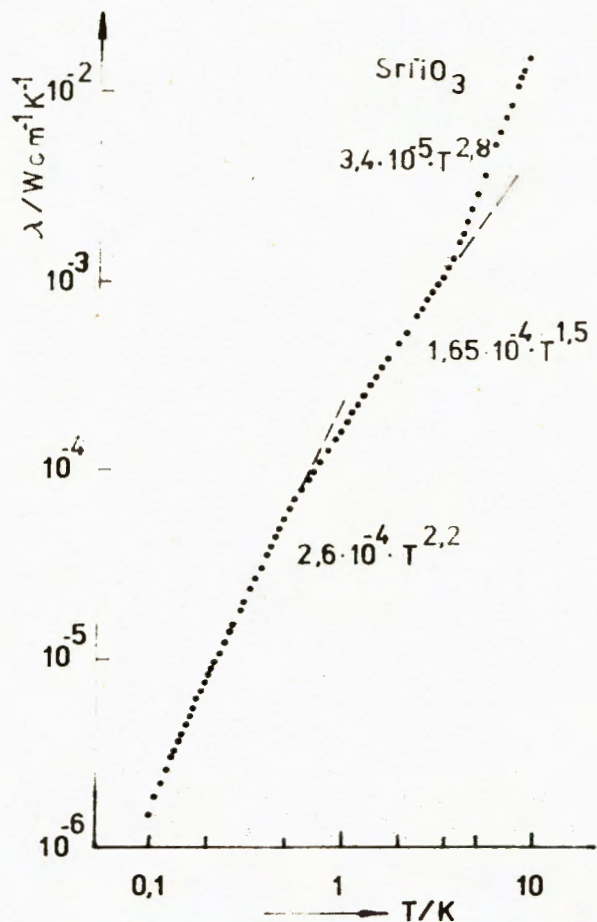


Рис. 6. Теплопроводность монокристалла $SrTiO_3$.

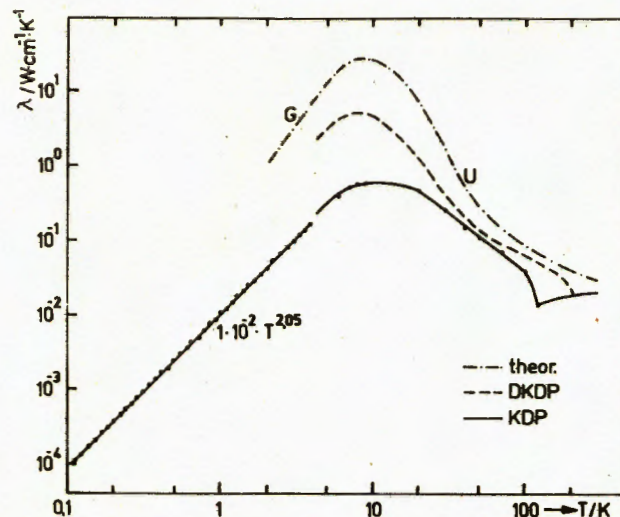


Рис. 7. Теплопроводность монокристалла KH_2PO_4 ; $T > 4$ К из [10].

Таблица I. Корреляция между характерными температурами T_2 (диэлектрической восприимчивости) и T_p (плато теплопроводности)

Материал	T_2 /К	T_p /К
Монокристаллы SBN (50% Ba)	15,6	15
- " - SrTiO₃	2	2
- " - KDP	9	10
Поликристаллы PLZT 8,5/65/35	7,5	8
- " - PLZT 8/65/35	45	40
- " - Pb_xSr_{1-x}TiO₃		
x = 0	2	2
x = 0,005	2,4	2,2
x = 0,055	6,5	7,5
x = 0,12	8	7,5
Аморфные вещества:		
Cenasil /11/	9	7
BK 7 /12/	10	10

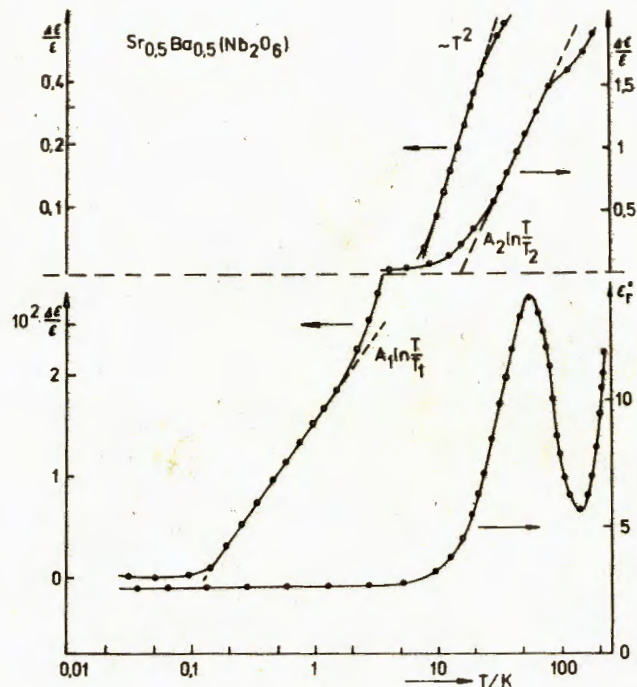


Рис. 8. **SBN (50% Ba)** - общий ход температурной зависимости комплексной диэлектрической постоянной.

Дальнейшее рассмотрение данного вопроса показывает, что низкотемпературные "аномалии" аморфных и дефектных веществ и "универсальное" диэлектрическое поведение твердых тел являются только разными компонентами одной и той же проблемы, которая не исчерпывается низкотемпературными эффектами.

Обширный экспериментальный материал и первые теоретические работы указывают на возможность объяснения самых разных аномалий во многих физических свойствах (аморфные структуры, диэлектрическая релаксация, электрические шумы, спин-решеточная релаксация, фазовые переходы, упругая релаксация, магнитная релаксация ...) большой группы веществ исходя из единого механизма взаимодействия.

Исследование конкретных свойств этого механизма и установление общей модели позволило бы найти микроскопическую интерпретацию для каждого конкретного вещества со своими специфическими параметрами как частный случай общего эффекта.

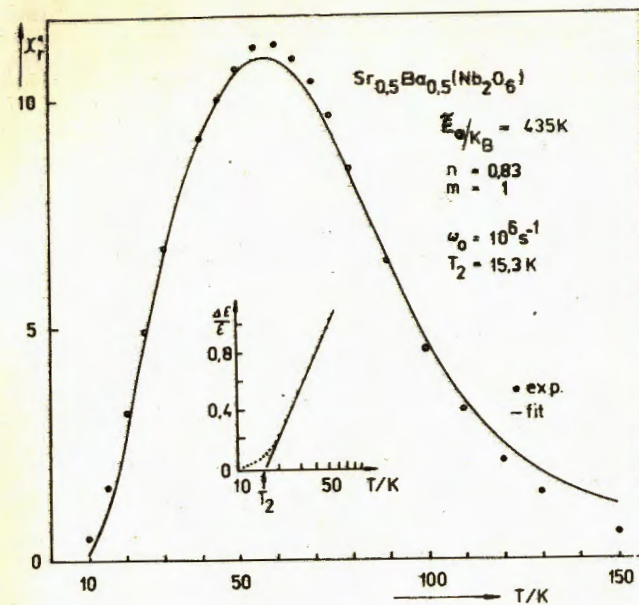


Рис. 9 .
Анализ диэлектрической аномалии монокристалла **SBN**

ЛИТЕРАТУРА

1. E.Fischer. Dissertation. TU Dresden (1983)
2. D.A.Ackermann et al. Phys.Rev. B 23 3886 (1981)
3. A.K.Jonscher, Nature 267 673 (1977)
4. A.K.Jonscher. Phys.Stat.Sol., (b) 84 159 (1977)
5. K.L.Ngai, C.T.White. Phys Rev B 20 2475 (1977)
6. K.L.Ngai, Comments Solid State Phys V 9, 141 (1980)
7. W.Hässler, Dissertation. TU Dresden (1984)
8. W.A.Phillips Ed., Topics in Current Physics V 246 Springer Verlag (1981)
9. I.Menning et al, Phys.Stat.Sol., (a) 73 K 105 (1982)
10. Y.Suemune. J.Phys.Soc. Japan 22, 735 (1967)
11. W.Scheibner. TU Dresden (Sektion Physik). private communication
12. P.J.Anthony, A C Anderson, Phys. Rev. B 20 763 (1979)

Рукопись поступила в издательский отдел
12 декабря 1985 года.

Принимается подписка на препринты и сообщения Объединенного института ядерных исследований.

Установлена следующая стоимость подписки на 12 месяцев на издания ОИЯИ включая пересылку, по отдельным тематическим категориям:

ИНДЕКС	ТЕМАТИКА	Цена подписки на год
1.	Экспериментальная физика высоких энергий	10 р. 80 коп.
2.	Теоретическая физика высоких энергий	17 р. 80 коп.
3.	Экспериментальная нейтронная физика	4 р. 80 коп.
4.	Теоретическая физика низких энергий	8 р. 80 коп.
5.	Математика	4 р. 80 коп.
6.	Ядерная спектроскопия и радиохимия	4 р. 80 коп.
7.	Физика тяжелых ионов	2 р. 85 коп.
8.	Криогеника	2 р. 85 коп.
9.	Ускорители	7 р. 80 коп.
10.	Автоматизация обработки экспериментальных данных	7 р. 80 коп.
11.	Вычислительная математика и техника	6 р. 80 коп.
12.	Химия	1 р. 70 коп.
13.	Техника физического эксперимента	8 р. 80 коп.
14.	Исследования твердых тел и жидкостей ядерными методами	1 р. 70 коп.
15.	Экспериментальная физика ядерных реакций при низких энергиях	1 р. 50 коп.
16.	Дозиметрия и физика защиты	1 р. 90 коп.
17.	Теория конденсированного состояния	6 р. 80 коп.
18.	Использование результатов и методов фундаментальных физических исследований в смежных областях науки и техники	2 р. 35 коп.
19.	Биофизика	1 р. 20 коп.

Подписка может быть оформлена с любого месяца текущего года.

По всем вопросам оформления подписки следует обращаться в издательский отдел ОИЯИ по адресу: 101000 Москва, Главпочтамт, п/я 79.

Фишер Э.

P8-85-880

Низкотемпературные аномалии аморфного вещества - проявление универсальных свойств твердых тел

Представляются некоторые аспекты принципиально нового подхода к проблеме низкотемпературных аномальных свойств аморфных и сильно дефектных веществ. Показывается, что весьма эффективными модельными веществами при изучении данных проблем являются сегнетоэлектрические кристаллы, у которых наблюдаются все низкотемпературные аномалии, известные для диэлектрических стекол. Анализ экспериментальных данных в рамках общепринятых моделей выявляет их формальный характер. Найдена удивительно сильная качественная и количественная корреляция между аномалиями в разных тепловых и диэлектрических свойствах. Критический пересмотр экспериментальных данных и теоретических концепций, разработанных при изучении низкотемпературных свойств аморфных веществ, с одной стороны, и диэлектрической релаксации твердых тел, с другой, приводит к заключению, что все эти т.н. аномалии являются следствием единого, универсального механизма многочастичного взаимодействия. Даются некоторые характеристики этого процесса.

Работа выполнена в Лаборатории высоких энергий ОИЯИ.

Препринт Объединенного института ядерных исследований. Дубна 1985

Перевод автора

Fischer E.

P8-85-880

Low-Temperature Anomalies of Amorphous Solids in Connection with Universal Response Behaviour

Some aspects of a new approach to understanding the anomalous low-temperature properties of amorphous and disordered solids are given. It is shown that ferroelectric crystals serve as a good tool for investigation of this problem, showing the same behaviour as glasses. A proof analysis of the experimental data using the two-level model is not satisfactory. A strong correlation between the several thermal, dielectric and acoustic properties is obtained, suggesting a new model in terms of a universal many-body relaxation.

The investigation has been performed at the Laboratory of High Energies, JINR.

Preprint of the Joint Institute for Nuclear Research. Dubna 1985