

ОБ АНОМАЛИЯХ АННИГИЛЯЦИИ ПОЗИТРОНОВ В ИОННЫХ КРИСТАЛЛАХ

В.И.Гольданский, Е.П.Прокопьев

В ряде работ итальянских ученых были обнаружены интересные аномалии аннигиляции позитронов в ионных кристаллах.

Оказалось, что в KCl магнитное тушение орто-позитрония является аномально слабым [1], тогда как в полимерах это тушение нормальное [2,3], а в воде - аномально сильное [2,4]. Это значит, что параметр магнитного тушения Q в KCl меньше, а в воде больше теоретического его значения, равного

$$Q_0 = \left(2\mu_0 H / \Delta W_0 \right)^2 \frac{\tau}{\tau_0} \quad , \quad (I)$$

где μ_0 - магнитный момент электрона; $\Delta W_0 = \frac{56}{3} \pi \mu_0^2 |\Psi_0(0)|^2$ - превышение энергии триплетного позитрония ($1^3 S_1$) над синглетным ($1^1 S_0$); $\tau_s = [4\pi \tau_0^2 c |\Psi(0)|^2]^{-1} = 1,25 \cdot 10^{-10}$ сек - собственное время жизни синглетного позитрония; τ - измеряемое на опыте время жизни триплетного позитрония, определяющееся в конденсированной фазе pick-off - аннигиляцией (для свободного позитрония и в газовой фазе $\tau = \tau_T^0 = 1115 \tau_s^0$); τ_0 - классический радиус электрона; $|\Psi(0)|^2$ - плотность волновых функций электрона и позитрона в области их перекрытия в атоме позитрония.

С другой стороны, оказалось [5 - 7], что вероятность 3γ -аннигиляции во многих ионных кристаллах (в том числе, и для вышеназванного KCl, но в особенно сильной степени - для BeO) гораздо выше, чем ожидаемая для pick-off - аннигиляции величина $P_{3\gamma} = 0,27\%$.

Поскольку

$$P_{3\gamma} = I_2 \frac{\tau}{\tau_T^0} + (1 - \frac{4}{3} I_2) \frac{1}{372}, \quad (2)$$

где I_2 - наблюдаемая на опыте интенсивность долгоживущей компоненты аннигиляции, а время ее жизни τ - тоже есть величина экспериментальная, рост $P_{3\gamma}$ может быть связан лишь с уменьшением τ_T^0 (а значит, и τ_s^0).

Для объяснения аномально сильного магнитного тушения в воде Фабри и др. [3, 4] предложили чисто эмпирически принять $\Delta W = 5 \cdot 10^{-4}$ эв вместо теоретического значения $\Delta W_0 = 8,34 \cdot 10^{-4}$ эв для свободного позитрония¹).

Аномально слабое магнитное тушение и повышенная вероятность 3γ -аннигиляции в ионных кристаллах не получили пока никакого объяснения.

Представляется возможным истолковать эти аномалии, рассматривая позитроний в ионных кристаллах как своеобразный экситон, состоящий из двух связанных в кулоновском поле $U = -e^2/\epsilon z$ (ϵ - оптическая диэлектрическая проницаемость, z - расстояние, e - заряд) квазичастиц с эффективной массой m_- (электрон) и m_+ (позитрон).

В рамках феноменологической экситонной модели

$$|\Psi(0)|^2 = |\Psi(0)|_0^2 \frac{1}{\epsilon^2} \left(\frac{M}{M_0} \right)^3, \quad (3)$$

где $M_0 = m_0 / 2$ - приведенная масса свободного позитрония
 m_0 - масса электрона, а $M = \frac{m_+ m_-}{m_+ + m_-}$ - приведенная масса его
 экситонного состояния в конденсированной фазе.

Кроме того, величина μ_0^2 для такого экситонного состояния долж-
 на быть заменена произведением $\mu_+ \mu_- = \mu_0^2 \frac{m_0}{m_-} \frac{m_0}{m_+}$.

В результате параметр магнитного тушения Q оказывается равным:

$$Q = Q_0 \frac{\mu_0^2 |\Psi_0(0)|^2}{\mu_- \mu_+ |\Psi(0)|^2} = Q_0 \epsilon^3 \frac{m_0 (m_- + m_+)^3}{8 m_-^2 m_+^2}, \quad (4)$$

а при $m_- = m_+ = m$

$$Q = Q_0 \epsilon^3 \frac{m_0}{m}, \quad (5)$$

т.е. эффективное магнитное поле, действующее на позитроний в конден-
 сированной фазе, равняется

$$H_{эф.} = H \sqrt{\epsilon^3 \frac{m_0}{m}}. \quad (6)$$

Далее, на основании (2), получаем для вероятности 3γ -аннигиля-
 ции:

$$P_{3\gamma} = I_2 \frac{\tau}{\tau_T} \frac{1}{\epsilon^3} \left(\frac{M}{M_0} \right)^3 + \left(1 - \frac{4}{3} I_2 \right) \frac{1}{372}. \quad (7)$$

Для оценки совместимости экспериментальных данных с использованными
 здесь представлениями можно положить $\epsilon \approx 1$, подобно тому, как это
 было принято для мюония в работах Носова и Яковлевой [8,9].

Тогда из экспериментальных данных о магнитном тушении [1] следует,
 что для KCl $\frac{m}{m_0} \approx 4.2$. Из данных о 3γ -аннигиляции [5-7], можно
 заключить, что для BeO (рост $P_{3\gamma}$ в 23 раза (!) по сравнению с ожи-
 каемым для *pick-off*-аннигиляции) $\frac{M}{M_0} \approx 3$.

Ниже приводятся данные в монографии Пекара [10] эффективные массы
 электрона в некоторых ионных кристаллах:

Кристалл	NaCl	NaBr	NaI	KCl	KBr	KI	RbCl	RbBr	RbI
$\frac{m_-}{m_0}$	2,78	2,96	3,25,	1,85	1,87	2,11	1,78	1,70	1,89

Эффективная масса позитрона в ионных кристаллах неизвестна, но,
 например, в жидком натрии $m_+ = 1,9m_0$ [11].

Таким образом, налицо качественное подтверждение возможности предлагаемой здесь трактовки аномалий аннигиляции позитронов в ионных кристаллах. Для количественной ее проверки необходимо систематическое сопоставление для одних и тех же веществ, данных о магнитной тушении (изучавшемся пока лишь для KCl , причем с точностью, недостаточной для определения $\mu_{эф}$), и вероятности $3f$ - аннигиляции позитронов.

Институт химической физики
Академии наук СССР

Поступило в редакцию
15 сентября 1966 г.

Литература

- [1] A.Bisi, A.Florentini, L.Zappa. *Phys.Rev.*, **134**,A328, 1964.
- [2] G.Iaci, I.P.Quercia, E.Turrisi. *Nuovo Cim.*, **24**,746, 1962.
- [3] G.Fabri, G.Poletti, G.Randone. *Phys.Rev.*, **135**,A80, 1964.
- [4] G.Fabri, E.Germagnoli, I.P.Quercia, E.Turrisi. *Nuovo Cim.*, **30**, 21, 1963.
- [5] A.Gainotti, E.Germagnoli, G.Schianchi, L.Zecchina. *Nuovo Cim.*, **32**, 880, 1964.
- [6] A.Gainotti, E.Germagnoli, G.Schianchi, L.Zecchina. *Phys. Lett.*, **13**, 9, 1964.
- [7] C.Bussolati, L.Zappa. *Phys.Rev.*, **136**,A 657, 1964.
- [8] В.Г.Носов, И.В.Яковлева. *ЖЭТФ*. **43**, 1750, 1962.
- [9] V.G.Nosov, I.V.Yakovleva. *Nucl.Phys.*, **68**, 609, 1965.
- [10] С.И.Мекар. Исследования по электронной теории кристаллов. М.-Л. ГИИЛ, 1951.
- [11] A.T.Stewart, J.Shand. *Phys.Rev. Lett.*, **16**, 67, 1966.

1) При этом, однако, следовало бы учесть и изменение τ_s . Легко убедиться, что при заданной массе электрона и позитрона для любого значения $|\psi(0)|^2$: $\tau_s \Delta W = \frac{\hbar c}{e^2} \hbar \approx 137 \hbar = const$.