

**НАУЧНАЯ СЕССИЯ ОТДЕЛЕНИЯ ОБЩЕЙ ФИЗИКИ И АСТРОНОМИИ  
И ОТДЕЛЕНИЯ ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ АКАДЕМИИ НАУК СССР  
(27—28 октября 1971 г.)**

27 и 28 октября 1971 г. в конференц-зале Физического института им. П. Н. Лебедева АН СССР состоялась научная сессия Отделения общей физики и астрономии и Отделения ядерной физики АН СССР. На сессии были заслушаны доклады:

1. В. В. Овсянкин, П. П. Феофилов. Кооперативные оптические явления в конденсированных средах.

2. А. А. Абрикосов. Некоторые свойства металлов с магнитными примесями.

3. И. М. Лифшиц, Ю. М. Каган. Квантовый механизм кинетики фазовых переходов и проблема металлического водорода.

4. А. И. Алиханьян. Электромагнитное излучение ультрарелятивистских электронов.

Ниже публикуется краткое содержание двух прочитанных докладов.

**В. В. Овсянкин, П. П. Феофилов.** Кооперативные оптические явления в конденсированных средах.

В системах оптически возбуждаемых взаимодействующих частиц в конденсированных средах наблюдается ряд явлений, связанных с преобразованием энергии электронного возбуждения (кооперативные явления). Некоторые из этих явлений не только представляют значительный интерес с точки зрения физики взаимодействия излучения и вещества, но и открывают новые пути для понимания ряда важнейших процессов, остающихся во многом не ясными до сих пор.

Наибольший интерес представляют явления кумуляции энергии в системе возбужденных частиц на одной из них с образованием высоких возбужденных состояний. Эти явления, с наибольшей отчетливостью наблюдаемые в активированных кристаллах, могут рассматриваться как модельные по отношению к более сложным и более важным явлениям в искусственно создаваемых и природных гетерогенных системах (оптическая сенсibilизация, фотосинтез). Для ограничения собственно-кооперативных процессов образования высоких возбужденных состояний от феноменологически близких процессов ступенчатого (последовательного) возбуждения имеется ряд экспериментальных критериев, базирующихся на изучении характеристик антистоксовой люминесценции из высоких возбужденных состояний (зависимость от интенсивности возбуждающего излучения, концентрации взаимодействующих частиц, кинетика, спектры возбуждения).

В кристаллах с редкоземельными активаторами наблюдались следующие кооперативные процессы преобразования энергии: а) Суммирование энергии тождественных возбужденных состояний. б) Суммирование энергии различных возбужденных состояний тождественных ионов. в) Суммирование энергии возбужденных состояний различных ионов. г) Распад возбужденного состояния одной частицы с образованием более низкого возбужденного состояния той же частицы и возбуждением соседней (релаксация ионных пар). д) Суммирование энергии возбуждения двух ионов с одновременной передачей энергии третьему иону (кооперативная сенсibilизация люминесценции). е) Распад возбужденного состояния частицы с возбуждением двух (или более) низких энергетических состояний других частиц.

В ряде случаев процессы кумуляции энергии протекают с большой вероятностью, что позволяет рассматривать соответствующие системы как эффективные трансформаторы частоты падающего излучения «вверх».

В активированных кристаллах возможны также процессы, в которых роль промежуточных играют не реальные, а виртуальные возбужденные состояния: а) Кооперативное возбуждение одним фотоном двух взаимодействующих частиц. б) Испускание одного «кооперативного» фотона двумя взаимодействующими частицами. в) Кооперативное усиление света удвоенной (суммарной) частоты при распределении его в среде с инвертированным заселением энергетических состояний взаимодействующих частиц.

В системах взаимодействующих частиц возможны кооперативные процессы комбинирования реальных электронных уровней различных частиц: а) Комбинационное возбуждение (поглощение). б) Комбинационная люминесценция.

Кооперативная кумуляция энергии возбуждения, проявляющаяся в антистоксовой люминесценции, наблюдалась в ряде полупроводниковых кристаллов (серебряногалогенидные соли, иодиды ртути и свинца, хлорид таллия и др.), на поверхности которых адсорбирован слой красителя — донора энергии, а также у фотосинтезирующих систем (зеленые листья, хлорелла). Высокая эффективность процесса кумуляции вплоть до крайне низких (субнановаттных) плотностей возбуждающего излучения, наблюдаемая у сенсibilизированных фотографических эмульсий, позволяет строить непротиворечивые модели первичных актов оптической сенсibilизации фотолитических (и фотосинтетических) процессов.

В системе двух взаимодействующих частиц, обладающих соответственно дискретными и непрерывными возбужденными состояниями (например, редкоземельные ионы и центры окраски), возможна интерференция этих состояний, проявляющаяся в ряде особенностей в спектрах поглощения («антирезонанс»).

Материалы доклада опубликованы в статьях: В. В. Овсянкин, П. П. Феофилов, Письма ЖЭТФ 3, 494; 4, 471 (1966); 14, 548 (1971); Опт. и спектр. 20, 526 (1966); 31, 944 (1971); ДАН СССР 174, 787 (1967); Ж. прикл. спектр. 7, 498 (1967); Appl. Opt. 6, 1828 (1967); сборник «Нелинейная оптика», Н., «Наука», 1968, стр. 293; Труды 9-й Международной конференции по физике полупроводников, т. 1, М., «Наука», 1969, стр. 251; сборник «Спектроскопия кристаллов», М., «Наука», 1970, стр. 135; сборник «Молекулярная фотоника», Л., «Наука», 1970, стр. 86; Биофизика 15, 589 (1970); П. П. Феофилов, А. К. Трофимов, Опт. и спектр. 27, 538 (1969); П. П. Феофилов, *ibid.* 31, 849 (1971); В. В. Овсянкин, *ibid.* 28, 206 (1970); В. А. Аргангельская, П. П. Феофилов, *ibid.*, стр. 1215.

**А. А. Абрикосов.** Некоторые свойства металлов с магнитными примесями (эффект Кондо).

Еще в 30-х годах было обнаружено, что сопротивление целого ряда металлов при низких температурах начинает увеличиваться с понижением температуры. Это могло означать только существование нового механизма рассеяния электронов, эффективность которого растет с уменьшением температуры или энергии электрона. Дальнейшие эксперименты показали, что этот эффект связан с наличием в металле магнитных примесей, т. е. примесей атомов с незаполненными внутренними оболочками, сохранивших свой спин при помещении в основной немагнитный металл. Эффект наблюдался лишь при очень малой концентрации примесей (<0,1%).

В настоящее время известно уже большое количество сочетаний основного металла и примеси, в которых имеется этот эффект. Количественное измерение температурной зависимости сопротивления было проделано в середине 50-х годов Крофтом с соавторами на меди и Н. Е. Алексеевским и Ю. П. Гайдуковым на золоте с малой примесью железа. Оказалось, что при низких температурах сопротивление описывается формулой  $\rho = \rho_1 + \rho_2 \ln(1/T)$ . Теория этого явления была дана японским теоретиком Кондо в 1964 г., после чего эффект стали называть его именем. Согласно Кондо взаимодействие электрона с примесью, содержит помимо обычной потенциальной части обменный член, пропорциональный  $\sigma s$ , где  $\sigma$  и  $s$  — операторы спина электрона и примеси. При расчете амплитуды рассеяния по теории возмущений в первом (борновском) приближении оба взаимодействия дают константу. Для обычного взаимодействия это справедливо и при точном расчете. Однако для обменной части второе приближение дает логарифмический член в амплитуде рассеяния и в соответствии с этим также в сопротивлении. В результате оказывается

$$\rho = \rho_1 + \rho_{ex}^{(0)} [1 - (3J/z\mathcal{E}_F) \ln(\mathcal{E}_F/T)], \quad (1)$$

где  $\rho_1$  — потенциальная часть,  $\rho_{ex}^{(0)}$  — обменная часть сопротивления в борновском приближении,  $\mathcal{E}_F$  — энергия Ферми,  $J$  — энергия обменного взаимодействия,  $z$  — число валентных электронов на один атом основного металла.

При выводе формулы (1) предполагается, что спины атомов примеси свободно ориентируются в пространстве. Это имеет место до тех пор, пока температура велика по сравнению с энергией взаимодействия примесных спинов друг с другом. При более низких температурах спины упорядочиваются. Характерная температура имеет порядок  $\Theta \sim cJ^2/\mathcal{E}_F$ , где  $c$  — атомная концентрация примеси.

Понижая концентрацию примеси, можно уменьшить  $\Theta$  ниже той температуры, при которой поправка к формуле (1) станет большей по сравнению с единицей. В этом случае эта формула не годится. Суммированием наиболее опасных членов ряда теории возмущений докладчик в 1956 г. получил

$$\rho_{\text{ex}} = \rho_{\text{ex}}(0) / [1 + (3JZ/2\mathcal{E}_F) \ln(\mathcal{E}_F/T)]^2. \quad (2)$$

Если  $J > 0$  (это соответствует ферромагнитному знаку взаимодействия электрона с примесью), то эта формула даст ответ на вопрос. Если же  $J < 0$ , то при «температуре Кондо»

$$T_K \sim \mathcal{E}_F \exp(-2\mathcal{E}_F/3 |J| Z)$$

сопротивление обращается в бесконечность. Это соответствует обращению в бесконечность амплитуды рассеяния при некоторой энергии электронов (отсчитанной от химического потенциала) порядка  $T_K$ , что противоречит общим принципам квантовой механики. Ввиду этого выражение (2) в этой области является недостаточным.

Многочисленные исследования этой проблемы не привели к окончательному решению этого вопроса. Объясняется это тем, что в области энергий и температур меньше или порядка  $T_K$  возникает сильная связь электронов с примесью, что приводит к большим математическим сложностям. Ввиду этого приходится делать дополнительные предположения, которые влияют на результат.

Наиболее последовательными представляются два подхода. Один из них (А. А. Абрикосов и А. А. Мигдал, 1970) исходит из методов, применяемых в теории элементарных частиц с сильной связью и теории фазовых переходов. Согласно этому подходу при  $T \ll T_K$  получается

$$\rho = \rho_0 \{1 - a(s) (T/T_K)^{b(s)/s}\},$$

где  $a(s)$  и  $b(s)$  — неизвестные положительные коэффициенты порядка единицы, остающиеся конечными при  $s \rightarrow \infty$ . При  $T \rightarrow 0$  спин примеси полностью экранируется электронами, но восприимчивость  $\chi \rightarrow \infty$  при  $T \rightarrow 0$ .

Согласно второй идее само существование примесного спина при помещении в металл имеет место лишь при достаточно слабой связи. Ввиду этого задача должна рассматриваться полностью микроскопически. Эта программа никем не проведена строго, но разные упрощенные схемы дают примерно одинаковый результат

$$\rho = \rho_0 [1 - q (T/T_K)^2]. \quad (3)$$

Спин примеси исчезает при  $T = 0$  и  $\chi \rightarrow \text{const}$  при  $T \rightarrow 0$ . Пока экспериментальная ситуация не ясна. Большинство экспериментаторов склоняются скорее к формуле (3) и  $\chi \rightarrow \text{const}$ , однако есть также данные, качественно соответствующие первому подходу. Однако в главном сомнения нет. При антиферромагнитном знаке обменного взаимодействия ( $J < 0$ ) электроны при  $T \ll T_K$  полностью экранируют примесный спин. Догадка об этом впервые была высказана Шриффером в 1967 г.

Помимо магнитных свойств и сопротивления эффект Кондо проявляется в целом ряде других явлений. Например, в результате появления зависимости амплитуды рассеяния от энергии электрона при низких температурах радикально меняется поведение термо-э.д.с. В области остаточного сопротивления дифференциальная термо-э.д.с. достигает постоянного отрицательного предела порядка  $10^{-5}$  в/см (Кондо, 1956). При  $T \ll T_K$  она начинает уменьшаться по абсолютной величине и обращается в нуль при  $T \rightarrow 0$ .

Если основной металл является сверхпроводником с критической температурой  $T_c \sim 10 T_K$ , то, согласно теоретическому предсказанию (Мюллер и Хартманн, Зиттарц, 1970), существует область концентраций примеси, в которой должны наблюдаться два перехода при понижении температуры: из нормального состояния в сверхпроводящее и затем обратно в нормальное. Недавно это предсказание подтверждено на опыте.

Есть и целый ряд других явлений, в которых проявляется эффект Кондо: характеристика туннельного контакта, теплопроводность, магнитное упорядочение и др.