



Статья

К 85-летию юбилею профессора Я. Г. Пономарёва: история открытия леггеттовской моды

С. А. Кузьмичёв^{1,2*}, Т. Е. Кузьмичёва²

¹ Физический факультет, Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Ленинские горы, 1, 119991, Москва, Россия

² Физический институт им. П. Н. Лебедева РАН, Ленинский пр-т, 53, 119991, Москва, Россия

* e-mail: kuzmichev@mig.phys.msu.ru

Статья посвящена воспоминаниям о профессоре кафедры физики низких температур и сверхпроводимости физического факультета Московского государственного университета, заведующем лаборатории туннельной спектроскопии сверхпроводников Ярославе Георгиевиче Пономарёве (1938–2015). Авторы попытались охарактеризовать его с разных сторон, как человека и как ученого. Приводится история открытия леггеттовской плазменной моды в первом известном двухщелевом сверхпроводнике, дибориде магния, сделанного профессором Я. Г. Пономарёвым в 2002 году.

Ключевые слова: высокотемпературная сверхпроводимость, многощелевые сверхпроводники, MgB_2 , джозефсоновская спектроскопия, андреевская спектроскопия, леггеттовская плазменная мода.

За свою жизнь (1938–2015) Ярослав Георгиевич Пономарёв успел многое: и закончить физический факультет Московского государственного университета (МГУ) в 1961 году, и поработать в засекреченном конструкторском бюро («почтовом ящике»), вернуться на работу в МГУ и воспитать множество студентов и аспирантов, выпустить классические работы по исследованию висмута и его соединений как в нормальных условиях, так и под давлением, а на волне открытий купратных высокотемпературных сверхпроводников (ВТСП) переключиться на их исследование туннельными методами; организовать лабораторию в Университете Вупперталя, западная Германия. Начиная с 1986 года, в течение десяти лет ему удалось как модифицировать классическую технику «break-junction» создания туннельных контактов применительно к слоистым материалам (заменяв разрыв проволоки на расслаивание образца в базальной плоскости) [1–3], создать оригинальную установку для записи вольтамперных характеристик (ВАХ) и спектров динамической проводимости туннельных контактов (сначала на оптомеханической базе и двухпараметрическом самописце, в дальнейшем — с использованием появившихся в 1993 году скоростных карт ввода-вывода), так и получить ряд пионерских результатов, таких как обнаружение:

1. *внутреннего* эффекта Джозефсона в слоистых ВТСП-материалах [4–6],
2. ветвления ВАХ джозефсоновских контактов [4,6,7],
3. гигантских неустойчивостей на вертикальных участках ВАХ, связанных с динамическими процессами, протекающими в джозефсоновских структурах [4,6],
4. корреляции энергии связи куперовских пар $2\Delta_0$ в ВТСП-купратах с количеством CuO_2 -плоскостей [8,9],
5. скейлинга амплитуды сверхпроводящей щели $2\Delta_0$ и критической температуры T_c при вариации допирования в различных семействах купратных ВТСП [5,6,8,9],
6. генерации переменным джозефсоновским током однофононных и двухфононных возбуждений, соответствующих рамановским фононным модам [5–9],
7. экспериментальное обнаружение в конце 2002 года леггеттовских плазменных колебаний в первом известном двухщелевом сверхпроводнике MgB_2 [10–12].

Далее мы приведем краткую справку о ранних достижениях профессора Я. Г. Пономарёва из издания «Энциклопедия Московского университета. Физический факультет» [13].

«Кандидат физико-математических наук (1969). Тема кандидатской диссертации: «Электронные переходы под действием давления в висмуте и сплавах висмут-сурьма, легированных примесью акцепторного типа». Доктор физико-математических наук (1985). Тема докторской диссертации: «Энергетический спектр носителей заряда в узкощелевых полупроводниках и полуметаллах».



Рис. 1. Профессор Я. Г. Пономарёв (1938–2015). Фото предоставлено проф. Е. П. Скипетровым

Профессор кафедры физики низких температур и сверхпроводимости физического факультета (2002). Член диссертационного совета при МГУ (2001).

Область научных интересов: исследование влияния давления, примесей и сильных электрических полей на энергетический спектр узкощелевых полупроводников и полуметаллов (1964–1990), изучение квантовых размерных эффектов в тонких полуметаллических нитях и сверхрешетках (1977–1988), определение параметров сверхпроводящего состояния высокотемпературных сверхпроводников с помощью туннельной и микроконтактной спектроскопии (с 1987 г.). Обнаружил и исследовал такие новые физические явления, как электронно-топологические переходы 2.5 рода (переходы Лифшица) в полуметаллах под действием давления, инверсию зон в узкощелевых полупроводниках под давлением, возникновение седловой точки в спектре и инверсию расщеплённых по спину уровней Ландау в полуметаллах и полупроводниках при переходе от прямого спектра к инвертированному, размерные осцилляции типа «квантования потока» в продольном магнитном поле у нитевидных полуметаллических монокристаллов. Соавтор открытия № 238 «Явление электронно-топологических фазовых переходов металлов при упругих деформациях».

Отметим, что Ярослав Георгиевич верил сам и никогда не забывал говорить своим ученикам об ответственности ученого за свои открытия, поэтому восхищался и всегда с большим трепетом говорил о таких людях, как академик А. Д. Сахаров, академик Б. Б. Кадомцев; само собой, заведующий кафедрой физики низких температур академик А. И. Шальников, академик Б. М. Понтекорво. По иронии судьбы, статьи о профессорах физического факультета Я. Г. Пономарёве и Б. М. Понтекорво в этой энциклопедии идут друг за другом [13].

Несмотря на то что профессор Пономарёв являлся признанным в СССР и России классиком-визмутологом, Ярослав Георгиевич не считал чем-то зазорным, к примеру, первым поздравиться со студентом или аспирантом. Интеллигентность, вежливость, терпимость, огромный багаж знаний, абсолютная память и невероятное упорство составляли неотъемлемые части его личности. Был по-отечески заботлив к студентам нашей лаборатории 1-09 (которая раньше называлась «Лабораторией Н. Б. Брандта»). Тем не менее, Ярослав Георгиевич не переносил научную лабораторную или публикационную деятельность низкого уровня (например, «мы тоже можем что-то измерить, а результат подставить в эту формулу или модель, ведь так делают многие. Годится ли она и нужно ли это делать — для нас не так важно»). Ярослав Георгиевич говорил нам, что лучше вообще не прочитать и сразу закрыть такую работу, чтобы не засорять разум случайными выводами или ложными суждениями. Говорил нам, что научная деятельность и её результаты не должны быть привязаны к какой-либо теоретической модели, а всегда должны находиться

в контексте причинно-следственных связей. Был внимателен как к процессу обучения новых кадров, так и к преемственности в научной деятельности. Опасался людей, зашедших «погулять» в какую-либо научную область, чтобы собрать «сливки», и ценил научные школы.

Вместе с покойным член-корреспондентом Е. Г. Максимовым профессор Пономарёв сдавал теоретический минимум самому академику Ландау и легко ориентировался в теории, будучи при этом экспериментатором до мозга костей. Был чрезвычайно щепетильным в вопросе цитирования работ других авторов и проставления благодарностей и учил этому нас. Однажды на лабораторном семинаре была поднята нерешённая проблема, и через несколько дней один из аспирантов нашей лаборатории обнаружил, что существует единственная публикация в солидном журнале, проливающая свет на этот вопрос, и спросил профессора Пономарёва, не закрывает ли это проблему. В глазах Ярослава Георгиевича блеснул живой интерес, который тут же погас, когда он увидел название этой статьи и список её авторов. «А Вы видели, кто эту статью написал? Посмотрите на авторов! Не считая первого автора, тут собрались все начальники подразделений и директора институтов. А где исследователи-то? Не думаю, что эти результаты нужно воспринимать всерьёз, — это они для отчёта опубликовали».

С одной стороны, профессор Пономарёв ценил в других исследователях непредвзятость, целеустремлённость и даже напористость, умение отстоять свою точку зрения. С другой стороны, к примеру, на рассказ о том, что такой-то хорошо известный учёный — такой «грозный, строгий и в споре готов растерзать оппонентов», отвечал: «А Вы знаете, что у него все карманы конфетами набиты и он их потихоньку детишкам раздаёт?» или «Да он за пазухой рогатку носит и когда все отворачиваются, рогатку достаёт и втихаря стреляет». Ярославу Георгиевичу нравились люди бойкие и задорные, которые умеют и пошутить, и даже к месту похулиганить, но на всё это должно хватать именно ума, а не глупости. Позже мы поняли, что Я. Г. сам обладает этими качествами. Время от времени мы стали подмечать, что, когда «все отворачиваются», он может «достать из-за пазухи рогатку» или «конфеты» для близких людей или детей всех сортов. Юмор, жизнерадостность, новые устремления и отсутствие скуки — вот самые яркие черты Ярослава Георгиевича.

Приведём один пример из студенческой жизни профессора Пономарёва и член-корреспондента Максимова (они были одноклассниками на кафедре физики низких температур МГУ), который он сам любил рассказывать. Как-то раз, чтобы не было скучно, они вдвоём пришли на кафедру (которая находится в отдельном здании на территории МГУ на Воробьёвых горах) за полчаса до начала первой пары. С собой принесли заранее заготовленные, еще не высохшие ватки, пропитанные хорошо известным соединением йода, которое абсолютно безобидно в жидком состоянии, но после высыхания взрывается от прикосновения с хлопком и выделением облачка паров йода. Ватки были аккуратно разложены в различные жизненно важные места криогенного корпуса: под некоторые дверные ручки, под рычажок автомата с газированной водой (который тогда стоял в корпусе) и под спусковую ручку сливного бачка в уборной. Доделав задуманное, зачинщики поднялись на второй этаж в лекционную аудиторию, сели за парту и принялись изображать прилежных студентов, пришедших на лекцию заранее. Первой пострадавшей стала уборщица, которая прибиралась в уборной комнате. Раздался лёгкий хлопок, и испуганная женщина выбежала в коридор. Несмотря на неожиданность, она не лишилась способности рассуждать хладнокровно и, смекнув, что тут что-то не так, напрямик направилась к заведующему кафедрой Александру Иосифовичу Шальникову. Как известно, академик Шальников обладал недюжинной проницательностью и по свидетельству очевидцев, поразмыслив лишь немного, спросил секретаря: «Скажите, а Максимов с Пономарёвым уже на кафедре?». На что последовал положительный ответ. «Ко мне в кабинет их. Живо!». Столкнувшись с неизбежным, зачинщики не стали кривить душой или

уходить от ответственности и, понуриив головы, тут же сознались. Ярослав Георгиевич вспоминал, что в те несколько секунд в его голове носилась лишь одна мысль: каково же будет наказание? Заведующий поинтересовался, помнят ли студенты, в какие ещё места заложили свои сюрпризы и подытожил: «Понятно. Времени прошло достаточно, уже всё высохло. Скоро первая пара начнётся — вот идите и сами вынимайте все ватки до единой. И чтобы успели». Вооружившись пинцетами, оба искателя приключений отправились на разминирование. Поскольку Я. Г. всегда имел талант экспериментатора, он умудрился вытащить все ватки без единого хлопка. У ставшего впоследствии известным теоретиком Максимова дело пошло хуже: ватка, засунутая под рычажок газировального аппарата, никак не поддавалась. Экзерсис с её извлечением закончился хлопком и изменением цвета носа будущего член-корреспондента Я. Г. Максимова на фиолетовый.

Прошло много лет, пришел возраст, но мальчишеский задор и характер профессора Пономарёва не изменились. В начале 2000-х, присутствуя на семинаре Гинзбурга, который проходил в актовом зале Физического института Российской академии наук (ФИАН), мы слушали его доклад о последних достижениях в области туннельных исследований купратных ВТСП. В зале на кресле рядом с проходом сидел Е. Г. Максимов. В какой-то момент мы заметили, что он стал склоняться в проход, как нам показалось, чтобы лучше рассмотреть представленное на экране. Это отклонение стало настолько существенным, что уважаемый Е. Г. потерял равновесие и свалился со стула. Его соседи переглянулись, наверняка кто-то в зале подумал, что он заснул, хотя очевидно это было не так. Наверно, не стоит упоминать о том, что, возвращаясь на место, член-корр. Максимов сдержанно ругался. Причина этого странного происшествия стала понятна позднее. Однажды, будучи в приподнятом настроении, Ярослав Георгиевич поведал нам, что во время своего доклада ради забавы пытался засветить лучом лазерной указки в глаз своему давнему другу.

Ну а теперь расскажем историю открытия леггеттовской плазменной моды, которая началась в январе 2001 года. В это время один из авторов этой статьи начал учиться в аспирантуре МГУ им. М. В. Ломоносова под руководством профессора Пономарёва. Несмотря на то, что сверхпроводимость в дибориде магния была случайно открыта в самом конце 2000 года [14], уже в январе 2001 г. мы получили первые образцы нового сверхпроводника, приготовленные группой проф. Б. М. Булычёва, заведовавшего кафедрой химии и физики высоких давлений химического факультета МГУ. В итоге наша лаборатория туннельной спектроскопии ВТСП с головой ушла в исследование электронных и сверхпроводящих свойств MgB_2 . В то время никто не мог предположить, что мы имеем дело с первым двухщелевым или двухкомпонентным сверхпроводником. В таком материале сосуществуют два вида куперовских пар, обладающих различными энергиями спаривания ($2\Delta_1$ и $2\Delta_2$), которые образуются в сверхпроводящем состоянии ниже T_c . Одновременно находясь в любой точке реального пространства, эти два сверхпроводящих конденсата не являются в MgB_2 полностью независимыми: они слабо взаимодействуют посредством межзонного спаривания в импульсном пространстве. Этот феномен в чем-то аналогичен эффекту близости между двумя сверхпроводниками в реальном пространстве, хотя в первом случае конденсаты наводят друг на друга свои внутренние свойства в k -пространстве. В результате амплитуда сверхпроводящего параметра порядка каждого из конденсатов (Δ_j , $j=1, 2$) зависит как от внутренних свойств конденсата (внутризонной константы электрон-фононного взаимодействия λ_{jj}), так и от силы межзонного спаривания, определяемой константами λ_{12} или λ_{21} [15–17]. Даже если изначально оба конденсата находились в пределе слабой связи теории Бардина-Купера-Шриффера (БКШ), т.е. $\lambda_{11}, \lambda_{22} < 0,25$, а характеристические отношения $2\Delta^{\text{eigen}}(0)/k_B T_c = 3,53$, то отличие потенциалов спаривания V_{ij} в внутризонном и межзонном каналах приведет к тому, что $2\Delta_1(0)/k_B T_c > 3,53 > 2\Delta_2(0)/k_B T_c$ (где Δ_1 — большая сверхпроводящая щель).

Так почему же соединение с простой химической формулой MgB_2 проявляет такое разнообразие сложной физики? Одна из причин заключается в слоистости его кристаллической структуры и сложной форме поверхностей Ферми, которые включают в себя как минимум пару двумерных дырочных цилиндров (образованных σ -зонами бора), расположенных практически ортогонально с двумя трехмерными электронными и дырочными листами (π -зоны бора и магния) [18–20]. Всё это несвойственно классическим сверхпроводящим материалам (т.н. БКШ-сверхпроводникам), обладающим более или менее изотропной кристаллической структурой и проводимостью, и трехмерными поверхностями Ферми. В сверхпроводящем состоянии во всех зонах проводимости классического сверхпроводника образуются куперовские пары с одинаковыми свойствами (как минимум обладающими равной энергией связи $2\Delta_0$). Это обычно происходит из-за перемешивания импульсов посредством межзонного рассеяния. Несмотря на то, что этот классический феномен является одним из важных выводов теоремы Ф. Андерсона, двухщелевая сверхпроводимость в дибориде магния существует, а сам MgB_2 не подчиняется этой концепции из-за наличия двумерных поверхностей Ферми, слоистости кристаллической структуры и крайне слабого межзонного взаимодействия. Детали приведены в работе [21].

Туннельные особенности большой амплитуды в области малых напряжений смещения (вызванные малой сверхпроводящей щелью Δ_π) надоедливо появлялись на спектрах динамической проводимости джозефсоновских и андреевских контактов на основе MgB_2 (см. спектры 1', 2' и соответствующие им ВАХ 1, 2 на рис. 2), и на протяжении нескольких месяцев мы пытались по возможности отделаться от них, чтобы они «не портили» и «не загромождали» наши $dI(V)/dV$ -спектры. Только по прошествии продолжительного времени мы осознали, что наблюдение двух типов особенностей, соответствующих двухщелевой природе MgB_2 , на спектрах туннельных контактов неизбежно.

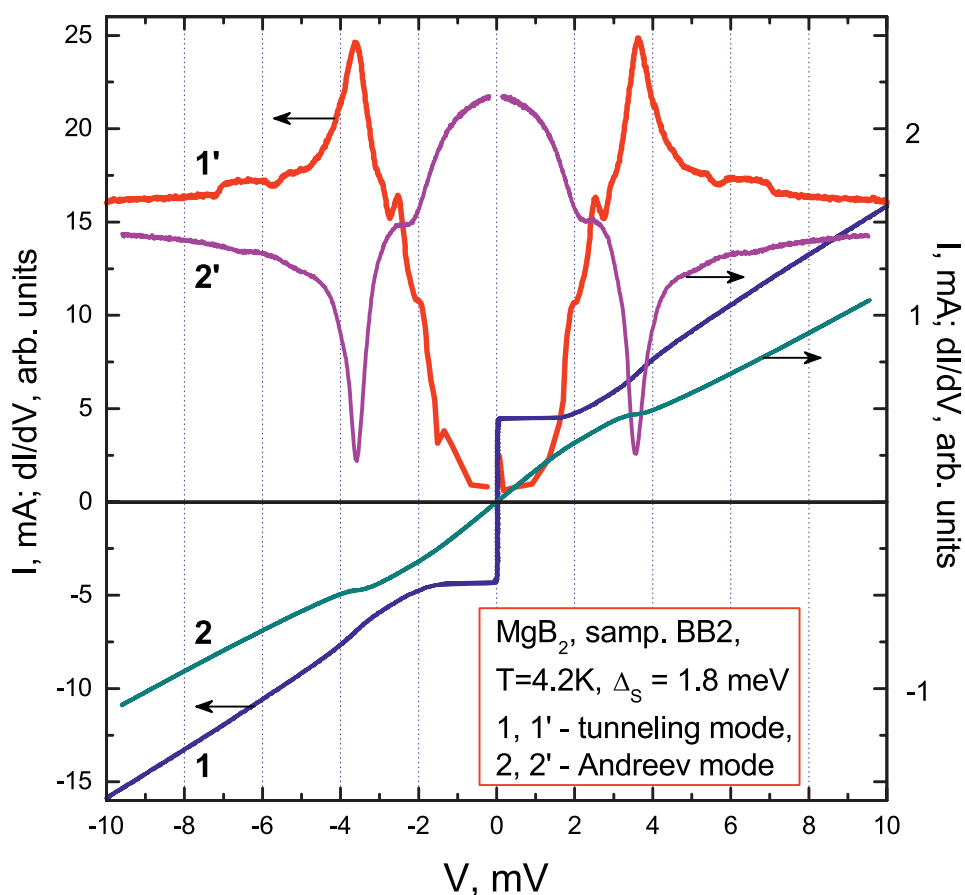


Рис. 2. ВАХ (кривые 1, 2) и соответствующие $dI(V)/dV$ -спектры (1', 2') джозефсоновского SIS-контакта (1, 1') и андреевского SnS-контакта (2, 2') на базе MgB_2 , измеренные при $T=4,2$ К и содержащие структуру от малой сверхпроводящей щели $\Delta_\pi(0)\approx 1,8$ мэВ. Данные взяты из работы [11]

Ещё в 1966 году Энтони Леггетт в своей пионерской работе [22] предсказал существование коллективных осцилляций сверхпроводящей плазмы, вызванных малыми флуктуациями разности фаз $\Delta\varphi$ между двумя сверхпроводящими конденсатами в двухщелевом сверхпроводнике. Носителя заряда могут переходить из одной зоны в другую, образуя переменный межзонный ток в k -пространстве с характерной частотой $\omega_L(k)$. В своей нобелевской лекции [23] Леггетт называет такой процесс «внутренним эффектом Джозефсона» в k -пространстве. Основным результатом теории Леггетта [22] является тот факт, что квадрат частоты плазменной моды $\omega_L(k)$ определяется двумя слагаемыми: частотой фононоподобной (бесщелевой) моды, зависящей от k и частотой безмассовой моды, слабо зависящей от больших k и имеющей пороговое значение ω_0 при $k \rightarrow 0$. Таким образом, $\omega_L(0) = \omega_0$ можно назвать экситонной модой. Условием бездиссипативности процесса является соотношение $\omega_0 \leq 2\Delta_2(0) \leq 2\Delta_1(0)$ (т.н. смягчение леггеттовской моды). Леггетт показал [22], что при $T \rightarrow 0$ в пределе слабой связи теории БКШ и при малых волновых векторах k :

$$\omega_0^2 = 4 \Delta_1(0) \Delta_2(0) \frac{\lambda_{12} + \lambda_{21}}{\lambda_{11}\lambda_{22} - \lambda_{12}\lambda_{21}} \quad (1)$$

Аналогичный результат был получен Шараповым и др. для диборида магния [24], а также в ряде теоретических работ [25–28]. Скейлинг ω_0^2 и $\Delta_1(0)\Delta_2(0)$ может быть проверен при вариации амплитуд сверхпроводящих щелей $\Delta_{1,2}(0)$ с допированием в системах $(Mg,Al)B_2$ или $Mg(B,C)_2$. С точки зрения экспериментатора, установление подобного скейлинга позволит отличить энергию леггеттовской моды с $\omega_0 \propto \Delta_1\Delta_2$ от энергии характерного непрямого межзонного перехода $\omega^2 \propto (\Delta_1 + \Delta_2)^2$.

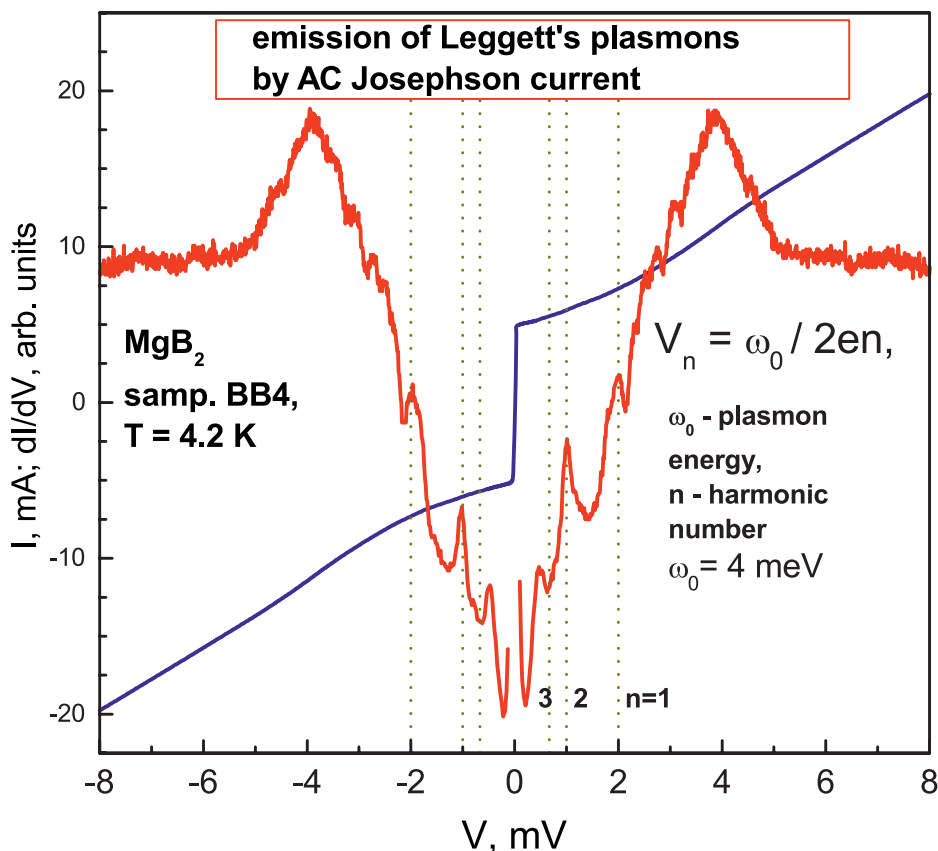


Рис. 3. ВАХ (линия синего цвета) и $dI(V)/dV$ -спектр (линия красного цвета) джозефсоновского SIS-контакта на базе MgB_2 , измеренные при $T=4,2$ К. Положения туннельных максимумов $dI(V)/dV$ определяют амплитуду малой сверхпроводящей щели $2\Delta_\pi \approx 4$ мэВ. Вертикальными штрихами отмечены положения тонкой структуры $V_n = \omega_L n / (2em)$, где $n, m=1, 2, \dots, e$ — заряд электрона, вызванной резонансным возбуждением леггеттовской моды с энергией $\omega_0 \approx 4$ мэВ переменным джозефсоновским током

В течение лета 2002 года на спектрах динамической проводимости планарных туннельных контактов на базе MgB_2 , а также $MgB_2 + MgO$ как в режиме низкой прозрачности и малой ёмкости (SIS, где S — сверхпроводник, I — изолятор), так и высокой прозрачности с некогерентным транспортом (SnS, n — тонкий нормальный металл), профессор Пономарёв обнаружил дополнительную воспроизводящуюся тонкую структуру. Для SIS-контактов она соответствовала резонансному возбуждению некой бозонной моды переменным джозефсоновским током в диапазоне энергий малой сверхпроводящей щели $2\Delta_\pi$ (рис. 3) [27]. В SnS-режиме наблюдалась тонкая структура, соответствующая потере характерной энергии в процессе многократного испускания бозона т.н. андреевскими электронами [29], т.е. носителями тока, вовлеченными в процесс многократных андреевских отражений [30,31] (рис. 4).

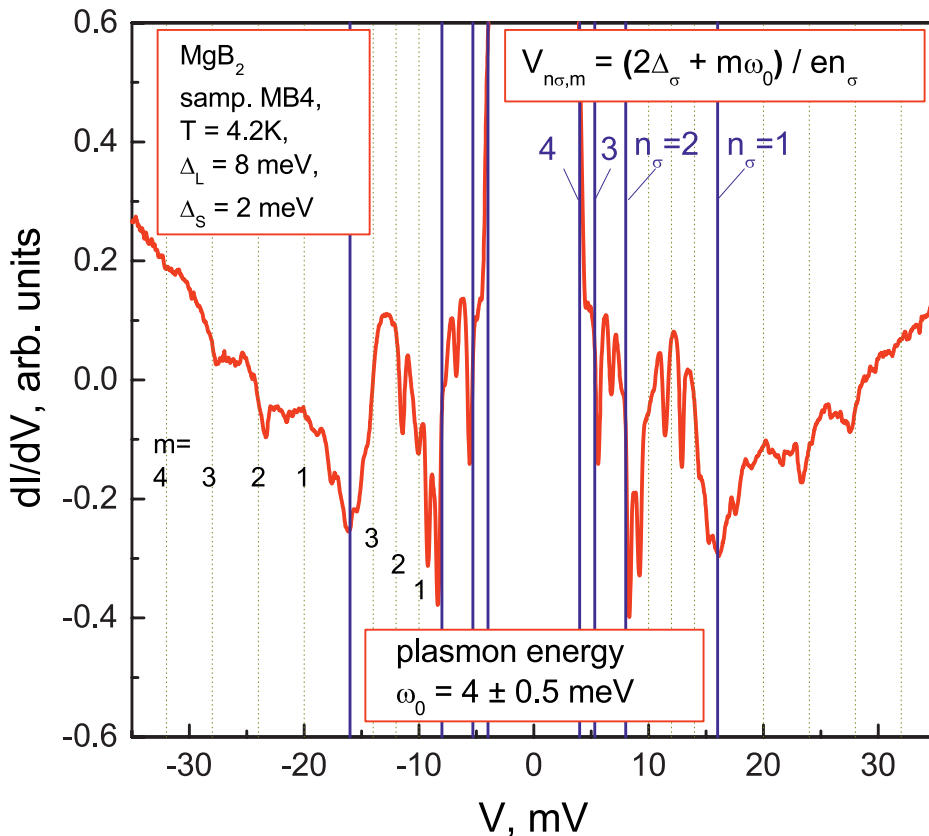


Рис. 4. $dI(V)/dV$ -спектр андреевского SnS-контакта на базе MgB_2 , измеренный при $T=4,2$ К. Андреевские особенности от большой сверхпроводящей щели $2\Delta_\sigma \approx 16,8$ мэВ отмечены вертикальными линиями синего цвета и значками n_σ ; положения тонкой структуры $V_{n\sigma,m} = (2\Delta_\sigma + m\omega_0)/(en_\sigma)$ ($n_\sigma, m=1, 2, \dots$), вызванной испусканием леггеттовских плазмонов с энергией $\omega_0 \approx 4$ мэВ, показаны пунктиром

На лабораторном семинаре профессор Пономарёв нацелил нас искать подобные тонкие структуры на $dI(V)/dV$ -спектрах туннельных контактов, чтобы проверить их воспроизводимость. Заметим, что лишь *объёмные* свойства материалов или наблюдаемых эффектов будут воспроизводиться в планарных контактах на микротрещине, имеющих случайную площадь и размеры. В течение 2000 года воспроизводимость этих эффектов наблюдалась нами множество раз и была неплохо верифицирована для диборидов магния с высокими $T_c \approx 35-40$ К. Профессор Пономарёв стал первым человеком, который сопоставил характерные энергии особенностей тонкой структуры в двух туннельных режимах (джозефсоновском и андреевском), а также данные, полученные как с SIS и SnS-контактов, так и с соответствующих им стопочных структур типа SISI-...-S и SnSn-...-S; систематизировал и осознал единую леггеттовскую природу наблюдаемых эффектов [10–12,32].

Конечно же, природа бозонных резонансов, обнаруженных профессором Пономарёвым, требовала прояснения, и мы посчитали своим долгом это проверить. Одной из очень вероятных причин появления таких резонансов как для транспортных, так и для оптических измерений могло быть не прямое туннелирование квазичастиц с потолка валентной зоны № 1 на дно зоны проводимости № 2. Такой межзонный процесс должен обладать некой характерной энергией возбуждения $(\Delta_\sigma + \Delta_\pi) \sim 8\text{--}11$ мэВ для MgB_2 с $T_c \approx 34\text{--}38$ К. Напротив, мы воспроизводимо наблюдали энергии, составляющие лишь половину этих значений (4–5 мэВ). С другой стороны, при реализации такого непрямого туннелирования на спектрах наших планарных контактов неминуемо должна была появиться фундаментальная щелевая особенность большой амплитуды при смещениях $eV = (\Delta_\sigma + \Delta_\pi)$, а не дополнительная тонкая структура, наблюдаемая нами. В результате мы пришли к заключению, что открытые особенности действительно имеют леггеттовскую природу, и профессор Пономарёв решил, что пора опубликовать экспериментальные результаты.

Первая публикация появилась в самом конце 2002 года в «Вестнике Центра хемотроники стекла им. В. В. Тарасова», опубликованного Российским химико-технологическим университетом им. Д. И. Менделеева [10]. Эти труды конференции позволили быстро опубликовать результаты, что сыграло свою позитивную роль, поскольку следующая наша статья на эту тему была отправлена в высокорейтинговый физический журнал весной 2003 года (см. препринт [32]), но публикация рукописи была затянута и задержана рецензентами. В итоге, в сентябре 2003 г. рукопись была переслана нами в редакцию журнала Solid State Communications, где была немедленно принята в печать как статья по «горячей теме». В результате, появившись онлайн в октябре 2003 г., работа вышла в печать лишь во втором выпуске журнала в январе 2004 г. [11]. Таким образом, это формально привело к потере двух лет с момента экспериментального обнаружения феномена.

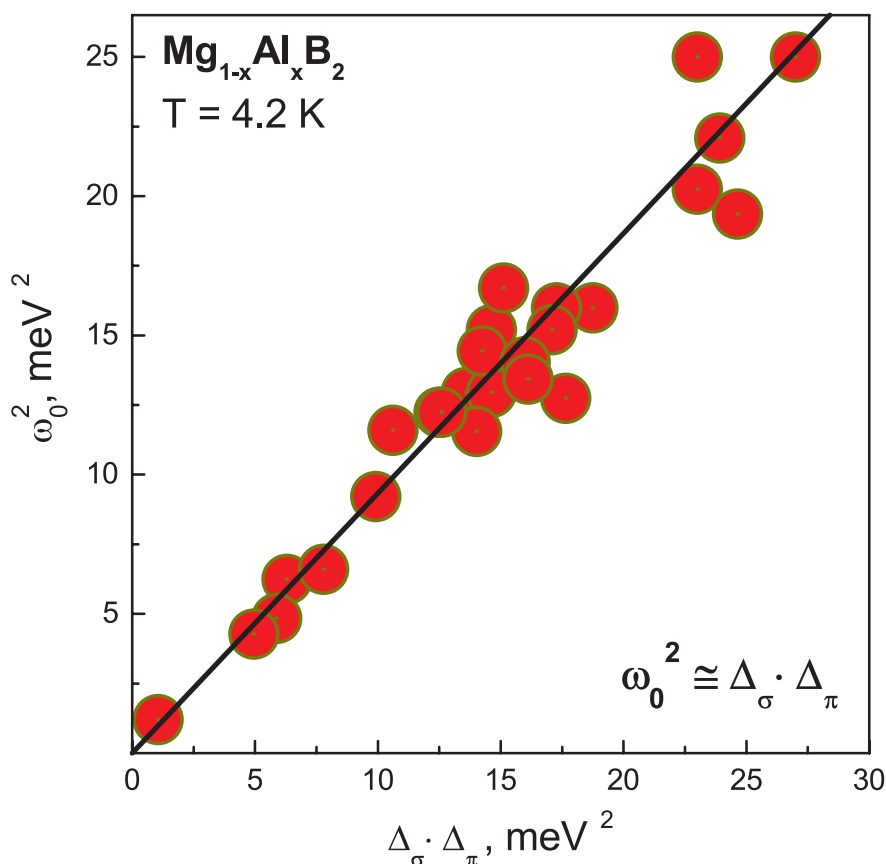


Рис. 5. Линейная зависимость квадрата леггеттовской моды ω_L^2 от произведения амплитуд двух сверхпроводящих щелей $\Delta_\sigma \Delta_\pi$ при $T \ll T_c$, полученная по данным исследований MgB_2 , $\text{MgB}_2 + \text{MgO}$, $(\text{Mg,Al})\text{B}_2$ с диапазоном $T_c \approx 6\text{--}41$ К. Данные взяты из [12,25]

Было очень приятно, когда Энтони Дж. Леггетт сослался на работу в *Solid State Comm.* [10] в своей нобелевской лекции [23]. Несмотря на удовольствие от экспериментального обнаружения нового феномена и помимо азарта первооткрывателей, мы всё же продолжали сомневаться, не могут ли резонансы, наблюдаемые в эксперименте, быть вызваны чем-то ещё кроме леггеттовских коллективных возбуждений? Необходимо было определить, как получаемая резонансная энергия $\omega_L(0)$ изменяется при вариации степени допирования в соединениях $Mg_{1-x}Al_xB_2$ и, соответственно, с T_c таких диборидов магния. Поскольку наша техника позволяет измерять объёмные сверхпроводящие параметры порядка (напрямую при $T \rightarrow 0$), мы решили проверить линейную связь между квадратом независимой от импульса части энергии леггеттовской моды и произведением экспериментальных значений σ - и π -щели в соответствии с уравнением (1) в широком диапазоне критических температур. Результат этой важной экспериментальной проверки показал, что $\omega_0^2 \propto \Delta_\sigma(0)\Delta_\pi(0)$, и был опубликован впервые на рис. 6 работы Я. Г. Пономарёва и др. «Leggett's Mode in $Mg_{1-x}Al_xB_2$ » [12] (рис. 5).

Заключение

Путь тщательно проводимых исследований или открытий редко бывает лёгким. Более того, даже не каждый отличный экспериментатор, имея необходимые навыки, может довести дело до конца и не быть сломленным превратностями судьбы. Тем не менее, профессор Я. Г. Пономарёв с присущим ему упорством, аккуратностью и сосредоточенностью достойно выдержал это сражение и с честью довел дело до конца. К сожалению, здесь невозможно рассказать обо всех успехах, находках и открытиях Ярослава Георгиевича, а его ученики всегда будут благодарны ему и будут хранить теплые воспоминания и светлую память о нём.

Благодарности

Авторы признательны Б. М. Булычеву, К. П. Бурдиной, В. К. Генчелю, Л. Г. Севостьяновой (химический факультет МГУ), а также С. И. Красносвободцеву и А. В. Варлашкину (ФИАН) за предоставленные образцы. Мы всегда будем благодарны Е. Г. Максимову за консультации и полезные обсуждения.

Литература

- [1] Ya. G. Ponomarev, et al., *Phys. Rev. B* **52**, 1352 (1995).
- [2] Ya. G. Ponomarev, et al., *Physica C* **243**, 167 (1995).
- [3] С. А. Кузьмичёв, Т.Е. Кузьмичёва, *Физ. Низк. Темп.* **42**, 1284 (2016).
- [4] Ya. G. Ponomarev, et al., *Physica C* **315**, 85 (1999).
- [5] Я. Г. Пономарёв, Е.Г. Максимов, *Письма в ЖЭТФ* **76**, 455 (2002).
- [6] Ya. G. Ponomarev, et al., *Pis'ma v ZhETF* **96**, 830 (2012).
- [7] Ya. G. Ponomarev, et al., *Solid State Comm.* **111**, 513 (1999).
- [8] M. A. Lorenz, et al., *J. Low Temp. Phys.* **117**, 527 (1999).
- [9] Я. Г. Пономарёв, *УФН* **172**, 705 (2002).
- [10] Ya. G. Ponomarev, et al., *Bulletin of the V. Tarasov Center of Chemotronics of Glass* **2**, 139 (2002).
- [11] Ya. G. Ponomarev, et al., *Solid State Comm.* **129**, 85 (2004).
- [12] Ya. G. Ponomarev, et al., *Pis'ma v ZhETF* **85**, 52 (2007).
- [13] Энциклопедия Московского университета. Физический факультет: в 2 тт. Т. 2. // Под ред. В. И. Трухина, В. А. Караваева. М.: КДУ, 2008.
- [14] J. Nagamatsu, et al., *Nature* **410**, 63 (2001).
- [15] В. А. Москаленко, *ФММ* **4**, 503 (1959).
- [16] В. А. Москаленко, *УФН* **113**, 340 (1974).
- [17] H. Suhl, et al., *Phys. Rev. Lett.* **3**, 552 (1959).
- [18] A. Y. Liu, et al., *Phys. Rev. Lett.* **87**, 087005 (2001).
- [19] Y. Kong, et al., *Phys. Rev. B* **64**, 020501 (2001).
- [20] H. J. Choi, et al., *Nature* **418**, 758 (2002).

- [21] I. I. Mazin, et al., Phys. Rev. Lett. **89**, 107002 (2002).
- [22] A. J. Leggett, Prog. Theor. Phys. **36**, 901 (1966).
- [23] A. J. Leggett, Rev. Mod. Phys. **76**, 999 (2004).
- [24] S. G. Sharapov, et al., Eur. Phys. J. B **30**, 45 (2002).
- [25] A. E. Karakozov, et al., JETP Lett. **91**, 24 (2010).
- [26] E. G. Maksimov, et al., J. Exp. Theor. Phys. **115**, 252 (2012).
- [27] D. F. Agterberg, et al., Phys. Rev. B **66**, 214507 (2002).
- [28] A. Anishchanka, et al., Phys. Rev. B **76**, 104504 (2007).
- [29] U. Zimmermann, K. Keck, Z. Phys. B **101**, 555 (1996).
- [30] M. Octavio, et al., Phys. Rev. B **27**, 6739 (1983).
- [31] R. K ummel, et al., Phys. Rev. B **42**, 3992 (1990).
- [32] Ya. G. Ponomarev, et al., arXiv: cond-mat/0303640 (2003).

On the 85th anniversary of Prof. Ya. G. Ponomarev: the history of the Leggett mode discovery

S. A. Kuzmichev^{1,2*}, T. E. Kuzmicheva²

¹ Faculty of Physics, Lomonosov Moscow State University, Leninskie Gory 1, 119991, Moscow, Russia

² Lebedev Physical Institute, Russian Academy of Sciences, Leninsky prospect 53, 119991, Moscow, Russia

* e-mail: kuzmichev@mig.phys.msu.ru



Кузьмичёв Светослав Александрович, кандидат физико - математических наук, старший научный сотрудник, кафедра физики низких температур и сверхпроводимости, физический факультет МГУ им. М. В. Ломоносова; Физический институт им. П. Н. Лебедева РАН.

Dr. Svetoslav Kuzmichev, Senior researcher, Low temperature physics and Superconductivity of the Division of Physics, Lomonosov Moscow State University (MSU), V.L. Ginzburg Center for High-Temperature Superconductivity and Quantum materials P. N. Lebedev Physical Institute, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia.



Кузьмичёва Татьяна Евгеньевна, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник, Физический институт им. П. Н. Лебедева РАН.

Dr. Tatiana Kuzmicheva, Senior researcher, V. L. Ginzburg Center for High-Temperature Superconductivity and Quantum materials P. N. Lebedev Physical Institute, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia.