

## PERSONALIA

## Леонид Вениаминович Келдыш

(к 80-летию со дня рождения)

PACS number: 01.60.+q

DOI: 10.3367/UFNr.0181.201104q.0455

7 апреля 2011 г. исполняется 80 лет действительному члену Российской академии наук (РАН), выдающемуся специалисту в области физики твёрдого тела, автору классических теорий — Леониду Вениаминовичу Келдышу.

После окончания МГУ в 1954 г. Л.В. Келдыш поступил в аспирантуру ФИАНа, где его научным руководителем стал В.Л. Гинзбург. С тех пор вся жизнь Л.В. Келдыша неразрывно связана с Отделом теоретической физики ФИАНа (ныне Отделение теоретической физики им. И.Е. Тамма ФИАН).

Начало научной деятельности Л.В. Келдыша пришлось на период становления полупроводниковой электроники в 1950-х годах. Относительно малые (по сравнению с металлами) концентрации носителей тока — "свободных" электронов и "дырок" — и миниатюрные размеры полупроводниковых приборов приводят к тому, что уже слабые внешние сигналы создают сильные внутренние поля и существенно отклоняют от равновесного распределение электронов по энергиям. Те задачи, которые ставила перед теоретиками физика полупроводников, во многом определили основные направления научной деятельности Л.В. Келдыша. Это — квантовая теория конденсированных сред, в особенности сильно неравновесные состояния и нелинейный отклик на сильные внешние поля (электрические, электромагнитные, давление и т.д.), включая сопутствующие трансформации электронного спектра, в том числе переходы металл–диэлектрик. С самого начала своей научной деятельности Л.В. Келдыш тесно сотрудничал с экспериментальными группами, в первую очередь из отдела физики полупроводников ФИАНа.

Одним из наиболее существенных первых результатов Л.В. Келдыша было введение понятия о неупругом, т.е. сопровождаемом испусканием или поглощением фононов (квантов колебаний кристаллической решётки), квантовом туннелировании электронов. Им было показано, что в зависимости от деталей электронного спектра конкретного полупроводника вклад этого процесса может на много порядков превосходить вклад "прямого" (бесфононного) туннелирования. Годом позже туннельный эффект в полупроводниках был открыт экспериментально и стал основой нового типа устройств. И сразу выяснилось, что во многих полупроводниках, включая наиболее важные — кремний и германий, доминирующим является именно туннелирование с участием фононов. Эти работы стали и началом так называемой неупругой туннельной спектроскопии — исследования фононов, магнонов и других квазичастиц в кристаллах по их участию в туннельном токе.

Вслед за этим Л.В. Келдыш применил аналогичные представления к процессу поглощения света полупроводниками в присутствии внешнего электрического поля. Он показал, что при этом существенно изменяется спектр поглощения — становится возможным поглощение фотонов, для которых в отсутствие электрического поля кристалл прозрачен. Такой сдвиг края поглощения в электрическом поле также был вскоре открыт экспериментально и нашёл широкое применение как в различных оптоэлектронных устройствах, так и в оптической спектроскопии полупроводников. Сейчас это явление называется эффектом Франца–Келдыша.

После создания лазеров с их возможностями генерировать сильнейшие электромагнитные поля в оптическом диапазоне частот, Л.В. Келдыш рассмотрел вопрос о воздействии таких полей на электроны как в твёрдых телах, так и в атомах. В отличие



Леонид Вениаминович Келдыш

от простейшего подхода, применимого только для слабого поля излучения и основанного на учёте воздействия света на атом как слабого возмущения, в основу теории был положен противоположный подход — точный учёт взаимодействия атомного электрона с полем излучения и рассмотрение взаимодействия электрона с атомным ядром как возмущения. При этом оказалось, что два известных явления — туннельный эффект и фотоэффект — являются по существу двумя предельными случаями одного и того же более общего процесса и плавно переходят друг в друга при изменении параметров воздействующего поля — напряжённости или частоты. Туннельный эффект — предельный случай сильных полей и относительно низких частот, фотоэффект — предельный случай слабых полей и высоких частот. Казавшиеся поначалу неожиданными, результаты этой работы были полностью подтверждены последующими экспериментами и стали основой современного понимания взаимодействия мощного лазерного излучения с атомами, молекулами и твёрдыми телами. Предложенный подход был существенно развит в дальнейшем (в 1970-х и 1980-х годах) в работах учеников Л.В. Келдыша и в России, и за рубежом. Одно из направлений, которое, по-сути, выросло из этой

работы, — это генерация ультракоротких, аттосекундных импульсов. Из-за очень сильной нелинейности процесса туннельной ионизации туннельные переходы происходят в основном в коротком временном интервале, когда поле волны достигает максимума. Поэтому в сильных полях процесс может быть очень быстрым — порядка атомных времен, что приводит к возможности исследовать внутриатомные процессы в аттосекундном диапазоне. Эта работа Л.В. Келдыша 1964 г. ("Ионизация в поле сильной электромагнитной волны" *ЖЭТФ* 47 1945 (1964)) имеет очень высокий индекс цитирования, оставаясь востребованной и в настоящее время: за последние три года появилось почти 800 новых ссылок на эту работу.

Интересовавшие Л.В. Келдыша задачи всегда были связаны с процессами взаимодействия электронов с внешними полями, фонами. В таких задачах возникал вопрос о методах описания неравновесных состояний электронов и их кинетики. Поэтому при написании своей кандидатской диссертации (очень поздно — через 10 лет после поступления в аспирантуру) Л.В. Келдыш занялся разработкой нового теоретического аппарата для описания воздействия сильных полей на квантовые системы многих взаимодействующих частей. Такой аппарат, основанный на использовании так называемых неравновесных функций Грина, был им успешно построен в 1964 г. Работа эта произвела такое впечатление, что Л.В. Келдышу была присвоена сразу докторская степень. Разработанная Л.В. Келдышем диаграммная техника находит сейчас широкое применение в самых разных разделах теоретической физики: физике низких температур и квантовых жидкостей, включая сверхпроводимость, физике металлов, полупроводников и наноструктур, лазерной физике, квантовой теории поля и квантовой космологии. По существу, этот формализм позволяет распространить знаменитую технику диаграмм Фейнмана на всю область квантовой кинетики. Эта работа, опубликованная в *ЖЭТФ* также в 1964 г. (т. 47, с. 1515), является, наравне с работой об ионизации атомов, одной из наиболее известных работ Л.В. Келдыша. Обе работы Л.В. Келдыша, опубликованные в *ЖЭТФ* в 1964 г., входят в десятку наиболее цитируемых работ российских физиков.

В квантовых системах многих взаимодействующих частей сам электронный спектр существенно зависит от распределения электронов по состояниям, поэтому отклонения системы от равновесного состояния за счёт внешнего воздействия могут приводить к существенной модификации спектра, а иногда и к его качественной перестройке, сопровождаемой изменением всех физических свойств объекта. В середине 1960-х годов Л.В. Келдышем был написан цикл работ по коллективным свойствам неравновесных электронно-дырочных систем и фазовым переходам в таких системах. В работе Л.В. Келдыша (совместно с Ю.В. Копаевым) была предложена модель, в которой происходило связывание электронов и дырок в электронейтральные пары, сопровождаемое перестройкой спектра в полупроводниковый. Различные модификации такой модели, называемой иногда моделью экситонного диэлектрика, получили широкое распространение для объяснения различных переходов металл — полупроводник.

В 1967 г. Л.В. Келдышем было высказано предположение, что основным состоянием неравновесной электронно-дырочной системы в сильно возбуждённых полупроводниках должна быть не система экситонов, а коллективное связанное состояние типа жидкого металла, получившее название электронно-дырочная жидкость (ЭДЖ). ЭДЖ — весьма специфическая двухкомпонентная (электроны и дырки), вырожденная ферми-жидкость с вполне определёнными концентрацией и работой выхода (энергией связи) для каждого типа частиц, а также поверхностным натяжением. Вскоре она была действительно обнаружена экспериментально и детально изучена в германии и кремнии. Выяснилось, что она существует в виде подвижных устойчивых металлических капель, свободно перемещающихся внутри полупроводникового кристалла со скоростями вплоть до скорости звука.

Следует особо упомянуть замечательную идею, высказанную Л.В. Келдышем в середине 1960-х годов, о возможности модулирования электронных свойств полупроводника ультразвуком. По сути, это была идея создания сверхрешёток — идея о возможности целенаправленного изменения законов движения электронов в кристаллах полупроводников с помощью периодического изменения их состава или структуры. В то время технически осуществи-

мым представлялась только периодическая модуляция свойств кристалла ультразвуковой волной. Сейчас технология позволяет модулировать состав структур в широких пределах — без сверхрешёток немислима современная физика твёрдого тела.

До настоящего времени Л.В. Келдыш активно интересуется вопросами взаимодействия экситонов с интенсивным электромагнитным полем в современных полупроводниковых структурах, открывающих новые возможности управления свойствами поляритонов (связанных состояний экситонов и фотонов). Им исследовался оптический отклик диэлектрических и полупроводниковых квантовых ям и процессы взаимодействия мощных электромагнитных импульсов с экситонами в наноструктурах.

Работы Л.В. Келдыша сыграли исключительно важную роль в развитии физики твёрдого тела, послужили основой ряда научных направлений. Его научные достижения неоднократно получали официальное признание: он был удостоен и Ленинской премии, и премии Европейского физического общества, был избран действительным членом РАН и членом Американской академии наук. Работы Келдыша продолжают получать признание и сейчас. За последние 10 лет он стал первым среди физиков лауреатом негосударственной премии Триумф (2001 г.), был удостоен премии Президента РФ в области образования (2003 г.) и Золотой медали им. С.И. Вавилова (2005 г.). Совсем недавно Л.В. Келдыш стал лауреатом международной премии в области нанотехнологий RUSNANOPRIZE-2009 по направлению "нанoeлектроника" с формулировкой "за пионерские исследования полупроводниковых сверхрешёток и туннельных эффектов в полупроводниках, широко используемых в технологиях нанoeлектронных приборов, особенно в молекулярно-лучевой эпитаксии".

Большое место в жизни Л.В. Келдыша всегда занимала также педагогическая деятельность. Много лет, с 1965 года, когда он стал профессором МГУ, его жизнь была тесно связана с физическим факультетом МГУ. Более двадцати лет, с 1978 по 2001 г., он возглавлял кафедру Квантовой радиофизики МГУ, и даже после ухода с поста заведующего кафедрой в течение ряда лет продолжал читать курс "Взаимодействие излучения с веществом". Тем, кто имел счастливую возможность сотрудничать с Л.В. Келдышем, хорошо известна высокая требовательность, предъявляемая им к собственным работам. Зачастую, получив тот или иной оригинальный результат, он не публиковал его, а передавал своим ученикам для дальнейшего развития, так что многие его результаты "ходили по рукам" и существенно использовались в их работах. Очень существенна была его роль в качестве постоянного участника знаменитого семинара В.Л. Гинзбурга, где его глубокие критические замечания помогли многим авторам будущих работ. Таким образом, его роль в формировании своей научной школы, фактически, существенно шире того, что видно из формального списка его публикаций. Многие из его учеников стали известными теоретиками, кандидатами и докторами наук, несколько человек стали членами РАН. Они активно работают в направлениях, основы которых были заложены Л.В. Келдышем, или же были сформулированы им для своих учеников.

Будучи человеком, чувствующим личную ответственность за сохранение и развитие науки в России, Л.В. Келдышу пришлось выполнять большую административную работу, которая отвлекала его от занятий физикой и которой он не имел большого желания заниматься. Однако и в этой, чуждой ему, области им было сделано очень многое. В конце 1980-х — начале 1990-х годов Л.В. Келдыш возглавлял Теоретический отдел ФИАНа, а в 1989 г. стал директором ФИАНа, сумев сохранить институт в это непростое время. В 1991–1996 гг. Л.В. Келдыш занимал пост академика-секретаря Отделения физики и астрономии РАН, делая всё возможное для сохранения научного потенциала страны.

Мы от всей души поздравляем Леонида Вениаминовича с юбилеем, желаем ему крепкого здоровья, успехов, новых творческих достижений.

*А.Ф. Андреев, П.И. Арсеев, М.А. Васильев,  
А.В. Гуревич, Ю.В. Копаев, О.Н. Крохин,  
Е.Г. Максимов, Г.А. Месяц, В.И. Ритус,  
В.А. Рубаков, О.В. Руденко, М.В. Садовский*