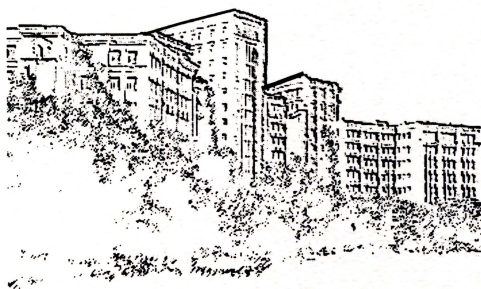


М.И. Каганов

ЭПИЗОДЫ ИЗ ЖИЗНИ ФИЗИКА-ТЕОРЕТИКА



Харьков 2003

К 200-летию Харьковского университета

М. И. КАГАНОВ

**ЭПИЗОДЫ ИЗ ЖИЗНИ
ФИЗИКА-ТЕОРЕТИКА**

Харьков 2003

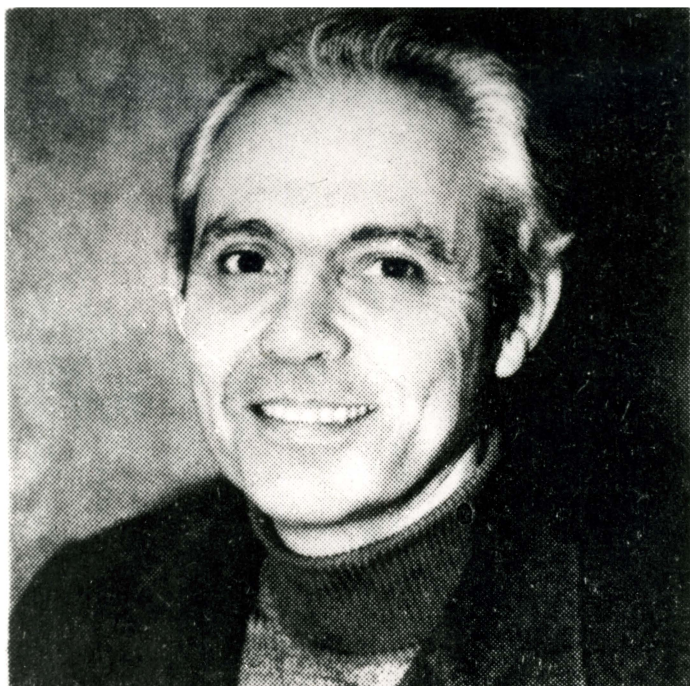
Каганов М.И. Эпизоды из жизни физика-теоретика. – Харьков: ХНУ, 2003. – 78 с.

В этой книжке содержится творческая автобиография Моисея Исааковича Каганова – выдающегося физика-теоретика, одного из создателей современной теории твердого тела, яркого представителя всемирно известной Харьковской школы физиков-теоретиков, созданной И.М. Лифшицем. Моисей Исаакович много лет работал профессором Харьковского университета, воспитал несколько поколений учеников. Основной раздел книжки написан М.И. Кагановым. Дополнением являются короткие рассказы учеников Моисея Исааковича о своем Учителе.

Текст «Эпизодов из жизни физика-теоретика» приводится в редакции автора.

Издается по решению кафедры теоретической физики от 12 октября 2001 года.

© М.И. Каганов, 2003



ПРОФЕССОР М.И. КАГАНОВ

ПРЕДИСЛОВИЕ

Двадцатый век – период бурного развития физики, значительного расширения области применения ее принципов. В этот период созданы теория относительности и квантовая механика, теория твердого тела и квантовых жидкостей ... Успехи физики стимулировали рост интереса к ее основам, к судьбам ее творцов. Поэтому сочинения участников тех событий, их воспоминания имеют непреходящую ценность.

Читателю предлагается книжка одного из создателей современной теории твердого тела, выдающегося физика-теоретика Моисея Исааковича Каганова «Эпизоды из жизни физика-теоретика». М.И. Каганов – яркий представитель всемирно известной Харьковской школы физиков-теоретиков, созданной академиком Ильей Михайловичем Лифшицем. М.И. Каганов не только автор ряда открытий в области физики конденсированного состояния вещества, но и блестящий популяризатор науки. Его книги являются настольными для многих поколений физиков. Моисей Исаакович относится к плеяде тех ученых, кто делал физику двадцатого столетия не только полезной, но и романтической. Много лет работая профессором кафедры теоретической физики Харьковского университета, он воспитал несколько поколений учеников. Многие из них стали известными физиками.

Эта книжка является, по существу, научной биографией М.И. Каганова. В ней он описывает историю создания теории твердого тела, раскрывает «секреты» работы физика-теоретика, оценивает свой вклад в науку. Мы сочли возможным включить в книжку свои короткие рассказы об Учителе. Надеемся, что эту книжку с интересом прочитают все, кто интересуется историей физики, кто пожелает окунуться в атмосферу тех лет, когда создавалась современная теория твердого тела.

А. М. Ермолаев,

В. В. Ульянов

ЭПИЗОДЫ ИЗ ЖИЗНИ ФИЗИКА-ТЕОРЕТИКА

Введение. Отрывок из автобиографии. Тематика длинной жизни. От электроники к теории твёрдого тела. Опоздал. Импеданс. Дела семейные. Январь 1962 года. Электронная теория металлов и топология. Электроны, фононы, магноны. Магноны в ферро- и антиферромагнетиках. Выбор темы. Электронный ветер. Э-вспышки. Соавторство. Заключительные слова.

ВВЕДЕНИЕ

Мне уже за 80. Прошёл юбилей. Круглые даты располагают к подведению итогов. А.Ермолаев и В.Ульянов издали брошюру, посвящённую мне. Читал её с душевным волнением и мысленно благодарил всех, кто сказал тёплые слова в мой адрес. Ловил себя на том, что не привык к титулу учителя. Конечно, много раз за свою педагогическую деятельность с некоторой гордостью констатировал: “Мой ученик,” – особенно в тех случаях, когда узнавал о достижениях своего бывшего аспиранта или дипломника. Но то, что есть люди, которые называют меня своим учителем, вызывает непривычные эмоции. Мне в жизни очень повезло. И мои родители, и мой учитель ушли из жизни, когда мне исполнилось 60 лет. Я уже был дедушкой, но ощущал себя учеником и сыном. Остро ощущал потерю. До сих пор не могу привыкнуть, что нет среди близких людей тех, которых я привык воспринимать как старших. Почти в любой компании с некоторой долей самоиронии мысленно говорю себе: “А старше тебя никого нет”.

Давненько задумывался над своей научной биографией. В одной из папок иногда под руку попадает несколько страниц текста – следы попыток изложить на бумаге приходившие мне по этому поводу мысли. Все мои воспоминания оканчивались первыми работами. Чтобы хоть что-нибудь мог понять читатель, далёкий от того, чем я занимался, приходилось входить в детали, которые вспоминать, а тем более фиксировать не было большого

желания. Конечно, примешивалась и естественная лень. Когда прочитал посвящённую мне брошюру, стало стыдно: Саше Ермолаеву и Володе Ульянову не лень писать о тебе, а тебе лень самому описать свой научный путь. И ещё: мне пришло в голову, что если писать своим коллегам, принадлежащим той же школе, то объяснять придется немного. Уверен, вы поймете меня с полуслова. Можно просто попытаться вспомнить, как зародилась та или иная работа, какие обстоятельства ее породили, какие эмоции она вызывает сегодня. Ведь работы вызывают чувства, близкие тем, которые мы испытываем к живым людям.

ОТРЫВОК ИЗ АВТОБИОГРАФИИ

Я закончил Физико-математический факультет Харьковского университета в 1949 году, а поступил в Университет в 1939-м. То, что между поступлением и окончанием прошло 10 лет, легко объясняется: большую часть этого десятилетия я провёл на военной службе. В тот год, когда я поступил в Университет, закон о воинской обязанности был изменён, и студенты 1-го курса были призваны. Я попал в Береговую оборону Черноморского флота. Потом война, участие в боях. И, наконец, демобилизация в начале 1946 года.

Должен признаться, все годы вынужденного перерыва я мечтал о том моменте, когда вернусь в Университет. И вот этот момент наступил. Нового здания ещё не было. Поэтому, вспоминая годы учёбы, мысленно возвращаюсь не на площадь Дзержинского, а на Университетскую горку.

Мне не хочется отвлекаться на описание трудностей послевоенной жизни в разрушенном войной Харькове. Лучше вспомню тех, кто читал нам лекции (простите за случайный порядок и за то, что не все инициалы помню, ведь прошло более 50 лет). Лекции по теоретической физике читали И.М. Лифшиц, А.И. Ахиезер, В.Л. Герман. К.Д. Синельников прочёл несколько лекций по истории физики. Общую физику читал А.С. Мильнер. Разные разделы математики читали разные лекторы. Математический анализ – М.Н.Марчевский, аналитическую геометрию – Д.З.Гордевский, высшую алгебру – В.В.Никишов, математическую физику – Н.С.Ландкоф, теорию функций комплексного переменного – В.К.Балтага и А.Я. Повзнер.

В.М. Цукерник и я с первой сессии до последней занимались и все сдавали вместе. Торопясь быстрее закончить университет¹, мы “перескочили” через курс и оказались в компании нескольких человек, которые, как и мы, хотели заниматься теоретической физикой. Было нас пятеро (кроме В.М. Цукерника и меня, А.Ситенко, В.Шестопапов и Г.Таранова). Похоже, мы были первыми выпускниками Физико-математического факультета Харьковского университета по специальности “теоретическая физика”.

То, что мы поторопились с окончанием Университета, принесло свои плоды. Антисемитская кампания после 49-го года усилилась, и несомненно, ни Цукерник, ни я не были бы приняты в УФИТИ. Правда, “кадровые волнения” Цукерника не обошли стороной. Через короткое время, не называя причины, его уволили, и на несколько лет он, талантливый физик-теоретик, был оторван от творческой работы.

В 1946 году мне было 25 лет. Я был взрослее своих сокурсников и ненамного моложе своих учителей. Это привело к тому, что со многими из учителей, а после окончания – с коллегами по работе, у меня установились не вполне обычные отношения. Конечно, я ощущал себя учеником. Но одновременно складывалась и развивалась доверительная близость, которая в ряде случаев переросла в дружбу. Свои дружеские отношения с друзьями-учителями я очень ценил и ценю.

Во время войны я вступил в Партию (тогда Партия писалась с большой буквы). Поэтому, когда я вернулся в Университет, меня почти с первых месяцев загрузили так называемой общественной работой. Тогда меня это не очень угнетало. По-видимому, какие-то черты моего характера требовали “деятельности”. Сужу по тому, что по сути всю жизнь до выхода на пенсию не ограничивался только сидением за письменным столом и чтением лекций. Где-то заседал, где-то представлял, что-то организовывал. Ко всем видам такой траты времени уже много лет назад начал относиться иронически. Придумал даже формулу: “Как много надо делать, чтобы ничего не делать”, – и прежде всего относил ее к себе самому. Но продолжал тратить время. Теперь его жалко.

¹ В.М. Цукерник потерял год на учебу в Строительном институте.

ТЕМАТИКА ДЛИНОЙ В ЖИЗНЬ

1949 год. Один из самых важных годов моей жизни. В начале года я женился, в середине года моя жена Элла и я окончили Университет, в конце года родилась дочь Инна.

В 49 году мы (В.М. Цукерник и я) делали две работы. Тему одной дал А.И. Ахиезер, тему другой – И.М. Лифшиц. Каждая из работ после её окончания должна была стать дипломной работой. Какая у кого, решал жребий (буквально). Мне выпало защищать работу, тему которой предложил Илья Михайлович. Не могу опустить эту подробность: редко от случая столь непосредственно зависит вся дальнейшая жизнь.

После того, как мы бросили жребий, мы “разделились”: каждый доделывал “свою” работу. Не помню, имела ли дипломная работа то же название, что статья, вышедшая в 1950 году в Учёных записках Харьковского университета, том 35 (Труды физического отделения физико-математического факультета, том 2, стр. 41 – 54): “Распространение электромагнитных колебаний в неоднородных анизотропных средах”. Авторы – И.М.Лифшиц, М.И.Каганов и В.М.Цукерник.

Библиографическая справка побуждает сделать несколько замечаний.

В названии статьи отсутствует ключевое слово “поликристалл”, слова “неоднородная анизотропная среда” вызывают ненужные ассоциации: можно подумать, что тема статьи – распространение электромагнитных волн в слоистых средах, например.

Илья Михайлович относился к полученным нами результатам и к статье вполне серьёзно, но без особого увлечения. Дело в том, что Илью Михайловича не столько интересовал конкретный физический результат, полученный в работе, сколько аппарат вычисления усреднённых характеристик поликристаллов. К тому времени, как мы занялись усреднением уравнений Максвелла, содержащих тензор второго ранга, аппарат себя прекрасно проявил на примере более сложных уравнений теории упругости с тензорами четвертого ранга. Теорией упругости поликристаллов вместе с Ильёй Михайловичем и под его руководством занимались Л.Н. Розенцвейг и Г.Д. Пархомовский (ссылки в Списке трудов И.М. Лифшица, Избранные труды, 1-й том, Москва, 1987, стр. 545).

Ученые записки Харьковского университета не слишком доступное издание. Интернета и баз данных в те годы не было. Казалось, статья обречена на забвение.

Неожиданно для нас с Цукерником нашей работе была дарована длинная жизнь. Дело в том, что распространение электромагнитных волн (особенно радиоволн) в флуктуирующих средах интересовало значительно большее число физиков, чем распространение звуковых волн. Поликристалл – частный случай флуктуирующей среды. Надо учесть и некое случайное (опять!) обстоятельство. Одним из центров исследования взаимодействия радиоволн с флуктуирующими средами был ИРЭ АН УССР, теоретики которого – выпускники того же университета, что и мы. Большинство из них прекрасно нас знали и знали наши работы. Появились ссылки, появились просьбы выслать работу. Работу узнали. Признаться, часто мне это доставляло беспокойство. Ксерокса еще не было. Оттиски быстро разошлись...

В 2001 году в журнале *Physical Review B* (V.63, p. 054202) вышла статья “Effective surface impedance of polycrystals under anomalous skin effect conditions” – авторы: Inna M. Kaganova, Moisey I. Kaganov. Между первой работой по теории поликристаллов, в которой я принимал участие, и этой работой прошло более 50 лет. Срок этот вместил практически всю мою творческую жизнь физика-теоретика.

Об импедансе и об аномальном скин-эффекте я собираюсь рассказать. Пока же только хочу отметить, какую важную роль играют “граничные условия” в научной биографии: воспоминания о *первой* работе порождают новые работы.

Совсем неожиданное “применение” имела моя дипломная работа несколько лет назад. Я уже жил в Соединенных Штатах. Среди моих последних дипломников перед выходом на пенсию и отъездом из Москвы был Педро Контрерас из Венесуэлы. Мы с ним занимались электронной теорией металлов. Когда, окончив МГУ, Педро вернулся в Венесуэлу, он поступил на работу в Геофизический институт при нефтяной компании. Институт занимался ультразвуковой разведкой. Их интересовало взаимодействие звуковых волн с поликристаллами. Педро знал о моем знакомстве с работами И.М. Лифшица и его учеников конца 40-х годов. Он был инициатором моего

приглашения в Каракас в качестве консультанта. Поездка состоялась. Кажется, мое участие в разработке программы исследований было полезно. Меня огорчило только одно: думая о поездке, мечтал попасть в Южное полушарие. Надеясь на знание школьной географии, не посмотрел на карту. Уже в Венесуэле выяснил, что экватор я не пересек.

ОТ ЭЛЕКТРОНИКИ К ТЕОРИИ ТВЕРДОГО ТЕЛА

Когда после окончания университета я был принят в УФТИ, на его вывеске стояло: “Физико-технический институт Академии Наук УССР”. Но и я, и все физики знали, что хозяином института является какая-то секретная организация в Москве. Назначение в УФТИ я получал в Москве, в некоем здании на ул. Солянка. В само здание я ни разу не попал. Работник отдела кадров в военной форме общался со мной через окно. Я стоял во дворе. В течение многих дней я доказывал ему, что он сам (я знал его фамилию) подписал мое назначение в УФТИ.

Знал я, конечно, что УФТИ принимает участие в решении задач, связанных с созданием атомного оружия, понимал, что задачи самые разнообразные. В 40-х – 50-х годах одной из важнейших разработок УФТИ был линейный ускоритель. Основное теорфизическое обеспечение осуществлял отдел, которым руководил А.И. Ахиезер. Считалось, что наш отдел, отдел, руководимый И.М. Лифшицем, куда я был принят на должность младшего научного сотрудника, тоже должен заниматься ускорителем. Сотрудников в отделе, кроме меня, было еще двое: Липа Натанович Розенцвейг (о нем я уже упоминал) и математик Полина Борисовна Найман.

Мои попытки заняться теорией ускорителей заряженных частиц к успеху не привели: ничего не получалось. Помню мучительные попытки рассчитать структуру электромагнитного поля вблизи какой-то сеточки для оценки экранирования. Было очевидно, что расчет никому не нужен, так как экспериментаторы умеют подбирать необходимые данные для экранировки сетки без нас, теоретиков. Как оказалось, важнее было выяснить, какой поток заряженных частиц выдержит сетка. Дело в том, что от ударов частиц она разогревалась и могла расплавиться. Мы (Л.Н. Розенцвейг и я) решили эту задачу. Она достаточно проста. Заинтересовало меня и поэтому, наверное,

запомнилось то, что важную роль играло тепловое излучение, так как сетка располагалась в вакууме.

Когда через много лет появились счетчики заряженных частиц, в которых основным элементом служит трёхмерная сетчатая конструкция, я вспомнил свою первую успешную попытку заняться ускорительной тематикой.

Никто из нас, включая И.М., не знал, чем заняться в этой нужной для престижа УФТИ области. Спас положение Яков Борисович Файнберг (он был в отделе Ахиезера), предложивший мне заняться взаимодействием заряженных частиц с замедляющей средой. Замедлять надо не частицы, а электромагнитные волны. Частицы надо ускорять. Но как их ни ускоряй, быстрее света двигаться они не могут. А для того, чтобы частицы не отставали от ускоряющего их поля, надо, чтобы электромагнитные волны двигались со скоростью, меньшей их скорости в вакууме. Для этого в ускорителе существуют всякие приспособления. Но можно, исследуя взаимодействие частиц с электромагнитными волнами, идеализировать задачу, считая, что ускоритель представляет из себя волновод, наполненный диэлектриком. Вот и предложил мне Я.Б. заняться исследованием взаимодействия электронов с волнами в волноводе, заполненном анизотропным диэлектриком (анизотропия – дань конкретности: ускоритель несомненно анизотропен).

В подобных задачах существует своеобразная иерархия описания пучка заряженных частиц: можно исследовать взаимодействие отдельной частицы с волнами в диэлектрике, можно считать, что частицы пучка движутся с общей средней скоростью (гидродинамическое приближение), и, наконец, можно описывать пучок по законам физической кинетики, то есть с помощью кинетического уравнения Власова.

Работы всех трёх уровней составили содержание кандидатской диссертации, с защитой которой я долго тянул, так как мои интересы вскоре переместились в теорию твёрдого тела.

В теорию твёрдого тела я пришёл с “багажом”, который состоял из умения описывать взаимодействие частиц и волн. Кроме того, освоил кинетическое уравнение Больцмана, правда, в его простейшей форме, когда столкновительный член играет незначительную роль. Дело в том, что в тех

задачах, которые я решал, наибольший интерес представлял случай больших частот, когда пучок можно было считать бесстолкновительной плазмой.

Мы хорошо знали не только критические замечания Ландау и др. в адрес Власова, но и как “делать правильно”, с большим уважением относились к явлению, которое получило название *затухание Ландау*. Сейчас, по прошествии многих лет, видно, что мы не переоценивали затухание Ландау. Многое сделанное мною в электронной теории металлов по своей природе должно быть отнесено к тому же кругу явлений, что и затухание Ландау. К таким явлениям, в частности, относятся аномальный скин-эффект и бесстолкновительное затухание звука в металлах.

Еще одно важное обстоятельство.

В то время при изложении физической кинетики основное внимание уделяли расчету основных кинетических коэффициентов, исходя из диссипативных механизмов. Так было, правда, до выхода 10-го тома Курса теоретической физики Л. Ландау и Е. Лифшица (“Физическая кинетика”).

Работы по теоретической электронике приучили меня к мысли, что в физической кинетике есть класс задач, основной интерес в которых не связан с исследованием диссипативных процессов. Более того, диссипативные процессы являются, скорее, мешающим обстоятельством, а интересные результаты обнаруживаются в бесстолкновительном или близком к нему режиме. Теория гальваномагнитных явлений в металлах, связавшая зависимость от магнитного поля компонент тензора сопротивлений с электронным энергетическим спектром, может служить примером теории, в которой результаты тем отчетливей, чем роль диссипативных процессов меньше.

Мой уход из теоретической электроники и переход в теорию твердого тела связан, как мне теперь представляется, с двумя обстоятельствами. Во-первых и прежде всего, с тем, что квантовая теория твердого тела очень интересовала Илью Михайловича. Во-вторых, я все больше узнавал об экспериментах, которые делались в Криогенной лаборатории УФТИ. Интерес к твердотельной тематике активно поддерживался низкотемпературными экспериментами, которые осуществлялись в отделе, руководимом Б.Г. Лазаревым.

Связь основных работ по электронной теории металлов, выполненных под руководством и при участии Ильи Михайловича Лифшица, с исследованиями УФТИйских криогенщиков описана мною в статье “К истории электронной теории металлов (УФТИ, 50-е годы)”, впервые опубликованной в брошюре “Илья Михайлович Лифшиц” (Москва, “Знание”, 1987; статья вошла и в мою книгу “Школа Ландау. Что я о ней думаю”, Троицк, “Тровант”, 1998, стр. 240 – 253).

Первая статья, в которой я воспользовался знаниями, накопленными при работе по тематике, связанной с ускорителем, была статья “Кинетика разрушения сверхпроводимости полем высокой частоты” (И.М. Лифшиц, М.И. Каганов. ДАН СССР, 1953, т.90, №4, стр. 519 – 521). Эта статья – продолжение двух работ Лифшица, опубликованных раньше (одна – в ЖЭТФе, 1950, т. 20, вып. 9, стр. 834 – 841, другая – в ДАН СССР, 1953, т. 90, №3, стр. 363 – 366). Во всей теории важную роль играет распределение электромагнитного поля в слое нормального металла, возникающего на поверхности образца за счёт разрушения сверхпроводимости. В зависимости от частоты колебания магнитного поля и величины длины свободного пробега электронов в слое нормального металла осуществляется либо нормальный скин-эффект, либо аномальный. Нами (И.М. и мною) рассмотрен последний случай.

Я привлечен был к работе, в которой на начальном её этапе не принимал участия, как “знаток” теории аномального скин-эффекта. Об аномальном скин-эффекте я наверняка узнал от А.А. Галкина, который вместе со своими учениками активно занимался исследованием свойств нормальных и сверхпроводящих металлов в переменных электромагнитных полях при низких температурах.

Моё знание теории аномального скин-эффекта исчерпывалось знакомством с работой G.E. Reuter’a и E.H. Sondheimer’a (Proc. Roy. Soc. A **195**, 1948, p. 336). Правда, в начале 50-х годов теория аномального скин-эффекта этой работой, пожалуй, и ограничивалась. Ни работы А.Б. Пиппарда, ни нашей с М.Я. Азбелем ещё не было.

При всём различии объектов (электронной подсистемы металла и пучка заряженных частиц в ускорителе) методы решения некоторых задач

физической кинетики, как я уже отмечал, очень близки. Надо только помнить, что *некоторых*, а отнюдь не всех. Речь идет о тех задачах, в которых достаточно τ -приближения либо можно вовсе пренебречь столкновениями. И в теоретической электронике, и во многих задачах электронной теории металлов дело обстоит именно так. Потому-то я и оказался хорошо подготовленным к решению многих задач электронной теории металлов.

Решения задач теоретической электроники навсегда привили мне любовь к макроскопической электродинамике. Видно это по большинству моих работ, особенно по теории магнитных явлений, но о них я надеюсь рассказать позже.

Сейчас о двух давних работах. Обе не только доставили мне удовольствие когда-то, но удовольствие сохранилось до сих пор.

Первая: “Влияние термоэлектрических сил на скин-эффект в металлах” (М.И. Каганов, В.М. Цукерник, ЖЭТФ, 1958, **35**, 474). В виде задачи она вошла в “Электродинамику сплошных сред” Ландау-Лифшица (Москва, “Наука”, 1982, стр. 288). Идея работы проста. Пусть поверхность металла не совпадает с плоскостью симметрии кристалла. Тогда при падении электромагнитной волны на металл переменное электрическое поле в металле имеет компоненту, перпендикулярную поверхности, а термоэлектрическая сила порождает поток тепла и градиент температуры. Для решения задачи о скин-эффекте надо к уравнениям электродинамики добавить уравнение теплопроводности и уравнения решать совместно, добавив граничные условия для температуры. Они определяются тем, с чем соседствует поверхность металла. Мы решили сформулированную задачу и получили выражения для импеданса и глубины скин-слоя, содержащие термоэлектрический коэффициент Томсона. В случае хороших металлов поправки к обычным формулам малы, но для полуметаллов и вырожденных полупроводников вполне значительны.

Идея второй работы еще проще.

В случае ферромагнитного металла выражение для глубины скин-слоя δ содержит магнитную проницаемость μ – функцию частоты ω ($\delta = c/[2\pi\sigma(\omega)\omega]^{1/2}$), σ – удельная электропроводность. При той частоте, при которой магнитная проницаемость обращается в ноль, скин-глубина равна

бесконечности, а металлическая пластина должна обладать селективной прозрачностью. Явление было названо *антирезонансом* и предсказано в короткой заметке (М.И.Каганов, ФММ, 1959, 7, 288). В 1969 году селективная прозрачность магнитных пластин была экспериментально обнаружена в ИФП Б.Гейнрихом и В.Ф.Мещеряковым – сотрудниками А.С. Боровика-Романова (Письма в ЖЭТФ, 1969, 9, 618), и я более подробно, чем в ФММ, изложил теорию в статье “Селективная прозрачность ферромагнитных плёнок” (Письма в ЖЭТФ, 1969, 10, 336).

Все, наверное, согласятся, что наибольшее внимание во взаимодействии частиц с волнами привлекает черенковское излучение. Теория черенковского излучения оставила заметный след в моей научной биографии.

На мою работу “Движение заряженной частицы в анизотропном диэлектрике с осевой симметрией” (ЖТФ, 1953, 23, 507) была ссылка на стр. 448 первого издания “Электродинамики сплошных сред” (правда, с опечаткой: напечатано ЖЭТФ вместо ЖТФ). Во втором издании ссылку я не обнаружил. Особенно существенной мне представляется совместная работа с А.Г.Ситенко “О потерях энергии заряженной частицей, движущейся в анизотропной среде” (ДАН СССР, 1955, 100, 681). В этой работе нам удалось (не без подсказки Ландау) разделить потери энергии на черенковские и поляризационные. При движении частицы в анизотропной среде это оказалось не вполне тривиальной задачей при том методе расчёта потерь, который мы использовали. В Доклады Академии Наук эта работа была представлена Л.Д.Ландау.

С В.Г.Баряхтаром мы вычислили интенсивность черенковского излучения при движении заряженной частицы через ферродиелектрик (ЖЭТФ, 1958, 35, 766) и обнаружили, что интенсивность излучения в μ раз больше, чем при движении через немагнитную среду с тем же показателем преломления (μ – магнитная проницаемость). Для излучения волн радиодиапазона этот факт существен.

В моих и с моим участием работах по излучению заряженных частиц можно увидеть ссылку на монографию Н.Бора “Прохождение атомных частиц через вещество” (Москва, ИЛ, 1950). В цитированной выше работе “Движение

заряженной частицы в анизотропном диэлектрике с осевой симметрией” есть уточнение: “Л.Д. Ландау (в монографии Н.Бора и т.д.)”. В виде приложения к монографии Н.Бора на двух страничках (буквально) редактором перевода Я.А. Смородинским был изложен предложенный Ландау метод расчета потерь энергии заряженной частицей, движущейся с постоянной скоростью v . Метод Ландау не требовал вычисления потока электромагнитной энергии, а использовал формулу для полных потерь энергии в единицу времени $-evE$, E – значение электрического поля в точке нахождения заряда. Разделение потерь на черенковское излучение и на поляризационные потери решается путем анализа дисперсионного уравнения для электромагнитных волн. Метод Ландау очень упрощает расчет.

Прежде, чем “расстаться” с работами по теоретической электронике, хочу разрешить себе несколько эмоциональных замечаний.

На всю жизнь я сохранил глубокую признательность Я.Б. Файнбергу. В годы учебы все задачи воспринимаются принадлежащими одному из двух классов: те, которые решены, и нерешаемые. Предложенные мне Яковом Борисовичем задачи убедили меня, что есть задачи, которые *могу решить я*. Без понимания того, что такие задачи существуют, не может жить и работать ни один творческий работник. Тем более физик-теоретик.

В середине 70-х годов, а, может быть, и в начале 80-х, когда я ощущал себя целиком “принадлежащим” теории твердого тела, на семинаре в Институте физических проблем появился человек, представившийся сотрудником Института радиотехники и электроники и выразивший желание получить у меня консультацию. Я согласился, и мой новый знакомый, захватив с собой довольно объемистую сумку, прошел за мной в теоротдел. Когда мы приступили к разговору, выяснилось, что его интересы связаны с теорией лампы бегущей волны, а сумка полна журналами, в каждом из которых есть моя или моя с соавторами статья. С нашего разговора прошло много лет, а я до сих пор помню, как мне было приятно узнать, что мои давние работы интересны. Принесла ли пользу моя консультация, не знаю.

И последнее. Коллеги признавали меня специалистом по черенковскому излучению. В частности, это проявилось в том, что я был приглашен в качестве официального оппонента Ученым советом ФИАНа по докторской

диссертации Б.М. Болотовского (очень приятное воспоминание). Вместе со мной оппонентом на этой защите был И.М. Франк, получивший Нобелевскую премию по физике вместе с И.Е. Таммом и П.А. Черенковым.

ОПОЗДАЛ

Я уже писал, что первой работой с моим участием по электронной теории металлов была работа по сверхпроводимости. По существу, эта работа была чисто феноменологической. Из теории сверхпроводимости достаточно было знать, что сверхпроводящее состояние разрушается магнитным полем, превышающим критическое значение, а переход из сверхпроводящего состояния в нормальное в магнитном поле – переход первого рода. И все.

Сверхпроводимость была открыта в 1911 году. К началу 50-х годов, когда я делал первые шаги в физике металлов, накопилась огромная литература по физике сверхпроводников. Трудно было разобраться, какие результаты важны для будущей теории, а какие не представляют заметного интереса. По-моему, среди физиков, занимающихся металлами, не было ни одного, которого не интересовала дразнящая загадка микроскопической теории сверхпроводимости.

Существует анекдот о великом немецком математике Карле Вейерштрассе, которого спросили: “Если после смерти Вы попадете в рай и предстанете перед Богом, что Вы у него спросите?” Говорят, он ответил, не задумываясь: “Где расположены нули ζ -функции Римана?”

А вот действительно происшедший случай.

Мой близкий друг умирал. Большую часть суток он находился в забытии. Я заходил к нему и, если он не спал, рассказывал ему научные новости. Был он физиком-теоретиком. В какой-то из дней, вернувшись из Москвы (жил я тогда в Харькове), рассказал ему в общих чертах только что услышанную теорию Бардина-Купера-Шриффера – микроскопическую теорию сверхпроводимости. На несколько секунд его лицо преобразилось. В таких случаях говорят – осветилось. И слабым голосом мой друг произнес: “Я рад, что успел узнать природу сверхпроводимости”.

Но я опережаю время. В 1950 году была опубликована известная работа В.Л. Гинзбурга и Л.Д. Ландау “К теории сверхпроводимости” (ЖЭТФ, 20,

1064). В ней построена феноменологическая теория поведения сверхпроводников вблизи точки перехода. В аннотации сказано: “Проведено решение уравнений для одномерного случая (сверхпроводящего полупространства и плоских пластин)”. Понимая, что изучить работу Гинзбурга-Ландау лучше всего, занявшись какой-либо задачей, я, воспользовавшись новой теорией, решил задачи о цилиндре и сфере. Потребовались довольно громоздкие расчёты. Справившись с ними, сообщил Виталию Лазаревичу, что я сделал. Если мне не изменяет память, получил письмо от Гинзбурга, в котором он написал, что, во-первых, эти же задачи решил В.П. Силин, и его статья послана в ЖЭТФ, а, во-вторых, что интересно было бы заняться случаем магнитного поля, перпендикулярного поверхности полупространства или пластины. Поняв, что опоздал, но, опасаясь полностью “потерять” полученные результаты, отправил свою статью в Учёные записки Харьковского университета (Труды Физического отделения Физико-математического факультета ХГУ им. А.М. Горького (1952, 3, 25)).

Рассказал об этом эпизоде не в порядке борьбы за приоритет. Никаких оснований у меня для этого нет. Дело в другом. Под влиянием совета Виталия Лазаревича я попытался понять, как ведёт себя сверхпроводник в магнитном поле, нормальном к поверхности образца, и понял, что задача мне не по плечу. Понял и оставил попытки заниматься теорией сверхпроводимости. Теперь, оглядываясь, часто задумываюсь, какими критериями должен руководствоваться физик-теоретик при выборе темы работы. Конечно, в той блаженной ситуации, когда ему предоставлена свобода выбора. Я знал и знаю очень способных физиков-теоретиков, которые почти не “осуществились”, так как не могли заставить себя “спуститься” до уровня интересных конкретных задач, задач, не имеющих фундаментального значения. Решение же фундаментальных задач им не давалось. С другой стороны, сколько способных молодых людей одержимы желанием публиковаться вне зависимости от того, представляет ли публикация интерес или нет. Несколько лет назад я услышал термин “тиражировать”. Он возмутил меня своей откровенной циничностью. Единого рецепта нет, но те, кто умеют работать на границе своих возможностей, внушают большое уважение.

ИМПЕДАНС

Хорошо известно, что *импеданс* или *поверхностный импеданс* – основная характеристика высокочастотных свойств металлов.

Напечатал эту фразу и задумался. Импеданс, думаю, вошел в словарь физиков, занимающихся электронными свойствами металлов, в течение жизни моего поколения. Так ли это? Решил себя проверить. В Физической энциклопедии (том 2) в статье “Леонтовича граничное условие” сказано, что условие “было сформулировано в 30-х гг., но опубликовано в 1948”. Значит прав, так как именно использование импеданса для формулировки граничных условий при решении задач, в которых играет роль металлическая поверхность, показывает, что импеданс является характеристикой металла и не зависит от угла падения и поляризации волны (не зависит от формы электромагнитного поля, как мы говорили). При нормальном скин-эффекте импеданс $\zeta = (4\pi i \sigma \omega)^{-1/2}$, то есть выражается через $\epsilon_{\text{eff}} = 4\pi i \sigma \omega$ – эффективную диэлектрическую проницаемость металла (σ – удельная проводимость, ω – частота волны). Если известен импеданс, то можно обернуть формулу и ввести $\epsilon_{\text{eff}} = 1/\zeta^2$.

Использование импеданса для введения эффективной диэлектрической проницаемости удобно в условиях аномального скин-эффекта, когда связь между напряжённостью электрического поля E и плотностью тока j нелокальна. Причиной независимости импеданса от формы поля служит большая оптическая плотность металла $|\epsilon_{\text{eff}}| \gg 1$, что позволяет вычислять импеданс при нормальном падении электромагнитной волны на поверхность металла, а результат использовать в общем случае. Поправки и, следовательно, точность полученного выражения можно оценить, зная значение импеданса при наклонном падении волны. Такого расчёта в случае аномального скин-эффекта не было. В качестве дипломной работы под моим руководством такой расчёт выполнил Э.А. Канер. Результаты опубликованы в виде статьи “К вопросу о возможности введения эффективной диэлектрической постоянной на высоких частотах” (ЖЭТФ, 1956, **31**, 459). В заглавии явно пропущено слово “металла”. Надо было: “...эффективной диэлектрической постоянной металла...” Если мне не изменяет память, это первая работа Э.А. Канера по электронной теории металлов. В электронной

теории у него есть и более крупные достижения (в частности, предсказание – вместе с М.Я. Азбелем – циклотронного резонанса, который на западе справедливо называли *Азбель-Канер – резонансом*). И еще одно воспоминание. Если не ошибаюсь, Канер защитил две дипломные работы: по теоретической физике и по оптике.

Вычислением импеданса в разных условиях я занимался всю жизнь. Раздел “Тематика длиной в жизнь” подтверждает: действительно, всю жизнь.

Импеданс – характеристика металла. Думаю, В.Л. Гинзбург первым обратил внимание на то, что импеданс обладает свойствами обобщенной восприимчивости и его мнимая $\text{Im}\zeta$ и реальная $\text{Re}\zeta$ части должны быть связаны дисперсионными соотношениями.

Именно понимание импеданса как характеристики металла и вызвало у нас (у дочери Инны и у меня) желание вычислить импеданс поликристалла, исходя из знания тензора импедансов отдельных кристаллитов. Этим в нескольких работах и в разных предельных случаях мы занимались. Мы использовали тот же подход, что был использован в моей дипломной работе. Предположив, что при любой ориентации кристаллита анизотропия двумерного тензора импедансов каждого участка поверхности мала, мы использовали второй порядок теории возмущений. Свои результаты опубликовали в двух работах. Одну – в журнале *Waves in Random Media* (1993, 3, 177), другую – в ФНТ (1996, 22, 712).

Ситуация изменилась, когда А.М. Дыхне и Инна Каганова обнаружили, что нет необходимости использовать малость анизотропии, а компактный “точный” ответ для импеданса поликристалла, занимающего полупространство, можно получить при произвольной анизотропии импеданса кристаллитов. Основой их подхода служит то, что условием, позволяющим использовать граничные условия Леонтовича и для всего образца, и для каждого из кристаллитов, является малость импеданса ($\zeta \ll 1$). Это позволяет принять за нулевое приближение импеданс идеального металла $\zeta = 0$. Скиновая глубина проникновения δ в идеальный металл, естественно, равна нулю, и такой металл полностью отражает электромагнитную волну. Воспользовавшись этим, Дыхне и Инна показали, что эффективный импеданс поликристалла есть просто среднее значение импеданса кристаллитов: $\zeta_{\text{eff}} \delta_{ik}$

$=\langle \zeta_{ik} \rangle$. Тензор ζ_{ik} – тензор второго ранга, индексы $i, k=x, y$, если ось z направлена вдоль нормали к поверхности кристалла, а δ_{ik} – символ Кронекера. Какова точность этого результата? Такая же, какая необходима при введении граничного условия Леонтовича на отдельном кристаллите. Это означает, что переход от отдельного кристаллита к поликристаллу (усреднение) не изменяет точности: точность результата та же, что при записи условия на каждом кристаллите.

Поликристалл – простейший пример неупорядоченной системы. В теории неупорядоченных систем задачи, в которых точность результата не понижается при усреднении, встречаются крайне редко. Точность приведенной выше формулы, как мы говорили, не зависит от анизотропии тензора: $\Delta\zeta/\zeta \approx \delta^2/a\lambda$, где a – размер кристаллита, а λ – длина волны в вакууме. Фактически для наиболее интересного случая волн радиодиапазона эта дробь столь мала, что приведенный результат можно считать точным без извинений и кавычек.

Когда начинал этот раздел, думал, не назвать ли его “Импеданс без Азбель-Канер – резонанса”. Многие события в теории импеданса металлов не связаны с циклотронным резонансом. Надо, правда, признать, что с открытием Азбеля и Канера все они как-то отступили на задний план. Когда речь заходит о высокочастотных свойствах металлов, особенно, в магнитном поле, циклотронный резонанс служит как бы полномочным представителем всей тематики.

Если не ограничиваться предельными случаями, аналитическими методами импеданс металлов со сложной поверхностью Ферми рассчитан быть не может. В частности, вычисление импеданса требует знания взаимодействия электронов с поверхностью металла (как вы понимаете, речь идёт о столкновении электронов проводимости металла с его поверхностью изнутри).

С другой стороны, как показано М.Я Азбелем и мною [ДАН СССР, 1955, 102, 49, формула (11)], при предельно аномальном скин-эффекте (то есть $\delta \ll l$, где l – длина свободного пробега электронов) при произвольной форме поверхности Ферми значения импеданса при зеркальном и диффузном отражении электронов отличаются друг от друга множителем $8/9$, как и у

металла, поверхность Ферми которого – сфера (см. цитированную выше работу G.E.Reuter'a и E.H. Sondheimer'a). При нормальном скин-эффекте импеданс вовсе не зависит от характера отражения электронов поверхностью, он выражается через компоненты статической проводимости. Оценка предельных случаев показывает, что импеданс мало чувствителен к характеру столкновений электронов с поверхностью.

Несколько слов о роли структуры интеграла столкновений.

При нормальном скин-эффекте теория связывает между собой статическую проводимость и импеданс. В частности, какова роль приходного члена в интеграле столкновения можно не задумываться: теория нормального скин-эффекта – феноменологическая теория, которая выражает значение импеданса через значения компонент проводимости. Хотя статическая проводимость, конечно, зависит от полного интеграла столкновений, ее вычисление не входит в теорию нормального скин-эффекта: в принципе, например, можно воспользоваться измеренными или табличными значениями компонент проводимости, а не вычисленными.

Значение импеданса при предельно аномальном скин-эффекте есть предел при $l \rightarrow \infty$, и конечное значение импеданса – следствие существования особенности функции распределения при $v_z=0$. Вычисляя, опускают приходный член (в приходном члене особенность функции распределения интегрирована и потому приходный член не играет роли), а потом устремляют к бесконечности “уходную” длину пробега.

Хочется напомнить, что по сути предельно аномальный скин-эффект – одно из проявлений затухания Ландау. В работах по электронной теории металлов, по-моему, это никогда не отмечалось.

Лет десять назад мои друзья (Г.Я.Любарский, Е.Червонко) и я задумались над теорией скин-эффекта в нормальных металлах. Будучи все преподавателями, мы ощущали неполноту теории скин-эффекта. Задача о скин-эффекте в металлах – одна из фундаментальных задач физической кинетики проводников. Нужно последовательное, доведенное до числа решение этой задачи, хотя бы для того, чтобы “предъявить” его студентам и иметь надежный эталон для проверки оценок, полученных по порядку величины из физических соображений. Мысленно сравнивали теорию скин-

эффекта с теорией статической проводимости. Ясно, что, если не прибегать к численным методам, то значение проводимости реального металла можно получить только по порядку величины, даже если перемещение электронов по поверхности Ферми описывать уравнением диффузии (см. гл. “Металлы” в “Физической кинетике” Е.М.Лифшица и Л.П.Питаевского, М. “Наука”, 1979; подробное изложение работы Р.Н.Гуржи и А.И.Копелиовича (1971) в сборнике “Электроны проводимости” под редакцией М.И. Каганова и В.С. Эдельмана, М. “Наука”, 1985). С другой стороны, существуют простые модели, позволяющие получить точный ответ. При рассеянии свободных электронов на примесях удаётся ввести и вычислить транспортную длину свободного пробега, входящую во многие кинетические коэффициенты. Известно также решение кинетического уравнения Больцмана при рассеянии электронов на дебаевских фонах (Феликс Блох, 1929).

Мы за образец взяли введение транспортной длины свободного пробега, описывающей упругое рассеяние свободных электронов на примесях. Теория исходит из вероятности рассеяния электрона $W(\theta)$, где θ – угол рассеяния. Именно с её помощью вводится транспортная длина свободного пробега l_{tr} . Получение компактной формулы для l_{tr} возможно потому, что в задаче есть только одно выделенное направление – направление вектора напряжённости электрического поля $\mathbf{E}$.

В теории скин-эффекта ситуация сложнее: функция распределения зависит от двух векторов – от $\mathbf{E}$ и от вектора нормали к поверхности полубесконечного образца.

Мы попытались решить задачу, не уточняя вид функции $W(\theta)$ (по аналогии с теорией транспортной длины), но не преуспели. Тогда мы сосредоточили своё внимание на простейшем случае, позволяющем учесть влияние приходящего члена в интеграле столкновений.

Мы приняли: $W(\theta) = W_0(1 + \alpha \cos \theta)$. В этом приближении задача допускает точное решение при зеркальном и диффузном отражении электронов от поверхности. Физическое оправдание модели: учтены s- и p-рассеяния (множитель W_0 пропорционален сечению s-, а αW_0 – сечению p-рассеяния). При $\alpha=0$ приходящий член в интеграле столкновений тождественно равен нулю.

Случай зеркального отражения математически прост, а случай диффузного отражения требует серьёзного владения методом решения уравнений Винера-Хопфа (без участия Г.Я.Любарского мы бы не справились). В нашей статье (ЖЭТФ, 1992, **101**, 1351 – 1375) решение обеих задач достаточно подробно описано. Что же мы выяснили? Как мы и понимали, учёт приходного члена в интеграле столкновения не может изменить качественных выводов теории скин-эффекта. С другой стороны, вне предельных случаев ($\delta \ll l$ и $\delta \gg l$) ситуация сложнее: даже для металлов со сферической поверхностью Ферми: импеданс не есть однозначная функция ни уходной, ни транспортной длины пробега, а существенно зависит от вида функции $W(\theta)$, в рассмотренном случае от параметра α . Зависимость эта для диффузного отражения сложна. Нам пришлось признаться, что получить её из качественных соображений (на пальцах) мы не умеем.

В этом разделе я не хочу касаться геометрических аспектов электронных свойств металлов (надеюсь посвятить им специальный раздел). Одна идея (она принадлежит А.Б.Пиппарду), хотя она имеет геометрический смысл, не затрагивает особенностей строения поверхностей Ферми. В условиях аномального скин-эффекта, как обратил внимание Пиппард, большинство электронов не принимают участия во взаимодействии с электромагнитной волной. Они неэффективны. Эффективны только электроны,двигающиеся параллельно поверхности образца. Исключив неэффективные электроны, Пиппард практически на пальцах вывел выражение для импеданса при $\delta \ll l$. В 1957 году А.И.Ахиезер, В.Г.Барьяхтар и я воспользовались соображениями Пиппарда (A.B.Pippard, Proc.Roy.Soc. 1954, **224**, 273), но применили их к вопросу об обменном уширении линии ферромагнитного резонанса, обязанном неоднородности переменного магнитного поля из-за скин-эффекта (ФММ, поступила в редакцию 21 августа 1957 г.; на имеющемся у меня оттиске заметки “К вопросу о ширине линии ферромагнитного резонанса”, к сожалению, нет библиографических данных).

Исследованием высокочастотных свойств магнитных металлов я довольно много занимался. С А.Я.Бланком мы опубликовали в УФН обзор “Плазменные эффекты в ферромагнитном резонансе” (1967, **92**, 583), на

который было много ссылок. Обзор, в какой-то мере, подвел итог. Но работать в этой области я, однако, не перестал.

Представление о поздних работах по теории высокочастотных свойств магнитных металлов могут дать некоторые из разделов обзора “Магноны, магнитные поляритоны, магнито-статические волны”, написанного совместно с Н.Б.Пустыльник и Т.И.Шалаевой для мемориального номера журнала УФН (1997, **167**, №2, 191 – 236), посвященного 80-летию Ильи Михайловича Лифшица². Здесь мне хочется обратить внимание на §11, который посвящен изучению свойств поверхностной магнитной волны – волны Дэймана–Эшбаха (J.R.Eshbach, R.W.Damon, Phys. Rev., 1960, **118**, 1208) в металле. Теория позволяет рассмотреть случай не только нормального, но и аномального скин-эффекта. Формула (11.16) – дисперсионное уравнение волны Дэймона – Эшбаха – демонстрация своеобразного использования понятия импеданса.

ДЕЛА СЕМЕЙНЫЕ

Слово *семья* и производные от него, по-моему, у подавляющего большинства людей вызывает вполне положительные ассоциации и эмоции. Кроме слова *семейственность*. В словаре Ожегова одно из значений этого слова имеет примечание – (*неодобр.*), а приведенный пример (*Борьба с семейственностью*) прямо указывает, что надо делать с семейственностью – бороться. Поэтому, наверное, никого не удивит, что я скрыл свое руководство дипломной работой своей дочери Инны Кагановой. Было это в конце 60-х, в начале 70-х годов. Официальную роль взял на себя мой коллега по теоретическому отделу УФТИ Л.В.Танатаров. До сих пор я испытываю к нему чувства благодарности. У меня было много дипломников. Мало кто из моих дипломников затратил столько труда на дипломную работу, сколько затратила Инна: работа была очень трудоемкой, но, по-моему, достаточно поучительной.

² Обзор содержит мое примечание. Хочу привести его.

“Все работы, вошедшие в обзор, сделаны сравнительно недавно. Мы были лишены возможности обсудить их с Ильей Михайловичем. Однако используемый макро-подход выработался под непосредственным влиянием Ильи Михайловича. Хочется верить, что принадлежность к школе Ильи Михайловича Лифшица ощущается. Когда мы работали над обзором, я часто с грустью думал, как было бы полезно и приятно обсудить тот или иной вопрос с Ильей Михайловичем...Надо сказать, что с 1982 года такие мысли посещали меня часто.”

Как было принято в Школе И.М.Лифшица, дипломные работы всегда были продолжением, развитием работ, которыми занимались руководители. Так было и в данном случае. По материалам дипломной работы Инны были опубликованы две статьи: “Черенковское излучение звука частицей, движущейся через металл” (ФТТ, 1973, **15**, 2119) и “К теории генерации звука заряженными частицами. Возбуждение звука Ξ -вспышками” (ФТТ, 1973, **15**, 1536). Первая, как очевидно, – следствие занятий теоретической электроникой. Но не только: в то время меня интересовало взаимодействие электронов и фононов. К теме второй работы – к Ξ -вспышкам я ещё вернусь.

К сожалению, всякие дела (в основном связанные с переездом из Харькова в Москву) привели к тому, что интереснейшая проблема исследования механизма излучения звуковых волн частицами, пролетающими через конденсированную среду, “ушла от нас”. Ею занялись другие. Правда, через какое-то время наши работы заинтересовали, но совсем не тех физиков, которым мы адресовали свои работы. Заинтересовались физики, пытавшиеся создать методику регистрации нейтрино по следам заряженных частиц в морской воде. Об этом мне рассказал М.И.Подгорецкий³. В то время мы оба (и Инна, и я) были так далеки от тех наших работ, что не смогли воспользоваться интересом, проявленным физиками из совершенно другой области. Жаль!

Будучи более бдительным, начальство ещё дважды могло бы обвинить меня в семейственности.

Моей дипломницей была моя двоюродная сестра Ира Скловская. Так как фамилии у нас разные, не было необходимости привлекать к официальной роли кого-нибудь постороннего. Ира заканчивала Отделение механики Механико-математического факультета ХГУ, была студенткой кафедры, которую создал и которой многие годы руководил Вениамин Леонтьевич Герман. На кафедре большое внимание уделяли механике сплошных сред в её теорфизическом аспекте. Именно с этим связано привлечение меня к руководству дипломной работой Иры Скловской. В это время я, насколько помню, изучал только вышедший том Курса теоретической физики Ландау-

³ М.И. Подгорецкий – физик-теоретик, до конца своей жизни (1919 – 1995) работал в ОИЯИ (Дубна). Крупный специалист по физике элементарных частиц.

Лифшица – “Электродинамика сплошных сред” и хотел куда-нибудь применить новые знания. Осознав, что часто поверхностные волны – результат объединения разных волн, я пытался найти новый пример такого подхода. В работе Иры Скловской новая поверхностная волна была найдена. Для её обнаружения, действительно, надо было совместно решить уравнения упругости и электростатики. В результате мы опубликовали статью “О поверхностной волне в пьезоэлектрике” (М.И.Каганов, И.Л.Скловская, ФТТ, 1966, 8, 3480). Теперь эти волны известны как волны Блюштейна – Гуляева (см. задачу №5 в §17, гл.II второго издания “Электродинамики сплошных сред”, она содержит ссылку: *J.L.Bleustein*, 1968; *Ю.В.Гуляев*, 1969). Справедливо ли то, что наш приоритет не учитывается? Во-первых, в наиболее полных обзорах и монографиях, посвящённых поверхностным волнам, нашу работу упоминают. Во-вторых, для нас открытая волна была лишь примером возможности, даже симметричного анализа мы не провели. В работах Блюштейна и особенно Гуляева она превратилась в участника и даже в главное действующее лицо акустоэлектроники. Конечно, грустно, что на нас нет ссылки именно в “Электродинамике сплошных сред”, но, возможно, это и справедливо.

В следующем и последнем семейном эпизоде участвуют три поколения: кроме меня, моя дочь Инна и внука Марина Литинская. Марина закончила Физический факультет МГУ, была студенткой Кафедры кристаллов. Я был профессором МГУ, работал на Кафедре физики низких температур. В группу будущих физиков-теоретиков, которая существовала под эгидой Кафедры физики низких температур, входили студенты не только Кафедры физики низких температур, но и Кафедры кристаллов. Я должен был быть руководителем дипломной работы Марины. И формально им был. Скажем так: не вполне формально. Тему предложил я, внимательно следил, как у внучки-дипломницы(!) идут дела, но основную роль (и как руководитель, и как соавтор Марины) играла моя дочь Инна Каганова. События, связанные с этим семейным эпизодом, довольно подробно изложены в небольшом цикле из трёх статей, названном нами “Вокруг шарика” (А.Ю.Гроссберг, М.И.Каганов, “Квант”, 1996, №2). В цикл входят статьи: М.Каганов, “История

задачи – древняя и новая”; А.Гроссберг, “Стержни-пружинки, полимеры и метеориты”; А.Гроссберг и М.Каганов, “Сколько же энергии уносит звук?”

А.Ю.Гроссберг – талантливый физик-теоретик, ученик Ильи Михайловича московского периода, в настоящее время Гроссберг – профессор университета в Миннеаполисе (Миннесота, США).

Почему цикл назван “Вокруг шарика”, станет сейчас ясным.

В работах И.М.Лифшица и Л.Н.Розенцвейга конца 40-х годов важное место занимали работы по динамике кристаллической решётки. Одной из таких работ была их работа о кристалле, заполняющем полупространство (ЖЭТФ, 1948, **18**, 1134).

Для Ильи Михайловича это одна из работ важного в его творчестве цикла исследований по теории локальных возмущений. Для меня, для Инны и Марины – завязка некоего сюжета.

Когда мы с В.М. Цукерником появились в УФТИ, одна из предложенных нам И.М. задач должна была стать развитием работ по динамике кристаллической решётки, заполняющей полупространство. Нам предлагалось вычислить реакцию упругого полупространства на удар сталкивающегося с поверхностью шарика. Задача у нас “не пошла”, И.М. её не вспоминал, и мы её оставили. Аукнулось через много лет. Когда Марина на Физическом факультете Московского университета изучала теорию упругости, я вспомнил о нерешённой задаче и подумал, что она может быть хорошей темой для самостоятельной работы. Сначала речь шла о курсовой работе. Выяснилось, что работа требует много усилий и хорошего владения математическим аппаратом теории упругости. Работала Марина под руководством своей мамы, а я лишь наблюдал. Работы вполне хватило не только на курсовую работу, но и на дипломную. Более того: в результате 1-го мая 1995 года появились две хорошие статьи в европейском журнале (I.Kaganova, M.Litinskaya, Physics Letters A, 1995, **200**, 365 и 375). Признаюсь, появление этих статей доставило огромное удовольствие. Не меньшее, чем выход из печати собственных статей.

Оказывается, Илья Михайлович о задаче, которую он дал мне и Цукернику и о которой не напоминал, не забывал. Это ясно из рассказа А.Ю.Гроссберга, вошедшего в цикл “Вокруг шарика” (см. выше). Вспомнил её

И.М. в связи с работами по физике полимеров. Не лишне задуматься: совсем разные задачи нередко связаны между собой. Связаны, правда, в сознании такого опытного и талантливого физика-теоретика, каким был Илья Михайлович.

К семейным делам можно отнести и цикл работ с Инной по теории поликристаллов. Он уже кратко описан в разделе “Импеданс” и упомянут в разделе “Тематика длиной в жизнь”, но кое-что следует, по-моему, добавить.

Метод И.М.Лифшица, которым для меня начался интерес к поликристаллам, математически прост для исследования свойств неограниченного (бесконечного) образца. В этом случае, с помощью метода Фурье, легко интегральные уравнения превратить в алгебраические. Желая преодолеть методические ограничения, мы занялись обобщением метода И.М., чтобы иметь возможность использовать его для задач, в которых граница играет существенную роль.

Естественней всего было попытаться решить задачу о скин-эффекте. С этого мы с Инной и начали. Неожиданно наткнулись на трудность с выполнением полного набора граничных условий. Связана она была с тем, что мы не учитывали продольного электрического поля или наведённого заряда, возникновение которого обеспечивает выполнение граничного условия для плотности тока. То, что дело в этом, мы разобрались позже. Так как Инне была более знакома теория упругости, чем электродинамика, то мы решили, что Инна займётся рэлеевскими волнами.

Вскоре я встретился в Карпаче⁴ с А.А.Марадудиным и договорился, что он будет принимать участие в решении задачи о распространении рэлеевских волн в поликристаллах. Сотрудничество было очень продуктивным и полезным. Мне до сих пор жаль, что подробное изложение работы отсутствует. Интересны не только результаты, но и вычисления, а они не опубликованы.

Переоценить полученные результаты трудно. По существу, до работы Инны и Марадудина (I.M.Kaganova, A.A.Maradudin, Phys.Scr. **44**, 104, 1992) не было никакой ясности, как связаны характеристики рэлеевской волны в

⁴ В горном курорте Карпач около Вроцлава (Польша) Вроцлавский университет проводит ежегодно теоретические конференции, лектором на которых я был несколько раз.

изотропном поликристалле с упругими модулями кристаллитов, из которых поликристалл состоит. Распространение объёмных звуковых волн в поликристаллах было рассмотрено ещё в конце 40-х годов (И.М. Лифшиц, Г.Д. Пархомовский. “Поглощение ультразвука в поликристаллах”, Учёные записки Харьковского университета, 27. Труды физического отделения физико-математического факультета, 1948, 1, стр. 25 – 36). Важный результат рассмотрения – затухание звуковых волн, объяснённое экстинкцией волн на кристаллитах. Аналогичное явление имеет место и при распространении электромагнитных волн в диэлектрических поликристаллах (см. цитированную выше статью – мою дипломную работу). Из-за неоднородности поликристалла рэлеевские волны тоже рассеиваются. В работе Инны и Марадудина важное место занимает вычисление затухания рэлеевских волн в поликристаллах. Насколько я знаю, воспользовавшись этими результатами, К.Н.Зиновьевой (ИФП РАН) удалось лучше разобраться со значением величины скачка Капицы на границе между поликристаллом и сверхтекучим гелием.

После публикации статьи Инны с Марадудиным мы вернулись к теории скин-эффекта в поликристаллах. Я получал большое удовольствие от того, что опять, после более чем 20-летнего перерыва работал с дочерью. Как я уже писал, мы придерживались апробированной схемы. До сих пор (а прошло уже много лет) мне кажется, что то, как распуталась история с выполнением граничного условия для плотности тока (см. I.M.Kaganova, M.I.Kaganov, Normal skin effect in polycrystals. Waves in Random Media, 3, 177 – 198, 1993), представляет более серьёзный интерес, чем может показаться. Такая ситуация встречается во многих задачах.

Важным моментом в развитии теории поликристаллов следует считать переход от нормального скин-эффекта к аномальному. Впервые метод Лифшица был распространён на интегральные уравнения со случайными коэффициентами. Хочется думать, таким путём удастся решить и другие задачи. Несомненно, вполне интересно было бы вычислить коэффициент поглощения ультразвука электронами поликристаллического металла, когда длина свободного пробега электронов превышает длину волны звука. Для

монокристаллов коэффициент поглощения в этих условиях аккуратно вычислен А.И. Ахиезером, Г.Я. Любарским и мною (ЖЭТФ, **32**, 837, 1957).

Привитая первыми работами по фермилогии любовь к геометрии (пояски, сечения и т. п.), естественно, проявилась и в этих работах и позволила разобраться, как ведут себя усреднённые электронные характеристики поликристаллических образцов металлов со сложными поверхностями Ферми. Стоит обратить внимание на формулу, согласно которой компонента Фурье проводимости поликристалла при $kl \gg 1$ обратно пропорциональна волновому вектору и прямо пропорциональна площади поверхности Ферми, сколь бы сложной формы поверхность Ферми ни была. Геометрическое видение позволило рассмотреть два принципиально разных случая малой анизотропии электронных свойств металла: поверхность Ферми – эллипсоид с близкими по величине полуосями и сферическая поверхность Ферми с “прыщиками” и “оспинками”.

По этой тематике мы опубликовали три работы [Phys. Lett. A **173**, 473 (1993); Waves Random Media **3**, 177 (1993); J. Low Temp. Phys. **22**, 712 (1996)]. Для вычислений, описанных в этой статье, потребовались не только трудоспособность и усидчивость, но и высокая квалификация. Должен сделать грустное признание: к тому времени, как мы начали заниматься теорией электронных свойств поликристаллов, я уже такие вычисления не мог делать. Моё участие сводилось к совместным обсуждениям постановки задач и результатов.

Повторю: работы по теории поликристаллов, которые перечислены здесь, не вышли за пределы идей Лифшица. Возможность получения строго обоснованных формул для средних модулей базировалась на малой анизотропии кристаллитов. Работа Инны с А.М. Дыхне [А.М. Dykhne and I.M. Kaganova, Physica A **241**, 154 (1997)] кардинально изменила ситуацию (я уже об этом писал).

Инна и я использовали метод, апробированный Инной и А.М. Дыхне на примере *нормального* скин-эффекта, для вычисления импеданса поликристалла в условиях *аномального* скин-эффекта. Таким образом, мне кажется, теория скин-эффекта получила своё завершение. Не перечисляя все полученные нами результаты (см. Physical Review B, V.63, p. 054202), отмечу,

что в поликристалле геометрия поверхности Ферми “дает себя знать”. Даже аномалии, сопровождающие топологический переход (изменение связности поверхности Ферми за счет внешнего воздействия), не исчезают при усреднении.

Заканчивая описание семейных дел, не могу не похвастать: и дочь Инна, и внука Марина, стали хорошими физиками – теоретиками, обе кандидаты наук. Инна успешно работает в Теоретическом отделе ИФВД им. Л.В. Верещагина РАН (г. Троицк, под Москвой). Марина после окончания аспирантуры в *Scuole Normale* (Пиза, Италия) получила степень PhD, а в настоящее время работает в Университете в Ульме (Германия), имея Гумбольдтовскую стипендию.

ЯНВАРЬ 1962 ГОДА

Когда мне исполнилось 60, мои ученики и молодые коллеги⁵ сделали мне “королевский” подарок: собрали мои работы, сделали копии, переплели и в виде семи томов преподнесли 4 июня 1982 года. Благодарен я был и есть безмерно. Я не умею “заводить архивы”, и поиски любого понадобившегося мне оттиска всегда были почти неразрешимой задачей. Нечего говорить, что семь томов перелетели со мной через океан и заняли почетное место на полке в новом жилище.

Закончив (по меньшей мере, временно) с “Делами семейными”, я вспомнил о своей работе “О неупругом рассеянии частиц и черенковском излучении” (ЖЭТФ, **43**, 153, 1962). Работа, несомненно, принадлежит “переходной” тематике: в ней конденсированная среда не только среда распространения макроскопических волн, но и динамическая система со своим спектром элементарных возбуждений. Естественно, прежде, чем начать писать, разыскал интересующую меня работу (в 3-м томе). Перелистал, прочитал благодарность:

“В заключение хочу поблагодарить Л.Д.Ландау за полезные советы, а также И.М.Лифшица и В.М.Цукерника за интерес к работе”.

Задумался, какой полезный совет дал мне Ландау. Не вспомнил. Временно перестал об этом думать, так как обратил внимание на справку:

⁵ По-моему, главным зачинщиком и исполнителем была Таня Лисовская. Большое ей спасибо!

“Поступила в редакцию 14 января 1962 г.” Меня буквально захлестнул поток воспоминаний. Дело в том, что автомобильная катастрофа, в которой пострадал Ландау, произошла 7 января 62-го года. Узнал я о происшедшем 8-го, когда в первый раз в этот свой приезд в Москву зашёл в редакцию ЖЭТФа. Возможно, чтобы узнать поступила ли эта моя статья в редакцию. Но не обязательно был конкретный повод: часто я заходил просто так.

Когда я узнал, что идёт борьба за жизнь Ландау, попытался понять, могу ли быть полезным. Встретившийся Евгений Михайлович Лифшиц сказал, что помочь я не могу. Действительно, не москвич, знакомых врачей нет, полезных людей не знаю, машины нет и водить не умею. Е.М. посоветовал не идти в больницу: “Зачем Вам видеть Дау, обмотанного бинтами?” – сказал он. “Запомните его таким, каким Вы его знали!” Шансов, что Ландау останется в живых было очень мало. Что мне оставалось? Только узнавать состояние. Этим я и занимался: каждые несколько часов звонил в больницу. В больнице у телефона дежурили физики, звонки не мешали тем, кто боролся за жизнь Ландау. Из Москвы в том январе я поехал в Ленинград. Начался период междугородних звонков. Когда вернулся в Харьков, взял на себя оповещение физиков о состоянии Ландау. Дирекция УФТИ выделила служебную телефонную линию, которой можно было пользоваться из квартиры.

Первый раз после аварии увидел Ландау в Академической больнице. Большой радостью (не только для меня, но для многих) было то, что Ландау меня узнал. Тогда я впервые услышал фразу: “Сегодня болит нога. Как пройдет, заходите, поговорим!” В течение шести лет я слышал её много раз. Иногда болела не нога, болел живот. Отдельными содержательными словами несколько раз за шесть лет, которые Ландау прожил после аварии, мы перебросились. Но ни разу по-настоящему не говорили, ни о физике, ни на литературные, ни на бытовые темы.

Вернусь к статье. Перечитал её. В одном месте исправил незначительную опечатку. Совершенно очевидно, статья, о которой идёт речь, – последняя работа, которую я обсуждал с Ландау.

Самое тонкое место в статье – утверждение: “...потери энергии частицей....-- разностный эффект. Частица теряет энергию [на излучение бозонов] и приобретает энергию [поглощая бозоны]”. Это позволяет выразить

вероятности излучения и поглощения бозонов через известную из макроскопических расчётов спектральную плотность потерь энергии $(dE/dt)_\omega$ и функцию распределения Бозе-Эйнштейна $N_{BE}(\omega)$ [энергия квазичастицы-бозона равна $\hbar\omega$, см. формулы (4) и (5) в статье].

Дальнейшее содержание статьи – применение формул (4) и (5) к конкретным случаям. Мне хочется думать, что до приведенного выше утверждения додумался самостоятельно. Иначе это означало бы, что Ландау дал мне тему работы. Такого, насколько помню, никогда не было. Если бы было, то в благодарности прямо было бы сказано.

Пытаюсь вспомнить всё связанное с этой работой. Ссылка на работу А.И.Ахиезера, И.А.Ахиезера и И.Я.Померанчука (ЖЭТФ, 41, 478, 1961) напомнила мне неприятный разговор с Александром Ильичом, пожалуй, единственный за долгие годы наших хороших отношений. Он в какой-то мере был связан с работой, о которой идёт речь. Совершенно не могу вспомнить причину обид друг на друга. Несомненно, дело было в том, что мы занимались близкими темами одновременно, но, надо сказать, занимались с совершенно различных позиций. Скорее всего, Ландау, которому я рассказал о взаимных обидах, посоветовал, чтобы я добавил в работу нечто вне пределов интересов А.И.Ахиезера. Наверное, именно поэтому в работе, кроме рассеяния звука, рассмотрено неупругое рассеяние за счет рождения (поглощения) экситона – этот пример демонстрирует возможности принятого в работе подхода.

ЭЛЕКТРОННАЯ ТЕОРИЯ МЕТАЛЛОВ И ТОПОЛОГИЯ

Начну с грустного воспоминания. На одном из московских кладбищ – похороны Лии Яковлевны – жены Бориса Яковлевича Левина. Многих пришедших отдать последний долг Лие Яковлевне не видел много лет. Среди них и А.Я. Повзнер, за несколько лет до этого переехавший из Харькова в Москву. Он задал мне странный вопрос: “Приготовили ли Вы себе пуленепробиваемый жилет?” Увидев, что я обескуражен, разъяснил: недавно он получил расписание заседаний Московского математического общества, а в нём среди прочих указано заседание с моим докладом “Электронная теория

металлов и топология”. Он считает, что без защитного жилета мне не обойтись. Легко понять, его слова не добавили мне уверенности.

Как я оказался в программе заседаний Московского математического общества? Чтобы ответить на этот вопрос, надо перенестись из Москвы в Триест. Мой бывший дипломник Юй Лу, в прошлом студент Харьковского университета, в 70-90-е годы, занимал ответственный пост в ИСТР, в Международном центре теоретической физики (Триест, Италия). По его приглашению несколько раз я был гостем ИСТР. Во время одного из посещений я разделял квартиру с молодым и способным математиком из Москвы Витей Васильевым – учеником В.И. Арнольда. Арнольд тоже в это время был в Триесте. Квартира, которую мы занимали, была очень удобна для жилья, но не для работы: в комнатах не было необходимых для работы столов. Поэтому мы раскладывали всё, что нужно для занятий, на большом столе в кухне. Однажды я увидел, что рисунки в статье Вити очень похожи на рисунки из моих статей. Я показал ему то, чем я тогда занимался. Он загорелся и сказал, что это будет интересно Арнольду. Когда мы встретились втроём, я в нескольких словах сказал, чем я занимаюсь, Владимир Игоревич сказал, что это было бы интересно послушать на заседании Математического общества. Легкомысленно я согласился, уверенный, что ещё предстоят всякие разговоры, выбор удобного времени, откладывание. Довольно скоро после возвращения из Италии выяснилось, что всё ... доклад назначен на такое-то число.

Признаться, я не только никогда не выступал перед Московским математическим обществом, но никогда и не бывал на его заседаниях. Слово “топология”, вынесенное в название, меня очень смущало. “Что я знаю о топологии? Скорее всего, – думал я, – совсем не то, что понимают математики под этим словом”. Короче, волновался. Так как дело происходило осенью (дату не помню), то решил начать с того, что дата близка дню смерти Ильи Михайловича Лифшица, которому мы обязаны геометризацией электронной теории металлов. Уверенный, что мемориальные слова аудитория выслушает спокойно, а дальше... как-нибудь, я вышел докладывать. Представлял меня Сергей Петрович Новиков. Назвал и ...произнёс задуманное мною введение о

роли Ильи Михайловича. Не оставалось ничего другого, только признаться, что мне придется обойтись без введения.

Удивительно, но обстановка была необычайно благожелательной. Арнольд и Новиков сидели на первой парте, внимательно слушали, задавали вопросы, которые, чувствовалось, помогали аудитории воспринимать суть: физические термины слушателей несколько смущали. Радовало, что многие факты из электронной теории металлов, о которых я говорил, могут служить примерами теории катастроф, модной тогда не только среди математиков. Я не ошибся: сходство картинок (моих и В.Васильева) действительно свидетельствует о том, что наши результаты близки по существу. В пуленепробиваемом жилете не было никакой необходимости.

При обсуждении доклада я почувствовал, что С.П.Новиков серьезно заинтересован и знает наши работы по теории гальваномагнитных явлений. Я не ошибся. В декабре 1996 г. проходила STATISTICAL MECHANICS CONFERENCE RUTGERS UNIVERSITY (NY, USA). Два раза в год удивительно регулярно проходят подобные конференции. Но та конференция была необычной. Особенно для учеников Ильи Михайловича Лифшица. Она носила мемориальный характер и была приурочена к 80-летию Ильи Михайловича. Здесь не место рассказывать, как прошла Конференция. Приятно отметить, что очень успешно. После конференции в честь 80-летия Ильи Михайловича одно из заседаний конференции стали регулярно посвящать кому-либо из выдающихся физиков-теоретиков или математиков. Это стало традицией.

На конференции в декабре 1996 года появился С.П.Новиков. С.П. не выступал с докладом, но многим участникам подарил оттиск из Писем в ЖЭТФ со статьей, развивающей теорию гальваномагнитных явлений. Вклад С.П.Новикова и его учеников в теорию гальваномагнитных явлений описан в обзоре С.П.Новикова и А.Я.Мальцева (УФН, **168**, 249, 1998), содержащем достаточно полную библиографию математических аспектов теории гальваномагнитных явлений. Для меня и В.Г. Песчанского топологический анализ, проведенный математиками, послужил отправной точкой для написания обзорной статьи "Гальваномагнитные явления сейчас и сорок лет назад" (Physics Reports, 2002, **372**, №6, 445).

О геометрических аспектах электронной теории металлов неоднократно писалось не только в книге “Электронная теория металлов” И.М.Лифшица, М.Я. Азбеля и М.И.Каганова (Москва, Наука, 1971), в оригинальных статьях, но и в обзорных. Сошлюсь только на три (во всех трёх есть подробная библиография): М.И.Каганов, И.М.Лифшиц, “Электронная теория металлов и геометрия” (УФН, 1979, **129**, 487); М.И.Каганов, Ю.В.Грибова, “Топологические переходы в нормальных металлах” (ФНТ, 1991, **17**, 907) и Я.М.Блантер, М.И.Каганов, А.В. Панцулая, А.А.Варламов, “Теория электронных топологических переходов” (Physics Reports, 1994, **245**, №4, 160). В последнем обзоре – особенно подробная библиография.

Не хочу повторять то, что уже было сравнительно полно описано в обзорах, но несколько замечаний позволю себе сделать.

В 1960 году И.М.Лифшиц предсказал возможность аномалий свойств металлов, обязанных изменению связности поверхности Ферми (ЖЭТФ, 1960, **30**, 1569). Признаюсь, я был уверен, что аномалии никогда не будут обнаружены. Во-первых, думал я, нужно фантастическое давление, чтобы поверхность Ферми изменила свою топологию. Во-вторых: неужели не найдутся какие-нибудь причины, чтобы “замыть” слабенький фазовый переход 2-го рода⁶? Ведь слабость перехода имеет простой физический смысл: аномалия-то определяется электронами проводимости, расположенными в окрестности *одной точки* на поверхности Ферми!

Вскоре мне стало очевидно, что я ошибался. Комбинируя влияние примесей и давления, экспериментаторы существенно уменьшили необходимое для наблюдения аномалий давление, а причины, которые, по моему мнению, должны были бы “замыть” аномалии (рассеяние прежде всего), не ликвидировали аномалии (рассеяние, оказалось, само может быть причиной аномалии, см. В.Г.Вакс и др., ЖЭТФ, 1981, **80**, 1613). В 1982 году за обнаружение явления электронно-топологического перехода металлов при упругих деформациях И.М.Лифшицу с группой экспериментаторов было выдано удостоверение об открытии.

⁶ По терминологии П.Эренфеста предсказываемые И.М.аномали можно трактовать как фазовый переход $2\frac{1}{2}$ -го рода.

Свидетельством того, что я осознал свою ошибку, служат не только обзоры, но и ряд результатов, среди которых отмечу предсказание своеобразной аномалии у коэффициента поглощения звука при топологическом фазовом переходе (В.И.Давыдов, М.И.Каганов, Письма в ЖЭТФ, 1972, **16**, 133). Кроме того, в 1982 году мы (я и А.А.Нурмагамбетов) предсказали, что должен существовать своеобразный обобщённый топологический переход, проявляющийся в аномалии поверхностной энергии металлического образца (ЖЭТФ, 1982, **83**, 2296).

Геометризация электронной теории металлов по существу дела началась теорией эффекта де-Гааза – ван-Альфена (И.М.Лифшиц, А.М.Косевич, ДАН СССР, 1954, **96**, 963; ЖЭТФ, 1955, **29**, 730), когда выяснилось, что значение наблюдаемой величины (в данном случае магнитного момента металла в магнитном поле) может быть выражено через площади экстремальных сечений поверхности Ферми. Сечения проводятся перпендикулярно магнитному полю. Сильное впечатление на всех нас (физиков, занятых исследованием свойств металлов) произвела работа И.М.Лифшица и А.В.Погорелова (ДАН СССР, 1954, **96**, 1143), показавшая, что можно по измеряемым величинам (по периодам осцилляций и по их амплитудам) восстановить электронный энергетический спектр металла. Среди теоретиков началась буквально охота за структурно-чувствительными эффектами. Так как сам электронный энергетический спектр описывается в наглядных геометрических терминах (отдельные полости поверхности Ферми, нормали к ним – вектора скорости), то в теоретических работах появились характеристики, имеющие геометрический смысл: сечения, хорды, пояски на поверхности, гауссова кривизна и тому подобные.

Формулы и экспериментальные результаты годны для расшифровки электронного энергетического спектра только в том случае, если при выводе формул не были использованы конкретные предположения о законе дисперсии электронов проводимости. Так появился термин “электроны с произвольным законом дисперсии”. Во главу угла подхода ставилось вырождение электронного газа. Именно оно позволяло получать “ответы” в геометрических терминах.

Работ описанного стиля, который в западной литературе получил название *фермилогии*, накопилось много. Ильёй Михайловичем и мною было опубликовано несколько обзоров в УФН (1959, 69, 419; 1962, 78, 411; 1965, 87, 389). А втроём (М.Я.Азбель, И.М. и я) написали и опубликовали упоминавшуюся книгу “Электронная теория металлов”, опубликовали с явным опозданием (1971г.): пик интереса к физике нормальных металлов прошёл.

Прервусь на воспоминание. В Институт физических проблем из Aston University (Бирмингем, Англия) приехал историк науки Пол Хок (Dr. P.Hoch). Точную дату не помню, но, несомненно, между 82-м и 85-м годами прошлого века (Илья Михайловича уже не было, а Евгений Михайлович принимал участие в беседе). Пол Хок брал интервью у физиков, принимавших участие в создании современной физики твёрдого тела. Более всего, насколько помню, его интересовала история теории гальваномагнитных явлений. По моему мнению, в нашем (В.Г. Песчанского и моём) обзоре (см. выше) она описана объективно. Некоторые личные аспекты истории – в статье с шутливым названием “Почему Марк сломал линейку Ильмеха и как возникла аббревиатура ЛАК”. Я поместил её в свою книгу “Школа Ландау. Что я о ней думаю” (“Тривант”, г. Троицк Московской области, 1998). В этой же книге есть очерк “К истории электронной теории металлов (УФТИ, 50-е годы)”. В очерке описано, как влияли на теоретические исследования работы УФТИйских экспериментаторов. Похоже, нет оснований возвращаться к этому вопросу.

Разговаривая с Полом Хоком, я спросил его, за кем на западе “числится” фермилогия. Он уверенно ответил, что за Ильёй Лифшицем и его харьковскими учениками. Услышать такой ответ было очень приятно, так как мне казалось, что фермилогия стала общим местом, а нас попросту забыли.

Теория гальваномагнитных явлений продемонстрировала связь измеряемых величин (компонент тензора сопротивлений) с топологической структурой спектра: замкнуты или открыты поверхности Ферми, скомпенсирован металл или нет. Локальная геометрия поверхности Ферми ни в теории, ни в экспериментальных результатах себя не проявляла.

Уже в первой работе по теории аномального скин-эффекта, выполненной в предположении о том, что электроны имеют “произвольный” закон дисперсии (М.И.Каганов, М.Я.Азбель, ДАН СССР, 1955, **102**, 49) было показано, что эффект определяется отнюдь не всеми электронами на поверхности Ферми, а только теми, которые расположены на “пояске” $\mathbf{p}\mathbf{v}=0$, $\epsilon=\epsilon_F$ (обозначения обычные, единичный вектор $\mathbf{p}$ направлен вдоль нормали к поверхности образца). Не сразу было обращено внимание на то, что “поясок” – плоская кривая только в том случае, если вектор скорости линейно зависит от квазиимпульса. В общем случае форма “пояска” вычурна, а при определенных направлениях вектора $\mathbf{p}$ топология “пояска” должна изменяться.

Если поверхность Ферми выпуклая, “пояски” при любой ориентации вектора $\mathbf{p}$ имеют одинаковую структуру. Изменение топологии “пояска” возможно, если на поверхности Ферми есть вмятины и/или перемычки. Существование вмятин и перемычек означает наличие на поверхности линий параболических точек, в которых гауссова кривизна равна нулю. Изменение топологии “пояска” (его перестройка – разрыв или появление перемычки между петлями) затрагивает небольшую область на поверхности. Точки, вблизи которых осуществляются переходы, расположены на линии параболических точек. Анализ структуры “поясков” и выяснение угловой зависимости физических характеристик металлов выявили роль локальной геометрии поверхности Ферми. В этом смысле особенно продуктивным оказалось исследование поглощения ультразвука электронами металла при $kl \gg 1$ и, общее, электрон-фононного взаимодействия. В этих случаях $\mathbf{n}=\mathbf{k}/k$, $\mathbf{k}$ – волновой вектор звуковой волны или квазиволновой вектор фонона (см. статьи: Г.Т.Аванесян, М.И.Каганов, Т.Ю.Лисовская, Письма в ЖЭТФ, 1977, **25**, 381; М.И.Каганов, А.Г.Плявенек⁷, М.Хитшольд, 1982, **82**, 2030 и обзор М.И.Каганов, “Энергетический спектр металлов и его особенности, УФН, 1985, **145**, 507).

Уже в работе И.М.Лифшица, в которой была предсказана возможность топологического фазового перехода в нормальном металле, выяснилось, как я

⁷Андрей Плявенек после окончания аспирантуры МГУ и защиты кандидатской диссертации, которую он выполнил под моим руководством, успешно работал в области физики лазеров. Для меня было совершенно неожиданным его добровольный уход из жизни. Не знаю причины, но ощущение трагизма не могу забыть.

отметил выше, что аномалия любых свойств металла при топологическом переходе определяется электронами, расположенными вблизи изолированной (критической) точки на поверхности Ферми (из-за симметрии, возможно, вблизи нескольких точек). То же – в случае аномалий, обязанных изменению топологии “пояска”. Казалось бы, точка – всегда точка, никакое топологическое изменение ей “не грозит”. Это верно, но, однако, структура поверхности вокруг точки определяется локальной геометрией поверхности Ферми: в эллиптических, параболических, цилиндрических точках и в точках уплощения – в каждой из типов точек структура поверхности другая, что приводит к изменению характера аномалии. Изменение внешнего воздействия (например, направления волнового вектора звука или магнитного поля) перемещает критическую точку по поверхности Ферми. Таким образом, даже в этом случае “топологические переходы” возможны (кавычки характеризуют условность термина).

Донецкий физико-технический институт (теперь им. А.А.Галкина) АН СССР традиционно проводил в посёлке Караван, расположенном в живописной местности, летние школы по физике металлов. Несколько раз я принимал в них участие в качестве лектора. Обстановка на школах была прекрасная. Физиков, исследующих электронные свойства нормальных металлов, школы особенно привлекали – их тематика была центральной частью программы. На одной из таких школ в докладе я высказал мысль, что многие аномалии нормальных металлов можно трактовать как своеобразные топологические переходы, если справедлива следующая схема: свойство → геометрический образ → изменение топологии геометрического образа под внешним воздействием → аномалия. Описанию такого подхода многих свойств металлов посвящён обзор “Топологические переходы в нормальных металлах” (М.И.Каганов, Ю.В. Грибкова, ФНТ, 1991, 17, 907). Этот подход упомянут и в обзоре Я.М.Блантера, М.И.Каганова, А.В.Панцулая, А.А. Варламова в *Physics Reports*’е за 1994 год, “Теория электронных топологических переходов” (V. 245, №4, 160). Оба я уже упоминал.

Роль локальной геометрии в свойствах нормальных металлов привлекала моё внимание многие годы. За 70 – 80-е годы было опубликовано много работ на эту тему. Своеобразный итог был подведён в лекции

“Properties of metals and the local geometry of the Fermi surfaces”, написанной совместно с Т.Ю.Лисовской и прочитанной мною в зимней школе в Карпаче (и об этих школах я уже упоминал). Материалы школ в Карпаче, как правило, издаются. Наша лекция вошла в одно из изданий (к сожалению, у меня нет оттиска, не могу привести библиографическую справку).

Я не пытаюсь даже схематически описать свойства металлов, зависящие от локальной геометрии поверхностей Ферми. Всё можно найти в обзорах и статьях. Ряд теоретических предсказаний подтвердились, другие ждут экспериментального подтверждения. Есть теоретические работы, объяснившие аномалии, которые сначала были обнаружены в эксперименте.

Независимо от меня и моих непосредственных коллег роль локальной геометрии поверхностей Ферми изучала Н.А.Зимбовская. Она опубликовала много работ по этой теме. В 1996 году в Екатеринбурге издана её монография “Локальная геометрия поверхности Ферми и высокочастотные эффекты в металлах” (перевод на английский – 2001 год, из-во Springer).

Электронная теория металлов наряду с теорией магнетизма – наиболее устойчивые мои научные привязанности. Любые привязанности, даже научные, не ограждены от переживаний. Хочу поделиться переживаниями, которым я обязан теории металлов.

Слово “переживание” принадлежит не столько холодной науке, сколько литературе, описывающей отношения между героями. Роль учёного играет писатель. В его воображении возникают герои повествования. Их необходимо куда-то поместить, появляется место действия – пространство, в котором герои живут – перемещаются, действуют. Необходимо хотя бы приблизительно указать время действия. Автора, а за ним и читателя, иногда интересует происхождение героев, но часто и автор, и читатель удовлетворены лишь перечислением героев, констатацией того, что герои есть. Постепенно, по ходу описываемых событий герои обретают черты – свойства характера, принадлежность той или другой социальной группе, манеру поведения в разных ситуациях.

Попробую воспользоваться подобной терминологией.

Герои – электроны и фононы. Место действия – идеальный кристалл. Его структура, главным образом его элементы симметрии. Они почти столь

же важны, как законы природы. Принадлежность к социальным группам: электроны – фермионы, фононы – бозоны. Аналогом времени действия служит указание, что главные события происходят при низких температурах.

Происхождение героев волнует мало. Конечно, важно, что электроны – бывшие валентные электроны, а фононы – кванты упругих колебаний.

При низких температурах фононов мало и все они имеют не только малую энергию, но и малый импульс (квазиимпульс, чтобы быть точным). Понимание происхождения фононов даёт возможность установить характер их законов дисперсии, а то, что их немного, позволяет считать фононы почти идеальным бозе-газом.

Электронов много (несколько на каждую ячейку кристалла). О законе дисперсии можно высказать только самые общие утверждения. Они диктуются законами природы и геометрией кристалла. Выяснить, что из себя представляет закон дисперсии электрона, можно, используя экспериментальные данные. Так родилась фермилогия – спектроскопия электронного энергетического спектра. Годом её рождения надо считать 1954-й – год выхода из печати статьи И.М.Лифшица и А.В.Погорелова (это уже было сказано). Все основные фермилогические вычисления исходили из того, что электроны проводимости – сильно вырожденный ферми-газ. Казалось бы, вся совокупность наших представлений о металле надёжно подтверждает это. Выводы основываются на сравнении теории с экспериментальными фактами.

Но почему электроны, взаимодействие которых друг с другом того же порядка, что с ионами, под воздействием ионов кардинально меняют свой закон дисперсии, а взаимодействием каждого электрона со своими “собратьями” можно пренебречь? Невозможность ответить на этот вопрос была причиной довольно болезненных переживаний, тем более, что полагалось переживания скрывать. Основных приёмов сокрытия было два. Первый был очень прост: электроны именовались квазичастицами, имеющими заряд и подчиняющимися статистике Ферми-Дирака. Второй приём ещё проще: от проблемы отмахивались, приводя пример электронного газа большой плотности, который тем ближе к идеальному, чем плотнее.

Создание Л.Д.Ландау теории ферми-жидкости ликвидировало недоумение и положило конец переживаниям. Теория ферми-жидкости

позволила вполне строго очертить круг явлений, для построения теории которых можно не задумываться, что есть электроны проводимости – *ферми-газ* или *ферми-жидкость*: для этих явлений формулы выглядят тождественно. При этом все величины, входящие в формулы, описывающие электронные свойства металла, как свойства *ферми-жидкости*, и по смыслу являющиеся характеристиками свойств отдельных квазичастиц-электронов (например, энергия, скорость), зависят от взаимодействия между электронами [см. стр. 198 – 201 в книге “Электронная теория металлов” И.М.Лифшица, М.Я.Азбеля и М.И.Каганова].

Я столь подробно останавливаюсь на переживании, связанном с отличием электронов проводимости от газа, так как выяснилось, что через много лет после того, как этот вопрос был выяснен, некоторым казалось, что вся фермилогия исходит из одноэлектронного приближения.

Вспоминаю конференцию по физике металлов в Дрездене, участником которой я был. Происходило это, похоже, в конце 70-х или в начале 80-х годов. Мы (Н. Eschrig – физик-теоретик из Дрездена и я) представили вдвоём доклад о роли локальной геометрии поверхности Ферми металла в его фононном спектре (в частности, в докладе приводились экспериментальные факты, подтверждающие теорию). Одно из заседаний было посвящено дискуссии. Так вот, в довольно жаркой дискуссии пришлось доказывать аудитории, что эксперимент на основе фермилогических формул позволяет определить истинный ферми-жидкостной энергетический спектр металла.

Второе переживание, которое хочу описать, связано с моделью Гаррисона (W.A.Harrison⁸). Сжившись с представлением о том, что электрон с произвольным законом дисперсии – главный твой герой, не просто вдруг узнать, что все такие интересные сложности: открытые поверхности, электроны и дырки, обилие малых групп электронов у поливалентных металлов, – всё это результат разрезания ферми-сферы свободных электронов и складывания частей в угодную периодической структуре кристалла.

Переживание было острым, но не долгим, так как анализ движения электронов проводимости во внешних полях показал, что в большинстве

⁸ Мне прятно вспоминать, что я поборол неприятие Ландау модели Гаррисона. Он согласился, что, как эвристическая модель поверхности Ферми, она полезна.

случаев модель Гаррисона не заменяет фермилогию, а помогает ей. Исследование динамики электронов, закон дисперсии которых существенно отличен от $p^2/2m$, необходим. Такой подход остался в электронной теории металлов и продолжает верно “нести службу”.

Заканчивая этот затянувшийся раздел, хочу поделиться своим ощущением, которое можно было бы назвать крушением надежд, но такое название слишком трагично, если не воспринимать его с иронией. Так и будем его воспринимать.

Итак, крушение надежд.

За те десятилетия, что я наряду со многими физиками, как теоретиками, так и экспериментаторами, занимался физикой металлов, металл “открыл свое лицо”. В настоящее время известны поверхности Ферми всех или почти всех металлов и многих интерметаллических соединений. Предсказано и получило объяснение множество тонких свойств нормальных металлов. Думаю, если собрать воедино все статьи, посвященные электронным свойствам нормальных (несверхпроводящих, нарочно подчеркиваю!) металлов, то пришлось бы издать многотомную энциклопедию. Сейчас они разбросаны по десяткам журналов и годам. Возникает вопрос: “Ну и что? Что с этим делать?” Когда-то мне мерещилось: выяснив, каковы поверхности Ферми металлов, начнут поверхности Ферми воспринимать как карты местности, на которой “проживают” электроны, время “великих географических открытий” сменится “этнографией” – начнется изучение свойств отдельных электронов, прежде всего, времен их “оседлой” жизни в данном месте на поверхности Ферми. Эта мечта не осуществилась. Лет 10 назад с группой своих коллег попытался получить грант для подобного исследования, но нам его не выделили.

Другая сторона “крушения надежд”. Говоря о роли твердых тел в технике, И.М.Лифшиц любил подчеркивать, что их роль изменилась: раньше твердые тела играли главным образом роль строительного материала, а теперь – квантовых приборов. Конечно, имелись в виду главным образом полупроводники. Возможно, в ближайшем будущем можно будет добавить сверхпроводники. А нормальные металлы? Я не слышал о каком-либо нетрадиционном применении нормальных металлов. Вполне возможно, что я

чего-то не знаю, но, скорее всего, по-прежнему используются в основном прочность, пластичность, ковкость, большие электро- и теплопроводность нормальных металлов...И всё...

ЭЛЕКТРОНЫ, ФОНОНЫ, МАГНОНЫ

Я автор книжки, название которой совпадает с названием этого раздела⁹. Книжка – попытка рассказать непрофессионалам о квантовой теории твёрдого тела. Кажется, я не ошибаюсь, считая, что книжка имела успех. Что несомненно, так это то, что эту книжку я люблю до сих пор. А ведь с момента её издания прошло почти четверть века.

На переплёте книжки нарисована скала, омываемая волнами. Дело в том, что книга имеет эпиграф – две строки из стихотворения Д.С.Самойлова:

“До свидания, камень!

И да будет волна!”,

– как символ волновой (квантовомеханической) природы движения атомных частиц и, одновременно, – моей любви к поэту Самойлову. Но на скале – странная птица. Когда книжка вышла из печати, многих удивил рисунок на обложке, и мне приходилось объяснять, как на переплёт “залетела” птица. Птичку поместил художник, оформлявший книжку. Когда мне показали проект обложки, я удивился, но увидев, как огорчён художник, не смог возразить. Птичка осталась. Этим дело не кончилось. Года через два издательство “Мир” решило издать перевод книги на английский язык. Однажды, ко мне в Институт физических проблем пришёл кто-то из издательства с просьбой “подписать обложку”. Увлечённый тем, чем я тогда был занят, почти не глядя, подписал. Когда посыльный ушёл, мой коллега спросил: “А Вы обратили внимание, что на обложке – рыбка?” Только после этого я сообразил, что было нарисовано на обложке – рыбка из формул и значков, которые художник нашёл в моём тексте. Так и существуют два издания: по-русски – с птичкой, по-английски – с рыбкой.

Писать научно-популярные статьи я начал очень давно, в те далёкие времена, когда журнал “Наука и жизнь” выходил в старом формате. Именно в “Науке и жизнь” старого формата вышла моя первая научно-популярная

⁹ М.И.Каганов, “Электроны, фононы, магны”, Москва, “Наука”, 1979.

статья. Если не путаю, называлась она “Диэлектрики, металлы, полупроводники”, и написана в соавторстве с очень уважаемым мною физиком-теоретиком А.С.Компанейцем. Александр Соломонович принадлежит к тем, кого я числю среди своих учителей. Хорошо помню, как мы писали и обсуждали написанное в номере гостиницы “Украина”, где я жил, приехав в командировку из Харькова в Москву. Компанеец – прекрасный популяризатор. После его смерти я принял участие в переиздании его научно-популярных книг, и очень рад, что они обрели вторую жизнь.

По моим ощущениям научные работники, пишущие научно-популярные статьи и книги, несколько стесняются этого. Иногда даже оправдываются: “Надо подработать...”. Или: “Меня уговорили...”. Никогда сколько-нибудь серьёзно не обсуждались опубликованные статьи, книги. Поэтому особенно приятно, когда кто-то из тех, к кому ты относишься с почтением, “замечает” твою статью, брошюру, книгу. В своих отрывочных воспоминаниях о М.А.Леонтовиче я писал, как был рад, когда на доске в своём кабинете в ИФП увидел надпись М.А., который хвалил мою статью в журнале “Природа” о магнонах.

Изданная в Москве книга “Электроны, фононы, магноны” имеет свою предшественницу, вышедшую в 1978 году под тем же названием, но польски в Варшаве, в издательстве PWN. Вышла заботами моих друзей – польских (вроцлавских) физиков Яцека Ковальского и Тадеуша Пашкевича. С их помощью и с моим участием были отобраны статьи и брошюры, которые, собранные вместе и переведённые ими на польский язык, составили книгу. Книга вышла, и “я понял, что мне хочется иметь подобную книгу на русском языке” (из предисловия к русскому изданию “Электронов, фононов, магнонов”).

В 1993 году во Вроцлаве, в Издательстве Вроцлавского университета вышла моя книга “Этюды о физике твёрдого тела”, в предисловии к которой я написал: “Эта уже вторая моя книжка, которая выходит раньше на польском языке, чем на моём родном русском”. Инициатор издания, научный редактор и основной переводчик Тадеуш Пашкевич. По-русски эта книга вовсе не вышла.

Оценкой коллегами моих научно-популярных произведений я очень дорожу. Мне приятно вспомнить следующий эпизод. Два месяца я был гостем Берлинского университета, где читал сжатый курс квантовой теории твёрдого тела. В одно из воскресений знакомый профессор пригласил меня с женой на обед. Надо сказать, времяпрепровождение было хорошо продумано: вместо скучного сидения за столом, после обеда нам устроили прекрасную прогулку по озеру на пароходике (дом стоял на берегу озера), а перед уходом я получил замечательный “подарок”. Хозяин увёл меня в свой кабинет и продемонстрировал мою книгу “Электронны, фононы, магноны” на русском. На полях книги был написан перевод многих терминов на немецкий – так профессор готовился к лекциям.

Многие годы я был просто невыездным (к счастью, этот термин уже многим непонятен). После переезда в Москву (1970) начал выезжать. На Запад редко, но в страны Восточной Европы – сравнительно часто. Особенно часто в Польшу и в ГДР. Поэтому неудивительно, что и в Польше, и в ГДР выходили переводы книг, написанных мною или с моим участием. Несколько книг вышли и в уже объединённой Германии. Особенно меня радует, что одна из них была мною написана в соавторстве с моим другом Эберхардом Егером после выхода на пенсию, здесь, в Бостоне: E. Jaeger, M.I.Kaganov, “Grundlagen der Festkoerperphysik” (Verlag Harry Deutsch, 2000). По-немецки название (“Основы физики твёрдого тела”) звучит особенно торжественно. Эту книгу не вполне законно причислять к научно-популярным. Это учебник для будущих инженеров, которые не могут обойтись без знания основ физики твёрдого тела.

Многие годы я был связан с Физической редакцией издательства “Советская энциклопедия” (теперь оно называется: Научное издательство “Большая Российская энциклопедия”): писал статьи по теории твёрдого тела, числился в консультантах при Редакции физики, помогал в подборе авторов, рецензировал, а иногда и редактировал статьи своих коллег. Работа в Энциклопедии доставляла мне удовольствие и казалась полезной. Плохо помню свои самые первые шаги на этом поприще, но хорошо запомнил, как вместе с Евгением Станиславовичем Боровиком писал большую статью “Металлы” для Физического словаря. Было это в 60-е годы. Это была хорошая

школа. Евгений Станиславович относился к работе с предельной серьёзностью. Прекрасно зная накопленный за столетия исследования металлов огромный экспериментальный материал, он понимал, какие сведения сохранили свою ценность и будут полезны будущим читателям. Работали, как правило, мы на квартире Боровика. Я с удовольствием приходил к нему, так как немедленно попадал в какую-то удивительно рабочую атмосферу. Соавторство – непростое дело. Ни разу, ни по какому поводу не возникала нервозность. Это не значит, что мы всегда были согласны друг с другом. Меня больше тянуло к теории, а моему соавтору хотелось наполнить статью экспериментальными данными. Обсуждали, выбирали, сопоставляли... Всё это спокойно, прислушиваясь к чужому мнению. И, признаюсь, спокойствие – заслуга Евгения Станиславовича.

В современной Физической энциклопедии, последний, пятый том которой вышел в 1998 году, статья “Металлы” написана В.С.Эдельманом и мною.

Когда я начинал этот раздел, то не предполагал перечислять свои научно-популярные брошюры и книги, а тем более статьи в Энциклопедии. Я хотел, “привязавшись” к слову магнетизм, перейти к работам по теории магнетизма, но ... не получилось: интерес к научно-популяризаторской деятельности не позволил мне пренебречь своим участием в этом, как мне представляется, необычайно важном деле. Следующий раздел, действительно, будет посвящён магнетизму. Этот раздел естественно закончить упоминанием книги из Библиотечки “Квант”: М.И.Каганов, В.М.Цукерник “Природа магнетизма”(Москва, “Наука”, 1982) . Книга мне эта очень дорога. Прежде всего, потому что написана в соавторстве с Витей Цукерником. У нас много совместных статей, но общая книга одна. Кроме того, написав “Природу магнетизма”, мы осуществили то, что запланировали. “Название книги довольно точно обозначает тему. Мы постарались рассказать о природе магнетизма,” – так начинается Введение. Постарались рассказать и рассказали. Теперь, через более чем 20 лет можно не скромничать: замысел удался. Если бы “Природу магнетизма” удалось переиздать (такой план у нас был, а её содержание не устарело), то, вполне естественно, было бы что

добавить. Но, когда один из нас в Израиле, а другой в Америке, трудно надеяться, что план будет реализован. Но ведь пометчать можно...

МАГНОНЫ В ФЕРРОМАГНЕТИКАХ И АНТИФЕРРОМАГНЕТИКАХ

Твёрдое тело (для меня) как объект теорфизической деятельности уже давно превратилось в носителя газов квазичастиц. Кристаллическая решётка заменяет собой пространство, в котором квазичастицы движутся. Оно же задаёт квазичастицам симметрию.

Обязательно в теле есть фононы. Их может быть много разных. Все они бозоны. Всегда есть акустические фононы. Именно они играют главную роль в низкотемпературных свойствах твёрдых тел. Под влиянием криогенщиков УФТИ, а потом ИФП больше всего меня интересовали свойства твёрдых тел при низких температурах. И с этой точки зрения магнетик для меня – вещество, у которого, кроме фононов, есть специфические бозоны – магноны. Годом рождения магнонов (спиновых волн) в ферромагнетике надо считать 1930 год, когда Ф.Блох (F.Bloch) рассмотрел элементарное возбуждение в системе строго упорядоченных атомных спинов в кристалле. Оказалось, что магноны с малыми квазиимпульсами очень похожи на обычные частицы, так как их закон дисперсии, если не учитывать малые релятивистские слагаемые в гамильтониане, квадратичен.

Когда мы (В.Цукерник и я) по совету А.И.Ахиезера начали заниматься низкотемпературными свойствами ферромагнетиков (1949), магноны ещё были экзотическими квазичастицами. Их историография (по крайней мере для нас) ограничивалась, кроме работы Блоха (F.Bloch, *Zs. f. Phys.* **61**, 206, 1930), работой Гольштейна – Примакова (Т.Holstein, Н.Primakoff, *Phys.Rev.* **58**, 1098, 1940), в которой аппарат вторичного квантования впервые применён к магнонам, а также А.И.Ахиезера (*J. Phys. USSR*, **10**, 217, 1946), вычислившего времена жизни магнонов за счёт их взаимодействия друг с другом и с фононами.

Специфика магнонов по сравнению с фононами не только в том, что они описывают спиновый беспорядок. Надо подчеркнуть два обстоятельства.

Первое. Существование двух различных межатомных взаимодействий, формирующих энергетический спектр магнетиков: большого обменного и, как правило, значительно меньшего релятивистского.

Второе. Приближённый характер статистики магнонов.

Первое обстоятельство, играя заметную роль, иногда помогает, иногда, наоборот, осложняет расчёт конкретных характеристик магнетиков. С самого начала нашей деятельности мы это обстоятельство учитывали. Это позволило, например, ввести различные времена релаксации: одни – для тех процессов, в которых числа магнонов сохраняются, другие для процессов, в которых число магнонов не сохраняется.

Обменное взаимодействие особенно существенно при выводе закона дисперсии магнонов. Магноны в ферромагнетиках похожи на обычные частицы, а в антиферромагнетиках – на звуковые волны именно в обменном приближении. Учёт релятивистских взаимодействий усложняет зависимость энергии магнона от квазиимпульса. Усложнения избежать нельзя, так как существует область температур, когда пренебрежение релятивистскими взаимодействиями в спектре магнонов вносит грубые ошибки в величину и, главное, температурную зависимость магнитных характеристик.

Похоже, В.Цукерник и я первые (в 1956 году) вычислили температурные зависимости магнитного момента и магнонной теплоёмкости ферромагнетика с учётом релятивистских взаимодействий (опубликована статья в ФММ, 1957, т.V, вып.3, стр. 561). С этой работой связано воспоминание (одновременно приятное и грустное). Постановку работы я обсуждал с Ландау. На каком-то этапе мы договорились о совместной (втроём) публикации. Однако, вскоре выяснилось, что тот совет, который дал мне (нам) Ландау, можно было почерпнуть из статьи С.Herring, C.Kittel, Phys. Rev. 1951, **81**, 869. Ландау отказался от соавторства.

Второе обстоятельство – приближённый характер статистики магнонов – следствие правил коммутации компонент магнитного момента, которые только приближённо удаётся свести к бозевским правилам коммутации. Существующие, но весьма часто отбрасываемые члены разложения описывают так называемое кинематическое взаимодействие. Было известно, что весь подход, строго говоря, справедлив для атомов, обладающих

достаточно большим спином S . Малым параметром служит обратная величина $1/S$. Однако, в случае обычных трёхмерных магнетиков магноны – бозоны хорошо описывали экспериментальную ситуацию даже тогда, когда спин атома был порядка единицы.

После 1956 года многие считали, что для ферромагнетиков ситуация оправдана Ф.Дайсоном (F.Dyson, Phys.Rev. 1956, **102**, 1217), который “доказал”, что при температуре значительно ниже температуры Кюри можно пользоваться разложением Гольштейна-Примакова. Слово “доказал” взял в кавычки: до сих пор попытки совершенствовать квантовую модель магнонов не прекратились.

Мне казалось, что трудности, обязанные тому, что в ферромагнетиках величина спина порядка единицы, можно преодолеть, используя макроскопический подход по аналогии с теорией упругости. Магноны при таком подходе – кванты колебаний плотностей магнитных моментов M , магнитных подрешёток, число которых равно числу неэквивалентных магнитных атомов в элементарной ячейке кристалла. Потом выяснилось, что, строго говоря, точность макроскопического подхода не превосходит точности микроскопического описания (хочу подчеркнуть, Витя Цукерник в этом убедился раньше меня и убедил меня), но некоторые преимущества от введения макроскопических величин всё же возникают, так как многие величины приобретают наглядный смысл.

И ещё: вывод закона дисперсии длинноволновых спиновых волн при макроскопическом подходе приобретает убедительность. По предложению Вити, исходя из двуподрешёточной модели, мы определили спектр спиновых волн в антиферромагнетиках (“К теории антиферромагнетизма при низких температурах”, М.И.Каганов, В.М.Цукерник, ЖЭТФ, **34**, 106, 1958). В этой работе, кроме того, вычислены температурные зависимости продольной и поперечной магнитных восприимчивостей, а также – спиновой части теплоёмкости. На эту работу, приятно отметить, есть ссылка в Курсе теоретической физики (т. IX, Москва, “Наука”, 1978, Е.М.Лифшиц, Л.П.Питаевский, Статистическая физика, часть 2, стр. 368). У нашей работы есть ещё одно немаловажное достоинство. Ознакомившись с ней, Ландау признал, что есть возможность получать разумные теоретические результаты

о поведении антиферромагнетиков при низких температурах. До этого Ландау придерживался негативной позиции, считая, что для построения теории надо прежде всего знать основное состояние антиферромагнетика. Подход, используемый нами, как бы снимал этот вопрос.

Как я уже писал, теорией магнетизма я занимался всю свою жизнь. Некоторые из результатов вошли в мою докторскую диссертацию, большинство – в обзоры, написанные в соавторстве с моими коллегами.

Первый из обзоров, посвящённый магнитной тематике, в виде двух частей опубликован в УФН в 1960 году (А.И.Ахиезер, В.Г.Барьяхтар, М.И.Каганов, “Спиновые волны в ферромагнетиках и антиферромагнетиках”, 71, 533 и 72, 3). Написание обзора под руководством и при непосредственном участии Александра Ильича, несомненно, было очень полезной школой. В дальнейшем всегда старался следовать его советам, на которые он не скупился.

Через некоторое время (уже без меня, с участием С.В.Пелетминского) обзор был значительно переработан, расширен и превращён в монографию “Спиновые волны” (Москва, “Наука”, 1967). “Спиновые волны” – первая монография в мировой литературе по этой тематике. На ней воспитывалось несколько поколений физиков. Сожалею ли я, что монография писалась без меня? Мне трудно однозначно ответить на этот вопрос. Когда началась работа над будущей книгой, я был занят с И.М.Лифшицем писанием обзоров по электронной теории металлов, которые потом тоже стали основой монографии. Сидеть на двух стульях неудобно. Мне пришлось отказаться от соавторства в “Спиновых волнах”. Думаю, поступил правильно.

ВЫБОР ТЕМЫ

Моя жизнь физика-теоретика была свободной. И в УФТИ, и в ИФП я мог заниматься тем, чем хотел. Такая ситуация имеет несомненные преимущества. Но надо признаться, не только. Поэт сказал: “Но самое страшное – это инерция стиля”. Относится сентенция не только к поэзии. Можно годами делать грамотные работы, которые не встречают серьёзных претензий рецензентов, их публикуют достаточно престижные журналы, но если проанализировать, как их цитируют, то выяснится: если и цитируют, то

твои коллеги и ученики, а широкой научной общественностью они вовсе не востребованы. Я не сторонник оценки научных работников по индексу цитирования. Есть много искусственных (и искусных!) приёмов быть процитированным. Но при самооценке игнорировать невостребованность твоих работ нельзя. Короче, тонкий вопрос, о котором стоит думать.

Сейчас меня волнуют не те работы, которые делаются “по инерции”, а то, как возникает новая проблематика. Мой жизненный опыт показывает, что часто это происходит случайно. Приведу несколько примеров.

Взаимодействию фононной и электронной подсистем металла посвящено много работ, сделанных мною с соавторами. Для меня всё началось с работы 1957 года (А.И.Ахиезер, М.И.Каганов, Г.Я.Любарский, “Поглощение ультразвука в металлах”, ЖЭТФ, **32**, 837). Должен сказать, занимательно перечитать старую работу, особенно такую, которую последующие работы не перечеркнули. Похоже, у нашей работы именно такая судьба.

Итак, перечитываю. Если бы я не был соавтором, то был бы уверен, что работа эта – непосредственное развитие работ Л.Д.Ландау и Ю.Б.Румера, а также А.И.Ахиезера по поглощению звука в твёрдых телах: первые ссылки в коротком перечне источников именно на их работы. Инициатором этой работы был, действительно, Ахиезер. Но я хорошо помню, как обстояло дело. Незадолго до того, как А.И. сформулировал задачу, Марком Азбелем и мною была построена кинетическая теория аномального скин-эффекта в металлах с поверхностью Ферми произвольной формы – обобщение работы Reuter’a, Sondheimer’a 1948 года (эти работы я уже упоминал). Построение базировалось на методе Винера – Хопфа решения интегральных уравнений с разностным ядром на полуоси. Кроме того, знаю, что примерно тогда же Ахиезер и Любарский вычислили альбеда нейтронов, что потребовало использования метода Винера – Хопфа. Александру Ильичу очень хотелось найти возможность ещё где-нибудь применить метод Винера – Хопфа. Ему показалось, что поглощение звука, длина волны λ которого меньше длины свободного пробега l электронов проводимости, подходит. Довольно скоро выяснилось, что можно обойтись без интегрального уравнения (теория скин-эффекта сложнее), но задача о вычислении коэффициента поглощения звука

при $l \gg \lambda$ оказалась и сама по себе очень интересной, и, как принято говорить, продуктивной (уж для меня – во всяком случае): за работой 1957 года последовало много разных работ, в которых я не только принимал участие, но часто был и инициатором.

Читая работу, я обратил внимание на то, что ссылки на работы по теории аномального скин-эффекта нет. Уверен, что никакого нарочитого замалчивания не было. Не надо решать интегральное уравнение, нечего и думать об аномальном скин-эффекте!

И ещё. В конце работы показано, что при $l \gg \lambda$ взаимодействие электронов со звуковой волной можно рассматривать как поглощение и испускание отдельных фононов. Тонкость в том, что обычно условие применимости такого подхода жёстче: $\omega\tau \gg 1$, где ω – частота звука, а τ – время свободного пробега электронов; так как $\omega\tau = (s/v)(l/\lambda)$ (s – скорость звука, а v – фермиевская скорость, $s/v \approx 10^{-3}$), то в данном случае подход применим даже при $\omega\tau \ll 1$, лишь бы длина пробега была велика ($l \gg \lambda$). Несомненно, существенный результат! Значительно позже я высказывал мысль, что наше рассмотрение позволяет по измерению коэффициента поглощения звука непосредственно измерить матричный элемент электрон-фононного взаимодействия. Этим соображением, кажется, воспользовался только А.Шепелев (сотрудник Криогенной лаборатории УФТИ). Помню, мы об этом с ним говорили.

Сейчас меня интересует другая сторона дела. Формула для коэффициента поглощения звука содержит δ -функцию, аргумент которой $\cos\theta - s/v$, где θ – угол между вектором скорости электрона и направлением звуковой волны. Равенство – очевидное условие черенковского излучения. Или условие затухания Ландау. Ни на одно, ни на другое нет ссылки. Подчеркну, и в этом случае никакого желания скрыть единство явлений не было. Оно (единство) не ощущалось.

Вернёмся к выбору тематики.

Интерес к сверхтекучести, к гелию у меня, можно сказать, был всегда. Когда-то с огромным удовольствием прочитал популярную книжку М.Бронштейна “Солнечное вещество”, знакомство с Криогенной лабораторией УФТИ началось с участия в работах Б.Н.Есельсона и Наташи

Березняк по сверхтекучести. Когда начал преподавать, с огромным интересом изучил обзоры Э.Л.Андроникашвили и Е.М.Лифшица, опубликованные в виде приложений к знаменитой монографии В.Х. Кеезома “Гелий” (книги у меня здесь нет, поэтому не могу дать точную ссылку). С воодушевлением пересказывал студентам обзоры, но самостоятельных работ по теории сверхтекучести у меня не было.

Когда неожиданно даже для близких смертельно заболел В.Л. Герман (1964), то харьковские физики и друзья В.Л. в Москве пытались помочь врачам (привозили консультантов, доставали дефицитные лекарства, организовывали консультации, даже доставили из Москвы машину искусственного дыхания). К сожалению, ни старания врачей, ни наша помощь не помогли. Не перенеся операцию, Вениамин Леонтьевич умер. Среди активно помогавших был и Игорь Адаменко – тогда аспирант Германа. В результате смерти руководителя он “осиротел”. Совместные усилия нас сблизили. Игорь пришёл ко мне за советом. “Чем Вы занимались с Вениамином Леонтьевичем?” – спросил я. Игорь ответил, что гидродинамикой. Я сказал, что лучше представляю себе двужидкостную гидродинамику, чем обычную. Игорь был согласен заняться сверхтекучестью под моим руководством. Первые работы по гелию мы сделали совместно и, насколько помню, темы исходили от меня: “Волновые процессы в плоскопараллельном капилляре, заполненном HeII” (ЖЭТФ, 1967, **53**, 615); “Теплообмен между твёрдым телом и гелием, заполняющим узкую щель” (ЖЭТФ, 1967, **53**, 886); “К кинетической теории поглощения четвёртого звука ”(ЖЭТФ, 1968, **54**, 689). По гелиевой тематике И.Н.Адаменко защитил кандидатскую диссертацию. Вскоре ни моё руководство, ни рекомендации для выбора тем Игорю были уже не нужны. У него установились тесные и плодотворные отношения с Отделом ФТИНТа, которым руководил Б.Н.Есельсон. Он превратился в серьёзного результативного физика-теоретика, интересы которого по-прежнему связаны со сверхтекучестью. Адаменко давно уже доктор и профессор. А я рад, что способствовал выбору им тематики, которой он посвятил свою жизнь. Правда, чуть жаль, что не сумел без Игоря продолжать заниматься He-II. Когда-то свою популярную статью в журнале “Природа” я назвал “Гелий продолжает удивлять”. Название

выражало и выражает мое отношение к гелию. Удивление уже давно испытываю издали. Правда, еще одна работа по гелиевой тематике у меня есть, дипломная работа Поддъячевой под моим и К.Н.Зиновьевой руководством (К.Н. – всемирно известный специалист по гелию, научный сотрудник ИФП): “К кинетической теории теплопроводности HeII в капиллярах” (М.И.Каганов, Е.В.Поддъячева, ЖЭТФ, 1986, **91**, 868). Даже по названию видно, что работа не вышла за пределы того круга тем, которыми мы занимались с Игорем Адаменко.

Казалось бы, моя жизнь физика-теоретика проходила в тесном контакте с экспериментаторами. Я не только работал в институтах, славящихся работами по экспериментальной физике, но и дружил с физиками-экспериментаторами. Всегда посещал семинары экспериментаторов и, думаю, понимал, чем они заняты, каковы полученные ими результаты. Несомненно, направление экспериментальных работ в УФТИ и в ИФП играло важную роль в выборе мною тем исследований. Но, не знаю почему, всего несколько раз тема работы родилась как непосредственная реакция на работу моего коллеги – экспериментатора. Сейчас в голову пришли два эпизода.

В конце 1969-го или в начале 1970-го на Ученом совете по физике твердого тела УФТИ И.А.Гиндин, Б.Г.Лазарев, Я.Д.Стародубов и В.П.Лебедев докладывали работу, в которой авторы убедительно демонстрировали увеличение пластичности металла при переходе в сверхпроводящее состояние (перечислил авторов в том порядке, в котором они указаны в публикациях: ДАН СССР, **188**, 803; Письма в ЖЭТФ, **11**, 288, 1970). Подобные наблюдения в те годы были привлекающей внимание экзотикой: господствовала мысль, что при переходе в сверхпроводящее состояние с кристаллической решеткой практически ничего не происходит, а пластичность – несомненно свойство кристаллической решетки. По-моему, не дождавшись конца доклада, я подошел к Василию Дмитриевичу Нацику и предложил ему совместно рассмотреть эффект уменьшения трения дислокаций об электроны проводимости при сверхпроводящем переходе. То, что электроны оказывают заметное тормозящее влияние на дислокации, мы знали по работам В.Я.Кравченко (см., в частности, ФТТ, **8**, 927, 1966). Вскоре появилась в Письмах в ЖЭТФ наша публикация (**11**, 550, 1970), а через несколько лет уже

с участием Кравченко мы опубликовали в УФН большой обзор “Электронное торможение дислокаций в металле” (111, 649, 1973). Хочу подчекнуть, что с удовольствием вспоминаю об этих работах не только потому, что считаю их важными, но и потому, что между мной и Васей Нациком возникла дружба, которую я очень ценю.

Если для Нацика работы о роли сверхпроводящего перехода в пластичности металла – один из этапов его исследований механических свойств твёрдых тел (поведения дислокаций и других дефектов кристаллической решётки при низких температурах), для меня эти же работы – составная часть изучения электронного ветра. Об электронном ветре постараюсь рассказать отдельно.

Следующий эпизод непосредственного влияния результатов экспериментов на выбор темы теоретического рассмотрения произошёл в ИФП. Н.В.Заварицкий изучал акустоэлектрический эффект в олове (Письма в ЖЭТФ, 25, 61, 1977) и обнаружил, что анизотропия эффекта не совпадает с анизотропией поглощения звука, хотя было очевидно, что оба эффекта определяются общим механизмом. Примитивная теория акустоэлектрического эффекта существовала и предсказывала пропорциональность акустоэлектрической разности потенциалов коэффициенту поглощения звука – соотношение Вайнрайха (G.Weinreich, Phys. Rev., 107, 317, 1957). Мы предположили, что пропорциональность двух коэффициентов возникла из-за переупрощённости модели. Расчёт полностью подтвердил предположение. Первая публикация была совместной с Заварицким (Н.В.Заварицкий, М.И.Каганов, Ш.Т.Мевлют, Письма в ЖЭТФ, 28, 223, 1978). Шевхи Мевлют – мой аспирант тех лет. И в этом рассмотрении было неоправданное предположение: мы пренебрегли приходным членом в интеграле столкновений электронов. На то, что в данном случае так делать нельзя, наше внимание обратил сотрудник ИРЭ АН СССР П.Е. Зильберман. Замечу, это был хороший урок: казалось, пренебрежение оправдано. Никогда не лишне проверить себя. Пока мы обобщали работу, предполагая интеграл столкновений произвольным эрмитовым оператором, выяснилось, что теорией акустоэлектрического эффекта занимаемся не только мы, но и И.М.Суслов – ученик А.Ф.Андреева. Мы объединили усилия, и появилась

работа в ЖЭТФе (М.И.Каганов, Ш.Т.Мевлют, И.М.Суслов, 78, 376, 1980). Так как мы включили в рассмотрение влияние постоянного магнитного поля, то, учтя естественную эрмитовость оператора столкновений, нам удалось выразить акустоэлектрические характеристики через функцию, описывающую гальваномагнитные явления. Вывод соответствующих соотношений доставил авторам удовольствие. Как мы ожидали, они подтвердили возможность отличия анизотропии поглощения звука и акустоэлектрического эффекта. Статья в Письмах в ЖЭТФ заканчивается фразой: “Детальное сравнение теории с экспериментом требует численных расчётов, использующих определённую модель поверхности Ферми”. Стыдно признаваться, но до детального сравнения теории с экспериментом так дело и не дошло.

ЭЛЕКТРОННЫЙ ВЕТЕР

Термин *электронный ветер* не очень часто употребляется. Но в Физической энциклопедии статья с таким названием есть. Написал её В.Д.Надик по моей просьбе: С.М.Шапиро – научный редактор Редакции физики попросила меня, как консультанта, найти автора. Вот я и нашёл.

Почти дословно цитирую определение из статьи. Электронный ветер – эффект “увлечения” током в электронных проводниках собственных ионов и дефектов структуры. Обязан нарушению детального механического равновесия в электрическом поле и перераспределению импульса между электронами и решёткой. В скобках добавлено: “Примером ещё одного эффекта такого типа является возбуждение звука в металле электромагнитной волной.” Именно этому “ещё одному эффекту” посвящены работы по электронному ветру с моим участием, а в некоторых случаях под моим руководством.

Трансформацией электромагнитной энергии в звуковую я начал заниматься под влиянием своего друга Владимира Борисовича Фикса. Многие годы В.Б. интересовался явлениями, связанными с электронным ветром. Его докторская диссертация посвящена ионному переносу в электронных проводниках. На её основе им опубликована монография “Ионная проводимость в металлах и полупроводниках (электроперенос)” (Москва, “Наука”, 1969). Автор предисловия И.М.Лифшиц высоко оценил монографию

и отметил: “Множество эффектов..., обусловленные пространственной неоднородностью силы электронного ветра, рассматриваются автором с единых позиций; благодаря этому, обнаруживается внутренняя связь столь далеких на первый взгляд явлений, как миграция ионов и возбуждение звука электромагнитной волной.”

Первая наша совместная работа по возбуждению звука в металле полностью изложена Володей в монографии (гл. IX, параграф 8). Постановка задачи несколько отличается от большинства последующих работ, в которых рассмотрено падение электромагнитной волны на поверхность металла. Источником звука в нашей первой работе (М.И.Каганов, В.Б.Фикс, ФММ, **19**, 489, 1965) служит переменный ток в тонком слое металла на поверхности диэлектрика. Сравнение этой работы с серией работ В.Б.Фикса и Г.Е.Пикуса (ФТТ, **1**, 1062, 1147, 1959; **2**, 65, 1960), в которых теоретически исследованы разнообразные электрокинетические эффекты, показывает, что природа и электрокинетических, и электроакустических эффектов едина. Действительно, электроны приобретенный от электрического поля импульс отдают кристаллической решетке. В среднем электроны движутся с постоянной скоростью, существует механическое равновесие. Перераспределение по образцу полного импульса, отдаваемого электронами решетке, приводит к возникновению силового диполя. Именно силовой диполь – причина электрокинетических явлений при постоянном токе и электроакустических – при переменном.

Вспоминая наши с Володей разговоры о том, следует ли изучать столь незначительный эффект: коэффициент трансформации электромагнитной энергии в звуковую очень мал. “Не бывает маленьких и больших эффектов, бывают наблюдаемые и ненаблюдаемые,” – запальчиво убеждал меня мой друг. И ... нам повезло: в эти же годы эффект был обнаружен (B.Abeles, Phys. Rev. **19**, 1181, 1969), энтузиазм возрос, и трансформация электромагнитной энергии в звуковую стала одной из тех тем, которыми я был занят многие годы. Естественным образом привлекались молодые сотрудники. Для некоторых эта тема стала основной в их научной карьере (например, для Г. Ивановски, который вполне самостоятельно делает интересные работы по взаимодействию электромагнитных и звуковых волн в металлах со своими

учениками; он создал свою школу в Македонии, а начинал как мой дипломник и аспирант).

Физикой электромагнитно-акустического преобразования (ЭМАП) энергично занимались в лаборатории Ю.П.Гайдукова (А.Н.Васильев и др.). Меня с этой лабораторией связывали дружеские отношения. Возникали обсуждения, появились совместные публикации (не только в ЖЭТФе, но и в УФН).

Своеобразный итог работам по ЭМАП подведен в вышедшей недавно книге А.Н.Васильева, В.Д.Бучельникова, С.Ю.Гуревича, М.И.Каганова, Ю.П.Гайдукова “Электромагнитное возбуждение звука в металлах” (Челябинск – Москва, Из-во ЮУрГУ). Челябинск “возник” не только потому, что выпускник нашей кафедры В.Д.Бучельников – профессор Южно-Уральского Университета, но и потому, что ЭМАП оказалось эффективным методом определения параметров металлических изделий, использованным на металлургических заводах Урала. Его преимущество в том, что звук в образце возбуждается без механического контакта с поверхностью образца.

Возникновение распределенной силы (силового диполя) вызвано длиной пробега: в одном месте электрон приобретает импульс от электрического поля, а в другом отдает его решетке. Ясно, что ЭМАП и аномальный скин-эффект имеют общую природу. Можно сказать, что преобразование возможно в меру аномальности скин-эффекта. Даже когда импеданс и глубина скин-слоя соответствуют нормальному скин-эффекту, ЭМАП обусловлен нелокальностью взаимодействия электронов с электрическим полем и решеткой (и тогда, когда нелокальность очень слаба). Эта сторона ЭМАП меня особенно интересовала. В то время, когда описываемая деятельность была модна, много споров было связано с приоритетом: кто какую форму записи силы, действующей на решетку со стороны электронов, предложил. Мы (В.Б. и я) старались в спорах не принимать участия.

Для себя я декларировал, что пользуюсь известными уравнениями для расчета неизвестных эффектов. Из этого правила есть исключение. В ранее цитированной работе В.М.Цукерника и моей было показано, что в определенных условиях при падении электромагнитной волны на поверхность

металла в металле возникают колебания температуры, пропорциональные амплитуде волны. Так как термоупругие силы очень велики, то, возможно, колебания температуры смогут себя проявить, как дополнительный механизм трансформации электромагнитной энергии в звуковую. Соответствующий расчет был мною проделан в работе, опубликованной в ЖЭТФе (98, 1828, 1990). Необходимую анизотропию для возбуждения колебаний температуры может создать магнитное поле. Как это проявится в ЭМАП, выяснено в работе М.И. Каганова и Ф.М. Мааллави "Роль эффекта Нернста в электромагнитно-акустическом преобразовании" (ФНТ, 18, 737, 1992). В связи с этими расчетами возник вопрос, есть ли аналог аномального скин-эффекта для тепловой волны. Ответ отрицателен: длина свободного пробега превышает глубину проникновения тепловой волны δ_T лишь при $\omega\tau \gg 1$, когда понятие переменной температуры теряет смысл. В связи с тем, что в условиях аномального скин-эффекта глубина скин-слоя $\delta < \delta_T$, удается сформулировать эффективные граничные условия к уравнению теплопроводности и вывести формулы ЭМАП при высоких частотах. Результат опубликован в работе А.Н. Васильева, Ю.П. Гайдукова, М.И. Каганова и Е.Г. Кругликова (ЖЭТФ, 101, 671, 1992).

Идейно близка к описанным наша (В.Б.Фикса и моя) работа "К теории электромеханических сил в металлах" (ЖЭТФ, 73, 753, 1977). В ней рассмотрен механизм возникновения электромеханических сил, создаваемых током и сконцентрированных у границ кристаллитов. Работа носит предварительный характер, если думать о построении теории электропластических эффектов (для чего она и задумывалась), но интересна, так как предсказывает своеобразный механизм рассеяния электронов на межкуристаллитной границе, когда последняя не содержит никаких посторонних включений (граница двойника, например). Хотя выбрана простейшая модель (с обеих сторон от границы поверхности Ферми – эллипсоиды, повернутые друг относительно друга), удалось показать, что возможно полное внутреннее отражение электронной волны при падении на границу. Работа должна быть полезной при построении теории остаточного сопротивления в предельно чистых поликристаллах.

Ξ-ВСПЫШКИ

Хотя 21 год я был сотрудником УФТИ, входившего в систему учреждений, занятых атомной проблемой, у меня нет засекреченных работ, но, просматривая статью о Ξ-вспышках, обратил внимание на примечание: “Основные результаты настоящей работы содержатся в отчетах ФТИ АН СССР за 1951—1952 гг. При подготовке статьи к публикации были учтены работы, появившиеся после 1952 г.” Работа, о которой идет речь (И.М. Лифшиц, М.И. Каганов и Л.В. Танатаров “К теории радиационных изменений в металлах”), опубликована в 1959 году (журнал “Атомная энергия”, 6, 391). Сначала засекретили, а потом рассекретили.

Теория Ξ-вспышек строилась для объяснения свойств материалов, которые находятся под воздействием осколков деления ядер урана. В материалах под облучением наблюдают изменения, которые обычно происходят при высоких температурах. Среднюю температуру поддерживают низкой, но это не помогает – изменения происходят.

Наша статья (трех авторов) была развитием работы И.М.Лифшица (ДАН СССР, 1956, 109, 1109). Задача, прежде всего, заключалась в том, чтобы сделать теорию Ильи Михайловича доступной для экспериментаторов: статья в Докладах Академии Наук была слишком плотно насыщена математикой. Кроме того, в работе содержится важное обобщение. Дело в том, что большую часть своей энергии осколок отдает электронам, которые более свободно, чем непосредственно решетка, разносят ее по кристаллу. Для рассмотрения происходящего была избрана двухтемпературная модель. Весь расчет производился в предположении, что температуры электронов и решетки не совпадают, а теплообмен между двумя подсистемами осуществляется излучением фононов электронами. Незадолго до рассмотрения радиационных изменений в металлах мы в том же составе исследовали теплообмен между электронами и решеткой (М.И. Каганов, И.М. Лифшиц, Л.В. Танатаров, “Релаксация между электронами и решеткой”, ЖЭТФ, 31, 232, 1956¹⁰).

¹⁰ Эта работа тоже содержит примечание о том, что выполнена за несколько лет до публикации. Не могу вспомнить, причина задержки – засекреченность или инерция авторов.

Квазиравновесные состояния макроскопических систем были в 50-е годы модным объектом исследования. При рассмотрении кинетических явлений в ферро- и антиферромагнетиках учитывалась возможность различия температур фононов и магнонов. В какой-то мере такой подход объединял различные задачи, решение которых составило мою докторскую диссертацию.

Двутемпературная теория Ξ -вспышек была использована Я.Е.Гегузиным в связи с работами по образованию треков в кристаллах. Было показано, что трек (результат перекристаллизации) образуется только тогда, когда электроны не могут слишком далеко разнести энергию, полученную от осколка. По этому поводу мы (И.М. Лифшиц, Я.Е. Гегузин и я) опубликовали заметку “Влияние свободного пробега электронов на образование трека вокруг траектории заряженной частицы в металле” (ФТТ, **15**, 2425, 1973). Не могу не вспомнить, что, когда я докладывал эту заметку на Ученом совете Института физических проблем, П.Л.Капица вслух удивился: “Казалось бы, такой сложный вопрос (будет трек или нет), а удастся дать полуколичественный ответ...”

Заканчивая о Ξ -вспышках, напомним: понимание механизма передачи энергии от осколка деления решетке позволило Инне и мне установить, что заряженная частица, пролетая через кристалл и тормозясь, генерирует в нем звуковые волны (И.М. Каганова, М.И. Каганов, ФТТ,**15**, 1536, 1973). Эту работу можно считать предвестником выполненных гораздо позже работ по ЭМАП, в которых важную роль играли термоупругие напряжения (см. предыдущий раздел).

Работа о генерации звука Ξ -вспышками в делящемся материале вызывает воспоминание о совещании в Обнинске, где я ее докладывал. В первом ряду сидели А.Ф. Прихотько и А.И. Лейпунский. Спускаюсь со сцены. Александр Ильич приглашает сесть рядом с ним, улыбается и говорит: “Значит, делящийся материал шуршит?! Надо бы прислушаться...”

СОАВТОРСТВО

Большинство работ написано мною в соавторстве. Мне хочется думать, что в подавляющем большинстве работы действительно были результатом совместного творчества – со-авторства. Не буду перечислять соавторов. Мне

хочется просто всех своих соавторов искренне поблагодарить и сказать, что многих работ попросту не было бы, не работая мы вместе.

Изредка к соавторству приводила дружба. Чаше – наоборот: в результате соавторства возникала дружба или, по крайней мере, тёплые отношения, которые я очень ценю.

Совместная работа – непростое дело. Вспоминаю историю первого восхождения на Эверест. Хилари и Тенсинг договорились, что никогда не скажут, кто первым вступил на вершину. Хилари не выдержал и проговорился, что он был первым. Когда речь идёт о мировых достижениях, наверное, трудно удержаться (хотя я не оправдываю Хилари), но и в процессе работы, которая не сулит Нобелевской премии, трудно не выпячивать свою роль. Брошенное как бы случайно: “Я же говорил, что так должно быть,” – может испортить настроение соавтору, особенно, если для получения результата, он потратил много усилий. Очень приятно было работать с Ильёй Михайловичем. Он умудрялся сочетать руководство, обучение с уважением к ученику-соавтору. Хочется думать, что хоть в какой-то мере я перенял от своего учителя эту манеру поведения.

ЗАКЛЮЧИТЕЛЬНЫЕ СЛОВА

Начиная перечень эпизодов, не представлял себе, какое это увлекательное занятие. Трудно остановиться. Но понимаю, что пора.

Каков итог? Я доволен своей судьбой. Большую часть жизни занимался делом, которое любил. Не слишком доволен собой. Можно было больше и лучше учиться. Следовало пытаться решать по-настоящему трудные задачи. Самокритика обусловлена не ощущением, что я что-то не сделал из того, что *должен* был сделать. Никому я ничего не должен, но несомненно получал бы очень большое удовольствие, преодолевая по-настоящему серьёзные трудности. Я же старался избегать трудных задач. “Лучше меньше, да лучше,” – правильная мысль. Только следовать ей непросто.

Belmont, MA, USA.

Июнь 2003г.

А.М.Ермолаев

Из воспоминаний “Мои университетские учителя”

*Теперь признаюсь: ворошу я свои воспоминания
главным образом для того, чтобы назвать имена.*

М.И.Каганов

За окнами университета – золотая осень 1960 года. А я шагаю по лестнице между деканатом физико-математического факультета и аудиторией на шестом этаже. Почти сталкиваюсь с человеком, идущим впереди меня. Он высок и строен. Его элегантный серый костюм гармонирует со светлой прядью тогда еще темных волос. Он как будто бы почувствовал мой взгляд, оглянулся. Красив. Живые темные глаза на смуглом лице, приветливая улыбка... Оказывается, мы направляемся в одну и ту же аудиторию! Он будет читать группе физиков-теоретиков, в которой я учусь, спецкурс “Квантовая теория металлов”. Представляется: Моисей Исаакович Каганов... Не мог я знать тогда, что Моисей Исаакович станет моим Учителем, укажет мне мою научную тропу.

Лекции Моисея Исааковича не были похожи на то, с чем я сталкивался раньше. В его изложении электроны проводимости металла оживали. На первый план выдвигались физические соображения “на пальцах”, как он любил говорить. Они подкреплялись красивой и нетривиальной математикой. Полученные формулы всесторонне обсуждались. Своим энтузиазмом он заряжал студенческую аудиторию, создавал атмосферу, в которой легко дышалось и работалось. Это была настоящая физика - не только глубокая, но

и романтическая. И сейчас, много лет спустя, я с волнением вспоминаю лекции Моисея Исааковича.

Хорошо помню экзамен по курсу М.И. Я должен был рассказать об энергетическом спектре жидкого гелия и о проводимости тонких пленок металлов. Кажется, М.И. остался доволен моим рассказом о фонах и ротонах в гелии, а при ответе на второй вопрос спросил:

- Какова причина неравновесности электронов в Вашей задаче?
- Время релаксации, - ответил я.
- Оно всегда есть!

Так и не смог я тогда сообразить, что только внешнее электрическое поле выводит электроны из состояния равновесия. М.И. сам подсказал мне ответ. На фоне блестящих ответов Юй Лу и других моих сокурсников я получил пятерку с минусом. М.И. никогда не забывает о том, как важно поддержать начинающего физика.

После окончания университета Владимир Игнатьевич Хоткевич пригласил меня на научную работу ассистентом кафедры экспериментальной физики. Нагрузка была огромная: решение задач по физике со студентами, лабораторные работы, политчасы, дежурства в студенческих общежитиях, поездки со студентами в колхоз. Для занятий научной работой оставалось совсем немного времени. Мне казалось, что я сам смогу найти теорфизическую задачу и решить ее. Пытался изучать обзоры Моисея Исааковича с А.И.Ахиезером и В.Г.Барьяхтаром по теории спиновых волн в магнетиках, опубликованные в УФН в 1960 году. Однако до собственной оригинальной задачи дело не доходило.

В то время я уже имел часть нагрузки по кафедре статистической физики и термодинамики, которой руководил Илья Михайлович Лифшиц. Мой друг И.И.Фалько посоветовал обратиться к Илье Михайловичу за помощью. Илья Михайлович сказал:

- Обратитесь к Моисею Исааковичу. Он ждет Вас.

Вскоре я получил первое задание от М.И. Он предложил изучить его обзор в УФН (1959), написанный вместе с И.М.Лифшицем. В процессе изучения обзора возникли контуры моей первой статьи (ФТТ, 1966). В ней речь шла о плотности электронных состояний в полупроводниках с решеткой вюрцита. Моисей Исаакович показал, как получаются общие формулы, как из

них извлекаются асимптотики, как надо писать текст статьи. Эти уроки забыть невозможно!

Мои встречи с М.И. стали регулярными. В то время он читал студентам физического факультета общий курс атомной и ядерной физики. Я посещал его лекции. Бережно храню конспекты этих лекций. Тогда у нас возникла идея превратить их в книгу. До сих пор по моей вине эта идея не реализована.

Пятидесятые и шестидесятые годы отмечены бурным развитием теоретической физики. Разрабатывались методы квантовой теории поля в статистической физике и кинетике, усилиями И.М.Лифшица и его учеников создавалась новая идеология в теории твердого тела, которая сейчас называется фермиологией, интенсивно изучались свойства сверхпроводников, все больше работ было посвящено теории неупорядоченных систем. М.И. обратил мое внимание на серию работ Ю.М.Кагана и А.П.Жернова, в которых рассматривалась электропроводность нормальных металлов с квазилокальными колебаниями примесных атомов в кристаллической решетке. Следуя методу упомянутых авторов, под руководством М.И. мне удалось рассчитать теплопроводность таких металлов. Эта работа вошла в мою кандидатскую диссертацию.

Получив очередное задание от М.И., я регулярно докладывал ему о ходе работы, результаты обсуждались в университете и, в основном, дома у Моисея Исааковича. Я приходил к нему в назначенное время и сталкивался с кем-то из учеников М.И., с которыми отработал раньше. Чаще всего это был мой сокурсник И.Н.Адаменко. Несмотря на непрерывный конвейер учеников, М.И. всегда готов обсуждать результаты, оказать помощь в трудных местах. Он находит время для обсуждения новостей, живо интересуется бытом молодых преподавателей. В свой первый визит я познакомился с супругой М.И. Эллой Мироновной. В минуты коротких перерывов она охотно участвовала в беседах. И сейчас, посещая уютный дворик на улице Чайковского, где жил Моисей Исаакович, всматриваясь в подъезд его дома, я вспоминаю наши встречи. Всегда с благодарностью буду помнить гостеприимство его семьи и те уроки, которые я получил.

Задача Ильи Михайловича и Моисея Исааковича о влиянии примесных атомов на энергетический спектр квазичастиц в твердых телах стала моей любимой. Летом 1967 года я пытался рассчитать спектр электронов в

металлах в поле изолированных примесных атомов и в магнитном поле. Полученную в процессе расчета плотность электронных состояний попытался использовать в теории эффекта де Гааза-ван Альфена. Работа продвигалась медленно. Я ждал осени, чтобы показать результат М.И. Он живо заинтересовался моими попытками и тут же вручил мне оттиски работ Н.Б.Брандта и Л.Г.Любутиной, которые экспериментально изучали эффект де Гааза-ван Альфена в примесных металлах. Вместе с М.И. мы довели расчеты до конца, сравнили с опытом. Оказалось, что наши формулы объясняют биения в эффекте де Гааза-ван Альфена, обнаруженные Н.Б.Брандтом и Л.Г.Любутиной. В процессе обсуждения этого результата с М.И. он спросил меня:

- Почему же Вы не волнуетесь?

Я ответил:

- Я переволновался вчера.

Так появилась моя первая статья с Моисеем Исааковичем.

М.И. посоветовал мне поехать в Москву и показать результат Николаю Борисовичу Брандту. В начале апреля 1968 г. я докладывал эту работу на семинаре Н.Б. в МГУ. Не мог понять странной реакции аудитории на упоминание об уровнях Ландау. Лишь после доклада я узнал о смерти Л.Д.Ландау и о том, что похороны состоятся через несколько часов. На похоронах я встретил Моисея Исааковича, увидел А.Б.Мигдала, В.А.Фока, И.М.Халатникова. Самого Л.Д.Ландау я увидел впервые в Харьковском университете незадолго до трагической автомобильной катастрофы. Он выступал тогда с докладом "Фундаментальные проблемы физики".

Результаты изучения эффекта де Гааза-ван Альфена в примесных металлах я докладывал на городском семинаре И.М.Лифшица. К сожалению, он сам не смог присутствовать на докладе. Появился после семинара. М.И. коротко сообщил ему основной результат. Илья Михайлович поинтересовался величиной эффекта. М.И. ему сразу ответил. Так я получил одобрение Ильи Михайловича и вскоре приступил к написанию текста кандидатской диссертации.

В процессе работы над диссертацией мы успели с М.И. подготовить к печати статью о влиянии магнитного поля на интеграл косвенного обменного

взаимодействия и спектр спиновых волн в магнетиках. Эта работа также вошла в диссертацию.

В то время, когда я сочинял текст кандидатской диссертации, М.И. сам взялся за обработку своих лекций по атомной физике. Он написал брошюру "Атомная физика и сегодняшняя картина мира" и пригласил меня в соавторы. Я до сих пор не могу вспомнить, какой же мой вклад в эту работу. Кажется, нулевой. Между тем эта брошюра, изданная в Москве (Знание, 1971), сыграла и продолжает играть огромную роль в моей карьере. Методическая работа - чуть ли не главная обязанность преподавателя университета. Совсем недавно эта брошюра помогла мне получить профессорский аттестат. Без нее никакие научные достижения в расчет не были бы приняты. За эту брошюру мы с М.И. в 1972 г. на Всесоюзном конкурсе на лучшие произведения научно-популярной литературы получили Диплом второй степени.

После защиты кандидатской диссертации 25.12.69 состоялась традиционная вечеринка в ресторане "Динамо". К сожалению Моисей Исаакович был без Эллы Мироновны. Присутствовал американский теоретик Лео Каданов, который гостил у Вали и Игоря Фалько. Они показали ему всю процедуру защиты диссертации в СССР. Жаль, что этот ресторан вскоре сгорел и от того памятного для меня места не осталось даже следа.

В 1970 г. М.И. получил предложение И.М.Лифшица и П.Л.Капицы занять должность старшего научного сотрудника теоретического отдела Института физических проблем в Москве. Наши встречи стали менее частыми. Но помощь и поддержку М.И. я ощущаю всегда. В 1978 г. вместе с польским физиком С.Клямой он опубликовал работу по эффекту де Гааза-ван Альфена в проводниках с магнитопримесными состояниями электронов. Так называются состояния и уровни, отщепленные от уровней Ландау примесными атомами донорного типа. Эта работа пробудила меня от послезащитной спячки. Следуя подходу М.И., я рассчитал электропроводность металлов с магнитопримесными состояниями и обнаружил участок, на котором магнитосопротивление линейно растет с ростом поля. Написал об этом М.И. Он посоветовал опубликовать результат как можно скорее.

Логика развития теории магнитопримесных состояний привела к тому, что я занялся расчетами высокочастотной проводимости металлов с такими

состояниями. Эта задача, естественно, попала в круг интересов Э.А.Канера. Вместе с ним мы опубликовали несколько работ, в которых были обнаружены новые ветви в спектре электромагнитных волн. Эти ветви были названы нами магнитопримесными волнами. Моисей Исаакович рецензировал эти работы, давал советы, высказывал пожелания. Это было уже после смерти Э.А.Канера.

Работая в Москве, М.И. часто посещал Харьков, бывал в университете. Однажды В.В.Ульянов спросил у него, не пора ли А.Ермолаева запускать на докторскую “орбиту”. М.И. ответил согласием. Он помог мне организовать оппонентов (среди них – Н.Б.Брандт), на всех этапах курировал прохождение моей докторской диссертации. С удовольствием вспоминаю 1988 год, когда я много раз бывал в Москве. И каждый раз моя поездка начиналась с визита к Моисею Исааковичу домой на улицу Профсоюзную. Он тут же организовывал необходимые встречи, давал советы, на каждом шагу поддерживал меня. Бывал я и у него на новом рабочем месте – в Институте физпроблем – Мекке теоретической физики. Здесь он представил меня Д.Хмельницкому, В.С.Эдельману. Жаль, что это время так быстро прошло.

Последний раз мы встретились с Моисеем Исааковичем в мае 1994 года. В университете отмечалось 50-летие кафедры теоретической физики, созданной И.М.Лифшицем. С огромным вниманием мы слушали рассказ М.И. об И.М.Лифшице, о физиках, создававших теорию твердого тела, о той поре, когда формировалась знаменитая Харьковская школа физиков-теоретиков, ярким представителем которой является Моисей Исаакович.

Часы неумолимо отсчитывают время... Вместе с В.В.Ульяновым мы провожаем Моисея Исааковича до поезда, увозящего его в Москву. Вскоре он уезжает в США. Мы провожаем своего Учителя с надеждой на будущие встречи.

В.В.Ульянов

Из “Воспоминаний физика-теоретика”

*Воспоминание самая сильная
способность души нашей.*

А.С.Пушкин

Вот предо мною старенькая тетрадь в клетку. Это конспект спецкурса "Квантовая теория металлов", который нам читал Моисей Исаакович Каганов. Почти все свои конспекты я сохранил. Правда, они лежат на самой верхней полке закрытого шкафа, но сейчас я пересмотрел их и выбрал несколько в связи с воспоминаниями. Среди них и эта тетрадка. Из преподавателей-теоретиков Моисей Исаакович был ближе всех к студентам. Он сразу же завоевал наше доверие и симпатии, сохранившиеся навсегда, своей открытой манерой держаться. Он называл каждого по имени, всегда был жизнерадостен, вносил живость во все вокруг. Широкая улыбка, высокий рост, безграничное обаяние, демократичность, свободная манера общения со студентами, раскованность, открытость, остроумие, - в те времена это было совершенно необычным поведением. Чаще всего наши преподаватели были отделены от нас слабопроницаемым барьером, сохранялась дистанция, да и сами мы были закомплексованы, зажаты.

Словом, его полюбили сразу, им восхищались. Экзамен по спецкурсу был трудным, теория тесно переплеталась с описаниями экспериментов, но Моисей Исаакович принимал, хоть и строго, однако как-то легко и непринужденно.

Образный язык, широта взглядов, литературный талант впоследствии выразились в полной мере в его многочисленных книгах, статьях, воспоминаниях. Никто не мог написать лучше Моисея Исааковича о своем учителе академике Илье Михайловиче Лифшице. В свою очередь, когда Илья Михайлович произносил слово "Мусик" (так нежно называли своего любимца друга Моисея Исааковича), то столько любви вкладывалось в это созвучие, в котором не только ударение, но и некоторая увеличенная длительность падали на первый слог, а второй слог сопровождался легким шипением на коварной букве "с".

Запомнилось одно из первых занятий, которые вел у нас Моисей Исаакович. Разбиралась теория плазмы, вводилось понятие дебаевского радиуса. Моисей Исаакович научил нас, как рисовать греческую букву "каппа". Дело было на втором этаже старого маткорпуса. В перерыве Моисей Исаакович подошел ко мне и предложил сотрудничество. Тогда я еще не созрел для серьезной научной работы. У меня как раз был период интенсивных занятий волейболом: тренировки и изматывающие игры на первенство города отнимали много сил, а увлечение музыкой и женским полом довершало круг занятий. Представив, что на меня ляжет еще и груз научной работы, я решил, что дополнительной деятельности не потяну. Пришлось уклониться от столь лестного предложения. Видимо, это было одной из больших моих ошибок. Лучшего научного руководителя, чем Моисей Исаакович, вероятно, нельзя было себе представить.

Моисей Исаакович первым из преподавателей рассказал нам кое-что об Илье Михайловиче, о том, как нужно ценить студенческое время, чтобы успеть овладеть профессиональными навыками, о том, как он сам ночами сидел над расчетами, добиваясь нужных результатов упорным трудом.

Запомнился еще такой случай. На старших курсах я стал довольно много внимания уделять одежде. Рубашки заказывались в мастерской по моим выкройкам воротника под галстук (одну из выкроек храню). В те времена стали носить достаточно узкие яркие галстуки, которых, конечно же, не было в продаже. Пришлось освоить технологию их пошива (даже с подкладкой) на швейной машине. В магазинах был большой выбор пестрых тканей, и я закупал узкие полоски (к недоумению продавщиц). Моисей Исаакович заметил, видимо, что чуть ли не на каждом занятии у меня был

новый галстук (мешочек с некоторыми из них и сейчас сохранился). И вот однажды, когда дело дошло до яркого желтого галстука, Моисей Исаакович не выдержал. Прямо на занятии он подошел ко мне и шепнул: "Володя, откуда у Вас такие галстуки !?" Пришлось открыть "секрет". Он был очень удивлен, а я не догадался предложить ему свои услуги.

В наши студенческие времена его фамилия произносилась с ударением на втором слоге. Позднее мы узнали, что нужно на третьем.

Кажется, незадолго до своего отъезда вместе с Ильей Михайловичем в Москву Моисей Исаакович как-то зашел в деканат физфака в новом сером пиджаке и горячо заговорил о том, что курс по атомной и ядерной физике, который ему предстояло прочитать, он назовет "От атома до кварка". Как жаль, что это предназначалось другим поколениям физиков, а не нашему! Успел ли он реализовать свое намерение в Харькове? Может быть, его книга, написанная вместе с Александром Михайловичем Ермолаевым, и была воплощением этого замысла?

Часто, проходя на место сбора во время праздничных демонстраций, мне приходилось встречать высокую фигуру среди сотрудников УФТИ. То Моисей Исаакович, окруженный восторженными почитателями, что-то занимательно рассказывал. Все такой же энергичный и молодой, каким запомнили мы его в дни нашей студенческой юности. То же происходит и ныне, когда он бывает в Харькове.

В 1979 году вышла книга Моисея Исааковича "Электронны, фононы, магноны", на которой автор написал мне: "Дорогому Володе дружески. Автор Мусик. Харьков, 9.80". Да, вот такой он: каким был, таким остался. А вот и фрагмент последней страницы этой книги под названием "Заключительные фразы":

"...Теоретическая физика - строгая наука, требующая тонких физических соображений и кропотливых, иногда очень трудных математических расчетов. Получить новые результаты можно, только овладев всем арсеналом средств, методов и представлений современной физической теории. И, как в любой сфере человеческой деятельности, оказывается, что источником результатов служит труд, к счастью приносящий радость не только своими результатами, но и непосредственно в процессе решения еще не решенных задач."

Добавлю еще несколько запомнившихся эпизодов.

Было это, кажется, в конце 50-х. Однажды, возвращаясь домой, я застал в нашей квартире двух тихо сидевших на диване людей. Это были Леонид Степанович Гулида и Александр Иванович Беседовский (в ту пору заместитель декана физфака). Они сообщили, что на завтра ожидается прилет очень важной особы из Англии - какого-то профессора-физика. Принимать его, мол, поручено нашей кафедре. Так получилось, что в тот момент никого на кафедре не оказалось, кто бы мог помочь в общении с иностранцем, и они вспомнили, что молодой аспирант, кажется, хорошо сдал кандидатский минимум по английскому языку.

Действительно, в то время я достаточно свободно читал физическую литературу на английском и даже пытался разбирать неадаптированные художественные тексты. Однако разговорной практики никогда не имел. В те времена преподавание языка строилось с исключением возможности общения с иностранцами.

Можно понять мое смятение, когда меня бросились умолять спасти положение столь уважаемые люди. Они просто готовы были пасть предо мною на колени (так образно врезался в память этот эпизод, вызывающий у меня улыбку и поныне). Пришлось дать согласие. На завтра в условленном месте меня уже ожидала машина с нашими героями. Накануне я, конечно, лихорадочно перебирал свои учебники в поисках возможных нужных английских фраз. Как потом оказалось, Леониду Степановичу все же удалось связаться с семьей Моисея Исааковича Каганова, которого не было перед тем в Харькове, но который должен был вот-вот приехать. На мое счастье, все так и вышло. Мы заехали за Моисеем Исааковичем, и он уже был дома, согласившись отправиться на аэродром. Мне тоже вежливо предложили участвовать во встрече важной персоны, но я с радостью покинул делегацию. Я был очень благодарен Моисею Исааковичу, что он спас меня от возможного позора. Так мне тогда казалось, хотя, быть может, это и был подходящий случай получить языковую практику. Впрочем, вряд ли в те времена иностранца пустили бы путешествовать по нашей стране без переводчика.

Кстати, того профессора благополучно доставили в университет. Как уже бывало неоднократно раньше и много раз позже, подобных гостей водили по разным кафедрам, приглашали в кабинеты крупных

университетских чиновников, чем-то угощали, но никогда не приводили к нам, если даже они были нашими гостями. Тут наша милая администрация проявляла удивительную деликатность, помня, в каких условиях живет наша кафедра. Им становилось стыдно показывать, что известный на весь мир академик Илья Михайлович Лифшиц со своими учениками ютится в каморке, в которую даже неприлично заглянуть.

Другой эпизод связан с празднованием 50-летия нашей кафедры.

В июне 1993 года я неожиданно встретил Моисея Исааковича Каганова в Харькове и, рассказав о наших планах отметить эту дату, пригласил его принять участие в юбилейных торжествах. Он живо откликнулся, пообещав приехать в Харьков в мае следующего года и подготовить мемориальные материалы для издания.

Утром 24 мая 1994 года Моисей Исаакович был уже в Харькове, а в 12 часов началась мемориальная конференция в университете.

Первым выступает Моисей Исаакович, который рассказывает о жизни и творчестве основателя нашей кафедры Ильи Михайловича Лифшица. Он показывает сигнальный экземпляр второго тома избранных трудов Ильи Михайловича, в котором имеется большая мемориальная статья Моисея Исааковича [17]. По материалам этой статьи и ведется рассказ нашего гостя. Его мы не ограничиваем во времени, но Моисей Исаакович опытный оратор, хорошо владеющий аудиторией и обладающий тонким чувством меры. Его всегда интересно слушать, а сейчас особую остроту восприятию его слов придает то, что он скоро уезжает в Штаты навсегда. Он говорит о первых послевоенных годах, о своей учебе на физмате и работе на кафедре. Это особенно ценно: то время для нас является белым пятном в истории кафедры... Мы с Александром Михайловичем Ермолаевым провожали Моисея Исааковича на вокзале. Он был очень растроган. Как всегда, тепло и по-дружески распрощался с нами. Я успел передать ему фрагмент только что написанных воспоминаний, не рассчитывая увидеть их когда-либо напечатанными...

Л И Т Е Р А Т У Р А

1. Лифшиц И.М., Азбель М.Я., Каганов М.И. Электронная теория металлов. - М.: Наука, 1971. - 416 с.
2. Каганов М.И., Лифшиц И.М. Квазичастицы: Идеи и принципы квантовой физики твердого тела. - М.: Наука, 1989. - 91 с.
3. Каганов М.И. Электроны, фононы, магноны. - М.: Наука, 1979. - 192 с.
4. Каганов М.И., Цукерник В.М. Природа магнетизма. - М.: Наука, 1982. - 192 с.
5. Каганов М.И., Ржевский В.В. Введение в квантовую теорию твердого тела. - М.: МГУ, 1987. - 142 с.
6. Каганов М.И. Школа Ландау: Что я о ней думаю. - Троицк: Тривант, 1998. - 360 с.
7. Каганов М.И. Взаимодействие заряженных частиц с медленными волнами в анизотропных диэлектриках. Автореферат кандидатской диссертации. - Харьков, 1954. - 9 с.
8. Каганов М.И. Некоторые задачи кинетической теории твердого тела. Автореферат докторской диссертации. - Харьков, 1958. - 11 с.
9. Каганов М.И., Филатов А.П. Поверхность ферми. (Металл открывает тайны). - М.: Знание, 1969. - 64 с.
10. Каганов М.И., Ермолаев А.М. Атомная физика и сегодняшняя картина мира. - М.: Знание, 1971. - 64 с.
11. Каганов М.И. Магноны и плазмоны. - М.: Знание, 1973. - 64 с.
12. Каганов М.И., Нацик В.Д. Электроны, дислокации, звук. - М.: Знание, 1977. - 64 с.
13. Каганов М.И., Френкель В.Я. Вехи истории физики твердого тела. - М.: Знание, 1981 - 64 с.
14. Каганов М.И., Слуцкий А.А. Магнитный пробой. - М.: Знание, 1985. - 64 с.
15. Каганов М.И. Микро... и макро... - М.: Знание, 1986 - 64 с.
16. Каганов М.И. К истории электронной теории металлов (УФТИ, 50-е годы). В кн.: Академик Илья Михайлович Лифшиц. - М.: Знание, 1987. - 64 с.
17. Каганов М.И. Илья Михайлович Лифшиц. Жизнь и творчество. В кн.: Лифшиц И.М. Избранные труды. Электронная теория металлов. Физика полимеров и биополимеров. - М.: Наука, 1994. - 442 с.

СОДЕРЖАНИЕ

Предисловие	4
М.И. Каганов. Эпизоды из жизни физика-теоретика	5
Введени	5
Отрывок из автобиографии	6
Тематика длиной в жизнь	8
От электроники к теории твердого тела	10
Опоздал	17
Импеданс.	19
Дела семейные.	25
Январь 1962 года.	32
Электронная теория металлов и топология	34
Электроны, фононы, магноны	46
Магноны в ферро- и антиферромагнетиках	50
Выбор темы	53
Электронный ветер	59
Е-вспышки.	63
Соавторство	64
Заключительные слова	65
А.М. Ермолаев о своем Учителе	66
В.В. Ульянов о встречах с Моисеем Исааковичем	72
Литература	77

Науково-популярне видання

Мойсей Ісаакович Каганов

Епізоди із життя фізика-теоретика

Відповідальний за випуск Г.І. Рашба

Підп. до друку 20.12.03 . Формат 60х84 1/16. Папір офсетний.
Друк ризографічний. Ум. друк. л. 4,1 . Обл.-вид. арк. 4,7 .
Тираж 50 прим. Ціна договірна.

Харківський національний університет ім. В.Н. Каразіна. 61077,
Харків, пл. Свободи, 4

Видавничий центр

Віддруковано ПП “Азамаєв”

