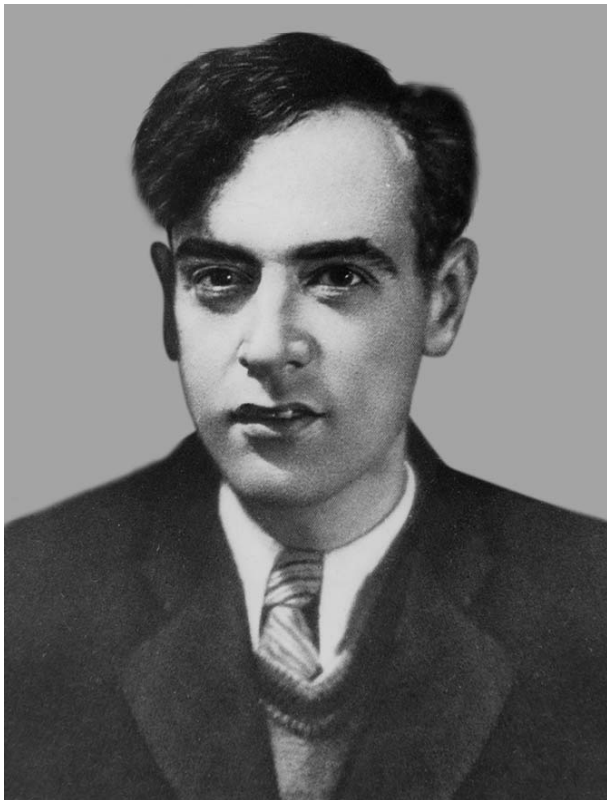


ЭТЮДЫ
ОБ УЧЁНЫХ

ВЕЛИКИЙ ФИЗИК

К 100-ЛЕТИЮ СО ДНЯ РОЖДЕНИЯ АКАДЕМИКА Л.Д. ЛАНДАУ



Лев Давидович Ландау

Лев Давидович Ландау родился 22 января 1908 г. в Баку. Его отец был инженером-нефтянником, мать – врачом¹. Способности и интерес к точным наукам проявились у мальчика рано. Так, в дополнение к обычной таблице умножения, которую все мы заучивали в школе, Ландау запомнил на всю жизнь и таблицу умножения двузначных чисел. (На мой вопрос: “Зачем?” – он ответил: “Мне было интересно”.) Ещё в школьные годы он самостоятельно изучил дифференциальное и интегральное исчисления. (Впрочем, так поступали многие будущие физики-теоретики – это прояв-

ление естественного любопытства.) Школу он окончил в 13 лет и через год поступил в Бакинский университет, причём сразу на два факультета – физико-математический и химический, но настоящий выбор, который ему предстояло сделать, был между физикой и математикой. Я был очень удивлён, услышав от Ландау, что оба предмета интересовали его в равной степени и выбор был сделан, по существу, случайно. Как бы то ни было, физика, несомненно, выиграла от этого случайного выбора. Впрочем, математика всегда интересовала Ландау, и не только её прикладная сторона. Вспоминаю, не без стыда за свою необразованность, что, услышав мой наивный вопрос: “Известен ли закон распределения простых чисел?”, Ландау взял мел и на доске, используя дзета-функцию Римана, вывел соответствующий логарифмический закон. Я уже не говорю о том, что нередко для Ландау оказывалось проще развить самостоятельно необходимый математический метод, чем изучать его по книгам.

В 1924 г. Ландау перевёлся на физическое отделение Ленинградского университета, который и окончил в 1927 г., девятнадцати лет отроду. В университете он получил возможность общаться с активно работавшими физиками-теоретиками, среди которых следует отметить блестящего учёного М.П. Бронштейна, расстрелянного в 1938 г. Первую научную работу Ландау опубликовал в 1926 г. [4]. Несмотря на столь раннее начало, он всё-таки в известном смысле опоздал. Величайший переворот в физике, связанный с созданием квантовой механики, уже свершился, и Ландау не успел принять в нём участия, о чём жалел. Зато ему довелось изучать квантовую механику “с пылу – с жару”, по оригинальным работам её основателей, и он был навсегда потрясён красотой этой теории и выразившейся в ней силой человеческого разума, способностью человека, по словам Ландау, понять и описать то, что уже невозможно наглядно вообразить. Впрочем, и в создание аппарата квантовой механики Ландау внёс существенный вклад. В своей второй работе, опубликованной в 1927 г., он ввёл очень важную физическую величину – матрицу плотности. Дело в том, что описание состояния физической системы с помощью волновой функции возможно только в том случае, если система не взаимодействует и не взаимодействовала в прошлом с дру-

¹ Предлагаемая статья посвящена главным образом научной деятельности Ландау и не претендует на подробное изложение его биографии. Читатель может найти много интересного в сборнике статей [1, 2], написанных учениками и друзьями Ландау. Более подробный обзор научных работ Ландау дан в [3].

гими системами. В общем случае описание даётся матрицей плотности, которая, наряду с волновой функцией, является фундаментальным понятием квантовой механики. (Практически одновременно с Ландау матрица плотности была введена Ф. Блохом и Дж. Нейманом.)

Окончив университет, Ландау поступил в аспирантуру Ленинградского физико-технического института, который возглавлял А.Ф. Иоффе. В 1929 г. Ландау был командирован за границу, где имел возможность в течение полутора лет работать у Н. Бора в Дании, у Э. Резерфорда в Англии и у В. Паули в Швейцарии (поездка частично оплачивалась Рокфеллеровским фондом по рекомендации Бора). Пребывание у Бора имело огромное значение для Ландау. Он углубил своё понимание квантовой механики и до некоторой степени сформировал собственные научные вкусы. Ландау считал себя учеником Бора и до конца дней сохранил любовь и уважение к учителю. (Ученики как-то спросили Ландау, считает ли он, что всё понятно в квантовой механике. Ландау ответил, что все принципиальные вопросы решены, но есть тонкие парадоксы, которые может разъяснить только Бор.) В свою очередь, Бор никогда не скрывал своего восхищения Ландау.

Плодотворным оказался также визит в Англию. Именно там Ландау выполнил работу, сразу сделавшую его знаменитым. Речь идёт о теории диамагнетизма металлов.

Создание квантовой механики открыло широкое поле исследований конкретных физических процессов, особенно квантовых процессов в твёрдых и жидких телах. Постепенно эта область выделилась в особый раздел физики – квантовую теорию конденсированного состояния, и Ландау по праву считается одним из её отцов-основателей. Исследование диамагнетизма металлов было его первым вкладом. Работе Ландау 1930 г. предшествовала работа 1927 г. В. Паули, где было показано, что ориентация спиновых магнитных моментов электронов металла во внешнем магнитном поле приводит к положительному, то есть парамагнитному, вкладу в магнитную проницаемость металла. Остался, однако, открытым вопрос о роли поступательного движения электронов.

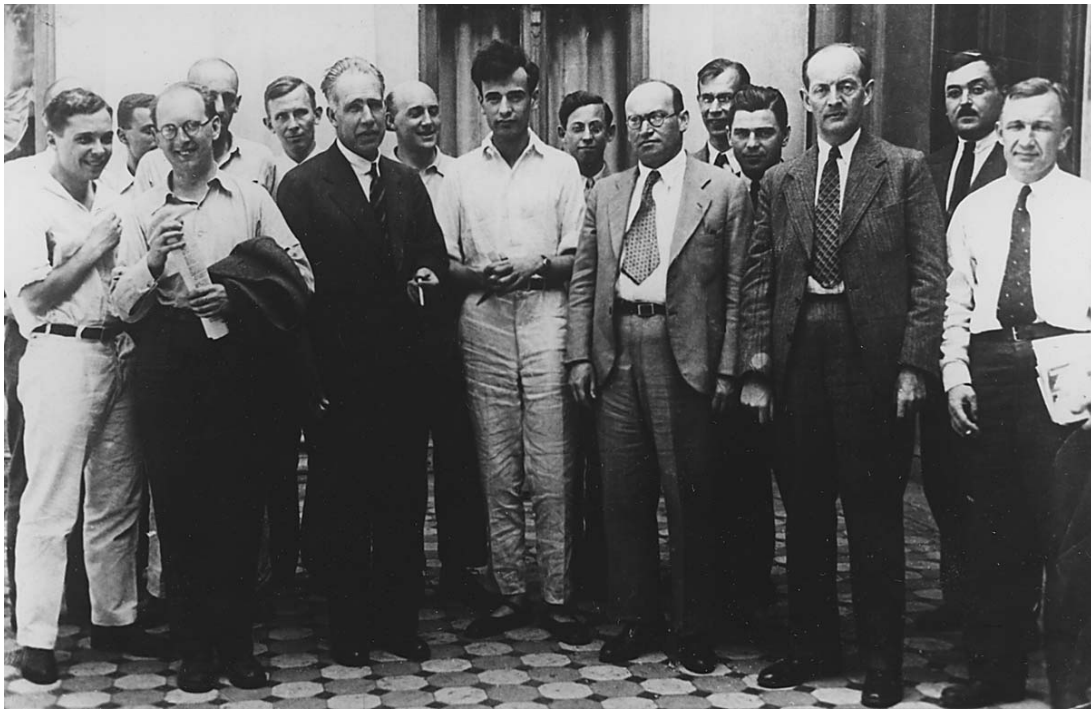
В магнитном поле электроны в объёме металла движутся по спиральным орбитам. Это движение создаёт магнитный момент, направленный против поля. Однако в классической теории этот момент полностью компенсируется электронами, движущимися в обратном направлении вдоль поверхности металла. Ландау показал, что в квантовой теории такая компенсация не имеет места. Согласно квантовой механике, энергия электрона в магнитном поле квантуется, то есть может принимать только определённые значения. Сум-

мирование по этим значениям, приближённое проведение которого потребовало от Ландау большого искусства, приводит к диамагнитному вкладу в магнитную восприимчивость. Работа о диамагнетизме сразу выдвинула Ландау в первые ряды теоретиков. Пребывание в Кембридже сыграло важную роль в жизни Ландау ещё и потому, что там он познакомился с П.Л. Капицей, работавшим тогда в лаборатории Розерфорда. (Я думаю, что работа о диамагнетизме была начата в надежде объяснить только что произведённые Капицей измерения магнитных свойств металлов.)

Характерно, что несмотря на столь блестящий успех, Ландау круто сменил объект исследований. Следующая его работа, опубликованная совместно с Р. Пайерлсом в 1931 г., посвящена теории квантово-механических измерений в релятивистской квантовой механике. Как известно, согласно принципу неопределённости Гейзенберга, невозможно одновременно измерить координату и импульс частицы, но каждая из этих величин может быть определена точно. Ландау и Пайерлс пришли к заключению, что измерение координаты само по себе возможно лишь с ограниченной точностью. Её точному измерению препятствует рождение в процессе измерения электронно-позитронных пар и излучение света. Единственно точно измеримой величиной, кроме масс частиц и их поляризаций, являются импульсы рассеянных частиц. Работа молодых теоретиков вызвала очень большой интерес и породила горячие дискуссии, в которых участвовали крупнейшие физики мира. Мне кажется, что не все вопросы, поставленные в этой работе, можно считать окончательно решёнными даже сегодня.

По возвращении в Ленинград Ландау продолжил работы по квантовой механике. Он развил теорию квантовых переходов при столкновениях медленных атомов. Предложенный в этих работах метод вычислений полностью сохранил своё значение до настоящего времени. Более того, думаю, что его трудно изложить лучше, чем это сделано в двух коротких статьях Ландау, опубликованных в 1932 г.

Ландау преподавал в Ленинградском политехническом институте, откуда его уволили за осмеяние теории эфира. В 1932 г. он переехал в Харьков, где по инициативе Иоффе был образован Украинский физико-технический институт. Ландау возглавил теоретический отдел этого института и одновременно начал преподавать на физико-механическом факультете Харьковского механико-машиностроительного института, а с 1935 г. стал заведующим кафедрой общей физики Харьковского университета. У Ландау, который обладал исключительными педагогическими способностями, появились первые ученики: сначала



Участники Международной конференции по теоретической физике в Украинском физико-техническом институте (Харьков, 1934 г.). На переднем плане (слева направо): Д.Д. Иваненко, Л. Розенфельд, Н. Бор, Л.Д. Ландау, Я.И. Френкель, Р. Вильямс, И.Е.Тамм

А.С. Компанец и Е.М. Лифшиц, а потом А.И. Ахиезер, И.Я. Померанчук, В.Г. Левич. Все они стали впоследствии крупными физиками-теоретиками. Впрочем, преподавание в университете длилось недолго. В декабре 1936 г. Ландау был уволен, “так как его плохо понимали студенты”. Бессмысленно гадать – так это было или не так. Приближался Большой террор, и увольнение было для Ландау одним из его предвестников.

В Харькове Ландау работал исключительно интенсивно. За неполных четыре года пребывания в Украинском физико-техническом институте он опубликовал 19 работ. Упомяну важнейшие из них. В 1935 г. Ландау в соавторстве с Е.М. Лифшицем опубликовал статью “К теории дисперсии магнитной проницаемости ферромагнитных тел”. Несмотря на скромное название, она стала основой современной теории ферромагнитных явлений. В ней было выведено уравнение Ландау–Лифшица, которое описывает поведение вектора магнитного момента ферромагнетика. В ней также построена теория магнитных доменов – областей с различными направлениями намагниченности, на которые разбивается ферромагнетик. Поскольку вопрос имеет большое практическое значение, идеи, изложенные в этой статье, получили развитие в сотнях, если не тысячах последующих работ различных авторов.

В этом отношении с работой о ферромагнетизме может конкурировать работа 1937 г. о кинетическом уравнении для частиц, взаимодействующих по закону Кулона. Как известно, кинетическое уравнение, описывающее столкновение между частицами, получено Л. Больцманом в 1872 г. Это уравнение, описывающее столкновение между нейтральными частицами – атомами и молекулами, непригодно для частиц, взаимодействующих по закону Кулона, то есть электронов и ионов. Из-за медленного убывания сил с расстоянием в уравнении возникают расходящиеся интегралы. Ландау преодолел эту трудность, используя физические соображения об экранировании взаимодействия на больших расстояниях, и получил свободное от расходимостей уравнение. Мало того, он использовал медленность убывания сил для упрощения уравнения и приведения его к элегантному и удобному виду. Эта работа Ландау фактически опередила своё время. В 30-х годах прошлого века мало кто интересовался столкновениями заряженных частиц, и даже кинетическое уравнение Больцмана казалось слишком сложным для практического применения. Ситуация кардинально изменилась в 50-х годах, главным образом в связи с проблемой управляемых термоядерных реакций. Количественная теория электронно-ионной плазмы стала насущной необходимостью, и кинетическое уравнение Ландау является основой этой теории.

В том же 1937 г. Ландау опубликовал две работы, посвящённые теории фазовых переходов. Они полностью изменили ситуацию в этой важной проблеме статистической физики. Собственно фазовые переходы, например воды в лёд, известны с древности. Классики термодинамики Клапейрон и Клаузиус дали количественное объяснение, основанное на том, что при данных условиях устойчиво то состояние тела, которое имеет меньшую энергию. В этом случае при переходе выделяется некоторое тепло. Такими свойствами обладают обычные фазовые переходы – переходы первого рода. К моменту появления работы Ландау были получены достоверные экспериментальные данные о существовании фазовых переходов другого типа – непрерывных переходов, или переходов второго рода. При таких переходах состояние тела меняется непрерывно и тепло не выделяется. Что же тогда меняется? Ландау понял, что в точке непрерывного перехода меняется симметрия тела, так что два состояния тела всегда различаются качественно. Поняв сущность явления, он построил количественную теорию непрерывных фазовых переходов. Эта теория фактически открыла целую новую область статистической физики.

В работе было введено важнейшее понятие параметра порядка, характеризующего степень нарушения симметрии при переходе. Он равен нулю по одну сторону перехода и отличен от нуля – по другую. Теория Ландау установила поведение физических величин вблизи точки непрерывного перехода и позволила выяснить, между состояниями каких симметрий возможны такие переходы. В дальнейшем стало ясно, что теория справедлива на достаточном удалении от точки перехода, а сама точка перехода является особой в смысле теории функций комплексного переменного. Выяснению характера этой особенности Ландау посвятил много времени позднее, уже в 1950-х годах, но полного успеха не добился. В конце концов стало ясно, что особенность невозможно исследовать аналитически, и были развиты остроумные численные методы, о которых Ландау, к сожалению, уже не узнал. С практической точки зрения, однако, теория Ландау даёт достаточную точность для большинства переходов.

Последнюю из выполненных в Харькове работ Ландау посвятил объяснению промежуточного состояния сверхпроводников, к тому времени обнаруженному экспериментально. Эта работа, по моему мнению, особенно элегантна с математической точки зрения. Ландау показал, что в промежуточном состоянии сверхпроводник разбивается на чередующиеся сверхпроводящие и несверхпроводящие слои и, используя теорию функций комплексного переменного, которой владел в совершенстве, определил аналитически форму сверхпроводящих слоёв.



Л.Д. Ландау и П.Л. Капица

Важная перемена в жизни Ландау произошла в марте 1937 г., когда он по приглашению П.Л. Капицы переехал в Москву и был зачислен в Институт физических проблем, в котором работал до конца своих дней. Здесь он сделал лучшие свои работы. И я уверен, что переезд в Москву спас жизнь Ландау. Дело в том, что в августе–сентябре 1937 г. были арестованы ведущие сотрудники Украинского физико-технического института: замечательный физик с мировым именем Л.В. Шубников, а также Л.В. Розенкевич и В.С. Горский [5]. Все трое были вскоре расстреляны без суда по решению наркомвнудела Н.И. Ежова и генпрокурора А.Я. Вышинского. Перед смертью несчастных заставили признаться в членстве в “контрреволюционной вредительской троцкистской организации”, в которой якобы состоял и Ландау. Современный читатель должен понимать, что подобные признания не отражали ни реальности, ни предпочтений допрашиваемых. НКВД ставил таким образом чёрную метку, намечая жертвы следующей волны арестов. В этой ситуации арест Ландау был неизбежен. Переезд в Москву не мог отвлечь его, но замедлил. Секретные бумаги ходят медленно. Ландау был арестован только 28 апреля 1938 г. Эта задержка оказалась очень важной. Арестованный Ландау дожил до 1939 года. А в декабре 1938 г. Ежов был смещён с поста наркомвнудела и заменён Л.П. Берия. Террор не прекратился, но диктаторские полномочия НКВД были ограничены. Партийно-государственная верхушка получила возможность влиять на судьбы арестованных.хлопоты Капицы имели шансы на успех. Разумеется, то, что Ландау был теперь сотрудником Капицы, также облегчало хлопоты.

Борьба Капицы за жизнь Ландау началась в самый день ареста. Капица написал письмо И.В. Сталину. (Теперь мы знаем, что письмо Сталину на-

писал и Н. Бор.) Реакции не последовало. Думаю, что любой другой житель СССР счёл бы это достаточным предупреждением – не соваться больше. Но не Капица. 6 апреля 1939 г. он пишет новое письмо. На сей раз В.М. Молотову. Цитирую: “За последнее время, работая над жидким гелием вблизи абсолютного нуля, мне удалось найти ряд новых явлений, которые, возможно, прояснят одну из наиболее загадочных областей современной физики... Но для этого мне нужна помощь теоретика. У нас в Союзе той областью теории, которая мне нужна, владел в полном совершенстве Ландау, но беда в том, что он уже год как арестован...”

Конечно, говоря всё это, я вмешиваюсь не в своё дело, так как это область компетенции НКВД. Но всё же я думаю, что я должен отметить следующее как ненормальное:

1. Ландау год как сидит, а следствие ещё не закончено, срок для следствия ненормально длинный.

2. Мне, как директору учреждения, где он работает, ничего неизвестно в чём его обвиняют...” [6].

Думаю, что это – самое нетипичное для того времени письмо. Во-первых, в нём нет никакого преклонения перед величием адресата (а ведь Молотов был вторым лицом государства). Далее, поражает смелость Капицы. В эпоху террора даже простое знакомство с арестованным было опасно. А Капица прямо указывает на “ненормальности” в работе НКВД, да ещё требует, чтобы ему, “как директору учреждения”, сообщили, в чём Ландау обвиняют.

Кстати, в чём? Не буду подробно пересказывать содержание “дела Ландау” [6, 7]. Причиной ареста послужили упомянутые выше показания расстрелянных сотрудников Украинского физико-технического института. Соответственно, из Харькова переехали обвинения во вредительстве, среди них – “отрыв теории от практики”. Поскольку важность научных работ Ландау отрицать было нельзя, его заставили признаться в том, что он “всегда вытравлял” из своих работ “ту основу, за которую можно было ухватиться для технических приложений”. Всё это было бы смешно, если бы речь не шла о жизни и смерти. В деле также хранится копия антисталинской листовки, написанной рукой друга Ландау физика М.А. Кореца, причём Ландау сознался в соучастии в её составлении. Я не берусь судить о её происхождении. Замечу, что Ландау при “переспросе” от всех своих признаний отказался. Во всяком случае, и с листовкой, и без неё материала в деле было вполне достаточно. Более того, Ландау после года заключения был полностью истощён и, как мне не раз доводилось от него слышать, умер бы в тюрьме очень скоро. К счастью, письмо Капицы подействовало. Ландау

дау отпустили под его поручительство. Ландау считал Капицу своим спасителем и сохранил глубочайшую благодарность ему на всю жизнь².

Первая научная работа, опубликованная Ландау после перехода в Институт физических проблем, была посвящена вопросам ядерной физики. Ландау, развивая идеи Бора, применил методы статистической физики к изучению тяжёлых атомных ядер. Он получил количественные оценки для многих наблюдаемых величин, включая ширину ядерных уровней. Работа быстро стала классической в своей области.

Пока Ландау сидел, был опубликован ещё один его важный результат. В 1938 г. в Институте физических проблем работал, по приглашению Капицы, английский физик-экспериментатор Д. Шенберг. Он исследовал магнитные свойства висмута и обнаружил осцилляции магнитной восприимчивости при изменении магнитного поля. Ландау немедленно построил полную теорию явления, обобщив свою теорию диамагнетизма на случай сильного магнитного поля. Тут его и арестовали. Результаты Шенберга были опубликованы одновременно в “Журнале экспериментальной и теоретической физики” и “Proceedings Royal Society”. Однако теория была существенна для статьи. Шенберг попросил верного друга Ландау профессора Пайерлса написать по заметкам Ландау краткое изложение вывода, которое было опубликовано – с именем Ландау – в качестве приложения к статье в “Proceedings Royal Society”. Из статьи в “Журнале экспериментальной и теоретической физики” все упоминания о Ландау были исключены.

Выйдя из тюрьмы, Ландау занялся теорией сверхтекучести жидкого гелия. Это удивительное явление было только что открыто Капицей. (Помните “новые явления” в жидком гелии “вблизи абсолютного нуля” из письма Молотову? Капица не преувеличивал.) Оно состоит в способности гелия протекать через узкие капилляры, не испытывая трения, что означает отсутствие у этой жидкости вязкости. Слово “занялся” звучит обыденно. Но мне хочется, чтобы читатель поставил себя на место человека, выпущенного из тюрьмы буквально полумёртвым, под честное слово Капицы, и имевшего все основания ожидать нового ареста. Какой силой воли нужно было обладать, чтобы немедленно сосредоточиться над труднейшей и совершенно новой проблемой? У меня нет сомнения в том, что его в этом поддерживали забота семьи Капицы и исключительный интерес к физике. В 1941 г. была опубликована

² Замечу, что Ландау и самому удалось успешно вступить за арестованного друга, хотя и не в разгар террора. В 1935 г. он добился освобождения Кореца, уже приговорённого к заключению в лагерь. В 1938 г. Ландау это, разумеется, припомнили.

статья Ландау “Теория сверхтекучести гелия II”, которая по праву считается одной из важнейших работ по теории конденсированного состояния.

Работа основана на принципиальном для этой теории положении (его иногда называют “парадигмой Ландау”), согласно которому все свойства тела вблизи абсолютного нуля могут быть описаны в терминах наличия в нём газа “квазичастиц” или “элементарных возбуждений”, каждое из которых обладает определённой энергией E и импульсом p . Функция $E(p)$ (энергетический спектр) – важная характеристика тела. В частности, нагрев тела может быть описан как появление в нём новых квазичастиц. На основе этой картины Ландау объяснил сверхтекучесть. Если течение жидкости сопровождается трением, она нагревается, то есть рождаются новые возбуждения. Ландау показал, что законы сохранения энергии и импульса квазичастиц делают невозможным такой процесс, если их спектр удовлетворяет определённому критерию (критерий Ландау). Комбинируя теоретические соображения с анализом экспериментальных данных, Ландау установил спектр жидкого гелия. Оказалось, что он удовлетворяет его критерию, что и объясняет сверхтекучесть этой жидкости. На основе таких соображений Ландау построил количественную теорию, описывающую поведение сверхтекучего гелия. В соответствии с теорией, сверхтекучий гелий при конечных температурах ведёт себя как смесь двух жидкостей – сверхтекучей и “нормальной”. Сформулированная Ландау в той же работе “двужидкостная гидродинамика”, в которой до сих пор не нужно изменить ни строчки, служила теоретической основой всех исследований сверхтекучего гелия вплоть до середины 1950-х годов. Замечу, что наибольший вклад в теорию наблюдаемых явлений внесли в тот период сам Ландау и его ученики, прежде всего И.М. Халатников.

Следует отметить, что работам Ландау предшествовали работы Л. Тиссы, который, кстати, сотрудничал с Ландау в Харькове и считал себя его учеником. (Профессор Тисса недавно отпраздновал своё 100-летие.) Тисса пытался объяснить сверхтекучесть гелия, рассматривая его как идеальный Бозе-газ ниже точки конденсации Бозе–Эйнштейна. Теория Тиссы, в которой тоже возникает картина двух жидкостей, является несамосогласованной во многих пунктах и ни в коей мере не приложима к гелию – плотной жидкости сильно взаимодействующих атомов.

После начала Великой Отечественной войны Ландау вместе с Институтом физических проблем был эвакуирован в Казань. Читатель не удивится, узнав, что некоторые его исследования в это время были посвящены гидроаэродинамике и теории горения и взрыва (последние были сделаны совместно с К.П. Станюковичем). Ландау, в частно-

сти, предложил схему развития турбулентности жидкости, основанную на предположении о появлении в ней большого числа колебаний с несоизмеримыми частотами. Работа имела большое стимулирующее значение для теории турбулентности, хотя дальнейшее развитие теории не подтвердило буквально схему, предложенную Ландау. Он также установил важную теорему о том, что при сверхзвуковом движении тела всегда возникают две ударные волны. К тому же периоду относится создание в сотрудничестве с Я.А. Смолодинским теории рассеяния протона на протоне с учётом наличия резонанса, связанного с ядерными силами.

Забегая вперёд, скажу, что интерес Ландау к гидродинамике позднее привёл к созданию в 1953 г. теории множественного образования частиц. В этой теории рассматриваются столкновения частиц сверхвысоких энергий. Такие процессы наблюдаются в космических лучах. Если энергия сталкивающихся частиц достаточно велика, образуется большое число новых частиц. Теория Ландау основана на идее Э. Ферми, согласно которой большое число образовавшихся частиц позволяет применить методы статистической физики. Ландау развил и исправил работу Ферми, показав, что основные физические явления происходят на стадии расширения сжатого при столкновении вещества, причём это расширение, несмотря на невообразимо малый размер системы, может быть описано уравнениями гидродинамики, правда не обычной, а релятивистской, которая описывает движение жидкости со скоростями, близкими к скорости света. Идеи Ландау получили в дальнейшем развитие в его работе с С.З. Беленьким и работах других авторов, которые объяснили широкий класс экспериментальных данных. Отмечу чрезвычайную математическую трудность проблемы. Ландау как-то сказал, что это самая трудная задача, которую он решил в своей жизни. В настоящее время гидродинамический подход к изучению столкновений частиц снова стал очень актуальным. К сожалению, я не имею возможности остановиться на других важных работах Ландау, относящихся к физике космических лучей.

Первый послевоенный год был ознаменован для Ландау торжеством его теории сверхтекучести. В 1946 г. В.П. Пешков, используя предложенный Е.М. Лифшицем метод, открыл “второй звук” – распространяющиеся в сверхтекучей жидкости незатухающие колебания температуры. Эксперимент не только подтвердил предсказания теории, но и позволил в 1947 г. уточнить форму и параметры энергетического спектра гелия. После того как в 50-х годах были проделаны прямые измерения этого спектра рассеянием нейтронов, оказалось, что Ландау определил его удивительно точно.



Сотрудники теоретического отдела Института физических проблем в 1956 г. Стоят (слева направо): С.С. Герштейн, Л.П. Питаевский, Л.А. Вайнштейн, Р.Г. Архипов, И.Е. Дзялошинский; сидят: Л.А. Прозорова (единственный физик-экспериментатор на этой фотографии), А.А. Абрикосов, И.М. Халатников, Л.Д. Ландау, Е.М. Лифшиц

В 1946 г. Ландау был избран академиком, мнущая ступень члена-корреспондента. Он снова начал преподавать и был назначен заведующим кафедрой теоретической физики только что образованного Физико-технического факультета МГУ. Он читал там оригинальный курс общей физики – на пару с П.Л. Капицей. Ландау читал теорию, Капица рассказывал об экспериментах и показывал их. Первая часть курса Ландау издана [8]. На мой взгляд, эта небольшая книга представляет собой верх элегантности.

В 1946 г. была опубликована вторая важная работа Ландау по теории плазмы. Она связана с критикой работ А.А. Власова, который впервые применил для исследований колебаний плазмы в отсутствие столкновений кинетическое уравнение. В теории Власова возникали расходящиеся интегралы. Власов обходил эту трудность, беря без всяких оснований главное значение интеграла. Ландау решил задачу корректно и обнаружил, что плазменные колебания в действительности затухают. Введённое таким образом затухание Ландау – фундаментальное явление физики плазмы.

Вскоре обстановка стала ухудшаться. Капица критиковал руководство Берия Атомным проектом и был в августе 1946 г. смещён с поста директора Института физических проблем. В 1948 г., после знаменитой сессии ВАСХНИЛ, началась подготовка к “идеологической дискуссии” по физике [9]. Ландау рассматривался как очевидная

жертва. Будучи убеждённым и последовательным материалистом, он никогда не включал в свои книги диалектико-материалистических заклиний или цитат. (Когда к нему особенно пристали, Ландау сказал: “Я не философ. Пришлите философа-профессионала и пусть он впишет в мои книги, что хочет”. Разумеется, никто из философов не пожелал иметь столь опасного соавтора.) Дискуссия не состоялась, но её инициаторам кость бросили. Министр высшего образования С.В. Кафтанов издал приказ, отстраняющий идеологически подозрительных учёных от преподавания. Ландау был снят с заведования с формулировкой “в связи с реорганизацией кафедры”. Реорганизация как раз и состояла в увольнении Ландау³.

На этом фоне в 1950 г. появилась совместная работа В.Л. Гинзбурга и Л.Д. Ландау “К теории сверхпроводимости”, которая по своему значению в физике сравнима с работой по теории сверхтекучести. Ситуация с теорией сверхпроводимости – свойством многих металлов при низких

³ Забавная подробность. Материалы подготовки к дискуссии были опубликованы позднее отдельной книгой. Она начиналась статьёй уже покойного С.И. Вавилова, содержавшей выпад против “Курса теоретической физики” Ландау и Лифшица. Однако текст доклада был разослан предполагаемым участникам дискуссии ещё при жизни Вавилова. Там этого пассажа не было. Удивлённый Ландау попросил объяснений. Редакция ответила что-то вроде: “В докладе этого действительно не было, но мы вставили, так как это соответствовало духу статьи”.

температурах не оказывать сопротивления электрическому току – была в то время весьма своеобразной. Явление сверхпроводимости было довольно хорошо изучено экспериментально. Существовали также уравнения Г. Лондона и Ф. Лондона, формально описывающие свойства сверхпроводников в слабом магнитном поле. Физический смысл явления оставался, однако, непонятным. Гинзбург и Ландау тоже не знали природы сверхпроводимости. Но они понимали, что это чисто квантовое явление, и потому предположили, что электроны сверхпроводника должны описываться некоторой волновой функцией, для которой из самых общих соображений удалось написать уравнения. Между тем смысл функции оставался неясным. Только семь лет спустя, после работ Дж. Бардина, Л. Купера и Р. Шриффера и Н.Н. Боголюбова, стало ясно, что электроны в сверхпроводнике связываются в пары. Волновая функция Гинзбурга–Ландау есть не что иное, как волновая функция этих пар. Уравнения же оказались совершенно правильными, с одной единственной поправкой: вместо заряда электрона e , входившего в теорию, должен стоять заряд пары $2e$ [10].

Теория Гинзбурга и Ландау, описывающая множество явлений и относительно простая, сразу же объяснила существовавшие эксперименты и инициировала новые. Она находит широкое применение и сейчас в самых разных разделах физики, например, в астрофизике для объяснения свойств нейтронных звезд. На основе этой теории А.А. Абрикосов в 1957 г. объяснил свойства так называемых сверхпроводников второго рода. Он предсказал, что магнитное поле проникает в такие сверхпроводники в виде особых нитей – квантованных вихрей Абрикосова. В 2003 г. Гинзбург и Абрикосов были удостоены Нобелевской премии за свой вклад в теорию сверхпроводимости. Ландау получил премию в 1962 г., главным образом за теорию жидкого гелия. На мой взгляд, Нобелевский комитет имел все основания дать ему премию много раньше.

В конце 1940-х годов Ландау и его сотрудники в Институте физических проблем были привлечены к работам по созданию ядерного оружия. Я не компетентен судить об этой стороне деятельности моего учителя. Кажется, она носила вспомогательный характер по сравнению с работами главных действующих лиц. В ходе этих работ, однако, Ландау совместно с И.М. Халатниковым и математиком Н.Н. Мейманом разработал эффективные методы численного решения нелинейных уравнений в частных производных – уравнений гидродинамики и уравнения теплопроводности. Дело свелось к исследованию устойчивости соответствующих разностных схем. Оказалось, что большими преимуществами обладают так назы-



И.М. Халатников, Л.Д. Ландау и Е.М. Лифшиц у входа в Институт физических проблем. 1958 г.

ваемые нелокальные схемы счёта. К сожалению, эта работа, пионерская в момент создания, была опубликована только в 1958 г. Отмечу, что аналогичные методы в связи с той же проблемой были развиты в США Дж. Нейманом.

“Специальные” работы Ландау оказались настолько важными, что ему были присуждены две Сталинские премии и звание Героя Социалистического Труда. Но благодарность властей, как это нередко бывает в нашей стране, обернулась для Ландау возмутительным произволом. Его участие в закрытых работах было использовано как предлог, чтобы не пускать его за границу до конца жизни. Естественно, это затрудняло его научную работу, мешало признанию его работ и оскорбляло. (Я не говорю здесь об ущербе интересам нашей страны, на которые запретителям было, как видно, наплевать.) Наглость властей предержавших дошла до того, что Ландау пытались не пустить на международную конференцию по физике элементарных частиц, проходившую в Киеве. Только решительный протест председателя оргкомитета И.Е. Тамма избавил нашу страну от этого позора (впрочем, Ландау твёрдо решил ехать и без разрешения).

В действительности, как я уверен, закрытые работы были лишь предлогом. Истинная причина состояла в нелицеприятных отзывах Ландау о по-



Л.Д. Ландау, английский физик Х. Холл и В.Л. Гинзбург. Москва, 1959 г.

литике советского правительства и о советской власти вообще. С этими высказываниями, записанными подслушивающими устройствами или сообщёнными куда следует агентами, читатель может ознакомиться в своеобразном документе – Справке КГБ СССР, направленной в декабре 1957 г. в Отдел науки ЦК КПСС [11]. Особенно впечатляюща реакция Ландау на жестокое подавление Будапештского восстания 1956 г.

Ландау, с его универсальным интересом ко всем разделам физики, легко менял области исследований. В 1954 г. он снова, после долгого перерыва, обратился к релятивистской квантовой механике. В то время квантовая электродинамика получила значительное развитие, прежде всего в работах Ф. Дайсона, Р. Фейнмана, Дж. Швингера и С. Томонага. Была создана теория обнаруженного экспериментально Лэмбовского сдвига и сформулированы правила вычисления наблюдаемых эффектов с любой желаемой точностью. Ответ при этом представляется в виде ряда, члены которого изображаются диаграммами Фейнмана. В теории, однако, с неизбежностью возникали бесконечности, устраняемые с помощью искусственных приёмов. Ландау, Абрикосов и Халатников решили разобраться в сути этих трудностей, впервые применив метод суммирования главных диаграмм, который впоследствии вошёл в “золотой фонд” методов теоретической физики. Результат исследования оказался парадоксальным. Трудности с бесконечностью заменились на трудности с нулём. Выяснилось, что вакуум полностью экранирует заряд электрона (“эффект нуль заряда”). Этот принципиально важный результат не означал практической неприменимости квантовой электродинамики. Дело в том, что достаточно изменить теорию на очень малых расстояниях, чтобы трудность исчезла, а на таких малых расстояниях всё равно начинают

играть роль другие взаимодействия. Ситуация, однако, иная в теории сильных взаимодействий, которые, в частности, связывают протоны и нейтроны в атомных ядрах. Здесь трудности возникают уже на значительных расстояниях, где теория должна быть применима. Ландау понял, что теории с нуль зарядом не годятся для описания сильных взаимодействий (к такому же заключению пришли И.Я. Померанчук и Е.С. Фрадкин). Некоторое время он настойчиво искал (вместе со своими учениками) теорию, в которой вакуум не экранирует, а, наоборот, увеличивает заряд. Не найдя такой теории, пришёл к заключению, что известные теории не годятся для описаний сильных взаимодействий. Здесь он был совершенно прав. А из этого он сделал вывод, что квантовая теория поля вообще не пригодна и нужно строить теорию по-другому, опираясь лишь на аналитические свойства диаграмм. Здесь Ландау оказался не прав, и его ошибка весьма поучительна.

Оказалось, что теории с усилением взаимодействия с расстоянием существуют. Это так называемые теории полей Янга–Миллса. Их называют теориями с асимптотической свободой, поскольку в таких теориях частицы слабо взаимодействуют на малых расстояниях. Дело, однако, в том, что силы действуют не между обычными частицами, а между частицами с дробным электрическим зарядом – кварками, из которых состоят протоны и нейтроны. Вакуум настолько усиливает взаимодействие между кварками, что они вообще не могут существовать в свободном виде. Представления о кварках возникли уже после Ландау на основе глубокого анализа экспериментальных данных. История учит нас, что физика – это наука о свойствах реального мира, и даже выдающимся теоретикам опасно убежать далеко вперёд от эксперимента. Сам Ландау активно разрабатывал теорию, основанную на аналитических свойствах, до конца своей жизни в науке и получил оснащённые результаты. Замечу, что эти работы инициировали развитие своеобразного раздела математики – теории особенностей Ландау.

Существенное изменение к лучшему для Ландау и всего Института физических проблем произошло в 1955 г., когда Капица вновь стал директором созданного им института. Такой поворот дел был заслугой самого Ландау, который составил письмо Н.С. Хрущёву, подписанное несколькими членами Академии наук, о необходимости возвращения Капицы в институт. Ландау ожидал этого возвращения с большим нетерпением, другие сотрудники, вероятно, со смешанными чувствами – Капица был известен как строгий директор. Осенью 1955 г. Капица впервые после возвращения экзаменовал поступающих в аспирантуру.

Мы, кандидаты, шли на экзамен с немалым страхом. Помню, что я сразу обратил внимание на глубокое взаимное уважение Капицы и Ландау, которое стало очевидно с первых же слов, которыми они обменялись во время экзамена. Ландау вновь стал преподавать в МГУ. Он читал курс теоретической физики на физическом факультете и руководил аспирантами на кафедре М.А. Леонтовича.

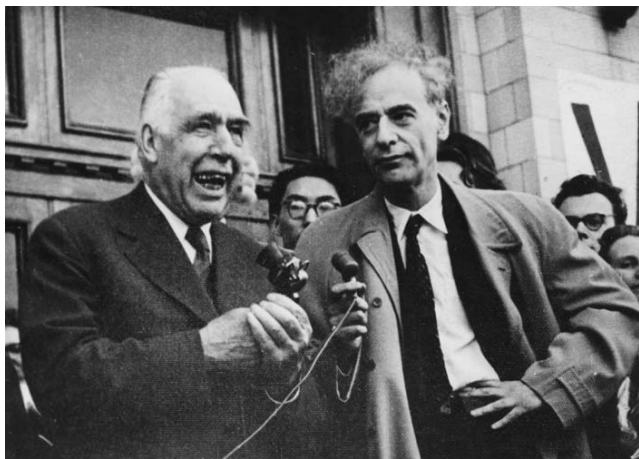
В 1957 г. в физике элементарных частиц произошло важное событие. Экспериментальные данные убедительно свидетельствовали о том, что в слабых взаимодействиях нарушается закон сохранения чётности, считавшийся до той поры строгим законом природы. Ландау счёл, что простой отказ от сохранения чётности порождает значительные трудности. Неинвариантность изотропного пространства по отношению к зеркальному отражению представлялась ему “более чем странной” и эстетически неприятной. Он попытался спасти ситуацию, предположив, что наш мир инвариантен относительно инверсии с одновременной заменой всех частиц на античастицы (аналогичные соображения высказали Т. Ли, С. Янг и А. Салам). Тогда несимметрия переносилась с пустого пространства на частицы. Помню, что на одном из семинаров Померанчук спросил Ландау: “А что будет, если и комбинированная чётность всё же не сохраняется?”. “Не хотел бы я жить в таком кривом мире”, – ответил Ландау. Однако дальнейшие опыты показали, что и сохранение комбинированной чётности тоже нарушается, хотя и в меньшей степени, чем простой, и с этим приходится мириться. Мир устроен так, как он устроен, а не так, как нам нравится.

В 1956 г. Ландау создал теорию Ферми-жидкости, которая, по моему мнению, является его высшим достижением. Эта теория описывает поведение при низких температурах несверхтекучих жидкостей, состоящих из частиц с полусцелым спином. Сюда относятся атомы редкого изотопа гелия – гелий-3, а также электроны в несверхпроводящих металлах. Когда Ландау рассказал свою работу на семинаре, то первое, что поразило слушателей, – это разрыв с представлениями теории сверхтекучести, хорошо известной большинству присутствовавших. Если спектр элементарных возбуждений сверхтекучей жидкости не имел ничего общего с энергиями свободных атомов, то в теории Ферми-жидкости сохранялось соответствие между возбуждениями и атомами, число возбуждений в определённом смысле равнялось числу атомов. Далее, элементарные возбуждения, опять-таки в отличие от теории сверхтекучести, сильно взаимодействуют. Математический аппарат теории, весьма нетривиальный, был в сущности, не выведен, а постулирован на основе интуитивных соображений с использованием га-

лилеевской инвариантности и законов сохранения массы, энергии и импульса. Мне лично, горячему адепту теории сверхтекучести, показалось особенно странным равенство чисел атомов и возбуждений, и я попросил Ландау привести какие-либо соображения в его пользу. Ландау ответил: “Мне самому этот пункт не нравился, и я пытался его изменить, но убедился, что это невозможно”. В следующей работе Ландау на основе новой теории предсказал существование в гелии-3 при очень низких температурах “нулевого звука” – колебаний, скорость которых, в отличие от обычного звука, не определяется сжимаемостью жидкости. (Такие колебания в разреженном Ферми-газе были ранее предсказаны В.П. Силиным на основе уравнений, полученных им вместе с Ю.Л. Климонтовичем. Ландау не знал этих работ, но когда я их ему показал, немедленно сделал соответствующую ссылку.) Нулевой звук был вскоре обнаружен экспериментально.

В теории Ландау взаимодействие между возбуждениями описывалось некоторой функцией от их импульсов. Смысл этой функции оставался в первой работе не вполне ясным. Он был выяснен в последней работе Ландау на эту тему, в которой дано полное математическое обоснование теории (для этой работы были существенны результаты статьи А.Б. Мигдала 1957 г.). Оказалось, что функция взаимодействия выражается определённым образом через амплитуду взаимного рассеяния атомов. Ландау доложил свою работу на беспрецедентно длинном семинаре, продолжавшемся часа два с половиной (Ландау не любил, да как-то и не умел, делать длинные доклады). Попутно было доказано пресловутое равенство чисел частиц и возбуждений. Ландау долго отказывался опубликовать эти результаты: “Не могу же я писать работу в 40 страниц!”. Работа всё же была напечатана в 1958 г., но без этого доказательства. Теория Ферми-жидкости Ландау, наряду с теорией сверхтекучести, – одна из важнейших составных частей теории конденсированного состояния. В последние годы большое внимание физики уделяют поискам систем фермионов с “нефермижидкостным поведением”. Разумеется, такие поиски предполагают справедливость теории Ландау для обычных систем.

Как бы ни было велико число читателей оригинальных работ Ландау, оно не может сравниться с числом читателей “Курса теоретической физики” Ландау и Лифшица. Верой и правдой курс служит уже нескольким поколениям студентов и является настольной книгой едва ли не каждого физика-теоретика. Он переведён по крайней мере на 11 языков. В тайну достоинств этого курса так же трудно проникнуть, как и в тайну достоинств какого-либо замечательного произведения мировой литературы. Попробую все-таки высказать некоторые соображения.



Н. Бор и Л.Д. Ландау на физическом факультете МГУ в День физика. 1961 г.

Ландау, вступивший в научную жизнь вскоре после возникновения современной физики, предпочитал изложение, близкое к оригинальным работам её творцов, и не уделял внимание позднейшим обоснованиям. (Те, кто интересуется вопросами обоснования, должны читать другие книги. Ландау, кстати, говорил, что не рассматривает свою школу как «единоспасающую церковь».) Ландау обладал необычайно ясным пониманием сущности физических явлений и передавал его читателям. Не следует думать, что это понимание всегда давалось ему легко. Он размышлял над тем или иным вопросом до тех пор, пока не достигал полной ясности. Книга по любой научной проблеме сильно выигрывает, если автор сам работал в этой области. Ландау работал практически во всех областях теоретической физики и был уникально подготовлен к созданию «Курса теоретической физики». Он обладал практически безупречным вкусом при подборе работ для включения в курс. Нередко работы, казавшиеся малоактуальными при включении в курс, оказывались на переднем крае впоследствии. Наконец, Ландау обладал редкой способностью находить самый короткий и целесообразный путь решения сложной физической задачи.

Стоит упомянуть, что Ландау, очень серьёзно относившийся к «Курсу теоретической физики» и вкладывавший в него много сил, нередко включал в него свои новые научные результаты и не публиковал их отдельно. Приведу несколько более-менее случайных примеров. Ландау создал специально для тома, посвящённого квантовой механике, теорию квантовых переходов при медленном изменении параметров системы. Никогда не был напечатан в виде статьи придуманный Ландау и Лифшицем вывод соотношений теории флуктуаций электромагнитного поля С.М. Рыто-

ва на основе флуктуационно-диссипативной теоремы. Только в курсе опубликована общая формулировка конденсации Бозе–Эйнштейна в терминах матрицы плотности. (Когда я показал соответствующее место в книге моему датскому коллеге, он грустно сказал: «Я вижу, что в курсе Ландау–Лифшица есть всё. Но как найти?»)

Книги Ландау и Лифшица в период их выхода в свет сильно отличались от современных им учебников. Например, впервые изложение статистической физики было целиком основано на методе Гиббса. Постепенно, однако, методические новинки Ландау и Лифшица проникли в учебную литературу, обычно в разбавленном виде. (Изложение Ландау и Лифшица многим кажется слишком концентрированным.)

Эта статья посвящена Ландау. Но нет сомнения в том, что «Курс теоретической физики» не стал бы таким событием, если бы не второй его автор, Е.М. Лифшиц. Лифшиц сам был выдающимся физиком и обладал способностями, дополняемыми при написании курса способностями Ландау. Он имел строгий критический ум и не пропускал логических скачков в казавшемся эффектным выводе. Умел представить себя на месте читателя, что, кажется, не всегда удавалось Ландау. И очень хорошо писал.

Ландау создал успешную школу физиков-теоретиков. Его ученики всех поколений играли и играют ведущую роль во многих разделах этой науки. Конечно, главным здесь было, что сам Ландау был великим физиком. Но с практической точки зрения немалое значение имело то, что *всякий* человек, желавший стать физиком-теоретиком, мог вступить в контакт с Ландау без каких-либо трудностей или формальностей. Достаточно было позвонить ему (домой!) или написать письмо и попросить принять экзамен теоретического минимума. Ландау относился к этой части своей жизни очень серьёзно. Он отвечал на письма сразу (я получил ответ на своё письмо из Саратова через семь дней), не откладывал экзамены надолго и очень редко переносил их. Экзамены позволяли Ландау знакомиться с молодыми людьми и отбирать тех, кого он считал перспективными. У него был на это хороший глаз, и он редко допускал ошибки.

Атмосфера в теоретическом отделе Института физических проблем, куда я попал в 1955 г., была удивительно творческой, количество интересных задач, которые ежедневно обсуждались, намного превышало возможность решить их наличными силами. Мне, однако, казалось самым удивительным, что сотрудники и аспиранты отдела имели неограниченные возможности обсуждать с Ландау любые проблемы физики. Он интересовался

всем и обычно оказывалось, что он уже думал над заданным ему вопросом. Впрочем, обсудить с Ландау интересный научный вопрос мог всякий. Достаточно было сказать Ландау: “Я занимался такой-то задачей и хочу обсудить результаты”. Ландау редко откладывал разговор больше чем на неделю. Но ход разговора мог быть весьма различен. Ландау, нередко знавший о постановке вопроса не меньше, чем автор, обычно хотел слушать “с конца”, то есть увидеть конечный ответ, правдоподобность которого он мог оценить сразу. Пытаться заставить Ландау слушать с начала до конца было безнадежно, а настойчивость часто приводила к преждевременному концу разговора, равно как и упорство в отстаивании очевидных для Ландау ошибок работы.

Кстати, свобода обсуждения в отделе не означала отсутствия дисциплины. Никто из сотрудников не имел права опубликовать статью без одобрения Ландау и отнюдь не формального одобрения. Ландау читал окончательный (по мнению автора) текст статьи очень придирчиво и почти всегда требовал переделок. Процедура иногда затягивалась на месяц-другой, и возможность утраты приоритета в расчёт не принималась. Нередко, если возникало сомнение, Ландау брал ручку и сам проделывал вычисления, чтобы проверить тот или иной пункт работы. Следить за этим было очень интересно, обычно он использовал какой-либо упрощающий вычисления трюк на каждом этапе, а половину преобразований производил в уме.

Научная работа Ландау прервалась в пору расцвета. 7 января 1962 г. он попал в автомобильную катастрофу. На шоссе Москва–Дубна автомобиль, в котором он сидел, столкнулся с грузовиком. Ландау получил очень тяжёлые травмы, в том числе травмы головы. Несколько недель он оставался между жизнью и смертью. Кажется, для его спасения было сделано всё возможное. Лучшие московские врачи безотказно посещали больного. Поскольку в больницах не было необходимых лекарств и оборудования, их присылали из-за границы, главным образом издатель “Курса теоретической физики” в Англии Дж. Максвелл. Вся эта активность требовала организации, которую взяли на себя друзья-физики. Раскачался и Минздрав СССР. Была создана комиссия во главе с профессором Н.И. Гращенковым, после чего стало возможным получать лекарства в Москве, в 4-м Главном управлении Минздрава, а не везти их за тридевять земель. Были приглашены виднейшие зарубежные нейрохирурги для консультации.

Ландау находился в бессознательном состоянии, из которого вышел только через месяц. Жизнь его была спасена, но здоровье и работоспособность не восстановились. Он всё время находился в угнетённом состоянии, разговаривал необычным для него тонким голосом и жаловался на боли. При попытке заговорить с ним на научные темы, да и просто рассказать новости он неизменно отвечал: “У меня сейчас болит живот” (или “нога”). “Завтра это пройдёт и мы поговорим”. Я и сейчас не могу вспоминать об этом без душевной боли. В 1968 г. у Ландау, как отдалённое следствие повреждений при аварии, развился паралич кишечника. Операция не помогла, работа кишечника не восстановилась. 1 апреля 1968 г. Ландау умер от послеоперационного тромба.

Печальная личная судьба Ландау не заслоняет счастливой судьбы его научного наследия. Квантовая теория конденсированного состояния, у колыбели которой он стоял, является сейчас наиболее быстро развивающимся и, вероятно, наиболее важным, с точки зрения технических приложений, разделом физики. Его статьи и книги читают и сейчас, через 40 лет после его смерти. Многие идеи учёного, первоначально казавшиеся странными, стали теперь азбучными истинами. Его творчество стало частью интеллектуального достояния человечества.

Л.П. ПИТАЕВСКИЙ,
академик

ЛИТЕРАТУРА

1. Воспоминания о Л.Д. Ландау. М.: Наука, 1988.
2. Landau. The physicist and the man. Oxford: Pergamon Press, 1989.
3. *Абрикосов А.А.* Академик Л.Д. Ландау. М.: Наука, 1965.
4. *Ландау Л.Д.* Собр. трудов. М.: Наука, 1969.
5. *Павленко В.Ю., Ранюк Ю.Н., Храмов Ю.А.* Дело УФТИ. Киев: Феникс, 1998.
6. *Капица П.Л.* Письма о науке. М.: Московский рабочий, 1989.
7. Лев Ландау: год в тюрьме // Известия ЦК КПСС. 1991. № 3.
8. *Ландау Л.Д.* Курс лекций по общей физике. М.: Изд-во МГУ, 1948.
9. *Сонин А.С.* Физический идеализм: История одной идеологической компании. М.: Физматлит, 1994.
10. *Гинзбург В.Л.* О сверхпроводимости и о сверхтекучести. Автобиография. М.: Физматлит, 2006.
11. “По данным агентуры и оперативной техники...”. Справка КГБ СССР об академике Ландау // Исторический архив, 1993. № 3.