

**ЗНАНИЕ**

НОВОЕ  
В ЖИЗНИ,  
НАУКЕ,  
ТЕХНИКЕ

СЕРИЯ  
ФИЗИКА

АКАДЕМИК  
ЛЕОНИД  
ИСААКОВИЧ  
МАНДЕЛЬШТАМ

22 3-  
A 38  
3'80



**НОВОЕ  
В ЖИЗНИ,  
НАУКЕ,  
ТЕХНИКЕ**

**АКАДЕМИК  
ЛЕОНИД ИСААКОВИЧ  
МАНДЕЛЬШТАМ**

**Серия  
«Физика»  
№ 3, 1980 г.**

**СБОРНИК СТАТЕЙ**

**Издается  
ежемесячно  
с 1946 г.**

**Издательство  
«Знание»  
Москва  
1980**

**22.3г**  
**А38**

**А38 Академик Леонид Исаакович Мандельштам. (Сборник статей). М., «Знание», 1980. 64 с. (Новое в жизни, науке, технике. Серия «Физика», 3. Издается ежемесячно с 1946 г.)**

Брошюра посвящена 100-летию со дня рождения одного из самых выдающихся советских физиков академика Леонида Исааковича Мандельштама.

Статьи, включенные в сборник, обрисовывают научную и педагогическую деятельность Л. И. Мандельштама, весомость вклада, внесенного им в физику и ее преподавание, а также глубину и разносторонность его научных интересов.

Брошюра рассчитана на широкий круг читателей, интересующихся развитием советской физики.

**20401**

**22.3г**

С. М. РЫТОВ,  
член-корреспондент АН СССР

### ЛЕОНИД ИСААКОВИЧ МАНДЕЛЬШТАМ

Очень трудно коротко рассказать о таком большом человеке и выдающемся ученом, как Леонид Исаакович Мандельштам<sup>1</sup>.

Как только я начал обдумывать этот доклад, у меня, естественно, сразу же возник вопрос: о чем рассказывать? Что может быть интересно и важно для людей, которым сейчас 20—25 лет, в жизни, работе и личности физика, несомненно исключительного и выдающегося, но родившегося 100 лет тому назад и вот уже 35 лет как ушедшего из жизни?

Я вспоминаю, что было интересно мне самому в мои 20 лет, когда я был студентом III курса физмата МГУ и даже еще не начал посещать лекции и семинары Мандельштама, что я хотел бы узнать тогда о знаменитых физиках, родившихся где-то около 30-х годов прошлого века и умерших до моего рождения? Скажем, о Гельмгольце, Максвелле, Стоксе, Кельвине, Гиббсе.

Да в общем-то ничего, кроме тех конкретных результатов и достижений в физике или математике, которые навсегда связаны с их именами. И это не было моей особенностью. Подавляющее большинство моих товарищей-студентов тоже не питало никакого пристрастия к истории вообще и к истории науки в частности, не читало мемуаров и биографий.

Лишь позднее под прямым влиянием Мандельштама я если и не полюбил такие вещи, то по крайней мере осознал их значение, их поучительность и даже их необходимость для того, чтобы ощутить научный подвиг в тех или иных открытиях и теориях — не сейчас, когда они уже вошли в плоть и кровь науки, а в те

---

<sup>1</sup> Доклад на V Всесоюзной школе по нелинейным волнам, посвященной 100-летию со дня рождения Л. И. Мандельштама, г. Горький, 9 марта 1979 г.

времена, когда они были сделаны. Это действительно поучительно, это дает и ретроспективу, и перспективу, а в каком-то отношении и вдохновляет. Посмотрите хотя бы, как Максвелл пишет о знаменитых дневниках Фарадея.

Короче говоря, до меня дошло, что представление об истории физики и об ее творцах позволяет лучше понять эволюцию и борьбу идей, позволяет почувствовать динамику науки, внутреннюю логику ее развития лучше, чем знание только добытых результатов.

Но дело, конечно, не только в этом. Ясно, что от меня, от одного из ныне живущих учеников Мандельштама, видевших его и общавшихся с ним, вы, естественно, в первую очередь ожидаете «показаний очевидца», **личных** воспоминаний. Беда в том, что я принадлежу (в отличие от М. А. Леонтовича) ко **второму** поколению учеников Мандельштама. Разница в возрасте между Мандельштамом и мною почти 30 лет, а знал я его только в течение последних 16 лет его жизни. Поэтому я не был в такой же мере близок с ним, как его сотрудники и ученики первого, старшего поколения. Это затрудняет мою задачу, которую я вижу в том, чтобы по мере сил воссоздать некий **общий** облик Мандельштама, дать **общее** представление о нем как о человеке науки и о человеке исключительных личных качеств, душевного благородства и обаяния.

Эта задача несколько облегчается тем, что к 100-летию со дня рождения Мандельштама подготовлен сборник<sup>2</sup>, в который вошло почти все, что говорили о Мандельштаме люди, знавшие его гораздо дольше и ближе, чем я. Большинства их уже нет в живых. Все, что было ими сказано после кончины Мандельштама в 1944 г., освещает его биографию, его личность, его интересы и творчество, освещает очень полно и в разных ракурсах. Именно поэтому я могу позволить себе затронуть многое только вскользь.

Вместе с тем, надеюсь, вы не посетуете на то, что я довольно часто буду прибегать к цитированию. Во многих случаях не скажешь о Мандельштаме лучше, чем сумели в свое время сказать И. Е. Тамм или А. А. Андронов, Н. Д. Папалекси или Г. С. Горелик. Имея все

---

<sup>2</sup> Академик Л. И. Мандельштам. К 100-летию со дня рождения. М., «Наука», 1979.

это в виду, я максимально сокращу чисто биографические сведения и не буду углубляться в **детальный** разбор научного и педагогического наследия Мандельштама.

Все же, имея в виду тех, кто не только не видел Мандельштама, но и ничего о нем не читал, мне придется сказать несколько слов о его биографии. Это, так сказать, «пунктирная» биография.

Родился Леонид Исаакович в Могилеве, но его детство и юность проходили в Одессе. До 12 лет он учился дома, и лишь в 1891 г. поступил в III класс гимназии, которую и окончил (с медалью) в 1897 г. Сразу же он поступил на физмат Новороссийского университета, но уже через два года был исключен в связи со студенческими волнениями. В том же 1899 г. он уехал, по совету родителей, в Страсбург (тогда это означало — в Германию), где поступил на физмат университета.

Его дальнейшую жизнь можно условно разделить на три периода. Страсбургский период — до 1914 г., т. е. до начала первой мировой войны. Затем с 1914 по 1925 г. — период войны, двух революций, гражданской войны и последующей разрухи, в течение которого Мандельштам сменил ряд городов и мест работы в поисках возможностей для серьезных научных исследований и для настоящего преподавания. И наконец, с 1925 г. — последний, московский, самый насыщенный и плодотворный период его жизни, расцвет его научной и педагогической деятельности, принесший главные его достижения.

Прежде чем несколько пополнить эти сведения, я хотел бы все же сказать и об объективных основаниях того, почему Мандельштам играет особую роль в нашей физике. Они заключаются в том, что он является одним из ее **основоположников**.

Так получилось, что в отечественной физике не было своих Лобачевских и Менделеевых. За исключением Петра Николаевича Лебедева, не оставившего выдающихся учеников, у нас не было своих физиков мирового масштаба. Наша большая физика началась после Октябрьской революции, и в ее становлении главную роль сыграли два человека — А. Ф. Иоффе и Л. И. Мандельштам.

Они совершенно разные, и роли их различны. А. Ф.

Иоффе, если можно так выразиться, насаждал физику **вширь**. Он в очень большой мере был дальновидным и активным **организатором** физического фронта у нас в стране, он положил начало ряду направлений и научно-исследовательских центров, организовал быстрый рост научных кадров. Мандельштам же насаждал физику **вглубь**, в смысле постижения духа и основ этой науки — начиная с Ньютона и вплоть до Эйнштейна, Планка, Бора и Шредингера.

Оба наши основоположника учились за рубежом: Иоффе у Рентгена, Мандельштам — у Фердинанда Брауна. Этот «импорт» физики продолжался и в следующем поколении. При прямом содействии Иоффе П. Л. Капица поехал работать к Э. Резерфорду, а Л. Д. Ландау — к Н. Бору. В результате возникли отечественные физические школы, одна из самых ранних — школа Мандельштама, которые выдвинули советскую физику на современный мировой уровень.

Многие из научных достижений Мандельштама уже давно и прочно вошли в физический обиход, причем не только как конкретные открытия, но и как «идеология» — колебательная и волновая идеология, нелинейная идеология, пронизывающая все развитие современной физики. Это хорошо. Плохо другое — то, что сплошь и рядом эти достижения превратились в фольклор. Читая, скажем, об интерференции радиоволн, о радиointерферометрах, редко можно увидеть указание на то, что первым, кто перенес идеи оптической интерференции в радиодиапазон, первым, кто указал на ряд важных практических применений такого переноса, был Мандельштам (совместно с Н. Д. Папалекси). Сегодня это фольклор, который, по определению, не имеет автора. Почему это так?

Верно ведь и обратное: если долго не называть имени конкретного автора, то постепенно оно стирается, и произведение становится фольклором. С некоторых пор имя Мандельштама упоминалось в широкой печати все реже. После смерти Мандельштама Президиум АН учредил две мемориальные премии имени Л. И. Мандельштама — по физике и по радио. К сожалению, одна из них была присуждена только два, другая — три раза. Исчезновение этих премий тоже сработало в сторону забвения.

В ту же сторону сработало и другое событие. За от-

крытие комбинационного рассеяния света Нобелевская премия была присуждена индийскому физiku Раману и не была присуждена Мандельштаму и Ландсбергу, хотя события происходили в иной последовательности, чем публикации. Открытие побочных линий в спектре рассеянного света Мандельштам и Ландсберг сделали на неделю **раньше** Рамана, но их сообщение, содержащее и факт, и правильное его объяснение, появилось на три с половиной месяца **позже**, чем посланная Раманом телеграмма в Nature, в которой не было и намека на объяснение наблюдаемого явления.

В нашей литературе обычно избегают термина «эффект Рамана», а говорят — вслед за самим Мандельштамом — о комбинационном рассеянии света. Хотя мы и имеем полное основание говорить об «эффекте Мандельштама—Ландсберга», нам приходится, видимо, избегать столь острого диссонанса с зарубежной терминологией.

Нечто подобное произошло и за 16 лет до открытия комбинационного рассеяния, еще в Страсбурге. Совместно с Папалекси Мандельштам провел там остроумно поставленные опыты, продемонстрировавшие иперцию электронов в металле. Это было сделано за четыре года до классических опытов Толмена и Стюарта, которым и достались лавры. В обоих случаях сыграло роль почти болезненно придирчивое (слова Папалекси) отношение Мандельштама к стандарту своих публикаций. Статья об инерции электронов так и не была послана в печать. В открытии же комбинационного рассеяния Мандельштам задерживал публикацию вплоть до полного устранения всяких сомнений в чистоте эксперимента и до полного уяснения того, что же именно наблюдается.

Здесь можно было бы рассказать много интересного. И о том, что Мандельштам, не зная в то время о теории Борна колебаний в кристаллах, сам быстро понял, что это **модуляция** света инфракрасными колебаниями решетки. И о том, что это понимание было прямым следствием его интуиции, прямым переносом представлений о радиомодуляции в оптический диапазон. Но об этих вещах можно прочесть в ряде статей, включая статьи и лекции самого Мандельштама.

Разумеется, с именем Мандельштама связаны не только комбинационное рассеяние, не только радионин-



терференция, но и предсказание тонкой структуры релеевского рассеяния, и обобщение понятия резонанса, и оформление теории колебаний в самостоятельную науку, и создание нелинейной теории колебаний, и соотношение неопределенностей энергия—время, и параметрика, и первое в физике блестящее применение аппарата интегральных уравнений, и многое другое, о чем мне еще придется упоминать и без чего современная физика немислима. Поражает разнообразие, даже кажущаяся пестрота этого неполного перечня (почему «кажущаяся» — об этом еще пойдет речь). Но необычайная разносторонность Мандельштама очевидна. Несомненно, он был **универсалом** в физике и, видимо, одним из последних универсалов. Как хорошо выразился о нем А. А. Андронов, «в громадном здании физической науки для него не было запертых комнат».

Мандельштам ставил и своими руками проводил эксперименты — как демонстрационные, так и исследовательские, сам участвовал в радиотехнических исследованиях — как в натуральных, так и в заводских условиях и, более того, получил (наполовину в соавторстве с Папалекси) 60 патентов на изобретения, на новые принципы измерений, новые приборы и устройства чисто инженерного характера. Экспериментальное чутье Мандельштама было исключительным. Выслушав экспериментатора и посмотрев на его установку, он тут же на месте давал совет, который снимал все трудности и приводил к успеху опыта.

Такой диапазон, охватывающий и теоретическую, и экспериментальную, и математическую, и техническую физику, и параметрические генераторы переменного тока, и логическую структуру теории относительности, — это универсализм особого, точнее говоря, **классического** масштаба.

Я позволю себе просто процитировать из уже упомянутого доклада Мандельштама об А. Н. Крылове, что, по собственному мнению Мандельштама, типично для классиков науки. Вот что он сказал:

«Первое — это отношение к вопросу: чистая или прикладная наука. Классики вообще, насколько я могу судить, этого различия не знали. В их трудах обе стороны знания взаимно дополняли и оплодотворяли друг друга...

Далее, для классиков характерен выбор проблем.

В нашей науке, говоря несколько схематично, можно различить двоякого рода проблемы. Одни носят отпечаток искусственности; часто кажется, что они создаются только потому, что дают повод к более или менее остроумным конструкциям. К типу искусственных проблем я отношу также накопления того или иного опытного материала без руководящей идеи. Такие проблемы могут быть полезны и приводят иногда к интересным результатам, но, как правило, они мало способствуют прогрессу науки.

Совершенно иной характер носят проблемы, естественным образом вытекающие из органического развития какой-нибудь отрасли знания. Они жизненны и потому плодотворны. Я не хотел бы быть неправильно понятым. Говоря «жизненный», я не имею в виду сказать «утилитарный».

Эйнштейн своим принципом относительности, Планк, Бор и другие квантовой механикой — я привожу только самые разительные примеры — ответили на глубоко жизненные вопросы, значение которых не может быть переоценено. Науку двигает вперед решение жизненных проблем».

Вот в чем Мандельштам видел типичные черты классиков науки и что он высказал, имея в виду А. Н. Крылова. Но ведь эти черты в полной мере свойственны и самому Мандельштаму. Решенные им проблемы были жизненны, и именно поэтому их решение открывало новые пути и в физике, и в технике.

Я продолжу цитату из того же доклада Мандельштама.

«Но именно ввиду их жизненности они большей частью трудны. Природа, ставя проблему по существу, предоставляет нам самим найти соответствующую четкую формулировку, отделить главное от второстепенного, а это часто не легко. Природа, как говорил Френель, строит свои законы через голову математических трудностей, которые физику, однако, нужно преодолеть. Поэтому решение важных жизненных проблем под силу только крупнейшим ученым.

...Жизнь, выдвигая те или иные проблемы, не считается с установленными нами — часто искусственно — границами между отдельными науками и их областями, границами, которые мы иногда — неизвестно почему — так ревниво оберегаем. Отсюда — разносторонность ис-

следователя таких проблем. Но это не та разносторонность, которая охватывает одновременно и математику, и историю, и физику, и медицину, которая имела смысл в давно прошедшие времена, а теперь неизбежно связана с поверхностностью. Это разносторонность, происходящая от стремления охватить всю многогранную проблему в целом и от глубокого понимания связи между отдельными, для обычного глаза совершенно разнородными явлениями».

Всего два абзаца, но как много в них сказано. Здесь затронуты и правильная идеализация, и различие между универсализмом и энциклопедизмом, и взаимная связь внешне разнородных явлений. Позвольте мне в меру сил прокомментировать эти вопросы, разумеется, имея в виду самого Мандельштама.

Ландау как-то сказал, что теоретическая физика — это умение делать оценки. Это умение, несомненно, опирается на идеализацию задачи (термин Мандельштама; сейчас чаще говорят о моделировании), т. е. на ее упрощение, отбрасывание несущественного и сохранение только существенного. Без этого задача неприступно сложна. Но как решить заранее, что существенно, а что нет? Для этого нет никаких правил, никаких рецептов, никакого алгоритма. Все опирается на накопленный опыт, на чутье, на интуицию. Поэтому правильная идеализация и является искусством, проявлением мастерства, таланта. В одной из своих лекций Мандельштам выразил это иным образом: при постановке задачи физик сам должен уметь определять необходимую меру строгости. В другой раз он сказал: «Когда я перевожу физику на математику, я всегда от чего-то отвлекаюсь». По утверждению Андропова, Мандельштам считал, что вопросы идеализации должны занимать фундаментальное место во всяком преподавании физики — как в школьном, так и в университетском. Уже школьник должен сознавать, что в любой физической теории мы работаем с идеальными моделями реальных вещей и процессов. Надо ли добавлять, что Мандельштам был величайшим мастером правильной идеализации.

Говоря о разносторонности, Мандельштам отвергал энциклопедизм, или, как любят теперь выражаться, «эрудированность». Мандельштам вовсе не был человеком, который знает все, что сказали по данному вопро-

еу другие. Его разносторонность сочеталась с внутренним единством. На протяжении всей его жизни, начиная со Страсбурга, можно отчетливо проследить становление, развитие и замечательное использование некоторых **общих** идей или, говоря его словами, **руководящих точек зрения**. Именно они направляли его собственное творчество и его размышления. Именно они (наряду с доскональным изучением первоисточников) формировали его взгляды. Именно они вели к установлению внутренних связей, объединявших в его сознании всю физику в единое целое. Андронов говорит даже не только о физике, а обо всем точном естествознании, включая математику и технику.

Однако и в рамках теоретической физики можно заметить очень характерное для Мандельштама свойство. Когда речь шла об истоках физических теорий, его никогда не удовлетворяли ссылки на «очевидность». Его всегда интересовали вопросы гносеологического порядка и он стремился (с годами — все больше) уяснить себе — а значит, и другим — самые глубинные корни физических постулатов и теорий, корни как исторические, так и логические. Он был не только замечательным физиком-универсалом, но и глубоким мыслителем.

У меня нет возможности подробнее осветить эту сторону личности Мандельштама, но прочтите (или перечитайте) его лекции по теории относительности или по основам квантовой механики и вы сами убедитесь в справедливости сказанного.

Естественно было бы теперь обратиться к вопросу о том, в чем же заключались руководящие точки зрения, которые выработал Мандельштам. Но прежде чем к этому перейти, я хотел бы немного пополнить «пунктирную» биографию Мандельштама и сказать о нем как о человеке.

Вернемся к периоду Страсбурга, где он прошел путь от студента до профессора университета (с 1913 г.). У него там были хорошие учителя — сам Браун, уже известный работами по термодинамике и по электроизмерительным приборам (в частности, трубка Брауна, предок современных электронных осциллографа и кинескопа), математик Генрих Вебер, физик-теоретик Эмиль Кон. По мере научного роста Мандельштама его отношения с этими крупными учеными переходили в дружбу.

В Страсбурге Мандельштам изучил математику и классические труды Максвелла, Гельмгольца, Больцмана, Герца, Лоренца и Релея. Последний оказал на Мандельштама особое влияние. Труды Релея, который, в сущности, завершил линейную теорию колебаний, вызвали у Мандельштама особый резонанс, были, как хорошо выразился Папалекси, ему конгениальны. «И не случайно, — пишет далее Папалекси, — пути их научного творчества часто шли параллельно и неоднократно пересекались».

Не подлежит сомнению, что «атмосфера» электромагнитных колебаний и волн, в которую Браун сразу же погрузил Мандельштама, наряду с изучением Релея положила начало **колебательному подходу** Мандельштама ко **всей** физике. «Беспроволочная телеграфия» сблизила Мандельштама и с Папалекси, с нес началались их многолетнее сотрудничество и дружба.

Ряд выдающихся работ в Страсбурге принес Мандельштаму европейскую известность. Совместно с Папалекси он создал тончайший измеритель частот и декрементов, использующий ими же придуманный фазовый динамометр. Мандельштам провел там работы и по направленности антенн, выяснил роль фаз в этом деле и вскрыл допущенную здесь известным радиоспециалистом Флемингом ошибку. Я подчеркиваю слово «фаза», ибо, несомненно, с тех времен начинается обостренное внимание Мандельштама к фазовым соотношениям в колебаниях и волнах, породившее позднее радионтерфферометрию. Здесь же произошел перенос радионтерфферометрии в оптику, начались работы по рассеянию света и последовавшее затем благодаря Смолуховскому, Эйнштейну и самому Мандельштаму выяснение роли флуктуаций в рассеянии. Здесь и работы по теории дисперсии, и обнаружение ошибки у М. Планка в вопросе об ослаблении света из-за рассеяния. Это было в 1904 г. 25-летний доцент смело вступил в полемику с таким корифеем, как Планк, и доказал свою правоту. Весьма сухо Планк это признал. В открытке, присланной Л. И. (31 июля 1905 г.), он писал:

«Милостивый государь! Вы совершенно правы в своем последнем возражении. Соответствующую поправку я сделал на берлинском заседании, т. е. 21 апреля 1904 г. На это указано в отписке, который я од-

новременно Вам посылаю. С глубоким уважением М. Планк».

В Страсбурге же Мандельштам сделал свою выдающуюся работу по рассеянию света на границе раздела двух жидкостей — из-за тепловых флуктуаций этой границы. Можно сказать, в награду он получил открытку от Эйнштейна (1913 г.):

«Дорогой г-н Мандельштам! Я только что доложил на коллоквиуме о Вашей красивой работе по флуктуациям поверхности, о которой ранее мне сказал Эренфест. Сожалею, что Вас лично тут нет. С наилучшим приветом. Ваш А. Эйнштейн».

На открытке расписались участники коллоквиума.

Усилившийся интерес к оптике, к вопросам разрешающей силы, породил классическую работу Мандельштама по строгой теории образования оптического изображения в микроскопе при когерентном и некогерентном освещении объекта. Именно в ней впервые были блестяще использованы интегральные уравнения. И снова возникла полемика — на этот раз с Люммером, и снова Мандельштам оказался прав.

Наконец, еще одна чрезвычайно характерная для Мандельштама работа: он заинтересовался тем, как создать в оптике источник, близкий (в масштабе длины волны) к границе раздела, т. е. создать условия, которые имеют место в радио. Что при этом будет? Он чрезвычайно остроумно осуществил такой источник и изучил весь вопрос как экспериментально, так и теоретически.

«Все эти исследования, — пишет Папалекси, — часть коих представляли собой блестящие, весьма содержательные полемики с Планком, Флемингом, Люммером, в которых Л. И. доказал ошибочность их воззрений, принесли ему признание и известность».

Заканчивая рассказ о страсбургском периоде, нельзя не упомянуть и о том, что именно в студенческие годы у Мандельштама, по свидетельству Папалекси, внезапно пробудился глубокий интерес к литературе, к музыке, к изобразительным искусствам. Он начал поглощать художественную литературу на разных языках, посещать художественные галереи, концерты. Его любимым поэтом был Пушкин. Стихи Пушкина он почти все знал наизусть и много читал о нем. Авторитетные литературоведы считали, что позднее Мандельштам

сделался пушкинистом чуть ли не профессионального уровня.

Первая мировая война оборвала работу в Страсбурге. В конце июля 1914 г., едва закончив лекции, он спешно выехал на родину и прибыл в Одессу в день объявления войны. Как я уже говорил, период до 1925 г. был периодом поисков пригодного для науки места работы. Я скажу несколько слов лишь о трех наиболее длительных этапах этого периода.

Два года Мандельштам проработал научным консультантом на заводе Сименса и Гальске в Петрограде (ныне завод им. Козицкого). Об этой работе довольно подробно написал ученик Мандельштама, а в дальнейшем — его и Папалекси многолетний сотрудник Е. Я. Щеголев, который в то время был там студентом-практикантом. В статье «Л. И. Мандельштам — радиоинженер» (вошедшей в юбилейный сборник) Щеголев описывает целый ряд замечательных разработок и приборов Мандельштама. Он пишет, что всех поражало, «как красиво и подчас гениально просто решал Л. И. очень непростые технические задачи, так просто, что невольно у каждого из нас возникал вопрос, почему же это раньше не пришло мне в голову?». А вопросы были не только такие, как создание прецизионного абсолютного измерителя частоты, но и такие, как технология оксидирования проволоки для реостатов. Много лет на разных заводах проволоку оксидировали потом по способу Мандельштама, не зная имени автора этого способа.

В течение четырехлетнего пребывания в Одессе (1918—1922) Мандельштам принял живейшее участие в создании Одесского политехнического института и буквально на голом месте создал физический практикум и лабораторию. Он заведовал там кафедрой физики, привлек в институт Н. Д. Папалекси и И. Е. Тамма и на высоком уровне поставил чтение лекций. Сохранилась вводная лекция Мандельштама к общему курсу физики в этом институте\*.

Лекция дает представление и об уже достигнутом в то время педагогическом мастерстве Мандельштама, и об его особом стиле. Тема лекции: нужна ли физика инженеру, причем не только «свой» раздел физики, а

---

\* См. настоящий сборник.

вся эта наука в целом, и не только опытная ее часть, но и теория. Ответ, конечно, положительный: широкое владение физикой просто необходимо каждому инженеру.

Всюду и всегда Мандельштам думал о науке.

Размышляя о рассеянии света — вопросе, который занимал его всю жизнь, — он уже в 1918 г. пришел к мысли, что тепловые флуктуации в однородной среде должны при рассеянии монохроматического света создавать в рассеянном свете спектральный дублет. В основе этого предсказания лежал сделанный им ранее решающий шаг — отождествление «формальных» гармонических решеток Эйнштейна с акустическими волнами Дебая. Много позднее он сказал об этом шаге с оттенком гордости, ни звуком не обмолвившись о себе, что «сделать это было не легко». В 1922 г. к тому же предсказанию пришел Бриллюэн. Экспериментально увидеть дублет Мандельштама—Бриллюэна удалось лишь через 12 лет. Принято все же констатировать, что дублет М.—Б. именуется так повсеместно, т. е. это один из немногих случаев, когда открытие Мандельштама не стало фольклором и не закреплено только за французским автором.

В 1922 г. Мандельштам переехал в Москву в качестве научного консультанта радиолaborатории Треста заводов слабого тока, где были хорошие условия для работы: и аппаратура, и научная литература. Ситуация еще улучшилась после перевода лаборатории в Петроград и преобразования ее в Центральную радиолaborаторию (ЦРЛ). В последующие три года Мандельштам и Папалекси сделали много хороших работ в области радиомодуляции, стабилизации частоты, повышения селективности приемников, но Мандельштам по-прежнему стремился к **физическим** исследованиям и к неотделимому от них преподаванию.

И вот, как я уже говорил, в 1925 г. мечта Мандельштама осуществилась: он был приглашен в качестве профессора физики и заведующего теоретическим кабинетом НИИФ МГУ. Очень быстро он стал центральной фигурой факультета и института. Столь же быстро сложилась и московская школа Мандельштама.

В самом начале доклада я сказал, что А. Ф. Иоффе был крупным **организатором** научных центров. Мандельштам ~~вообще~~ не был организатором. Говоря о мос-



ковской школе Мандельштама, я имею в виду не создание каких-либо институтов или лабораторий, а возникновение коллектива талантливых и очень разных людей, вовлеченных в орбиту его научного влияния и исключительно широких научных интересов, вовлеченных исключительно его собственным притяжением как ученого и человека.

Школа Мандельштама — это и особая атмосфера, полная взаимной доброжелательности и вместе с тем чуждая малейших послаблений в требованиях, предъявляемых к работнику науки. Я не представляю себе подлинно научной школы без такой атмосферы.

Конечно, совместная работа членов школы Мандельштама получала и организационное оформление, и в этом большую роль сыграли руководители уже существовавших институтов, в которых работал Мандельштам. Сами они не входили в школу Мандельштама, но сумели по достоинству оценить и его самого, и эту школу. В этой связи надо с благодарностью отметить и роль тогдашнего директора НИИФ МГУ Б. М. Гессена, и роль С. И. Вавилова, который в МГУ, и в ФИАН, и в Академии наук всегда оказывал в меру своих всевозрастающих возможностей широкую поддержку работе Мандельштама и его сотрудников.

Имена этих ближайших сотрудников и первых московских учеников Мандельштама хорошо известны. В области радиофизики и радиотехники это его друг со студенческих лет Н. Д. Папалекси, в физической оптике и ультразвуковой акустике — Г. С. Ландсберг, в теоретической физике — И. Е. Тамм и М. А. Леонтович, в теории колебаний — А. А. Андронов, А. А. Витт и С. Э. Хайкин, а позднее Г. С. Горелик.

Небезынтересно отметить, насколько все ученики Мандельштама остались **разными**, несмотря на общую школу. Это показывает, что Мандельштам **развивал**, а не подавлял индивидуальность своих учеников. В результате не возникло унификации ни по интересам, ни по стилю работы, ни по стилю публикаций. Статью Горелика не спутаешь со статьей Леонтовича или Андропова. Все они и без подписей тотчас же различимы.

Некоторые из названных первых представителей школы Мандельштама создали в дальнейшем свои физические школы, хотя и менее широкие по профилю, но весьма сильные. Я имею в виду теоретические школы

Тамма, Андропова и Леонтовича и экспериментальную школу Ландсберга.

До 1935 г. Мандельштам продолжал совместно с Папалекси руководить радиотехническими исследованиями в ЦРЛ. В 1934 г., после перевода Академии наук в Москву, он взял под идейное руководство две лаборатории ФИАН — оптическую, возглавленную Г. С. Ландсбергом, и лабораторию колебаний, возглавленную Н. Д. Папалекси. Научные исследования по оптике и радиофизике продолжались и в НИИФ МГУ, а на физфаке Мандельштам регулярно проводил серии ежегодных семинаров и лекционных курсов, представлявших собой совершенно **уникальное** явление в преподавании физики.

Остается добавить, что к московскому периоду относятся и многократные проявления признания исключительных заслуг Мандельштама. В 1928 г. он был избран членом-корреспондентом АН СССР, а в 1929 г. — действительным членом АН, причем его выдвинули в академики почти все вузы и научные учреждения Союза. В 1931 г. ему была присуждена премия имени Ленина, в 1936 г. — премия им. Менделеева, в 1942 г. — Государственная премия, в 1940 г. он был награжден орденом Трудового Красного Знамени, а в 1944 г. — орденом Ленина.

Мандельштам был исключительно **цельным** человеком. Он стремился к истине и был бескомпромиссно принципиален как в науке, так и в любой жизненной ситуации. Вместе с тем эта железная принципиальность удивительным образом сочеталась у него с мягкостью, деликатностью, доброжелательностью и подлинной добротой. А. Н. Крылов сказал о нем: «Л. И. отличался прямоотой, честностью, полным отсутствием искаательства и лукавства...» Надеюсь, что старинное слово «искательство» всем понятно, несмотря на постоянное обновление его содержания.

Вот некоторые примеры из воспоминаний о Мандельштаме.

И. О. Вильнер — дочь друзей Мандельштамов — пишет о том, как однажды Л. И., хотя он не совсем хорошо себя чувствовал, захотел посмотреть теннисный матч. Попытались достать такси, но ничего не получилось, и тогда она предложила вызвать машину из га-

ража АН. Вильнер пишет: «Л. И. посмотрел на меня так, что я не знала, куда деваться от смущения.

— О чем ты говоришь? Поехать посмотреть матч в академической машине? Как это могло прийти тебе в голову?»

Квартира Мандельштама в здании НИИФ имела внутренний выход в Институт и находилась рядом с Оптической лабораторией Ландсберга. Разумеется, никаких вахтеров тогда не было, квартира воспринималась как часть Института, и этим ходом в квартиру пользовались друзья, коллеги, ученики Л. И., он сам и его семья.

Е. Л. Фейнберг пишет: «На самом деле здесь проходила невидимая граница.

— Неужели Вы думаете, — пояснял Сергей Леонидович Мандельштам, — что если у нас не работает радиоприемник и нужно проверить напряжение на лампе, то можно принести на минуту вольтметр из лаборатории? Это вызвало бы подлинный гнев у отца. Принцип есть принцип — государственное имущество неприкосновенно».

Я вовсе не хочу, чтобы эти два эпизода окружили Мандельштама ореолом особой добродетели. Для него этот принцип был просто проявлением элементарной порядочности, так сказать, тривиальным условием самоуважения.

Вот два других эпизода, характеризующих принципиальность Мандельштама в отношениях с людьми. Об одном из них мне напомнил С. М. Райский.

С московскими физиками школы Мандельштама работал длительное время один ленинградец. Хотя его уже нет в живых, я назову его *М*. Потом *М* вернулся в Ленинград, где имелась лучшая аппаратура, и сделал хорошие эксперименты, полностью подтвердившие одно предсказание Мандельштама. *М* опубликовал статью, в которой ни словом не обмолвился ни о Мандельштаме, ни о тех, с кем он работал первоначально. Это нарушение научной этики вызвало возмущение москвичей. Ландсберг предлагал написать в Ленинград соответствующее письмо. Тамм, со свойственной ему горячностью, заявил, что он немедленно поедет в Ленинград и там выскажет прямо в лицо, кому следует, все, что он по этому поводу думает. Спокойней всех отнесся к этому инциденту Мандельштам. Он сказал: «Взрослых

людей не воспитывают. С ними либо имеют дело, либо не имеют. С *N* дела иметь не следует».

Больше с *N* он дела не имел.

И опять же я не хочу создать впечатление о Мандельштаме как о некоем фанатичном правдолюбце. Он был по-настоящему мудрым человеком, видящим жизнь не в черно-белом изображении. Он всесторонне взвешивал чей-либо поступок или проступок, учитывая и причины, и обстоятельства, и мотивы. Именно поэтому его окончательное суждение было глубоко продуманным и обоснованным. В данном случае он не нашел в поступке *N* ничего, кроме честолюбия.

В. С. Алексеев-Попов вспоминает, что в столовой у Мандельштамов стоял за ширмой диван, часто служивший ложем для гостей, которые нуждались в ночлеге. В 1931 г. он сам был таким гостем, причем на короткий срок оказался здесь в компании с гостем совсем иного склада и облика. Он пишет: «Если я, выросший в провинции, напоминал кузена Лариосика, то «сосед» мой, молодой, но уже знаменитый своим открытием физик, живший в Ленинграде, был одет по последней моде Запада, где он успел уже не раз побывать и куда вновь направлял свой путь для участия в одном из научных конгрессов, к чему, однако, встретились непредвиденные им препятствия. Усилия этого моего временного «соседа» и были направлены на то, чтобы прибегнуть к авторитету Л. И. для устранения этих препятствий. И здесь я мог наблюдать, как почти изысканная любезность Л. И. в качестве хозяина ни в малейшей степени не распространялась на область искомого заступничества, саму возможность которого он отвергал из глубоко принципиальных соображений. Позицию эту он ни на йоту не изменил, и будущее показало, что, отказав этому человеку в доверии, он был морально глубоко прав».

Неудивительно, что моральный авторитет Мандельштама был исключительно высок и далеко вышел за рамки его школы и института. Иной раз посторонние люди приходили к нему или писали ему, чтобы узнать его мнение или получить совет по поводу той или иной ситуации или своих поступков и намерений. Пожалуй, лучше всех сказал об этом Г. С. Ландсберг в своем выступлении после смерти Мандельштама. Он сказал:

«Теперь я уже пожилой человек. Но я не стыжусь

признаться, что на протяжении двух десятилетий моей близости с Л. И. я, принимая то или иное ответственное решение или оценивая свои поступки и намерения, задавал себе вопрос — как отнесется к ним Л. И. И мне было ясно, что то, что может вызвать его осуждение, не должно быть предпринято. Я мог не соглашаться с Л. И., особенно когда речь шла о тех или иных практических шагах, но никогда у меня не было сомнения в правильности морального суждения Л. И. о людях и поступках».

Любопытно, что Мандельштам всегда настороженно относился к слову «очень». Услышав суждение о ком-то, что он *очень* порядочный человек, Мандельштам ска- зал: «Очень порядочных людей не бывает. Человек может быть либо порядочным, либо непорядочным. Очень порядочный человек — человек непорядочный».

Так же он реагировал и тогда, когда речь заходила об *очень* способных молодых людях. Он любил вспоминать в таких случаях изречение старого часового мастера из Одессы: «Не люблю способных. Способные на все способны».

Ландсберг писал о мягкости Л. И.:

«От Л. И. можно было услышать порицание за недостаточную мягкость речи и несдержанность высказываний. Но твердости поведения он требовал всегда и никогда не рекомендовал уступчивости. Слово «суровость» меньше всего подходит к образу Л. И., всегда искренне мягкому, человечному и доброму. И тем не менее ничье суждение не было более суровым, когда дело касалось какого-либо компромисса».

Вот несколько иллюстраций человеческих качеств Мандельштама. Райский вспоминает об отношении Мандельштама к суеверным людям, верящим в том, что если черная кошка перебежала дорогу, то надо обойти путь кошки... Мандельштам считал, что «не следует ироническими замечаниями побуждать суеверного человека действовать вопреки приметам. Поступая против своих привычек, человек нервничает, теряет душевное спокойствие и способность хорошо ориентироваться в уличном движении».

Кстати, переходя от черной кошки к «черным» рецензентам ВАКа в наши дни, которые, оставаясь неизвестными, «режут» **защищенные** диссертации, можно вспомнить мнение Мандельштама о порядке присужде-

ния ученых степеней. Он считал, что критиковать диссертацию надо до ее постановки на диспут. Если же работа уже принята к защите, то на этой стадии не следует препятствовать присуждению степени.

Я вспоминаю его оценку моей собственной первой статьи «К вопросу о детектировании». Л. И. дал мне сжатые указания, как написать статью. Я написал и, конечно, был уверен, что написал хорошо. Отдав мой «манускрипт» (слово Мандельштама. Он не говорил «рукопись»), я пришел через несколько дней к Мандельштаму и, ожидая похвал, спросил его, как он ее находит. Не сказать правду он не мог, но сказать ее для него было мучительно. Он опустил глаза и очень тихо промолвил лишь одно слово: «Ужасно». Изучая его правку, я понял, что это действительно было ужасно, и понял, как надо писать научные статьи.

Другой эпизод требует некоторых предварительных пояснений.

В 1944 г. приближалось 50-летие изобретения радио А. С. Поповым, в связи с чем подготавливались два сборника. Первый — о самом изобретении — готовил А. И. Берг, а второй — «Из предыстории радио» — готовил Мандельштам, а я помогал ему.

Надо сказать, что Мандельштам первоначально держался того мнения (вероятно, принятого среди ученых Ф. Брауна), что Попов и Маркони изобрели радио независимо друг от друга, причем Маркони сразу же обогнал Попова в практических применениях. Берг привозил к Л. И. огромные папки собранных им документов и горячо доказывал приоритет Попова. Мандельштам тщательно вникал во все аргументы и в конечном счете согласился с Бергом. Прочитав ряд документов, он в моем присутствии сказал: «**Этого** я не знал».

Затем он начал писать введение ко второму сборнику. Это введение обрывается на полуслове. Оно было последней статьей Мандельштама.

Мандельштам подбирал весь материал ко второму сборнику и тщательно проверял качество всех переводов. Я перевел знаменитый доклад Герца «О соотношениях между светом и электричеством», прочитанный в 1889 г. в Гейдельберге и подытоживший установление электромагнитной природы света. Поправок к моему переводу у Л. И. было немного, но об одной из них я

и хочу сказать. Она чрезвычайно характерна для Мандельштама, для его деликатности.

В моем первоначальном переводе доклад Герца начинается словами: «Многоуважаемое собрание! Когда речь идет о соотношениях между светом и электричеством, профан (der Laie) представляет себе первым делом электрический свет».

Мандельштам сказал: «Нет, так нельзя. Конечно, не «профан», а «человек непосвященный».

Вот еще один эпизод, о котором вспоминает И. О. Вильнер.

«Мы зашли к Мандельштамам в то время, когда Л. И. принимал в аудитории экзамен у какой-то студентки или аспирантки. Он вошел в комнату очень расстроенный и обратился к своей жене со словами: «Пожалуйста, пойди и скажи этой девушке, что она ничего не знает. Пусть придет в другой раз». Ему самому сказать это было слишком трудно.

Я не сказал и половины того, что мне хотелось бы и что я мог бы рассказать о Л. И. Мандельштаме, как об отдельных штрихах его биографии, так и о вещах, существенных для полного о нем представления.

Здесь и его забавная для нас, студентов, склонность прибегать в первые годы московского периода к немецким словечкам и поговоркам. Кстати сказать, сразу же после прихода Гитлера к власти в Германии он полностью исключил все это из своего лексикона и сразу же официально заявил о своем выходе из Германского общества физиков и естествоиспытателей.

Здесь и его влияние на людей, в частности — на студентов, его способность воспитывать без морализирования. Как вспоминает В. А. Фабрикант, «...нас, студентов, воспитывали не нравоучениями, а личным примером, своим отношением к науке, друг к другу. Мы ощущали чистоту атмосферы, нас окружавшей, что далеко не всегда бывает. Мы видели, как Л. И. радуется чужим достижениям, видели, как он сочетает большую терпимость к людям с твердостью в своих научных убеждениях».

Здесь и подчеркнутая Андроновым почти полная неспособность Мандельштама ошибаться в вопросах физики. И Андронов, и Тамм, и Папалекси пишут об известных парадоксах, которыми Эйнштейн и Подольский пытались опровергнуть квантовую механику и ко-

торые Мандельштам на следующий же день полностью разъяснял, задолго до того, как это делал Н. Бор. Разъяснял, но не публиковал, поскольку Эйнштейн, Бор, говорил Мандельштам, «это люди, лучше которых мы не знаем». «Может быть, — говорил он, — я чего-то не понимаю».

Здесь и пребывание Мандельштама во время войны в Боровом. Планы ряда монографий, которые он хотел написать, чувствуя, видимо, что из-за усиливающейся болезни сердца времени у него остается уже немного. В частности, с приехавшим в Боровое Папалекси Мандельштам обсуждал план монографии по параметрике и параметрическим генераторам. Тогда же они пришли к выводу о технической возможности радиолокации Луны, на 15 лет опередив в смысле научной инициативы американцев.

Много еще есть такого, о чем стоило бы рассказать, но я чувствую, что пора заканчивать. Я остановлюсь в заключение только на трех уже упомянутых, но отложенных вопросах — на руководящих точках зрения Мандельштама, на нелинейном мышлении и на мандельштамовском преподавании.

Может быть, лучше, точнее, чем другие, обрисовал научный облик Мандельштама А. А. Андронов.

В его докладе<sup>3</sup> действительно охвачены наиболее существенные черты. На трех из них я и хочу коротко остановиться, поскольку после доклада Андропова прошло 35 лет.

Начну я с нелинейного мышления.

Нелинейность в физике — отнюдь не новая вещь. Небесная механика, гидродинамика, электротехника с железом, релятивистские законы движения, эйнштейновская теория гравитации — все это «от роду» нелинейно. Но в каждой из названных областей нелинейность всегда воспринималась как некая специфическая неприятность, как «своя» нелинейность в данной области. Первым, кто остро осознал необходимость выработки «нелинейного физического мышления», был именно Мандельштам. Он четко поставил эту задачу в своем замечательном докладе на конференции по колебаниям в 1931 г., поставил применительно к теории колебаний и радиотехнике. Нелинейность вошла в радиотехнику

---

<sup>3</sup> См. настоящий сборник.



начиная с искрового пробоя и когерера Бранли, но с появлением электронных ламп и автогенераторов незатухающих колебаний она сделалась **жизненной** проблемой. В ту пору никто не понимал отчетливей и яснее Мандельштама, что большие возможности классической линейной теории колебаний, начавшейся с Лагранжа и в большой мере завершенной Релеем, все же ограничены, и что широчайший круг физических и технических вопросов требует создания нового подхода, новой, нелинейной, теории.

Самим Мандельштамом или при его участии вырабатывались нелинейные понятия и нелинейная интуиция, нелинейный математический аппарат теории колебаний, ее нелинейный язык. Подводя итог этого процесса в 1944 г., Андронов предлагал сравнить положение дел в 1927 г., когда имелись лишь пионерские работы Ван-дер-Поля, Эпплтона и немногих других авторов, с положением в 1944 г., когда уже имелась на вооружении качественная теория дифференциальных уравнений А. Пуанкаре, была развита теория разрывных автоколебаний, началось вторжение в теорию автоматического регулирования и сделаны первые шаги в **распределенных** нелинейных системах.

Закономерно продолжить сегодня это сопоставление и сравнить положение вещей в 1944 г. с 1979 г. Нелинейное мышление вторглось в теорию **полей**, в **волновые** задачи, в распространение электромагнитных волн и в том числе (из-за лазеров) в оптику. Я не говорю уже о дальнейшем развитии нелинейной акустики. Более того, даже квантовики сознают, что достижение общей теории элементарных частиц и всех видов их взаимодействий невозможно в рамках линейной теории  $\Psi$ -волн, а требует, видимо, самосогласованной **нелинейной** теории разных  $\Psi$ -функций.

Что дает мне основание переносить идеи теории колебаний на всю физику? Это особое положение теории колебаний, новое мандельштамовское понимание фундаментальной роли теории колебаний в развитии всей физики, к которому он пришел в Боровом и которое, разумеется, тут же захотел поведать всем, задумав новый курс теории колебаний. Уже совсем больной, он начал этот курс в 1944 г., но успел прочесть только четыре лекции.

Вы знаете, что первоначальное деление физики на

ее традиционные области — механику, акустику, оптику и т. д. — имело антропоморфный характер. Это было деление по нашему **восприятию** явлений. В рамках этого деления выросло достаточно глубокое знание законов внутри каждой из таких областей, что и подготовило почву к установлению **общности законов**, к тому, что Андронов назвал позднее — применительно к теории колебаний — «изоморфизмом закономерностей». Это более поздний этап и соответственно более высокий уровень **классификации** явлений — не по их восприятию, а по **общности закономерностей**. Такая классификация обладает огромной эвристической силой.

Уже Релей в своей «Теории звука» написал дополнительную главу об электрических колебаниях, подчеркнув, что оба вида малых колебаний — звуковые и электрические — это одно и то же, как говорится, один к одному. Но при дальнейшем развитии нелинейной теории колебаний принцип изоморфизма поднялся от тождественности уравнений на более высокий уровень. Не простое тождество уравнений, а принадлежность **разных** уравнений к одному и тому же типу или классу в смысле топологической структуры фазового пространства. Вслед за Мандельштамом мы говорим теперь не только об общеколебательных, но и об общеволновых законах, хотя общей качественной теории какого-то функционального фазового пространства для полей пока не существует.

Поскольку и в указанной более развитой форме принципа изоморфизма речь идет об **уравнениях**, в каком-то смысле, говорил Мандельштам, все это математика. Но он же подчеркивал, что этот принцип нельзя считать чистой математикой. Ведь в отличие от чистой математики физические уравнения — это математическое выражение **физических** законов, уравнения для **физических** величин, которые мы обязаны так или иначе уметь измерять. Эти уравнения подконтрольны опыту, и тем самым даже наиболее общие аксиомы (например, вариационные принципы), из которых эти уравнения можно вывести, являются не результатом абстрактного соглашения, а отражением устройства природы. Поэтому и изоморфизм закономерностей — это не следствие каких-то логических упражнений, не что-то принимаемое а priori, а тоже отражение того, что имеет место в природе. Поэтому же, как выразился Мандель-

штам, «именно физика учит нас, как допрашивать дифференциальные уравнения».

Поскольку изоморфизм закономерностей не априорен, он может оказаться и не универсальным. Но в теории колебаний, с ее общепризнанным значением, он установлен с очень большой надежностью и уже широчайшим образом оправдал себя как при изучении известных, так и при открытии новых явлений. Я имею в виду мандельштамовскую идею «колебательной взаимопомощи» традиционных разделов физики, тот «интернациональный» язык теории колебаний, на котором эти разделы, говорящие на своих «национальных» языках, могут общаться между собой.

Вряд ли надо приводить относящиеся сюда высказывания из лекций и докладов самого Мандельштама. Кроме его собственных выступлений, их можно найти почти у всех, кто о нем писал. Я хотел бы только подчеркнуть то изумительное искусство, с каким сам Мандельштам пользовался этой колебательной взаимопомощью и в собственных исследованиях, а в своих лекциях. Это искусство позволяло ему с легкостью перебрасывать мосты между традиционно «разными» явлениями: от радио к оптике во времена Страсбурга, от оптики к радио в московские времена — при развитии радиointерференционных методов, и снова от радио к оптике в релеевском и комбинационном рассеянии. В учении о резонансе, в модуляции, в параметрике, где угодно, он без малейшего усилия привлекал и механику, и электродинамику, и оптику, и акустику, и молекулярную физику, и квантовую механику. Можно сказать, что традиционное деление физики не играло для него роли, но... только там, где действительно работал изоморфизм закономерностей. С не меньшей ясностью он видел и специфические особенности разных областей физики.

Вообще в нем удивительным образом сочетались любовь к широким обобщениям и зоркое, обостренное восприятие конкретного факта, в нем сочетались, как сказал Тамм, ум абстрактный и ум пластический.

Конечно, вы слышали о последних достижениях психологической науки, установившей разную роль обоих полушарий мозга: правое оперирует конкретными понятиями, образами, а левое постигает абстракции, логическую структуру и т. п. У всех людей оба полуша-

рия связаны между собой, но у Мандельштама это была, по-видимому, какая-то особая, **сильная** связь...

Быть может, самым ярким и значительным примером выявления специфичности определенной области физики служит проведенный им анализ вопроса о том, что означает **измерение** в доквантовой и в квантовой физике. Его теория **косвенных измерений** в квантовой механике, опередившая близкие в некоторых отношениях идеи Гейзенберга, — это, по свидетельству самих квантовиков (в частности, И. Е. Тамма), был оригинальный и весомый вклад в понимание самой квантовой теории.

Лучше всех об идее колебательной взаимопомощи и ее претворении в жизнь самим Мандельштамом написал Андронов. Я не буду развивать эту тему дальше, так как на сегодня колебательная и **волновая** взаимопомощь уже давно вошла в физический обиход.

Последнее, на чем нельзя не остановиться, — это преподавание Мандельштама, его лекции, семинары и вообще его выступления. Много и многими написано о совершенно особой эмоциональной атмосфере, которую создавали выступления Мандельштама. Его лекции и доклады захватывали аудиторию, заставляли ее испытывать радостное возбуждение, забывать обо всем на свете и переживать услышанное. Даже люди, далекие от физики, бывали потрясены. После доклада Мандельштама о радиоинтерференции (1938 г.) академик А. Е. Ферсман написал ему письмо:

«Считаю совершенно необходимым выразить тлубочайшую мою благодарность за тот замечательный доклад, который Вы прочли на общем собрании Академии». И в конце письма: «Еще раз благодарю Вас за исключительное наслаждение, которое я получил от Вашего доклада». Врач санатория «Боровое» С. И. Бражников вспоминает о докладе «Об оптических работах Ньютона», прочитанном Мандельштамом академикам, жившим во время эвакуации в этом санатории (этот доклад включен в юбилейный сборник). Бражников пишет, что по окончании доклада воцарилась тишина, а потом грянул взрыв аплодисментов.

«Оружием» Мандельштама было замечательное умение поразить слушателей, зажечь их интерес и заставить их увидеть вопросы там, где, казалось бы, уже все ясно в силу сказанного ранее. Он побуждал слу-

шателей и ловить каждое слово, и напряженно думать. Этой цели служили, в частности, и парадоксы, к которым он любил прибегать. Но это было только «оружие». А в чем заключался корень, или «секрет», такого воздействия?

Мандельштам обладал обостренным чувством стиля и формы, умел излагать вопрос не только убедительно и «прозрачно», но и красиво. Конечно, я имею в виду не «красоты стиля», а подлинную красоту изложения, к которой он старался приблизить и работы своих учеников.

Но это не главное.

Преподавание Мандельштама не имело ничего общего с традиционным многократным повторением курса из учебного плана, хотя бы и с ежегодными дополнениями и улучшениями. Все его 8 семинаров и 6 лекционных курсов в Москве были совершенно различны по тематике или по содержанию. Даже курс теории колебаний, начатый в 1944 г., вовсе не был воспроизведением курса под тем же названием, прочитанного в 1930—1932 гг., а был по замыслу совершенно иным. И я вижу теперь, что главное заключалось в том, что Мандельштам не просто любил и умел учить, а в том, что его лекции, семинары, доклады были **необходимы и ему самому**. Он жаждал поделиться своими идеями, плодами своих размышлений как по специальным, более узким вопросам, так и по общефизическим.

Поэтому его преподавание не было обычным обучением физике, а было прежде всего школой физического мышления.

Поэтому его выступления были захватывающе интересны не только физикам.

Поэтому они не устаревают и не могут устареть, несмотря на свою давность.

Мой вам совет: читайте Мандельштама. Не бойтесь потратить на это время. Это, как говорил сам Мандельштам о произведениях классиков, «настоящее чтение». Нельзя ограничиваться только знанием законов физики и умением считать. Надо понимать дух этой науки, учиться физически мыслить, приобретать физическую интуицию. Быть может, это даже более важно, чем усвоение формально-логической стороны. И именно такому, глубокому пониманию учат лекции Мандельштама.

## Л. И. МАНДЕЛЬШТАМ И ТЕОРИЯ НЕЛИНЕЙНЫХ КОЛЕБАНИЙ<sup>1</sup>

### I. Предварительные замечания

Общепризнано как у нас в СССР, так и за границей, что деятельность Л. И. Мандельштама оказала фундаментальное влияние на создание и развитие теории нелинейных колебаний, хотя [работы], связанные с нелинейной теорией, — это лишь одна и при этом, по-видимому, не главная сторона его научного творчества. Научные результаты, полученные им в этой области (большой частью совместно с Н. Д. Папалекси), научные результаты его учеников и учеников его учеников составляют значительную часть научных достижений, которые вообще здесь имеются. Если не ограничиваться только теми работами, где главным моментом являются нелинейные [представления], а учитывать и те работы, где [они — существенный, но не основной момент], то наиболее широко известными выдающимися научными достижениями Л. И. Мандельштама и Н. Д. Папалекси в рассматриваемой области являются: 1) теория параметрической машины и фактическое создание параметрической машины; 2) открытие резонанса второго рода и создание приемного устройства, основанного на нем; 3) изобретение радиоинтерферометрии и создание новой технической дисциплины — радиогеодезии. Однако, может быть, не меньшее значение, чем эти конкретные результаты, имеет тот новый подход к исследованию нелинейных систем, который Л. И. Мандельштам вызвал к жизни. Новые понятия, новые расчетные методы, новая терминология, выработанные как им самим, так и при его участии, уже сегодня завоевали себе обширную область применения. Несомненно, что

---

<sup>1</sup> Доклад на состоявшемся 22 декабря 1944 г. заседании АН СССР совместно с МГУ им. М. В. Ломоносова, посвященном памяти Л. И. Мандельштама. Печатается с некоторыми сокращениями. Изменения, внесенные редакцией при перепечатке, заключены в квадратные скобки.

завтра эта область будет еще больше и весьма существенно больше.

За последние (сороковые) годы начал происходить процесс, если можно так выразиться, известного перебазирования теории нелинейных колебаний. Возмужавшая на материале радиотехники, она в настоящее время, наряду с непрерывно расширяющейся в связи с новыми типами генераторных и приемных устройств областью применения внутри радиотехники, получила другую, может быть, не менее обширную область систематического применения — теорию автоматического регулирования. И есть серьезные основания ожидать, что помощь, которую теория нелинейных колебаний оказывает теории автоматического регулирования, и те существенные, но спорадические услуги, которые она оказывает теории электрических машин, динамике полета, теории часов и т. д., приведут в конечном счете к созданию новой научной дисциплины. Название ее я не хочу предвосхищать, но она будет классифицировать машины и механизмы так, как это делает теория колебаний, — по структуре соответствующего фазового пространства, а не по тому, будет ли машина работать сжатым воздухом или электричеством и будет ли механизм твердозвенный, упругозвенный или электрический.

Особо следует упомянуть о расширяющемся применении теории нелинейных колебаний к распределенным системам, начиная от радиотехнических кליстронов и кончая разнообразными аэродинамическими автоколебаниями.

Поэтому подробный анализ научной деятельности Л. И. Мандельштама в области теории нелинейных колебаний, связь этой деятельности с деятельностью в этой области его предшественников и современников, несомненно, представляет большой интерес.

Однако мне кажется, что сейчас, когда еще не прошло и месяца со дня смерти нашего милого Леонида Исааковича, когда очень мало из того, что им сделано в последнее время, опубликовано и его бумаги не разобраны, еще нет возможности такой анализ провести сколько-нибудь добросовестным образом. Я не забываю, конечно, и о том, что — само собой разумеется — настоящая оценка деятельности такого крупнейшего ученого, каким являлся Л. И. Мандельштам, требует

определенной перспективы, определенного расстояния во времени. [...]

Проведение предварительного, чернового анализа деятельности Л. И. Мандельштама мне до известной степени облегчил он сам, 21 ноября 1944 г. я советовался с ним, как построить доклад по теории нелинейных колебаний на научной конференции МГУ, считаясь с содержанием приглашения, требовавшего «осветить роль университетского коллектива в развитии теории колебаний в Советском Союзе». Он мне сказал примерно следующее: «Расскажите, как было дело, как фактически возникали наши работы, как мы раньше работали в МГУ. Расскажите, по возможности без выкладок, без детального исследования вопросов приоритета, так, чтобы это было понятно широкой аудитории, студентам». И после перечисления, на что именно обратить внимание, добавил: «Расскажите вкратце и о том, что сейчас делается, пусть будет видно, что и сейчас в этой области мы не сидим сложа руки».

Я сегодня смогу последовать советам Л. И. Мандельштама только в той мере, которая соответствует изменившимся целям моего доклада. Но я все же попытаюсь показать на примере некоторых работ, историю которых я близко знаю, как Л. И. Мандельштам руководил широким фронтом исследований по теории нелинейных колебаний, как он ставил задачи, как толкал и направлял своих учеников и сотрудников на их разрешение.

Я попытаюсь также беглыми штрихами рассказать здесь о том, каким своеобразным и особенным ученым был Л. И. Мандельштам, как он понимал теорию колебаний — линейную и нелинейную, — и попробую дать представление о некоторых руководящих идеях его творчества в этой области.

Мне кажется, что знакомство с этими руководящими идеями даже в моем огрубленном, схематическом и субъективном изложении все же представляет значительный интерес для физиков, для математиков, интересующихся прикладными вопросами, и отчасти для инженеров.

## **II. Мандельштам как тип ученого**

Обычные термины мало помогут в характеристике Л. И. Мандельштама.



Действительно, как это уже многие и в разных выражениях подчеркивали, в наше время резкого деления физиков на теоретиков и экспериментаторов, на «чистых» физиков и «технических» физиков Л. И. Мандельштам одновременно и теоретик, и экспериментатор, и «чистый» физик, и «технический» физик.

Если пользоваться известной терминологией В. Оствальда, Л. И. Мандельштам одновременно и классик — по образцовой ясности и законченности опубликованных им работ, по строгости и точности рассуждений, и романтик — по стремлению делиться своими идеями и догадками, по своей любви к преподаванию, по силе своего живого слова, способного вызвать напряженное внимание и радостное возбуждение аудитории.

Я постараюсь перечислить ряд наиболее характерных черт, не претендуя на полноту и законченность.

**Понимание нового на основе исключительного знания старого.** Эту черту я отношу прежде всего к теории нелинейных колебаний, одним из создателей которой является сам Л. И. Мандельштам и которая по отношению к классической линейной теории колебаний является новой теорией. Но эта же черта относится и к другим сторонам научной деятельности Л. И. Мандельштама, в частности к его деятельности в области квантовой теории. Чтобы пояснить, что я здесь имею в виду, я приведу одно высказывание П. С. Эренфеста, сделанное им во время съезда физиков в 1924 г. Эренфеста спросили, чем отличаются А. Эйнштейн и Н. Бор от других физиков и какие свойства их ума и характера определяют те блестящие научные достижения, которые связаны с их именами. И Эренфест ответил (я недавно просмотрел старую запись), что хотя Эйнштейн и Бор обладают резко различной индивидуальностью, у них есть ряд общих черт, отличающих их, как он выразился, от «обыкновенных» физиков. Я приведу сейчас только первую из перечисленных им черт. «И Эйнштейн, и Бор исключительно хорошо знают классическую физику, они, так сказать, пропитаны классическим знанием. Они знают, они любят, они чувствуют классику так, как не может этого делать обыкновенный физик. Меньше всего они готовы признать новое только потому, что это — новое. Скорее их можно назвать консерваторами — с такою бережностью они относятся к классическим объяснениям, к каждому кирпичику зда-

ния классической физики. Но для них новые вещи являются необходимостью потому, что они хорошо знают старое и отчетливо видят невозможность старого, классического объяснения».

Я думаю, что эти слова — целиком, ничего в них не меняя, — следует отнести к Л. И. Мандельштаму и уже этим выделить его из категории «обыкновенных» физиков. Ими можно охарактеризовать его отношение и к квантовой теории, и к теории нелинейных колебаний. Я буду говорить только о последней. Он удивительным образом знал, любил и чувствовал классическую линейную теорию колебаний, которой он столь виртуозно пользовался. Но будет правильно сказать о Мандельштаме и классической теории линейных колебаний и нечто совсем другое. Никто отчетливее и острее Л. И. Мандельштама не понимал, что ее большие возможности являются все же ограниченными и что громаднейший круг важнейших физических и технических вопросов требует создания нелинейной теории.

**Настороженное и последовательное внимание к вопросам теории познания.** Л. И. Мандельштам интересовался, как возникают, развиваются и трансформируются физические понятия, как они связаны с объективной реальностью, какова область их эффективного применения. Из его лекций и высказываний ясно, что он глубоко исследовал логическую структуру физических теорий: механики, термодинамики, физической статистики, теории относительности, в последнее время — квантовой механики

С этой же его чертой связано то внимание к вопросам идеализации, к вопросам связи реальных вещей и процессов с изучаемыми нами математическими моделями, о которых — в разрезе теории колебаний — я еще буду говорить отдельно. Сюда же примыкает его постоянный на протяжении ряда лет интерес к анализу и обоснованию теоретико-вероятностных схем, описывающих физические закономерности, и к связи этих схем с объективной реальностью и с динамическими схемами. Этой же, и может быть первой, чертой его научного облика обуславливается тот интерес к процессу взаимодействия старых и новых понятий, который он усматривал в любой развивающейся физической теории, в частности в теории нелинейных колебаний, и который он не только изучал, но, я бы сказал, старался на-

править и использовать. Здесь же лежат, как мне кажется, главные корни его интереса к истории науки, особенное внимание которой он уделял в последние годы.

**Исключительная разносторонность.** Л. И. Мандельштам напечатал (вместе с И. Е. Таммом) работу по кристаллооптике теории относительности в «*Mathematische Annalen*», и он же является автором или соавтором около 60 радиопатентов. От обсуждения работы Каратеодори по аксиоматике термодинамики он непринужденно переходил к высказыванию своих соображений о том, почему именно догалилеевы часы (без маятника, с так называемым балансом) хуже часов Галилея—Гюйгенса (с маятником).

С каждым из своих учеников или сотрудников он имел свой, особый разговор. Этот разговор был специфичен, он отвечал научным интересам ученика или сотрудника. А учеников и сотрудников и вообще лиц, с которыми он беседовал по вопросам физики, было немало, и их научные интересы были весьма разнообразны. В громадном здании физической науки для него не было запертых комнат.

Мне кажется существенным здесь подчеркнуть две вещи.

Во-первых, Л. И. Мандельштам ощущал все точное естествознание, включая математику и технику, как единое развивающееся целое и не только подчеркивал взаимное влияние математики и физики, физики и техники и т. д., но хотел каждую новую вещь, будь то квантовая механика или теория нелинейных колебаний, понять и усвоить прочно, как необходимую составную часть всей физики, всего точного естествознания.

И, во-вторых, эта несравненная способность к далеко идущим сопоставлениям сочеталась у Л. И. Мандельштама с большой силой и остротой при конкретном исследовании, с умением преодолевать или обходить экспериментальные или вычислительные трудности.

**Особая «мандельштамовская» ясность.** Январь—февраль 1930 г. Идет дискуссия в «*Nature*» о том, прав ли Флеминг, заявивший, что боковые полосы при радиопередаче являются не физической реальностью, а математической фикцией. В общем в результате десятка писем Флеминга, его полуоппонентов и оппонентов истина бо-

лее или менее выясняется, во всяком случае видно, что Флеминг неправ. Но вот (март 1930 г.) об этой дискуссии говорит Л. И. Мандельштам. Прежде всего — это характерно для Л. И. Мандельштама — он постарался придать конкретный, доступный экспериментальной проверке смысл словам «физическая реальность боковых полос», указав на естественный критерий реальности частей целого — возможность придания им с помощью тех или иных экспериментальных средств самостоятельного физического существования. Затем он остро сформулировал, казалось бы, давно установленные принципы спектрального разложения, осуществляемого линейными системами с постоянными параметрами. Этими простыми соображениями Л. И. Мандельштам внес такую ясность в этот круг задач, что ответ на дискутируемый вопрос, который, как всем стало ясно, не имеет другого содержания, кроме такого: будет ли достаточно селективный приемник регистрировать боковые полосы, сделался не просто очевидным, а сверхочевидным, тривиальным.

1935—1936 гг. Идет дискуссия между А. Эйнштейном, Б. Подольским и И. Розеном, с одной стороны, и Н. Бором — с другой, об основах квантовой теории. Становится, в общем, понятно, что А. Эйнштейн и его соавторы ошибаются, пусть не в тенденции, которая многим симпатична, но в конкретных упреках квантовой механике. Но положение вещей все же не является ясным до конца для широкого круга физиков, так как ответ Н. Бора написан в его обычном, по выражению Эренфеста, «рембрандтовском» стиле (наряду с яркими и отчетливыми местами в нем есть и темные пятна и полутени) и так как вторая статья А. Эйнштейна, тождественная с первой по уверенности в возможности построения динамической теории микропроцессов, но содержащая, в сущности, признание ошибочности конкретных обвинений во внутренней противоречивости, предъявленных им и его соавторами квантовой механике, все же несколько упрощает действительное положение дела в последней. В 1938—1939 гг. Л. И. Мандельштам дает новое изложение основ квантовой механики, в ряде пунктов примыкающее к изложению математика Неймана, в нескольких же важных пунктах совершенно оригинальное, и объявляет небольшой курс лекций «по некоторым основным вопросам квантовой

механики». После нескольких лекций, посвященных, между прочим, отчетливому выяснению теоретико-вероятностной природы квантовой механики и теории измерений в квантовой механике, ситуация вокруг спора А. Эйнштейн—Н. Бор становится столь прозрачной, что делается затруднительным даже простое воспроизведение первоначальных рассуждений А. Эйнштейна, Б. Подольского и И. Розена. Когда Л. И. Мандельштам, следуя обещанию, данному в начале курса, все же должен был их изложить, то, чувствуя, что ему трудно изложить их с педагогической целью, «всерьез», вынужден был сказать: «Теперь ошибка А. Эйнштейна кажется столь тривиальной, что мне трудно излагать его первоначальную точку зрения как правду».

Можно было бы упомянуть и о других примерах, иллюстрирующих особую манеру рассуждать, присущую Л. И. Мандельштаму, при которой основные решающие стороны проблемы выступают на первый план и многие вопросы, не требующие вычислений и правильно сформулированные, уже этим самым разрешаются.

У Л. И. Мандельштама и в научной работе, и в преподавании было стремление устранять даже не совсем отчетливо сознаваемые трудности умозаключений, те психологические препятствия, которые часто мешают нам полностью принять те или другие выводы, как бы ни была неумолима логика, приводящая к этим выводам. Он умел в этих случаях быстро понять, что именно затрудняет его собеседника («А что вас шокирует в этом рассуждении?» — обычный для него в таких случаях вопрос), а поняв, двумя-тремя фразами «снять» все трудности. Точно так же он всегда знал, какие выводы будут шокировать аудиторию, и заранее в соответствии с этим строил аргументацию. Если к Л. И. Мандельштаму приходили сотрудники или ученики, желавшие проверить какие-либо свои соображения, и если, выслушав их и, как правило, изменив аргументацию, он с ними соглашался, то спрашивающие получали абсолютную уверенность, что у них все в порядке, так как аргументация самого Л. И. Мандельштама была неотразима. Он почти не был способен ошибаться в вопросах физики.

**Коллективный характер научного творчества и отсутствие резкой черты между преподаванием и научной работой.** У Л. И. Мандельштама не так уж много опуб-

ликованных работ, относящихся к теории колебаний в узком смысле этого слова, причем, как уже было сказано, почти все эти работы принадлежат ему совместно с Н. Д. Папалекси. Но тот, кто знает только эти работы, хотя и содержащие важные научные результаты, тот не имеет понятия о его деятельности в области теории колебаний.

Научное творчество Л. И. Мандельштама носило подлинно коллективный характер и отличалось отсутствием резкой границы между преподаванием и научной работой.

Большое значение для развития теории колебаний имели лекции и семинары Л. И. Мандельштама в Московском университете. Эти лекции и семинары иногда содержали новые научные результаты, которые нигде больше не публиковались. Но, может быть, еще большее значение этих лекций было в систематическом привитии навыков колебательного мышления, в общем повышении колебательной культуры.

Влияние этих лекций и семинаров Л. И. Мандельштама, посвященных теории колебаний, как и других, посвященных теории электромагнитного поля, оптике, теории относительности, физической статистике, квантовой механике, далеко выходило за пределы физического факультета МГУ. Они собирали со всей Москвы многочисленную и разнообразную аудиторию, в которой наряду со студентом можно было встретить профессора, наряду с физиком — математика и инженера. Ситуация с «записками» этих лекций и семинаров, в особенности с тем, что относится к теории колебаний и отчасти к оптике и квантовой механике, напоминает известную ситуацию с записками лекций Вейерштрасса, которые распространялись в рукописном виде и оказали существенное влияние как на преподавание, так и на научные исследования в области теории аналитических функций. Вокруг Л. И. Мандельштама существовала атмосфера подлинной научной школы. Во-первых, он любил учить — в самом прямом значении этого слова — молодых физиков, любил задавать и растолковывать им разные трудные и каверзные задачи, разные «парадоксы». Во-вторых, он непрерывно делился с сотрудниками и учениками своими соображениями и планами будущих работ, ставя перед ними вопросы, из которых вырастали научные исследования. При этом

Л. И. Мандельштам искренне радовался, если его ученик проявлял работоспособность и особенно творческую инициативу в научной работе. Он был готов незаметным и деликатным образом отказаться от авторства в пользу своего ученика или сотрудника и умел придать его работе известный блеск и остроту, переакцентируя две-три формулировки и указав на новые следствия. Одновременно он никогда не забывал отмечать, если его ученик делал что-нибудь существенное самостоятельно.

### III. Как понимал Л. И. Мандельштам теорию колебаний

Л. И. Мандельштам любил теорию колебаний и понимал ее весьма своеобразно и широко.

Каковы те признаки, по которым выделяется учение о колебаниях? Л. И. Мандельштам подчеркивает, что эти признаки принципиально отличны от тех, по которым делят физику на оптику, акустику, учение об электричестве и магнетизме и т. д. Мы выделяем колебания не по признаку физических явлений, которые мы одинаково воспринимаем, а по форме закономерностей. А история и современная ситуация в точном естествознании нам показывают, что эти закономерности фактически бывают одинаковы в самых различных областях, что мы имеем дело с изоморфизмом закономерностей. Ситуацию, имеющую здесь место, Л. И. Мандельштам пояснял следующим образом. Каждая из областей физики — оптика, механика, акустика — говорит на своем, «национальном» языке. Но есть «интернациональный» язык — это язык теории колебаний. Она вырабатывает свои специфические понятия, свои методы, свой универсальный язык. «Интернационализм» теории колебаний придает ей колоссальное значение. Изучая одну область, вы получаете тем самым интуицию и знание в совсем другой области. «Темные места в оптике, — говорил Л. И. Мандельштам, — освещаются, как прожектором, при изучении колебаний в механике и т. д.». Л. И. Мандельштам не дал точного определения теории колебаний. Своим слушателям он об этом сказал в такой полушутливой форме: «Вот вы думаете, он все говорит о колебаниях и еще долго будет говорить, а не дал определения, что такое колебания»,

И Л. И. Мандельштам сказал, что давать определения — это тяжелая и неблагодарная задача. Например, ~~неблагодарная~~ задача дать такое определение физики, которое отделило бы ее от химии. Важно другое — ~~важны~~ руководящие точки зрения, общие идеи. Одной из таких ~~общих~~ руководящих точек зрения в учении о колебаниях является периодичность. Периодические явления или приблизительно периодические явления — это колебательные явления. Всякий периодический процесс относится к ведению теории колебаний. Обратное, конечно, неверно. Многие непериодические процессы также относятся к колебаниям. Кроме того, следует иметь в виду, как это он особенно подчеркивал, что равновесные режимы — это частные случаи периодических процессов.

Вы видите, как своеобразно и широко Л. И. Мандельштам понимал теорию колебаний. Ясно, что в его понимании к теории колебаний в широком смысле относятся и теория движения планет, и теория цефеид, и теория радиоприема, и динамическая теория приливов. Ясно, что при таком понимании теории колебаний Л. И. Мандельштам не мог ограничиться изучением только линейных колебаний. Л. И. Мандельштам много раз подчеркивал, что общие закономерности, с которыми имеет дело теория колебаний, нельзя считать чисто математическими. «Конечно, — говорил он, — поскольку вы имеете дело с уравнениями главным образом дифференциальными, то с некоторой точки зрения все это — математика. Но не в этом главное. Прежде всего потому, что именно физика учит нас, как допрашивать дифференциальные уравнения. В теории колебаний математический образ, например предельный цикл, имеет чрезвычайно наглядное не только геометрическое, но и физическое содержание. Иначе говоря, в дополнение к анализу вы здесь имеете не только геометрическую, но и физическую наглядность, не только геометрическую, но и физическую интуицию. Причем эта физическая наглядность и интуиция может быть весьма разветвленной и богатой и может опираться на радиотехнический, электротехнический, оптический и тому подобный материал».

Имеется известная эволюция во взглядах Л. И. Мандельштама на значение теории колебаний и на ее место в точном естествознании. На конференции по коле-



баниям, относящейся к 1931 г., Л. И. Мандельштам говорил о «скромных задачах теории колебаний», скромных, например, по сравнению с задачами квантовой механики. В его докладе о работах А. Н. Крылова и в лекциях 1944 г., посвященных теории колебаний, имеется совсем другая нота. Он говорит здесь о том, что главные открытия в физике, начиная с открытия Коперника, были, по существу, колебательными и что, может быть, прав английский математик и философ Уайтхед, утверждающий, что рождение физики связано с применением абстрактной идеи периодичности к большому числу отдельных конкретных явлений.

#### **IV. Идея выработки нелинейного физического мышления**

Термины «линейные колебания», «нелинейные колебания» имеют математическое происхождение. Они служат для обозначения тех колебаний, изучение которых сводится соответственно к линейным и нелинейным, главным образом дифференциальным уравнениям. То обстоятельство, что эта классификация, определяемая физическими особенностями рассматриваемых задач, связана с математикой, отнюдь не случайно. Оно указывает на фундаментальную роль, которую математический аппарат играет в теории колебаний.

Идея выработки нелинейного мышления, опирающегося на твердую математическую базу, идея создания наглядных физических представлений и понятий, имеющих в своей основе адекватные нелинейным физическим объектам математические представления и понятия, является, как мне кажется, основной руководящей идеей научного творчества Л. И. Мандельштама в области теории нелинейных колебаний.

Я начну с классической линейной теории колебаний.

Такие понятия, как гармонический осциллятор, логарифмический декремент, нормальные и парциальные частоты, резонанс, принцип суперпозиции, спектральный подход и т. д., обладают для физика исключительно большой наглядностью и в совокупности создают стройную, цельную и прозрачную картину процессов, происходящих в линейных колебательных системах.

Эти понятия и все это линейное мировоззрение тесно связаны с математикой. Математический аппарат,

трактующий линейные колебательные системы, весьма разработан и чрезвычайно адекватен физическим задачам классической теории линейных колебаний. Адекватность этого аппарата физическим задачам классической теории линейных колебаний не должна нас удивлять, так как именно эта область может служить наиболее разительным примером взаимного плодотворного сотрудничества физики и математики. Достаточно вспомнить знаменитый спор Эйлера, Д'Аламбера и Лагранжа о теории колебаний струны, откуда ведут свое происхождение многие относящиеся сюда понятия и методы. С Лагранжа же, в сущности, начинается и теория малых колебаний, т. е. теория линейных дискретных систем. Классической линейной теории колебаний Л. И. Мандельштам придавал большое значение, и ей в основном был посвящен как его курс лекций по теории колебаний, так и два годичных семинара (1926—1927 гг., 1930—1931 гг.).

Он разделял две стороны этого аппарата. Во-первых, принципиальную сторону, связанную с теми физическими понятиями, о которых только что шла речь, и с тем, какие движения возможны в линейных системах, каков характер их зависимости от внешних сил, от начальных условий и т. д., и вычислительную сторону. Он говорил, что в линейных системах с постоянными коэффициентами принципиальных вопросов уже не возникает или почти не возникает. Но относительно вычислительных вопросов он говорил, что они здесь удовлетворительно решены только в довольно простых случаях, касающихся дискретных систем и систем с одной, частично с двумя степенями свободы, и очень интересовался всеми возможностями преодоления вычислительных трудностей в случае многих степеней свободы. Аналогичные вещи его живо интересовали и в случае распределенных систем.

Значительное внимание Л. И. Мандельштам уделил вопросам дальнейшего развития теории линейных систем на случай систем с переменными коэффициентами, в первую очередь — с коэффициентами, периодически зависящими от времени. Здесь были получены существенные научные результаты, связанные с обобщением в различных направлениях обычного понятия резонанса.

Но основное внимание Л. И. Мандельштам нап्रा-

вил на нелинейные системы. Во-первых, Л. И. Мандельштам остро чувствовал всю необходимость выработки нелинейного мышления, всю необходимость иметь руководящие нелинейные теоретические концепции, которые позволяли бы разбираться в разнообразных и сложных явлениях и которые обладали бы способностью предсказывать новые нелинейные явления. [...]

Во-вторых, Л. И. Мандельштам не менее остро чувствовал необходимость строгого математического рассмотрения хотя бы основных, наиболее простых, жизненно необходимых задач теории нелинейных колебаний, так как в противном случае, говорил он, вы находитесь на зыбкой почве, ни в чем не можете быть уверены и прежде всего не можете быть уверены в хотя бы приблизительной правильности рассматриваемых нами идеальных математических моделей физических задач.

Л. И. Мандельштам с известной осторожностью относился к различным нестрогим методам приближенного решения задач теории нелинейных колебаний прежде всего там, где шла речь о действии внешней силы на нелинейную систему или о теории связанных систем. Особенно его задевали те отдельные случаи, когда различные нестрогие методы давали противоречивые результаты или когда авторы делали совершенно необоснованные выводы, подсказывавшиеся им «линейной психологией» (например, ошибка Гюттона с условиями самовозбуждения лампового генератора).

Лишь позднее, к 1930 г., когда выяснилось, что строгие методы нелинейной теории в общем подтверждают выводы первоначальных нестрогих рассмотрений, его отношение к последним изменилось, и он неоднократно отмечает заслуги авторов нестрогих методов, особо отмечая заслуги Ван-дер-Поля.

В вопросах, связанных с атакой на нелинейные системы, целесообразно различать два этапа. Первый этап — до 1928 г., т. е. до того, как была установлена связь нелинейных задач теории колебаний с работами Пуанкаре и Ляпунова, и второй этап — после установления такой связи.

Математическое оружие первого этапа — это общие теоремы теории дифференциальных уравнений, позволявшие в некоторых случаях делать заключение о существовании и единственности периодических решений

нелинейной задачи по свойствам характеристики лампы, и так называемый метод припасовывания.

Математическое оружие второго этапа — теория предельных циклов и так называемая теория малого параметра.

Однако не следует думать, что в связи с этой смелой математического вооружения у Л. И. Мандельштама произошли существенные изменения в принципиальных установках. То, что было выше сказано о выработке нелинейного мышления и о математическом аппарате, способном решать жизненные задачи, может быть отнесено как к первому, так и ко второму этапу.

Я перейду теперь к изложению нескольких способов атаки нелинейных задач и к полученным при этом результатам.

**Выяснение свойств решений по заданным свойствам характеристик.** В колебательном семинаре 1926—1927 гг. Л. И. Мандельштам поставил специальный доклад об условиях самовозбуждения незатухающих колебаний обычного лампового генератора и так называемого маятника Фроуда. В своем выступлении, которое, как и всегда, явилось наиболее интересным моментом семинара (в случае отсутствия Л. И. Мандельштама на семинаре студенты говорили: «Чай без сахара»), Л. И. Мандельштам дал физическую характеристику незатухающих колебаний и подчеркнул, что наиболее специфическая их черта — независимость амплитуды от начальных условий — не может быть понята из анализа линейного уравнения, а требует исследования полного нелинейного уравнения. Он указал, что так как, с одной стороны, математическая теория нелинейных систем весьма мало разработана и так как, с другой стороны, техника настоятельно требует теории этих вещей, то прибегают к различным нестрогим методам приближенного рассмотрения. Подчеркнув, что при таких нестрогих рассмотрениях вы никогда не сможете быть уверены в правильности выбранной вами идеализации задачи, он рассказал в нескольких словах результаты своей (вместе с Н. Д. Папалекси) работы, позволяющие в некоторых случаях строго устанавливать наличие и устойчивость периодических решений нелинейного дифференциального уравнения лампового генератора по нескольким свойствам характеристики, в частности по наличию тока насыщения. Он за-

метил, что, имея такое доказательство, можно было спокойно пользоваться различными приближенными способами расчета незатухающих колебаний.

Когда через пару лет Л. И. Мандельштам ознакомился с работами Картана (1925 г.) и Льенара (1928 г.), ставивших себе примерно те же цели, он мне сказал, что, может быть, работу, о которой идет речь, все же стоит напечатать, так как «у нас совсем другой подход, чем в этих работах». Однако она так и осталась ненапечатанной.

О важности такого рода задач, решение которых позволяет делать высказывание о колебательных возможностях системы по общим свойствам характеристики, Л. И. Мандельштам особо сказал на конференции по колебаниям в 1931 г., упомянув, что «для некоторых частных случаев эти задачи удалось решить», и не сказав ни слова о своих и Н. Д. Папалекси результатах.

После 1931 г. появилось еще несколько работ, относящихся к этому кругу вопросов, в частности, интересное исследование американцев Левинсона и Смиса (1942 г.).

Важность всего этого круга работ общепризнанна. Но мало кому известно, что Л. И. Мандельштам и Н. Д. Папалекси одни из первых, если не первые, получили существенные результаты в этом направлении.

**Метод припасовывания.** Одной из первых научных работ, выполненных под руководством Л. И. Мандельштама в Московском университете, была работа М. А. Леонтовича «К теории электромагнитного прерывателя».

Тема этой работы, как и многие другие темы, интересовавшие Л. И. Мандельштама, связана с проблемами идеализации. Именно одной из основных задач работы было выяснение того решающего влияния, которое имеет на работу прерывателя самоиндукция, и выяснение непригодности теоретической модели, не учитывающей самоиндукцию. Нас сейчас интересует здесь совсем другое. В этой работе по совету Л. И. Мандельштама для отыскания периодического решения был использован так называемый метод припасовывания, следуя которому, мы заменяем нелинейное дифференциальное уравнение несколькими линейными уравнениями и «припасовываем» в точках сопряжения различных уравнений постоянные интегрирования, исходя из

требования непрерывности решения, а часто и его первой производной по времени. Этот метод был применен впервые к нелинейным проблемам теории колебаний Н. Д. Папалекси в задаче о выпрямителе (1911 г.), затем А. Зоммерфельдом в теории вынужденных колебаний дуги (1914 г.), а затем и многими другими.

Л. И. Мандельштам придавал большое значение методу припасовывания. Он считал, что этот метод может быть математически обоснован и разработан таким образом, чтобы стать рабочим методом физики и техники, пригодным для рассмотрения хотя бы некоторых наиболее простых, но жизненно необходимых задач теории нелинейных колебаний. Он говорил, что нельзя надеяться, что математика даст нам возможность работать со сколько-нибудь сложными характеристиками, что нам все равно приходится фундаментально упрощать задачу, выбирать ту или иную простую аналитическую аппроксимацию. Он считал также возможной разработку приближенного подхода к решению задач по методу припасовывания, опираясь — в случае незатухающих и близких к синусоидальным колебаний — на представление об «авторезонансе», т. е. о резонансе под действием силы, порождаемой движением самой системы.

В 1927 г. Л. И. Мандельштам предложил мне исследовать устойчивость движений, получаемых по методу припасовывания, а затем вообще «попытаться подвести под этот метод серьезную математическую базу». Он сказал [...], что Н. Д. Папалекси уже ряд лет тому назад нашел по методу припасовывания периодическое решение в важной проблеме лампового генератора для случая характеристики, составленной из кусков прямых<sup>1</sup>, и что если удастся что-либо сделать в отношении исследования устойчивости периодических движений, получаемых по этому методу, или в отношении обоснования этого метода, то сразу будет внесена ясность в целый ряд задач.

Из этой задачи выросла работа о предельных циклах, о которой я скажу ниже, но сама задача, поставленная Л. И. Мандельштамом, тогда не была решена.

С 1927 г. метод припасовывания был многократно использован при решении различных задач теории не-

---

<sup>1</sup> Эти результаты Н. Д. Папалекси не были опубликованы.

линейных колебаний. [...] Однако задача, поставленная Л. И. Мандельштамом, об исследовании устойчивости периодических движений, получаемых по методу припасовывания, не только не была решена, но даже не была затронута.

За последнее время теория автоматического регулирования заставила обратить особое внимание на метод припасовывания. Дело в том, что основные факторы, обуславливающие нелинейность уравнений движения в теории автоматического регулирования, — кулоновское трение и характеристика сервомотора — непринужденно допускают простую кусочно-прямолинейную аппроксимацию. Это как раз тот совсем не редкий случай, когда, по выражению Л. И. Мандельштама, «сама физика подсказывает употребление метода припасовывания».

В 1943—1944 гг. мне совместно с моими сотрудниками Н. Н. Баутиным и А. Г. Майером удалось при помощи теории точечных преобразований дать решение ряда нелинейных задач теории автоматического регулирования и наметить способы решения некоторых более сложных задач. Попутно получился ответ на вопрос, поставленный Л. И. Мандельштамом в 1927 г., об исследовании устойчивости периодических движений, получаемых по методу припасовывания: исследование устойчивости приводится к исследованию системы уравнений в конечных разностях, которое может быть проведено по известным рецептам. Л. И. Мандельштам с интересом отнесся к этим работам; несмотря на приступы болезни, он приехал на мой доклад 10 марта 1944 г. на сессии Отделения физико-математических наук и выступил там с рядом замечаний. Это было одно из последних его выступлений, если не последнее. Я хотел бы здесь отметить, что весь этот цикл работ с некоторой точки зрения можно рассматривать как осуществление старой идеи Л. И. Мандельштама о «математическом воспитании» метода припасовывания.

**Теория предельных циклов.** Как уже было сказано, в связи с вопросом об устойчивости периодических движений, получаемых по методу припасовывания, поставленным мне Л. И. Мандельштамом, возникла работа о предельных циклах. Я не буду останавливаться на подробностях. Я скажу только, что он отнесся очень внимательно к моему утверждению, что незатухающие ко-

лебания в системах с одной степенью свободы — это предельные циклы Пуанкаре.

Когда дальнейшая мобилизация математической информации быстро привела к работам А. М. Ляпунова по устойчивости и к методу малого параметра Пуанкаре, то Л. И. Мандельштам (так, по крайней мере, мне показалось) был несколько удивлен. Он захотел отчетливо понять происхождение всех этих работ, их место внутри математики, их связь, а в некоторых случаях — отсутствие прямой связи с астрономией, механикой и физикой. Поразительна та легкость, с которой он оставался на новой точке зрения, сумел быстро нащупать ее сильные и слабые стороны и начать руководить атаками при помощи нового оружия.

Сильной стороной новой точки зрения, связанной с общей качественной теорией дифференциальных уравнений, Л. И. Мандельштам считал ее адекватность основным задачам теории нелинейных колебаний и ее исключительную геометрическую наглядность. «Здесь мы имеем, — говорил Л. И. Мандельштам, — действительно адекватный нашим нелинейным задачам, не имеющим «линейных воспоминаний», математический аппарат, пусть недостаточно разработанный. Опираясь на этот аппарат, можно будет создать новые понятия, специфичные для нелинейных систем, можно будет выработать новые руководящие точки зрения, которые позволят мыслить нелинейно».

Несомненно, что он ценил и некоторые другие «колебательные» достижения общей качественной теории и верил в ее дальнейшие возможности.

Однако с не меньшей отчетливостью он видел и слабые стороны общей качественной теории. Основная слабость, которую он понял почти мгновенно, — это ее сравнительно малая эффективность в исследовании конкретных уравнений. «Беда теории Пуанкаре не в том, что она дает качественные ответы на вопросы, — как раз эти качественные ответы весьма часто и нужны технике, — беда теории Пуанкаре в том, что она скорее говорит, что вообще может быть у дифференциальных уравнений определенного класса, чем учит исследовать конкретное уравнение», — говорил Л. И. Мандельштам. Однако он всегда отмечал [...] даже небольшие заслуги качественной теории в исследовании конкретных уравнений.



**Некоторые итоги.** Прежде чем перейти к итогам, я укажу на два существенных пробела в моем изложении.

Для ряда вопросов теории нелинейных колебаний Л. И. Мандельштам видел острую необходимость отказаться от дискретной идеализации и перейти к распределенным системам.

Для других вопросов теории нелинейных колебаний он видел не менее острую необходимость отказаться от динамической идеализации и с целью учета флюктуаций перейти к теоретико-вероятностной модели. В обоих этих направлениях в значительной степени под влиянием Л. И. Мандельштама были достигнуты существенные успехи. Однако анализ этих успехов выходит за пределы моего доклада.

Каковы итоги? Само собой разумеется, что задачу выработки нелинейного физического мышления, опирающегося на твердую математическую базу, нельзя считать решенной. Но сравните ситуацию, скажем, в 1927 г., когда Л. И. Мандельштам начал разворачивать работу по нелинейным колебаниям в МГУ, с современной ситуацией. Мы имеем теперь целый ряд руководящих нелинейных концепций, пришедших в соответствующих областях на смену старым линейным концепциям и позволяющих уверенно и безошибочно разбираться в некоторых классах нелинейных явлений. Мы имеем теперь — к чему особенно стремился Л. И. Мандельштам — уже довольно значительный запас наглядных физических понятий и представлений, имеющих твердую математическую основу и адекватных нелинейным явлениям. Я перечислю некоторые нелинейные понятия, либо получившие точный физический и математический смысл, либо впервые выдвинутые в этот период времени.

Я начну с фазового пространства, которое в теории колебаний теперь перестало быть только математической абстракцией и приобрело высокую степень физической наглядности не только потому, что физики с ним свыклись, но и потому, что оказалось возможным его приблизить к нашим органам чувств, наблюдая систематически фазовые траектории на экране осциллографа (В. М. Бовшеров). Если говорить об автономных системах, то такие физические понятия, как автоколебания, мягкое и жесткое возбуждение автоколебаний, за-

тягивание и т. д., получили теперь твердую математическую основу в виде предельных циклов, теории бифуркаций, областей устойчивости в большом и т. д. Если говорить о неавтономных системах, то такие физические понятия, как феррорезонанс, захватывание разных видов, получили математическую основу в теории периодических решений и их бифуркаций, а ряд других физических понятий, например резонанс второго рода, асинхронное возбуждение и т. д., был вновь выдвинут, отправляясь от математической теории.

Не все достижения этих лет в направлении выработки нелинейного мышления принадлежат Л. И. Мандельштаму или лицам, так или иначе с ним связанным. Но именно Л. И. Мандельштам вызвал к жизни это новое, опирающееся, с одной стороны, на настоящую математику, с другой стороны — на тонкий радиофизический эксперимент, научное направление в теории нелинейных колебаний.

## **V. Идея правильной идеализации**

«Когда я перевожу физику на математику, я всегда от чего-то отвлекаюсь» — эта фраза принадлежит Л. И. Мандельштаму, и он не устал привлекать внимание к тому, казалось бы, очевидному обстоятельству, что в теории колебаний, как и во всякой другой физической теории, мы работаем с идеальными моделями реальных вещей и процессов. Он считал, что вопросы идеализации должны занимать фундаментальное место во всяком преподавании физики — как в школьном, так и в университетском. Вопросы идеализации занимают большое место во всем научном творчестве Л. И. Мандельштама. Но я сейчас смогу остановиться сколько-нибудь подробно только на одном вопросе, относящемся к этому кругу проблем и имеющему большое техническое значение, — на теории разрывных колебаний.

Создание настоящей теории разрывных колебаний, которым мы в значительной мере обязаны Л. И. Мандельштаму, оказалось возможным только после анализа и преодоления внутренних затруднений теории, связанных с идеализацией. Всякая идеализация, по выражению Л. И. Мандельштама, «обладает способностью мстить за себя», обладает способностью создавать внутренние затруднения. Устранение таких внутренних за-

труднений теории имеет большое практическое значение, так как часто позволяет работать с простыми моделями и характерно для теории разрывных колебаний.

Чтобы были ясны все идейные связи, мне придется начать издалека.

1895 год. Французский математик и механик Пенлеве придумывает ряд примеров, где закон трения Кулона в сочетании с наличием жестких связей приводит к парадоксам. Именно в примерах Пенлеве, в противоречие с основным положением теоретической механики, задание начальных координат и скоростей не определяет однозначно дальнейшего движения системы. Пенлеве очень остро ставил вопрос о «логической несовместимости» закона трения Кулона с обычными положениями теоретической механики.

1908 год. Знаменитый математик и организатор науки Ф. Клейн читает лекцию в Геттингене «О критике Пенлеве закона трения Кулона». Излагая в этой лекции свои взгляды на парадокс Пенлеве и взгляды уже тогда известного аэрогидродинамика Л. Прандтля, учитывая те статьи о парадоксе Пенлеве, которые появились в промежутке 1895—1908 гг., Клейн и Прандтль указывают, что парадокс Пенлеве есть следствие идеализации — следствие наличия абсолютно жестких связей. Введение деформируемых связей сразу ликвидирует парадокс: уравнения движения изменяются и неоднозначность исчезает. Но не это самое существенное в высказываниях Клейна и Прандтля. Они замечают и всячески подчеркивают другое (и в этом вся соль): можно не вводить деформируемых связей и не переходить к новым дифференциальным уравнениям. Нужно только в соответствующих случаях принять дополнительную гипотезу, характеризующую мгновенные изменения скорости и вызывающую мгновенную остановку, ликвидирующую неоднозначность. На языке фазового пространства — гипотезу о мгновенном скачке изображающей точки. Таким образом, добавочная гипотеза о скачках изображающей точки, т. е. об особом рода внутренних ударах, позволяет достичь однозначности, сохранив идеальные, абсолютно жесткие связи и закон Кулона, т. е. сохранив весьма простую математическую модель.

1925 год. Е. Фридлиндер рассматривает ряд простых схем, главным образом радиотехнических, которые об-

ладают способностью совершать незатухающие колебания, но где с точки зрения обычной идеализации имеется один элемент, запасающий энергию (т. е. либо самоиндукция, либо емкость). Фридлиндер мало интересуется дифференциальными уравнениями движения, но, пользуясь особой диаграммой, он дает графический прием отыскания амплитуды и формы незатухающих колебаний исходя из физического представления о мгновенных скачках тока или напряжения — о мгновенных электрических ударах.

Для того чтобы было понятно, чем мы обязаны Л. И. Мандельштаму в этом вопросе, мне придется кое-что сказать и о своей работе.

1929 год. Я уже стою — как будет дальше видно, в известном смысле слишком прямолинейно — на той точке зрения, что математический образ, соответствующий незатухающим колебаниям или автоколебаниям, — это предельный цикл Пуанкаре. Я рассматриваю разные схемы и всюду ищу циклы. Но вот я рассматриваю в обычной идеализации схему мультивибратора Абрагама—Блоха, содержащую одни только емкости, но способную совершать автоколебания. Я пишу дифференциальные уравнения движения, ищу цикл, но не только не нахожу цикла, но мне удается строго доказать, что исследуемые мною уравнения движения предельного цикла иметь не могут. «Вместо» цикла я нахожу на фазовой плоскости особую кривую, где фазовая скорость становится бесконечной. Наличие такой кривой не позволяет однозначно установить движение изображающей точки. Получился парадокс: автоколебания — это циклы, циклов нет, а схема совершает автоколебания. С этим парадоксом я пришел к Л. И. Мандельштаму, который почти мгновенно понял, в чем дело, и после некоторого обсуждения резюмировал (у меня есть старая запись): «Если строго доказано, что циклов нет, то это уже хорошо. Так как мультивибратор на практике колеблется, то либо идеализация не годится, либо вы не знаете, как нужно работать с такой идеализацией». Он прибавил, что уезжает в Ленинград и там попробует этот парадокс обдумать. Возвратившись из Ленинграда, он сказал примерно следующее: «Мы с Николаем Дмитриевичем думаем, что с принятой вами идеализацией можно работать и можно отыскать интересующее физику периодическое решение.

Однако оно будет не того непрерывного типа, который вы искали, а разрывного типа, т. е. соответствующее движение изображающей точки будет содержать мгновенные скачки. Мы думаем, что это периодическое решение в данном случае можно найти, если внести дополнительную гипотезу, что при таких перескоках электрическая энергия, запасенная в конденсаторах, меняется непрерывно». Вскоре уже вместе с А. А. Виттом мы попробовали реализовать эти указания Л. И. Мандельштама. После преодоления некоторых расчетных трудностей мы нашли разрывное периодическое решение и даже проследили разрывной процесс установления такого периодического решения.

Таким образом, была решена задача, значительно более трудная, чем те, которые решались графически Фридлиндером, а главное, была внесена полная теоретическая ясность в этот круг вопросов, которой тогда не было ни у Ван-дер-Поля, как это отметил Н. Д. Папалекси в своем докладе на съезде физиков 1930 г., ни у Фридлиндера.

Л. И. Мандельштаму и Н. Д. Папалекси принадлежит та заслуга, что они выдвинули эту идею [разрывных автоколебаний] в применении к теории колебаний и, отчасти используя разрозненные высказывания отдельных исследователей, создали, может быть, и не вполне законченную, но последовательную и плодотворную теорию, или, лучше сказать, **концепцию** идеализации колебательных систем. Эта концепция послужила базой для строгой теории разрывных колебаний, и несомненно, что есть такие области техники, в частности, теория автоматического регулирования, которые ждут последовательного и конкретного применения этой концепции.

Я закончу этот раздел словами Л. И. Мандельштама о том, что правильный с точки зрения теории колебаний подход к вопросам идеализации лишь облегчает выбор математической модели, но «решающую роль играют талант и научный такт исследователя».

## **VI. Идеи колебательной взаимопомощи различных областей физики и техники**

Как уже было сказано, различные области физики и техники обладают сходными закономерностями. Но

могут быть и специфические различия: одни колебательные явления открыты и легко дискутируются в одной области, но те же (с точки зрения теории колебаний) вещи завуалированы — и в силу этого иногда даже вообще неизвестны — в другой области.

Идея Л. И. Мандельштама, которую я хочу сейчас изложить, заключается в том, чтобы вести атаку на колебательные закономерности одновременно с различных сторон, выбирая слабые места и используя результаты, полученные в одной какой-либо области (например, механике), во-первых, для обогащения теории колебаний и, во-вторых, для продвижения в другой области (например, радиотехнике). С этой идеей связана характерная особенность Л. И. Мандельштама: не решать, как правило, какую-нибудь одну изолированную проблему, подбирая к ней в случае надобности различные подходы, а, имея определенный теоретический подход, подбирать те жизненные проблемы, которые при этом подходе могут получить решение, или предстать в новом свете; или осветить темное место в самом подходе.

Примером такого «горизонтального распила» физической действительности, когда задачи из различных областей группируются вокруг одного теоретического подхода, являются исследования Л. И. Мандельштама, относящиеся к использованию разложения Фурье в теории линейных систем. Временная постоянная колебательного контура и разрешающая сила дифракционной решетки, боковые полосы при модуляции и комбинационное рассеяние, физическая реальность разложения Фурье и ложные структуры, видимые в микроскопе, и, наконец, быстрота телеграфирования и селективность в радиотехнике и принцип неопределенности в квантовой механике — все эти, казалось, весьма запутанные и ничем друг с другом не связанные понятия и вопросы выстроились здесь у Мандельштама в стройную единую систему. Особо следует отметить, что такие рассуждения, помимо внесения ясности в завуалированные проблемы соседних областей и обогащения теории колебаний, часто превращались у Л. И. Мандельштама в предвидение новых, еще неизвестных явлений, которые потом могли быть найдены и фактически находились экспериментальным путем. Его возражения Планку основывались на перенесении радиотехнических рас-

суждений в оптику. Его известная работа об излучении источников света у поверхности раздела двух сред — на том же, причем здесь было предсказано, а затем и открыто новое оптическое явление. Его еще более известная, можно сказать, знаменитая работа о рассеянии света поверхностью жидкости основана на перенесении на этот случай — с надлежащей модификацией — рассуждений, связанных с объемным флюктуационным рассеянием света жидкостью, причем здесь также было предсказано, а затем и открыто новое оптическое явление.

Работа Л. И. Мандельштама и Н. Д. Папалекси о резонансе второго рода основана, грубо говоря, на перенесении астрономических результатов в радиотехнику, причем здесь было предсказано, а затем открыто и использовано для приема новое явление.

Но существенная особенность колебательной взаимопомощи в теории нелинейных колебаний заключается в том, что здесь ценные выводы можно получить из сопоставления задач из различных областей, не требуя, чтобы эти задачи описывались совпадающими уравнениями. Достаточно, чтобы эти уравнения принадлежали к одному типу, имели сходное пространство.

Несомненно, что плодотворная мандельштамовская идея колебательной взаимопомощи не только не исчерпана в своих выводах, но можно сказать, что здесь сделаны только первые шаги.

## **Заключение**

Основной центр исследований в области теории нелинейных колебаний находился в 1907—1921 гг. в Германии в значительной мере благодаря Баркгаузену. Основные работы, относящиеся к 1922—1929 гг., были выполнены в Голландии — я имею в виду работы Вандер-Поля. Приблизительно с 1930 г. основной центр исследований по теории нелинейных колебаний находится в СССР, чем мы обязаны в первую очередь Л. М. Мандельштаму. Идеи Л. И. Мандельштама в области теории нелинейных колебаний, о которых я здесь пытался дать некоторое представление, имеют непреходящее значение. Этим идеям предстоит интенсивное развитие и богатая событиями жизнь.

Л. И. МАНДЕЛЬШТАМ,  
академик

**ВСТУПИТЕЛЬНАЯ ЛЕКЦИЯ К КУРСУ ФИЗИКИ  
В ОДЕССКОМ ПОЛИТЕХНИЧЕСКОМ ИНСТИТУТЕ<sup>1</sup>**

Приступая к чтению лекций по физике, я хотел бы, прежде чем перейти к систематическому изложению предмета, остановиться сегодня на одном общем вопросе и поделиться с вами некоторыми соображениями насчет того положения, которое физика занимает и, по моему убеждению, должна занимать в ряде наук, изучению которых вы собираетесь посвятить ближайшие годы.

Мне хотелось бы дать вам материал, на основании которого вы могли бы сами убедиться, что физика нужна инженеру всегда, во все времена его деятельности и что на нее нельзя смотреть как на предмет, который нужно — да и нужно ли? — раз пройти, а потом можно и забыть, так как ведь все равно то, что необходимо знать инженеру из физики, еще раз повторяется при прохождении специальных предметов.

Говоря, что инженеру нужна физика, я имею в виду не только то, что он должен быть знаком с теми отдельными явлениями и законами, с которыми он непосредственно встречается в своей практической деятельности. Такое утверждение было бы само собой очевидным. Что инженер-строитель, рассчитывая прочность сооружения, должен быть знаком с основными законами упругости, что инженер-электротехник в проектировании, скажем, осветительной сети должен знать закон Ома, связывающий силу тока, сопротивление или, другими словами, сечение провода и электродвижущую силу батареи и т. д., — это, конечно, не нуждается в доказательстве. Нет, когда я говорю, что инженеру нужна физика, я этим хочу сказать, что ему нужно широкое владение этим предметом в его совокупности; я утверждаю, что ему нужно знание физики самой по себе как цельной дисциплины, а не только в зависимости от текущих применений, с ее специфической методикой. Я утверждаю, наконец, что для этого инженеру недостаточно знать только опытную часть ее, а что он должен быть основательно знаком и с теорией.

Но для того чтобы показать, что это действительно так, мы прежде всего должны постараться уяснить себе структуру физики как науки и посмотреть, в каком соотношении находятся теория и тот опытный материал, которым физика оперирует.

Конечно, мы не можем решать здесь вопроса о сущности физической науки во всей его полноте. Этот вопрос, относящийся к теории познания и крайне интересный как для физика, так и для философа, значительно более сложен, чем это может показаться на

---

<sup>1</sup> Прочитана в октябре 1918 г. — Полн. собр. трудов Л. И. Мандельштама. Т. 3. М., Изд-во АН СССР, 1950.



первый взгляд. В истории философской мысли он всегда занимал важное место. Но нам для нашей цели и нет надобности особенно сильно в него углубляться. Нам достаточно будет заняться только одной его стороной, хотя, правда, и здесь нам придется начать несколько издалека.

Не подлежит сомнению, что единственным средством, с помощью которого мы черпаем наши сведения об окружающем нас мире, являются наши органы чувств. Но единичные чувственные восприятия слишком мимолетны и неустойчивы, чтобы служить материалом для дальнейшей переработки. И вот человек выделяет и фиксирует в памяти те общие черты отдельных восприятий, которые повторяются и которые для него практически важны. Этот процесс, совершающийся непроизвольно, ведет к образованию того, что в логике называется понятием.

В образовании понятий состоит первый шаг по пути познания природы. Они являются той базой, на которой строится дальнейшее. Но образованные таким образом первоначальные понятия обладают, как мне кажется, следующим свойством. Они не поддаются строгому определению. Мы все владеем понятием «свет». Но объяснить словами, определить один другому сущность этого понятия мы не можем. Чтобы научиться, ему нужно иметь глаза, нужно видеть, как освещается все нас окружающее при восходе солнца и как погружается опять во мрак при его заходе. Если быгь прозаичнее, тому же можно научиться, включая и выключая электрическую лампочку. Но одно несомненно — слова, определения здесь бессильны. Попробуйте объяснить слепому от рождения, что такое свет!

Возьмите другой пример (может быть, менее очевидный). Мы все знаем, что такое жидкость. Но я не думаю, чтобы можно было понятие жидкости определить исчерпывающим образом словами. Нужно показать воду, ртуть, спирт, масло и сказать: вот такие тела мы называем жидкостью. Другого способа нет.

Итак, одними словами первоначальным физическим понятиям научить нельзя. Вот почему, позвольте мне это здесь подчеркнуть, ни учебник, ни учитель недостаточны, чтобы научить физике. Учащийся должен хоть немного работать опытно сам. Он должен хоть поверхностно, но сам видеть, сам слышать, сам осязать те явления, о которых ему говорят.

Мы несколько отвлеклись в сторону. Вернемся к первым шагам по пути познания природы, к понятиям, непосредственно навязанным нам природой. По мере того как человечество увеличивало свой запас навязанных опытом понятий (опытных знаний), все настоятельнее являлась потребность в их систематизации, без которой нет возможности разобраться в бесконечном обилии окружающих нас явлений. В этой систематизации громадную службу оказывает нам наша способность образовывать другого рода понятия, понятия более определенные, чем те, о которых шла речь выше, и менее зависящие от наших чувств. В первую очередь сюда относятся понятия о числе и те понятия, которыми оперирует математика. В области этих понятий, другими словами, в области математического мышления, мы себя чувствуем несравненно более уверенно, чем при оперировании с материалом, непосредственно поставляемым нам нашими чувствами. При помощи математических понятий можно определенно формулировать послышки и так же определенно и легко делать из них выводы и заключения. И вот,

зная за собой эту силу, человек старается — вначале инстинктивно, а затем с развитием науки и сознательно — приспособить математические понятия и специально понятие о числе к сырому опытному материалу, к понятиям физическим.

В этом процессе перехода от качественных соотношений к количественным заключается важнейший этап научной мысли. На нем основано как понятие об измерении, так и сам процесс измерения физических величин. Можно смело утверждать, что какая-нибудь область физических явлений вообще становится наукой только с того момента, когда мы научаемся вводить в нее измерения. Так, например, пока не было точного понятия температуры и не умели ее измерять, науки о теплоте почти или даже совсем не существовало.

Пользуясь в описанном смысле математикой, мы стараемся теперь найти систему в окружающих нас явлениях и облегчить себе их понимание тем, что ищем такие математические формулы в общем, не непременно узкоалгебраическом смысле слова, которые охватывали бы возможно большее число единичных фактов или общую сторону различных явлений. Если такая формула найдена, то мы говорим, что нашли физический закон. Возьмем пример. Закон преломления света при переходе из одной прозрачной среды в другую гласит, как известно, так: падающий и преломленный лучи лежат в одной плоскости и отношение между синусом угла падения и синусом угла преломления есть величина постоянная. Например, для воды и воздуха это отношение равно 1,33. Что представляет собой этот закон? Это формула, охватывающая бесчисленное множество единичных случаев преломления. Она избавляет нас от необходимости делать в каждом отдельном случае опыт, она делает ненужным запоминать или заносить в таблицы для каждого отдельного случая угол падения и соответственный угол преломления луча. Зная закон преломления, вы уверены, что в любой момент, когда это вам понадобится, при помощи простейших вычислений вы сможете решить всякий представившийся в этом направлении вопрос.

По мере того как физические знания росли, по мере того как число найденных законов увеличивалось, все труднее и труднее становилось разобраться в их разнообразном обилии. Движимые оягом необходимостью возможно лучше ориентироваться в этом громадном материале, люди старались найти такие картины, такие точки зрения, которые позволили бы объединить в одно целое отдельные законы. Так создавалась физическая теория, или, вернее, теории.

Теория, таким образом, находится в таком же отношении к отдельным законам, в каком законы находятся к отдельным явлениям. Систематизирующая роль теории, конечно, не исчерпывает всей ее сущности, но все же, как вы видите, в систематизации наших знаний она имеет громадное значение. И тут математика является огромным подспорьем. Только что рассмотренные соотношения между различными сторонами физики и постепенное развитие их могут быть прослежены на любой физической теории. Очень просто это сделать, например, на оптике.

Оптика, между прочим, одна из самых древних научно разработанных отраслей физики. Изучение оптических явлений уже в древности привело к установлению некоторых законов. Закон прямолинейного распространения света, закон отражения от зеркал

были известны давно. Позже, в XVIII в., был найден закон преломления. Смотри по тому, какая группа явлений подвергалась исследованию и с каких точек зрения к ним подходили, были устанавливаемы различные отрывочные законы. Было открыто явление дифракции или загибания света, интерференции и т. д. Но пока не было общей, объединяющей точки зрения, было чрезвычайно трудно разобраться во всей совокупности оптических явлений. Более того, отдельные законы, казалось, находились в противоречии друг с другом. Загибание света не вязалось, например, с прямолинейным распространением луча.

Так было до того, пока усилиями ряда гениальных физиков, из которых в первую очередь должны быть названы Гюйгенс и Френель, не удалось найти ту картину, которую мы теперь называем волнообразной теорией света и которая позволила объединить всю оптику в одно стройное целое. И все, что казалось сложно и противоречиво, сделалось простым и ясным.

А возьмите теорию всемирного тяготения Ньютона. Объединяя с гениальной смелостью столь разнородные на взгляд наших чувств явления, как падение камня и движение небесных светил, она грандиозна именно своей простотой. В одной простой формуле она содержит всю динамику всего мироздания.

Я ограничусь этими примерами. Может быть, в них осталось кое-что вам неясным. Это ничего. Понимание фактической стороны придет по мере того, как вы будете изучать физику, но я думаю, что для вас, по крайней мере в общих чертах, теперь выяснилось соотношение между ее опытной и теоретической сторонами.

Эти две стороны, как вы видели, тесно связаны между собой, они вместе представляют одно целое. В достижении нашей конечной цели — познания природы — могучим подспорьем, систематизирующим наш опыт и дающим возможность пользоваться материалом, является теория. Теория, а значит, и орудие, которым, как мы видели, она пользуется — математика, — не является балластом и чем-то искусственно «пристегнутым» к науке о природе. Нет, она есть то орудие, без которого мы не были бы в состоянии осилить окружающий нас мир как в практическом смысле, так и в смысле удовлетворения умственных потребностей.

Поэтому я нахожу — не считайте это парадоксом, — что нельзя требовать знания только опытной физики, но вовсе не потому, что это слишком мало, а потому, что это слишком трудно. Более или менее полное знание опытной физики без помощи теории человеку не под силу.

Из тех же соображений я хотел бы, чтобы вы не оправдали того несколько злого слова, которое сказал знаменитый математик Клейн относительно уровня знания математики. Математику, сказал Клейн, забывают дважды — элементарную в университете и высшую — по выходе из университета.

Изложенный взгляд на систематизирующую роль теории очень хорошо иллюстрируется одним красивым сравнением, сделанным Пуанкаре.

Пуанкаре сравнивает всю физику с огромной библиотекой. Отдельные опытные данные, отдельные явления — это те томы, из которых библиотека состоит. Теория — это каталог нашей библиотеки. Как без каталога библиотека, особенно большая, представляет собой лишь сборище книг, очень ценных книг, которыми, в сущности, продуктивно пользоваться нельзя, точно так же

физика без теории не есть наука, а лишь довольно малочисленный конгломерат отдельных фактов, разобраться в которых невозможно.

А теперь нам будет уже негрудно ответить на тот вопрос, который мы поставили себе вначале. Нужна ли инженеру физика в ее целом, не достаточно ли ему знания отдельных, непосредственно для его практической работы нужных фактов? Ответ, мне кажется, ясен.

Чтобы продуктивно работать — позвольте мне говорить на языке сравнения Пуанкаре, — инженеру недостаточно прочесть и знать несколько книг из громадной библиотеки знания. Он должен быть знаком или, по крайней мере, уметь разбираться в каталоге всей библиотеки. А не то слишком часты будут те случаи, когда он натолкнется на такие явления, которых в его книгах нет. И тогда, если он не умеет разбираться в каталоге, он потеряется, он будет выхватывать наугад то одну, то другую книгу из огромной библиотеки, но, исключая какой-нибудь счастливый случай, он не найдет того, что ему нужно.

История техники знает немало примеров загадочных неуспехов, неуспехов повторных, имевших иногда весьма неприятные последствия. Очень часто оказывалось, что загадочность обуславливалась не присутствием действительно новых, до тех пор вообще неизвестных факторов, а отсутствием у тех, кто данными вопросами занимался, широкого физического горизонта. И когда за решение брались люди, обладавшие действительно широкими физическими знаниями, то загадка не только разъяснялась и находился способ предотвратить неуспех, но часто открывались и новые пути для дальнейшего прогресса.

Остановимся на нескольких примерах.

Во второй половине прошлого столетия стала обращать на себя внимание инженеров случаи непятных обрушений мостов, особенно цепных мостов, которые в то время как раз строились в сравнительно большом количестве. Непонятных — потому, что мосты рушились под весьма небольшой тяжестью, которую они по расчету должны были свободно выдерживать и фактически раньше выдерживали. Повторные проверки не обнаруживали ошибок в расчетах, а катастрофы были налицо. Инженеры беспомощно стояли перед совершившимися несчастьями и не имели средств предотвратить их в будущем.

И только в последнем десятилетии прошлого века решение вопроса было найдено. Вот что оказалось. Цепной мост представляет собой не жесткую систему, а систему, которая может, подобно струне, совершать колебания, с той разницей, что струна колеблется быстро, совершая несколько сот колебаний в секунду, в то время как мост, если его заставить колебаться, совершает за секунду, скажем, одно или даже меньше колебаний. И вот при известных условиях нагрузки наступило так называемое явление резонанса, несшее гибель мосту.

Явление резонанса давно было известно физикам в области акустики. Оно состоит в следующем. Представьте себе натянутую струну. Она способна, если по ней ударить или провести по ней смычком, звучать в некотором определенном тоне, при этом она приходит в колебания со вполне определенной частотой. Каждому тону соответствует своя частота. Скажем, что наша струна способна совершать 435 колебаний в секунду. Это соответствовало

бы тону «ля». Предположим, что струна находится в покое. Возьмем теперь вблизи другую струну, которая тоже способна совершать 435 колебаний в секунду, и заставим эту струну звучать. Тогда окажется, что под влиянием колебаний нашей второй струны приходит в колебания — и сильные колебания — и первая. Это явление называется резонансом. Но если вторая струна имеет отличное от первой число колебаний, то первая струна молчит и на колебания второй струны не отвечает. Объяснение явления резонанса несложно. Та струна, которую мы заставляем непосредственно колебаться, передает первой струне через воздух маленькие толчки, следующие друг за другом в темпе ее колебаний, т. е. каждую  $\frac{1}{435}$  сек один толчок. Каждый толчок сам по себе крайне незначителен. Первый толчок действительно приведет струну в ничтожно слабое колебание, но если темп этих колебаний и входящих толчков один и тот же, то второй толчок придется как раз вовремя и усилит действие первого. Третий усилит колебания еще больше и т. д. Произойдет накопление действия отдельных толчков, и в результате получается сильное звучание. Между тем если отдельные толчки следуют друг за другом не впопад, то действие одного будет уничтожаться действием следующего и заметного эффекта не будет.

Явление резонанса, изученное впервые в акустике, ею абсолютно не ограничивается. Звонарь на колокольне, раскачивающий тяжелый колокол, пользуется, хотя и бессознательно, тем же явлением. Он не в состоянии преодолеть тяжесть колокола одним усилием и поэтому поступает так. Он дает веревке слабый толчок: колокол отклоняется, но очень незначительно, а затем возвращается обратно; как раз в момент возвращения звонарь дает следующий толчок, и такими ритмичными, следующими в темпе колебаний колокола толчками он его раскачивает до тех пор, пока язык не ударит по колоколу. Вот почему, между прочим, звать в тяжелый колокол, особенно снизу, при помощи веревки, т. е. в условиях, когда следить за колебанием нельзя, требует немалого навыка.

Теперь, я думаю, вам будет ясно, как явление резонанса может оказаться губительным для моста. Представьте себе, и это действительно бывало при некоторых катастрофах, что по мосту проходит военный отряд, идущий в ногу. Отдельные толчки, производимые при этом, не оказывают сколько нибудь заметного действия. Но если случайно период этих ритмических толчков совпадает с периодом колебаний моста — а это, особенно в цепных мостах, может случаться очень легко, — то наступает явление резонанса. Действия отдельных толчков накапливаются, мост раскачивается все сильнее, материал не выдерживает, и мост рушится. Вот почему, между прочим, теперь при проходе отряда через такой мост солдатам дается команда идти не в ногу. Это, конечно, одна из причин, а подобных причин наступления резонанса может быть множество, и оградить себя от таких ритмических нагрузок трудно. Поэтому в настоящее время — а это и есть главный практический результат, к которому привела теория, — почти совершенно отказались от жестких систем, имеющих собственные колебания.

Современные конструкции имеют гораздо большую жесткость, чем прежние цепные мосты, и этим возможность колебаний, а значит и возможность наступления губительного резонанса, устраняется.

Я думаю, что вам теперь также стало ясным, почему случаи, подобные описанному, казались непонятными и загадочными. Конструкторы рассчитывали прочность своих мостов исключительно статически, т. е. они принимали во внимание только постоянную нагрузку, и с этой точки зрения их расчеты были совершенно правильными. Они не учитывали и даже не напали на мысль о необходимости учета ритмически изменяющейся нагрузки, с одной стороны, и колебаний моста — с другой. Их кругозор был ограничен и не охватывал явлений во всем их разнообразии. Но нашлись люди с широкой теоретической подготовкой, для которых звучание струны и колебания моста являлись лишь частными случаями, охватываемыми одним общим законом, и вопрос был решен.

Интересно, что аналогичное явление повторилось в совершенно другой области. Вы знаете, что для передачи электрической энергии пользуются иногда кабелем, состоящем, по существу, из двух металлических проводников, несущих ток, и изолированных друг от друга каким-нибудь изолирующим веществом, например гуттаперчей. Слой гуттаперчи между проводами должен быть больше или меньше, смотря по тому электрическому напряжению, иначе говоря, смотря по числу вольт, при котором передача энергии идет. Понятно при этом, что из соображений экономии и из-за тяжести кабеля слой гуттаперчи делают не больше (конечно, с известным запасом), чем это нужно для данного случая. Проверка делается в заводской лаборатории. Для этого соединяют один провод с положительным, другой — с отрицательным полюсом батареи и смотрят, выдерживает ли кабель нужное напряжение. И вот наблюдались случаи, что при работе с переменным током кабель, полностью выдержавший испытание в лаборатории, в работе пробивался.

Вопрос разъяснился и здесь тоже лишь тогда, когда к нему подошли с физико-теоретической стороны. Оказалось, что здесь, как и в случае моста, губительным фактором было явление резонанса. Дело в том, что кабель, смотря по длине, имеет различные периоды собственных электрических колебаний. Он представляет собой электрическую аналогию струны. С другой стороны, отличительной чертой переменного тока является его ритмическая пульсация.

И вот, если длина кабеля оказывалась такова, что период пульсации тока совпадал с периодом колебаний кабеля, наступало явление резонанса, происходило нарастание колебаний электрического напряжения, которое благодаря этому достигало гораздо большей величины, чем то, которое давали динамомашинны и на которое был рассчитан кабель, и изоляция пробивалась.

Позвольте мне в заключение остановиться еще на одном примере, взятом совсем из другой области и ясно, как мне кажется, иллюстрирующем значение широкого физического горизонта при разрешении технических вопросов.

Я имею в виду вопрос об оптических инструментах, и в частности вопрос о микроскопе. Вы знаете, что микроскоп играет чрезвычайно важную роль в очень многих областях прикладного знания. Я не буду напоминать вам его значение в медицине, в гигиене, в санитарии. Я укажу только на то, что и в изучении металлов микроскоп в настоящее время незаменим. Микроскопом особенно заинтересовались уже в середине прошлого столетия, после того как применение его в биологии открыло совершенно новые пути в изучении явлений жизни. Но после первых успехов обна-

ружилось, что существовавшие тогда микроскопы не были хороши и не были сильны. Исследователи ясно чувствовали, что если бы удалось построить микроскоп с большим увеличением, то вместе с тем явилась бы возможность проникнуть еще дальше в сущность жизни. А такая перспектива всегда с особенной силой манила людей. И фантазия не останавливалась перед постройкой микроскопов, увеличивающих в десятки, сотни тысяч и миллионы раз, и ждали от их применения чудес. Исследователи ждали, что с их помощью можно будет проникнуть в самые сокровенные детали строения живой материи.

Понятно, что при такой конъюнктуре и специалисты-конструкторы оптических приборов взялись с усиленной энергией за усовершенствование микроскопа. И они считали принципиально возможным достигнуть любых увеличений. Весь вопрос, казалось, сводился к преодолению технических трудностей.

Дело в том, что в то время все расчеты, касавшиеся оптических приборов, велись исключительно при помощи так называемой геометрической оптики. В основание расчета полагалась та теория микроскопа, которая, впрочем, и до сегодняшнего дня только и преподается в средней школе и которая оперирует со световыми лучами как с прямыми линиями. А с точки зрения геометрической оптики действительно не существует принципиальной границы для возможного увеличения микроскопа.

Однако же весьма скоро обнаружилось, что работа, направленная к усовершенствованию микроскопа, далеко не дает всех результатов, которых, казалось, можно было ожидать. Между тем, что казалось достижимым, и тем, что достигалось, было противоречие, которому объяснения не находилось.

Так обстояло дело, когда нидерландский механик Цейсс, имевший небольшую механическую и оптическую мастерскую и изготавливавший сам недурные по тому времени микроскопы, пригласил в качестве консультанта тогда еще молодого физика Аббе. Аббе обладал хорошей теоретической подготовкой, хорошо владел теоретической оптикой. Он знал, что геометрическая оптика есть лишь удобная схема для обработки классического явления преломления. Он знал ее цену, потому что он сам очень много внес нового в эту область. Но он знал также, что с точки зрения волновой теории света, служащей базой для геометрической оптики, последняя есть не более как приближение. И он сразу подошел к вопросу о микроскопе с широким, не связанным с узкими рамками геометрической теории взглядом.

Результаты такого подхода к делу не заставили себя долго ждать. Одним из главных результатов, к которым пришел Аббе, был следующий. Он показал, что волнообразная природа света ставит принципиальный предел тому полезному увеличению, которое может быть достигнуто при помощи микроскопа или вообще любого оптического инструмента. Если детали объекта мельче определенной величины или нормы, то эти детали не могут быть видны, выявить их ни один микроскоп не может. Все мечты об увеличении в 100 000 раз и больше и все связанные с ними надежды должны быть принципиально оставлены, и работа тех, кто хотел такие микроскопы построить, совершенно беспредельна. Блестящими опытами Аббе подтвердил правильность своих теоретических выводов.

Практическая важность открытия Аббе, конечно, очевидна, по

Аббе на этом, я сказал бы, негативном открытии не остановился.

Мечтая о невозможном, конструкторы оптических приборов до Аббе фактически далеко не осуществили и того, что возможно. И вот Аббе во всеоружии обширных теоретических знаний и большого опыта взялся за усовершенствование микроскопа.

Это ему и его методу работы, при котором он широко пользовался всей теорией, мы обязаны тем, что микроскоп в настоящее время почти достиг того, чего от него вообще можно ожидать, и что он представляет собой один из наиболее совершенных оптических инструментов.

Позвольте мне на этом остановиться. Я надеюсь, что вы теперь согласитесь со мной, что знание, широкое, полное знание физики для инженера не роскошь, а необходимость, что широкий физический горизонт должен быть достоянием не только тех отдельных избранных людей — инженеров, которым суждено прокладывать новые пути в технике, но и достоянием всякого инженера, сознательно относящегося к своему делу. Если то, что я сказал, может способствовать укреплению в вас этого взгляда, то моя цель была бы достигнута.

Но я не хотел бы закончить нашу сегодняшнюю беседу, не указав хотя двумя словами на еще одну сторону вопроса. Я хотел бы еще сказать вам, что занятия физикой, углубление в ее основы и в те широкие идеи, на которых она строится, и в особенности самостоятельная научная работа, приносят огромное умственное удовлетворение. Убеждать в этом я не хочу. Да и вряд ли здесь возможно убеждение. Тут каждый должен убедиться сам. Но я хотел бы, чтобы вы знали, что если кто-нибудь из вас почувствует в себе такое стремление, то для меня всегда будет большим удовольствием способствовать всем, чем я могу, его осуществлению. В сильном удовлетворении таких чисто научных запросов учащихся я, помню моих личных симпатий, вижу одну, и не последнюю, задачу высшей школы.



## СОДЕРЖАНИЕ

С. М. Рытов. Леонид Исаакович Мандельштам . . . . .	3
А. А. Андронов. Л. И. Мандельштам и теория нелинейных колебаний . . . . .	29
Л. И. Мандельштам. Вступительная лекция к курсу физики в Одесском политехническом институте	55

## АКАДЕМИК ЛЕОНИД ИСААКОВИЧ МАНДЕЛЬШТАМ

### Сборник статей

Гл. отраслевой редактор *В. П. Демьянов*  
Редактор *К. А. Кутузова*  
Мл. редактор *Т. Г. Иншакова*  
Обложка художника *Н. В. Пьяных*  
Худож. редактор *М. А. Гусева*  
Техн. редактор *Т. В. Луговская*  
Корректор *Р. С. Колокольчикова*

ИБ № 2479

Сдано в набор 16.01.80. Подписано к печати 05.02.80. Т 01328.  
Формат бумаги 84×108<sup>1</sup>/<sub>32</sub>. Бумага тип. № 12. Гарнитура литературная. Печать высокая. Усл. печ. л. 3,36. Уч.-изд. л. 3,68.  
Тираж 42 980 экз. Заказ 112. Цена 11 коп. Издательство «Знание». 101835, ГСП, Москва, Центр, проезд Серова, д. 4.  
Индекс заказа 804003.  
Типография Всесоюзного общества «Знание», Москва, Центр, Новая пл., д. 3/4.