

УСПЕХИ ФИЗИЧЕСКИХ НАУК**ЯКОВ ИЛЬИЧ ФРЕНКЕЛЬ****А. И. Ансельм**

В ночь на 23 января с. г. скончался выдающийся советский физик-теоретик, лауреат Сталинской премии, член-корреспондент Академии наук СССР Яков Ильич Френкель.

Яков Ильич представлял собой пример учёного с исключительно широким кругом интересов и дарований. Многие высказанные им впервые идеи и положения стали прочным достоянием современной науки.

Молекулярная теория кристаллов и жидкостей, электронная теория металлов, теория электронных свойств диэлектриков и полупроводников, физика атомного ядра, геофизика — обязаны многими из своих основных представлений Я. И.

Наш обзор научной деятельности Я. И. мы начнём с изложения его работ по молекулярной теории кристаллов и жидкостей. Нам кажется, что в этой области им были получены наиболее значительные научные результаты. Первоначальное наивное представление, существовавшее у физиков о кристаллах, как полностью упорядоченных в пространстве системах, и о жидкостях как полностью неупорядоченных, неизбежно должно было смениться представлениями, ближе отвечающими реальной действительности. В 1923 г. академик А. Ф. Иоффе высказал идею о возможности перехода иона или атома одного из узлов кристаллической решётки, в результате его теплового движения, в одно из соседних междоузлий. Я. И. в ряде работ развил эту идею, рассмотрев термодинамическое равновесие и механизм движения такого диссоциированного иона и оставленной им «дырки» и построил количественную теорию ионной электропроводности кристаллов. С тех пор «дефекты по Френкелю» стали неотделимым свойством реального кристалла. Советские физики широко использовали идеи Я. И. при трактовке электрических свойств ионных кристаллов и электронных свойств полупроводников. В известной монографии Н. Мотта и Р. Герни «Электронные процессы в ионных кристаллах» «дефектам по Френкелю» посвящена большая часть второй главы.

В 1925 г. Я. И. выдвинул плодотворную идею об аналогии между жидким и твёрдым (кристаллическим) состояниями. В самом деле, расстояния между соседними атомами в жидкостях и кристаллах одного и того же порядка. Это приводит к примерно одинаковому взаимодействию между атомами в твёрдых и жидких телах. Я. И. подчёркивал, что это обстоятельство должно сказаться не только на одинаковости некоторых макроскопических свойств обоих агрегатных состояний, но и на сходстве их внутренней молекулярной структуры. Впоследствии рентгенографический анализ с несомненностью указал на существование ближнего порядка в жидкостях, т. е. на квазикристаллический характер ближайшего окружения каждой молекулы жидкости. Очень важно то, что

Я. И. указал не только на необходимость существования ближнего порядка в жидкостях, сближающего их с кристаллами, так сказать, в структурно-геометрическом отношении, но и на одинаковый характер теплового движения атомов в кристалле и жидкости. Согласно Я. И. молекулы жидкости, в основном, колеблются около некоторого положения равновесия, переходя в среднем через время $\tau = \tau_0 \exp(U/kT)$ в новое равновесное положение (τ_0 — период колебания, T — абсолютная температура, U — высота потенциального барьера, отделяющего оба положения равновесия). Формула Френкеля, приведённая выше, с точки зрения теоретика почти тривиальна, но она оказалась исключительно плодотворной при истолковании и систематизации огромного опытного материала по диффузии, вязкости и электропроводности жидкостей. Более точные опыты, произведённые в более широком температурном интервале, показали на ограниченную применимость формулы, но её прогрессивная роль в осмысливании явлений, протекающих в жидкостях, остаётся несомненной. В начале 30-х годов Я. И. публикует ряд интересных работ, посвящённых ориентационному порядку-беспорядку в кристаллах и жидкостях. В этих работах впервые вводится понятие об ориентационных волнах, т. е. волнах вращательных качаний молекул в кристаллах. Изучение простейшей линейной цепочки ориентированных молекул с закреплёнными центрами приводит Я. И. к важному выводу о том, что граничная частота ориентационных волн обратно пропорциональна корню квадратному из момента инерции частицы. К этому же циклу работ относится теория ориентационного плавления в кристаллах. Это явление заключается в том, что в кристалле при некоторой определённой температуре исчезает дальний порядок в ориентациях молекул. Если кристалл состоит из полярных молекул, то ориентационное плавление проявляется на опыте в виде скачка электрической поляризации, наступающей при некоторой определённой температуре. Скачок теплоёмкости, наблюдающийся при определённых температурах у кристаллов хлористого водорода и метана, тоже может быть в некоторых случаях объяснён ориентационным плавлением. Идея Я. И. об ориентационных волнах получила дальнейшее развитие в работах советских теоретиков и привела к полной теории ориентационно-трансляционных волн в молекулярных кристаллах, широко используемой для интерпретации спектров комбинационного рассеяния малых частот, открытых советскими физиками.

Существенный вклад внёс Я. И. в теорию кинетической упругости высокополимеров. Известно, что кинетическая теория упругости линейных высокополимеров основана на представлении о тепловом движении (вращении) отдельных звеньев макромолекулы. Я. И., совместно с С. Е. Бреслером, первый учёл эффект несвободного вращения отдельных звеньев макромолекулы, приблизив тем самым теорию к условиям реального взаимодействия атомов в высокополимерах. Эти работы Я. И. получили дальнейшее плодотворное развитие в работах советских теоретиков по поворотной изомерии полимерных молекул.

Большая группа работ Я. И. посвящена механическим свойствам кристаллов. Здесь в первую очередь необходимо указать на работы по теории пластической деформации, выполненные им совместно с Т. А. Конторовой. В этих работах было показано, что в правильной кристаллической решётке возможен особый тип движения атомов — последовательное согласованное перемещение целых групп атомов из одних положений равновесия в другие. Такая «волна деформации» распространяется со

скоростью $v = c \left[1 - W_0^2/W^2 \right]^{1/2}$, где c — скорость звука в кристалле, W — энергия группы атомов, участвующих в перемещении, и W_0 — минимальная энергия сдвигообразования. Предполагается, что в основе на-

блюдаемой на опыте пластической деформации кристаллов лежит движение частиц именно этого типа. Интересно отметить, что в 1949 г., одиннадцать лет спустя после появления работ Я. И. и Т. А. Конторовой, английские физики Ф. Франк и Эшельби опубликовали ряд работ, в которых они рассмотрели тот же вопрос с макроскопической точки зрения, т. е. используя уравнения теории упругости. Они получили результаты, в точности совпадающие с результатами, полученными Я. И. и Конторовой.

В 1941 г. появилась работа Я. И. и Т. А. Конторовой, посвящённая статистической теории хрупкой прочности реальных кристаллов. Развивая количественно идею, высказанную ранее А. П. Александровым и С. Н. Журковым о том, что влияние масштабного фактора на хрупкую прочность кристаллов носит чисто статистический характер, авторы получили формулу, связывающую наиболее вероятное значение напряжения в образце, при его хрупком разрушении, с его объёмом. Следует отметить, что сравнительно недавно эта формула получила подтверждение на опыте.

Очень велика роль Я. И. в развитии современной электронной теории металлов. В 1916 г. А. Ф. Иоффе организовал в Петрограде при Политехническом институте научный семинар по физике. В этом семинаре принимали участие Н. Н. Семёнов, П. И. Лукирский, П. Л. Капица, Я. И. Френкель, Я. Г. Дорфман и др. При обсуждении вопроса о природе потенциального барьера, удерживающего свободные электроны внутри металла, Я. И., которому в то время было 22 года, выступил с собственной точкой зрения, которая заключалась в предположении о существовании на поверхности металла двойного электрического слоя. Несмотря на то, что работа Я. И. была сделана до появления квантовой механики и квантовой статистики, идея о существовании двойного электрического слоя на поверхности металла не потеряла своего значения до настоящего времени.

Весьма передовые идеи высказывал Я. И. по вопросу о теплоёмкости свободных электронов металла. Известно, что классическая электронная теория металлов столкнулась с непреодолимыми трудностями в вопросе об их теплоёмкости, которая, вопреки классическим представлениям, оказалась той же величины, что и теплоёмкость диэлектрических кристаллов. Это непонятное неучастие свободных электронов в тепловом равновесии металла Я. И. трактовал (качественно) совершенно правильно, как внутриатомное движение их с возможными переходами от одного узла решётки к соседнему. Я. И. пришёл к этим выводам на основании правильных соображений о непрерывном изменении внутриатомного движения электронов при конденсации атомов металла в решётку.

Я. И. умел находить удивительно простой язык для изложения сложных физических теорий. С исключительной простотой и наглядностью были им получены свойства Ферми-газа при абсолютном нуле температуры. Исходя из принципа минимума энергии системы и принципа Паули, он смог, пользуясь буквально одним выражением для объёма шара в пространстве импульсов, получить правильные значения для нулевой энергии, нулевого давления и т. д. На основании тех же простых соображений Я. И. доказал, что удвоенная средняя кинетическая энергия электронов в металле равна их потенциальной энергии, взятой с обратным знаком. Это позволяет со значительной простотой и наглядностью объяснить природу сил сцепления в металлах и определить правильный порядок постоянной решётки.

Несмотря на значительные успехи формальной теории ферромагнетизма, природа внутреннего молекулярного поля оставалась до 1928 г. необъяснённой. Константа внутреннего поля ферромагнетиков, измеренная на опыте, оказалась в тысячи раз большей, чем она должна была бы быть при учёте магнитного взаимодействия атомов. Я. И., совместно

с Я. Г. Дорфманом, правильно усмотрел причину огромного внутреннего поля в ферромагнетиках в квантовомеханическом обменном взаимодействии соседних атомов.

Большую роль в современной электронной теории диэлектриков и полупроводников играет представление об экситонах, выдвинутое Я. И. в 1931 г. Рассматривая поглощение света в диэлектриках, Я. И. пришёл к плодотворному представлению о двух возможных типах поглощения — одном, связанном с переходом электрона из заполненной зоны в зону проводимости, и другом, при котором возбуждённый электрон остаётся связанным со своим атомом. Однако возбуждение, или «экситон», не остаётся связанным с определённым узлом решётки, а подобно электрону полосы проводимости или дырке заполненной зоны, может свободно перемещаться по всему кристаллу. Это обстоятельство позволяет говорить об экситонных волнах подобно тому, как мы говорим о модулированных волнах электронов проводимости. Экситону, так же как и электрону в периодическом поле кристалла, можно сопоставить определённый квазиимпульс. При поглощении кванта света (фотона) и образовании экситона должны выполняться соответствующие законы сохранения: энергии и количества движения. Так как в рассматриваемом процессе может одновременно принимать участие и квант дебаевских тепловых волн (фонон), то структура спектра поглощения очень сильно усложняется (мультиплетная структура экситона). Преобразование экситона в тепловые колебания может согласно Я. И. происходить двояким образом. В первом случае экситон движется столь быстро, что он не успевает деформировать решётку вблизи возбуждённого атома кристалла; тогда рассеяние экситонного возбуждения происходит за счёт испускания отдельных тепловых фононов. Во втором случае «прилипший» экситон в той или иной мере деформирует решётку в непосредственном своём окружении, что приводит к возможности одновременного испускания большего числа фононов. Можно без преувеличения сказать, что основы электрически неактивного поглощения света в диэлектриках были заложены Я. И. В последние годы, в связи с некоторыми опытами по внешнему фотоэффекту, интерес к экситонам Френкеля сильно возрос, и появился ряд теоретических работ, развивающих теорию Я. И. Интересные работы советского теоретика С. И. Пекара по теории поляронов, выполненные в основном в 1944—1949 гг., тоже были основаны на идее Я. И. о возможной локализации свободного электрона в идеальной кристаллической решётке в результате её поляризации электроном.

В 1931 г. Я. И., совместно с академиком А. Ф. Иоффе, предложил теорию выпрямляющего действия контакта металла с полупроводником. Теория основывалась на рассмотрении механизма туннельных переходов электронов между металлом и полупроводником. Теория привела к правильной зависимости тока от приложенной разности потенциалов. Дальнейшее развитие теории твёрдых выпрямителей, выполненное главным образом трудами советских теоретиков, показало на ограниченную применимость теории Я. И. и А. Ф. Иоффе. Однако тщательное исследование вопроса, выполненное главным образом в течение последних лет, показывает, что единой теории твёрдых выпрямителей не существует и что «туннельная теория» имеет применение в ряде technically интересных случаев.

Огромная научная активность Я. И. и его живой интерес к наиболее актуальным проблемам науки не могли оставить его равнодушным к вопросам ядерной физики. Но и здесь, как и повсюду, он вносит свой своеобразный подход к вопросу. Во-первых, его мало интересуют те вопросы ядерной физики, в которых применение громоздкого математического аппарата не всегда оправдывается физической ценностью полученных результатов. Во-вторых, он вносит в решение тех физических вопросов ядерной физики, которые его интересуют, термодинамические

и статистические методы теоретика, много работавшего в области молекулярной физики. Эта задача облегчается для него тем, что атомные ядра (во всяком случае тяжёлых элементов) трактуются как заряженные капли — модель, для разработки которой им было сделано так много.

В 1936 г. Я. И. выдвигает смелую идею — предлагает трактовать испускание нуклонов и альфа-частиц возбуждёнными ядрами, как процесс испарения атомов и молекул нагретым кристаллом. Как и в теории парообразования, он выражает вероятность испускания частицы промежуточным ядром (испарение) через вероятность обратного процесса (конденсации). Пользуясь этой простой физической картиной, Я. И. вычисляет ширину энергетических ядерных уровней и получает зависимость ширины от энергий промежуточного и конечного ядер. Когда в 1939 г. было экспериментально открыто деление ядра урана, Я. И., ещё до опубликования подробных расчётов Бора и Уилера, рассмотрел энергетические вопросы, связанные с делением тяжёлого ядра. Сравнивая между собой изменение поверхностной ядерной и кулоновской энергий ядра-капли при её делении, Я. И. приходит к заключению о возможности спонтанного деления ядра урана — явления, которое было впоследствии подтверждено блестящими опытами советских физиков. Он вносит также известную ясность и в динамическую теорию деления ядра, обусловленную электрокапиллярными колебаниями, вызванными захватом нейтрона.

Основные научные интересы Я. И. были направлены на решение актуальных конкретных задач физики. Это вполне соответствовало его характеру и темпераменту, его потребности непрерывного общения с физиками-экспериментаторами, инженерами и научными работниками других специальностей: метеорологами, биологами и т. п. Однако эти же качества его характера не могли оставить его равнодушным и к наиболее принципиальным проблемам теоретической физики. В 1926 г., за два года до появления релятивистского уравнения Дирака, Я. И. публикует работу, в которой он исследует электромагнитное поле движущегося электрона, обладающего магнитным моментом. Исходя из законов классической электродинамики, Я. И. показывает, что движущийся момент обязательно создаёт и электрический момент. Требование релятивистской инвариантности приводит к тому, что составляющие магнитного момента m и электрического p являются компонентами некоторого антисимметричного тензора второго ранга. Исходя из этих

соображений, Я. И. показал, что электрический момент $p = \left[m \frac{v}{c} \right]$

где v — скорость электрона и c — скорость света. Следует отметить, что формула Френкеля следует и из точного уравнения Дирака для движения электрона.

Интерес Я. И. к вопросам геофизики — теории атмосферного электричества и проблеме земного магнетизма — проявился ещё в пору его юности. В 1912 г., ещё будучи гимназистом, Я. И. пытался построить теорию атмосферного электричества и теорию земного магнетизма, основанную на представлении о намагничивающем действии Солнца на Землю. Я. И. показал свои опыты молодому профессору А. Ф. Иоффе, который подверг их справедливой критике, но отметил талантливого юношу и привлек его впоследствии к работе в Физико-технический Институт. В 1944—1946 гг. Я. И. вновь обращается к этим же проблемам и, как нам кажется, вносит существенный вклад в теорию, объясняющую существование электрического поля в земной атмосфере.

Наблюдения показывают, что у поверхности Земли всегда существует электрическое поле. При отсутствии облаков это поле направлено вертикально вниз (что соответствует отрицательно заряженной поверхности Земли) и по порядку величины равно 1 в/см. При наличии облаков по-

ле у поверхности Земли имеет противоположное направление и значительно большую величину. Теория Я. И. хорошо объясняет эти факты как с качественной, так и с количественной стороны. Согласно Я. И. облака являются гигантскими генераторами, поддерживающими электрическое поле Земли, которое стремится распасться из-за электропроводности атмосферы, вызванной действием космических лучей и радиоактивности почвы. Используя хорошо известный факт, что капли воды, погруженные в нейтральную ионизованную атмосферу, заряжаются отрицательно, Я. И. детально рассматривает механизм падения электроотрицательного облака в поле тяжести Земли. Если учесть наличие положительно заряженной в объеме облака атмосферы, то легко показать, что рассматриваемый механизм вызывает электрическую поляризацию облака, создающего в окружающем пространстве поле, свойства которого соответствуют наблюдениям.

Мы не коснулись в нашем кратком очерке научной деятельности Я. И. многих его интересных работ, но мы надеемся, что упомянули о большинстве исследований, оставивших существенный след в науке. Общее количество работ, опубликованных Я. И., очень велико — оно превышает двести. Остаётся непонятным, как при такой огромной творческой активности у него оставалось время и силы для работы над многочисленными монографиями и учебниками, над которыми он неустанно трудился всю жизнь. Механика, электродинамика, теория относительности, квантовая механика, статистическая физика, теория металлов, кинетическая теория жидкостей и многие другие вопросы физики получили в книгах Я. И. интересное, быть может не всегда бесспорное, но оригинальное и богатое новыми идеями изложение. Особый интерес представляет монография Я. И. «Кинетическая теория жидкостей», изданная Академией наук в 1945 г. и как бы подытоживающая двадцатилетний труд автора в этом направлении. За эту монографию Я. И. был в 1947 г. удостоен Сталинской премии первой степени. Нет сомнения в том, что интересные и оригинальные учебники Я. И. во многом способствовали развитию теоретической физики в Советском Союзе. Некоторые из учебников Я. И. подверглись справедливой критике со стороны советской научной общественности. Я. И. сумел сделать правильные выводы из этой критики — переизданная им в 1950 году «Теория металлов» в значительной мере лишена тех недостатков, которые ей были присущи раньше. Смерть застала Я. И. за переработкой курса «Волновой механики» — работы, которой ему так и не суждено было довести до конца.

Оглядываясь на путь, пройденный этим человеком в течение не слишком долгой 58-летней жизни, поражаешься огромному и благородному труду, выполненному им. Диапазон научных интересов Я. И. был огромен, начиная от ультратеоретических вопросов релятивистской теории электрона и кончая техническими задачами искрения трамвайных проводов. Исключительный интерес проявлял он к смежным областям физики — геофизике, биофизике, астрофизике, которые он также обогатил многими интересными идеями.

Научный семинар, руководимый Я. И. с начала двадцатых годов, длительное время являлся одним из наиболее активных и передовых научных центров по теоретической физике в Советском Союзе. Многие физики-теоретики начинали свою работу, будучи в той или иной мере связанными с Я. И. И если многие из них сами стали впоследствии крупными учёными и нашли собственные пути в науке, то первыми робкими шагами на научном поприще они обязаны Я. И. Недаром Я. И. до последних дней жизни был связан со своими учениками не только в Ленинграде, но и в Москве, Киеве, Свердловске, Львове, Черновцах и других городах Союза. Такую общую работу по воспитанию научных кадров Я. И. совмещал с педагогической деятельностью

в Ленинградском политехническом институте, где он в течение тридцати лет заведывал кафедрой на физико-механическом факультете.

Казалось бы, что такой опромный труд мог быть выполнен только узким учёным кабинетного типа. Однако те, кто был знаком с Я. И. лично, знают, в какой мере ему не соответствовало понятие «кабинетного учёного». Ещё до войны Я. И. уделяет много внимания и оказывает помощь развитию в нашей стране научной и учебной кинематографии. Во время войны, в 1944—1945 гг., Я. И. работает над некоторыми вопросами в Институте теоретической геофизики в Москве. С 1945 до 1947 г. он работает в Главной геофизической обсерватории в Ленинграде, оставаясь в ней членом Учёного совета до конца жизни. Даже в последний свой приезд в Москву, в декабре 1951 г., Я. И., несмотря на плохое самочувствие, продолжал консультировать сотрудников Всесоюзного института авиационных материалов.

Правительство высоко оценило работу Я. И., наградив его орденом Трудового Красного Знамени в 1945 г. и удостоив его Сталинской премии первой степени в 1947 г.

Внешняя жизнь Я. И. не была богата событиями. Я. И. родился 10 февраля 1894 г. в Ростове-на-Дону, но почти всю жизнь прожил в Петербурге — Ленинграде. Закончив среднюю школу в Петербурге, он поступает на физико-математический факультет Петербургского университета, который оканчивает в 1917 г. Весной 1917 г. он с семьёй переезжает в Ялту, где после Октябрьской революции принимает деятельное участие в организации Таврического университета. В период установления советской власти в Крыму он работает в Народном комиссариате образования. В 1920 г., при временной оккупации Крыма белыми, Я. И. был за эту работу заключён в тюрьму.

После окончательной победы Советской власти Я. И. в 1921 г. возвращается в Петроград, где по приглашению академика А. Ф. Иоффе начинает работать в Ленинградском физико-техническом институте и на физико-механическом факультете Политехнического института. Здесь, в Лесном, между весёлым светлым зданием Физико-технического института и строгим массивом Политехнического протекает вся жизнь этого крупного учёного и замечательного человека.

Я думаю, что нет ни одного человека, который при личном знакомстве с Я. И. не испытал на себе всего обаяния его личности, его безграничного доброжелательства к окружающим. Ему была абсолютно чужда поза учёного-ментора, рядящегося в тогу непогрешимости. Его бурный темперамент учёного приводил его иногда к ошибкам, но он никогда не отказывался заново пересмотреть свои точки зрения. Он был не только учёным в одной из наиболее абстрактных областей человеческого знания, но и большим любителем музыки и живописи.

Таким рисуется нам образ этого крупного учёного, честного правданина и обаятельного человека.