

## ИЗ ИСТОРИИ ФИЗИКИ

## Игорь Евгеньевич Тамм

Е.Л. Фейнберг

Юбилейная дата побуждает еще раз вспомнить об этой уникальной личности, интересной во многих аспектах. Я напомним здесь об Игоре Евгеньевиче, как о физике-теоретике исключительно высокого уровня, о его трудах. Я буду говорить и о научной обстановке того времени, когда он создавал свои работы, о их связи с развитием всей нашей физики, которая на протяжении его жизни развивалась от провинциального уровня до высокой науки, завоевывая мировое признание. Я решаюсь при этом включать элементы личных воспоминаний.

Игорь Евгеньевич родился 8 июля 1895 г. во Владивостоке, но уже в его раннем детстве семья долгим путем через Японию (транссибирская железная дорога еще не была достроена) переехала в Елисаветград (при советской власти переименованный в Кировоград). Здесь его отец стал "городским инженером", — построил электростанцию, водопровод и т.п. и ведал всем этим хозяйством. Его положение обеспечивало небогатое, но благополучное существование семьи. Здесь Игорь Евгеньевич в 1913 г. окончил гимназию и еще до ее окончания определилась его основная жизненная направленность — наука, физика. Это было так серьезно, что когда он летом 1913 г. отправился учиться в Эдинбург, в университет, то был уже достаточно подготовлен, чтобы физику вообще не слушать, только ходил на лабораторные занятия. Математику начал сразу со 2-го и 3-го курсов и, кроме того, проходил лишь химию, языки, занимался общественной деятельностью. Уже в декабре он сдал математику за 2-й курс. "Таким образом, — писал он в письме будущей жене, Наталии Васильевне Шуйской, — я не на инженерном, а на чистой математике. В третий терм (апрель-июнь) возьму себе по физике курс по теории колебаний и, вероятно, логику и введение в философию". Действительно, почему-то формально он числился на инженерной специальности и сетовал: "Как это глупо, что я учусь "на инженера". И стремление у меня лишь к чистой науке, и практического работника из меня не выйдет... Переменить сейчас техническое на университет [ет] не смогу. Постараюсь сделать это на тот год".

Е.Л. Фейнберг. Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, 117924 Москва, Ленинский просп. 53  
Тел. (095) 137-03-10

Статья поступила 17 марта 1995 г.

Однако, как и в России, он не меньше интересовался социальными проблемами, "политикой" в его терминологии. Он посещает политические собрания и митинги социалистов, знакомится с жизнью бедноты, читает русскую, запрещенную на родине литературу, изучает "Капитал" Маркса. Жизнь горячо интересует его во всех проявлениях. Он близко знакомится со студентами из Индии и других стран. Вступает в социалистический студенческий кружок и в фабианское общество. Подрабатывает на жизнь, преподавая русский язык на курсах иностранных языков ("поглощает страшно много времени") и занимается еще множеством дел.

Со свойственной ему решительностью суждений, естественно обостренной в молодости, Игорь Евгеньевич оценивает преподавателей: "Нет никакого смысла сидеть на лекциях — один читает до смешного элементарно, другой засыпается..., тк<sup>1</sup> что студенты его поправляют. Только один профессор есть у меня стоящий."

Стараясь вернуться на родину, он запрашивает о возможности поступить в Московское техническое училище (зачтут ли там год обучения в Эдинбурге), но, возвратившись в начале лета 1914 г. все же поступает на физико-математический факультет Московского университета. И это определило его профессиональную жизнь.

Здесь не место описывать все значительные события в жизни Игоря Евгеньевича, черты его личности, проявившиеся в университетские годы и в годы гражданской войны<sup>2</sup>. Он закончил университет в 1918 г. и тогда только резко отошел от политической деятельности (а в 1917 г. она была такой бурной, что он даже был делегатом Первого Всероссийского съезда советов от Елисаветграда, по партийной принадлежности — "меньшевиком-интернационалистом", т.е. довольно близким к большевикам. Однако уже Октябрь в сильной степени оттолкнул его от них).

Несколько последующих лет были для его научной работы пустыми. Правда, некоторое время он преподавал в Симферопольском университете, где общался со многими замечательными учеными (физик Я.И. Френкель, математики В.И. Смирнов и Н.М. Крылов, биологи

<sup>1</sup> Это не описка: Тамм, видимо, спеша, всюду пишет "кк" вместо "как" и "тк" вместо "так". Он ведь до старости даже ходил быстро, мелкими шагами, как бы стремясь обогнать самого себя.

<sup>2</sup> См., например, сборник статей "Воспоминания об И.Е. Тамме" (М.: Наука, 1-е изд. — 1981, 2-е — 1986). Готовится к печати 3-е издание, дополненное материалами, которые ранее по разным причинам не разрешалось публиковать.

А.Г. Гурвич и А.А. Любишев и др.), а затем, в 1921 г. перебрался в Одессу к Л.И. Мандельштаму, ставшему на всю жизнь его близким старшим (на 16 лет) другом, можно сказать, учителем. Но до этого беспорядочные годы гражданской войны были заполнены переездами, часто очень опасными из-за пересечения фронтов.

Только в 1921 г. в Одессе, голодной и холодной, началась, по существу, его научная деятельность. Здесь разумно сделать отступление и сказать несколько слов о положении физики в нашей стране того времени.

До революции физика у нас в целом была слаба. Если в химии уже были такие имена, как Д.И. Менделеев, А.М. Бутлеров; в математике — Н.И. Лобачевский, М.В. Остроградский, П.Л. Чебышев, А.А. Марков, А.М. Ляпунов; в физиологии — И.М. Сеченов, И.П. Павлов, А.А. Ухтомский, то в физике после Ломоносова в начале XIX в. был лишь вскоре совсем забытый В.В. Петров, потом Э.Х. Ленц и Б.С. Якоби, сверкнул изобретатель радио А.С. Попов, из числа наиболее значительных были Н.А. Умов и А.Г. Столетов, мало известные на Западе, и лишь начал свою деятельность действительно замечательный физик П.Н. Лебедев. Дело не только в том, что он был блестящим экспериментатором, впервые наблюдал и измерил давление света (работа, пожалуй, "нобелевского уровня"). Это был человек всегда полный физическими идеями, первый, кто в начале XX века основал у нас свою школу физики того же характера, что и западно-европейские. Он пестовал своих учеников (С.И. Вавилов, Н.Н. Андреев, В.К. Аркадьев и др.). Но в 1911 г., вместе с более чем сотней других профессоров Московского университета покинул его в знак протеста против реформ министра просвещения Кассо, который для борьбы с революционным движением студенчества резко ограничил традиционную университетскую автономно.

Эта акция (так уж повелось в России, что интеллигенция не отделяла себя от либеральных течений, от социальных и политических проблем) вообще обескровила университет, а для университетской физики была губительной. Через год П.Н. Лебедев умер от болезни сердца в возрасте 46 лет, а физика в университете захирела и далеко отстала от мирового уровня. Игорь Евгеньевич вспоминал, что теорию электричества читал некий профессор, который, дойдя до уравнений Максвелла, объявил, что это очень сложная теория и он ее читать не будет. Несколько более серьезных молодых преподавателей (Н.Н. Андреев, Г.С. Ландсберг и др.) не делали погоды.

Особенная ситуация сложилась в Петербурге, где в 1907–1912 гг. работал выдающийся австрийский теоретик П. Эренфест, не нашедший работы на родине. Организованный им теоретический семинар оказал огромное влияние на формирование группы молодых теоретиков и теоретически образованных экспериментаторов, которые проявили себя в полной мере позднее, после революции. Остальные же физики, более старшего поколения, были столь же консервативны, как в Москве. Исключением являлся О.Д. Хвольсон, пятитомный курс физики которого не только выходил у нас в постоянно обновляемом виде несколькими изданиями, но и был переведен за границу.

Можно сказать, что если Россия "была беременна революцией", то наша культура была "беременна боль-

шой наукой". В физике был такой исследователь, как А.А. Эйхенвальд, экспериментально доказавший эквивалентность конвекционного тока и тока проводимости (эффект Эйхенвальда), был Е.С. Федоров, классифицировавший кристаллографические группы симметрии, был А.А. Фридман (которого, однако, можно скорее считать математиком-механиком; лишь в 1922–1923 гг. он сделал выдающееся открытие в физике — нашел нестационарные решения в космологии Эйнштейна, доказав тем возможность расширяющейся вселенной). Недостатком, однако, оставалось отсутствие научных школ, за исключением единственной школы П.Н. Лебедева, вскоре распавшейся.

Почти все значительные физики предреволюционного поколения (за исключением, пожалуй, только Н.А. Умова) по многу лет учились и в молодости работали за границей, почти только в Германии, которая вплоть до гитлеровского разгрома науки была безусловным мировым лидером в естественных науках. Так, П.Н. Лебедев учился у Кундта, Кольрауша и Гельмгольца, А.Ф. Иоффе — у Рентгена, А.А. Эйхенвальд, Н.Д. Папалекси, Д.С. Рождественский, Н.Н. Андреев, Б.Б. Голицин кончали немецкие (или швейцарские) университеты, либо хоть несколько лет работали там по окончании российского университета. Почти все они, уже после революции, создали свои школы, организовали институты и т.д.

Не был исключением и Л.И. Мандельштам. Изгнанный из Новороссийского (Одесского) университета за участие в студенческом движении, он с 1899 г. учился, а затем работал у Брауна в Страсбурге, где стал профессором, своими работами приобрел мировое имя и лишь в 1913 г. вернулся на родину. На Игоря Евгеньевича он оказал огромное влияние. Именно под его руководством в возрасте 26 лет началась научная деятельность Тамма.

\* \* \*

Игорь Евгеньевич был к ней уже вполне готов. В частности на высоте была его математическая подготовка. Он доказал это, когда в 1922–1925 гг. были опубликованы три его первые работы.

Первая, краткая, совместная с Л.И. Мандельштамом, была напечатана позже других, за границей [1], но, по существу, из нее исходят две более обширные работы [2, 3], опубликованные ранее, однако только на русском языке. Эти исследования по электродинамике анизотропных сред в теории относительности были интересны с общей, принципиальной точки зрения. Однако мы и до сих пор не встречаемся в буквальном смысле с анизотропными телами, движемися с релятивистскими скоростями. Не удивительно, что эти вопросы еще долго не рассматривались в литературе. Лишь через четверть века Яух и Ватсон, не зная о работах Мандельштама и Тамма, заинтересовались проблемой и, в частности, повторили некоторые их результаты [4–6].

Однако в действительности эти исследования имеют отношение и к вполне конкретным физическим вопросам. Дело в том, что даже в изотропных средах при движении со скоростью  $|\mathbf{u}| \sim c$  возникает ситуация, имеющая анизотропный характер. Например, диэлектрическая  $\epsilon$  и магнитная  $\mu$  восприимчивости при наличии пространственной и (или) временной дисперсии стано-

вятся, скажем, для плоской волны зависящими не только от ее частоты  $\omega$  и волнового вектора  $\mathbf{k}$ , но и от "анизотропной" комбинации  $\omega - \mathbf{k}\mathbf{u}$ , и потому эффективно уравнения электродинамики приобретают такой же характер, как для анизотропной среды. Другой пример — релятивистски движущийся сгусток плазмы в магнитном поле. В таких случаях становится полезным главный результат работы [1] — сведение уравнений Максвелла для напряженностей электрического и магнитного полей  $\mathbf{E}$ ,  $\mathbf{H}$  и их индукций  $\mathbf{D}$ ,  $\mathbf{V}$  к одному тензорному уравнению. Например, в отсутствие источников поля оно имеет вид:

$$F_{ik} = s_{ijkl}H^{jl},$$

где  $F_{ik}(\mathbf{E}, \mathbf{V})$  и  $H_{jl}(\mathbf{D}, \mathbf{H})$  — обычные тензоры Минковского (2-го ранга), а  $s_{ijkl}$  — материальный тензор 4-го ранга, построенный определенным образом из компонент  $\varepsilon_\alpha$  и  $\mu_\alpha$ ,  $\alpha = 1, 2, 3$ , вдоль трех осей и вектора  $\mathbf{k}$ . Благодаря этому можно от напряженностей перейти к потенциалам, найти функцию Грина и т.п., что резко упрощает задачу. Обзор всей этой ситуации, а также библиография огромного числа (более четырехсот) работ по конкретным релятивистским явлениям "анизотропного" типа, выполненных до 1975 г., содержится в большой статье [7], включающей также оригинальные результаты авторов.

Однако почти все это делалось без ссылок на исследования Манделъштама и Тамма. По-видимому, первой работой, исходившей прямо из них, была статья Рязанова [8].

Работы, о которых идет речь, Игорь Евгеньевич делал в основном уже в Москве, куда он переехал в 1922 г. как только после введения НЭПа обстановка стала понемногу нормализоваться. Но жил он крайне неустойчиво. Зарабатывать на жизнь для возникшей своей семьи приходилось и преподаванием в неинтересных вузах, и писанием популярных статей по физике, и переводами книг.

Но положение в физике в целом в стране быстро менялось к лучшему. В Петрограде–Ленинграде уже возникли крупные физические институты, каких прежде в России вообще не было. Прежде всего — это Физико-технический институт, организованный А.Ф. Иоффе, ставший колыбелью многих, постепенно, с начала 30-х годов отпочковавшихся от него институтов, причем не только в своем городе. В Харькове, Днепропетровске, Свердловске (Екатеринбурге) и Томске возникали новые институты, в которых ядро составляли приезжавшие туда готовыми группами питомцы института А.Ф. Иоффе (Харьковский и Свердловский стали потом мощными научными центрами). Другой крупный институт — Оптический институт Д.С. Рождественского, имел в очень большой степени прикладную тематику (фактически только благодаря ему у нас смогла возникнуть "на пустом месте" промышленность с массовым производством широчайшего круга оптических приборов), но сочетавший это с исследовательской работой по самым глубоким вопросам оптики. Не случайно в нем, помимо самого Д.С. Рождественского, работали такие физики, как В.А. Фок, С.И. Вавилов, А.Н. Теренин. Наконец, нельзя не вспомнить Рентгеновский и радиологический институт В.Г. Хлопина, в котором впоследствии, в 1937 г. был запущен первый в Европе циклотрон.

В Москве столь мощное развитие началось несколько позже. Существенным толчком был переезд в Москву в 1925 г. Л.И. Манделъштама, возглавившего в университете кафедру теоретической физики. Игорь Евгеньевич стал приват-доцентом физического факультета уже в 1924 г., а в 1930 г. заменил Л.И. Манделъштама в качестве заведующего кафедрой теоретической физики. Вокруг Л.И. Манделъштама объединилась и лучшая часть старой профессуры, и молодые аспиранты — А.А. Андронов, А.А. Витт, М.А. Леонтович, Г.С. Горелик, С.Э. Хайкин, С.М. Рытов и др. Приглашение Л.И. Манделъштама в Москву произошло после долгой борьбы этих людей против остальной профессуры. При этом значительную роль сыграла молодежь, в частности, входившая в общественные организации университета, которые тогда имели большую силу (среди них особой активностью отличался студент А.А. Андронов, впоследствии академик). Из преподавателей большую роль сыграл молодой С.И. Вавилов.

Но физика в Москве развивалась и в новых технических институтах, подобно упоминавшимся выше ленинградским, подчиненных Народному комиссариату (т.е. министерству) тяжелой промышленности. Так возник Электротехнический институт, в Теоретическом отделе или Отделе физики которого в конце 20-х годов по совместительству работал и И.Е. Тамм. Любопытно, что его важнейшие работы по квантовой теории излучения [9, 10], о которых будет сказано ниже, были опубликованы, как выполненные в этом институте.

Примерно в то же время там начали работать известные оптики, ученики Л.И. Манделъштама и Г.С. Ландсберга — В.А. Фабрикант, В.Л. Грановский, К.С. Вульфсон. Другие вопросы физики разрабатывались, например, под руководством А.С. Предводителя в Теплотехническом институте, который возглавлял крупный и широкообразованный инженер Л.К. Рамзин (впоследствии осужденный как глава мифической "Промпартии").

Государство, насколько возможно, не жалело средств на развитие науки, направляя их, как видим, даже через промышленный наркомат. Однако в стране не было еще собственного производства исследовательской аппаратуры. Сотрудники (в 1930 г. в их числе был и я, тогда лаборант Теплотехнического института) ходили по комиссионным магазинам, скупая все подходящее: испорченные амперметры и вольтметры фирм Хартмана–Брауна или Сименса–Гальске, которые еще можно было починить, объективы от старых фото- и киноаппаратов и т.п. Когда Л.И. Манделъштам, не обладавший спектрометром с достаточной разрешающей силой, предложил ленинградскому оптику Е.Ф. Гроссу попытаться обнаружить предсказанное им дублетное расщепление линии света при рассеянии (известное ныне как дублет Манделъштама–Бриллюэна), то передал ему для работы (в качестве рассеивателя) хрустальную пробку от графина, купленную в комиссионном магазине. Командированные за границу физики часто на свои деньги покупали нужные материалы. Но, конечно, хотя и бедное еще государство тем не менее широко закупало приборы за границей.

Заметим, что в 1931 г. и ученики Л.И. Манделъштама — А.А. Андронов, Г.С. Горелик вместе с близкими им ленинградцами — М.Т. Грехова, В.И. Гапонов и др. переехали в Нижний Новгород и создали там



Игорь Евгеньевич Тамм (Лейден, Голландия, 1928 г.)

институт, который в настоящее время превратился в мощный комплекс институтов, хорошо известный научному миру. Уместно подчеркнуть, что все это движение (как ленинградцев, так и москвичей) на периферию в значительной мере основывалось на гражданственном понимании необходимости развивать науку не только в столице, но и по всей стране. Традиции российской интеллигенции были еще живы. Этим людям приходилось преодолевать огромные трудности, но дело делалось.

Уже в начале 30-х годов недостаток оборудования стал понемногу преодолеваться. Я сам видел, как стали наполняться пустые ранее шкафы в Институте физики Московского университета. Так, появились в огромном количестве зеркальные гальванометры "ФИ" производства Ленинградского физического института. Сначала половина из них почти сразу выходила из строя, но с каждым годом качество улучшалось. Они были дешевы и работали. Появились и оптические приборы. В Радиевом институте в Ленинграде в 1932 г. начали строить циклотрон, в Харькове, еще ранее, — ускоритель Ван-де-Граафа, и промышленность выполняла специальные заказы.

Но бытовая неустроенность научных работников, особенно молодых, продолжалась еще долго. До 1935 г.

Игорь Евгеньевич жил в "квартире", перестроенной из конюшни во дворе университета. Пол был на уровне земли и квартиру нередко заливало, а "удобства" были во дворе. Этого, однако, не стеснялись. Дирак, друг Игоря Евгеньевича, дважды приезжавший в СССР, жил у него дома (с этим связан известный эпизод, когда во второй приезд, отвечая смущенному Игорю Евгеньевичу, быстро и многословно извиняющемуся за то, что после первого визита у него ничего не изменилось, любивший точность лаконичный Дирак сказал: "Как ничего не изменилось? Раньше туда надо было ходить со свечкой, а теперь лампочку повесили").

\* \* \*

Но вернемся после этого отступления к работам И.Е. Тамма того периода. Начав свою научную деятельность очень поздно (для теоретика), в 26 лет, он работал с необычайной интенсивностью. Сначала, после статей [1–3], идет несколько работ, выполненных еще в рамках старой боровской квантовой теории (до появления квантовой механики) и не имеющих существенного значения. Здесь, однако, стоит упомянуть статью о парамагнетизме атомов [11], в которой, по-видимому, впервые был учтен вклад орбитальных моментов. Этот результат, конечно, остался верен и поныне, но стал элементарно понятным. Другая судьба у работы [12], в которой Игорь Евгеньевич попытался найти общий количественный критерий допустимости использования принципа соответствия, который тогда был единственным методом расчета явлений в электродинамике, ориентирующейся на квантовые идеи, и вычислить интенсивности спектральных линий атома. Направленная в печать 15 июня 1925 г., она, по существу, опоздала. Появление квантовой механики сделало ее излишней. Но о принципе соответствия мы еще поговорим. Наконец, в эти же годы он работал над своим курсом "Основы теории электричества", вышедшем впервые в 1929 г. Этот замечательный своей физической ясностью курс стал очень популярным. Было много его изданий, почти всегда дополнявшихся и перерабатывавшихся при жизни Игоря Евгеньевича. Выходил он и после его смерти. Если вспомнить сказанное выше об уровне преподавания теории электричества в дореволюционном Московском университете, то нетрудно понять, какое освежающее, революционизирующее значение имела эта книга. Она и по сей день сохраняет свою ценность.

В каком-то смысле переломным можно считать 1928 г., когда Игорь Евгеньевич впервые, уже сформировавшимся ученым, более чем на полгода поехал за границу. Был в Геттингене у Борна, но основное время провел в Лейдене у Эренфеста. Здесь он по-настоящему вошел в только что оформившуюся квантовую механику, установил тесные взаимоотношения с высоко его оценившими Эренфестом и с приехавшим в Лейден Дираком.

Вернувшись домой, Тамм заканчивает начатую в Лейдене работу по электродинамике вращающегося электрона [13]. Нам сейчас нелегко понять, почему в 1928–1929 гг., когда уже существовала и квантовая механика, и дираковская теория электрона со спином, нужно было развивать сложную релятивистскую неквантовую теорию магнитного момента электрона. Но один

тот факт, что эта работа была в основном сделана в Лейдене, а в статье выражается благодарность Эренфесту и Фоккеру "за многие полезные обсуждения" показывает, что проблему соответствия дираковской теории спина и классической картины вращающегося заряда лучшие физики того времени считали актуальной.

Игорь Евгеньевич занимался физикой со всепоглощающей страстью. И когда его в это же время захватил интерес к единой теории поля Эйнштейна, он посвятил ей за один 1929 г. пять (!) публикаций (две — совместно с М.А. Леонтовичем), чтобы выяснить поведение в этой теории дираковского электрона и, шире, пытаюсь показать, как он пишет в первой статье, "что у новой эйнштейновской теории поля имеются определенные квантовомеханические черты". Он старается, в частности, выяснить, будет ли в единой теории поля сферически симметрично поле заряженной частицы.

Но эти работы, которые потребовали много сил и времени, сложного математического аппарата, постигла неудачная судьба. Эйнштейновская единая теория поля, в которой ее автор попытался объединить электромагнитное поле с гравитационным так же, как в электромагнитном поле объединены электрическое и магнитное, и был занят этим последние три десятилетия своей жизни, не решила проблемы. Теперь мы знаем, почему она была обречена: в объединенной теории полей электромагнетизм должен входить вместе со слабыми (а также сильными) взаимодействиями, которые в то время не были известны. Практически весь ученый мир физиков тогда рассматривал упорство Эйнштейна как чудачество, позволительное для гения. Потребовалось несколько десятилетий, чтобы его *idée fixe* возродилась на новом уровне, стала общепризнанной коренной проблемой.

Оценивая весь этот этап, первые 8 лет серьезной работы Игоря Евгеньевича в области теоретической физики, когда проявился его высокий, так сказать, технический профессионализм и широта знаний, нельзя не признать, что он не принес ему все же настоящего успеха. Нельзя, конечно, сбрасывать со счета его прекрасный курс теории электричества. Но осязаемых научных результатов не было.

И здесь Игорь Евгеньевич совершает резкий поворот в своей научной работе. От рассмотрения самых общих проблем (релятивистская электродинамика анизотропных тел; границы применимости метода соответствия; единая теория поля) он переходит к изучению конкретных явлений в рамках квантовой механики. И за несколько лет делает очень значительные вещи.

Близость к Л.И. Мандельштаму, к своему почти сверстнику Г.С. Ландсбергу и более молодому другу М.А. Леонтовичу прямо повлияла на выбор темы первой работы этого периода [9]. Эти физики глубоко изучали рассеяние света в твердых телах как экспериментально, так и в рамках классической теории, в которой это явление рассматривается как рассеяние световой волны на упругих колебаниях кристалла. При этом уже было полное понимание того, что частота рассеянного света может быть как больше, так и меньше начальной частоты. Игорь Евгеньевич дал квантовую теорию процесса, но значение его работы выходит далеко за рамки просто последовательной теории частного процесса. Дело в том, что он проквантовал упругие колебания по образцу квантования электромагнитного поля,

произведенного Гейзенбергом и Паули. В результате коллективные колебания частиц решетки предстали как газ "упругих квантов" — квазичастиц, каждая из которых включает движение всех частиц решетки. Я.И. Френкель предложил назвать их фононами. В конкретных полученных формулах обнаружилось и некоторое отличие от результатов классической теории. Оно немедленно получило экспериментальное подтверждение в опытах Г.С. Ландсберга и Л.И. Мандельштама.

Но главное здесь, конечно, в том, что впервые в физике движение многих взаимодействующих частиц было сведено к газу квазичастиц. Значение этого шага трудно переоценить<sup>3</sup>. Однако с тех пор квазичастицы разных типов, в частности фононы, так прочно вошли в физику, стали таким привычным понятием, что, заглянув в какую-либо специальную физическую или общую энциклопедию, вы в статьях "фонон" или "квазичастица" не найдете даже упоминания о том, что в физику они были введены Таммом в работе [9].

Вслед за этим сразу последовала другая важная работа Игоря Евгеньевича [10] о рассеянии света на свободном электроны, т.е. теория комптон-эффекта. Это опять частный процесс, но результаты снова имеют принципиальное значение для теории.

Дело в том, что до конца двадцатых годов большинство крупнейших физиков считало, что для расчета квантово-электродинамических процессов достаточно квантовать движение электронов, а взаимодействие с полем рассматривать по методу соответствия. Например, взаимное рассеяние двух электронов, когда один переходит из состояния  $\psi_1^0(\mathbf{r}_1)$  в состояние  $\psi_1^f(\mathbf{r}_1)$ , а другой из  $\psi_2^0(\mathbf{r}_2)$  в  $\psi_2^f(\mathbf{r}_2)$  рассчитывалось так: образуем плотности зарядов перехода  $\rho_1^{of} = e\psi_1^{f*}(\mathbf{r}_1)\psi_1^0(\mathbf{r}_1)$  и  $\rho_2^{of} = e\psi_2^{f*}(\mathbf{r}_2)\psi_2^0(\mathbf{r}_2)$  и токов перехода  $\mathbf{j}_1^{of} = e\psi_1^{f*}(\mathbf{r}_1)\boldsymbol{\alpha}\psi_1^0(\mathbf{r}_1)$ ,  $\mathbf{j}_2^{of} = e\psi_2^{f*}(\mathbf{r}_2)\boldsymbol{\alpha}\psi_2^0(\mathbf{r}_2)$ . Тогда амплитуда их рассеяния по теории возмущений в нижнем порядке по заряду есть (формула Меллера):

$$A_{of} = \text{const} \int \frac{\rho_1^{of}(r_1)\rho_2^{of}(r_2) - \mathbf{j}_1^{of}(r_1)\mathbf{j}_2^{of}(r_2)}{|\mathbf{r}_1 - \mathbf{r}_2|} d\mathbf{r}_1 d\mathbf{r}_2$$

( $\boldsymbol{\alpha}$  — матрицы Дирака; const — известный фактор). Вторичное квантование здесь совершенно не нужно. (Даже Ландау придерживался этой точки зрения вплоть до войны.)

Подобные же рассуждения дают амплитуды перехода для других процессов. Однако обоснованность этого подхода остается под сомнением. Более того, уже тогда были известны случаи, когда при этой идеологии возникают несовпадающие результаты различных конкретных ее применений. Игорь Евгеньевич сам ссылается в [10] на различные результаты Шрёдингера и О. Клейна, вычисливших комбинационное рассеяние света атомом.

Поэтому Игорь Евгеньевич пересмотрел вопрос о комптон-эффекте, последовательно квантуя поле по Паули и Гейзенбергу, т.е. используя вторичное квантование. Окончательная формула совпала с той, которую получили Клейн и Нишина за год до того, применяя метод соответствия. Что же, Тамм просто подтвердил их результат и его работа принадлежит к разряду так презиравшихся Ландау *Verklärungen* и *Neubegründungen*

<sup>3</sup> Ср. статью Е.Г.Максимова и С.Ю. Саврасова в этом выпуске.

(разъяснения и новые обоснования)? Отнюдь нет. Дело в том, что в методе принципа соответствия участвуют только начальные и конечные состояния частиц, а при вторичном квантовании в рассмотрение входят промежуточные состояния. И вот Игорь Евгеньевич обнаружил, что промежуточные состояния, при которых дираковский электрон оказывается в состоянии с отрицательной энергией, играют фундаментальную роль. Даже в предельном случае рассеяния длинных (инфракрасных) волн, когда в результате получается классическая формула Томсона, эти состояния с отрицательной энергией совершенно необходимы.

Надо вспомнить, что в то время наличие в теории Дирака состояний с отрицательной энергией было "головной болью" для физиков. Ведь все реальные электроны, имеющие положительную энергию, должны были бы упасть на уровень с бесконечно большой отрицательной энергией. Сам Дирак, как известно, предложил поправить дело, заполнив все уровни с отрицательной энергией электронами, так что наблюдаемыми объектами могли бы быть только "дырки" в этом фоне, имеющие свойства положительно заряженных частиц. По существу, этим предсказывалось существование позитронов, но они были открыты только в 1932 г., а тогда и сам Дирак, и Тамм считали, что дырки — это протоны, хотя на самом деле масса дырки должна была быть равна массе электрона. Большинство же теоретиков считало заполненный фон и дырки нелепостью.

В такой туманной атмосфере многие находили совершенно необходимым каким-то образом изгнать из теории Дирака состояния с отрицательной энергией. Поэтому результат Игоря Евгеньевича имел чрезвычайно большое значение. Он развеял надежды на устранение отрицательных уровней.

В этой же статье Игорь Евгеньевич выясняет вероятность аннигиляции электрона с дыркой, которую опять считает протоном, и показывает, что возникает новая существенная трудность: электрон в атоме должен был бы аннигилировать с протоном ядра за ничтожно малое время  $\sim 10^{-3}$  с. Только через два года, когда был открыт позитрон, эта формула помогла понять, почему в земных условиях он так трудно наблюдаем: попав в среду с большим числом электронов, он очень быстро аннигилирует с одним из них.

В этой же истории поучительно, что и Тамм, и сам Дирак рассматривали свой ужасный вывод относительно быстрой аннигиляции электрона с протоном своего атома только как "трудность" теории, но не как катастрофу. Обыкновенный теоретик не столь высокого уровня не посмел бы так спокойно смотреть на этот результат, казалось бы обесценивающий всю теорию. Но Дирак и Тамм видели в этой теории убедительную стройность и красоту, а не только успешное объяснение спина, и такого рода "трудности" не могли их поколебать.

С этой статьей связан личный эпизод, ради которого, быть может, стоит отвлечься. Сохранилось письмо И.Е. Тамма к П. Эренфесту от 24 февраля 1930 г. Из него видно, что Игорь Евгеньевич сначала послал статью с небольшой ошибкой. Вот выдержка из этого письма:

"Дорогой Павел Сигизмундович, Вы, наверное получили мою телеграмму. Мне страшно, страшно стыдно. Я, как писал, трижды проверял свои вычисления, перед тем, как послать Вам заметку. Затем сел писать работу

полностью для печати — при этом я всегда делаю все выкладки заново, не глядя в ранее написанное. И вот оказалось, что в самом начале я всюду путал знак у синуса! Если сделать все правильно, то в окончательной формуле никакого отличия от формулы Клейна-Нишины нет!

Вся эта история мне тем более обидна, что мне теперь удалось привести вычисления в нравящуюся мне изящную форму. Если их совсем немного видоизменить, то можно, например, вычислить вероятность спонтанного перехода электрона из состояния положительной энергии в состояние энергии отрицательной. Этим я сейчас занимаюсь и закончу на днях.

Ужасно мне неприятно, что я второй раз обращаюсь к Вам с просьбой о напечатании и второй раз с такими промахами (в прошлом году не симметризовал волнового уравнения)...

Ваш Иг. Тамм

P.S. Конечно, все сказанное о преобладающей роли переходов через состояние отрицательной энергии остается справедливым. Иг. Т."

В своих воспоминаниях об Игоре Евгеньевиче (см. сноску на с. 811) я написал, что у него не опубликовано ни одной ошибочной работы (были гипотетические высказывания, не оправдавшиеся экспериментально и адресованные скорее экспериментаторам) и что в печать направлялось только тщательно и многократно проверенное. Оказывается, все же были моменты, когда он спасался от опубликования ошибки в последнюю минуту. Заметим, что, как видно из письма, в исправленную статью он внес дополнения, в частности формулу для сечения аннигиляции.

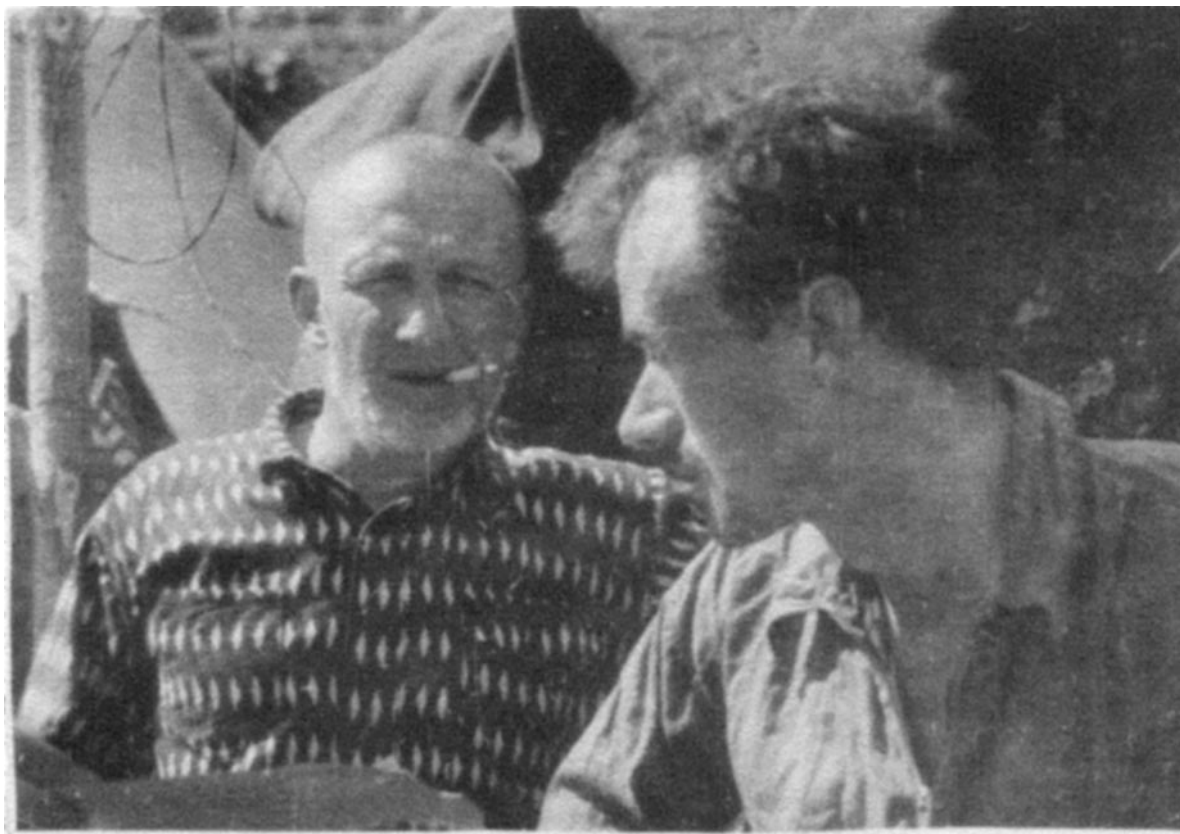
Дираковской теории электрона посвящены еще две более частные заметки Тамма — в 1930 г. о рассеянии света на двух электронах и в 1934 г., уже после открытия позитрона, о матрицах плотности в теории Дирака (там, где в статье обычно указывается название института, в котором работа выполнена, стояло: "Теберда — Кавказ", т.е. она была выполнена на отдыхе, в горном курорте [14]).

В 1931 г. Тамм поехал работать в Кембридж к Дираку, которого он называл гением, которым восхищался. По дороге заехал к Эренфесту в Лейден, а на обратном пути — к Иордану, в Росток. Общение с Дираком привело к настоящей дружбе. В письме Л.И. Мандельштаму Игорь Евгеньевич писал: "В Кэмбридже мне очень хорошо... В научном отношении ... самое интересное — новая работа Дирака, законченная "на моих глазах" ... Он показывает, что квантовомеханически возможно существование изолированных магнитных полюсов". Игорь Евгеньевич добавляет, что в связи с этим "написал математическую (sic!) работу", — исследование забавных свойств собственной функции электрона в поле магнитного полюса". Речь идет о статье [15].

Дирак обучил Тамма вождению автомобиля и они поехали в Шотландию, где в подходящем месте Игорь Евгеньевич в ответ обучал Дирака альпинизму (перед этим "В качестве предварительного курса я лично лазал с ним по деревьям", — пишет он в том же письме). После этого, во время приездов Дирака в СССР, Тамм ходил с ним в альпинистские походы на Кавказе.

Но вернемся к физике.

После работ по рассеянию света и теории электрона Дирака Игорь Евгеньевич переключился на новую об-



И.Е. Тамм и Поль Дирак (Кавказ, 1936 г.)

ласть — квантовую теорию металлов, тогда только зарождающуюся. Здесь были исследованы три существенные проблемы.

Во-первых, в 1931 г., совместно с С.П. Шубиным, учеником Л.И. Мандельштама и И.Е. Тамма, исключительно талантливым теоретиком (впоследствии, в 1937 г. арестованным и через год погибшим) была дана теория фотоэффекта на металле. Эта работа стала классической и исходной для многих последующих исследований других авторов. Здесь были четко разграничены две разные физические основы для двух компонент эффекта: поверхностный эффект, т.е. выбивание электрона из поверхностного слоя, где главную роль играет скачок потенциала на границе металл–воздух, и объемный — выбивание электронов проводимости, движущихся внутри металла (блховские волны). Эту работу, по дороге в Кэмбридж, Игорь Евгеньевич докладывал в Лейдене [16].

Во-вторых, совместное с учеником Игоря Евгеньевича Д.И. Блохинцевым исследование работы выхода электронов из металла [17].

И, наконец, в-третьих, едва ли не самая важная из этого цикла работа Тамма, в которой он обнаружил возможность существования особых поверхностных состояний электронов в металле. Находясь в таком состоянии, электрон не может ни вылететь наружу, ни войти внутрь металла [18]. Эти "уровни Тамма", как их с тех пор называют, оказались исключительно важными для физики поверхностных явлений, а через четверть века — для транзисторной техники и т.п. Уже в 60-е годы эта область так разрослась, что появилась монография С. Дэвисона и Дж. Левина "Поверхностные

(таммовские) состояния" (на русском языке изданная в 1973 г.) [19]<sup>4</sup>.

Наконец, заканчивая этот период 1933-м годом, нельзя не упомянуть, что Игорь Евгеньевич впервые выступил со статьей по методологическим вопросам физики в философском журнале [20]. Защищая новую физику — теорию относительности и квантовую механику от невежественных нападок партийных философов и консерваторов-физиков, объявивших себя марксистами, он тактично объяснял им истинное значение нового этапа в развитии науки, но добился лишь яростной ненависти к нему, закрепившей его репутацию "буржуазного идеалиста". Она принесла ему в дальнейшем много опасных неприятностей.

\* \* \*

Остановимся на минуту и рассмотрим положение в физике в это время, ставшее переломным для нее и в мире, и в нашей стране.

В мире это проявилось в том, что в 1932 г. были экспериментально открыты позитрон (и это блестяще подтвердило предсказание теории Дирака, укрепив авторитет квантовой механики, теоретической физики вообще) и нейтрон (после чего стало ясно, что ядра состоят из протонов и нейтронов и это открыло новую

<sup>4</sup> К настоящему времени из этой идеи развилось огромное число экспериментальных и теоретических исследований множества физических явлений, уходящих корнями в поверхностные уровни Тамма, но гораздо более сложных и разнообразных. В качестве примера одного из них — статья Б.А. Волкова в настоящем номере УФН.

эпоху — эпоху физики атомных ядер). В апреле того же года Кокрофт и Уолтон, на созданной ими высоковольтной установке, впервые расщепили атомное ядро ускоренными протонами. Все это (как и многие другие успехи физики) изменило всю атмосферу исследований и начался резкий рост их масштаба. Это изменение хорошо описано в романе Митчелла Уилсона (физика по образованию), изданном у нас почему-то под названием "Жизнь во мгле" (подлинное английское название — *Life with lightning* — "Жизнь с молнией").

В нашей стране это совпало с периодом превращения физики в развитую область науки, приобретающую международный авторитет. К этому времени у нас уже было сделано несколько открытий такого масштаба, который соответствует нобелевским премиям. Так, в 1928 г. Г.С. Ландсберг и Л.И. Мандельштам открыли комбинационное рассеяние света в кристаллах — раман-эффект, обычно называемый так потому, что Раман в Индии, наблюдавший его в жидкости, сообщил о нем телеграммой в журнал *Nature* на 3 месяца раньше, чем Г.С. Ландсберг и Л.И. Мандельштам передали свою статью в печать, и получил Нобелевскую премию<sup>5</sup>. Это опережение оказалось решающим, хотя у Рамана понимание наблюдаемого эффекта было на более низком уровне, чем у Ландсберга и Мандельштама, понимавшими ясно его физическое содержание.

Далее, в 1927 г. Д.В. Скобельцын в Ленинградском физико-техническом институте открыл, что космические лучи, наблюдаемые на поверхности Земли, являются электронами высоких энергий (и поэтому не могут, например, быть следствием радиоактивных примесей в атмосфере), а в 1929 г. показал, что они идут в виде ливней электронов (интересно, что до этого в реферативном журнале *Physikalische Berichte* работы по космическим лучам помещались в разделе "Геофизика"). Это открытие можно рассматривать как начало физики высоких энергий. Однако Нобелевскую премию получил В. Боте, подтвердивший этот результат другим методом (системой счетчиков, включенных на совпадение, а не наблюдением в камере Вильсона как у Д.В. Скобельцына). Интересно, что премия была формально присуждена именно за этот метод.

В 1926–1932 гг. Н.Н. Семенов (вначале работавший с Ю.Б. Харитоном) открыл разветвленные цепные химиче-

ские реакции (через четверть века удостоен Нобелевской премии за это открытие вместе с С. Хиншелвудом).

Наконец, немного позже, в 1933 г., С.И. Вавилов и П.А. Черенков наблюдали необычное излучение света электронами в среде, называемое теперь их именами (опубликовано в 1934 г.), которое нашло объяснение через несколько лет в работе И.Е. Тамма и И.М. Франка. За него через четверть века и была присуждена Нобелевская премия.

Но помимо этого было сделано много и других замечательных работ. Приведу лишь несколько примеров. М.А. Леонтович и Л.И. Мандельштам теоретически обнаружили, что квантовая механика приводит к возможности туннельного эффекта и выяснили все его основные свойства, а Г. Гамов на этой основе построил теорию  $\alpha$ -распада ядер. В Харьковском физико-техническом институте был построен ускоритель Ван-де-Граафа, на котором (в том же 1932 г., что Кокрофт и Уолтон) А.К. Вальтер, Г.Д. Латышев, А.И. Лейпунский и К.Д. Синельников (все — молодежь) повторили опыт по расщеплению ядра. Можно было бы назвать и другие значительные работы.

Все это показывает, что к началу тридцатых годов, за какие-нибудь 10 лет выросло новое поколение физиков-теоретиков (вспомним еще молодого Л.Д. Ландау) и экспериментаторов, успевших уже заявить себя работами, выполненными на мировом уровне, и еще большее их число появилось в непосредственно последовавшие годы. Школы, созданные учеными старшего поколения, о которых мы говорили вначале, порождали новые школы.

Одновременно, как уже говорилось, возникало и производство научной аппаратуры. Новые институты быстро множилось. Если раньше научные статьи традиционно посылались в *Zeitschrift für Physik* и *Physikalische Zeitschrift*, где их быстро публиковали, и лишь с запозданием (до года) они появлялись на русском языке в журнале Русского физико-химического общества, то в 1931 г. возник международный журнал *Physikalische Zeitschrift der Sowjetunion*, издававшийся в Харькове и быстро публиковавший статьи на немецком, английском и французском языках. Правда, "международным" он был условно, но все же там появлялись статьи и иностранных авторов, даже Дирака. Главное, советские работы получили прямой путь за границу, этот журнал был читаемым.

В 1934 г. в Харькове была созвана Международная конференция по теоретической физике, всего человек 30. Но среди них были Бор, Розенфельд, Валлер, Гордон (уравнение Клейна и Гордона) — всего 8 иностранцев. Интерес, внимание к нашей науке возрастали.

Еще совсем незадолго перед тем простой факт существования физических исследований в нашей стране был неизвестен в массах. Я могу сослаться на собственный пример. Я вырос и учился в школе в центре Москвы. Испытывая влечение к физике, ходил в Румянцевскую (потом Ленинскую) библиотеку читать книги, рассказывающие о работах Эйнштейна, Бора, Резерфорда. Был уверен, что исследовательской работой могут заниматься только гении, но никак не обыкновенные люди, и окончив школу, пытался поступить в химический институт, где была хотя бы электрохимическая специальность. Когда на следующий (1930) год узнал о существовании физического факультета в километре от школы и поступил на него, то некоторые

<sup>5</sup> На самом деле Г.С. Ландсберг и Л.И. Мандельштам наблюдали эффект даже несколько раньше Рамана, но они долго дополнительно перепроверяли опыты и также по другим причинам задержались с отправкой рукописи (подробнее см. Фабелинский И Л УФН 126 124 (1978)). У нас долго считалось, что советские ученые не были включены в число лауреатов из-за антисоветских настроений Нобелевского комитета (и что Борн в знак протеста вышел из комитета). Возможно, это и было серьезным фактором, но теперь, когда в согласии с правилами комитета, более чем через 50 лет после событий опубликованы все хранившиеся в секрете материалы этого присуждения, дело выглядит проще. Оказывается, в первый раз, в 1929 г., Ландсберга и Мандельштама не выдвигал никто, а Рамана — двое крупных физиков, включая Бора. Однако премию получил де Бройль. На следующий год обоих наших ученых выдвинул только Хвольсон, а Мандельштама — Папалекси, в то время как Рамана выдвинуло очень много более именитых физиков. Вероятно, это и решило дело. Премия присудили Раману. Попросту говоря, наша физика за рубежом еще не пользовалась значительным авторитетом. Да и процедура выдвижения, как известно, всегда требует особой "организаторской активности" кандидата.



знакомые моих родителей спрашивали: это что, физкультура?

Вскоре такая ситуация стала невозможной. Сообщение о расщеплении атомного ядра в Харькове было напечатано в "Правде" на первой странице, как главная новость дня, в виде "Рапорта товарищу Сталину" о крупной победе советской науки. О физике вообще информация разрасталась.

\* \* \*

Научный переворот 1932 г. направил в новое русло и исследования Игоря Евгеньевича. Он переключился на ядерную физику.

Интересна судьба его первой же (совместно с его аспирантом С.А. Альшутером) работы, в которой на основе анализа экспериментальных данных о магнитных моментах ядер высказывается утверждение, что незаряженная частица — нейтрон обладает магнитным моментом. Сейчас очень трудно понять, почему эта небольшая работа вызвала такое сильное осуждение на упоминавшейся выше харьковской конференции по теоретической физике в 1934 г. Но дело в том, что тогда считалось само собой разумеющимся, что элементарные частицы "предельно элементарны" и поэтому точечные. Более того, некоторые авторы говорили, что частица не может быть не точечной, потому что тогда по ней при соударении взаимодействие будет распространяться со скоростью, превышающей скорость света. Это значит, что неточечная частица безмолвно предполагалась недеформируемой, абсолютно твердой. Поэтому не думали о возможности того, что в пределах нейтральной частицы возможно ненулевое распределение заряда и токов, лишь в целом дающее нейтральное целое. Но Игорь Евгеньевич не видел в этих возражениях убедительных аргументов и настаивал на своей точке зрения. Потребовалось немного времени, и она была признана правильной.

Совсем другой характер имела обширная и важная работа Тамма о природе ядерных сил. Естественно, что протон-нейтронная структура ядра ставила вопрос о том, какими силами частицы удерживаются вместе. Ведь кроме гравитационных и электромагнитных сил ничего не знали. Даже само предположение о том, что есть какие-то еще силы, было невероятно смелой фантазией. Как пишет в своей статье Игорь Евгеньевич, "сразу после открытия нейтрона в 1932 г. Гейзенберг высказал предположение, что взаимодействие протона с нейтроном обязано обмену электрическим зарядом". Обратите внимание — опять только электрическим. Но о механизме обмена ничего нельзя было сказать. Однако в 1934 г. Ферми дал свою замечательную теорию  $\beta$ -распада, как процесса испускания нуклоном пары электрон-нейтрино. Этого было достаточно, чтобы Игорь Евгеньевич немедленно выдвинул идею о том, что нуклоны (тогда этого термина, конечно, еще не употребляли) взаимодействуют через обмен такими парами и их антипарми. Это было допущение совершенно новых сил, помимо гравитации и электромагнетизма. Он немедленно принялся за расчеты, производил их по ночам во время харьковской конференции и получил обескураживающий результат: этот обмен действительно дает новый вид сил, и притом, как нужно, короткодействующих, убывающих с расстоянием  $r$ , как  $r^{-5}$ , но на много порядков более слабых, чем нужно для объяснения

устойчивости ядер. Формулу для потенциала взаимодействия  $V = ar^{-5}$ , где  $a$  — определенная константа, пропорциональная квадрату константы  $\beta$ -распада  $g^2$  (т.е., как мы сказали бы сейчас, квадрату заряда слабого взаимодействия), при  $r \ll \hbar/mc$ , где  $m$  — масса электрона, т.е. при  $r < 10^{-13}$  см,  $V(r) \sim g^2 r^{-5}$  Игорь Евгеньевич опубликовал в виде краткого письма в *Nature* [21] и был чрезвычайно огорчен неудачей<sup>6</sup>.

В течение двух последующих лет Тамм безуспешно рассматривал другие варианты реализации этой своей идеи. Когда в 1935 г. Конопинский и Уленбек предложили видоизменение теории  $\beta$ -распада Ферми [23], Игорь Евгеньевич ухватился за этот вариант, который года на два очаровал некоторых физиков тем, что, казалось, он лучше описывает форму  $\beta$ -спектров. В этом варианте силы получались на несколько порядков *больше* необходимых. В обширной статье 1936 г. [24] он показал, что нужной величины сил можно достичь, взяв линейную комбинацию двух вариантов. Но так как в самом подходе Конопинского и Уленбека возможно множество вариантов, то Игорь Евгеньевич заканчивает статью меланхолической фразой: "Представляется бессмысленным дальнейшее исследование огромного разнообразия возможностей такого рода без знания каких-то общих принципов, которые пока еще не открыты". Я сам помню это его настроение. Он посылал статью в печать "через силу".

Однако он был неправ. Во-первых, на самом деле "огромное разнообразие возможностей", которые открывали варианты теории Конопинского и Уленбека, очень скоро отпало. Эта теория с самого начала вызвала у многих теоретиков принципиальные возражения. Дело в том, что в ее гамильтониане взаимодействия присутствуют члены с производными по времени (от операторной волновой функции) высшего порядка. Это недопустимо, потому что тогда изменение волновой функции во времени не определяется ее значением в нулевой момент времени, а требует задания в этот момент и ее производных по времени. Это противоречит основным принципам квантовой механики.

Во-вторых, очень скоро выяснилось, что экспериментально наблюдавшееся отклонение  $\beta$ -спектров от предсказаний первоначальной теории Ферми прекрасно объясняется наложением нескольких  $\beta$ -спектров при каскадном распаде радиоактивных ядер. Таким образом, таммовская теория  $\beta$ -сил в первоначальном ее варианте (т.е. на основе теории  $\beta$ -распада Ферми) описывает реально существующие слабые силы между нуклонами (и эти силы были несколько десятилетий спустя обнаружены на опыте), но не они определяют устойчивость атомных ядер.

Очень скоро, в 1935 г., Юкава, прямо ссылаясь на работу Тамма, выдвинул смелую идею, согласно которой ядерные силы обусловлены обменом тогда еще не известной, гипотетической частицей с массой  $\sim 300$  МэВ/ $c^2$  — мезоном. Теперь мы знаем, что это — пион. Исходным пунктом для Юкавы была идея Игоря Евгеньевича о межчастичных силах, обусловленных обменом частицами, имеющими массу.

<sup>6</sup> Одновременно там же было опубликовано письмо Д.Д. Иваненко [22], содержащее изложение этой же идеи обмена, но без каких-либо формул, вычислений и количественных результатов, или даже оценки.

Итак, за какие-нибудь 6–7 лет Тамм опубликовал три цикла работ: по рассеянию света твердым телом (введя при этом понятие квазичастицы, фонона) и электроном (включая аннигиляцию электрона с дыркой, доказав необходимость дираковских отрицательных уровней энергии); по квантовой теории металлов (предсказав существование поверхностных "уровней Тамма" и объяснив фотоэффект на металле) и по ядерной физике (высказав утверждение о наличии магнитного момента у нейтрона и, главное, дав теорию ядерных  $\beta$ -сил). Это сразу завоевало ему признание, уважение мирового сообщества физиков. Как говорил мне Б. Понтекорво, его высоко оценил Ферми. С ним дружил и работал вместе Дирак. Эрэнфест предлагал его в качестве своего преемника по кафедре, которую до него занимал Лоренц. Оценили его и наши физики: в 1933 г. Игорь Евгеньевич был избран членом-корреспондентом АН СССР, у него установились хорошие отношения с Л.Д. Ландау и В.А. Фоком, старая дружба связывала его с Я.И. Френкелем. Но завоевал он также репутацию "буржуазного идеалиста" среди наших "марксистских" физиков и физиков-реакционеров.

Было вполне естественно, что когда С.И. Вавилов организовал (после переезда Академии наук СССР в Москву в 1934 г.) Физический институт им. П.Н. Лебедева и пригласил туда лучших московских физиков, среди них был и Игорь Евгеньевич, организовавший и возглавивший Теоретический отдел. Он руководил им до смерти. Отдел носит теперь имя И.Е. Тамма. Очень скоро он перенес туда из Университета свой еженедельный семинар и вообще сосредоточил здесь свою деятельность.

\* \* \*

И в это время вторгся совсем новый эпизод. В 1933 г. аспирант С.И. Вавилова, исключительно тщательный и внимательный экспериментатор П.А. Черенков, изучая свечение растворенных в жидкости ураниловых солей, их флюоресценцию под действием  $\beta$ -электронов радия, с ужасом увидел, что жидкость светится почти так же сильно и без ураниловых солей. Это делало его изучение ураниловых солей безнадежным занятием. Но С.И. Вавилов сразу заинтересовался "паразитным" свечением и быстро установил, что это новый, не известный ранее тип излучения. По мере дальнейшего, очень трудного при тогдашней технике экспериментального исследования П.А. Черенков установил детальнее его характеристики (потом оказалось — удивительно точно). Обсуждение разных возможностей С.И. Вавиловым, И.М. Франком и И.Е. Таммом все более вело к заключению, что излучает равномерно движущийся электрон. Это казалось диким, вызвало многочисленные насмешки, поскольку "все знали", что равномерно движущийся электрон не может излучать. Достаточно ведь перейти в систему покоя электрона и становится ясным, что излучать нечему. Но при этом упускали "маленькую" деталь. Приведенное обычное рассуждение относится к электрону, движущемуся в пустоте. Если же все происходит в материальной среде (в данном случае — в жидком растворителе), то в системе покоя электрона на него налетает эта среда и теперь есть чему излучать. Франк и Тамм в 1937 г. дали объяснение и теорию этого излучения Черенкова–Вавилова [25, 26] (на Западе гово-

рят просто "черенковского излучения", оставляя в стороне важную роль Вавилова в этом открытии). В статье 1939 г. Игорь Евгеньевич разработал эту теорию более полно. Как уже говорилось выше, именно за это открытие Тамм, Франк и Черенков получили в 1958 г. Нобелевскую премию (С.И. Вавилов скончался задолго до того, а посмертно эта премия не присуждается).

Забавно, что в научной биографии Игоря Евгеньевича эта его работа, удостоенная почетнейшей награды, была, по существу, эпизодическим отклонением в сторону. Ведь все эти и последующие годы его главной темой была физика ядра и элементарных частиц. Отклонением можно считать и очень хорошую работу, принесшую много пользы физике космических лучей. Речь идет о совместной с его учеником С.З. Беленьким статье 1939 г. [27], в которой теория электромагнитных ливней была существенно усовершенствована путем учета потерь энергии частиц на ионизацию среды, в которой развивается ливень<sup>7</sup>. Только благодаря этому стало возможным применять теорию к основной группе частиц ливня, именно к тем, которые имеют сравнительно малые энергии, а их большинство. Впоследствии авторы возвращались к этому вопросу для уточнения и сравнения с появляющимися экспериментами в 1945 г. [28].

В основной же интересовавшей его области в довоенные годы заслуживает быть отмеченной работа [29]. Дело в том, что когда были открыты (в космических лучах) мюоны и обнаружен их распад, то ошибочно считалось, что они распадаются на электрон и одно нейтрино, так что их спин считали равным единице. Еще не знали, что это вовсе не тот мезон, который Юкава предложил в качестве переносчика взаимодействия между нуклонами (пион, как известно, был открыт лишь в 1947 г.). Только постепенно осознавали кардинальное противоречие, которое возникает при попытке отождествления ядерного мезона Юкавы с наблюдаемым в космических лучах: ведь знали, что мезоны в космических лучах составляют так называемую проникающую компоненту, т.е. слабо взаимодействуют с ядрами атомов среды и потому не могут быть носителями ядерных сил. Поэтому исследование возможных свойств заряженных частиц со спином, равным единице, было предметом многих теоретических работ. Но обычно это было вычисление различных электромагнитных процессов с участием таких частиц (их рассеяние на кулоновском центре, электромагнитное тормозное излучение) по теории возмущений. Они приводили при больших энергиях к неограниченному росту сечений с энергией, несовместимому с теорией возмущений.

Тамму принадлежит очень интересный и существенный результат: он обнаружил, что точная полная система волновых функций такой частицы в поле кулоновского центра необходимо содержит состояния с особенностью в центре, т.е. описывают падение частицы на центр [29]. Выход из этого положения возможен, если приписать этой частице конечные размеры, как это предложил Ландау, рассматривая рассеяние частицы на кулоновском центре в борновском приближении теории возмущений, чтобы избежать бесконечного роста сечения с энергией. Ландау считал, что радиус мезона со-

<sup>7</sup> В настоящее время активно обсуждается влияние ядерной среды на кварк-глюонные струи (см. статью И.М. Дремина и А.В. Леонидова в этом выпуске).

спином единица должен быть  $r_\mu \sim e^2/m_\mu c^2$ , где  $m_\mu$  — его масса [30].

Конечно, это была грубая оценка. Ведь никто не знал, как ввести в локальную теорию релятивистскую частицу конечного размера. Тем не менее она, вместе с выводом Игоря Евгеньевича о падении на центр в точной теории, послужила для Ландау и Тамма основанием для гипотезы [31], что такой мезон падает на протон, пока не достигнет расстояния порядка  $r_\mu$ . А на таком расстоянии энергия *электромагнитного* взаимодействия мезона и протона имеет порядок сотни МэВ, т.е. порядок, нужный для ядерных сил. Согласно этой гипотезе нейтрон, например, состоит из протона и отрицательно заряженного мезона со спином единица.

Эта работа двух крупнейших теоретиков ярко показывает, в каком глубоком тумане пробивались физики к пониманию природы ядерных сил, какие далекие от истины гипотезы они иногда выдвигали. Было еще несколько довоенных публикаций Игоря Евгеньевича о проблеме ядерных сил, носивших скорее характер обзоров ситуации и обсуждения разных предлагавшихся идей, но все это не приводило к существенным продвижениям. Вплоть до открытия пионов положение оставалось туиковым.

\* \* \*

Таким образом, в период с середины 30-х годов и вплоть до войны деятельность Тамма была отмечена тремя существенными работами: во-первых, это "Нобелевская" работа по теории излучения Вавилова–Черенкова, которую при всем высоком профессионализме, понадобившемся при ее выполнении, как это ни парадоксально, вряд ли можно считать особенно выдающейся среди всех работ Игоря Евгеньевича, хотя, конечно, она была одной из лучших. Во-вторых, совместная с С.З. Беленьким работа по усовершенствованию теории электромагнитных ливней космических лучей. Наконец, в-третьих, принципиально существенная работа о заряженных частицах со спином единица в кулоновском поле. Много это или мало? Конечно, очевидно, что эти работы выполнены теоретиком высокого класса. И все же можно сказать, что от автора фона и теории бета-сил можно было бы ожидать и большего. В чем же дело? Нельзя объяснить это возрастным снижением творческой активности. В это время Игорю Евгеньевичу было 40–45 лет — асте, период расцвета по мнению древних. Да и последующая его деятельность служит достаточным опровержением такого предположения.

Однако на самом деле можно только удивляться тому, что Игорь Евгеньевич сделал все это. Ведь это были годы страшного сталинского террора. Друзья Игоря Евгеньевича, его коллеги уничтожались, ссылались в лагеря Гулага. Один за другим шли чудовищные лживые судебные процессы. На одном из них в качестве "свидетеля" появился любимый брат Игоря Евгеньевича, Леонид Евгеньевич, публично "признавшийся" во вредительской деятельности (он занимал высокую инженерную должность в Донбассе) по заданию Пятакова, своего начальства, одной из центральных фигур процесса. Его показания публиковались под крупным заголовком в центральных газетах. Можно только догадываться, какими пытками выколачивались такие "признания". Он, конечно, сразу был расстрелян. Как часто бывало,

это сопровождалось дополнительными ужасными несчастьями в семье осужденного. Самого Игоря Евгеньевича подвергали унижительным "проработкам" на публичных собраниях в университете и в ФИАНе, обвиняя в "утрате бдительности" по отношению к "врагам народа" (брат, друг с детских лет Б.М. Гессен — директор Института физики университета, расстрелянный в 1936 г., и т.д.). Все это сопровождалось намеками, грозящими тяжелыми последствиями. Если даже не произносилось вслух, то подразумевалось его меньшевистское прошлое и т.п. Ужасна была вся окружающая обстановка, которая страшно давила сама по себе, даже если не было персональных "проработок".

Удивительным может казаться то, что в этой атмосфере все же люди оставались личностями, даже неплохо работали. До сих пор трудно понять, как мозги, зажатые, перекрученные страхом и идеологическим прессом, могли в то же время независимо, творчески мыслить в своей профессиональной области. По-видимому, дело в том, что работа была спасением, родом внутренней эмиграции, давала возможность сохранить свою личность. Как иначе можно понять, например, то, что Л.Д. Ландау после года тюрьмы, проведенного в условиях принятых тогда жестоких методов следствия, фактически — пыток ("конвейерный допрос" и т.п.) в течение последующих полутора — двух лет смог опубликовать чуть ли не десяток работ, в том числе фундаментальную теорию жидкого гелия (за которую, собственно, и получил потом Нобелевскую премию)<sup>8</sup>.

В эти годы Игорь Евгеньевич был придавлен, загнан преследованиями, угрозами, гибелью близких людей, осознанием превращения режима, обещавшего социализм (мечта всей его жизни со времен юности), в деспотическую, безжалостную диктатуру. Но он был человеком сильной воли и внешне, в обычной обстановке в Институте не обнаруживал этого состояния перед другими. Догадываться о его переживаниях можно было только по тому, как часто суровая сосредоточенность заменяла обычную живость его лица, как новые морщины появлялись на его лице. Для такого творческого человека чистая атмосфера честной научной работы была тем глотком свежего воздуха, который еще позволял выжить "с петлей на шее". Впрочем, так оно и было для большинства людей, посвятивших свою жизнь науке.

\* \* \*

Война привела теоретиков, да и экспериментаторов-ядерщиков в состояние растерянности. На общее горе, на общий ужас накладывалось сознание ненужности своей работы. Когда на другой день после начала войны, в понедельник 23 июня Игорь Евгеньевич собрал немногочисленных тогда сотрудников Теоретического отдела ФИАНа, угнетенное состояние от этого сознания было откровенным. Пожалуй, один только М.А. Леонтович, который в последние годы занимался теорией распро-

<sup>8</sup> Невольно вспоминается, как во время нескольких лет своей ужасной, приведшей к смерти болезни, полупарализованный Игорь Евгеньевич тем не менее интенсивно продолжал научную работу. Когда кто-то выразил удивление по этому поводу в присутствии М.А. Леонтовича, тот сказал: "А чем же еще можно спастись в таком положении?"



Н.В. и И.Е. Тамм (дача, Жуковка, лето 1967 г.)

странения радиоволн, знал, что для него переход на оборонную тематику дело естественное (радиолокация!). Но господствующей тематикой в Отделе были принципиальные вопросы теории элементарных частиц, ядерных сил и т.п. Теперь это было никому не нужно. Поэтому начались лихорадочные поиски актуальной узкоприкладной тематики. Вспомним, что и в Ленинградском физико-техническом институте работы по физике ядра и частиц были сразу свернуты. И.В. Курчатов, под руководством которого уже шли первые исследования на запущенном им незадолго до того первом в Европе циклотроне Радиевого института, перешел на обеспечение безопасности военных кораблей от магнитных мин. К нему присоединился А.П. Александров и некоторые другие сотрудники ЛФТИ. В ФИАНе, который был эвакуирован в Казань, Д.И. Блохинцев перешел на решение проблемы снижения шумов самолетных моторов (вначале, пока еще не было радиолокаторов, противоздушная оборона основывалась на шумопеленгации), и это потребовало серьезного продвижения в акустике. Тем же некоторое время занимался (работавший тогда в ФИАНе) И.Я. Померанчук. Другие выбирали узко прикладные задачи. Например, М.А. Марков стал конструировать противотанковые снаряды с улучшенными аэродинамическими свойствами (это было, конечно, несколько наивно — конструкторы оборонных институтов здесь были лучшими профессионалами) и т.д. Но страстное желание чем-либо помочь фронту было глубоким и искренним. Только через 2–3 года ядерщики оказались остро необходимыми.

В такой обстановке возникла работа Тамма (совместная с В.Л. Гинзбургом) о слоистом сердечнике [32], нужная для радиотехники (ее использовал работавший в ФИАНе Н.Д. Папалекси) и о вариациях магнитного поля Земли, не очень-то нужная обороне. По просьбе И.В. Курчатова Игорь Евгеньевич рассчитывал сложные магнитные поля кораблей и т.п.

Тем не менее в Казани наравне с этим он все время продолжал интенсивно работать по проблемам теории частиц и ядерных сил. А так как и Гинзбург, наряду с работами практического значения (по распространению радиоволн в ионосфере), продолжал свою работу по теории частицы, способной находиться в состояниях с разными спинами, они начали сотрудничать. Результатом явилась работа [33], в которой было предложено

релятивистское уравнение для частицы с переменным спином. В нем были неудовлетворительные элементы, устраненные впоследствии, когда этот подход обобщили И.М. Гельфанд и А.М. Яглом, предложившие свое уравнение. Игорь Евгеньевич, не очень довольный результатами, задержал публикацию этой работы до 1947 г.

Но что же все-таки делал Тамм в течение четырех лет войны? Выше названы небольшие в масштабе этого выдающегося теоретика узкоприкладные работы. К ним можно еще добавить некоторое участие в работах лаборатории Г.С. Ландсберга, при помощи которой в Академии, в Казани был налажен выпуск "стилоскопов" — приборов для экспрессного спектрального анализа состава металлов (до разреза необходимых фронтов для быстрой сортировки металлов из разбитой техники, чтобы не пускать в общий переплав ценные сорта стали). Игорь Евгеньевич помогал при расчете оптических систем и т.п. Мы видели, что кроме всех этих "мелочей", за которые он брался с особой страстностью, была выполнена только одна, совместная с В.Л. Гинзбургом, работа по частицам с высшими спинами. Но что еще? Я могу только засвидетельствовать, что все время Игорь Евгеньевич напряженно работал, невзирая на обстановку. Стоит привести цитату из воспоминаний В.Я. Френкеля, тогда мальчика, родители которого были близкими друзьями Тамма. Он описывает "Один из вечеров в семействе Таммов" [34]: "Игорь Евгеньевич сидел на какой-то маленькой, детской скамеечке, Наталья Васильевна, его жена, занималась хозяйством, а ее отец, очень пожилой человек с окладистой бородой, чинил ботинки (тогда в семьях ученых в этом не было ничего необычного. — Е.Ф.)... Когда мы с матерью вошли, Игорь Евгеньевич вскочил, поздоровался, сказал несколько слов, а потом, извинившись, снова примостился на скамеечке, с тетрадкой на коленях. "А мы не помешаем тебе, если будем разговаривать?" — спросила мать. "Нет, нет, нет, пожалуйста, разговаривайте, не обращая на меня никакого внимания!" "Гора (так звали Игоря Евгеньевича жена и друзья детства. — Е.Ф.) умеет совершенно отключаться", — пояснила ей Наталья Васильевна". В других воспоминаниях говорится, что при этом в углу на полу лежала горка картофеля, — характерная деталь, типичная для тяжелой жизни в эвакуации даже виднейших ученых<sup>9</sup>. (Впрочем, уже в сентябре 1943 г. ФИАН вернулся в Москву, где было легче. По крайней мере, продовольственные "карточки" не были пустыми бумажками, по ним, действительно, выдавали продукты, хотя и в весьма умеренном количестве).

<sup>9</sup> В прекрасном романе "Жизнь и судьба" Василия Гроссмана, который сам всю войну был на фронте и, видимо, имел слабое представление о жизни в тылу, описывается некий титулованный физик, который со своим институтом был эвакуирован в Казань. В одной красочной сцене появляется его дочь, приносящая из специального магазина для выдающихся ученых два килограмма сливочного масла. Это, по крайней мере в отношении Казани, совершенно невероятная фантазия. Кроме семьи Таммов я знал близко еще одну семью члена-корреспондента и могу заверить, что никакого специального магазина для них не существовало. Все они жили так же голодно, как другие ученые, а такой роскоши, как масло, конечно, "в глаза не видели". Дополнительные блага для ученых (всех специальностей, включая гуманитариев), для писателей, композиторов и т.п. появились только в 1945 г.

Можно думать, что именно результатом всей этой работы явилась большая очень существенная статья, опубликованная сразу после войны (поступила в редакцию 27 августа 1945 г.) [35]. В ней Игорь Евгеньевич предложил приближенный метод для эффективного рассмотрения ядерных сил, осуществляемых через обмен пионами различных типов. Этот метод, называемый в мировой литературе "методом Тамма–Данкова" (поскольку через пять лет он был переоткрыт в США Данковым [36]), сам Игорь Евгеньевич называл методом обрезанных или усеченных уравнений. Он состоит в том, что в системе уравнений, получаемых при разложении в ряд по константе связи точного уравнения, принимаются во внимание только, например, два первых уравнения, а член во втором уравнении, связывающий его с последующими, отбрасывается. Зато остающаяся система двух уравнений приводится к одному интегродифференциальному уравнению для волновых функций и энергии состояния, которое решается точно, вне рамок теории возмущений (Игорь Евгеньевич не знал тогда и никто не вспомнил, что еще в 1934 г. В.А. Фок применял подобный подход в электродинамике). С его помощью Тамм исследовал устойчивость связанной системы протон–нейтрон для различных типов сил (т.е. различных типов пионов, переносящих взаимодействие).

Этот метод привлек внимание многих авторов. Так, Чини [37] предложил его ковариантную форму и обсуждал проблему перенормировки, а Дайсон посвятил три статьи его релятивистскому обобщению, результатом чего явился так называемый "новый метод ТД" [38]. Очевидно, что этот метод несовершенен, но он в определенной мере лучше теории возмущений. Его релятивистское обобщение, по существу, эквивалентно уравнению Бете–Солпитера, появившемуся позднее. Сам же Игорь Евгеньевич вернулся к нему много позже в двух работах, опубликованных в 1952 и 1955 гг. Они были выполнены совместно с молодыми (тогда) сотрудниками Теоретического отдела ФИАН В.П. Силиным и В.Я. Файнбергом. Первая из них переплетается с новой тематикой, о которой мы еще будем говорить, с введением нуклонных "изобар" — нестабильных частиц (здесь было впервые использовано релятивистское уравнение для частиц со спином  $3/2$ , какой считалось учитываемое в работе возбужденное состояние нуклона), а во второй — метод усеченных уравнений применялся к рассеянию пионов нуклонами.

\* \* \*

Дойдя до этого места, читатель невольно задается вопросом: почему, сформулировав метод в работе, опубликованной в 1945 г., Игорь Евгеньевич обратился к его использованию лишь через 7 лет? А что же было в промежутке? Было на самом деле многое.

Среди сколько-нибудь значительных советских теоретиков Тамм был одним из очень немногих, кто не был сразу привлечен к работе над атомным оружием. А между тем, несмотря на участие в нем многих замечательных физиков, здесь ощущался острый недостаток научных сил. К работе привлекали даже аспирантов, возвращаемых с фронта, сколько-нибудь близких специалистов, быстро осваивавших новую тематику. Но Игорь Евгеньевич оставался полностью в стороне. Причину определить нетрудно. Я думаю, что здесь сыграли

роль "анкетные данные": брат — "враг народа", показанный всей стране; близкие, друзья — тоже "враги"; сам — бывший меньшевик и т.д. Он был "плохим", не заслуживал доверия. Даже в 1946 г., когда проходили большие выборы новых академиков, его не выбрали. Благодаря усилиям тогдашнего президента Академии наук С.И. Вавилова, были избраны академиками прекрасные физики — Л.Д. Ландау, М.А. Леонтович, Г.С. Ландсберг и Д.В. Скобельцын, но не Игорь Евгеньевич, хотя он имел уже прочную, очень высокую международную репутацию, опубликовал почти все свои крупнейшие работы. Он был специалистом по теории атомного ядра, но с легкостью выполнял исследования в самых разных областях. В воспоминаниях о Тамме я уже писал, что он всегда брался за труднейшие, наиболее актуальные проблемы, и, естественно, неоднократно после напряженнейшей работы приходил к неудаче. После многих недель (или месяцев) страстной работы, разочарованный он приходил в Отдел и просил: "Подкиньте какую-нибудь задачку конкретного характера, чтобы опохмелиться после запоя!" Таково происхождение двух его, совместных с Л.М. Бреховских, статей [39, 40]. Подобные задачки он решал с легкостью первоклассного профессионала. Между тем в "атомной проблеме" количество задач такого рода, которые необходимо было решать, казалось неисчислимым. Но Игорь Евгеньевич оставался в стороне.

Современного читателя могут удивить слова о том, что поименованные выше академики были избраны "благодаря усилиям С.И. Вавилова". Теперь трудно поверить, что списки кандидатов проходили обязательный контроль в ЦК КПСС. Указывались "желательные" и "нежелательные". Отстаивать тех или иных, включая их в число "желательных" или "допустимых", должно было руководство Академии. После решения ЦК ни один член партии, даже некоторые беспартийные выборщики не осмеливались голосовать негодным для ЦК образом (хотя голосование было тайным). Что касается Тамма, то было известно, что в 1946 г. его имя вычеркнул "сам" член Политбюро А.А. Жданов. Ведь Жданов ведал идеологией, а Игорь Евгеньевич был заклеямен, как "буржуазный идеалист". Да, так было до смерти Сталина, а в несколько более мягкой форме прямое давление ЦК продолжалось и все время потом. В день выборов в каждом Отделении, за час до заседания собиралась "партийная фракция" (академики и члены-корреспонденты, состоявшие в партии) и в присутствии представителя Отдела науки ЦК им сообщалось, за кого по мнению ЦК следует, а за кого не следует голосовать. И это неизменно исполнялось и было решающим фактором. Но вернемся к работам И.Е. Тамма.

Время шло и в 1946 г. его понемногу стали привлекать к обсуждению некоторых — не главных — вопросов по "закрытой" тематике атомной проблемы. Так появилась, опубликованная лишь много лет спустя, работа о фронте ударной волны [41]. (При публикации указано, что работа была выполнена в 1947 г.), и статья [42] (в то время исследования по созданию ускорителей частиц до высоких энергий тоже относились к атомной тематике и были засекречены). Было указано, что она написана в 1947–1948 гг.

Когда же возникла новая проблема — создание термоядерного оружия, видимо, И.В. Курчатов, ведавший всей научной ядерной проблематикой в этой обла-

сти, сумел убедить "кого следует" в необходимости использовать талант Тамма (Жданов к этому времени умер). Из "Воспоминаний" А.Д. Сахарова теперь все знают, что Игорю Евгеньевичу было поручено организовать в Теоретическом отделе ФИАНа группу "поддержки" или "проверки" теоретических работ, которые по этому вопросу уже вела группа Я.Б. Зельдовича. В фиановскую группу вошли В.Л. Гинзбург, С.З. Беленький, только что кончивший аспирантуру А.Д. Сахаров и аспирант Е.С. Фрадкин, а вскоре затем закончившие МИФИ Ю.А. Романов и В.Я. Файнберг. Для всех них проблема была совершенно новой и незнакомой. Но может быть именно поэтому, свободные от образа мыслей, установившегося и в американской группе Э. Теллера, и в нашей группе Я.Б. Зельдовича, они получили результат, который оказался фантастически неожиданным: вместо "поддержки" Сахаров и Гинзбург уже через два месяца выдвинули две решающие совершенно новые идеи. Как широко известно, идея Сахарова состояла в том, что реагирующим дейтерием или, в другом варианте, дейтерием и тритием, нужно окружать запал — урановую или плутониевую бомбу ни одним слоем (при этом из-за медленности ядерной реакции  $d+d$  и даже в сто раз более быстрой реакции  $d+t$  реагирующее вещество не успевает полностью прореагировать и разлетается впустую), а чередуя слои из  $d+d$  или  $d+t$  со слоями природного урана. Такая "слойка" делает продуктивную реакцию возможной: дейтерий и тритий не разлетаются потому, что быстрые нейтроны вызывают деление в слоях урана, которые, благодаря разогреву и полной ионизации атомов, оказывают сдерживающее огромное давление. Идея же Гинзбурга касалась трудного вопроса о том, как ввести в систему радиоактивный распадающийся тритий. Он решил этот вопрос очень элегантно: нужно ввести  ${}^6\text{Li}$  (в виде твердого дейтерида лития  ${}^6\text{LiD}$ ), который под действием нейтронов дает нужный тритий и гелий, причем еще выделяется большая энергия.

Такая простота основных идей не избавляла от многочисленных физических (не говоря уже о технологических) проблем, требовавших напряженной, сложнейшей исследовательской работы. Этой работе и были отданы силы и время Игоря Евгеньевича (и всей его группы) еще в первый период, когда вся группа работала в Москве, но особенно после того, как Тамм, Сахаров и Романов в марте 1950 г. были откомандированы в ядерный исследовательский центр (которым руководил Ю.Б. Харитон), известный теперь как "Арзамас-16".

Здесь нет возможности дать полное представление о работах Игоря Евгеньевича по этой его "основной тематике" тех лет — по созданию бомбы. То, что можно рассказать, прекрасно описано в статье [43]. Мы узнаем из нее, что Игорь Евгеньевич играл выдающуюся роль, как лидер, "дирижер" большого коллектива, увлекавший других, вникавший во все и в то же время сам решавший множество непрерывно возникавших конкретных проблем. Поразительно широк спектр того, что он делал: от тонких и сложных физических проблем до, по существу, почти организаторских. В качестве примера можно вспомнить, что именно он с несколькими коллегами спешно, но тщательно изучал перед первым взрывом стекавшиеся к ним метеорологические данные, чтобы определить, куда пройдет после взрыва страшный радиоактивный след. На них лежала огромная

ответственность: на основании их анализа принималось решение о выборе момента испытания. Ведь если бы они ошиблись, губительный хвост огромного облака лег бы на территорию, на которой жили многие тысячи людей. Что же касается физических проблем, которые приходилось решать Игорю Евгеньевичу, то достаточно вспомнить одну из них, приведенную в [43].

С самого начала, несмотря на кажущуюся простоту двух основных идей Сахарова и Гинзбурга, стоял один важный вопрос: что происходит непосредственно после "срабатывания" этих идей в "слойке", в возникающей таким образом "особой точке"; как этот  $\delta$ -образный элемент переходит в дальнейший непрерывный процесс? Эта проблема была так сложна и туманна, что Игорю Евгеньевичу было разрешено проконсультироваться у физика и математика высочайшего уровня, не привлеченного формально к работе над проектом, у академика В.А. Фока. Однако и это не принесло пользы. Для решения потребовались не только знания профессионала высшей квалификации, но и исключительная интуиция для проникновения в суть процессов. И в конце концов Игорь Евгеньевич сумел все же справиться с этой проблемой и тем открыл путь к дальнейшей разработке проблемы. Группа И.Е. Тамма, как и параллельно работавшая там же группа Я.Б. Зельдовича, должны были постоянно преодолевать возникавшие вновь и вновь трудные теоретические вопросы.

Работая с таким огромным напряжением, Игорь Евгеньевич тем не менее находил время следить за литературой по принципиальным проблемам физики. Приезжая в Москву, он принимал участие в работе общего семинара Теоретического отдела и, более того, привлек молодых сотрудников Силина и Файнберга к совместной работе по дальнейшему развитию своего метода "усеченных уравнений" — "метода ТД". Результатом этого и явилась совместная работа [44], опубликованная еще до окончательного возвращения Игоря Евгеньевича в Москву, которое состоялось через несколько месяцев после успешного испытания первой водородной бомбы в августе 1953 г.

Но и этим не исчерпывается бурная научная деятельность уже 55-летнего Игоря Евгеньевича. Были еще две ее сферы.

Во-первых, это разработка идеи управляемого термоядерного синтеза с помощью так называемого магнитного термоядерного реактора, который теперь называют Токамаком. Идея его появилась в 1954 г. Ее принято называть идеей Сахарова и Тамма, а когда Сахаров в 70–80-х годах был в жестокой опале, то в литературе имя Сахарова вообще опускалось. Но Игорь Евгеньевич всегда подчеркивал, что сама идея принадлежит Сахарову. Я помню, как, когда при нем произносили слова: "работа Тамма и Сахарова", он вскакивал со своего места и выкрикивал: "Сахарова и Тамма, Сахарова и Тамма!", интонацией выделяя имя Сахарова. И.Н. Головин вспоминает, как на первом совещании высшего комитета под председательством Берии Сахаров, рассказав кратко о сути предложения, отметил, что основные расчеты сделал Тамм. "Тамм заволновался и, попросив слово, начал возбужденно объяснять, что основные идеи принадлежат Сахарову и основная заслуга — Сахарова. Берия нетерпеливо замахав рукой, перебил Тамма словами: "Сахарова никто не забудет" [45]. Но и Сахаров был прав: основные обширные



Л.А. Арцимович, Н. Бор, Д.А. Рожанский, И.Е. Тамм и А.П. Александров (ФИАН, 1961 г.) (фото Д.С. Переверзева)

расчеты, требовавшие и новых, частных, идей сделал Игорь Евгеньевич.

В 1958 г. работы по Токамаку были рассекречены. Появилось шеститомное собрание выполненных к тому времени исследований. Оно открывается статьей Игоря Евгеньевича [46], как частью I всей работы Сахарова и Тамма, затем часть II, написанная Сахаровым, и часть III — снова Тамма [47]. Эти подробные исследования прояснили основные исходные идеи, дали им количественное оформление. Они были выполнены в 1951 г.

Первая работа — "Свойства высокотемпературной плазмы, находящейся в магнитном поле". На основе кинетического уравнения здесь была рассмотрена роль диффузии и термодиффузии. Выяснено, что коэффициент диффузии в четыре раза превышает коэффициент термодиффузии, т.е. простая диффузия — главное. Это имело очень большое значение для последующих работ. Тамм рассмотрел свойства плазмы в таких условиях, причем начал с пренебрежения столкновениями. Это приближение широко использовалось впоследствии. Но Игорь Евгеньевич учел и столкновения. Существенным было в этой работе и открытие возможности возникновения температурного скачка на стенке камеры. Статья заканчивается "Ориентировочным расчетом малой модели". Следующая статья [47] — "Дрейф и теплопроводность плазмы в тороиде при наличии стабилизирующего тока" продвигает проект дальше по пути к реалистической установке.

Прошло около полувека и мы видим, что для реализации этой идеи нужно еще многое, но усилия физиков разных стран продвинули дело уже далеко. В настоящее время, как известно, разрабатывается проект

гигантского международного реактора (Россия, США, Япония). В этой связи мне хочется вспомнить один рассказ Игоря Евгеньевича о психологической настроенности физиков, вовлеченных в эту проблему. Все тогда находилось под гипнозом поразительного успеха научных предсказаний. Создавая урановую и плутониевую бомбы, они проработали гору сложнейших ядерных, газодинамических, химических, металлургических и других научных проблем, чисто конструкторских задач — и все сработало превосходно, в первых же испытаниях и в США, и у нас. Взались за термоядерную бомбу, — новая гора научных и технологических проблем, и снова все сложилось в "изделие", которое сработало сразу, как говорят производственники, "с первого предъявления". Была уверенность, что и управляемый термоядерный синтез будет осуществлен так же быстро и успешно. Первые попытки были предприняты Л.А. Арцимовичем, и — о, чудо! Создав сильноточный газовый разряд и осуществив так называемый пинч в шнуре разряда, экспериментаторы обнаружили нейтроны, идущие из шнура. Восторг был всеобщим. Исключением, однако, был сам Арцимович. Он заявил, что это "не те" нейтроны. Игорь Евгеньевич говорил мне, что две недели убеждал Арцимовича в том, что он достиг желаемого успеха. Казалось, все сходилось с теоретическими оценками. Но Арцимович стоял на своем. И, наконец, убедил и остальных в своей безрадостной правоте. Начался длящийся до сих пор период яростной работы над проблемой. Вспоминаю также, как известный индийский физик Х. Баба, приехавший в Советский Союз в середине 50-х годов, рассказывал, что он заключил пари: он утверждал, что проблема будет решена в ближайшие



20 лет и именно в нашей стране. Его преждевременная трагическая смерть помешала ему уплатить свой проигрыш.

Но я сказал, что в этот период, на переломе 40–50-х годов, кроме основного занятия водородной бомбой, у Игоря Евгеньевича было еще две важных сферы деятельности, а описал только одну. Вторая была совершенно иного характера. Она не имела никакого отношения к бомбе, а касалась фундаментальной физики частиц. Это была идея нуклонных резонансов — "нуклонных изобар", как тогда называли их сам Игорь Евгеньевич. Дело, кратко, в следующем.

Незадолго перед тем, изучая фоторождение пионов на нуклонах и рассеяние пионов нуклонами при энергиях до сотен МэВ, американские экспериментаторы (с участием Ферми) обнаружили, что наибольший вклад в эти процессы вносят состояния системы нуклон+пион, имеющие изотопический спин  $3/2$  и механический спин  $3/2$  или  $1/2$ . Этого было для Игоря Евгеньевича достаточно, чтобы выдвинуть смелую гипотезу о существовании нестабильной частицы — бариона с изотопическим и механическим спинами, равными  $3/2$ . Он назвал такую частицу "изобарой", распадающейся на нуклон и пион. В работе, совместной с Ю.А. Гольфандом и В.Я. Файнбергом [48] была построена релятивистская теория рассеяния пион-нуклон (с изобарой в качестве промежуточного состояния), а необходимые константы взаимодействия и высота уровня возбужденного состояния изобары подбирались так, чтобы получить правильное (наблюдаемое на опыте) угловое распределение пионов при различных энергиях. Этих данных было уже очень много.

Работа потребовала обширных численных вычислений, что при тогдашнем техническом оснащении (обычные старинные механические арифмометры, лишь в конце работы дополненные электрическими арифмометрами "Мерседес") требовало для подбора четырех неизвестных констант чудовищного труда. Однако этот труд был вознагражден тем, что все же удалось хорошо описать все многочисленные эксперименты, хотя и с одним неприятным результатом: высота изобарного уровня получалась лишь ненамного больше ширины уровня.

Это обстоятельство вызвало глубокий скепсис у многих московских теоретиков. Имеет ли смысл говорить о таком состоянии, как о частице (например, вставлять ее, как другие, стабильные частицы, в фейнмановские диаграммы)?

Но Игорь Евгеньевич хорошо прочувствовал расчеты и был воодушевлен результатом. Особенно широко работы с использованием изобар развернулись после окончательного его возвращения в Москву в конце 1953 г. Работа нескольких молодых сотрудников в Отделе шла по разным направлениям (фоторождение пионов и т.п.). Удавалось снова добиваться (с теми же константами) согласия с экспериментом. Теперь мы знаем, что Игорь Евгеньевич оказался прав. Резонансы (современное название таммовских изобар) с шириной уровня того же порядка, что высота над уровнем основного, стабильного, состояния, стали равноправными членами огромного семейства известных частиц. Тот уровень ( $3/2$ ,  $3/2$ ), который получил Тамм с сотрудниками, есть хорошо известный теперь резонанс  $\Delta(1236)$ . Он был впервые введен еще в работе Игоря Евгеньевича (совместной с В.П. Силиным и В.Я. Файнбергом) [44],

где, как уже говорилось, впервые же было практически использовано релятивистское уравнение для частицы со спином  $3/2$ .

\* \* \*

Обозревая первый послевоенный период научной деятельности И.Е. Тамма, 1945–1955 гг., мы не можем не поражаться смелости интуитивно предугадываемых идей и обширности разных областей физики, — и фундаментальной, и прикладной, которые он охватил и своими непосредственными исследованиями, и организуя совместную работу талантливого коллектива теоретиков.

Мы видим, что послевоенное десятилетие было для него необычайно продуктивным в научном отношении. Хотя значительное место в нем заняла прикладная физика, но это была физика огромного масштаба и по ее практическому значению, и по широте, разнообразию охватываемых физических проблем. То, что сделал в ней Игорь Евгеньевич, действительно было по плечу только физике очень высокого уровня.

Обращаясь к его работам по принципиальным, фундаментальным вопросам, мы прежде всего должны вспомнить о работе, о которой не упоминалось выше, хотя она была выполнена еще в 1944 г. и опубликована в 1945 г. Речь идет о совместной с Л.И. Мандельштамом (скончавшимся в 1944 г.) работе [49], посвященной соотношению неопределенностей для времени и энергии. Как отмечалось в этой статье, в отличие от соотношения неопределенностей для импульса и координаты, которое следует из шрёдингеровского формализма квантовой механики, оно обосновывалось обычно лишь мысленными экспериментами и тривиальным соотношением для времени и частоты. Этот недостаток и восполнен в [49]. Авторы показывают, что интервал времени  $\Delta t$ , за который в нестационарном состоянии физические характеристики (наблюдаемые) меняются на величину порядка самой величины, с одной стороны, и неопределенность энергии этого состояния  $\Delta E$ , с другой, связаны искомым соотношением неопределенности, и что такой результат возникает из коммутационного соотношения между оператором Гамильтона и оператором данной наблюдаемой. Кроме того было показано, что соотношения неопределенностей, обычно рассматриваемые для чистого состояния, сохраняют свое значение и для смешанного состояния. Соотношение  $\Delta E \Delta t \sim \hbar$  становится формальным следствием квантовой механики.

В фундаментальной физике Игорь Евгеньевич в этот период, как мы видели, сделал еще две существенные вещи. Во-первых, это создание приближенного метода усеченных уравнений (метод Тамма–Данкова) и его применение к взаимодействию нуклонов (подробнее об этом методе см. [50]). Во-вторых, смелая идея нуклонных "изобар", т.е. "резонансов", — возбужденных состояний нуклона, распадающихся с испусканием пиона. Игорю Евгеньевичу пришлось отстаивать эту идею серией работ (совместных с молодыми сотрудниками), спорить с такой же страстностью и со столь же высокими авторитетами, как в молодости, когда никто не поверил ему, что у нейтрона есть магнитный момент. К сожалению, теперь уже никто не вспоминает, что именно он ввел в физику резонансы и показал плодотворность этой идеи при объяснении конкретных процессов.



Но этот период характерен также и тем, что на Игоря Евгеньевича впервые обрушились почести и награды, премии и звания. Его, наконец, избрали академиком. Смерть Сталина сняла со страны значительную часть ужаса, в котором все жили. Игорь Евгеньевич стал *persona grata*. Но он оставался прежним глубоко демократичным человеком. Деньги из получаемых премий он широко раздавал нуждающимся молодым ученым, сам разыскивал их. Стал ездить за границу по разным поводам, — для переговоров о сотрудничестве с Академией наук — в ГДР, в Швецию — для получения Нобелевской премии, в США и Англию — на Пагуошские конференции (4 раза), в Швейцарию — на Международную конференцию по мирному использованию атомной энергии, и снова туда же на конференцию по физике высоких энергий и на совещание экспертов по ядерному разоружению. В Индию, Францию, Японию, Китай...

Впервые его страсть к путешествиям, узнаванию новых стран и новых людей получила удовлетворение. Его избрали в несколько иностранных академий, включая такую престижную, как Национальная академия США. Это был счастливый период еще и потому, что страна становилась чуть-чуть счастливее. Но зато практически прекратилась на некоторое время чисто научная работа, у себя дома, за своим столом. Конечно, страсть к науке им владела по-прежнему. И.М. Франк в своих воспоминаниях [51] рассказывает, как даже в Стокгольме, среди торжеств, сопровождавших вручение Нобелевской премии, узнав со слов о каком-то новом интересном эксперименте, Игорь Евгеньевич по ночам сидел за работой, чтобы понять его теоретическую суть (он не сумел этого достичь — к счастью, потому что переданный ему слух оказался ложным). Но ему все же было плохо из-за оторванности от реальной научной работы. Главное — не было новых идей (а при его характере ему были необходимы крупные идеи, а не рядовые работки, которые он мог бы и теперь делать). Он писал статьи памяти друзей. Используя возникший авторитет, боролся с лженаукой, особенно с лысенковщиной. Его захватили новые открытия в молекулярной генетике. Он изучил эти работы и пытался сам кое-что сделать — разгадать генетический код, но его опередил Гамов. И, наконец, в 1964 г. такая идея, которая ему была нужна, казалось, пришла и подчинила его себе.

Прежде чем говорить о ней, нужно вспомнить, что это был за период в теоретической физике. Невозможность выйти за пределы теории возмущений в физике сильных взаимодействий, с одной стороны; важное наблюдение Е.С. Фрадкина, а также Л.Д. Ландау и И.Я. Померанчука (1955 г.) о стремлении заряда частицы к нулю ("московский нуль"), с другой, подорвали веру в квантовую теорию поля. На Киевской международной конференции по физике высоких энергий в 1959 г. Ландау сказал (это повторено в его статье в сборнике в честь В. Паули [52]: "Гамильтониан есть труп и его следует похоронить со всеми заслуженными им почестями"). Необходимость построения совершенно новой теории, не основанной на ортодоксальной квантовой теории поля, многим казалась необходимой. Примерно начиная с 1955 г. в течение 15 лет лучшие теоретики безуспешно искали замену теории поля. Лишь немногие считали доводы против традиционного подхода несолидными, а доказательство "московского нуля" — недостаточно строгим для таких

кардинальных выводов. Игорь Евгеньевич, вероятно, потому, что столь же кардинальные переходы уже происходили при его жизни, тоже придерживался "революционной" точки зрения. В 1965 г., выступая на конференции в Японии в честь 30-летия работы Юкавы, предсказавшего пион, говорил [53]: "В настоящее время стало ясным, что развитие физики подвело нас к такой точке, когда стало необходимым изменение некоторых из наших фундаментальных физических представлений и что изменение должно быть столь же коренным, как то, которое связано с созданием теории относительности и квантовой механики".

В это время возникло множество "сумасшедших" теорий, начиная с работы Гейзенберга (1957), основывающейся на нелинейном уравнении Дирака, из которого он неплохо получил значения "зарядов" — электрического, сильных взаимодействий и гравитационных взаимодействий. Но Бор не зря назвал эту теорию "недостаточно сумасшедшей". От нее пришлось отказаться. Конкурировали также метод аксиоматической *S*-матрицы, нелокальные теории и т.п., но цель оставалась недостижимой.

Игорь Евгеньевич остановил свое внимание на том, что при высоких энергиях измерение координат частицы с помощью пробных частиц сталкивается с трудностью, делающей координату частицы неизмеримой: в процессе измерения рождается много новых частиц, в том числе нестабильных, распадающихся вдалеке от точки взаимодействия. Поэтому на измерение координаты накладывается предел. Отсюда он заключает, что должно существовать соотношение неопределенности между компонентами координат. Однако импульсы частиц могут быть измерены, например по отклонению в магнитном поле. Поэтому для компонент импульса соотношения направленности нет. Соответственно, следуя работе Снайдера (1947 г.), он строит теорию в импульсном пространстве. Однако Снайдера постигла неудача из-за того, что возникали специфические расходимости (при интегрировании по углам). Игорь Евгеньевич изменил его теорию, введя импульсное пространство переменной кривизны, что устранило эти расходимости, но зато теория получилась невероятно трудной для исследования. Только высокий профессионализм, превосходное владение нужной математикой сделало для Игоря Евгеньевича (и для присоединившегося к нему его молодого сотрудника В.Б. Вологодского) возможным хоть какое-нибудь продвижение. Трудности были не только математические, но и принципиального характера. Тамм работал "запоем", с таким же напряжением, как и в молодые годы. Через два года на него обрушилась страшная, неизлечимая болезнь. Вскоре он слег, наступил паралич нерва, управляющего диафрагмой, и, чтобы спасти его жизнь, его подключили к респираторной машине, которая непрерывно, днем и ночью, ритмически вдвухала ему воздух в легкие. Но и это не сломило его. Еще более двух лет он продолжал напряженно работать. Вставал с постели, садился за стол, где стояла другая, портативная машина, и продолжал неимоверно сложные вычисления в различных придумываемых им вариантах теории (я сам видел нумерацию страниц этих вычислений: в конце концов она перевалила через три тысячи!). Этот огромный труд, бесконечная изобретательность при преодолении все заново возникавших трудностей, длились более 6 лет.

Игорь Евгеньевич сам проклинал свое упрямство, он уже чувствовал, что принципиальные трудности непреодолимы, но не мог окончательно "зарезать" свою идею, и вычисления продолжались. Конечно, в период его болезни это было психологически целебно, давало основу для существования, но работа так и осталась незавершенной. Похоже, что путь был тупиковый. То, что было все же получено, было опубликовано уже после его смерти [54].

Но говоря об этом периоде, нельзя не вспомнить одну написанную им в это время статью. В 1967 г. Академия наук СССР наградила Игоря Евгеньевича золотой медалью им. М.В. Ломоносова. Это — высшая научная награда, присуждаемая Академией наук. По уставу награжденный ею должен при вручении ему этой медали на общем собрании Академии выступить с речью о своих работах, с обзором положения в этой области физики и о своих воззрениях на перспективы будущих исследований. Торжественный акт и доклад должны были состояться в марте 1968 г., когда Игорь Евгеньевич, тяжело больной, лежал прикованным к дыхательной машине. Многие считали невозможным такой доклад и в лучшем случае ожидали, что его подготовят для него сотрудники. Однако Игорь Евгеньевич решил написать его, и сделал это, конечно, сам. На общем собрании доклад был зачитан А.Д. Сахаровым. Всем слушавшим его стало ясно, что автором является Игорь Евгеньевич. Широка взгляда, определенность точек зрения, оптимизм, пронизывающий весь текст, были удивительно характерны для него. Он закончил доклад словами: "Я надеюсь, что мы с вами доживем до нового этапа теории, в чем бы он ни заключался".

Не дожил. 12 апреля 1971 г. Игорь Евгеньевич скончался.

## Список литературы

- Mandelstamm L I, Tamm I E "Elektrodynamik der anisotropen Medien un der speziellen Relativitätstheorie" *Math. Ann.* **95** 154 (1925)
- Tamm I E "Электродинамика анизотропной среды в специальной теории относительности" *ЖРФХО* **56** (2–3) 248 (1924)
- Tamm I E "Кристаллооптика теории относительности в связи с геометрией биквадратичной формы" *ЖРФХО* **57** (3–4) 1 (1925)
- Jauch J M, Watson K M *Phys. Rev.* **74** 950 (1948)
- Jauch J M, Watson K M *Phys. Rev.* **74** 1485 (1948)
- Jauch J M, Watson K M *Phys. Rev.* **75** 1249 (1949)
- Бологовский Б М, Столяров С Н Современное состояние электродинамики движущихся сред (безграничные среды), в кн. *Эйнштейновский сборник 1974* (М.: Наука, 1976)
- Рязанов М И *ЖЭТФ* **32** 1244 (1957) [см. также в кн. *Некоторые вопросы теоретической физики* (М.: Атомиздат, 1958) с. 75]
- Tamm I "Über die Quantentheorie der molekularen Lichtzerstreuung in festen Körpern" *Z. Phys.* **60** 345 (1930)
- Tamm I "Über die Wechselwirkung der freien Elektronen mit der strahlung nach der Diracschen Theorie des Elektrons und nach der Quantenelektrodynamik" *Z. Phys.* **62** 545 (1930)
- Tamm I "Zur Quantentheorie des Paramagnetismus" *Z. Phys.* **32** 582 (1925)
- Tamm I "Versuch einer quantitativen Fassung des Korrespondenzprinzips und die Berechnung der Intensitäten der Spektallinien I" *Z. Phys.* **34** 59 (1925)
- Tamm I "Zur Elektrodynamik des rotierenden Electrons" *Z. Phys.* **55** 199 (1929)
- Tamm I "On the formulation of the exclusion principle in Dirac's theory of the positron" *Phys. Z. Sowjetunion* **6** 189 (1934)
- Tamm I "Die verallgemeinerten Kugelfunktionen und Wellenfunktionen eines Elektrons im Felde eines Magnetpoles" *Z. Phys.* **71** 141 (1931)
- Schubin S P, Tamm I E "Zur Theorie der Photoeffekts an Metallen" *Z. Phys.* **68** 97 (1931)
- Blochinzev D, Tamm I "Über die Austrittsarbeit der Elektronen aus Metallen" *Z. Phys.* **77** 774 (1932)
- Tamm I "Über eine mögliche Art der Elektronenbindung an Kristalloberflächen" *Phys. Z. Sowjetunion* **1** 753 (1932)
- Дэвисон С, Левин Дж *Поверхностные (таммовские) состояния* (М.: Мир, 1973)
- Tamm I E "О работе философов-марксистов в области физики". *Под знаменем марксизма* **2** 220 (1933)
- Tamm I "Exchange forces between neutrons and protons and Fermi's theory" *Nature* **133** 981 (1934)
- Ivanenko D *Nature* **133** 981 (1934)
- Konopinski E, Uhlenbeck G *Phys. Rev.* **48** 7 (1935)
- Tamm I E *Phys. Z. Sowjetunion* **10** 567 (1936)
- Tamm I E, Франк И М "Когерентное излучение быстрого электрона в среде" *ДАН СССР* **14** 107 (1937)
- Tamm I "Radiation emitted by uniformly moving electrons" *J. Phys. (USSR)* **1** 439 (1939)
- Tamm I, Belenky S "On the soft component of cosmic rays at sea level" *J. Phys. (USSR)* **1** 177 (1939)
- Tamm I, Belenky S "The energy spectrum of cascade electrons" *Phys. Rev.* **70** 660 (1946)
- Tamm I E "Движение мезонов в электромагнитных полях" *ДАН СССР* **29** 551 (1940); Tamm I E "Motion of mesons in electromagnetic fields" *C.R. Acad. Sci. URSS (Doklady)* **29** 551 (1940)
- Landau L J. *Phys. (USSR)* **2** 485 (1940)
- Landau L, Tamm I *C.R. Acad. Sci. URSS (Doklady)* **29** 555 (1940)
- Tamm I E, Гинзбург В Л "Теория электромагнитных процессов в слоестом сердечнике" *Изв. АН СССР, серия физ.* **7** 30 (1943)
- Гинзбург В Л, Тамм И Е "К теории спина" *ЖЭТФ* **17** 227 (1947)
- Френкель В Я Встречи, в кн. *Воспоминания об И.Е. Тамме* (М.: Наука, 1981) (1-е изд., 1986 (2-е изд.))
- Tamm I "Relativistic interaction of elementary particles" *J. Phys. (USSR)* **9** 449 (1945)
- Dancoff S M *Phys. Rev.* **78** 382 (1950)
- Cini M *Nuovo Cimento* **10** 526 624 (1953)
- Dyson F *Phys. Rev.* **90** 994; **91** 421 1543 (1953)
- Бреховских Л М, Тамм И Е "Удар по пластинке и излучение ею звука", в кн. *Рефераты научно-исследовательских работ за 1943–1944 годы. Отделение физ.-мат. наук [АН СССР]* (М.-Л.: Изд-во АН СССР, 1945) с. 46
- Бреховских Л М, Тамм И Е "О вынужденных колебаниях бесконечной пластинки, соприкасающейся с водой" *ЖТФ* **16** 879 (1946)
- Tamm I E "О ширине ударных волн большой интенсивности" *Тр. Физич. ин-та им. П.Н. Лебедева АН СССР* **29** 239 (1965)
- Tamm I E "Об электродинамическом взаимодействии электронов в ускорителях" Там же, **18** 3 (1962)
- Харитон Ю Б, Адамский В Б, Романов Ю А, Смирнов Ю Н И.Е. Тамм глазами физиков *Арзамас-16* (в печати); *Воспоминания об И.Е. Тамме*, изд. 3-е (М.: ИздАТ, 1995); *Природа* № 7 (1995)
- Tamm I E, Силин В П, Файнберг В Я "К релятивистской теории взаимодействия нуклонов" *ЖЭТФ* **24** 3 (1953)
- Из записок И.Н. Головина Природа* № 8 29 (1990)
- Tamm I E "Теория магнитного термоядерного реактора, I", в кн. *Физика плазмы и проблема управляемых термоядерных реакторов* Т. 1. (М.: Изд-во АН СССР, 1958) с. 3.
- Tamm I E "Теория магнитного термоядерного реактора, III" Там же, с. 31
- Tamm I E, Гольфанд Ю А, Файнберг В Я "Полуфеноменологическая теория взаимодействия  $\pi$ -мезонов с нуклонами" *ЖЭТФ* **26** 649 (1954)
- Мандельштам Л И, Тамм И Е "Соотношение неопределенности энергия–время в нерелятивистской квантовой механике" *Изв. АН СССР, серия физ.* **9** 122 (1945); *J. Phys. (USSR)* **9** 249 (1945)
- Силин В П, Файнберг В Я *УФН* **56** 569 (1955); Файнберг В Я *Природа* № 7 (1955)
- Франк И М Отрывки воспоминаний разных лет, в кн. *Воспоминания об И.Е. Тамме* 2-е изд. (М.: Наука, 1986) с. 249
- Ландау Л Д О фундаментальных проблемах, в кн. *Л.Д. Ландау. Собрание трудов* Т. 2. (М.: Наука, 1969) с. 423
- Tamm I E "О кривом импульсном пространстве", в кн. *И.Е. Тамм. Собрание научных трудов* Т. 2 (М.: Наука, 1975); см. также *Proc. Int. Conf. on Elementary particle* (Kyoto, 1965) p. 314
- Tamm I E, Вологодский В Б "Об использовании кривого импульсного пространства при построении нелокальной квантовой теории поля" *Тр. Физич. ин-та им. П.Н. Лебедева АН СССР* **57** 5 (1972)