

# **Работы И.М. Франка по излучению движущихся источников в преломляющих средах ("оптика движущихся источников")**

**Б.М. Болотовский**

Заряженная частица, проходящая через преломляющую среду, т.е. через среду, свойства которой определяются заданием электрической и магнитной проницаемостей, становится источником излучения электромагнитных волн. В настоящее время излучение движущихся источников в различного рода преломляющих средах выделилось в довольно обширную область физики. В этой области уже накоплен большой экспериментальный и теоретический материал, результаты исследований находят важные применения в физике.

Это направление возникло в 1930-е годы, когда был открыт и получен объяснение эффект Вавилова – Черенкова. При этом возникновение и развитие электродинамики движущихся источников (или оптики движущихся источников) тесно связаны с именем И.М. Франка. Ему принадлежат важные вклады в этот раздел физики, определяющие уровень достижений и сегодняшнее состояние всей проблемы. Кстати, термин "оптика движущихся источников" принадлежит И.М. Франку и означает то же самое, что и "электродинамика движущихся источников".

И.М. Франк учился на физическом факультете Московского государственного университета. Когда пришло время выбирать специальность, он выбрал оптику. Руководителем его дипломной работы был профессор Сергей Иванович Вавилов, будущий создатель Физического института им. П.Н. Лебедева и будущий Президент Академии наук СССР. С.И. Вавилов внёс большой вклад в развитие ряда разделов оптики, в частности в учение о люминесценции. В студенческие годы И.М. Франка оптика на физическом факультете МГУ была также представлена такими всемирно известными физиками, как Г.С. Ландсберг и Л.И. Мандельштам. Это были и выдающиеся учёные, и замечательные преподаватели.

Курс электромагнитной теории читал Игорь Евгеньевич Тамм. Он в то время писал курс "Основы теории электричества", по которому впоследствии учились многие поколения физиков. И.М. Франк слушал лекции Г.С. Ландсберга по оптике, ходил на знаменитые семинары Л.И. Мандельштама, не пропускал и лекции И.Е. Тамма по электродинамике. И.М. Франк, уже определивший свои будущие интересы в физике, изучал науку об электричестве как оптик. Оптика во многих отношениях есть электродинамика волновых процессов. Соответствующие электродинамические закономерности И.М. Франк воспринимал как оптические.

Много лет спустя, в декабре 1958 г., И.М. Франку вручили в Стокгольме Нобелевскую премию за теорию излучения Вавилова – Черенкова. Эта теория была создана одиннадцатью годами ранее в совместной работе И.М. Франка и И.Е. Тамма. Премия была присуждена трём физикам: П.А. Черенкову, И.Е. Тамму и И.М. Франку. С.И. Вавилова к тому времени не было в живых. Каждый из награжденных должен был прочитать Нобелевскую лекцию. И.М. Франк озаглавил свою лекцию "Оптика источников света, движущихся в преломляющих средах". Ещё позднее, в 1969 г., И.М. Франк издал в Дубне в издательском отделе Объединённого института ядерных исследований (ОИЯИ) препринт под названием "Оптика и ядерная физика", в котором говорилось о том общем, что имеют волновые процессы в оптике (в электродинамике) и в квантовой механике. Ещё позднее, в 1974 г., И.М. Франк опубликовал эту статью с некоторыми изменениями в сборнике *Современные проблемы оптики и ядерной физики* (Киев: Наукова думка, 1974). Для оптики волновой аспект квантовой механики — дело вполне привычное.

Не следует думать, что И.М. Франк был оптиком в узком понимании этого слова. Скорее, он видел связь между различными ветвями физической науки.

После окончания Московского университета И.М. Франк несколько лет работал в Ленинграде в Государственном оптическом институте (ГОИ). По

рекомендации С.И. Вавилова И.М. Франк был взят в лабораторию А.Н. Теренина, под руководством которого занимался исследованием фотохимических реакций. Директором института был выдающийся физик Д.С. Рождественский, известный своими замечательными исследованиями по оптической спектроскопии. И.М. Франк познакомился с этим институтом ещё в студенческие годы. Много позднее он вспоминал: "Когда я впервые попал в Ленинград в 1929 году на студенческую практику, мне довелось познакомиться с прекрасным научным институтом, в котором авторитет Д.С. Рождественского был очень высок и где велись исследования в спокойной творческой атмосфере, которой мог бы позавидовать любой из наших институтов".

С.И. Вавилов в эти годы работал в Ленинграде. Он был заместителем Д.С. Рождественского в ГОИ, а также возглавлял физическое отделение Физико-математического института имени В.А. Стеклова АН СССР.

В апреле 1934 г. Общее собрание Академии наук приняло Постановление о разделении института имени В.А. Стеклова на два института: Институт физики и Институт математики. Тогда же было принято решение о переводе этих двух институтов — физического и математического — в Москву. Директором Физического института стал С.И. Вавилов.

И.М. Франк с первого дня существования Физического института Академии наук СССР (ФИАН) стал его сотрудником и вместе с институтом переехал в Москву. Он вошёл в состав группы, которая занималась физикой атомного ядра и космических лучей.

В молодом институте царила замечательная атмосфера сотрудничества и научного поиска. Впоследствии, много лет спустя, И.М. Франк вспоминал:

"В молодости мне посчастливилось в том отношении, что уже в студенческие годы я попал в среду, в которой научное влияние воспринималось особенно интенсивно и разносторонне. Я имею в виду научную школу Л.И. Мандельштама, к которой принадлежали мои непосредственные учителя и выдающиеся физики С.И. Вавилов, Г.С. Ландсберг и И.Е. Тамм — учёные, столь различные по своей индивидуальности. Была, однако, особенность, характерная для всей этой школы — это непрерывное научное общение. Вопросы теории и результаты экспериментов неизменно и постоянно обсуждались, и эти разговоры (они происходили и вне научных семинаров), частые и длительные, никто не считал потерей времени. Первое время мне казалось удивительным, что столь выдающиеся люди часы своего драгоценного времени, в которое могли бы сделать нечто замечательное, тратят на разговоры, в которых немалое внимание уделяется тому, что не получилось или оказалось ерундой. В то время я не понимал и того, что в этих беседах часто излагались новые идеи, задолго до их опубликования, и, разумеется, без опасения, что их опубликует кто-то другой. Притом никто не жалел усилий, чтобы помочь формированию нового в понимании, совершенно не думая о соавторстве. В той моральной атмосфере, которая была свойственна школе Л.И. Мандельштама, это было более чем естественно" (И.М. Франк, в кн. *Воспоминания о И.Е. Тамме* 3-е изд., доп. (М.: ИЗДАТ, 1995) с. 347).

Ещё до переезда в Москву в Физическом институте было открыто новое явление, которое впоследствии получило название "эффект Вавилова – Черенкова" (или

свечение Вавилова – Черенкова). С.И. Вавилов поручил своему аспиранту П.А. Черенкову исследовать люминесценцию некоторых растворов под действием жёстких гамма-квантов, излучаемых радиоактивными препаратами. В процессе измерений Павел Алексеевич Черенков обнаружил, что под действием жёсткого гамма-излучения светятся не только растворы, но и чистые растворители. Оба вида свечения — растворов и чистых растворителей — были весьма слабыми, определить их раздельно было почти невозможно, чувствительность эксперимента оказывалась на пределе. Поэтому первоначально П.А. Черенков рассматривал обнаруженное им свечение чистых растворителей как неудачу. Но С.И. Вавилов заинтересовался необычным свечением. Был проведён стандартный набор измерений, разработанный в лаборатории С.И. Вавилова для исследования люминесценции. По результатам этих измерений С.И. Вавилов сделал вывод о том, что обнаруженное свечение чистых жидкостей под действием гамма-излучения не является люминесценцией. Относительно природы этого свечения С.И. Вавилов предположил, что гамма-лучи, проходя через жидкость, выбивают из атомов электроны. Выбитые электроны, двигаясь в жидкости, и являются источником наблюдаемого излучения. С.И. Вавилов также высказал предположение о том, что наблюдаемое свечение вызвано торможением электронов, проходящих через жидкость, т.е. представляет собой тормозное излучение электронов — явление к тому времени известное.

Предположение С.И. Вавилова о том, что наблюдаемое свечение представляет собой тормозное излучение, в дальнейшем не оправдалось. Но его утверждение относительно того, что источником свечения являются выбитые из атомов электроны, оказалось совершенно правильным.

После переезда ФИАНа в Москву исследования, связанные с новым видом свечения, продолжались.

Состояние дел в исследовании нового вида свечения постоянно обсуждалось на семинаре Сергея Ивановича Вавилова, а также и при встречах вне семинара. Здесь надо сказать, что не все физики, знавшие об этих исследованиях, относились к ним серьёзно. Были и такие, которые сомневались в чистоте эксперимента, с недоверием относились к результатам, полученным при измерениях на пороге зрения. Но все ближайшие коллеги Сергея Ивановича не сомневались в том, что обнаружено новое свечение, и внимательно следили за ходом исследования. В частности, Игорь Евгеньевич Тамм несколько раз обсуждал с Ильёй Михайловичем Франком возможные причины нового свечения.

На одном из заседаний семинара, которым руководил С.И. Вавилов, было предложено поместить стаканчик со светящейся жидкостью в магнитное поле. Электроны, выбитые из атомов жидкости, должны были изменить направление своего движения под действием магнитного поля. Поскольку предполагалось, что именно электроны являются источником свечения, то должны были измениться и свойства наблюдаемого света.

Опыты с магнитным полем были проведены, и они обнаружили новое свойство исследуемого излучения — оно оказалось направленным. Электроны излучали вперёд по направлению своего движения.

Когда Илья Михайлович Франк рассказал об этом Тамму, Игорь Евгеньевич высказал важное замечание.

Он сказал, что если излучение направленное, то оно излучается с достаточно большого пути, сравнимого с длиной излучаемой волны. Это замечание было основано на законах волновой оптики. Согласно этим законам, если имеется излучатель размером  $L$ , излучающий волны длиной  $\lambda$ , то эти излучённые волны распространяются вблизи от некоторого выделенного направления, так что угловой разброс  $\Delta\theta$  в направлениях распространения равен по порядку величины отношению длины волны  $\lambda$  к размерам излучающей системы  $L$ :

$$\Delta\theta \approx \frac{\lambda}{L}.$$

Если размер системы  $L$  много больше, чем длина  $\lambda$  излучаемой волны, то разброс углов  $\Delta\theta$  мал и излучение, как говорят, остро направлено.

Илья Михайлович Франк со всем вниманием отнёсся к этому важному замечанию. К тому времени предположение С.И. Вавилова о том, что источником наблюдаемого свечения являются электроны, выбитые из атомов гамма-лучами радия ("комpton-электроны"), стало уже твёрдо установленным фактом. Электроны двигались в исследуемой жидкости примерно в том же самом направлении, что и выбившие их гамма-лучи. Если предположить, что электроны излучали на всём своём пути в жидкости, то длина этого пути и составила размер излучателя. И.М. Франк решил рассмотреть, как складываются электромагнитные волны, излучённые движущимся электроном из каждой точки пути. Для этого он воспользовался тем же, по существу, приёмом, который применил великий голландский физик Христиан Гюйгенс в *Трактате о свете* (1690 г.) при рассмотрении явлений отражения и преломления света. Согласно Гюйгенсу каждая точка, расположенная на фронте волны, является источником излучения вторичной волны и огибающая всех этих вторичных волн образует новый фронт, который и определяет свойства волны, и в частности направление её распространения. В согласии с замечанием И.Е. Тамма И.М. Франк предположил, что из каждой точки пути при движении электрона в среде излучается сферическая волна и совокупность этих волн образует результирующее поле. Такой простой подход позволил разобраться в качественной стороне явления и объяснить некоторые свойства излучения Вавилова – Черенкова, в частности направленность излучения. Оказалось, что если скорость заряженной частицы в среде меньше, чем фазовая скорость света в той же среде, то волны, излучённые из разных точек траектории, не имеют общей огибающей. Если же скорость частицы превосходит фазовую скорость света, то волны, излучённые на всём пути, имеют общую огибающую, т.е. существует излучаемая волна, фронт которой и представляет собой огибающая. Эта огибающая составляет определённый угол с линией движения частицы, который и задаёт направленность излучения. Излучаемая волна распространялась под углом  $\theta$  к направлению скорости электрона, причём угол  $\theta$  определялся из соотношения

$$\cos \theta = \frac{1}{n\beta},$$

где  $\beta = v/c$  — отношение скорости заряда к скорости света,  $n$  — показатель преломления среды, в которой движется электрон. Простые оценки, сделанные И.М. Франком, показали, что такая картина даёт значе-

ние угла излучения в согласии с наблюдениями. Но в картине, полученной И.М. Франком, было много такого, что на первый взгляд казалось очень странным. Было хорошо известно, что равномерно движущийся заряд не излучает электромагнитных волн. В противоположность этому известному факту И.М. Франк исходил из предположения, что заряд излучает в каждой точке своего пути. Из замечания, высказанного И.Е. Таммом, следовало, что и он так считал. Было также на первый взгляд непонятно, как может скорость заряженной частицы превышать скорость света. Согласно теории относительности никакое материальное тело не может иметь скорость, превышающую скорость света.

О полученных результатах Илья Михайлович рассказывал по очереди нескольким физикам, в том числе М.А. Маркову и М.А. Леонтовичу. Они выслушали рассказ Франка, но не проявили к нему большого интереса. Впоследствии Михаил Александрович Леонтович, когда заходила речь о каком-либо высказывании И.М. Франка, говорил: "Илья — серьёзный мужчина, его надо слушать внимательно. Я в своё время не послушал и упустил Нобелевскую премию".

Со своими результатами (и со своими сомнениями) И.М. Франк обратился к Игорю Евгеньевичу Тамму. Игорю Евгеньевичу всё это было близко, потому что беседы с С.И. Вавиловым и И.М. Франком заставляли его задумываться над природой нового свечения. Он с неподдельным горячим интересом выслушал И.М. Франка и решил провести расчёт явления с применением строгой теории — электродинамики Максвелла–Лоренца. Спустя некоторое время И.Е. Тамм позвонил И.М. Франку и попросил его немедленно приехать к нему домой. И.М. Франк писал в воспоминаниях: "Я застал И.Е. Тамма за столом, увлечённого работой и уже исписавшего много листов бумаги формулами. Он сразу же стал рассказывать мне о сделанном им до моего прихода. Сейчас я уже не могу вспомнить в точности, что было предметом совместного обсуждения в ту ночь. Думаю, что обсуждались и ход решения задачи, предложенный И.Е. Таммом, и правильность выкладок, и физические основы теории, в которых многое было ещё неясно. Помню только, что просидели мы долго. Домой я возвратился под утро пешком, так как городской транспорт уже закончил (или ещё не начал) свою работу. У меня было ощущение, что в моей жизни произошло немаловажное событие, вероятно, главным образом потому, что я впервые стал участником теоретической работы, и притом совместно с И.Е. Таммом".

Второго января 1937 г. совместная статья И.Е. Тамма и И.М. Франка поступила в редакцию журнала *Доклады Академии наук СССР*. Статья носила заглавие "Когерентное излучение быстрого электрона в среде", и в ней содержалось теоретическое объяснение излучения Вавилова–Черенкова. К тому времени вопросы, которые вызывали сомнения, были успешно разрешены. В частности, выяснен был и вопрос о том, может ли равномерно движущаяся заряженная частица излучать в каждой точке своего пути и не противоречит ли это тому, что равномерно движущийся заряд не излучает. Оказалось, что оба этих утверждения согласуются. Действительно, можно считать, что любой движущийся заряд, в том числе и равномерно движущийся, излучает в каждой точке своего пути. Но при равномерном движении, если скорость частицы меньше, чем фазовая скорость света в

той среде, через которую движется частица, излучённые волны взаимно гасятся. В данном случае отсутствие излучения происходит вследствие взаимного погашения всех излучаемых волн. А в случае, когда скорость частицы превышает скорость излучаемых волн, эти волны когерентно складываются, а не гасят друг друга.

Стало также ясно, что движение частицы со скоростью, превышающей фазовую скорость света в среде, не противоречит теории относительности. Действительно, теория относительности запрещает движение материальных тел со скоростью, превышающей скорость света в пустоте. А скорость света в среде, как правило, меньше, чем скорость света в пустоте. Скажем, прозрачная пластмасса имеет показатель преломления  $n = 1,5$ . В такой среде скорость света равна приблизительно  $200000 \text{ км с}^{-1}$ . В то же время скорость света в пустоте равна  $300000 \text{ км с}^{-1}$ , т.е. в полтора раза больше. Поэтому частица может обогнать световую волну в среде и в то же время иметь скорость меньшую, чем скорость света в пустоте.

Теория И.Е. Тамма и И.М. Франка объясняла все ранее полученные экспериментальные результаты. Но в теории также содержались предсказания, которые следовало проверить. Теория давала количественные выражения для спектра, интенсивности излучения, точно определяла поляризацию. Дополнительные эксперименты, проведённые П.А. Черенковым в 1937 г., подтвердили количественные выводы теории. Надо отметить, что измерения, проводимые П.А. Черенковым с первого дня исследований, отличались исключительной надёжностью. Работая в трудных условиях, на пороге зрения, он проверял и перепроверял полученные результаты, так что они не вызывали ни малейшего сомнения.

Излучение Вавилова–Черенкова нашло широкое применение в физике высоких энергий, где оказалось возможным регистрировать быстрые заряженные частицы по вспышкам излучения Вавилова–Черенкова. Но в первые годы после открытия никаких предложений по использованию излучения Вавилова–Черенкова не высказывалось. Излучение было настолько слабым, что о каком-либо его использовании не было и речи. Положение изменилось после того, как в годы Второй мировой войны были разработаны чувствительные приёмники светового излучения — фотоумножители. В 1947 г. американский физик И.А. Геттинг предложил регистрировать излучение Вавилова–Черенкова с помощью фотоумножителей. Так появились первые черенковские счётчики. Теперь они есть в каждой лаборатории, где ведётся изучение частиц высокой энергии. Причём с помощью черенковских счётчиков можно измерять самые разные характеристики быстрых заряженных частиц — направление движения, величину заряда, скорость, энергию. Прогресс в физике высоких энергий, связанный с применением черенковских счётчиков, послужил основанием для присуждения Тамму, Франку и Черенкову в 1958 г. Нобелевской премии.

Илья Михайлович Франк впоследствии неоднократно обращался к различным вопросам, связанным с теорией излучения Вавилова–Черенкова. В совместной его работе с Виталием Лазаревичем Гинзбургом было рассмотрено излучение Вавилова–Черенкова при движении заряженной частицы не в сплошной однородной среде, а в канале, проделанном в этой среде. По резуль-

татам этой работы стало возможным судить о том, какие области среды — удалённые от траектории заряда или близкие к ней — принимают участие в образовании излучения. Он также исследовал длительность вспышки излучения Вавилова–Черенкова. Этот вопрос был важен для определения эффективности работы черенковских счётчиков.

Излучение Вавилова–Черенкова возникает в том случае, когда скорость заряженной частицы превосходит фазовую скорость электромагнитных волн. Поэтому, казалось бы, в пустоте излучение Вавилова–Черенкова невозможно — скорость материального тела не может превысить скорость света в пустоте. Однако существуют объекты, которые могут распространяться со сверхсветовой скоростью. Примером таких объектов является солнечный зайчик — светлое пятно на стене, которое образовано солнечным лучом, отражённым от зеркала. Такое пятно может двигаться со скоростью, превышающей скорость света в пустоте. Никаких противоречий со специальной теорией относительности при этом не возникает, движение зайчика не связано с переносом энергии в направлении движения. Однако световое пятно на границе раздела индуцирует поверхностные заряды и токи. Эти заряды и токи могут перемещаться по поверхности раздела с любой скоростью и, в частности, могут стать источником излучения Вавилова–Черенкова, если скорость пятна превышает скорость света в пустоте. Примеры сверхсветовых источников рассматривались в работах В.Л. Гинзбурга и других авторов.

Первый и очень поучительный пример сверхсветового источника принадлежит И.М. Франку. Представим себе две среды с разными значениями показателей преломления, разделённые плоской границей. Для определённости будем их называть "первая среда" и "вторая среда". В первой среде показатель преломления равен  $n_1$ , во второй —  $n_2$ . Пусть в первой среде на границу раздела падает плоская электромагнитная волна. Нетрудно показать, что эта волна возбуждает на поверхности раздела заряды и токи, которые перемещаются по поверхности со скоростью  $v = c/n_1 \sin \vartheta_1$ , где  $\vartheta_1$  — угол падения. Видно, что скорость этих поверхностных образований всегда больше, чем скорость света в первой среде. Значит, в первой среде должно возникать излучение Вавилова–Черенкова. Нетрудно убедиться в том, что это излучение даёт в точности отражённую волну. Эти же самые поверхностные токи и заряды могут стать источником излучения и во второй среде, если их скорость превосходит скорость света во второй среде, т.е. если  $v = c/n_1 \sin \vartheta_1 > c/n_2$ . При этом излучение Вавилова–Черенкова во вторую среду даёт в точности преломлённую волну. Если же скорость поверхностных зарядов и токов оказывается меньше, чем скорость света во второй среде, т.е. если  $v = c/n_1 \sin \vartheta_1 < c/n_2$ , то излучение Вавилова–Черенкова во второй среде отсутствует — преломлённая волна не образуется. Последнее неравенство совпадает с условием полного внутреннего отражения.

Таким образом, можно представить отражённую и преломлённую волны как излучение Вавилова–Черенкова от источников, созданных падающей волной на границе раздела.

В послевоенные годы И.М. Франк много времени и сил уделял исследованиям по физике нейтронов. Но классическая теория прохождения заряженной частицы

через вещество продолжала его интересовать. В последние годы жизни он написал книгу, которую можно рассматривать как итог его исследований, посвящённых излучению Вавилова–Черенкова (И.М. Франк *Излучение Вавилова–Черенкова. Вопросы теории* (М.: Наука, 1988)).

\* \* \*

У теории Франка и Тамма были исторические предшественники. В 1904 г. знаменитый немецкий математик и физик Арнольд Зоммерфельд вычислил поле электрона, который движется в пустоте со скоростью, превышающей скорость света. Зоммерфельд показал, что в этом случае электрон излучает электромагнитные волны. Но в следующем году была окончательно сформулирована теория относительности, согласно которой сверхсветовое движение в пустоте оказалось невозможным. Работа Зоммерфельда была забыта. Тамм и Франк не знали о ней, когда создавали свою теорию. О публикации Зоммерфельда они узнали, когда уже окончательные результаты своей работы обсуждали с Абрамом Федоровичем Иоффе. Тот помнил о работе Зоммерфельда и сообщил о ней Тамму и Франку. Так в уже упомянутой статье Тамма и Франка "Когерентное излучение быстрого электрона в среде" появилась ссылка на забытую работу Зоммерфельда. Оттиск статьи был послан А. Зоммерфельду. Зоммерфельд ответил благодарственным письмом, а в свой учебник *Оптика* включил параграф "Излучение Черенкова". Но Зоммерфельд ни в письме, ни в учебнике не упомянул о том, что ещё в конце XIX в. английский учёный Оливер Хевисайд рассмотрел движение точечного электрического заряда в среде (не в пустоте, а в среде!), причём он также рассмотрел случай, когда скорость заряда превосходит скорость света в среде. Он показал, что в этом случае имеет место излучение электромагнитных волн, причём излучение направленное, и определил некоторые свойства этого излучения. Рассмотрение Хевисайда было не таким полным, как у Франка и Тамма, он, в частности, не учитывал дисперсии, т.е. зависимости показателя преломления от частоты световой волны. Он также полагал, что скорость электрона может быть как угодно велика. Ограничения на скорость, налагаемые теорией относительности, ему не были известны, потому что теории относительности ещё не существовало. Всё же можно сказать, что Хевисайд подошёл к современной теории излучения Вавилова–Черенкова ближе, чем кто-либо другой. Но его работа не привлекла внимания и была быстро забыта. Причина этого состоит в том, что Хевисайд намного опередил своё время, в которое сторонников атомного строения вещества можно было пересчитать по пальцам, а атом электричества — электрон — ещё не был даже открыт. И трудно было тогда себе представить, что может существовать частица, скорость которой превышает скорость света в среде. Возможность получать такие частицы появилась лишь значительно позднее, в первом десятилетии XX в., после открытия радиоактивности. Не очень многие люди читали статьи и книги Хевисайда, а те, кто читал, сочли, что его рассмотрение поля сверхсветового заряда далеко от реальности. Напротив, перед Таммом и Франком стояла задача объяснить реальное, уже открытое излучение, источником которого были реальные быстрые заряженные частицы. О работах Хевисайда вспомнили в первой половине 1970-х годов, примерно через 90 лет после

того, как они были выполнены. Илья Михайлович Франк в это время отдыхал в академическом санатории "Узкое". Я его там навещал. По его просьбе я привёз третий том книги Хевисайда *Электромагнитная теория*. В этом томе Хевисайд рассматривал сверхсветовое движение точечного заряда в преломляющей среде. Илья Михайлович прочитал интересовавшую его часть книги и в следующий мой приезд, когда разговор зашёл о Хевисайде, сказал: "Это большая честь иметь такого предшественника".

\*\*\*

В 1942 г. И.М. Франк опубликовал в журнале *Известия Академии наук СССР, серия физическая* работу под заглавием "Эффект Доплера в преломляющей среде". Эта работа до сих пор определяет уровень понимания в той области, которой она была посвящена. Пусть имеется передатчик, излучающий волну с определённой длиной. Роль передатчика может играть атом, излучающий световую волну, или лазер, или радиостанция. И пусть эти сигналы принимает человек, оснащённый приёмным устройством. Если приём и передача происходят в пустоте и оба устройства — передатчик и приёмник — покоятся друг относительно друга, то приёмник надо настраивать на ту же самую частоту, на которой работает передатчик, иначе сигнал не будет принят. Если же передатчик и приёмник движутся относительно друг друга, то оказывается, что частота передатчика и частота, на которой происходит приём сигнала, не совпадают. Это явление на примере света, идущего от двойных звёзд, впервые исследовал австрийский физик Христиан Доплер в середине XIX в., и оно получило название эффекта Доплера.

Пусть передатчик излучает частоту  $\Omega$ . Для простоты предположим, что передатчик движется, а наблюдатель (приёмник) покоится. Скорость передатчика обозначим через  $v$ .

Если передатчик и приёмник расположены в пустом пространстве, то связь между частотой передатчика  $\Omega$  и частотой  $\omega$ , на которой принимается переданный сигнал, имеет вид

$$\omega = \frac{\Omega}{1 - (v/c) \cos \theta}.$$

Здесь  $v$  — скорость передатчика,  $c$  — скорость света,  $\theta$  — угол между скоростью передатчика и направлением излучения. Важно отметить, что при заданных значениях  $v$ ,  $\Omega$  и  $\theta$  частота принимаемого сигнала  $\omega$  имеет единственное значение.

И.М. Франк рассмотрел эффект Доплера не в пустоте, а в преломляющей среде, где имеет место явление дисперсии, т.е. волны с различной частотой распространяются с различной скоростью. Оказалось, что эффект Доплера в преломляющей среде обладает многими интересными особенностями. В частности, может оказаться, что передатчик работает на одной определённой частоте, а приём происходит на нескольких дискретных частотах. Сигнал расщепляется по частоте. Действительно, в среде с дисперсией показатель преломления  $n$  зависит от частоты  $\omega$ :  $n = n(\omega)$ . Соответственно фазовая скорость света в такой среде равна  $c/n(\omega)$ . Для того чтобы получить формулу для эффекта Доплера в среде с дисперсией, достаточно в предыдущей формуле для эффекта Доплера в пустоте  $c$  заменить отношением

$c/n(\omega)$ . Это даёт

$$\omega = \frac{\Omega}{1 - \beta n(\omega) \cos \theta}.$$

Здесь через  $\beta$  обозначено отношение скорости передатчика  $v$  к скорости света в пустоте  $c$ :  $\beta = v/c$ . Если задана частота  $\Omega$ , на которой работает передатчик, скорость движения  $v$  и угол излучения  $\theta$ , то последнее соотношение представляет собой уравнение относительно частоты  $\omega$ , на которой ведётся приём. Такое уравнение может иметь несколько решений, что и говорит о расщеплении сигнала по частоте. И.М. Франк назвал этот случай сложным эффектом Доплера.

В преломляющей среде возникает ещё одна возможность: скорость излучателя может быть больше, чем скорость света (в качестве излучателя можно рассматривать, например, атом, движущийся в среде со сверхсветовой скоростью). Статья И.М. Франка "Эффект Доплера в преломляющей среде" положила начало исследованию эффекта Доплера также и при сверхсветовом движении. Позднее в совместной работе В.Л. Гинзбурга и И.М. Франка была выяснена одна замечательная особенность эффекта Доплера при сверхсветовом движении излучателя. Как известно, в обычных условиях атом, оказавшись в возбуждённом состоянии, излучает свет и переходит в нормальное состояние. Если же атом движется со сверхсветовой скоростью, то, как показали В.Л. Гинзбург и И.М. Франк, излучение может сопровождаться переходом не в нормальное, а в ещё более высокое возбуждённое состояние. Это явление получило название аномального эффекта Доплера.

\*\*\*

В статье "Эффект Доплера в преломляющей среде" И.М. Франк ввёл очень важную величину, определяющую процессы излучения движущихся источников. Он назвал эту величину сначала "зона Френеля" по аналогии с теорией дифракции, затем стал употреблять название "путь формирования излучения". Теперь эту величину чаще называют "когерентная длина". Она характеризует движение заряженной частицы в поле электромагнитной волны. Когерентная длина — это расстояние, которое проходит заряд в поле волны так, что при этом фаза волны в точке, где находится заряд, изменяется не больше, чем на половину длины волны. Другими словами, когерентная длина — это расстояние, на котором заряженная частица либо отстаёт от волны, либо опережает её на полволны, т.е. сдвигается по фазе (отстаёт или опережает) на  $\pi/2$ .

Рассмотрим прозрачную среду с показателем преломления  $n$ . Пусть в этой среде движется с постоянной скоростью  $v$  заряженная частица. Из каждой точки своего пути частица излучает электромагнитные волны. Можно сказать, что от каждой точки, через которую проходит заряженная частица, излучаются во все стороны волны, подобно тому, как от плывущего корабля во все стороны расходятся волны по поверхности воды.

Пусть траектория заряда совпадает с осью  $z$  некоторой системы координат. Предположим, что из точки  $z = 0$  заряд излучает волну

$$\exp [i(\mathbf{k}\mathbf{r} - \omega t)]. \quad (1)$$

Здесь  $\omega$  — частота излучаемой волны,  $\mathbf{k}$  — волновой вектор,  $\mathbf{r}$  — точка наблюдения. Величина волнового вектора определяется соотношением  $k = (\omega/c)n$ .

Рассмотрим теперь точку  $z = l$ . Проходя через эту точку, заряд излучает среди прочих и волну с такими же значениями частоты и волнового вектора, что и у волны (1). Однако волна, излучённая из точки  $z = l$ , имеет другую фазу. Действительно, точки  $z = 0$  и  $z = l$  разнесены в пространстве и, кроме того, процесс излучения из точки  $z = l$  сдвинут по времени относительно процесса излучения из точки  $z = 0$  на величину  $\Delta t = l/v$ . Поэтому волна, излучённая из точки  $z = l$ , будет иметь вид

$$\exp \left\{ i \left[ \mathbf{k}(\mathbf{r} - \mathbf{l}) - \omega \left( t - \frac{l}{v} \right) \right] \right\}, \quad (2)$$

где  $\mathbf{l}$  — вектор, направленный из точки  $z = 0$  в точку  $z = l$  и по величине равный  $l$ .

Обозначим через  $\phi_1$  фазу волны, излучённой движущимся зарядом в точке  $l = 0$  (см. выражение (1)):

$$\phi_1 = \mathbf{k}\mathbf{r} - \omega t.$$

Соответственно через  $\phi_2$  обозначим фазу волны, излучённой зарядом в точке  $z = l$  (см. (2)):

$$\phi_2 = \mathbf{k}(\mathbf{r} - \mathbf{l}) - \omega \left( t - \frac{l}{v} \right).$$

Как видно из выражений для  $\phi_1$  и  $\phi_2$ , волны излучённые движущимся зарядом в начале и в конце пути длиной  $l$ , различаются по фазе. Нетрудно определить разность фаз  $\phi_2 - \phi_1$ :

$$\phi_2 - \phi_1 = l \frac{\omega}{v} \left( 1 - \frac{v}{c} n \cos \theta \right), \quad (3)$$

где  $\theta$  — угол между направлением движения излучающей частицы (осью  $z$ ) и направлением распространения волны (т.е. направлением волнового вектора  $\mathbf{k}$ ).

Предположим сначала, что путь  $l$  достаточно мал — настолько, что разность фаз  $\phi_2 - \phi_1$  много меньше единицы. Очевидно, что в этом случае волны, излучаемые из любой точки пути, близки по фазе и потому поля всех этих волн складываются, а результирующая амплитуда излучения пропорциональна  $l$ . Затем с дальнейшим возрастанием пути  $l$  разность фаз  $\phi_2 - \phi_1$  увеличивается и при некотором значении  $l$  становится равной  $\pi$ . Тогда волна, излучённая в начале пути, и волна, излучённая в конце пути, оказываются в противофазе. Поля этих волн уже не складываются, а вычитаются. Результирующее поле уже не возрастает с увеличением пути  $l$ .

Если волны, излучённые в начале и в конце пути, сдвинуты по фазе на  $\pi$ , то поля волн, излучённых в любой точке между началом и концом пути, имеют один и тот же знак. Можно сказать, что волны на всём отрезке  $l$  излучаются в фазе.

Значение пути  $l = l_f$ , с которого излучение собирается в фазе, можно определить, положив в формуле (3) разность фаз  $\phi_2 - \phi_1 = \pi$ . Тогда мы получим

$$l_f = \frac{\pi v}{\omega} \frac{1}{1 - \beta n \cos \theta}, \quad (4)$$

здесь  $\beta = v/c$ .

Это выражение впервые было получено И.М. Франком. Сначала он назвал величину  $l_f$  зоной Френеля для

излучения, по аналогии с таковой в теории дифракции, где зона Френеля — это область, из которой излучение приходит к наблюдателю в фазе. Позднее И.М. Франк использовал для  $l_f$  название "путь формирования". Теперь эту величину нередко называют когерентной длиной. В классической (неквантовой) физике эта величина определяет длину пути, с которого набирается излучение.

Интересно отметить, что в квантовой теории существует величина, которая имеет тот же физический смысл, что и введённый И.М. Франком путь формирования. В начале 1930-х годов два физика-теоретика, Ганс Бете и Вальтер Гайтлер, в рамках квантовой электродинамики провели расчёт тормозного излучения электрона в поле массивного кулоновского центра (атомного ядра).

Бете и Гайтлер не использовали в расчётах понятие траектории. В их расчётах электрон описывался плоской волной. Поэтому они не могли поставить тот вопрос, который И.М. Франк позднее поставил в рамках классической теории: какова длина пути, с которого излучение электрона собирается в фазе? Но они в рамках квантовой теории поставили эквивалентный вопрос: каковы размеры той области, расположенной вблизи ядра, в пределах которой электрон даёт основное излучение? Другими словами, они оценили размер той области пространства, которая вносит основной вклад в матричный элемент. Они получили такую оценку для размеров этой области. Предположим, что первоначальная энергия электрона равна  $E_1$ , а энергия электрона после излучения (когда электрон уже отлетит на большое расстояние от ядра) равна  $E_2$ . Пусть, кроме того, электрон, пролетая мимо ядра, излучил квант частоты  $\omega$ . При этих условиях Бете и Гайтлер получили, что размеры области, существенной для излучения, по порядку величины определяются соотношением:

$$l_0 = \frac{2\pi c}{\omega} \frac{E_1}{mc^2} \frac{E_2}{mc^2}.$$

Здесь  $c$  — скорость света,  $m$  — масса электрона.

При достаточно больших энергиях электрона длина  $l_0$  отсчитывается в направлении его начального импульса (впрочем, при достаточно больших энергиях направления начального и конечного импульсов электрона, а также направления импульса тормозного кванта близки между собой — квант излучается вперёд по направлению движения электрона).

Если энергия  $\hbar\omega$  тормозного кванта составляет малую долю от энергии налетающего электрона  $E_1$ , то в формуле для  $l_0$  можно принять  $E_1 \approx E_2 \approx E$ , и тогда величину  $l_0$  можно записать в виде

$$l_0 = \frac{2\pi c}{\omega} \left( \frac{E}{mc^2} \right)^2 = \frac{2\pi c}{\omega} \frac{1}{1 - \beta^2}.$$

Будем считать, что в формуле И.М. Франка (4) для пути формирования  $l_f$  скорость электрона  $v$  близка к скорости света  $c$ . Кроме того, положим в этой формуле  $\theta = 0$  (излучение вперёд) и  $n = 1$  (вакуум). Тогда формула (4) перейдёт в выражение для  $l_0$ , полученное Бете и Гайтлером.

Таким образом, для релятивистского электрона и для излучения вперёд классический и квантовый подходы дают примерно одинаковые оценки для пути, с которого набирается излучение. Важно, что величина этого пути

быстро возрастает с увеличением энергии (пропорциональна квадрату энергии).

Существует распространенное мнение, что физические процессы при высоких энергиях характеризуются интенсивным взаимодействием на малых расстояниях, разыгрываются в малых пространственных областях и эти процессы следует описывать с помощью квантовой теории. И.М. Франк показал, что даже при высоких энергиях имеется такой класс процессов, которые протекают на большом пути, и этот путь тем больше, чем выше энергия частицы. Таким процессом, в частности, является излучение Вавилова – Черенкова. Это излучение набирается со всего пути, как бы велик он не был. Действительно, если в выражение (4) для  $I_f$  подставить значение  $\cos \theta$  для излучения Вавилова – Черенкова, то знаменатель обратится в нуль и выражение для  $I_f$  станет расходящимся. Частица здесь неограниченно долго движется в фазе с излучаемой волной и, следовательно, когерентная длина может стать сколь угодно большой. Но если излучение собирается на большом пути, то начинают играть роль не индивидуальные свойства атомов, составляющих среду, а свойства среды в целом. В каком-то смысле верно утверждение, что чем больше путь формирования, тем с большим основанием можно рассматривать процесс как классический. К таким процессам относятся излучение Вавилова – Черенкова и переходное излучение, о котором речь пойдет ниже.

\*\*\*

Излучение Вавилова – Черенкова имеет место при движении заряженной частицы в однородной среде. В середине 1940-х годов И.М. Франк заинтересовался вопросом о том, как протекает излучение частицы, если она движется в неоднородной среде. Простейший пример излучения движущейся частицы в неоднородной среде был рассмотрен совместно В.Л. Гинзбургом и И.М. Франком. Совместная работа началась ещё в годы Отечественной войны, а результат её был опубликован в *Журнале экспериментальной и теоретической физики (ЖЭТФ)* в 1946 г. под заглавием "Излучение равномерно движущегося электрона, возникающее при его переходе из одной среды в другую". В работе рассматривались две разные среды (с различными значениями диэлектрической проницаемости), разделённые плоской границей. Заряженная частица двигалась равномерно в одной из сред по направлению к границе, пересекала границу раздела по нормали и двигалась дальше уже во второй среде. Оказалось, что такое пересечение границы между двумя средами сопровождается излучением электромагнитных волн. Авторы назвали это излучение переходным. В работе были определены поля по обе стороны границы и подсчитаны потери энергии на излучение назад, т.е. в ту среду, в которой электрон двигался первоначально.

Несколько лет спустя Г.М. Гарибян подсчитал полные потери энергии заряженной частицы на переходное излучение. Потери энергии определялись как работа электрического поля на всём пути частицы. Оказалось, что для релятивистских электронов полные потери линейно возрастают с увеличением энергии частицы. В дальнейшем было выяснено, что основная доля потерь приходится на излучение вперёд. Оно и возрастает пропорционально энергии частицы. Спектральный состав переходного излучения вперёд содержит высокие частоты, вплоть до рентгеновских. Излучение же назад

возрастает с увеличением энергии гораздо медленнее, по логарифмическому закону.

Уже было сказано выше, что излучение Вавилова – Черенкова после своего открытия несколько лет ожидало теоретического объяснения. В противоположность этому переходное излучение сначала было предсказано теоретически, а обнаружено на опыте двенадцать лет спустя. В дальнейшем теория переходного излучения не только способствовала развитию наших теоретических представлений относительно прохождения заряженной частицы через вещество, но также позволила осуществить важные применения в физике высоких энергий. Оказалось возможным регистрировать быстрые заряженные частицы по испускаемому ими переходному излучению. Счётчики на переходном излучении теперь применяются во всех центрах по физике высоких энергий. Большой вклад в развитие теории и приложений переходного излучения внесли учёные Ереванского физического института (ЕРФИ). До развала Советского Союза этот институт лидировал в развитии теории рентгеновского переходного излучения, в создании счётчиков на переходном излучении.

Состоялось несколько международных симпозиумов, посвящённых теории и приложениям этого явления. В последние годы международные симпозиумы по взаимодействию быстрых частиц с веществом регулярно проводились по инициативе Томского политехнического института. На этих симпозиумах доклады и обсуждения, посвящённые переходному излучению, занимают важное место.

Исследование разных сторон переходного излучения проводится также в Московском государственном университете, Белгородском университете, в ФИАНе, ОИЯИ. Переходное излучение используется, кроме того, для генерации мощного электромагнитного излучения интенсивными пучками заряженных частиц.

\*\*\*

Выше было сказано о роли Сергея Ивановича Вавилова в открытии эффекта, который носит его имя наряду с именем Павла Алексеевича Черенкова. Роль С.И. Вавилова была также велика как участника постоянных обсуждений, которые способствовали пониманию и в конечном счёте привели к созданию теории Тамма – Франка. Не меньшую роль сыграл С.И. Вавилов и на всех этапах научной жизни И.М. Франка. Студент Московского университета Илья Михайлович Франк выполнял дипломную работу под научным руководством Сергея Ивановича Вавилова. После окончания университета И.М. Франк работал научным сотрудником в ГОИ, где С.И. Вавилов был заместителем директора по науке. Когда Сергей Иванович Вавилов был назначен директором ФИАНа, он пригласил И.М. Франка в качестве сотрудника лаборатории атомного ядра. Этот факт тоже заслуживает особого внимания. Немногие тогда могли оценить перспективы развития ядерной физики, которая в те годы только начала бурно развиваться. А Вавилов предвидел это бурное развитие. Его специальностью была физическая оптика, но он в то время предлагал своим ученикам темы, пограничные с ядерной физикой. Вот и тема исследования, которое проводил его аспирант П.А. Черенков, называлась "Свечение растворов ураниловых солей под действием гамма-излучения радия". И в создаваемом им институте с самого начала была организована лаборатория атом-



ного ядра. Его заботы по развитию ядерной физики окупались сторицей. В годы после Великой Отечественной войны, когда перед страной встала задача создания ядерного оружия, ФИАН сыграл не последнюю роль в решении этой задачи.

Вавилов был человеком высокой культуры и высокой порядочности. Л.И. Мандельштам как-то сказал, что очень порядочных людей не бывает: либо человек порядочный, либо нет. Но самого Л.И. Мандельштама хочется назвать очень порядочным человеком. И таким же был Сергей Иванович Вавилов. И.М. Франк ценил С.И. Вавилова и как учителя, и как заботливого руководителя, и как человека высокой культуры, в том числе и высокой культуры поведения. Он относился к С.И. Вавилову с любовью, уважением, благодарностью за науку и за чисто человеческое, отеческое внимание и расположение. Когда Сергей Иванович скончался, И.М. Франк много сил потратил на то, чтобы собрать и издать сборник воспоминаний о нем. Он стал редактором этого сборника. Сборник вышел тремя изданиями. В третье издание Илья Михайлович включил несколько новых, ранее не опубликованных статей, написанных людьми, близко знавшими С.И. Вавилова. Свою вводную статью Илья Михайлович очень сильно дополнил для третьего издания, так что её объём удвоился. Многие из того, что он добавил в свою статью, просто нельзя было написать раньше, в предыдущих изданиях (первое издание вышло в 1979 г., второе — в 1981 г.). Во время подготовки к печати третьего издания И.М. Франк тяжело болел. Он сильно опасался, что не успеет закончить редактирование книги. Когда подготовка книги к печати была закончена, он сказал родным: "Теперь можно и помирать". И через несколько дней умер. Книга вышла из печати через несколько месяцев после его кончины.

\*\*\*

Илья Михайлович происходил из замечательной семьи. Дед его Людвиг Семёнович Франк был военный врач. У него было два сына — Семён Людвигович и Михаил Людвигович. Михаил Людвигович был профессором математики, выдающимся педагогом. Под его влиянием сформировались у его детей естественнонаучные интересы. У Михаила Людвиговича Франка было два сына — Глеб (старший) и Илья. Глеб Михайлович Франк, брат Ильи Михайловича, стал известным биофизиком, действительным членом Академии наук СССР. Дядя Ильи Михайловича Франка, брат отца, Семён Людвигович Франк, был знаменитым религиозным философом. В 1922 г. по указу Ленина он был выслан из России на печально известном "философском пароходе". Вместе с ним были высланы такие философы, как Николай Бердяев, Питирим Сорокин и другие. Конечно, приходится сожалеть, что Россия выслала за границу своих наиболее выдающихся мыслителей. Но, с другой стороны, если бы Ленин их не выслал в 1922 г., то Сталин, придя к власти, скорее всего, просто уничтожил бы их. А так изгнанники получили возможность работать за рубежом. С изгнанным своим дядей Илья Михайлович не мог общаться — в те годы это было опасно для жизни. Не общался он и с его потомством, своими двоюродными братьями и сестрами. Я думаю, и зарубежные родственники, в свою очередь, понимали, какую опасность для И.М. Франка могли бы представлять контакты с ними.

\*\*\*

И.М. Франк был очень сдержанный и вежливый человек. Сдержанность его и вежливость доходили до такой степени, что можно было удивляться. Однажды в Москву приехал из Еревана мой друг Григорий Маркарович Гарибян, известный физик, который занимался теорией переходного излучения и открыл рентгеновское переходное излучение. Он получил новые результаты и рассказал мне. Я ему посоветовал: "Гриша, съезди в Дубну к Илье Михайловичу Франку, расскажи ему. Это ему будет очень интересно". Гриша отправился в Дубну и вернулся оттуда совершенно счастливый. Он рассказал, что Илья Михайлович выслушал его очень благожелательно, выразил полное согласие с его результатами. Спустя несколько недель я встретил Илью Михайловича в ФИАНе. Разговор зашел о результате, полученном Г. Гарибяном. «Помилуйте, что же там нового? — сказал Илья Михайлович. — Это всё мне давно известно. Я ему говорю: "Как хорошо, что мы с вами думаем одинаково". А он не понимает!»

\*\*\*

Приведу ещё один случай, из которого видно, какой Илья Михайлович был цивилизованный человек. Где-то в середине 1970-х годов мне прислали на отзыв заявку на открытие. Тогда существовал такой порядок, что человек, совершивший открытие, получал специальный диплом, в котором было написано: такой-то и такой-то совершил такое-то и такое-то открытие. Это было чисто бюрократическое мероприятие. Что такое открытие в науке? У Ньютона не было диплома на открытие. И у Эйнштейна не было. А тут человек мог обратиться в Комитет по делам изобретений и открытий с заявлением: так и так, я открыл то-то и то-то, прошу выдать мне диплом на открытие. Одно из таких заявлений мне и прислали на отзыв. Прочитав заявку, я увидел, что открытие, на которое претендовал автор, в значительной мере (наполовину или больше) было определено работами Ильи Михайловича Франка. Я об этом и написал в отзыве. Не знаю, как дальше пошло дело о присуждении диплома на открытие. Вполне возможно, что по заявке было принято положительное решение и заявитель всё-таки получил диплом на открытие. Спустя года полтора после этого случая я рассказал о нём Илье Михайловичу. «Я знаю, — сказал Илья Михайлович, — он мне сообщил, что хочет подать заявку на открытие. А я ему сказал: "Подавайте". Но ведь он мог понять, что это мне неприятно». О судьбе заявки Илья Михайлович тоже ничего не знал.

\*\*\*

Где-то между 1970-м и 1980-м годами, точнее не помню, исследования по переходному излучению были выдвинуты на Ленинскую премию. Ереванский физический институт выдвинул на премию группу физиков, которые сыграли важную роль в развитии теории и приложений. Конечно, номером первым в этой группе был Илья Михайлович Франк, предсказавший это явление и вместе с В.Л. Гинзбургом создавший его теорию. В.Л. Гинзбурга в числе претендентов не было — он перед этим был награждён Ленинской премией за исследования по теории сверхпроводимости, а премия дважды не присуждалась. Список физиков, выдвинутых на Ленинскую премию, не был предварительно обсуждён с Ильёй Михайловичем Франком. Когда Илья Михайлович ознакомился с этим списком, он направил в комитет по

Ленинским премиям письмо. Он написал, что есть физики (и назвал фамилии), которых не включили в представление на премию, а между тем они внесли в теоретические и экспериментальные исследования переходного излучения вклады, по важности не меньшие, чем вклады тех, кто выдвинут. Поэтому он возражает против состава претендентов, указанных в представлении. Такое письмо было равносильно отказу от Ленинской премии. Комитет по Ленинским премиям не мог изменить состав лиц, выдвинутых на премию, не мог исключить кого-то из выдвинутых, не мог добавить новую кандидатуру. Было ясно, что если основоположник всех исследований, выдвинутых на премию, возражает против списка лиц, включённых в представление, то Комитет вообще откажется от рассмотрения этого представления. Так и получилось. Премия за открытие и исследование переходного излучения так и не была присуждена. Илья Михайлович всё это понимал, когда писал письмо. Он мне дал возможность ознакомиться с копией письма, сказав при этом: "Я себе зарубил Ленинскую премию".

\*\*\*

Принято ругать плохие работы по физике — ошибочные, содержащие неаккуратные измерения или неверные физические идеи. Илья Михайлович придерживался другого мнения. Он говорил: "Принято считать, что плохие работы вредят развитию физики. Я с этим не могу согласиться. Плохие работы никакого влияния на развитие физики не оказывают. Их быстро забывают".

\*\*\*

Было в жизни Ильи Михайловича Франка событие, которое доставило ему годы горьких переживаний.

29 августа 1973 г. в газете *Правда* — в главной газете Советской страны — было напечатано письмо с осуждением общественной деятельности академика Андрея Дмитриевича Сахарова. Под письмом стояли подписи сорока академиков, и в их числе была подпись И.М. Франка.

А.Д. Сахаров в 1969 г. написал свою знаменитую статью "О мирном сосуществовании, прогрессе и интеллектуальной свободе". В этой статье он размышлял о путях развития Советского Союза и мирового сообщества, обсуждал необходимые условия для нормального развития страны. Его соображения во многом противоречили официальной идеологии, которой придерживалось руководство Советского Союза. Идеология эта оставалась неизменной вплоть до развала советского государства, она, собственно, и привела к развалу. Мысли, высказанные А.Д. Сахаровым, в нашей стране замалчивались или искажались, а сам он стал объектом травли на страницах газет и журналов. Одним из элементов этой травли и стало письмо сорока академиков.

В числе сорока академиков, подписавших письмо, несомненно, были люди, сделавшие это по убеждению. Были и такие, на которых оказывалось давление, которые по своей воле не подписали бы письмо. Но какое давление могло оказать академическое начальство на Илью Михайловича Франка, всемирно известного учёного, Нобелевского лауреата?

У нас, в ФИАНе, рассказывали такую историю. Приходит Андрей Дмитриевич Сахаров в институт 29 августа и видит — в вестибюле вывешена фотокопия письма сорока академиков. Подошёл к письму, прочитал, дошёл до подписей. Изучил подписи и говорит: "Илья Михайлович Франк подписал это письмо. Хоро-

ший человек, я ему сочувствую. А вот, Виталий Лазаревич Гинзбург не подписал. Хороший человек, я ему сочувствую".

Те, кто отказался подписать письмо, ждали неприятностей от начальства. Те, кто подписал (по крайней мере, некоторые из них), испытывали укоры совести. Андрей Дмитриевич сочувствовал и тем и другим.

Примерно через месяц после того, как появилось письмо сорока, в ФИАНе было составлено "Заявление учёных ФИАН", в котором общественная деятельность А.Д. Сахарова осуждалась. Сотрудники теоретического отдела ФИАНа (отдела, в котором работал А.Д. Сахаров) отказались подписывать это письмо. Когда я рассказал об этом Илье Михайловичу Франку, он сказал: "И правильно сделали".

Значит, он сочувствовал тем, кто отказался.

Я его ни о чём не расспрашивал. Через несколько лет он мне рассказал, при каких обстоятельствах он поставил свою подпись под письмом сорока. Его пригласил Президент Академии наук и предложил подписать письмо. Илья Михайлович отказывался, Президент уговаривал подписать. Это длилось довольно долго (если не ошибаюсь, Илья Михайлович сказал: два часа).

"А потом, — сказал Илья Михайлович, — Президент перестал меня уговаривать. Он достал из стола листок с текстом письма и уже с подписями. Он дал мне этот листок. Я увидел, среди прочих, подписи таких людей, к которым я относился с большим уважением. И я подумал: раз такие люди подписали это письмо, значит, я неправ, что упорствую. И я подписал, а теперь простить себе не могу".

Третьего января 1990 г. в дубненской газете была напечатана статья И.М. Франка под заглавием "Истина всегда берет верх". Там были такие строки:

«Недавно мы пережили тяжелое потрясение. Ушел из жизни великий борец за справедливость А.Д. Сахаров, и боль утраты ещё не утихла. Никто, конечно, не забывает о тех гонениях, которым он недавно подвергался. Вина за них ложится и на Академию наук СССР. Я не был среди тех, кто осуждал присуждение ему Нобелевской премии мира, считая эту награду совершенно заслуженной. Однако в том, что опубликовала Академия наук против Сахарова, есть и моя доля вины. Я уже много лет как её осознал и никогда об этом не забываю. Вместе с Д.С. Лихачевым говорю не только "прощай", но и "прости"».

Заглавие статьи в газете — "Истина всегда берёт верх" — представляет собой часть фразы, которую И.М. Франк услышал от С.И. Вавилова: "Истина всегда берёт верх, но жизни человеческой для этого может оказаться недостаточно".

Из сорока академиков, подписавших письмо против Сахарова, мне известны только двое, которые принесли свои извинения Андрею Дмитриевичу. Это Илья Михайлович Франк (его слова приведены выше) и Сергей Васильевич Вонсовский. Вонсовский покаяться на общем собрании Академии наук в присутствии Сахарова. И уважение мое к этим двум физикам — Вонсовскому и Франку — только возросло после этого.

\*\*\*

Время, в которое жил и работал Илья Михайлович Франк, было временем бурного развития физики в нашей стране. Это время сменилось временем развала и застоя. Предстоит восстановить многое, что было

утрачено за последние десятилетия. Восстановить и пойти дальше. И память о тех, кто ранее прокладывал пути к знанию, восприятие их опыта и достижений и, не в последнюю очередь, их нравственности, помогут двигаться быстрее.

PACS numbers: 01.65. + g, 28.20. – v, 28.41. – i  
DOI: 10.3367/UFNr.0179.200904j.0415

## **И.М. Франк и развитие Объединённого института ядерных исследований**

А.Н. Сисакян, М.Г. Иткис

Илья Михайлович Франк принадлежит к блестящей плеяде отечественных физиков прошлого столетия. Он родился 23 октября (10 октября по старому стилю) 1908 г. в Петербурге в семье, давшей российской культуре несколько выдающихся деятелей (отец — Михаил Львович Франк, математик, профессор Крымского (Таврического) университета, брат — Глеб Михайлович Франк, известный биофизик, академик АН СССР, дядя Семён Львович Франк — крупный русский философ и психолог). В 1926 г. Илья Михайлович поступил в Московский государственный университет. После его окончания в 1930 г. он в течение нескольких лет работал в Государственном оптическом институте (ГОИ) в Ленинграде, занимаясь изучением фотохимических реакций оптическими методами. Его оригинальные работы в этом направлении послужили основанием для присуждения двадцатипятилетнему И.М. Франку докторской степени.

В 1934 г. Илья Михайлович перешёл в Физический институт им. П.Н. Лебедева (ФИАН), который в то время возглавлял С.И. Вавилов. Здесь в 1937 г. И.Е. Тамм и И.М. Франк в работе, ставшей классической, дали исчерпывающее объяснение "загадочному свечению Вавилова–Черенкова", за которое в 1958 г. Тамм, Франк и Черенков получают Нобелевскую премию.

В последующие годы Илья Михайлович всё более концентрируется на исследованиях в области ядерной физики. С 1946 г. И.М. Франк — руководитель вновь созданной лаборатории атомного ядра ФИАН. Одной из важных задач в этой области, решением которой занялся Илья Михайлович с сотрудниками, являлось точное определение параметров уран-графитовых решёток и выяснение физических закономерностей переноса нейтронов в них. Новой идеей явилось предложение Ильи Михайловича использовать в этих исследованиях импульсный источник нейтронов. С 1956 г. И.М. Франк переходит на работу в Дубну, в Объединённый институт ядерных исследований (ОИЯИ).

Как известно, 26 марта 1956 г. в Москве в конференц-зале Президиума РАН было подписано соглашение об учреждении международной научно-исследовательской организации под названием "Объединённый институт ядерных исследований". Институт был образован на базе двух действующих лабораторий — лаборатории Института ядерных проблем АН СССР и Электрофизической лаборатории АН СССР, получивших название лаборатории ядерных проблем и лаборатории высоких

энергий в составе нового института. Однако при обсуждении структуры института в Академии наук Д.И. Блохинцев, первый директор ОИЯИ, предложил дополнительно к двум лабораториям создать и включить в структуру ОИЯИ лабораторию теоретической физики (ЛТФ) и лабораторию нейтронной физики (ЛНФ) на основе реактора с высокой плотностью потока нейтронов. Предложения Д.И. Блохинцева были приняты и отражены в заключительном сообщении об организации ОИЯИ. Он же и пригласил И.М. Франка на работу в ОИЯИ. Тем самым в 1956 г. была образована лаборатория нейтронной физики, которая впоследствии стала носить имя своего основателя и первого избранного директора И.М. Франка. В этой должности И.М. Франк проработал чуть более 30 лет, а последние два года жизни являлся почётным директором ЛНФ (на должность директора ЛТФ был приглашён замечательный учёный — математик, механик, физик-теоретик Н.Н. Боголюбов). Сам Блохинцев перешёл на работу в ОИЯИ из Физико-энергетического института в Обнинске, где он в 1955 г. предложил идею оригинального импульсного реактора периодического действия на быстрых нейтронах. Теория такого реактора была полностью разработана в 1956 г., хотя публикация в открытой печати появилась только в 1959 г. [1].

Создать такой реактор было решено в Дубне, а руководить работами пригласили И.М. Франка. Выбор кандидатуры был, естественно, не случайным. Многие годы Илья Михайлович руководил лабораторией в ФИАНе, главной задачей которой была разработка вопросов, связанных с созданием ядерных реакторов в Советском Союзе.

Сам Франк вспоминал: "По поручению Игоря Васильевича Курчатова мне довелось работать и даже управлять первым советским реактором почти сразу после того, как он начал действовать, то есть в конце 1946-го — начале 1947 года" [2].

Параллельно лаборатория занималась и другими вопросами ядерной физики, включая взаимодействие быстрых и медленных нейтронов с ядрами, деление ядер, изучение реакций с нейтронами на лёгких ядрах, диффузию нейтронов в различных средах и др.

В мае 1957 г. Илья Михайлович выступил на сессии Учёного совета ОИЯИ с докладом о проекте реактора и перспективах его использования для научных исследований. Сразу после одобрения проекта Учёным советом началась его реализация. Импульсный характер работы нового нейтронного источника потребовал разработки оригинальной аппаратуры систем управления и защиты, дозиметрического контроля. Впервые в СССР был разработан многоканальный временной анализатор для экспериментов по времени пролёта. Большую роль в создании этого уникального проекта сыграли также сотрудники Научно-исследовательского и конструкторского института энерготехники (НИКИЭТ) под руководством Н.А. Доллежала.

В 1959 г. основные строительные работы и работы по изготовлению оборудования для реактора названного ИБР (импульсный быстрый реактор) завершились и начались монтажные работы. 23 июня 1960 г. реактор был выведен в режим импульсной критичности и были измерены его основные параметры, которые полностью согласовывались с расчётными предсказаниями. На рисунке 1 приведена выписка из оперативного журнала