

УСПЕХИ ФИЗИЧЕСКИХ НАУКФИЗИКА НАШИХ ДНЕЙ**СОВЕТСКИЕ УЧЕНЫЕ—ЛАУРЕАТЫ
НОБЕЛЕВСКОЙ ПРЕМИИ ПО ФИЗИКЕ 1958 ГОДА**

Нобелевская премия по физике за 1958 г. присуждена трем советским физикам—Павлу Алексеевичу Черенкову, Игорю Евгеньевичу Тамму и Илье Михайловичу Франку—за открытие и объяснение явления, называемого в СССР эффектом Вавилова—Черенкова, и более известного на Западе просто как эффект Черенкова.

Со времени, когда П. А. Черенков¹ обнаружил новое явление, прошло двадцать четыре года, а со времени, когда И. М. Франк и И. Е. Тамм объяснили это явление—двадцать один год. Напомним краткую историю открытия.

В 1934 г. П. А. Черенков, тогда аспирант академика С. И. Вавилова, исследовал люминесценцию растворов ураниловых солей под действием γ -излучения радия. В этих опытах обнаружилось странное явление—все чистые жидкости слабо светились при облучении их γ -лучами радия.

Свечение жидкостей под действием γ -излучения было известно давно. В частности, свечение, обнаруженное Черенковым, весьма напоминало так называемое «синее» свечение жидкостей под действием интенсивного ультрафиолетового излучения, обнаруженное и исследованное в 1929 г. С. И. Вавиловым и Л. А. Тумерманом² (см. также³).

Как показано этими авторами, синее свечение жидкостей связано с наличием в них ничтожных посторонних примесей. По своим свойствам это свечение является обычной флуоресценцией и обладает всеми ее наиболее характерными признаками, обусловленными конечной длительностью высвечивания (порядка или более чем 10^{-10} сек). В явлениях люминесценции эта длительность определяется вероятностью перехода из возбужденного состояния атома или молекулы в состояние, энергетически более низкое. Поэтому воздействием на возбужденные частицы всегда возможно в той или иной мере потушить люминесценцию. Этого можно добиться, например, повышением температуры (что также понижает степень поляризации свечения, так как тепловое движение «сбивает» ориентацию молекул), или путем добавления к жидкости некоторых «тушащих» веществ, взаимодействующих с возбужденными молекулами.

Однако свечение, обнаруженное П. А. Черенковым, обладало свойствами, отличающимися от обычной флуоресценции. Самая тщательная очистка жидкости от загрязнений не снижала яркости свечения. Например, свечение обычной водопроводной воды после троекратной дистилляции оказалось таким же, как и до дистилляции. Новое свечение не удавалось также потушить введением в раствор энергичных тушителей флуоресцен-

ции—иодистого калия, азотнокислого серебра, нитробензола. Растворение этих веществ в малых и больших концентрациях не сказывалось на интенсивности нового вида свечения. Поэтому гипотезу о том, что свечение вызвано малыми флуоресцирующими примесями, пришлось отбросить.

Для выяснения природы явления Черенковым был выполнен ряд опытов, обычно применяемых для этой цели в лаборатории С. И. Вавилова при определении флуоресценции растворов светящихся красок. Эти опыты состоят в определении яркости и поляризации свечения в различных условиях (при изменении температуры, при добавлении тушащих веществ). Теория позволяет с помощью таких измерений определить основную характеристику излучателей—время жизни в возбужденном состоянии.

В случае свечения, обнаруженного Черенковым, оказалось, что полностью отсутствует влияние как температуры, так и тушащих агентов. Это означает, что длительность возбужденного состояния излучателей здесь если и отлична от нуля, то во всяком случае по величине на несколько порядков меньше, чем для обычных видов люминесценции. Это дало основание С. И. Вавилону³ утверждать, что «наблюдаемый эффект вообще не может быть каким-либо видом люминесценции, для которой конечная длительность возбуждения является необходимым характерным признаком». В той же работе С. И. Вавилова³, появившейся одновременно с первым сообщением П. А. Черенкова, содержались и первые указания на возможные причины явления.

Как известно, механизм поглощения γ -лучей в веществе состоит в том, что гамма-квант передает свою энергию целиком или частично электронам—при фото- или комптон-эффекте. Выбитые электроны, двигаясь в среде, постепенно тормозятся, передавая ей свою энергию. В частности, эти электроны могут вызывать и флуоресценцию атомов и молекул среды. Поскольку, однако, опыты показали, что свечение не может быть флуоресценцией, С. И. Вавилов допустил, что излучают сами электроны. Единственным известным в то время механизмом излучения свободного электрона в среде было тормозное излучение. С. И. Вавилов предположил, что новое свечение и объясняется тормозным излучением электронов, выбитых γ -лучами из атомов жидкости. Эта гипотеза объясняла почти все известные в то время свойства излучения—отсутствие длительности возбужденного состояния, характер поляризации свечения и его универсальность, т. е. то обстоятельство, что новое свечение было обнаружено у всех исследованных чистых жидкостей самого разнообразного химического состава.

В дальнейшем выяснилось, что механизм излучения свободных электронов в среде, объясняющий свечение Вавилова—Черенкова, не является тормозным излучением, и эта часть предположений Вавилова неверна. Однако утверждение С. И. Вавилова, что явление, открытое П. А. Черенковым, не есть обычная люминесценция, и что излучают сами электроны, оказалось правильным и определило весь ход дальнейших исследований.

Опыты, выполненные П. А. Черенковым с источниками β -лучей (тонкостенные ампулы, наполненные эманацией радия), показали, что электроны действительно возбуждают в жидкостях свечение, тождественное по свойствам с тем, что дают γ -лучи. Для прямого доказательства того, что и при облучении γ -лучами свечение тоже вызывается электронами, были поставлены опыты с влиянием на свечение магнитного поля. Если свечение вызывается электронами, то поляризация свечения должна определяться направлением движения электронов. Магнитное поле действует на электроны, искривляя их траекторию. Поэтому наложение магнитного поля должно вызвать изменение поляризации свечения. Если же свечение вызывается не электронами, а непосредственно γ -лучами, то влияния магнитного поля быть не должно. Влияние магнитного поля оказалось очень



ПАВЕЛ АЛЕКСЕЕВИЧ
ЧЕРЕШКОВ

значительным, и вопрос тем самым решился в пользу электронов. Однако механизм излучения электронов в среде оставался непонятым. Гипотеза, что свечение представляет собой тормозное излучение свободных электронов, не могла объяснить наблюдаемое значение интенсивности излучения, того факта, что яркость свечения была примерно одинакова в жидкостях с различными Z , и других фактов.

В результате этих и дополнительно поставленных экспериментов Черенковым было показано, что излучение имеет отчетливо выраженную направленность. Оказалось, что максимум интенсивности наблюдается под вполне определенным углом к направлению движения электронов.

Прежде чем переходить к теории явления, упомянем еще, что спектр нового свечения оказался сплошным и ограниченным с коротковолновой стороны лишь границей поглощения самой жидкости или границей поглощения применяемой оптики.

Для выяснения основных свойств нового свечения П. А. Черенкову пришлось провести ряд трудных и тонких экспериментов. Если справедливо шутливое изречение, что все великие открытия делаются в темноте, то здесь оно имеет буквальный смысл. Дело в том, что при имевшихся в распоряжении Черенкова источниках γ -лучей наблюдаемое свечение было очень слабым. В связи с этим при применении для количественных измерений обычных методов фотометрии сразу же возник ряд весьма значительных трудностей. Наиболее подходящим и в то же время простым методом для изучения нового свечения оказался метод фотометрии по порогу зрения, разработанный Е. М. Брумбергом и С. И. Вавиловым специально для количественных измерений со слабым источником света⁴. Каждый день перед измерениями П. А. Черенков (нередко в измерениях участвовал и С. И. Вавилов) час—полтора проводил в затемненной комнате. За это время чувствительность глаза увеличивалась в десятки тысяч раз. После этого начинались измерения. Все отдельные измерения проводились через определенный интервал времени (3—5 минут), чтобы избежать утомления глаза. Для сохранения адаптации («настройки» глаза на темноту), а также для устранения возможности произвольного самовнушения, запись отсчетов проводилась ассистентом. Два—два с половиной часа измерений настолько утомляли зрение, что дневную работу приходилось кончать, иначе появлялись ошибки.

Хотя изучаемое свечение наблюдается во всех прозрачных веществах, независимо от того, находятся ли они в жидком или твердом состоянии, для детального изучения этого явления были избраны жидкости. Это обуславливалось тем, что почти все образцы твердых тел, как естественные, так и приготовленные искусственно, под действием радиоактивных излучений обнаруживают довольно яркую люминесценцию. Налагаясь на изучаемое свечение, значительно более слабое по своей интенсивности, эта люминесценция создает ряд добавочных экспериментальных трудностей.

Свечение, открытое в 1934 г. Черенковым и носящее теперь имени Вавилова и Черенкова, было объяснено в 1937 г. И. Е. Таммом и И. М. Франком⁵. Они показали, что свечение Вавилова—Черенкова как качественно, так и количественно может быть объяснено с помощью представлений классической электродинамики. Непосредственным результатом этих представлений является утверждение, что даже равномерно движущийся в среде заряд должен излучать свет, если его скорость превышает фазовую скорость света в этой среде. Для электрона, движущегося в воде, такая критическая скорость достигается уже при энергии, равной примерно 250 кэв. Известно, что значительная часть электронов, испускаемых радиоактивными веществами или создаваемых γ -лучами, обладает большими энергиями.

Условие, при котором равномерно движущийся в однородной среде электрон может излучать свет, может быть получено как из классических, так и из квантовых соображений.

Пусть равномерно и прямолинейно движущийся заряд излучает волну. Поскольку заряд движется равномерно и прямолинейно в однородной среде, его электромагнитное поле должно переноситься вместе с ним, т. е. должно зависеть от аргумента $\mathbf{x} - \mathbf{v}t$, где \mathbf{v} —скорость заряда. Поэтому излученная волна имеет вид

$$e^{ik(\mathbf{x} - \mathbf{v}t)}, \quad (1)$$

где \mathbf{k} —волновой вектор, характеризующий направление распространения световой волны. Как видно из (1), частота такой волны (множитель при t в показателе) определяется равенством

$$\omega = kv = kv \cos \vartheta, \quad (2)$$

где ϑ —угол между направлением распространения волны и скоростью заряда. С другой стороны, частота всякой электромагнитной волны в среде связана с ее волновым вектором \mathbf{k} соотношением

$$\omega = \frac{ck}{n}, \quad (3)$$

где n —показатель преломления для данной волны, c —скорость света в пустоте. Из сравнения (2) и (3) следует

$$\cos \vartheta = \frac{c}{nv} = \frac{1}{n\beta} \left(\beta = \frac{v}{c} \right). \quad (4)$$

Условие (4) определяет угол между скоростью заряда и направлением распространения излучаемой им волны. Ясно, что волна реально излучается лишь в том случае, если

$$\frac{vn}{c} = n\beta > 1, \quad (5)$$

т. е. если скорость заряда превосходит фазовую скорость света в среде.

К аналогичному условию возникновения излучения приводят также простые квантовые соображения, впервые высказанные В. Л. Гинзбургом⁶. Приняв для импульса фотона в среде выражение $p_\gamma = \frac{\hbar\omega n}{c}$ и учитывая законы сохранения энергии и импульса при излучении фотона, можно получить выражение для $\cos \vartheta$, из которого следует, что соотношение (4) справедливо с точностью до отношения дебройлевской длины волны электрона $\frac{\hbar}{p_e}$ к длине волны излучаемого фотона. Эта величина в реальных случаях оказывается очень малой, что подчеркивает классическую природу явления.

Для потерь энергии заряженной частицы на излучение Вавилова—Черенкова И. Е. Тамм и И. М. Франк получили выражение (потери на единицу пути частицы)

$$\frac{dW}{dx} = -\frac{e^2}{c^2} \int_{n\beta > 1} \left(1 - \frac{1}{n^2\beta^2} \right) \omega d\omega, \quad (6)$$

где под интегралом стоит спектральная интенсивность излучения Вавилова—Черенкова на частоте ω , и интегрирование проводится по частотам, для которых выполнено условие (5), т. е. по тем волнам, фазовая скорость

которых меньше скорости заряда. Эта формула получила в мировой литературе название формулы Франка и Тамма.

Теория Тамма и Франка позволила определить также поляризацию излучения Вавилова—Черенкова. Именно электрический вектор волны Вавилова—Черенкова перпендикулярен волновому вектору волны (как и во всякой световой волне) и лежит в плоскости, образованной скоростью частицы \mathbf{v} и волновым вектором \mathbf{k} излученной волны. Направление вектора поляризации дается вектором

$$\mathbf{v} - \frac{\mathbf{k}(\mathbf{k}\mathbf{v})}{k^2}. \quad (7)$$

Свойства излучения, следующие из теории Тамма и Франка, оказались тождественными с наблюдаемыми Черенковым.

Еще в 1904—1905 гг. Зоммерфельд⁸ показал, что если электрон движется в пустоте со скоростью, превышающей скорость света, то он должен терять энергию, тормозясь собственным полем, т. е. давать электромагнитное излучение. В дальнейшем, однако, стало очевидно, что движение электрона со скоростью, большей скорости света в пустоте, невозможно, и работа Зоммерфельда была забыта. После работы Тамма и Франка стало ясно отношение расчетов Зоммерфельда к действительности: формулы, полученные Зоммерфельдом, оказываются справедливыми, если в них заменить скорость света в пустоте на скорость света в среде. Тогда заряженная частица может обогнать свое поле, и может возникнуть эффект Вавилова—Черенкова.

За двадцать с лишним лет, прошедших со времени открытия и объяснения эффекта Вавилова—Черенкова, это явление стало объектом многих экспериментальных и теоретических исследований и важных физических приложений.

Подробному изучению подвергся эффект Вавилова—Черенкова как в изотропных, так и в кристаллических средах. Эффект Черенкова в кристаллах имеет ряд интереснейших особенностей, рассмотренных впервые В. Л. Гинзбургом. Не имея здесь возможности входить в подробности, мы отсылаем читателя к обзорам по эффекту Черенкова^{9,10,11}, где имеется подробная библиография. И. М. Франком выяснен ряд теоретических вопросов—черенковское излучение мультиполей, интерференция излучения Вавилова—Черенкова, длительность вспышки излучения и другие. И. Е. Тамм рассмотрел обращение эффекта Вавилова—Черенкова (или, что то же самое, эффект Вавилова—Черенкова в системе координат, где заряд покоится, а среда движется со сверхсветовой скоростью). Это рассмотрение легло в основу нескольких вариантов когерентного метода ускорения, предложенного недавно В. И. Векслером.

В. Л. Гинзбургом и И. М. Франком рассмотрено излучение Вавилова—Черенкова при движении частицы по оси канала в плотной среде. Это рассмотрение легло в основу методов генерации радиоволн с помощью эффекта Вавилова—Черенкова.

Но самым важным из всех применений эффекта Вавилова—Черенкова до сего времени является его использование для регистрации быстрых заряженных частиц.

Излучение Вавилова—Черенкова обладает рядом уникальных свойств, обусловивших его широкое применение в физике быстрых частиц. Быстрая частица, испуская черенковский свет, как бы «выдает себя» наблюдателю. Начало развития техники черенковских счетчиков относится к 1947 г., когда Геттинг предложил для обнаружения излучения Вавилова—Черенкова использовать фотоумножитель. За последние годы появилось множество различных конструкций черенковских счетчиков для опре-

деления самых различных характеристик заряженных частиц—скорости, заряда, направления движения, полной энергии. Скорость заряженной частицы может быть определена по угловому распределению черенковского излучения с очень высокой точностью, достигающей 0,1% (измерения Мэзера энергии протонов на 184-дюймовом циклотроне в Беркли, 1951 г.).

Созданы черенковские селекторы по скорости, и с их помощью был открыт антипротон. На советских искусственных спутниках Земли установлены черенковские счетчики для регистрации многозарядных ионов в космическом излучении.

Эффект Вавилова—Черенкова—очень распространенное в природе явление. Учет этого явления необходим в целом ряде областей физики: при исследовании свечения ночного неба, люминесценции, физики электронной плазмы, проблемы управляемых термоядерных реакций, генерации радиоволн с помощью эффекта Вавилова—Черенкова, при изучении полярных сияний, в целом ряде новых методов ускорения.

Несколько слов о самих лауреатах. Все они—сотрудники физического института им. П. Н. Лебедева Академии наук СССР. Двое из них—П. А. Черенков и И. М. Франк—ученики академика С. И. Вавилова, преждевременная смерть которого явилась большой потерей для науки и не позволила ему разделить нынешний триумф новых нобелевских лауреатов.

П. А. Черенков родился в 1904 г. в семье крестьянина Воронежской губернии. Двух лет он остался без матери. Школу он окончил только в 20 лет, поскольку учение приходилось совмещать с работой. После окончания школы П. А. Черенков поступил в Воронежский университет. Окончив университет в 1928 г., П. А. Черенков затем два года преподавал физику в средних школах г. Мичуринска. В 1930 г. он поступил в аспирантуру физического института, где работал под руководством академика С. И. Вавилова. В 1935 г. он защитил кандидатскую диссертацию «Люминесценция растворов ураниловых солей под действием γ -лучей», а в 1940 г.—докторскую, содержащую исследование эффекта, носящего теперь его имя. Он принимал участие в работе по созданию ускорителей электронов на большие энергии (в частности, ускорителя ФИАН на 265 Мэв). Последние годы П. А. Черенков работает над различными вопросами фотоядерных реакций.

И. М. Франк родился в 1908 г. в Ленинграде. Мать И. М. Франка работала врачом городской больницы, отец—преподавателем математики (впоследствии—профессор Ленинградского политехнического института). В 1926 г. после окончания средней школы, поступил в Московский государственный университет. Дипломную работу выполнял под руководством академика С. И. Вавилова. После окончания университета с 1930 по 1934 г. И. М. Франк работал в Государственном оптическом институте в Ленинграде. С 1934 г. он сотрудник физического института. В марте 1935 г. получил степень доктора физико-математических наук за диссертацию на тему «Элементарные процессы при оптической диссоциации».

В 1946 г. И. М. Франк был избран членом-корреспондентом Академии наук СССР.

И. М. Франк не перестает работать над различными сторонами задачи о движении заряженных частиц через преломляющую среду (эффект Вавилова—Черенкова, эффект Доплера, переходное излучение). Сейчас И. М. Франк заведует лабораторией атомного ядра в Физическом институте. Известны работы И. М. Франка и возглавляемого им коллектива по актуальным вопросам нейтронной физики и физики атомного ядра.



ИЛЪЯ МИХАЙЛОВИЧ
ФРАНК



ИГОРЬ ЕВГЕНЬЕВИЧ
ТАММ

И. Е. Тамм—крупнейший физик-теоретик. Его работы в области теории металлов, теории ядерных сил и взаимодействия элементарных частиц, теории лавинных процессов в космических лучах (и, конечно, работы по теории эффекта Вавилова—Черенкова) получили всеобщее признание. Он вместе с А. Д. Сахаровым является пионером в области работ по управляемым термоядерным реакциям в Советском Союзе.

И. Е. Тамм родился в 1895 г. во Владивостоке в семье инженера, работавшего на постройке Уссурийской железной дороги. В 1898 г. семья переехала в г. Елизаветград, где И. Е. Тамм в 1913 г. окончил гимназию. В том же году И. Е. Тамм поступил студентом в Эдинбургский университет в Шотландии, где проучился один год. С началом войны 1914 г. И. Е. Тамм перевелся на физико-математический факультет Московского университета. После окончания в 1918 г. он был оставлен в университете для подготовки к профессоруре. С 1919 г. И. Е. Тамм—преподаватель физики в высших учебных заведениях Симферополя, Одессы и (с 1922 г.) Москвы.

В 1933 г. И. Е. Тамм был избран членом-корреспондентом Академии наук СССР. В следующем году ему без защиты была присуждена ученая степень доктора физико-математических наук. С того же года И. Е. Тамм работает в Физическом институте Академии наук, где все эти годы руководит теоретическим отделом. В 1953 г. он был избран действительным членом Академии наук СССР.

Все три лауреата ведут большую педагогическую работу. В течение нескольких десятилетий И. Е. Тамм возглавлял кафедру теоретической физики Московского Государственного университета, по существу им созданную. Преподавательская работа И. М. Франка также связана с Московским Государственным университетом, где он возглавляет кафедру радиоактивных излучений, П. А. Черенков—профессор Московского механического института.

Б. М. Болотовский

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. П. А. Черенков, ДАН 2, 451 (1934).
2. S. I. Wawilow и L. A. Tumermann, Zs. f. Phys 54, 270 (1929).
3. С. И. Вавилов, ДАН 2, 457 (1934).
4. Е. М. Брумберг и С. И. Вавилов, Изд. АН ОМОН, сер. VII, 919 (1933); ДАН III, 405 (1934).
5. И. Е. Тамм и И. М. Франк, ДАН 14, 107 (1937).
6. В. Л. Гинзбург, ЖЭТФ 10, 589 (1940); ДАН 24, 131 (1939).
7. L. Mallet C.R. 183, 274 (1926); 187, 222 (1928); 198, 445 (1929).
8. A. Sommerfeld, Gött. Nachr. 99, 363 (1904); 201 (1905).

ОБЗОРНЫЕ СТАТЬИ

9. И. М. Франк, УФН 30, 149 (1946).
10. Дж. Джелли, УФН 58, 231 (1956).
11. Б. М. Болотовский, УФН 62, 201 (1957).