

К 130-летию со дня рождения великого советского физика Игоря Евгеньевича Тамма

Часть 1. Пионер квантовой физики: И.Е. Тамм и его вклад в развитие электроники

Виктор Алексеев

В статье рассмотрены основные этапы биографии и научное наследие выдающегося советского физика-теоретика, лауреата Нобелевской премии Игоря Евгеньевича Тамма. Особое внимание уделено его ключевым научным достижениям, оказавшим фундаментальное влияние на развитие современной электроники.

Рассмотренные в этой статье работы Игоря Евгеньевича Тамма демонстрируют исключительную научную ценность, ставя его в один ряд с такими выдающимися физиками, как Альберт Эйнштейн, Нильс Бор, Пол Дирак. Показано, как теоретические концепции, предложенные Таммом почти столетие назад, стали основой многих современных электронных технологий. Работа базируется на анализе оригинальных трудов учёного и демонстрирует актуальность его научных идей для развития квантовой электроники, фотоники и нанотехнологий.

Факты биографии

Со дня рождения Игоря Евгеньевича Тамма (1895–1971) – выдающегося российского физика-теоретика, академика АН СССР, лауреата Нобелевской премии по физике 1958 года – исполнилось 130 лет. Он также был удостоен других многочисленных советских и зарубежных званий и наград (рис. 1).

Игорь Евгеньевич Тамм родился 8 июля (26 июня по старому стилю) 1895 года во Владивостоке.

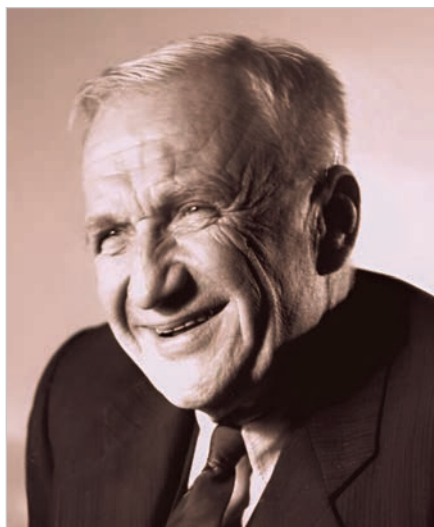


Рис. 1. Тамм Игорь Евгеньевич [1]

В 1898 году семья переехала в Елисаветград, где отец Евгений Фёдорович Тамм много лет проработал городским инженером [2].

После окончания Елисаветградской гимназии в 1913 году Игорь Тамм, в совершенстве владевший английским и немецким языками, поступил в Эдинбургский университет, где в течение года прослушал курс знаменитого английского учёного, основателя математической физики Эдмунда Уиттекера [3]. Общение с таким великим учёным дало Тамму понимание стандартов мировой науки. Этот год стал поворотным в биографии Тамма. Он увлёкся физикой, которой в дальнейшем посвятил всю свою жизнь. В связи с разразившейся Первой мировой войной Тамм возвращается в Россию, где продолжает обучение на физико-математическом факультете Московского университета.

Весной 1915 года Игорь Тамм добровольно отправился на фронт в качестве санитаря. В это время Тамм серьёзно увлёкся политикой. Он поддерживал умеренное крыло РСДРП и выступал за более умеренные методы борьбы за социализм, отдавая предпочтение парламентским и легаль-

ным методам. В 1917 году в качестве делегата от Елисаветградского исполкома Игорь Тамм участвовал в Первом Всероссийском съезде Советов рабочих и солдатских депутатов в Петрограде.

В 1918 году он защитил диплом по физике, посвящённый электродинамике и взаимодействию электромагнитного излучения с веществом и был оставлен при Московском университете для подготовки к профессорскому званию [4].

В конце 1919 года всех выпускников университета отправили преподавать в города, только что освобождённые Красной армией.

Игорь активно включился в процесс создания «нового справедливого социалистического общества». В мае 1919 года он был делегатом Всероссийского съезда по внешкольному обучению. Затем осенью 1919 года он переехал в Крым и стал преподавателем физики в новом Таврическом университете, организованном в 1918 году. Осенью 1920 года он переехал в Одессу и был принят на должность ассистента на кафедре физики Одесского политехнического института. Его руководителем стал выдающийся физик Леонид Исаакович Мандельштам (эффект комбинационного рассеяния света Мандельштама – Ландсберга) [5].

Именно в Одессе Игорь Тамм начал свою самостоятельную научную работу в области макроскопической электродинамики.

В 1922 году он вернулся в Москву, где в течение года читал лекции по физике в Коммунистическом университете имени Свердлова и в Институте инженеров путей сообщения. В 1923 году Тамм преподавал на факультете теоретической физики 2-го Московского университета.

В 1924 году Тамма пригласили на должность приват-доцента физического факультета МГУ. В 1925 году кафедру теоретической физики этого факультета возглавил Л.И. Мандельштам, который стал непосредственным научным руководителем Игоря Тамма.

В 1924 году Игорь Тамм познакомился с известным физиком Паулем Эренфестом, по рекомендации которого «Фонд Лоренца» в 1927 году предоставил молодому учёному Тамму стипендию для научной командировки в Германию и Нидерланды. Благодаря этому счастливому событию Игорь Тамм провёл около полугода в крупнейших физических лабораториях Нидерландов и Германии, где он работал вместе с ведущими физиками Европы: Кронигом, Бором, Шрёдингером, Дираком [6].

В 1930 году Тамм стал профессором и занял должность Леонида Исааковича Мандельштама в качестве заведующего кафедрой теоретической физики.

В 1931 году он побывал в командировках в Англии (Кембридж) и Германии. Прекрасно владея английским и немецким, Тамм имел возможность обсуждать последние открытия в физике непосредственно с их авторами [7].

В 1933 году Игорю Тамму без защиты, по совокупности работ, была присвоена степень доктора физико-математических наук. В этом же году он был избран членом-корреспондентом Академии наук СССР.

В 1934 Тамм стал заведующим сектором теоретической физики нового Физического института имени П.Н. Лебедева АН СССР (ФИАН) [8].

В 1946 году Игорь Тамм перешёл на работу в Московский механический институт (МИФИ в настоящее время), где возглавил кафедру теоретической ядерной физики. Он был первым заведующим этой кафедрой.

В эти годы И.Е. Тамм был привлечён к работам по созданию атомного оружия. Следует тем не менее подчеркнуть, что Тамм принимал лишь косвенное научно-консультативное участие в разработках первой советской атомной бомбы, которая была успешно испытана в 1949 году. Ключевую роль здесь играли другие учёные, такие, например, как И.В. Курчатов.

В том же году Тамм возвращается в МГУ на кафедру квантовой теории и электродинамики.

В 1950 году Тамм с группой сотрудников ФИАН, в которую вошли А.Д. Сахаров и В.Л. Гинзбург, был переведён в КБ-11 в Арзамас-16 (Саров) для работ по проекту термоядерного оружия. После успешного испытания первой советской водородной бомбы в 1953 году Игорь Евгеньевич Тамм стал академиком АН СССР по отделению физико-математических наук и получил Сталинскую премию. В 1954 году И.Е. Тамму было присвоено звание Героя Социалистического Труда с вручением ордена Ленина и золотой медали «Серп и Молот».

В начале 1954 года И.Е. Тамм вернулся в ФИАН, в котором работал до конца жизни.

Скончался И.Е. Тамм 12 апреля 1971 года, похоронен в Москве на Новодевичьем кладбище.

Более детальную информацию о биографии И.Е. Тамма можно найти в следующих статьях [9, 12].

Научное наследие Игоря Евгеньевича Тамма

Следует подчеркнуть, что И.Е. Тамм был прежде всего выдающимся физиком-теоретиком. Поэтому его труды в основном посвящены таким разделам теоретической физики, как: квантовая механика, классическая и квантовая электродинамика, теория твёрдого тела, теория элементарных частиц, квантовая оптика, проблемы термоядерного синтеза, другие прикладные задачи.

Хотя наибольшую известность ему принесла Нобелевская премия 1958 года за теоретическое объяснение эффекта Черенкова, его научное наследие выходит далеко за пределы этого открытия.

В данной статье рассмотрены только те направления работ Игоря Тамма, которые повлияли на развитие современной электроники.

Серьёзно заниматься научными поисками Игорь Тамм начал в 1922 году после встречи с Л.И. Мандельштамом, который рекомендовал ему заняться крайне популярными тогда вопросами электродинамики в приложениях общей теории относительности Эйнштейна (ОТО). Для понимания вопросов, которыми тогда занимался Тамм, нужно сказать бук-

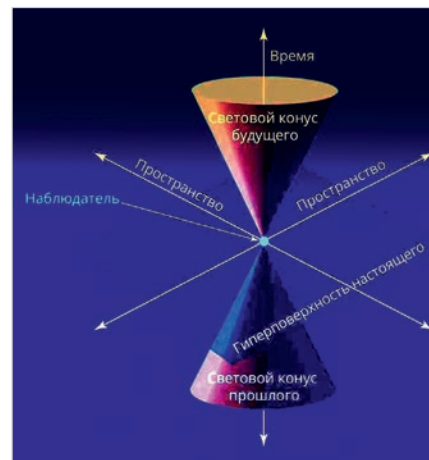


Рис. 2. Пространство Минковского рассматривает три координаты евклидова пространства и четвертую как $C \times T$, где C – скорость света, T – время события

вально несколько слов о терминах, которые употребляются в его статьях.

Прежде всего, следует отметить Германа Минковского, одного из столпов немецкой школы математики и физики. Он был одним из учителей молодого Альберта Эйнштейна. Наиболее известен тем, что вслед за А. Пуанкаре развил идею объединения трёх измерений пространства и времени в одно четырёхмерное псевдоевклидово пространство, получившее название «Пространство Минковского» – ПМ. Это позволило ему разработать четырёхмерный математический аппарат специальной теории относительности (СТО).

Не вдаваясь в сложные математические рассуждения, отметим, что в случае с ПМ каждому событию соответствует точка пространства, три координаты которой представляют собой декартовы координаты трёхмерного евклидова пространства, а четвёртая координата определяется как $C \times T$, где C – скорость света, а T – время события. В пространстве Минковского световой конус разделяет пространство-время на области прошлого и будущего относительно заданного события. Он образован изотропными векторами и служит для определения причинно-следственных связей. Световые конусы определяют границы, отделяющие моменты, которые могут повлиять на заданное событие в прошлом, от моментов, на которые может повлиять заданное событие в будущем (рис. 2).

Такой подход позволяет избежать противоречий между классической

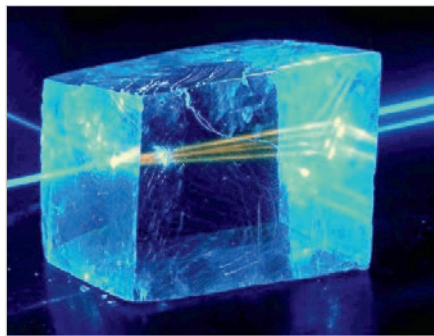


Рис. 3. В некоторых типах кристаллов существует эффект двойного лучепреломления

физикой и наблюдениями, связанными с относительной скоростью света.

В пространстве Минковского уравнения физических законов остаются неизменными (инвариантными) при преобразованиях Лоренца.

Исходные уравнения электродинамики движущихся сред, полученные Минковским, позволили получить полное описание электромагнитного поля в среде, движущейся равномерно и с произвольной скоростью.

Понятие ПМ дало возможность обосновать один из основных постулатов квантовой теории поля, гласящий, что пространство и время не являются независимыми величинами, а тесно связаны между собой, а их восприятие зависит от наблюдателя [13].

Первую статью на эту тему Игорь Тамм готовил почти два года (с 1922 по 1924 гг.). Статья «Электродинамика анизотропной среды в специальной теории относительности» была опубликована в старейшем российском научном периодическом издании «Журнал Русского физико-химического общества ЖРФХО», основанном в 1869 году [14].

В этой работе был дан вывод инвариантных уравнений электродинамики анизотропной среды. Фактически Игорь Тамм обобщил известные уравнения Минковского для случая движущейся анизотропной среды методом, предложенным Л.И. Мандельштамом. Для этого Тамм объединил описание электромагнитных свойств материала в единый математический объект: четырёхмерный тензор. Таким образом, электрическая (ϵ) и магнитная (μ) проницаемости были представлены не как скаляры в случае классической электродинамики, а как компоненты четырёхмерного тензора для релятивистского варианта. Это позволило получить точные уравнения для

любых скоростей движения, описывающие сложное поведение анизотропных материалов и автоматически учитывающие эффекты теории относительности Эйнштейна.

При выводе уравнений для случая анизотропных кристаллов (кроме моно- и триклинометрических) Игорь Тамм использовал упрощение, когда оси трёхмерных тензоров ϵ и μ совпадают между собой.

Кроме того, в статье был рассмотрен более общий случай для пространственного вращения исходных координатных осей, покоящихся относительно кристалла и параллельных его главным осям.

В целом эта работа Игоря Тамма дала способ теоретического описания электродинамики кристаллов и других анизотропных материалов в релятивистском контексте. Например, дальнейшие исследования показали, что в движущемся кристалле электрические и магнитные свойства могут смешиваться. При этом направления максимальной проводимости поворачиваются, что приводит к новым эффектам, которые не проявляются в неподвижном кристалле.

Данная работа Игоря Тамма стала одним из базовых методов теоретических описаний приложений релятивистской электродинамики сложных сред, что крайне важно для теории света в кристаллах, жидких кристаллах, а также для анализа различных анизотропных материалов.

Через год практически эта же статья с небольшими изменениями, но в соавторстве с Л.И. Мандельштамом, была опубликована в немецком журнале «Анналы математики» [15].

Работа получила широкую известность в мировом научном сообществе, и даже сам Альберт Эйнштейн дал ей высокую оценку.

Работы по квантовой электродинамике Тамм продолжил в Москве под руководством Мандельштама. В 1925 году была опубликована их совместная работа «Кристаллооптика теории относительности в связи с геометрией биквадратичной формы», в которой выведенные им инвариантные уравнения электродинамики анизотропной среды использовались для описания законов распространения света в кристаллах [16].

В обыденной жизни мы сталкиваемся с тем, что свет распространяется прямолинейно в одном направлении

по так называемым «нулевым линиям». Однако известно, что в некоторых типах кристаллов существует эффект, который получил название «двойное лучепреломление».

Это явление заключается в расщеплении проходящего света на два луча, распространяющихся по разным траекториям (рис. 3).

Причиной двойного лучепреломления является анизотропия, то есть зависимость показателя преломления от направления распространения в кристалле.

Анализируя полученные им ранее решения, Тамм обнаружил удивительную аналогию, заключающуюся в том, что уравнения для света в кристаллах математически похожи на уравнения распространения света в гравитационном поле Эйнштейна.

Тамм показал, что для объяснения этого явления нужна другая геометрия, отличная от Евклидовой. Используя пространство Минковского и описанные выше уравнения, Тамм предложил определять элемент длины в анизотропных средах биквадратичной формой в дифференциалах координат, а в вакууме и в изотропных средах в квадратичной форме. Таким образом, в анизотропных структурах следует использовать более общую геометрию биквадратичной формы вместо римановой геометрии квадратичной формы.

В натуральной (римановой) геометрии нормаль к лучевой поверхности совпадает с радиус-вектором, а нормаль к волновой поверхности совпадает с направлением потока энергии. Поэтому волна и луч описываются одним уравнением.

В случае неинвариантного описания контравариантные координаты требуют специальной интерпретации через волновые соотношения. Поэтому возникает различие между волной и лучом.

Важно то, что возникающая двойственность «волна-луч» не является фундаментальным свойством света, а возникает из-за выбора неинвариантной системы описания. В правильной геометрической формулировке (с инвариантным элементом длины) свет описывается единым образом.

В заключительной части статьи Тамм анализирует три фундаментальных тензора своей теории.

Для анизотропной среды:

- тензор s (IV ранга) описывает электромагнитные свойства среды;
- тензор h (IV ранга) определяет элемент длины ds ;
- тензор k (II ранга) обеспечивает связь между ко- и контравариантными представлениями.

В изотропных средах все три тензора s , h и k сводятся к одному тензору II ранга, аналогичному метрическому тензору g квадратичной геометрии.

Полученная Игорем Таммом формула для скорости луча точно совпадает с известными формулами кристаллооптики для магнитных кристаллов, что подтверждает правильность его подхода.

Результаты этой работы были использованы в дальнейшем для разработок таких приложений, как, например, гетерогенные транзисторные кристаллические структуры, оптические модуляторы, поляризационные устройства, а также другие компоненты оптоволоконной связи.

Свой преподавательский опыт Игорь Тамм обобщил в знаменитом фундаментальном курсе «Основы теории электричества», который был опубликован в 1929 году и впоследствии переиздавался более 10 раз на многих языках мира [17].

В предисловии к первому изданию учебника Тамм писал, что основной целью этого курса является объяснение физического смысла и содержания основных положений теории электричества. Нужно отметить, что Игорь Тамм великолепно владел высшей математикой. Тем не менее основная особенность методики преподавания Тамма заключалась в том, что понимание студентами физической сути явлений было важнее формального использования математического аппарата. Например, Тамм объяснял теорему Гаусса следующим образом. Электрические заряды создают воображаемые кривые в пространстве, которые показывают направление электрического поля. Их стали называть силовыми линиями. Положительные заряды являются источниками этих линий, а отрицательные – их стоками. Поток напряжённости электрического поля можно представить так: сколько линий вытекает из воображаемого мешочка, столько заряда в нём и содержится.

Последнее издание этого учебника, содержащее более шестисот страниц, используется в настоящее время во

многих университетах мира для изучения курса электродинамики.

Большинство наиболее значимых открытых научных работ И.Е. Тамма приходится на период с 1930 по 1939 годы.

Как физик-теоретик, Тамм старался дать объяснение наиболее интересным экспериментальным результатам, полученным физиками в разных лабораториях мира.

В письме, написанном в 1937 году своему другу Владимиру Фоку [18], Игорь Тамм выделяет некоторые собственные работы, которые он оценивал больше всего. Эти работы соответствуют таким основным направлениям исследований, как рассеяние света в твёрдых телах, взаимодействие свободных электронов с излучением, фотоэффект, связанные состояния электронов на поверхности кристаллов, термоэлектронная эмиссия, магнитный момент нейтрона, Черенковское излучение (ЧИ).

Статья И.Е. Тамма «О квантовой теории молекулярного рассеяния света в твёрдых телах» (1930) была опубликована в одном из наиболее авторитетных научных журналов того времени «Zeitschrift für Physik (Zs. f. Ph.)» [19]. В этой работе Тамм использовал появившуюся тогда теорию Дирака, описывающую поведение электрона с точки зрения релятивистской квантовой механики.

Он сопоставил теорию Дирака с формализмом квантования Гейзенберга – Паули и дал объяснение спиновых свойств электрона. Основной идеей работы Игоря Тамма было квантово-механическое рассмотрение рассеяния излучения электронами, что имело крайне важное значение для подтверждения релятивистского волнового уравнения Дирака для электрона. Вычисленная Игорем Таммом в данной работе рассеивающая способность электрона значительно лучше соответствовала имевшимся экспериментальным данным, чем в классической теории.

В этой работе Тамм впервые ввёл понятие акустических квантов в твёрдом теле. Эти первые квазичастицы представляли собой квантованные вибрации ионов кристаллической решётки. В классической физике они соответствуют звуковым волнам в твёрдом теле. Тамм назвал их «квантами упругости – Elastischen Quanten» (современное

название – акустические кванты). Термин «фонон» позже предложил Я.И. Френкель в своей монографии «Волновая механика».

В отличие от упругого рассеяния, где энергия фотона не изменяется, при неупругом (комбинационном) взаимодействии энергия рассеянного фотона отличается от первоначальной благодаря влиянию собственных молекулярных колебаний кристаллической решётки.

В своей статье Тамм рассматривал квантованные звуковые волны аналогично фотонам, представляющим собой кванты световых волн.

Понятие фонона играет ключевую роль в современной теории конденсированных сред и позволяет представить слабо возбуждённое состояние системы взаимодействующих частиц в виде газа особых объектов на фоне её основного состояния.

Фактически Игорь Тамм разработал модель, в которой молекулы или атомы рассматриваются как квантовые осцилляторы, взаимодействующие с электромагнитным полем света. Это позволило описать рассеяние света как квантово-механический процесс, связанный с переходами между дискретными энергетическими уровнями.

Данная работа Игоря Тамма позволила создать теоретический фундамент эффекта неупругого рассеяния света в рамках квантового подхода, где свет и вещество рассматриваются как квантовые поля.

Предложенная Игорем Таммом теоретическая модель объясняла многие непонятные до того экспериментальные данные спектров рассеяния света, наблюдаемых в газах, жидкостях или твёрдых телах. Квантовая интерпретация рассеяния света, предложенная Таммом, стимулировала появление теории квантовой оптики, в которой свет рассматривается как поток фотонов, взаимодействующих с квантовыми системами. Это направление сегодня включает исследования квантовых компьютеров, квантовой криптографии и фотонных квантовых систем.

Кроме того, в этой работе были заложены основы молекулярной спектроскопии (Рамановская спектроскопия), которая в настоящее время широко используется во многих приложениях физики, химии, материаловедения, биологии и т.д.

Начиная со студенческих лет Тамм интересовался явлением фотоэффекта, открытым ещё в 1887 году Генрихом Герцем. В современной формулировке суть этого явления заключается в том, что свет или другое электромагнитное излучение, взаимодействуя с веществом, может передавать энергию фотонам электронам вещества. В результате возможны два варианта. Внешний фотоэффект характеризуется испусканием электронов веществом, а внутренний – перераспределением электронов внутри вещества.

В 1888–1890 годах Александр Столетов опубликовал шесть основополагающих работ на эту тему, в том числе и с формулировкой первого закона внешнего фотоэффекта.

В 1905 году Альберт Эйнштейн использовал квантовую теорию света, предложенную Максом Планком, для объяснения фотоэффекта. Именно за эти работы, а не за теорию относительности, он в 1921 году был удостоен Нобелевской премии.

В 1923 году Роберт Милликен получил Нобелевскую премию в области физики «за работы по определению элементарного электрического заряда и фотоэлектрического эффекта».

Вполне естественно, что Игорь Тамм интересовался вопросами, связанными с фотоэффектом. В 1931 году он вместе со своим аспирантом С. Шубиным разработал собственный вариант квантовой теории фотоэффекта в металлах [20]. Его статья начинается с вопроса: «Почему вообще возможно поглощение фотона свободным электроном в металле? По классическим законам сохранения энергии и импульса это должно быть запрещено!»

Для ответа на этот вопрос Тамм использовал квантово-механическое описание поведения электронов на границе металл-вакуум, что было новаторским подходом для 1931 года. Он нашёл решение уравнения Шрёдингера с учётом реальной структуры металла. В отличие от ранее использованных моделей, Тамм и Шубин учли такие важные факторы, как периодический потенциал кристаллической решётки, столкновения электронов с решёткой, влияние поверхностных состояний.

Крайне важным было доказательство того, что в первом варианте фотоэффекта свет (фотоны) передаёт

свою энергию электронам, которые «туннелируют» через потенциальный барьер в металле и таким образом вылетают из него.

Результаты расчётов Тамма показали наличие связи между поверхностными и объёмными состояниями при экспоненциальном затухании волновой функции в поверхностном слое твёрдого тела толщиной около 10^{-7} см.

Также Тамм впервые указал на то, что должен существовать второй фотоэлектрический порог объёмного эффекта в металле. Позже это явление, получившее название «красной границы фотоэффекта», было экспериментально подтверждено и объяснялось тем, что фотоэффект не наблюдается, если частота света меньше определённого граничного значения. Для возникновения первого варианта фотоэффекта, то есть выбивания электронов из металла, свет должен обладать достаточной частотой, чтобы преодолеть работу выхода электрона.

До этой работы Игоря Тамма фотоэффект рассматривался как единое явление. Тамм показал, что это два разных физических процесса с разными механизмами, спектральными характеристиками и практическими применениями. Во-первых, поверхностный эффект реализуется за счёт скачка потенциала на границе металл-вакуум, который обеспечивает сохранение импульса. Во-вторых, объёмный эффект объясняется передачей избыточного импульса кристаллической решётке.

Высказанные Таммом почти век назад идеи остаются актуальными и в настоящее время. Примером этому могут служить фотокатоды с квантовой эффективностью >40%, просветляющие оптические покрытия, гетероструктурные лазеры с инверсной накачкой, каскадные квантовые структуры, однофотонные детекторы, лавинные фотодиоды, квантовые точки.

В новой статье, опубликованной в 1932 году в журнале «Physikalische Zeitschrift der Sowjetunion – PZ der Sowjetunion» (Физический журнал Советского Союза), Тамм анализирует возможные связанные состояния электронов на поверхности кристаллов [21].

Пользуясь случаем, нельзя не сказать несколько слов об этом журнале как об одном из начинаний Тамма. Журнал «Physikalische Zeitschrift

der Sowjetunion» (сокр. «PZ der Sowjetunion») был научным изданием, созданным в 1932 году по инициативе группы советских физиков, включая таких учёных, как И.Е. Тамм и Л.Д. Ландау при поддержке немецких коллег. Издателем выступало Общество физиков-теоретиков и математиков при Академии наук СССР совместно с немецким издательством.

Журнал был предназначен для публикации передовых исследований в таких областях, как квантовая механика, теория относительности и физика твёрдого тела. Статьи публиковались преимущественно на немецком языке.

Издание прекратилось в 1938 году из-за ухудшения мировой политической ситуации.

Однако основную ценность этой работы составили впервые предложенные Таммом связанные поверхностные электронные состояния на границе кристалла с вакуумом, получившие позже общепринятое название «уровни Тамма, или таммовские поверхностные состояния». Эта статья стала основополагающей для физики твёрдого тела и открыла новое направление: физику поверхностных состояний.

В качестве инструмента своего анализа Тамм использовал решения уравнения Шрёдингера для двух вариантов: одномерной и трёхмерной кристаллических решёток. Рассмотрев простой пример с бесконечно глубокой потенциальной ямой, Тамм перешёл к варианту, когда правая потенциальная стенка была заменена периодическим потенциальным полем $U(x)$. Это осциллирующее поле Тамм ассоциировал с колебаниями кристаллической решётки.

Даже в том случае, если максимальная величина потенциала этого поля меньше, чем энергия W связанного электрона, при определённых значениях W электронная волна может полностью отражаться от потенциальной решётки. При этом электрон оказывается запертым между потенциальной стенкой слева и потенциальной решёткой справа, волновая функция будет иметь максимальное значение на поверхности раздела и экспоненциально спадать по мере удаления в обе стороны от поверхности раздела.

При таком подходе он доказал, что должны существовать необыч-

ные состояния, которые возникают из-за взаимодействия электрона с осцилляциями кристалла, с одной стороны и потенциальным барьером внешней среды, с другой. Эти состояния – «уровни Тамма» возникают, когда электрон попадает в запрещённую зону кристалла, но его энергия остаётся ниже потенциального барьера внешней среды.

Таким образом, эти уровни характеризуются такими энергетическими состояниями, при которых электроны «застревают» у поверхности кристалла. Их волновая функция (решения уравнения Шрёдингера) быстро убывает как вглубь кристалла, так и наружу, то есть электроны локализуются вблизи поверхности.

Также в статье было показано, что электронная проводимость в диэлектриках может возникать только при возбуждении электронов внешним излучением, например светом. Этот процесс Тамм назвал «внутренним фотоэффектом».

В этой статье Игорь Тамм впервые показал, что сама поверхность кристалла является источником новых квантовых состояний, которые принципиально не могут существовать в бесконечном кристалле.

В современной теоретической физике различают собственные (таммовские) и несобственные поверхностные состояния. Собственные состояния связаны с самим обрывом решётки, а несобственные – с локальными дефектами на границе.

Задачи, связанные с таммовскими состояниями, возникают в самых неожиданных областях науки и техники. Так, например, исследования искусственных наноалмазов размером 2–5 нм, проведённые группой российских учёных, выявили поверхностные состояния Тамма, которые проявляются только на исключительно чистых образцах [22]. Было обнаружено, что в рамановском спектре появляются дополнительные линии, например, 1325, 1500, 1600 см^{-1} , которых нет в обычных алмазах. Эти линии связаны с поверхностными состояниями Тамма. В статье отмечается, что при использовании лазеров с разными длинами волн (от 257 до 1064 нм) интенсивность и положение Рамановских пиков меняются. С помощью компьютерного моделирования была рассчитана плотность фоннных состояний (PhDOS), кото-

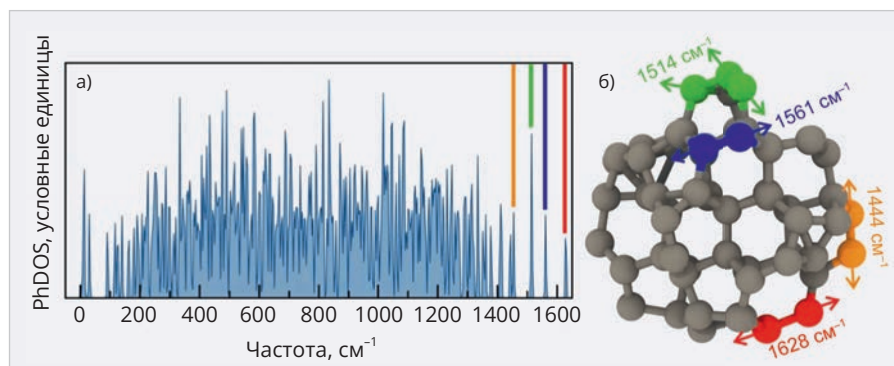


Рис. 4. Плотности фоннных состояний исследованных наноалмазов (а) и визуализация атомных колебаний, соответствующих высокочастотным фоннным модам (б)

рая показала, что высокочастотные колебания выше 1333 см^{-1} связаны с поверхностными атомами наноалмаза. Полученные значения плотности фоннных состояний исследованных наноалмазов показаны на рис. 4а. Упрощённая визуализация атомных колебаний, соответствующих высокочастотным фоннным модам, представлена на рис. 4б. Цветные полосы на рис. 4а соответствуют фоннным модам, показанным на рис. 4б. Стрелки указывают направление атомных колебаний.

Измерения, проведённые с помощью ядерного магнитного резонанса, показали, что эти линии не связаны с примесями или другими типами углерода, такими как, например, графит с sp^2 -связями. Наноалмазы обладают уникальными свойствами, такими как высокая твёрдость. Их модуль упругости 607 ГПа, что больше, чем у обычного алмаза (443 ГПа). Поверхностные состояния Тамма в наноалмазах вызывают особые оптические свойства, такие как резонансное рамановское рассеяние, зависимое от энергии возбуждения. Эти свойства делают наноалмазы перспективными для современных и будущих электронных компонентов.

Благодаря резонансному рассеянию наноалмазы могут использоваться в сенсорах для обнаружения света или химических веществ. Локализация света на поверхности наноалмазов может быть применена в фотонных чипах или для управления световыми сигналами в нанoeлектронике. Оптические свойства, связанные с поверхностными состояниями, могут дополнить использование NV-центров (дефектов азота) в наноалмазах для квантовых компьютеров.

Детальный обзор проблем, связанных с таммовскими состояниями, можно найти в монографии С. Дэвисона и Дж. Левина «Поверхностные (таммовские) состояния» [23].

Предложенные Игорем Таммом концепции легли в основу так называемых таммовских плазмонов (Tamm Plasmon), с помощью которых описывается механизм поведения электронов на границе между металлом и специальным диэлектрическим материалом, называемым «распределённым брэгговским отражателем» (Distributed Bragg Reflector – DBR). Не погружаясь глубоко в сложную математику, можно простыми словами описать эти механизмы следующим образом.

С одной стороны, электроны могут свободно перемещаться внутри проводника. С другой – диэлектрик (DBR), состоящий, например, из чередующихся слоёв GaAs/AlAs, действует как зеркало для света, отражая его определённым образом. На границе, разделяющей эти две структуры, происходят сложные комбинированные процессы, в которых задействованы свет (фотоны) и поверхностные плазмонные волны – СП (Surface Plasmon Polaritons – SPP), которые возникают в результате коллективных колебаний свободных электронов в металлах и полупроводниках. Они распространяются вдоль границы между металлом и диэлектриком, перенося энергию на большие расстояния. Можно сказать, что SPP похожи на волны, возникающие на поверхности воды под действием ветра и распространяющиеся вдоль реки, ограниченной берегами.

Значения волнового вектора у поверхностного плазмона SPP превосходят значения волнового векто-

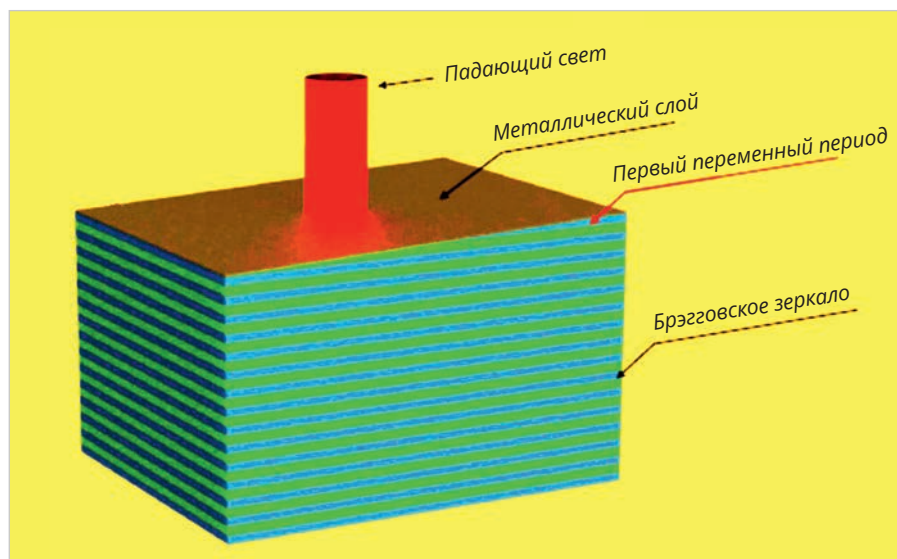


Рис. 5. Схематическое изображение структуры таммовского плазмон-поляритона на основе GaAs/AlAs и DBR из золотой плёнки

ра света в вакууме. Поэтому SPP не может быть возбуждён светом. Для возбуждения SPP нужны специальные методы, например призмы или особые наноструктуры. Таммовский плазмон, напротив, может быть возбуждён светом напрямую благодаря малым значениям волнового вектора. Для того чтобы различать эти два типа плазмонов, стали употреблять термин «таммовские плазмон-поляритоны».

В отличие от SPP, таммовские плазмон-поляритоны не распространяются вдоль границы кристалла, а локализованы в одной точке и образуют стоячую волну. Благодаря DBR свет как бы «запирается» в этой области, создавая узкую спектральную линию.

Поскольку таммовские плазмон-поляритоны (ТПП) обладают высокой чувствительностью к параметрам гибридных структур, в которых они возникают, они являются крайне перспективными для создания датчиков, способных точно измерять изменения показателя преломления, а также для разработки лазеров, оптических переключателей, фильтров и селективных излучателей света и тепла. Такие технологии находят применение в современной электронике, включая оптические сенсоры, фотонные устройства и энергоэффективные источники излучения.

Схематическое изображение структуры Тамма, состоящей из распределённого брэгговского отражателя (DBR) на основе GaAs/AlAs и золотой плёнки, показано на рис. 5.

Более подробно таммовские плазмон-поляритоны будут рассмотрены в следующей части статьи.

В 1933 году в том же журнале «Physik der Sowjetunion» Игорь Тамм опубликовал статью о работе выхода электронов из металла и термоэлектронной эмиссии, подготовленную совместно со своим аспирантом, а впоследствии сотрудником «первого созыва» Теоретического отдела Физического института Дмитрием Ивановичем Блохинцевым [24].

В 1933 году на момент опубликования статьи были известны эмпирические законы термоэлектронной эмиссии (уравнение Ричардсона) и основные принципы статистики Ферми – Дирака.

Однако единой теории, согласующей эти концепции с учётом квантово-механического рассмотрения потенциального барьера на поверхности металла, тогда ещё не было. В этой статье Тамм и Блохинцев объяснили природу термоэлектронной эмиссии в металлах (ТЭЭМ), основываясь на том, что в металле электроны распределены по энергиям согласно статистике Ферми – Дирака, а не классическому максвелловскому закону. При нагреве металла часть электронов приобретает достаточно высокую энергию, чтобы преодолеть потенциальный барьер на границе металл–вакуум, который определяется работой выхода электрона из металла. Именно эта группа электронов формирует термоэлектронный поток. Авторы рассмотрели механизм движения электронов, имеющий статистический

характер, с учётом вероятностей их прохождения через потенциальный барьер. В результате была получена формула тока эмиссии, по структуре напоминающая формулу Ричардсона, но включающая дополнительные экспоненциальные члены, учитывающие зависимость работы выхода от температуры. В предельном случае высоких температур формула эмиссионного тока сводится к уравнению Ричардсона. Однако для точного описания электронов, покидающих металл, необходимо учитывать статистику Ферми – Дирака и особенности потенциального барьера.

Работу выхода Тамм и Блохинцев интерпретировали как энергетический барьер, который должен преодолеть электрон, чтобы покинуть металл и перейти в вакуум. При таком подходе работа выхода определялась как разность между уровнем наибольшей энергии электрона при абсолютном нуле и внешним потенциалом, удерживающим электроны внутри металла. Под воздействием однородного электрического поля, направленного от поверхности металла, потенциальный барьер на границе металл–вакуум слегка понижается, что облегчает электронам преодоление этого барьера и эмиссию из металла. Это происходит потому, что потенциальная энергия электрона вблизи поверхности складывается из двух частей: электростатического взаимодействия с поверхностным зарядом («силы зеркального изображения») и энергии взаимодействия с внешним электрическим полем. В результате внешнее электростатическое поле изменяет профиль поверхности потенциального барьера, уменьшая эффективную работу выхода, что приводит к повышению термоэлектронной эмиссии.

Работу Игоря Тамма и Дмитрия Блохинцева [24] можно рассматривать как заключительный этап, который помог перейти от эмпирических и полуэмпирических моделей к детальной квантово-механической теории электро-эмиссионных процессов. Она оказала значительное влияние на развитие таких приложений современной электроники, как, например, холодные катоды с автоэлектронной эмиссией, фотоэлектрохимическая катализация, электронная микроскопия, а также на другие сферы современной электроники.

В середине 30-х годов И.Е. Тамм начал серьёзно заниматься проблемами ядерной физики. В этот период он публикует ряд работ по таким вопросам, как, например, релятивистское взаимодействие элементарных частиц (1934), магнитный момент нейтрона (1934), взаимодействие нейтронов и протонов (1934), бета-радиоактивность (1936), взаимодействие нейтронов с электронами (1938).

Значительный период (1939–1951) был посвящён ядерной физике. В 1939 году он опубликовал работу «О структуре ядер» (*Physical Review*), в 1940 году – серию работ о нейтрине и взаимодействии тяжёлых частиц.

Все эти работы представляют несомненный интерес с точки зрения ядерной физики. Их оригинальные тексты можно найти в «Собрании научных трудов И.Е. Тамма» [14].

В нашей статье остановимся на работе И.Е. Тамма и С.А. Альтшулера (1934), посвящённой магнитному моменту нейтрона. Кроме того, что эта работа описывает фундаментальные свойства нейтрона, повлиявшие на дальнейшее развитие ядерной физики, она имеет также большое прикладное значение, в том числе и для современной электроники [25].

Нейтрон был открыт в 1932 году английским физиком Джеймсом Чедвиком. В 1933 году Альфред Ланде опубликовал статью в журнале *Physical Review*, в которой он исследовал магнитный момент протона. То есть в это время было известно, что протоны имеют магнитный момент. Однако о нейтральных частицах ядра – нейтронах существовало ошибочное мнение, что они магнитными свойствами не обладают.

Игорь Тамм, интересовавшийся новыми открытиями в физике, поручил своему аспиранту Семёну Александровичу Альтшулеру всесторонне изучить эту тему. Крайне интересным в этой проблеме было то, что ядра с чётным числом протонов и нейтронов никак не проявляют магнитных свойств. В то же время, если в ядре наблюдается избыток или недостаток нейтронов, оно ведёт себя, как магнит. Отсюда они сделали гениальный вывод: раз добавление одного нейтрона делает ядро магнитным, значит, сам нейтрон должен обладать магнитным моментом. Революционность этой идеи заключалась в

том, что нейтральная частица может быть магнитом.

Тамм не стал углубляться в сложные квантово-механические расчёты. Вместо этого он использовал существующие экспериментальные данные по магнитным моментам различных ядер. Используя простую математическую модель, он оценил, каким должен быть магнитный момент нейтрона, чтобы объяснить наблюдаемые экспериментальные данные.

Авторы предсказали, что магнитный момент нейтрона составляет примерно половину ядерного магнетона и его направление противоположно механическому (спиновому) вращению.

Сама мысль о наличии магнитного момента у нейтрона и его составной структуре в то время встретила многочисленные возражения, в частности, со стороны Нильса Бора.

Несмотря на то что много позже экспериментально измеренный магнитный момент нейтрона оказался равен $-1,913042$ ядерного магнетона, эта работа Игоря Тамма имеет фундаментальное значение как для теоретических основ ядерной физики, так и для различных приложений, начиная от кубитов квантовых компьютеров и заканчивая установками термоядерного синтеза.

Эта статья является ярким доказательством таланта Игоря Евгеньевича Тамма, показывая способность физика-теоретика увидеть физический смысл нового явления, скрытый за математическими формулами.

Вывод Тамма о том, что магнитные свойства нейтрона – это не просто абстрактное явление, а реализация скрытой внутренней структуры частицы, был действительно провидческим. Он предположил, что магнитный момент возникает из-за движущихся внутри частицы зарядов или спинов, что связано с квантовыми свойствами самой частицы. Таким образом, магнитный момент нейтрона воспринимался как проявление квантово-механических свойств и внутренней динамики частиц, приводящей к взаимодействиям с внешними магнитными полями. Это гениальное предсказание Игоря Тамма подтвердилось в 1964 году, когда Мюррей Гелл-Манн и Джордж Цвейг независимо разработали теорию строения адронов,

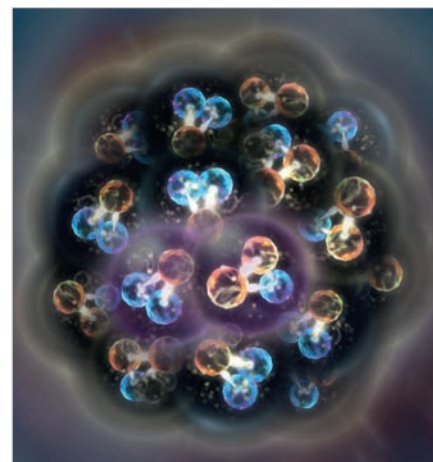


Рис. 6. Коррелированные пары протонов и нейтронов, выделенные фиолетовым цветом, взаимодействуют с кварками и глюонами [26]

утверждавшую, что протоны и нейтроны состоят из кварков. Экспериментальные доказательства существования кварков были получены в 1968 году в Стэнфордском центре линейных ускорителей (SLAC).

Авторам недавно опубликованной работы удалось показать корреляцию протон-нейтрон пар, основанную на взаимодействии с кварками и глюонами (рис. 6).

С точки зрения современной электроники понимание магнитных свойств нейтрона стало основой для развития технологий магнитной записи информации.

Точное знание магнитного момента нейтрона позволило создать сверхчувствительные магнитометры и другие измерительные приборы, используемые в современной электронике.

Эта работа заложила теоретические основы для развития ЯМР-технологий, которые сегодня используются не только в электронике для анализа материалов, но также и в медицине (МРТ).

Благодаря наличию магнитного момента у нейтрона дифракция нейтронов используется для изучения магнитных структур в кристаллах и сложных материалах. Это единственный инструмент, позволяющий напрямую исследовать магнитное упорядочение в магнетиках, что невозможно с помощью рентгеновских лучей. С помощью нейтронных методов удалось идентифицировать сложные спиральные и периодические магнитные структуры в новых материалах, что привело к созда-

нию новых магнитных сплавов и устройств.

Следующим «захватывающим увлечением» Игоря Тамма стало загадочное излучение, описанное Павлом Черенковым в статье, опубликованной в журнале «Доклады АН СССР» в 1934 году [27]. Эта статья была подготовлена по результатам аспирантской работы Черенкова, которая заключалась в изучении люминесценции различных растворов под действием γ -радиации. Научным руководителем был президент АН СССР Сергей Иванович Вавилов, крупнейший специалист в области люминесценции. В ходе своих экспериментов Черенков обнаружил непонятное слабое свечение в чистой воде при облучении воды препаратом радия. Вследствие незначительной яркости свечения для количественных измерений в большинстве случаев применялся метод визуальной фотометрии слабых свечений, разработанный С.И. Вавиловым.

Это свечение коренным образом отличалось от обычной флуоресценции. Этим результатам не поверил С.И. Вавилов, утверждавший, что вода светиться не может, и это просто ошибка эксперимента. Однако Павел Черенков продолжил исследования и после двух лет сложных дополнительных экспериментов не только подтвердил эффект свечения, возникающего в воде под действием гамма-излучения, но и определил его направленность [28].

Первым, кто попытался теоретически описать это явление, был сам С.И. Вавилов (ДАН СССР, 2, 457, 1934). Не вдаваясь в сложные детали, отметим только, что интерпретация Вавилова оказалась ошибочной.

Правильное теоретическое объяснение эффекта Черенкова впервые дали Игорь Тамм и Илья Франк в 1937 году [29].

В этой статье они показали, что оптически прозрачное вещество, в котором движется электрон, излучает когерентно, по крайней мере, на протяжении, сравнимом по своим размерам с длиной волны видимого света. Это свечение, получившее позднее название «Черенковское излучение» – ЧИ (Cherenkov Radiation), частично поляризовано, и вектор колебаний параллелен движению электрона. Характерным его свойством является резкая асимметрия в

распределении интенсивности, проявляющаяся в том, что в направлении движения электрона света излучается много больше, чем в противоположном направлении.

Таким образом, ЧИ не может быть вызвано ни рассеянием электронов на атомных ядрах, ни взаимодействием с отдельными атомами.

Тамму и Франку удалось создать строгую теоретическую модель, которая объяснила все наблюдаемые особенности ЧИ.

Характерной особенностью эффекта Черенкова является строгая направленность возникающего излучения. Свет распространяется только под определённым углом θ к направлению движения электрона: $\cos \theta = 1/(\beta n)$, где $\beta = v/c$. Это объясняет наблюдавшуюся Черенковым асимметрию свечения.

Результаты дополнительных экспериментов и их теоретическое описание были приведены в статье Игоря Тамма в соавторстве с Ильёй Франком и Павлом Черенковым, опубликованной в ДАН СССР в 1938 году [30]. Анализируя результаты возникновения свечения в чистых жидкостях под действием быстрых электронов, они показали, что в них возникает слабое видимое свечение, которое существенно отличается от каких-либо ранее известных видов люминесценции. Свечение не тушится ни изменением вязкости жидкостей при нагревании, ни растворением в них активных тушителей флуоресценции типа KI и AgNO_3 .

Степень поляризации возникающего свечения не меняется с изменением вязкости. Направление преимущественных колебаний электрического вектора во всех случаях совпадает с направлением оси первичного пучка. Спектр свечения непрерывный до 2200 \AA (для воды).

Для различных жидкостей угол, под которым наблюдается максимум излучения, возрастает с увеличением показателя преломления.

В 1939 году Игорь Тамм фактически завершил формирование теоретических основ эффекта Черенкова, обеспечив тем самым его использование в физике элементарных частиц. В статье, опубликованной в «Journal of Physics of the USSR» [31], он более подробно рассмотрел излучение равномерно движущегося заряда. В ней также обсуждаются условия, при

которых теория может быть применена к видимому излучению электронов с учётом того, что при прохождении через среду они отклоняются в результате соударений, постепенно теряют энергию на ионизацию и т.д.

Эта статья переносит акцент с конкретного экспериментального явления на общую физическую проблему излучения равномерно движущегося заряда в среде. Тамм формулирует это как фундаментальное исключение из классического правила об отсутствии излучения у равномерно движущихся зарядов.

Здесь приведён более строгий вывод основной формулы эффекта Черенкова и его центральной идеи, заключающейся в том, что заряд излучает электромагнитные волны при равномерном движении, если его скорость превышает фазовую скорость света в данной среде. При выводе основной формулы Тамм учёл такие важные моменты, как дисперсия среды, релятивистский анализ с точки зрения системы покоя электрона, конечное время движения.

Статья подчёркивает полное согласие теории Тамма – Франка с экспериментами Черенкова и независимыми исследованиями Коллинза и Рилинга [32], подтверждающими выводы об интенсивности и угловом распределении, поляризации излучения, зависимости от оптических свойств среды, энергетическом пороге.

Физический смысл теоретического объяснения эффекта Черенкова, которое дали Игорь Тамм и Илья Франк, можно понять на следующем простом и наглядном примере. Если представить себе движущееся судно на спокойной глади озера, то в случае, когда его скорость небольшая, вокруг него возникают лишь небольшие круговые волны. Однако если скорость судна превышает минимальную скорость волн на поверхности воды (0,83 км/ч), судно будет непрерывно генерировать волнение даже в том случае, когда его скорость остаётся постоянной. При этом за судном потянется характерный V-образный след из волн. Это явление демонстрирует ударную волну на воде. Аналогичный эффект наблюдается, когда возникает звуковая ударная волна при превышении самолетом скорости звука.

Точно так же ведёт себя электрон, движущийся в оптически прозрачной

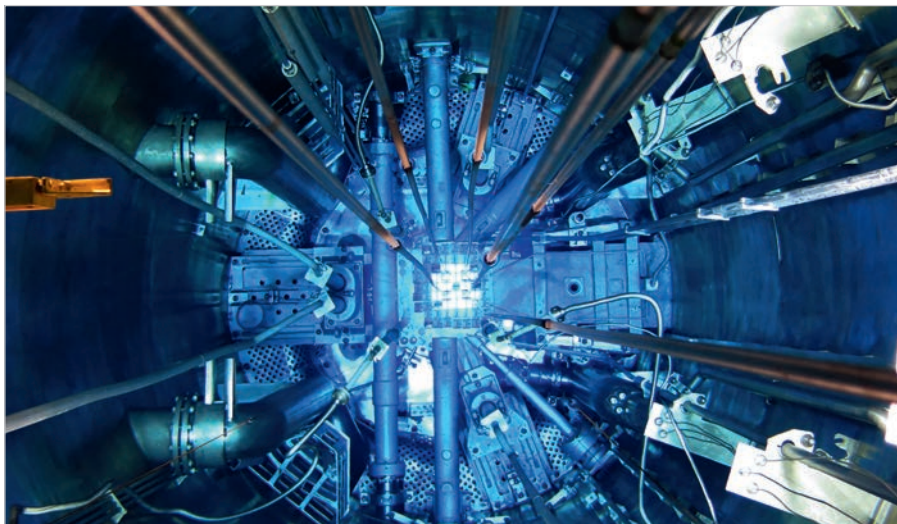


Рис. 7. Излучение Черенкова наблюдается в воде, окружающей топливо в ядерных реакторах



Рис. 8. За открытие черенковского излучения и разработку его теории Игорь Тамм, Илья Франк и Павел Черенков (трое в центре слева направо) получили в 1958 году Нобелевскую премию по физике

среде. Когда электрон летит через стекло или воду со скоростью, превышающей скорость света в этой среде, он создаёт световую ударную волну в виде голубоватого свечения, направленно-го вперёд по ходу движения электрона.

Хорошо известно, что излучение Черенкова наблюдается в воде, окружающей топливо в ядерных реакторах [33] (рис. 7).

Тамм объяснял это тем, что движущийся электрон, например, в воде непрерывно возмущает электрическое поле вокруг себя. Эти возмущения распространяются со скоростью света в воде, которая меньше скорости света в вакууме в n раз, где n – показатель преломления света в воде.

Если электрон движется медленно, каждое новое возмущение не успевают «догнать» предыдущие, поскольку они просто гасят друг друга, и свечения нет. Однако когда электрон обгоняет вызванные им световые возмущения, они начинают складываться в определённом направлении, создавая когерентное излучение. При этом излучение возникает только при выполнении простого условия: $v > c/n$, где v – скорость электрона, c – скорость света в вакууме, n – показатель преломления оптически прозрачной среды.

Так, например, для воды $n = 1,33$. Это означает, что для возникновения черенковского излучения элек-

трон должен иметь энергию больше 260 кэВ, что вполне реально в случае радиоактивного распада. В целом эта статья Игоря Тамма имеет фундаментальное значение, поднимая эффект Черенкова на уровень базового физического принципа и показывая его место в общей теории электромагнитного излучения. Таким образом, конкретное экспериментальное открытие перешло в разряд универсального физического закона.

Во время Великой Отечественной войны (1941–1945) Игорь Тамм занимался проблемами физики металлов, связанными с новыми типами оружия. В частности, он исследовал магнитные свойства различных сплавов. Это были закрытые для публикации работы.

В 1944 году Игорь Тамм и Илья Франк вновь вернулись к теме черенковского излучения [34]. Этому во многом способствовала опубликованная Э. Ферми статья, в которой он описал свою новую теорию ионизационных потерь электрона [35]. Для учёта влияния среды на поле движущегося электрона Ферми использовал метод, аналогичный тому, который был применён Игорем Таммом в теории эффекта Черенкова [30].

В этой статье Тамм отмечает, что результаты Ферми могли бы быть получены в более общем виде и простым способом, если воспользоваться расширенной теорией эффекта Черенкова. Для этого достаточно было учесть поглощение света в среде и считать показатель преломления величиной комплексной, а не действительной [34].

Кроме того, Тамм и Франк ещё раз показали в деталях, что ускорение электронов играет лишь второстепенную роль, а основной механизм связан с равномерным движением.

За открытие черенковского излучения Павел Черенков и разработку его теории Игорь Тамм и Илья Франк получили в 1958 году Нобелевскую премию по физике (рис. 8).

В своей речи Манне Сигбан из Шведской королевской академии наук отметил, что «открытие явления, ныне известного как эффект Черенкова, представляет собой яркий пример того, как относительно простое физическое наблюдение при правильном подходе может привести к важным открытиям и проложить новые пути для дальнейших исследований».

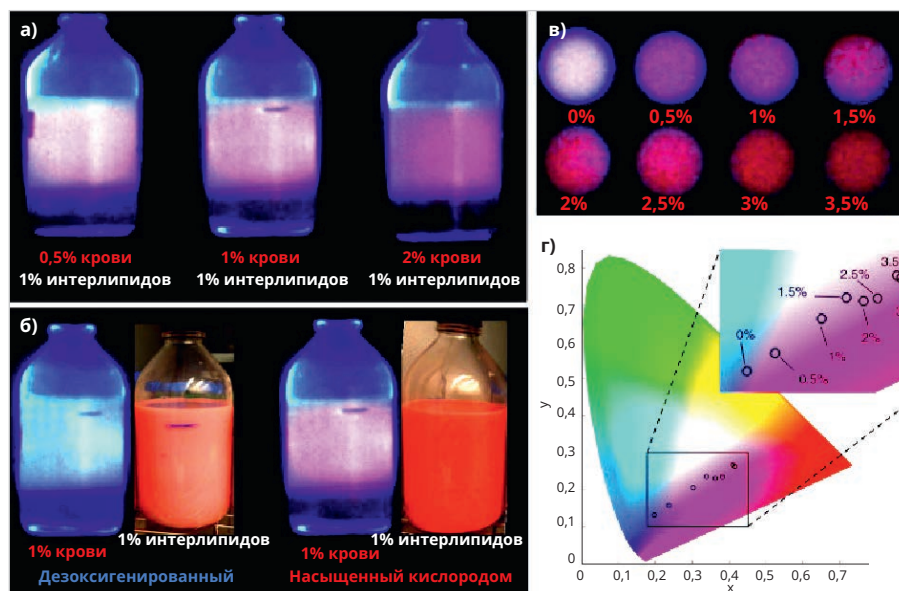


Рис. 9. Изменение цвета ЧИ для разных биологических образцов под действием импульсного рентгеновского излучения (пояснения приведены в тексте)

Действительно, рассмотренные выше работы этих нобелевских лауреатов оказали заметное влияние на самые разнообразные направления науки и техники.

Идеи Игоря Тамма продолжают стимулировать научный поиск и в наше время. В 2025 году 85-летний юбилей со дня опубликования легендарной статьи Тамма научный коллектив физиков российского Университета ИТМО (СПб.) отметил новой работой, описывающей аттосекундные явления в эффекте Черенкова [36]. В этой теоретической работе получены параметры, определяющие конечную длину формирования и время распространения фотона, которое становится отрицательным вблизи угла Черенкова. Показано, что конечная длительность вспышки, связанная с размером электронного пакета, а также сдвиг времени прибытия фотона имеют аттосекундные масштабы (аттосекунда равна одной квинтиллионной доле секунды (10^{-18} секунды)). Необычно то, что временной сдвиг фотона может быть как положительным, так и отрицательным.

Идеи Игоря Тамма нашли применение при разработке нового медицинского оборудования, анализирующего спектр ЧИ, возникающего под действием импульсного рентгеновского излучения (4 мкс), вырабатываемого стандартной терапевтической рентгеновской трубкой с напряжением 6 МВ. Благодаря разному коэффициенту преломления органы с различным содержанием крови испускают

ЧИ разного цвета [37]. Изменение цвета ЧИ для разных биологических образцов под действием импульсного рентгеновского излучения (4 мкс) показано на рис. 9.

Изменение концентрации крови в водных растворах, содержащих 1% интралипида для имитации тканевого рассеяния, влияет на цвет черенковского излучения образцов, показанных на рис. 9а. Повышенная оксигенация увеличивает сигнал в красном канале черенковских изображений (рис. 9б) и наблюдается благодаря уменьшению поглощения красного света оксигемоглобином по сравнению с дезоксигемоглобином.

Систематическое изменение концентрации крови в небольших образцах 1% раствора интралипида (рис. 9в) демонстрирует почти монотонное распределение цветов по оси от красного к синему.

Изображение наложено на диаграмму цветности CIE в цветовом пространстве x-y (рис. 9г).

На самом деле это достаточно сложный технический эксперимент, использующий уникальное электронное оборудование, позволяющее регистрировать крайне слабое по интенсивности импульсное (4 мкс) ЧИ на уровне существующего фотонного фона. К деталям этого эксперимента мы вернёмся в следующей части статьи.

В качестве другого примера влияния работ Игоря Тамма на современную электронику можно привести научное приборостроение.

Черенковские детекторы, являющиеся одними из основных инструментов ядерной физики, позволяют регистрировать быстрые частицы с высокой эффективностью, измерять скорость частиц и идентифицировать их по порогам возникновения излучения. Достаточно отметить, что детекторы элементарных частиц (Ring Imaging Cherenkov – RICH) используются в Большом адронном коллайдере.

В астрофизике черенковские телескопы для регистрации широких атмосферных ливней (ШАЛ) позволяют регистрировать вторичные продукты галактических космических лучей.

Состав галактических космических лучей (ГКЛ) представляют большей частью протоны (около 90%). Считается, что основным источником ГКЛ являются взрывы сверхновых звезд в нашей галактике. Эти взрывы создают ударные волны, которые ускоряют частицы до гигантских энергий (10^{21} эВ), позволяющих этим частицам распространяться по галактике и достигать Земли. В результате взаимодействия с земной атмосферой образуются каскады новых ядер и гамма-квантов, вызывающих ШАЛ, шириной десятки километров, в которых задействованы миллиарды частиц.

Этих частиц настолько много, а вспышки ЧИ столь короткие (5–20 наносекунд), что необходимо регистрировать отдельные фотоны на уровне солнечного света.

В качестве примера такого типа черенковских телескопов ШАЛ можно привести IACT – Imaging Atmospheric Cherenkov Telescope. Принцип действия этого телескопа проиллюстрирован схемой на рис. 10.

Общая площадь поверхности, освещённая этой вспышкой, составляет многие сотни квадратных метров.

Поэтому такие телескопы объединяются в сеть, состоящую из отдельных устройств, распределённых по высоте и ширине, обычно в горной местности. На рис. 10 показана структурная схема черенковского телескопа, предназначенного для регистрации ШАЛ [38].

Такой телескоп в общем случае представляет собой большое сегментированное зеркало, которое отражает черенковское излучение на массив фотоумножителей. Фотоумножите-

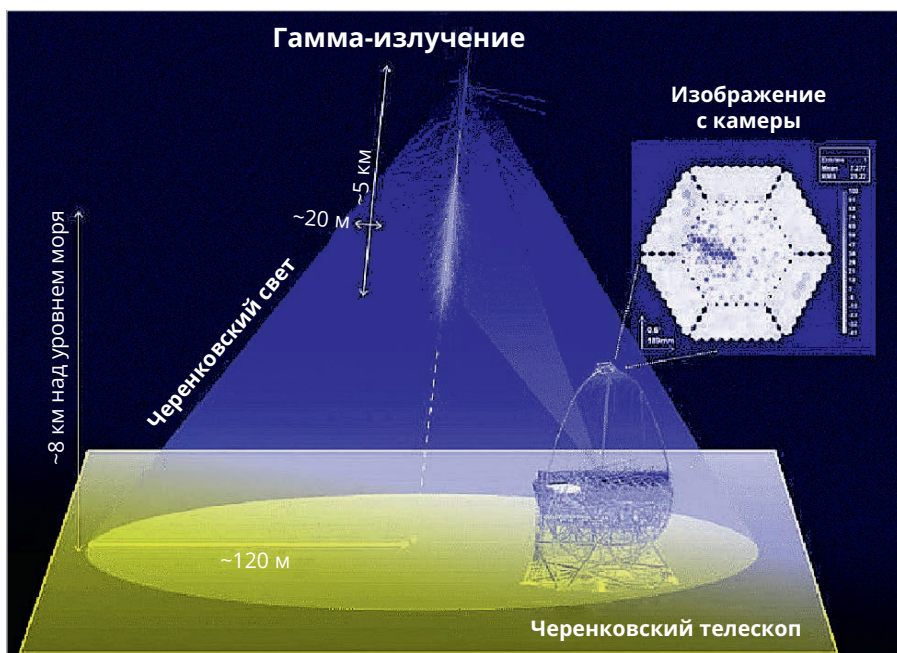


Рис. 10. Структурная схема черенковского телескопа для регистрации ШАЛ



Рис. 11. Оптический модуль нейтринного телескопа Baikal-GVD

ли соединены с быстродействующей электроникой, которая усиливает, оцифровывает и регистрирует картину или изображение ливня. Наиболее эффективным режимом работы является использование массива таких телескопов, которые обычно могут быть расположены на расстоянии от 70 до 120 метров друг от друга. В современных моделях подобных устройств в качестве детекторов используется новый тип фотоумножителей, так называемые SiPM – Silicon Photomultiplier – твердотельные детекторы, чувствительные к отдельным фотонам. Они представляют собой матрицу микроячеек с лавинными фотодиодами, работающими в гейгеровском режиме.

Для регистрации нейтрино существует другой тип телескопов, измеряющих «прямое» ЧИ. В них используются в качестве тормозящей среды огромные количества воды или льда. Например, российский нейтринный телескоп Baikal-GVD представляет собой кластерную структуру из измерительных блоков, расположенных на дне озера Байкал. Тормозящей средой служит вода озера. Этот телескоп Baikal-GVD входит в Глобальную нейтринную сеть (Global Neutrino Network – GNN) наряду с телескопами IceCube на Южном полюсе и KM3NeT в Средиземном море [39].

Нейтринный телескоп Baikal-GVD состоит из гирлянд оптических модулей (рис. 11).

Каждый из четырнадцати кластеров содержит 8 гирлянд по 36 модулей. Гирлянды заякорены на дне. Главная гирлянда располагается в центре кластера, а остальные в радиусе 60 метров вокруг неё.

Следующая значимая статья Игоря Тамма была написана в соавторстве с Л.И. Мандельштамом. В 1945 году они опубликовали одну из наиболее интересных своих работ, касающуюся основного закона сохранения энергии в квантовой механике [40]. Известно, что полная энергия замкнутой квантово-механической системы не имеет одного определённого, постоянного во времени значения. Однако здесь постоянной остаётся вероятность измерить каждое из возможных значений энергии системы.

Они предложили строгое математическое обоснование соотношения неопределённости для энергии и времени, опираясь на уравнение Шрёдингера. Их идея: если энергия системы имеет разброс (ΔH), то это связано с тем, как быстро изменяются другие физические величины системы, такие, например, как координаты или импульсы. Это значит, что для того, чтобы точно измерить энергию системы, необходимо затратить больше времени. С другой стороны, за короткое время энергия будет определена с меньшей точностью.

В качестве иллюстрации к своей теории авторы рассмотрели, как соотношение работает при столкновении двух частиц. Если энергия системы имеет малый разброс, процесс изменения скорости одной из частиц занимает больше времени.

Если состояние системы (например, атома) нестабильно и быстро распадается (короткое время жизни τ), то энергия этого состояния имеет большой разброс (ΔH). Это объясняет, почему спектральные линии атомов не являются идеальными, а имеют определённый разброс ширины.

Современная электроника всё больше переходит на квантовый уровень. Поэтому чисто теоретическая работа Тамма и Мандельштама позволяет понять, как фундаментальные принципы квантовой механики применяются к реальным системам при разработках новых технологий. Так, в туннельных диодах, квантовых точках или атомных часах электроны переходят между состояниями с разной энергией за определённое вре-

мя. Точное управление квантовыми состояниями требует учёта соотношения неопределённости, полученного Игорем Таммом.

Формула, полученная для соотношения неопределённости энергии и времени, объясняет ширину спектральных линий, что важно при проектировании лазеров для конкретных приложений. Короткое время жизни состояния атома определяет большой разброс энергии, что приводит к более широким спектральным линиям. Это, в свою очередь, влияет на точность и стабильность лазеров.

В наноразмерных устройствах, таких как одноэлектронные транзисторы, соотношение неопределённости Тамма помогает оценить, как быстро можно переключать состояния в таких устройствах, что важно для их скорости и энергоэффективности.

Многие из написанных Игорем Таммом работ базируются на математическом аппарате, объединяющем квантовую механику и специальную теорию относительности. Эти идеи легли в основу нового научного направления, получившего позже название «квантовая теория поля» (КТП), которая является обобщением квантовой механики на случай взаимопревращения частиц при высоких энергиях и околосветовых скоростях.

В 1945 году Игорь Тамм опубликовал статью, посвящённую изучению взаимодействий элементарных частиц с учётом релятивистских эффектов, то есть высоких скоростей, близких к скорости света. В этой статье он предложил математический метод для решения некоторых задач КТП [41].

Основная особенность теории Тамма заключалась в том, что он рассматривал частицы (например, электроны) и поле их взаимодействия (электромагнитное или мезонное) как квантованные системы. Это значит, что поле состоит из «порций» энергии – квантов, таких как фотоны (для электромагнитного поля) или мезоны (для ядерных взаимодействий). Для этого Тамм использовал гамильтониан, который состоял из двух частей: энергии свободных частиц и энергии их взаимодействия. Это позволило ему математически описать процесс взаимодействия между частицами, обменивающимися между собой квантами поля.

Анализируя модельные расчёты для случаев, когда частицы образуют устойчивые системы, например атомы или ядра, где их энергия меньше суммы энергий покоя отдельных частиц, он показал, что можно значительно упростить модель. Для этого можно в первом приближении упростить уравнения, отбросив малозначимые члены за счёт замены полной энергии системы на сумму энергий покоя. Также можно не учитывать процессы аннигиляции и образования пар.

Кроме того, Тамм рассмотрел особый случай взаимодействия частиц с целым спином, опосредованного мезонами с малой массой покоя. Это было крайне важно для понимания ядерных сил, которые связывают протоны и нейтроны в ядре.

К таким же выводам спустя пять лет пришёл американский физик Сидни Данков (Sidney Michael Dancoff) [42]. Он усовершенствовал метод Тамма, решив задачу взаимодействия нуклонов с учётом отдачи нуклонов при испускании и поглощении мезонов для случая нейтрального скалярного мезонного поля.

Эти две независимые работы Игоря Тамма и Сидни Данкова сформировали универсальный метод расчётов, позволяющий в пределах заданной точности отбрасывать определённые члены уравнения. Этот метод, первоначально использованный в квантовой теории поля, позже получил название «Тамма – Данкова».

К вопросу об унификации уравнений для квантовой теории поля Игорь Тамм вернулся в середине 1950-х. К этому времени появились новые результаты исследований как в ядерной физике, так и в КТП. Метод Тамма – Данкова требовал доработок и уточнений. Поэтому в 1955 году И.Е. Тамм вместе с В.П. Силиным и В.Я. Файнбергом опубликовали статью, посвящённую усовершенствованному методу Тамма – Данкова с описанием его применения к рассеянию мезонов нуклонами [43]. Эта большая и сложная работа в основном состоит из математических формул. Не вдаваясь в детали, отметим, что авторы учли такие важные моменты, как устранение расходимостей, адаптированное под задачи для ядерной физики, а также динамика мезонов и нуклонов с учётом их спинов.

Позже этот метод получил международное признание и общепринятое название «Tamm Dancoff Approximation» – TDA.

Разработанный более восьми десятков лет назад TDA продолжает использоваться в современной физике, особенно в квантовой теории поля и квантовой химии.

Этот метод полезен для расчёта энергетических уровней и других физических величин в сложных квантовых системах, где другие методы могут быть неприменимы или менее точны.

Так, например, в работе [44] надёжность приближения TDA для прогнозирования колебательно-разрешённых спектров поглощения и испускания нескольких прототипических сопряжённых молекул была проверена путём проведения серии тщательных теоретических расчётов в сравнении с экспериментальными результатами как для формы полос, так и для энергий 0-0. Они показали, что метод TDA может воспроизводить экспериментальные формы полос вместе с положениями пиков поглощения и испускания. Что касается «Time-Dependent Density Functional Theory» – TDDFT, TDA приводит к занижению относительных интенсивностей в большинстве случаев, но не изменяет никакие другие характеристики спектров.

В недавно опубликованной работе [45] рассмотрен вопрос о том, насколько TDA влияет на точность расчётов спектров рентгеновского поглощения (XAS) и рентгеновской эмиссии (XES).

Обобщённые результаты исследований этих спектров, показанные на рис. 12, говорят о том, что для простых систем, таких, например, как отдельные молекулы воды в газовой фазе, метод TDA даёт результаты, близкие к полным расчётам TDDFT.

В более сложных системах, таких как молекулярные кластеры, TDA может давать менее точные результаты из-за сильных межэлектронных взаимодействий. Модифицированная версия TDA (CVS-TDA) учитывает только переходы, связанные с ядрами атомов, которые являются источником XES.

В правой части рис. 12 показаны символьные изображения матриц вторых частных производных функции, так называемых гессианов (Hessians), которые представляют

собой математические матрицы. Гессиян характеризует кривизну функции. В квантовой химии он используется для описания поведения электронов в молекуле при расчёте спектров с помощью методов TDDFT и TDA. Например, гессиян справа вверху (TDDFT) – это большая матрица размером 80×80 , учитывающая все возможные переходы между 5 занятыми и 8 виртуальными орбиталями. Для CVS-TDA используются уменьшенные матрицы (16×16 и 8×8). Более подробно об этом будет сказано во второй части статьи.

В 1948–1949 годах Тамм возвращается к идее рассеяния элементарных частиц с точки зрения теории соударений в пространстве импульсов, предложенной Дираком. Эта теория рассматривает столкновения частиц не в координатном (реальном) пространстве, а в пространстве импульсов. Такой подход позволяет учитывать законы сохранения импульса и энергии при столкновениях, что существенно при переходе к квантовым и релятивистским системам. Дирак использовал приближение Бора, в рамках которого разрешены были только определённые квантованные орбиты (дискретный энергетический спектр).

В статьях [46, 47] Игорь Тамм рассмотрел вариант теории рассеяния в импульсном пространстве с непрерывным спектром энергий. Поскольку в то время не существовало общих методов решения подобных задач (сингулярные интегральные уравнения), то необходимо было разработать соответствующий метод. В работе [46] Тамм модернизировал способ нахождения приближительного решения краевых вариационных задач (метод Ритца). Он предложил оптимизированный алгоритм, позволяющий оценивать собственные функции задач рассеяния элементарных частиц с непрерывным энергетическим спектром в импульсном пространстве. Однако в этой работе при определённых условиях собственные функции обращались в бесконечность. Поэтому во второй части статьи, опубликованной через год, Тамм исправил эти недостатки, введя новую математическую формулировку с комплексными функциями [47].

Идеи Тамма, изложенные в этих двух статьях, легли в основу современных численных методов, исполь-

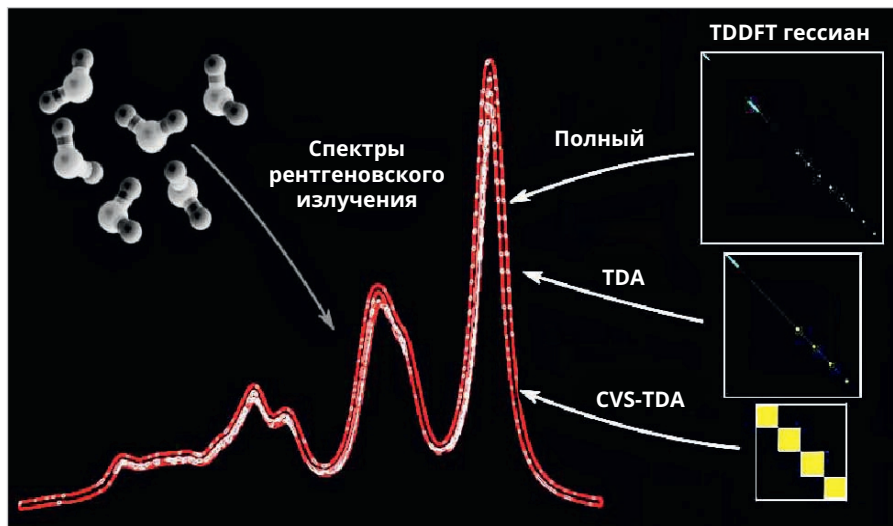


Рис. 12. Влияние TDA на точность расчётов спектров рентгеновской эмиссии (XES)

зуемых в программах моделирования электронных устройств (SPICE, TCAD).

Принципы, заложенные в работах Тамма, применяются в современных моделях подвижности носителей заряда в полупроводниках. При этом учитываются такие основные механизмы, исследованные Игорем Таммом, как рассеяние на акустических фононах, рассеяние на оптических фононах, рассеяние на заряженных центрах и рассеяние на нейтральных центрах.

Современная теория квантового транспорта в наноразмерных устройствах использует методы функций Грина (NEGF – Non-Equilibrium Green’s Functions), которые являются прямым развитием вариационных подходов, предложенных Таммом. Кроме того, подобные методы применяются при решении оптимизационных задач с помощью квантовых компьютеров с отжигом.

В 1948 году правительство СССР поручило Игорю Тамму разработку вопросов, связанных с термоядерным оружием. Поэтому большинство его работ периода 1950-х было секретным. В эти годы он организовал и возглавил теоретическую группу, занимавшуюся разработкой термоядерного оружия. Под его руководством совместно с Андреем Сахаровым и Виталием Гинзбургом были сформулированы ключевые идеи, позволившие создать первую советскую водородную бомбу (РДС-6с), испытанную в 1953 году [48]. За свою роль в создании термоядерного оружия Игорь Евгеньевич Тамм был удостоен звания Героя Социалистического Труда, стал лауреатом Сталинской

премии и был избран академиком АН СССР.

Из открытых публикаций, не вошедших в этот обзор, можно дополнительно отметить ещё несколько работ, которые прямо или косвенно имели значение для развития специальных разделов электроники.

Например, цикл работ, выполненных совместно с С.З. Беленьким, был связан с каскадной теорией ливней и характеристиками мягкой компоненты космических лучей на уровне Земли. Данные исследования позволили Игорю Тамму разобраться позже в вопросах взаимодействия элементарных частиц с земной атмосферой [48]. Результаты этих работ во многом послужили развитию детекторов излучения и систем регистрации радиоактивных элементов в воздухе [49–51].

Дальнейшая научная деятельность Игоря Евгеньевича Тамма связана с вопросами физики атомного ядра, которые хорошо известны у нас и за границей. Все эти работы можно найти в свободном доступе на сайте «И.Е. Тамм, Собрание научных трудов в двух томах» [52, 53].

Особый интерес представляют работы Тамма, связанные с теорией магнитного удержания плазмы, которые легли в основу концепции управляемого термоядерного синтеза.

Игорь Тамм и Андрей Сахаров предложили идею термоизоляции горячей плазмы сильным магнитным полем, формирующим тороидальную структуру, так называемый токамак. Данный подход лежит в основе конструкций нового поколения термоядерных

установок, включая международный проект ITER [54, 55].

Рассмотренные в этом разделе работы Игоря Евгеньевича Тамма демонстрируют исключительную научную ценность, ставя его в один ряд с такими выдающимися физиками, как Альберт Эйнштейн, Нильс Бор, Пол Дирак. Выдвинутые почти век назад идеи Игоря Тамма не только сохранили свою значимость, но и стали фундаментом для революционных технологий XXI века.

Во второй части статьи будут рассмотрены примеры конкретных современных устройств, в которых воплотились идеи Игоря Тамма.

В заключение этой части статьи необходимо отметить созданную Игорем Евгеньевичем Таммом научную школу, воспитавшую таких выдающихся учёных, как, например:

- Моисей Александрович Марков (1908–1994) – академик-секретарь Отделения ядерной физики АН СССР, основатель нейтринной астрофизики;
 - Илья Михайлович Франк (1908–1990) – соавтор теории эффекта Черенкова, Нобелевская премия 1958, академик АН СССР, лауреат двух Сталинских премий (скорее соратник, чем ученик);
 - Евгений Львович Фейнберг (1912–2005) – известный физик-теоретик, ученик Тамма, академик РАН, соавтор работ по физике высоких энергий и космическим лучам;
 - Виталий Лазаревич Гинзбург (1916–2009) – Нобелевская премия 2003;
 - Андрей Дмитриевич Сахаров (1921–1989) – Нобелевская премия 1975;
 - Леонид Вениаминович Келдыш (1931–2016) – академик РАН, создатель теории полупроводников;
 - Дмитрий Иванович Блохинцев (1908–1979) – известный физик-теоретик, член-корреспондент АН СССР, соавтор работ по термоэлектронной эмиссии, создатель квантовой механики ансамблей частиц;
 - Семён Александрович Альтшулер (1911–1983) – советский физик, член-корреспондент АН СССР, соавтор работ о магнитном моменте нейтрона;
 - Виктор Павлович Силин (1926–2019) – советский и российский физик-теоретик, член-корреспондент РАН, соавтор работ по теории взаимодействия нуклонов;
 - Семён Захарович Беленький (1916–1956) – лауреат Сталинской премии,
- участник проекта РДС-6с, соавтор работ по лавинным процессам в космических лучах;
- Семён Петрович Шубин (1908–1938), известный физик-теоретик, д.ф.м.н., соавтор работ по физике твёрдого тела;
 - Игорь Юрьевич Кобзарев (1932–1991) – советский физик-теоретик, соавтор работ по физике странных частиц;
 - другие ученики, а также ученики учеников, развивающие идеи Игоря Евгеньевича Тамма.

Литература

1. История РФ. Тамм Игорь Евгеньевич. URL: <https://histrf.ru/read/biographies/igor-evgenevich-tamm>.
2. Тамм Игорь Евгеньевич. URL: https://ru.wikipedia.org/wiki/Тамм,_Игорь_Евгеньевич.
3. Sir Edmund Taylor Whittaker. URL: <https://www.britannica.com/biography/Edmund-Taylor-Whittaker>.
4. Портрет: И.Е. Тамм. Летопись Московского университета. URL: <https://letopis.msu.ru/peoples/7233>.
5. Мандельштам Леонид Исаакович. URL: https://ru.m.wikipedia.org/wiki/Мандельштам,_Леонид_Исаакович.
6. Сибирь. Реалии. URL: <https://www.sibreal.org/a/sudba-nobelevskogo-laureata-i-sozdatelya-vodorodnoy-bomby-igorya-tamma/30532655.html>.
7. «Выведешь формулу – не расстреляю». URL: <https://strana-rosatom.ru/2020/07/10/26182/>.
8. 100 знаменитых учёных. Тамм Игорь Евгеньевич. URL: <https://history.wikireading.ru/176866>.
9. Воспоминания о И.Е. Тамме: К 100-летию со дня рождения / РАН. Физ. ин-т им. П.Н. Лебедева / отв. ред. Е.Л. Фейнберг. 3-е изд., доп. М.: ИздАТ, 1995. URL: https://elib.biblioatom.ru/text/vospominaniya-o-tamme_1995/p0/.
10. Романов Ю.А. Воспоминания об учителе // Люди «Объекта». Саров-Москва: ИНФО, Человеческое Ко, 1996. С. 212–215. URL: https://elib.biblioatom.ru/text/lyudi-ob-yekta_1996/p212/.
11. Гинзбург В.Л. Долгая, разнообразная и нелёгкая жизнь (к 100-летию со дня рождения Игоря Евгеньевича Тамма). М.: Физматлит, 2001. С. 255–267. URL: https://elib.biblioatom.ru/text/ginzburg_o-nauke-o-sebe_2001/p255/.
12. Тамм И.Е. // Физики о себе / отв. ред. В.Я. Френкель. Л.: Наука, 1990. С. 214–217. URL: https://elib.biblioatom.ru/text/fiziki-o-sebe_1990/214/.
13. Пространство Минковского. URL: <https://bit.ly/4nSR8LT>.
14. Электродинамика анизотропной среды в специальной теории относительности / Журнал Русского физико-химического общества, т. 56, вып. 2–3, 1924. URL: https://elib.biblioatom.ru/text/tamm_sobranie-trudov_t1_1975/p19/.
15. Mandelstam L., Tamm I. Elektrodynamik der anisotropen Medien und der speziellen Relativitätstheorie, Math. Ann. 95 (1925) 154–160. URL: https://elib.biblioatom.ru/text/tamm_sobranie-trudov_t1_1975/p62/.
16. Тамм И., Мандельштам Л. Кристаллооптика теории относительности в связи с геометрией биквадратичной формы // Журнал Русского физико-химического общества, т. 56, вып. 2–3, 1924. URL: https://elib.biblioatom.ru/text/tamm_sobranie-trudov_t1_1975/p33/.
17. Тамм И.Е. Основы теории электричества. М., 2003. URL: http://tevza.org/home/course/ECM2012/books/Tamm_Electromagnetism.pdf.
18. К 100-летию Игоря Евгеньевича Тамма // Специальный выпуск журнала «Природа». 1995. № 7 (1959). 194 с. URL: https://elib.biblioatom.ru/text/priroda_1995_07/p108/.
19. Tamm I. Über die Quantentheorie der molekularen Lichtstreuung in festen Körpern Zeitschrift für Physik (Zs. f. Ph.). 60, 345, 1930). URL: https://elib.biblioatom.ru/text/tamm_sobranie-trudov_t1_1975/p168/.
20. Тамм И.Е., Шубин С.П. К теории фотоэффекта в металлах. Zeitschrift für Physik, Bd. 68, Heft 3/4. 1931. URL: https://elib.biblioatom.ru/text/tamm_sobranie-trudov_t1_1975/p196/.
21. Tamm I.E. On the possible bound states of electrons on a crystal surface. Zeitschrift für Physik der Sowjetunion, 1932, 1, 733. URL: https://elib.biblioatom.ru/text/tamm_sobranie-trudov_t1_1975/p216/.
22. Mikhail Popov et al. Surface Tamm States of 2–5 nm Nanodiamond via Raman Spectroscopy. Nanomaterials 2023, 13(4), 696. URL: <https://doi.org/10.3390/nano13040696>.

23. Дэвисон С., Левин Дж. Поверхностные (таммовские) состояния. М.: Мир, 1973. URL: https://korobkknig.ru/nauka_i_tehnika1/fizika/poverhnostnye-tammovskie-sostoyaniya-57152.html.
24. Тамм И.Е., Блохинцев Д.И. О работе выхода электронов из металла. *Physik der Sowjetunion*, 1933, 3, 170. URL: https://ikfia.ysn.ru/wp-content/uploads/2018/01/Tamm_t1_1975ru.pdf (с. 227).
25. Тамм И.Е., Альтшулер С.А. Магнитный момент нейтрона. ДАН СССР, 1934, 1, 455. URL: https://ikfia.ysn.ru/wp-content/uploads/2018/01/Tamm_t1_1975ru.pdf (с. 283).
26. First coherent picture of an atomic nucleus made of quarks and gluons. *Phys.org* 2003–2025 powered by Science X Network. URL: <https://phys.org/news/2024-10-coherent-picture-atomic-nucleus-quarks.html>.
27. Черенков П.А. Видимое свечение чистых жидкостей под действием γ -радиации. ДАН СССР, 1934, т. 2, № 8. С. 451–457. URL: <https://ufn.ru/ru/articles/1967/10/n/>.
28. Черенков П.А. Влияние магнитного поля на видимое свечение жидкостей, вызываемое γ -лучами // Доклады Академии наук СССР. 1936. Т. 3. С. 414. URL: <https://elib.gstu.by/bitstream/handle/220612/30035/107-112.pdf?sequence=1&isAllowed=y>.
29. Тамм И.Е., Франк И.М. Когерентное излучение быстрого электрона в среде. ДАН СССР, 1937. Т. XIV. № 3. С. 107. URL: https://elib.biblioatom.ru/text/tamm_sobranie-trudov_t1_1975/p68/.
30. Тамм И.Е., Франк И.М., Черенков П.А. Свечение чистых жидкостей под действием быстрых электронов // Известия АН СССР. 1938. № 1–2, 29. URL: https://elib.biblioatom.ru/text/tamm_sobranie-trudov_t1_1975/p75/.
31. Тамм И.Е. Излучение, вызываемое равномерно движущимися электронами // *J. Phys. USSR*, 1, № 5–6, 439, 1939. URL: https://elib.biblioatom.ru/text/tamm_sobranie-trudov_t1_1975/p77/.
32. Collins G.B., Reiling V.G. *Phys. Rev.*, 1938, 54, 499. URL: <https://www.nobelprize.org/prizes/physics/1958/cherenkov/lecture/>.
33. What is Cherenkov Radiation? IAEA. URL: <https://www.iaea.org/newscenter/news/what-is-cherenkov-radiation>.
34. Тамм И.Е., Франк И.М. Излучение электрона при равномерном движении в преломляющей среде // Труды ФИАН СССР, 2, вып. 4, 63, 1944. URL: https://elib.biblioatom.ru/text/tamm_sobranie-trudov_t1_1975/p113/.
35. Fermi E. *Phys. Rev.*, 1940, 57, 485. URL: <https://journals.aps.org/pr/abstract/10.1103/PhysRev.57.485>.
36. Dmitry Karlovets et. al. Attosecond physics hidden in Cherenkov radiation. *Communications physics, Nature Portfolio journal*, (2025) 8:192. URL: <https://www.nature.com/articles/s42005-025-02108-y.pdf>.
37. Daniel A. et al. Color Cherenkov imaging of clinical radiation therapy. *Light Sci Appl*, 2021, Nov 4; 10(1):226. URL: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/34737264/>.
38. Alicia López Oramas. URL: https://www.researchgate.net/figure/Principle-of-the-IACT-technique-The-g-ray-shower-axis-is-aligned-with-the-axis-of-the_fig5_275329291.
39. Baikal Deep Underwater Neutrino Telescope. URL: <https://baikalgvd.jinr.ru>.
40. Тамм И.Е., Мандельштам Л.И. Соотношение неопределённости энергия – время в нерелятивистской квантовой механике // Известия АН СССР, серия физическая, 1945, 9, № 1–2, 122. URL: https://elib.biblioatom.ru/text/tamm_sobranie-trudov_t2_1975/p258/.
41. Igor Tamm. Relativistic Interaction of Elementary Particles // *Journal of Physics (USSR)*, 1945, том 9, № 6, с. 449–460. URL: https://elib.biblioatom.ru/text/tamm_sobranie-trudov_t2_1975/p100/.
42. Dancoff S.M. Non-adiabatic meson theory of nuclear forces *Phys. Rev.*, 1950, 78, 382. URL: <https://journals.aps.org/pr/abstract/10.1103/PhysRev.78.382>.
43. Тамм И.Е., Силин В.П., Файнберг В.Я. Метод усечённых уравнений поля и его применение к рассеянию мезонов нуклонами // ЖЭТФ, 1955, 29, 6. URL: https://elib.biblioatom.ru/text/tamm_sobranie-trudov_t2_1975/p158/.
44. Is the Tamm-Dancoff Approximation Reliable for the Calculation of Absorption and Fluorescence Band Shapes? *Journal of Chemical Theory and Computation*, 2013. URL: <https://pubs.acs.org/doi/10.1021/ct400597f>.
45. Evaluating the Impact of the Tamm–Dancoff Approximation on X-ray Spectrum Calculations. *J. Chem. Theory Comput.* 2024, 20, 2181–2191. URL: https://pubs.acs.org/doi/pdf/10.1021/acs.jctc.3c01341?ref=article_openPDF.
46. Тамм И.Е. О некоторых математических методах теории рассеяния частиц, ч. I // ЖЭТФ. 1948, 18, вып. 4, 337. URL: https://elib.biblioatom.ru/text/tamm_sobranie-trudov_t2_1975/p266/.
47. Тамм И.Е. О некоторых математических методах теории рассеяния частиц, ч. II // ЖЭТФ. 1949, 19, вып. 1, 74. URL: https://elib.biblioatom.ru/text/tamm_sobranie-trudov_t2_1975/p279/.
48. Атомный проект СССР. URL: https://elib.biblioatom.ru/text/atomny-proekt-sssr_t2_kn2_2000/p0_o/.
49. Тамм И.Е., Бельский С.З. О мягкой компоненте космических лучей на уровне моря. 1939 (т. 2, с. 61). URL: https://elib.biblioatom.ru/text/tamm_sobranie-trudov_t2_1975/p61/.
50. Тамм И.Е., Бельский С.З. Энергетический спектр каскадных электронов, т. 2, с. 116. URL: https://elib.biblioatom.ru/text/tamm_sobranie-trudov_t2_1975/p116/.
51. Бельский С.З. Лавинные процессы в космических лучах. М., 1946. 230 с. URL: <https://search.rsl.ru/ru/record/01011204424>.
52. Тамм И.Е. Собрание научных трудов в двух томах. Т. 1. М.: Издательство «Наука», 1975. URL: https://elib.biblioatom.ru/text/tamm_sobranie-trudov_t1_1975/p0/.
53. Тамм И.Е. Собрание научных трудов в двух томах. Т. 2. М.: Издательство «Наука», 1975. URL: https://elib.biblioatom.ru/text/tamm_sobranie-trudov_t2_1975/p0/.
54. Теория магнитного термоядерного реактора, I // Физика плазмы и проблемы управляемых термоядерных реакций, т. 1. М., 1958. С. 3. URL: https://elib.biblioatom.ru/text/tamm_sobranie-trudov_t2_1975/p363/.
55. Теория магнитного термоядерного реактора. III // Физика плазмы и проблемы управляемых термоядерных реакций, т. 1. М., 1958. С. 31. URL: https://elib.biblioatom.ru/text/tamm_sobranie-trudov_t2_1975/p380/.