

КОНФЕРЕНЦИИ И СИМПОЗИУМЫ

К 100-летию со дня рождения академика И.М. Франка

Научная сессия Отделения физических наук
Российской академии наук, 22 октября 2008 г.

Г.А. Месяц; Б.М. Болотовский; А.Н. Сисакян, М.Г. Иткис;
Б.А. Бенецкий; А.И. Франк; В.Л. Аксёнов

PACS number: 01.10.Fv

DOI: 10.3367/UFNr.0179.200904g.0403

22 октября 2008 г. в конференц-зале Физического института им. П.Н. Лебедева РАН состоялась Научная сессия Отделения физических наук Российской академии наук, посвящённая 100-летию со дня рождения лауреата Нобелевской премии академика И.М. Франка. На сессии были заслушаны доклады:

1. Месяц Г.А. (Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, Москва). *Илья Михайлович Франк (вступительное слово)*.

2. Крохин О.Н. (Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, Москва). *И.М. Франк и оптические исследования*.

3. Болотовский Б.М. (Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, Москва). *Работы И.М. Франка по излучению движущихся источников в преломляющих средах ("оптика движущихся источников")*.

4. Сисакян А.Н., Иткис М.Г. (Объединённый институт ядерных исследований, Дубна, Московская обл.). *И.М. Франк и развитие Объединённого института ядерных исследований*.

5. Бенецкий Б.А. (Институт ядерных исследований РАН, Москва). *И.М. Франк — создатель и руководитель лаборатории атомного ядра в ФИАНе*.

6. Франк А.И. (Объединённый институт ядерных исследований, Дубна, Московская обл.). *И.М. Франк и оптика ультрахолодных нейтронов*.

7. Аксёнов В.Л. (Объединённый институт ядерных исследований, Дубна, Московская обл.). *Пульсирующие ядерные реакторы в нейтронной физике*.

Краткое содержание вступительного слова и докладов 3–7 публикуется ниже.



Илья Михайлович Франк
(23.10.1908 – 22.06.1990)

PACS numbers: 01.60. + q, 01.65. + g, 41.60.Bq
DOI: 10.3367/UFNr.0179.200904h.0403

Илья Михайлович Франк (вступительное слово)

Г.А. Месяц

23 октября 2008 г. исполнилось 100 лет со дня рождения Ильи Михайловича Франка — выдающегося физика,

академика, лауреата Нобелевской премии. Родился Илья Михайлович в Санкт-Петербурге в интеллигентной семье. Отец, талантливый математик и педагог, во многом повлиял на будущее сыновей. (Брат Ильи Михайловича, Глеб, стал известным специалистом по биофизике.)

В начале 1920-х годов семья переехала в Крым, Илья учился в школе в Ялте. Затем слушал лекции, не поступая в университет, в Крымском университете в Симферополе, где его отец был профессором; работал в физической лаборатории, занимался в математическом кружке. В 1926 г. поступил на физико-математический факультет Московского государственного университета (МГУ) и окончил его в 1930 г. по двум специальностям: "физика" (кафедра теоретической физики Л.И. Мандельштама) и "математика". Со второго курса работал в лаборатории С.И. Вавилова, совместно с которым в 1931 г. опубликовал работу по люминесценции. В 1930–1934 гг. занимался исследованием фотохимических процессов в Государственном оптическом институте, в котором заместителем директора по науке был С.И. Вавилов, ставший с 1932 г. заведующим физическим отделом Физико-математического института. В физическом отделе были начаты работы по изучению свойств только что открытых нейтронов, свечению жидкостей под действием ионизирующей радиации, а также по исследованию проблемы окрашивания кристаллов, микроструктуры жидкостей, электрического пробоя в газах, катализаторов химических реакций.

В этот период под руководством С.И. Вавилова вместе с И.М. Франком работали такие замечательные учёные-физики, как Г.А. Гамов, Л.В. Мисковский, Н.А. Добротин, П.А. Черенков, Л.В. Грошев и др. Началось пополнение оборудования, возникали разнообразные семинары. Отдел стремительно осваивал новую физику и быстрыми шагами входил в новую эффективную фазу своего существования. Хотя специальностью С.И. Вавилова являлась физическая оптика, круг его научных интересов был намного шире. В этот период С.И. Вавилов поставил цель создать новый "полифизический" институт, в котором сочетались бы основные направления современной физики, диктуемые логикой развития науки, и при этом каждое направление возглавлялось бы первоклассным специалистом. Будущую структуру Физического института С.И. Вавилов обсуждал с коллегами. С.И. Вавилов осознавал важность быстро развивающейся в то время физики атомного ядра и чётко понимал необходимость поддержки "новой физики", возникшей в начале XX в. — теории относительности и квантовой механики. Он также ясно представлял, что для современной физики теория не менее важна, чем эксперимент, и что эти две части физической науки неразрывно связаны между собой.

28 апреля 1934 г. общее собрание Академии наук СССР приняло постановление о разделении Физико-математического института на два института: Математический институт и Физический институт. Вскоре, летом 1934 г., по постановлению Правительства СССР оба института вместе с Академией наук переехали в Москву, заняв здание на 3-й Миусской улице, построенное ещё в 1912 г. на пожертвования для лаборатории Петра Николаевича Лебедева. Тем самым завершилась более чем двухсотлетняя эволюция небольшого отдела Кунсткамеры и начатая А.Н. Крыловым и законченная С.И. Вавиловым трансформация физического отдела Физико-математического института в Физический институт Академии наук (ФИАН). Это событие символизировало также соединение старой петербургской академической физики с более молодой московской университетской. Уместно напомнить и о дружбе Б.Б. Голицына и

П.Н. Лебедева, начавшейся ещё в дни их учёбы в Страсбургском университете и продолжавшейся вплоть до смерти П.Н. Лебедева. Таким образом, новый Физический институт объединил в себе традиции голицынской и лебедевской научных школ. Возглавил Физический институт ученик П.П. Лазарева (ассистента и ближайшего помощника П.Н. Лебедева) академик С.И. Вавилов.

При отборе сотрудников С.И. Вавилов неизменно старался отыскать наиболее талантливых исследователей, обеспечивая тем самым возможность возникновения в будущем сильных научных школ. Известно, что академик А.Н. Крылов в шутку по этому поводу сказал, что Сергей Иванович старается брать на работу сотрудников сильнее себя.

По существу, с 1934 г. началась новая история ФИАНа. Вскоре здесь появилась лаборатория атомного ядра, возглавляемая Д.В. Скобелевым, в составе которой работали В.И. Векслер, С.Н. Вернов, Л.В. Грошев, Н.А. Добротин, И.М. Франк, П.А. Черенков и др.; лаборатория физики колебаний, руководимая Н.Д. Папалекси (А.А. Андронов, Б.А. Введенский, Л.И. Мандельштам, Г.С. Горелик, С.М. Рытов, П.А. Рязин, Е.Я. Щеголев и др.); лаборатория физической оптики под руководством Г.С. Ландсберга; лаборатория люминесценции, возглавляемая С.И. Вавиловым (В.В. Антонов-Романовский, В.Л. Левшин, М.А. Константинова, Л.А. Тумерман и др.); лаборатория спектрального анализа, руководимая С.Л. Мандельштамом; лаборатория физики диэлектриков, возглавляемая Б.М. Вулом; лаборатория теоретической физики под руководством И.Е. Тамма (Д.И. Блохинцев, В.Л. Гинзбург, М.А. Марков, К.В. Никольский, Е.Л. Фейнберг, В.А. Фок и др.); лаборатория акустики, возглавляемая А.А. Андреевым (С.Н. Ржевкин, Л.Д. Розенберг, Ю.М. Сухаревский и др.). С 1934 г. по 1937 г. в состав Института входила также лаборатория поверхностных явлений, руководимая П.А. Ребиндером. В предвоенный период ФИАН ежегодно организовывал экспедиции на Эльбрус для наблюдения космических лучей и некоторых атмосферно-оптических явлений. И.М. Франк, в частности, работал в двух эльбрусских экспедициях, где занимался исследованием космических лучей с использованием камеры Вильсона,

В ФИАНе И.М. Франк работал в период 1934–1970 гг. В 1935 г. (в 26 лет!) Илья Михайлович защитил докторскую диссертацию. С 1940 г. стал профессором Московского университета, с 1946 по 1956 гг. возглавлял лабораторию радиоактивного излучения в Научно-исследовательском институте ядерной физики при МГУ. С 1957 г. И.М. Франк — директор лаборатории нейтронной физики Объединённого института ядерных исследований (ОИЯИ) в Дубне и с 1971 г. — заведующий лабораторией Института ядерных исследований АН СССР. Основные работы И.М. Франка относятся к физической оптике, физике нейтронов и ядерной физике низких энергий.

Вавилов настаивал, чтобы после перехода в ФИАН Франк переключился на ядерную физику. В 1937–1940 гг. И.М. Франк (совместно с Л.В. Грошевым) выполнил серию работ по изучению образования электрон-позитронных пар под действием гамма-квантов на криптон с использованием камеры Вильсона.

Примерно в это же время Павел Черенков, один из аспирантов Вавилова в ФИАНе, начал исследование

голубого свечения (позднее названного излучением Черенкова или излучением Вавилова – Черенкова), возникающего в преломляющих средах под воздействием гамма-лучей. Черенков показал, что это излучение не было ещё одной разновидностью люминесценции, но он не мог объяснить его теоретически. В 1937 г. И.М. Франк и И.Е. Тамм сумели вычислить свойства электрона, равномерно движущегося в некоторой среде со скоростью, превышающей скорость света в этой среде. Они показали, что в этом случае излучается энергия, а угол распространения возникающей волны просто выражается через скорость электрона и скорость света в данной среде и в вакууме. Одним из первых результатов новой теории стало объяснение поляризации излучения Черенкова. Теория оказалась настолько удачной, что Франк, Тамм и Черенков смогли экспериментально проверить некоторые её предсказания, такие как наличие энергетического порога для падающего гамма-излучения, зависимость этого порога от показателя преломления среды и характерная форма возникающего излучения (полный конус с осью вдоль направления падающего излучения).

И.М. Франк в 1946 г. был избран членом-корреспондентом АН СССР, а его совместная с Таммом, Черенковым и Вавиловым работа была отмечена Государственной премией СССР. В 1958 г. Тамм, Франк и Черенков были награждены Нобелевской премией по физике "за открытие и истолкование эффекта Черенкова". В своей Нобелевской лекции Франк говорил, что эффект Черенкова "имеет многочисленные приложения в физике частиц высокой энергии. Выяснилась также связь между этим явлением и другими проблемами, как, например, связь с физикой плазмы, астрофизикой, проблемой генерирования радиоволн и проблемой ускорения частиц". Открытие излучения Вавилова – Черенкова привело к созданию нового метода детектирования и измерения скорости высокоэнергетических ядерных частиц. Этот метод имеет огромное значение в современной экспериментальной ядерной физике.

Именно эта работа стала началом целой серии теоретических исследований И.М. Франка, посвящённых источникам света, движущимся в преломляющей среде. Им была создана теория так называемого сложного эффекта Доплера — эффекта Доплера в преломляющей среде, а также аномального эффекта Доплера в случае движения источника со сверхсветовой скоростью (1947 г., совместно с В.Л. Гинзбургом). В 1946 г. Франк совместно с Гинзбургом предсказал переходное излучение, возникающее при пересечении движущимся зарядом плоской границы раздела двух сред. Этот вид излучения возникает вследствие перестройки электрического поля равномерно движущейся частицы, когда она пересекает границу между двумя средами, обладающими разными оптическими свойствами. Хотя эта теория была позднее проверена экспериментально, некоторые из её важных следствий не удавалось обнаружить лабораторным путём ещё в течение более десяти лет.

В середине 1940-х годов И.М. Франк провёл теоретические и экспериментальные исследования размножения нейтронов в гетерогенных уран-графитовых системах, которые помогли понять закономерности переноса нейтронов в ядерных реакторах, в частности позволили с высокой точностью определить критический размер и коэффициент размножения нейтронов в бесконечной

системе и изучить их зависимость от свойств уран-графитовой решетки. Илья Михайлович предложил и разработал импульсный метод изучения диффузии тепловых нейтронов, обнаружил (1954 г.) зависимость среднего коэффициента диффузии от геометрического параметра (эффект диффузионного охлаждения). Разработал также новый метод спектрометрии нейтронов — по времени их замедления в свинце.

Под руководством И.М. Франка выполнен цикл экспериментальных исследований реакций на лёгких ядрах, в которых испускаются нейтроны, взаимодействия быстрых нейтронов с ядрами трития, лития и урана, процесса деления ядер, положено начало изучению короткоживущих квазистационарных состояний и деления ядер под действием мезонов и частиц высоких энергий. В 1957 г. под руководством И.М. Франка была создана лаборатория нейтронной физики в ОИЯИ. Здесь он был одним из руководителей работ по созданию импульсных быстрых реакторов периодического действия для спектроскопических нейтронных исследований ИБР-1 (1960 г.) и ИБР-2 (1981 г.). В 1970 г. Франк полностью перешёл в ОИЯИ.

В 1954 и 1971 гг. работы И.М. Франка были отмечены Государственными премиями СССР, а в 1968 г. И.М. Франк был избран академиком АН СССР.

И.М. Франк считал, что учёный обязан быть широко образованным, интеллигентным человеком. Его научные статьи чётки и написаны ясным языком. Коллеги всегда отмечали его особую интуицию в вопросах постановки эксперимента или поиска решения теоретических проблем. На всю жизнь И.М. Франк сохранил уважение к своему любимому учителю — С.И. Вавилову. Он подготовил сборник воспоминаний о Сергее Ивановиче, который был дважды переиздан. Умер Илья Михайлович через несколько дней (в Москве 22 июня 1990 г.) после завершения работы над третьим изданием. До конца своих дней Илья Михайлович не утратил ни творческого, ни жизненного оптимизма, основанного прежде всего на том, что судьба подарила ему возможность всю жизнь заниматься любимым делом.

PACS numbers: **01.65.** + g, 41.60.Bq, 41.60.Dk
DOI: 10.3367/UFNr.0179.200904i.0405

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

Б.М. Болотовский

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Первый и очень поучительный пример сверхсветового источника принадлежит И.М. Франку. Представим себе две среды с разными значениями показателей преломления, разделённые плоской границей. Для определённости будем их называть "первая среда" и "вторая среда". В первой среде показатель преломления равен n_1 , во второй — n_2 . Пусть в первой среде на границу раздела падает плоская электромагнитная волна. Нетрудно показать, что эта волна возбуждает на поверхности раздела заряды и токи, которые перемещаются по поверхности со скоростью $v = c/n_1 \sin \vartheta_1$, где ϑ_1 — угол падения. Видно, что скорость этих поверхностных образований всегда больше, чем скорость света в первой среде. Значит, в первой среде должно возникать излучение Вавилова–Черенкова. Нетрудно убедиться в том, что это излучение даёт в точности отражённую волну. Эти же самые поверхностные токи и заряды могут стать источником излучения и во второй среде, если их скорость превосходит скорость света во второй среде, т.е. если $v = c/n_1 \sin \vartheta_1 > c/n_2$. При этом излучение Вавилова–Черенкова во вторую среду даёт в точности преломлённую волну. Если же скорость поверхностных зарядов и токов оказывается меньше, чем скорость света во второй среде, т.е. если $v = c/n_1 \sin \vartheta_1 < c/n_2$, то излучение Вавилова–Черенкова во второй среде отсутствует — преломлённая волна не образуется. Последнее неравенство совпадает с условием полного внутреннего отражения.

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

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

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

* * *

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

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

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

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

Если передатчик и приёмник расположены в пустом пространстве, то связь между частотой передатчика Ω и частотой ω , на которой принимается переданный сигнал, имеет вид

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

Здесь v — скорость передатчика, c — скорость света, θ — угол между скоростью передатчика и направлением излучения. Важно отметить, что при заданных значениях v , Ω и θ частота принимаемого сигнала ω имеет единственное значение.

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

$c/n(\omega)$. Это даёт

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Обозначим через ϕ_1 фазу волны, излучённой движущимся зарядом в точке $l = 0$ (см. выражение (1)):

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

Соответственно через ϕ_2 обозначим фазу волны, излучённой зарядом в точке $z = l$ (см. (2)):

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

Как видно из выражений для ϕ_1 и ϕ_2 , волны излучённые движущимся зарядом в начале и в конце пути длиной l , различаются по фазе. Нетрудно определить разность фаз $\phi_2 - \phi_1$:

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

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

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

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

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

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

здесь $\beta = v/c$.

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

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

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

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

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

Здесь c — скорость света, m — масса электрона.

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

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

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

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

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

быстро возрастает с увеличением энергии (пропорциональна квадрату энергии).

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

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

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

возрастает с увеличением энергии гораздо медленнее, по логарифмическому закону.

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Значит, он сочувствовал тем, кто отказался.

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

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

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

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

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

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

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

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

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

И.М. Франк и развитие Объединённого института ядерных исследований

А.Н. Сисакян, М.Г. Иткис

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

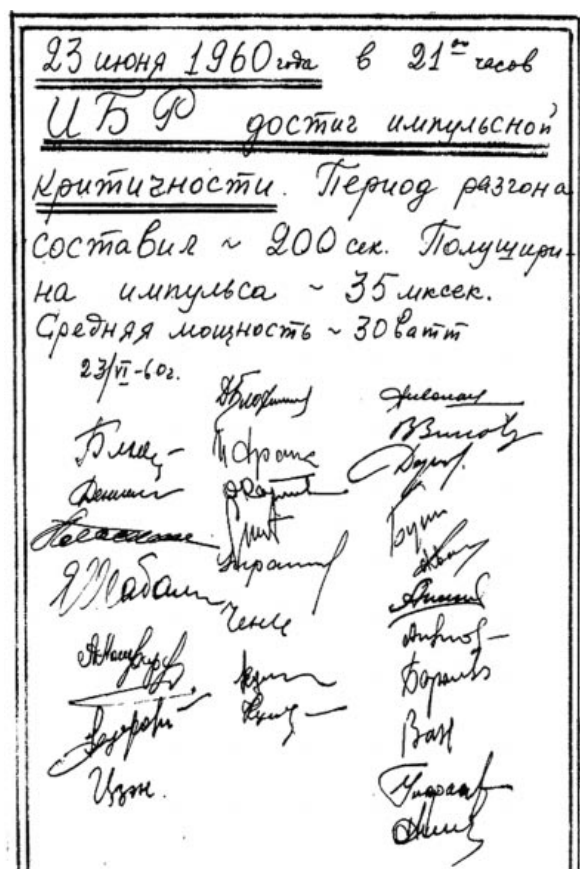


Рис. 1. Выписка из оперативного журнала реактора ИБР-1 о достижении импульсной критичности.

установки, в котором расписались все участники пуска, в том числе И.М. Франк и Д.И. Блохинцев.

На девятой сессии Учёного совета ОИЯИ был представлен доклад под названием "Импульсный реактор лаборатории нейтронной физики Объединённого института ядерных исследований". В нём был рассмотрен принцип действия этой уникальной, не имевшей аналогов в мире установки. Принципиальная схема ИБР приведена на рис. 2 [3]. Импульсный характер работы реактора обеспечивался тем, что активная зона 4, состоящая из металлического плутония, была разделена на две части, между которыми вращался стальной диск 1 с запрессованным в него вкладышем из обогащённого урана. При совмещении уранового вкладыша с неподвижной активной зоной реактор на короткое время переходил в надкритическое состояние и происходила генерация мощного нейтронного импульса. Средняя мощность ИБР-1 составляла 1 кВт, длительность нейтронного импульса — 40 мкс при частоте повторения импульсов $8,3 \text{ с}^{-1}$. При этом пиковая (импульсная) мощность составляла 3 МВт.

Уже эти параметры позволили ИБР стать лучшей в мире установкой для исследований низкоэнергетичных ядерных резонансов и реакций с малыми сечениями. В работе [4] приведено сравнение параметров дубненского реактора с параметрами нейтронных источников того времени на основе ускорителей и стационарных нейтронных источников.

Впоследствии мощность реактора была увеличена до 6 кВт. В 1965 г. для уменьшения длительности нейтрон-

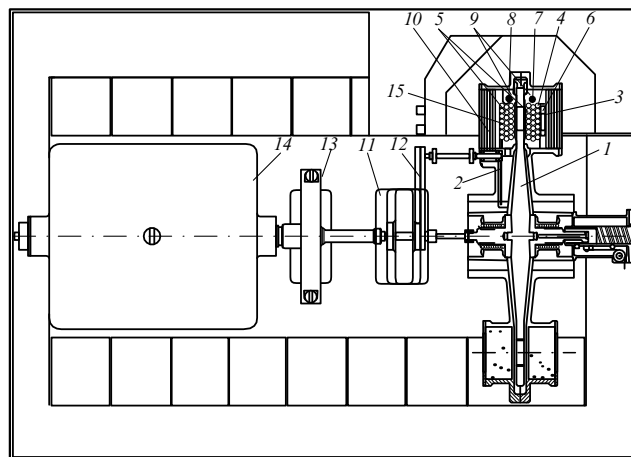


Рис. 2. Схема устройства реактора: 1 — основной вращающийся диск, 2 — вспомогательный вращающийся диск, 3 — основная подвижная зона (ОПЗ), 4 — неподвижная активная зона, 5 — аварийные стержни (АС), 6 — пластина грубого регулятора (ГР), 7 и 8 — регулирующие стержни, 9 и 10 — отражатель нейтронов, 11 — передача для увеличения числа оборотов, 12 — привод к валу вспомогательного диска, 13 — тормозное устройство для быстрой остановки вращения, 14 — электродвигатель для вращения диска, 15 — вспомогательная подвижная зона (ВПЗ).

ного импульса было предложено использовать микротрон, разработанный под руководством С.П. Капицы. Ускоренные до энергии 30 МэВ электроны облучали вольфрамовую мишень и генерировали первичные нейтроны за счёт фотоядерной реакции. Эти нейтроны затем размножались в активной зоне реактора. В результате длительность нейтронного импульса удалось сократить до 3 мкс. В такой конфигурации установка проработала до 1968 г.

10 июня 1969 г. под руководством И.М. Франка был пущен новый реактор ИБР-30, средняя мощность которого составила 25 кВт (в импульсе реактор развивал мощность 100 МВт) при длительности нейтронного импульса около 60 мкс и частоте повторения импульсов 5 Гц. Эти параметры были достигнуты благодаря новой конструкции топливных элементов активной зоны реактора и использованию двух урановых вкладышей во вращающемся стальном диске, вместо одного, как это было в ИБР-1. В результате поток нейтронов от новой установки почти в 100 раз превысил максимально достижимые потоки на имевшихся тогда нейтронных источниках на основе электронных ускорителей.

24 марта 1970 г. был введён в строй новый инжектор на основе линейного ускорителя электронов ЛУЭ-40. В результате стало возможным работать на установке не только в режиме импульсного реактора, но и в режиме электронного бустера (ИБР-30 + ЛУЭ-40). Это позволило осуществить целый ряд оригинальных научных экспериментов как в области ядерной физики, так и в области нейтронных исследований конденсированных сред, о которых кратко упоминается ниже. Нейтронный источник в конфигурации ИБР-30 + ЛУЭ-40 проработал на физический эксперимент почти 80 тыс. часов до июня 2001 г. Основные параметры ИБР-30 приведены в табл. 1.

За разработку и создание импульсных исследовательских реакторов и импульсных бустеров И.М. Франк в составе коллектива авторов был удостоен Государственной премии СССР за 1971 год.

Таблица 1. Параметры ИБР-30

Дата физического пуска Начало работы инжектора электронов	10 июня 1969 г. 24 марта 1970 г.
Средняя тепловая мощность*	25 кВт
Полный поток нейтронов	$1,3 \times 10^{15} \text{ н с}^{-1}$
Средняя плотность потока тепловых нейтронов на поверхности замедлителя	$5 \times 10^{10} \text{ н см}^{-2} \text{ с}^{-1}$
Импульсная плотность потока тепловых нейтронов на поверхности замедлителя	$10^{14} \text{ н см}^{-2} \text{ с}^{-1}$
Поток резонансных нейтронов на расстоянии 100 м, приведённый к мощности 1 кВт в диапазоне 1 эВ–10 кэВ	$P(E) = \frac{2,7 \times 10^6}{E^{0,9} L^2} W [\text{н см}^{-2} \text{ с}^{-1} \text{ эВ}^{-1}]$, где E — энергия нейтрона в [эВ], L — пролётная база в [м], W — мощность в [кВт]
Длительность нейтронного импульса	4 мкс
Частота повторения	100 Гц
* После Чернобыльской аварии (1986 г.) работа осуществлялась только в бустерном режиме на мощности не более 10 кВт.	

Как уже упоминалось выше, реактор создавался для исследований в области ядерной физики. В целом ряде направлений были получены пионерские результаты, многие из которых до сих пор активно развиваются в исследовательских центрах мира. Научную программу исследований в лаборатории нейтронной физики И.М. Франк развивал в тесном взаимодействии со своим заместителем, другом и ближайшим коллегой Ф.Л. Шапиро. Ниже кратко излагается часть научной программы, разработанной и реализованной в ЛНФ.

Светосильная спектроскопия нейтронных резонансов.

Отсутствие у нейтрона электрического заряда, а следовательно, и кулоновского барьера, препятствующего его проникновению в ядро, позволяет использовать нейтрон для получения возбуждённых ядер, лежащих в области бета-стабильных изотопов. При захвате нейтрона ядром образуется возбуждённое состояние компаунд-ядра с энергией близкой к энергии связи нейтрона, с временем жизни порядка 10^{-15} с и энергетической шириной около 0,66 эВ. Рассматривая ядерную реакцию как процесс, протекающий в два независимых этапа, сечение реакции можно представить в виде [5]

$$\sigma_x = \sigma_c w(x), \quad (1)$$

где σ_c — сечение образования компаунд-ядра, $w(x) = \Gamma_x/\Gamma$ — относительная вероятность его распада по каналу с вылетом частицы x . Значения энергий и ширины ядерных уровней компаунд-ядра можно определять, изучая резонансы в энергетической зависимости сечений. Регистрация различных каналов распада компаунд-состояний даёт возможность определять парциальные вероятности распада компаунд-состояния.

Эффекты сверхтонкого взаимодействия в нейтронных резонансах. Одним из наиболее ярких примеров, демонстрирующих возможности методики нейтронной спектроскопии на реакторе ИБР-30, являются эксперименты, использующие эффекты сверхтонкого взаимодействия в нейтронных резонансах для изучения свойств компаунд-состояний, а именно магнитных моментов и среднеквадратичных радиусов ядер. Циклы работ по этим направлениям были проведены в ЛНФ в 1973–1976 гг. [6, 7] и 1981 г. [8] соответственно.

Известные методы измерения магнитных моментов ядер (основанные на эффекте Мёссбауэра и возмущении угловых корреляций) не могли быть применены к компаунд-состояниям. Впервые на возможность измерения магнитных моментов нейтронных резонансов указал Ф.Л. Шапиро [9], который предложил использовать для определения магнитных моментов энергетический сдвиг нейтронных резонансов, возникающий за счёт сверхтонкого взаимодействия магнитного момента ядра с внутриатомным магнитным полем в экспериментах с поляризованными нейтронами или ядрами. Механизм появления энергетического сдвига положения нейтронного резонанса объясняется наличием внутриатомного магнитного поля H , при взаимодействии которого с ядром, обладающим спином I , проекцией спина m и магнитным моментом μ_0 , появляется энергетический сдвиг $\mu_0 H m/I$, аналогичное смещение будет испытывать и состояние компаунд-ядра, таким образом результирующий сдвиг выражается в виде

$$\Delta E_{mm'} = H \left(\frac{\mu_b m'}{J} - \frac{\mu_0 m}{I} \right). \quad (2)$$

Для того чтобы получить окончательное выражение, описывающее сдвиг нейтронного резонанса ΔE_0 , нужно просуммировать $\Delta E_{mm'}$ по всем возможным состояниям с учётом статистических весов и заселённости подуровней. Так, при равной нулю поляризации, $f_n = 0$, нейтронного пучка

$$\Delta E_0 = -f_n H \left\{ \left[1 - \frac{1}{(2I+1)(I+1)} \right] \mu_b - \mu_0 \right\}, \quad J = I + \frac{1}{2},$$

$$\Delta E_0 = -f_n H (\mu_b - \mu_0), \quad J = I - \frac{1}{2}. \quad (3)$$

Величина ΔE_0 оказывается весьма малой: в предположении, что μ_b и μ_0 различаются на один ядерный магнетон, а поле на ядре составляет 10^6 Э, сдвиг оказывается равным $\Delta E_0 \approx 3 \times 10^{-6}$ эВ, что на 4–5 порядков меньше собственной ширины нейтронного резонанса.

На реакторе ИБР-30 методом времени пролёта наблюдалось пропускание нейтронов металлическими фольгами из редкоземельных элементов Tb, Dy, Ho и Er. Ядра этих элементов поляризовались посредством глубокого (≈ 30 МК) охлаждения в криостате с раствором

нием ^3He в ^4He . Внутренние магнитные поля на ядрах этих элементов имеют величину $(3-7) \times 10^6$ Э, при этом поляризация ядер внутри доменов составляла от 0,84 до 0,99. Для разрушения поляризации температура на мишени повышалась до 0,5–1,5 К. Чередующиеся измерения с поляризованными и неполяризованными ядрами дали возможность получить времяпролётные спектры, относительный сдвиг резонансов в которых описывался выражением (3). Для получения величины сдвига проводилась подгонка спектров методом наименьших квадратов. В результате длительных измерений (около 300 ч для каждого элемента) были получены значения магнитных моментов компаунд-состояний ядер. Анализ данных по магнитным моментам редкоземельных ядер, несмотря на его относительно невысокую точность (при этом надо отдать должное искусству экспериментаторов и стабильности нейтронного источника — измерялись сдвиги резонансов на величину порядка 10^{-4} от собственной ширины), позволяет, тем не менее, дать общую характеристику магнитных моментов компаунд-состояний редкоземельных ядер и провести сравнение с теоретическими оценками этих величин. Теоретический анализ позволил сделать вывод о том, что описание магнитных моментов компаунд-состояний ядер в рамках статистической модели является правомерным и тем самым модель получает подтверждение ещё в одной области.

Нарушение пространственной (Р) и временной (Т) чётности в компаунд-ядрах. Согласно модели универсального электрослабого взаимодействия гамильтониан, описывающий взаимодействие нуклонов в ядре, может быть представлен в виде $H = H_0 + W$, где W — обусловленная слабым взаимодействием малая добавка, нарушающая Р-чётность. Наличие такого слагаемого в гамильтониане может привести к появлению в экспериментально наблюдаемых величинах Р-нечётных добавок. Оценки для простейших одночастичных ядерных процессов показывали, что величина эффектов должна составлять $10^{-6} - 10^{-7}$, однако существовали и подходы, показывавшие, что в сложных ядрах смешивание возбуждённых состояний разной чётности и одного спина (s- и р-резонансы одного спина в случае возбуждённых состояний, образованных при захвате нейтронов), приводящее к Р-нечётным эффектам, может быть значительно усилено при их близком расположении по энергии. Такие усиленные эффекты наблюдались в эксперименте начиная с 1964 г. [10]. С середины 1981 г. начали публиковаться экспериментальные работы, выполненные в ЛНФ ОИЯИ на ИБР-30 [11–14], в которых для ряда ядер была исследована зависимость полных нейтронных сечений от спиральности нейтронов. На опыте измерялся эффект пропускания:

$$\varepsilon = \frac{T_+ - T_-}{T_+ + T_-}, \quad (4)$$

где $T_{\pm} = \exp(-n\sigma_{\pm})$ — прозрачности мишени для нейтронов с положительной и отрицательной спиральностями, n — толщина мишени, выраженная числом ядер на квадратный сантиметр, из которого затем извлекалась величина Р-нечётного эффекта и, при известных спинах смешивающихся резонансов, величина слабого матричного элемента. Площадь мишени составляла 30 см², поляризация нейтронного пучка

находилась на уровне 60 %, что обеспечивалось разработанной и созданной в ЛНФ поляризованной протонной мишенью на основе лантан-магниевого нитрата $(\text{La}_2\text{Mg}_3(\text{NO}_3)_{12} \times 24\text{H}_2\text{O})$ с парамагнитной примесью ^{142}Nd , в количестве 0,4 % замещающей La).

Зависимость полных сечений от спиральности нейтрона была измерена для 14 резонансов ядер ^{81}Br , ^{93}Nb , ^{111}Cd , ^{117}Sn , ^{127}I , ^{139}La , ^{145}Nd , ^{238}U . Для четырёх резонансов впервые был обнаружен статистически значимый эффект нарушения пространственной чётности. Дальнейшее развитие этих работ привело к широкому международному сотрудничеству с участием физиков ОИЯИ, США, Голландии, Японии и Канады (коллаборация Triple). В результате этого сотрудничества сегодня уже изучено несколько десятков р-волновых резонансов в различных ядрах, определены их спины, что дало возможность извлечь из экспериментально наблюдаемых эффектов величины слабого матричного элемента и получить значение среднеквадратичных матричных элементов слабого взаимодействия, которые согласуются с теоретическими предсказаниями.

Альфа-распад компаунд-ядер. В соответствии с представлением о ядерной реакции с образованием компаунд-ядра как о двухступенчатом процессе исследование (п, α)-реакции на резонансных нейтронах представляется интересным в двух аспектах. С одной стороны, это направление нейтронной спектроскопии, позволяющее изучать полные и парциальные альфа-ширины — дополнительный к известным нейтронным и радиационным ширинам набор характеристик нейтронных резонансов, с другой — это альфа-распад сложных высоковозбуждённых компаунд-состояний. Поскольку времена жизни компаунд-состояний много больше ядерных времён, можно считать компаунд-состояния квазистабильными и рассматривать их альфа-распад по аналогии с альфа-распадом основных состояний ядер.

Изучение альфа-распада компаунд-состояний позволяет в ряде случаев абстрагироваться от индивидуальных особенностей структуры распадающегося состояния и существенно расширить диапазон исследуемых энергий и периодов полураспада. Так, для ядра ^{144}Nd энергия альфа-распада основного состояния $E_{\alpha}^0 = 1,83$ МэВ, а для компаунд-состояний $E_{\alpha}^c = 9,4$ МэВ. Это приводит к различию на 33 порядка в периодах полураспада основного и возбуждённого состояний ядра ^{144}Nd .

Одним из возможных путей распада возбуждённого состояния ядра является испускание гамма-кванта и последующий альфа-распад возникшего промежуточного состояния. При этом энергетический спектр альфа-частиц, наряду с узкими пиками, соответствующими прямым альфа-переходам в основное и возбуждённые состояния, содержит широкий максимум, обусловленный гамма-альфа-процессом. Поскольку в двухступенчатом процессе участвует большое число промежуточных состояний, это приводит к хорошему усреднению его вероятности и позволяет делать довольно общие заключения о свойствах промежуточных состояний и об особенностях гамма-переходов с энергией ≤ 1 МэВ между высоковозбуждёнными состояниями (С–С-переходы).

С использованием расчётной зависимости средней альфа-ширины от энергии по альфа-спектру была восстановлена относительная зависимость радиационной

силовой функции первичных гамма-квантов от энергии. В то же время точность абсолютного определения силовой функции оказалась невысокой, что было связано с ограниченной точностью расчёта проницаемости барьера для альфа-частицы. Исследования усреднённых по резонансам сечений реакции (n, α) [15–17] позволили существенно увеличить эффективное число резонансов и уменьшить погрешность нормировки при расчёте проницаемости барьера. Всё это позволило провести прямое восстановление абсолютного значения радиационной силовой функции первичных мягких гамма-переходов из экспериментального спектра вторичных альфа-частиц реакции $(n, \gamma\alpha)$ [18] и впервые провести сопоставление экспериментальных данных о радиационной силовой функции для гамма-переходов мультипольности $E1$ во всём исследованном диапазоне энергий — от 0,2 до 20 МэВ.

Открытие ультрахолодных нейтронов. Несмотря на то, что многие специалисты, работающие в нейтронной физике, приписывают идею хранения нейтронов Э. Ферми, первая работа [19], в которой указано на возможность хранения и даны первые оценки возможной плотности ультрахолодных нейтронов (УХН) в установке с конвертором из жидкого гелия, появилась в 1959 г.

УХН — нейтроны с чрезвычайно малой кинетической энергией: $\sim 10^{-7}$ эВ. Основным отличительным свойством УХН является то, что они могут отражаться от границы раздела вакуум–вещество при любых углах падения. Это справедливо, если энергия нейтрона меньше величины так называемого фермиевского потенциала

$$U = \frac{\hbar^2}{2m_n} 4\pi N_0 b, \quad (5)$$

здесь m_n — масса нейтрона, N_0 — плотность ядер, b — когерентная амплитуда рассеяния нейтрона. Это свойство УХН и определяет их привлекательность как объекта для исследования свойств самого нейтрона и процессов взаимодействия нейтронов с поверхностью.

Внимание к УХН вновь привлёк Ф.Л. Шапиро в 1968 г. Анализируя возможность экспериментального обнаружения электрического дипольного момента (ЭДМ) нейтрона, Шапиро предложил использовать УХН для поиска ЭДМ нейтрона [20]. Это стимулировало экспериментальные работы по получению и хранению УХН. В 1968 г. на импульсном реакторе ИБР-1 впервые были зарегистрированы УХН [21]. Тем самым было показано, что казавшаяся неразрешимой задача выделения УХН на фоне тепловых нейтронов может быть эффективно решена при выводе УХН из активной зоны реактора по изогнутому зеркальному нейтроноводу.

Усовершенствование источников УХН продолжается до сих пор. Уже достигнуты плотности порядка 50 н см^{-3} , что на четыре порядка больше, чем в первых экспериментах. Существуют проекты, в которых планируется увеличить плотность до $10^3 - 10^4 \text{ н см}^{-3}$. Именно с помощью УХН получены наиболее точные значения времени жизни нейтрона, ограничения на величину заряда нейтрона ($\leq 10^{-25}e$) и ЭДМ ($\leq 10^{-26}e \text{ см}$).

Дальнейшее развитие источников УХН, несомненно, приведёт к улучшению экспериментальной точности и,

как следствие, к новым подтверждениям (или уточнениям) современных моделей электрослабого взаимодействия, фундаментальных свойств нейтрона, астрофизических процессов с участием нейтронов.

Наряду с этим, по предложению польских физиков Б. Бураса и Е. Яника на нейтронных источниках ЛНФ были начаты эксперименты по исследованию структуры и динамики конденсированных сред. Были созданы дифрактометры и спектрометры неупругого рассеяния, на которых начаты исследования структуры кристаллов, атомной и молекулярной динамики, изучение структуры и динамики жидкостей, спектроскопия уровней кристаллического электрического поля в редкоземельных соединениях и т.д. В начале 1970-х годов И.М. Франк инициировал проведение исследований свойств биологических объектов с использованием нейтронов. Благодаря этому на ИБР-30 под руководством Ю.М. Останевича была создана установка малоуглового рассеяния нейтронов, которая оказалась исключительно эффективной для решения целого круга задач, связанных с биологией. Но наиболее полное развитие исследования в области конденсированных сред получили на новом реакторе ИБР-2.

Реактор ИБР-2. С 1966 г. И.М. Франка и Д.И. Блохинцева охватывает идея создания мощного импульсного реактора ИБР-2. Предпосылками к этому были повышенный интерес в мировом научном сообществе к источникам нейтронов, как стационарным, так и импульсным, успешный опыт эксплуатации ИБР и необходимость увеличения плотности потока нейтронов на выведенных пучках. Идея получает поддержку в ОИЯИ и в правительстве СССР. При активном участии И.М. Франка начинаются проектные и опытно-конструкторские работы по созданию ИБР-2. Главный конструктор — Н.А. Доллежал (НИКИЭТ), научный руководитель проекта — Д.И. Блохинцев (1967–1979 гг.), а с 1979 г. — И.М. Франк. В ЛНФ по инициативе И.М. Франка создаётся отдел, в задачи которого входят научное руководство и курирование работ ИБР-2.



И.М. Франк (справа) и Н.А. Доллежал



И.М. Франк у пульта управления реактора ИБР-2.

В 1969 г. начинается строительство этого очень сложного, уникального объекта. Создание ИБР-2 проходит при определяющей помощи Минсредмаша: это и ресурсы, и новые технологии, инженерная, интеллектуальная поддержка его отраслевыми институтами. В координации этих работ велика роль И.М. Франка.

1977 г. — проходит успешно физический пуск ИБР-2 без теплоносителя (натрия) [22], 1980–1984 гг. — физический пуск с теплоносителем и энергетический пуск [23]. И.М. Франк как научный руководитель принимает непосредственное участие в пусковых работах. На рисунке 3 приведена принципиальная схема реактора ИБР-2.

В этом реакторе активная зона, изготовленная из двуокси плутония, имеет в горизонтальном сечении вид неправильного шестигранника. Около одной из сторон активной зоны располагается модулятор реактивности, состоящий из основного и дополнительного подвижных отражателей. Лопастей этих отражателей вращаются с различной скоростью, и при их одновременном прохождении через центр активной зоны реактор переходит в надкритическое состояние. Охлаждение активной зоны производится жидким натрием. Такая схема позволила получить поистине уникальные, с точки зрения импульсного выхода нейтронов из реактора, параметры. До сих пор ИБР-2 остается самым высокопоточным исследовательским импульсным источником нейтронов в мире. Основные параметры реактора приведены в табл. 2.

Среди других импульсных источников нейтронов в мире ИБР-2 в Дубне выделяется рекордно высокими

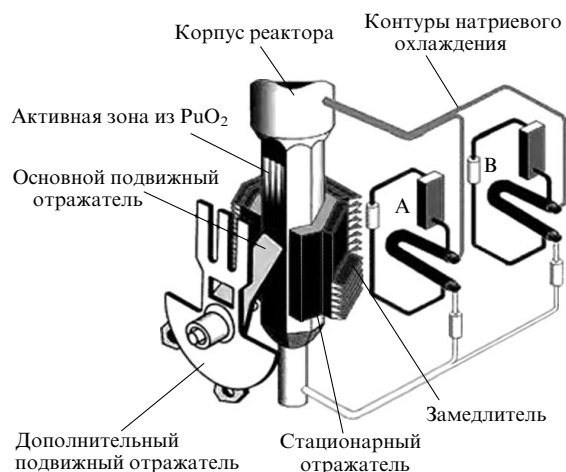


Рис. 3. Принципиальная схема реактора ИБР-2.

Таблица 2. Основные параметры реактора ИБР-2

Параметр ИБР-2	Значение
Средняя мощность, МВт	2
Тип топлива	PuO ₂
Количество ТВС	78
Максимальное выгорание, %	6,5
Частота импульсов, Гц	5; 25
Полуширина импульса, мкс	215
Средний поток тепловых нейтронов, см ⁻² с ⁻¹	5×10^{12}
Пиковый поток тепловых нейтронов, см ⁻² с ⁻¹	10^{16}

средней мощностью (2 МВт) и пиковым значением нейтронного потока (10^{16} см⁻² с⁻¹), а также малой частотой повторения импульсов (5 Гц вместо стандартных 30–50 Гц). На реакторе создана уникальная экспериментальная база. Большинство установок создавалось на основе международной кооперации, например малоугловая установка изготовлялась в сотрудничестве с Венгрией, спектрометр неупругого рассеяния создавался в сотрудничестве с Польшей, комплекс дифрактометров для геологических исследований — в сотрудничестве с Германией, фурье-дифрактометр — в сотрудничестве с Финляндией и т.д. Отличительная и уникальная особенность ИБР-2 заключается в том, что имеется канал для облучений с большой площадью — 20×40 см в поперечнике — с лёгким доступом для доставки образцов. Поток быстрых нейтронов в канале 3×10^{12} см⁻² с⁻¹. Канал оборудован, кроме того, установкой для облучения малых образцов при низкой температуре (до 10 К) — другой криогенной установкой для облучения в высоком потоке нейтронов в России нет.

Наличие в спектре нейтронов быстрого импульсного реактора ИБР-2 значительной доли эпитепловых и резонансных нейтронов даёт уникальную возможность проведения нейтронного активационного анализа (НАА) на эпитепловых нейтронах и тем самым позволяет повысить чувствительность метода к элементам с большими сечениями в эпитепловой области энергий, в первую очередь к редкоземельным элементам. Так, чувствительность пневмотранспортной установки (ПТУ) "Регата" к редкоземельным элементам составляет величину порядка 10^{-5} ppm, что на два-три порядка выше чувствительности установок для НАА с тепловыми

нейтронами. Работы ведутся в сотрудничестве с российскими и зарубежными научными центрами при финансовой поддержке грантами со стороны стран-участниц ОИЯИ, Евросоюза, НАТО и др.

Таким образом, в заключение можно отметить, что под руководством И.М. Франка с 1957 г. по 1989 г. лаборатория нейтронной физики Объединённого института ядерных исследований добилась выдающихся результатов в создании и эксплуатации импульсных реакторов на быстрых нейтронах периодического действия. Сформировалась научно-техническая школа по импульсным нейтронным источникам, получившая признание в научном сообществе.

Многие научные направления, работы по которым начинались под руководством И.М. Франка, вышли на качественно новый уровень и реализуются сегодня на основе широкой международной кооперации со странами-участницами ОИЯИ и многочисленными партнёрами как в России, так и за рубежом.

Успешные работы в ОИЯИ по модернизации ИБР-2 и по созданию установки ИРЕН (источник резонансных нейтронов), запуск которой осуществлен в декабре 2008 г., большая серия научных экспериментов, проводимых в сотрудничающих научных центрах уже после ухода из жизни Ильи Михайловича, — это лучший памятник замечательному учёному.

Список литературы

1. Бондаренко И И, Ставиский Ю Я *Атомная энергия* **7** 417 (1959) [Bondarenko I I, Stavitskii Yu Ya *Atom. Energy* **7** 887 (1961)]
2. Франк И М, Дубна: наука, содружество, прогресс, № 13, 26 марта (1986)
3. Франк И М, Сообщение ОИЯИ Р-674 (Дубна: ОИЯИ, 1961)
4. Попов А Б, Сообщение ОИЯИ РЗ-2003-182 (Дубна: ОИЯИ, 2003)
5. Пикельнер Л Б, Попов Ю П, Шарапов Э И *УФН* **137** 39 (1982) [Pikel'ner L B, Popov Yu P, Sharapov E I *Sov. Phys. Usp.* **25** 298 (1982)]
6. Алфименков В П и др. *ЯФ* **17** 13 (1973) [Alfimenkov V P et al. *Sov. J. Nucl. Phys.* **17** 6 (1973)]
7. Alfimenkov V P et al. *Nucl. Phys. A* **267** 172 (1976)
8. Meister A et al. *Nucl. Phys. A* **362** 18 (1981)
9. Shapiro F L, in *Research Applications of Nuclear Pulsed Systems* (Vienna: IAEA, 1967) p. 176
10. Abov Yu G, Krupchitsky P A, Oratovsky Yu A *Phys. Lett.* **12** 25 (1964)
11. Алфименков В П и др. *Письма в ЖЭТФ* **34** 308 (1981) [Alfimenkov V P et al. *JETP Lett.* **34** 295 (1981)]
12. Алфименков В П и др. *Письма в ЖЭТФ* **35** 42 (1982) [Alfimenkov V P et al. *JETP Lett.* **35** 51 (1982)]
13. Алфименков В П и др., Препринт РЗ-82-86 (Дубна: ОИЯИ, 1982)
14. Alfimenkov V P et al. *Nucl. Phys. A* **398** 93 (1983)
15. Анджеевски Ю и др. *ЯФ* **48** (1) 20 (1988)
16. Анджеевски Ю и др. *ЯФ* **32** 1192 (1980)
17. Втюрин В А и др., Сообщение ОИЯИ Р15-88-186 (Дубна: ОИЯИ, 1988)
18. Втюрин В А, Попов Ю П, Сообщение ОИЯИ РЗ-82-309 (Дубна: ОИЯИ, 1982)
19. Зельдович Я Б *ЖЭТФ* **36** 1952 (1959) [Zel'dovich Ya B *Sov. Phys. JETP* **9** 1389 (1959)]
20. Шапиро Ф Л *УФН* **95** 145 (1968) [Shapiro F L *Sov. Phys. Usp.* **11** 345 (1968)]
21. Лушников В И и др., Препринт РЗ-4127 (Дубна: ОИЯИ, 1968)
22. Ананьев В Д и др. *Атомная энергия* **46** (6) 393 (1979) [Anan'ev V D et al. *Atom. Energy* **46** 449 (1979)]
23. Ананьев В Д и др. *Атомная энергия* **57** (4) 227 (1984) [Anan'ev V D et al. *Atom. Energy* **57** 673 (1984)]

PACS numbers: **01.60. + q, 01.65. + g, 28.20. - v**
DOI: 10.3367/UFNr.0179.200904k.0421

И.М. Франк — создатель и руководитель лаборатории атомного ядра в ФИАНе

Б.А. Бенецкий

Этот доклад посвящён основанию и развитию лаборатории И.М. Франка, нейтронным и ядерным экспериментам и решению так называемой атомной проблемы.

Когда И.М. Франк в 1934 г. по предложению С.И. Вавилова перешел из Государственного оптического института (ГОИ) в Физический институт АН СССР (ФИАН) он был молодым человеком, но уже сложившимся исследователем с примерно девятилетним стажем научной работы. Первую самостоятельную научную работу Илья Михайлович выполнил в Математическом обществе при Таврическом университете, временно преобразованном тогда в педагогический институт, где он, не будучи студентом этого института, слушал лекции в 1925–1926-м учебном году и работал в учебной физической лаборатории. Эта первая работа по геометрии, появившаяся, вероятно, не без влияния его отца, талантливого математика Михаила Людвиговича Франка, была опубликована в 1928 г. В то время И.М. Франк учился на физико-математическом факультете Московского государственного университета (1926–1930 гг.), сочетая выполнение учебных планов по физике (кафедра Л.И. Мандельштама) и математике с постановкой новых задач в специальном физическом практикуме. Тогда же И.М. Франк под руководством С.И. Вавилова выполнил работу по исследованию тушения люминесценции, опубликованную ими в 1931 г.

Илья Михайлович с огромным уважением и теплотой относился к Сергею Ивановичу Вавилову, называл его своим Учителем, и даже в устном упоминании это слово всегда и безусловно звучало с большой буквы. Свидетельством того, как Сергей Иванович оценивал своего ученика, служит его отзыв о научной работе И.М. Франка [1], данный в 1938 г. в связи с рекомендацией И.М. Франка в члены-корреспонденты АН СССР. "Илья Михайлович Франк ... зарекомендовал себя как прекрасный, чрезвычайно разносторонний физик-экспериментатор с выдающейся теоретической эрудицией. В одной из первых работ [посвящённых процессам тушения во флюоресцирующих жидкостях. — Б.А.Б.] ... обнаружил большое экспериментальное умение и исключительную физическую интуицию... В этих [по исследованию фотохимических реакций. — Б.А.Б.] работах проявилась инициатива и оригинальность экспериментальной методики и научного мышления И.М. Франка. Работы интересны изяществом метода и исчерпывающим анализом экспериментальных данных... По моему предложению в 1933 г. И.М. Франк перешёл к работе в совершенно другой области — физике атомного ядра. С поразительной быстротой он освоился с методикой... вошёл в курс состояния мировой литературы и стал руководящим работником в молодой лаборатории атомного ядра*...

* Будущий ядерно-физический отдел Д.В. Скобельцына в ФИАНе. (Примеч. Б.А.Б.)

Живейшее участие принял И.М. Франк в осуществлении и объяснении опытов П.А. Черенкова... В частности, И.М. Франку принадлежит блестящая догадка о том, что перед нами совершенно новое явление, специфическое для распространения электронов, движущихся со скоростью больше фазовой скорости света в плотной среде. Эта идея получила полное и вполне строгое развитие в теоретической работе И.Е. Тамма и И.М. Франка ... Незаурядная одарённость, эрудиция и прекрасные научные результаты И.М. Франка уже нашли своё выражение в том, что Президиум АН СССР присудил И.М. Франку степень доктора физико-математических наук в 1934 г., когда ему было 26 лет".

Эта диссертационная работа, которая была выполнена в течение трёх лет в ГОИ в лаборатории А.Н. Теренина, посвящена экспериментальному исследованию фотохимических реакций оптическими и спектрометрическими методами.

Для понимания масштаба широты интересов и возможностей Ильи Михайловича к сказанному необходимо добавить следующее. В 1934–1935 гг. он проводил исследования космических лучей методом камеры Вильсона на Эльбрусе, в 1937–1940 гг. совместно с Л.В. Грошевым изучал рождение электронно-позитронных пар гамма-квантами (по характеристике С.И. Вавилова "с исключительной тщательностью и полнотой"), в эти же годы принимал участие совместно с Н.А. Добротиным и П.А. Черенковым в работе Стратосферной комиссии АН, приведшей к открытию эффекта резкой вариации интенсивности свечения ночного неба, в 1942 г. методами классической электродинамики провёл исследование эффекта Доплера в преломляющих средах, в 1946 г. совместно с В.Л. Гинзбургом предсказал существование нового явления — переходного излучения.

1946 год явился для Ильи Михайловича годом признания и новых проблем. Он стал лауреатом премии, ныне называемой Государственной Премией I степени, за открытие и объяснение природы излучения Вавилова–Черенкова (именно так он сам называл это явление), был избран в члены-корреспонденты Академии наук и стал основателем и руководителем лаборатории в Физическом институте АН СССР. Эта лаборатория была образована 1 апреля 1946 г., когда ядерно-физический отдел Д.В. Скобельцына в ФИАНе был разделен на три лаборатории: И.М. Франка, Н.А. Добротина и В.И. Векслера. Лаборатория И.М. Франка просуществовала в ФИАНе до 1 января 1971 г., когда на основе трёх лабораторий ФИАНа — атомного ядра, фотоядерных реакций и нейтрино — был организован Институт ядерных исследований (ИЯИ) АН СССР (теперь ИЯИ РАН).

В 1946 г. основные направления работы лаборатории И.М. Франка определялись необходимостью решения "атомной проблемы", а конкретно — определения микроскопических характеристик процессов деления ядер и взаимодействия нейтронов с ядрами, макроскопических параметров ядерных реакторов, исследований реакций с легчайшими ядрами (таких как взаимодействие нейтронов с литием, дейтронов с дейтерием, дейтронов с тритием).

Никаких экспериментальных средств у вновь образованной лаборатории не было, за исключением того, что ФИАН обладал самым мощным в Союзе радиевым источником. Кроме этого, не было фактически ничего [2].

В момент образования в состав лаборатории входили, включая руководителя, пять научных сотрудников, к концу года — пятнадцать, среди которых — специалист по радиоэлектронике и ещё три инженерно-технических работника. К концу 1949 г. в лаборатории работало уже 25 сотрудников. В этих условиях Илья Михайлович проявил себя как выдающийся организатор и руководитель научного коллектива — работы были начаты незамедлительно.

По свидетельству очевидца: "Когда мы пришли в 1946 г., было только центральное здание и больше ничего. Там помещалась лаборатория Франка. На втором этаже было, по-видимому, три комнаты, две из них смежные. Был вход в комнату и из неё направо и налево. Было ещё две комнаты, в которых я никогда не был, потому что они были секретные. Там, собственно, и начались работы по размножению нейтронов в уран-графитовых системах для реакторов. Их вели И.М. Франк, Л.В. Грошев, Л.Е. Лазарева, Е.Л. Фейнберг уже позже. Что там делалось, я не знаю. Были три комнаты, мы находились в центральной, они бегали из одной в другую. Охраны не было, только, так сказать, внутренняя дисциплина" [2].

В то время первой задачей было измерение отклонения от единицы коэффициента размножения нейтронов, равного произведению числа образующихся при делении урана вторичных нейтронов ν на вероятность их замедления до тепловых энергий ϕ и на вероятность остаться в размножающей системе θ :

$$\nu\phi\theta - 1.$$

По меткому высказыванию В. Вайскопфа, несчастье человечества было следствием того, что Бог сделал эту разность хотя и малой, но положительной. Если бы она оказалась равной, например, двум десяткам, то реактор на естественном уране был бы непомерно велик. Поэтому необходимо было не только определить эту величину, но и попытаться найти пути её увеличения. Этим и занимались "люди, бегавшие из комнаты в комнату".

Остальной состав лаборатории только формировался. Лаборатория была укомплектована физиками, пришедшими с войны, т.е. молодыми сотрудниками, не имевшими опыта работы в этой области. "Мы пришли после годичного курса. Некоторые пришли, минув его... Для остального состава лаборатории формулировались общезначимые ядерные задачи, а средства были весьма ограничены" [2]. И далее: "Илья Михайлович понимал, по-видимому, что нужны какие-то технические средства для работы в ядерной физике, и в комнате на первом этаже главного корпуса начали собирать ускорительную трубку. Каскадный генератор Кокрофта–Уолтона. Е.М. Балабанов (который был специалистом по электрическим явлениям в газах и занимался коронным разрядом) и Л.Н. Кацауров строили эту трубку. Причём Е.М. Балабанов по своим связям доставал конденсаторы, фарфор какой-то, предназначенный не для этой цели. В общем, из подручных материалов они собрали ускорительную трубку". Таких ускорителей было собрано не менее трёх, и их энергия оказалась достаточной для создания источников быстрых нейтронов и исследований реакций с легчайшими ядрами.

В период до 1952 г. в целом были созданы новый научный коллектив, экспериментальная и измерительная

базы, разработаны теоретические основы и измерительные методы. Были проведены исследования по физике взаимодействия нейтронов с веществом; физике взаимодействия быстрых нейтронов с ядрами (в том числе, с ураном для решения задачи бланкета — делящейся оболочки термоядерного реактора); измерены сечения реакций с легчайшими ядрами (nLi , DD , DT); определены практически важные характеристики деления и параметры реакторов (в том числе, коэффициенты размножения нейтронов, геометрические параметры, вероятности замедления до тепловых энергий). При этом реакторные параметры определялись способом альтернативным методу сборки критических систем — "методом призмы".

Первоначально теория призмы была развита И.И. Гуревичем и М.Я. Померанчуком для гомогенной системы, но априори было известно, что это не оптимальный вариант. Илья Михайлович с сотрудниками исследовали подкритические уран-графитовые системы, в которых наблюдалось экспоненциальное затухание нейтронного потока после впрыска в такую призму импульса нейтронов (так называемый метод нестационарной диффузии). В 1946–1949 гг. были выполнены работы по изучению равновесных спектров и диффузионных параметров нейтронов в размножающих и замедляющих средах. При этом было показано, что эффективная температура вытекающих из замедлителя нейтронов может отличаться от температуры среды. Был открыт эффект диффузионного охлаждения — зависимость средней скорости нейтронов в среде и, следовательно, их коэффициента диффузии от размеров замедлителя.

Логическим продолжением этого направления явилась разработка способа спектрометрии медленных нейтронов по времени замедления. В лаборатории в короткие сроки был разработан и осуществлён проект оригинального спектрометра по времени замедления в свинце (СВЗ) на основе построенного силами того же коллектива генератора Кокрофта – Уолтона.

Ещё в 1944 г. Е.Л. Фейнберг, рассматривая процесс замедления нейтронов в среде тяжёлых атомов, заметил эффект, напоминающий принцип автофазировки частиц при ускорении. В такой среде нейтрон с большей скоростью чаще сталкивается с тяжёлыми ядрами и более эффективно замедляется, а с меньшей — менее эффективно. При одновременном начале процесса замедления происходит группировка спектра замедляющихся нейтронов около средней энергии $\bar{E}$. Эта энергия функционально связана с временем замедления t , например для значений $\bar{E} \gg 1$ эВ [3]:

$$\bar{E} = \frac{K}{(t - t_0)^2},$$

где K и t_0 — параметры, зависящие от характеристик замедлителя и источника нейтронов. В этом состоит принцип спектрометрии нейтронов по времени замедления. Спектрометр по времени замедления нейтронов в свинце оказался очень эффективным средством исследований по реакторной тематике, в том числе для измерений сечений захвата нейтронов.

Когда в 2003 г., к 95-летию со дня рождения Ильи Михайловича, мне довелось собирать соответствующий материал, оказалось невозможным обнаружить ссылку, содержащую дату запуска первого в мире СВЗ в лаборатории И.М. Франка. Объяснение столь странного

факта, как оказалось, содержится в воспоминаниях Евгения Львовича Фейнберга. Необходимо отметить, что И.М. Франк многократно и по разным поводам подчёркивал вклад Е.Л. Фейнберга в становление и развитие лаборатории, он даже ввёл в употребление специальный термин "ассоциированный член нашей лаборатории".

Евгений Львович в книге воспоминаний о Ф.Л. Шапиро [4] доходчиво пояснил суть дела: «Те, "кому полагается", внимательно вчитались в мою анкету, и в 1950 г. я был отстранён от закрытых работ (по-видимому, я был допустим на ранней стадии развития атомной проблемы, когда людей было катастрофически мало...) ... А тогда "представитель Совета Министров при ФИАНе", генерал из "органов" Ф.П. Малышев, оценив успех, предложил Фёдору Львовичу [Шапиро] и Л.Е. Лазаревой оформить патент на этот спектрометр и диплом на открытие. Однако они согласились на это только в том случае, если в число авторов буду включен и я. Генерал был против, но они упорно не уступали. Так дело и кончилось ничем».

Как знают работавшие с ним люди, Илья Михайлович был чрезвычайно деликатный и не слишком открытый человек, что некоторым могло показаться проявлением слабости, но на самом деле его принципы были незыблемы. Сейчас не каждый может представить себе, каким гражданским мужеством должны были обладать сотрудники и руководитель лаборатории в то время (примерно 1948–1949 гг.) в описанном выше противостоянии.

Спустя примерно четыре десятилетия, в 1988 г., на основании результатов исследований стационарной и нестационарной диффузии нейтронов было зарегистрировано открытие. Позднее в нашей стране и ряде других стран (США, Япония) на базе более мощных источников нейтронов были созданы спектрометры, аналогичные первому СВЗ, который проработал в лаборатории атомного ядра до 2005 г. А в 2003 г. на "Большом кубе" — новом СВЗ на пучке протонов линейного ускорителя ИЯИ, превосходящем в момент запуска по эффективности другие спектрометры подобного типа не менее чем на пять порядков, были получены первые научные результаты. "Нейтроны, — как говорил Илья Михайлович, — специальность нашего дома".

В 1953 г. И.М. Франку и ещё шести сотрудникам его лаборатории была присуждена Государственная премия "за работы по физике реакторов и исследования ядерных реакций с легчайшими ядрами". В целом за эти работы был отмечен правительственными наградами 31 сотрудник лаборатории, т.е. практически все, работавшие в лаборатории с момента её образования по 1950 г. включительно. Из-за ограниченности объёма доклада я не буду далее излагать материал в историческом аспекте, сославшись на нашу публикацию [5] (дополнение, начиная со с. 12).

Если верно утверждение М. Монтеня, что человек — это стиль, то оно, вероятно, справедливо и в отношении научного и вообще творческого коллектива. А Илья Михайлович, как известно всем, кто имел счастье общаться с ним, как учёный и научный руководитель был носителем черт особого стиля "старого" ФИАНа. Что определяло этот стиль научной деятельности? Это, как мне представляется:

— во-первых, стремление к предельной ясности и полноте понимания сущности изучаемого предмета вне

зависимости от предполагаемой ценности результата исследования. Или, что не менее важно, — четкого определения границ такого понимания;

— во-вторых, убеждение в единстве и равноценности всех составляющих того, что мы понимаем под словами "наука" и "физика" в частности;

— в-третьих, признание в физической науке первенства экспериментальных методов исследования. "Любовь хорошо, а золотой браслет — лучше". Под золотым браслетом подразумевался результат опыта (с оговоркой: "если он не дутый");

— в-четвертых, стремление найти наиболее простой (в лучшем смысле слова) путь исследования, при котором главным инструментом изучения природы служит голова экспериментатора, а остальное — дополнением к ней. В этом случае он бывал довольно жесток в оценках: "NN — человек аппаратный";

— в-пятых, высокая критичность при определении степени достоверности собственных результатов и выводов. Мне хорошо памятен случай, когда Илья Михайлович в течение восьми лет "тормозил" публикацию экспериментальных данных, полученных в работе с его участием, пока не удостоверился в их правильности. Зато попутно была выполнена и успешно защищена кандидатская диссертация, исходным пунктом которой была проверка ранее полученных результатов. "Вы очень деликатно покрывали американцев", — похвалил автора Илья Михайлович;

— в-шестых, способность восприятия обоснованного суждения сотрудника, независимо от его возраста и положения, а также уважение к результатам работы коллег и учеников. "Лучше делать свои работы, чем критиковать чужие". "Ну как там эта работа, которой я не патриот?" Первое он внушал мне, когда я был молодым младшим научным сотрудником. Второе я услышал от Ильи Михайловича при нашей предпоследней в жизни встрече в палате академической больницы;

— в-седьмых, строгое соблюдение этических норм во всех, в том числе деловых, отношениях. Как мне представляется, Илья Михайлович был достаточно избирателен в контактах с окружающими его людьми. Будучи сам исключительно интеллигентным, он высоко ценил это качество в других. Однако, придавая большое значение правилам "хорошего тона", Илья Михайлович не переносил автоматически оценку личностных качеств человека на результаты его труда.

Вот что писал Илья Михайлович о своем понимании интеллигентности [6, с. 85]: «Сам я выходец из интеллигентной семьи, из среды так называемой трудовой интеллигенции. Почти всю мою жизнь слово "интеллигент" звучало пренебрежительно, а с добавкой "гнилой" — ругательно. Мой отец, которым я очень горжусь, и ряд моих учителей были значительно интеллигентнее меня». И далее: "Я далёк от мысли считать всех работников управленческого аппарата чиновниками. Среди них много знающих и дельных работников, но есть и чиновники. А чиновники всегда были и остаются главными недоброжелателями интеллигенции. Не менее опасны и ученые-бюрократы. Бюрократ в науке не менее опасен, чем чиновник... А интеллигент и бюрократ всегда были и всегда будут злейшими врагами" [6, с. 89].

Как воспитатель молодых кадров Илья Михайлович последовательно проводил в жизнь принцип "лучше позже, но лучше". "Сначала защищаются те, кто очень

хочет, затем — наиболее талантливые, потом — все остальные". "Экзамен по специальности (как говорил Сергей Иванович) нужен для того, чтобы не пропустить, кого не следует".

Я позволю себе закончить эту статью размышлениями Ильи Михайловича о душе. Привожу эти строки не по тексту отредактированной рукописи из архива [6, с. 85], а по факсимиле [6, с. 170, 171 (фотоблок)] в том же издании, поскольку при чтении именно факсимильного текста мне внутренне слышится голос Ильи Михайловича и его манера говорить.

"Людам моего возраста необходимо заботиться о своей душе. У человека душа не только имеется, но и часто болит. И всё же, пусть простят мне это верующие, я не думаю, что она бессмертна. Но каждому из нас необходимо оставаться наедине со своей совестью, она подскажет, надо ли при этом повторять слова молитвы.

Никто не уходит из жизни бесследно. Что-то от нас остаётся жить в тех, кто нас окружал. Живёт же в нас нечто от тех, кого мы потеряли".

Приношу благодарность всем, кто помогал мне в подготовке этого доклада, в частности научному сотруднику лаборатории атомного ядра ИЯИ РАН М.М. Салохиной.

Список литературы

1. Вавилов С И, в сб. *Илья Михайлович Франк. 1908–1990: К 90-летию со дня рождения* (Под общ. ред. В Л Аксенова, ред.-сост. А С Гиршева) (Дубна: ОИЯИ, 1998) с. 5
2. Барит И Я, Беловицкий Г Е, Бенецкий Б А, Препринт № 1161/2006 (М.: ИЯИ РАН, 2006)
3. Исаков А И и др. *Нестационарное замедление нейтронов: Основные закономерности и некоторые приложения* (М.: Наука, 1984) Гл. 2
4. Фейнберг Е Л, в сб. *Ф.Л. Шапиро: ученый и человек: Книга воспоминаний* (Сост. Л Б Пикельнер, А В Стрелков) (Дубна: ОИЯИ, 1998) с. 62
5. Барит И Я, Бенецкий Б А, Казарновский М В, в сб. *Илья Михайлович Франк. 1908–1990: К 90-летию со дня рождения* (Под общ. ред. В Л Аксенова, ред.-сост. А С Гиршева) (Дубна: ОИЯИ, 1998) с. 7
6. Франк И М, в сб. *Илья Михайлович Франк. 1908–1990: К 90-летию со дня рождения* (Под общ. ред. В Л Аксенова, ред.-сост. А С Гиршева) (Дубна: ОИЯИ, 1998) с. 85

PACS numbers: **01.65.** + g, 03.75.Be, **28.20.** – v
DOI: 10.3367/UFNr.0179.2009041.0424

И.М. Франк и оптика ультрахолодных нейтронов

А.И. Франк

К проблемам нейтронной оптики Илья Михайлович Франк обратился в начале 1970-х годов, вскоре после открытия Ф.Л. Шапиро с сотрудниками ультрахолодных нейтронов (УХН). Разумеется, это не было случайностью. В экспериментах с УХН столь ярко проявлялись необычные волновые свойства нейтрона, что это не могло не волновать Илью Михайловича, которому столь близок был именно волновой подход к физике. В нейтронной оптике он, вероятно, увидел область, где тесно смыкаются столь любимая им оптика и нейтронная физика, которой он отдал не один десяток лет.

Напомним, что после первых ярких работ по наблюдению УХН возникла и стала всё более проявляться и первая проблема. Как и ожидалось, УХН действительно долго хранились в сосудах, но время их хранения было заметно меньшим, чем предсказываемое теорией, что представляло собой так называемую аномалию в хранении УХН. Это обстоятельство, несомненно, представляло собой определённый вызов как для экспериментаторов, так и для теоретиков.

Поэтому не удивительно, что большая часть работ Ильи Михайловича по нейтронной оптике [1–7] относится к периоду, непосредственно следовавшему за временем открытия УХН в 1968 г. Здесь мне хотелось бы кратко напомнить о некоторых результатах этих работ и рассказать о том, какой была дальнейшая судьба высказанных в них идей.

Итоги первого периода исследований ультрахолодных нейтронов были подведены Ф.Л. Шапиро в докладе [8], подготовленном им* для конференции в Будапеште летом 1972 г. На той же конференции с дополнением к этому докладу выступил И.М. Франк [3].

Известно, что взаимодействие длинноволновых нейтронов с веществом может быть описано путём введения так называемого эффективного потенциала

$$U_{\text{eff}} = \frac{\hbar^2}{2m} \frac{Nb}{\pi}, \quad (1)$$

пропорционального плотности атомных ядер в веществе N и длине когерентного рассеяния нейтронов b на ядрах вещества. Именно этим подходом пользовался в своих работах Ф.Л. Шапиро. Эффективный потенциал U является результатом усреднения точечного квазипотенциала Ферми

$$u = \frac{2\pi\hbar^2}{m} b\delta(\mathbf{r} - \mathbf{r}_j), \quad (2)$$

описывающего в первом борновском приближении поведение волны, рассеянной точечным объектом на больших от него расстояниях. Однако Илья Михайлович немедленно перешёл к более привычному ему, восходящему к Ферми, описанию взаимодействия нейтронов со средой через показатель преломления $n = k/k_0$, где k и k_0 — волновые числа в среде и вакууме соответственно. Квадрат показателя преломления сопоставлялся при этом с диэлектрической постоянной для света ε :

$$n^2 = \varepsilon' + i\varepsilon'' = 1 - \frac{4\pi N}{k_0^2} (b' - ib''). \quad (3)$$

Здесь следует отметить несколько обстоятельств. Во-первых, длина рассеяния b — величина комплексная. Следовательно, и диэлектрическая проницаемость тоже комплексная величина, что, впрочем, является привычным в оптике. Её мнимая часть определяется сечением процессов, приводящих к исчезновению УХН, а именно — радиационного захвата и неупругого рассеяния. Во-вторых, действительная часть b для большинства веществ положительна. И в-третьих, мнимая часть b обычно много меньше действительной.

Таким образом, из формулы (3) видно, что если волновое число падающей волны k_0 становится меньше

некоторого порогового значения $k_{\text{lim}} = \sqrt{4\pi Nb'}$, то действительная часть ε оказывается отрицательной. Вспомня, что показатель преломления также величина комплексная, $n = n' + in''$, мы сразу же видим, что отрицательный знак ε' означает, что мнимая часть показателя преломления больше его действительной части:

$$\varepsilon = n^2 = (n'^2 - n''^2) + 2in'n''. \quad (4)$$

Эта ситуация характерна для оптики металлов. Таким образом, Илья Михайлович сопоставил полное отражение УХН с отражением света от металла, причём от металла с аномально высокой проводимостью. По аналогии с тем, как это делается в металлооптике, амплитуда отражённой волны была им определена через коэффициент Френеля.

Надо сказать, что аналогия между отражением УХН от поверхности вещества и отражением света от идеального металла и сейчас не является вполне общепринятой, поскольку металлическим отражением нейтронов часто неоправданно называют совсем другое явление. По существу, работа [3] была первой работой по оптике УХН. Впоследствии И.М. развил эти идеи [4, 5] и в 1974 г. прочёл памятную многим лекцию на II Нейтронной школе в Алуште [6]. К этой лекции мы и обратимся.

Как мы видели, квадрат волнового числа нейтронов в среде является комплексной величиной:

$$k^2 = k_0^2 - 4\pi N(b' - ib''), \quad k = k' + ik''. \quad (5)$$

Подставляя в левую часть первого из уравнений (5) квадрат комплексного волнового числа и приравнявая мнимые и действительные части этого уравнения, легко получить явные выражения для действительной и мнимой частей волнового числа, что и было сделано И.М. в работах [5, 6]:

$$k' = \sqrt{\frac{k_0^2 - 4\pi Nb'}{2}} + \sqrt{\frac{(k_0^2 - 4\pi Nb')^2}{4} + (2\pi Nb'')^2}, \quad (6)$$

$$k'' = \sqrt{\frac{4\pi Nb' - k_0^2}{2}} + \sqrt{\frac{(k_0^2 - 4\pi Nb')^2}{4} + (2\pi Nb'')^2}.$$

Формулами (6) пользуются редко, поскольку малость величины b'' позволяет разложить подкоренные выражения и получить более простые приближённые формулы. Однако имеется важный, хотя и не слишком часто встречающийся, случай сильнопоглощающих сред, в котором мнимая и действительная части длины рассеяния оказываются одного порядка. Тогда в соответствии с (6) как действительная, так и мнимая части волнового числа сильно зависят от действительной и мнимой частей длины рассеяния.

И тут проявляется одно удивительное свойство оптики поглощающих сред. Положим, что волновое число k_0 волны, падающей на среду, стремится к нулю. Легко показать, что действительная часть волнового числа в среде k' ограничена величиной

$$k_{\text{min}}^2 = 2\pi\rho b' \left(\sqrt{1 + \left(\frac{b''}{b'}\right)^2} - 1 \right). \quad (7)$$

* В связи с болезнью Ф.Л. Шапиро этот доклад был прочитан В.И. Луцкиным.

Это означает, что скорость нейтрона в среде остается конечной, даже когда скорость нейтрона, падающего на среду, обращается в нуль. Причину этого Илья Михайлович немедленно объяснил. Действительно, весь поток, вошедший в среду, в ней же и поглощается. Таким образом, поглощение приводит к появлению постоянного потока нейтронов через границу среды. Связанной с ним эффективной скорости можно, видимо, придавать физический смысл.

Именно с этим связано предсказанное ранее И.И. Гуревичем и П.Э. Немировским [11] ограничение возрастания сечения захвата нейтронов в средах с большим поглощением. При уменьшении скорости нейтрона сечение продолжает возрастать по закону $1/v$, но под скоростью v в среде всегда следует понимать конечную величину

$$v' = \frac{h}{m} k'. \quad (8)$$

К сожалению, непосредственно измерить в эксперименте скорость нейтрона в сильно поглощающей среде пока не удалось, но теория в целом была проверена. Результаты экспериментов [12] по пропусканию УХН через плёнки, содержащие естественный гадолиний, очень хорошо соответствовали данным расчёта по формулам (6). Надо сказать, что условия этих экспериментов были в некотором роде уникальными. Сечение захвата УХН достигало впечатляющей величины в 20 Мб, а длина затухания волны была втрое короче самой длины волны.

Надо сказать, что вопрос о физическом смысле скорости нейтрона в среде И.М. вовсе не считал тривиальным. В связи с этим вспоминается следующий эпизод. На Нейтронной школе в Алуште 1974 г. с лекцией об экспериментах с очень холодными нейтронами выступил Альберт Штайерл из Мюнхенского технического университета [13]. Среди прочего он рассказал о результатах измерения пропускания очень медленных нейтронов через тонкие плёнки. Эксперименты, казалось, свидетельствовали о видимом отклонении от закона $1/v$ для сечения поглощения, если под скоростью понимать скорость нейтрона в вакууме v_0 . Однако это противоречие полностью снималось, если вместо v_0 рассматривать скорость нейтрона в среде (8). И.М. Франк, выступивший с комментариями к лекции Штайерла, высоко оценил этот результат, вполне соответствующий его представлениям. Много лет спустя, в воспоминаниях об Илье Михайловиче А. Штайерл писал [14]: "В течение долгого, почти 40-летнего, периода наших общих научных интересов, я лишь однажды не понял Илью Михайловича: суммируя итоги нашей работе в Гархинге, он сказал, что мы подтвердили закон $1/v$. Это нас удивило, поскольку мы сами никогда не сомневались, что закон $1/v$ для реакций с нейтронами должен быть справедлив даже в случае самых малых энергий, разумеется, если учитывать рефракционные поправки к скорости нейтрона в среде. Жаль, что я не спросил его тогда, что именно он имел в виду".

Можно предположить, почему вопрос о скорости нейтрона в среде не представлялся И.М. столь простым. Вот что он писал несколько лет спустя относительно распространения света в среде [15]: "Фотон в среде очевидно не является свободной частицей. Распространение волны получается в результате когерентного

сложения волн отдельных атомов. Таким образом, для возникновения волны существенно коллективное движение, происходящее в атомах среды. Это характерное свойство не частицы, а квазичастицы (например, аналогично фононам)". Сказанное, несомненно, справедливо и по отношению к нейтронам в преломляющей среде. Поэтому результат А. Штайерла, свидетельствующий не только о возможности придавать скорости нейтрона в среде физический смысл, но и об отличии этой скорости от вакуумного значения, представлялся ему важным.

Много позднее различие скоростей нейтрона в среде и в вакууме было измерено в прямом эксперименте [16]. Было продемонстрировано, что при помещении на пути нейтронного пучка преломляющегося образца полное время пролёта нейтрона изменяется в соответствии с

$$\Delta t = \frac{d}{v} \left(\frac{1}{n} - 1 \right), \quad (9)$$

где n и d — показатель преломления и толщина образца соответственно. Эта временная задержка составляла в разных измерениях от 4×10^{-10} с до 10^{-7} с, в то время как полное время пролёта было порядка 0,017 с. В качестве часов использовалась прецессия спина нейтрона в магнитном поле, а результаты эксперимента соответствовали результатам расчёта с точностью в несколько процентов.

Но вернёмся к упомянутой выше лекции И.М. на Алуштинской школе. Обращаясь снова к проблеме закона дисперсии нейтронных волн, он, в частности, напоминает, что закон дисперсии для нейтронов (3) вполне аналогичен закону дисперсии света в разрежённой среде

$$k^2 = k_0^2 + 4\pi N \frac{\omega^2 \alpha}{c^2}, \quad |n^2 - 1| \ll 1 \quad (10)$$

и они оба описываются известной формулой Фолди [17]:

$$k^2 = k_0^2 + 4\pi N f_0. \quad (11)$$

Последняя связывает волновые числа в вакууме и в среде с плотностью рассеивателей N и амплитудой f_0 рассеяния вперёд на элементарном центре рассеяния. Действительно, при рассеянии света на атоме роль амплитуды рассеяния играет поляризуемость α с соответствующим множителем ω^2/c^2 , а когерентная длина рассеяния нейтронов b представляет собой взятое с обратным знаком предельное значение амплитуды рассеяния вперёд, $b = -\lim f_0$, при стремящемся к нулю волновом числе.

Однако для плотной среды формула Фолди для света не применима. Показатель преломления в плотной среде описывается известной формулой Лоренца — Лоренца:

$$n^2 = 1 + \frac{4\pi N \alpha}{1 - (4\pi/3) N \alpha}. \quad (12)$$

Хорошо известно, с чем связано различие формул (10) и (12). Дело в том, что в плотной среде электрическое поле E' , действующее на атом, отлично от поля E , падающего на среду:

$$E' = \frac{E}{1 - (4\pi/3) N \alpha}. \quad (13)$$

Если отношение этих полей обозначить как C , то закон дисперсии для света может быть записан в виде универсальной формулы, полученной Лэксом [18]:

$$k^2 = k_0^2 + 4\pi N C f_0. \quad (14)$$

Таким образом, формула Лэкса единым образом описывает закон дисперсии и для света, и для нейтронов, различие состоит лишь в разной величине коэффициента C , представляющего собой отношение внешнего поля и так называемого когерентного поля в среде. Для света в разреженной среде и для нейтронов принимают $C = 1$.

И тут Илья Михайлович сделал удивительное предположение: а что если мы не до конца понимаем теорию рассеяния нейтронов в плотной среде и коэффициент Лэкса для нейтронов не в точности равен единице? Ведь если у него появится небольшая мнимая часть C'' , то она, будучи умноженной на относительно большую величину b' , заметно изменит мнимую часть ε и вместе с ней вероятность захвата нейтрона в среде:

$$\varepsilon = n^2 = 1 - \frac{4\pi N}{k_0^2} (C' - iC'')(b' - ib''). \quad (15)$$

Таким образом, комплексность коэффициента C вполне может быть причиной аномалии в хранении УХН.

Это предположение было удивительным и, насколько я помню, не встретило в то время особого понимания. Однако по прошествии примерно 10 лет другие авторы, занимаясь теорией дисперсии нейтронных волн, показали, что формула Фолди действительно не вполне верна и поправки на когерентное поле должны существовать, а соответствующий коэффициент C в самом деле комплексный. Природа этих поправок связана с тем, что ядра-рассеиватели расположены в среде не вполне произвольным образом, поскольку во всех веществах, даже в жидкостях и аморфных телах, имеется, по крайней мере, ближний порядок. Некоторая корреляция имеет место даже в модели, в которой рассеиватели представляют собой твёрдые сферы. В этом случае речь идёт просто о том, что расстояние между их центрами не может быть меньше диаметра. Кстати, именно в этой модели легче всего провести расчёт, если за радиус сферы принять радиус атома a . Приведём в связи с этим результаты Сирса [9]:

$$C = 1 + J' + iJ'',$$

$$J' = J_0 \left(\frac{\sin k_0 a}{k_0 a} \right)^2, \quad J'' = \frac{J_0}{2(k_0 a)^2} (2k_0 a - \sin 2k_0 a), \quad (16)$$

$$J_0 = 2\pi N b a^2.$$

Легко видеть, что если $k_0 a \rightarrow 0$, то

$$C' \approx 1 + 2\pi N b' a^2, \quad C'' \approx \frac{4}{3} \pi N b' k_0 a^3. \quad (17)$$

Аналогичные результаты получены и в работе [10]. Из (17) видно, что в случае УХН, когда n^2 близко к нулю, а $k_0^2 \approx 4\pi N b'$,

$$C' \approx 1 + k_0^2 a^2, \quad C'' \approx k_0^3 a^3, \quad (18)$$

где характерный параметр $k_0 a \approx 10^{-2}$. Следовательно, если справедлива экстраполяция результатов работ [9,

10] в область УХН, то для последних величина C'' может быть порядка $10^{-5} - 10^{-6}$.

Ситуация ещё более усложнилась после появления работы [19], в которой указывалось, что область применимости теории, основанной на использовании точечного псевдопотенциала Ферми (2), ограничена условием $k_0 \gg 4\pi N b d$, где $d \approx N^{-1/3}$ — межатомное расстояние. Хотя в случае УХН это условие хорошо выполняется, все-таки нельзя исключить, что и в этом случае общепринятая теория не вполне точна.

Таким образом, теория определённо предсказывает существование небольших отклонений от фолдиевского закона дисперсии, который часто называют "потенциальным", поскольку ему соответствует модель эффективного потенциала (1). Однако экспериментальные данные, которые могли бы подтвердить или опровергнуть этот вывод, до сих пор отсутствуют, а точность, с которой закон дисперсии нейтронных волн в веществе установлен из эксперимента, не превышает нескольких процентов. Между тем пути подхода к экспериментальной проверке справедливости потенциального закона дисперсии были намечены уже в работах И.М. Франка [4, 6].

Он показал, что если справедлив закон дисперсии (5), то тот же закон дисперсии справедлив и для нормальной к поверхности компоненты волнового числа

$$k_{\perp}^2 = k_{0\perp}^2 - 4\pi N b. \quad (19)$$

Отсюда следует, что в случае потенциального закона дисперсии нормальная компонента волнового числа в среде $k_{\perp}$ зависит только от нормальной компоненты волнового числа в вакууме $k_{0\perp}$. Для любого иного вида закона дисперсии это не справедливо.

Таким образом, если при неизменной величине $k_{0\perp}$ в эксперименте обнаруживается зависимость нормальной компоненты волнового числа в среде от компоненты $k_{0\parallel}$, параллельной границе вещества, то это должно свидетельствовать об отклонении от закона дисперсии (5). Иная формулировка этого утверждения содержится в [20].

Такая зависимость в принципе могла бы быть обнаружена в экспериментах с нейтронными интерферометрами. В частности, в эксперименте [21] вращающийся кварцевый диск был помещён в одно из плеч нейтронного интерферометра, оперировавшего с тепловыми нейтронами при длине волны $\lambda = 1,27 \text{ \AA}$. Ось вращения диска была параллельна волновому вектору падающей волны. Очевидно, что в этом случае волновое число k_0 нейтронов, рассеивающихся на ядрах образца, зависит от скорости вращения диска, в то время как границы диска неподвижны. При приведении диска во вращение фаза волны, прошедшей через диск, оставалась неизменной с точностью порядка 10^{-4} , что демонстрировало независимость $k_{\perp}$ от k_0 . Однако изменение k_0 было весьма мало, поскольку линейная скорость образца в месте прохождения нейтронов была на два порядка меньше скорости нейтронов. Поэтому, как указывалось в [22], точность эксперимента являлась явно недостаточной для обнаружения предсказанных в [9, 10] поправок к закону дисперсии.

Несколько иной экспериментальный подход, применимый к случаю УХН, был предложен в работе [23], в которой предлагалось использовать нейтронный интерферометр Фабри – Перо, представляющий собой струк-

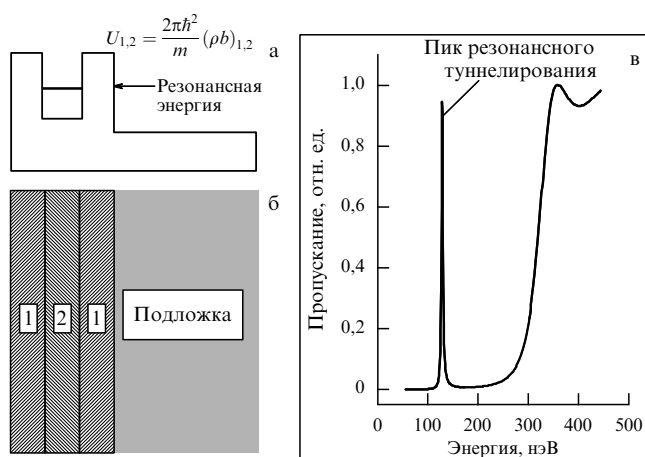


Рис. 1. Интерферометр Фабри–Перо (ИФП) для нейтронов. (а) Потенциальная структура ИФП. (б) Устройство интерферометра: три плёнки из двух сортов вещества нанесены на подложку. (в) Зависимость пропускания ИФП от энергии при нормальном падении на него нейтрона.

туру из трёх пленок, характеризующихся различными значениями эффективного потенциала (1). Потенциальная структура такого интерферометра представляет собой два барьера и яму между ними (рис. 1). При не слишком малой ширине d ямы в ней возможно образование уровней квазисвязанных состояний, положение которых с некоторым приближением определяется соотношением

$$k_{2\perp}d \approx p\pi, \quad p = 1, 2, 3, \dots, \quad (20)$$

где $k_{2\perp}$ — нормальная компонента волнового числа в веществе средней плёнки, образующей потенциальную яму. Такая структура имеет ярко выраженный резонансный характер пропускания нейтронов, что хорошо подтверждалось осуществлёнными к тому времени экспериментами [24].

Предлагалось приготовить такой интерферометр на поверхности прозрачного для нейтронов диска и так же, как в работе [21], направить нейтроны перпендикулярно к его поверхности. В отсутствие поправок к потенциальному закону дисперсии компонента волнового числа в среде $k_{2\perp}$ нечувствительна к тому, покоится или вращается диск в своей плоскости. В противном случае она должна зависеть от скорости вращения, что в соответствии с (20) приведёт к смещению положения резонанса и соответственно спектра нейтронов, пропущенных интерферометром.

Такой эксперимент был поставлен [25], и его результаты свидетельствовали о том, что при вращении диска с интерферометром спектр пропускания УХН заметно смещался. Однако впоследствии стало понятным, что существует ещё одна физическая причина обнаруженного эффекта. Оказалось, что в случае УХН форма спектра пропускания интерферометра может отличаться от его формы, предсказываемой решением одномерной квантовой задачи [26]. Дело в том, что в условиях резонансного туннелирования происходит колоссальное усиление сечений всех процессов рассеяния и захвата нейтронов, в том числе сечения рассеяния нейтронов на

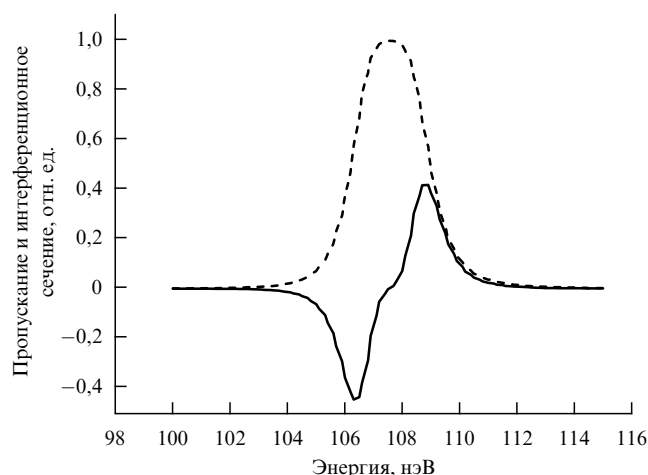


Рис. 2. Интерференционное сечение, характеризующее деформацию линии пропускания нейтронов через реальный ИФП. Штриховой линией показано положение невозмущённой кривой пропускания. Масштаб произвольный. Знакопеременное поведение сечения соответствует асимметричной деформации линии.

оптических неоднородностях. Было показано, что интерференция невозмущённой волны, прошедшей через структуру туннельным образом, и волны, рассеянной на неоднородности на нулевой угол, приводит к несимметричному искажению формы линии пропускания. При этом величина соответствующего интерференционного сечения оказывается обратно пропорциональной полному волновому числу:

$$\sigma_{ts} = -\frac{4\pi}{k} \operatorname{Im} \{ T^* f(k_t, k_t) \}, \quad (21)$$

где T — амплитуда невозмущённой волны, $f(k_t, k_t)$ — амплитуда рассеяния на угол 0. Таким образом, для УХН форма спектра пропускания оказывается искажённой (рис. 2). При вращении диска с интерферометром волновое число k в системе координат, с ним связанной, возрастает, интерференционное сечение (21) уменьшается и спектр пропускания восстанавливается. Наличие этого дополнительного эффекта не позволило судить о степени справедливости потенциального закона дисперсии, и вопрос, таким образом, остался открытым.

Теперь мне хотелось бы обратиться к ещё одной работе И.М. Франка, посвящённой нейтронной оптике [2]. В ней впервые был поставлен вопрос о возможности создания нейтронного микроскопа. Для того чтобы стало более ясным характерное для того времени представление о проблеме, позволю себе процитировать соответствующий фрагмент статьи полностью:

"В дальнейшем, когда это станет возможным, предстоит выполнить и простейшие оптические опыты. Например, можно представить себе такой эксперимент. Через небольшое отверстие ультрахолодные нейтроны падают на вогнутое зеркало и, отражаясь, собираются в фокусе (рис. 3). При этом за счёт силы тяжести при движении вниз они будут приобретать дополнительную скорость по вертикали. В результате их движение у зеркала будет таким, как если бы они выходили из точки О, находящейся несколько выше отверстия А, а соберутся они в фокусе С — ниже геометрического фокуса В. В оптических приборах для ультрахолодных

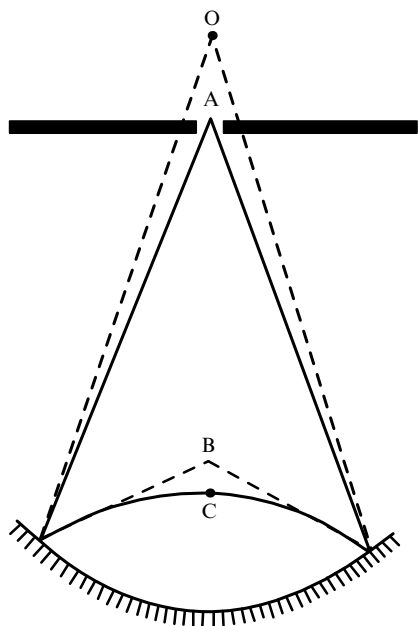


Рис. 3. Рисунок из статьи И.М. Франка в журнале *Природа* (1972 г.).

нейтронов такую своеобразную хроматическую aberrацию, зависящую от скорости, надо учитывать. Мне думается, что получение оптического изображения с помощью отражения и преломления очень медленных нейтронов — опыт настолько существенный, что его обязательно надо выполнить. Ведь можно мечтать о том, что в отдалённой перспективе оптика очень медленных нейтронов позволит создать нейтронный микроскоп".

В то время это предложение было очень смелым. Состояние источников УХН было таково, что всерьёз мечтать о таком микроскопе было очень трудно, и предложение казалось безнадёжным. Однако обозначенная в нём проблема гравитационного хроматизма представляла определённый вызов, и хотелось найти какие-либо, хотя бы теоретические, подходы к её решению.

Предложенная И.М. схема опыта допускала обсуждение на вполне классическом, т.е. корпускулярном, языке. При таком подходе было ясно, что нейтрон, следуя к фокусу по разным траекториям, должен затратить на движение различное время. При этом было не вполне понятно, к каким следствиям это приведёт при волновом рассмотрении проблемы. Мне пришлось несколько раз разговаривать об этом с Ильей Михайловичем. Итогом этих бесед явилось представление о том, что можно учесть силу тяжести, пользуясь чисто оптическим языком, а именно ввести понятие "гравитационный показатель преломления" [27]:

$$n(z) = \left(1 - \frac{2gz}{v_0^2}\right)^{1/2}, \quad v_0 = v|_{z=0}. \quad (22)$$

Таким образом, пространство, в котором действует сила тяжести, можно считать оптически неоднородной средой, в которой без ограничения справедлив один из основополагающих принципов оптики — принцип Ферма. Из справедливости принципа Ферма следовала сама возможность формирования изображения нейтронными волнами в потенциальном поле. Представление об

оптически неоднородной среде давало возможность воспользоваться рядом готовых выводов, хорошо известных в оптике [28]. Однако корректный ответ на вопрос о роли неизохронности классических траекторий был найден не сразу. Вместе с тем становилось ещё более ясным, что вопрос этот важный. При конкретных оптических расчётах в выражения для основных характеристик оптического устройства, таких, например, как фокусное расстояние и увеличение, классическое время пролёта входило самым непосредственным образом [29, 30]. Дальнейшие исследования прояснили ситуацию, и роль классического времени распространения частицы стала более понятной. Выяснилось, что требование изохронности классических траекторий в оптической системе совпадает с условием её ахроматизации [31].

В последующие годы в области практической оптики УХН было сделано многое. В частности, произошёл существенный прогресс в вопросе компенсации гравитационных aberrаций. Был создан ряд приборов — прототипов нейтронного микроскопа. Однако на пути к полноценному микроскопу всё ещё стоит важная проблема недостаточной интенсивности источников УХН. Поэтому вопрос о возможности и полезности практического использования нейтронного микроскопа остаётся открытым. Не останавливаясь на этом подробно, отойду от читателя, интересующегося этим вопросом, к обзорам [31, 32].

Напомню ещё об одной малоизвестной работе И.М. Франка. Думая о причине аномалии в хранении УХН, он допускал возможность существования, помимо гипотезы о неточности теории, некоторого универсального механизма, приводящего к неупругому рассеянию нейтронов при отражении от поверхности. При этом нейтрон может приобрести такую дополнительную энергию, при которой его скорость превысит граничную. Тогда при одном из следующих столкновений со стенкой сосуда он сможет войти в вещество и там погибнуть.

В поисках возможной причины такого "нагрева" УХН Илья Михайлович обратился к вопросу о дифракции нейтронов на бегущих поверхностных волнах вещества [7]. Скорость распространения таких волн близка к скорости звука в веществе, т.е. составляет несколько километров в секунду, в то время как скорость УХН примерно в тысячу раз меньше. Для качественного анализа проблемы И.М. рассмотрел задачу об отражении нейтрона от поверхности вещества в системе координат, которая движется со скоростью поверхностной волны V . В этой системе координат поверхность вещества представляет собой неподвижную дифракционную решётку с периодом, равным длине поверхностной волны Λ , продольная скорость нейтрона $v'_x = V$, а нормальная компонента v'_y в точности та же, что и в лабораторной системе. Поскольку $v'_x \gg v'_y$, то полная скорость v' по абсолютной величине близка к V . Дебройлевская длина волны нейтрона $\lambda \approx h/mv'$ при этом мала и по порядку величины близка к периоду решётки.

При отражении нейтронов от поверхности с таким профилем неизбежно должны наблюдаться дифракционные максимумы (рис. 4), а направления дифрагированных волн легко вычислить так же, как это делается в обычной оптике. Таким образом, в движущейся системе координат нейтрон может рассеяться с той же скоростью v' , но под другим углом к поверхности. Нормальная

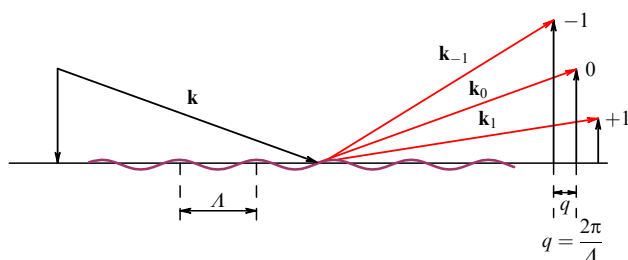


Рис. 4. Дифракция нейтронов на поверхностной волне в движущейся системе координат. Волновые векторы всех волн одинаковы по абсолютной величине. Нормальные компоненты волн ненулевых дифракционных порядков отличаются от нормальной компоненты падающей волны.

компонента скорости при этом изменится, причём изменение зависит от порядка дифракции. Напомним, что в обеих системах координат нормальная компонента скорости одинакова.

Представляется, что предсказанный И.М. Франком эффект в некотором роде удивителен. Хорошо известно, что при дифракции света на бегущей в веществе (ультразвуковой) волне плотности в спектре рассеянных волн появляются спутники с частотами, отличающимися от частоты исходной волны. Расщепление частот в этом так называемом дублете Мандельштама – Бриллюэна определяется соотношением

$$\pm \frac{\Delta v}{v} = \pm 2 \frac{v}{c} \sin \frac{\theta}{2}, \quad (23)$$

где v — скорость волны в веществе, c — скорость света, θ — угол Брэгга, определяемый соотношением $2\Lambda \sin(\theta/2) = \lambda$. Здесь Λ и λ — длины ультразвуковой и световой волн соответственно. Очевидно, что величина такого доплеровского сдвига частоты относительно мала в меру малости фактора v/c . Более того, если направления распространения световой и акустической волн ортогональны, то относительная величина сдвига частот оказывается порядка $(v/c)^2$ и эффект становится совсем малым. Такой поперечный эффект Доплера имеет чисто релятивистскую природу.

Совершенно иная ситуация имеет место при дифракции УХН на поверхностной волне. Во-первых, обе скорости, как нейтрона, так и бегущей волны, много меньше скорости света и справедливо классическое рассмотрение задачи. Во-вторых, скорость волны много больше скорости нейтрона, и именно поэтому изменение частоты при нормальном падении нейтрона на вещество оказывается значительным. И в-третьих, поскольку речь идет о массивной частице, изменение частоты нейтронной волны прямо означает изменение энергии и классической скорости нейтрона.

По прошествии двенадцати лет после опубликования [7] дифракция нейтронов на бегущей поверхностной волне действительно наблюдалась в эксперименте [33]. Правда, опыт был поставлен не с ультрахолодными, а с так называемыми холодными нейтронами, скорость которых составляла несколько сотен метров в секунду. Но и в этом случае она была значительно меньше скорости ультразвуковой волны, искусственно возбуждаемой на поверхности кварцевого кристалла. Авторы провели достаточно детальный теоретический анализ проблемы, из которого, в частности, следовало, что

энергия нейтронов, соответствующих порядку дифракции ± 1 , действительно отличается от исходной на величину $\Delta E = \pm \hbar \Delta \omega$, $\omega = 2\pi f$, где f — частота ультразвуковой волны. Величина ΔE при этом составляла порядка 10^{-7} эВ, т.е. была близка к типичной энергии УХН. Правда, изменение энергии таких холодных нейтронов оказалось на три порядка меньшим, чем сама энергия. Едва ли оно могло быть зарегистрировано, да и авторы не ставили перед собой такой задачи, сосредоточившись на измерении направления и интенсивности дифракционных максимумов. Разумеется, работу Франка, опубликованную в виде препринта на русском языке, они не знали.

Эффект изменения энергии нейтронов при дифракции на движущейся волне фактически был открыт заново спустя почти два десятилетия после работы И.М. Франка. В работе [34] была рассмотрена задача о дифракции УХН на движущейся периодической структуре (дифракционной решётке). Так же как и в работе И.М. Франка, решение задачи было найдено в движущейся системе координат, где решётка покоится, с последующим переходом в лабораторную систему.

При нормальном падении волны на решётку и в случае, когда длина волны много больше её периода, это решение имеет вид

$$\Psi(x, y, t) = \sum_j a_j \exp[i(k_j x + q_j y - \omega_j t)],$$

$$k_j = k_0 \left(1 + j \frac{\Omega}{\omega}\right)^{1/2}, \quad \omega_j = \omega + j\Omega, \quad (24)$$

$$\Omega = \frac{2\pi V}{L}, \quad q_j = j \frac{2\pi}{L}, \quad Lk_0 \ll 1,$$

где k_0 — волновое число падающей волны, L — период решётки, V — скорость её движения, j — порядок дифракции, a_j — амплитуды, определяемые фурье-преобразованием функции пропускания (отражения) решётки.

С точностью до члена $q_j y$, имеющего чисто дифракционную природу, это выражение совпадает с выражением для волновой функции нейтронов, прошедших через быстрый (квантовый) модулятор, периодически воздействующий на волну с частотой $f = \Omega/(2\pi)$ [35]. Как видно из (24), в случае движущейся решётки роль частоты модуляции играет отношение скорости её движения к пространственному периоду $f = V/L$. Качественно этот результат нетрудно объяснить. Действительно, двигаясь поперёк направления распространения волны, решётка модулирует прошедшую волну в каждой точке нейтронного пучка. Такая модуляция должна приводить к появлению спутников, частоты которых отличаются от исходной на величину, кратную Ω .

Таким образом, выяснилось, что движущаяся решётка может действовать в качестве квантового модулятора, порождая нейтронные волны с энергией, отличной от начальной на величину кратную $\hbar \Omega$. Наблюдать это явление в [35] предлагалось с помощью спектрометра ультрахолодных нейтронов.

Соответствующий опыт был поставлен несколькими годами позднее, когда для экспериментов стал доступен спектрометр УХН с упоминавшимися выше интерферометрами Фабри–Перо. Вместо того, чтобы использовать поступательное движение решётки, оказалось удобнее её вращать. Поэтому решётка представляла собой

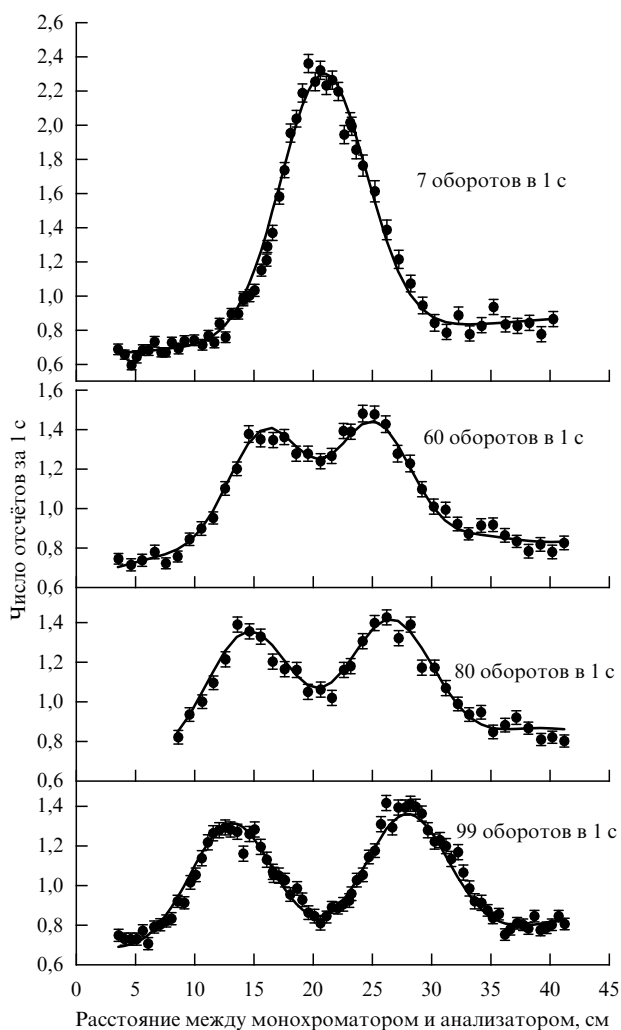


Рис. 5. Спектр нейтронов, прошедших через вращающуюся решётку. Частота вращения решётки указана на рисунке. Изменению расстояния между анализатором и монохроматором в 1 см соответствует изменение энергии в 1 нэВ. Скорости вращения решётки 100 оборотов в 1 с соответствует частота модуляции нейтронной волны 1,89 МГц.

кремниевый диск с радиальными канавками на периферии.

Эксперимент [36] наглядно показал, что при вращении решётки, в полном согласии с теорией, в спектре пропущенных нейтронов действительно возникают сателлиты с энергией, отличающейся от начального значения на величину $\hbar\Omega$ (рис. 5). Интенсивность нейтронов, соответствующих ± 1 -му порядку дифракции, также согласовывалась с результатами расчёта и достигала почти 40 % от интенсивности падающей волны. Таким образом, спустя четверть века после работы Франка предсказанный им эффект наблюдался в эксперименте.

Тогда же было осознано и ещё одно важное обстоятельство. Поскольку передача энергии от решётки к нейтрону квантована, то оказывается возможным не просто ускорять и замедлять нейтроны, но передавать им точно известный квант энергии, что очень привлекательно для осуществления целого ряда новых экспериментов. В частности, появилась возможность создания так называемой нейтронной временной линзы, с помощью которой можно фокусировать нейтроны во

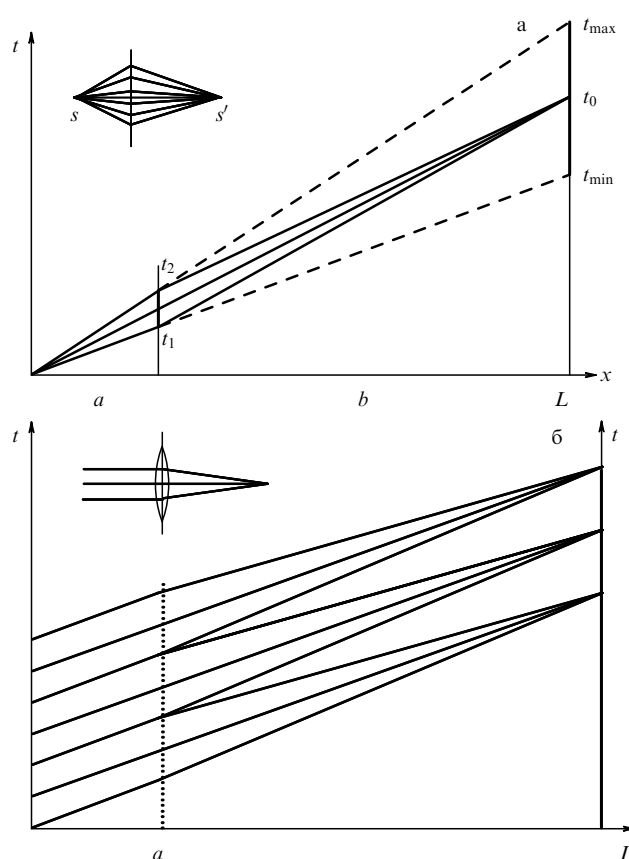


Рис. 6. (а) Временное фокусирование нейтронов от импульсного источника. (б) Схема демонстрационного эксперимента. Монохроматические нейтроны, имеющие одинаковые скорости, поступают в прибор в произвольные моменты. Нейтронная линза периодического действия изменяет их скорости. В результате в точке наблюдения L происходит группирование нейтронов (временное фокусирование).

времени [37]. Принцип временного фокусирования поясняет рис. 6а.

В обычной оптике фокусирующая линза преобразует угловое распределение лучей, в результате чего они пересекаются в точке фокуса. Временная линза преобразует распределение нейтронов по скоростям, в результате чего нейтроны, испущенные импульсным источником в некотором диапазоне скоростей, одновременно достигают точки наблюдения. На рисунке 6а изображены траектории нейтронов в координатах путь – время. Прямые линии (лучи) соответствуют движению нейтронов с постоянной скоростью. В отсутствие фокусирования нейтроны достигли бы точки наблюдения в разное время в интервале между моментами $t_{\min}$ и $t_{\max}$.

Разумеется, длительность импульса τ любого реального источника не может быть бесконечно малой. Соответственно, конечна и длительность импульса Θ в точке регистрации. По аналогии с геометрической оптикой можно ввести понятие временного увеличения M . Оказывается, что при относительно небольшой передаче энергии $\Delta E \ll E$, для временного увеличения справедлива известная из геометрической оптики формула тонкой линзы

$$M = \frac{\Theta}{\tau} = \frac{b}{a}, \quad (25)$$

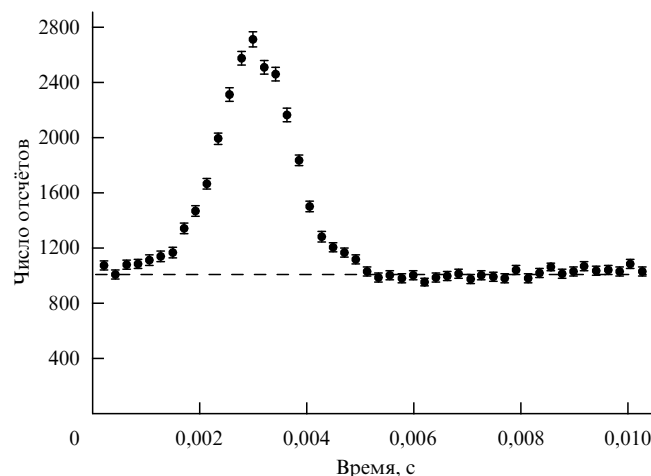


Рис. 7. Демонстрация возможности временного фокусирования. Монохроматические нейтроны, поступающие в прибор в произвольные моменты, проходят через временную линзу периодического действия. На зависимости скорости счёта от времени хорошо виден пик нейтронов, сфокусированных во времени. Временная шкала равна времени оборота решётки.

где a и b — расстояния от источника до линзы и от линзы до точки наблюдения соответственно.

Роль временной линзы вполне может играть движущаяся решётка, что и было продемонстрировано в работе [38]. Для демонстрационного эксперимента был выбран вариант фокусирования лучей от бесконечно удалённого источника, когда временная линза собирает в фокусе падающие на неё параллельные лучи. Такой схеме опыта соответствуют траектории монохроматических нейтронов, исходящих из некоторого стационарного источника (рис. 6б). При этом линза работает в циклическом режиме, фокусируя нейтроны, поступившие в прибор в течение некоторого периода T_{cycl} .

Так же как и в эксперименте [36], решётка представляла собой кремниевый диск с радиальными канавками. Однако расстояние L между штрихами решётки теперь было не постоянным, а зависело определённым образом от азимутального угла на поверхности диска. При этом в каждый момент времени нейтроны могли проходить только через небольшой сектор решётки. Таким образом, при вращении решётки нейтроны "видели" только её небольшой фрагмент, двигавшийся с постоянной угловой скоростью, но с пространственным периодом, зависевшим от времени. В соответствии с (24) переменное во времени значение L и обеспечивало необходимую временную зависимость частоты $\Omega(t)$. В эксперименте уверенно наблюдалось временное фокусирование ультракоротких нейтронов, правда, с эффективностью несколько меньшей, чем расчётная (рис. 7). Таким образом, была продемонстрирована возможность создания временной линзы, основанной на эффекте ускорения и замедления нейтронов при дифракции на движущейся решётке.

Вскоре нашлось и ещё одно применение эффекту дифракционного квантования энергии. Именно на нём был основан новый метод проверки принципа эквивалентности для нейтрона. В недавнем эксперименте [39] энергия mgH , приобретаемая нейтроном при падении в гравитационном поле Земли на высоту H , компенсировалась квантом энергии $\hbar\Omega$, передаваемым ему при

дифракции в -1 -й порядок на движущейся решётке. Измеренная таким образом гравитационная сила $m_n g_n$, действующая на нейтрон, оказалась равной mg_{loc} , с точностью порядка 2×10^{-3} . Здесь m — масса нейтрона, известная из таблиц, g_{loc} — ускорение свободного падения макроскопических тел в месте проведения эксперимента.

Уже после публикации работы [39] было осознано, что квантовый характер эксперимента позволяет обойти трудность, состоящую в том, что при интерпретации эксперимента следовало использовать не табличную массу нейтрона m , а его инертную массу m_i , величина которой, строго говоря, неизвестна [40]. Однако известно отношение $\hbar/m_i$ [41], определяемое из экспериментов, в которых одновременно измерялись длина волны нейтрона $\lambda = \hbar/(m_i v)$ и его скорость v . Этого достаточно для корректной интерпретации данных эксперимента [39]. Планируется, что работа по прецизионной проверке принципа эквивалентности для нейтрона будет продолжена.

Упомяну кратко ещё об одном оптическом эффекте, в котором ярко проявляется аналогия между нейтронной и обычной оптикой. Хорошо известно, что в однородной среде частота волны и её волновое число сохраняются, хотя последнее и отличается от своего вакуумного значения. При этом долгое время молчаливо подразумевалось, что стоит волне, пройдя через образец, снова выйти в вакуум, как волновое число обретёт своё первоначальное, вакуумное, значение. Между тем это справедливо только в случае покоящегося или равномерно движущегося образца.

Долгое время случай произвольного движения образца оставался не исследованным ни в обычной, ни в нейтронной оптике. Исключением являлась работа В.И. Микерова [42]. Анализируя возможность наполнения ловушки для УХН без её разгерметизации, В.И. Микеров предложил использовать мембрану, движущуюся по гармоническому закону по направлению движения УХН и против него. При этом Микеров нашёл, что энергия УХН после прохождения колеблющейся плёнки должна меняться. Будучи неопубликованным, этот результат долгое время оставался неизвестным.

Спустя несколько лет началось теоретическое исследование взаимодействия электромагнитной волны с диэлектриком, движущимся с ускорением. В 1982 г. К. Танака (К. Tanaka) рассмотрел проблему отражения и прохождения волны через плоскопараллельный диэлектрический слой, движущийся с постоянным линейным ускорением, и нашёл, что при прохождении через ускоряющийся образец частота электромагнитной волны изменяется [43]. В пренебрежении многократным отражением от границ образца выражение для изменения частоты прошедшей электромагнитной волны имеет вид

$$\Delta\omega = \frac{\omega_0}{c^2} w d(n-1), \quad \frac{wd}{c^2} \ll 1, \quad (26)$$

где w — ускорение образца, d — его толщина. Формула (26) не содержит скорости образца, а единственной характеристикой вещества является его показатель преломления.

Величина эффекта, который мы будем называть эффектом ускоряющейся среды, очень мала. Взяв для толщины образца значение $d \approx 1$ м, для показателя преломления $n \approx 1,5$ получим из формулы (26), что при

ускорении $w \approx 100 \text{ м с}^{-2}$ относительное изменение частоты $\Delta\omega/\omega \approx 5 \times 10^{-16}$. Возможность его экспериментального наблюдения обсуждалась в работе [44]. Однако, насколько известно, эффект ускоряющейся среды в оптике пока не наблюдался. В нейтронном сообществе работа Танаки осталась незамеченной.

В 1993 г. появилась работа Ковальского [45], в которой было предложено проверить принцип эквивалентности в нейтронном эксперименте нового типа. Ковальский рассмотрел вопрос о прохождении нейтронов через материальный слой, движущийся с ускорением. Основываясь главным образом на времени распространения нейтронов от источника до детектора, он пришёл к выводу, что на выходе из пластинки их энергия должна отличаться от начальной. Для изменения энергии он получил формулу, весьма похожую на (26):

$$\Delta E \cong mwd \left(\frac{1}{n} - 1 \right). \quad (27)$$

Этот же результат позднее был получен в работе [46] путём последовательного вычисления изменения волнового числа нейтронов при преломлении на входной и выходной поверхностях образца, движущегося с ускорением. Различие в скоростях этих поверхностей в момент пересечения их нейтроном и приводило к появлению эффекта.

В недавней работе [47] формулы (26) и (27) были получены единым образом исходя из принципа эквивалентности. При этом было показано, что кинематической причиной возникновения эффекта является задержка во времени распространения волны, обусловленная наличием преломляющего образца. Для электромагнитной и нейтронной волн соответствующая временная задержка составляет

$$\Delta\tau_{\text{ем}} \cong \frac{d}{c}(n-1), \quad \Delta\tau_{\text{н}} = \frac{d}{v} \left(\frac{1}{n} - 1 \right). \quad (28)$$

Эффект ускоряющейся среды недавно наблюдался в экспериментах с ультрахолодными нейтронами [47]. Использование УХН в экспериментах такого рода имеет определённое преимущество, поскольку для них показатель преломления может быть заметно меньшим единицы. Правда, малость скорости УХН приводит в силу закона $1/v$ к жёстким ограничениям на толщину образца d .

В качестве образца в эксперименте [47] использовалась кремниевая пластинка толщиной порядка 1 мм, совершавшая гармоническое движение с частотой несколько десятков герц. Максимальное ускорение образца достигало 75 м с^{-2} , а изменение энергии нейтрона составляло несколько единиц с размерностью $[10^{-10} \text{ эВ}]$. Результаты эксперимента соответствовали результатам расчётов с точностью лучшей, чем 10 %.

Хотя в условиях лабораторного эксперимента эффект ускоряющейся среды весьма мал, не следует считать, что его изучение представляет лишь академический интерес. Дело в том, что во Вселенной существуют объекты, имеющие размеры, на много порядков превышающие "лабораторные", и нередко движущиеся с большими ускорениями. Вопрос о значимости эффекта ускоряющейся среды в астрофизических явлениях заслуживает, по-видимому, самого внимательного анализа.

При этом следует иметь в виду, что в силу своей кинематической природы эффект может порождаться не только ускорением ограниченного объёма вещества, содержащего рассеивающие центры, но и областью пространства, характеризующейся наличием силового поля. Для проявления эффекта важен лишь факт изменения волнового числа внутри объёма, движущегося с ускорением. При этом в силу универсальности эффекта речь может идти о волнах (и частицах) любой природы. Этот вопрос также обсуждался в [47].

Отметим здесь и ещё одно обстоятельство. Теория, приводящая в первом приближении к формуле (27), основана на предположении о справедливости "потенциального" закона дисперсии нейтронных волн в среде, движущейся с ускорением. Однако это предположение не является вполне очевидным. Обращаясь к микроскопической картине явления дисперсии, напомним, что отличие волнового числа в среде от его вакуумного значения является результатом интерференции волны, падающей на среду, и волн, рассеянных всеми элементарными рассеивателями. В случае нейтронных волн такими рассеивателями являются атомные ядра. В неинерциальной системе отсчёта, связанной с ускоряющейся средой, или в эквивалентном случае воздействия на частицу силы все волны в среде перестают быть сферическими и условия интерференции должны измениться. Вопрос о значимости этого обстоятельства пока не исследован, и появление новых экспериментальных данных может пролить свет на проблему.

В этом докладе мне хотелось показать, что многие из идей, высказанных Ильёй Михайловичем почти сорок лет назад, и сейчас сохраняют актуальность, а некоторые из них получили существенное и в чём-то неожиданное развитие. Что касается собственных результатов автора, рассмотренных выше и в цитируемых работах, то большинство из них получено в сотрудничестве с многочисленными коллегами. Всем им автор приносит искреннюю благодарность.

Список литературы

1. Франк И М *Вестник АН СССР* **41** (12) 13 (1971)
2. Франк И М *Природа* (9) 24 (1972)
3. Frank I M "Remark of professor I.M. Frank", in *Nuclear Structure Study with Neutrons: Proc. of the Intern. Conf., Budapest, July 31 – August 5, 1972* (Eds J Erö, J Szücs) (London: Plenum Press, 1974)
4. Франк И М, Препринт РЗ-7809 (Дубна: ОИЯИ, 1974)
5. Франк И М, Препринт РЗ-7810 (Дубна: ОИЯИ, 1974)
6. Франк И М, в сб. *II Междунар. школа по нейтронной физике (Алушта, 2–19 апреля 1974 г.)* (Сб. лекций ОИЯИ, ДЗ-7991) (Дубна: ОИЯИ, 1974) с. 19; *УФН* **161** (11) 109 (1991) [Frank I M *Sov. Phys. Usp.* **34** 988 (1991)]
7. Франк И М, Сообщения ОИЯИ Р4-8851 (Дубна: ОИЯИ, 1975)
8. Шапиро Ф Л, Препринт РЗ-7135 (Дубна: ОИЯИ, 1973); *Нейтронные исследования. Собрание трудов* (М.: Наука, 1976) с. 229
9. Sears V F *Phys. Rep.* **82** 1 (1982)
10. Warner M, Gubernatis J E *Phys. Rev. B* **32** 6347 (1985)
11. Гуревич И И, Немировский П Э *ЖЭТФ* **41** 1175 (1961) [Gurevich I I, Nemirovskii P E *Sov. Phys. JETP* **14** 838 (1962)]
12. Франк А И и др. *ЯФ* **66** 1879 (2003) [Frank A I et al. *Phys. At. Nucl.* **66** 1831 (2003)]
13. Steyerl A, в сб. *II Междунар. школа по нейтронной физике (Алушта, 2–19 апреля 1974 г.)* (Сб. лекций ОИЯИ, ДЗ-7991) (Дубна: ОИЯИ, 1974) с. 42
14. Штайерл А В, в сб. *Илья Михайлович Франк: Очерки и воспоминания* (Под общ. ред. В Л Аксенова, сост. А С Гиршева, А И Франк) (М.: Наука, 2008) с. 399

15. Франк И М *Письма в ЖЭТФ* **28** 482 (1978) [Frank I M *JETP Lett.* **28** 446 (1978)]
16. Frank A I et al. *Physica B* **297** 307 (2001); Франк А И и др. *ЯФ* **65** 2066 (2002) [Frank A I et al. *Phys. At. Nucl.* **65** 2009 (2002)]
17. Foldy L L *Phys. Rev.* **67** 107 (1945)
18. Lax M *Rev. Mod. Phys.* **23** 287 (1951); *Phys. Rev.* **85** 621 (1952)
19. Nosov V G, Frank A I *Phys. Rev. A* **55** 1129 (1997)
20. Klein A G, Werner S A *Rep. Prog. Phys.* **46** 259 (1983)
21. Arif M et al. *Phys. Rev. A* **31** 1203 (1985)
22. Sears V F *Phys. Rev. A* **32** 2524 (1985)
23. Франк А И, Носов В Г *ЯФ* **58** 453 (1995) [Frank A I, Nosov V G *Phys. At. Nucl.* **58** 402 (1995)]
24. Steyerl A et al. *Physica B* **151** 36 (1988)
25. Бондаренко И В и др. *Письма в ЖЭТФ* **67** 746 (1998) [Bondarenko I V et al. *JETP Lett.* **67** 786 (1998)]
26. Frank A I et al., JINR commun. E3-2004-216 (Dubna: JINR, 2004)
27. Франк И М, Франк А И *Письма в ЖЭТФ* **28** 559 (1978) [Frank I M, Frank A I *JETP Lett.* **28** 516 (1978)]
28. Кравцов Ю А, Орлов Ю И *Геометрическая оптика неоднородных сред* (М.: Наука, 1980) [Kravtsov Yu A, Orlov Yu I *Geometrical Optics of Inhomogeneous Media* (Berlin: Springer-Verlag, 1990)]
29. Steyerl A, Schütz G *Appl. Phys.* **17** 45 (1978)
30. Франк А И, Препринт ИАЭ-3203 (М.: ИАЭ, 1979)
31. Франк А И *УФН* **151** 229 (1987) [Frank A I *Sov. Phys. Usp.* **30** 110 (1987)]
32. Франк А И *Атомная энергия* **66** (2) 93 (1989) [Frank A I *Atom. Energy* **66** 106 (1989)]
33. Hamilton W A et al. *Phys. Rev. Lett.* **58** 2770 (1987)
34. Frank A I, Nosov V G *Phys. Lett. A* **188** 120 (1994)
35. Франк А И, Носов В Г *ЯФ* **57** 1029 (1994) [Frank A I, Nosov V G *Phys. At. Nucl.* **57** 968 (1994)]
36. Frank A I et al. *Phys. Lett. A* **311** 6 (2003); Франк А И и др. *Письма в ЖЭТФ* **81** 541 (2005) [Frank A I et al. *JETP Lett.* **81** 427 (2005)]
37. Франк А И, Гэйлер Р *ЯФ* **63** 605 (2000) [Frank A I, Gähler R *Phys. At. Nucl.* **63** 545 (2000)]
38. Франк А И и др. *Письма в ЖЭТФ* **78** 224 (2003) [Frank A I et al. *JETP Lett.* **78** 188 (2003)]
39. Франк А И и др. *Письма в ЖЭТФ* **86** 255 (2007) [Frank A I et al. *JETP Lett.* **86** 225 (2007)]
40. Sears V F *Phys. Rev. D* **25** 2023 (1982)
41. Mohr P J, Taylor B N *Rev. Mod. Phys.* **77** 1 (2005)
42. Микеров В И, Дисс. ... канд. физ.-мат. наук (М.: ФИАН, 1977) с. 105
43. Tanaka K *Phys. Rev. A* **25** 385 (1982)
44. Neutze R, Stedman G E *Phys. Rev. A* **58** 82 (1998)
45. Kowalski F V *Phys. Lett. A* **182** 335 (1993)
46. Носов В Г, Франк А И *ЯФ* **61** 686 (1998) [Nosov V G, Frank A I *Phys. At. Nucl.* **61** 613 (1998)]
47. Франк А И и др. *ЯФ* **71** 1686 (2008) [Frank A I et al. *Phys. At. Nucl.* **71** 1656 (2008)]

PACS numbers: **01.65. + g, 28.20. – v, 28.41. – i**
 DOI: 10.3367/UFNr.0179.200904m.0434

Пульсирующие ядерные реакторы в нейтронной физике

В.Л. Аксёнов

1. Введение

Первый пульсирующий ядерный реактор ИБР начал работать в Объединённом институте ядерных исследований (ОИЯИ) в Дубне в 1960 г. К концу 1960-х годов уже были получены блестящие научные результаты, поняты преимущества этого типа источников нейтронов и пути их развития. В 1971 г. авторскому коллективу, в состав

которого входил И.М. Франк, была присуждена Государственная премия за работы по созданию исследовательского быстрого импульсного реактора (ИБР) и ИБР с инжектором. В это время уже началось сооружение нового пульсирующего реактора ИБР-2.

В 1971 г. в *ДАН СССР* была опубликована статья И.М. Франка "Вопросы развития оптики нейтронов" [1], в которой он очень ёмко сформулировал основные принципы пульсирующих реакторов, экспериментальных методов и направлений исследований. И.М. Франк подчёркивал, что использование нейтронов в экспериментах по рассеянию определяется законами оптики и что оптика тепловых и холодных нейтронов во многом похожа на оптику электромагнитного излучения (света), особенно в диапазоне рентгеновских лучей. Однако имеются и различия, связанные, во-первых, с различием взаимодействий с веществом и, во-вторых, с тем, что нейтрон имеет конечную массу. Последнее обстоятельство обуславливает возможность развития в нейтронной оптике метода времени пролёта, а этот метод наиболее эффективно используется на импульсных источниках нейтронов. В данном докладе мы рассмотрим развитие метода времени пролёта и ту роль, которую пульсирующие реакторы сыграли в нейтронной физике.

2. Метод времени пролёта

Метод времени пролёта в нейтронной физике состоит в том, что нейтроны регистрируются на заданном расстоянии L от источника и измеряется время пролёта t этого расстояния. Зная L и t , можно определить скорость нейтрона v и, следовательно, его энергию. Для реализации метода нужен мигающий источник для фиксирования момента вылета нейтронов. Впервые этот метод реализовал Альварес в 1938 г. с помощью мигающего циклотрона. В 1947 г. Э. Ферми на стационарном реакторе (ядерном реакторе с непрерывным потоком) использовал механический прерыватель потока нейтронов, который представлял собой вращающийся диск с прозрачной для нейтронов щелью. Такой прерыватель — прерыватель Ферми — периодически пропускает нейтроны в течение короткого интервала времени Δt . При этом период повторения импульсов должен быть значительно больше измеряемого времени пролёта t . Интенсивность пучка медленных нейтронов с энергией E_n , меньшей 10 МэВ, в основном используемых в нейтронной физике, была значительно больше, чем на ускорителях. Поэтому в течение длительного времени для реализации метода времени пролёта использовали реакторы с прерывателями Ферми и полученные результаты имели большое значение для развития атомной энергетики. Однако по мере развития техники ускорителей функции разделились. В исследованиях с тепловыми нейтронами (10^{-3} эВ $< E_n < 10^{-1}$ эВ) по-прежнему преобладали реакторы, а в исследованиях с резонансными нейтронами (1 эВ $< E_n < 10^4$ эВ) — ускорители.

Причины этого следующие [1]. Разрешение спектрометра, использующего метод времени пролёта, $R = \Delta t/L$, где Δt — ошибка в измерении времени. При $R = \Delta t/L$ [мкс м⁻¹] ошибка в измерении энергии $\Delta E = 0,028 E^{3/2} R$ [эВ]. Тогда для резонансных нейтронов, например, при $L = 10^3$ м и $\Delta t = 1$ мкс разрешение $R = 10^{-3}$ мкс м⁻¹ и для $E_n = 10^4$ эВ ошибка составляет $\Delta E = 28$ эВ, а для $E_n = 1$ эВ — $\Delta E = 2,8 \times 10^{-5}$ эВ. Для тепловых нейтронов, например, при $L = 20$ м, $\Delta t =$

$= 100$ мкс разрешение $R = 5$ мкс м^{-1} и для $E_n = 2,5 \times 10^{-2}$ эВ ошибка $\Delta E = 1,1 \times 10^{-4}$ эВ. Другой важный для нейтронной спектроскопии параметр — светосила. При прочих равных условиях и заданном разрешении светосила тем больше, чем меньше Δt . Светосила реактора с прерывателем пропорциональна $\Delta t/\tau L^2$. Поэтому, если уменьшить в заданное число раз Δt и L , то разрешение R останется неизменным, а светосила возрастёт в $1/L$ раз. Однако в случае стационарного реактора увеличение светосилы ограничено, во-первых, из-за технических трудностей, связанных с сокращением Δt механическим путём, а во-вторых, уменьшение Δt означает использование тем меньшей доли излучения реактора, чем меньше $\Delta t/\tau$, где τ — время между моментами пропускания пучка. Кроме того, в течение тех временных промежутков, в которые прерыватель не пропускает нейтроны, излучение реактора не только не используется, но и создаёт паразитный фон. Поэтому для нейтронной спектроскопии более выгодными оказываются пульсирующие источники нейтронов, в которых Δt может быть малым и всё излучение сосредоточено в импульсе. Такие источники нейтронов создают на основе ускорителей электронов или протонов. В середине 1980-х годов были созданы мощные импульсные источники нейтронов на базе протонных ускорителей с энергией протонов около 1 ГэВ, удовлетворяющие всем условиям реализации метода времени пролёта во всём интервале энергий медленных нейтронов [2].

3. От пульсирующего реактора к супербустеру

Отдельную главу в развитии метода времени пролёта открыло появление импульсных реакторов периодического действия (пульсирующих реакторов) и сочетание их с мигающими ускорителями — инжекторами. Идею пульсирующего реактора предложил Д.И. Блохинцев [3] в 1955 г., теория этого реактора была разработана И.И. Бондаренко и Ю.Я. Стависким в 1956 г. Действие реактора основано на механической модуляции реактивности: активная зона находится в подкритическом состоянии, а вращающийся на диске кусок урана на короткое время переводит систему в надкритическое для мгновенных нейтронов состояние. В результате возникает импульс мощности и импульсный поток нейтронов.

Средняя мощность первого реактора ИБР была первоначально низкой — 1 кВт, позднее 6 кВт. Однако мощность в импульсе при частоте повторения 8 импульсов в секунду достигала 3 и 18 МВт соответственно, а в режиме редких импульсов (один раз в 5 с) — 1000 МВт. В 1968 г. ИБР был остановлен, и в 1969 г. на его месте был установлен новый реактор такого же типа (ИБР-30) со средней мощностью 25 кВт. При этом поток тепловых нейтронов в импульсе достигал величины 10^{15} нейтронов на 1 см^2 за 1 с. Однако сравнительно большая длительность импульса — 60 мкс — давала разрешение в 60 раз меньшее, чем приведённые выше оценки. Поэтому исследования с резонансными нейтронами, для которых реактор ИБР сооружался, были ограничены кругом задач, требующих высокой светосилы, но достаточно умеренного разрешения.

В то же время реакторы ИБР и ИБР-30 оказались весьма эффективными для исследования конденсированных сред. Дело в том, что для исследований таких сред

используют тепловые и холодные ($E_n < 10^{-2}$ эВ) нейтроны. Длительность испускаемых таких нейтронов замедлителем определяется диффузией нейтронов и равняется примерно 100–200 мкс. Поэтому длительность импульса от реактора ИБР оказалась полностью удовлетворяющей потребностям нейтронографии. Краткий обзор основных результатов дан в [4, 5].

Главным результатом использования реакторов ИБР и ИБР-30 в нейтронографии стало применение метода времени пролёта в дифракции нейтронов. Геометрическая оптика нейтронов совпадает с геометрической оптикой рентгеновских лучей как при дифракции, так и при скользящем угле падения. Поэтому нейтронографические эксперименты ставились по схеме рентгенографических. Так, начиная с первых опытов в 1936 г., дифракция нейтронов проводилась следующим образом. Из спектра излучения выделяют определённую длину волны λ и эмпирически ищут угол, для которого выполняется условие Брэгга–Вульфа: $2d \sin \theta = n\lambda$, где d — расстояние между отражающими плоскостями в кристалле, θ — угол между направлением излучения и поверхностью этих плоскостей, n — целое число; угол падения равен углу отражения. Однако можно поступать иначе, а именно применить метод времени пролёта, пользуясь в условии Брэгга–Вульфа тем, что длина волны нейтронов обратно пропорциональна их скорости [6].

Возможность использования метода времени пролёта в дифракции нейтронов впервые обсуждал П. Эгелстаф в 1954 г. В 1961 г. Б. Бурас попытался применить этот метод на стационарном реакторе с прерывателем Ферми в Сверке (Варшава). Однако интенсивность этого источника оказалась недостаточной. В 1962 г. Б. Бурас инициировал постановку такого эксперимента на реакторе ИБР. Опыты оказались успешными, так что метод времени пролёта в дифракции нейтронов был реализован. В дальнейшем для реактора ИБР-30 сотрудниками лаборатории нейтронной физики были предложены практически все методики в этом направлении, которые затем использовались и в других нейтронных центрах на импульсных источниках. С появлением высокопоточных импульсных источников нейтронов в середине 1980-х годов метод времени пролёта в дифракции нейтронов превратился в мощный метод структурных исследований и получил широкое распространение [2].

Вернёмся к спектроскопии резонансных нейтронов, для которой, как уже отмечалось, желательно иметь короткий импульс нейтронов. В принципе решение этой проблемы было известно. В 1958 г. в ядерном центре Великобритании в Харуэле был создан бустер-размножитель, состоящий из мишени для фотоядерной реакции, помещённой в подкритическую сборку, и электронного ускорителя-инжектора. В случае реактора ИБР открывалась новая возможность — создание бустера с импульсной мишенью, или супербустера [1, 7]. В этом случае в момент инжекции нейтронов импульсным электронным ускорителем реактор с помощью модулятора реактивности получает максимальную реактивность, которая затем быстро спадает. Процесс размножения нейтронов обусловлен только мгновенными нейтронами, в то время как запаздывающие нейтроны, которые затягивают процесс цепной реакции, не успевают внести свой вклад. Поскольку длительность одного звена цепочки размножения на ИБР составляет 10^{-8} с, при коэффициенте

умножения, равном 200, размножение заканчивается через 2 мкс. Таким образом, предоставляется возможность усилить импульс в несколько сотен раз с увеличением его длительности до 3–4 мкс. В стационарном бустере при таком умножении импульс станет почти критическим для запаздывающих нейтронов и система перестанет быть импульсной.

В 1965 г. в качестве инжектора для реактора ИБР был установлен микротрон, изготовленный в Институте физических проблем (ИФП) АН СССР. В 1969 г. на реакторе ИБР-30 был установлен линейный ускоритель электронов с импульсным током 200 мА и длительностью импульса около 1 мкс. В качестве мишени использовался плутоний, который впоследствии был заменен вольфрамом. В 1971 г. Д.И. Блохинцев и И.М. Франк в коллективе авторов были удостоены Государственной премии СССР за "исследовательский реактор ИБР и реактор ИБР с инжектором". До 1996 г. источник ИБР-30 работал в двух режимах — пульсирующего реактора и импульсного супербустера. С 1996 г. реакторный режим не использовался и до 2001 г. ИБР-30 работал как бустер-размножитель с частотой импульсов 100 импульсов в секунду, средней мощностью размножающей мишени 12 кВт и полушириной импульса 4 мкс. С 1994 г. в ОИЯИ реализуется проект нового импульсного источника нейтронов ИРЕН (источник резонансных нейтронов) [8] с использованием линейного ускорителя электронов и размножающей мишени. В конце 2008 г. планируется окончание первого этапа — без размножающей мишени.

Создание импульсного бустера-размножителя ИБР-30 стало основой существенного развития нейтронной ядерной спектроскопии, которая на всех этапах развития нейтронной физики служила главным поставщиком экспериментальных данных [9]. Светосильная нейтронная ядерная спектроскопия открыла путь к изучению высоковозбужденных, в интервале энергий от 6 МэВ до 10 МэВ, состояний ядер с точностью, недостижимой другими методами. Кроме проведения работ по нейтронной ядерной спектроскопии, на ИБР-30 были начаты и развиты и другие оригинальные исследования по физике атомного ядра и фундаментальных взаимодействий (см., например, [4, 5]).

4. Импульсный быстрый реактор ИБР-2

Успешная работа реактора ИБР и его модификаций стимулировала дальнейшее развитие в этом направлении. В середине 1960-х годов появилось несколько новых проектов. Первым было сообщение о пульсирующем реакторе "Sora" со средней мощностью 1 МВт, имеющем подвижный отражатель. Реактор планировалось построить в исследовательском центре Евратома в Испре (Италия). Мощный импульсный реактор периодического действия со средней мощностью до 30 МВт предполагалось построить в Брукхейвенской национальной лаборатории (США). В 1964 г. началась работа в Дубне над проектом нового реактора — ИБР-2. Его принципиальным отличием от реакторов ИБР стала модуляция реактивности подвижным отражателем, а также охлаждение активной зоны жидким натрием. Из всех предложенных проектов новых высокопоточных пульсирующих реакторов был реализован только проект ИБР-2, что стало возможным благодаря опыту эксплуатации таких систем в Дубне и Обнинске, а также



И.М. Франк у пульта реактора ИБР-2 (1976 г.).

активному участию Министерства среднего машиностроения СССР¹.

Официально проектирование ИБР-2 началось в 1966 г., а строительство — в 1969 г. Первая критическая сборка была произведена в ФЭИ в 1968 г., с 1970 г. по 1975 г. исследовался макет подвижного отражателя на стенде в Дубне. Физический пуск реактора (без теплоносителя) произошёл через 8 лет после начала строительства: в конце 1977 г. — начале 1978 г. Затем началась подготовка и осуществление энергетического пуска (с натрием), который фактически завершился 9 апреля 1982 г. выходом на среднюю мощность 2 МВт при частоте импульсов 25 Гц и проведением первых физических экспериментов на выведенных пучках. После кончины Д.И. Блохинцева в январе 1979 г. научным руко-

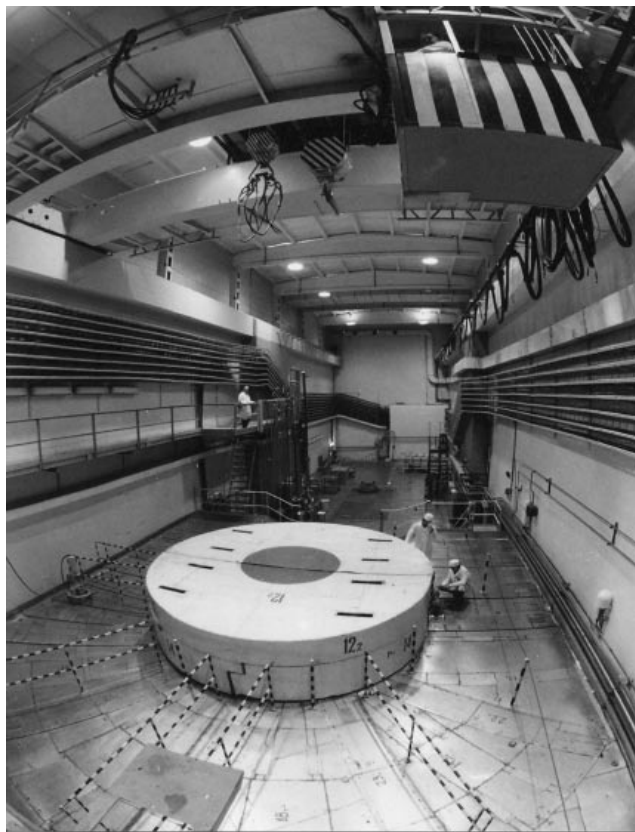
¹ Кроме ОИЯИ и Физико-энергетического института (ФЭИ) (г. Обнинск, Калужская обл.) в строительстве реактора ИБР-2 принимал участие целый ряд организаций Министерства среднего машиностроения СССР. Главным конструктором реактора был Научно-исследовательский конструкторский институт энерготехники, проектные работы выполнял Государственный специализированный проектный институт, топливные элементы изготовляли Всесоюзный (теперь Всероссийский) научно-исследовательский институт неорганических материалов и комбинат "Маяк". Для решения отдельных задач привлекались и другие специализированные институты и конструкторские бюро мощной индустрии Минсредмаша. Можно утверждать, что создание пульсирующих реакторов — одно из ярких воплощений высочайшего потенциала ядерной науки и техники страны.



Активная зона ИБР-2, представляющая собой бак ёмкостью 22 л, в который помещается топливо — двуокись плутония. Бак загружается в корпус реактора.

водителем реактора ИБР-2 стал И.М. Франк. Официально реактор был принят в эксплуатацию 10 февраля 1984 г., выполнение программы физических экспериментов началось 9 апреля 1984 г. после выхода на мощность 2 МВт при частоте импульсов 5 Гц.

Активная зона реактора объёмом 22 л содержала 92 кг двуоксида плутония. Модуляция реактивности осуществлялась стальным подвижным отражателем, состоящим из двух вращающихся с разными скоростями (1500 и 300 оборотов в минуту) частей. Когда обе части отражателя проходили зону, генерировался импульс мощности (1500 МВт). При регулярном режиме



Реакторный зал ИБР-2.

работы реактора — 2500 часов в год на эксперимент — срок работы зоны без замены топлива составлял не менее 20 лет, срок эксплуатации подвижного отражателя — 5–7 лет. В 1995 г. ИБР-2 начал работать с новым (третьим по счёту) подвижным отражателем. В 2002 г.



Экспериментальный зал ИБР-2.

планировалась замена вместе с заменой подвижного отражателя и активной зоны. Однако финансовое положение в 1990-х годах не позволило вовремя начать модернизацию реактора. Модернизация реактора ИБР-2 — это длительная программа научно-технических работ, по существу создание нового реактора без строительства здания, рассчитанная на 10 лет. Эта программа была начата только в 2000 г. благодаря финансовой поддержке Министерства атомной энергии РФ (правопреемника Минсредмаша СССР) и лично министра Е.О. Адамова. Для того чтобы продлить срок работы реактора ИБР-2, средняя мощность была снижена до 1,5 МВт и время работы на мощности сокращено до 2000 часов в год. В декабре 2006 г. реактор был остановлен для замены всех технологических систем. В 2010 г. планируется пуск нового реактора ИБР-2М с улучшенными параметрами и современными системами обеспечения безопасности.

Таким образом, пульсирующий ИБР-2 — экономичное, относительно дешёвое и, как показал опыт работы, простое и безопасное в эксплуатации устройство. Создание ИБР-2 обошлось примерно в 20 млн руб. (в ценах 1984 г.). Сегодня эксплуатация реактора, его дальнейшее развитие и совершенствование стоят менее 1 млн долларов США в год. Это в 10–50 раз меньше, чем для других современных источников нейтронов в мире. В то же время реактор даёт в импульсе рекордно высокий для исследовательских источников нейтронов поток, равный 10^{16} нейтронов на 1 см^2 за 1 с.

В 1996 г. Д.И. Блохинцев и И.М. Франк (оба посмертно) в коллективе авторов были удостоены премии Правительства РФ за создание исследовательского высокопоточного импульсного реактора ИБР-2.

5. Обратный метод времени пролёта

Реактор ИБР-2, обладая рекордно высоким потоком тепловых нейтронов в импульсе, в обычной постановке дифракционного эксперимента имел большие преимущества в исследованиях, не требующих высокого разрешения. Однако для прецизионных измерений точности на уровне 1 % не хватало.

Разрешение времяпролётного порошкового дифрактометра описывается следующим выражением:

$$R = \frac{\Delta d}{d} = \left[\left(\frac{\Delta t_0}{t} \right)^2 + (\gamma \cot \theta)^2 \right]^{1/2},$$

где Δt_0 — ширина нейтронного импульса, γ описывает геометрические неопределённости, $t = 252,778 L \lambda$ — время пролёта нейтрона от источника до детектора, λ — длина волны нейтрона, θ — угол Брэгга. Понятно, что временной вклад может быть уменьшен за счёт либо уменьшения Δt_0 , либо увеличения пути пролёта нейтрона, т.е. удаления образца от источника нейтронов.

Например, на одном из лучших в мире порошковых дифрактометров HRPD (High Resolution Powder Diffractometer) на импульсном источнике нейтронов ISIS (In-situ Storage Image Sensor) в Лаборатории им. Резерфорда–Эпплтона (RAL, Великобритания) разрешение составляет $\Delta d/d \approx 6 \times 10^{-4}$ в достаточно широком интервале длин волн. Это разрешение является практически предельно достижимым для структурных исследований с помощью как нейтронов, так и рентгеновских лучей. Однако при ширине нейтронного импульса $\Delta t_0 \approx 15 \text{ мкс}$ $\text{\AA}^{-1}$ длина пролётной базы на HRPD $L = 100 \text{ м}$.

В результате поток нейтронов на образце имеет весьма умеренную величину — $\Phi_0 \approx 10^6 \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$.

Для реактора ИБР-2 такой обычный способ увеличения разрешения за счёт увеличения пролётной базы не годится, так как $\Delta t_0 = 320 \text{ мкс}$. Поэтому был предложен и адаптирован для применения на реакторе ИБР-2 обратный метод времени пролёта с использованием фурье-прерывателя [2]. Ключевым элементом предложенной схемы является фурье-прерыватель, который в отличие от обычного прерывателя Ферми имеет не одну, а много щелей. В нашем случае — это диск диаметром 50 см с 1024 щелями, ширина которых (1 мм) равна расстоянию между ними. Диск вращается с переменной скоростью до 9000 оборотов в минуту. При максимальной скорости вращения длительность импульса сокращается до 2 мкс. Поскольку щелей много, то поток нейтронов уменьшается незначительно, однако возникает эффект рецикличности, приводящий к перекрытию регистрируемых спектров. Идея обратного метода времени пролёта, позволяющая расшифровать перекрывающиеся дифракционные спектры, состоит в следующем. Хотя нельзя сказать точно, какая скорость была у зарегистрированного детектором нейтрона, можно указать, какие скорости у него могли быть, проверяя состояние прерывателя и реактора в соответствующие предшествующие моменты. Оказывается, что, варьируя частоту вращения прерывателя от нулевой до некоторой максимальной и накапливая большое число событий, отсортированных таким образом, можно получить обычный спектр упруго-рассеянных нейтронов с развёрткой по времени. Возможность сортировки обеспечивается формированием опорных сигналов, совпадающих с моментами "открытого" состояния реактора и прерывателя и управляющих работой быстрого сдвигового регистра, через который идёт накопление детекторных сигналов. Временная часть функции разрешения принимает вид

$$R(t) \sim \int_0^{\Omega_m} g(\omega) \cos \omega t d\omega,$$

где $g(\omega)$ — функция распределения частот, Ω_m — максимальная частота вращения фурье-прерывателя. В простейшем случае $g(\omega)$ может быть аппроксимирована функцией Блакмана. При этом полуширина $R(t)$ равна Ω_m^{-1} и может быть доведена до 7 мкс. Тогда

$$\frac{\Delta t_0}{t} = \frac{\Delta t_0}{253 L \lambda} \approx \frac{10^{-4}}{d}.$$

Фурье-дифрактометр высокого разрешения (ФДВР) на реакторе ИБР-2 имеет параметры $\Delta d/d \approx 5 \times 10^{-4}$ ($d = 2 \text{ \AA}$), $L = 20 \text{ м}$, $\Phi_0 \approx 10^7 \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$.

Создание ФДВР на реакторе ИБР-2 имело принципиальное значение. Во-первых, появилась возможность прецизионных структурных исследований, которая сразу же была использована для исследований новых материалов, таких как высокотемпературные сверхпроводники [11] и манганиты с колоссальным магнетосопротивлением [12]. Во-вторых, было показано, что при умелом использовании источники нейтронов с длинным импульсом имеют практически те же возможности, что и короткоимпульсные источники на базе протонных ускорителей, причём стоимость последних на один-два порядка больше. Этот опыт уже используется в мире. Так,

новый Европейский суперисточник нейтронов (European Spallation Source, ESS) проектируется как источник с длинным импульсом.

Введение в строй ФДВР завершило создание широко-профильного комплекса спектрометров на реакторе ИБР-2. Этот комплекс позволил получить ряд новых оригинальных результатов при изучении структуры материалов. За развитие и реализацию новых методов структурной нейтронографии на импульсных и стационарных реакторах коллективу авторов из ОИЯИ, Петербургского института ядерной физики им. Б.П. Константинова РАН и Российского научного центра "Курчатовский институт" в 2000 г. была присуждена Государственная премия РФ в области науки и техники.

6. ИБР-2 в исследованиях наноматериалов

Реактор ИБР-2 по своим параметрам — рекордно высокий поток тепловых нейтронов в импульсе, большая доля холодных нейтронов в спектре — идеально подходит для исследований конденсированного состояния вещества. Сегодня ИБР-2 эффективно используется в исследованиях проблем физики конденсированных сред, химии, материаловедения, молекулярной биологии, синтеза соединений для фармакологии и создания материалов для медицины, а также в инженерных науках и геофизике [5]. Среди объектов исследования находятся и материалы, которые в последнее время принято относить к отдельному классу наноматериалов. Реактор ИБР-2 как физический прибор для междисциплинарных исследований, обладающий параметрами излучения в нанодиапазоне, является также эффективным, в том числе, для нанодиагностики и исследований наноматериалов (см., например, [13]).

И.М. Франк поддерживал исследования конденсированных сред, особенно его интересовали проблемы биологии и биофизики, а также развитие методов нейтронной оптики. В частности, его привлекала задача оптического описания поведения нейтронов при их скользящем падении на поверхность плотных веществ. Этот раздел нейтронной оптики начал бурно развиваться с середины 1980-х годов после появления высокопоточных импульсных источников нейтронов, в частности реактора ИБР-2. Оказалось, что рефлектометрия (так называют методы исследования поверхностей, тонких плёнок и границ раздела в слоистых структурах, основанные на оптике нейтронов при скользящем угле падения), так же как и дифракция, имеет свои преимущества при времяпролётной постановке эксперимента. Особый интерес для нейтронной рефлектометрии представляет использование поляризованных нейтронов [14].

Лаборатория нейтронной физики была среди пионеров создания нового научного направления — оптики поляризованных нейтронов при скользящем угле падения (рефлектометрии поляризованных нейтронов), и все вопросы, связанные со становлением этого направления, обсуждались с И.М. Франком. Сейчас рефлектометрия поляризованных нейтронов сформировалась как один из мощных современных методов диагностики и исследования наноструктурных материалов. Нейтронная рефлектометрия является идеальным методом для исследования и диагностики наноструктурных материалов, в частности слоистых систем и систем со структурированными поверхностями. Слабое взаимодействие нейтронов с веществом делает этот метод неразрушающим при

большой глубине проникновения излучения в образец. В случае объектов, содержащих водород, имеется прекрасный способ контрастирования с помощью изотопного замещения дейтерием. Наконец, новые методы исследования, основанные на использовании магнитного момента нейтрона, открывают новые возможности для изучения магнитных и немагнитных наносистем.

В последнее десятилетие, наряду с развитием техники зеркального отражения, которая даёт информацию о структуре по глубине образца (скажем, по оси z), успешно развивается техника незеркального (диффузного) рассеяния, которая позволяет получить информацию об изменениях структуры в плоскости образца по одной из координат (скажем, по оси x). Наконец, в последние годы начала развиваться техника малоуглового рассеяния вблизи угла скольжения (Grazing Incidence Small-Angle Neutron Scattering, GISANS), которая даёт информацию об изменениях структуры в плоскости образца по другой координате (координате y). Таким образом, появляется возможность полного исследования структуры низкоразмерных систем на наноуровне. Типичные примеры наносистем, исследованных с помощью нейтронной рефлектометрии, — это магнитные многослойные плёнки, полосчатые (stripe) структуры, квантовые точки, нанопроволоки в пористом кремнии, полимеры с включениями магнитных наночастиц, мультислойные везикулы, магнитные жидкости.

Схема рефлектометрического эксперимента в принципе проста (рис. 1). На поверхность образца под малым углом скольжения θ_i падает пучок нейтронов с волновым вектором k_i . При зеркальном отражении, при котором угол отражённого пучка $\theta_f = \theta_i$, переданный импульс $q = k_f - k_i$ (где k_f — волновой вектор отражённого пучка) перпендикулярен подложке. При незеркальном отражении ($\theta_f > \theta_i$) появляется параллельная поверхности подложки составляющая переданного импульса q_x , которая несет информацию об искажениях поверхности в этом направлении, например о шероховатостях или о внедрённых в среду наночастицах. При времяпролётной постановке эксперимента интенсивность зеркального отражения на детекторе, которая зависит от длины волны нейтрона, регистрируется в фиксированной точке (в угле отражения). Интенсивность незеркального рассеяния "высвечивается" в точках, находящихся выше или ниже линии зеркального отражения, в виде крыльев брэгговского, отвечающего условию $q_0 = p_i + p_f = \text{const}$, или йонедовского рассеяния, для которого $k_i = k_c$ или $k_f = k_c$, где k_c — критическое значение волнового вектора, при котором выполняется условие полного внешнего отражения нейтронов.

Преимущество времяпролётной постановки эксперимента состоит в том, что прямой пучок не приближается к линии интенсивности зеркального отражения, как это происходит в случае рефлектометров с постоянной длиной волны, когда необходимо вращать образец. В результате при использовании времяпролётной методики интенсивность фона при критическом угле и больших длинах волн в области рассеяния Йонеды оказывается очень низкой по сравнению с интенсивностью фона в методе, в котором переменной является угол θ_i при постоянной длине волны.

В рефлектометрическом эксперименте зеркальное рассеяние от идеальной плоской многослойной структуры, т.е. без шероховатостей на поверхности и на

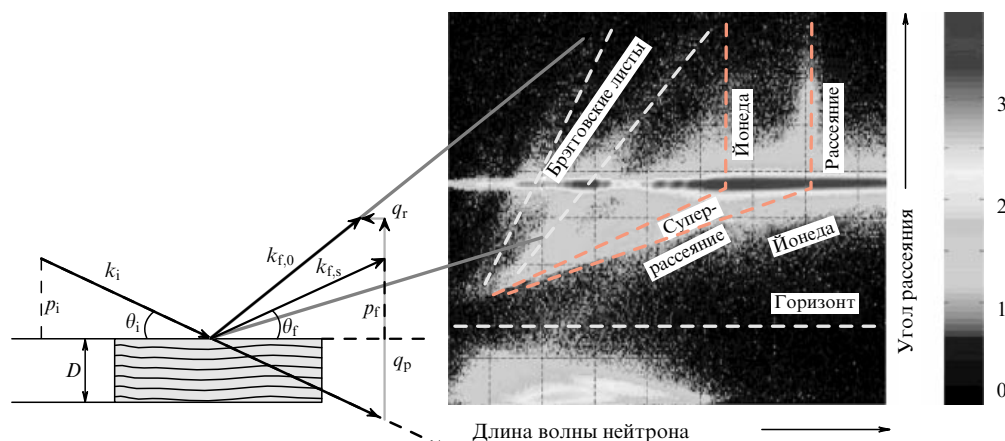


Рис. 1. Схема рефлектметрического эксперимента. Угол $\theta_i \leq \theta_c$, где θ_c — критический угол, при котором наступает полное внешнее отражение. Если угол отражённого пучка $\theta_f = \theta_i$, то отражение зеркальное, если $\theta_f > \theta_i$, то — незеркальное. k_i — волновой вектор падающего нейтрона, $k_{f,s}$, $k_{f,0}$ — волновые векторы нейтрона при зеркальном и незеркальном отражении соответственно, $p_{i,f}$ — проекции волновых векторов на нормаль к поверхности: $p_{i,f} = k_{i,f,s} \sin \theta_{i,f}$.

межслойных границах, даёт значение толщины плёнки D , которое определяется по положению осцилляций коэффициента отражения R в точках обратного пространства $q = 2\pi n/D$. В случае многослойной системы положение брэгговских пиков $q = 2\pi n/d$ даёт значения толщины слоёв d . Интенсивность брэгговских пиков возрастает при увеличении контраста рассеяния нейтронов между слоями. Незеркальное рассеяние возникает тогда, когда на границах между слоями и на поверхности имеются шероховатости. Источником незеркального рассеяния могут служить и магнитные неоднородности.

Интенсивность незеркального рассеяния зависит не только от силы рассеяния на неоднородностях в слоях, но и от изменения амплитуды нейтронного волнового поля внутри многослойной системы, вызванного многократ-

ными отражениями и переходами нейтронов через межслойные границы. Эти процессы резонансного усиления учитываются в борновском приближении искажённых волн. В однослойных тонких плёнках, в частности жидких, эти эффекты отсутствуют и соответственно не возникает высокоинтенсивных брэгговских крыльев.

В качестве примера нейтронной нанодиагностики рассмотрим исследование магнитной полимерной слоистой структуры, которая представляет собой тонкую плёнку симметричного диблок-полимера, состоящего из дейтерированного полистирина (d-ПС) и полибутилметакрилата (ПБМА). Такая система, П(д-С-д-БМА), представляет собой самоорганизующуюся матрицу для ламеллярного расположения наночастиц магнетита Fe_3O_4 [15]. Самоорганизующиеся полимерные плёнки явля-

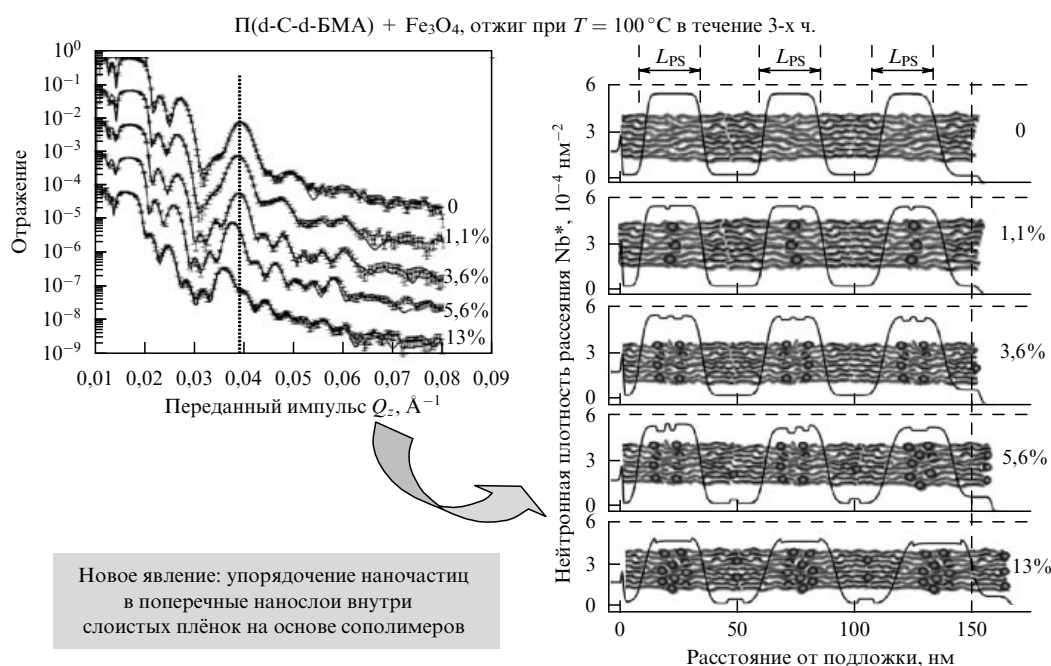


Рис. 2. Распределение наночастиц магнетита (точки) в П(д-С-д-БМА) в зависимости от их концентрации, полученное из экспериментальных данных по зеркальному и незеркальному рассеянию нейтронов [15]. Справа от кривых в процентах указано соответствующее содержание наночастиц в образцах.

ются весьма перспективными искусственно создаваемыми функциональными материалами, в которых полимерная матрица служит средой для наночастиц с различными свойствами. В результате получается новый функциональный материал с формируемыми на наномасштабе свойствами.

В рассматриваемом примере материал создаётся с помощью послойного перемешивания компонент вращением (spin-coating). Базовая матрица в виде ламеллярной структуры образуется в результате отжига. Магнитные наночастицы, введенные в один из диблок-сополимеров, образуют нанолиты, размеры которых зависят от концентрации наночастиц. Задача состоит в исследовании устойчивости структуры такой композитной полимерной плёнки. Проблема стабильности получаемых в результате самосборки структур является общей для нанотехнологий. Когда найдены условия стабилизации нового материала, можно начинать изучать его физические свойства, в нашем случае — магнитные.

Как видно из рис. 2, наночастицы магнетита собираются в ПС-слоях и тем самым уходят от взаимодействия с ПБМА. Это новое явление. Ещё в 1907 г. Пиккеринг установил, что смеси стабилизируются наночастицами, которые располагаются по границам раздела компонентов. Здесь же наночастицы упорядочиваются в нанолитах внутри слоёв сополимерной многослойной плёнки.

Параметры композита, определённые из нейтронного эксперимента, указаны в таблице для чистой системы (концентрация примесей $x = 0$) и для системы с концентрацией примесей $x = 13\%$.

Таблица. Параметры нанокомпозита $\text{P(d-C-d-BMA)} + \text{Fe}_3\text{O}_4$

Параметр	$x = 0$	$x = 13\%$
D , нм	$153,3 \pm 1,0$	$170,5 \pm 1,0$
L , нм	$50,2 \pm 0,5$	$55,3 \pm 1,0$
L_{PS} , нм	$24,4 \pm 0,5$	$29,0 \pm 1,0$
ξ , нм	$600,0 \pm 5,0$	$400,0 \pm 5,0$
σ , нм	$3,5 \pm 0,5$	$5,8 \pm 0,5$
ζ	6	4

Со структурной точки зрения введение примесей приводит к следующим изменениям. Увеличивается полная толщина композитной плёнки D . Это увеличение обусловлено возрастанием толщины L каждого бислоя, что, в свою очередь, вызвано возрастанием толщины L_{PS} слоя ПС.

Наблюдается заметное увеличение параметра шероховатостей σ , что означает ослабление устойчивости композита. Об этом же свидетельствует поведение корреляционной длины ξ в слое (размер в плоскости домена). Уменьшение ξ означает, что изменяются параметры границ между слоями и упругость γ между двумя полимерами уменьшается. Это служит ещё одним указанием на уменьшение устойчивости композита.

Уменьшение параметра конформности ζ означает увеличение несовпадения границ шероховатостей между слоями и границ доменов.

Приведённые структурные данные о расположении наночастиц и их влиянии на толщины и другие параметры слоёв являются важной информацией для технологов.

7. Заключение

Итак, пульсирующие ядерные реакторы, созданные в Объединённом институте ядерных исследований при активном участии И.М. Франка, почти за 50 лет их работы позволили сформировать целый ряд научных направлений в нейтронной физике, ставших определяющими в мире. Научная школа по нейтронной оптике, возникшая под руководством И.М. Франка, развивается уже в нескольких поколениях.

Отдавая дань огромному вкладу И.М. Франка в развитие мировой и отечественной науки и обороноспособность страны, в то же время, как мне представляется, можно заключить, что не менее важным в наследии И.М. Франка является влияние, которое он оказывал на окружающих и которое продолжает действовать до сих пор. Лучше, чем он сам, о подобном влиянии не скажешь. В воспоминаниях о своём учителе И.М. Франк писал [16]: "... творческое наследие таких физиков, как С.И. Вавилов, содержит не только труды, подписанные его именем, или труды его сотрудников и учеников, продолжающих разработку тех же проблем. Имеется нечто не менее важное, на что, однако, не может быть ссылок в опубликованных работах. Это — то идейное влияние, прямое или косвенное, которое оказывает учёный... Это именно то влияние, которое нужно считать научной школой учёного, которую не следует отождествлять с простой совокупностью тех, кто работал или работает под его непосредственным руководством. Я имею здесь в виду и нечто большее, чем организационная помощь работам, хотя она в условиях современной науки играет важнейшую роль. Существенно и другое — личное влияние учёного, во многом неотделимое от его человеческих свойств".

Список литературы

1. Франк И М *Вестник АН СССР* **41** (12) 13 (1971)
2. Аксенов В Л, Балагуров А М *УФН* **166** 955 (1996) [Aksenov V L, Balagurov A M *Phys. Usp.* **39** 897 (1996)]
3. Блохинцев Д И *Рождение мирного атома* (М.: Атомиздат, 1977)
4. Франк И М *ЭЧАЯ* **2** 807 (1972)
5. Аксенов В Л *Вестник РАН* **71** 415 (2001) [Aksenov V L *Herald Russ. Acad. Sci.* **71** 264 (2001)]
6. Франк И М *Природа* (9) 24 (1972)
7. Шабалин Е П *Импульсные реакторы на быстрых нейтронах* (М.: Атомиздат, 1976) [Shabalin E P *Fast Pulsed and Burst Reactors* (Oxford: Pergamon Press, 1979)]
8. Aksenov V L et al. "Proposal for the construction of the new intense resonance neutron source (IREN)", Preprint E3-92-110 (Dubna: JINR, 1992)
9. Пикельнер Л Б, Попов Ю П, Шарапов Э И *УФН* **137** 39 (1982) [Pikel'ner L B, Popov Yu P, Sharapov E I *Sov. Phys. Usp.* **25** 298 (1982)]; Попов Ю П *ЭЧАЯ* **34** 448 (2003) [Popov Yu P *Phys. Part. Nucl.* **34** 229 (2003)]
10. Аксенов В Л *Природа* (2) 3 (1996)
11. Аксенов В Л *УФН* **172** 701 (2002) [Aksenov V L *Phys. Usp.* **45** 645 (2002)]
12. Аксенов В Л, Балагуров А М, Помякушин В Ю *УФН* **173** 883 (2003) [Aksenov V L, Balagurov A M, Pomyakushin V Yu *Phys. Usp.* **46** 856 (2003)]
13. Авдеев М В *УФН* **177** 1139 (2007) [Avdeev M V *Phys. Usp.* **50** 1083 (2007)]
14. Аксенов В Л *Природа* (9) 50 (2008)
15. Lauter-Pasyuk V et al. *Appl. Phys. A* **74** S528 (2002); *Physica B* **350** e939 (2004)
16. Франк И М, в сб. *Сергей Иванович Вавилов: очерки и воспоминания* 3-е изд., доп. (Под ред. И М Франка) (М.: Наука, 1991)