

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 ФИАНа. Одной из важных задач в этой области, решением которой занялся Илья Михайлович с сотрудниками, являлось точное определение параметров уран-графитовых решёток и выяснение физических закономерностей переноса нейтронов в них. Новой идеей явилось предложение Ильи Михайловича использовать в этих исследованиях импульсный источник нейтронов. С 1956 г. И.М. Франк переходит на работу в Дубну, в Объединённый институт ядерных исследований (ОИЯИ).

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

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

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

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

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

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

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

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	$1,3 \times 10^{15}$ н с ⁻¹
Средняя плотность потока тепловых нейтронов на поверхности замедлителя	5×10^{10} н см ⁻² с ⁻¹
Импульсная плотность потока тепловых нейтронов на поверхности замедлителя	10^{14} н см ⁻² с ⁻¹
Поток резонансных нейтронов на расстоянии 100 м, приведённый к мощности 1 кВт в диапазоне 1 эВ–10 кэВ	$P(E) = \frac{2,7 \times 10^6}{E^{0,9} L^2} W$ [н см ⁻² с ⁻¹ 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 растворе-

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 см^2 , 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 (коллорабация 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 (n, 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 $E_{\alpha}^0 = 1,83 \text{ МэВ}$, а для компаунд-состояний $E_{\alpha}^c = 9,4 \text{ МэВ}$. 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 $\leq 1 \text{ МэВ}$ 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 проникаемости 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 проникаемости 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 нейтронному каналу.

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 двуоксида 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

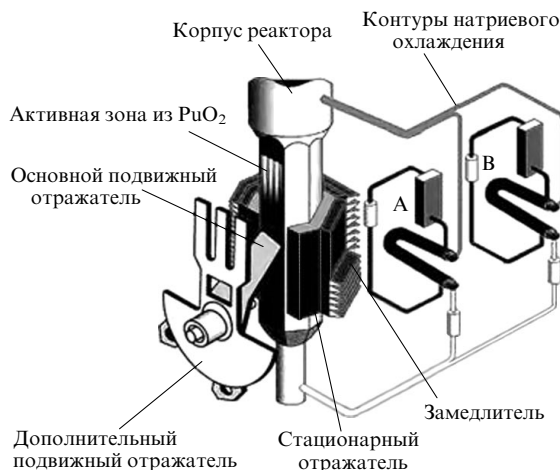


Рис. 3. Принципиальная схема реактора ИБР-2.

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 (10¹⁶ 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 × 10¹² 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, Staviskii 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 Р3-2003-182 (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 Р3-82-86 (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 Р3-82-309 (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. Луцкий В И и др., Препринт Р3-4127 (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 Львовича 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.)