

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 фиксации момента вылета нейтронов. Впервые этот метод реализовал Альварец 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 m^{-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 меньше, 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 испускания 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 скольжении 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 инъекции 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 "Soga" 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-

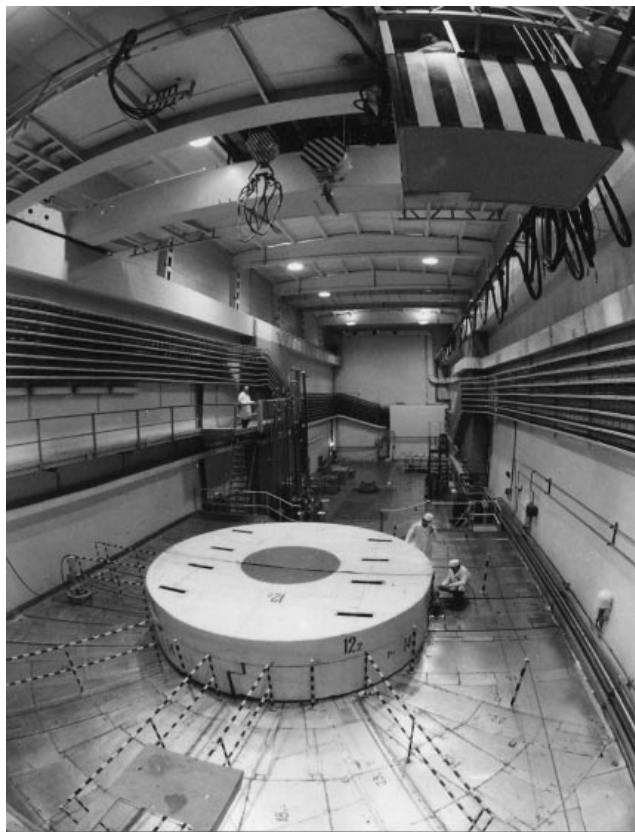
¹ Кроме ОИЯИ и Физико-энергетического института (ФЭИ) (г. Обнинск, Калужская обл.) в строительстве реактора ИБР-2 принимал участие целый ряд организаций Министерства среднего машиностроения СССР. Главным конструктором реактора был Научно-исследовательский конструкторский институт энерготехники, проектные 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 по-смертно) 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 $\Delta t_0 \approx 15 \text{ мкс } \text{Å}^{-1}$ 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 Блэкмана. 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 $\Delta d/d \approx 5 \times 10^{-4}$ ($d = 2 \text{ Å}$), $L = 20 \text{ м}$, $\Phi_0 \approx 10^7 \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$.

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, мультиламеллярные 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 шероховатости 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

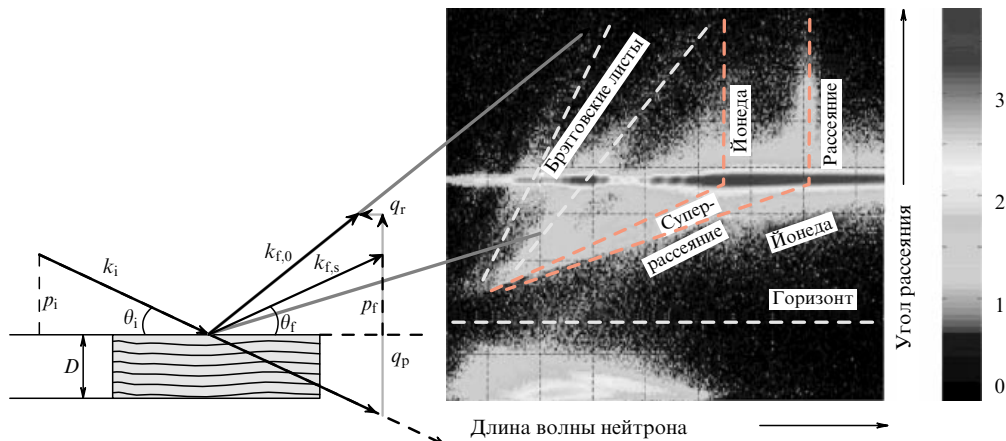


Рис. 1. Схема рефлектометрического эксперимента. Угол $\theta_i \leq \theta_c$, где θ_c — критический угол, при котором наступает полное внешнее отражение. Если угол отражённого пучка $\theta_r = \theta_i$, то отражение зеркальное, если $\theta_r > \theta_i$, то — незеркальное. k_i — волновой вектор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

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 полистирена (d-ПС) и полибутилметакрилата (ПБМА). Такая система, П(d-С-d-БМА), представляет собой самоорганизующуюся матрицу для ламеллярного расположения наночастиц магнетита Fe_3O_4 [15]. Самоорганизующиеся полимерные плёнки явля-

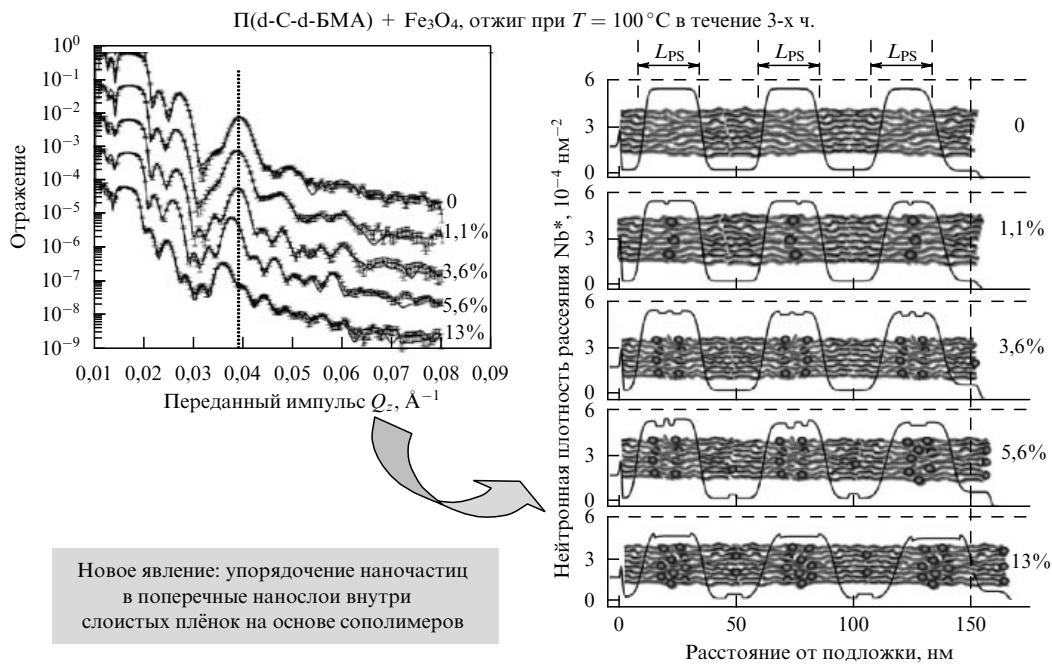


Рис. 2. Распределение наночастиц магнетита (точки) в П(d-С-d-БМА) в зависимости от их концентрации, полученное из экспериментальных данных по зеркальному и незеркальному рассеянию нейтронов [15]. Справа от кривых в процентах указано соответствующее содержание наночастиц в образцах.

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 нанокompозита П(d-C-d-БМА) + Fe₃O₄

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, Шараров 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)