

ПУЛЬСИРУЮЩИЙ ЯДЕРНЫЙ РЕАКТОР*

К 40-летию Объединенного института ядерных исследований

26 марта 1956 г. в Москве было подписано соглашение об образовании в Дубне Объединенного института ядерных исследований – международного научного центра, призванного объединить усилия 12 социалистических стран в познании микромира. Нам не хотелось бы пропустить 40-летний юбилей ОИЯИ, хотя трудные для российской науки времена отнюдь не располагают к торжествам. Причиной тому не только безусловные заслуги ОИЯИ перед отечественной и мировой наукой, не только целая плеяда ярких ученых, работавших там. Желающих освежить в памяти те баснословные годы, когда научные достижения были предметом национальной гордости, мы отсылаем к нашим публикациям, посвященным 25-летию ОИЯИ (Природа. 1981. № 5). Но мы хотели бы также подчеркнуть то важное обстоятельство, что Объединенный институт ядерных исследований сохранился как крупный международный центр, не растерял свой научный потенциал, не только не утратил связей с родственными организациями за рубежом, но и нашел новые формы сотрудничества. ОИЯИ в Дубне не «выживает», а живет полнокровной научной жизнью. Подтверждение тому – цикл статей ведущих ученых ОИЯИ, посвященных фундаментальным проблемам физики, которые мы намерены опубликовать в течение всего юбилейного для ОИЯИ 1996 года. Редакция и редколлегия журнала «Природа» поздравляют коллектив Института с юбилейной датой.



Виктор Лазаревич Аксенов, доктор физико-математических наук, профессор, директор Лаборатории нейтронной физики им. И.М.Франка Объединенного института ядерных исследований, заведующий кафедрой Учебно-научного центра этого института. Действительный член Международной академии наук высшей школы. Область научных исследований – динамика кристаллической решетки, разупорядоченные системы, фазовые переходы, сверхпроводимость.

Ядерные реакторы получили широкое распространение с конца 50-х годов, и уже в следующем десятилетии каждая индустриально развитая страна имела или стремилась иметь их, поскольку это было признаком экономической мощи.

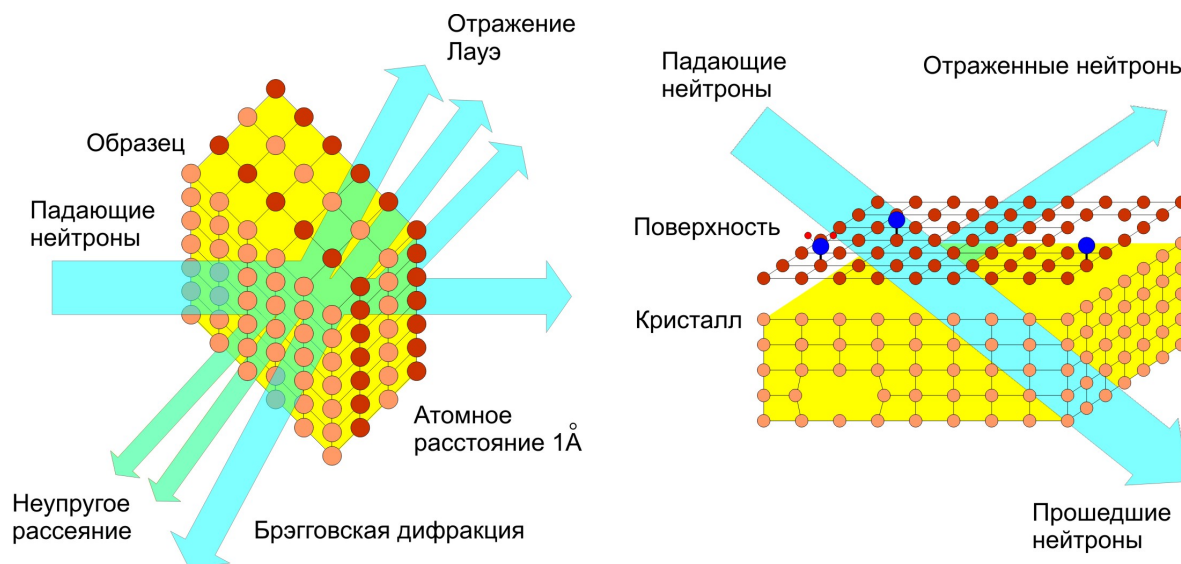
Помимо радиационных исследований и производства изотопов, ядерные реакторы с самого начала использовались для физических исследований при помощи выведенных пучков нейтронов. Эти исследования оказались настолько информативными и существенными для ядерной физики и физики конденсированных сред, что с середины 60-х годов начали создавать источники нейтронов, уже специально ориентированные на пучковые эксперименты.

Особенно большое распространение получили эксперименты по рассеянию медленных нейтронов в конденсированных средах (твердых телах и жидкостях), позволяющие изучать характеристики вещества на атомном и молекулярном уровне. Замечательным свойством медленных нейтронов является то, что их длины волн $\lambda = 1 \div 10 \text{ \AA}$ и энергии $E_n = 1 \div 100 \text{ мэВ}$ соответствуют типичным межатомным расстояниям и характерным энергиям элементарных возбуждений в конденсированных средах. Это позволяет одновременно исследовать и

структуру вещества, т.е. получать информацию о том, как организованы составляющие

его атомы или молекулы, и динамику, т.е. узнавать о взаимодействии между атомами и молекулами.

Эти и другие свойства нейтрона сделали его совершенно необходимым инструментом современного естествознания. Признанием данного факта может служить присуждение Нобелевской премии по физике в 1994 г. Б.Брокхаузу и К.Шаллу “за пионерский вклад в развитие методов рассеяния нейтронов для изучения вещества в конденсированном состоянии”¹. В настоящее время в исследования с помощью рассеяния нейтронов вовлечены тысячи специалистов из числа физиков, химиков, материаловедов, биологов.



Рассеяние нейтронов в веществе. Попадая в вещество, тепловые нейтроны испытывают рассеяние на ядрах атомов (ядерное рассеяние) и на электронах атомных оболочек (магнитное рассеяние). Упругое рассеяние, которое разделяют на обычную дифракцию и дифракцию при малых углах рассеяния (малоугловое рассеяние), дает информацию о структуре вещества (кристаллической и магнитной). Неупругое рассеяние, т.е. рассеяние с передачей энергии, - о спектре элементарных возбуждений.

Если угол падения нейтронов меньше некоторого критического, такие нейтроны не проникают вглубь образца, но отражаются от поверхностных слоев. В этом случае получают данные о структуре поверхности. Прошедшие через образец нейтроны дают информацию о магнитных неоднородностях внутри образца.

Возможности исследований с нейтронами расширяются с переходом к более интенсивным источникам. Происходит это не только за счет возрастания скорости проведения экспериментов, но и за счет расширения их диапазона благодаря увеличению точности измерений, возможности изучения объектов малых размеров, сложных объектов и объектов с малыми сечениями рассеяния, осуществлению экспериментов с анализом поляризации нейтрона до и после рассеяния. Поэтому работы по созданию все более интенсивных источников нейтронов не прекращаются.

Самый интенсивный в мире импульсный источник нейтронов – пульсирующий ядерный реактор ИБР-2 – работает с 1984 г. в Лаборатории нейтронной физики им. И.М.Франка Объединенного института ядерных исследований (ЛНФ ОИЯИ, Дубна Московской области). Его предшественник – реактор ИБР – был построен в 1960 г. через четыре года после образования международного научного центра ОИЯИ, и, претерпев ряд модернизаций, сегодня тоже работает на физический эксперимент. С созданием пульсирующих реакторов в Дубне появились новые направления в

¹ Лауреаты Нобелевской премии 1994 года. По физике – Б.Брокхауз и К.Шалл // Природа. 1995. № 1. С.106.

конструировании источников нейтронов и в развитии методов нейтронных исследований вещества.

В данной статье будет рассказано о пульсирующих реакторах и о некоторых их применениях в изучении конденсированных сред. Но сначала обсудим другие, кроме отмеченного выше, свойства нейтрона и способы получения интенсивных пучков нейтронов.

ЗАЧЕМ УЧЕНЫМ НУЖНЫ НЕЙТРОНЫ?

Нейтрон был открыт в 1932 г. Дж.Чедвиком и сразу же привлек к себе внимание физиков благодаря двум своим свойствам: электрической нейтральности (верхняя оценка заряда нейтрона составляет $2 \cdot 10^{-22}e$) и наличию собственного механического момента – спина, который равен $1/2$ (в единицах \hbar). В физических исследованиях используют медленные нейтроны с энергией до 10^5 эВ (табл.1).

Таблица 1. Классификация медленных нейтронов по энергии

Нейтроны	Энергия, эВ	Области применения
Резонансные	$5 \cdot 10^{-1} - 10^4$	Ядерная физика, физика фундаментальных взаимодействий
Тепловые	$5 \cdot 10^{-3} - 5 \cdot 10^{-1}$	Физика конденсированных сред, биология, химия, материаловедение
Холодные	$10^{-4} - 5 \cdot 10^{-3}$	
Очень холодные	$10^{-7} - 10^{-4}$	Физика частиц (нейтрона), нейтронная оптика
Ультрахолодные	$< 10^{-7}$	

Как электрически нейтральная частица, нейтрон легко вступает в ядерные реакции. По существу, современная ядерная физика началась после открытия нейтрона. Изучение ядерных реакций с его участием в настоящее время является эффективным способом получения информации о структуре ядер и ядерных константах, а также о фундаментальных взаимодействиях. В этих исследованиях важную роль играет наличие у нейтрона спина. Использование пучков поляризованных нейтронов (спин которых ориентирован в одном направлении) позволяет исследовать такие эффекты, как нарушение симметрии обращения времени и пространственной четности².

С физикой фундаментальных взаимодействий связано и изучение свойств самого нейтрона, таких как его электромагнитная структура, дипольный электрический момент, а также время жизни³. Для их изучения очень удобны ультрахолодные нейтроны, открытые в Дубне в 1968 г. Ф.Л.Шапиро с сотрудниками⁴. Так, наиболее точные значения времени жизни нейтрона были получены группой ЛНФ ОИЯИ и Петербургского института ядерной физики (ПИЯФ) РАН на установке ультрахолодных нейтронов на реакторе ВВР-М в г.Гатчине Ленинградской обл. Оно оказалось наиболее близким к среднему значению⁵ $\tau_n = 887.0 \pm 1.6$ сек.

Весьма широко нейтроны используются при исследовании вещества в конденсированном состоянии. Можно выделить следующие крупные разделы: кристаллография, магнетизм, физика разупорядоченных систем (включая сверхтекучие жидкости), физика поверхности и слоистых систем, строение полимеров,

² Алфименков В.П. Нарушение пространственной четности в нейтронных резонансах // Природа. 1985. № 11. С.86-95.

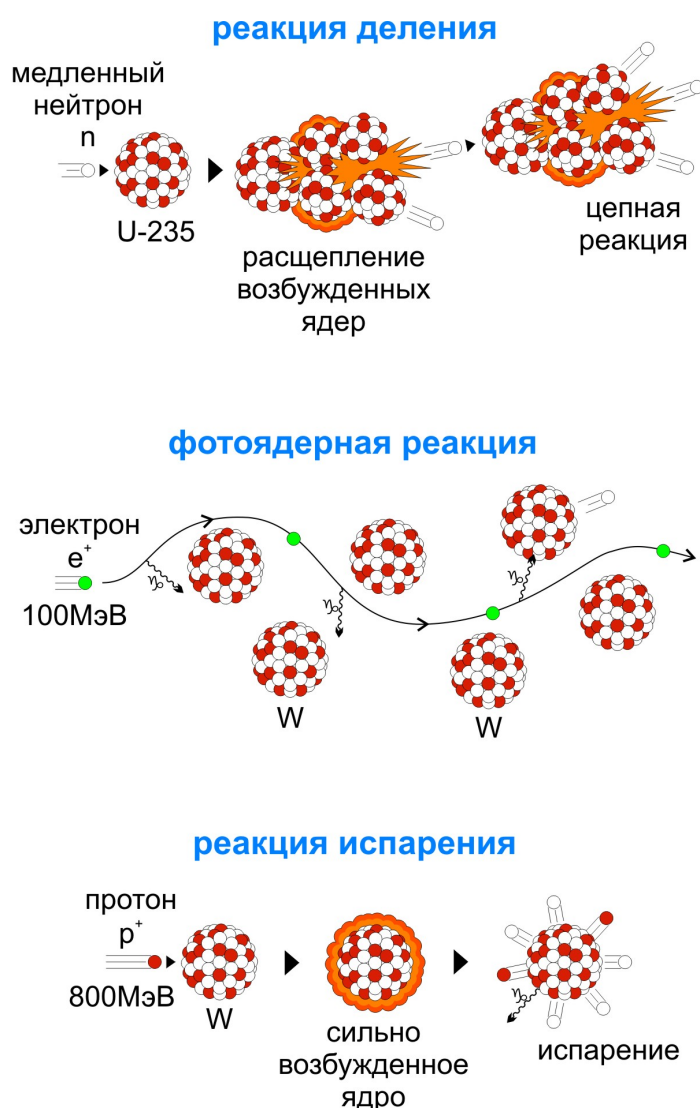
³ Под временем жизни нейтрона понимают период полураспада свободного нейтрона на протон, электрон и электронное антинейтрино. В составе ядра нейтрон не устойчив.

⁴ Франк А.И. Ультрахолодные нейтроны // Природа. 1981. № 1. С.30-41.

⁵ Serebrov A.P. Neutron β -decay today and its studies at PNPI, Gatchina // Neutron News. 1993. № 2, p.16-20.

биологических мембран, белков, химические реакции, старение материалов, элементный анализ, внутренние напряжения. Необходимо подчеркнуть, что большинство этих работ направлено на изучение не просто свойств новых материалов, хотя и это важно, а новых физических явлений, которыми физика конденсированных сред постоянно снабжает естествознание. Одним из последних примеров подобной решающей роли нейтронов может служить расшифровка с их помощью структуры высокотемпературных сверхпроводников.

В последнее время в указанных областях исследований все большее распространение получают источники синхротронного света, главные достоинства которых – высокая светосила и перестраиваемость по энергии. Однако это не означает, что они вытесняют нейтроны, эти два метода взаимно дополняют друг друга. Нейтроны обладают рядом свойств, которые, несомненно, выделяют их среди других частиц, используемых при изучении явлений в физике конденсированных – фотонов, электронов, мюонов, протонов.



Различные ядерные реакции, используемые для получения нейтронов в интенсивных источниках. Реакция деления инициируется в делящемся ядре, например, ^{235}U при захвате медленного нейтрона. В результате деления ядра, освобождается в среднем 2.5 нейтрона, которые в свою очередь инициируют другие деления. Так возникает цепная реакция.

Электроны с большой энергией (>30 МэВ), испытывая торможение в веществе, порождают жесткое рентгеновское излучение. Высокоэнергетические фотоны в свою очередь могут возбудить ядро, в результате чего оно испускает нейтрон (фотоядерная реакция). Выход γ -квантов тормозного излучения пропорционален энергии электронов и заряду ядра, поэтому мишень должна состоять из ядер с большим зарядом. Часто используют вольфрам (W).

Протон, как частица гораздо более тяжелая, чем электрон, имея соответствующую энергию, «прошивает» вещество (при $E=800$ МэВ пробег составляет десятки сантиметров) и оставляет за собой хвост частиц и возбужденных ядер. Расщепленные протоном ядра испускают, так называемые, каскадные и «испарительные» нейтроны. Последние, которых значительно больше ($>85\%$), обеспечивают освобождение энергии возбужденного ядра, подобно испарению частиц с поверхности жидкости.

Нейтроны в веществе взаимодействуют как с ядрами, так и с электронами (спиновое взаимодействие) атомов. Очень важно то, что эти взаимодействия относительно слабые: нейтроны не нарушают структуру и не изменяют химические свойства вещества, как это происходит, например, в фотоэмиссии, поэтому при вычислении сечения рассеяния достаточно ограничиться первым порядком теории возмущений. Слабое

взаимодействие обуславливает и большую глубину проникновения нейтронов в образец (в отличие от фотонов), что позволяет исследовать объемные структурные и динамические свойства в экспериментах по упругому и неупругому рассеянию. С помощью малоуглового рассеяния изучают структуры с большими характерными внутренними размерами, прошедшие нейтроны используют для изучения магнитных неоднородностей внутри образца. В то же время нейтронные эксперименты дают представление и о свойствах поверхностей, что существенно дополняет исследования с помощью рентгеновских лучей, особенно магнитных систем.

Важным преимуществом нейтрона при изучении конденсированных сред является присущее ему собственное магнитное состояние. Использование магнитного рассеяния нейтронов и особенно поляризованных пучков в настоящее время служит основным источником знаний о магнитных структурах⁶.

Амплитуда ядерного рассеяния определяется свойствами ядерных сил; она не спадает с увеличением угла рассеяния, как амплитуда рассеяния фотонов или электронов, что позволяет проводить измерения до больших значений углов и более точно определять положения ядер. Кроме того, амплитуда рассеяния для нейтронов не зависит от атомного номера таким регулярным образом, как для фотонов и электронов. Легкие элементы, например водород, имеют значительно большую амплитуду, что позволяет нейтронам эффективнее "высвечивать" их в структуре. Наконец, нейтронная амплитуда имеет изотопную зависимость, причем случается, что изотопы одного элемента имеют амплитуды разного знака (что невозможно для фотонов и электронов), а это дает уникальную возможность изотопного контрастирования в исследуемом образце.

Эффективность метода рассеяния нейтронов при изучении конденсированных сред и огромное количество возникающих новых задач привели к тому, что в среднем источники нейтронов сегодня используются примерно на 80% времени для работ по физике конденсированных сред, химии, материаловедению и биологии и на 20% – для работ в области физики ядра и фундаментальных взаимодействий⁷.

ИНТЕНСИВНЫЕ ИСТОЧНИКИ НЕЙТРОНОВ

Исторически первыми интенсивными источниками нейтронов были ядерные реакторы с непрерывным потоком – **стационарные реакторы** (табл.2), где в процессе самопроизвольного деления урана тепловая мощность, а следовательно, и поток нейтронов, поддерживаются постоянными во времени. Сейчас в мире работает около 50 исследовательских реакторов, на которых проводятся пучковые исследования⁸. Наибольшее число реакторов было создано в период с 1955 по 1960 г. Эти реакторы первого поколения разрабатывались для проведения облучений и радиационных исследований. После 1960 г. появились реакторы второго поколения, которые уже предназначались как для радиационных исследований, так и для исследований на нейтронных пучках. Первый стационарный реактор третьего поколения, т.е. реактор

⁶ Малеев С.В., Окорочков А.И. Поляризованные нейтроны и исследование свойств вещества // Природа. 1986. № 10. С.46-56.

⁷ Следует заметить, что источники нейтронов (ядерные реакторы и особенно ускорители) – довольно дорогие устройства. Поэтому при исследовании конденсированных сред их используют в тех случаях, когда особые свойства нейтрона дают возможность получить информацию недостижимую другими методами. Более того, перед тем, как выполнять нейтронный эксперимент, проводят аттестацию образца, т.е. измеряют его характеристики всеми доступными методами и прежде всего проводят структурный анализ на рентгеновских установках.

⁸ Современное состояние исследовательских реакторов в мире рассмотрено в обзоре: Aksenov V.L. Reactor neutron sources.// In: Large Facilities in Physics, ed. M.Jacob and H.Schopper. World Scientific. 1995. p.273-291, где приведены их основные параметры и дан анализ перспектив развития.

исключительно для пучковых исследований, был построен в 1965 г. в Брукхейвене (США), через 5 лет после ввода в действие в Дубне пульсирующего реактора, названного ИБР (импульсный быстрый реактор), который с самого начала должен был использоваться только для пучковых исследований. Наиболее мощный реактор третьего поколения с непрерывным потоком нейтронов работает в Европейском центре нейтронных исследований – Институте им. Лауэ-Ланжевена в Гренобле, Франция, (ИЛЛ)⁹.

Рассмотрим подробнее устройство обычного стационарного реактора, чтобы лучше понять особенности пульсирующих реакторов и других источников нейтронов.

Ядерное топливо, заключенное в тепловыделяющие элементы – твэлы, – размещается в так называемой активной зоне, в центре реактора. В качестве топлива в современных исследовательских реакторах используется обычно обогащенный уран в металлическом виде или в виде химических соединений. При обогащении природного урана, состоящего из нескольких изотопов, извлекают делящийся изотоп, обычно ^{235}U , которого в естественной смеси в 139 раз меньше, чем неделящегося ^{238}U . Чем выше обогащение урана этим изотопом, тем больше возможностей иметь высокопоточный реактор. Лучшие реакторы используют топливо с обогащением 92–93%.

В результате спонтанного деления ядра ^{235}U образуется в среднем 2.5 быстрых нейтрона с энергией 10^5 – 10^8 эВ. Часть из них может быть захвачена другими ядрами урана, и тогда возникает цепная реакция. Число делений, вызванное одним делением в предыдущем цикле, называется **коэффициентом размножения K** . Цепная реакция протекает только при $K > 1$. Устройства с $K < 1$ называют **подкритическими**, с $K = 1$ – **критическими**, с $K > 1$ – **надкритическими**. Стационарные реакторы всегда работают в критическом режиме с $K \geq 1$.

Захват нейтронов происходит наиболее легко, когда их энергия не превышает 10^6 эВ. Поэтому, чтобы увеличить эффективность использования топлива, активную зону окружают замедлителем и затем отражателем для удержания возможно большего числа нейтронов в системе. Замедлитель должен быть из вещества, обеспечивающего максимальную потерю энергии нейтрона при соударении, т.е. содержать наиболее легкие элементы. Наилучшими замедлителями являются вода (обычная и тяжелая) и графит. Отражатель делается из материала, близкого по составу к замедлителю, обычно это тяжелая вода, графит, бериллий.

Производящая нейтроны система, состоящая из активной зоны, замедлителя и отражателя, окружается бетонной конструкцией, служащей биологической защитой от излучений. В ней делают каналы для вывода нейтронов, обычно располагая их по касательной к зоне. Это нужно для того, чтобы избежать попадания в них γ -квантов и быстрых нейтронов, которые увеличивают фон при проведении экспериментов и создают дополнительные трудности в организации радиационной защиты.

⁹ Аналогичный реактор мощностью 100 МВт, реактор ПИК, сооружается в ПИЯФ РАН. Это современный источник нейтронов с потоком тепловых нейтронов $4 \cdot 10^{15}$ н/см²с, двумя холодными и двумя горячими замедлителями, экспериментальным (около реактора) и нейтронным залами с общим возможным числом спектрометров – до 50.

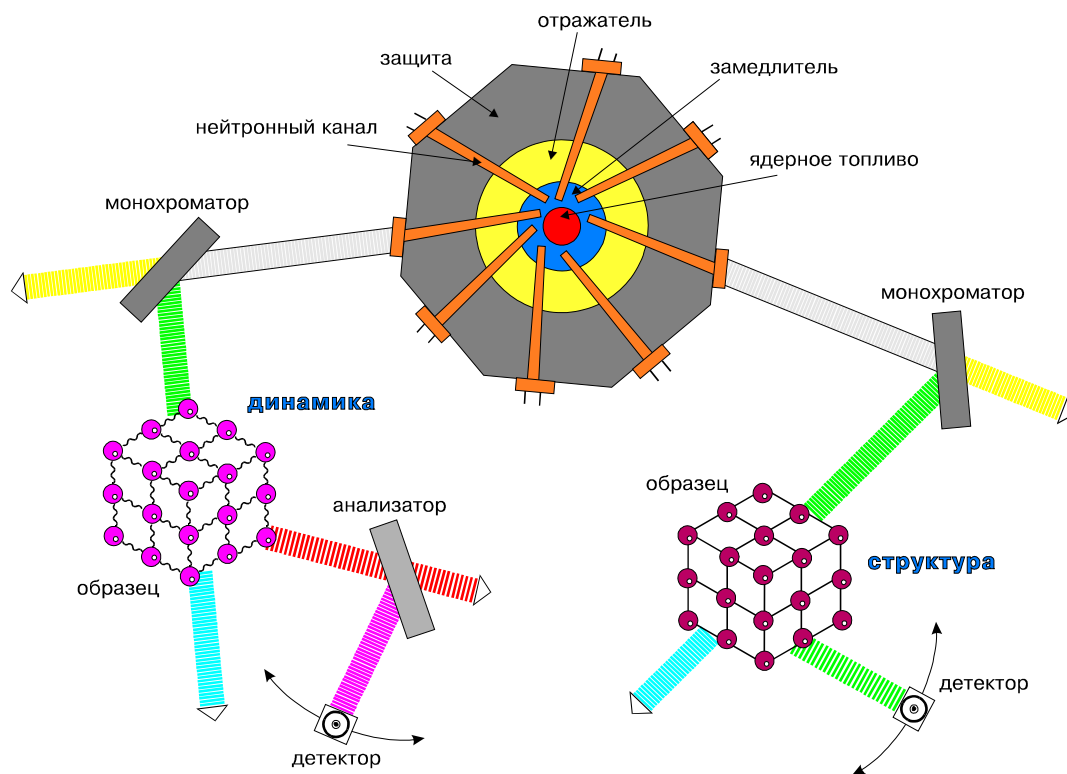


Схема ядерного реактора и установок для экспериментов по упругому и неупругому рассеянию. Устройство источников нейтронов с использованием ускорителей электронов или протонов в принципе такое же, только вместо активной зоны устанавливается мишень из тяжелого металла, а к мишени пристраивается вывод для частиц из ускорителя. Число нейтронов в таком источнике можно увеличить, если мишень поместить в делящийся материал с подкритической массой. Такое устройство называется бустером. Бустер по своим теплофизическим характеристикам близок к реакторам. Принципиальное отличие состоит в том, что цепная реакция деления в бустере идет только при «подсветке» от ускорителя.

Чтобы как можно больше нейтронов достигало образца, используют специальные нейтронотводы, из которых простейший – это вакуумированная труба, снижающая рассеяние нейтронов воздухом. На современных источниках нейтронов широко применяются специальные нейтронотводные системы, которые составлены из нейтронных зеркал – брусков стекла с покрытием, хорошо отражающим нейтроны. Здесь используется явление полного внутреннего отражения нейтронов с определенными значениями энергии, подобно тому, как это имеет место в световой волоконной оптике. Обычно нейтронотводы делают изогнутыми, с радиусом от 5 м до 5 км, тогда пучок дополнительно очищается от γ -квантов и быстрых нейтронов. Эти устройства играют большую роль в повышении светосилы приборов и получают все большее распространение.

Специальные нейтронотводы с покрытием из магнитных материалов используются для создания пучков поляризованных нейтронов, позволяющих получать информацию о магнитных материалах, недоступную другим методам.

Поток нейтронов, получаемых от реактора, существенным образом зависит от замедлителя. Обычно в исследовательских реакторах замедлителем служит вода, находящаяся при комнатной температуре, что дает максимум выхода нейтронов с тепловой энергией, т.е. такой, которая соответствует комнатной 300 К и равна ~ 25 мэВ (при этом длина волны $\lambda \approx 0.2$ нм). В разных экспериментах участвуют нейтроны различных энергий. Для расширения энергетического диапазона, а следовательно и круга изучаемых явлений, применяют специальные устройства, располагаемые вблизи активной зоны реактора и называемые холодными (обычно с температурой до 20 К) и

горячими (с температурой около 2000 К) замедлителями, которые увеличивают долю холодных или надтепловых нейтронов соответственно. В последнее время холодных замедлителей становится все больше из-за возросшего интереса к длиннопериодным структурам и медленным процессам в конденсированных средах. Практически все ведущие нейтронные центры сегодня имеют на реакторах холодные замедлители, в основном, из жидкого водорода. В Японии (Цукуба) и в России (Дубна) накоплен опыт работы с замедлителями из твердого метана.

Таблица 2. Интенсивные источники нейтронов для физических исследований

Тип источника, пример	Происхождение нейтронов	Число нейтронов в реакции	Средняя мощность, МВт	Поток тепловых нейтронов в импульсе, н/см ² ·с
Реактор HFR, Гренобль	Реакция деления	~2 на деление	57	2·10 ¹⁵ (постоянный поток)
Пульсирующий реактор ИБР-2, Дубна	Реакция деления + модуляция реактивности, отражатель	×100-200	2	10 ¹⁶
Ускоритель ORELA, Ок Ридж	Фотоядерная реакция (e, γ), (γ, n) в мишени из тяжелого металла (Pb, W, U)	~5·10 ⁻² на электрон с энергией 100 МэВ	0.05	1.3·10 ¹⁴
Бустер ИБР-30, Дубна	Фотоядерная реакция в размножающей мишени (U, Pu)	×20	0.01	5·10 ¹⁴
Ускоритель ISIS, Оксфорд	Испарительная реакция (p, n) в мишени из тяжелого металла (Pb, W, U)	~30 на протон с энергией 800 МэВ	0.2	1.3·10 ¹⁵
Бустер ИН-0.6, Троицк (проект)	Испарительная реакция в размножающей мишени (²³³ U)	×20	0.1	6.6·10 ¹⁶

Для исследования структуры вещества используют упругое рассеяние (дифракцию) нейтронов, для изучения микроскопической динамики – неупругое. Постановка дифракционного эксперимента в принципе проста. Пучок нейтронов из реактора направляется на монокристалл, в котором известны межплоскостные расстояния d . Согласно условию Вульфа-Брэгга ($\lambda = 2d\sin\theta$), отраженные от кристаллических плоскостей под озаданными углами θ нейтронные волны имеют определенные длины волн λ . Таким образом можно выделить из «белого» пучка нейтроны с фиксированной длиной волны. Затем этот монохроматизированный пучок направляется на исследуемый образец. Большинство нейтронов проходят через него без изменения энергии (т.е. рассеивается упруго), но выходит из него в заданных направлениях в результате дифракции. Рассеянный на образце пучок регистрируется детектором под разными углами, и таким образом определяются межплоскостные расстояния в образце. Экспериментом по такой схеме К.Шалл с соавторами в конце 40-х годов в Ок-Ридже (США) показал, как при помощи нейтронов может быть изучена структура вещества в конденсированном состоянии.

Часть нейтронов изменяет свою энергию при прохождении через образец, т.е. рассеивается неупруго. Схема спектрометра для неупругого рассеяния была предложена Б.Брокхаузом с сотрудниками в середине 50-х годов в Чолк Ривере (Канада). Как и нейтронный дифрактометр, он имеет кристалл-монохроматор, способный вращаться относительно вертикальной оси, которая перпендикулярна направлению движения нейтронов. И образец, и кристалл-анализатор тоже могут

вращаться относительно вертикальных осей. В отличие от дифрактометра, в спектрометре рассеянный пучок направляется сначала на кристалл-анализатор, а уже затем – на детектор. Такая схема позволяет измерять изменение энергии нейтрона при прохождении через образец.

Ядерные реакторы с постоянным потоком имеют ограничения по возможно допустимому потоку нейтронов, которые обусловлены технологическими причинами, связанными главным образом с отводом тепла. В этом смысле лучшую перспективу открывают импульсные источники нейтронов.

ИМПУЛЬСНЫЕ И ПУЛЬСИРУЮЩИЕ РЕАКТОРЫ

Первый импульсный реактор был создан в 1945 г. в Лос Аламосе в рамках Манхетенского проекта (создание атомной бомбы США). В этом реакторе активная зона состояла из основной стационарной части и дополнительной подвижной. Последняя подвешивалась с помощью электромагнита и при его выключении падала, скользя по направляющим вблизи от стационарной части. В дальнейшем были использованы различные схемы достижения всплеска делений за счет создания избыточной реактивности с переводом реактора в надкритическое состояние на короткое время. Самые мощные устройства, не считая атомных бомб, генерирующие до 10^{20} делений, представляют собой гомогенные уран-графитовые реакторы на тепловых нейтронах. Активная зона здесь – графитовая кладка с диспергированным в графите ураном. Импульс инициируется либо быстрым выводом блока стержней, поглощающих нейтроны, либо вводом подвижной части активной зоны.

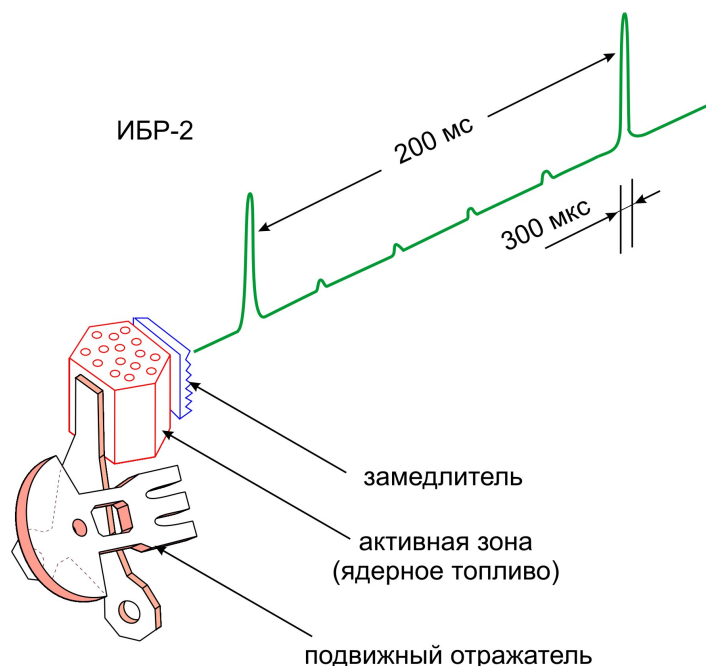
Все эти реакторы называются **импульсными реакторами аperiодического действия**, поскольку после каждой вспышки требуется большое время (сутки и более) для перевода всей системы в исходное состояние. Создавались они для изучения радиационных повреждений в материалах, электронных приборах, биологических объектах, поэтому главной целью было достижение большого пикового потока нейтронов. Систематические пучковые исследования на таких реакторах практически не проводят из-за очень низкого среднего потока. В качестве редкого примера использования в фундаментальной физике сверхмощного аperiодического импульсного реактора можно привести готовящийся эксперимент по измерению времени жизни нейтрона. Эксперимент будет осуществлен на Большом импульсном графитовом реакторе во Всероссийском научно-исследовательском институте экспериментальной физики (ВНИИЭФ, г.Арзамас-16). Установка для получения ультрахолодных нейтронов с рекордной плотностью до 10^4 н/см³ построена в ЛНФ в Дубне совместно с физиками ВНИИЭФ.

Другой тип – импульсный реактор периодического действия (**пульсирующий реактор**), он был создан в 1960 г. в Дубне. Идея этого реактора возникла в конце 1955 г. в Физико-энергетическом институте (ФЭИ, г.Обнинск, Калужской обл.) при обсуждении экспериментов на стационарном реакторе. Тогда в экспериментах по ядерной физике начали пользоваться времяпролетным методом, при котором измеряется время пролета нейтронов от источника до детектора. В этом методе фиксация момента вылета нейтронов производится с помощью прерывателя пучка – вращающегося диска с узкой прозрачной для нейтронов щелью. В схеме таких нейтронных экспериментов прерыватель занимает место первого монохроматора. В результате стационарный реактор превращается в импульсный источник, где импульсы нейтронов генерируются с частотой вращения прерывателя.

Д.И.Блохинцев предложил вместо комбинации стационарный реактор–прерыватель использовать модуляцию реактивности реактора вращением части активной зоны. Тогда сразу получается импульсный поток нейтронов, причем при значительно более экономном использовании топлива. В начале 1956 г. в ФЭИ началась разработка теории такого реактора. В марте 1956 г. в Дубне был образован

международный научный центр – ОИЯИ, директором которого представителями стран-участниц был избран Д.И.Блохинцев. Первый пульсирующий реактор – ИБР – начал сооружаться в 1957 г. в Дубне в ЛНФ ОИЯИ, руководимой лауреатом Нобелевской премии Франком, при активном участии специалистов ФЭИ. Блохинцев до своей смерти (1979) оставался научным руководителем и непосредственным участником всех работ по пульсирующим реакторам.

Физический пуск реактора ИБР был произведен 23 июня 1960 г. Активная зона, содержащая 20 кг металлического плутония, была разделена на две части с $K \leq 1$, между которыми вращались два стальных диска разного диаметра с урановыми вкладышами. Импульсы мощности развивались, когда основной и вспомогательный вкладыши совмещались с неподвижной активной зоной и переводили всю систему в надкритическое состояние с $K \geq 1$. Вспомогательный диск служил для изменения частоты повторения импульсов, которая могла принимать значения от 5 до 50 Гц. Средняя мощность – энергия, выделенная за период и отнесенная к длительности периода, – сначала составляла всего 1 кВт, затем была доведена до 6 кВт. Для отвода выделяемого тепла достаточно было воздушного охлаждения. В то же время мгновенная мощность в максимуме, которая и определяет выход нейтронов, при частоте 5 Гц достигала сначала 5, а затем 25 МВт, т.е. мощности обычных стационарных реакторов.



Принципиальная схема ИБР-2. В пульсирующем реакторе мощность (ход цепной реакции) и, следовательно, поток нейтронов генерируется с помощью периодической механической модуляции реактивности активной зоны, которая сама по себе находится в подкритическом состоянии. В реакторе ИБР-2 это делается с помощью вращающегося отражателя: пять раз в секунду обе части отражателя совмещаются с зоной и происходит всплеск мощности.

По своим теплофизическим и кинетическим свойствам пульсирующий реактор мало отличается от стационарного. Однако благодаря низкой средней мощности он проще и дешевле в эксплуатации из-за меньшей активации оборудования и медленного выгорания топлива.

ИБР успешно работал до 1968 г., затем он был заменен на новый реактор ИБР-30. ИБР-30 принципиально повторял ИБР, но в нем содержался ряд усовершенствований, в частности позволяющих обеспечить съем тепловой мощности до 30 кВт. ИБР-30 работал с 1969 по 1986 г., после чего его зона стала использоваться в качестве размножителя мишени из вольфрама, на которую направлялся пучок электронов от линейного ускорителя. В мишени протекают фотоядерные реакции под действием высокоэнергетичных γ -квантов – тормозного излучения ускоренных электронов (их энергия должна быть не ниже 3- МэВ). При этом мишень находится в окружении делящегося материала зоны – подкритической сборки с $K < 1$.

Подкритическая сборка за счет реакции деления, инициированной фотонейтронами, может увеличить выход нейтронов из источника в десятки раз. Система ускоритель – размножающая мишень называется **бустером**, т.е. можно сказать, что установка ИБР-30 в настоящее время работает как бустер.

Параллельно со строительством реактора в ЛНФ под руководством Франка и Шапиро готовилась физическая программа работы на нем. Данные первых экспериментов были опубликованы в 1961 г. одновременно с публикацией результатов, полученных на электронном ускорителе «General Atomic» (США)¹⁰.

Успешная работа реактора ИБР и его модификаций стимулировала дальнейшее развитие в этом направлении. В середине 60-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 Евроатома 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 серии 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 активному участию Министерства среднего машиностроения СССР¹¹.

Официально проектирование ИБР-2 началось в 1966 г., а строительство – в 1969-м. Первая критическая сборка произведена в ФЭИ в 1968 г., с 1970 по 1975 г. исследовался макет подвижного отражателя на стенде в Дубне. Физический пуск реактора (без теплоносителя) произошел через 8 лет после начала строительства: в конце 1977 – 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. Официально реактор был принят в эксплуатацию 10 февраля 1984 г., выполнение программы физических экспериментов начато 9 апреля 1984 г., после выхода на мощность 2 МВт при частоте импульсов 5 Гц. Время запуска (освоения) реактора было близко ко времени, затраченному на его фактическое создание, что, по-видимому, оправдано новизной и необычностью выполняемой задачи.

Активная зона реактора объемом 22 л содержит 90 кг двуокиси плутония. Модуляция реактивности осуществляется стальным подвижным отражателем, состоящим из двух вращающихся с разными скоростями (1500 и 300 об/мин) частей. Когда обе части отражателя проходят зону, генерируется импульс мощности (1500 МВт). При регулярном режиме работы реактора – 2500 часов в год на эксперимент – срок работы зоны без замены топлива составляет не менее 20 лет, срок эксплуатации подвижного отражателя – 5–7 лет. С 27 марта 1995 г. ИБР-2 начал работать с новым (третьим по счету) подвижным отражателем, ресурс которого определен в 7 лет; в 2002 г. вместе с подвижным отражателем будет заменена и активная зона.

¹⁰ Франк И.М. Развитие и применение в научных исследованиях импульсного реактора ИБР // ЭЧАЯ. 1972 . Т.2. Вып.4. С.806-860.

¹¹ Кроме ОИЯИ и ФЭИ в строительстве реактора ИБР-2 принимал участие целый ряд организаций Министерства среднего машиностроения СССР (теперь Министерство РФ по атомной энергии). 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 Министерства. Можно утверждать, что создание пульсирующих реакторов – одно из ярких воплощений высочайшего потенциала ядерной науки и техники страны.



Активная зона ИБР-2. Это бак емкостью 22 л, в который помещено топливо – двуокись плутония. Бак загружается в корпус реактора.

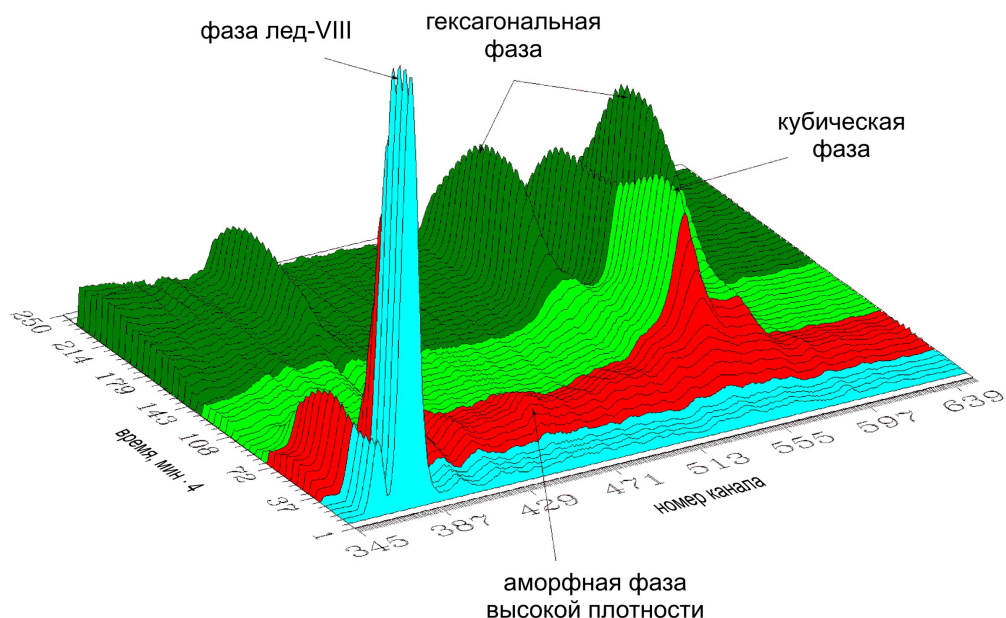
Таким образом, пульсирующий ИБР-2 – экономичная, относительно дешевая и, как показал опыт более чем 10-летней работы, простая и безопасная в эксплуатации машина. Ее создание обошлось примерно в 20 млн. руб. (в ценах 1984 г.). Сегодня эксплуатация реактора, его дальнейшее развитие и совершенствование стоят меньше 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 дает в импульсе рекордный для исследовательских источников нейтронов поток, равный 10^{16} н/см²·сек.

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ПУЛЬСИРУЮЩЕГО РЕАКТОРА

Как показал опыт работы пульсирующих реакторов в Дубне, они эффективно могут применяться для экспериментов по рассеянию нейтронов в конденсированных средах. При функционировании импульсных источников нейтронов измеряется время пролета нейтрона t на расстоянии от источника до образца L_0 и от образца до детектора L_1 , при этом используется соотношение $\lambda = \frac{h}{mv} = \frac{0.4}{v} = \frac{0.4t}{L_0 + L_1}$.

Применение метода времени пролета открыло совершенно новые возможности для структурных исследований. Впервые идею дифрактометра по времени пролета

реализовал Б.Бура в 1963 г. на стационарном среднепоточном реакторе в Варшаве, в котором имелся прерыватель. В полной мере метод проявил себя на импульсном источнике; первый такой дифрактометр заработал в Дубне на ИБР в 1964 г. Сегодня дифрактометры по времени пролета являются стандартными приборами на всех импульсных источниках нейтронов.



Нейтронная дифрактограмма тяжелого льда в температурном интервале от 94 до 290 К. Температура 94 К соответствует времени начала отсчета. Использование нейтронографии в реальном времени позволило впервые обнаружить образование аморфного льда высокой плотности (hda) из фазы VIII. Далее фаза hda переходит в фазу аморфного льда низкой плотности и затем в кубический (I_c) и гексагональный (I_h) лед.

В принципе постановка эксперимента на таком источнике проще, чем на стационарном. Отличие заключается в отсутствии монохроматоров. В этом, кстати, состоит еще одно достоинство импульсных источников (кроме низкой по сравнению с реакторами средней мощности), поскольку они дают возможность использовать все нейтроны, в то время как монохроматор вырезает из полного спектра только нейтроны с определенной длиной волны (энергией).

Мощный поток нейтронов значительно расширяет круг стандартных нейтронографических задач: например, снимать нейтронограммы за короткое время наблюдения¹². Дифрактометрия в реальном времени оказалась весьма эффективной при изучении фазовых переходов, химических реакций и проблем формирования структуры в процессе синтеза соединений. Высокая проникающая способность нейтронов позволяет проводить эксперименты с использованием различных дополнительных устройств, таких как криостаты, печи, установки внешнего магнитного и электрического полей, а также давления¹³.

¹² Балагуров А.М. и др. Нейтронографическое исследование фазовых превращений метастабильного льда высокого давления VIII // Письма в ЖЭТФ. 1991. Т.53. Вып.1. С.30-33.

¹³ В конце 1993 г. на ИБР-2 начал работать новый дифрактометр ДН-12, позволяющий проводить эксперименты с давлением до 20 ГПа. В перспективе оно может быть доведено до 100 ГПа. Идея дифрактометра ДН-12 была предложена физиками Российского научного центра «Курчатовский институт» и опробована ими на реакторе средней мощности ИР-8 в Москве.

Таблица 3. Направления использования пульсирующего реактора ИБР-2

Виды рассеяния, направления исследований	Разрешение спектрометров	Средний поток нейтронов на образце
Упругое Прецизионный анализ структуры поли- и монокристаллов; изменения структуры под действием температуры, внешнего давления, электрических и магнитных полей	$\Delta d/d$ до $5 \cdot 10^{-4}$: дифрактометры ФДВР, ДН-2, ДН-12, СНИМ-2, НСВР	до $5 \cdot 10^7$ н/см ² /с, диапазон длин волн нейтронов λ : 0.8-20 Å
Малоугловое Изучение надатомных структур масштаба от 10 до 300 Å, биологических объектов, полимеров	$\Delta Q/Q$ до $4 \cdot 10^{-2}$: спектрометр ЮМО	до $4 \cdot 10^7$ н/см ² /с, λ : 0.7-17 Å
Отражение от поверхности Изучение поверхностей немагнитных и магнитных пленок, границ раздела фаз	$\Delta\theta/\theta \leq 3 \cdot 10^{-2}$: рефлектометры СПН-1, РЕФЛЕКС-1, РЕФЛЕКС-2 степень поляризации пучка до 96%	до 10^6 н/см ² /с, λ : 0.7-10 Å
Неупругое Исследование динамики кристаллов, полиморфных материалов, классических и квантовых жидкостей	$\Delta E/E$ до 10^{-2} : спектрометры НЕРА, КДСОГ-М, ДИН-2ПИ, ДИН-2ПП	до $7 \cdot 10^6$ н/см ² /с, интервал передач энергии: 0-300 мэВ

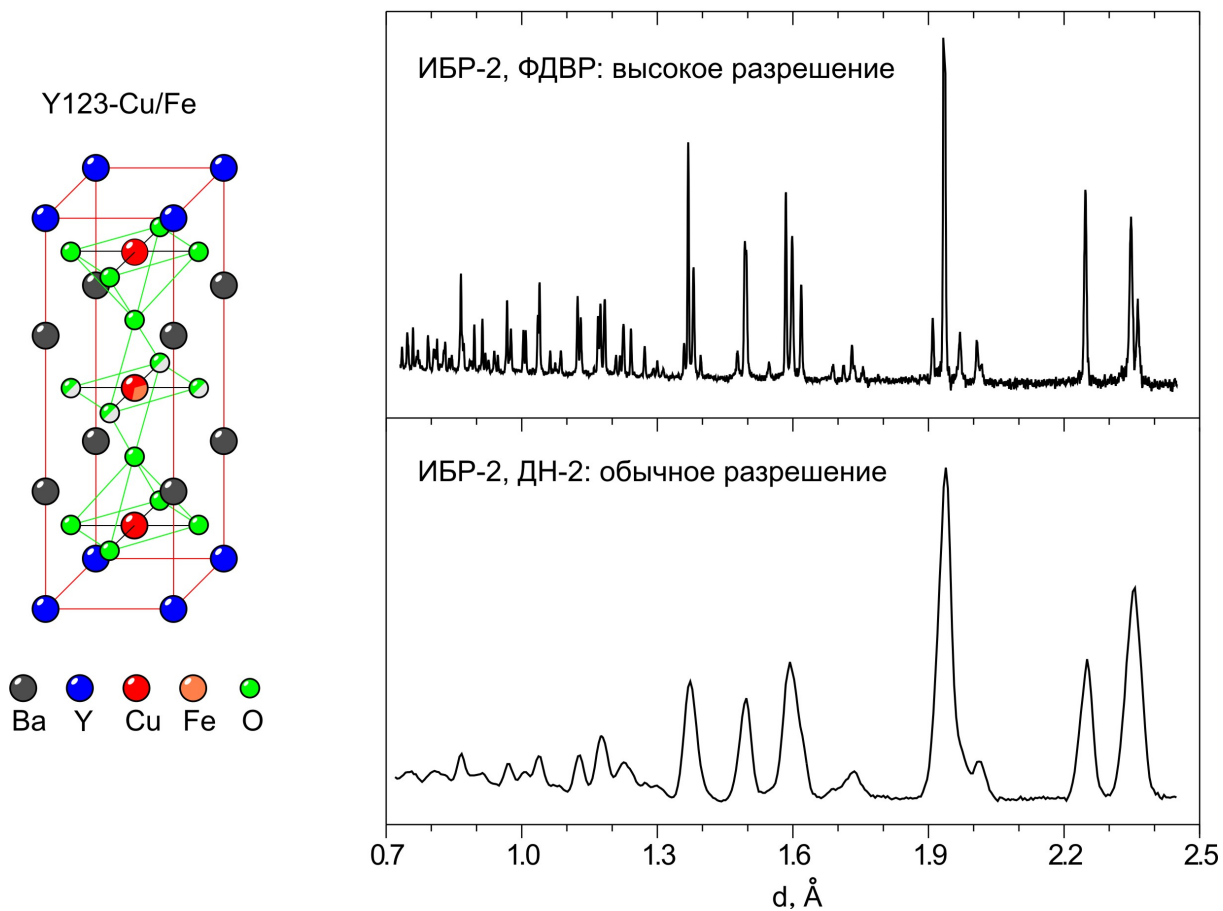
Разрешение приборов зависит от точности измерения переданных энергии и импульса, которая, в свою очередь, обусловлена видом эксперимента. Разрешение в экспериментах по дифракции и неупругому рассеянию определяется длительностью нейтронного импульса; для малоуглового рассеяния и рефлектометрии длительность нейтронного импульса не является определяющей.

Чтобы улучшить разрешение в случае дифракции и неупругого рассеяния, можно либо увеличить расстояние L_0 от источника до образца, либо уменьшить длительность нейтронного импульса с помощью дополнительного прерывателя. В стандартном подходе оба эти способа уменьшают поток нейтронов. Недавно на ИБР-2 был использован новый для импульсных источников прием: фурье-прерыватель – диск с 1024 прозрачными для нейтронов щелями. Новый прибор – фурье-дифрактометр высокого разрешения (ФДВР) – имеющий, по существу, предельное для дифрактометров пространственное разрешение $\Delta d/d = 5 \cdot 10^{-4}$ является одним из четырех в мире приборов такого класса. Помимо ФДВР, близкие параметры имеют дифрактометры HRPD на импульсном источнике нейтронов с использованием протонного ускорителя ISIS (Диткот, Великобритания) и дифрактометры D2B и PHRD на стационарных реакторах HFR (Гренобль, Франция) и HFBR (Брукхейвен, США)¹⁴.

Значение высокого разрешения было проиллюстрировано, например, при изучении структуры высокотемпературного сверхпроводника $YBa_2Cu_3O_{6+y}$ с замещением меди на железо¹⁵.

¹⁴ Дифрактометр ФДВР создавался при сотрудничестве групп физиков ЛНФ ОИЯИ, ПИЯФ РАН и Центра технических исследований VTT (Хельсинки, Финляндия) с учетом опыта работы первого фурье-дифрактометра мини-СФИНКС на реакторе ВВР-М в Гатчине. Подробнее см. В.Л.Аксенов и др. Нейтронный фурье-дифрактометр на реакторе ИБР-2 // Сообщ. ОИЯИ, РЗ-91-172, Дубна, 1991.

¹⁵ Balagurov A.M. et al. Atomic and magnetic structure of $YBa_2(Cu_{1-x}^{57}Fe_x)_3O_{6+y}$ by neutron diffraction on isotope enriched samples // Physica C. 1994. V.228. P.299-308.



Структура и дифракционные спектры высокотемпературного сверхпроводника $YBa_2(Cu_{1-x}Fe_x)_3O_{6+y}$. В нижней части показан результат измерений с обычным ($\sim 1\%$), в верхней – с высоким ($\sim 0.1\%$). Во втором случае можно получить более полную информацию об атомной и магнитной структуре образца. В частности, удастся определить расположение примесного атома железа в структуре.

Краткий перечень возможного использования ИБР-2 приведен в табл.3. Многие из отмеченных там спектрометров созданы в ОИЯИ совместно с институтами России и других стран-участниц ОИЯИ.



Часть экспериментального зала ИБР-2. Из реактора выходит 14 каналов, на каждом из которых установлено один или два спектрометра. Нейтроноводы и приборы закрыты бетонной защитной оболочкой. Приборы управляются с помощью персональных компьютеров, данные измерений по компьютерной связи передаются для обработки в компьютеры, расположенные на рабочих местах физиков в лабораторном корпусе недалеко от реактора.

Фото Ю.А.Туманова

Можно смело сказать, что за время работы реактора с 1984 года вокруг него сформировался целый комплекс спектрометров, позволяющий проводить на современном уровне исследования с рассеянием нейтронов по всем актуальным проблемам физики конденсированных сред, химии, материаловедения, биологии¹⁶.

* * *

Многолетний опыт использования пульсирующих ядерных реакторов в Дубне показывает, что они представляют собой эффективные и экономичные устройства, дающие уникальные возможности для исследований с помощью нейтронов во многих областях современной науки. Вместе с тем эти реакторы играют важную роль в формировании идей и технических решений при создании новых источников нейтронов во всем мире. Все это служит объективным основанием для дальнейшего совершенствования пульсирующего ядерного реактора ИБР-2.

¹⁶ Более подробную информацию о параметрах и возможностях спектрометров см.: Aksenov V.L. Update on the pulsed reactor IBR-2 and its instruments at Dubna // Physica B. 1991. V.174. P.438-442; Belushkin A.V. IBR-2 – the fast pulsed reactor at Dubna // Neutron News. 1991. M.2. №2. P.14-18; а также буклеты для пользователей и годовые отчеты ЛНФ.