

УДК 539.1+538.9

НЕЙТРОННАЯ ФИЗИКА НА ПОРОГЕ XXI ВЕКА

В.Л.Аксенов

Объединенный институт ядерных исследований, Дубна

| | |
|---|------|
| 1. ВВЕДЕНИЕ | 1303 |
| 2. ЧАСТИЦЫ И ФУНДАМЕНТАЛЬНЫЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ | 1305 |
| 3. ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ НЕЙТРОНОВ С ЯДРАМИ | 1308 |
| 4. ФИЗИКА КОНДЕНСИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ | 1309 |
| 5. МОЛЕКУЛЯРНЫЕ СОЕДИНЕНИЯ | 1311 |
| 6. ХИМИЯ | 1314 |
| 7. БИОЛОГИЯ | 1316 |
| 8. МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ | 1320 |
| 9. ИНЖЕНЕРНЫЙ АНАЛИЗ | 1323 |
| 10. НАУКИ О ЗЕМЛЕ | 1327 |
| 11. СОВРЕМЕННЫЕ ИСТОЧНИКИ НЕЙТРОНОВ | 1331 |
| 11.1. Источники с непрерывным потоком. | 1332 |
| 11.2. Импульсные источники. | 1335 |
| 12. ЗАКЛЮЧЕНИЕ | 1339 |
| СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ | 1340 |

НЕЙТРОННАЯ ФИЗИКА НА ПОРОГЕ XXI ВЕКА

В.Л.Аксенов

Объединенный институт ядерных исследований, Дубна

Предметом современной нейтронной физики является исследование с помощью нейтронов в широком диапазоне энергий фундаментальных взаимодействий и симметрий, высоковозбужденных состояний атомных ядер, кристаллических и магнитных структур, динамических возбуждений в твердых телах и жидкостях. В обзоре проведен анализ состояния и перспектив решения наиболее актуальных и принципиальных проблем нейтронной физики. Основной вывод: нейтронная физика дает много информации для физики частиц, атомного ядра, конденсированного состояния вещества, химии, биологии, материаловедения, наук о Земле, однако в следующем столетии необходимо создать новые высокопоточные источники нейтронов. После 2010 года в мире число ядерных реакторов, используемых для физических исследований, уменьшится до 10–15. Дан анализ тенденций в развитии источников нейтронов. Рассмотрены возможности наиболее развитых нейтронных центров в мире. Обсуждаются наиболее перспективные проекты новых источников нейтронов.

The objectives of present-day neutron physics are neutron-aided investigations of fundamental interactions and symmetries, high excited states of nuclei, crystalline and magnetic structures, dynamic excitations in solids and liquids over a wide range of energies. The state-of-art and perspectives of the solution of most topical and principal problems of neutron physics are analyzed. The main conclusion is that neutron physics provides rich information for nuclear particle physics, physics of nucleus, condensed matter physics, chemistry, biology, materials science, and earth sciences. In the next century, however, new higher flux neutron sources must be created. By the year 2010 the number of nuclear reactors used for physical research will reduce to 10–15 reactors over the world. Trends in the development of neutron sources are analyzed. The possibilities of leading neutron research centers in the world are considered and most promising projects of neutron sources are discussed.

1. ВВЕДЕНИЕ

Нейтронная физика возникла как новый раздел ядерной физики сразу же после открытия нейтрона в 1932 г. (см., например, обзор в специальном выпуске журнала «Успехи физических наук» [1]). На первом этапе нейтронная физика развивалась в двух направлениях: как физика элементарных частиц по изучению свойств самого нейтрона и как физика атомного ядра. Следующий этап был связан с открытием радиоактивности, вызываемой нейтронами, и открытием деления ядер. Этот этап завершился созданием ядерных реакторов и овладением ядерной энергией. Нейтронная физика стала научной основой ядерной энергетики.

Первый ядерный реактор был построен под руководством Э.Ферми в Чикаго в 1942 г. Первый реактор в Европе и Азии построен в Москве в

1946 г. под руководством И.В.Курчатова. Ядерные реакторы благодаря активности МАГАТЭ 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 показателем экономического развития.

Помимо задач реакторной физики и техники, радиационных исследований, производства изотопов, ядерные реакторы с самого начала использовались для физических исследований при помощи выведенных пучков нейтронов. Эти исследования оказались настолько информативными и существенными, что с середины 60-х годов начали создавать источники нейтронов, уже специально ориентированные на пучковые эксперименты. Первый специализированный для пучковых физических исследований ядерный реактор был построен в Дубне в 1960 г. Это был первый в мире пульсирующий реактор ИБР. Позже, в 1965 г., в Брукхейвене (США) был построен специализированный пучковый реактор непрерывного действия. С этого времени начинается современный этап развития нейтронной физики.

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. В настоящее время около 80 % пучкового времени используется для исследований в этой области. Пионеры рассеяния нейтронов Бертрам Брокхауз и Клиффорд Шалл, выполнившие первые эксперименты в конце 40-х годов в США и Канаде, в 1994 г. были удостоены Нобелевской премии по физике.

За прошедшие 50 лет интенсивность источников нейтронов возросла примерно в 100 раз. Надо сказать, однако, что это мало по сравнению с ростом интенсивности источников других излучений, например, фотонов в лазерах или рентгеновских лучей на источниках синхротронного излучения. Заметим, что за прошедшее время значительно повысилась и эффективность использования источников нейтронов, тоже примерно в 100 раз, за счет создания холодных и горячих замедлителей, развития оптических элементов (монокроматоров, нейтронных волноводов, анализаторов), усовершенствования детекторных систем и систем сбора информации. Так что прогресс в использовании нейтронов для исследований вещества не вызывает сомнений. Вместе с тем возможности таких исследований все-таки ограничены интенсивностями существующих источников нейтронов. Задача создания высокопоточных источников нейтронов является самой актуальной для нейтронного сообщества.

В этой связи в последние годы был проведен целый ряд обсуждений перспектив развития нейтронных источников и исследований с помощью нейтронов [2–5]. В данном обзоре мы, основываясь на итогах этих обсуждений, рассмотрим общие черты исследований вещества с помощью выведенных пучков нейтронов на следующем этапе развития нейтронной физики. В качестве

примеров использованы некоторые результаты, полученные в основном в Лаборатории нейтронной физики им. И.М.Франка ОИЯИ. Обсуждаются состояние и перспективы развития источников нейтронов для исследований на выведенных пучках.

2. ЧАСТИЦЫ И ФУНДАМЕНТАЛЬНЫЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ

Нейтрон реагирует на все известные силы, кроме электростатических, которые в реакциях с другими частицами в силу их большого дальнего действия часто маскируют тонкие эффекты. Поэтому нейтрон оказывается полезным в целом ряде направлений исследований фундаментальных взаимодействий и симметрий [4]. В табл. 1 перечислены некоторые задачи нейтронной физики, представляющие интерес для физики частиц, и их современный статус, обозначенный цифрами в скобках, которые означают, что эксперимент

- (1) — завершен,
- (2) — реализуем на существующих источниках,
- (3) — может быть продолжен на существующих источниках, но желательно иметь более интенсивный,
- (4) — завершен и может быть продолжен только на источниках следующего поколения,
- (5) — реализуем только на более интенсивных источниках.

Случаи (2) и (3) представляют программу исследований на ближайшие 10 лет, (4), (5) — задачи для последующего времени.

Многие из тем в табл. 1 возникли не так давно — в восьмидесятые годы. Некоторые темы изучаются давно и их можно комментировать. Например, дальнейшее уточнение заряда нейтрона на существующих источниках невозможно (современная оценка: $< 10^{-21}$ е). В то же время это очень важная величина. Стандартная модель элементарных частиц не содержит требования квантования заряда, т.е. не требует нулевого заряда у нейтрона, а согласно теориям великого объединения он должен равняться нулю. Совсем недавно, в 1998 г., появились сообщения об обнаружении массы нейтрино. Если дираковская масса нейтрино не равна нулю, то должно нарушаться зарядовое квантование, и, следовательно, атом водорода должен быть точно нейтральным, а нейтрон нет. Так что прямые измерения заряда нейтрона могут служить независимым тестом теории.

Электрический дипольный момент (ЭДМ) изучается в течение 50 лет. Установлена верхняя граница для его значения: 10^{-25} е·см. Ненулевое значение ЭДМ свидетельствовало бы о нарушении симметрии обращения времени. Уже несколько теорий возможных источников этого нарушения были закрыты в процессе измерения ЭДМ. В настоящее время на очереди, на-

Таблица 1. Свойства нейтрона и его взаимодействий

| Наблюдаемая величина | Статус | Проблема |
|---|--------|---|
| Масса: m_n/m_p | (4) | Модельно-независимое значение константы |
| \hbar/m_n | (4) | Эл.-магн. взаимодей. α |
| $m_p \approx 938,27 \text{ МэВ} = 1836,1 m_e$ | | |
| $m_n = 938,27 \text{ МэВ} = 1838,7 m_e$ | | |
| Заряд: | | Квантование заряда |
| $Q_n = (-0,4 \pm 1,1) \cdot 10^{-21} Q_e $ | (4) | Теории великого объединения (ТВО) |
| Момент: | | |
| магнитный монополюный $M_n = 0$ | (4) | ТВО |
| магнитный дипольный | (1) | Кварковые модели |
| $\mu_n = -1,9130428(5) \mu_{\text{нук}}$ | | |
| $\mu_{\text{нук}} = e\hbar/2m_p c$ | | |
| *электрический дипольный | (3) | T -инвариантность, ТВО |
| $d_n = (2,6 \pm 4,2 \pm 1,6) \cdot 10^{-26} \text{ е-см}$ | | Барион-антибарионная асимметрия Вселенной |
| Поляризуемость: | | |
| электрическая | (4) | Квантовая |
| магнитная | (5) | хромодинамика |
| Время жизни: | (3) | Слабое кварк-лептонное взаимодей.: космология Большого Взрыва, астрофизика и физика Солнца, кварковые модели, проверка стандартной модели |
| $\tau_n = (888,4 \pm 2,9) \text{ с}$ | | |
| Длины рассеяния: | | |
| нейтрон-электронного | (4) | Распределение заряда нейтрона |
| *нейтрон-нейтронного | (5) | Изоспиновая инвариантность |
| Пространственная четность: | | |
| Вращение спина в немагнитной среде | (3) | |
| Поляризующее действие нейтрона | (3) | Кварк-кварковое электрослабое взаимодействие |
| n - p γ -асимметрия | (4) | |
| n - p γ -круговая поляризация | (4) | |
| Асимметрия в ядерных делениях | (3) | Мезоскопика |
| *Нарушение T -инвариантности в нейтронной оптике | (5) | ТВО, барионная асимметрия |

Знаком (*) обозначены задачи, которым придается принципиальное значение.

пример, теории великого объединения с левой(правой) симметрией. Особый интерес представляет проверка гипотезы А.Д.Сахарова о преобладании вещества над антивеществом во Вселенной, возникшем после Большого Взрыва (проблема барионной асимметрии в космологии). Эти модели дают оценку

для ЭДМ 10^{-27} е-см. Так что для этого случая эксперимент по измерению ЭДМ нейтрона будет носить характер «да-нет».

Еще один пример — распад нейтрона. За последние 10 лет точность экспериментов увеличилась с 7 до 0,3%. Измерения времени жизни нейтрона и коэффициентов корреляций при β -распаде имеют три главных применения. Первое — проверка предсказаний кварковой модели о силе эффективной слабой кварк-лептонной связи. Здесь достаточна точность порядка 1%. Второе применение — слабые сечения рассеяния, которые определяют, например, изобилие изначальных частиц, температуру Солнца, потоки солнечных нейтрино, рождение нейтрино, w^\pm , Z^0 и другие слабые события в экспериментах физики частиц. В этих исследованиях также достаточна точность нейтронных данных на уровне 1%. Наконец, по-видимому, наиболее важное применение изучения распада нейтрона состоит в проверке стандартной модели (СМ) в физике частиц. На больших ускорителях СМ интенсивно исследуется в секторе второй и третьей генерации частиц. Распад нейтрона связан со всеми четырьмя частицами первого поколения (кварки «up» и «down», электрон и антинейтрино). В СМ нужно только два параметра для описания распада нейтрона. Поскольку параметров в β -распаде много, то задача переопределена. Поэтому возможны разные тесты СМ. Эти тесты более строгие, чем аналогичные при высоких энергиях на ускорителях. В частности, это касается проверки существования правых токов, унитарности смешивания кварков и симметрии ароматов. Эксперименты должны продолжаться с большей точностью.

Надо отметить, что довольно мало параметров β -распада измерено с нужной точностью, поэтому можно ожидать, что эти эксперименты продолжатся еще не один десяток лет.

Весьма полезными для изучения свойств нейтрона оказались ультрахолодные нейтроны (УХН). Открытые экспериментально в 1968 г. в Дубне [6], они позволили провести наиболее точные измерения времени жизни нейтрона и получить значение, приведенное в табл. 1. Эти измерения были проведены совместно группой сотрудников ЛНФ ОИЯИ и ПИЯФ РАН на реакторе ВВР-М ПИЯФ РАН (Гатчина) с помощью оригинальной установки КОВШ, предложенной и разработанной в ЛНФ им. И.М.Франка [7]. В настоящее время эксперименты по изучению свойств УХН продолжают на реакторе Европейского исследовательского нейтронного центра — Института им. Лауэ–Ланжевена (см., например, [8,9]).

Недавно сотрудниками ЛНФ им. И.М.Франка был предложен [10] новый способ генерации УХН на движущихся конверторах в сочетании с мощным импульсным реактором БИГР Всероссийского научно-исследовательского института экспериментальной физики (Саров). Ожидаемая плотность УХН (до 10^5 см $^{-3}$) позволит не только повысить точность измерений, но и провести новые эксперименты, пока недоступные на существующих источниках. Мак-

симальная плотность УХН на реакторе ИЛЛ в настоящее время не превышает 10^2 см^{-3} . Первые пробные эксперименты на реакторе БИГР показали [11], что метод работает, и после оптимизации установки могут быть достигнуты рекордные плотности УХН.

3. ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ НЕЙТРОНОВ С ЯДРАМИ

Ядерная физика низких энергий в основном имеет дело с объектами на микроскопическом уровне, т.е. с квантовыми системами с конечным числом взаимодействующих частиц при низких температурах. С теоретической точки зрения такие системы представляют собой сложную проблему. Однако в ядерных спектрах содержится большая информация, поэтому многие современные концепции типа гигантских резонансов или квантового хаоса появились именно в ядерной физике.

В 80-е годы произошла в некотором смысле неожиданная революция: многие необычайно сложные ядерные спектры теперь неплохо поддаются описанию с помощью простых алгебраических формул типа Балмера. Эти формулы появились из бозонных и бозон-фермионных суперсимметричных формулировок динамической проблемы ядра. Многие успешные эксперименты по проверке теории были выполнены на ядерных реакторах, поскольку гамма-спектры после захвата нейтронов более информативны, чем соответствующие спектры из других ядерных реакций. Так что исследования в этой области имеют принципиальный характер и будут продолжены с улучшением детектирующей аппаратуры.

Другой интересной областью являются радиоактивные ядра, изучение которых дает простор для моделей с большим разнообразием комбинаций нейтронных и протонных чисел N и Z . Эти короткоживущие ядра являются действительно реальными ядрами, в которых проблема стабильности ядерного взаимодействия решается за предельно короткое время, сравнимое с временем распада. Интенсивные источники нейтронов дают уникальную возможность производства высокоинтенсивных, богатых нейтронами продуктов деления.

Взаимодействие нейтронов со сложными ядрами позволяет изучать эффекты проявления фундаментальных симметрий в нейтронных резонансах (см. табл. 1). В 1964 г. [12] были начаты экспериментальные исследования нарушения пространственной четности при радиационном захвате медленных поляризованных нейтронов неполяризованными ядрами ^{113}Cd . В дальнейшем [13] были обнаружены усиленные P -нечетные эффекты на ядрах ^{139}La , которые позволяют глубже понять структуру возбужденных состояний и механизм нарушения четности в ядрах. Для ядерной физики важна информация о матричных элементах слабого взаимодействия в ядрах, получение их рас-

пределения и сопоставление его с предсказаниями теории. Именно такую информацию дают исследования усиленных P -нечетных эффектов. В последние годы благодаря развитию техники эксперимента стало возможным изучение нарушения временной инвариантности в нейтронных резонансах [14]. Дальнейшее исследование эффектов нарушения P -четности и T -инвариантности при взаимодействии поляризованных нейтронов со сложными ядрами представляется весьма перспективным.

Остается актуальным изучение процессов деления, индуцированных медленными нейтронами. Хотя спонтанное и вынужденное деление ядер изучается более 50 лет, до сих пор нет полного понимания механизма и динамики этого явления. Это обусловлено тем, что деление является одним из наиболее сложных ядерных превращений, связанных с глубоким перераспределением массы и заряда исходного ядра при рождении сильнодеформированных и возбужденных осколков. Преимущество медленных нейтронов состоит в том, что только для s - и p -волновых нейтронных резонансов в полном сечении (n, f)-реакции и в энергетической зависимости углового распределения осколков деления появляется интерференция амплитуд деления $J^{\pi}K$ для различных компаунд-состояний. Эти амплитуды, характеризуемые четностью π системы, спином J и его проекцией на ось деления K , являются определяющими для процесса деления.

Нейтронная физика оказалась весьма полезной для решения проблем астрофизики. Наиболее тяжелые элементы синтезируются через захват нейтронов как в ядрах красных гигантов (медленный процесс), так и при взрывах сверхновых (быстрый процесс). С помощью различных источников нейтронов можно изучать оба эти процесса: быстрый в реакциях деления, медленный — в радиационном захвате. Удастся воспроизводить процессы образования элементов: соответствующие температуры, времена, нейтронные и электронные потоки.

4. ФИЗИКА КОНДЕНСИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ

Макроскопические свойства вещества определяются взаимодействием атомов и молекул. Для изучения этих взаимодействий развиты различные физические методы. Значительная часть их состоит в изучении рассеяния излучений в веществе, что позволяет получить информацию о кристаллической структуре вещества в объеме и на поверхности, а также о динамике атомов и молекул.

По сравнению с другими видами излучений нейтроны имеют ряд преимуществ, отмеченных в табл. 2.

Любое исследование в области физики конденсированного состояния начинается с изучения атомной структуры соединения. В качестве примера

Таблица 2. Преимущества тепловых нейтронов

- Слабое взаимодействие с веществом, большая глубина проникновения
- Взаимодействие ядерное → структура
 электроны → магнитное
- Изотопическая зависимость амплитуды рассеяния
- $\lambda \sim d(1 \div 10 \text{ \AA})$, $E_n \sim 1 \div 100 \text{ МэВ}$ ($12 \div 1200 \text{ К}$)

использования нейтронов в структурных исследованиях можно привести расшифровку кристаллической структуры оксидомедных высокотемпературных сверхпроводников (ВТСП). Их открытие в 1986 г. было одним из ярких событий в физике конденсированного состояния в последние годы. Именно использование нейтронов позволило определить положения легкого кислорода на фоне таких тяжелых элементов, как иттрий, ртуть и барий [15], и тем самым сделать первый шаг в понимании механизма нового явления. Одним из препятствий в изучении механизма высокотемпературной сверхпроводимости является довольно сложная кристаллическая структура оксидомедных ВТСП и многообразие структурных дефектов. Вот почему ртутьсодержащие оксидомедные ВТСП с общей формулой $\text{HgBa}_2\text{Ca}_{n-1}\text{Cu}_n\text{O}_{2n+2+\delta}$ (рис. 1) привлекательны для исследователей, изучающих взаимосвязь между структурой и сверхпроводящими свойствами. Такие соединения, открытые в Московском государственном университете в 1993 г. [16], имеют высокую температуру сверхпроводимости и относительно простую кристаллическую структуру. Более того, первый член гомологического ряда практически не имеет дефектов упаковки вдоль оси c , которые имеются у других членов ряда, и, как полагают, он является одним из наиболее удобных соединений для структурных исследований [17]. Эти исследования продолжаются с целью создания соединений с еще более высокими температурами сверхпроводящего перехода [18, 19].

Способность нейтронов глубоко проникать в вещество позволяет исследовать новые материалы при реальных условиях температуры, давления и других внешних воздействий, что в совокупности с возрастающими возможностями увеличения дифракционного разрешения и нейтронных потоков делает структурную нейтронографию совершенно необходимой при изучении атомных и молекулярных структур новых материалов.

Важным свойством нейтрона, открывающим широкие возможности его использования для изучения свойств вещества в конденсированном состоянии, является наличие собственного магнитного момента. Магнетизм — одна из традиционных областей применения нейтронных методов. Это обусловлено тем, что нейтронные методы, по существу, являются наиболее информативными при изучении магнитных явлений. В последние годы нейтронное рассеяние все больше применяется для изучения систем с сильными элек-

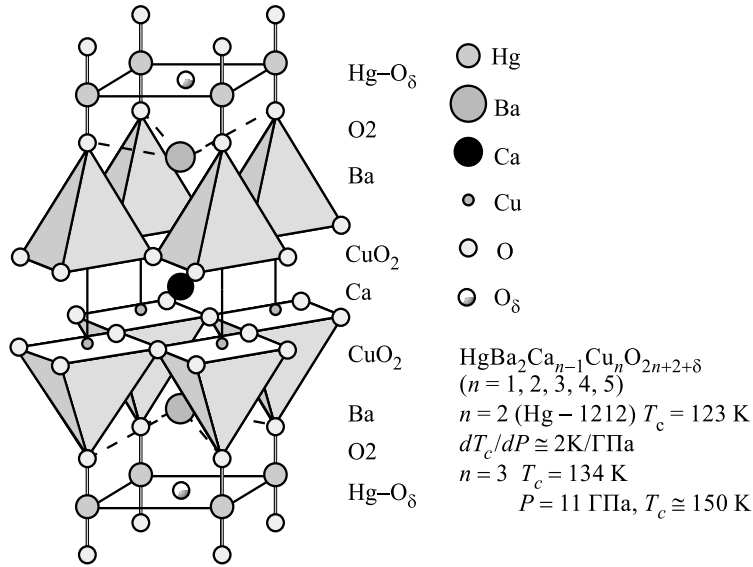


Рис. 1. Фрагмент кристаллической структуры ртутьсодержащих оксидомедных высокотемпературных сверхпроводников

тронными корреляциями, таких, как сверхпроводники, тяжелые фермионы, спин-пайерлсовские переходы, фуллерены, низкоразмерные магнетики. Эта тенденция будет развиваться в ближайшем будущем.

Для физики конденсированного состояния важное значение имеет исследование аморфных систем и жидкостей. Нейтроны, имея способность проникать глубоко в образец, позволяют эффективно изучать ближний порядок. Поскольку при этом взаимодействие нейтронов с веществом слабое, то имеется хорошая возможность сравнивать результаты с теоретическими расчетами. Аморфные материалы часто имеют лучшие, по сравнению с кристаллическими, механические и магнитные характеристики. Дальнейшее применение нейтронов в этой области требует развития методов, особенно поляризационного анализа, улучшения разрешения в малоугловом рассеянии, а также увеличения интенсивности поляризованных пучков на рефлектометрах.

5. МОЛЕКУЛЯРНЫЕ СОЕДИНЕНИЯ

В последние годы в физике и химии конденсированного состояния вещества оформился большой раздел, получивший название «физика мягкого состояния (soft matter)». Мягкие материалы включают в себя очень широкий класс молекулярных соединений, таких, как полимеры, термотропные

жидкие кристаллы, мицеллярные растворы и лиотропные мезофазы амфифильных молекул, микроэмульсии и коллоидные суспензии.

Одной из наиболее развивающихся здесь областей использования нейтронов является исследование полимеров. Помимо общего интереса эта область исследований имеет очень перспективные промышленные применения. Полимерный гель представляет собой подвижную сетку связанных и пересекающихся полимерных цепочек, которая может очень сильно разбухать в хорошем растворителе. Гели являются отличной моделью для изучения молекулярных взаимодействий (ван дер Ваальса, гидрофобных, электростатических, водородных связей). Полимерные гели имеют также практическое значение. Например, гель-электрофорез является одним из основных инструментов аналитической биохимии. Одним из наиболее известных и изученных гелей является диаллилдиметиламмонийхлорид (DDACl) с формулой $(\text{CH}_2=\text{CH}-\text{CH}_2-\text{N}^+\text{Cl}^-(\text{CH}_3)_2-\text{CH}_2-\text{CH}=\text{CH}_2)_n$.

Два обстоятельства определяют успех применения нейтронов в данной области. Во-первых, возможность замены Н на D в качестве меток. Во-вторых, большие времена движения молекул соответствуют временам для некоторых методов рассеяния медленных нейтронов, особенно для метода спинового эха. Из современных проблем в этой области можно отметить проблему деформации и релаксации полимерных расплавов, а также их реакцию на сдвиги и деформации. Последние всегда присутствуют при производстве полимеров и их роль далека от понимания.

Другой большой класс материалов — это поверхностно-активные вещества (ПАВ), которые имеют широкое применение в нефтяной и химической промышленности. Изучение ПАВ в растворах представляет собой интенсивно развивающуюся область науки. Кроме чисто научного интереса, эти системы широко используются на практике (а именно в химии, фармацевтике и пищевой промышленности). ПАВ — это молекулы, состоящие из двух частей, каждая из которых демонстрирует очень разные свойства в отношении критерия растворимости. Простой пример представляет собой додецилсульфат натрия с формулой $\text{CH}_3(\text{CH}_2)_{11}\text{SO}_4^-\text{Na}^+$. Он содержит линейную парафиновую цепочку, состоящую из 12 атомов углерода, которая гидрофобна и липофильна (это означает, что он имеет сходство с жирами). Он также имеет группу SO_4^-Na^+ , которая, будучи ионизированной, сильно гидрофильна.

Одним из наиболее ярких свойств таких систем является их широкий полиморфизм. В частности, ПАВ в растворе образует мицеллярные, ламеллярные, два типа гексагональных и две принципиально различные кубические фазы различных симметрий. Некоторые из этих фаз показаны на рис. 2. В настоящее время для их исследования используют зеркальное отражение нейтронов, которое дает информацию о структуре вдоль нормали к поверхности материала. Увеличение потока нейтронов позволит изучать незеркальное отражение и, следовательно, упорядочение внутри слоев. Увеличение нейтрон-

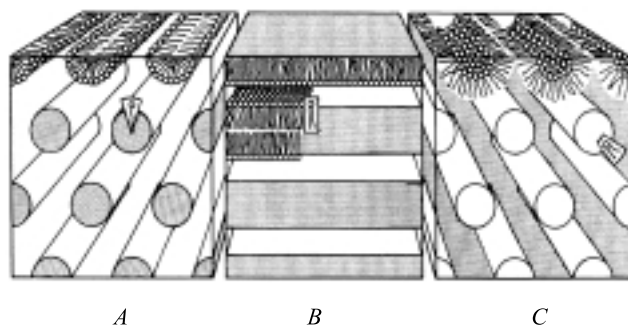


Рис. 2. Некоторые из фаз систем ПАВ/растворитель: *A* — гексагональная, *B* — ламеллярная и *C* — инвертированная гексагональная

ных потоков позволит обогатить арсенал нейтронных методов (поляризационный анализ, уменьшение Q_{\min} для малоуглового рассеяния) при исследовании новых перспективных систем типа белок-полимерных слоев.

Новой областью является исследование системы полимерный гель/ПАВ. При определенных условиях ПАВ, смешанное с полимерным гелем, может проникать в полимерную сетку, и система проявляет новые физико-химические свойства. Например, вышеупомянутые полимерный гель DDACl и противоположно заряженное ионное ПАВ SDS смешиваются. Как показано в [20], SDS, проникая в решетку геля DDACl, превращается в одномерную, хорошо упорядоченную ламеллярную фазу с повторяющимся периодом 33 Å. Это подтверждается наличием нескольких ламеллярных дифракционных порядков в рентгеновской дифракционной картине.

Малоугловое рассеяние нейтронов (МУРН) — один из мощных методов для исследований как полимерных систем, так и ПАВ. Систематические исследования с помощью малоуглового рассеяния нейтронов систем полимерный гель/ПАВ начаты недавно на спектрометре ЮМО на высокопоточном пульсирующем реакторе ИБР-2 в Лаборатории нейтронной физики им. И.М.Франка (ОИЯИ, Дубна) в сотрудничестве с кафедрой физики полимеров и кристаллов физического факультета Московского государственного университета. Пример такого исследования продемонстрирован на рис.3 [21]. Показан только первый порядок дифракционного распределения нейтронов на полимерном геле DDACl с противоположно заряженным SDS в D₂O. В большем масштабе рассеяние прекрасно описывается степенной зависимостью (прямой участок на log-log графике, рис. 3): $I(q) \sim q^{-\alpha}$ с показателем степени $\alpha = 3,7$. Это означает, что нейтроны рассеяны на поверхности с фрактальными размерами $D_s = 6 - \alpha = 2,3$. Вероятная интерпретация результата следующая. Молекулы SDS, проникая в гель DDACl, организуются в области с внутренней многослойной структурой. В результате взаимодействия

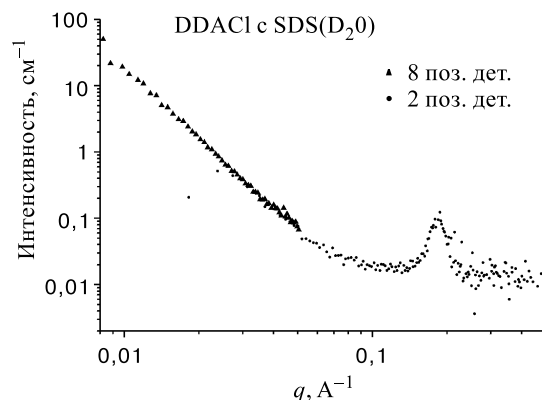


Рис. 3. Малоугловое рассеяние нейтронов в системе полимерный гель (диаллилдиметиламмонийхлорид)/ПАВ (додецилсульфат натрия)/D₂O

между ПАВ и полимерной сеткой образуется фрактальная поверхность SDS-доменов. Это новое, необычное явление. Обычно мультиламеллярные области ПАВ в объеме растворителя имеют «гладкую» поверхность. Дальнейшие исследования будут направлены на выяснение того, насколько общим является это явление для систем полимерный гель/ПАВ, и изучение условий, при которых появляется фрактальная структура.

6. ХИМИЯ

Большую часть пользователей нейтронных пучков составляют химики, которых интересуют химические реакции, катализ и электрохимия. Область (Q, ω) , доступная для нейтронов, и сопряженное с ней реальное пространство и время (от 0,1 до 1000 Å; от 10^{-15} до 10^{-8} с) делают возможным исследование пикосекундных явлений на атомном уровне. Вместе с другими преимуществами рассеяния нейтронов, такими, как изотопический контраст, магнитное взаимодействие и проникновение в образцы, это служит полезным дополнением к рентгеновскому методу, методу ядерно-магнитного резонанса и оптико-спектроскопическому методу, которые также незаменимы для решения проблем современной химии. Они могут быть объединены в следующие широкие области исследований [4]: реакции твердого состояния; молекулярная вибрационная спектроскопия; протонная и ионная проводимость; структура жидкого состояния, динамика и реакции; синтез и свойства цеолитов; каталитическое состояние и реактивность; электрохимические реакции. Около 90 % исследований основано на разнице сечений рассеяния нейтрона на водороде и дейтерии.

Новые возможности открывают дифракционные исследования в реальном времени, в особенности исследования реакций в твердой фазе [22, 23]. В случае простых реакций, с малым числом промежуточных фаз, достаточно проследить за эволюцией во времени нескольких дифракционных пиков, измеренных при фиксированном угле рассеяния. Значительно более сложный анализ потребовался в эксперименте в реальном времени по синтезу соединения $YBa_2Cu_3O_x$ (Y123) из исходных компонентов Y_2O_3 , $BaCO_3$ и CuO на воздухе (рис.4 [22]). Образец помещался в муфельную печь с большим внутренним объемом и с широкими входным и выходным окнами, закрытыми прозрачными для нейтронов экранами. Размеры окон позволяли установить несколько детекторов на больших и малых углах рассеяния, которые регистрировали дифракционные спектры в диапазоне межплоскостных расстояний от 1 до 30 Å. Образец представлял собой стехиометрическую для

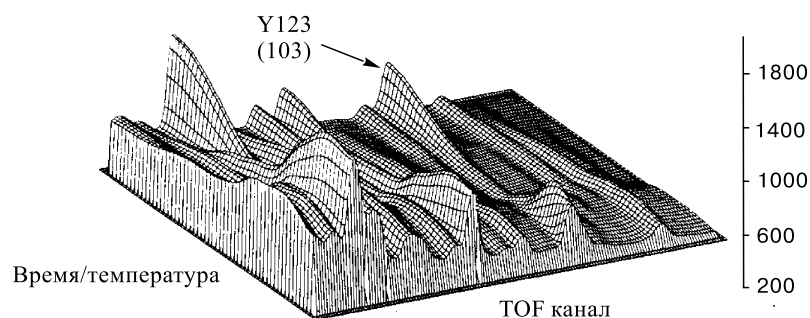
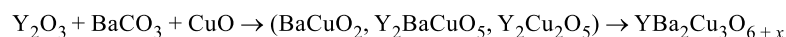


Рис. 4. Серия нейтронных дифракционных спектров, полученная в процессе синтеза высокотемпературного сверхпроводника $YBa_2Cu_3O_x$.

Y123 смесь исходных компонентов в контейнере из платиновой фольги. Его исходная масса составляла около 10 г. Приведенные в [22] результаты получены в режиме задания максимального значения (940°C) температуры и плавного выхода на него. После достижения 940°C температура в течение 6 ч поддерживалась при этом значении, затем было проведено постепенное (за ~ 3 ч) охлаждение образца до 160°C . Обработка нейтронограмм включала несколько этапов: идентификацию дифракционных пиков, прослеживание их эволюции, определение интегральных интенсивностей пиков и структурный анализ по методу Ритвельда. Было показано, что в ходе реакции синтеза Y123 можно выделить три стадии: распад исходных компонентов, образование про-

межуточных фаз и формирование конечной фазы. Анализ кинетики идущей реакции показал, что она хорошо описывается уравнением реакции, идущей на двумерных границах раздела фаз.

7. БИОЛОГИЯ

Биология является одной из наиболее перспективных областей применения нейтронов. Биофизические эксперименты с нейтронами можно разделить на два типа. Первый тип экспериментов направлен на изучение общих принципов физики и химии макромолекул. Второй тип экспериментов направлен на изучение функционирования конкретных биологических систем. Интересно, что развитие источников синхротронного излучения не только не отгеснило нейтроны, но еще более выявило их уникальность. Способность нейтронов «видеть» водород лучше, чем это могут делать фотоны, как в статике, так и в динамике, позволяет успешно определять детали структуры и функционирования биологических систем. Можно отметить целый ряд важных результатов, полученных с помощью нейтронов, по изучению комплексов белок–белок и белок–нуклеиновые кислоты, взаимодействия макромолекул с растворителем (тРНК, мембранные белки), динамики белков, моделей биологических мембран. Будущие эксперименты предполагают использование всех методов рассеяния нейтронов, но при этом требуется повышение потока нейтронов, которое может быть достигнуто как путем создания высокопоточных источников, так и улучшением нейтронных труб и детекторов. Эффективность может быть повышена также за счет совместного использования различных методов, таких, как синхротронное излучение и ЯМР.

В качестве примера современных исследований приведем изучение структуры рибосомы методами рассеяния нейтронов и синхротронного излучения, проводимого в последние годы совместно Институтом белка РАН (Пушино), ЛНФ ОИЯИ, Институтом кристаллографии РАН (Москва) и Европейской лабораторией по молекулярной биологии (Гренобль, Франция).

С физической точки зрения рибосома является молекулярной машиной с размерами около 250 Å, синтезирующей белки из аминокислот по программе, закодированной в специальной матричной РНК. Общая схема процесса биосинтеза белка показана на рис. 5 [24]. С химической точки зрения рибосома является нуклеопротеидом, состоящим из специальных рибосомных РНК и различных рибосомных белков. Комбинация нескольких десятков макромолекул разной химической структуры образует уникальную частицу, в которой все стадии процесса биосинтеза белка строго координированы в пространстве и времени.

Создание пространственной модели рибосомы высокого разрешения и структурное описание механизма биосинтеза белка невозможно без четкого

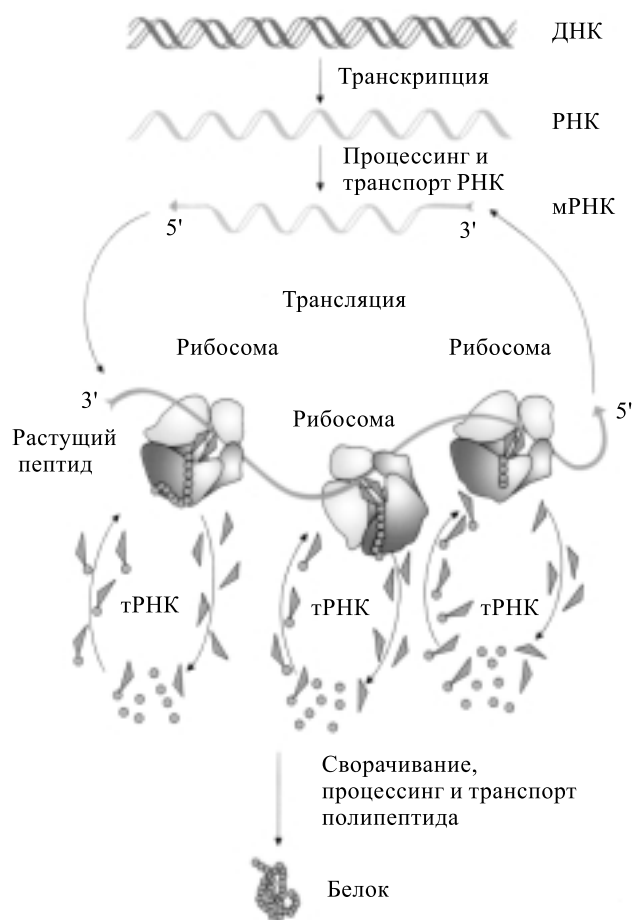


Рис. 5. Общая схема процесса биосинтеза белка

разграничения в структуре рибосомы компонентов, соответствующих РНК и белку. Огромные успехи криоэлектронной микроскопии и рентгеновской дифракции, достигнутые за последние годы, тем не менее, не позволили провести такое разграничение, поскольку контраст между РНК и белком в них довольно мал. Эта проблема довольно легко решается методом вариации контраста в малоугловом рассеянии нейтронов. В настоящее время разработан общий подход к построению моделей рибосомных частиц, основанный на анализе методом сферических гармоник экспериментального набора кривых рассеяния рентгеновских лучей и нейтронов [24]. Главное достоинство этого подхода состоит в возможности прямой визуализации положения РНК

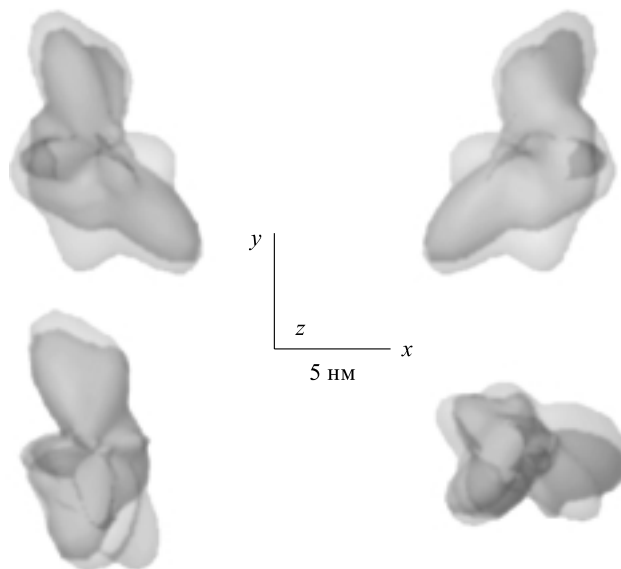


Рис. 6. Структурная модель 30S-субчастицы рибосомы *Thermus thermophilus* (серый) и ее РНК (темный) с пространственным разрешением 35 Å

в рибосомных частицах без использования априорной информации. Один из примеров такого построения для 30S-субчастицы рибосомы из теплолюбивой бактерии *Thermus thermophilus* с пространственным разрешением 35 Å показан на рис. 6 [25]. Примечательно, что белки данной бактерии кристаллизуются и структура многих из них известна. Это дает основание надеяться на локализацию отдельных белков с использованием модели [25].

Недавно был предложен новый подход, позволяющий получать олигонуклеотид направленным разрезанием рибосомной РНК с помощью специального фермента рибонуклеазы на довольно большие РНК-белковые комплексы, соответствующие отдельным доменам 30S-субчастицы рибосом. Таких доменов в 30S-субчастице три: 5', центральный и 3', причем каждый из них соответствует отдельной части 30S-рибосомной частицы. Так, домен 5' образует «тело», центральный домен занимает «выступ», а домен 3' располагается в «головке» 30S-субчастицы (рис. 7). Первым результатом применения такого подхода является возможность отделения «головки» 30S-субчастицы от ее двухдоменного «туловища», а последующее изучение с помощью нейтронного рассеяния и электронной микроскопии показало, что хотя при таком обезглавливании 30S-субчастицы «туловище» весьма компактно, однако входящие в его состав два домена («тело» и «выступ») не строго фиксированы и имеют определенную небольшую подвижность друг относительно друга [26].

Центральный домен (выступ)

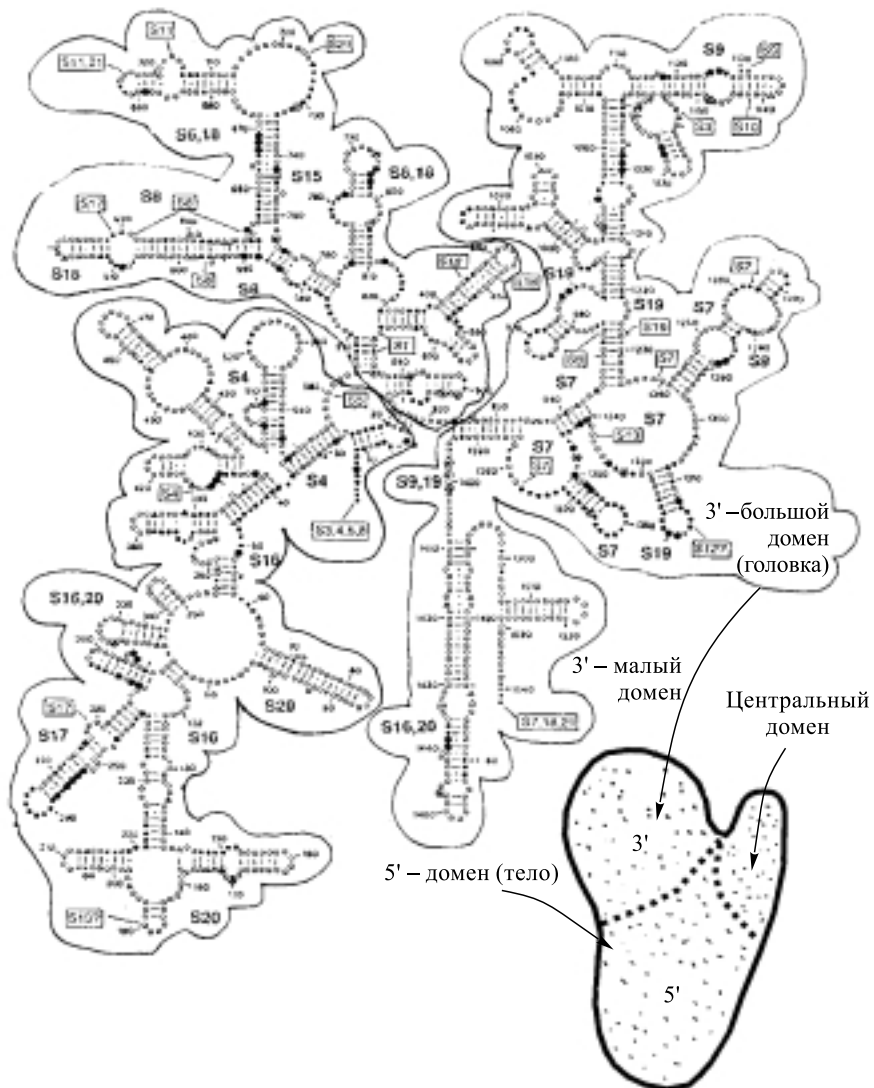


Рис. 7. Схема вторичной структуры 16S РНК из бактерии *T.thermophilus*

Другим ключевым вопросом структурной рибосомологии является вопрос об изменениях самой рибосомной частицы в процессе одного из этапов биосинтеза белка — транслокации. Использование метода вариации контраста в рассеянии нейтронов для целой 70S-рибосомной частицы бактерии

Escherichia coli, выращенной параллельно на протонированной и дейтерированной среде, позволило установить, что компактность 70S-рибосомной частицы меняется при транслокации [27]. Дальнейшие исследования показали, что эти изменения в основном затрагивают 30S-субчастицу рибосом; при этом расстояние между центрами тяжести обеих субчастиц также изменяется. На основании этих результатов была предложена модель работы рибосомы как динамической машины. Рибосома осциллирует между двумя конформерами, отличающимися по геометрическим размерам. Активной (пульсирующей) частью является 30S-субчастица. Движение ее головки относительно пассивной 50S-субчастицы и составляет главный механический акт при транслокации [28].

8. МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

В отдельную область исследований с использованием нейтронов выделяют материаловедение, задачей которого является изучение свойств материалов при изменении микроструктуры. К таким микроструктурам относятся точечные дефекты, дислокации, межфазные границы и внутренние соединения с микротрещинами, пораами и т.п. Материаловедение непосредственно связано с методами производства: порошковой металлургией, механической плавкой, молекулярно-лучевой эпитаксией и т.д.

Интенсивно развивается в последнее время дифрактометрия внутренних напряжений. Преимущества нейтронов, по сравнению с рентгеновскими лучами, состоят в высокой проникающей способности и больших углах рассеяния, что позволяет в перспективе уменьшить «масштабный» объем до размеров $50 \times 50 \times 50$ мкм. В настоящее время он составляет примерно 1 мм^3 [23]. Для решения задач материаловедения весьма успешно используется нейтронная рефлектометрия.

В качестве примера приведем исследование проблемы пиннинга вихрей, с которой связано увеличение критического тока. Нейтроны могут идентифицировать вихревую решетку и помочь определить наилучший способ изготовления, например, сверхпроводящих лент.

При значениях поля ниже критического магнитный поток проникает в сверхпроводник в смешанном состоянии в форме вихрей, каждый из которых несет один квант потока. Новые эффекты возникают в тонких сверхпроводящих пленках во внешнем магнитном поле, приложенном параллельно поверхности пленки, когда ее толщина совпадает по порядку величины с глубиной проникновения. Приведенная размерность и наличие поверхностного барьера делают величину первого критического поля больше, чем у массивных сверхпроводников. При величине поля, равной критической, только один ряд вихрей проникает в пленку. По мере того как поле продолжает расти, ряды

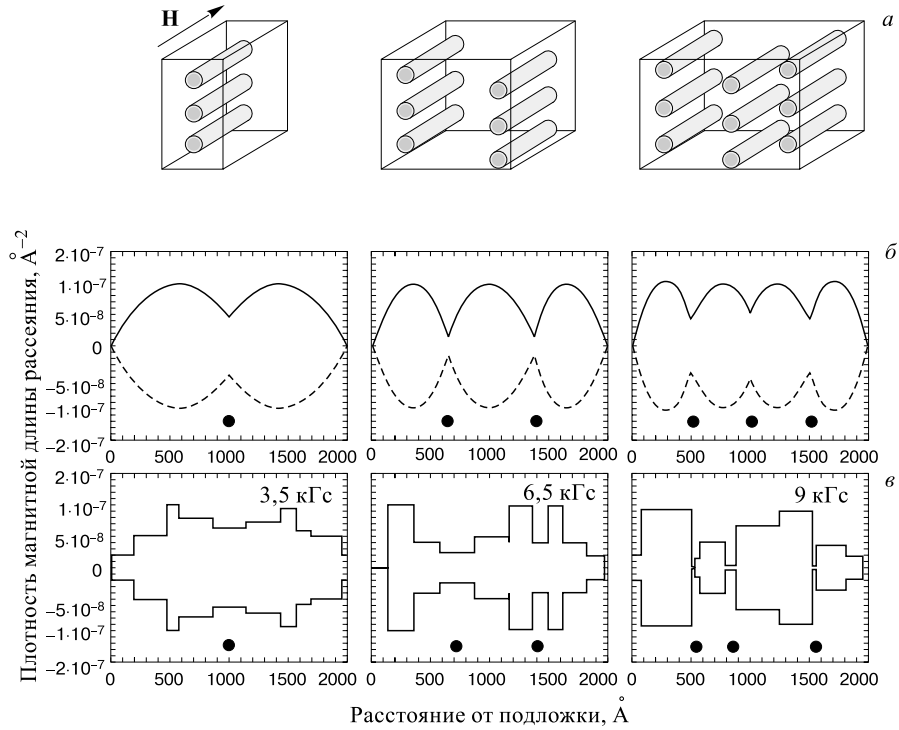


Рис. 8. Расположение рядов вихрей внутри сверхпроводящей тонкой пленки во внешнем магнитном поле H . *a*) Схематическое изображение расположения от 1 до 3 рядов вихрей. *б*) Идеальный профиль плотности магнитной длины рассеяния (профиль намагниченности) на рядах вихрей, полученный с помощью рефлектометрии поляризованных нейтронов. Два спиновых состояния нейтрона во внешнем магнитном поле дают две плотности магнитной длины рассеяния и обозначены сплошной и пунктирной линиями. Ядерная плотность длины рассеяния не включена. *в*) Экспериментально полученная плотность магнитной длины рассеяния (профиль намагниченности) в представлении ступенчатой функции [30]. Данные были получены при температуре 4 К и охлаждении образца в нулевом поле

вихрей прерывисто проникают в пленку [29]. Схема расположения одного, двух и трех рядов вихрей показана на рис.8,*a*.

Рефлектометрия поляризованных нейтронов является идеальным инструментом для изучения магнитной структуры, перпендикулярной к поверхности пленки. Данный метод позволяет определить положение рядов вихрей, а следовательно, и количество рядов вихрей внутри сверхпроводящей пленки. Структура проникающего магнитного потока, перпендикулярного к поверхно-

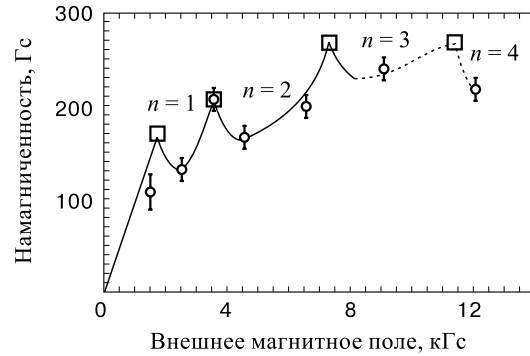


Рис. 9. Общая намагниченность пленки $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$ как функция внешнего магнитного поля. Прямая линия характеризует мейснеровское состояние. Сплошная линия, проходящая через экспериментальные точки (\circ), основана на расчетах [31], n — количество рядов вихрей в пленке. Квадратики обозначают величину внешнего магнитного поля, при котором имеют место переходы рядов вихрей

сти образца, определяется с помощью профиля плотности магнитной длины рассеяния для различных величин внешних полей.

Модельные расчеты для профилей плотности магнитной длины рассеяния от 1 до 3 рядов вихрей приведены на рис. 8,б. Две кривые представлены для каждой конфигурации вихрей и показывают магнитные вклады для двух спиновых состояний нейтронов во внешнем магнитном поле. Профиль плотности магнитной длины рассеяния прямо пропорционален профилю намагниченности. Форма намагниченности состоит из двух частей: проникновение магнитного поля с обоих интерфейсов характеризуется косинусоидальным поведением [30], а магнитное распределение каждого ряда вихрей представляет собой наложение в виде пикообразных событий. Таким образом, представляется возможным определить положение рядов вихрей внутри сверхпроводящей пленки с использованием рефлектометрии. Результаты измерений с использованием рефлектометра ADAM на реакторе HFR в ИЛЛ (Гренобль, Франция) показаны на рис. 8,в. Они получены для высокотемпературной пленки $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$ толщиной 2000 Å. Ступенчатая кривая получается в результате процедуры подгонки к кривым отражения, для получения которых использовалась «slice»-модель. На экспериментально полученном профиле намагниченности четко видны от 1 до 3 рядов вихрей, как и ожидалось из модельных расчетов для растущего внешнего магнитного поля.

Усреднение по кривым на рис. 8,в дает полную намагниченность сверхпроводящей пленки. Это позволяет еще лучше понять поведение переходов рядов вихрей, как показано на рис. 9. Прямая линия, идущая из начала координат, представляет мейснеровское состояние тонкой пленки. При величине

внешнего магнитного поля 1,7 кГс первый ряд вихрей проникает в пленку и намагниченность падает. Сплошная линия — результат расчетов, приведенных в [31], кружки — экспериментальные данные. После уменьшения, вызванного проникновением первого ряда вихрей, намагниченность имеет минимум. Это показывает, что только ограниченное количество рядов вихрей может проникать в пленку.

Количество вихрей в пределах одного ряда увеличивается с ростом внешнего магнитного поля, что приводит к усилению взаимодействия между вихрями. Это можно видеть на кривой намагниченности, т.к. после минимума намагниченность возрастает, что отражает возрастающее сопротивление среды проникновению следующих вихрей. Второе падение намагниченности имеет место, когда второй ряд вихрей проникает в пленку, при значении внешнего магнитного поля $\sim 3,5$ кГс. Последовательное проникновение вихрей продолжается по мере того, как внешнее магнитное поле продолжает увеличиваться, и соответствующий профиль намагниченности подтверждает тот факт, что при значении поля 12 кГс четыре ряда вихрей локализованы.

Общая тенденция намагниченности к росту выше критического поля показывает, что проникновение вихрей распределено по широкому интервалу внешних полей. Затрудненное проникновение вызвано ограниченной геометрией пленки, которая разрешает лишь последовательное проникновение рядов вихрей.

9. ИНЖЕНЕРНЫЙ АНАЛИЗ

Различие между инженерным анализом и материаловедением состоит в том, что первый ориентирован на анализ в большей степени инженерных свойств изделия, чем свойств материала, из которого оно изготовлено. Главной целью инженерного анализа является неразрушающий контроль качества изделий и процедуры их изготовления.

Традиционным является изучение металлургических микроструктур. В последнее время стало популярным изучение пространственных неоднородностей коллоидных систем с помощью малоуглового рассеяния и рефлектометрии. Большой развивающийся раздел этого направления посвящен изучению внутренних напряжений и текстуры, а также связанных с этими задачами проблем пластичности и усталости материалов.

В результате механических и тепловых операций при изготовлении промышленных изделий внутри материалов могут возникать механические напряжения, которые сильно влияют на прочность конструкций, поскольку они являются внутренне слабыми местами, в частности, для распространения трещин. Остаточные напряжения появляются и при деформации изделия, если некоторые его части деформировались пластически, тогда как другие испы-

тали упругую деформацию [32, 33]. Такие напряжения могут возникать в макроскопических областях, как, например, в постоянно изогнутых трубах, где области вблизи поверхности деформированы пластически, а внутренние области деформированы упруго.

Для инженеров особый интерес представляют неразрушающие методы контроля поведения деталей конструкций и конструкционных материалов, в том числе при внешних воздействиях. Для неразрушающего контроля внутренних напряжений используют различные физические методы: дифракцию рентгеновских лучей, ультразвуковое сканирование, магнитные измерения. В последние годы все большее распространение получает метод нейтронной дифракции, который пока в основном используется как калибровочный и как метод, позволяющий ответить на некоторые специальные вопросы. Прежде всего это вопросы, связанные с диагностикой внутренних напряжений глубоко в объеме (нейтроны могут проникать в сталь на глубину до 4 см, в алюминий — до 10 см), и вопросы анализа многофазных материалов (композиты, армированные материалы, керамики, сплавы), где нейтронная дифракция может дать информацию о распределении напряжений для каждой компоненты отдельно. Более того, именно с помощью нейтронной дифрактометрии можно получить наиболее полную информацию о микроструктуре изделия. Действительно, из смещения положений дифракционных пиков определяются величины деформаций и затем вычисляются макронапряжения, анализ уширения пиков позволяет определить так называемые напряжения 3-го рода, связанные с микронапряжениями в кристаллических зернах, наконец, анализируя интенсивности пиков, удастся выяснить распределение ориентаций кристаллитов (текстуру изделия).

Использование нейтронной дифрактометрии для анализа внутренних механических напряжений началось в 1981 г. [34]. Для такого анализа необходим не только высокий поток, но и высокое разрешение, поскольку величина деформации кристаллической решетки (макродеформация)

$$e_{hkl} = (d_{hkl} - d_{0hkl})/d_{0hkl},$$

где d_{hkl} и d_{0hkl} (межплоскостные расстояния для деформированной и недеформированной решеток) обычно имеют порядок $10^{-3} - 10^{-4}$. Поэтому такого рода исследования начались после создания дифрактометров высокого разрешения. Большинство из них проводятся на двухосных дифрактометрах, однако уже накопленный опыт использования дифрактометров на высокопоточных импульсных источниках с коротким импульсом [35–37] и фурье-дифрактометров [38–40] показывает, что времяпролетная дифрактометрия имеет заметные преимущества при изучении внутренних напряжений. Прежде всего это связано с возможностью работать в фиксированной геометрии и с одновременным измерением нескольких дифракционных пиков.

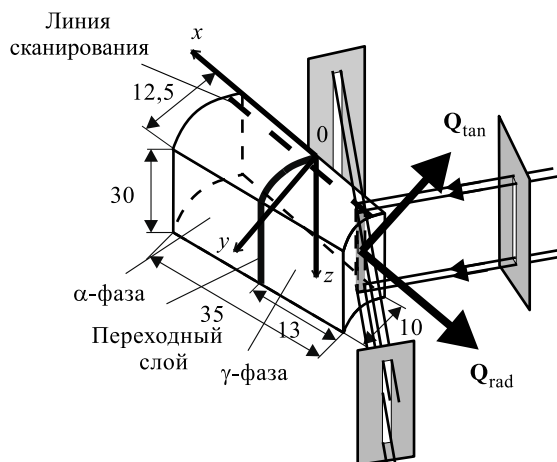


Рис. 10. Образец, вырезанный из трубы с наваренным ферритовым слоем. Показаны диафрагмы, ограничивавшие апертуры входного и рассеянного пучков [41]

Особенно удобной оказалась геометрия рассеяния на углы $\pm 90^\circ$, которая позволяет наилучшим образом выделить определенный объем рассеяния и вести измерение напряжений сразу в двух направлениях.

В качестве примера дифрактометрии остаточных напряжений рассмотрим результаты исследований труб аустенитной стали с наваренным ферритовым покрытием [41]. Такое покрытие труб является весьма эффективным способом защиты от коррозии, в том числе в химически активных средах. Однако некоторым сдерживающим фактором развития этой техники является довольно сложное неконтролируемое распределение остаточных напряжений. Поэтому актуальной является задача анализа внутренних напряжений вдоль поверхности, разделяющей ферритовый слой и аустенитную сталь. Наиболее распространенным способом такого анализа до недавнего времени был механический способ измерения деформаций при постепенном стачивании образца. Более информативным и полезным для оптимизации технологии является неразрушающий способ нейтронной дифрактометрии.

Образец представлял собой трубу из аустенитной стали (γ -фаза) с внутренним радиусом 148 мм, толщиной 15 мм, с покрытием из семи слоев ферритовой стали (α -фаза) типа 2NiMo 1VP с 135 наварными швами на общей длине 1100 мм. Для исследований был взят сегмент этой трубы, показанный на рис. 10.

Эксперименты проводились на дифрактометре ФДВР на реакторе ИБР-2 с использованием двух 90° -детекторов, которые дают разрешение 0,4–0,5 %.

Такая геометрия позволяет одновременно измерять поперечные и продольные компоненты деформации. С помощью диафрагм на выходе нейтронного пучка и перед детекторами объем сканирования образца устанавливался $2,1 \times 4,5 \times 19,4$ и $2,1 \times 2,6 \times 19,4$ мм для первого и второго детекторов соответственно. Измерения вдали от переходного слоя показали, что образец имел заметно выраженную текстуру в γ -фазе (интенсивность одного из брэгговских пиков была в ~ 8 раз больше вычисленного значения для случайно ориентированных кристаллитов). В α -фазе текстурирование не было обнаружено.

На рис. 11 показана зависимость разности $\sigma_t - \sigma_r = \frac{E}{1+\mu}(\varepsilon_t - \varepsilon_r)$ от расстояния от центра сварного шва. $G_t, G_r, \varepsilon_t, \varepsilon_r$ — тангенциальная и радиальная компоненты внутренних напряжений G и деформаций ε , E — модуль Юнга, μ — отношение Пуассона. На этом же рисунке сплошной линией показаны результаты механического (разрушающего) контроля. Видно, что в целом имеется хорошее качественное согласие. Отличие в γ -фазе, по-видимому, связано с необходимостью учета текстуры в обработке дифракционных данных.

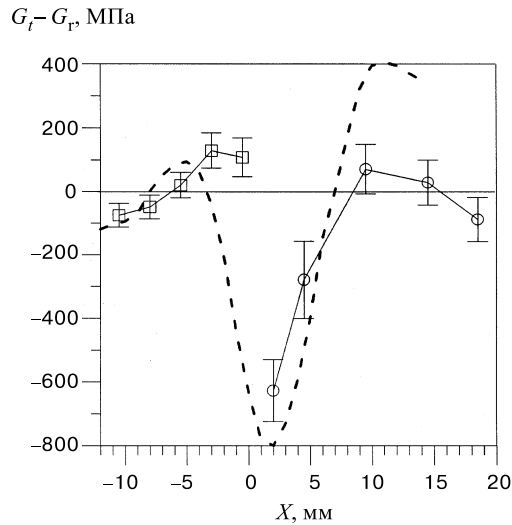


Рис. 11. Разность тангенциальной и радиальной компонент внутренних напряжений в трубе, показанной на рис. 10, измеренная в дифракционном эксперименте (\square, \circ) и полученная методом разрушающего контроля (пунктирная кривая) [41]

10. НАУКИ О ЗЕМЛЕ

Относительно новой областью является применение нейтронов в науках о Земле. Экспериментальные исследования здесь схожи с теми, которые характерны для материаловедения. Они состоят в изучении текстуры горных пород и минералов, а также в исследовании влияния внешнего давления на структуру образцов. Таким образом, необходимо развитие порошковой дифрактометрии высокого разрешения и техники высоких давлений. В настоящее время предельно достижимые параметры по пространственному разрешению — до 0,1 %, по давлениям — до 20 ГПа. Структурные исследования позволяют получать информацию, важную для целого ряда проблем, основные из которых — это геология планет, предсказание землетрясений и извержений вулканов.

Одним из наиболее крупных достижений современной геофизики является представление о тектонике плит. Концепция тектоники плит (или блоков) развилась из гипотезы разрастания океанического дна и трансформных разломов. Создание новой глобальной тектоники стало возможным, во-первых, благодаря сделанным открытиям о строении океанического дна и, во-вторых, вследствие того, что методами физики твердого тела были установлены реологические свойства материала мантии.

Общие принципы гипотезы были почти одновременно предложены Маккензи и Паркером, а также Морганом. Их основная идея состоит в том, что наружная оболочка твердой земли, образующая литосферу, подвергается сильным деформациям только вдоль относительно узких линейных подвижных поясов. Подвижные пояса и соединяющие их трансформные разломы разделяют литосферу на серию «жестких плит», не подвергающихся заметным внутренним растяжениям, складчатости или искривлениям [42, 43].

Основная доля тектонической активности сконцентрирована на границах между соседними плитами. Эта теория относит большую часть тектонической активности Земли, включая дрейф континентов и образование подводных океанических хребтов, молодых складчатых гор, глубоководных желобов, островных дуг, высоких плато и рифтовых долин, к единому процессу разрастания дна океанов.

Экспериментальное подтверждение представлений о дрейфе материков и разрастании океанического дна достижимо, главным образом, двумя физическими методами — это использование палеомагнетизма и реконструкция древнего напряженно-деформированного состояния в блоках земной коры с помощью текстурного анализа. Палеомагнетизм основан на предположении, что направление остаточной намагниченности в образцах горных пород позволяет определить наклонение и склонение магнитного поля той эпохи, когда порода формировалась.

Согласно гипотезе Вайна–Мэттьюза, история главного магнитного поля Земли, начиная с позднего мезозоя, запечатлена в океанической коре. Молодой слой океанической коры играет роль магнитной ленты, на которой записывалась полярность магнитного поля по мере образования новой коры в осевой зоне океанических подводных хребтов. Такую «магнитную запись» в коре можно расшифровать, регистрируя магнитные аномалии по профилям, пересекающим океанические хребты.

Другой экспериментальный физический метод заключается в реконструкции тензора палеодеформаций на ориентированных образцах горных пород по данным нейтронографического текстурного анализа и компьютерного моделирования пластической деформации. Такие исследования выполнены в текстурной группе Лаборатории нейтронной физики им. И.М.Франка ОИЯИ совместно с геологами Института геологии и динамики литосферы Геттингенского университета (Германия). Была исследована большая коллекция образцов горных пород, отобранных вблизи побережья на юго-западе Африки (Намибия) и по результатам нейтронографического текстурного анализа проведена реконструкция палеотектонических напряжений. Реконструированное напряженное состояние согласуется с представлением тектоники плит о направлении дрейфа континентов [42, 43].

Лабораторные исследования изменений физических свойств геологических образцов под воздействием температуры, механических напряжений, радиоактивных излучений необходимы как в связи с фундаментальными проблемами геологии и геофизики, так и для решения прикладных задач, например, для обоснованного выбора мест для строительства глубоководных хранилищ радиоактивных отходов.

Главная экспериментальная информация о внутреннем строении Земли в настоящее время получается из сейсмологических наблюдений. Продольные и поперечные сейсмические волны, возникающие в очагах землетрясений или в пунктах подземных ядерных взрывов, «просвечивают» нашу планету и позволяют выявить внутреннее строение Земли без непосредственного проникновения в ее недра. При анализе глобальных и региональных несоответствий модельных и наблюдаемых скоростей сейсмических волн пришли к необходимости учитывать анизотропию вещества земных недр. Поскольку анизотропия геоматериалов играет важную роль при решении и интерпретации большого круга геологических и геофизических задач (например, учет искривления траектории сверхглубоких скважин, определение направлений тепловых и флюидных потоков, электротеллурических токов и т.д.), интерес представляет физическая природа анизотропии горных пород.

В настоящее время факторы, обуславливающие анизотропию упругих свойств горных пород, наиболее полно устанавливаются с помощью комплексного применения нейтронографического текстурного анализа и пространственного измерения скоростей ультразвуковых волн в больших образ-

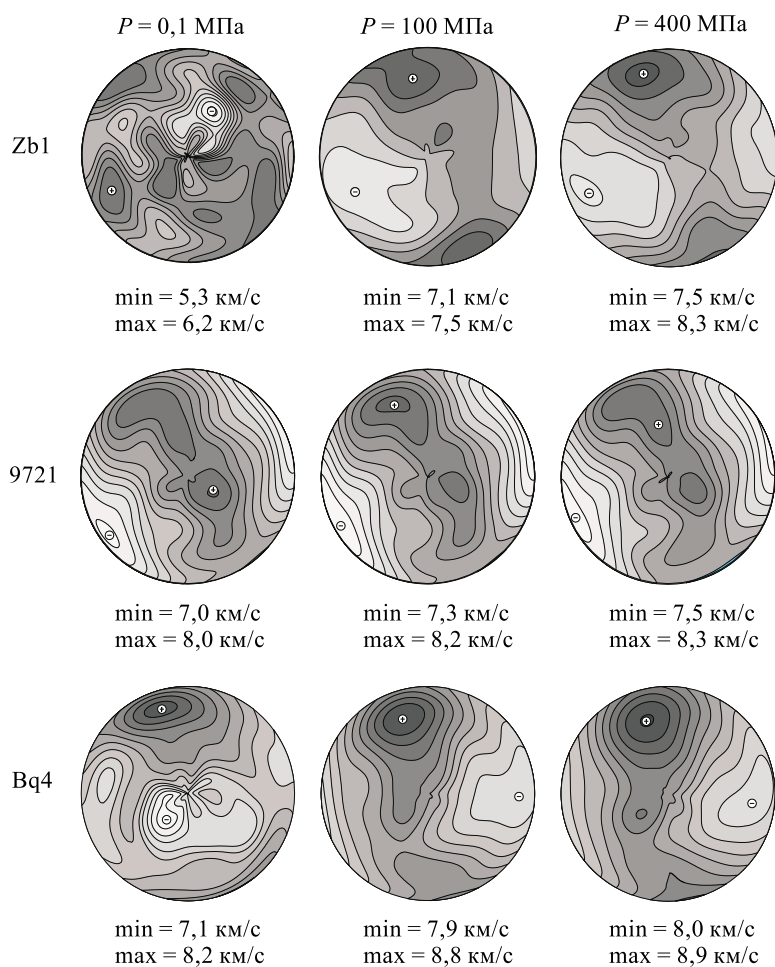


Рис. 12. Карты изолиний скоростей продольных упругих волн при различных давлениях [44]

цах горных пород сферической формы при различных давлениях. Нейтронографический текстурный анализ позволяет с высокой точностью исследовать кристаллографические текстуры относительно больших крупнозернистых образцов горных пород, т.е. дает информацию о пространственной преимущественной ориентировке кристаллических решеток зерен по всему минеральному ансамблю.

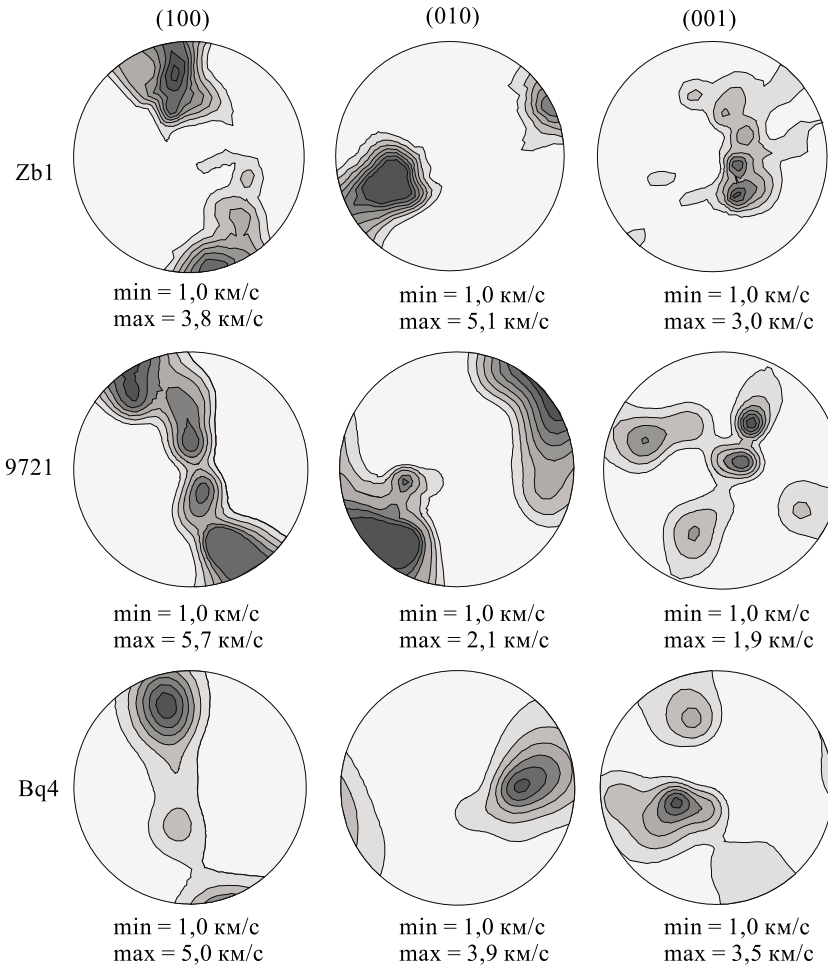


Рис. 13. Полюсные фигуры оливиновых ксенолитов, восстановленные по вычисленным текстурным компонентам [44]

Таким образом, нейтроны выявляют одну причину анизотропии — текстуру, в то время как пространственное акустическое прозвучивание несет информацию и о других факторах, создающих анизотропию в неоднородных, поликристаллических средах, таких, например, как ориентированные поры и трещины.

В качестве примера таких исследований приведем результаты совместной работы, выполненной в рамках проекта ЮНЕСКО группой сотрудников

ЛНФ ОИЯИ и сотрудников Геофизического института Чешской академии наук [44].

Образцы в форме шаров были изготовлены из оливиновых ксенолитов, вынесенных из мантии Земли потоками базальтов с глубин 80–120 км и из кернов Кольской сверхглубокой скважины. На рис. 12 приведены карты изолиний скоростей продольных упругих волн, измеренных при разных всесторонних давлениях, для трех оливиносодержащих образцов ксенолитов, а на рис. 13 показаны нейтронографические полюсные фигуры, наглядно отражающие характер преимущественных ориентировок зерен оливина в каждом из образцов. Основной вывод, сделанный на основе этих результатов, состоит в том, что характер упругой анизотропии сильно меняется с ростом гидростатического давления и обусловлен только кристаллографической текстурой при высоких давлениях.

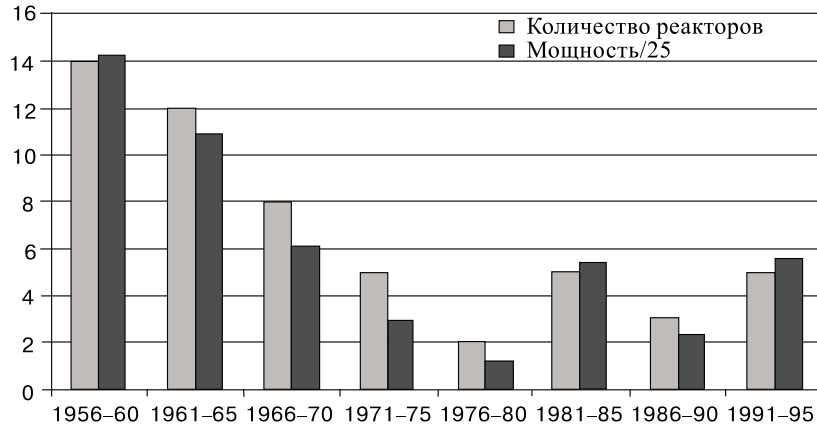
Из этих опытов следует, что те сейсмические и петрофизические разрезы литосферы, которые построены с привлечением данных лабораторных измерений скоростей упругих волн, выполненных без давлений и температуры, подлежат пересмотру.

11. СОВРЕМЕННЫЕ ИСТОЧНИКИ НЕЙТРОНОВ

Для получения интенсивных пучков нейтронов используют следующие ядерные реакции: деления тяжелых ядер, фотонейтронные и испарения. С точки зрения производства нейтронов и отвода тепла с мишени наиболее выгодной является реакция испарения. Однако исторически первыми интенсивными источниками нейтронов были ядерные реакторы, в которых непрерывный поток нейтронов генерировался в процессе самопроизвольного деления урана (стационарные реакторы). До сих пор они остаются основными интенсивными источниками нейтронов для физических исследований, хотя еще в 50-х годах было предложено использовать ускорители для этой цели: интенсивные импульсные источники нейтронов на базе электронных ускорителей начали создаваться в Харуэлле (Великобритания) в 1953 г. [45].

Нет каких-либо весомых преимуществ реакторов перед ускорителями, но разрыв в 10 лет и бурное развитие реакторной техники именно в это время определили путь развития базы для нейтронных исследований.

С начала 90-х годов число реакторов неуклонно уменьшается и в начале следующего столетия оно может достигнуть уровня 60-х годов (рис. 14). В то же время за последние 30 лет наблюдался значительный прогресс в ускорительной технике, которая имеет большие перспективы. Поэтому очевидно, что следующий этап в создании интенсивных источников нейтронов связан с использованием ускорителей, преимущественно протонных.



| Год | 1956-60 | 1961-65 | 1966-70 | 1971-75 | 1976-80 | 1981-85 | 1986-90 | 1991-95 |
|------------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| Количество | 14 | 12 | 8 | 5 | 2 | 5 | 3 | 5 |
| Мощность | 356 | 273 | 151 | 75 | 29 | 135 | 58 | 138 |

Современная ситуация

- ~30% мощности 1-е поколение
- ~50% мощности 2-е поколение
- ~20% мощности 3-е поколение
- малое количество новых реакторов

Рис. 14. Существующие реакторы с возможностью рассеяния нейтронов

Развитие реакторных источников сохраняет свою актуальность по ряду причин. Во-первых, протонные синхротроны с необходимыми параметрами являются достаточно сложными и дорогими машинами. Во-вторых, практическая реализация мишенных устройств высокой мощности сталкивается с типичными реакторными проблемами, такими, как отвод тепла и радиационная стойкость конструкции, определяемая плотностью потока быстрых нейтронов в зоне мишени. И, наконец, в настоящее время имеется еще достаточно много работающих реакторов, имеющих перспективы развития.

11.1. Источники с непрерывным потоком. Наибольшее число стационарных реакторов было создано в период с 1955 по 1960 гг. Это были реакторы первого поколения, которые создавались для облучений и радиационных исследований. После 1960 г. началось создание реакторов второго поколения, которые уже предназначались как для радиационных исследований, так и для исследований на нейтронных пучках. Примерно до 1960 г. увеличение по-

тока нейтронов происходило в той же степени, что и увеличение мощности реакторов, затем дальнейшее увеличение потока нейтронов стало опережать увеличение мощности реакторов [3]. Это опережение начало проявляться особенно с начала 70-х годов, когда стали эффективно использоваться реакторы третьего поколения, такие, как HFR в Институте Лауэ–Ланжевена (ИЛЛ) (Гренобль, Франция), ОРПНН в Лаборатории Леона–Бриллюэна (Сакле, Франция), ИР-8 в Российском научном центре «Курчатовский институт» (Москва, Россия), ИБР-2 в ОИЯИ (Дубна, Россия) и др.

В настоящее время в мире работают около пятидесяти исследовательских реакторов, на которых проводятся пучковые исследования. При этом большинство из них — это реакторы, проработавшие более 30 лет, что близко к естественному времени жизни реактора, т.е. большинство реакторов нуждаются в модернизации или замене на новые.

В конечном счете эффективность работы исследовательского реактора определяется работой экспериментальных установок. В табл. 3 приведены примеры стационарных реакторов третьего поколения и частично второго, наиболее эффективно используемых для пучковых исследований. Более полная таблица работающих исследовательских реакторов имеется в [3]. Экспериментальные установки делятся согласно общепринятой классификации на пять типов: дифрактометры для упругого брэгговского и упругого диффузного рассеяния, спектрометры для малоуглового рассеяния, рефлектометры, спектрометры для неупругого рассеяния и другие приборы. Последние включают в себя все, что не входит в предыдущие четыре категории. Установки для облучений и активационного анализа здесь не рассматриваются.

Как видно из этой таблицы, наиболее эффективными по всем показателям являются реактор HFR (ИЛЛ) среди реакторов высокой мощности и реактор ОРПНН — среди реакторов средней мощности. Реактор HFR имеет наибольший абсолютный и удельный (приведенный к мощности) поток нейтронов и наиболее развитую инфраструктуру для проведения экспериментов. Реактор ОРПНН, так же, как и реактор ИР-8, является, по-видимому, оптимальным для реакторов средней мощности.

Кроме технических характеристик, весьма существенным показателем является стоимость реактора, которая в значительной мере определяется его средней мощностью, поэтому условной характеристикой, определяющей стоимость производимого нейтрона, можно считать отношение средней мощности к плотности потока. Чем больше на реакторе экспериментальных установок, тем выше эффективность его использования, можно сказать, тем дешевле один произведенный нейтрон. Из табл. 4 видно, что по этому параметру из всех реакторов выделяются реакторы HFR и ОРПНН.

В целом, несмотря на весьма развившиеся в последние годы средства повышения эффективности использования реакторов — новые типы замедлителей, формирование пучков с помощью нейтроноводов, новые детектор-

ные системы, число современных реакторов для физических исследований в мире явно недостаточно, поэтому во многих странах разрабатываются новые проекты.

Таблица 3. Высокоточные источники нейтронов с непрерывным потоком и используемые приборы для экспериментов по рассеянию

| Страна | Место | Реактор | Год создания | Мощность, МВт | Поток $\times 10^{14}$ $\text{см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$ | Нейтронные каналы | За- медли- тели X — холод- ный Г — го- рячий | Приборы для рассеяния нейтронов | | | | | |
|------------|--------------|---------|--------------|---------------|---|-------------------|---|---------------------------------|-------------|----------------|-----------|--------|--------------|
| | | | | | | | | Дифракция | Малоугловое | Рефлектометрия | Неупругое | Другие | Полное число |
| Венгрия | Будапешт | WWR | 1992 | 10 | 1 | 8 | — | 2 | 1 | 1 | 3 | 3 | 10 |
| Германия | Юлих | FRJ-2 | 1962/72 | 23 | 2 | 8 | X | 4 | 3 | 1 | 7 | 3 | 18 |
| Германия | Берлин | BER-II | 1973/91 | 10 | 1 | 9 | X | 6 | 1 | 1 | 5 | 1 | 14 |
| Дания | Рисо | DR-3 | 1960 | 10 | 1,5 | 4 | X | 1 | 1 | 0 | 5 | 0 | 7 |
| Индия | Бомбей | Dhruva | 1985 | 100 | 2 | 13 | X | 3 | 1 | 0 | 8 | 1 | 13 |
| Канада | Чок-Ривер | NRU | 1957 | 125 | 3 | 6 | X | 3 | 1 | 0 | 2 | 0 | 6 |
| Нидерланды | Петтен | HFR | 1961/70 | 45 | 1 | 12 | — | 3 | 1 | 0 | 2 | 1 | 7 |
| Россия | Гатчина | BVP-M | 1959 | 16 | 1 | 14 | — | 3 | 2 | 0 | 1 | 6 | 12 |
| Россия | Москва | ИР-8 | 1981 | 8 | 1 | 12 | X | 2 | 0 | 0 | 3 | 5 | 10 |
| Россия | Екатеринбург | ИБВ-2М | 1966/83 | 15 | 2 | 6 | — | 4 | 1 | 0 | 1 | 0 | 6 |
| Россия | Гатчина | ПИК | 2003 план | 100 | 45 | до 50 | 2X, 2Г | — | — | — | — | — | до 50 |
| США | Брукхейвен | HFBR | 1965 | 60 | 9 | 9 | X | 3 | 3 | 1 | 6 | 2 | 15 |
| США | Ок-Ридж | HFIR | 1966 | 100 | 30 | 4 | — | 4 | 1 | 0 | 5 | 0 | 10 |
| США | Миссури | MURR | 1966 | 10 | 1,2 | 6 | — | 3 | 2 | 1 | 2 | 6 | 14 |
| США | Гайтесбург | NBSR | 1969 | 20 | 4 | 5 | X | 2 | 0 | 0 | 6 | 1 | 9 |
| Франция | Гренобль | HFR-ILL | 1971/95 | 58 | 15 | 26 | 2X, 1Г | 11 | 2 | 0 | 10 | 2 | 25 |
| Франция | Сакле | ORPHEE | 1980 | 14 | 2,5 | 20 | 2X, 1Г | 10 | 4 | 1 | 7 | 0 | 22 |
| Швейцария | Виллиген | SINQ | 1996 | 1 | 1 | 19 | 1X, 1Г | 3 | 1 | 2 | 3 | 3 | 12 |
| Швеция | Студвик | R-2 | 1960 | 50 | 4 | 8 | X | 6 | 0 | 0 | 2 | 0 | 8 |
| Япония | Ибараки | JRR-3M | 1990 | 20 | 2 | 26 | X | 4 | 1 | 0 | 10 | 5 | 20 |

Ядерные реакторы имеют ограничения для дальнейшего развития по получению более высоких выведенных потоков нейтронов, обусловленные технологическими причинами, связанными, главным образом, с отводом тепла. В этом смысле реакторы типа HFR в Гренобле или строящийся ПИК в Гатчине достигают предела потока выведенных тепловых нейтронов для стационарных реакторов $4 \div 5 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$.

С целью достижения более высоких потоков в начале 60-х годов были предложены проекты источников на базе протонных ускорителей (испарительные источники) с непрерывным потоком нейтронов. При этом протонный

пучок может быть как непрерывным, так и импульсным, но импульс имеет высокочастотную микроструктуру, которая несущественна для нейтронов, прошедших через замедлитель. Такого типа канадский проект ING предполагал поток нейтронов с поверхности замедлителя $10^{16} \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$. В 1968 г. этот проект был закрыт из-за отсутствия соответствующего ускорителя.

В 1997 г. в Швейцарии начал работать стационарный испарительный источник на базе изохронного циклотрона Института Пауля Шерера (Виллиген) с током протонов 1,5 мА при энергии 600 МэВ. Источник нейтронов SINQ спроектирован аналогично современным реакторам и имеет поток нейтронов $10^{14} \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$, что соответствует большинству современных стационарных реакторов (см. табл. 3).

11.2. Импульсные источники. История импульсных источников нейтронов берет свое начало с 1945 г., со времен Манхэттенского проекта, в рамках которого в Лос-Аламосе был создан импульсный ядерный реактор самогасящего действия, или апериодический импульсный реактор [46]. Таких реакторов в настоящее время в мире довольно много, но для физических исследований на выведенных пучках они практически не используются.

В 1960 г. в Объединенном институте ядерных исследований (Дубна) был введен в эксплуатацию пульсирующий реактор ИБР. Это был первый в мире реактор, в котором импульсы генерировались периодически с частотой 5 и 50 Гц за счет вращения части активной зоны. При средней мощности реактора всего 1 кВт поток нейтронов был выше, чем на стационарных реакторах мощностью в 10 МВт с прерывателем.

Успешная работа реактора ИБР и его модификаций стимулировала дальнейшее развитие этого направления. В середине 60-х годов появилось несколько новых проектов. Первым было сообщение о пульсирующем реакторе SORA с подвижным отражателем и средней мощностью 1 МВт. Реактор планировалось построить в исследовательском центре Евроатома в Испре (Италия). Мощный импульсный реактор периодического действия со средней мощностью до 30 МВт планировалось построить в Брукхейвенской национальной лаборатории (США). В 1964 г. в Дубне началась работа над проектом нового реактора ИБР-2. Принципиальным отличием ИБР-2 от серии первых реакторов ИБР стала модуляция реактивности с помощью подвижного отражателя, а также охлаждение активной зоны жидким натрием [46]. Из всех предложений новых высокопоточных пульсирующих реакторов был реализован только проект реактора ИБР-2.

Пульсирующий реактор ИБР-2, принятый в эксплуатацию в 1984 г., в настоящее время имеет самый высокий в мире импульсный поток тепловых нейтронов — $10^{16} \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$. В то же время это исключительно экономичная установка: время эксплуатации активной зоны реактора составляет около 20 лет, подвижного отражателя — 7 лет. Особенностью реактора ИБР-2 является большая длительность нейтронного импульса: 320 мкс для тепло-

вых нейтронов. До недавнего времени это считалось недостатком. Однако развитие техники эксперимента на реакторе ИБР-2 показывает, что создание современных приборов позволяет получить разрешение на уровне лучших импульсных источников для упругого и неупругого рассеяния [47].

Первый импульсный источник на ускорителях был создан в Харуэлле с использованием линейного электронного ускорителя в начале 50-х годов, здесь же в 1959 г. была предложена и реализована идея бустера: система ускоритель — размножающая мишень.

Хотя линейные электронные ускорители относительно просты в изготовлении, в настоящее время они используются мало (из-за низкой эффективности по сравнению с протонными ускорителями) и, в основном, для ядерной физики. Бустеры тоже не имеют широкого распространения. Насколько нам известно, в настоящее время только в Дубне работает бустер и создается новый [47]. Главная проблема состоит в отрицательном отношении общественности к любым системам, содержащим делящиеся материалы. Однако логика развития источников нейтронов, по-видимому, приведет к широкому использованию именно бустеров. В настоящее время имеется такой проект для Московской мезонной фабрики ИЯИ РАН в Троицке (Московская область) [48].

Протонные ускорители для импульсных источников нейтронов начали использоваться в начале 70-х годов. В 1973 и 1975 гг. были сконструированы прототипы ZING-P и ZING-P в Аргоннской национальной лаборатории США, где с 1981 г. работает источник IPNS. Аналогичные установки были сделаны в 1977 г. в Лос-Аламосе, где с 1985 г. работает мощный источник LANSCE, недавно переименованный в MLNSC. В 1980 г. вступил в действие источник KENS в Национальной лаборатории высоких энергий КЕК в Японии. Все эти источники нейтронов второго поколения создавались на ускорителях, предназначенных для ядерной физики.

Первый импульсный испарительный источник нейтронов третьего поколения ISIS, для которого главный ускоритель был построен специально, начал работать в 1985 г. в Лаборатории Резерфорда–Эплтона (Великобритания). В настоящее время ISIS — наиболее интенсивный, наиболее оборудованный и приспособленный для использования импульсный источник нейтронов [49,50].

Перечисленные испарительные источники нейтронов относятся к классу импульсных источников с малой длительностью нейтронного импульса — источники с коротким (~ 10 мкс) импульсом (SPS — Short Pulse Source). В последнее время весьма активно обсуждается вопрос о создании источников с длинным, порядка нескольких сотен микросекунд импульсом (LPS — Long Pulse Source). Дело в том, что создание протонных накопителей с энергией, достигающей нескольких ГэВ, необходимых для повышения потока нейтронов, весьма дорого. Гораздо дешевле построить мощный линейный протонный ускоритель. Однако в этом случае длительность нейтронного импульса уве-

Таблица 4. Импульсные источники нейтронов для экспериментов по рассеянию

| Страна | Источник | Год создания | Мощность мишени, кВт | Энергия пучка, МВт | | Поток $\times 10^{14} \text{ см}^{-2}\cdot\text{с}^{-1}$ | | Длит. имп., мкс | Частота, с^{-1} | Нейтронные каналы | Холодный заклад. | Приборы для рассеяния нейтронов | | | | | | | |
|--------------------------------|----------|--------------|----------------------|--------------------|---------|--|-------------|-----------------|--------------------------|-------------------|------------------|---------------------------------|-----------|--------|--------------|----|--|--|--|
| | | | | импульсный | средний | Дифракция | Малоугловое | | | | | Рефлектометрия | Неупругое | Другие | Полное число | | | | |
| Источники с коротким импульсом | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Великобритания | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Чилтон | ISIS | 1985 | 160 | 800 | 10 | $7 \cdot 10^{-3}$ | 20–30 | 50 | 14 | 2 | 5 | 2 | 2 | 6 | 1 | 16 | | | |
| США | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Аргонн | IPNS | 1981 | 7 | 450 | 3 | $2 \cdot 10^{-3}$ | 20–30 | 30 | 12 | 1 | 5 | 1 | 2 | 3 | 0 | 11 | | | |
| Лос-Аламос | MLNSC | 1985 | 50 | 800 | 7 | $5 \cdot 10^{-3}$ | 20–30 | 20 | 16 | – | 3 | 1 | 1 | 2 | – | 7 | | | |
| Япония | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Цукуба | KENS | 1980 | 3,5 | 500 | 1 | $7 \cdot 10^{-4}$ | 30–35 | 15 | 15 | 1 | 4 | 2 | – | 7 | 2 | 15 | | | |
| Источники с длинным импульсом | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Россия | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Дубна | ИБР-2 | 1984 | 2000 | – | 100 | $8 \cdot 10^{-2}$ | 320 | 5 | 14 | 1 | 5 | 1 | 2 | 3 | 1 | 12 | | | |
| Троицк | ИН-0.6 | 1998 | 30 | 300 | 3,5 | $9 \cdot 10^{-4}$ | 50 | 50 | 4 | – | 1 | – | – | 1 | – | 2 | | | |

личивается. Опыт работы пульсирующего реактора ИБР-2 — первого LPS — показал, что его возможности не уступают источникам SPS. Этот опыт может быть использован при конструировании LPS на протонных ускорителях. Такого типа источник начал работать в 1998 г. на линейном ускорителе Московской мезонной фабрики. Проект мощного LPS обсуждается в Лос-Аламосе.

В табл. 4 приведены интенсивные импульсные источники нейтронов, используемые для исследований конденсированных сред. Все указанные в таблице лаборатории имеют проекты развития своих источников с целью увеличения мощности и, соответственно, потоков нейтронов. Кроме того, имеются новые проекты, наиболее продвинутыми из которых являются AUSTRON, JHP, ESS и SNS. AUSTRON — это источник типа ISIS для стран средней Европы, JHP — японский адронный проект с интенсивным протонным ускорителем с энергией 1 ГэВ и средней мощностью, выделяемой на мишени, 1 МВт, ESS — это проект Европейского испарительного суперисточника (European Spallation Source) следующего поколения со средней мощностью 5 МВт, т.е. в 30 раз большей, чем ISIS, SNS — проект испарительного ис-

точника в Ок-Ридже (США) со средней мощностью 1 и 2 МВт. ESS — наиболее амбициозный проект в настоящее время. Некоторые параметры этого источника приведены в табл. 5 [51,52].

Таблица 5. Параметры Европейского испарительного суперисточника

| | | |
|--|-------------------|----------|
| Длина линейного ускорителя, м | 710 | |
| Энергия на выходе линейного ускорителя, ГэВ | 1,334 | |
| Окружность накопительного кольца, м | 163,4 | |
| Мощность в пучке, МВт | Мишень 1 | Мишень 2 |
| Частота повторения импульсов, Гц | 4–5 | 2 |
| Поток тепловых нейтронов в пике, $\text{см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$ | $2 \cdot 10^{17}$ | 10 |
| Средний поток тепловых нейтронов, $\text{см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$ | $7 \cdot 10^{14}$ | |

Для наглядности сравнения источников нейтронов и определения тенденций их развития на рис. 15 показаны наиболее известные источники разных типов.

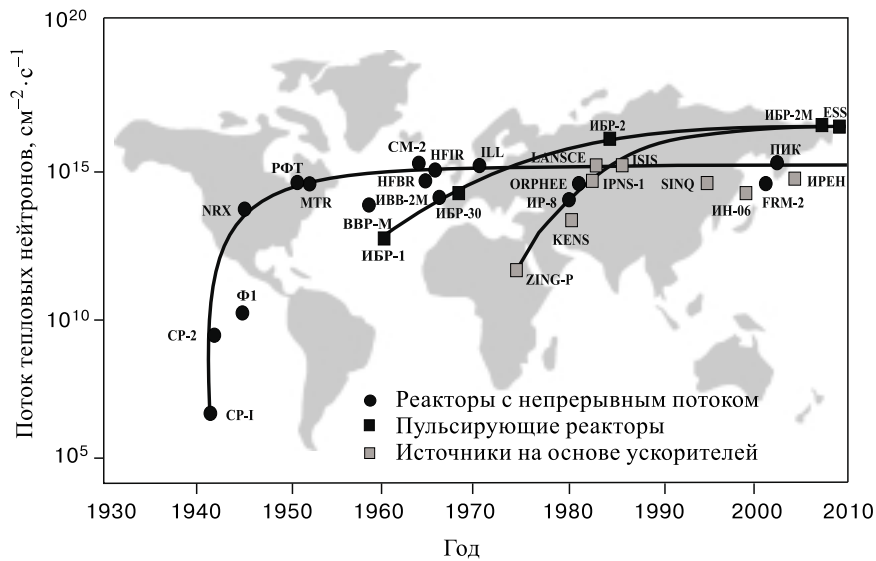


Рис. 15. Увеличение потока тепловых нейтронов по мере развития источников

12. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Итак, использование нейтронов для физических исследований развивается как в традиционных для нейтронной физики направлениях, так и в новых областях естествознания. На рис. 16 показано использование нейтронов в различных разделах наук по данным Европейской ассоциации по рассеянию нейтронов [4]. Современная тенденция состоит в расширении секторов, связанных с биологией, медициной, экологией, науками о Земле, т.е. с областями естествознания, с которыми человечество отождествляет науку XXI века. Учитывая то, что число задач в остальных секторах не уменьшается, можно заключить, что потребности в нейтронных исследованиях будут возрастать. Нет оснований думать, что ситуация изменится в ближайшие 20 лет. Особенно надо отметить постоянно нарастающую потребность в новых материалах, необходимых для обеспечения благосостояния и удобства жизни. Это обстоятельство должно способствовать распространению исследований с помощью нейтронов в область создания новых материалов (например, многослойных систем, полимеров и т.д.), а также в инженерный анализ в виде неразрушающего контроля изделий промышленности.

Ненейтронные методы исследования вещества, такие, как синхротронное излучение, не могут, по крайней мере в ближайшие десятилетия, стать полноценной заменой. Поэтому будет развиваться процесс совместного использования различных взаимодополняющих методов.

Характерной чертой современных нейтронных исследований является широкая международная кооперация. Все ведущие нейтронные центры в мире имеют международные программы пользователей. В силу уменьшения числа источников нейтронов эта тенденция в ближайшие годы будет усиливаться.

Главной проблемой нейтронной физики начала следующего столетия будет уменьшение числа источников нейтронов в результате вывода из эксплуатации отработавших свое время реакторов. Поэтому перед нейтронным сообществом стоят две задачи.

1. Более эффективное использование существующих источников нейтронов с помощью совершенствования методики, улучшения нейтроннопроводов, детекторов, окружения образца и т.д., а также путем совершенствования системы отбора экспериментов.

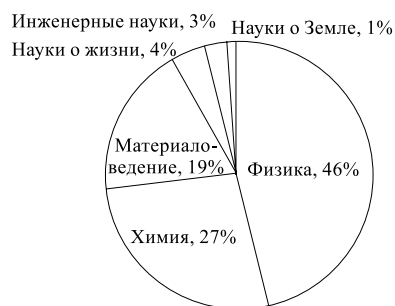


Рис. 16. Использование пучкового времени в различных науках по данным Европейской ассоциации по рассеянию нейтронов

2. Более активное развитие международной кооперации при создании источников нейтронов и взаимная поддержка в лоббировании проектов. Анализ показывает, что в ближайшие 20 лет было бы желательно иметь на каждом континенте в Северном полушарии дополнительно по одному новому источнику нейтронов следующего поколения типа ESS и 3–4 новых источника типа ISIS или HFR (ILL) в Европе и Америке.

В заключение автор выражает благодарность академику А.М.Балдину за предложение написать обзор, стимулирующие обсуждения и поддержку.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Франк И.М.** — Успехи физических наук, 1982, т.137, №1.
2. **Riste T.** — In: Neutron Beams and Synchrotron Radiation Sources. OECD — Megascience Forum, ISBN 92-64-14249-5, 1994.
3. **Aksenov V.L.** — In: Large Facilities in Physics (Ed. M.Jacob and H.Schopper). World Scientific, 1995, p.273.
4. Scientific Prospects for Neutron Scattering with Present and Future Sources. ESF, Strasbourg, ISBN2-903148-90-2, 1996.
5. **Richter D., Springer T.** — A Twenty Years Forward Look at Neutron Scattering Facilities in OECD Countries and Russia. ESF, Strasbourg, ISBN2-912049-03-2, 1998.
6. **Луциков В.И., Покотиловский Ю.Н., Стрелков А.В., Шапиро Ф.Л.** — Письма в ЖЭТФ, 1969, т.9, с.40.
7. **Алфименков В.П., Варламов В.Е., Васильев А.В. и др.** — Письма в ЖЭТФ, 1990, т.52, вып.7, с.984.
8. **Гельтенборт П., Несвижевский В.В., Карташов Д.Г. и др.** — Письма в ЖЭТФ, 1999, 70, 175.
9. **Strelkov A.V., Nesvizhevsky V.V., Geltenbort P. et al.** — Nucl. Instrum. Meth. in Phys. Res., 1999, v.A440, p.695.
10. **Багрянов Б.В., Карташов Д.Г., Кувшинов М.И. и др.** — Ядерная физика, 1996, т.59, с.1938.
11. **Багрянов Б.В., Карташов Д.Г., Кувшинов М.И. и др.** — Ядерная физика, 1999, т.62, с.844.
12. **Abov Yu.G., Krupchitsky P.A., Oratorsky Yu.A.** — Phys. Lett., 1964, v.12, p.25.
13. **Alfimenkov V.P., Borzakov S.B., Vo Van Thuan et al.** — Nucl. Phys., 1983, v.A398, p.93.
14. Time Reversal Invariance and Parity Violation in Neutron Reactions (Eds. Gould C.R., Bowman J.D. and Popov Yu.P.) World Sci., 1994.
15. **Hewat A.W., Hewat E.A., Bordet P. et al.** — In: Progress in High Temperature Superconductivity. (Ed. V.L.Aksenov, N.N.Bogolubov and N.M.Plakida) World Scientific, 1989, v.21, p.24.
16. **Putilin S.N., Antipov E.V., Chmaissem O., Marezio M.** — Nature (London), 1993, v.362, p.226.
17. **Aksenov V.L., Balagurov A.M., Sikolenko V.V. et al.** — Phys. Rev. B, 1997, v.55, p.1.

18. **Abakumov A.M., Aksenov V.L., Alyoshin V.A. et al.** — *Phys. Rev. Lett.*, 1998, v.80, p.385.
19. **Balagurov A.M., Sheptyakov D.V., Aksenov V.L. et al.** — *Phys.Rev. B*, 1999, v.59, p.7209.
20. **Sokolov E., Yeh F., Khokhlov A. et al.** — *J. Phys. Chem. B*, 1998, v.102, p.7091.
21. **Gordely V.I., Golubchikova L.V., Kuklin A.I. et al.** — *J. Progress in Colloids and Polymer Science*, 1993, v.93.
22. **Балагуров А.М., Миронова Г.М.** — *Сверхпроводимость: физика, химия, техника*, 1990, т.3, с.545.
23. **Аксенов В.Л., Балагуров А.М.** — *Успехи физических наук* 1996, т.166, с.955 (translation: *Physics-Uspeski*, 1996, v.39, p.897).
24. **Svergun D., Koch M., Serdyuk I.** — *J. Mol. Biol.*, 1994, v.240, p.66.
25. **Фан Л., Свергун Д.И., Волков В.В. и др.** — *Поверхность: рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования*, 1998, т.12, с.453.
26. **Serdyuk I., Ulitin A., Kolesnikov I. et al.** — *J. Mol. Biol.*, 1999, v.292, p.633.
27. **Spirin A., Baranov V., Polubesov G. et al.** — *J. Mol. Biol.*, 1987, v.18, p.119.
28. **Serdyuk I., Baranov V., Tsalkova T. et al.** — *Biochimie*, 1992, v.74, p.299.
29. **Garneiro G.** — *Phys. Rev. B*, 1998, v.57, p.6077.
30. **Lauter-Pasyuk V.V., Lauter H.J., Aksenov V.L. et al.** — *Physica B*, 1998, v.241, p.1095.
31. **Lauter-Pasyuk V.V., Lauter H.J., Aksenov V.L. et al.** — *Physica B*, 1999, v.267-268, p.149.
32. **Noyan I.C., Cohen J.B.** — *Residual Stress: Measurement by Diffraction* (New York: Springer, 1987).
33. **Holden T.M., Root J.H., Rogge R.B., Clarke A.P.** — *Tech. Suppl. CNS Bull.* 1995, v.16, p.1.
34. **Allen A.J., Hutchings M.T., Windsor C.G., Andreani C.** — *Adv. In Phys.*, 1985, v.34, p.445.
35. **David W.I.F.** — *RAL Commun. No. 86-068*, Chilton: RAL, 1986.
36. **Kupperman D.S., Majumdar S., Singn J.P.** — *Neutron News*, 1991, v.2, p.15.
37. **Bourke M.A.M.** — In: *Proc. NATO Advanced Research Workshop on Residual Stress*. Kluwer Acad. Publ., 1992, p.97.
38. **Priesmeyer H.G., Larsen J., Meggers K.J.** — *Neutron Res.*, 1994, v.2, p31.
39. **Aksenov V.L., Balagurov A.M., Bokuchava G.D. et al.** — *JINR Commun. No. E14-95-37*, Dubna, 1995.
40. **Hutchings M.T.** — *Neutron News*, 1992, v.3 (3), p.14.
41. **Taran Yu.V., Schreiber J., Mikula P. et al.** — In: *Proc. Europe Conf. on Res. Str. France*, 1996.
42. **Ivankina T.I., Nikitin A.N. and Ullemeyer K.** — *Journal of Earthquake Prediction Research*, 1995, v.4, p.471.
43. **Leiss Bernd.** — *Structure-Related Texture and Grain Fabric Investigations of Plastically Deformed Dolomite Rocks on the Southwestern Margin of the Damara Orogen (Namibia) — Texture Forming Mechanisms and their Kinematic Significance*. G(unknown char)tingen, 1996, 130.
44. **Иванкина Т.И., Клима К., Локаичек Л. и др.** — *Физика Земли*, 1999, т.5, с.29.
45. **Firk F.W.K.** — *Nucl. Instrum. Methods*, 1979, v.162, p.539.
46. **Шабалин Е.П.** — *Импульсные реакторы на быстрых нейтронах*. М.: Атомиздат, 1979; translation: *Fast Pulsed and Burst Reactors*. Oxford, New York: Pergamon Press, 1979).

47. **Аксенов В.Л.** — ЭЧАЯ, 1995, т.26, с.1449.
48. **Staviski Yu.Ya.** — PSI-Proc. 95-02, Villigen: PSI, 1995, v.1, p.64
49. **Finney J.L.** — Europhys. News, 1989, v.20 (9), p.119.
50. **Wilson C.C.** — Neutron News, 1995, v.6 (2), p.27.
51. ESS, Next Generation Neutron Source for Europe, 1997, v.1-3 ISBN 0902376500.
52. **Belushkin A.V.** — JINR Preprint E14-99-152, Dubna, 1999.