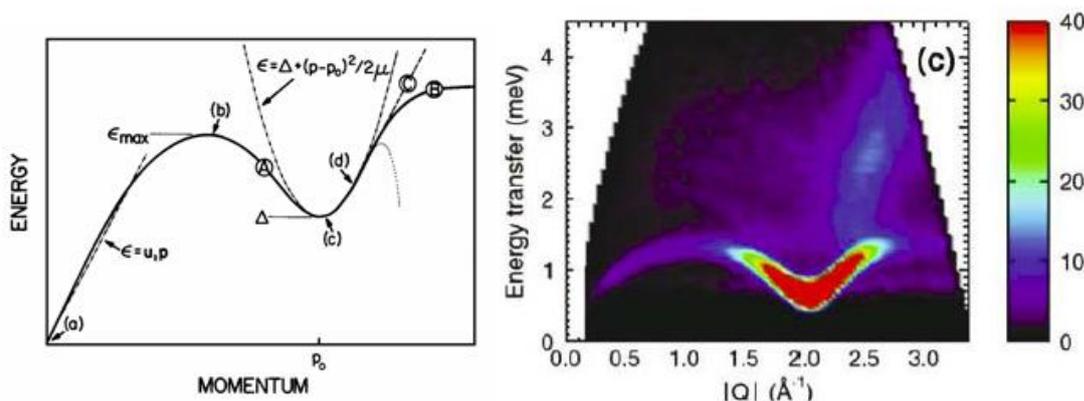


Нейтронная спектроскопия



Рабочая группа: П. А. Алексеев¹, С. Б. Вахрушев², А. С. Иванов³, Е. С. Клементьев⁴, Е. В. Москвин⁵.

¹Национальный Исследовательский Центр «Курчатовский институт», Москва, Россия

²Физико-Технический Институт им А.Ф. Иоффе РАН, С-Петербург, Россия

³Институт Лауэ-Ланжевена, Гренобль, Франция

⁴Институт Ядерных Исследований, Троицк, Москва, Россия

⁵Петербургский институт ядерной физики НИЦ «Курчатовский институт», Гатчина, Россия

Введение

Неупругое рассеяние нейтронов (НРН), методика, называемая также нейтронной спектроскопией, является одним из краеугольных камней для любого центра нейтронных исследований на основе высокопоточного нейтронного источника. По значению для исследований материалов, по числу приборов в ведущих нейтронных пользовательских центрах НРН можно сопоставить с таким широко используемым экспериментальным методом, как нейтронная дифракция. Если прочие нейтронные методики: дифракция, малоугловое рассеяние, рефлектометрия – дают информацию о структуре исследуемых систем (ядерной и магнитной), то НРН является прямым способом изучения динамики структурных и магнитных возбуждений.

В результате проведения экспериментов по НРН получают нейтронные спектры, заключающие в себе большой массив информации о свойствах и взаимодействиях исследуемых систем, особенно если измерения проводятся в широком диапазоне переданных энергий и импульсов с достаточно высоким разрешением, при варьировании внешних термодинамических параметров (температуры, давления, магнитного поля).

Динамические свойства играют очень важную роль в физике конденсированного состояния, химии, биофизике и биологии, науках о материалах, поэтому развитие методики НРН должно быть одним из приоритетных направлений работ на реакторе ПИК. Исходя из критического положения нейтронной спектроскопии в Российской Федерации, именно на НИРК ПИК могут

возлагать надежды все заинтересованные в ренессансе этой методики в стране.

Учитывая, что в ПИЯФ НИЦ КИ на базе данного источника нейтронов создается Международный центр нейтронных исследований, приборный парк на реакторе ПИК должен обеспечивать нужды международного сообщества исследователей, заинтересованных в получении экспериментальной информации о динамических свойствах материалов.

При создании приборной базы НРН необходимо учитывать мировой опыт, опираться на круг экспертов с опытом создания спектрометров разных типов, их применения для решения актуальных научных и прикладных задач.

Области научных применений нейтронной спектроскопии

НРН используется для исследования динамических свойств материалов. По значению для физики конденсированного состояния нейтронную спектроскопию можно сопоставлять с таким высокоинформативным методом, как нейтронная дифракция. Нейтронная спектроскопия и дифракция являются комплементарными методиками, их нельзя противопоставлять друг другу. Дифракция (как на основе ядерного, так и магнитного рассеяния нейтронов) позволяет определять кристаллические и магнитные структуры материалов, т.е. отвечает на вопрос: где находятся атомы (или как

ориентированы магнитные моменты). Дифракция также способна обнаруживать фазовые переходы в материалах. Но, как правило, дифракционные методы не позволяют понять механизмы явлений в конденсированных средах, природу фазовых переходов, причины формирования того или иного основного состояния системы. Найти ответы на эти более глубокие вопросы может помочь НРН, ибо этому методу доступны спектры элементарных возбуждений, как решеточных – фононов (ответ на вопрос: как атомы движутся), так и электронных и магнитных (магноны, экситоны и т. д.).

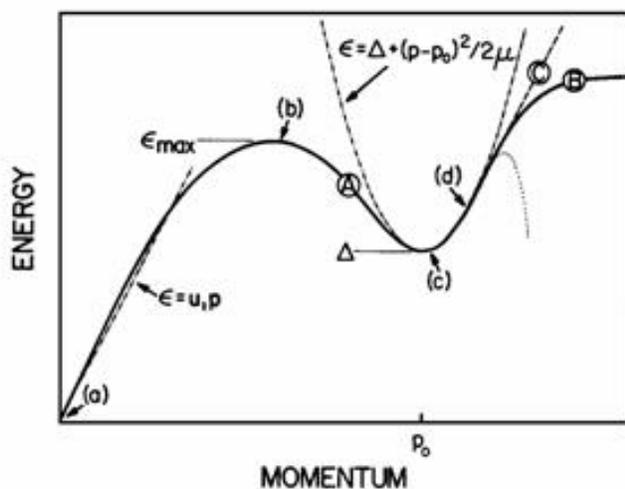
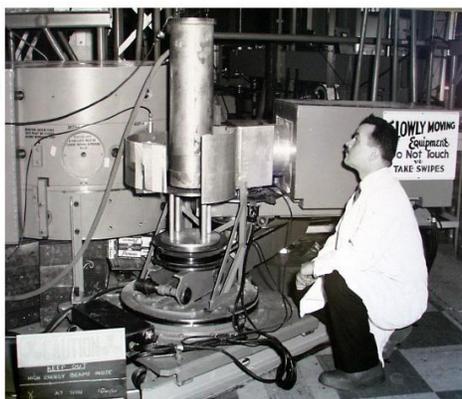


Рис. 42. Рождение концепции квазичастиц – постулирование Л. Д. Ландау закона дисперсии для возбуждений в жидком гелии. Этот закон, впоследствии блестяще подтвержденный НРН, позволил дать исчерпывающее феноменологическое описание большинства свойств сложного квантового объекта

Концепция квазичастиц – элементарных возбуждений разной природы – является самой плодотворной идеей в физике конденсированных сред XX века и одним из главных инструментов научного познания в этой области фундаментальной науки. Далеко

не случайно при присуждении Нобелевской премии за развитие методики нейтронных исследований конденсированных сред одна половина была присуждена за развитие нейтронной дифракции, а вторая – за НРН. Так, например, точное знание полной

Bertram N. Brockhouse - Facts



Source: Atomic Energy of Canada Limited, Chalk River, Ontario (CC BY-NC-ND 2.0)

Рис. 43. Важная историческая веха нейтронной спектроскопии – создание Бертрамом Брокхаузом первого ТАС-спектрометра. Этот спектрометр был расположен в Исследовательском центре Чок-Ривер (Канада), на нем удалось исследовать законы дисперсии фононных и магнитных возбуждений. За свои пионерские работы по развитию данной нейтронной методики Бертрам Брокхауз получил Нобелевскую премию

энергии и симметрии системы связанных атомов (кристалла), разницы между энергиями различных кристаллических фаз не дает возможности что-либо сказать о физических свойствах кристалла – теплоемкости, намагниченности, восприимчивости, тепловом расширении, теплопроводности, электросопротивлении и т. д. В то же самое время спектры элементарных возбуждений (законы дисперсии и плотности состояний возбуждений) позволяют правильно рассчитывать все основные физические свойства, определять механизм фазовых переходов. Тем самым дифракция в физике конденсированных сред является в значительной степени методом диагностики и поиска эффектов, а спектроскопия – методом выяснения сути явлений, движущих сил, объяснения физических свойств материалов. Две данные методики хорошо дополняют друг друга, если применяются в разумном сочетании. Существенный перекоп в пользу одной из них снижает научную результативность нейтронного источника.

Возбуждения, доступные НРН, отражают многие степени свободы изучаемых систем. К квазичастицам относятся фононы,

магноны (или спиновые волны в рамках классической теории магнетизма), волны спиновой плотности, парамагноны, спиноны, экситоны, ротоны, фазоны и т. д. Нейтронная спектроскопия является инструментом изучения возбуждений в молекулах (вибрационных, ротационных). Существуют многие виды одноузельных (одноионных) возбуждений: локальные моды колебаний примесных атомов в кристаллах, переходы между уровнями основных мультиплетов, расщепленных в кристаллическом электрическом поле, межмультиплетные переходы. НРН применяют для изучения критической динамики и физики фазовых переходов. Важную роль играет нейтронная спектроскопия в исследованиях явлений диффузии и релаксации как в твердых телах, так и в soft matter – полимерах, биологических объектах, в широком круге органических и неорганических соединений. Жидкости (в том числе и квантовые), эмульсии, суспензии, аморфные материалы и прочие неупорядоченные среды, квазикристаллы – все эти объекты имеют специфические виды возбуждений, проявляющиеся в нейтронных спектрах.

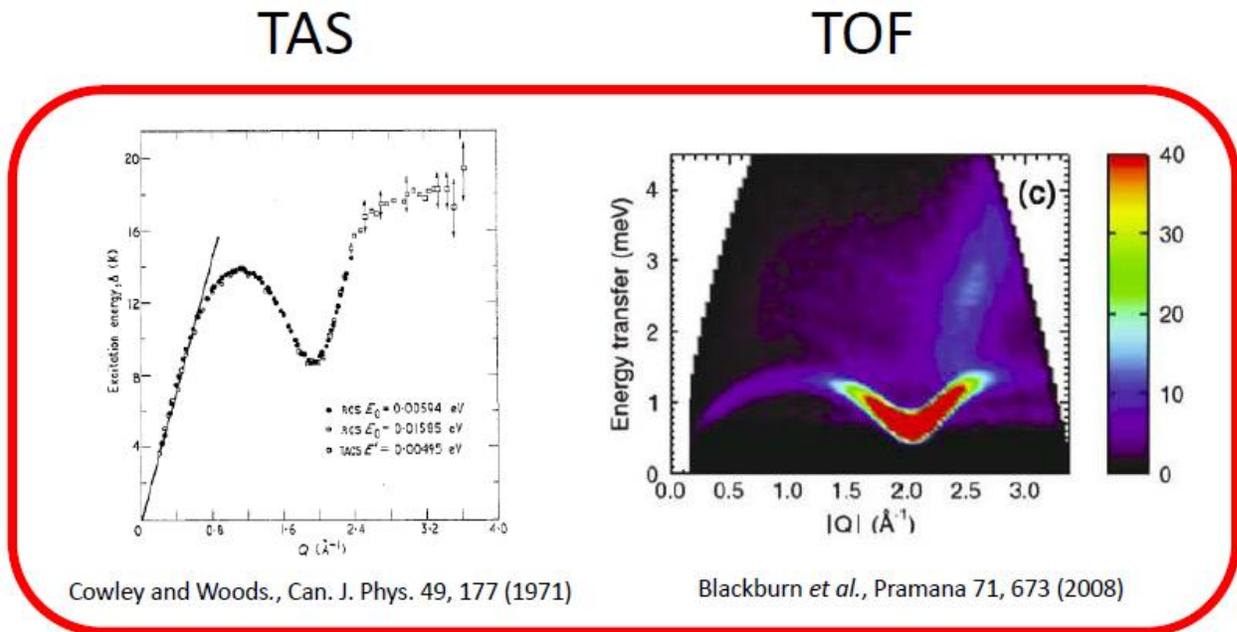


Рис. 44. Возбуждения в жидком гелии через призму НРН. Показаны результаты трехосной и времяпролетной спектроскопии. Помимо фононов и ротонов НРН способно выявлять относительно слабые дополнительные вклады

Очень большое значение НРН имеет для изучения динамики кристаллической решетки. Прямые измерения законов дисперсии и плотности фоновых состояний (в том числе и парциальных) позволили изучить потенциалы межионных взаимодействий, понять природу формирования многих материалов, объяснить аномалии их физических свойств. В частности, на основе спектров НРН удалось получить прекрасное количественное описание для сверхпроводников с фононным механизмом сверхпроводимости.

Незаменимыми оказались нейтронные спектрометры для изучения фазовых переходов, как структурных, так и магнитных, в выявлении тех мод, с которыми связана структурная или магнитная неустойчивость системы. Критическая динамика в физике

фазовых переходов – еще одна важная ниша для НРН. Ключевую роль нейтронная спектроскопия играет в исследовании магнетиков разных классов – ферро- и ферримагнетиков, антиферромагнетиков, зонных магнетиков и систем с волнами спиновой плотности, спиновых стекол, молекулярных магнетиков, металлоорганических магнетиков. Нейтронные спектры содержат информацию об эффективных обменных константах и прочих важных параметрах магнитных систем.

Для решения проблемы высокотемпературной сверхпроводимости (ВТСП) и исследования ВТСП разных типов (в частности, купратов) НРН применяют как один из самых многообещающих и высокоинформативных методов. Хотя проблема ВТСП пока не решена, уже накоплен

очень большой объем информации как о решеточной подсистеме, так и о магнитных возбуждениях, что может сыграть решающую роль в выяснении механизма сверхпроводимости. В настоящее время идут активные исследования магнитных и решеточных возбуждений в сверхпроводниках нового поколения на основе железа.

Трудно переоценить роль, которую играет НРН в исследовании систем с сильными электронными корреляциями. В результате измерений спектров магнитных возбуждений удалось выяснить природу необычных основных состояний, выявить возбуждения, специфические для кондо-систем, тяжелофермионного и промежуточно-валентного режимов. Были обнаружены многочисленные аномалии динамики решетки.

Низкоразмерные системы, в том числе системы с квазиодномерными спиновыми цепочками и квазидвумерными плоскостями

квантовых спинов, были объектами исследования методом НРН. При этом были получены фундаментальные результаты, обнаружены магнитные возбуждения новой природы.

Спектрометры обратного рассеяния и СЭ-приборы оказались незаменимы для исследования динамических процессов при низких переданных энергиях, что потребовало достижения предельно высокого энергетического разрешения (10^{-3} и 10^{-5} мэВ соответственно). Низкоэнергетическая динамика характерна для процессов релаксации, физических явлений с большими характерными временами и низкими частотами. Класс объектов, требующих изучения низкоэнергетической динамики, очень широк, при этом исследуются как структурные явления, так и явления в магнитной и электронной подсистемах

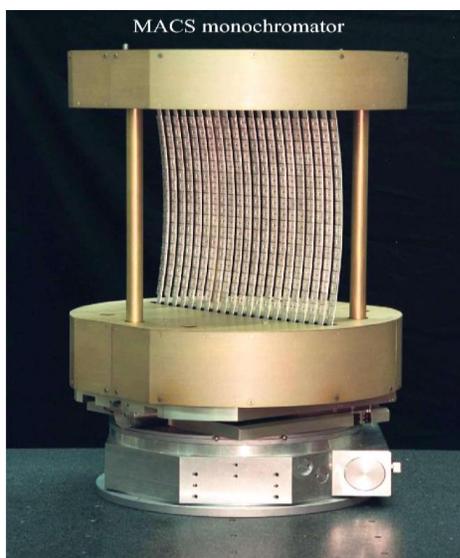


Рис. 45. Современный фокусирующий нейтронный монохроматор – основа для повышения светосилы TAS нейтронных спектрометров

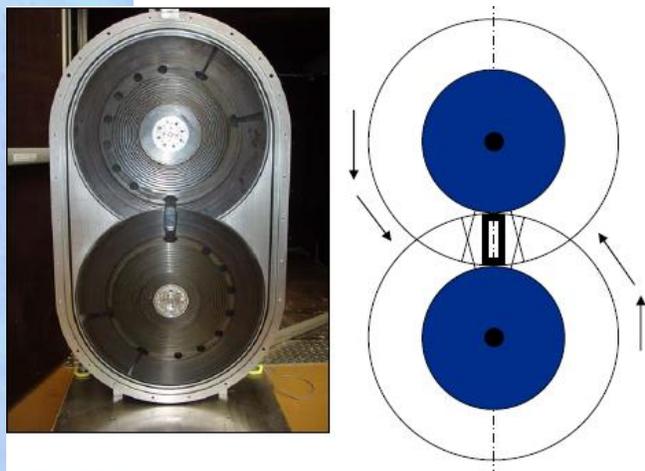


Рис. 46. Современный дисковый прерыватель (чоппер) – ключевой элемент нейтронного TOF-спектрометра

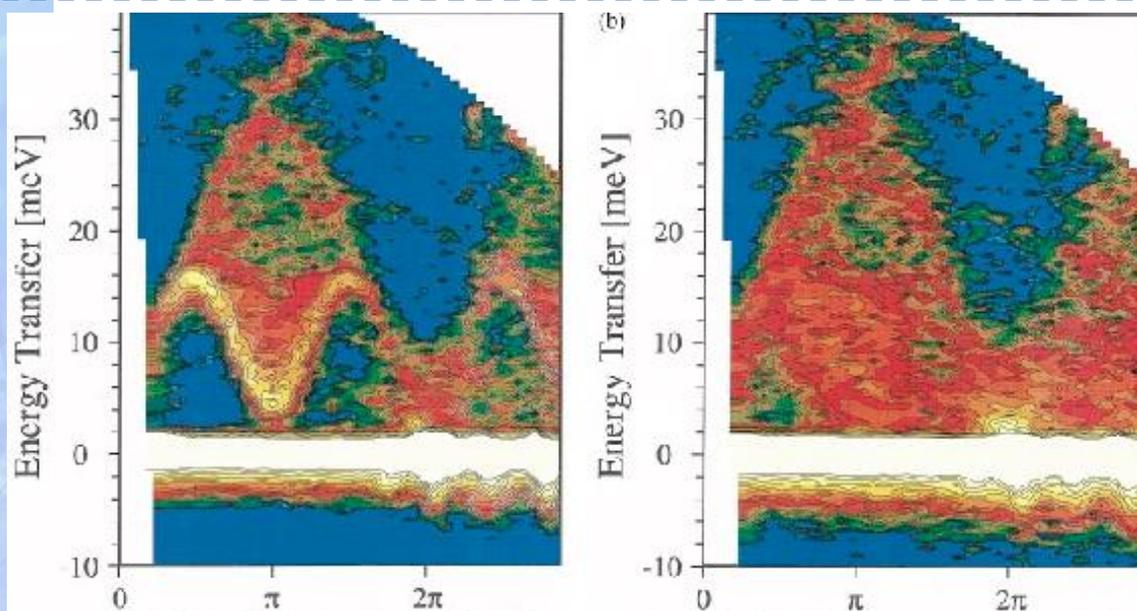


Рис. 47. Методом НРН был впервые обнаружен спиновый континуум выше хорошо определенных дисперсионных кривых магнонов. Этот результат стал важнейшим вкладом НРН в физику квантовых систем с низкой размерностью

Роль методики НРН в решении прикладных задач

Необходимо признать, что НРН в большей степени используется в фундаментальной науке, чем для непосредственного решения прикладного характера. Тем не менее в физическом материаловедении и инженерных науках, химии, биологии, медицине, индустрии наносистем роль НРН была и остается значительной.

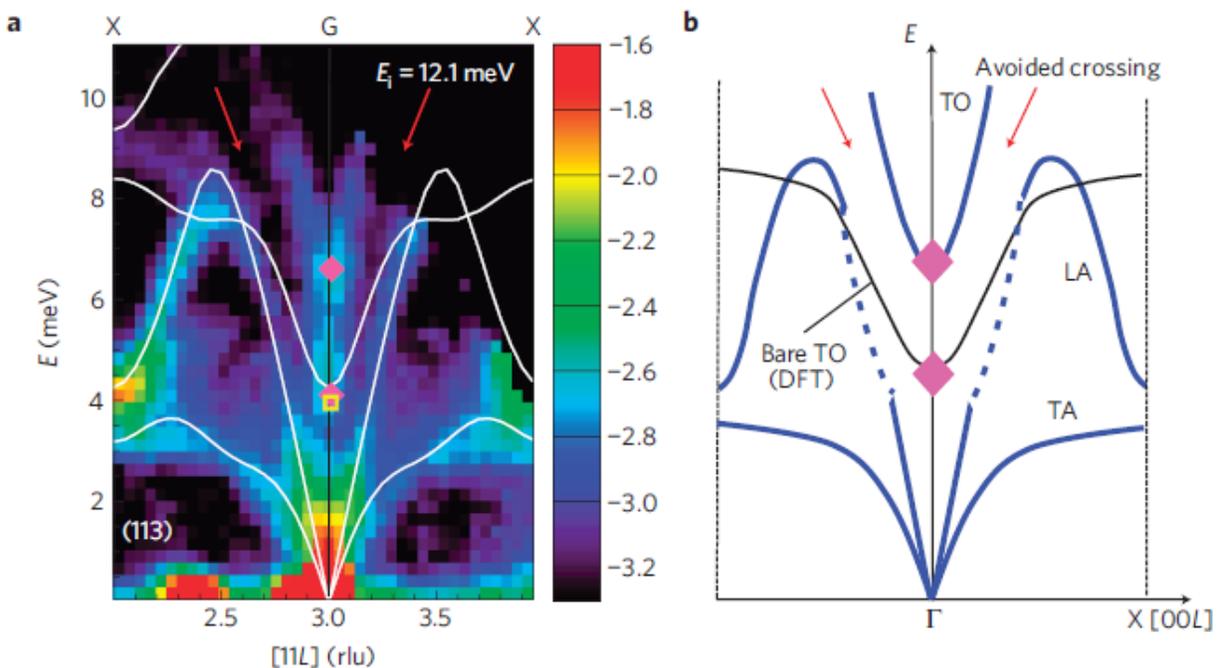


Рис. 48. Пример исследования динамики решетки важных для приложений термоэлектрических материалов при помощи НРН

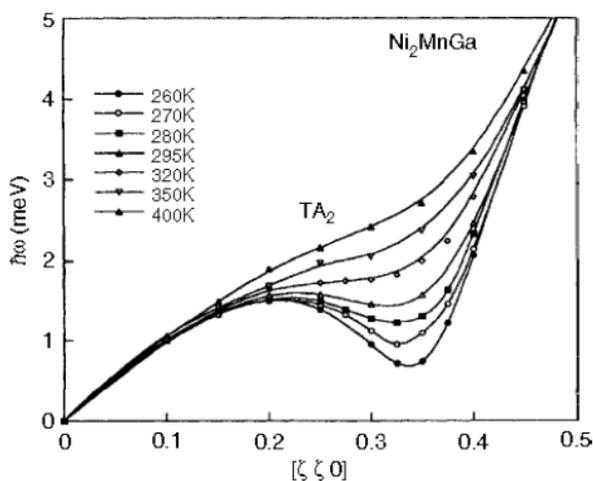


Рис. 49. Пример аномалии в динамике решетки – эволюция при изменении температуры мягкой фононной моды. Подобная мода наблюдается в релаксорах, в сплавах с памятью формы – важных технологических материалах

Исследование законов дисперсии фононных мод и плотности фононных состояний позволило оптимизировать многие функциональные материалы. В качестве примера можно привести изучение мягких фононных мод в сплавах с памятью формы (NiTi и сплавы на его основе) и улучшение функциональных свойств этих сплавов благодаря полученной информации. НРН активно использовалось и продолжает использоваться при оптимизации свойств ферроэлектрических систем, при исследовании и совершенствовании релаксоров, важных для технических приложений.

Изучение динамики молекул (молекулярная спектроскопия) играет значительную роль в химии, химических технологиях. НРН применяется в данных приложениях наряду с прочими спектроскопическими экспериментальными методиками. В некоторых случаях нейтронная спектроскопия является мощным аналитическим методом, поскольку определенные химические соединения (молекулы) легче идентифицировать по нейтронным спектрам, нежели по нейтронным или рентгеновским дифрактограммам, особенно в случае многофазных систем – смеси большого числа сложных соединений

В качестве важного примера можно привести исследование динамических свойств сплавов на основе железа – инваров, имеющих близкие к нулю значения коэффициента термического расширения. Помимо сплавов железа методом НРН были изучены прочие

перспективные инвары с механизмом формирования отрицательного вклада в термическое расширение, отличным от магнитного механизма, характерного для инваров на основе железа. Активно изучаются при помощи НРН перспективные термоэлектрики. Для ряда термоэлектриков (скуттерудитов) необходимо измерять локальные моды тяжелых атомов. В некоторых термоэлектриках актуально измерение динамики магнитной и электронной подсистем.

Системы с сильными электронными корреляциями: ВТСП и соединения с колоссальным магнетосопротивлением – также являются важными функциональными материалами, объектами исследования методом НРН.

Спектрометры высокого разрешения: СЭ-приборы и установки обратного рассеяния – часто применяются для изучения относительно медленных процессов релаксации и диффузии, например, в эмульсиях, суспензиях, гелях, в соединениях органических веществ, биологических объектах. Запрос на пучковое время на нейтронных спектрометрах со стороны научного сообщества в области soft matter очень велик, выделяемое время значительно меньше запрашиваемого. Перечисленные выше типы материалов далеко не исчерпывают все те объекты, при исследовании которых НРН способно дать ключевую экспериментальную информацию, за счет которой можно добиться значительного улучшения функциональных свойств материалов, совершенствования связанных с ними технологий.

Рис. 50. Методика НРН традиционно требовала образцов большого объема, как показанные на рисунке монокристаллы на основе слабо поглощающих нейтроны изотопов самария и бора. Бурный прогресс НРН позволяет уже сейчас использовать образцы относительно малого объема (десятые и сотые доли см^3)

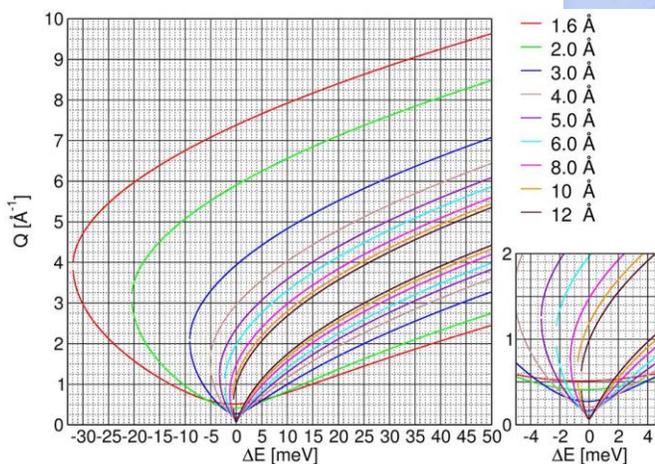


Приборы для НРН. Классификация

Общим свойством приборов НРН является регистрация энергии, потерянной или приобретенной нейтроном при взаимодействии с образцом, в большинстве случаев анализируется также и переданный нейтроном импульс, а для установок с пучками поляризованных нейтронов анализируется изменение спинового состояния. Дуализм «волна – частица», который применим к нейтронам как квантово-механическим объектам, приводит

к разнообразным конструктивным схемам нейтронных спектрометров. Наличие разнообразных спектрометров в ведущих нейтронных центрах связано с тем фактом, что невозможна унификация приборов НРН, поскольку для решения разных задач необходимы разные диапазоны переданных энергий, переданного импульса, энергетического разрешения и разрешения в импульсном пространстве.

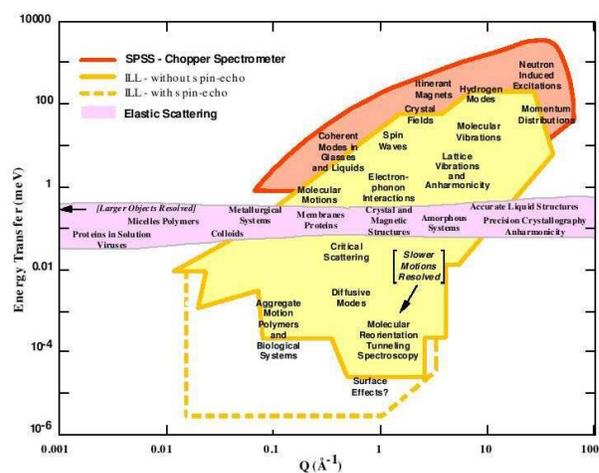
Рис. 51. Доступные для исследования на TOF-спектрометрах области в пространстве «энергия – импульс» в зависимости от длины волны нейтронов, падающих на образец. Кинематические ограничения связаны с необходимостью одновременного соблюдения законов сохранения энергии и импульса



Ни одна конструктивная схема не может обеспечить доступ к полному диапазону параметров, каждая схема соответствует определенному компромиссу

между разрешением и светосилой для требуемого (иногда довольно узкого) диапазона в энергетическом и импульсном пространстве.

Рис. 52. Области в пространстве «энергия – импульс», доступные для исследования при помощи неупругого нейтронного рассеяния. Подписанные типы возбуждений и физические явления размещены в наиболее типичных для них областях данного пространства



Основными типами установок для НРН являются: времяпролетные спектрометры (TOF), спектрометры на основе кристаллов, в частности трехосные (TAS), спектрометры

обратного рассеяния (backscattering в англоязычной литературе), спин-эхо-спектрометры (СЭ)

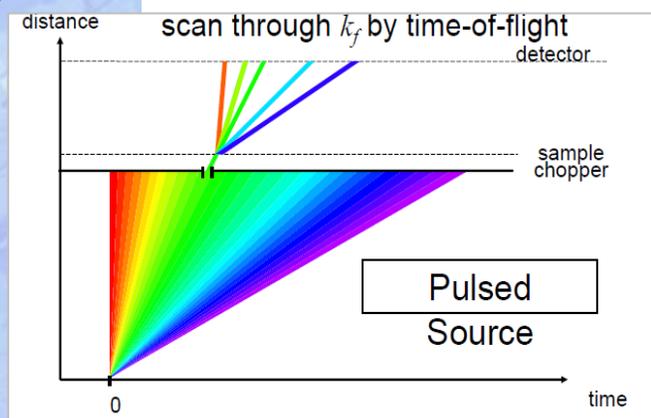


Рис. 43. Принцип действия TOF нейтронного спектрометра прямой геометрии. При монохроматизации первичного белого (полихроматического) импульсного пучка нейтронов теряется значительная доля интенсивности. Рассеянные образцом нейтроны попадают в детектор в разные моменты времени, если они передали или приобрели энергию при взаимодействии с образцом

TOF и TAS принято относить к приборам с обычным энергетическим разрешением, спектрометры обратного рассеяния и СЭ-установки – к приборам высокого разрешения. TAS используют волновые свойства нейтронов, зависимость угла брэгговского отражения от энергии нейтронов. TOF опираются на корпускулярные свойства нейтронов и тот факт, что медленные нейтроны (холодные, тепловые, горячие, эпитепловые) имеют низкие скорости, что делает регистрацию времени пролета относительно легкой задачей для современной электроники, а системы механических прерывателей способны задавать необходимую временную структуру

подтипы. Так, TOF-спектрометры могут иметь прямую и обратную геометрию (фиксируется начальная энергия E_i или конечная энергия E_f). Трехосные спектрометры делятся на классические TAS (с единственным анализатором) и TAS с мультиплицированием (множественные анализаторы), для которых разработано несколько конструктивных схем. Возможно создание гибридов между типами. Например, начальная энергия нейтронов на TOF-приборе может быть задана отражением нейтронного пучка от кристалла-монокроматора. Такие установки мы будем классифицировать как гибридные TOF-спектрометры. СЭ-опция может применяться на TAS для управления эллипсоидом разрешения в пространстве «энергия –



Рис. 54. Типичный TAS-спектрометр. Такие приборы очень гибки в исследовании возбуждений. Количество осей прибора, позволяющих варьировать параметры эксперимента, в реальности превышает число 3.

нейтронного потока.

СЭ-спектрометры используют прецессию магнитного момента нейтрона для определения изменения энергии при рассеянии. СЭ-установки во многих нейтронных центрах выносят в отдельную группу, отделяя их от TAS- и TOF-приборов из-за специфики методики, когда измеряемым параметром является сдвиг фазы прецессии спина. Некоторые основные типы делятся на

импульс» и решения некоторых (узких) научных задач. Такие установки мы будем классифицировать как TAS.

Для нейтронной спектроскопии при энергиях выше 1 эВ (эпитепловая область) применяют установки с фильтрами на основе специфических материалов, например актинидов. В контексте приборного парка реакторного комплекса ПИК эти установки обсуждаться не будут.

Есть еще одна классификация спектрометров НРН – по нейтронному спектру источника. Установки относят к «тепловым», «холодным», «горячим», если они получают нейтроны от источника, термализация нейтронов в котором происходит при нормальных условиях, низкой или высокой температуре соответственно. В случае исследовательских реакторов с экспериментальными каналами тепловые установки получают нейтроны непосредственно из замедлителя (обычной или тяжелой воды), холодные или же горячие установки требуют наличия специально создаваемых источников холодных и горячих нейтронов, основанных на охлаждении водородсодержащих (изотопы ^1H или ^2H)

материалов до криогенных температур либо нагреве углеродсодержащих материалов (например, графита) до высоких температур. Полноценный реакторный исследовательский комплекс, как правило, имеет источники нейтронов всех типов.

И, наконец, спектрометры НРН можно делить на две группы – приборы с пучками неполяризованных нейтронов и приборы, в которых используется техника поляризации нейтронных пучков и осуществляется анализ поляризации. Численно преобладает первая группа, но по степени востребованности (превышению числа запрашиваемых экспериментальных дней над доступными для использования) приборы обеих групп сопоставимы.

Конкуренция НРН и прочих методов исследования динамических свойств

В экспериментальной практике используется множество методов изучения динамических свойств материалов. Часть из них: электронный парамагнитный резонанс, ядерный магнитный резонанс, ферромагнитный резонанс, ультразвуковые методы – не сопоставимы с НРН по диапазону исследуемых энергий (частот), потому можно говорить об их комплементарности нейтронным методам в области низкочастотной динамики. Оптические методы, в частности в диапазоне инфракрасной части электромагнитного спектра, сопоставимы с НРН по области частот и способны давать информацию о решеточных и магнитных возбуждениях. Однако для оптических методов существенными ограничениями являются доступность только центра зоны Бриллюэна, степень прозрачности материала для

излучения, правила отбора и симметричные ограничения на видимые моды. Для нейтронов таких ограничений нет, они способны сканировать возбуждения в широком диапазоне значений переданного импульса в обратном пространстве.

В качестве реальных конкурентов НРН можно рассматривать активно развиваемые в последние годы на синхротронных источниках 3-го поколения методы неупругого рассеяния гамма-квантов (IXS, на русском языке аббревиатуры пока нет – данная методика на синхротронах в РФ отсутствует, RIXS – резонансное неупругое рассеяние гамма-квантов) и ядерного резонансного неупругого рассеяния (ЯРНР). Метод IXS по сути подобен методике TAS в НРН, подходит для изучения законов дисперсии и плотности состояний фононов. Энергетическое разрешение IXS не зависит от

переданной энергии, но при этом его величина сопоставима с достигаемой на тепловых приборах TAS в области передачи энергии 15–30 мэВ (что хорошо для исследований с большой передачей энергии) и, соответственно, уступает примерно порядок разрешению холодных TAS. Лоренцевская форма спектральной функции вызывает дополнительные трудности. IXS пока подходит для исследования относительно простых модельных систем (элементов), опирается на теоретические модели для законов дисперсии, по совокупности возможностей данный метод в настоящее время уступает нейтронной спектроскопии в области изучения динамики решетки. Метод RIXS также пока имеет довольно низкое энергетическое разрешение и хорошо подходит только для исследования электронных состояний в атомах.

Синхротронные методики (IXS) применялись для измерения магнитных возбуждений с очень жестким магнитным спектром. Их интерпретация в значительной степени опирается на модельные расчеты. Эти тестовые измерения продемонстрировали низкое, по сравнению с нейтронной спектроскопией, разрешение, потому сильная позиция НРН в изучении магнитной динамики, в особенности для исследования магнитных спектров при низких переданных

энергиях и с достаточно высоким разрешением (0,1 мэВ), выглядит незыблемой, по крайней мере в ближайшем десятилетии.

ЯРНР для соединений, содержащих некоторые изотопы (мессбауэровские изотопы, в частности ^{57}Fe), способно успешно конкурировать с НРН. Особенно хорош этот метод для прямого измерения парциальных вкладов элементов на основе мессбауэровских изотопов в плотность фононных состояний. Однако для широкого класса объектов и главное – для детального исследования законов дисперсии ЯРНР не подходит, НРН остается незаменимой методикой.

В целом можно утверждать, что нейтронная спектроскопия (в силу объективных физических причин) пока испытывает меньшее давление со стороны бурно развивающихся синхротронных методик (на фоне ошеломляюще быстрого прогресса источников синхротронного излучения), чем такие методы, как нейтронная дифракция и малоугловое рассеяние нейтронов. Другими словами, многие задачи структурных исследований, решаемые в настоящее время на источниках нейтронов, могут быть также успешно решены на синхротронных источниках. Доля таких задач в области изучения динамических свойств значительно меньше.

Современное состояние НРН в Российской Федерации

На территории нынешней Российской Федерации методика НРН ранее (примерно до первой половины 70-х гг. прошлого века) развивалась практически синфазно с ее развитием в мире. Так, например, уже в 1960

г. в Курчатовском институте (точнее, в ИАЭ им. И. В. Курчатова) проводились измерения нейтронных спектров на одном из первых в мире TOF-спектрометров, в конце 60-х были начаты измерения на TAS-спектрометре.

Первые установки для НРН работали на исследовательских реакторах ИРТ и МР. Затем нейтронные спектрометры появились в прочих нейтронных центрах на территории РФ (в Гатчине, Дубне, Заречном). Физики нашей страны внесли важный вклад в изучение динамики решетки и магнитной динамики многих систем, являлись полноценными членами международного сообщества нейтронных спектроскопистов. Однако к настоящему времени как число физиков, владеющих данной методикой, так и число инструментов, предназначенных для НРН, стало критически малым. В одном из наиболее массовых в мире сегментов нейтронных спектрометров – спектрометрах по времени пролета (TOF) после демонтажа КДСОГ-М (ИБР-2, ОИЯИ) и ликвидации холодного спектрометра НРН на ГЭК-10 (ИР-8, НИЦ КИ) в нашей стране остались только приборы относительно низкой светосилы: NERA-PR (ИБР-2, ОИЯИ) на 100-метровой пролетной базе и DIN-2PI (ИБР-2, ОИЯИ). Установка обратной геометрии DN-12 (ИБР-2, ОИЯИ), имеющая опцию для НРН с низкой светосилой, используется главным образом для структурных исследований.

Необходимо отметить, что TOF-дифрактометры в Российской Федерации иногда называют спектрометрами, а измеряемые на них дифрактограммы – спектрами. В данном случае слова «спектр», «спектральный» отражают только метод регистрации дифрактограмм по времени пролета нейтронов – т. е. то, что непосредственно в эксперименте измеряется временной (но не энергетический!) спектр. Разумеется, по физическому назначению подобные установки без анализа передачи

энергии нейтроном не являются спектрометрами НРН.

TAS-спектрометры НРН разработки 70-х гг. прошлого века – АТОС в НИЦ КИ (реактор ИР-8) и Нейтрон-3 в ПИЯФ РАН (источник ВВР-М) устарели на несколько десятилетий и практически не используются в последние годы для нейтронной спектроскопии. Прекратил работу и устаревший TAS-спектрометр на Урале в Институте реакторных материалов (реактор ИВВ-2М).

Установки обратного рассеяния (backscattering) как класс отсутствовали на территории РФ, что является существенным недостатком приборного парка нейтронного рассеяния страны, поскольку закрыт доступ не только к важному интервалу переданных энергий и импульсов, но и ко многим явлениям, требующим измерения спектров с высоким разрешением (до уровня нескольких мкэВ).

Появление развитого парка нейтронных приборов для нейтронной спектроскопии на исследовательском реакторном комплексе ПИК отдалено от текущего момента временным интервалом не менее 6–7 лет. Можно сделать предположение, что приблизительно до 2020 г. на ПИКе (особенно для внешних пользователей) не будет возможностей измерять спектры НРН. Полноценные установки для НРН (сильной их стороной будут большие потоки эпитепловых нейтронов) могут заработать в ближайшее десятилетие на нейтронном комплексе в ИЯИ РАН в Троицке при условии значительного повышения нейтронных потоков на источниках ИН-06 и РАДЭКС, что требует

повышения энергии и тока протонного драйвера.

Баланс между исследованиями структуры и динамики материалов, как мы видим, в нашей стране весьма существенно сместился в сторону структурных исследований. Такое положение дел свидетельствует о нездоровом состоянии дел в нейтронном рассеянии. Частично столь сильный дисбаланс объясняется относительной простотой создания дифрактометров, как на стационарных источниках нейтронов, так и на импульсных. В частности, на импульсных источниках для дифракции нет необходимости в анализе энергии нейтронов, в какой-либо их монохроматизации. Дифрактометры в целом заметно дешевле, проще в разработке, эксплуатации, обработке полученных данных. Отсутствие в стране высокопоточного реактора класса HFR (ILL, Гренобль, Франция) при наличии легководных реакторов с относительно низкими потоками способствовало развитию методик,

адаптированных к низкой плотности нейтронного потока. Именно по перечисленным выше причинам возник столь явный (вопиющий) дефицит спектрометров НРН в России. Соотношение дифрактометров к спектрометрам в РФ в настоящее время близко к 10 : 1. Такое положение свидетельствует о критическом состоянии дел в нейтронном рассеянии.

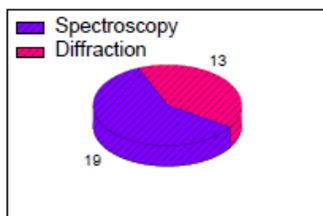
Для сохранения в Российской Федерации культуры нейтронной спектроскопии и возможности в будущем интенсивного развития этой мощной и продуктивной экспериментальной методики исключительно важно в ближайшее время построить и запустить в эксплуатацию спектрометры НРН на реакторе ПИК. Речь идет не только о миссии спасения этой области науки в РФ за счет усилий сотрудников и средств ПИЯФ НИЦ КИ, но и о прагматичном выборе ПИЯФ НИЦ КИ – занятии им заведомо очень плодотворной ниши лидирующего центра нейтронной спектроскопии в стране.

НРН в мировых нейтронных центрах

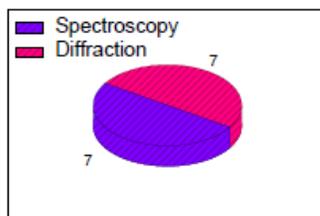
Нейтронная спектроскопия широко представлена во всех основных мировых центрах нейтронного рассеяния, как на основе стационарных источников, так и на основе импульсных источников нейтронов типа spallation (испарительно-скальвающая реакция). Доля установок НРН в приборном парке составляет десятки процентов, иногда превышает долю нейтронной дифракции. Так, на высокопоточном реакторе HFR в ILL (Гренобль, Франция) отношение числа спектрометров НРН к числу нейтронных

дифрактометров в настоящее время 19 : 13, на реакторе FRM-II в MLZ (Гархинг, Германия) – 10 : 11. На spallation-источниках наблюдается близкая картина: 7 : 7 на источнике SNS в ORNL (Окридж, США), 6 : 7 на JSNS в J-PARC (Токай, Япония), 8 : 12 на источниках ISIS-1 и 2 в RAL (Чилтон, Великобритания). На первой стадии планируемого Европейского нейтронного источника ESS (Лунд, Швеция) соотношение спектрометров к дифрактометрам составит 7 : 8

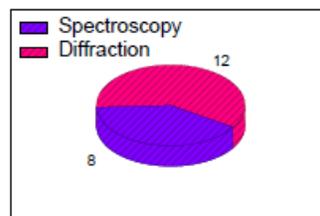
HFR, Institute Laue Langevin



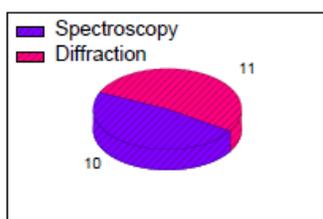
SNS, Oak Ridge



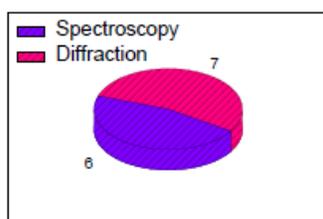
ISIS-1&2, RAL



FRM-II, MLZ



JSNS, J-PARC



IBR-2, JINR

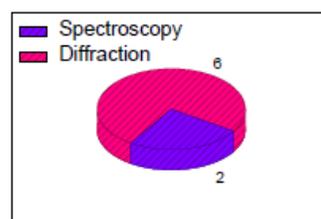
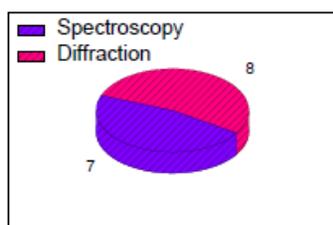


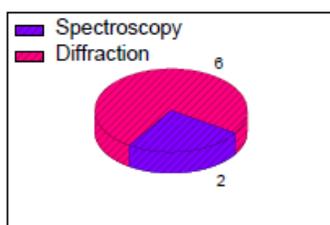
Рис. 55. Иллюстрация соотношения между установками для нейтронных исследований структурных и динамических свойств материалов в ведущих нейтронных центрах

Как мы видим, поддержке и развитию НРН в мире уделяется очень много внимания, что обусловлено большим интересом мирового пользовательского сообщества и большим числом заявок на эксперименты. Как правило, запрашиваемое количество дней

пучкового времени (как минимум) двукратно превышает число распределяемых дней на установках НРН в ведущих центрах. Для некоторых приборов в нескольких нейтронных центрах превышение достигает 4–5 раз.

ESS, 1st stage

IBR-2, JINR



Russian Federation

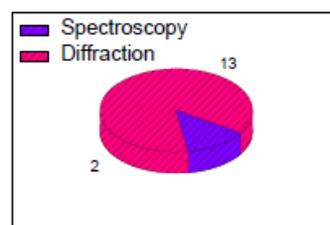


Рис. 56. Соотношение между спектрометрами и дифрактометрами для будущего источника ESS, российского источника ИБР-2 и в целом по РФ

Ведущими нейтронными центрами далеко не исчерпывается приборный парк НРН. На источниках средней и малой интенсивности также эксплуатируют нейтронные спектрометры. Методика НРН требовательна к плотности нейтронных потоков, потому на источниках нейтронов

низкой интенсивности предпочитают строить дифрактометры и установки малоуглового рассеяния нейтронов, доля установок НРН низка. Что касается источников среднего класса по интенсивности, зачастую на них доля НРН близка к таковой в ведущих нейтронных центрах.

Проекция опыта в области НРН, накопленного в Институте Лауэ – Ланжевена, и мировые тенденции в области нейтронных источников и приборной базы

Институт Лауэ – Ланжевена (ILL, Гренобль, Франция) в настоящее время является неформальной мировой столицей нейтронного рассеяния. Этот статус обусловлен наличием самого высокопоточного (на настоящий момент) стационарного исследовательского реактора HFR с экспериментальными каналами для нейтронного рассеяния как в зале реактора, так и в нейтронных залах, рекордным числом установок и проводимых в течение года экспериментов. В этом институте опыт проведения экспериментов по нейтронному рассеянию, проектирования, строительства и оптимизации приборов и их отдельных компонент накапливался в течение более чем 40 лет с участием ведущих специалистов из многих стран, в том числе и из России. Общий приборный парк ILL для исследований конденсированных сред превышает 40 установок (не считая дополнительные опции), при этом методика НРН представлена многочисленными установками основных типов.

НИРК ПИК по большому счету сопоставим с реактором в ILL по плотности

нейтронных потоков и числу каналов (строго говоря, ПИК превосходит реактор HFR по мощности и ожидаемой плотности потоков, но это превышение не является кратным, а может достигать нескольких десятков процентов для горизонтальных каналов). По-видимому, реактор HFR будет эксплуатироваться еще приблизительно полтора десятка лет, что подразумевает примерно 10 лет параллельной эксплуатации HFR и ПИКа, после чего пальма неоспоримого первенства среди нейтронных исследовательских центров на основе стационарных реакторов перейдет к НИРК ПИК.

Как будущий преемник реактора HFR в ILL, ПИК в ПИЯФ НИЦ КИ мог бы скопировать сложившуюся на настоящий момент и протестированную временем общую структуру приборного парка ILL и распределение по типам для установок НРН. Многие приборы НРН в ILL доведены до совершенства, конструктивные схемы и параметры приборов были оптимизированы на основе моделирования и реальных тестов и экспериментов. Копирование принципов компоновки отдельных (наиболее удачных)

приборов ILL допустимо, но слепое копирование распределения приборного парка ILL по типам не является лучшим решением. Дело в том, что приборный парк в ILL формировался в течение многих десятилетий и лишь в последние годы данный нейтронный центр начал испытывать очень острую конкуренцию со стороны самых мощных импульсных источников типа spallation. Конкуренция с источниками первого поколения (IPNS в ANL и LANSE в LANL, США) была незначительной, ISIS-1 (RAL, Великобритания) в решении некоторых актуальных задач успешно конкурировал с ILL, что можно увидеть при сопоставлении числа публикаций в высокорейтинговых журналах. Запущенные в эксплуатацию уже в XXI столетии мощные импульсные источники SNS (США) и JSNS (Япония) для многих

приложений нейтронного рассеяния превосходят ILL. Источники типа spallation быстро совершенствуются, предел этой технологии (в отличие от реакторной) еще не достигнут, приборы на данных источниках также не исчерпали ресурсы повышения эффективности, потому степень конкуренции со стороны будущих spallation-источников ожидается очень высокой. Планируемый к запуску в Европе источник ESS в ближайшее десятилетие многократно превзойдет по плотности нейтронного потока современные источники типа spallation и, по-видимому, станет флагманом нейтронного рассеяния в мире. Дополнительно отметим, что уже действует новый источник ISIS-2 (RAL), скоро будет введен в эксплуатацию мощный spallation-источник CSNS в КНР.

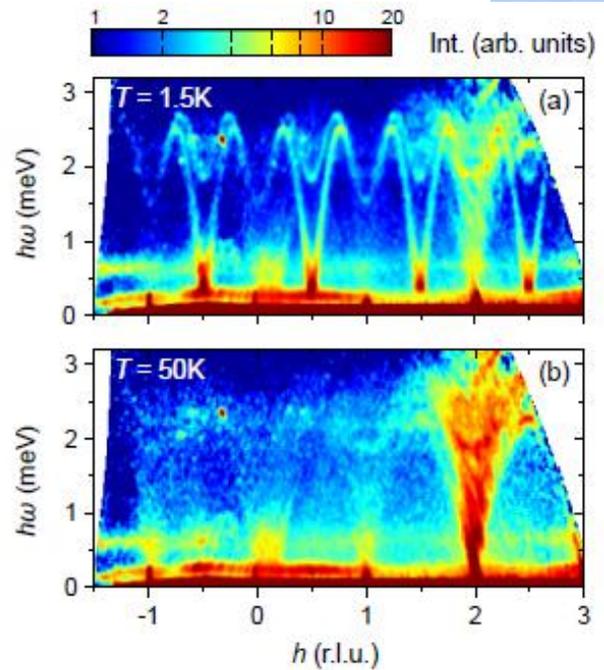


Рис. 57. Сегмент детектора современного нейтронного TOF-спектрометра. Эффективный телесный угол TOF-установок может составлять несколько единиц стерadian, при этом площадь позиционно-чувствительного детектора может достигать 50 м^2

На современных импульсных источниках созданы TOF-спектрометры высокой эффективности, настоящие «сканеры возбуждений» в четырехмерном пространстве «энергия – импульс» (три его компоненты). Эффективность этих приборов обусловлена как

мощностью источника, так и большим эффективным углом детектирования. При этом площадь позиционно-чувствительных детекторов с пространственным разрешением порядка 1 см составляет 30–50 м²

Рис. 58. Типичные для современных время-пролетных «сканеров возбуждений» карты интенсивности нейтронного рассеяния. Такие карты способны визуализировать дисперсию многих мод любой природы, обнаружить вклады от ранее неизвестных мод возбуждений



Согласно результатам моделирования, тестам и первым экспериментам, при переходе к принципу мультиплицирования импульсов для TOF-спектрометров на источниках нейтронов с длинным импульсом (ESS) и при достаточно длинной пролетной базе (будут использованы нейтронотводы высокого качества) эффективность спектрометров НРН может быть повышена в 10–25 раз по сравнению с лучшими современными TOF-спектрометрами. По-видимому, ESS и источники подобного класса будут обладать

«сканерами возбуждений», которые заведомо превзойдут самые совершенные приборы на стационарных реакторах при решении задач измерения возбуждений в больших областях пространства «энергия – импульс».

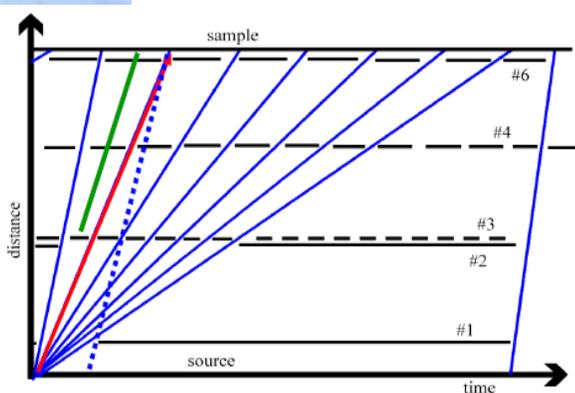


Рис. 59. Иллюстрация принципа мультиплицирования для TOF-спектрометров. Один длинный нейтронный импульс может быть превращен в 5–10 относительно узких импульсов, которые позволяют исследовать возбуждения без перекрытия временных окон при достаточно длинных пролетных базах

Необходимо отметить, что ожидаемый выигрыш (согласно проведенному моделированию) при реализации принципа TOF-мультиплицирования на длинноимпульсных источниках для методик дифракции и малоуглового рассеяния в 3–5 раз меньше, чем для методики НРН для холодных нейтронов, и приблизительно в 2 раза меньше для тепловых нейтронов. Напомним, что для НРН выигрыш может составлять 25 раз. Применение так называемой time-event-технологии регистрации нейтронов, ранее разработанной в физике высоких энергий для больших детекторных коллабораций на коллайдерах (БАК в ЦЕРН и не только), является важным

фактором повышения эффективности TOF-спектрометров на импульсных источниках нейтронов. Тем самым TOF нейтронная спектроскопия будет наиболее привлекательна и конкурентоспособна на источниках типа ESS. Дифракция и малоугловое рассеяние на стационарных источниках нейтронов будут испытывать меньшее давление со стороны ESS, чем TOF-спектроскопия. Разумеется, TAS-спектроскопия в ее классическом виде не будет реализована на импульсных источниках типа ESS и для нее не ожидается столь революционное увеличение эффективности, как для TOF-методики.

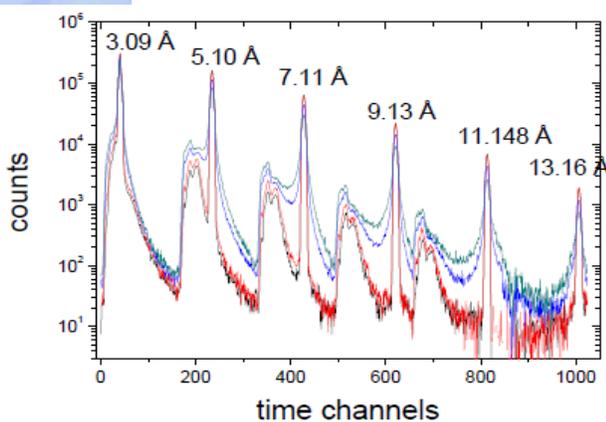


Рис. 60. Один из первых примеров нейтронных спектров, полученных при использовании мультиплицирования для TOF-спектрометров. Указаны значения длин волн для отдельных импульсов

Явным преимуществом TAS-спектроскопии по сравнению с TOF является избирательность при сканировании определенных областей в обратном пространстве и большая гибкость. Времяпролетные установки способны быстро накапливать данные для очень больших объемов в четырехмерном пространстве «энергия – импульс», но зачастую только незначительная доля полученной информации является полезной, иногда речь идет буквально о единицах процентов. В случае TAS-спектроскопии экспериментатор может таким образом программировать сканы, что практически 100 % измерений будут сделаны в нужных областях пространства «энергия – импульс». Это предполагает высокую квалификацию экспериментатора и наличие предварительной информации о наиболее интересных областях исследуемого пространства, наличие определенного и обоснованного плана измерений. Тем самым в руках профессионала TAS-спектрометр может выиграть у высокосветосильного TOF-спектрометра для решения многих задач. Например, при помощи TAS можно эффективно измерить зависимость интегральной интенсивности узкого резонансного пика от температуры или магнитного поля, что в случае TOF потребует больших усилий и времени. Для поддержки измерений на TAS важно использование предварительного моделирования нейтронных спектров. В случае широкого поиска в обширных областях пространства «энергия – импульс» (fishing for excitation в англоязычной литературе) систематический и плановый характер экспериментов на TAS уже не дает значимого выигрыша.

Большим преимуществом TAS-спектрометров является возможность изменения разрешения в импульсном и энергетическом пространстве за счет изменения расстояний от монохроматора до образца, от образца до анализатора и от анализатора до детектора. Кроме того, возможно изменение угловой расходимости пучков при использовании коллиматоров и разной степени фокусировки монохроматором и анализатором. TOF-приборы имеют фиксированную геометрию, подстройка расстояний под нужды конкретной задачи исключена. Изменение фиксированной конечной (или начальной) энергии на TAS, по сути, сопоставимо с возможностью изменения начальной энергии нейтронов на TOF-спектрометрах прямой геометрии, но в целом конструктивная схема TAS намного гибче.

Представляется разумным для ПИКа значительно изменить баланс между TAS- и TOF- спектрометрами в пользу первых, не обращая внимания на нынешнее соотношение этих двух основных типов приборов в ILL. По-видимому, задачи общей характеристики материалов методикой НРН в широких областях пространства «энергия – импульс» в будущем будет удобнее решать на «сканерах возбуждений» – высокопроизводительных TOF-установках на источниках нейтронов типа spallation (ESS, SNS, JSNS, ISIS-1 и 2, CSNS). Детальные исследования возбуждений разной природы в определенных областях пространства «энергия – импульс», в определенных (как правило, высокосимметричных) направлениях в обратном пространстве и в определенных его точках оптимально будет проводить на TAS-приборах на ПИК. Тем самым ПИЯФ НИЦ КИ

может быть привлекателен для высококвалифицированных групп исследователей, которые способны составить и обосновать четкий план измерений, позволяющих решать актуальные задачи при

Инфраструктурное обеспечение

Как показывает опыт работы мировых нейтронных центров, инфраструктурное обеспечение является исключительно важным элементом приборного парка. Это понятие включает в себя оборудование вокруг образца, обеспечивающее создание необходимых внешних условий: температуру от десятков мК до примерно 1 500 К, магнитные поля до 15 Т в вертикальной ориентации, высокие гидростатические давления до нескольких ГПа (при больших размерах образца) и возможные сочетания этих факторов. Наряду с этим огромную роль играет гибкая и надежная, и по возможности унифицированная, система управления приборами, сбора, первичной обработки и визуализации экспериментальной информации. Без надежной и согласованной работы этих элементов приборы фактически оказываются мало кому нужной грудой железа и пластика. Решение задач создания инфраструктуры должно осуществляться одновременно с созданием собственно парка нейтронных приборов, только в этом случае

изучении ограниченного объема в обратном пространстве, при точной настройке параметров спектрометров, реализованных по «гибким» схемам.

можно добиться необходимого для успешной работы уровня унификации по посадочным местам и обвязке оборудования для создания условий на образце, его электронного интерфейса и интеграции в систему управления и сбора данных.

Спецификой НРН с точки зрения созданий условий на образце является относительно большой объем образца по сравнению с прочими методиками, особенно с нейтронной дифракцией. Как правило, специализированное оборудование для создания высоких давлений для дифракции не подходит для нейтронной спектроскопии. По этой причине рекордные значения давлений не могут быть реализованы в случае НРН, но потребность в высоких давлениях тем не менее высока. Что касается низко- и высокотемпературного оборудования, устройств для создания стационарных или импульсных магнитных полей, НРН может быть легко унифицировано с прочими методиками.

Критерии и факторы выбора спектрометров для нейтронного реактора ПИК

Выбор приборов для нейтронной спектроскопии следует осуществлять исходя из многих факторов и обстоятельств, перечислим только основные.

1. Необходимо выбрать наиболее перспективные научные и прикладные области, рассматривая как фундаментальную физику конденсированных сред, химию, биологию, многочисленные приложения, включая материаловедение и наноиндустрию, для решения актуальных задач в которых следует выбирать и оптимизировать приборы.
2. Важно сформировать собственное узнаваемое «лицо» для НИРК ПИК в области нейтронной спектроскопии, обеспечив его безусловное лидерство в Российской Федерации и лидерство в мире по отдельным направлениям экспериментальных исследований методом НРН.
3. Приборы НРН должны использовать особенности и сильные стороны реактора ПИК, его отличия от прочих источников нейтронов в стране и в мире.
4. Важна комплементарность приборным паркам бурно прогрессирующих нейтронных центров на основе импульсных источников нейтронов, поиск и занятие ниши, в рамках которой можно с ними конкурировать, необходимо избегать конкуренции с ними в оптимальных для них нишах.
5. Необходимо учитывать конкуренцию со стороны существующих и проектируемых источников нейтронов типа spallation – наиболее прогрессирующего класса высокопоточных нейтронных источников, для которых созданы и будут создаваться высокоэффективные «сканеры возбуждений», конкурировать с которыми будет невозможно в большинстве задач НРН, требующих обзора обратного пространства.
6. Необходимо стремиться к унификации используемого оборудования и готовых технических решений, это может касаться узлов монохроматоров, анализаторов, столов образца, детекторных систем.
7. ТОФ-спектроскопия плохо унифицируется с прочими (кристалльными) типами приборов, она требует наличия и развития довольно сложной технологии прерывателей (дисковых и прерывателей Ферми), специфической электронной ТОФ-аппаратуры. На первый взгляд, создание и поддержка этих технологий ради функционирования одного или двух спектрометров кажется не оптимальным решением, замена ТОФ на TAS позволит иметь более унифицированный приборный парк, тем более что в области ТОФ-методики очень трудно конкурировать с импульсными источниками нейтронов (возможно отставание более чем на порядок). С другой стороны, для столь крупного нейтронного центра, как комплекс на базе реактора ПИК, очень важно иметь опыт в нейтронных исследованиях методом ТОФ, практику проектирования приборов этого типа, использования систем прерывателей, планирования экспериментов, обработки огромных массивов данных, получаемых на

Приборная база реакторного комплекса ПИК

позиционно-чувствительных детекторах с большой площадью. Во всяком случае пользовательское сообщество РФ выиграет от наличия TOF-спектрометра на ПИКе, физики-экспериментаторы будут лучше интегрированы в мировое сообщество нейтронной спектроскопии.

8. Нейтронно-оптические системы должны проектироваться с учетом особенностей и требований, специфических для каждого конкретного спектрометра, необходимо учитывать возможность размещения нескольких приборов или нескольких опций (вторичных спектрометров) на одном нейтроноводе.
9. Спектрометры должны использовать тепловые, холодные и горячие нейтроны, при этом в реакторном зале будут находиться приборы на тепловых и горячих нейтронах, а в нейтроноводном – преимущественно приборы на холодных нейтронах.
10. С учетом ограниченной свободной площади в реакторном и в нейтроноводном залах особенно привлекательными являются компактные конструктивные схемы.
11. Приборный парк НРН на ПИКе лучше создавать в две очереди. В первую очередь нужно включать приборы наиболее востребованных типов, для которых в ПИЯФ НИЦ КИ и в РФ имеется опыт создания основных узлов. Сложные приборы, требующие развития многих новых для РФ нейтронных технологий, следует перенести во вторую очередь. В частности, спектрометры обратного рассеяния со специфическими анализаторами большой площади не могут быть созданы в РФ в короткое время. Большие трудности ожидаются также при создании TOF-спектрометров с системой сфазированных дисковых прерывателей и позиционно-чувствительными детекторами большой площади. Тем не менее хотя бы один TOF-прибор важно ввести в состав приборного парка как можно раньше. Оптимально включить в первую очередь 6 приборов для НРН. Количество приборов второй очереди пока не определено. Основой второй очереди могут быть СЭ-установки, спектрометры обратного рассеяния.
12. Важна оптимизация расходов на создание экспериментальных установок, выбор недорогих решений при прочих равных (по возможности без ущерба для главных параметров) условиях, возможность постепенного улучшения и наращивания установок при последовательных инвестициях в течение нескольких лет. В частности, с учетом дефицита и дороговизны изотопа ^3He газовые детекторы большой площади, распространенные в мировой практике, не являются решением, которое может применяться на НИРК ПИК массово. Следует отдавать предпочтение другим способам увеличения эффективности спектрометров (применению фокусировок кристаллами, анализаторам большой площади и компактным детекторам).

Общий состав приборного парка НРН на реакторе ПИК

В настоящее время представляется, что общее число установок для НРН на реакторе ПИК (включая и возможные сменные опциональные вторичные спектрометры) должно быть не меньшим, чем 10. Приборный парк для нейтронной спектроскопии может состоять из установок всех основных типов: ТАС, ТОФ, СЭ и спектрометра(ов) обратного рассеяния. В ее составе должны быть установки на тепловых, холодных и горячих нейтронах, установки на неполяризованных и поляризованных нейтронных пучках. В приборном парке реактора ПИК для НРН будут доминировать кристалльные спектрометры: классические ТАС, ТАС с мультиплицированием, кристалльный прибор на горячем источнике нейтронов на основе монокроматорного блока и блока анализатора с нейтронными фильтрами и, возможно, анализаторами. ТОФ-спектрометр будет незначительной частью общего парка

приборов, созданной для поддержания культуры и технологии использования прерывателей и анализа по времени пролета на стационарном источнике нейтронов в РФ. Впервые в истории российского нейтронного рассеяния будет создан спектрометр обратного рассеяния. СЭ-установки, предназначенные для регулярных измерений в интересах нейтронной спектроскопии высокого разрешения, также будут новым для РФ сегментом приборного парка стационарного реактора.

Установки для НРН будут размещены в реакторном и нейтронноводном залах реактора ПИК. Для всех нейтронных спектрометров будет доступно оборудование для создания условий на образце – низких (до 30 мК) и высоких температур, высоких магнитных полей (вертикальные поля не менее 15 Т), высоких давлений (несколько ГПа для образцов большого объема).

Приборы первой очереди для нейтронной спектроскопии

К первой очереди отнесены наиболее востребованные приборы, многие из которых могут быть созданы в РФ в сравнительно короткий срок на основе существующих технологий. Необходимо подчеркнуть, что далеко не обязателен одновременный ввод в эксплуатацию всех приборов первой очереди.

Ряд приборов второй очереди может быть запущен ранее части приборов первой очереди. Без спектрометров, отнесенных к первой очереди, реактор ПИК не сможет конкурировать с прочими нейтронными центрами в области НРН и обслуживать нужды пользовательского сообщества.

Рис. 61. Пример современного гибридного прибора, сочетающего функции ТАС- и СЭ-спектрометров



В состав первых семи приборов входят:

В зале горизонтальных каналов

1. ТАС-спектрометр на тепловых нейтронах на неполяризованном нейтронном пучке с применением техники мультиплицирования на вторичном спектрометре (блок анализатора типа FlatCone). Этот прибор будет самым светосильным ТАС-прибором в мире на стационарном источнике нейтронов. Область применения – исследование магнитных и решеточных возбуждений;

2. ТАС-спектрометр на пучке поляризованных нейтронов. На данном приборе будет исследоваться не только изменение энергии и импульса, но и изменение спинового состояния. Для повышения светосилы прибора на нем будет применяться фокусировка при помощи кристаллов монохроматоров и анализаторов. Необходимо обеспечение быстрой смены монохроматора, при этом должно быть доступно не менее 3-х разных

монохроматоров. Область применения – изучение магнитной динамики материалов;

3. кристалльный спектрометр на горячем источнике нейтронов. Данный прибор будет использовать фокусирующий монохроматор (с возможностью выбора между несколькими монохроматорами) и блок вторичного спектрометра на основе нейтронных фильтров и кристаллоанализаторов (возможно, с геометрией, близкой к использованной на спектрометре IN1-Lagrange в ILL). Необходимо предусмотреть возможность смены блока вторичного спектрометра на опцию с высокой светосилой и умеренным энергетическим разрешением на основе комбинации нейтронных фильтров. Область применения – динамика решетки, магнитные возбуждения, молекулярная спектроскопия.

В нейтронном зале ПИКа

1. TAS-спектрометр на холодных нейтронах на пучке неполяризованных нейтронов с фокусирующими монохроматором и анализатором. Область применения – исследование магнитных и решеточных возбуждений;
2. TOF многороторный спектрометр на холодных нейтронах на пучке неполяризованных нейтронов. Область применения – исследование магнитных и низкочастотных решеточных возбуждений твердых тел, динамических свойств soft matter;
3. гибрид TAS-спектрометра и СЭ-спектрометра на пучке поляризованных нейтронов. Это прибор будет способен работать как обычный TAS на поляризованных нейтронах без СЭ-опции, а также как гибридный прибор с возможностью управления эллипсоидом разрешения и

Заключение

Нейтронная спектроскопия может стать одной из самых сильных сторон реактора ПИК и Международного центра нейтронных исследований на его базе. Следует выделить под приборы для НРН долю каналов, сопоставимую с таковой в прочих ведущих нейтронных центрах, при этом нет сомнений, что нейтронные спектрометры будут высоко востребованы российским и международным сообществом пользователей. Реактор ПИК с его высокой плотностью нейтронного потока и большим числом каналов сам по себе, методом грубой силы, не способен гарантировать такое же лидерство, какое долгое время имел Институт Лауэ – Ланжевена с его высокопоточным реактором

проведения измерений с намного лучшим разрешением в импульсном и энергетическом пространствах, чем это возможно на классическом TAS. Область применения – исследование магнитных и решеточных возбуждений с высоким разрешением, критической динамики, процессов диффузии и релаксации.

4. Спин-эхо спектрометр. Этот прибор будет способен обеспечить исследование динамики в биологических объектах, полимерах, и др. на временной шкале 10^{-12} – 10^{-8} сек. Его применение не ограничивается материаловедением и биологией, но может быть расширено в область магнитных фазовых переходов, критической динамики, процессов магнитной диффузии и релаксации.

HFR. Только разумный выбор спектрометров, их оптимизация для решения определенных задач могут обеспечить лидерство для реактора ПИК в отдельных направлениях экспериментальных исследований методом НРН. Ожидаемое тотальное доминирование «сканеров возбуждений» – TOF-спектрометров с огромными детекторными системами на spallation-источниках нейтронов (ESS, SNS, JSNS, ISIS-1 и 2, CSNS) для обзорных исследований материалов методом НРН делает бессмысленным создание большого парка TOF-спектрометров на реакторе ПИК. Следует избегать прямой конкуренции с будущим лидером – ESS и иметь комплементарный ему приборный парк.

Основой приборного парка НРН на реакторе ПИК будут кристалльные приборы – TAs разных типов. Эти спектрометры будут наиболее эффективны в руках профессионалов – пользователей, нацеленных на получение экспериментальной информации в определенных частях обратного (импульсного) пространства и способных извлечь пользу из гибкой конфигурации кристалльных спектрометров, оптимизации энергетического и импульсного разрешения.

На приборах НРН на ПИКе прежде всего будут выполняться задачи, имеющие самостоятельное, а не вспомогательное значение. Тем не менее, для решения ряда задач спектроскописты ПИЯФ НИЦ КИ и пользователи этой методики на реакторе ПИК, могут участвовать в экспериментах в прочих ведущих нейтронных центрах (в частности, на существующих spallation-источниках и на будущем ESS), изоляция спектроскопического

сообщества реактора ПИК от мирового сообщества должна быть исключена. Приборная база ПИКа должна давать возможность готовить специалистов, которые могут правильно планировать и проводить спектроскопические эксперименты на приборах разных типов, расположенных как на стационарных, так и на импульсных источниках нейтронов. По этой причине разнообразие принципов и конструктивных схем нейтронных спектрометров на ПИКе может являться его сильной стороной. После запуска в эксплуатацию приборов первой очереди реактора ПИК, как ранее, так и в настоящее время ИЛЛ, будет лучшим в мире нейтронным центром на основе стационарного реактора для проведения экспериментов методом НРН.