

Для чего нужны нейтроны



Гатчина – 2007

Может ли развитая страна существовать без современного высокопоточного источника нейтронов?



Открытие нейтрона стало одним из наиболее значительных событий в развитии физики XX века. Его поиски продолжались более 15 лет, а драматическая ситуация, связанная с обнаружением нейтрона, отмечена в докладе автора открытия Джеймса Чэдваика¹ на X Международном конгрессе по истории науки в Итаке «Нет необходимости говорить о моем удовлетворении и восторге в связи с тем, что продолжительные поиски нейтрона, в конце концов, увенчались успехом. Решающий шаг, однако, был сделан другими. В этом нет ничего необычного: прогресс познания является результатом деятельности многих умов и рук. И все же я не могу избавиться от чувства, что должен был бы добиться цели быстрее. Я мог бы выдвинуть в свое оправдание ряд извиняющих обстоятельств: нехватку оборудования и т. д. Но, несмотря на все это, я должен признать, хотя бы для себя, что не смог достаточно глубоко продумать свойства нейтрона, особенно те из них, которые наиболее ясно свидетельствуют о его существовании. Утешаю себя тем, что всегда гораздо труднее сказать первое слово о предмете, каким бы очевидным он впоследствии не оказался, чем последнее слово».

Тем не менее, последнее слово в изучении характеристик нейтрона и его практическом использовании не сказано до сих пор, хотя, начиная с 1933 г. развитие нейтронной физики продолжалось с возрастающей интенсивностью.

Нейтрон как инструмент для исследования материи

Нейтроны представляют собой идеальный инструмент для исследования различных веществ, высокая эффективность которого обусловлена их уникальными свойствами:

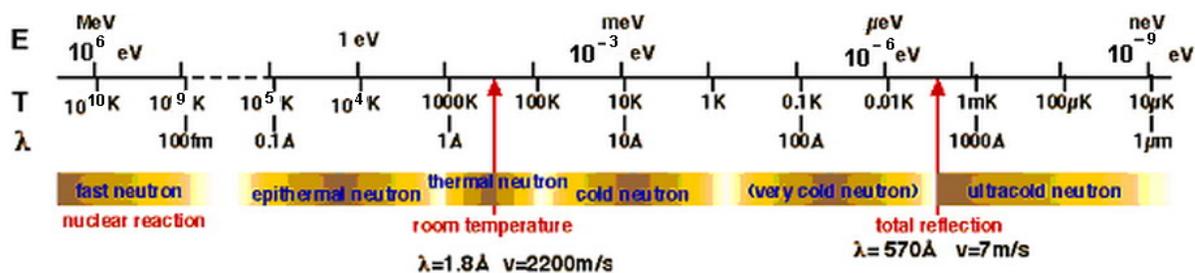
- **Нейтроны электрически нейтральны**, поэтому их проникающая способность значительно превышает проникающую способность электронов и даже рентгеновских лучей. Это позволяет проводить неразрушающий контроль деталей и материалов, находящихся в экстремальных условиях, например, внутри ячейки сверхвысокого давления, в высокотемпературной печи или при низкой температуре внутри криостата.
- Рентгеновское излучение рассеивается электронной оболочкой атомов, в то время как **нейтроны взаимодействуют с ядрами**, размер которых намного меньше размера оболочки. Следовательно, нейтроны позволяют с большей точностью определять положение атомов.
- **Нейтроны обладают магнитным моментом**, и это свойство делает их практически единственным инструментом для «прямого» исследования магнитной структуры вещества.

¹ ЧЭДВИК (Чадвик) Джеймс (Chadwick James) (20.X.1891 — 24.VII.1974) — английский физик-экспериментатор, член Лондонского королевского об-ва (1927). Р. в Боллингтоне. Окончил Манчестерский и Кембриджский ун-ты. В 1932 году, исследуя свойства таинственных «бериллиевых лучей», возникающих при облучении бериллия альфа-частицами, показал, что они являются потоком электрически нейтральных частиц — нейтронов (Нобелевская премия, 1935).

- Энергия тепловых нейтронов близка к энергии коллективных возбуждений в кристаллах, например, колебаний атомов и их магнитных моментов (фононов и магнонов), поэтому нейтроны являются уникальным инструментом для изучения межатомных взаимодействий и динамики атомов внутри вещества.
- Нейтроны взаимодействуют с атомными ядрами, а не с электронами оболочки атомов в отличие от рентгеновских и гамма-лучей. Это обуславливает их большую "контрастность" (чувствительность) в различении атомов близко расположенных в таблице Менделеева элементов. Особенно это относится к легким элементам (водород, кислород и др.), идентификация которых в телах, содержащих тяжелые элементы, почти невозможна рентгеновскими и гамма-методами.
- Дальнейшее понижение энергии нейтронов приводит к тому, что их дебройлевская длина волны начинает значительно превышать размеры атомов и становится сравнимой с размерами гигантских молекулярных образований и наноструктур. Таким образом, холодные нейтроны позволяют проводить структурные исследования сложнейших образований, начиная от биологических соединений до наночастиц.

Как элементарная частица, имеющая определенную массу, нейтрон обладает одновременно и волновыми свойствами, т.е. может дифрагировать на атомах, из которых состоит изучаемое вещество (аналогично дифракции света на оптических решетках). Если вы хотите увидеть объект, вы должны его осветить. Если вы хотите рассмотреть детали объекта, вы должны его осветить "светом" с длиной волны, равной или меньшей расстояния между интересующими вас деталями объекта. Для большинства твердых тел (или конденсированных сред) такие интересующие физиков детали (например, узлы кристаллической решетки) расположены на расстоянии нескольких ангстрем (10^{-8} см) друг от друга. Это означает, что для изучения структуры твердых тел нужен "свет" с длиной волны порядка ангстрем. Такой "свет" существует. Это – рентгеновские и гамма-лучи, а также пучки элементарных частиц, например, нейтронов.

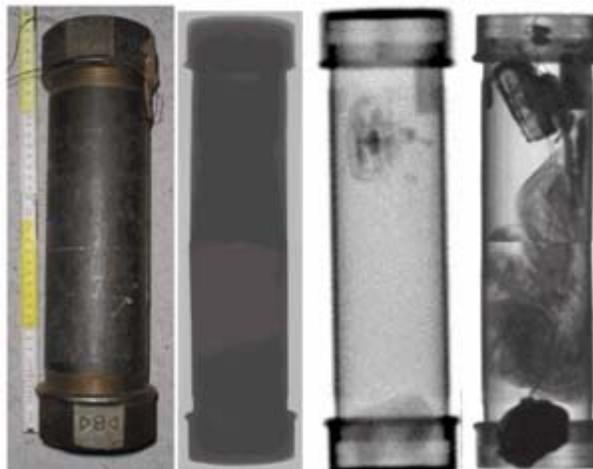
Соответствие между энергией нейтрона E ($E=mv^2/2$) и его дебройлевской длиной волны λ ($\lambda=h/mv$) показано на рисунке (здесь m – масса, v – скорость нейтрона, h – постоянная Планка).



Современные источники нейтронов — ядерные реакторы — дают тепловые нейтроны широкого диапазона энергий с максимумом в области 0,06 эВ. Соответствующая этой энергии дебройлевская длина волны нейтронов ($\sim 1 \text{ \AA}$) соизмерима с величиной межатомных расстояний в молекулах и кристаллах, на этом основан метод структурной нейтронографии. Соизмеримость же энергии тепловых нейтронов с энергией тепловых колебаний атомов и молекулярных групп, а также магнитных возбуждений в кристаллах и жидкостях обеспечивает оптимальное использование неупругого рассеяния нейтронов для их изучения

методами нейтронной спектроскопии. Для исследования структур с размерами 10 \AA (1 нанометр) и более необходимо дальнейшее понижение энергии (охлаждение) нейтронов.

Структурная нейтронография – один из основных современных методов структурного анализа вещества (вместе с рентгеновским структурным анализом и электронографией). Геометрическая теория дифракции всех трех видов излучений – рентгеновских лучей, электронов, нейтронов – одинакова, но физическая природа взаимодействия их веществом различна, что определяет специфику и области применения каждого из методов.

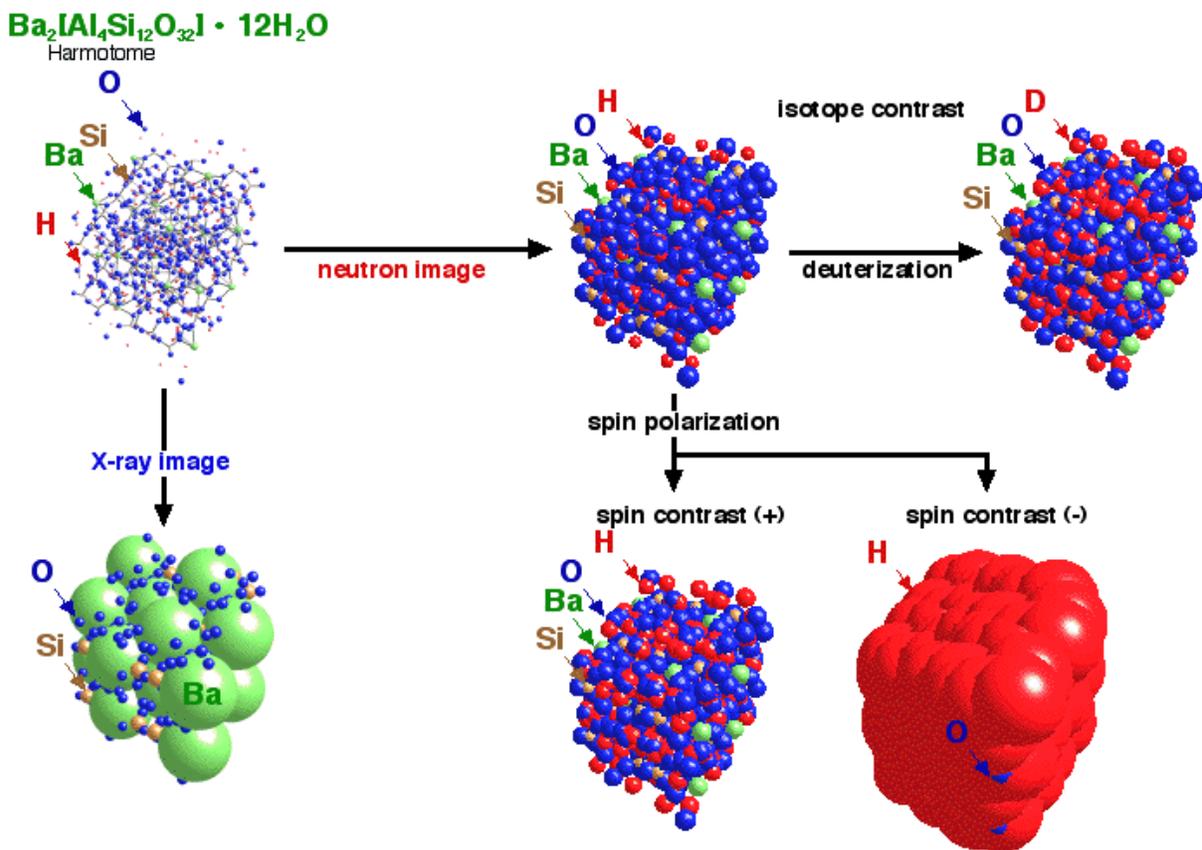


с

Возможности различных видов излучения продемонстрированы на примере исследования содержимого муляжа бомбы со стальным корпусом: обычное фото слева, следующие – рентгеновские лучи 150 keV, гамма излучение 1,3 MeV и тепловые нейтроны. Преимущество нейтронов (фото справа) очевидно.

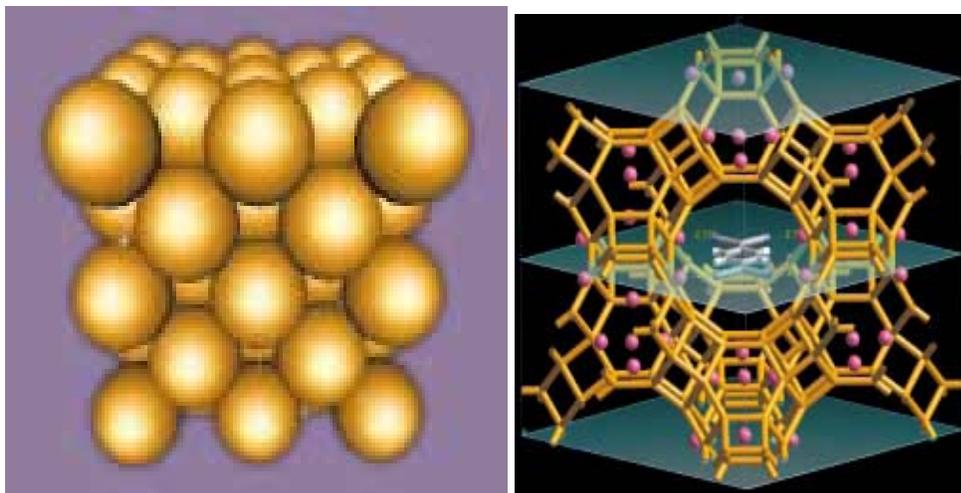
Рентгенографическими и электронографическими методами лишь в некоторых благоприятных случаях удастся определить положение атомов водорода в его соединениях с другими легкими атомами (с $Z \sim 30$). Нейтронографическое же определение положения атомов водорода не сложнее, чем большинства других элементов, причем существенная методическая выгода часто достигается заменой в изучаемой молекуле атомов водорода на его изотоп – дейтерий, как, например, при исследовании уранилов – соединений, используемых при обогащении урановых руд.

Следующий рисунок демонстрирует чувствительность нейтронов к легким элементам в сложных молекулярных объектах. В случае рентгеновского изображения вклад в сечение рассеяния атомов бария (благодаря их большому Z) превалирует над сечением рассеяния атомов водорода и кислорода. При нейтронном же изображении, наоборот, водород и кислород начинают доминировать. Более того, замена водорода в образце его изотопом дейтерием позволяет значительно усилить контраст его изображения. (Подобный метод может быть использован для увеличения контраста изображений других элементов при замене их подходящими изотопами) Наличие же магнитного момента у атома водорода предоставляет дополнительную возможность сравнения сечений рассеяния поляризованных нейтронов с различным направлением поляризации.



Другим замечательным свойством холодных нейтронов является возможность их транспортировки на большие расстояния по нейтроноводам. Это позволяет на одном холодном источнике использовать одновременно до нескольких десятков первоклассных нейтронных спектрометров. Так на реакторе Института Лауэ-Ланжевена на одном холодном источнике имеется два нейтроноводных зала и около сорока одновременно работающих приборов.

Нейтроны замечательны тем, что они позволяют исследовать структуру любых веществ вне зависимости от их атомного веса и плотности



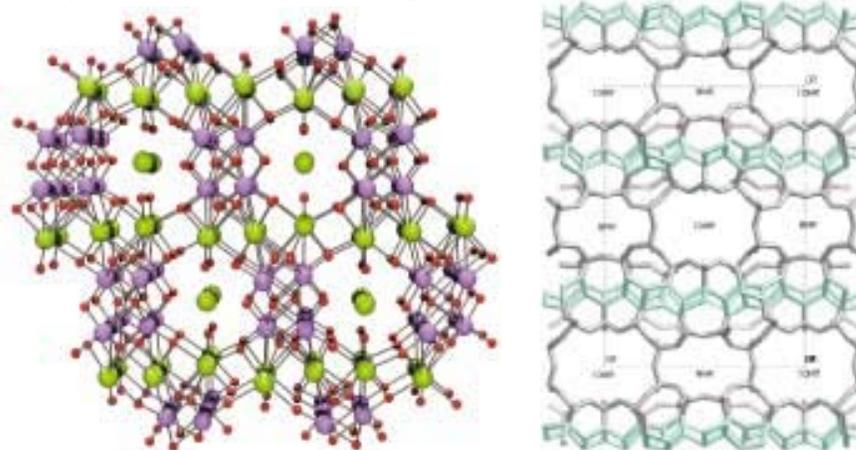
На рисунке приведена структура рыхлого цеолита NaY с биологическими молекулами внутри его пор, полученная с помощью нейтронов. Подобные цеолиты широко используются в промышленности, как в качестве катализаторов, так и в качестве хранилищ различных веществ. Синтез новых цеолитов является ключевым вопросом при развитии прогрессивных технологий в современной химической промышленности. На соседнем же рисунке приведена кристаллическая структура одного из наиболее плотных веществ – золота, полученная также с помощью нейтронов.

Токсичные отходы

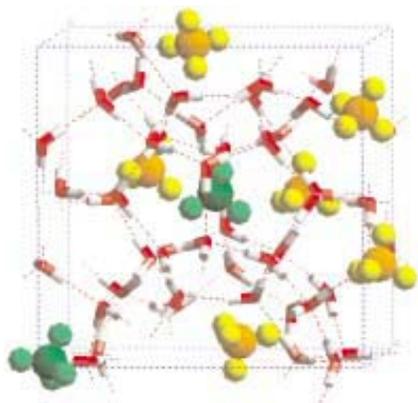
Токсичные вещества в окружающей среде представляют собой огромную опасность для человека и экологии в целом. Поэтому улавливание этих веществ имеет неоценимое значение для человечества в целом. Одним из способов их улавливания является синтез новых ионообменных смол и цеолитов. (Многие из нас используют их, например, в качестве фильтров для водопроводной воды).

Ионообменные смолы SOMS применяют для удаления нежелательных ионов из окружающей среды. Один из таких материалов, SOMS-3, способен улавливать радиоактивные ионы стронция-90 выделяя безопасные ионы натрия. Этот материал был специально разработан с величиной каналов достаточно большой, чтобы высвободить натрий, но достаточно маленькой, чтобы задерживать стронций-90.

На рисунке слева приведена структура каналов этих сложных цеолитов с ионами стронция внутри, подробно изученная с помощью нейтронов.



Справа показана структура алюмосиликатных минералов, также интенсивно использующихся в ионообменниках. Основу их структуры составляют окиси алюминия и кремния. Емкость ионного обмена пропорциональна относительным количествам алюминия и кремния. Этот тип материала также имеет большое значение для очистки радиоактивных отходов и используется для удаления радиоактивных изотопов цезия.



Новые источники энергии

Страны с развитой промышленностью постоянно находятся в поиске новых источников ископаемого топлива. Одними из потенциальных кандидатов рассматриваются гидраты газов, найденные на океанском дне и в Арктике. Эти

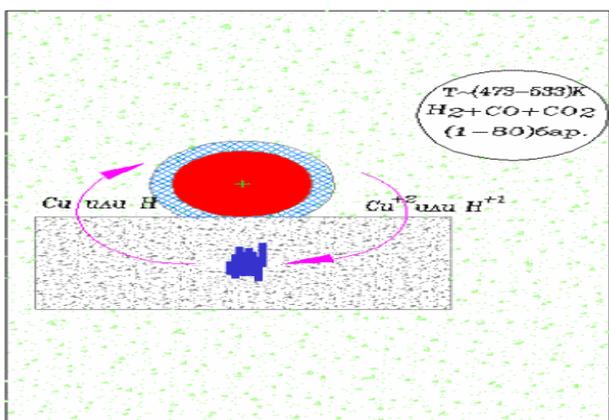
кристаллические соединения состоят из сетей молекул воды, в которых содержатся большие молекулы газа, например, метана.

Решетчатые гидраты известны уже почти 200 лет, но только несколько десятилетий назад они были обнаружены в природе и при этом в большом количестве! Фактически, морские отложения содержат около 10 000 миллиардов тонн гидрата метана, что значительно превышает запасы угля, нефти и газа (метан, конечно, является природным газом). Поэтому, гидраты метана будут иметь неоценимое экономическое значение, для энергетики.

Не удивительно, что во многих странах исследования гидратов газа становятся одним из наиболее приоритетных направлений. Гидраты газа существуют только при высоком давлении, и/или низких температурах. Они найдены в море на глубине в несколько сотен метров и в областях вечной мерзлоты. Только нейтроны, благодаря их уникальной проникающей способности, позволяют проводить исследования структуры этих веществ при таких высоких давлениях. Результаты этих исследований показывают как происходит заполнение больших и маленьких клеток молекулами газа и как оно зависит от давления и температуры.

Водородная энергетика

Нейтронные методы исследования незаменимы при решении задач водородной энергетики. Как уже отмечалось выше, здесь важна уникальная способность нейтрона «видеть» легкие атомы водорода, особенно на фоне тяжелых атомов. Именно такая ситуация

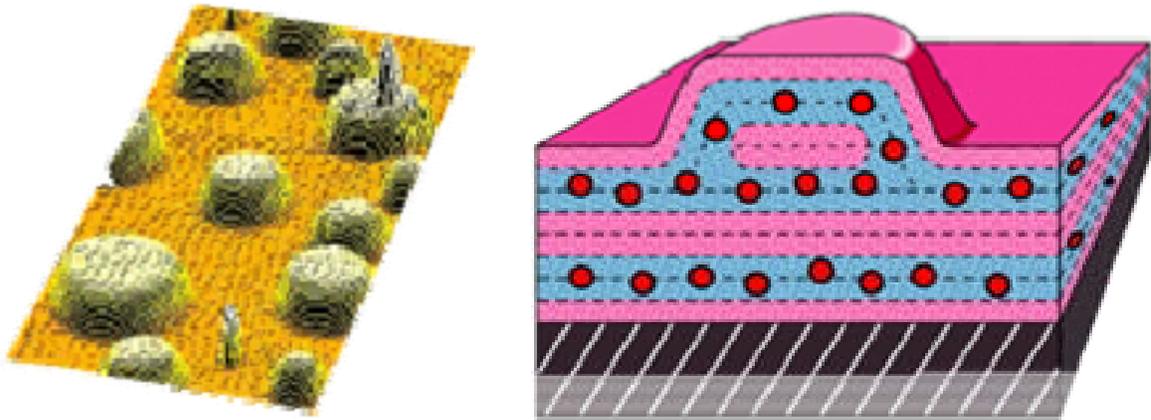


имеет место при создании топливных элементов, когда атомы водорода, как в резервуар для хранения и последующего выведения оттуда, внедряются в материал-носитель, состоящий из тяжелых атомов, обычно металлов. Где именно в материале-носителе находятся атомы водорода, что с ними происходит при том или ином воздействии на материал-носитель и как он сам изменяется – на все эти и другие вопросы могут дать ответ нейтронные исследования. Интересные результаты получены сотрудниками ПИЯФ РАН: в некоторых материалах-носителях атомы водорода распределяются не хаотично, а концентрируются, образуя кластеры. Необычная кластеризация меди и водорода в ZnO матрице, образующейся в результате отжига в атмосфере водорода соединений Zn_{1-x}Cu_xO (водородные накопители и катализаторы, используемые при производстве метанола, одного из основных компонентов водородной энергетики) показана на рисунке сверху.

Интересные результаты получены сотрудниками ПИЯФ РАН: в некоторых материалах-носителях атомы водорода распределяются не хаотично, а концентрируются, образуя кластеры. Необычная кластеризация меди и водорода в ZnO матрице, образующейся в результате отжига в атмосфере водорода соединений Zn_{1-x}Cu_xO (водородные накопители и катализаторы, используемые при производстве метанола, одного из основных компонентов водородной энергетики) показана на рисунке сверху.



На рисунке показана одна из пока еще немногих подводных лодок, работающих на водородном топливе.

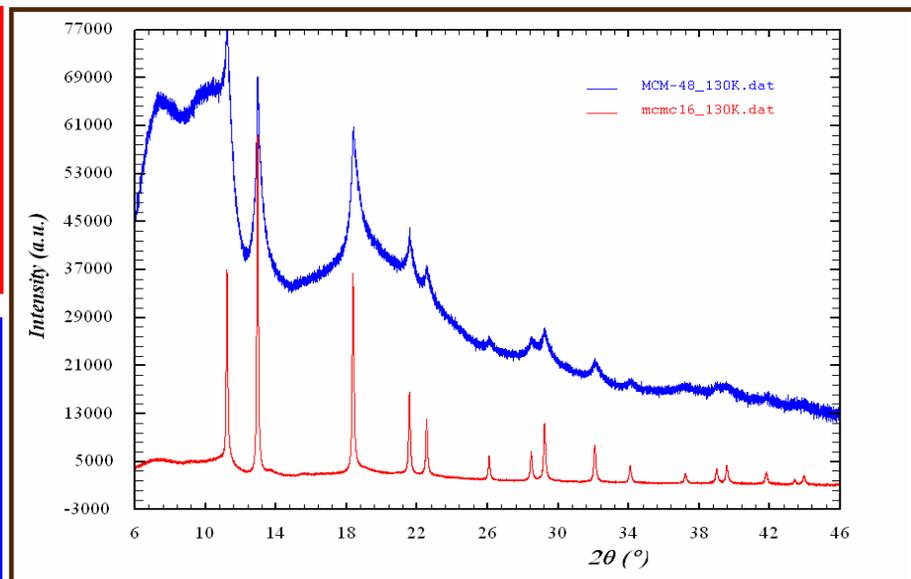
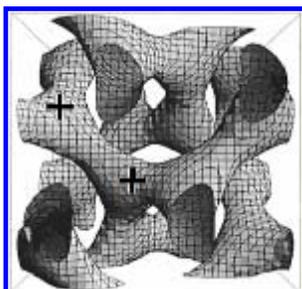
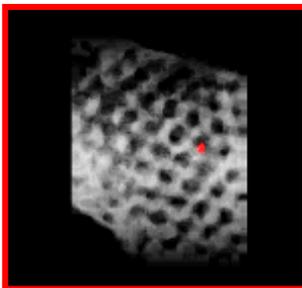


Нанотехнологии

В последние два года на нейтронных источниках, сотрудниками ПИЯФ РАН выполнен большой цикл работ по исследованию свойств некоторых материалов, объем которых искусственно был ограничен до наномасштабов (наночастицы в порах матрицы). Эти работы показали принципиальную возможность исследования наноматериалов с помощью нейтронов. Важным результатом этих исследований является информация о том, что наноматериалы (магнетики и сегнетоэлектрики) обладают свойствами, которых нет у этих же материалов с объемом, превышающим наномасштаб. Как следствие, значительно расширяется область практического использования таких материалов, например, при создании вычислительной техники, элементов памяти и т.д.

Магнитные нанокompозиты

Магнитные нанокompозиты получают путем синтеза магнетиков внутри различных нанопористых сред. В качестве пористой среды могут использоваться: нанопористое стекло со случайной системой взаимопроникающих пор, мезопористые матрицы с регулярной системой параллельных каналов, с гироидальной системой каналов, хризотилловые асбесты, искусственные опалы и другие матрицы. Антиферромагнитные оксиды переходных металлов: MnO , CoO , FeO , Fe_2O_3 , Fe_3O_4 , а также классические ферромагнетики Fe , Ni и Co



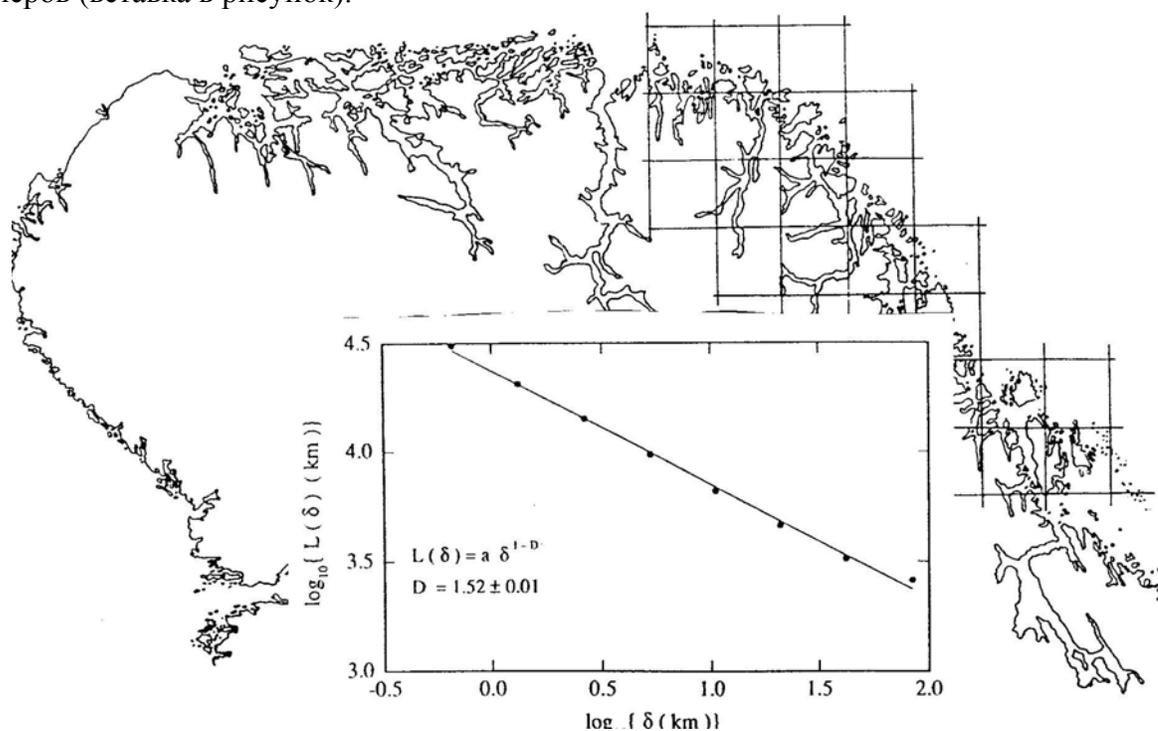
являются удобными объектами исследований, поскольку они достаточно легко могут быть синтезированы внутри нанопор. В тоже время свойства массивных (обычных) образцов хорошо известны.

Таким образом, появляется уникальная возможность исследований нового топологического класса магнетиков с необычными свойствами, а именно, магнитных структур в искусственно ограниченных границах, так называемых условиях "ограниченной геометрии". Физические свойства таких систем практически не изучены. Представленная программа предполагает систематические исследования структуры, морфологии, магнитного упорядочения и фазовых превращений в магнитных наночастицах, синтезированных внутри различных пористых сред.

Пример расшифровки структуры нанокompозитной пленки из данных нейтронной рефлектометрии показан на рисунке.

Законы фрактальности

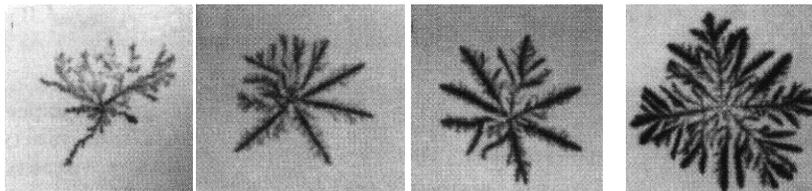
Изрезанность береговой линии материка (см. рисунок береговой линии Норвегии) так же, как и неоднородность поверхности внутри нанопористых материалов подчиняются **законам фрактальности**, т.е. подобию в широкой области масштабов. Размерность фрактальности D определяется углом наклона линейной \log - \log зависимости плотности элементов от их размеров (вставка в рисунок).



В нейтронных исследованиях пористых материалов аналогичная зависимость интенсивности рассеяния от масштаба нано-неоднородности позволяет определить суммарную площадь пористой поверхности, что важно при поиске и синтезе материалов с максимально развитой поверхностью для катализаторов, химических фильтров, газовых адсорберов, медицины и т.д.

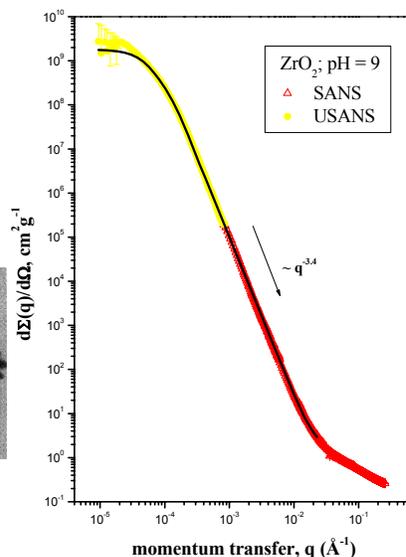
К ним относятся аморфные ксерогели различных металлов (железо, церий, цирконий, гафний, ванадий), аэрозоли металлов, сажи (фуллереновая и активированная), различные почвы.

На рисунках показана морфология кластеров цинка, полученных электроосаждением из раствора $ZnSO_4$ при различном напряжении на электродах, соответственно 2, 4, 8 и 10 вольт,



и пример малоуглового рассеяния нейтронов на аморфном ксерогеле гидратированного диоксида циркония (III) ZrO_2 .

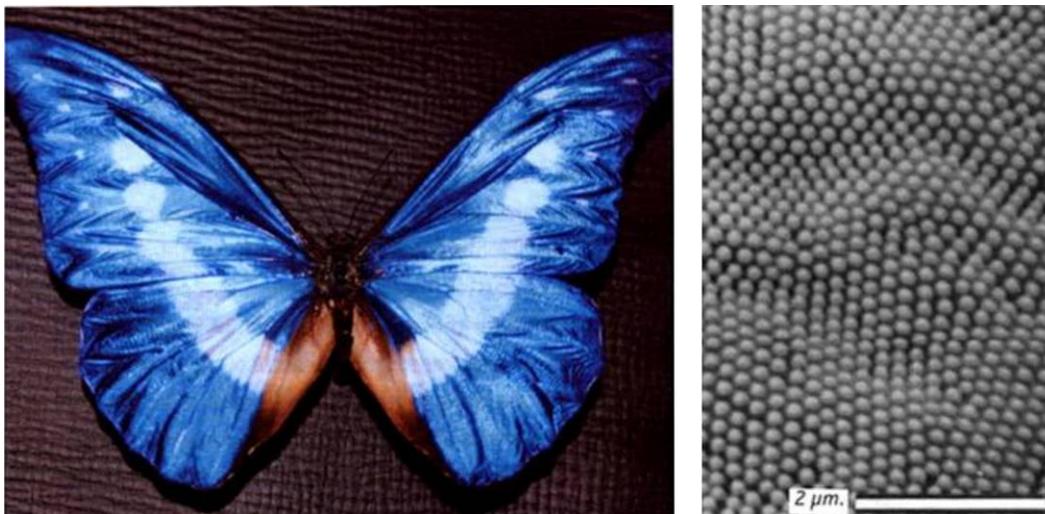
В области $0.05 < q < 0.0002 \text{ \AA}^{-1}$ показатель степени $n = 3.4$ соответствует рассеянию на фрактальной поверхности с размерностью $D_S = 6 - n = 2.6$.



Фотонные кристаллы

На протяжении последнего десятилетия значительные усилия исследователей всего мира направлены на создание и изучение материалов, структура которых определяется пространственным упорядочением элементов на субмикронном уровне. Такими системами являются открытые в 1991 году фотонные кристаллы, принципиально отличающиеся от обычных кристаллов тем, что их структура характеризуется строго периодическим изменением коэффициента преломления в масштабах, сопоставимых с длиной волны света. Во многом такая структура аналогична обычному кристаллу, где периодичность проявляется в изменении электронной плотности в масштабах кристаллической ячейки. Периодичность структуры фотонных кристаллов обуславливает их основное свойство: будучи прозрачными для широкого спектра электромагнитного излучения, они не пропускают свет с длиной волны, сравнимой с периодом структуры вследствие брэгговской дифракции на границах раздела. Фотонные кристаллы часто рассматриваются в качестве оптических аналогов электронных полупроводников, а значит, могут являться основой создания новых приборов квантовой электроники и телекоммуникационной индустрии.

Особое внимание следует уделить природным объектам, обладающим фотонными свойствами. Наиболее известными примерами являются природные опалы и перламутр, хотя проявление фотонных свойств встречается и в живой природе. Характерное для фотонных кристаллов явление иризации (радужная игра цвета) наблюдается у некоторых бабочек (*Vanessa kershawi*, *Morpho rhetenor*) морского червя (*Genus aphrodita*) и некоторых других

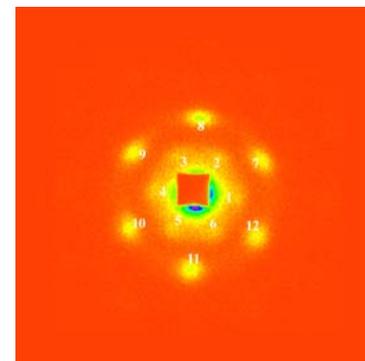
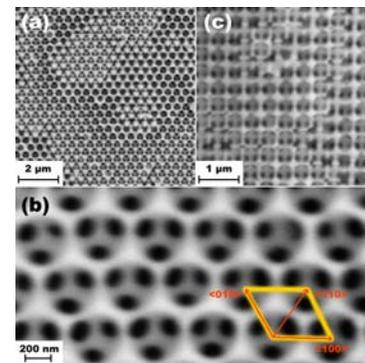


Иризация крыльев бабочки *Vanessa kershawi* и микрофотография поверхности крыла

видов. Развитие этого признака у биологических видов легко понять с точки зрения естественного отбора. И хотя очевидно, что возникновение фотонной структуры в этом случае является следствием процесса самоорганизации, истинная причина и механизм ее формирования до сих пор остается неясным. Важно подчеркнуть факт возможности передачи “умения” живых организмов *искусственно создавать* пространственно-упорядоченные системы на уровне ДНК.

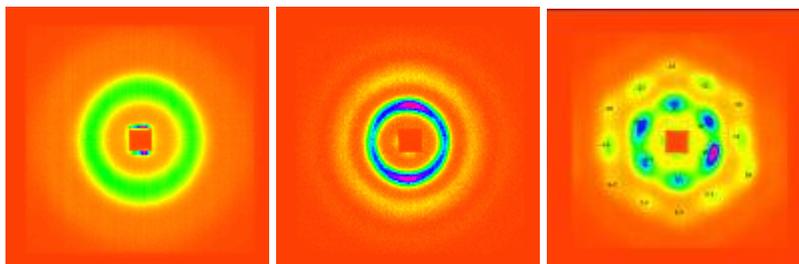
В последние годы наблюдается ярко выраженная тенденция переноса основного акцента исследований на получение фотонных материалов с **комбинированными** оптическими и, например, магнитными, полупроводниковыми, люминесцентными, электрохромными, сегнетоэлектрическими и др. свойствами.

Подобный подход может привести к созданию материалов, не имеющих в настоящее время аналогов, ввиду возможности как прямой, так и или обратной связи оптических свойств фотонных кристаллов с функциональными свойствами вещества, внедренного в пустоты пористой структуры. Полученные структуры называются инвертированными фотонными кристаллами, которые созданы из никеля электроосаждением () Структурные и магнитные свойства таких кристаллов изучаются методами малоуглового рассеяния поляризованных нейтронов. Характерная картина брегговской дифракции представлена на нижнем рис. справа. Полевая и температурная зависимости интенсивности рефлексов дают самую полную информацию о фотонных кристаллах.



Наноматрицы

Важным для нанотехнологии является создание наноматриц с упорядоченным распределением наноканалов для заполнения их нужным материалом. Например, при заполнении каналов магнитным материалом получают матрицы для высокоплотной записи информации.



Такие матрицы разрабатываются совместно с технологической группой МГУ и на каждом этапе изменения технологии проверяются малоугловой дифракцией нейтронов. На рисунках как пример представлены карты интенсивности малоуглового рассеяния нейтронов для трех различных образцов, приготовленных по разным технологиям с использованием разного качества исходного материала. На рисунке слева видно лишь кольцо рассеянной интенсивности на матрице фольги оксида алюминия из технического алюминия, специальным образом обработанного для образования наноканалов. Интенсивность рассеяния равномерно распределена вдоль кольца, и такая картина соответствует рассеянию на частично упорядоченной системе с корреляционной длиной в (2-3) постоянных решетки. Рисунок в середине для чистого алюминия. Он демонстрирует несколько колец интенсивности, соответствующих упорядочению в масштабе 10-20 постоянных решетки. Рисунок справа для чистого алюминия, но с дополнительным технологическим циклом. Он соответствует уже монокристаллу, рефлексы первого порядка которого образуют гексагон высоко-упорядоченной системы с корреляционной длиной равной размеру образца в $0,5 \text{ см}^2$ и радиусу каналов 14 нм. Таким образом, метод малоуглового рассеяния нейтронов является идеальным методом исследования наноструктур.



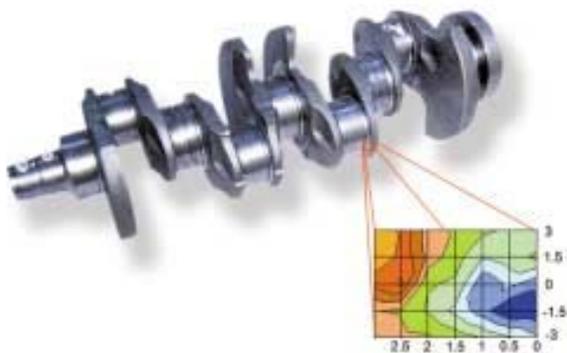
Исследование динамики химических процессов

В последние годы, в результате быстрого развития портативного электронного оборудования (мобильных телефонов и ноутбуков) материалы для хранения электрической энергии, стали объектами интенсивных исследований. Работа таких устройств зависит от их перезаряжающихся батарей, которые работают, преобразовывая химическую энергию хранящуюся в электродах, в электрическую энергию, при помощи электрохимических реакций. Электрохимические реакции обратимы, поэтому после использования всей энергии, батарею можно зарядить снова от внешнего

источника электричества.

Однако, эти аккумуляторы все еще имеют недостатки, связанные с конечным числом циклов зарядки – разрядки, после которых батарея приходит в негодность. Один из ключей к усовершенствованию – детальное рассмотрение кристаллической структуры электродов и того, как ионы распространяются в них. Здесь, нейтронная порошковая дифракция – вне конкуренции, она дает более подробную информацию, чем рентгеновская дифракция. Нейтроны легко проникают в образец и фиксируют данные, как обо всем материале так и об ионах водорода, причем в динамике процесса перезарядки.

Исследование внутренних напряжений



Нейтроны являются уникальным инструментом для определения остаточных напряжений, которые возникают после обработки конструкционных материалов. Принцип весьма прост: сжимающее напряжение уменьшает пространство между атомами в материале, в то время как растягивающее напряжение растягивает их. Нейтронная дифракция позволяет измерять межатомные расстояния в глубине материала, поэтому возникает возможность исследования напряжений внутри объекта. Эта методика

«нейтронного отображения напряжения», не разрушает материал и отображает внутренние напряжения с пространственным разрешением равным кубическому миллиметру, или даже меньшим. Высокая проникающая способность нейтронов позволяет проводить измерения в стали на глубине до нескольких сантиметров. Один из методов упрочнения коленчатых валов двигателей состоит в их обработке методом глубокой прокатки, однако только нейтроны позволяют определить реальное распределение напряжений после обработки, причем размеры исследуемого образца могут колебаться от 1 см до 2 м, а их вес может превышать 500 кг.

Микромеханизмы разрушения и формирования предразрывного состояния металла

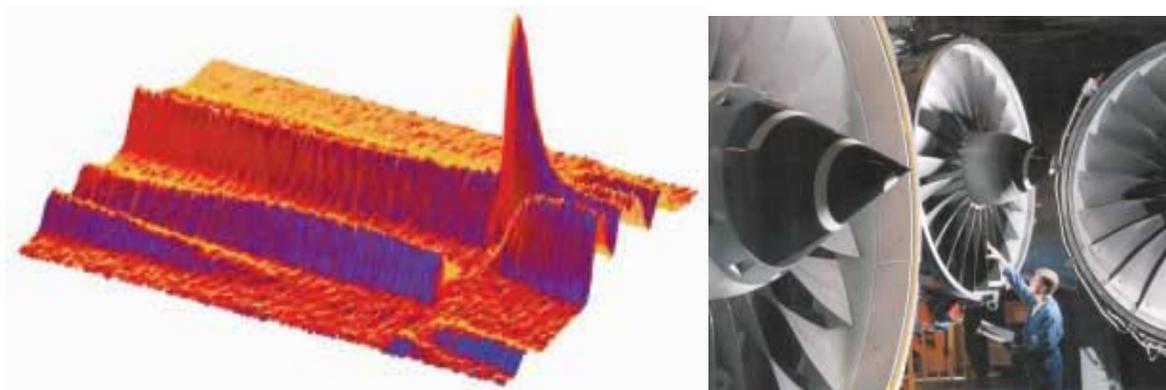
Современная физика рассматривает разрушение твердых тел под нагрузкой как процесс, приводящий к разрыву (макроразрушению) тела. Начало этого процесса связано с зарождением первичных субмикроскопических трещин (пор), кинетика дальнейшего развития которых (укрупнение, слияние) и определяет наступление катастрофы. Существующие исследования механизма разрушения опираются на данные механических испытаний и исследования поверхности.

Применение малоуглового рассеяния нейтронов значительно расширяет изучение процессов предразрушения. Появляется возможность объемного описания процесса на основе наблюдения элементарных фрагментов структуры (10 – 500 Å), в объеме образца (толщиной от долей мм до см). На современных приборах малоуглового рассеяния возможно

исследовать различные объекты (дефекты линейные и объемные, микрофазные включения, микрополости и трещины и т.д.) на масштабах от 10 до 5000 ангстрем.

Новые виды керамики для реактивных моторов

Кристаллическая структура Ti_3SiC_2 состоит из двойных слоев карбида титана чередующихся с одинарными слоями кремния. Такая слоистая структура приводит к необычной комбинации свойств, характерных для керамик и металлов. Этот материал устойчив к высоким температурам как керамика и проводит тепло и электричество подобно металлу. К другим его полезным техническим характеристикам относятся: превосходное сопротивление внезапным изменениям температуры, устойчивость к высоким температурам и сопротивление окислению, также возможность механической обработки. Все эти характеристики делают Ti_3SiC_2 превосходным кандидатом для использования при высоких температурах, например, для изготовления лопастей для турбин реактивных двигателей.



Керамика, подобная карбиду кремния титана обычно изготавливается, путем нагревания компонентов, элементов или составов, в правильных соотношениях. При его синтезе выделяется большое количество тепла. Единожды подожженная источником воспламенения (лазер, электронный луч, печь или электрическая дуга), реакция становится самоподдерживающейся и преобразовывает реагенты в конечный продукт, за промежуток времени меньше 100 секунд. Эту реакцию называют самораспространяющимся высокотемпературным синтезом (SHS). Высокая скорость реакции и высокая температура (до $2000^{\circ}C$) делают ее недоступной для изучения с помощью стандартных методик. Только с помощью нейтронной дифракции удастся проследить все ее промежуточные стадии.

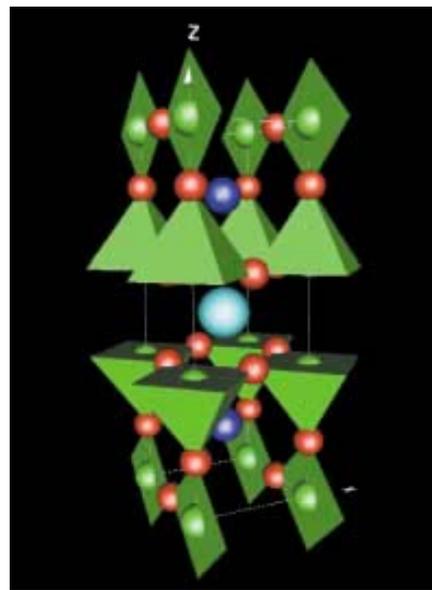
Нейтроны для атомной и термоядерной энергетики

Одним из наиболее важных традиционных направлений исследований, необходимых для развития атомной энергетики, являются исследования механизма изменения свойств материалов под действием облучения. Эти исследования выполняются, как правило, с разрушением облученных образцов (например, электронная микроскопия) или в виде тонких игл и пленок, т.е. в виде далеком от реальных объемных образцов. Техника малоуглового рассеяния нейтронов позволяет исследовать достаточно большие образцы без разрушения и во всем объеме. Возможная область наблюдения за микроскопическими образованиями внутри материала начинается от 10\AA и перекрывает диапазон интересный для анализа моделей распухания и изменения механических свойств (единица – десятки микрон).

Становится возможным наблюдение процесса сегрегации примесей фосфора, серы, меди и других на границах зерен и процесс образования пар типа фосфор – никель, фосфор-хром и тому подобных, а также образования газовых пор.

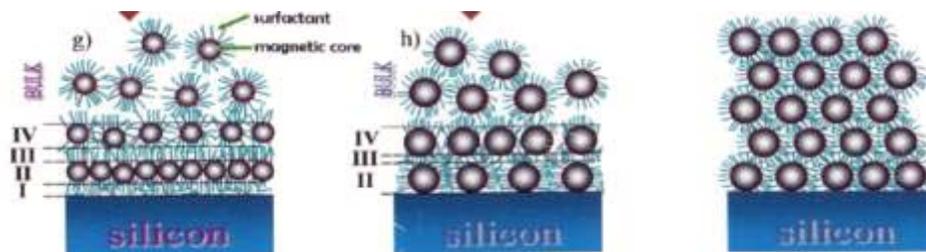
Высокотемпературные сверхпроводники

Нейтроны играют важную роль в изучении одного из наиболее известных сверхпроводящих материалов, YBCO ($YBa_2Cu_3O_7$). В зависимости от способа его производства он может быть как изолятором, так и сверхпроводником. А определяют эти свойства количеством кислорода в нем. Кислород – легкий элемент и его наблюдение с помощью нейтронов несравнимо проще, чем с помощью рентгеновских лучей.



Феррожидкости

Исследование супермагнитных наночастиц важно не только для понимания фундаментальных свойств супермагнетизма, но и для применения магнитных жидкостей в практических целях, таких как создание накопителей информации высокой плотности, использование в медицине для направленной транспортировки лекарственных средств, использование в подшипниках скольжения, в вакуумных уплотнениях подвижных деталей и во многих других технических приложениях.



По существу задача сводится к исследованию магнитных характеристик наноструктурных образований, при этом существует возможность использования

калиброванных гранул Fe_3O_4 требуемого размера начиная с $\sim 100\text{\AA}$. На рисунках изображена полученная экспериментально на нейтронном рефлектометре структура феррожидкости для концентраций 2, 5 и 7% (соответственно порядку рисунков) частиц Fe_3O_4 в тяжелой воде D_2O .

Мягкая материя

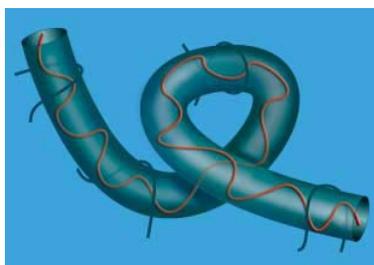
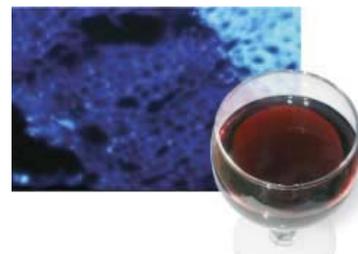
Нейтроны позволяют изучать широчайший класс “мягких” материалов, окружающих нас в повседневной жизни: от пластмасс и поверхностно-активных веществ, таких как мыло и другие моющие средства до жидких кристаллов, использующихся в электронных приборах и сложных биологических системах, таких как клеточные мембраны. Одно из наиболее важных направлений включает исследование коллоидных смесей одного вещества с другим в различных фазах, таких как гели и пенки. “Мягкая” материя становится объектом широкого круга исследователей – биологов, химиков, физиков, фармацевтов и др.

За последние 30 лет рассеяние нейтронов развилось в эффективное средство для исследования “мягкой” материи. В свою очередь “мягкая” материя, благодаря развитию нанотехнологий, становится одним из центров для инноваций на молекулярном и супрамолекулярном уровнях.

Основным достоинством нейтронов по сравнению с рентгеновским излучением является их возможность проникать в значительно более глубокие слои вещества и определять его структуру. Повсеместное использование нейтронов приводит к поразительным результатам.

Танины

Исследование виноградных танинов позволило определить их роль во вкусовых качествах вина. Размеры же подобных образований достигают 600 нанометров.

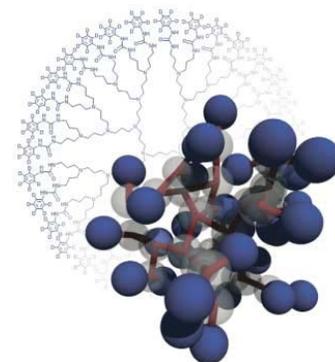


Полимеры

Нейтроны позволяют исследовать полимерные цепи (красная), вложенные внутрь трубки матрицы из другой полимерной цепи. Различные пластмассы состоят из подобных полимерных цепей, причем их длина и структура, определяющие основные свойства пластмасс зависят от технологии процесса.

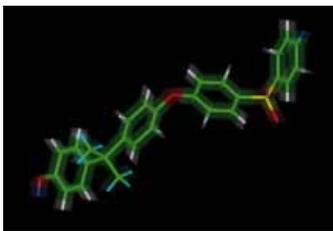
Дендримеры

Дендримеры – большие органические молекулы с ярко выраженной структурой древесного типа. Они синтезируются начиная от центральной зоны добавлением групп атомов в цепи. Они достигают нескольких нанометров и могут быть растворены в соответствующих растворителях. Подобные системы могут быть использованы в генной терапии и медицине.



Пластмассы

Пластмассы легки, долговечны и дешевы. Они заменили традиционную древесину, стекло и металл во многих вещах, которыми мы пользуемся каждый день, таких как упаковка, мебель и даже компоненты автомобилей.



Прочность же и термопластичность пластмассовых деталей напрямую определяется их химической структурой.

Что заставляет томатный кетчуп течь?



Многие ежедневно используемые нами жидкости, типа кремов для лица, шампуней и соусов, текут необычными способами. Их вязкость может радикально понизиться, если их размешать или потрясти, это явление называется тиксотропией. Переверните бутылку кетчупа горлышком вниз, и вы увидите, что соус едва движется; потрясите ее, и льется жидкость. Косметика типа жидкой основы под макияж также основана на тиксотропии, которая позволяет ровно распределить ее на коже. Такие необычные текущие свойства определяются поведением длинных цепочек молекул в веществе. Они затрудняют движение жидкости, поскольку формируют сети, которые либо запутываются, либо скрепляются вместе слабыми притягивающими взаимодействиями. Растворы углеродных нанотрубок или различные нановолокна, используемые в материалах с высокими технологическими показателями, ведут себя таким же образом. Изучение их текучих свойств в процессе обработки и производства, представляет значительный промышленный интерес и может быть проведено с высокой эффективностью с помощью нейтронов.

Динамика гелей для волос



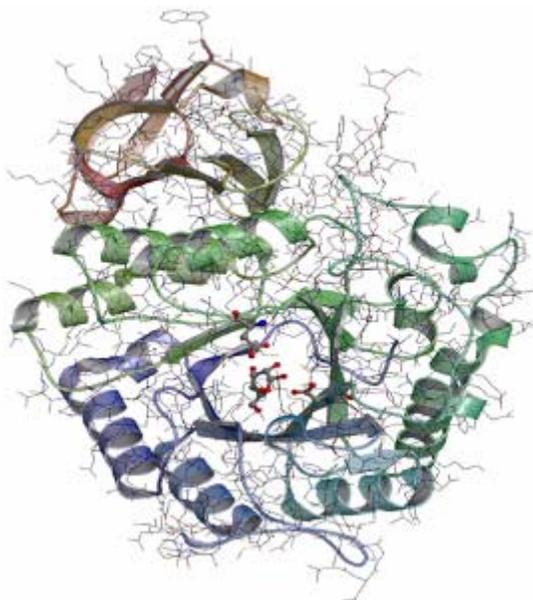
Прически с колючками сейчас в моде, они создаются с помощью специально-разработанных гелей, обладающими консистенцией, напоминающей что-то среднее между жидкостью и плотным веществом. Жесткость придает так называемый блоксополимер, состоящий из сегментов двух видов растворимых в воде длинно-цепочных молекул. Эти вещества входят в состав продукции, используемой как в хозяйстве, так и для личной гигиены. Кроме того, подобные молекулы имеют тенденцию самоорганизовываться в воде в сферические кластеры, называемые мицеллами, которые представляют большой интерес для транспорта лекарств внутри организма. Не удивительно, что люди хотят понять, как формируются и действуют блоксополимерные гели.

Застывание – сложный процесс. При понижении температуры или увеличении концентрации цепочки полимера запутываются, и быстрые движения, молекул в жидком состоянии внезапно уменьшаются.

Превосходным прибором для детального изучения динамики этого процесса является нейтронное спиновое эхо, которое позволяет измерять любые изменения в ориентации, вызванные поглощением небольших количеств энергии, связанных с движением мицелл, во время прохождения пучка через образец.

Нейтроны в биологии

Большое сечение некогерентного рассеяния нейтронов протонами (в отличие от рентгеновских лучей) делает водородсодержащие соединения превосходным объектом для



нейтронных исследований. Нейтроны позволяют локализовать положение атомов водорода в биологических объектах, в особенности содержащих воду. Более того, сечение рассеяния на водороде значительно отличается от сечения рассеяния на его более тяжелом изотопе - дейтерии. Это позволяет экспериментатору выделять определенные компоненты внутри сложной биологической структуры, путем замены в ней водорода на дейтерий, причем степень изотопической замены может им контролироваться.

На сегодняшний день нейтронные методы исследования являются единственным средством, способным дать ответ на вопрос о пространственной организации биологической материи в ядре живых клеток, т.е. от молекул

ДНК (наномасштаб) в хромосомах до самого ядра (микронные размеры). Эта информация является принципиальной для понимания функционирования живой клетки, как целого. Только благодаря объединению уникальных возможностей нейтронных и рентгенодифракционных исследований удастся получать такую информацию. Другие методы исследования дают информацию лишь для ограниченного масштаба, т.е. о составляющих ядра в узком диапазоне размеров. На рисунке показана молекулярная структура протеинов.

Исследование ультратонких полимерных пленок

Ультратонкие полимерные пленки находят все более широкое применение во многих высокотехнологичных областях. Они используются в различных сферах от покрытий сковородок до современной микроэлектроники. С миниатюризацией, становящейся главной технической направляющей в большинстве передовых технологий, ультратонкие полимерные пленки становятся все более и более востребованными. Однако, по мере уменьшения толщин пленок до размеров близких к величине молекул полимера, их свойства начинают сильно отличаться от свойств объемного материала. В очень тонкой пленке, молекулы полимера должны быть ограничены или сжаты. Это приводит к изменению структуры внутреннего расположения атомов.

Исследование таких ограниченных пленок полимера требует довольно специфических экспериментальных методов. Например, может быть использована методика атомной силовой микроскопии (AFM), которая основывается на микроскопическом исследовании



топологии полимера в атомном разрешении, но ее область исследования ограничена очень маленькими размерами образца. Методы же малоуглового отражения нейтронов позволяют изучить структуру всей полимерной пленки.

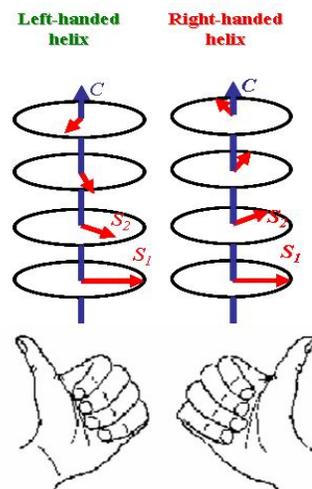
Один из экспериментов, демонстрирующих потенциал этой методики, заключался в исследовании процесса испарения ограниченных полимерных пленок, которое можно часто наблюдать в повседневной жизни.

В образцах полимерных композиций может быть также использована замена водорода дейтерием для определения химической структуры и геометрической организации различных фаз полимера с помощью контрастного метода.

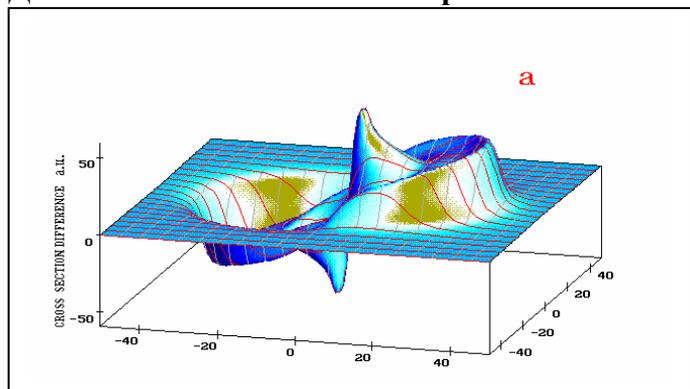
Естественно, данная методика не ограничена полимерами. Она открывает новые возможности исследования топологии любого типа и химического состава на поверхности образца.

Киральность в живой и неживой природе

Киральность (направление вращения винта) является фундаментальной характеристикой веществ с винтовой структурой, часто встречающихся как в живой, так и в неживой природе. Эти вещества, например, белки и ДНК, играют очень важную роль, и поэтому понимание связи их свойств с киральностью представляется одной из первостепенных задач. Проблемы киральности постоянно привлекают внимание как теоретиков, так и экспериментаторов. К счастью, винтовое, геликоидальное, упорядочение магнитных моментов (спинов) широко распространено в магнетиках и это дает возможность их изучения рассеянием нейтронов, особенно малоугловым рассеянием поляризованных нейтронов.



Динамическая спиновая киральность и как её видят



поляризованные нейтроны. На рисунке показан рельеф разностной интенсивности $\Delta I = I(P) - I(-P)$ малоуглового рассеяния нейтронов на площади двумерного детектора.

Одно такое измерение антисимметричного рассеяния нейтронов дает полную информацию о параметрах спиновых волн в намагниченном

ферромагнетике в области энергий $<0.1 \text{ meV}$.

Нейтронный активационный и нейтронный радиационный анализы

Нейтронный активационный анализ позволяет определять элементный состав образцов без какой-либо их предварительной подготовки перед измерениями. В этом случае основными достоинствами становятся: чистота измерений, отсутствие потерь химических элементов и загрязнений исследуемых образцов.

Определение элементов производится по гамма-лучам, испускаемым радиоактивными ядрами, образовавшимися при облучении исследуемого образца в нейтронном потоке. Образцы весом от 10 до 100 мг и мониторы нейтронного потока (обычно металлические железо и цирконий) запаиваются в ампулы из сверхчистого кварца и облучаются в течение от нескольких часов до нескольких дней в высоком потоке тепловых нейтронов. Спектры гамма-лучей от каждого образца измеряются три раза.

- a. Первое измерение производится не ранее, чем через 5 часов, но не позднее, чем через 3 дня после окончания облучения. В этом измерении определяются в основном Na, K, As, Br, Mo, Sb, Ho, Hg, Au и U.
- b. Второе измерение проводится обычно через 8 дней после облучения. В нем определяются Na, Cr, Fe, As, Br, Rb, Sb, Ba, La, Ce, Nd, Sm, Tb, Dy, Yb, Lu, Hf, Ta, Au, Th и U.
- c. Третье измерение проводится спустя 20 – 25 дней после облучения, здесь определяется содержание Sc, Fe, Co, Zn, Se, Zr, Sr, Sb, Cs, Ce, Eu, Tb, Tm, Yb, Hf, Ta, Hg и Ir.

При нейтронном радиационном анализе определение содержания элементов проводится по гамма-лучам, испускаемым ядрами мгновенно после захвата нейтронов. Измерительная установка располагается на выведенном из реактора пучке чисто-тепловых нейтронов. Подготовка образцов, весом от 100 мг, к измерениям производится аналогично подготовке образцов для нейтронного активационного анализа. Для одного образца измерение спектров и обработка результатов этих измерений занимает несколько часов.

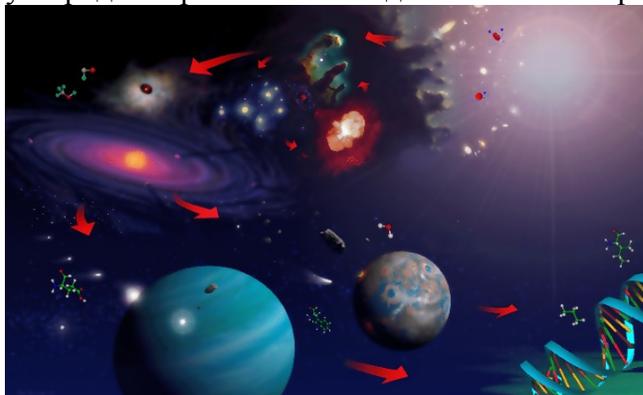
Чувствительность измерений элементного состава находится на уровне ppm (или, если указано, %): Li(%), B, Na(%), S(%), Cl, Ca(%), Ti, V(%), Cr(%), Fe(%), Co(%), Mn, Cu(%), Rh, Ag, Cd, In, Sb(%), I(%), Cs(%), La, Sm, Gd, Dy, Ho, Tm, Hf, Ta, Ir, Hg. Погрешность определения – несколько процентов от измеренной величины.

Роль нейтрон-активационного и нейтрон-радиационного анализов в экологии, геологоразведке, в горнодобывающей промышленности, производстве редких и драгоценных металлов, как и новых материалов и веществ, трудно переоценить. Специалисты считают, что в стране должно ежегодно проводиться несколько сотен тысяч анализов. Анализы необходимы везде, даже в таких далеких от физики науках, как археология.

Радиоактивные изотопы в археологии

Интересное применение для определения возраста древних предметов органического происхождения (дерева, древесного угля, тканей и т. д.) получил метод радиоактивного

углерода. В растениях всегда имеется бета-радиоактивный изотоп углерода ^{14}C с периодом полураспада $T=5700$ лет. Он образуется в атмосфере Земли в небольшом количестве из азота под действием нейтронов. Последние же возникают за счет ядерных реакций, вызванных быстрыми частицами, которые поступают в атмосферу из космоса (космические лучи). Соединяясь с кислородом, этот углерод образует углекислый газ, поглощаемый растениями, а через них и животными. Один грамм углерода из образцов молодого леса



испускает около пятнадцати бета-частиц в секунду. После гибели организма пополнение его радиоактивным углеродом прекращается. Имеющееся же количество этого изотопа убывает за счет радиоактивности. Определяя процентное содержание радиоактивного углерода в органических остатках, можно определить их возраст, если он лежит в пределах от 1000 до 50000 и даже до 100000 лет. Таким методом узнают возраст египетских мумий, остатков доисторических костров и т. д.

Нейтроны и искусствоведение

Удивительные истории происходят при применении современных нейтронных методик даже в такой далекой от точных наук области как искусствоведение. В институте Гана-Мейтнер в Берлине была исследована копия (из частной коллекции, цветное фото слева) известного полотна Рембрандта «Старик с тростью в шляпе с пером». Само полотно находится в Музее Искусств (Лиссабон) – фото справа. С первой неожиданностью столкнулись при фотографировании копии в рентгеновских лучах.



На рентгенограмме под портретом четко проявилось изображение (рисунок слева) другого известного полотна Рембрандта «Проповедник Элизар Свалмиус», оригинал которого находится в Королевском музее изящных искусств в Антверпене (черно-белое фото справа).



Окончательная разгадка пришла после исследования полотна с помощью нейтронов. Нейтронограмма показала, что состав красок обоих рисунков одинаков, из чего следует, что обе копии были выполнены в одной мастерской. Состав красок отличается от состава

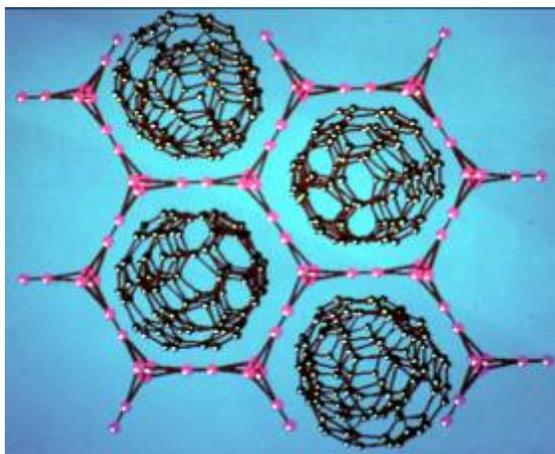
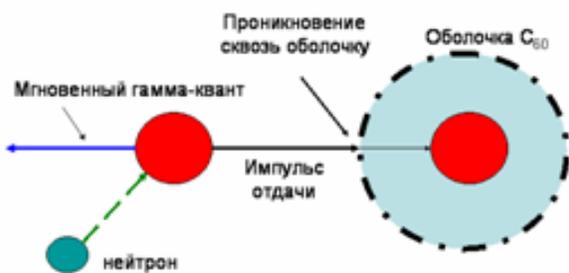
красок, использовавшихся в мастерской Рембрандта, а между написанием обеих копий прошел достаточно большой промежуток времени.

Из вышесказанного следует, что обе копии не принадлежат кисти Рембрандта или кого либо из его ближайших учеников.

Радиоактивные металлофуллерены в ядерной медицине

Наличие нейтронных полей для облучения и разработанные в ПИЯФ уникальные методики позволяют организовать производство эндометаллофуллеренов, (т.е. атомов металла, внедренных внутрь фуллера). Это эффективные препараты для диагностических и терапевтических целей. Прямой синтез металлофуллеренов с изотопами для целей ядерной медицины неудобен из-за крайне низкого (10^{-5}) содержания металлофуллеренов в конечных продуктах синтеза и малых периодов полураспада большинства медицинских радиоизотопов.

Альтернативным способом получения меченых радиоактивным изотопом металлофуллеренов является нейтронная активация металлофуллеренов, синтезированных со стабильными изотопами, выделенных и очищенных до активации нейтронами. Один из возможных вариантов получения радиоактивных эндометаллофуллеренов (см. рис.) – это внедрение радиоактивного атома внутрь оболочки фуллера (например, C_{60}) за счет отдачи после испускания гамма-кванта атомом, возбужденным в результате захвата теплового нейтрона



Радиоактивные эндоэдрические металлофуллерены весьма перспективны для использования в ядерной медицине. Металлофуллерены, будучи внутренне допированы радиоактивными изотопами, могут быть особенно полезны при использовании для целей медицинской диагностики, терапии рака и иммунотерапии. Маршрут таких меченых металлофуллеренов в живом организме может быть задан путем определенной функционализации углеродного кэйджа металлофуллера подходящими, настроенными на заданную ткань или орган (tissue-seeking), заместителями. Почти половина металлов, используемых в качестве радиоизотопов в ядерной медицине (Y, Ho, Sm, Dy и др.), уже были к настоящему времени инкапсулированы в молекулу металлофуллера.

Производство радиоактивных изотопов

Облучательные возможности высокопоточных реакторов (высокая плотность потока нейтронов, разнообразный спектр) при наличии на площадке радиохимического комплекса позволяют получать широкий круг радиоизотопов в интересах медицины и промышленности:

- рения-188 для терапии онкологических больных – получается только после двух - последовательных захватов нейтрона, требует высокого потока;
- молибдена-99 – для получения медицинских генераторов технеция;
- иридия-192 для промышленного использования в диагностике; и трансмутации природных минералов для ювелирной промышленности;
- изотопов иода, фосфора, самария, рутения, скандия и др.

Использование реакции двойного захвата расширяет этот список на высокопоточных реакторах с плотностью нейтронного потока 10^{15} н/см²с и выше.

Модифицирование свойств природных минералов



Благодаря своему красивому цвету, прозрачности и блеску топазы издавна применяются в ювелирной промышленности. Как свидетельствует древняя хроника, этими камнями украшали свои короны многие короли и султаны в разных странах. Особо ценятся прозрачные кристаллы с включениями и "полихромные", двухцветные кристаллы. Например, встречаются редкие экземпляры топаза с зонами голубого и винно- жёлтого цвета в одном кристалле. После огранки они за счёт смешения составных цветов выглядят зеленоватыми.

Обычно цвет топазов меняется в зависимости от примесей. Малым спросом в качестве драгоценного камня пользуется наиболее широко распространенный бесцветный топаз, он и стоит недорого. Однако после облучения в нейтронном потоке бесцветные топазы расцветают, см. рис.



Синтетические алмазы и нейтроны

Синтетические алмазы незаменимы при создании эффективного инструмента для обработки твердых материалов, микрохирургического инструмента, п\п детекторов излучения, а также для ювелирного производства.

Высокоэффективное производство синтетических алмазов с размерами более 3-5 карат требует тщательного технологического контроля на всех стадиях производства. Из всех известных методик только нейтроны позволяют вести подобный контроль непосредственно в условиях таких экстремальных



1 - бесцветный, 1,5 карат.
 2 - голубой бриллиант 0,3 карат.
 3 - синтетический, 1,2 карат.
 4 - синтетический, 1,3 карат.

ИХ

воздействий как высокие температуры и давления, которые необходимы при производстве высококачественных синтетических алмазов. А облучение созданных алмазов позволяет произвести необходимую модификацию их цветности.

Производство легированного кремния

Если словосочетание – монокристаллический кремний – хлеб радиоэлектроники справедливо, то выражение нейтронно-легированный кремний является основой современной силовой электроники справедливо вдвойне.

Сегодняшняя мировая потребность в нейтронно-легированном кремнии находится на уровне около 100 тонн, при этом наблюдается тенденция к удвоению потребности в ближайшие 10 лет. Важно отметить также тенденцию к увеличению диаметра используемых слитков до 200мм, которая требует использования уникальных облучательных возможностей. Такие облучательные возможности может предоставить строящийся реактор ПИК, на котором количество облученного кремния может быть доведено до 20 т/год при максимальном диаметре 180 мм. Мягкий спектр нейтронов обеспечивает низкий уровень дефектности легированного кремния и его высокое электронное качество. Сметная стоимость создания комплекса для производства такого количества кремния оценивается в ~ 8-9 млн. долларов США, включая стоимость сервисного инженерного оборудования для контроля параметров произведенного кремния.

Нейтрон, Вселенная и фундаментальные взаимодействия

В современной физике элементарных частиц тесно переплелись и космология, и свойства Вселенной на ранней стадии образования, и собственно структура элементарных частиц и их взаимодействий, ядерная физика и физика фазовых превращений.

Для получения новых данных в этой области имеются два пути. Первый – это увеличение энергий ускоряемых, а затем сталкивающихся частиц и ядер в физике высоких энергий для поиска новых частиц (например, хиггсовских бозонов, суперсимметричных партнеров обычных частиц или новых форм вещества типа кварк-глюонной плазмы). Этот путь требует создания дорогостоящих ускорителей и, соответственно, совместных усилий и участия многих стран. На этом пути Россия успешно участвует в большинстве крупных международных проектов практически на всех существующих и строящихся в мире ускорителях.

Второй путь – это увеличение точности измерений в физике низких и средних энергий, в частности, в нейтронной физике. Для этой цели необходимы высокоинтенсивные источники нейтронов, поскольку для увеличения точности необходимо увеличение статистики, кроме того, необходимы также новые идеи, методики и нестандартное оборудование. Следует заметить, что, хотя реактор и является достаточно дорогостоящим прибором, тем не менее, его цена ни в какое сравнение не идет с ценой современного суперколлайдера. Она существенно ниже.

Хотя существует мнение, что вся современная фундаментальная физика делается на гигантских суперколлайдерах, которые ускоряют и сталкивают субатомные частицы при невероятно высоких энергиях, многие наиболее важные проблемы современной науки могут быть решены в тонких и очень точных экспериментах на нейтронах. Энергии нейтронов в исследовательских реакторах простираются от электрон-вольт до наноэлектрон-вольт.

Энергия самых медленных ультрахолодных нейтронов на 18 порядков меньше энергий, до которых разгоняются протоны на современных ускорителях.

Нейтроны и протоны – это те "элементарные кирпичики", из которых построены атомные ядра обычного вещества. Именно они и составляют фундамент нашего познания природы. Нейтрон участвует во всех известных взаимодействиях: в гравитационном, слабом, электромагнитном и сильном.

По этой причине нейтроны играют важную роль в процессах звездного нуклеосинтеза, который определяет происхождение элементов во Вселенной.

Изучение фундаментальных свойств нейтрона дает ключ к пониманию как структуры "элементарных" частиц и механизма их взаимодействий, так и процессов, происходящих в глобальных масштабах Вселенной, таких как: возникновение асимметрии материи и антиматерии во Вселенной (барионная асимметрия Вселенной) и теорий «Великого объединения» всех известных взаимодействий.

Слабое взаимодействие

Слабое взаимодействие не играет значимой роли в повседневной жизни, главным образом, потому что слабые силы имеют чрезвычайно малый радиус взаимодействия. Тем не менее, слабое взаимодействие жизненно важно для нашего существования. Она определяет скорость ядерных процессов в Солнце и других звездах.

Известно, что слабое и электромагнитное взаимодействия, являются компонентами более сложного, объединенного взаимодействия, названного электрослабым и описываемого так называемой Стандартной моделью. Согласно современным представлениям эти два взаимодействия разделились при остывании Вселенной после Большого Взрыва (см. «электрослабый фазовый переход» на диаграмме). В отличие от электромагнитного взаимодействия, слабое имеет множество экзотических свойств. Например, оно является единственным взаимодействием, которое отличает «левое» от «правого», а также частицы и их античастицы, то есть нарушает зеркальную и зарядовую симметрии. Проявление этих специфических характеристик слабого взаимодействия в поведении нейтронов дает превосходный метод для его изучения на нейтронах.

Нейтрон устойчив в связанном состоянии внутри ядер атомов, однако в свободном состоянии он распадается, приблизительно за четверть часа, на протон, электрон и практически не взаимодействующую с веществом частицу, названную антинейтрино. Этот распад обусловлен слабым взаимодействием, а измерение времени жизни свободного нейтрона наряду с измерением других параметров его распада может быть использовано для проверки Стандартной модели электрослабого взаимодействия и поиска новой физики вне Стандартной модели.

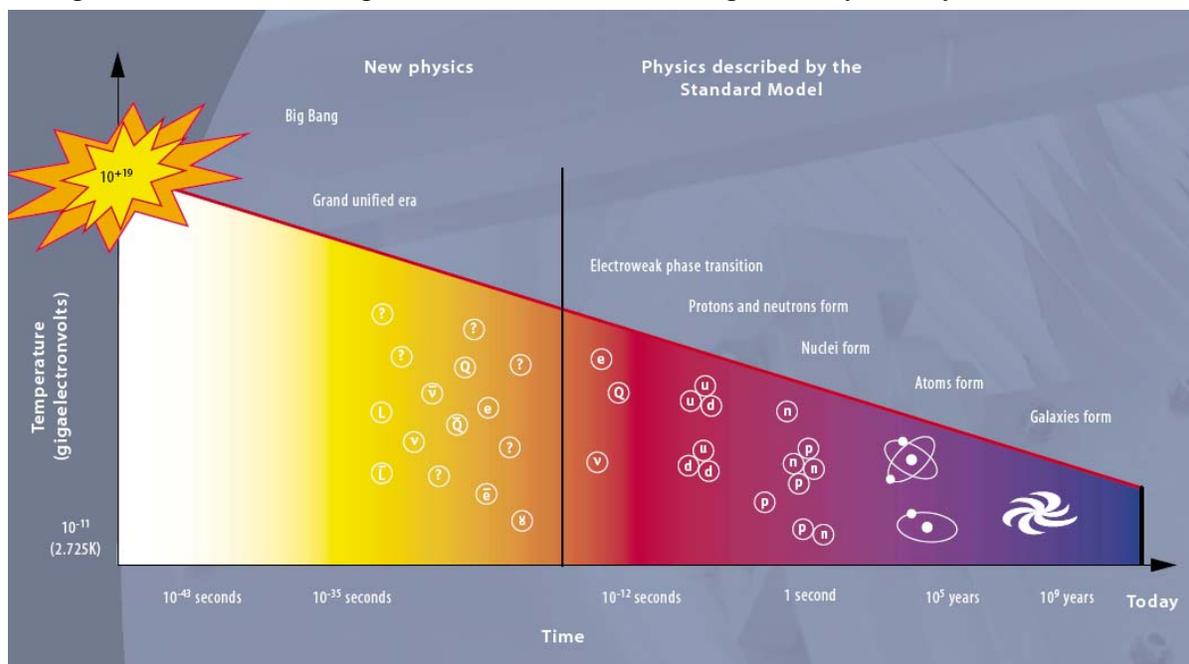
Нейтрон является естественным хронометром Вселенной, его время жизни играет существенную роль в первичном нуклеосинтезе. Согласно современным представлениям самые легкие элементы, водород, гелий и литий, сформировались в первые три минуты после Большого Взрыва. Величина же времени жизни нейтрона существенно влияет на относительную распространенность этих элементов.

Сравнение предсказанных моделью относительных количеств этих элементов с реально наблюдаемыми во Вселенной, является одним из наиболее веских доказательств модели Большого Взрыва.

Нейтроны и новая физика

Два вида дискретных симметрий полностью разрушаются слабым взаимодействием, а именно симметрия левого и правого (P) и симметрия между материей и антиматерией (C). Каким образом происходят эти нарушения симметрий? Наиболее популярные на сегодня теории говорят, что исходно Вселенная была симметричной, а все асимметрии нашей существующей Вселенной объясняются «спонтанным нарушением симметрии» в процессах фазовых переходов при расширении и остывании Вселенной после Большого Взрыва. Нейтронные эксперименты наряду с экспериментами в физике высоких энергий позволяют искать доказательства правильности подобных теорий.

Одной из самых захватывающих загадок современности является барионная асимметрия Вселенной — отсутствие во Вселенной антивещества в сопоставимых с веществом количествах. Для объяснения барионной асимметрии, как впервые отметил А.Д. Сахаров, необходимо предположить, что, во-первых, существует взаимодействие, не



сохраняющее барионное число, во-вторых, существует взаимодействие, нарушающее CP-инвариантность, в-третьих, отсутствует термодинамическое равновесие при расширении.

В Стандартной модели такие взаимодействия отсутствуют.

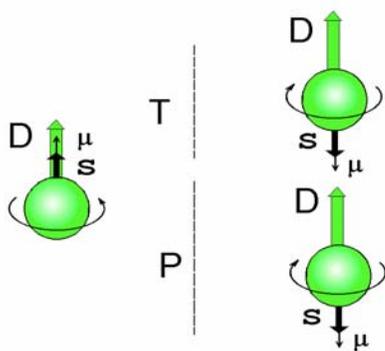
В ряде современных теорий "Великого объединения" – объединенных моделей сильного, слабого и электромагнитного взаимодействий, а также в суперсимметричных теориях допускается нарушение барионного и лептонного чисел и, как следствие, распад протона и нейтрон-антинейтронные осцилляции. Нарушение CP-симметрии было обнаружено в распадах нейтральных K-мезонов уже более 40 лет назад. Поэтому поиски механизма нарушения CP-симметрии, объясняющие и барионную асимметрию, являются одним из “краугольных камней” современной физики.

Как возвращаться назад во времени

Мы знаем, что в повседневной жизни время идет только вперед, мы становимся старше, вне зависимости от наших попыток оставаться молодыми. Время никогда не повернуть вспять. Однако, законы физики для элементарных процессов говорят, что время может идти в двух направлениях. Рассмотрим, например, процесс столкновения одной молекулы с другой. В кино такой процесс может быть просмотрен как вперед, так и назад. Однако он не может быть использован для определения того, в какую сторону идет время. Он симметричен относительно обращения времени.

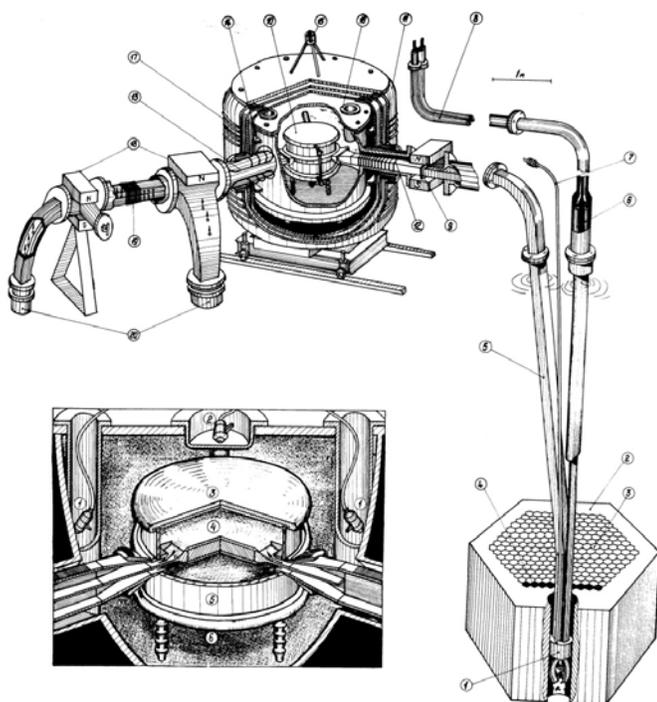
Такое поведение, называемое симметрией относительно обращения времени (T), связано с двумя другими, так называемыми дискретными симметриями. Все они имеют жизненно важное значение для нашего понимания строения элементарных частиц и взаимодействий между ними. Одна симметрия (P) говорит, что Природа не делает различия между поведением частицы и ее зеркальным изображением. Другая, так называемая симметрия относительно зарядового сопряжения (C), – что частицы на их античастицы (материя и антиматерия) эквивалентны. Слабое взаимодействие, как мы уже говорили, нарушает эти симметрии. Однако слабые взаимодействия сохраняют как симметрию относительно T преобразования, так и симметрию относительно одновременного C и P преобразований (CP).

Нарушение CP известно уже в течение 40 лет из экспериментов на ускорителях в реакциях с частицами, называемыми каонами и B-мезонами.

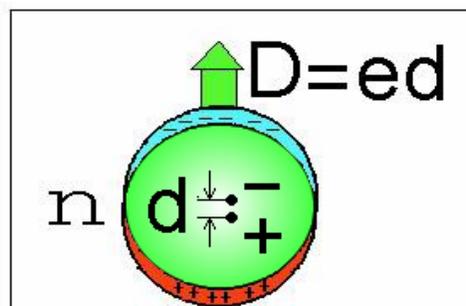


T-нарушение может быть обнаружено в экспериментах по наблюдению T-нечетной корреляции в бета-распаде нейтрона, а также по измерению постоянного электрического дипольного момента (ЭДМ) у нейтрона. Нейтрон – электрически нейтральная частица, то есть состоит из одинакового числа положительных и отрицательных зарядов. ЭДМ появляется, когда средние положения положительных и отрицательных зарядов не совпадают. Однако это противоречит T-инвариантности, поскольку при обращении времени направление ЭДМ относительно спина нейтрона изменяется на противоположное.

Обнаруженное нарушение CP- и, соответственно, T-симметрии в распадах K- и B-мезонов, если его учесть в рамках Стандартной модели приводит к величине ЭДМ нейтрона на уровне $\sim 10^{-31} - 10^{-33}$ е-см, что находится далеко за пределами современных экспериментальных возможностей измерения.



Однако в моделях, объясняющих барионную асимметрию Вселенной, ЭДМ нейтрона оказывается на уровне $\sim 10^{-26}$ – 10^{-28} е-см, и его обнаружение было бы прямым свидетельством в пользу моделей, объединяющих различные взаимодействия, таких как суперсимметричные и модели Великого объединения. В настоящее время ведется подготовка нескольких экспериментов по поиску ЭДМ



нейтрона на этом уровне точности. Таким образом, увеличение точности измерений в нейтронной физике позволяет получать результаты, которые вполне сопоставимы по важности с результатами, получаемыми на дорогостоящих суперколлайдерах, и могут существенно их дополнять. Обнаружение ЭДМ нейтрона свидетельствовало бы, в частности, о наличии новых тяжелых элементарных частиц.

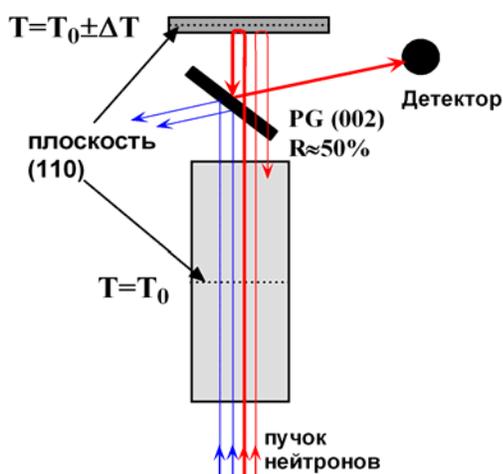
Поиск ЭДМ нейтрона

Рассмотрим принципы экспериментов по поиску ЭДМ нейтрона. Поляризованные ультрахолодные нейтроны, т.е. нейтроны магнитные моменты которых одинаково ориентированы относительно направления магнитного поля, помещаются в сосуд, находящийся в слабом магнитном поле. Их магнитные моменты прецессируют вокруг направления магнитного поля с частотой, которая зависит от нейтронного магнитного момента и напряженности магнитного поля. В дополнение к слабому магнитному полю, в сосуде создается сильное электрическое поле. Взаимодействие ЭДМ нейтрона с электрическим полем немного смещает частоту прецессии магнитного момента – всего на несколько миллиардных долей. Измерение этого крошечного сдвига с высокой точностью станет доказательством существования ЭДМ у нейтрона. Точность, которая достигнута в поиске ЭДМ, беспрецедентна. Если увеличить размер нейтрона до размеров Земли, то теперешняя точность эксперимента эквивалентна поиску смещения между средними положениями положительного и отрицательного электрических зарядов, на уровне нескольких микрон (меньше одной десятой толщины человеческого волоса) в ее центре.

Достижение требуемой экспериментальной чувствительности, возможно только при использовании самых передовых технологий. В эксперименте использованы атомные магнитометры, позволяющие измерять и стабилизировать магнитное поле в сосуде с точностью до миллионных долей магнитного поля Земли. Методы ядерного магнитного

резонанса используются для измерения нейтронной частоты прецессии. Также используются уникальные материалы и покрытия для оптимизации свойств сосуда для хранения ультрахолодных нейтронов, а уникальные магнитные экраны позволяют исключить влияние магнитного поля Земли.

В ПИЯФ сейчас разрабатывается совершенно новый дифракционный метод поиска ЭДМ нейтрона, основанный на том, что в совершенных кристаллах, в которых отсутствует центр симметрии, на нейтрон, движущийся в условиях, близких к брэгговским, действуют сильные внутрикристаллические электрические поля, достигающие величин несколько гигаВольт/см (10^9 В/см), которые на 4 – 5 порядков превосходят поля, используемые в экспериментах с ультрахолодными нейтронами. Эти поля были предсказаны, экспериментально обнаружены и исследованы в ПИЯФ. Наличие таких полей и возможность управлять их величиной и временем пребывания нейтрона в кристалле дают принципиально новую возможность поиска ЭДМ нейтрона с использованием холодных нейтронов.



Идея эксперимента, основанная на поиске эффекта вращения спина нейтрона за счет ЭДМ при прохождении через нецентросимметричный кристалл, показана на рисунке.

Принципиальная схема эксперимента по поиску ЭДМ нейтрона при отражении под $\pi/2$. Длина волны и энергия нейтрона, прошедшего через рабочий кристалл (от них зависит величина и знак электрического поля, действующего на нейтрон в этом кристалле) и отраженного вторым кристаллом, определяются межплоскостным расстоянием d отражателя. Этой величиной (a , следовательно, величиной и знаком электрического поля) можно управлять путем изменения температуры второго кристалла.

Измерение времени жизни нейтрона

Первые измерения времени жизни нейтрона были выполнены на нейтронных пучках из ядерных реакторов. Антинейтрино, испускаемые при распаде нейтрона, практически ненаблюдаемы, однако электроны и протоны, также являющиеся продуктами распада нейтрона, могут быть легко обнаружены. Если мы знаем число нейтронов в данном объеме в данный момент времени, то число электронов и протонов, испускаемых из этого же объема, дает нам возможность непосредственного измерения времени жизни нейтрона. Проблема возникает только в знании точного количества нейтронов в объеме, а также размера и формы объема, к которому чувствительны детекторы электронов и протонов.



В 1968 г. в России (Дубна) впервые были получены ультрахолодные нейтроны. Ультрахолодные нейтроны это нейтроны со столь низкими энергиями и, соответственно, со столь большой длиной волны (порядка 1000 Å), что они начинают отражаться от материальной стенки при любом угле падения на нее. Такие нейтроны можно заключить в закрытом сосуде и хранить в нем. В совершенном сосуде, сравнение количеств нейтронов, остающихся после двух различных времен их хранения, достаточно для определения времени жизни нейтрона. На верхнем рисунке изображены жидководородный источник ультрахолодных нейтронов с рекордной для своего времени плотностью на реакторе ВВР-М в Гатчине (Россия) и установка для измерения времени жизни нейтрона (ловушка ультрахолодных нейтронов), созданная учеными ПИЯФ и ОИЯИ. Ниже та же установка на реакторе ИЛЛ. На ней в 2004 г. российские ученые провели новое измерение жизни нейтрона с рекордной точностью и получили

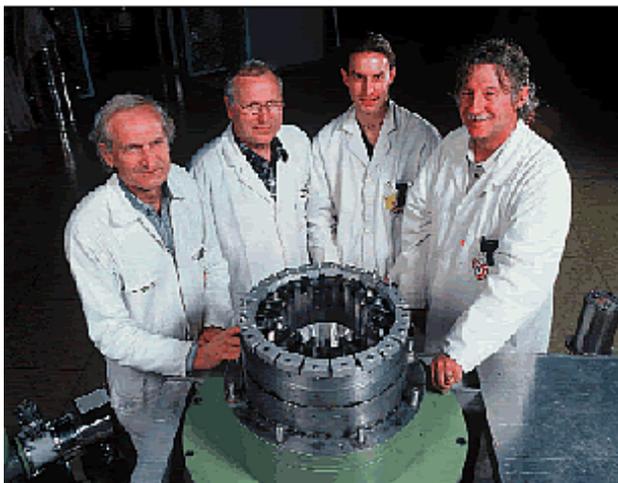
совершенно неожиданный результат. Оказалось, что нейтрон живет на 7,2 с меньше, чем считалось до этих пор. Новый результат оказался очень важным как для физики элементарных частиц, так для астрофизики и космологии. Он устранил существовавшее противоречие экспериментальных данных со Стандартной моделью. Во-вторых, он уменьшил рассчитываемую распространенность гелия во Вселенной, приблизив ее к наблюдаемой величине. Наконец, новое время жизни нейтрона, использованное в модели Большого Взрыва, увеличило расчетную величину барионной асимметрии.

В действительности же, в такой ловушке какое-то количество нейтронов теряется при столкновениях со стенками сосуда, так, что их число уменьшается немного быстрее, чем ожидается из бета-распада. Для коррекции этой ошибки можно выполнять эксперименты с использованием сосудов различных размеров. Поскольку размер сосуда увеличивается, число столкновений нейтрона со стенками, уменьшается. Экстраполируя данные к точке, при которой число столкновений является нулевым (бесконечно большой сосуд!) экспериментатор может устранить влияние стенок.

Однако подобную поправку на потери при соударениях со стенкой можно исключить, если использовать магнитные поля для хранения нейтронов (нейтроны имеют магнитный



момент, а значит, при движении в градиенте магнитного поля на них действует сила, которая позволяет ограничить их движение в пространстве). Подобная ловушка из постоянных магнитов, созданная в России, показана на рисунке снизу. В отсутствие материальных стенок потери могут быть устранены, и распад можно наблюдать в реальном времени.



ИСТОЧНИКИ НЕЙТРОНОВ: ПОЛОЖЕНИЕ В МИРЕ И В РОССИИ

Эффективность нейтронных методов определяется в существенной степени качеством доступных источников нейтронного излучения и, прежде всего, плотностью потока нейтронов. В этом плане представляется интересным сравнить ситуацию в России с тем, что имеется за рубежом.

Основным типом нейтронных источников до настоящего времени остаются ядерные реакторы – источники постоянного действия, использующие для производства нейтронов цепную реакцию деления урана. Источники испарительного типа, основанные на выбивании нейтронов быстрыми протонами из тяжелой мишени, для ряда исследований имеют определенные преимущества, но из-за низкого, по сравнению с реакторами, среднего потока (они работают в импульсном режиме) не могут в полной мере конкурировать с последними.

Лет двадцать пять назад в мире работало свыше 300 исследовательских реакторов, используемых, в основном, для материаловедческих исследований, т.е. облучения образцов и производства радионуклидов. Реакторов, специально предназначенных для физических исследований, т.е. имеющих выведенные нейтронные пучки, было не больше 100. Из них примерно 25, обладающих плотностью потока на уровне 10^{14} н/см².сек, и лишь два (один в США и один в Европе, безусловно лучший, в Международном институте Лауэ-Ланжевена, Гренобль, Франция) с плотностью потока – 10^{15} н/см².сек.

В 80-е годы наметилась тенденция к сокращению числа реакторов на Западе за счет снятия с эксплуатации маломощных и устаревших аппаратов, выработавших свой ресурс. На смену части из них стали приходить реакторы нового поколения, оснащенные современными техническими устройствами, такими как источники горячих и холодных нейтронов,

нейтронными системами, позволяющими получать и выводить пучки нейтронов определенной части энергетического спектра.

Только в 90-е годы и в начале 2000-х были введены в строй новые реакторы в Германии, Корею и Австралии, реконструированы некоторые реакторы во Франции, США, Венгрии и в ряде других стран, находятся в стадии проектирования или строительства исследовательские реакторы в Канаде и Китае. Вводятся в строй источники нейтронов в США и Японии.

Положение России, на протяжении десятилетий занимавшей одно из ведущих мест в мире в области исследований с нейтронами, на этом фоне сегодня весьма плачевно и продолжает ухудшаться. В самом деле: построенные на рубеже 50–60-х годов по инициативе И.В. Курчатова и А.П. Александрова исследовательские ядерные центры в различных регионах страны (Рига, Минск, Киев, Ленинград, Москва и Московская область, Тбилиси, Алма-Ата, Ташкент, Свердловск, Томск и т.д.) морально и физически устарели. Кроме того, с распадом СССР большинство из них оказались за пределами России.

Новые мощности на протяжении нескольких последних десятилетий не вводились. (Здесь не обсуждаются петлевые реакторы, не имеющие выведенных пучков и используемые, в основном, для облучения образцов в материаловедческих целях.) Сейчас в России еще работают четыре пучковых исследовательских реактора с потоком среднего класса $\sim 10^{14}$ н/см²с: реактор ВВР-М в Гатчине, введенный в эксплуатацию в 1959 г., реактор ВВР-Ц в Обнинске (1964 г.), реактор ИВВ-2М в Екатеринбурге (1963/1983г.) и реактор ИР-8 в Москве (пущен в 1957 г. как ИРТ и реконструирован в 1981 г. как ИР-8). Все они построены до Чернобыльской аварии и не отвечают в полной мере современным требованиям ядерной безопасности.

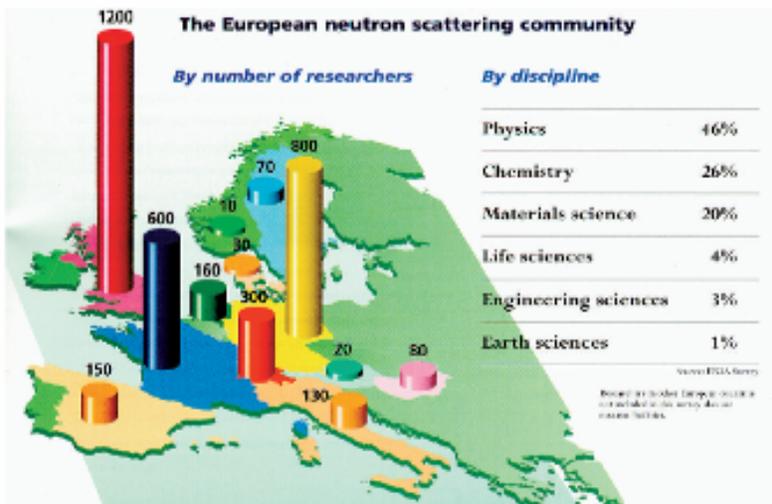
В 2006 г. был остановлен на реконструкцию единственный современный Российский нейтронный источник – импульсный реактор ИБР-2 в ОИЯИ (Дубна), дающий в импульсе 10^{16} н/см²с. Однако его средний во времени поток – всего 10^{13} н/см²с, что совершенно недостаточно для широкого класса экспериментов. Да и не может, в принципе, один источник удовлетворить потребности в нейтронах науки и промышленности такой страны как Россия.

К сожалению, в России не нашлось 2-х миллионов евро для продолжения пребывания России в качестве страны-участницы в известном международном исследовательском нейтронном центре – Институте Лауэ Ланжевена в Гренобле (Франция), обладающего в настоящее время самым высокопоточным в мире исследовательским реактором. С прекращением действия в июне 2007 г. соглашения России с этим институтом российские исследователи потеряют последнюю возможность проведения экспериментов на нейтронных пучках высокой интенсивности. В то же время важность нейтронных исследований для развития прорывных технологий понимают правительства таких стран, как Польша, Бельгия, Венгрия и Чехия, которые, хотя и не обладают очень высоким экономическим потенциалом, тем не менее, внося свой финансовый вклад, стали членами этого международного исследовательского центра.

Таким образом, следует констатировать, что без скорейшего завершения строительства современного высокопоточного пучкового реактора ПИК с потоком до $1.5 \cdot 10^{15}$ н/см²с в

Петербургском институте ядерной физики им. Б. П. Константинова РАН, в Гатчине Российская нейтронная наука окончательно утратит свои лидирующие позиции.

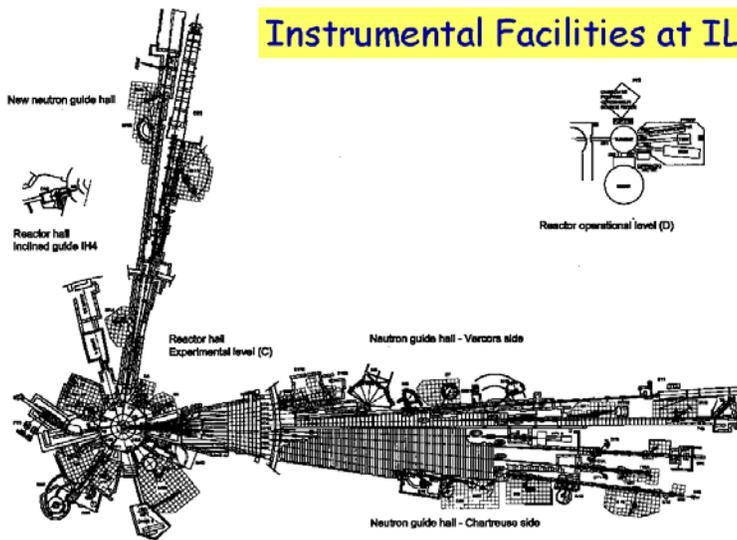
Европейские нейтронные источники

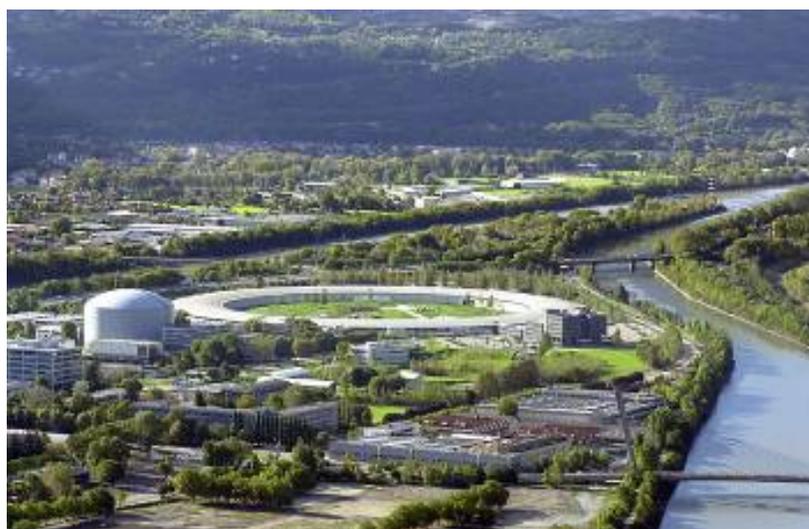
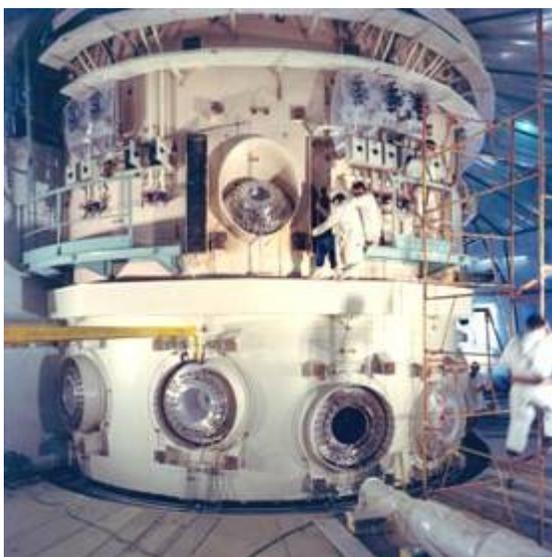


География нейтронных источников в Европе постоянно расширяется. Однако ввод нового интенсивного нейтронного источника еще не означает начала первоклассных исследований на нем. Нейтронный источник должен быть оборудован современными приборами, иметь источники горячих и холодных нейтронов с нейтронноводным залом. Зачастую из-за недостатка средств новые нейтронные источники вводятся в эксплуатацию “голые” без

экспериментальных установок, и лишь после пуска начинается создание приборного обеспечения. Наконец, необходим высококвалифицированный персонал для эксплуатации этих приборов.

Идеальным с этой точки зрения представляется реактор Института Лауэ Ланжевена (ИЛЛ). Этот международный центр оборудован 36 суперсовременными установками, на поддержание и развитие которых ежегодно выделяется около 6 млн. Евро. Доступ к установкам имеют исследователи из всех стран участниц. Имеется также социальная структура, ориентированная на прием ученых приезжающих для проведения экспериментальных исследований.





Российские нейтронные источники

В России максимальное число первоклассных установок – 18 имеется на реакторе ВВР-М Петербургского Института Ядерной Физики. Основные параметры этих приборов находятся на уровне лучших мировых приборов этого же класса. Однако нейтронный поток на реакторе ВВРМ недостаточен для проведения многих высокоточных экспериментов. Поэтому многие начатые в ПИЯФ эксперименты приходится завершать на более высокопоточных реакторах.

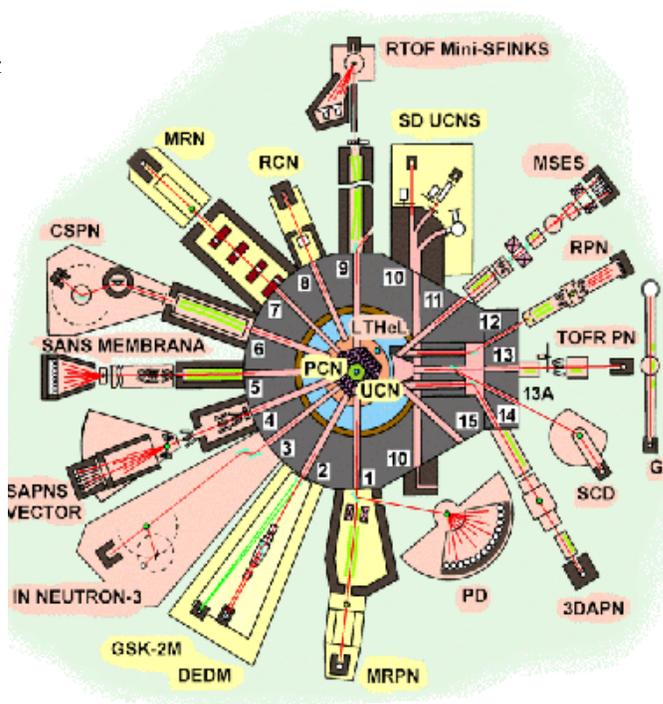


Основные параметры реактора ВВР-М:

- Мощность – 18 МВт
- Плотность нейтронного потока до $4 \cdot 10^{14}$ н/см²сек
- Число горизонтальных каналов – 17
- Число вертикальных каналов – 18
- Число часов работы в году – 3000
- Обслуживающий персонал – 90 чел.

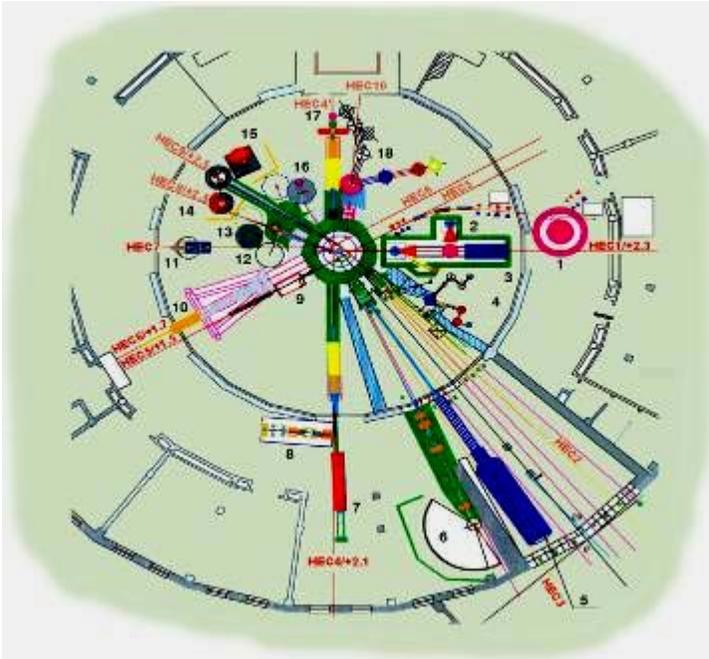
Размещение научной аппаратуры на реакторе ВВР-М

- Канал поляризованных холодных и ультрахолодных нейтронов (PCN, UCN)
- Кристалл-дифракционный монохроматор нейтронов (Канал 1А)
- 48-счетчиковый порошковый дифрактометр (Канал 1)
- Кристалл-дифракционный фокусирующий спектрометр ГСК-2М. Установка ДЭДМ (Канал 2)
- Трехосный нейтронный спектрометр "Нейтрон-3" со сдвоенным монохроматором (Канал 3)
- Малоугловой дифрактометр "Вектор" (Канал 4)
- Малоугловой дифрактометр "Мембрана-2" (Канал 5)
- Время-пролетный спектрометр (Канал 6)
- Механический многороторный монохроматор нейтронов (Канал 7)
- Установка для исследования γ -излучений в реакции радиационного захвата нейтронов ядрами (Канал 8)
- Нейтронный обратный фурье-дифрактометр для исследования порошковых образцов (Канал 9)
- Твердо-дейтериевый источник ультрахолодных нейтронов (Канал 10)
- Спин-эхо спектрометр тепловых нейтронов (Канал 11)
- 2-х кристалльный спектрометр поляризованных нейтронов (Канал 12)
- Двухмодовый рефлектометр на поляризованных нейтронах РПН-2М (Канал 13)
- Четырехкружный дифрактометр для исследований магнитной и кристаллической структуры (Канал 13А)
- Малоугловой дифрактометр поляризованных нейтронов с 3-х мерным анализатором поляризации (Канал 14)
- Низкотемпературная гелиевая петля НГП (LThel)
- Гамма-дифрактометр (GD)



состояния вещества и биологии. Создана кафедра нейтронной физики на базе ПИЯФ в Академическом физико-технологическом университете. Для подготовки специалистов по нейтронным исследованиям на базе ПИЯФ РАН создана Ассоциация Университетов, в которую вошли 18 ведущих Российских Университетов.





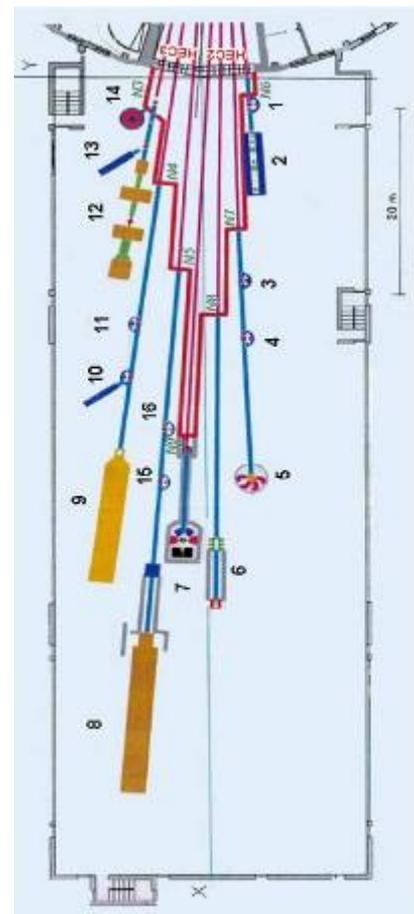
Залы экспериментальных каналов, шахта реактора, пульт управления и технологический зал ПИК.

Планируемые экспериментальные установки на горизонтальных каналах реактора ПИК.

1. Электромагнитный масс-сепаратор.
2. Нейтронный многоротный монохроматор.
3. Кристалл-дифракционный полярирующий нейтронный спектрометр.
4. Трехосный кристаллический спектрометр на поляризованных нейтронах
5. Малоугловой дифрактометр поляризованных нейтронов.
6. Многоротный спектрометр по времени пролета.
7. Корреляционный спектрометр для исследования бета-распада нейтрона
8. Установка для поиска ЭДМ нейтрона дифракционным методом.
9. Времяпролетный спектрометр продуктов деления.
10. Фокусирующий дифракционный гамма-спектрометр.
11. Двухкристальный дифракционный спектрометр.
12. Четырехкружный дифракционный спектрометр.
13. Четырехкружный монокристалльный дифрактометр на поляризованных нейтронах.
14. Суперпозиционный многосекционный порошковый дифрактометр.
15. Многодетекторный порошковый дифрактометр.
16. Четырехкружный монокристалльный дифрактометр на тепловых нейтронах.
17. Установка для измерения асимметрии вылета γ -квантов в реакции $pn \rightarrow \gamma d$.
18. Трехосный кристаллический спектрометр на тепловых нейтронах.

Оборудование, планируемое для размещения в нейтронноводном зале.

1. вакантное место,
2. тестовый рефлектометр,
3. вакантное место,
4. вакантное место,
5. корреляционный дифрактометр "Скорпион",
6. установки для исследований по фундаментальной физике с использованием поляризованных нейтронов,
7. Фурье-дифрактометр "Сфинкс",
8. малоугловой дифрактометр "Мембрана",
9. малоугловой спектрометр на поляризованных нейтронах "Тензор",
10. рефлектометр с горизонтальной плоскостью отражения,
11. вакантное место,
12. модуляционный спин-эхо спектрометр,
13. текстурометр,
14. 70-детекторный суперпозиционный порошковый дифрактометр,
15. двухосный дифрактометр для испытания монохроматоров,
16. вакантное место.



На наклонных каналах планируется комплекс установок, в том числе: низкотемпературная петля для исследования материалов, монокристаллический дифрактометр и гамма-дифрактометр.

Многие из перечисленных выше установок имеются в наличии и работают сейчас на пучках реактора ВВР-М или находится в стадии изготовления в ПИЯФ РАН и других институтах ядерно-физического профиля России.

Перечисленные выше устройства позволяют выполнять как фундаментальные, так и прикладные исследования.

Реактор ПИК предназначен для работы много десятков лет и поэтому в его конструкции заложена определенная гибкость как для постановки новых исследований, так и для совершенствования параметров самого реактора. Сам корпус реактора с активной зоной является сменным элементом и, по предварительным расчетам, переход на малопоглощающий материал вместо нержавеющей стали позволит поднять поток тепловых нейтронов в отражателе в 1,5 раза при сохранении установленной мощности 100 МВт.

Возможности оснащения действующих реакторов ВВР-М в ПИЯФ и реактора ИР-8 в Курчатовском институте источниками холодных и ультрахолодных нейтронов, а также нейтроноводными залами.

В настоящее время развитие нанонауки и нанотехнологии требует совершенствования экспериментальной базы исследований с нейтронами. До пуска нового исследовательского реактора ПИК, а также реактора ИБР-2 после реконструкции было бы целесообразно произвести оснащение реакторов ВВР-М в ПИЯФ и ИР-8 в Курчатовском институте источниками холодных и ультрахолодных нейтронов, а также нейтроноводными залами. Это позволило бы существенно расширить возможности для экспериментальных исследований за счет расширения спектра используемых нейтронов и обеспечения низкофоновых условий.

Создание источников холодных нейтронов и нейтроноводных систем является хорошо известной и широко используемой практикой. Любой из новых исследовательских реакторов оснащается источником холодных нейтронов и нейтроноводным залом. Реактор ИЛЛ в Гренобле оснащен источником ультрахолодных и двумя источниками холодных нейтронов с двумя нейтроноводными залами. В настоящее время рассматривается возможность постановки еще двух источников холодных и ультрахолодных нейтронов.

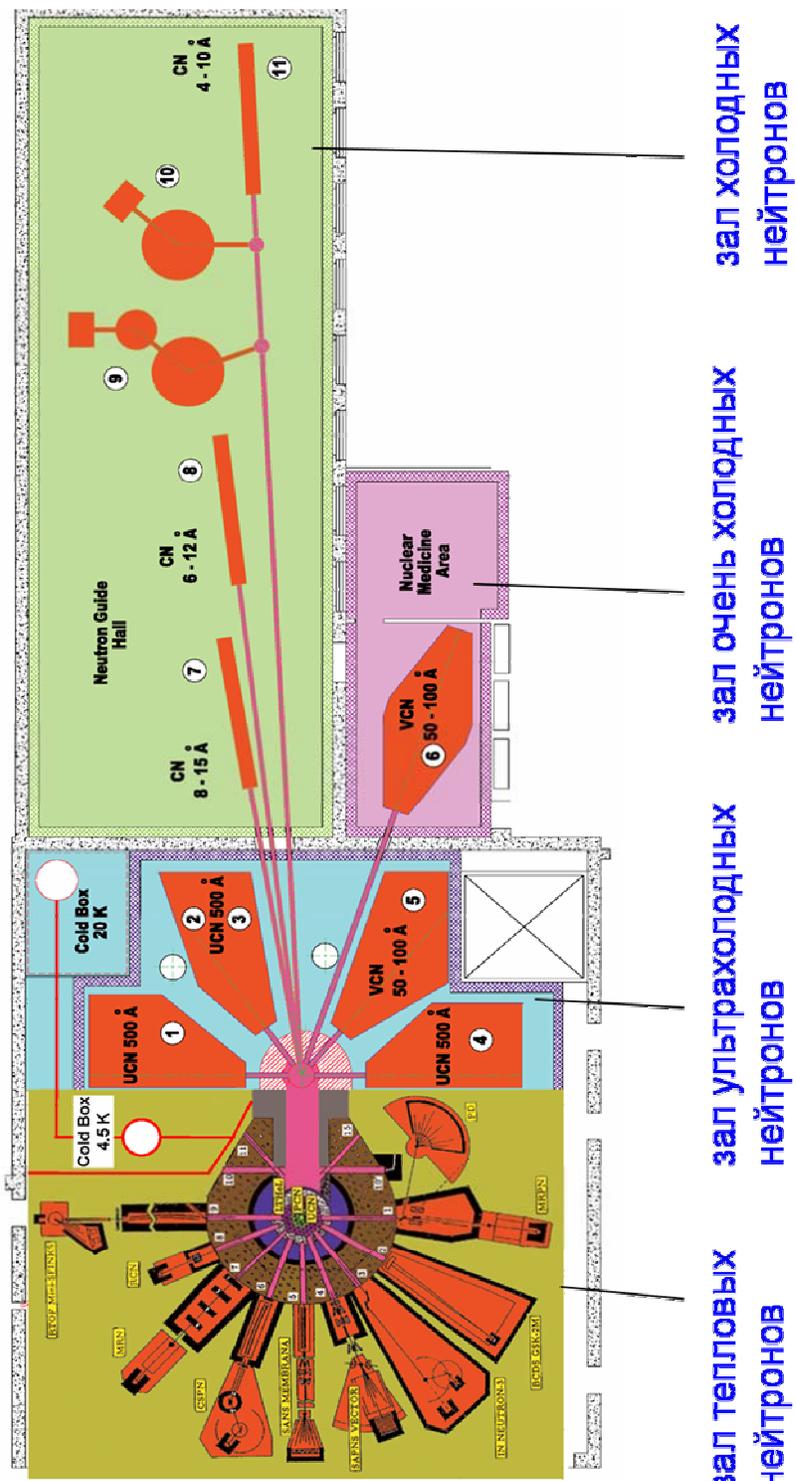
Хотя реакторы ВВР-М и ИР-8 проектировались без холодных источников и нейтроноводов, в них имеются благоприятные возможности для их размещения. Реактор ВВР-М обладает так называемой тепловой колонной, т.е. каналом диаметром 1 м примыкающим к активной зоне реактора. Реактор ИР-8 обладает каналом диаметром 230 мм расположенным в бериллиевом отражателе большого объема. В обоих случаях имеется удобная возможность размещения источников холодных нейтронов за пределами активной зоны реактора. Это исключительно важно, т.к. не требует реконструкции собственно реактора и не затрагивает вопросов режима работы реактора.

Наличие инфраструктуры реакторов, реакторного персонала, а также физиков с исследовательскими установками позволяет сделать такую модернизацию весьма эффективной и относительно недорогой. По предварительным оценкам затраты на нее могут составить 200÷400 млн. руб. для каждого из реакторов.

Реакторы ВВР-М и ИР-8 после реконструкции могли бы стать важным плацдармом для подготовки исследований на реакторах ПИК и ИБР-2. Это позволило бы консолидировать имеющиеся научные кадры, а также привлечь и подготовить новые кадры.

Следует особо подчеркнуть, что проект источника ультрахолодных нейтронов на реакторе ВВР-М предполагает получить исключительно высокую плотность ультрахолодных нейтронов вплоть до $2 \cdot 10^3$ н/см³, что на два порядка величины больше, чем на реакторе ИЛЛ. Такой результат будет достигнут за счет использования уникального источника на основе сверхтекучего гелия при температуре 1,2 К. Такой источник требует специальных условий с очень низким тепловыделением. Именно такие условия можно создать в тепловой колонне реактора ВВР-М, что и открывает возможности для создания уникального источника ультрахолодных нейтронов. После создания высокоинтенсивного источника ультрахолодных нейтронов будет закреплён российский приоритет в исследованиях с ультрахолодными нейтронами, которые были начаты в России (Дубна, Гатчина, Москва) в 70 годы. Планируемые на реакторе ПИК источники холодных нейтронов с рекордными потоками позволят также восстановить и российские приоритеты в исследованиях с холодными нейтронами.

Важно отметить, что международное сотрудничество и участие России в ИЛЛ являются исключительно актуальными и важными, особенно в настоящее время, пока предлагаемые проекты модернизации и запуск новых реакторов не осуществлены.



Реактор ВВР-М после реконструкции (общий план).

Составители: В. Ф. Ежов, В. В. Фёдоров

Отпечатано в типографии ПИЯФ РАН, тир. 50 экз.