

НЕЙТРОННЫЙ СВЕТ

Как закрутилось колесо

Каждый сотрудник Лаборатории нейтронной физики Объединенного института ядерных исследований хранит в памяти корпоративное предание о том, «как закрутилось колесо».

Оно гласит, что в конце 1955 года в обнинском Физико-энергетическом институте проходил семинар, где обсуждалась работа американских ученых по исследованию зависимости сечения деления урана-235 от энергии нейтронов. В их эксперименте использовался диск с нанесенным на него слоем урана. Он вращался синхронно с прерывателем пучка, а тем временем измерялась возникшая на ободу колеса радиоактивность урана. Вдруг Дмитрий Иванович Блохинцев, в то время директор ФЭИ поднял руку и сказал: «А что, если часть активной зоны реактора закрепить на ободу такого диска, да так, чтобы при каждом обороте эта часть проходила бы вблизи неподвижной зоны и кратковременно создавала бы сверхкритическую массу?»

Эти слова положили начало работе над проектом импульсного реактора на быстрых нейтронах – ИБР. И когда в середине 1956 года Дмитрию Ивановичу предложили возглавить организуемый в Дубне международный институт, он поставил условие: соорудить там такой реактор в качестве источника нейтронов. Для исследований на нем логично было образовать специальное научное подразделение. Так появилась Лаборатория нейтронной физики. Ее директором назначили будущего академика и будущего лауреата Нобелевской премии И.М. Франка, заместителем директора – выдающегося советского физика Ф.Л. Шапиро.

Пуск первого ИБР состоялся 23 июня 1960 года. То самое «закрутившееся колесо» - элемент его конструкции, механический модулятор реактивности в виде стального диска с запрессованными вкладышами из урана-235, который обеспечивал переход в надкритический режим на несколько микросекунд.

...Предание не обманывает. Именно Д.И. Блохинцев настоял на создании и реактора, и ЛНФ, ибо, как сказал нынешний директор лаборатории В.Н. Швецов, принадлежал к тем людям, «которые могут ставить условия». Помимо прочих оснований имело значение и то, что высказанная им на обнинском семинаре идея была реализуема. Именно этот принцип был реализован в одной из схем первой атомной бомбы. Блохинцев предложил использовать тот же принцип, но в хитроумном инженерном устройстве. Следовало, не давая реакции затухнуть, периодически подстегивать ее, не доводя, разумеется, до ядерного взрыва, даже до перегрева и расплавления, а для этого требовалось быстро убирать одну из частей, составляющих критическую массу – что как раз и достигалось вращением диска с урановыми вкладышами.

Идея была блестящим образом реализована, говорит Валерий Николаевич Швецов. Буквально за год теоретики Юрий Стависский и Илья Бондаренко разработали теорию. На ее реализацию ушло четыре года, она, при безупречном обосновании, потребовала предельно точного выполнения. Похожих проектов в 60-е годы выдвигалось немало, но никто не решился довести дело до конца, потому что было оно, конечно, рискованным: ведь, по сути, несколько раз в секунду вы начинали взрывать атомную бомбу. А в ОИЯИ – решились.

Первый пульсирующий реактор ИБР заработал в здании 43 в 1960 году. Он имел среднюю мощность всего 1 (один!) кВт, мощность утюга или кипятильника. Для реакторов это ничто. Средний по времени выход нейтронов составлял 10^{13} нейтронов в секунду – «тоже почти ничего», говорит Швецов. Но это средние величины. В импульсе они многократно возрастают. При «среднем» киловатте пиковая мощность первого ИБР достигала величины более 3 МВт. За восемь лет работы на нем сделаны впечатляющие открытия: обнаружены так называемые «ультрахолодные нейтроны», зафиксировано усиление эффекта нарушения пространственной четности в нейтронных резонансах при взаимодействии поляризованных нейтронов с поляризованными ядрами.

Один в четырех «лицах»

Проработал ИБР до 2001 года. Все это время он оставался прекрасным нейтронным источником, на котором были выполнены сотни экспериментальных работ мирового уровня. После модернизации 1968 года он превратился в ИБР-30

– реактор со средней мощностью 30 кВт и длительностью импульса 4,5 микросекунды. В то же время, тогда, когда началась эксплуатация первого ИБРа, Ф.Л. Шапиро предложил идею пульсирующего реактора со средней мощностью порядка нескольких мегаватт. Именно тогда началась история сегодняшнего ИБР-2. Этот реактор работает на том же принципе механической модуляции реактивности, но в отличие от первых ИБРов эта модуляция достигается в результате вращения вблизи активной зоны реактора металлических лопастей – подвижных отражателей.

С момента ввода в эксплуатацию и до сегодняшнего дня реактор ИБР-2 входит в тройку самых высокопоточных исследовательских реакторов. В течение 2007-2010 годов была проведена его глубокая модернизация с заменой корпуса, активной зоны, системы контроля и управления. На протяжении всего времени эксплуатации реактор ИБР-2 является установкой коллективного пользования, на которой проводят исследования ученые из всех стран-участниц Объединенного института ядерных исследований и других стран. Например, только в 2006 году пользователи из 13 стран (среди которых, кроме России, наибольшую активность проявляли Польша, Румыния, Словакия и Германия, как ассоциированный член ОИЯИ) провели около 150 экспериментов на выделенных пучках. Вообще же на ИБР-2 успели поработать ученые более чем 30 стран.

Модернизация основывалась на расчетах специалистов Лаборатории. Заново спроектировано и изготовлено подвижное отражательное устройство - механический модулятор реактивности в виде двух вращающихся лопастей. Оно, собственно, и делает ИБР-2 самым необычным реактором в мире. При сохранении высоких физических параметров модулятор сможет служить 50000 часов или 25 лет (прежнее устройство приходилось менять раз в 7 лет).

На одном из предприятий России была подготовлена новая топливная загрузка из высокообогащенной двуокиси плутония. Впоследствии в ЛНФ топливные элементы были собраны в кассеты для помещения в активную зону. Отработанное топливо было перемещено во временное резервное хранилище, а затем отправлено на переработку. Извлекли все старое оборудование. Эта ответственная и сложная операция – из-за высокой интенсивности остаточного наведённого гамма-излучения с поверхности извлекаемых предметов – прошла без каких-либо происшествий. Был поставлен и смонтирован новый корпус реактора, заполнены жидким натрием новые охлаждающие контуры, что, заметим, оказалось достаточно сложной задачей; установлены новые механизмы

управления и контроля, введены системы автоматического слежения за технологическими параметрами и автоматического управления защитой. В активной зоне реактора появился новый радиоактивный источник нейтронов, обеспечивающий ускоренное «поджигание» процесса производства нейтронов. Наконец, установка обрела достойный дизайн, а в здании реактора согласно новым требованиям, предъявляемым надзорными органами РФ, создан дополнительный защитный периметр с необходимыми средствами контроля.

На какое место в мировой «табели о рангах» мог рассчитывать модернизированный реактор - и сам по себе, и в комплексе с окружающими установками? Это было определено в 2010 году в соответствии с заданием дирекции и по поручению Ученого совета ОИЯИ. Что касается установок, то по всем параметрам тогда они практически не уступали признанным международным лидерам. Однако для привлечения пользователей необходимо было сделать их многофункциональными, а для этого развить ряд методик, которые разрабатываются и в других исследовательских центрах. Это виделось вполне реальной и не слишком дорогой задачей (цена вопроса – 1,5 миллиона долларов). Сравнение по рейтингу для дифрактометров высокого разрешения - установок, которые позволяют на атомном уровне с высокой степенью точности изучать структуру различных материалов, - показало, что дифрактометр, использовавшийся на реакторе ИБР-2 долгие годы, почти по всем параметрам соответствовал мировым требованиям и мог при определенной доработке служить экспериментаторам дальше. Всего же окружающий реактор исследовательский комплекс насчитывает 14 экспериментальных каналов. Все они в той или иной степени доведены до требований мирового уровня и служат экспериментаторам не хуже, а по отдельным характеристикам даже лучше гораздо более дорогих установок в Европе, США и Японии.

Сам же модернизированный реактор ИБР-2 при соблюдении эксплуатационного режима должен прослужить 25 лет. В течение ближайших 20 лет ИБР-2 будет входить в пятерку наиболее высокопоточных источников в мире. Из существующих импульсных источников нейтронов он выделяется своей рекордной средней мощностью и пиковым значением нейтронного потока, а также малой частотой повторения импульсов. При средней мощности 2 мегаватта пиковая мощность, то есть мощность в импульсе превышает среднюю почти в тысячу раз и достигает величины 1,85 гигаватт! За счет столь высокой пиковой мощности реактор вырабатывает рекордное количество нейтронов с единицы

поверхности активной зоны в единицу времени. Это обеспечивает уникальные возможности исследования новых материалов и наноструктур, позволяет исследовать объекты с характерными размерами от десятых долей до тысяч нанометров. Наконец, ИБР-2 экономичен - расходы на его эксплуатацию в сотни раз меньше, чем для нейтронных источников на основе протонных ускорителей, и экологичен, поскольку срок службы топливных сборок повышен до 15 лет и, следовательно, производится в десятки раз меньше радиоактивных отходов, чем в сравнимых по мощности стационарных реакторах.

Очень необходимая сущность

Что ж, отцы-основатели во главе с Д.И. Блохинцевым смотрели далеко вперед. Задуманный ими источник нейтронов действительно должен был стать ядром специальной лаборатории, послужить кристаллизации эффективной структуры, которая – просто по роду своей деятельности – в обозримом будущем не останется без работы, потому что физические исследования не прекратятся ни в обозримом, ни в отдаленном будущем.

К тому же, реактор ИБР-2 не только сущностный стержень лаборатории, значение которого в полной мере могут оценить лишь посвященные, но и ее флаг. Очень заметный, видный издалика. И очень уважаемый. Ведь нейтроны – великолепный инструмент научных, инженерных, промышленных, экологических, медицинских, материаловедческих исследований благодаря своим особым свойствам. Они не имеют заряда, но представляют из себя маленький магнит. Длина волны медленных нейтронов сравнима с межатомными расстояниями, они рассеиваются на ядрах атомов... Поэтому нейтроны идеальны для изучения объемных образцов, биологических систем, элементов в сложных системах, процессов химических реакций, атомной и молекулярной структуры вещества, магнитной структуры, атомной и магнитной динамики...

Наносистемы, функциональные материалы, комплексные жидкости и полимеры, фармакология, молекулярная биология и другие науки о жизни, горные породы и минералы, инженерная диагностика, ядерная физика – во всех этих областях пользуются нейтронными исследованиями. Теперь даже удивительно, что в существование нейтронов поверили не сразу. Они проявляли себя и до экспериментов Дж. Чедвика в 1932 году, однако никто из ученых, говорит В.Н. Швецов, не взял на себя смелость ввести новую сущность – от этого

предостерегала знаменитая «Бритва Оккама» («Не умножайте число сущностей сверх необходимого»). Возникающие незнакомые эффекты пытались объяснить гамма-квантами. Но гамма-квантов с такой энергией нет. Оставалось предположить, что «это что-то новое» - новое проникающее излучение. Чедвик измерил массу частицы этого излучения. Она оказалось почти равной массе протона.

Нейтронная физика, рассказывает Валерий Николаевич, началась с использования радиоизотопных источников нейтронов, позже появились источники на основе ускорителей и реакторы. Первый такой реактор был создан Э.Ферми в 1942 году. Импульсные источники, как мы уже говорили, для ряда исследований гораздо эффективнее, чем стационарные. Плотность потока нейтронов на этих источниках, которая определяет качество источника и, соответственно, нейтронного спектрометра, существенно выше. Нейтрон - электрически нейтральная частица. Поэтому измерить его энергию теми же способами, что энергию заряженных частиц, невозможно. Ионизацию он не производит, магнитное поле заметным образом не искривляет его траекторию.

Поэтому практически единственный надежный способ спектрометрии нейтронов – время пролета. Оно обратно пропорционально скорости. По скорости, вернее, по кинетической энергии в электрон-вольтах и происходит временная развертка нейтронов в эксперименте, то есть, определяется их энергетический спектр. Он необходим, чтобы использовать нейтроны как инструмент анализа тех объектов, с которыми они взаимодействуют. Если размер объекта сопоставим с длиной волны нейтрона, наблюдаются явления дифракции, интерференции, рассеяния – как в нормальной световой оптике. Так что недаром говорят о «нейтронной оптике», в которой нейтроны рассматриваются как свет, ведут себя аналогично фотонам.

Так как от реактора можно получить нейтроны различных энергий, продолжает В.Н. Швецов, можно исследовать объекты начиная от атомных ядер и заканчивая наночастицами. Все процессы взаимодействия нейтронов с объектами «сугубо немонотонны» по энергии, они дают острые пики при резонансах, когда вероятность взаимодействия – сечение - может увеличиться в тысячи раз. Структура этих резонансов в случае ядерной физики соответствует структуре ядра, в случае твердого тела дифракционные пики говорят о структуре кристалла, о положении атома внутри этого кристалла. При сжатии или, скажем,

нагревании начнутся фазовые переходы, пики изменятся, отражая изменения в структуре кристалла.

Нейтронное зрение информативно при точном измерении энергий. Эксперименты на импульсном источнике лучше защищены от искажений. Для этого источника, кроме прочего, очень важен такой параметр как длительность импульса. От него зависит качество определения энергии, энергетическое разрешение экспериментальной аппаратуры. Уменьшение длительности импульса, например, в 10 раз приводит к стократному росту качества источника. При исследованиях в области физики твердого тела оно должно быть на уровне до нескольких электрон-вольт, то есть укладываться в диапазон химических связей внутри молекул. В этом случае могут применяться и методики неупругого рассеяния, когда нейтроны используются для того, чтобы следить за динамикой молекул, за тем, как колеблются молекулы в кристаллах, атомы в молекулах, какую энергию они передают налетающим нейтронам или, наоборот, какую энергию забирают.

Где возможен прорыв

Даже из популярного, а значит, неизбежно упрощенного и обедненного описания нейтронных исследований становится понятно, насколько богатые возможности они предоставляют ученым. На маленькой частице ядерной материи держится большая наука. Лаборатория нейтронной физики, созданная «под реактор ИБР», выросла в целый многопрофильный научно-исследовательский институт классического толка, развивающий как фундаментальные изыскания, так и прикладные работы.

Те и другие, понятно, развиваются на направлениях, которые определяются и стимулируются возможностями ИБР. И наоборот, лимитируются возможностями базовых установок Лаборатории. Впереди у реактора 20 лет службы, он входит в пятерку самых высокопоточных источников в мире, говорит директор Швецов. А вот по экспериментальным установкам, несмотря на модернизацию, ЛНФ все-таки отстает от мирового уровня. Поэтому едва ли не главная задача Лаборатории – наращивание и совершенствование экспериментальной базы. А наиглавнейшая задача ЛНФ, по словам Швецова, - исходя из возможностей и ограничений, плюсов и минусов ситуации выделить и развить прорывные направления, которые можно было бы поставить в один ряд с

теми, что определяют место ОИЯИ в мировой научной иерархии, авторитет Дубны.

Одно из таких направлений – изучение магнитной структуры веществ при сверхвысоких давлениях. Здесь ЛНФ можно, безусловно, причислить к мировым лидерам.

Второе направление – биология. Здесь очень перспективным выглядит сотрудничество с Лабораторией радиобиологии ОИЯИ, например, по вопросам подготовки «марсианской миссии».

Третье направление – нейтронная ядерная физика. Для его развития необходима доводка второго нейтронного источника Лаборатории – установки «Импульсные резонансные нейтроны» (ИРЕН). Пока она используется процентов на десять своих возможностей, пока удается получить всего десять процентов от ожидаемого выхода нейтронов. Его надо повышать на порядок, а то и больше, говорит Валерий Николаевич. Сейчас закупается новое оборудование для ИРЕН. Впереди – масса конструкторско-монтажных работ, которые нужно завершить к концу 2015 года. Это позволит выйти на вполне приличный в сравнении с мировым уровень. Все эти задачи требуют хорошего кадрового обеспечения, в первую очередь – инженерного. Физиков в ЛНФ хватает, и опытных, и молодых, с нормальным уровнем зарплаты, особенно в Отделении конденсированных сред. Исследователи есть, нужны инженеры – реакторщики, электротехники.

Перекресток на перекрестке

Впрочем, прорывные направления – особая статья, они не отменяют повседневной работы над плановыми темами. Пользовательская политика строится вокруг реактора ИБР-2, говорит ученый секретарь Лаборатории Дорота Худоба. Имеющейся экспериментальной базы для ее реализации вполне достаточно. В строю – два работающих рефлектметра, третий, создающийся по совместному проекту с Германией, - в стадии подготовки, пробные измерения уже проведены. Очень интересная установка, по словам Дороты, - дифрактометр, где измеряются параметры материалов сварных конструкций. Здесь выполняются как прикладные исследовательские, так и заказные работы.

Большинство окружающих реактор экспериментальных установок входит в пользовательскую программу. Она высоко оценивается специалистами и привлекает в ОИЯИ ученых со всего света. Благодаря ей Лаборатория стала

одним из перекрестков мировой науки, точнее, «малым перекрестком на большом перекрестке», потому что «большим перекрестком» давно является вся Дубна.

Собственно говоря, ЛНФ как часть международного института обязана обеспечить доступ желающим к своим фирменным установкам, для чего организован клуб пользователей. Институт и Лаборатория получают от этого несомненную пользу. Ученые, приезжающие на эксперименты, как правило, входят в корпус давних, проверенных партнеров или же, скорее всего, таковыми со временем станут - соавторами, участниками коллабораций, экспертных комитетов и прочих профессиональных групп. Желающих много, отмечает Дорота Худоба, ведь ИБР-2 исправно снабжает пользователей нейтронами для научных исследований в разных дисциплинах – помимо ядерной физики и физики твердого тела это и химия, и биология, и фармацевтика, и медицина, и иные области знания.

Подать заявку на участие в исследованиях на ИБР-2 можно через сайт ЛНФ, где представлены все включенные в пользовательскую программу установки из окружения реактора с их возможностями. (Такая система давно практикуется на Западе, а вот в России ее освоили, пожалуй, только в ЛНФ.) С 1 марта по 15 апреля принимаются заявки на второе полугодие текущего года, в сентябре-октябре – на первое полугодие следующего. Человек для решения своей задачи выбирает, допустим, нужный ему спектрометр с нужными ему характеристиками и отправляет в Дубну через интернет заявку на время для проведения измерений. Его просьбу рассматривает один из трех международных комитетов экспертов по направлениям. Интересная задача, идея, надо дать время, решает комитет и выделяет три дня или неделю, а вообще-то столько, сколько необходимо для эксперимента. Дальше начинается согласование по срокам, и когда вопрос утрясается, делается российская виза, заказывается гостиница, организуется транспорт в аэропорт. Ученый прилетает, приезжает в Дубну, проходит инструктаж по технике безопасности, знакомится с установкой, сдает экзамен по радиационной безопасности, оформляет допуск на работу и проводит эксперимент. Бывает так, что за время пребывания в Дубне исследователь успевает обработать данные, написать статью и уезжает домой полностью удовлетворенный.

«Дальше порога исчезновения»

Без фундаментальных исследований в институте класса ОИЯИ, понятно, никуда. Реактор ИБР подходит как для них, так и для прикладных исследований. Баланс между теми и другими определяется научной программой исследований Лаборатории и интересами пользователей. Лаборатория регулярно выигрывает конкурсы по федеральным целевым программам, получает гранты различных фондов. Внешнее финансирование приходит исправно. Значит, интерес государства к деятельности Лаборатории есть и выражается он в конкретных суммах.

Всплеска теоретических исследований стоит ожидать после доработки ИРЕН – источника импульсных резонансных нейтронов, который, собственно, и мыслится как инструмент для решения нейтронно-физических проблем. Он позволит вести исследования в областях ядерной астрофизики, звездного нуклеосинтеза, отслеживать нарушения фундаментальной симметрии, изучать свойства высоковозбужденных ядер. Кроме того, оказалось, что спектр нейтронов от ИРЕН очень хорошо накладывается на спектр одной из установок Большого адронного коллайера, причем именно в том месте, где расположены детекторы, и это позволяет вести также прикладные исследования для важных экспериментов в ЦЕРН.

Но это дело будущего. Пока же одной из самых перспективных задач ЛНФ, способной вырасти в прорывное направление, можно считать изучение магнетизма веществ при сверхвысоких давлениях. В нее органично входит уточнение современных моделей природы магнитного поля Земли, которые сейчас в основном опираются на результаты косвенных методов исследований, не дающих полной картины магнитных свойств вещества на атомном уровне. Развитие нейтронных экспериментов поможет прояснить эти вопросы.

Руководитель направления «Давление - магнетизм» Денис Козленко объясняет их цель и смысл. Во-первых, понять, как устроен магнетизм в различных веществах на уровне атомного строения; во-вторых, понять, как может меняться магнетизм, когда мы меняем межатомное расстояние, прикладывая давление, и выявить общие закономерности природы магнитных явлений. Что в действительности происходит с ферромагнетиками, когда магнитные моменты отдельных атомов разворачиваются в другую сторону и пропадает намагниченность? Почему их ориентация меняется? Почему... но спектр явлений

тут достаточно широк. Что все это значит? Как может прояснить природу магнетизма?

Один из интересных классов магнитных веществ - квантовые магнетики, продолжает Д.П. Козленко. Некоторые из них отличаются особой внутренней конфигурацией – треугольной решеткой. На такой решетке, называемой фрустрированной, один из трех магнитных моментов может поворачиваться как в одну, так и в другую сторону по отношению к соседям без потери в полной энергии системы, что приводит к возникновению новых физических явлений. В результате возникают неожиданные экзотические магнитные состояния вещества - состояния «квантовой спиновой жидкости», в которой сами магнитные частицы не изменяют своего положения, а вот направления их магнитных моментов со временем меняются, создавая как бы аналог текущей жидкости. Этими флуктуациями, в принципе, можно управлять, хотя это не так-то просто, нужно приложить очень сильное магнитное поле, чтобы все спины согласованно повернулись... Но задача управления пока и не ставится, на первом плане задача чисто научная – получить и понять особенности этого необычного и редко реализуемого состояния вещества.

Недавно, говорит Д. Козленко, было обнаружено, что состояние квантовой спиновой жидкости реализуется естественным образом в природном минерале гербертсмитите, названном так в честь своего первооткрывателя Герберта Смита. Исследования, проводимые в ЛНФ, показали, что магнитные моменты спиновой жидкости, изменяющие ориентацию под влиянием сверхвысоких давлений, можно “заморозить” и перевести в классическое состояние антиферромагнетика, в котором каждому направлению момента соответствует противоположное направление на соседних магнитных атомах.

Вот так, по крупицам складывается объяснение природы магнетизма в материалах. Что, например, добавляет найденный эффект? Он позволяет уточнить наши представления о магнетизме в различных системах. Если мыслить в масштабе планеты Земля, то к уже существующей картине добавлены новые знания о том, как устроены магнитные вещества. Таких исследований, по словам Козленко, выполнено уже немало. Есть опыты по подавлению намагниченности с объяснением причин, есть - по изменению магнитных свойств в зависимости от межатомных расстояний. Обнаруженные закономерности помогут построить общие модели, которые объяснят поведение вещества. А некоторые из этих работ

в перспективе могут оказать значительное влияние на построение непротиворечивой теории магнитного поля Земли.

Благодаря опытам ЛНФ подходы к ней стали яснее. Но развитие данного направления исследований ставит перед учёными новые проблемы. Во-первых, ранее применялось относительно небольшое давление – до 70-80 тысяч атмосфер. В недрах планеты оно гораздо больше, там оно достигает сотен тысяч атмосфер. Создание сотрудниками Лаборатории в сотрудничестве с Курчатовским институтом уникальной установки для исследования микрообразцов при сверхвысоких давлениях, которая уже заработала на физический эксперимент, выведет подобные эксперименты на новый уровень. Пока достигнуто 120 тысяч атмосфер, но к выходу на проектные параметры до 500 тысяч атмосфер нет никаких препятствий, это лишь вопрос времени, необходимого для отработки экспериментальной методики. По многим из параметров новая установка ЛНФ опережает мировые аналоги, но вот по размерам детекторной системы уступает значительно, примерно в 20 раз, что накладывает ограничения на максимальный диапазон давлений и в перспективе может привести к снижению конкурентоспособности. Поэтому сейчас в ЛНФ идет поиск решений, которые позволят увеличить размеры детекторов ОИЯИ. Использование новой установки позволит перейти к диапазону давлений, существующих в недрах Земли. Следующие исследования как раз и будут посвящены находящимся там веществам.

«Сейчас мы начинаем исследовать один из самых древних магнетиков с сильной намагниченностью – магнетит Fe_3O_4 , - говорит Денис Козленко. - Он использовался в компасах и вообще сыграл важную роль в эволюции человечества. Железо и его соединения, в основном, и формируют магнитное поле Земли». Первые результаты показывают, что намагниченность этого материала под давлением меняется. За счет чего, с какой закономерностью? Подождем ответа.

Бутылка, полная нейтронов

Первые работы ЛНФ были посвящены ядерной физике, говорит заместитель директора Лаборатории Е.В. Лычагин. С использованием нейтронов изучалась, например, ядерная структура. Сейчас же ядерно-физическая проблематика находится на некотором спаде, на первый план выдвинулась

физика твердого тела, где освоены очень мощные экспериментальные методы, хотя актуальности многих и многих фундаментальных вещей никто не отменял. Даже в вопросах взаимодействия нейтронов с атомными ядрами остаются пробелы, на заполнение которых существует очевидный запрос в связи с разработкой новых поколений реакторов и нового реакторного топлива. Теоретиков по-прежнему волнуют вопросы ядерной структуры и физики самого ядра. Их могут снять нейтронные исследования.

Требует пристального внимания область сверхнизких энергий с обитающими там холодными (скорость – менее 1000 м/сек) и ультрахолодными (менее 5 м/сек) нейтронами. Ультрахолодный нейтрон - это очень интересный объект! – убежден Лычагин. Работу с такими объектами начали в ЛНФ под руководством Ф.Л. Шапиро. Он вдохновился идеями академика Я.Б. Зельдовича выполнить эксперименты по удержанию нейтронов. (Впоследствии Я.Б. Зельдович стал одним из соавторов открытия 1968 года «Явление удержания медленных нейтронов».) Зельдович предположил, что существуют нейтроны, обладающие уникальными свойствами, а именно: они не то что не проникают вглубь любого вещества, а наоборот – вследствие своей малой энергии – отражаются от него. А это значит, заявил Зельдович, что их можно, условно говоря, «насыпать в бутылку», то есть в какой-то замкнутый объем и хранить, спокойно рассматривая, внимательно изучая, наблюдая за их поведением во внешнем поле. Ф.Л. Шапиро предложил использовать такие нейтроны для поиска электрического дипольного момента. У элементарной частицы его быть не должно, а если он все-таки обнаружится, то это укажет на несохранение временной инвариантности. Что сие означает? То, что при обращении времени вспять (замене t на минус t) процесс может не пойти тем же путем, которым пришел к данному моменту.

Нейтроны, вылетевшие из делящихся в реакторе ядер с большой скоростью и энергией, довольно быстро «остывают» при взаимодействии с веществом и могут применяться для изучения различных явлений. Холодных и ультрахолодных нейтронов довольно мало, всего 10^{-12} от полного потока, и в этом большая проблема исследований, говорит Егор Валерьевич. Самый интенсивный на сегодня поток нейтронов имеет реактор Института Лауэ-Ланжевена в Гренобле мощностью 56 МВт. Источник ультрахолодных нейтронов на этом реакторе позволяет накапливать в сосудах до 50 таких частиц в кубическом сантиметре. Вообще же, чем больше мощность источника, тем больше таких

нейтронов. Чем они интересны? Для их поведения важны все известные типы взаимодействия: ядерное, электромагнитное, гравитационное и слабое. Ядерное и магнитное взаимодействия позволяют удерживать ультрахолодные нейтроны в вещественных или в магнитных, где они вообще не сталкиваются со стенками, ловушках. Такие медленные нейтроны могут «подпрыгивать» только на один-два метра в гравитационном поле Земли и превращаются в протоны в результате распада.

Так что, несмотря на некоторый упадок нейтронных ядерно-физических исследований обращение к сверхнизким энергиям иногда приводит к результатам, которые не удастся получить при сверхвысоких энергиях, полагает Е.Лычагин. Например, эксперименты по поиску электрического дипольного момента нейтрона, связанные с вопросом несохранения временной инвариантности, ставились в разных научных центрах. Последний результативный датирован 2006 годом. С тех пор никому продвинуться не удалось, даже большая коллаборация с участием англичан, японцев и многих других застряла на стадии сооружения установки, пока не дойдя до измерений.

Эксперимент по наблюдению квантовых состояний нейтронов в гравитационном поле Земли был предложен в ЛНФ В.И. Луциковым еще в далёком 1975 году и выполнен в ИЛЛ в 2002 году. Впервые было показано квантование энергии материального тела (нейтрона) в гравитационном поле. На первом гравитационном уровне нейтрон имеет энергию всего 10^{-12} эВ, а точность измерения энергии, в сооружаемых в настоящее время экспериментальных установках) может быть доведена до 10^{-18} эВ.

Значение времени жизни самого нейтрона представляет интерес для проверки предсказаний Стандартной Модели и моделей первичного нуклеосинтеза. Как ни странно, точность определения этого времени (при значении около 15 минут) составляет всего одну тысячную, в то время как для многих короткоживущих частиц эта точность намного выше.

Самые точные эксперименты связаны с использованием ультрахолодных нейтронов. Измерение времени их жизни, казалось бы, не представляет трудностей: идеологически этот опыт очень прост. Но оказывается, что корректно учесть все возможные дополнительные потери нейтронов из ловушки, не связанные с распадом нейтрона, является достаточно трудной методической задачей. Эти потери почему-то не соответствуют теоретическим предсказаниям, на практике всегда получается больше. Физики потратили много времени в

попытках понять – почему?.. «Сегодня мы, кажется, понимаем, в чем причина, - говорит Егор Лычагин. – Мы видим, что при взаимодействии с поверхностью стенок сосуда ультрахолодные нейтроны меняют свою энергию, в том числе и увеличивают ее, но при этом всё ещё остаются ультрахолодными. Мы связываем эти изменения с взаимодействием нейтронов с поверхностными наночастицами вещества. Возможно, что исследования этого процесса позволит разработать новый метод изучения динамики поверхностных наночастиц в русле общих исследований физики твердого тела». В этих исследованиях ультрахолодные нейтроны зарекомендовали себя как уникальный и очень чувствительный инструмент изучения поверхностей - элементного состава, динамики атомов и наночастиц.

Так в фундаментальных работах закладываются основы новых исследовательских технологий, развитие ядерной физики, постановка ядерно-физических экспериментов приводит к всплеску интереса со стороны специалистов по физике твердого тела. Интересные результаты вытекают из фундаментальных исследований, имеющих непосредственное отношение к вопросам практики. Подчеркнем: не из прикладных работ, а именно из фундаментальных. Таковы особенности современного высокотехнологического уровня.

Но для того, чтобы использовать ультрахолодные нейтроны как стабильный инструмент, нужны значительно более высокие плотности потока. И в этом направлении работа продолжается, разрабатываются новые источники ультрахолодных нейтронов. К сожалению, с 1986 года в России нет ни одного не только нового, но вообще ни одного их источника. Все эксперименты на этом направлении выполняются в Гренобле или на источнике в Майнце, ФРГ, который периодически останавливается. Поэтому, говорит Лычагин, физики Дубны с надеждой смотрят на север, в сторону Гатчины, ведь тамошний реактор ПИК когда-нибудь, да запустят.

Окно в наномир

Многогранность ЛНФ, будучи ее отличительной, фирменной чертой, одновременно порождает некоторые сложности, говорит заместитель директора Лаборатории Егор Лычагин. Направления исследований в целом мало зависят друг от друга и могут развиваться каждое в своем темпе. В свое время ядерно-

физическое направление несколько притормозило, физика твердого тела, напротив, вырвалась вперед и оттеснила многолетнего лидера на второй план, тем более, что реактор ИБР-2 ориентирован преимущественно на эксперименты в этой области. Особенно выделяется здесь Отдел конденсированных сред под руководством уже знакомого нам Дениса Козленко. А в нем обращают на себя внимание несколько успешно разрабатываемых тем.

Ну, например, интересны исследования процессов зарядки и разрядки аккумуляторов нового поколения на основе лития, более совершенных, чем хорошо знакомые всем нам аккумуляторы. «Внутривидение» на основе метода рассеяния нейтронов способно оказать тут неоценимую помощь. Циклы хорошо отслеживаются по характерному смещению нейтронных пиков, а по изменению их интенсивности видно, как ведет себя литий. Его поведение поддается детальному анализу, который создает научную основу для совершенствования технологий создания литиевых аккумуляторов.

Нейтронный источник открывает окно в наномир, дает возможность заглянуть внутрь литиевого аккумулятора, изучить, что происходит с твердым электролитом, отслеживать структурные изменения. За несколько минут экспериментаторы получают достаточно хорошие по качеству, достоверные статистические данные для расшифровки реальной структуры материала. Получают, заметим еще раз, за счет импульсного характера реактора.

Интенсивно ведутся работы по наноматериалам, по биологическим материалам, по полимерным материалам. Вообще, создание материалов, обладающих физическими и химическими свойствами, которые изменяются при изменении внешних условий или параметров окружающей среды предсказуемым и управляемым образом, является одной из главных задач науки и промышленности XXI века. Взять хотя бы энергетическую сферу. Ожидаемый переход на водородную энергетику невозможен без разработки надежных способов получения, транспортировки и хранения водорода, а эти способы, в свою очередь, невозможны без надежных материалов.

В создании всех новых методов и материалов велика роль исследовательских нейтронных технологий. Они незаменимы, например, при работе с полимерами. Нейтроны обладают уникальными свойствами, в частности, способностью «маркировать» отдельные молекулы и делать их видимыми с помощью изотопного замещения. Исследователи могут быстро

определить, насколько смешиваются какие-то полимеры, какова оптимальная температура смешивания, каким должен быть оптимальный состав материала.

Возьмем эксперименты, ведущиеся в ЛНФ с магнитными эластомерами. Это полимеры, в которые вставлены магнитные наночастицы. Ими можно управлять с помощью магнитного поля. Их свойства сильно меняются под его воздействием, что, собственно, и обеспечивает возможность широкого применения этих эластомеров. Если их, скажем, растянуть в магнитном поле в два раза, они будут держать форму, а уберете поле – сожмутся до прежнего размера. Это не что иное, как управление линейными размерами материала, что необходимо для очень широкого круга технологий, например, технологий контроля размера деталей.

Интересно, как проявляются эти эффекты на уровне атомной организации материи. Для изучения этого вопроса тоже используется рассеяние нейтронов. Оказалось, что встроенные магнитные частицы образуют достаточно большие сложные агрегаты, причем разной величины и форм - цилиндрические, эллипсоидные полые, эллипсоидные с цилиндрическими полостями. Наличие тех или иных конфигураций и определяет свойства вещества.

Еще одно новое направление – это исследование магнитных слоистых структур со слоями толщиной от десятков до тысяч ангстрем. Оказалось, что можно создавать множество наноструктурированных объектов, вроде, скажем, железо-хрома. Соединяя ферромагнетик железо с антиферромагнетиком хромом, получают материал с очень интересными, совершенно новыми свойствами. Сейчас создается множество искусственных и полупроводниковых магнитных наноструктур для управления током с помощью внешнего магнитного поля. Это так называемая спинтроника. Она находит применение в различных устройствах магнитной памяти для компьютеров. С ее появлением готовится новый прорыв в технологиях записи и считывания информации с магнитных или с оптических носителей.

Объектами внимания физиков ЛНФ являются также ветвящиеся полимеры, самозатягивающиеся краски на их основе и другие области применения полимеров, скажем, та же доставка лекарств к необходимому органу. Они выращиваются слоями, это контролируемый пошаговый синтез. Вопрос в том, как получить частицы нужного размера и с чем это связано. Вот это «с чем» и есть предмет изучения методами нейтронной физики. Фундаментальная наука в который раз оказалась очень полезной для практического применения.

Если говорить о других областях, то нейтронный анализ может широко применяться в фармацевтике, в фармакологии, а через них – в медицине. Нанотехнологии позволяют помещать лекарства внутрь фосфолипидных молекул, входящих в оболочки клеток, и направленно доставлять их к месту назначения с помощью этих полых наносфер. Вопрос, какими они должны быть, чтобы, не разлагаясь, проходить, например, в пищеводный тракт, втягиваться в кровь, доставляться в печень. Ответить на него можно, применив нейтронный анализ. Он покажет, как наночастички разного состава, с разной поверхностью проникают через кожу, проходят в различные биологические среды, как на их стабильность влияет окружающая среда.

Магнитные жидкости – тоже интересная и перспективная вещь. В органические растворители помещаются магнитные наночастицы, так что их свойства сильно зависят от параметров приложенного магнитного поля. Эти жидкости возможно использовать, скажем, в терапии рака, поскольку они при определенных условиях способны и целенаправленно уничтожать онкоклетки. Такие работы ведутся, изучаются структурные характеристики и размерность кластеров наночастиц в различных растворителях, их сравнительная эффективность.

Недавно в Отделе конденсированных сред начата многообещающая работа по развитию радиографии и томографии. В радиографии вместо света используется нейтронное излучение. Суть нейтронной радиографии можно выразить достаточно просто. Нейтронный свет освещает исследуемый объект, то есть препятствие, появившееся на их пути. По тому, как отклонились, искривились, затормозились «лучи», можно точно судить о внутренней структуре объекта. С точки зрения экспериментатора, тут ничего необычного, это классические опыты рассеяния в резерфордском понимании. Проникающая способность нейтронов позволяет заглянуть вглубь вещества, не разрушая объекты. Это очень мощный метод, во-первых, неразрушающего контроля материалов, во-вторых, исследования их внутреннего строения. И то, и то важно в исследованиях промышленных изделий на поиск дефектов.

Ранее в ЛНФ уже был развит метод исследования остаточных напряжений в материалах и изделиях с помощью нейтронной дифракции, который оказался очень эффективным. Вот известный, но от этого не менее показательный пример. Одно тульское предприятие, которое делает бойки для перфораторов, используемых горняками, попросило определить, почему боек служит меньше

положенного срока. С помощью неразрушающей диагностики удалось выявить причину, на предприятии несколько изменили технологию изготовления, что вдвое, а в иных случаях и впятеро увеличило срок службы. Аналогичные исследования ранее проводили в ЛНФ для атомных станций, для «Росатома», используя неразрушающий контроль в некоторых соединениях внутриреакторных труб. Новые возможности радиографии и томографии позволят существенно расширить и дополнить круг подобных исследований.

Конечно, незаменим этот метод и в исследованиях памятников истории и культуры, каких-то уникальных художественных, природных, экологических, архитектурных, инженерных объектов, повреждение которых будет невосполнимой потерей. Радиография позволяет обследовать их, сохраняя в целости и невредимости, изготовить при необходимости идеальную модель объекта, полностью повторяющую его форму с точностью до долей миллиметра... Можно по ископаемым костям исследовать не только саму костную ткань динозавров, но и биологические включения, другие ткани, которые очень хорошо видны в «нейтронном свете».

Радиография хорошо сочетается с обычной фотографией: фотоснимки являются точными копиями нейтронных снимков «внутренностей» объектов, которые нам не видны. Результаты радиографии удобно представлять в виде «внутренних портретов» самых обычных вещей, скажем, замка со всеми его деталями и пружинками. Это значит, что можно «разобрать на части» любой механизм, любое устройство, не разбирая его физически.

А нейтронная томография – следующий за радиографией шаг, переход к объемному изображению. Достигается это вращением объекта относительно источника нейтронного излучения.

Счет идет на ядра

Два из четырнадцати каналов в экспериментальном зале реактора ИБР-2М отданы не фундаментальной и не прикладной науке, а практическим приложениям последней. На одном тестируют и калибруют приборы космических аппаратов в нейтронном потоке, на другом проводят нейтронно-активационный анализ. Он входит в число наиболее эффективных и недорогих способов определения и визуализации загрязнений окружающей среды – воздуха, воды, почвы. Вот как объясняет его суть Валерий Николаевич Швецов.

Контейнеры с небольшими образцами помещают вплотную к активной зоне реактора и отдают во власть облучения. Вещество захватывает нейтроны, образуя при этом радиоактивные ядра – изотопы, у которых нейтронов на единицу больше, чем у исходного ядра. Возбуждение после захвата нейтронов снимается испусканием нейтрона, протона, альфа-частицы, чаще всего – гамма-кванта, либо, наконец, через бета-распад. Вынув образец из реактора и поместив вблизи детектора гамма-квантов, можно записать гамма-спектр, в котором будут представлены линии всех элементов и всех изотопов этих элементов, присутствующих в исследуемом веществе, и определить его изотопный состав, более того, количество каждого изотопа. А, кроме того, установить, сколько было «родителей» у этих «дочек» в процессе облучения. То есть, провести полную идентификацию изотопов, их полный количественный анализ, причем такой тщательный (с точностью до 10^{-11} грамма на грамм), что, образно говоря, «счет идет буквально на ядра». Реактор ИБР–2 позволяет использовать также потоки быстрых и эпитепловых нейтронов (их нельзя получить на реакторах, работающих на тепловых нейтронах). Область энергии этих нейтронов попадает в область резонансного поглощения ряда тяжелых и редкоземельных металлов. За счет этих резонансов определяются малые концентрации в исследуемых образцах.

Нейтронно-активационные исследования востребованы в экологии при разработке и сертификации методик мониторинга ситуации, при анализах атмосферных выпадений, допустим, тяжелых металлов, редкоземельных элементов и других загрязняющих агентов. Мониторинг ведется по растениям, например, по лишайникам, но чаще всего – по мхам-«биомониторам», поскольку они, не имея корней, питаются только воздушным путем только тем, чем снабжает их атмосфера.

Как делается анализ? Согласно давно отработанным и прописанным в инструкциях методикам. Мох собирают в лесу. Сушат. Прессуют в таблетки. Взвешивают. Помещают в контейнер. Прослаивают золотой фольгой, для того, чтобы в дальнейшем определить абсолютное значение нейтронного потока, прошедшего через образец. Контейнер забрасывают в реактор. Он облучается... От двух часов до недели. Потом, как уже сказано, образец кладут на гамма-детектор, снимают гамма-спектр, устанавливают количество элементов и изотопов и по сертифицированным методикам просто пересчитывают в количество загрязняющих веществ в атмосфере.

Конечный продукт этой технологии - географическая карта, на которой цветами обозначены места выпадения и концентрации элементов. Изоцвет – это изоконцентрация. Например, ванадия, загрязняющего местность вокруг тепловых электростанций, сжигающих уголь. Сразу становится понятно экологическое благополучие или неблагополучие региона... Поэтому нейтронно-активационный анализ может служить основанием для принятия природоохранных мер. К сожалению, говорит Швецов, он больше востребован в Европе, чем у нас в России. Результаты ЛНФ используются в европейских атласах загрязнений тяжелыми металлами. Команда Лаборатории уже 15 лет участвует в их составлении. В рамках международной программы UNECE «Атмосферные выпадения тяжелых металлов в Европе – оценки на основе анализа мхов-биомониторов поддерживается тесное сотрудничество с коллегами из Албании, Болгарии, Боснии, Белоруссии, Вьетнама, Греции, Македонии, Монголии, Польши, России, Румынии, Сербии, Словакии, Таиланда, Украины, Хорватии и ЮАР.

В Южной Африке исследования загрязнений морской воды проводили не по мхам, а по морским моллюскам. В заливе, где они обитают, планируется строительство большого грузового порта, и пока работы не начались, надо определить, как они повлияет на экологию.

Такие же исследования можно проводить применительно к радиоактивному заражению местности. Они, говорит В.Н. Швецов, будут начаты в 2015 году. Уже приобретен соответствующий низкофоновый детектор, позволяющий работать с естественной радиоактивностью, с фоновыми значениями, в сравнении с которыми и определяются «вклады» Чернобыля или Фукусимы. Первый проект должен быть связан с исследованиями на Дальнем Востоке и в Южной Корее, то есть в регионах, затронутых выбросами аварии в Японии. Он будет вестись совместно, на принципах софинансирования.

Расширение профиля

И вот – новое, необычное применение нейтроно-активационного анализа. Новый профиль. Скажем так - космический. Появившийся в результате сотрудничества ЛНФ с Лабораторией радиационной биологии ОИЯИ, где занялись проблемой зарождения жизни на Земле. То есть - совместные исследования проблем астробиологии, которые планируется провести с участием специалистов Палеонтологического института РАН, возглавляемого академиком

А.Ю. Розановым, академиком-секретарем Отделения биологических наук РАН. Основное поле его исследований – поиск в различных геологических отложениях и в различных телах космического происхождения следов жизнедеятельности колоний микроорганизмов либо более высокоорганизованных клеток, относящихся к разным геологическим временам существования Земли и Вселенной. Этих следов обнаружено множество. Огромный фактический материал подводит к выводу, что жизнь была привнесена на нашу планету упавшими метеоритами определенных классов и за миллионы лет эволюционировала до нынешнего состояния.

Подтвердить или опровергнуть этот вывод могут помочь нейтронные исследования. Метеориты в ЛНФ пропустят через нейтроно-активационный анализ с целью определить их элементный состав. Будут также поставлены биофизические эксперименты, проведено молекулярное моделирование биологических объектов, выполнена их реконструкция с помощью молекулярной динамики.

В Лаборатории нейтронной физики можно услышать мнение, что люди здесь не занимаются и, собственно, не должны заниматься концепциями верхнего уровня, какими-нибудь космогоническими вопросами, что их ниша – более приземленные, практические вещи, ну, например, такие перспективные, как новые материалы. Возможно, это не так престижно, как космос, зато дает значительные результаты, потому что знание, добываемое в Лаборатории, пусть даже то, что не сразу превращается в технологии, все равно со временем воплощается в нечто полезное и необходимое. Интегральная модель исследований, принятая в ЛНФ, дает интегральный междисциплинарный выход. Хотя и опосредованный.

Так оно и есть, конечно. Интегральная лаборатория прочно стоит на ногах, занимает свое вполне законное и абсолютно достойное место в исследовательской иерархии. Но при этом космогонические теории уже не кажутся здешним физикам чужими. Они начинают чаще посматривать вверх, в небо. Наверно, для этого просто пришло время.