



Главный российский источник рентгеновского света

Специализированный Курчатовский источник синхротронного излучения для фундаментальных научных исследований начали строить еще в 1986 г. На тот момент многие наши позиции в области рентгеновских и синхротронных исследований не уступали, а иногда и превосходили зарубежные разработки. Но наступили 1990-е гг., строящийся Зеленоградский синхротрон законсервировали, а Курчатовский синхротрон совместными усилиями нескольких научных организаций был введен в эксплуатацию лишь в октябре 1999 г. Так называемая процедура инаугурации Курчатовского источника состоялась при участии В.В. Путина, в то время премьер-министра России, и стала знаковым событием для отечественной науки. Несмотря на то что Курчатовский синхротрон — пока единственная мегаустановка, введенная в строй на территории бывшего СССР после его распада, она инициировала формирование стратегии развития комплекса отечественных мегаустановок. О том, как живет Курчатовский синхротрон сегодня, какие исследования здесь проводятся, нам рассказал член-корреспондент РАН Владимир Валентинович Квардаков

Курчатовский синхротрон

Курчатовский источник синхротронного излучения (СИ) сегодня единственный в России специализированный источник СИ, так называемый источник поколения 2+. Уникальность синхротрона заключается, в частности, в его инфраструктурном окружении, что позволяет проводить исследования с использованием целого ряда взаимодополняющих, комплементарных методов диагностики, развиваемых во всем Курчатовском институте и особенно в Курчатовском НБИКС-центре. Эта идеология конвергентных междисциплинарных исследований была заложена нашим директором М.В. Ковальчуком еще в конце 1990-х гг., когда он возглавлял Курчатовский синхротронный центр, и позднее развил ее применительно ко всему Курчатовскому институту. Речь идет о таких комплементарных методах, как рассеяние нейтронов, рентгеновских лучей и электронов, методах зондовой микроскопии, оптической, магнитной



Одна из экспериментальных станций в зале Курчатовского синхротрона (вверху); элемент накопительного кольца Курчатовского синхротрона (внизу)

диагностики. Такое взаимодействие методов позволяет нам быть конкурентоспособными по отношению к более современным зарубежным источникам СИ.

Уникальные исследовательские возможности дает также работа в едином комплексе Курчатовского источника СИ и исследовательского нейтронного реактора ИР-8. Так, нейтроны чувствительны к магнитным свойствам, акустическим волнам, положению легких атомов, например водорода. В то же время СИ обладает более высокой яркостью и когерентностью, и с его помощью исследуют микрообразцы вплоть до отдельных атомных слоев на поверхности кристалла или жидкости. Путем комбинации взаимодополняющих методов мы получаем уникальную информацию. Это как смотреть на микро- и наномир с разных точек зрения двумя глазами, что дает возможность перейти на качественно новый уровень диагностики, подобно тому как бинокулярное зрение дает людям ощущение глубины — третьего измерения.

Открытие явления дифракции рентгеновских лучей в кристаллах 100 лет назад стало переломным в понимании структуры вещества, послужило основой для развития науки о материалах и современной молекулярной биологии

Курчатовский источник СИ активно используется, в частности, для изучения физики взаимодействия излучения с веществом. Хотя в 2012 г. исполнилось уже 100 лет открытию явления дифракции рентгеновского излучения в кристаллах, эта физика по-прежнему активно развивается, ведь она очень многогранна, особенно в условиях, когда излучение становится все более ярким и когерентным, с развитием новых источников его генерации.

Колоссальный научный прорыв в оптике, связанный с созданием лазеров, изменил не только многие области физики, но и технологии. Но оптический лазер — это генератор излучения в достаточно узкой области спектра: микрон-полмикрона. Синхротронное же излучение перекрывает огромный интервал длин волн. Создание новых источников СИ и модернизация имеющихся, в том числе и Курчатовского источника, идет в первую очередь по пути повышения яркости и когерентности излучения, увеличения времени жизни пучка.

При взаимодействии когерентного излучения с почти совершенными кристаллами возникает ряд необычных с точки зрения классической рентгеновской оптики эффектов, которые очень чувствительны к структуре рассеивающих объектов. Это лежит в основе многих методов диагностики субатомного уровня разрешения, востребованных и в научных подразделениях Курчатовского института, в первую очередь центра конвергентных НБИКС-технологий, и внешними пользователями.

В частности, при когерентном взаимодействии излучения с кристаллом возникает «эффект стоячих рентгеновских волн» в его поверхностных слоях, что имеет важное практическое значение для решения так называемой фазовой проблемы, конкретных задач материаловедения, микроэлектроники, биологии, и в настоящее время активно используется в исследованиях объектов наносистем и нанобиотехнологий. Один из родоначальников этого уникального метода — профессор, доктор физико-математических наук М.В. Ковальчук.

Синхротронное излучение

Когда в антенне мобильного телефона электроны приходят в периодическое движение, рождается электромагнитная волна, при этом антенна слегка нагревается из-за наличия сопротивления. Точно так же электромагнитные волны излучают и электроны, вращающиеся по кругу в магнитном поле синхротрона. Но когда электроны разгоняют до скоростей, близких к скорости света, начинают действовать релятивистские эффекты и направления волн изменяются так, что они концентрируются в узком конусе по движению электронного пучка подобно тому, как это происходит с брызгами, отлетающими от быстро вращающегося колеса. При этом яркость излучения в конусе возрастает, а максимум его спектра смещается в рентгеновскую область. Такое излучение можно сделать очень мощным, поскольку электроны вращаются в вакууме и классических проблем с нагревом среды не возникает. Излучение релятивистских электронов в магнитном поле ускорительно-накопительного комплекса (синхротрона) и называют синхротронным.

Открытие явления дифракции рентгеновских лучей в кристаллах 100 лет назад стало переломным в понимании структуры вещества, послужило основой для развития науки о материалах и современной молекулярной биологии.

Синхротронное излучение обладает рядом уникальных свойств по сравнению с излучением лабораторных рентгеновских трубок. В первую очередь, это высокая яркость. Если все излучение сжать в узком конусе, а размер электронного пучка (т.е. светящейся точки) сделать минимальным, то яркость увеличится на многие порядки величины, подобно излучению лампы, которую превратили в идеальный прожектор. Такое превращение происходит в синхротроне за счет релятивистских эффектов и технических ухищрений по сжатию электронного пучка — уменьшению его эмиттанса (расходимости). Кроме того, СИ поляризовано и имеет временную структуру, поскольку электроны вращаются в единой плоскости и разбиты на сгустки, иными словами, СИ подобно стробоскопу, оно не непрерывно, что и используют при изучении динамических процессов.

На существование СИ первоначально обратили внимание в экспериментах на ускорителях, используемых для физики элементарных частиц. Задача таких ускорителей — разгон частиц до максимально высоких энергий, а эти энергии, как оказалось, ограничены главным



Большое кольцо Курчатовского синхротрона

образом потерями на излучение, которое назвали синхротронным и считали паразитным. Но через некоторое время ученые поняли, что СИ можно использовать в других областях физики. Неспециализированные синхротроны называются источниками СИ первого поколения. Такой источник СИ по-прежнему работает в Институте ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН, его опыт был использован и при разработке проекта Курчатовского синхротрона.

Открытие в 1912 г. Максом фон Лауэ явления дифракции рентгеновских лучей в кристаллах было переломным моментом в понимании структуры вещества, послужило основой для развития науки о материалах и современной молекулярной биологии. Раньше лишь догадывались о существовании атомов и их упорядочении в кристалле, а с помощью рентгеновских лучей исследователи увидели дифракционный образ кристаллической решетки. Это открытие послужило импульсом для развития и современного материаловедения, и техники генерации рентгеновского излучения. Первоначально единственными источниками излучения были рентгеновские трубки, где излучение возникает при торможении электронов в материале анода. Однако яркость рентгеновских трубок ограничена, т.к. существуют технические проблемы с быстрым охлаждением анода. А в синхротронах таких проблем нет, поскольку пучок электронов вращается в вакууме и механизм генерации связан с ускорением частиц в магнитном поле, где меняется только направление вектора скорости частицы, а не его абсолютная величина.

Разные поколения источников

Источники СИ второго поколения стали специализированными, т.е. предназначенными только для генерации и использования СИ, при этом была оптимизирована их магнитная структура. Основная задача этой структуры — сжать электронный пучок как можно тоньше и удержать на орбите как можно дольше. Чем меньше светящаяся точка, тем выше яркость, чем выше время жизни — тем лучше стабильность пучка.

В настоящее время в мире существует лишь несколько источников СИ третьего поколения. Это очень большие по диаметру машины, в которых излучение генерируется не только в поворотных магнитах, но и в специализированных устройствах типа ондулятора. Ондулятор — это длинная многополюсная змейка, где релятивистский электрон колеблется в магнитном поле так, что излучение с разных участков орбиты складывается с единой фазой. Самый современный источник третьего поколения *Petra-III* находится в синхротронном центре *DESY* в Гамбурге. Мы активно сотрудничаем с ними, создаем совместные станции, которые дополнят наши экспериментальные возможности. Кстати, источники третьего поколения не исключают необходимость источников предыдущих поколений и даже рентгеновских трубок, поскольку они имеют разный круг задач и режим работы пользователей. Так, например, появление самолетов не отменило автомобили, велосипед или прогулки пешком.

В Германии строят принципиально новый источник СИ — рентгеновский лазер на свободных электронах XFEL. Россия — основной партнер Германии в этом проекте

Наш источник в настоящее время существенно модернизирован и представляет собой поколение 2+. Изначально в магнитной структуре источника были предусмотрены прямолинейные промежутки, в которые можно вставлять вигглеры. Вигглер — это та же магнитная змейка, но более короткая, чем ондулятор, и имеющая более высокое магнитное поле, создаваемое сверхпроводящими магнитами. В результате излучение из вигглера столь же яркое и для некоторых приложений даже предпочтительнее ондуляторного, поскольку имеет более плавный спектр. Мы уже запустили первый вигглер, что почти в 100 раз увеличило яркость пучка и приблизило нас к источникам третьего поколения. Наш сверхпроводящий вигглер — уникальный прибор. У него очень сильное магнитное поле — 7,5 Тл, его пучок на полной мощности составляет около 100 кВт, и это, заметим, в рентгеновском диапазоне длин волн. Это требует особой радиационной защиты, вы видите, как искусно устроены каналы, радиационные заглушки и системы охлаждения.

Сейчас в Германии строят принципиально новый источник СИ — рентгеновский лазер на свободных электронах *XFEL*. Его излучение будет практически полностью когерентно. Россия — основной партнер Германии в этом проекте, как финансовый (мы имеем 25% акций), так и научный. В будущем мы будем иметь соответствующую квоту на использование пучкового времени, причем российскую научную программу решением правительства поручено разрабатывать и координировать Курчатовскому институту.

Рабочий процесс

Процесс ускорения электронов состоит из нескольких фаз. Линейный ускоритель, малое накопительное кольцо, большое накопительное кольцо 40 м в диаметре. Электрон ускоряется примерно так же, как и камень в праще, т.е. путем последовательного увеличения скорости при вращении по кругу. Ускоряющие импульсы передаются электронам от электромагнитного поля в ВЧ-камере, которая, если говорить на бытовом уровне, подобна сверхмощной кухонной СВЧ-печке, где создается стоячая волна. Электроны влетают в камеру в тот момент, когда направление электрического поля волны совпадает с направлением электронного пучка, т.е. толчки происходят всегда в нужном направлении и при многократном повторении ускоряют электроны до почти световых скоростей.

У нас квалифицированная команда физиков-экспериментаторов, специалистов-ускорительщиков, инженеров и техников, существует собственная программа модернизации. Замечу, что и синхротрон, и вигглер, и первые экспериментальные станции — наши, российские разработки. Некоторые станции от идеи до воплощения в железе целиком были созданы М.В. Ковальчуком и его коллегами из Института кристаллографии им. А.В. Шубникова РАН. Сегодня мы можем уже позволить себе заказывать новые станции за рубежом, чтобы сконцентрировать свои усилия на научной программе.

В накопителе электронный пучок вращается в высоком вакууме — почти космическом, как на высоте более 300 км над Землей. Поэтому электронный пучок может жить десятки часов, но когда мы модернизируем систему инжекции и сделаем ее квазинепрерывной, то эффективное время жизни пучка станет практически бесконечным, т.е. будет определяться экспериментальными потребностями самих физиков. При этом уменьшится и диаметр электронного пучка, который сейчас составляет порядка 100–200 микрон, а такое уменьшение очень важно для экспериментаторов, работающих на станциях.

Немало зависит и от каналов вывода СИ, которые передают это излучение в вакууме от накопителя до станций, а это расстояние составляет 20–30 м. Каналы могут содержать элементы, которые позволяют управлять пучком, например фокусировать.

СИ имеет широкий непрерывный спектр, поэтому на синхротроне вы можете выделить из спектра любую длину волны и даже сканировать (плавно изменять) ее, что важно для некоторых экспериментов, например по *EXAFS* — спектроскопии или резонансному рассеянию. Это позволяет выделять вклад отдельных химических элементов в картину поглощения или рассеяния, т.е. как бы видеть их индивидуальную роль во внутренней структуре материала.

Об исследовательских станциях

Российские экспериментальные станции реализуют основные исследовательские методики, необходимые нашим пользователям как из Курчатовского института, так и из внешних организаций, поскольку мы —

так называемая установка коллективного пользования и часть пучкового времени выделяем на конкурсной основе по заявкам. Наши станции позволяют комплексно изучать структуру как неорганических, так и биологических материалов — белков, биологических пленок, тканей и отдельных органов. Мы разрабатываем новые методы медицинской диагностики, в частности, опухолей мягких тканей, на основе регистрации рефракции (преломления) СИ, т.е. видим то, что невозможно увидеть традиционными рентгеновскими методами, основанными на эффекте поглощения.

Источник СИ — это междисциплинарная установка и для лабораторий НБИКС-центра, которым необходимы наши методы диагностики, а нам от них — новые образцы для исследований. В экспериментальном зале синхротрона совместные интересы сходятся буквально. Здесь размещен ряд так называемых чистых зон с современным оборудованием для развития нанотехнологий, и в эти зоны уже протянуты каналы СИ. Кроме того, станции используются при обучении и студентов и аспирантов базовых кафедр многих институтов, особенно Московского физико-технического, где уже несколько лет назад по инициативе М.В. Ковальчука создан первый в мире факультет конвергентных НБИКС-наук и технологий.

Каждая экспериментальная станция — это мини-лаборатория, и на каждый поворотный магнит будут поставлены канал вывода излучения и станция

Еще три года назад мы были сильно ограничены в развитии наших экспериментальных станций из-за малых размеров здания. Его расширили по периметру, возведя трехэтажную пристройку, при этом почти не прерывая нашу экспериментальную программу. Это было не просто, поскольку все системы синхротрона и станций чувствительны к пыли и вибрациям. Именно поэтому еще при строительстве синхротрона было принято решение покрыть все бетонные конструкции шлифованными мраморными плитами. Сегодня мы находимся с вами в огромном экспериментальном зале, который заполняется новыми станциями. Планируем довести их число до 35.

Новые площади — это и более длинные каналы станций, поэтому появилась возможность реализовать рентгенооптические схемы с фокусировкой пучка. Каждая станция специализируется на определенном направлении исследований и методике. Например, новая станция «Фаза», одно из любимых детищ М.В. Ковальчука, предназначена для развития рентгенологографических методов с использованием оборудования мирового уровня. Станция микротомографии позволяет исследовать структуру мозга (пока лабораторных животных) и зафиксировать картину когнитивных процессов, т.к.

! Справка

Владимир Валентинович Квардаков — специалист в области рентгеновской и нейтронной оптики, материаловедения, нанодиагностики с использованием рентгеновского, синхротронного излучений и нейтронов.



✓ В 1999 г. назначен заместителем директора по науке Института синхротронных исследований Российского научного центра «Курчатовский институт».

✓ С 2004 г. — исполнительный директор Научно-технического комплекса «Курчатовский центр синхротронного излучения и нанотехнологий» РНЦ «Курчатовский институт».

✓ С 2008 г. член-корреспондент РАН, отделение нанотехнологий и информационных технологий (нанодиагностика).

✓ С 2012 г. заместитель председателя совета Российского фонда фундаментальных исследований (РФФИ), одновременно — заместитель директора НИЦ «Курчатовский институт» по синхротронно-нейтронным исследованиям.

наши коллеги из НБИКС-центра научились вводить в мозг рентгеноконтрастные вещества, которые концентрируются в тех нейронах, где возникает мозговая активность. На станции белковой кристаллографии изучаются макромолекулы, содержащие десятки и сотни тысяч атомов, а структура белков есть ключ к пониманию механизмов их функционирования и к технологиям создания новых лекарств. То, как лекарственные средства проникают через клеточные мембраны, мы изучаем на станции «Ленгмюр». Здесь развиты диагностические методы, основанные на регистрации эффекта стоячих рентгеновских волн в условиях полного отражения излучения от поверхности жидкости. В настоящее время развиваются методы целевой доставки лекарственных препаратов, в частности в липидных нанокapsулах, и структуру этих капсул мы изучаем на станциях «Структурное материаловедение» и «Малоугловая дифракция», т.е. в этом комплексе наглядно видно преимущество наших комплексных исследований.

Синхротронное излучение несет свет знаний, а это основа как нашего мира, так и будущих технологий. ■

Подготовил Дмитрий Ромендик

За создание уникального исследовательского комплекса на базе Курчатовского источника синхротронного излучения группе физиков во главе с М.В. Ковальчуком была присуждена Премия Правительства РФ за 2006 г. в области науки и техники