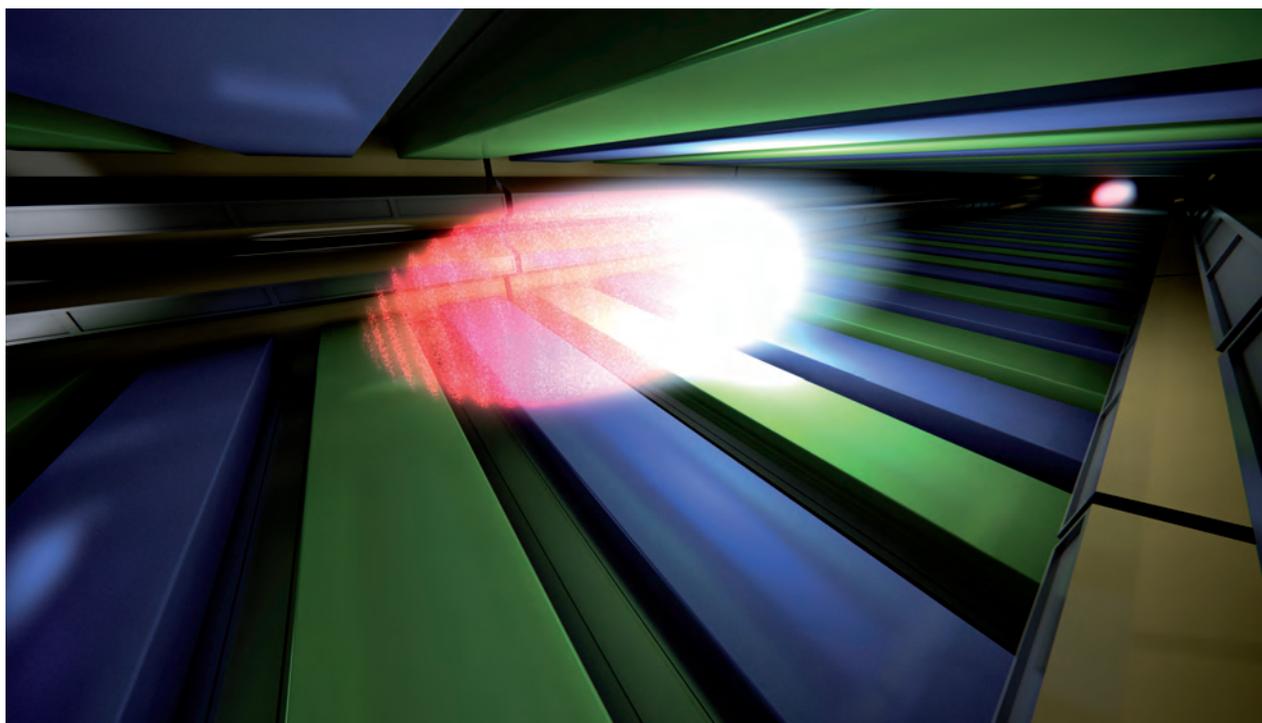


ЕВРОПЕЙСКИЙ РЕНТГЕНОВСКИЙ ЛАЗЕР НА СВОБОДНЫХ ЭЛЕКТРОНАХ XFEL



И ВЫЗОВЫ НАШЕГО ВРЕМЕНИ

Предисловие

Международный научный мегапроект по созданию Европейского рентгеновского лазера на свободных электронах XFEL (Европейский XFEL) стартовал в 2009 году. Физический пуск запланирован на 2017 год. Участниками проекта являются Германия, Россия, Венгрия, Дания, Испания, Италия, Польша, Словакия, Франция, Швейцария и Швеция. Стоимость проекта оценивается в 1,15 миллиардов Евро, финансовый вклад Германии составляет 58%, Российской Федерации – 27%, при этом вклады остальных стран-участниц варьируются от 1 до 3%. Долевое участие в создании международной научной мегаустановки позволит России стать полноправным участником европейского проекта. Российские ученые получают возможность участвовать в планировании научной деятельности Европейского XFEL, определении приоритетности исследований.

Режим генерации лазерного рентгеновского излучения пучком релятивистских электронов, положенный в основу XFEL, впервые был предложен более 30 лет назад российским учеными из Института ядерной физики им. Г.И. Будкера. При сооружении рентгеновского лазера на свободных электронах используются в том числе технологические решения и разработки российских научно-исследовательских организаций.

Распоряжением Правительства Российской Федерации научное руководство реализацией проекта XFEL и формирование научно-исследовательской программы эксплуатации установки возложено со стороны Российской Федерации на Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт». Для подготовки российской научной Программы экспериментов на Европейском XFEL в НИЦ «Курчатовский институт» сформирована Рабочая группа, включающая представителей ведущих российских научно-исследовательских и образовательных организаций, проводящих исследования с использованием синхротронного излучения.

ЕВРОПЕЙСКИЙ РЕНТГЕНОВСКИЙ ЛАЗЕР НА
СВОБОДНЫХ ЭЛЕКТРОНАХ XFEL
И ВЫЗОВЫ НАШЕГО ВРЕМЕНИ

1 Введение	2
2 Европейский XFEL и решение проблем в сфере здравоохранения в XXI веке	7
3 Энергетический вызов: природный и искусственный фотосинтез	12
4 Материалы и процессы для передовых технологий	15
5 Строительство Европейского XFEL и передача технологий в промышленность	17
6 Заключение	19

1 Введение

В настоящее время Европейский XFEL строится в г. Гамбург (Германия) и является одним из наиболее важных проектов исследовательской инфраструктуры, указанных в Дорожной карте Европейского стратегического форума по исследовательским инфраструктурам. Строительство XFEL (рис. 1), основанного в 2009 году в рамках межправительственного соглашения, поддерживается 11 странами. С 2017 года он предоставит ученым и пользователям из индустриальных секторов экономики уникальную возможность проводить исследования в области медицины, изучать структуру вещества, новые устойчивые источники энергии, а также разрабатывать экологически чистые материалы для новых технологий.

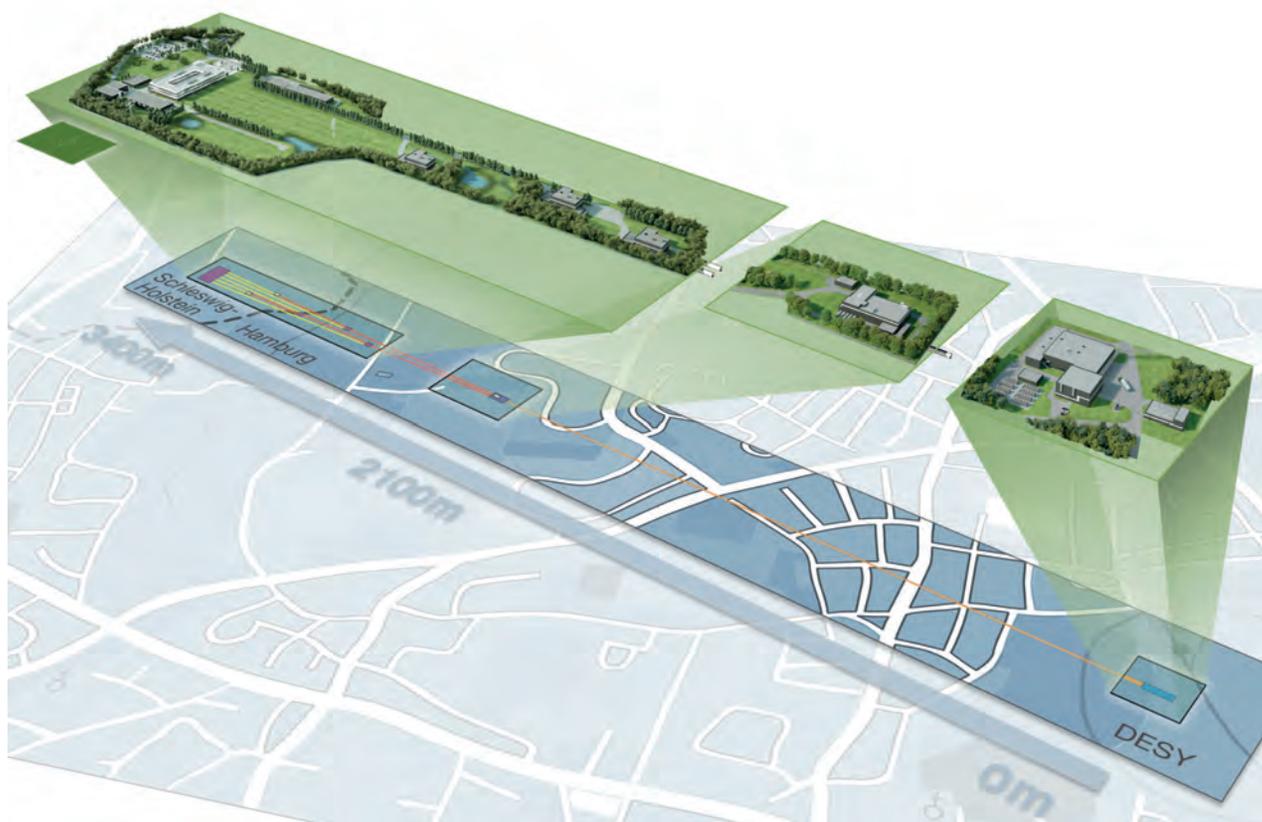


Рис.1. Общая схема Европейского XFEL с площадкой DESY-Баренфельд в г. Гамбурге (справа) и исследовательский комплекс в Шенефельде с экспериментальным залом (слева). Общая протяженность установки, располагающейся большей частью под землей, составляет 3,4 км, при этом общая протяженность подземных туннелей составляет 5,8 км.

Рентгеновское излучение представляет собой электромагнитные волны, такие же как и радиоволны, микроволны, или видимый свет, но с гораздо более короткой длиной волны. В то время как оптический микроскоп не способен увидеть объекты, меньшие по размеру, чем длина волны в спектре видимого света, у рентгеновского излучения длина волны достаточно короткая для того, чтобы наблюдать вещества на атомарном уровне (рис. 2). Рентгеновские лучи подразделяются на низкоэнергетическое, «мягкое» излучение с длиной волны достаточной для того, чтобы наблюдать большие молекулы (такие как протеины) и высокоэнергетическое, «жесткое» излучение с длиной волны, сравнимой с отдельными небольшими молекулами и атомами.

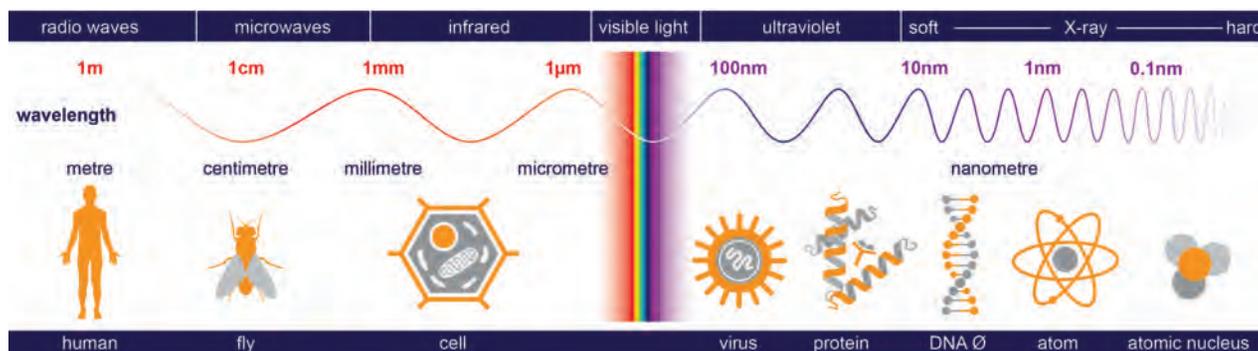


Рис.2. Спектр электромагнитного излучения, демонстрирующий длину волны каждого вида излучения в сравнении с различными объектами. Чем короче длина волны электромагнитного излучения, тем меньше объект, который можно увидеть с его помощью.

В 1950-х годах рентгеновское излучение сыграло решающую роль в исследовании молекулы ДНК. С его помощью было открыто, что атомарная структура представляет собой двойную спираль, схожую с круговой лестницей, перекладины которой содержат генетическую информацию. Это открытие, основанное на экспериментах по рентгеновской дифракции, признано одним из наиболее важных научных достижений столетия. Оно показывает, что понимание структуры является ключевым элементом в понимании предназначения. Это очень важно и для таких областей исследований как химия или материаловедение (см. раздел 4 «Материалы и процессы для передовых технологий»).

Исследование комплексных молекулярных структур требует очень ярких источников рентгеновского излучения. Ускорители частиц, в частности электронные ускорители, представляют собой очень яркие источники рентгеновского излучения, которые могут быть в миллионы раз ярче, чем медицинские рентгеновские трубки. Начиная с 1960-х гг. синхротроны произвели революцию в изучении биомолекул. В 1980-х гг. была получена атомная структура почти 70 биомолекул. В сентябре 2013 г. их число достигло 94000, при этом у 83000 из них структура были расшифрована с помощью синхротронного излучения. В наши дни синхротроны стали важнейшим инструментом для определения структуры биомолекул. Шесть Нобелевских

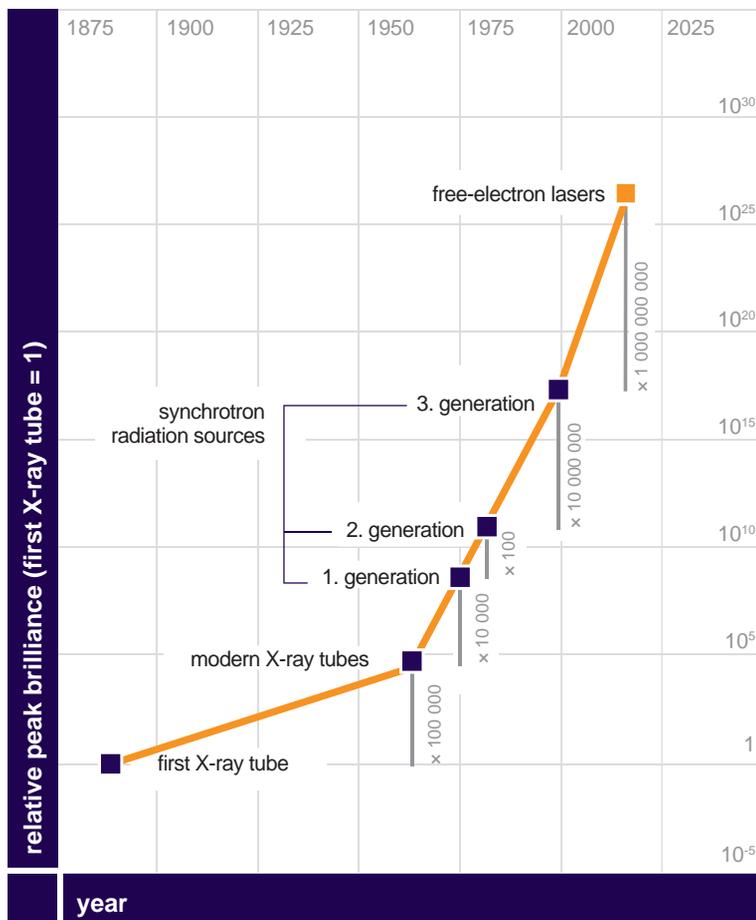


Рис. 3. Эволюция пиковой яркости. Развитие источников рентгеновского излучения показывает, насколько сильно увеличилась яркость, начиная с открытия возможностей ускорителей частиц по генерированию синхротронного излучения. Реализация проекта рентгеновского лазера на свободных электронах продолжает расширять возможности и открывает огромные перспективы для проведения исследований.

премий по химии были присуждены за исследования, в которых источники синхротронного излучения сыграли решающую роль.

За последние несколько лет произошел еще один прорыв в области повышения яркости рентгеновских источников – с использованием лазеров на свободных электронах, созданных на базе линейных ускорителей, генерируются импульсы рентгеновского излучения, обладающие тремя важными свойствами:

1. Импульсы лазеров на свободных электронах очень яркие: в 100 млн. - 1 млрд. раз ярче, чем синхротронное рентгеновское излучение (рис. 3).
2. Импульсы лазеров на свободных электронах очень короткие: до нескольких фемтосекунд. Фемтосекунда – это одна миллионная миллиардной доли секунды; за одну фемтосекунду свет проходит меньшее расстояние, чем составляет одна сотая часть толщины человеческого волоса.

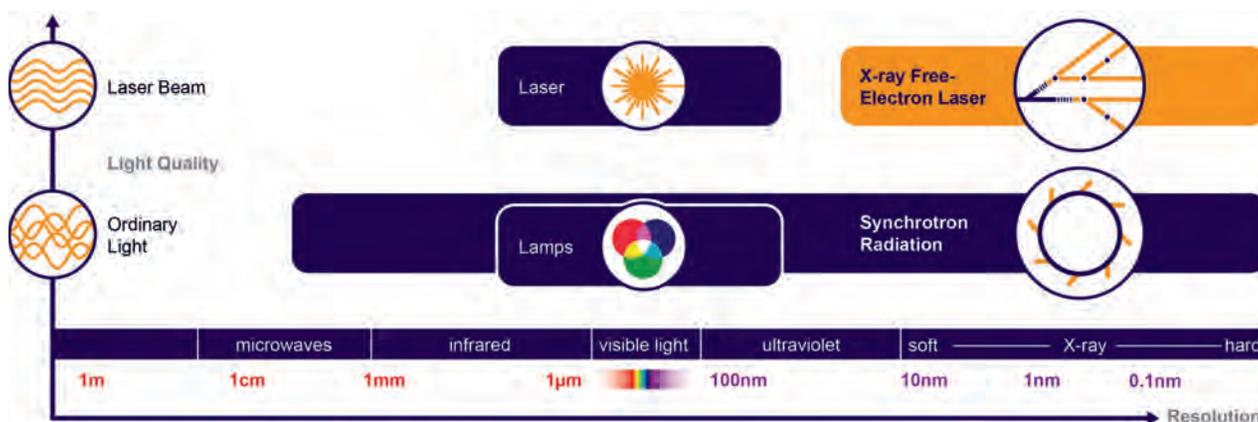


Рис.4. Качество излучения и длины волн различных источников излучения в сравнении. Лазерные пучки (когерентные) обладают более высоким качеством, чем обычное излучение (называемое некогерентным, от ламп в качестве примера). Источники излучения расположены слева направо. Рентгеновские лазеры на свободных электронах (отмечены оранжевым цветом) могут генерировать когерентное излучение в рентгеновской части спектра. Синхротроны охватывают широкий спектр по длине волны, но могут генерировать только некогерентное излучение.

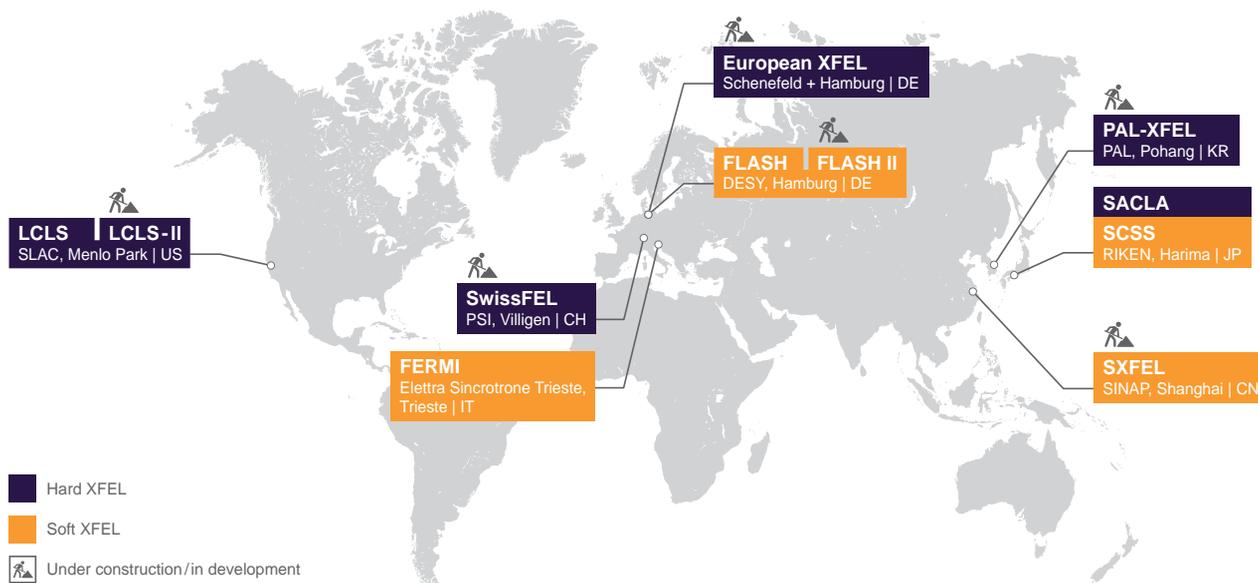


Рис.5 Источники излучения на основе лазеров на свободных электронах на карте мира. В настоящее время рентгеновские лазеры на свободных электронах с жестким излучением принимают пользователей только на установках SACLA в Японии и LCLS в США.

3. Импульсы лазеров на свободных электронах обладают таким качеством, как пространственная когерентность, означая, что волны лазерного излучения находятся в фазе и усиливают друг друга (рис. 4). Это качество позволяет проводить исследования, недоступные при использовании обычного рентгеновского излучения.

В настоящее время есть только несколько (рис. 5) действующих рентгеновских лазеров на свободных электронах: в Германии

ВВЕДЕНИЕ

(FLASH на установке DESY в г. Гамбурге), в Италии (FERMI@Elettra в г. Триесте), в Соединенных Штатах Америки (LCLS в Национальной ускорительной лаборатории SLAC, Калифорния) и в Японии (установка SACLA в институте Харимы RIKEN в префектуре Хёго). На сегодняшний день установки LCLS и SACLA являются самыми мощными. Другие ведущие индустриальные страны также находятся на пути создания подобных установок: Южная Корея строит рентгеновский лазер на свободных электронах, в Швейцарии также ведется строительство национальной установки в дополнение к вкладу в строительство Европейского XFEL.

Европейский XFEL будет более мощным с точки зрения энергии электронов и яркости, чем другие установки, и будет генерировать 27000 импульсов в секунду, в то время как установка SACLA генерирует 60, а LCLS только 120. Эти показатели станут важным шагом вперед и позволят Европе выйти в лидеры в научно-технологической области. (таблица 1)

Project	LCLS, USA	SACLA, Japan	European XFEL	SwissFEL, Switzerland	PAL XFEL, Korea
Max. electron energy (GeV)	14.3	8.5	17.5	5.8	10
Wavelength range (nm)	0.13–4.4	0.06–0.3	0.05–4.7	0.1–7	0.06–10
Photons/pulse	$\sim 10^{12}$	2×10^{11}	$\sim 10^{12}$	$\sim 5 \times 10^{11}$	$10^{11}–10^{13}$
Peak brilliance	2×10^{33}	1×10^{33}	5×10^{33}	1×10^{33}	1.3×10^{33}
Pulses/second	120	60	27000	100	60
Date of first beam	2009	2011	2016	2016	2015

Таблица 1. Сравнение свойств источников жесткого рентгеновского излучения, включая Европейский XFEL.

В следующих разделах на некоторых примерах будет показана важность Европейского XFEL для развития науки и общества.

2 Европейский XFEL и решение проблем здравоохранения в XXI веке

Средняя продолжительность жизни человека, начиная с древнейших времен до середины XIX века, оставалась неизменной, пока значительные улучшения условий жизни и достижения в области гигиены в развитых странах не привели к ее увеличению. Прогресс в современных биомедицинских науках, особенно развитие молекулярной биологии в XX веке, также повлияли на увеличение средней продолжительности жизни человека. Однако население развивающихся стран до сих пор сильно подвержено различным заболеваниям, а в развитых странах со стареющим населением некоторые заболевания, связанные с возрастом, служат основой для широко распространенных социальных явлений. Кроме того, такие заболевания как птичий грипп или СПИД могут передаваться от животного к человеку. Профилактика и лечение заболевания зачастую основаны на полном понимании причин и механизмов развития болезни на молекулярном уровне, а создание новых лекарственных препаратов основывается на расшифровке атомной структуры биомолекул (рис. 6). Именно по этой причине исследователи из фармацевтических компаний – постоянные промышленные пользователи источников синхротронного излучения.

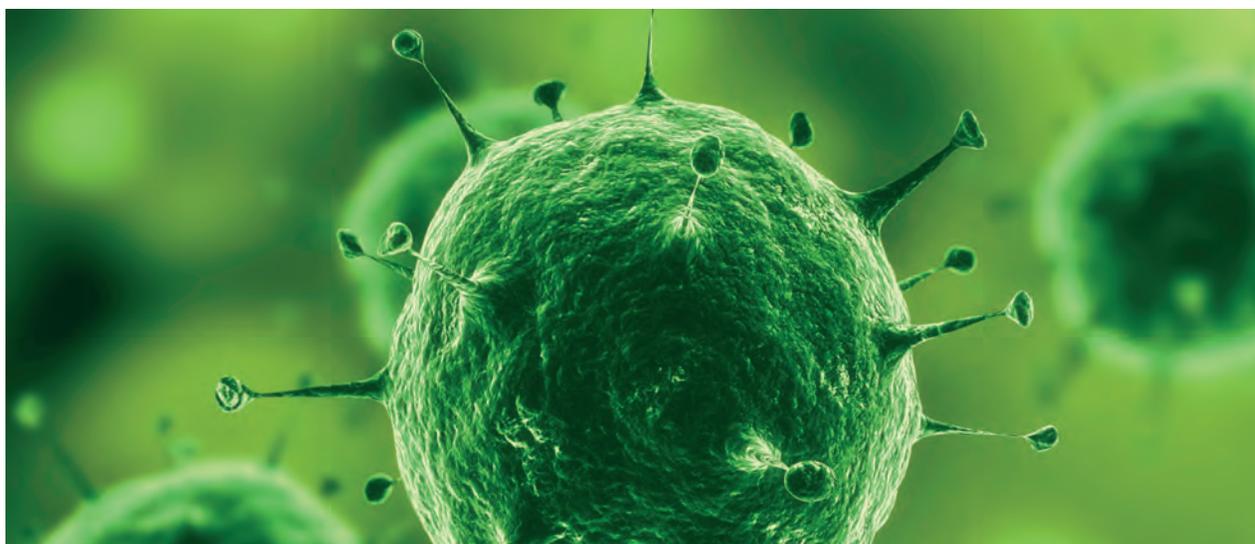


Рис.6 Вирусы ВИЧ или гриппа диаметром около 80-150 нанометров (миллиардная доля метра) используют особые биомеханические и биохимические процессы для того, чтобы инфицировать клетки. Планируется, что с помощью Европейского XFEL можно будет детально увидеть, как передается данная инфекция, и создать более эффективные лекарства от болезней, которые провоцируют эти вирусы. © fotolia.

Вклад Европейского XFEL в исследования структур будет многофункциональным:

- Прежде всего, благодаря яркости, когерентности и короткой длительности импульсов исследователи смогут гораздо более подробно изучить структуры биомолекул на атомарном уровне. Короткая длительность импульсов особенно важна, так как позволяет устранить основные препятствия на пути получения изображений с высоким разрешением – возникновение радиационных повреждений под действием интенсивных рентгеновских пучков. Молекула под действием пучка буквально взрывается – этот процесс длится десятки и сотни фемтосекунд (рис. 7). Несмотря на то, что все это занимает доли секунды, можно считать этот процесс медленным по сравнению с длительностью импульсов, которые будут генерироваться на XFEL. Поэтому на Европейском лазере на свободных электронах можно будет получать изображения с расшифровкой структуры до того, как произойдет ее радиационное повреждение.
- Во-вторых, по тем же самым причинам, исследователи надеются на то, что получение изображений биологических объектов (клетки, органеллы внутри клеток и вирусы) станет возможным при беспрецедентном пространственном разрешении в несколько нанометров.
- В-третьих, ультракороткие импульсы позволяют проводить динамические исследования процессов; то есть происходит переход от усредненных по времени и пространству изображений к моментальным молекулярным фотографиям – "кадрам", из которых можно делать настоящие фильмы молекулярных реакций.

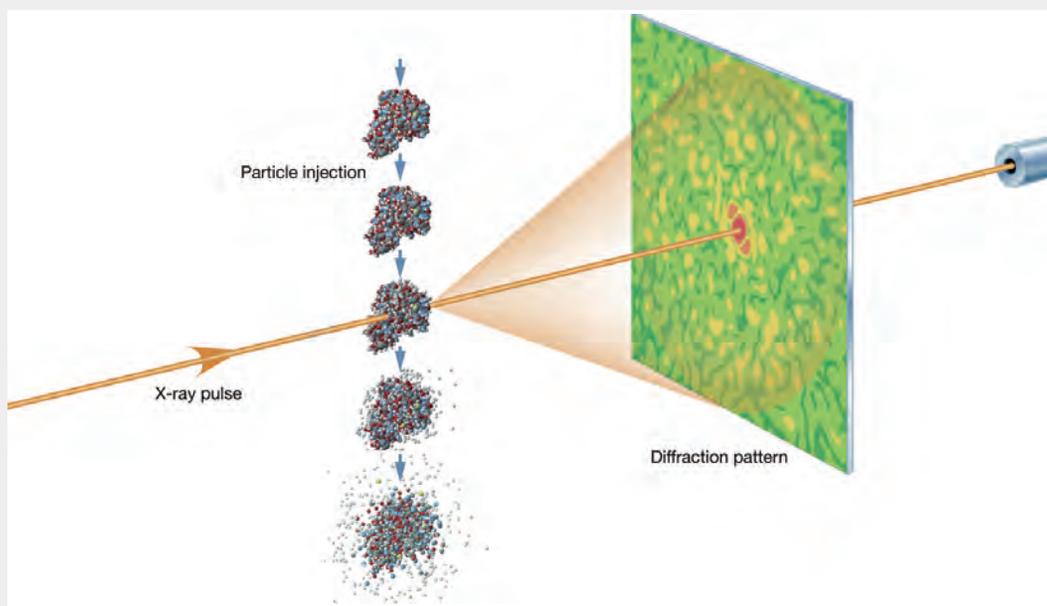


Рис.7. Рентгеновские импульсы, полученные с помощью лазера на свободных электронах, облучают биомолекулу. Камеры записывают дифракционные картины, которые содержат информацию о структуре молекулы до ее радиационного повреждения. Получение множества подобных дифракционных изображений образцов одной и той же биомолекулы позволит ученым понять ее трехмерную структуру.

ЕВРОПЕЙСКИЙ XFEL И РЕШЕНИЕ ПРОБЛЕМ ЗДРАВООХРАНЕНИЯ В XXI ВЕКЕ

В настоящее время для того чтобы определить атомарную структуру с помощью рентгеновского излучения, молекула или вещество должны быть в твердом кристаллическом состоянии. Кристаллизация биологических молекул отнюдь не простая задача. Получение кристаллов необходимого размера и качества для исследований на синхротроне занимает длительное время – многие годы, в то время как само изучение вещества в кристаллическом состоянии требует гораздо меньшего времени.

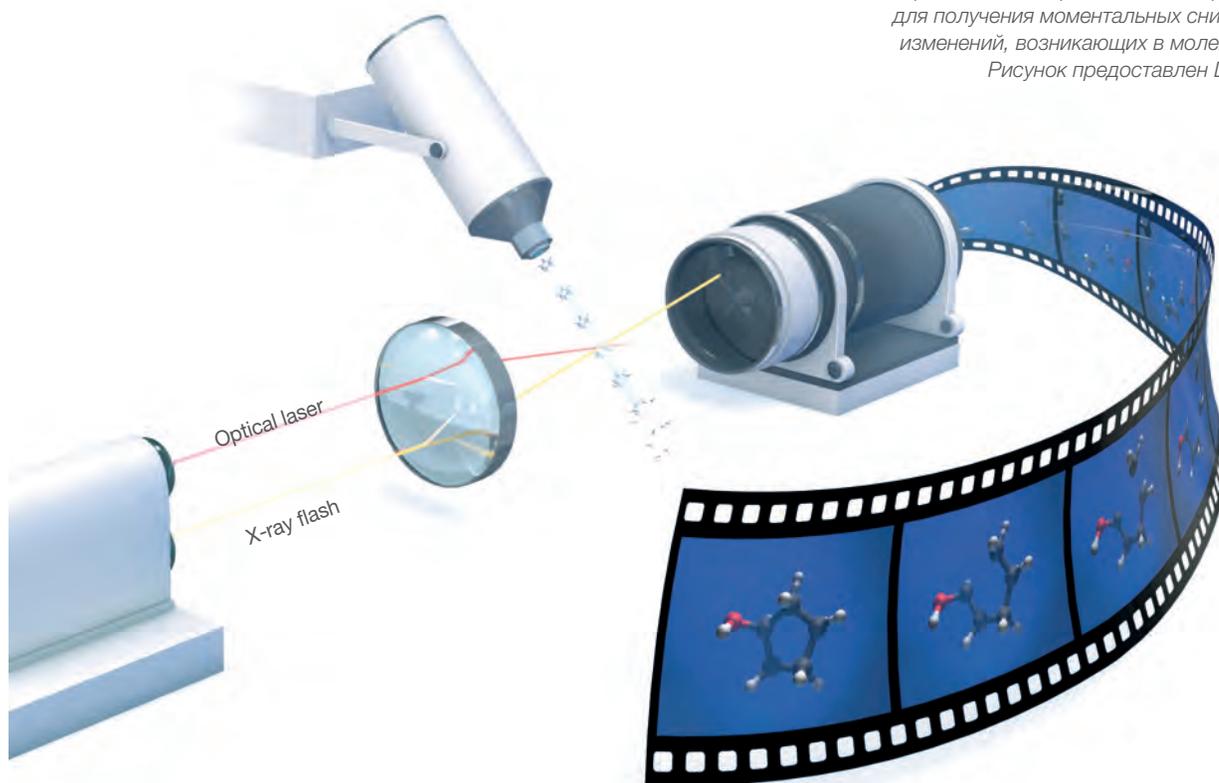
Рентгеновские лазеры на свободных электронах уже продемонстрировали качественно иные возможности (по сравнению с синхротронами) в получении информации о структуре очень малых (менее микрометра) нанокристаллов. Совсем недавно в Национальной ускорительной лаборатории SLAC была расшифрована ранее неизвестная структура белка катепсина В (цистеиновая протеаза) с разрешением 0,21 нм в ходе проведения исследований кристаллов при комнатной температуре (рис. 8). Этот белок играет очень важную роль в патогенезе сонной болезни – паразитическом заболевании, которое широко распространено в Африке и ежегодно становится причиной смерти почти 30 000 человек. Исследователи надеются, что полученные знания помогут найти новый метод борьбы с насекомыми, переносящими данное заболевание.



Рис. 8. Структура бека, участвующего в процессе передачи африканской сонной болезни. Ученые получили дифракционные картины (показанные на заднем плане) в Национальной ускорительной лаборатории SLAC, которые затем были реконструированы в молекулярную структуру (показано на переднем плане, не в масштабе). Рисунок предоставлен Greg Steward / SLAC National Accelerator Laboratory

Исследования на Европейском XFEL должны значительно увеличить ранее продемонстрированные возможности структурного анализа нанокристаллов, что, как ожидается, осуществит заветную мечту микробиологии — восстановление структуры по отдельным, не кристаллизованным молекулам. Наличие большого количества импульсов в секунду дает два основных преимущества в нанокристаллографии: во-первых, будет уменьшено время сбора данных и, во-вторых, что даже более важно, ожидается, что требуемое количество образца будет в 100 раз меньше, чем используемое в экспериментах на установке LCLS. Таким образом, можно будет провести множество других экспериментов с использованием небольшой части тех материалов, производство которых является комплексным и дорогостоящим процессом. Научное сообщество ожидает, что Европейский XFEL станет весьма эффективным инструментом, с помощью которого можно будет расшифровать структуры молекул (таких как мембранные белки, из которых трудно получить кристаллы размером более микрометра) в более короткие сроки и с меньшими усилиями. Это будет способствовать достижению прогресса как в нашем понимании патогенов, так и в создании фармацевтических препаратов. Существует и другая важная перспектива в будущем использовании Европейского XFEL для биологических наук: перспектива молекулярного кино.

Рис.9. Процесс создания молекулярного фильма. Сначала вспышка оптического лазера вызывает химическую реакцию. Второй импульс рентгеновского лазера на свободных электронах подается через различные временные интервалы после первого для получения моментальных снимков изменений, возникающих в молекуле. Рисунок предоставлен DESY.



ЕВРОПЕЙСКИЙ XFEL И РЕШЕНИЕ ПРОБЛЕМ ЗДРАВООХРАНЕНИЯ В XXI ВЕКЕ

Биомолекулы являются двигателями жизни. Подобно механическим устройствам с движущимися частями, они изменяют свою структуру в ходе выполнения соответствующих задач. Было бы очень полезно наблюдать за этими изменениями и движениями подвижных частей как в кино. Для того чтобы заснять движущийся объект, необходимо сделать много моментальных снимков. Более быстрые движения требуют меньшего времени измерения и большего числа моментальных снимков в единицу времени для того, чтобы избежать ухудшения разрешения изображения. Именно в такой ситуации ультракороткие по времени импульсы лазера на свободных электронах обеспечат четкое с высоким разрешением изображение процессов, проходящих на больших скоростях (рис.9).

Динамическим процессом в белках, который до сих пор не до конца понят специалистами и который играет важную роль в развитии многих серьезных болезней, является процесс укладки или «фолдинга» белка. При этом естественном процессе белок – линейная цепочка из молекул аминокислот – сворачивается в трехмерную структуру – конформацию, напоминающую клубок и характеризующую свойства данного белка. В некоторых редких случаях происходит неправильное сворачивание белка. Этот процесс связан со многими болезнями: сахарный диабет II типа, болезнь Крейтцфельда–Якоба (губчатая энцефалопатия – коровье бешенство), болезнь Альцгеймера, семейная амилоидная кардиомиопатия или полинейропатия, болезнь Хантингтона и Паркинсона. Исследование механизмов фолдинга, а также причин, по которым он проходит неправильно, может помочь в понимании причин столь серьезных заболеваний и возможностей их профилактики. Изучение самых первых шагов в процессе укладки с помощью рентгеновского лазера на свободных электронах очень интересует исследователей и позволит пошагово изучить процесс фолдинга белка.

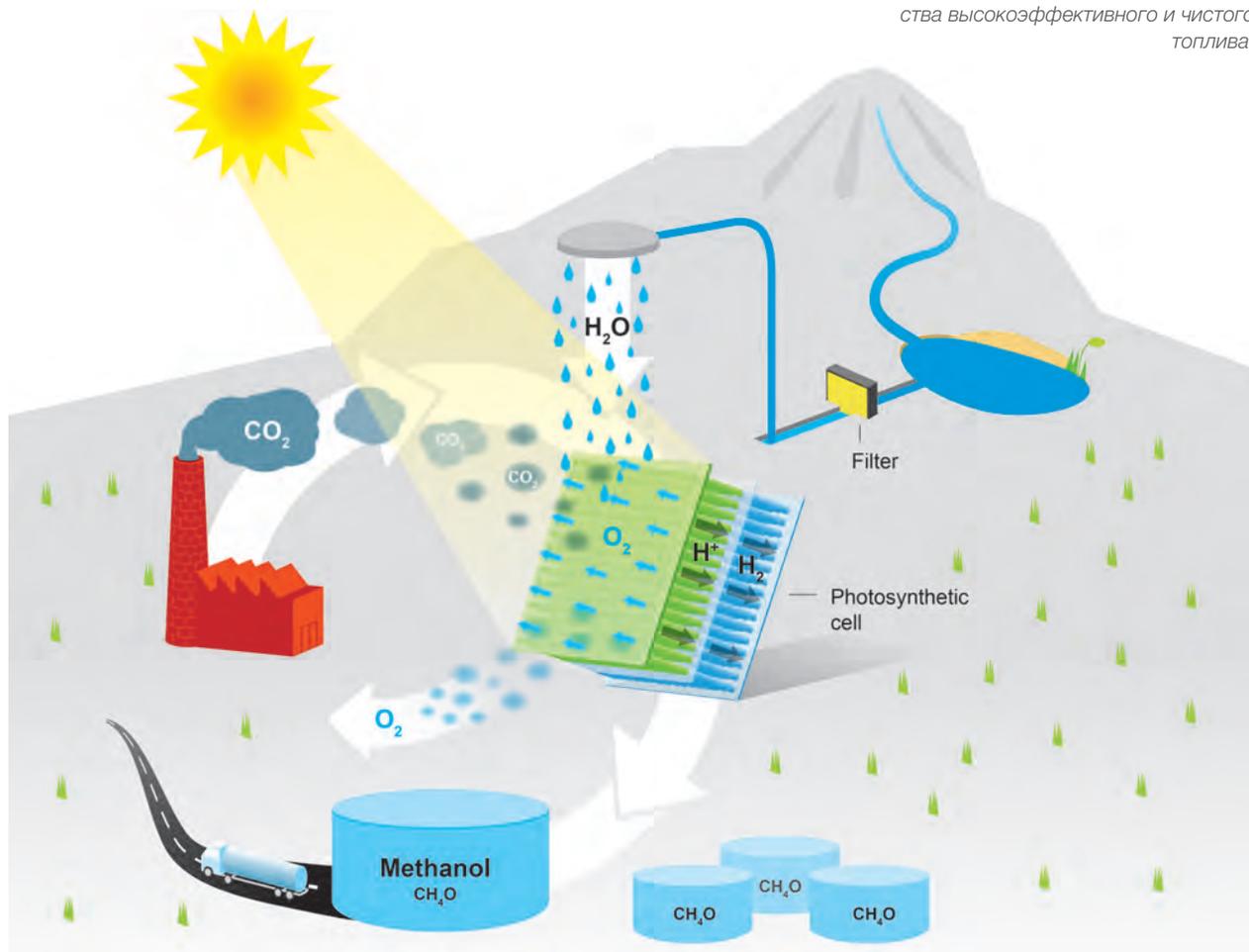
Таким образом, Европейский XFEL, как ожидается, позволит совершить гигантский скачок в способности исследовать, визуализировать и понимать молекулярные основы биологических процессов. Исследования связаны с изучением развития болезней и действиями природной иммунной защиты, включающей антитела, других биологических объектов – клеток, вирусов или мембран, а также фармацевтических препаратов. Исследования в данной области с помощью Европейского XFEL будут способствовать продолжению давней борьбы за здоровье и долголетие населения.

3 Энергетические вызовы: природный и искусственный фотосинтез

Наше общество сталкивается с многочисленными вызовами, связанными с обеспечением промышленности необходимой энергией, а также требованиями определенного уровня комфорта в нашей повседневной жизни. Ископаемое топливо существует в ограниченном количестве, а его использование ведет к рискам для климата и окружающей среды, особенно с учетом роста уровня жизни и энергетических потребностей развивающихся экономик. Энергия ядерного деления может быть не всегда безопасной, а термоядерный синтез все еще находится на экспериментальном этапе.

Солнце обеспечивает Землю огромным количеством энергии. Человечество мечтает о чистом, экономичном, надежном преобразовании этой энергии. Прямое использование солнечной энергии для генерирования электроэнергии (солнечные батареи) или тепла (устройства с использованием фототепловых методов) сталкивается с необходимостью хранения энергии, так как производственный цикл (генериро-

Рис. 10. Искусственный фотосинтез. В будущем искусственное биотопливо можно будет производить из CO_2 , солнечного света и воды, моделируя процессы, проходящие в растительной клетке. Европейский XFEL может делать снимки реакций, протекающих в растениях, с достаточным для их анализа временным разрешением. Это должно привести к лучшему пониманию данных реакций, давая ученым возможность оптимизировать их для производства высокоэффективного и чистого топлива.



ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ ВЫЗОВЫ: ПРИРОДНЫЙ И ИСКУССТВЕННЫЙ ФОТОСИНТЕЗ

вание возможно в дневное время, в ясные дни; ночью и в пасмурные дни процесс невозможен; больше энергии можно получить летом, меньше зимой) не совпадает с циклом потребления. Хранение энергии в настоящее время представляет собой неэффективный и дорогой процесс, что накладывает ограничения на использование солнечных батарей и устройств с использованием фототепловых методов (по аналогии с энергией ветра).

Для того чтобы разрешить данные проблемы, многие ученые пытаются оптимизировать процессы, которые могли бы использовать солнечный свет для создания сохраняемого и транспортируемого топлива. Вдохновение при этом черпается из естественного процесса фотосинтеза растений, которые используют энергию солнечного света. Растения используют энергию солнца для того, чтобы разделить воду на кислород и водород, который в свою очередь дополнительно делится на протон и электрон. Рекомбинация последних в водород обеспечивает энергией протекание реакции, необходимой для жизни и роста растений. В идеале, если кто-нибудь сможет смоделировать данный процесс, то можно будет использовать водород, выделенный из воды, для реакции с диоксидом углерода и получения метанола или метана, используемых в дальнейшем в качестве топлива (рис. 10).

В природе расщепление молекул воды и расщепление атомов водорода на протоны и электроны происходит в сложных биомолекулярных комплексах, один из которых называется «Фотосистема II» и содержит в составе белковых молекул четыре атома марганца и один атом кальция.

В лаборатории вода может быть разделена только за счет использования некоторых редких и тяжелых металлов, таких как платина или рутений – дорогих и сильно загрязняющих окружающую среду. Огромным прорывом станет понимание промежуточных шагов химического процесса расщепления воды у растений с помощью дешевых и распространенных веществ, таких как магний или кальций (или аналогичных), а также воспроизведение и оптимизация данного процесса для увеличения его эффективности. Полный цикл у растений и бактерий включает последовательное поглощение солнечного света (четыре фотона). Фотоны индуцируют трансформацию в структуре комплекса из марганца и кальция и запускают один шаг в реакции, ведущей к расщеплению двух молекул воды. Четвертый фотон возвращает комплекс к исходной конфигурации для того, чтобы начать все сначала.

ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ ВЫЗОВЫ: ПРИРОДНЫЙ И ИСКУССТВЕННЫЙ ФОТОСИНТЕЗ

Исследования, направленные на изучение структуры комплекса из марганца и кальция в различных промежуточных состояниях процесса, были затруднены до сих пор из-за необходимости замораживать кристаллы при очень низких температурах для ограничения последствий радиационных повреждений. Здесь у лазера на свободных электронах есть определенное преимущество, так как работы можно проводить при комнатной температуре при том, что в реальности процессы проходят при схожей температуре и могут индуцироваться с помощью последовательного освещения вспышками оптического лазера, которые управляют комплексом через различные состояния его цикла.

Возможность лазера на свободных электронах проследить за действиями в рамках химического цикла, как в видеоролике в режиме замедленной съемки, поможет лучше понять реакцию расщепления воды у растений. Уникальные возможности Европейского XFEL окажут существенное влияние и сформируют основу для создания оптимизированного процесса в промышленных масштабах для получения водорода и жидкого топлива из веществ, таких же дешевых и распространенных, как солнечный свет, вода, углекислый газ и некоторые легкие металлы.

4 Вещества и процессы для передовых технологий

4.а. Катализ и каталитические реакции

Выше приведен пример катализа в химических реакциях: сложная биомолекула, содержащая марганец и кальций не меняет своих свойств при реакции, во время которой происходит расщепление молекул воды, но при этом она не просто «пассивный наблюдатель». Она принимает участие в некоторых промежуточных процессах, становясь незаменимым ингредиентом для эффективного протекания реакции. Химики называют такого посредника катализатором, а сам процесс – катализом.

Уже почти столетие катализаторы являются важной частью химической промышленности. В начале XX века Фриц Габер и Карл Бош разработали катализаторы для повышения эффективности производства аммиака из азота и водорода, заложив тем самым основы производства синтетических удобрений. Сегодня катализаторы также используются для уменьшения масштабов загрязнения окружающей среды выхлопными газами (рис. 11) и являются основополагающими элементами в нефтехимической промышленности и многих других областях, оцениваемых на рынке в десятки миллиардов евро.

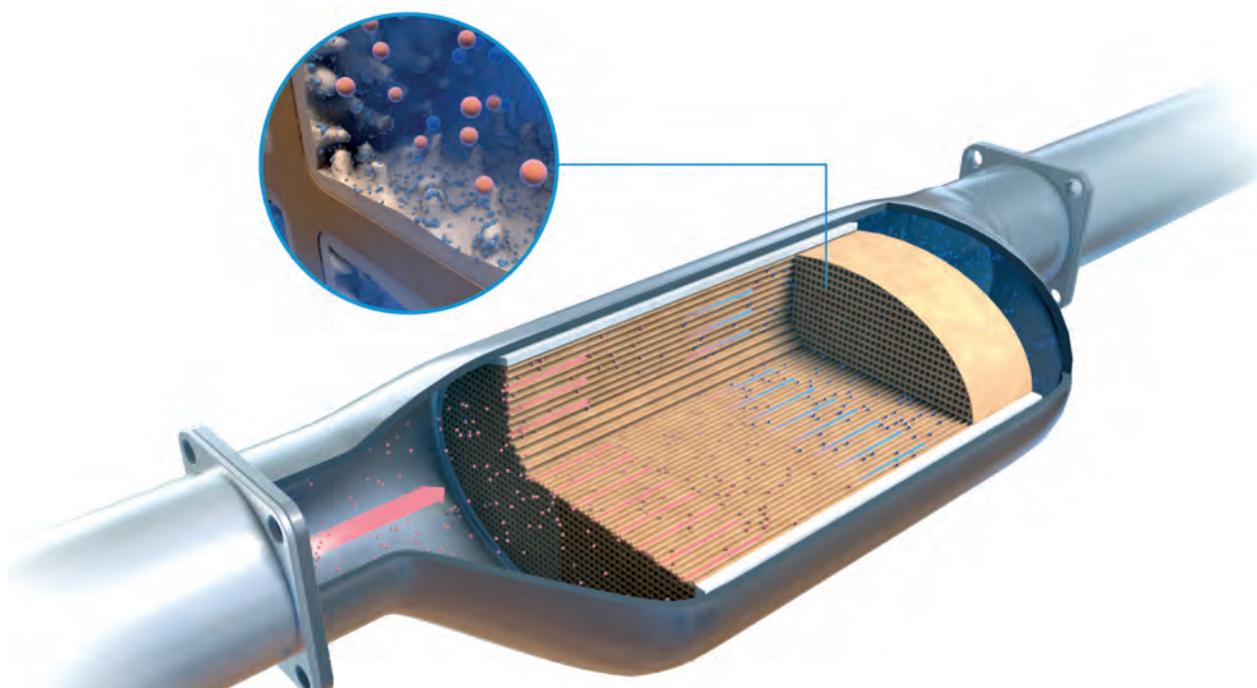


Рис. 11. Каталитический конвертер-нейтрализатор в машине, помогающий снизить токсичность выхлопных газов. Европейский XFEL может дать новые данные для понимания процессов катализа и поможет сделать катализаторы более эффективными, а газы менее токсичными. Рисунок предоставлен DESY.

Несмотря на их повсеместное использование, механизм действия катализаторов до сих пор не до конца понят. Во многих случаях они разрабатывались методом проб и ошибок с помощью, так называемых, «кулинарных рецептов». Рентгеновские лазеры на свободных электронах дадут новые импульсы для применения систематических подходов, основанных на возможности снимать «молекулярные фильмы» о реакции катализа на различных стадиях ее протекания. Понимание подробностей молекулярных механизмов будет способствовать совершенствованию разработок более эффективных и экологически чистых катализаторов с существенным влиянием на целый ряд важных промышленных процессов.

4.6. Наномagnetизм и информационные технологии

Развитие и совершенствование материалов для наиболее современных технологий также создают вызовы, ответить на которые можно будет с помощью рентгеновских лазеров на свободных электронах. Развитие информационных технологий, например, позволяет хранить информацию на все более компактных устройствах, а также дает возможность считывать и записывать ее так быстро, насколько это возможно. Современные жесткие диски используют многослойные магнитные материалы, в которых небольшой магнитный момент каждого зерна в верхнем слое может быть направлен в ту или иную сторону, чтобы зафиксировать "0" или "1", таким образом сохраняя один бит информации. Запись обычно происходит путем применения магнитных полей; чтение происходит путем измерения электрического сопротивления, которое зависит от ориентации магнитного момента верхнего слоя (так называемый "эффект гигантского магнитосопротивления", за открытие которого в 2007 году Альберту Ферту и Питеру Грюнбергу была присуждена Нобелевская премия по физике).

В последние годы было обнаружено, что короткий лазерный импульс света с круговой поляризацией, у которого есть два возможных направления, как у шурупа с левой или правой нарезкой, также может записывать данные на образце с помощью изменения магнитной полярности, но быстрее. Предполагается, что Европейский XFEL будет оснащен специальным устройством для получения рентгеновских лучей с круговой поляризацией, которые позволят исследователям создать схему намагничивания образца и изучить процесс ее эволюции во времени. Это приведет к лучшему пониманию сверхбыстрого стирания и перезаписи с помощью оптических лазерных импульсов и внесет вклад в понимание механизма, ограничивающего физическую скорость магнитной записи. Ускорение процесса записи данных является центральным вопросом как для развития информационных технологий, так и для развития многочисленных приложений в науке и технологии.

5 Строительство Европейского XFEL и передача технологий в промышленность

Уже на стадии строительства проект Европейского XFEL способствует развитию некоторых высокотехнологичных промышленных секторов в странах-участницах. Для того чтобы соответствовать требованиям, предъявляемым к Европейскому XFEL, производство многих компонентов требует сложных ноу-хау от исследовательских лабораторий, занятых в проекте; с другой стороны данные компоненты необходимо производить большими партиями промышленным способом. Например, потребовались 800 резонаторов из ниобия, плюс прототипные и запасные комплекты. Заказ был разделен между двумя промышленными компаниями, обладающими необходимой инфраструктурой и необходимым опытом, полученным на производстве прототипов этих изделий, под руководством экспертов из DESY и Национального Института Ядерной Физики (INFN, Италия). Базовая технология TESLA, разработанная в DESY, сейчас становится стандартом для сверхпроводящих линейных ускорителей по всему миру, для применения не только на лазерах на свободных электронах, но и в других крупных высокотехнологичных научных проектах, такой как источники нейтронов и коллайдеры для физики высоких энергий (рис. 12). Данную технологию предполагается использовать в различных проектах, а компании получают выгодную позицию на рынке, которая в дальнейшем будет усиливаться.



Рис. 12 Ускорительные технологии, используемые на Европейском XFEL, основывающиеся на специализированных резонаторах из ниобия, уже оказали влияние на развитие линейных ускорителей по всему миру. Рисунок предоставлен DESY.

Другая область, в которую Европейский XFEL также внесет значительный вклад – создание детекторов. Для того чтобы получить полное преимущество от высокого числа импульсов, генерируемых Европейским XFEL, детектор (по существу цифровая камера для рент-

СТРОИТЕЛЬСТВО ЕВРОПЕЙСКОГО XFEL И ПЕРЕДАЧА ТЕХНОЛОГИЙ В ПРОМЫШЛЕННОСТЬ

геновских лучей) должен быть в состоянии записать высококачественное изображение на датчике, передать его на временную систему памяти, удалить изображение с датчика, и быть готовым повторить процесс за очень короткий период времени. Устройство памяти временного хранения с возможностью сохранять несколько сотен изображений разработано и изготовлено, с перспективой увеличить количество изображений до нескольких тысяч. Все эти исследования требуют опыта и экспертизы, поэтому ряд европейских лабораторий принял участие в разработке прототипов. Были разработаны передовые электронные интегральные схемы, и их производство было передано компаниям. Некоторые особенности изображений, сделанных детектором с очень высокой скоростью считывания данных, будут интересными также для исследования с помощью синхротронов, где скорость обработки, хранения и восстановления данных сможет открыть новые возможности для бизнеса.

Вся информация, полученная в ходе эксперимента (сотни тысяч, а иногда и миллионы изображений) должны быть переданы для хранения на устройства памяти. Кроме того, все изображения должны сопровождаться дополнительной информацией (метаданными), позволяющей идентифицировать изображения (например, к какому эксперименту и образцу оно относится). Таким образом, Европейский XFEL вносит вклад в общие текущие исследования и разработку так называемого «потока данных», который все чаще затрагивает не только научные исследования в целом (пример: эксперименты в ЦЕРН привели к открытию бозона Хиггса), но и многие аспекты бизнеса и бытового обслуживания в нашем цифровом веке. В 1959 году Ричард Фейнман высказал гипотезу, что общий объем информации, содержащийся во всех крупных библиотеках мира (24 миллиона книг), составляет 0,1 петабайт информации (или 10¹⁴ байт). В современных условиях, данное количество информации может храниться на 10000 DVD высокого качества: тем не менее, ожидается, что Европейский XFEL произведет эквивалентное количество информации всего за первые несколько месяцев, и этот показатель будет только увеличиваться!

Некоторые из решений, разрабатываемых для эффективного взаимодействия с потоком данных на Европейском XFEL и на других крупных исследовательских установках (например, в ЦЕРН), как ожидается, станут использоваться и в других областях: более точный прогноз погоды, более точные модели климатических изменений, глобальные коммуникационные сети, где количество данных также неумолимо растет, хотя и не такими высокими темпами.

6 Заключение

Европейский XFEL – крупная исследовательская установка, которую создают 11 стран, станет основным вкладом в консолидацию позиции Европы на передовом рубеже фундаментальных научных исследований. Данный проект обещает много интересных открытий на благо общества. Несколько примеров были представлены в предшествующих параграфах.

Сам процесс строительства установки порождает научные и технологические вызовы, решаемые при участии научных кругов и промышленности.

В процессе работы на Европейском XFEL будут выбираться только самые лучшие и самые инновационные эксперименты, предлагаемые учеными из разных областей, обеспечивая возможность получения доступа к уникальным установкам. Эту возможность получают молодые ученые, а также те, кто работает в институтах или университетах со скромным финансированием, но имеет передовые идеи, представляющие реальный интерес для науки. С 6 установками в стартовой конфигурации и возможностью увеличения их числа до 15, Европейский XFEL будет в состоянии принять больше исследователей, чем любой другой рентгеновский лазер на свободных электронах в мире. Расположенный в кластере научных и образовательных центров, таких как DESY, Центр лазеров на свободных электронах (CFEL), университет Гамбурга, Общество Макса Планка, Европейская лаборатория по молекулярной биологии (EMBL), Центр структурных биологических систем (CSSB) и других, Европейский XFEL будет стремиться максимально развивать сотрудничество, чтобы предложить уникальную и активную исследовательскую среду. Окончание строительства и начало исследований должно предоставить Европе место в «высшей лиге» рентгеновских источников. Ожидается, что Европейский XFEL станет еще одной историей успеха европейского сотрудничества в области науки и техники.



EUROPEAN XFEL GMBH
Albert-Einstein-Ring 19 · 22761 Hamburg · Germany

www.xfel.eu

Foreword and translation provided
by NRC 'Kurchatov Institute'.