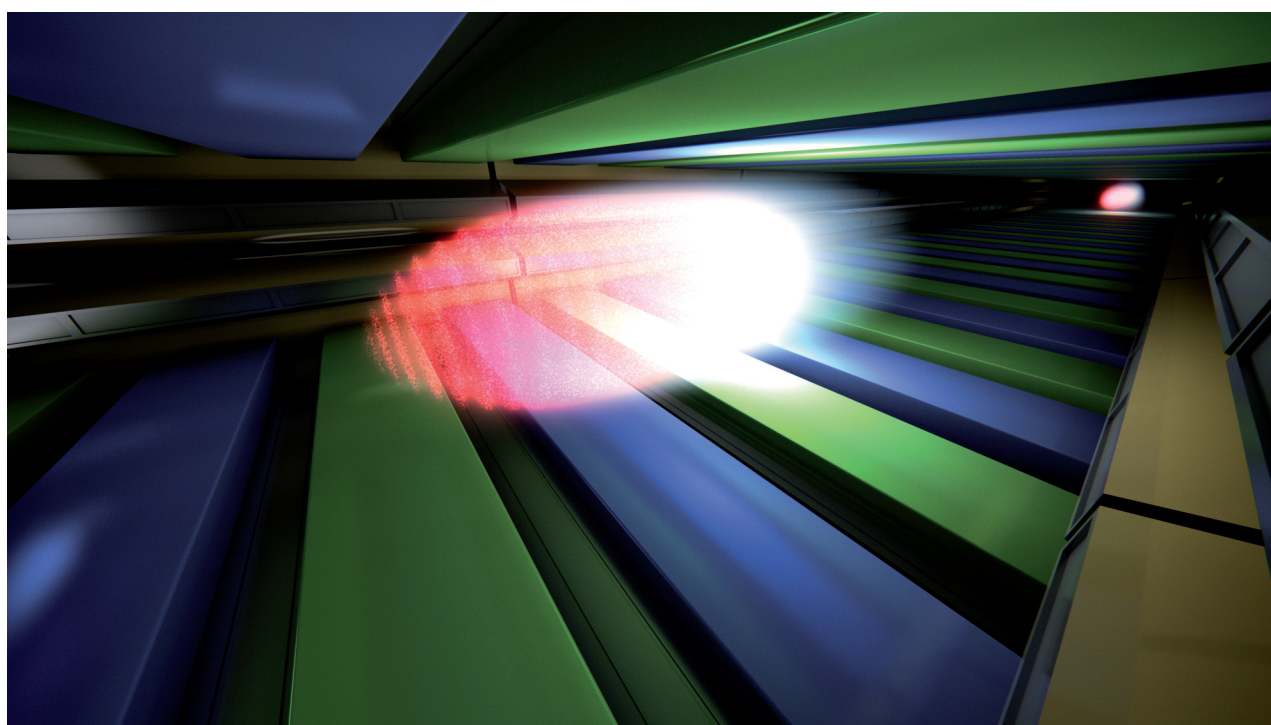


EUROPEAN XFEL EUROPEJSKI RENTGENOWSKI LASER NA SWOBODNYCH ELEKTRONACH



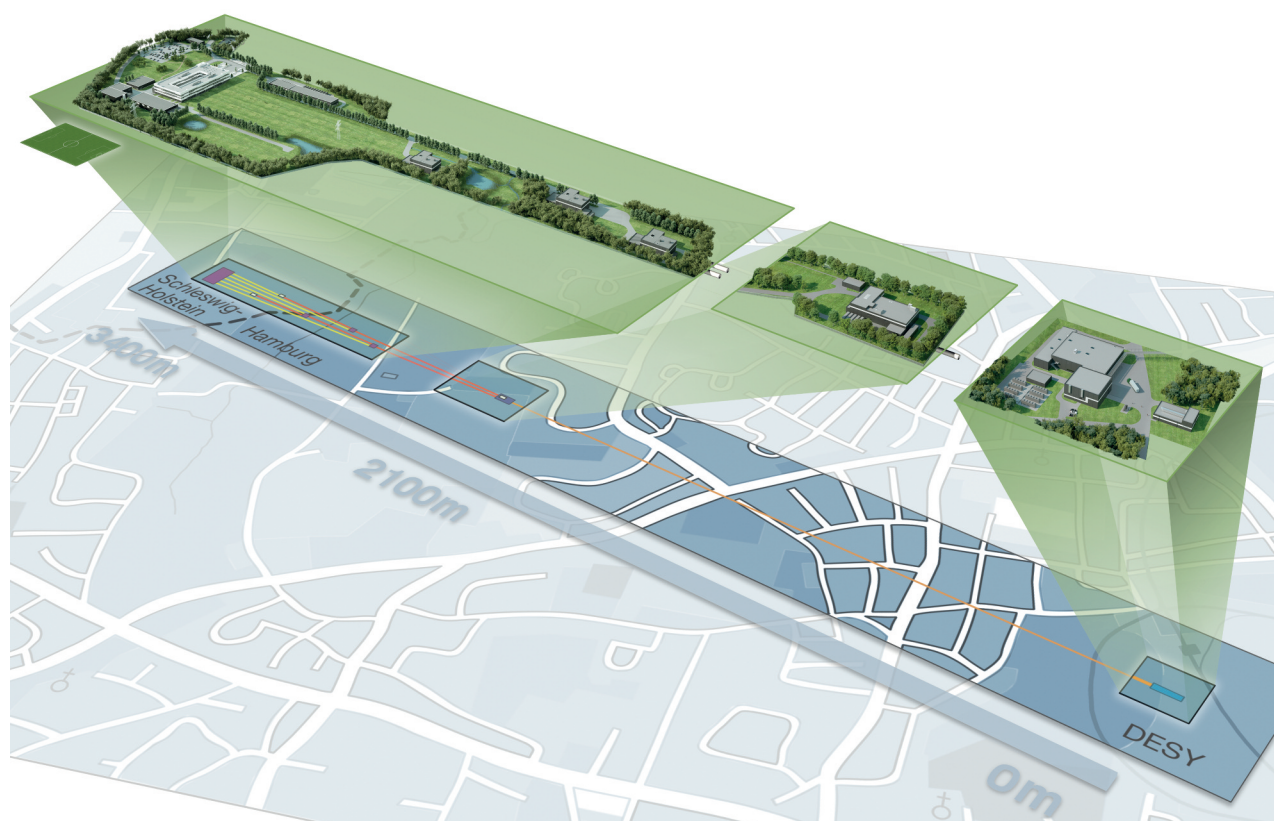
A WYZWANIA NASZYCH CZASÓW

**EUROPEJSKI RENTGENOWSKI LASER NA SWOBODNYCH
ELEKTRONACH A WYZWANIA NASZYCH CZASÓW**

1 Wstęp: European XFEL	1
2 European XFEL a problemy zdrowotne XXI w.	6
3 Wyzwanie energetyczne: Naturalna i sztuczna fotosynteza	11
4 Materiały i procesy dla zaawansowanych technologii	14
5 Transfer do przemysłu nowych technologii opracowanych dla European XFEL	16
6 Uwagi końcowe	18
7 Impressum	19

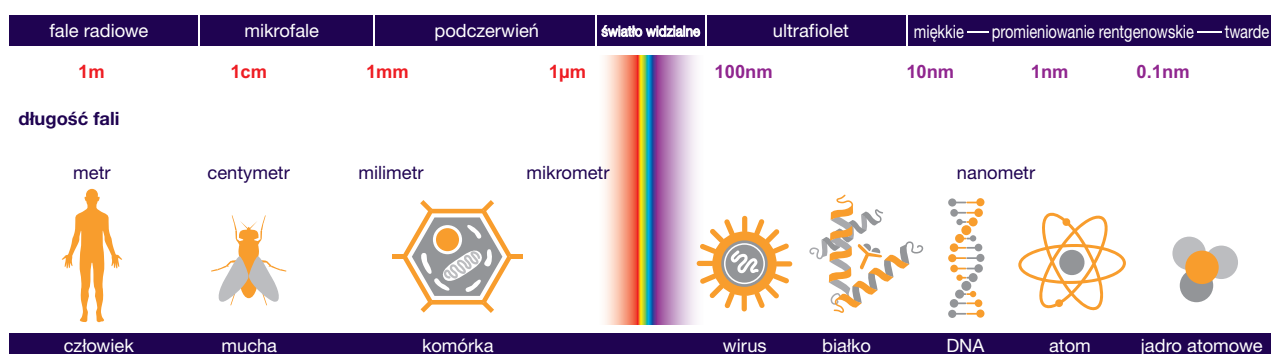
1 Wstęp: European XFEL

Niniejsza broszura pokrótce przedstawia korzyści, jakich można się spodziewać po uruchomieniu europejskiego rentgenowskiego lasera European XFEL (X-Ray Free-Electron Laser, laser na swobodnych elektronach). Obecnie budowany w okolicach Hamburga (rys.1) laser European XFEL został przez Europejskie Strategiczne Forum ds. Infrastruktury Badawczej zaliczony do głównych urządzeń badawczych Europy. Realizacja projektu ruszyła w 2009 r. po zawarciu międzyrządowej umowy 12 krajów europejskich. Od 2017 r. naukowcy i badacze z laboratoriów przemysłowych uzyskują nowe silne narzędzie do badań struktury materii i poszukiwań odpowiedzi na ważne pytania w dziedzinach takich jak medycyna, nowe/odnawialne źródła energii, materiały technologiczne, czy ochrona środowiska.



Rys.1 European XFEL będzie w większości schowany w tunelach o łącznej długości 5,8 km łączących siedzibę DESY w dzielnicy Bahrenfeld w zachodniej części Hamburga (na ilustracji z prawej strony) z halą eksperymetalną w ośrodku badawczym Schenefeld (na ilustracji z lewej strony). Całkowita długość lasera sięga ok. 3,4 km.

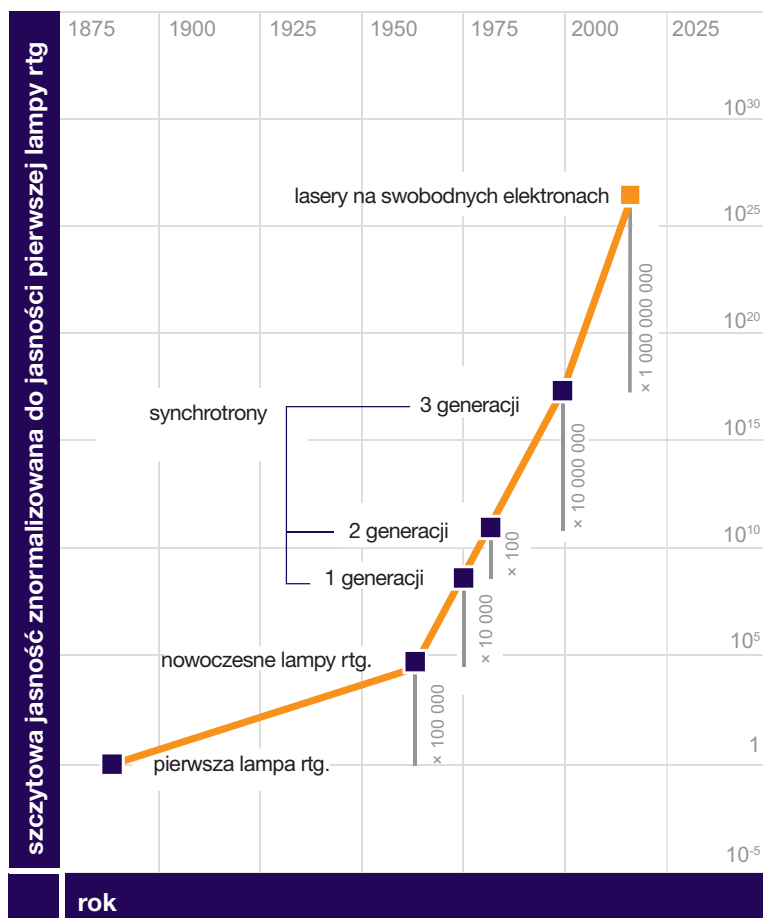
Natura promieni rentgenowskich (czasami zwanych promieniami X) jest podobna do natury fal radiowych, mikrofal i światła widzialnego – wszystkie są falami elektromagnetycznymi. Promienie X mają jednak o wiele krótsze długości fal. Żaden mikroskop nie może zobrazować obiektów mniejszych niż długość fali użytego w nim światła. Długości fal promieni rentgenowskich są wystarczająco małe, aby zobrazować szczegóły materii na poziomie atomowym (rys. 2). Zakres tych fal rozciąga się od tzw. „miękkich” promieni X zdolnych obrazować duże molekuly (np. białka) do tzw. „twardych” promieni X zdolnych obrazować małe molekuly i pojedyncze atomy.



W latach '50 ub. wieku promienie rentgenowskie odegrały decydującą rolę w ustaleniu, że istotne z punktu widzenia informacji genetycznej zasady w molekułach DNA (adenina, tymina, cytozyna i guanina) są ułożone w podwójne helisy jak skręcone drabiny i że szczeble tych drabin przenoszą informację genetyczną. To przełomowe odkrycie dokonane dzięki jednemu z najważniejszych eksperymentów XX wieku, którego nie dałoby się przeprowadzić bez wykorzystania promieni X pokazuje jak kluczową sprawą dla zrozumienia funkcji może być poznanie budowy. Podobnie jest w chemii czy w materiałoznawstwie (więcej informacji na ten temat można znaleźć niżej w rozdziale 4 pt. „Materiały i procesy dla zaawansowanych technologii”).

Aby móc określać złożone struktury molekularne trzeba dysponować bardzo jasnymi źródłami promieniowania. Akceleratory cząstek, w szczególności elektronów, mogą być wyjątkowo silnymi źródłami promieniowania rentgenowskiego (nawet miliony razy jaśniejszymi niż aparaty rentgenowskie używane w medycynie). Poczynając od lat '60 synchrotrony rewolucjonizowały badania biomolekuł. W 1980 r. znano strukturę około 70 biomolekuł. We wrześniu 2013 ta liczba przekroczyła 94 000. Strukturę ponad 83 000 z nich ustalono przy zastosowaniu rentgenowskiego promieniowania synchrotronowego. Obecnie synchrotrony są najważniejszymi narzędziami używanymi do określania struktur biomolekuł. Sześć nagród Nobla w dziedzinie chemii przyznano za prace, w których promieniowanie synchrotronowe ogrywało kluczową rolę.

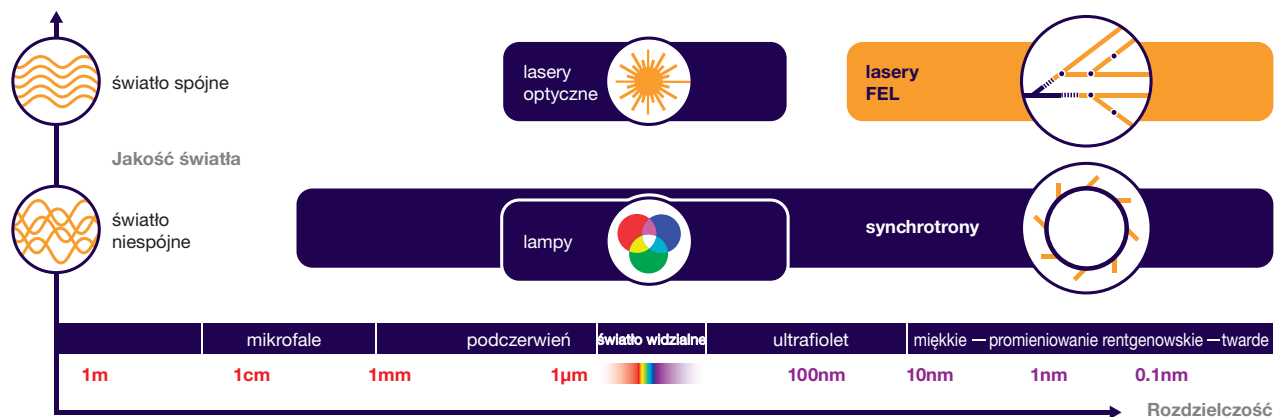
Rys.2 Widmo promieniowania elektromagnetycznego, w którym długości fal w poszczególnych zakresach zilustrowano obiektami o podobnych rozmiarach. Im krótsze fale, tym mniejsze objekty mogą być obrazowane przez dane promieniowanie.



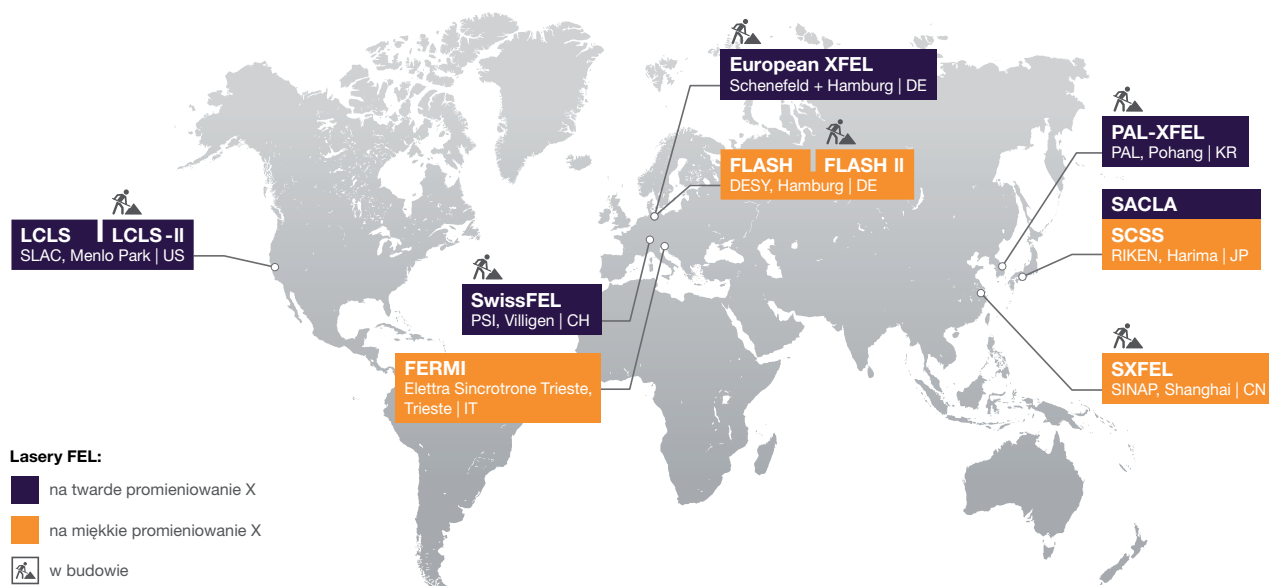
Rys.3 Ewolucja szczytowej jasności źródeł promieniowania rentgenowskiego. Widać jak dramatycznie wzrosła ich jasność od czasu odkrycia, że promieniowanie takie może być produkowane przez akceleratory. Opanowanie techniki generacji za pomocą laserów FEL doskonale wpisuje się w ten wykładniczy trend wzrostowy i otwiera nowe perspektywy badań, o których dotychczas nikomu się nie śniło.

Lasery na swobodnych elektronach (lasery FEL) pozwoliły wykonać w ciągu ostatnich kilku lat kolejny skok na drodze ku jaśniejszym źródłom promieniowania rentgenowskiego. Zasilane liniowymi akceleratorami elektronów lasery generują impulsy promieniowania, które charakteryzują się trzema bardzo korzystnymi własnościami:

1. Impulsy generowane przez lasery FEL są nadzwyczaj jasne, od 100 milionów do 1 miliard razy jaśniejsze niż promieniowanie synchrotronowe (rys.3).
2. Impulsy generowane przez lasery FEL są nadzwyczaj krótkie, trwają nawet tylko kilka femtosekund. 1 femtosekunda (1 fs) to milionowa część miliardowej części sekundy. Przez taki czas światło przebiega dystans krótszy niż jedna setna grubości włosa.
3. Światło generowane przez lasery jest spójne. Oznacza to, że promieniowanie propagujące się w różnych miejscach na przekroju wiązki fotonowej jest skorelowane w fazie i wzmacnia się wzajemnie (rys.4). Ta cecha czyni z impulsów generowanych przez lasery FEL narzędzie o wiele bardziej użyteczne dla eksperymentatorów niż konwencjonalne (niespójne) promienie rentgenowskie.



Rys.4 Porównanie jakości i zakresów długości fal światła emitowanego przez różne źródła. Spójne wiązki laserowe mają wyższą jakość niż niespójne wiązki generowane przez różne źródła reprezentowane tu przez lampy i synchrotrony. Wśród źródeł światła o krótszych falach (po prawej) synchrotrony generują wiązki o ograniczonej spójności, natomiast lasery rentgenowskie (zaznaczone tu pomarańczowo) – wiązki spójne.



Rys.5 Lasery rentgenowskie na świecie. Obecnie tylko dwa lasery na twarde promieniowanie X (SACLA w Japonii i LCLS w USA) są udostępnione naukowcom.

Na świecie pracuje tylko kilka laserów rentgenowskich: FLASH (DESY, Hamburg, Niemcy); FERMI (Elettra, Triest, Włochy); LCLS (SLAC, Menlo Park, Ca, USA) i SACLA (RIKEN Harima Hyogo, Japonia) – (rys.5). Dwie ostatnie instalacje są obecnie najpotężniejsze. Poza rozbudową istniejących instalacji, nowe lasery FEL są też budowane przez Koreę Północną, Chiny i Szwajcarię (niezależnie od uczestnictwa tej ostatniej w European XFEL).

European XFEL będzie silniejszy od już istniejących pod względem energii elektronów i jasności źródła. Dodatkowo będzie wytwarzał 27 000 impulsów na sekundę w porównaniu do 60 w przypadku SACLA lub 120 w przypadku LCLS. Te unikalne właściwości zapewnią Europie czołową pozycję na tym wysoce konkurencyjnym polu zaawansowanej nauki i technologii (Tabela1).

Projekt Parametr	LCLS USA	LCLS II CuRF	LCLS II SCRF	SACLA Japonia	European XFEL	SwissFEL Szwajcaria	PAL-XFEL Korea
Max. energia elektronów (GeV)	14,3	15	4,5	8,5	17,5	5,8	10
Zakres długości fal (nm)	0,1–4,6	0,05–1,23	0,25–6	0,06–0,3	0,05–4,7	0,1–7	0,06–10
Liczba fotonów w impulsie	$\sim 10^{12}$	2×10^{13}	$3 \times 10^{13}^{**}$	2×10^{11}	$\sim 10^{12}$	$\sim 5 \times 10^{11}$	10^{11} – 10^{13}
Szczytowa jasność źródła*	2×10^{33}	2×10^{33}	1×10^{32}	1×10^{33}	5×10^{33}	1×10^{33}	$1,3 \times 10^{33}$
Częstość repetycji (imp/s)	120	120	1 000 000	60	27 000	100	60
Data pierwszej wiązki	2009	2020	2020	2011	2016	2016	2016

* strumień fotonów o "ściśle" zdefiniowanej energii (w granicach 0,1% pasma energetycznego), przepływający w ciągu 1 s, przez pow. 1 mm kwadratowego w kącie bryłowym 1 mrad kwadratowy.

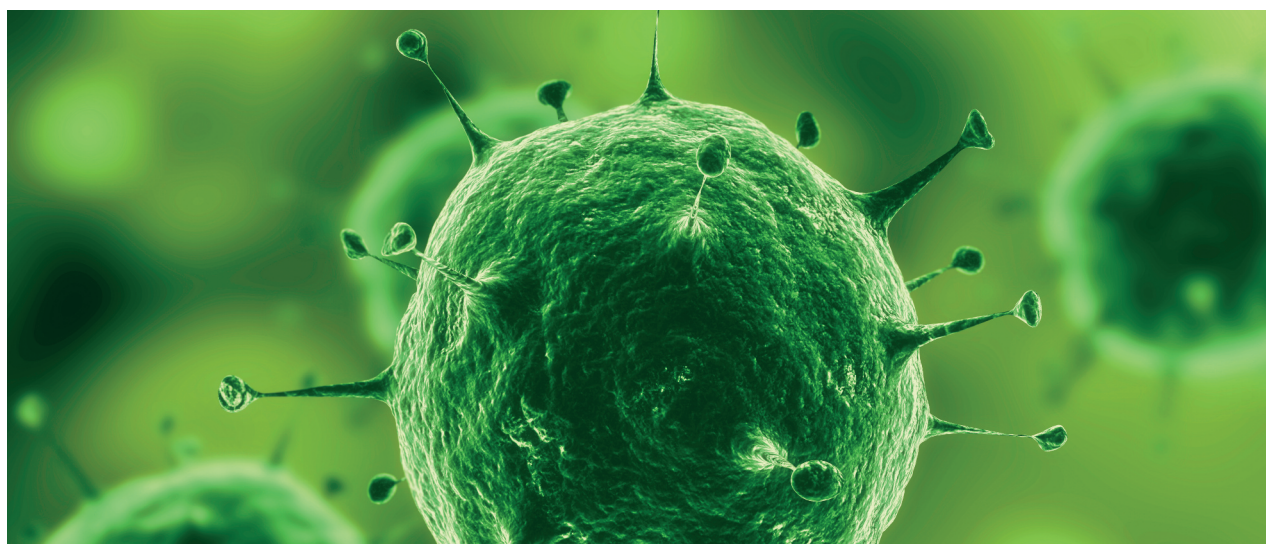
** miękkie promieniowanie rentgenowskie

Tabela 1: Porównanie istniejących źródeł twardego promieniowania rentgenowskiego z budowanym European XFEL.

W dalszych sekcjach omówiono kilka przykładowych zastosowań demonstrujących ważne znaczenie laserów FEL dla postępu nauki i rozwoju społeczeństw.

2 European XFEL a problemy zdrowotne XXI w.

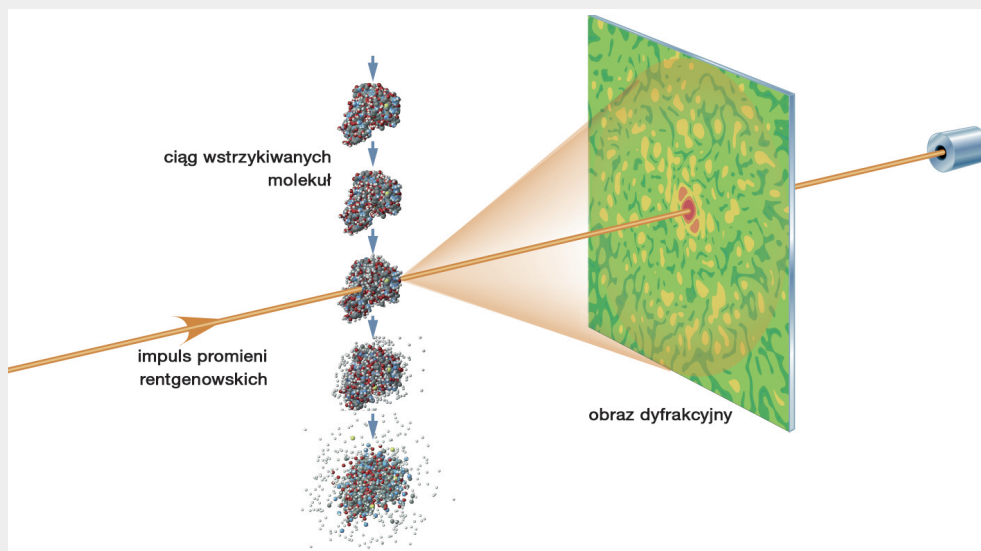
Oczekiwana długość życia pozostawała nie zmieniała się od czasów pradawnych aż do połowy XIX w., kiedy to w rozwiniętych krajach stopniowo wzrastał poziom higieny. Postępy nowoczesnej medycyny i biologii – zwłaszcza od czasu pojawienia się w XX w. biologii molekularnej – przyczyniły się do wydłużenia oczekiwanej długości życia na całym świecie. Niemniej mieszkańcy krajów rozwijających się są nadal dziesiątkowani przez choroby. Natomiast starzenie się populacji w krajach rozwiniętych doprowadziło do tego, że niektóre przypadłości wieku starczego stały się poważnym problemem społecznym. Ponadto pojawiły się epidemiologiczne zagrożenia drobnoustrojami przenoszonymi przez zwierzęta, takimi jak wirusy ptasiej grypy czy HIV. Skuteczne zapobieganie chorobom i ich leczenie często wymaga zrozumienia przyczyn i mechanizmów ich rozprzestrzeniania się – łącznie z mechanizmami na poziomie molekularnym. Skuteczne projektowanie nowych produktów farmaceutycznych często zależy od odszyfrowania struktury aktywnych biologicznie molekuł ze szczegółami na poziomie atomowym (rys.6). Dlatego też badacze pracujący dla firm farmaceutycznych należą do najczęściej spotykanych użytkowników źródeł promieniowania synchrotronowego wśród użytkowników z przemysłu.



Rys.6 Wirusy wywołujące takie choroby jak grypa czy AIDS mają rozmiary między 80 a 150 nanometrów (miliardowe części metra). Infekują komórki wykorzystując specjalizowane procesy biomechaniczne i/lub biochemiczne. Oczekuje się, że European XFEL pozwoli z nieosiągalnymi dotychczas szczegółami pokazać jak zachodzą takie infekcje, być może torując w ten sposób drogę do bardziej skutecznych i lepiej ukierunkowanych terapii chorób wywoływanych przez te wirusy.

European XFEL zrewolucjonizuje badania strukturalne z kilku przyczyn:

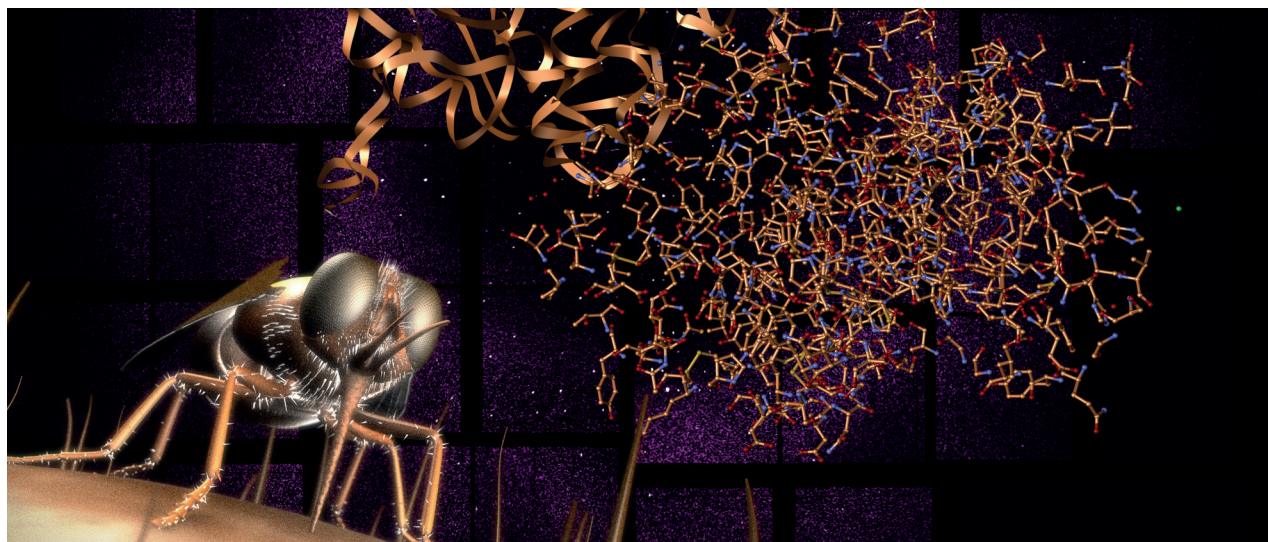
- Po pierwsze korzystając z dużej jasności, spójności i krótkiego czasu trwania impulsów badacze będą mogli badać struktury biologicznie czynnych molekuł na poziomie pojedynczych atomów lepiej i łatwiej niż dotychczas. Szczególnie ważny jest tu krótki czas trwania impulsu, ponieważ pozwala on przezwyciężyć główną przeszkodę uniemożliwiającą uzyskanie obrazów wysokiej rozdzielczości: radiacyjne uszkodzenie obrazowanych molekuł przez impulsy nadzwyczaj intensywnego promieniowania rentgenowskiego. Trafiona takim impulsem molekula po prostu eksploduje, ale trwa to kilkadziesiąt bądź nawet kilkaset femtosekund (rys.7). Ten bardzo krótki czas jest jednak wystarczająco długi w porównaniu do czasu trwania impulsów generowanych w European XFEL. Dlatego zanim molekula ulegnie zniszczeniu, obraz kodujący jej strukturę będzie mógł być zarejestrowany.
- Po drugie badacze mają nadzieję, że z w/w powodów obiekty biologiczne (komórki, organelle komórkowe, wirusy) będą mogły być obrazowane z niespotykaną dotąd rozdzielczością kilku nanometrów.
- Po trzecie ultra-krótkie, często powtarzane impulsy umożliwiają dynamiczne obrazowanie dziejących się procesów, czyli rejestrowanie filmów pokazujących co się dzieje z molekułą, a nie tylko statycznych migawek obrazujących jej stan w określonej fazie (momencie) procesu.



Rys.7 Impuls promieniowania rentgenowskiego z lasera FEL pada na wstrzykniętą biomolekułę. Kamera ustawiona za punktem interakcji rejestruje obraz dyfrakcyjny niosący informację o strukturze molekuly tuż przed jej zniszczeniem. Rejestrując wiele takich obrazów dyfrakcyjnych uzyskanych z kolejnych kopii biomolekuly można będzie zrozumieć budowę molekuly w trzech wymiarach.

Aby za pomocą promieni rentgenowskich móc określić ułożenie atomów, badane molekuly lub inny materiał muszą mieć postać krystaliczną, tzn. molekuly lub atomy muszą być rozmieszczone w przestrzeni periodycznie z tą samą orientacją. Krystalizacja molekuł biologicznych nie jest łatwym zadaniem. Zagadnienia związane z wytwarzaniem kryształów o dostatecznie dużych rozmiarach i dostatecznej jakości do badań synchrotronowych pochłonęło już wiele lat wysiłków. Dalsze kroki preparatyki są już o wiele prostsze.

Rentgenowskie lasery FEL wykazały już swą wyższość nad synchrotronami między innymi dlatego, że przy ich użyciu informacje strukturalne można uzyskać badając bardzo małe (mikrometr lub mniej) nanokryształy. W ostatnim czasie przeprowadzono badania nanokryształów w temperaturze pokojowej z użyciem lasera LCLS eksploatowanego w Stanford (USA). Określono wówczas z rozdzielczością 0,21 nm nieznaną wcześniej strukturę białka zwanego „kompleks cysteiny z proteazą katepsyny B” (rys.8). Białko to odgrywa bardzo istotną rolę w patogenezie śpiączki afrykańskiej, rozpowszechnionej w Afryce choroby która pochłania ok. 30 000 śmiertelnych ofiar rocznie. Badacze mają nadzieję, że nowo uzyskana wiedza doprowadzi ich do nowatorskiej terapii zwalczającej pasożyty wywołujące tę chorobę.



Rys.8 Struktura ważnego białka uczestniczącego w przenoszeniu śpiączki afrykańskiej. Rozpraszając promienie rentgenowskie wygenerowane w laserze LCLS naukowcy uzyskali obrazy dyfrakcyjne (na ilustracji w tle), z których następnie zrekonstruowali strukturę molekularną białka (na ilustracji na pierwszym planie, nie zachowana skala).

Impulsy generowane przez European XFEL mają znacznie poprawić zademonstrowane możliwości w zakresie badań struktury nanokryształów. Oczekuje się, że otworzą one drogę do spełnienia marzeń biologów zajmujących się badaniami molekuł: możliwość określenia struktury z badania pojedynczej, nieskryształizowanej molekule. Wysoka częstość powtarzania impulsów przekłada się na dwie korzyści w nanokrytalografii: po pierwsze skrócony czas zbierania danych, a po drugie (być może nawet ważniejsze) szacuje się, że do eksperymentów prowadzonych na wiązkach XFEL wystarczą próbki ok. 100 razy mniejsze niż te wymagane do eksperymentów prowadzonych na wiązkach LCLS. Dzięki temu można będzie wykonać znacznie więcej eksperymentów ponosząc znacznie mniejsze nakłady na przygotowanie i oczyszczanie próbek (a są to zazwyczaj procedury trudne i kosztowne). Społeczność naukowa oczekuje, że European XFEL stanie się bardzo wydajnym narzędziem do badań strukturalnych. Dzięki niemu będzie można ustalić strukturę wielkiej ilości molekuł które trudno kryształizują się w kryształy o wymiarach powyżej ok. 1 mikrometra, takich jak białka tworzące błony komórkowe. Pozwoli to znacznie lepiej zrozumieć działanie patogenów i zaawansować produkcję przeciwdziałających im środków farmakologicznych.

European XFEL oferuje biologom, medykom i farmaceutom jeszcze inne zastosowania filmowanie w przyszłości procesów molekularnych. Biomolekuły to wszak maszyny życia. Analogicznie do ruchomych części maszyn mechanicznych, w trakcie wykonywania swych funkcji życiowych biomolekuły modyfikują swą formę przestrzenną. Możliwość śledzenia tych zmian jak ruchu części maszyn oglądanych na filmie byłaby niezwykle pouczająca. Film obrazujący ruch wymaga wielu klatek. Im szybsze ruchy, tym mniej czasu na zrobienie każdej migawki i tym więcej zdjęć trzeba zrobić, aby uniknąć rozmytych obrazów. Tak więc ultra-krótki czas trwania impulsów z European XFEL to potencjalnie ostre, nierozmyte filmy bardzo szybko zachodzących procesów (rys.9).

Szczególnie dynamicznie zachodzą w białkach procesy fałdowania. Nie są one dobrze poznane, a grają ważną rolę w rozwoju wielu poważnych chorób. W takim naturalnie zachodzącym procesie białko – zasadniczo liniowy łańcuch molekuł aminokwasów – fałduje się w trójwymiarową strukturę, która wygląda jak gąszcz, lecz jest charakterystyczna dla danego białka. W rzadkich przypadkach białko fałduje się nieprawidłowo, co jest związane z wieloma chorobami takimi jak cukrzyca typu 2, choroba Creutzfeldta-Jakoba, choroba wściekłych krów, zespół Alzheimera, uwarunkowana amyloidami rodzinna choroba mięśnia sercowego lub polineuropatia, płasawica Huntingtona, czy choroba Parkinsona. Studia nad mechanizmem fałdowania mogłyby pozwolić na ustalenie przyczyn tych zaburzeń, a to z pewnością pomogłoby zrozumieć źródła tych poważnych



Rys.9 Filmowanie procesów zachodzących w molekułach. Najpierw błyskiem lasera optycznego wywołuje się reakcję chemiczną. Kolejne impulsy z lasera XFEL wysyłane w coraz dłuższym odstępie czasu po pierwszym impulsie optycznym robią "migawki" zmieniającego się stanu molekuly (kolejne klatki filmu).

chorób i sposoby ich zapobiegania. Z tego względu badaniom bardzo szybko zachodzących procesów fałdowania za pomocą laserów FEL przypisuje się niezwykle wysoki priorytet z myślą o zmapowaniu i zrozumieniu sposobów fałdowania białek.

Podsumowując, oczekuje się, że European XFEL pozwoli osiągnąć gigantyczny postęp w badaniach nad molekularnymi podstawami procesów biologicznych, pomagając zobrazować i zrozumieć te procesy. Badania takie obejmą procesy rozwoju chorób, działanie naturalnych systemów obronnych organizmów (przeciwciała), zachowanie się czynników biologicznych takich jak komórki, wirusy, czy błony komórkowe, a także studia nad substancjami farmaceutycznymi. Badania w tych obszarach umożliwione przez European XFEL istotnie wesprą od dawna prowadzoną walkę o zdrowie i długowieczność człowieka.

3 Wyzwanie energetyczne: naturalna i sztuczna fotosynteza

Nasze społeczeństwa stoją przed różnymi wyzwaniami usiłując zapewnić sobie dostatek energii niezbędnej do wytworzenia dóbr przemysłowych, zapewnienia sobie komfortu życia i zaspokojenia potrzeb transportowych codziennego życia. Zasoby paliw kopalnych muszą ulec kiedyś wyczerpaniu. Ponadto ich spalanie – zwłaszcza w obliczu podnoszenia się poziomu życia ludności i rosnącej konsumpcji w krajach rozwijających się – budzi bardzo poważne obawy związane z ochroną środowiska i możliwością zmian klimatycznych. Klasyczna energetyka jądrowa (oparta na rozszczepieniu ciężkich pierwiastków) jest przez niektóre społeczeństwa uważana za niebezpieczną, zaś energetyka termojądrowa (oparta na syntezie lekkich pierwiastków) jest ciągle na etapie badań.

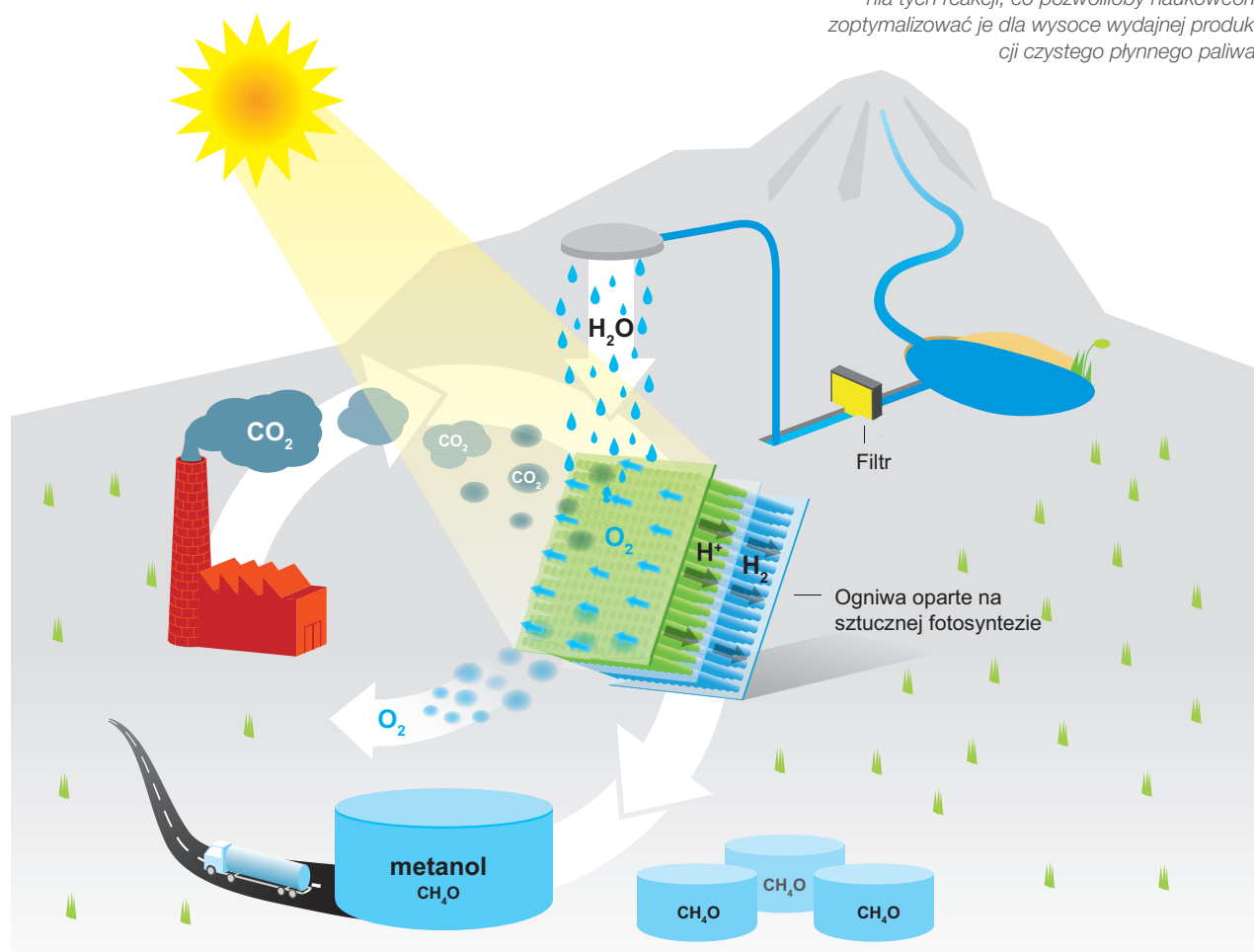
W każdej sekundzie ze Słońca dociera na Ziemię ogromna ilość energii promienistej. Czysta, ekonomicznie opłacalna i niezawodna technologia konwersji tej obfitej energii to marzenie przyszłości. Co prawda umiemy bezpośrednio konwertować energię słoneczną w prąd (tzw. urządzenia fotowoltaiczne) lub ciepło (tzw. panele solarne). Problemem jest magazynowanie tej energii, ponieważ cykl produkcyjny nie pokrywa się z cyklem zużycia. Energia ze Słońca jest produkowana przede wszystkim w słoneczne, letnie dni, a potrzebna jest najbardziej zimą, w dni zachmurzone i/lub deszczowe, nocami. Obecnie spotykane technologie magazynowania energii są niewydajne i kosztowne. Podobnie sprawa wygląda z energetyką wiatrową. Przez to perspektywy energetyki odnawialnej w znanej dotychczas postaci ogniw fotowoltaicznych, paneli solarnych i wiatraków są znacznie ograniczone.

W dążeniu do przezwyciężenia tych ograniczeń wielu naukowców próbuje optymalizować procesy, w których energia słoneczna byłaby używana do produkcji dających się łatwo magazynować i przewozić sztucznych paliw. Oczywistą inspiracją są tu naturalne procesy fotosyntezy zachodzące w roślinach. Rośliny zużywają energię słoneczną do hydrolizy wody w tlen i wodór, następnie do jonizacji atomów wodoru w wolne protony i elektrony. Rekombinacja tych ostatnich w atomy wodoru dostarcza energii dalszym reakcjom niezbędnym do życia i wzrostu roślin. Ktoś, komu udałoby się odtworzyć te procesy mógłby użyć wodoru uwolnionego z wody do związania dwutlenku węgla w metanol lub metan, a tych można by już używać jako paliw (rys.10).

W naturze hydroliza cząsteczek wody i jonizacja atomów wodoru w wolne protony i elektrony zachodzi w złożonych biomolekułach Fotoukład II, zawierających specyficzną grupę czterech atomów manganu i jeden atom wapnia. W laboratorium umiemy hydrolizować wodę z umiarkowaną wydajnością stosując jedynie katalizatory z ziem rzadkich i metali ciężkich takich jak platyna lub ruten, które są kosztowne i bardzo zanieczyszczają środowisko. Zrozumienie kroków chemicznej reakcji hydrolizy wody zachodzącej w roślinach przy udziale powszechnie występujących, tanich i bezpiecznych pierwiastków (jak mangan, wapń, lub podobne), a także odtworzenie tego procesu w laboratorium i zoptymalizowanie go dla poprawy wydajności byłoby osiągnięciem przełomowym.

Procesy fotosyntezy zachodzącej w roślinach i bakteriach polegają na sekwencyjnym pochłonięciu czterech fotonów światła słonecznego. Każde pochłonięcie indukuje określoną transformację struktury kompleksu manganowo-wapniowego i oznacza wykonanie jednego kroku na drodze reakcji prowadzącej do rozbicia dwóch molekuł wody. Pochłonięcie czwartego fotonu przywraca początkową strukturę kompleksu, który staje się tym samym gotowy do rozpoczęcia kolejnego cyklu.

Rys. 10 Sztuczna fotosynteza. W przyszłości można będzie produkować paliwa płynne z dwutlenku węgla, wody i wykorzystujące światło słoneczne imitujące procesy fotosyntezy zachodzące w każdej żywej komórce roślinnej. European XFEL mógłby „sfotografować” kolejne etapy reakcji zachodzącej w roślinach i szczegółowo zobrazować przemiany struktury biomolekuły biorącej udział w fotosyntezie (kompleksu Mn-Ca). To mogłoby doprowadzić do zrozumienia tych reakcji, co pozwoliłoby naukowcom zoptymalizować je dla wysoce wydajnej produkcji czystego płynnego paliwa.



Badania mające na celu poznanie przemian struktury kompleksu manganowo-wapniowe-go na poszczególnych etapach procesu były dotychczas utrudniane przez to, że badane kryształy musiały być ochładzane do bardzo niskich temperatur aby ograniczyć ich uszkodzenia radiacyjne. European XFEL będzie miał ogromną zaletę: umożliwi pracę w temperaturach pokojowych, w których procesy przebiegają w naturze. Przebieg reakcji można będzie kontrolować kolejnymi błyskami z lasera optycznego.

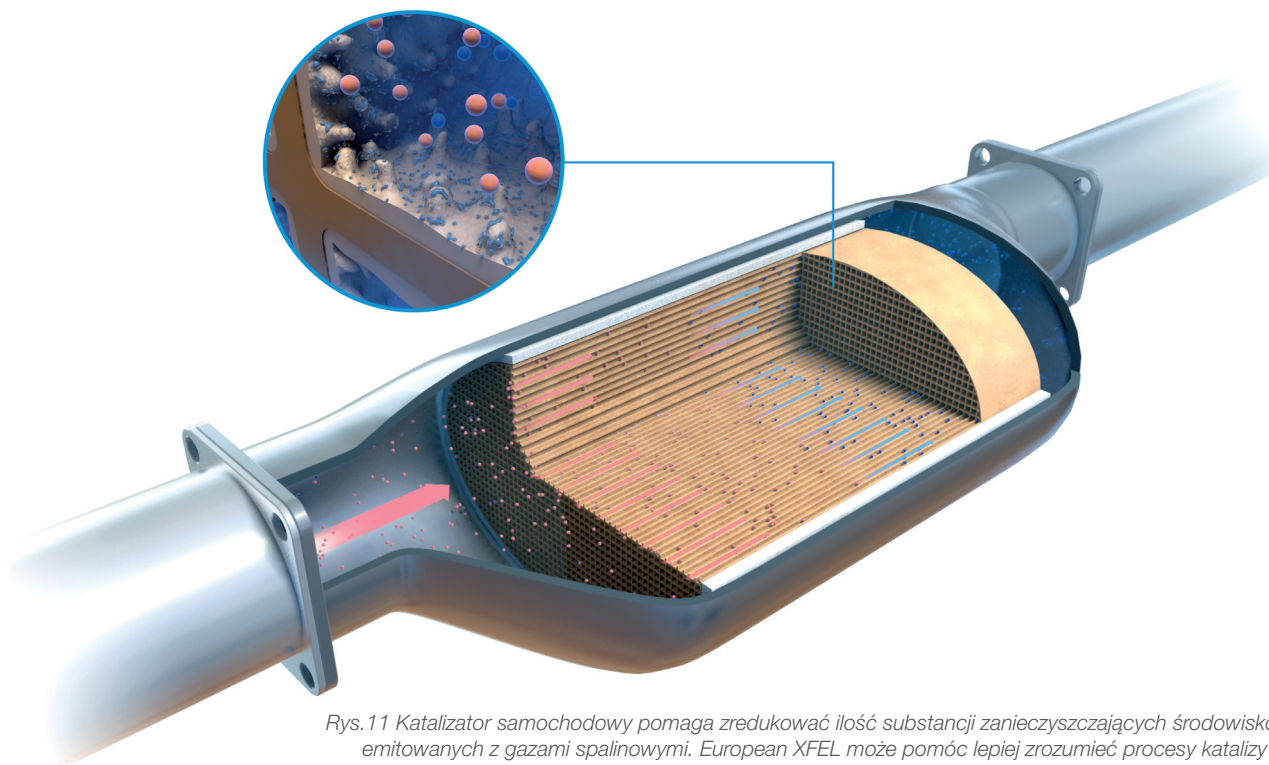
Możliwość śledzenia poszczególnych etapów tego chemicznego cyklu jak na zwolnionym filmie zapewniana przez unikatowe parametry European XFEL daje nadzieję na zrozumienie jak rośliny rozbijają cząsteczki wody. Miałoby to zasadniczy wpływ na te ekscytujące badania gdyż mogłyby doprowadzić do wdrożenia zoptymalizowanych procesów fotosyntezy w skali przemysłowej. Dzięki temu możliwe byłoby wytwarzanie wodoru i paliw płynnych ze składników tak tanich i powszechnie dostępnych jak światło słoneczne, woda, dwutlenek węgla i niewielkie ilości lekkich metali.

4 Materiały i procesy dla zaawansowanych technologii

4a Kataliza i reakcje katalizowane

Wyżej omówiona fotosynteza to przykład reakcji chemicznej, która nie może przebiegać bez złożonej biomolekuły zawierającej mangan i wapń. Mimo iż biomolekuła ta nie zmienia się w wyniku zajścia reakcji to nie można powiedzieć, że jest pasywnym „wizmem” przez czas jej zachodzenia. Modyfikując się uczestniczy w pośrednich fazach reakcji i bez niej reakcja nie przebiegałaby wcale lub przebiegałaby ze znacznie niższą wydajnością. Takie substancje nie wchodzące do produktów reakcji ale niezbędne do ich zajścia są przez chemików zwane katalizatorami, zaś reakcje wymagające jakiegoś katalizatora – reakcjami katalizowanymi.

Kataliza jest w inżynierii chemicznej stosowana już od co najmniej 100 lat i często ma fundamentalne znaczenie. W początkach XX w. Fritz Haber i Carl Bosch znaleźli katalizatory podwyższające wydajność zachodzenia reakcji, w których z azotu i wodoru produkowano amoniak, wyjściowy surowiec do produkcji wielu nawozów sztucznych. Obecnie rynek katalizatorów jest wyceniany na dziesiątki miliardów Euro rocznie. Głównymi odbiorcami są producenci samochodów dla których celem jest ograniczenie emisji substancji szkodliwych dla środowiska w strumieniu gazów spalinowych, (rys.11) i przemysł petrochemiczny (gdzie katalizatory pełnią fundamentalną rolę w wielu procesach przeróbki ropy naftowej). Istnieje też wiele innych zastosowań katalizatorów.



Rys.11 Katalizator samochodowy pomaga zredukować ilość substancji zanieczyszczających środowisko emitowanych z gazami spalinowymi. European XFEL może pomóc lepiej zrozumieć procesy katalizy i wyprodukować bardziej skuteczne katalizatory samochodowe, co pozwoliłoby zmniejszyć toksyczność spalin.

Mimo ich rozpowszechnienia, sposób działania katalizatorów często jest rozumiany bardzo słabo. W wielu przypadkach katalizatory dobierano metodą prób i błędów. Europejski laser XFEL da nowy impuls do systematycznych badań procesów katalizy oferując możliwość wykonania serii zdjęć obrazujących molekularny stan cząsteczek katalizujących na poszczególnych etapach przebiegającej reakcji. Szczegółowe zrozumienie wchodzących w grę mechanizmów molekularnych zwiększy szansę opracowania lepszych i bardziej przyjaznych dla środowiska katalizatorów, co miałoby niebagatelny wpływ na cały szereg ważnych procesów przemysłowych.

4b Nano-magnetyzm a technologie informatyczne

European XFEL może też pomóc opracować nowe i ulepszyć istniejące już materiały potrzebne zaawansowanym technologiom. Na przykład postęp w technikach informatycznych jest uwarunkowany technicznymi możliwościami coraz bardziej upakowanego zapisu informacji (na nośnikach o coraz mniejszych powierzchniach), a także szybkością operacji zapisu/odczytu.

Twarde dyski budowane są obecnie z wykorzystaniem warstw materiałów magnetycznych, w których każde drobne ziarenko warstwy przypowierzchniowej może mieć moment magnetyczny skierowany w górę bądź w dół. Ten kierunek może być interpretowany jako „0” lub „1”, zatem każde ziarenko może przechowywać jeden bit informacji. Informacje są zazwyczaj zapisywane odpowiednio skierowanym polem magnetycznym, natomiast odczyt polega na pomiarze rezystancji zależnej od orientacji momentu magnetycznego (tzw. „efekt gigantycznego magnetooporu”, za odkrycie którego Albert Fert i Peter Grünberg otrzymali nagrodę Nobla z fizyki za rok 2007).

Parę lat temu odkryto, iż krótkie impulsy lasera w których światło jest spolaryzowane kołowo (jak śruba lewoskrętna lub prawoskrętna) także mogą zmieniać orientację magnetycznych momentów naświetlonych ziaren materiału magnetycznego. Innymi słowy odkryto inny sposób zapisu informacji na nośnikach magnetycznych, który jest szybszy niż sposoby tradycyjne. European XFEL będzie wyposażony w specjalne urządzenie polaryzujące kołowo emitowane promieniowanie rentgenowskie. Umożliwi ono badaczom uzyskiwanie map namagnetyzowania badanych próbek i ich ewolucji w czasie. Oczekuje się, że takie badania doprowadzą do lepszego zrozumienia zjawisk towarzyszących ultraszybkiemu przestawianiu momentów magnetycznych przez impulsy laserów optycznych. Powinno to pomóc osiągnąć fizycznie uwarunkowane granice szybkości zapisu na nośnikach magnetycznych. Szybsze techniki zapisu danych to centralne zagadnienie warunkujące obecnie dalszy postęp technik informatycznych. Rozwiązanie tego problemu umożliwiłoby powstanie wielu nowych aplikacji i produktów opracowanych z myślą o zastosowaniach naukowych i technicznych.

5 Transfer do przemysłu nowych technologii opracowanych dla europejskiego lasera XFEL

Już w fazie budowy European XFEL stymuluje w krajach uczestniczących rozwój zaawansowanych technologii przemysłowych. Wyśrubowane parametry pracy lasera wymagają opracowania wielu podzespołów w laboratoriach dysponujących zaawansowanym know-how. Opracowane podzespoły muszą być następnie przemysłowo powielone z użyciem złożonych technik wytwórczych. Na przykład potrzeba było 800 (plus seria prototypowa i części zapasowe) wnekowych rezonatorów akceleratora wykonanych z niobu. Zamówienie podzielono między dwie firmy, które zainwestowały w niezbędną infrastrukturę i przeszły intensywne szkolenie pod okiem specjalistów z DESY i z włoskiej agencji INFN w trakcie produkcji serii prototypowych. Opracowana w DESY technologia TESLA staje się ogólnosiwiatowym standardem stosowanym przy budowie nie tylko nadprzewodzących liniowych akceleratorów elektronów dla laserów FEL, lecz także innych dużych instalacji badawczych, takich jak spalacyjne źródła neutronów czy zderzacze do prowadzenia eksperymentów z dziedziny fizyki wysokich energii (rys. 12). Ponieważ przewiduje się zastosowanie tej technologii na całym świecie w różnych projektach znajdujących się w fazie planowania lub na etapie przed rozpoczęciem budowy, to otwiera się nisza rynkowa z dużymi perspektywami. Wspomniane wyżej firmy zdobyły już w niej solidną przewagę konkurencyjną.



Rys. 12 Bazowane na rezonatorach z niobu technologie akceleratorowe opracowane na użytek European XFEL już wpłynęły na rozwój liniowych akceleratorów elektronów na całym świecie.

Innym obszarem, w którym European XFEL znacznie przyspieszył tempo rozwoju są detektory promieniowania. Aby w pełni wykorzystać możliwości stwarzane przez wysoką częstość powtarzania impulsów generowanych przez ten laser, detektor – którym w istocie jest cyfrowa kamera na promienie rentgenowskie – musi pracować dostatecznie szybko aby

móc dotrzymać kroku impulsom lasera. Oznacza to, że w bardzo krótkim czasie matryca kamery musi być w stanie zarejestrować wysokiej jakości obraz, a jej kontroler musi być w stanie przetransferować dane do pamięci operacyjnej i przygotować matrycę do następnego cyklu (wyzerować ją). W wersji prototypowej zaprojektowano pamięć operacyjną o pojemności wystarczającej na przechowanie kilkuset obrazów dyfrakcyjnych. Celem jest pojemność wystarczająca na zapisanie kilku tysięcy takich obrazów.

To wszystko wymaga naprawdę dużych umiejętności budowania złożonych układów scalonych i nic dziwnego, że w opracowywaniu prototypów zostało zaangażowanych kilka laboratoriów europejskich. Zaprojektowane w nich zaawansowane specjalizowane układy scalone zostały następnie powielone w kilku firmach przemysłowych. Dzięki niektórym ze swych parametrów opracowane detektory obrazujące o bardzo dużej szybkości odczytu danych z pewnością zainteresują (poza budowniczymi przyszłych laserów XFEL o dużej częstotliwości powtarzania impulsów) także badacze pracujących z synchrotronami. Być może detektory te znajdą także nowe zastosowania komercyjne umożliwiające przez niebywałą szybkość zapisu danych do/odczytu danych z pamięci.

Cała informacja zebrana w trakcie eksperymentu (a są to setki tysięcy jeśli nie miliony obrazów) musi zostać zapisana w pamięci. Ponadto każdemu z nich muszą towarzyszyć tzw. metadane umożliwiające jego identyfikację (z którego eksperymentu, z której próbki, przy jakich ustawieniach aparatury zebrany itd.). W ten sposób prace nad European XFEL wpisują się w ogólny trend prac badawczych i rozwojowych, które obecnie coraz częściej napotykają problem znany jako „potop danych” (dość jaskrawo problem ten wystąpił w prowadzonych w ośrodku CERN eksperymentach, które niedawno doprowadziły do potwierdzenia istnienia bozonu Higgsa). Zresztą w obecnym cyfrowym świecie problem ten coraz bardziej dotyczy nie tylko przedsięwzięć stricte naukowych, lecz także wielu aspektów biznesu i usług publicznych. Richard Feynman oszacował w 1959 r. całą informację zawartą w 24 milionach książek przechowywanych w owym czasie we wszystkich znaczących bibliotekach na świecie na 0,1 petabajtów (tj. 10¹⁴ bajtów). Mówiąc językiem bliższym naszych czasów jest to ilość informacji wymagająca do zapisu ok. 10 000 dysków DVD wysokiej jakości. Warto sobie uświadomić, że European XFEL wyprodukuje podobną ilość informacji w ciągu kilku miesięcy eksploatacji – a tempo produkcji nowych informacji będzie z czasem tylko rostało! Oczekuje się, że niektóre z rozwiązań opracowywanych dla skutecznego radzenia sobie z potopem danych produkowanych przez European XFEL i inne duże instalacje badawcze (jak akceleratory eksploatowane w CERN) okażą się społecznie użyteczne także w innych dziedzinach działalności (lepsze prognozowanie pogody, dokładniejsze symulacje ewolucji klimatu, rozwój globalnych sieci telekomunikacyjnych...), w których ilość danych nieuchronnie wzrasta – nawet jeśli w wolniejszym tempie.

6 Uwagi końcowe

European XFEL to duża instalacja badawcza budowana w okolicach Hamburga przez 12 krajów europejskich. Urządzenie o długości ok. 3,4 km w większości będzie ulokowane w podziemnych tunelach i w kilku naziemnych halach eksperymentalnych. Laser ten będzie zasadniczym czynnikiem sprzyjającym konsolidacji pozycji Europy na froncie badań podstawowych. Stwarza perspektywę dokonania wielu ekscytujących odkryć potencjalnie ważnych dla społeczeństw. Kilka obszarów potencjalnych odkryć omówiliśmy powyżej.

Budowa urządzenia nastęca wielu wyzwań naukowych i technologicznych, którym musi stawić czoło społeczność akademicka i przemysłowa – w imię obopólnych korzyści.

Zespół zarządzający eksploatacją European XFEL będzie wybierał najlepsze i najbardziej innowacyjne eksperymenty spośród propozycji zgłoszonych przez badaczy z różnych dyscyplin naukowych, zapewniając ich autorom dostęp do unikatowego narzędzia badawczego. Takie możliwości zostaną otwarte także przed młodymi naukowcami znajdującymi się dopiero u progu kariery, a także przed pracownikami instytutów/universytetów o ograniczonych funduszach. Pod warunkiem, że ich pomysły będą dobre i obiecujące dla rzeczywistego postępu w reprezentowanej przez nich dziedzinie naukowej. W początkowej konfiguracji laser będzie miał 6 stanowisk badawczych, możliwości rozbudowy sięgają docelowo 15 stanowisk. Na stanowiskach badawczych przy European XFEL będzie mogła pracować większa liczba badaczy niż przy jakimkolwiek innym laserze XFEL na świecie. Otoczony przez wianuszek prestiżowych placówek naukowych (DESY, CFEL, Uniwersytet Hamburgski, Instytuty Maxa Plancka, EMBL, CSSB i in.) European XFEL powinien wyzwolić efekty synergii i stworzyć atmosferę owocnej współpracy a także unikatowo stymulujące środowisko.

Po zakończeniu budowy – co powinno nastąpić w ciągu kilku najbliższych lat – Europa powinna się znaleźć na szczycie ligi użytkowników intensywnych źródeł promieniowania rentgenowskiego. Oczekuje się, że European XFEL okaże się kolejnym sukcesem wieńczącym owocną współpracę Europejczyków w dziedzinie badań i rozwoju zaawansowanych technologii.

7 Impressum

Redaktor:

European XFEL GmbH
Albert-Einstein-Ring 19
22761 Hamburg
Prof. Massimo Altarelli

Tekst:

Prof. Massimo Altarelli

Redakcja:

Dr. Bernd Ebeling

Redakcyjna współpraca:

Ilka Flegel

Fotoredaktor:

Dr. Frank Poppe

Układ graficzny i ilustracja:

Rothe Grafik, Georgsmarienhütte

Zdjęcia i ilustracje:

S. 6: Sebastian Kaulitzki/fotolia,
S. 8: Greg Stewart/SLAC National Accelerator Laboratory,
S. 10, 14 i 16: DESY,
wszyscy inni: European XFEL

Luty 2016