

# NOWE ŚWIATŁO DLA NAUKI: EUROPEJSKI RENTGENOWSKI LASER NA SWOBODNYCH ELEKTRONACH

**R. Sobierajski i K. Lawniczak-Jablonska**

*Instytut Fizyki Polskiej Akademii Nauk, Al. Lotników 32/46, 02-668 Warszawa, Polska*

**Streszczenie:** W styczniu 2007 roku rozpoczyna się realizacja projektu rentgenowskiego lasera na swobodnych elektronach w Europie – XFEL. Unikalna kombinacja długości fali, czasu trwania impulsu oraz szczytowej jasności pozwoli na badanie procesów zachodzących jednocześnie w dwu skalach atomowych – czasu i przestrzeni. Stworzy to nowe możliwości badawcze w fizyce, chemii, biologii i naukach technicznych. W artykule omówione zostaną zasada działania, budowa i podstawowe parametry powstającego urządzenia. Następnie przedstawiony zostanie krótki opis organizacji projektu.

**New light for science: European X-ray Free Electron Laser.**

**Abstract:** The execution of the X-Ray Free Electron Laser (XFEL) project begins January 2007. The unique combination of the radiation wavelength, pulse duration and peak brightness provided by XFEL will enable to study processes which occur in both atomic scales – time and space. It will create new scientific opportunities in physics, chemistry, biology and material sciences. In the paper the principles of the XFEL radiation generation, technical design and main radiation parameters are described. They are followed by short description of the project organization.

## 1. Wstęp

Na początku XXI wieku obserwujemy rewolucyjny rozwój źródeł spójnego promieniowania krótkofalowego, otwierający dla badaczy fundamentalnie nowe obszary nauki. Podstawową miarą tego rozwoju są trzy parametry emitowanego światła – długość fali, czas trwania impulsu i jasność<sup>1</sup>. To właśnie unikalna kombinacja tych parametrów w najnowocześniejszych źródłach pozwala na badanie zjawisk fizycznych z doskonałą (w zakresie opisywanym przez jednostki atomowe) rozdzielczością, zarówno czasową, jak i przestrzenną.

Powstały już i są budowane nowe lasery na swobodnych elektronach (nazywane źródłami synchrotronowymi IV generacji) pracujące w zakresach nadfioletu próżniowego (np. Free elektron LASer in Hamburg FLASH) i promieniowania rentgenowskiego (np. Linac Coherent Light Source LCLS) - niedostępnych dla klasycznych laserów. Szczytowa jasność tych źródeł przewyższa o ponad 8 rzędów wielkości jasność źródeł promieniowania synchrotronowego. Ich promieniowanie ma wysoki stopień spójności przestrzennej a czas trwania impulsu zmniejszono ponad 10 000 razy z ~100 ps do ~10 fs w porównaniu z najnowocześniejszymi źródłami synchrotronowymi III generacji.

W 2007 roku planowane jest rozpoczęcie budowy nowego rentgenowskiego lasera na swobodnych elektronach w Europie – XFEL. Powstanie przy nim międzynarodowy ośrodek naukowo-badawczy, którego zadaniem będzie, m.in.

ułatwienie dostępu do lasera międzynarodowej społeczności naukowej. Polska rozważa możliwość przystąpienia do tego ośrodka. Poniżej omówiona zostanie zasada działania oraz budowa i podstawowe parametry urządzenia. Następnie przedstawione zostanie w skrócie jak projekt jest zorganizowany.

## 2. XFEL – źródło synchrotronowe IV-tej generacji

Wielu naukowców używa w swoich badaniach promieniowania synchrotronowego dostępnego w bardzo szerokim zakresie widmowym, od podczerwieni, poprzez zakres widzialny, nadfiolet aż do twardych promieni rentgenowskich o długości fali sięgającej 0.05 nm. Promieniowanie synchrotronowe jest to silnie skupione promieniowanie elektromagnetyczne emitowane przez naładowane cząstki (np. elektrony bądź pozytrony) przyspieszone do relatywistycznych prędkości w kołowych akceleratorach - tzw. synchrotronach. Pomimo dużych kosztów konstrukcji i eksploatacji, na świecie pracuje kilkadziesiąt synchrotronów, a kolejne są w budowie.

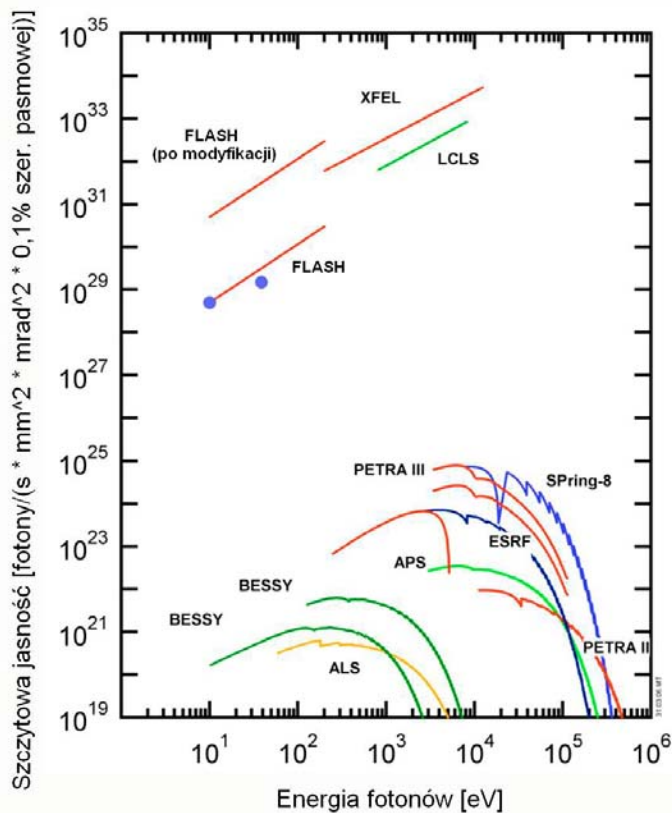
Jasność budowanych synchrotronów wzrastała w ogromnym tempie w trakcie ostatnich dziesięcioleci. Po raz pierwszy użyto promieniowania synchrotronowego do badań naukowych w dziedzinie ciała stałego, fizyki atomowej i cząsteczkowej, w połowie zeszłego wieku. Wykorzystano do tego celu synchrotrony przeznaczone do badań nuklearnych, a więc nie zoptymalizowane pod kątem emisji światła, – tzw. źródła I generacji. Wyniki doświadczeń były tak interesujące, że zdecydowano o budowie źródeł II generacji – przeznaczonych wyłącznie do emisji światła. Przykładami takich źródeł mogą być BESSY I, w Berlinie, NSLS w Brookhaven, USA, ACO, DCI, SuperAco w Orsay, Francja, czy

<sup>1</sup> Dwa pierwsze są powszechnie znane. Trzeci parametr opisuje własność promieniowania kluczową dla wielu technik eksperymentalnych, związana z intensywnością strumienia fotonów, jego rozmiarami przestrzennymi i skupieniem kątowym.

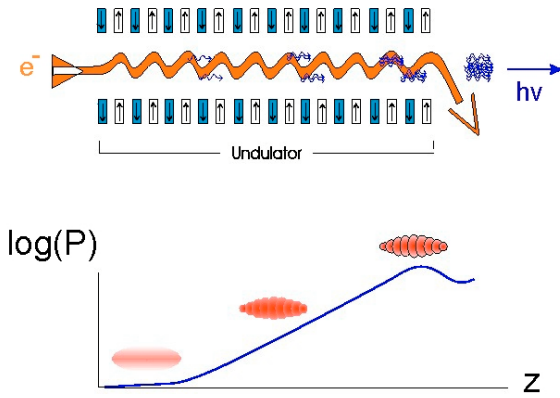
wreszcie Photon Factory w Tsukubie, w Japonii. W latach 90-tych rozpoczęły działanie źródła III generacji. Ich jasność powiększono o kilkanaście rzędów wielkości dzięki m.in. ulepszeniu akceleratorów i użyciu specjalnych struktur magnetycznych - tzw. undulatorów. Przykładami takich źródeł są ESRF w Grenoble, Francja, ALS w Berkeley, (USA), Elektra w Trieste, (Włochy), BESSY II w Berlinie, APS w Argonne, (USA), SPring8 w Japonii i SLS w Villigen (Szwajcaria) czy PETRA III w Hamburgu, którego przebudowa ma być zakończona w 2008. Źródła synchrotronowe III generacji osiągnęły jasność bliską maksymalnej możliwej z punktu widzenia praw fizyki opisujących emisję promieniowania synchrotronowego. Dalsze ulepszenia techniczne i technologiczne nie mogą znacząco poprawić jakości emitowanego promieniowania.

Jednak już w latach 80-tych powstała koncepcja nowego typu źródła, nazwanego źródłem synchrotronowym IV generacji. Wykorzystuje ono akcelerator liniowy, w którym elektrony przelatują tylko raz przez undulator, a nie wielokrotnie jak w przypadku synchrotronów. Jest to tzw. laser na swobodnych elektronach – FEL (Free Electron Laser). Wśród różnych konstrukcji tego typu należy wyróżnić tzw. SASE FEL (Self Amplified Spontaneous Emission FEL). Konstrukcja ta daje możliwość emisji promieniowania w zakresie rentgenowskim, szczególnie ważnym w badaniach. Po raz pierwszy udało się uruchomić laser typu SASE FEL w 1997 roku – LCLS, w Stanford, USA. To i kilka innych, powstałych krótko po nim źródeł emitowały światło pod-

czzerwone, widzialne bądź nadfioletowe. Jednak już w 2001 roku udało się uzyskać emisję promieniowania o długości mniejszej niż 100 nm (tzw. nadfiolet próżniowy - VUV). Dokonano tego przy użyciu lasera FLASH w laboratorium DESY, w Hamburgu. Jeszcze w 2001 roku wykorzystano ten laser do pierwszych eksperymentów z dziedziny fizyki ciała stałego i fizyki molekularnej. Na podkreślenie zasługuje fakt, że pierwszy eksperyment z fizyki ciała stałego został przeprowadzony przez grupę polskich naukowców z Instytutu Fizyki PAN kierowaną przez dra J. Krzywińskiego<sup>1-5</sup>. Stacja doświadczalna do tych eksperymentów została zbudowana w ramach grantu Fundacji Polsko-Niemieckiej. W okresie kilku ostatnich lat laser FLASH bił kolejne rekordy długości fali promieniowania, osiągając w 2006 roku  $\lambda=13.5$  nm. Kolejnym krokiem będzie uruchomienie w 2009 roku lasera rentgenowskiego LCLS w Stanford, USA. Urządzenie to będzie emitowało femtosekundowe impulsy promieniowania rentgenowskiego o niespotykanej do tej pory mocy szczytowej rzędu kilku gigawatów i gęstości mocy sięgającej  $10^{18}$  GW/cm<sup>2</sup>. Wreszcie w 2013 roku planowane jest uruchomienie lasera XFEL w Hamburgu. Będzie on się różnił od LCLS zastosowaniem technologii nadprzewodzących modułów przyspieszających. Pozwoli to nie tylko na wzrost szczytowej jasności (jak w przypadku LCLS), ale i jej wartości średniej. W porównaniu ze źródłami III generacji parametry te wzrosną o, odpowiednio, 10 i 5 rzędów wielkości (Rys. 1).



**Rys. 1.** Szczytowa jasność istniejących i planowanych źródeł synchrotronowych (wymienionych w tekście). Kropkami zaznaczono pomiary szczytowej jasności lasera FLASH, dostępnego obecnie dla użytkowników.



**Rys. 2.** Schemat działania SASE FEL. Paczka elektronowa –  $e^-$  przechodzi przez undulator promieniując fotony –  $h\nu$ . Na dolnym rysunku pokazano podłużną modulację paczki elektronowej oraz wynikający z niej wykładniczy wzrost mocy lasera  $P$  w zależności od przebytej w undulatorze drogi –  $z$ .

### 3. Zasada działania XFEL

Laser na swobodnych elektronach XFEL wykorzystuje tzw. proces SASE czyli "samo-wzmacniającej się emisji spontanicznej". Jest on przedstawiony schematycznie na Rys. 2. Relatywistyczna, monoenergetyczna paczka elektronowa o bardzo wysokiej gęstości ładunku i energii elektronów rzędu kilkunastu GeV porusza się wewnątrz undulatora. Urządzenie to wytwarza okresowe pole magnetyczne, które zakrzywia tor elektronów. Elektrony emitują światło o długości fali zależnej od ich energii i parametrów undulatora. Jest to tzw. emisja spontaniczna. W wyniku połączonego oddziaływania z polem magnetycznym undulatora i promieniowaniem emisji spontanicznej, gęstość paczki elektronowej ulega modulacji (Rys. 2). Dzieli się ona na "dyski" odległe od siebie o odległość  $\lambda$  - zależną od energii elektronów i parametrów undulatora. W efekcie procesu modulacji elektrony zaczynają emitować spójne promieniowanie, właśnie o długości fali  $\lambda$ . Moc promieniowania jest proporcjonalna do kwadratu liczby koherentnie emitujących cząstek. Wraz ze wzrostem spójności promieniowania, proces modulowania paczki elektronowej ulega przyspieszeniu. W efekcie prowadzi to do wykładniczego wzrostu mocy spójnego promieniowania:

$$P(z) = P_0 \cdot \exp\left(\frac{z}{L_{wzm}}\right)$$

gdzie  $z$  jest odległością pokonaną w undulatorze, długość  $L_{wzm}$  zależy od parametrów undulatora i wiązki elektronowej a jej typowa wartość dla promieniowania rentgenowskiego to kilkaset metrów. W pewnej odległości ( $z_{nas} \approx 4\pi L_{wzm}$ ) moc promieniowania osiąga nasycenie. Zaletą powyższego schematu działania jest to, że nie wymaga on stosowania rezonatora optycznego. Jest to szczególnie ważne w zakresie rentgenowskim, gdzie nie istnieją rezonatory optyczne a pomimo tego konstrukcja SASE FEL pozwala na emisję promieniowania laserowego.

Warto przytoczyć kilka innych parametrów promieniowania lasera XFEL. Jest ono spójne przestrzennie i częściowo spójne czasowo. W skład każdego impulsu promienio-

wania wchodzi niezależne, koherentne mody podłużne. Każdy z nich ma przypadkową fazę względem innych. Liczba modów podłużnych jest związana z fluktuacjami natężenia promieniowania dla różnych impulsów. W zakresie wykładniczego wzrostu mocy promieniowania średnia liczba modów w impulsie jest odwrotnie proporcjonalna do wariancji natężenia promieniowania. Jednak, jeśli laser pracuje w zakresie bliskim nasycenia, to fluktuacje słabną i nie przekraczają kilku procent.

W projekcie lasera XFEL można wyróżnić następujące części:

- iniektor,
- akcelerator liniowy,
- system rozdzielania wiązki elektronowej,
- undulatory,
- linie optyczne,
- stacje eksperymentalne.

Elementy te są ułożone liniowo, na odcinku o długości 3.4 km. Początek znajduje się na terenie ośrodka DESY, w północno-zachodniej części Hamburga, a koniec - w sąsiednim regionie Szlezwig-Holsztyn, na południe od miasteczka Schenefeld, gdzie znajdują się będą hala eksperymentalna i kampus naukowy (Rys. 3). Podstawowe funkcje wyszczególnionych elementów XFEL opisano poniżej.

Głównym zadaniem iniektora, niezwykle ważnym ze względu na zasadę działania XFEL, jest wytworzenie paczek (wiązek) elektronowych o odpowiedniej jakości. Są one emitowane z fotokatody, pod wpływem impulsów lasera optycznego. Następnie skupiane zostają w małym obszarze przestrzennym i przyspieszane przez działło elektronowe do energii 120 MeV. Aby proces SASE był możliwy, parametry opisujące paczki elektronowe na końcu iniektora, jak np. emitancja, szerokość pasma energetycznego itp., muszą osiągać wartości niespotykane w innych tego typu urządzeniach na świecie.



**Rys. 3.** Schemat budowy XFEL nałożony na mapę Hamburga.

#### **4. Założenia techniczne**

Kolejny element - akcelerator liniowy (linac) - służy przyspieszeniu elektronów do energii sięgającej 20 GeV (najwyższej energii przewidywanej obecnie wśród różnych projektów FEL). Największą jego częścią jest 116 modułów przyspieszających, każdy o długości 12 m. Wykorzystują one zaawansowaną nadprzewodzącą technologię RF ("radio frequency") powstałą we współpracy międzynarodowej w ramach tzw. TESLA Collaboration. Zaletami tej technologii są: przyspieszanie dużej ilości paczek elektronowych w trakcie trwania jednego impulsu RF, słabe wzbudzenie tzw. nadążającego pola elektrycznego przez wiązkę elektronową, możliwość zastosowania sprzężenia zwrotnego w trakcie trwania impulsu RF dla zapewnienia stabilnej wiązki elektronowej o wysokiej jakości, możliwość zmian struktury czasowej grupy paczek elektronowych, włączając w to pracę o wysokiej częstotliwości, aż do pracy ciągłej. Innym istotnym elementem są dwa kompresory wiązki elektronowej – zespół magnesów, którego zadaniem jest zmniejszenie długości paczki elektronowej do 55  $\mu\text{m}$ , co odpowiada czasowi krótszemu niż 200 fs. Pomiedzy modułami przyspieszającymi znajdują się magnesy sterujące i ogniskujące, oraz instrumenty diagnostyczne zapewniające prawidłowe prowadzenie paczki elektronowej i jej kolimację. Wszystkie te urządzenia są rozmieszczone w tunelu o długości 1.6 km i średnicy 5.2 m, biegnącym poziomo pod powierzchnią ziemi.

Paczki elektronowe wytwarzane w iniektorze i przyspieszane przez linac są ułożone w strukturę czasową powtarzaną z częstością 10 Hz (Rys. 4). W ramach tej struktury, minimalna odległość czasowa pomiędzy paczkami jest równa 200 ns, zaś ich maksymalna liczba sięga ponad 3000. Użytkownicy mają możliwość dobierania do potrzeb eksperymentów zarówno liczby paczek elektronowych (od pojedynczych do ~3000), jak i odległości czasowych pomiędzy nimi. Jest to realizowane za pomocą systemu magnesów, w których natężenie i polaryzację pola można zmieniać bardzo szybko – w czasie krótszym niż odstęp pomiędzy paczkami elektronowymi. Urządzenia te pozwalają zarazem na skierowanie każdej paczki do odpowiedniej linii elektronowej i związanego z nią undulatora. Umożliwia to równoczesną pracę wielu stacji eksperymentalnych.

Paczki skierowane do linii elektronowej numer 1 przechodzą następnie przez undulatory SASE1 i SASE3. W wyniku procesu SASE FEL opisanego powyżej, generowane są impulsy promieniowania rentgenowskiego, odpowiednio, "twardego" o długości fali 0.1 nm i "miękkiego" o długości fali w zakresie 0.4 – 1.6 nm. Paczki skierowane do linii elektronowej numer 2 przechodzą przez undulator SASE2, a następnie przez undulatory U1 i U2. W SASE2 wytwarzane są w wyniku procesu SASE FEL impulsy "twardego" promieniowania rentgenowskiego o długości fali w zakresie 0.1-0.4 nm. Natomiast w undulatorach U1, U2 w wyniku emisji spontanicznej powstaje jeszcze twardsze promieniowanie o długości fali sięgającej, odpowiednio, 0.025 i 0.009 nm. Podstawowe właściwości promieniowania rentgenowskiego emitowanego przez różne undulatory XFEL zapre-

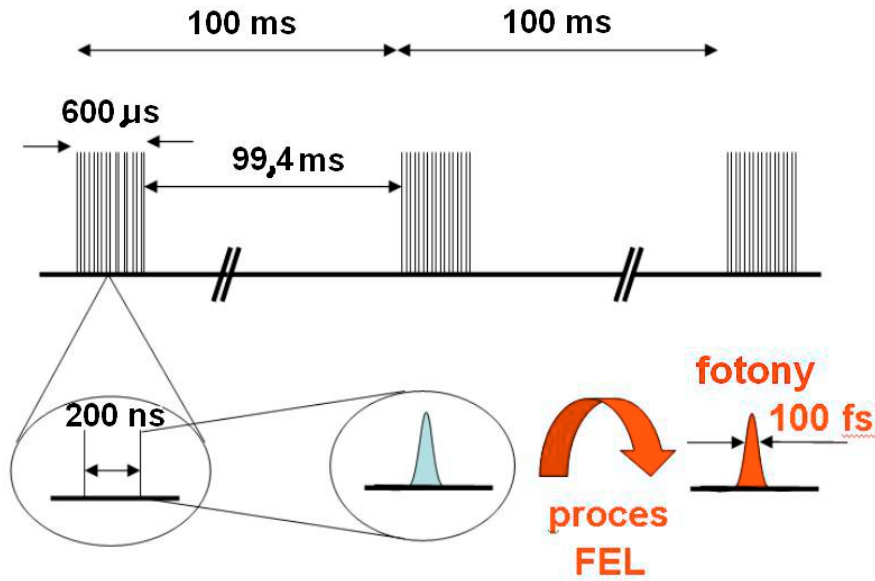
zentowano w tabelach 1 i 2, zaś schemat linii elektronowych i optycznych na Rys. 5.

Undulatory w XFEL różnią się od tych używanych w źródłach synchrotronowych II i III generacji długością (ponad 100 m w przypadku SASE3 i ponad 200 m w przypadku SASE1 i SASE2), bardzo zawężoną tolerancją justacji mechanicznej i jednorodności pola magnetycznego. Dlatego konieczne było podzielenie ich na pięciometrowe moduły oddzielone od siebie o 1.1 m. W obszarach pomiędzy modułami znajdują się urządzenia do korekcji orbity elektronowej i instrumenty diagnostyczne.

Elektrony po przejściu przez undulatory trafiają do jednego z dwóch absorberów wiązki. Fotony powstałe w pięciu undulatorach są transportowane przez 5 linii optycznych do hali eksperymentalnej. W skład tych linii mogą wchodzić różnorodne elementy optyczne np. lustra i monochromatory. Użyte mogą być także różne urządzenia mające na celu modyfikację własności wiązki. Można zmienić jej kształt, skolimować, odfiltrować do pewnego stopnia tło pochodzące z emisji spontanicznej undulatorów w przypadku SASE. Wreszcie możliwa jest szeroko rozumiana diagnostyka fotonów np. monitorowanie pozycji wiązki, jej średnica. Ta ostatnia funkcja jest szczególnie ważna nie tylko dla użytkowników, którzy muszą znać właściwości impulsu fotonowego, ale także dla operatorów akceleratora, np. w celu właściwej justacji segmentów undulatora.

Ostatecznie impulsy promieniowania trafiają do stacji eksperymentalnych. Linie optyczne nie są zaplanowane do wykonania konkretnych doświadczeń. Można do nich podłączyć różne stacje eksperymentalne, dostosowując je do potrzeb naukowców. Przykładowo, dostosowania wymagające wysokiej spójności promieniowania nakładają konieczność usunięcia zbędnych elementów optycznych, które obniżają właśnie wartość tego parametru. Z drugiej strony, niektóre eksperymenty korzystają z wiązki fotonów skupionej do mikrometrowych rozmiarów za pomocą specjalnej optyki rentgenowskiej. Wszystkie stacje muszą się jednak zmieścić w hali eksperymentalnej o rozmiarach 50 x 90 m i wysokości 14 m. Hala ta znajduje się na najniższej kondygnacji budynku mieszczącego także biura, laboratoria służące do przygotowania doświadczeń, oraz salę wykładową (Rys. 6).

XFEL przyciąga uwagę uczonych z całego świata. Dla wielu z nich jest to nie tylko źródło światła, ale także potencjalne miejsce spotkań naukowych, konferencji, dyskusji w grupach badawczych, pracy w laboratoriach. Instytucje partnerskie mogą otworzyć stałe stacje naukowe blisko XFEL, podobnie jak to ma miejsce w innych ośrodkach promieniowania synchrotronowego (np. HASYLAB, ESRF). Poza funkcjami naukowymi, takie stacje naukowe pełnić mogą funkcje edukacyjne np. stać się celem wycieczek grup szkolnych, uniwersyteckich. Dlatego można oczekiwać, że cały teren otaczający XFEL, szczególnie halę eksperymentalną, podlegać będzie rozwojowi, zostanie zabudowany takimi obiektami jak audytorium, laboratoria instytucji partnerskich, itp.



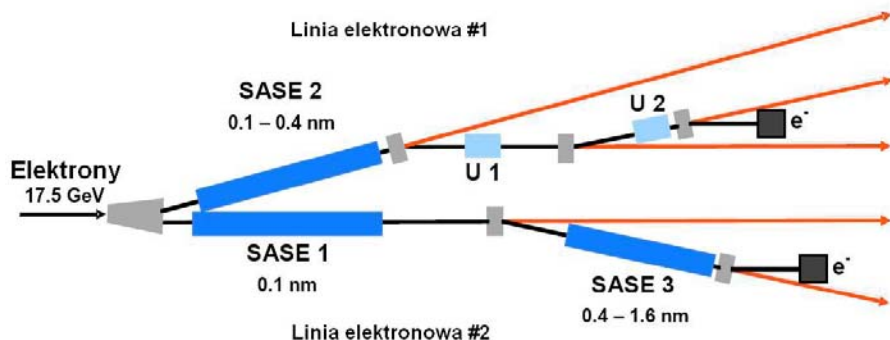
**Rys. 4.** Struktura czasowa wiązki elektronowej lasera XFEL. W wyniku procesu SASE FEL powstaje wiązka fotonowa o identycznej strukturze czasowej.

**Tabela 1:** Przykładowe parametry promieniowania undulatorów SASE1-SASE3 lasera XFEL – wyniki symulacji. Jednostką jasności jest  $B = 1 / (\text{s mrad}^2 \text{ mm}^2 0.1\% \text{ szer. pasmowej})$ .

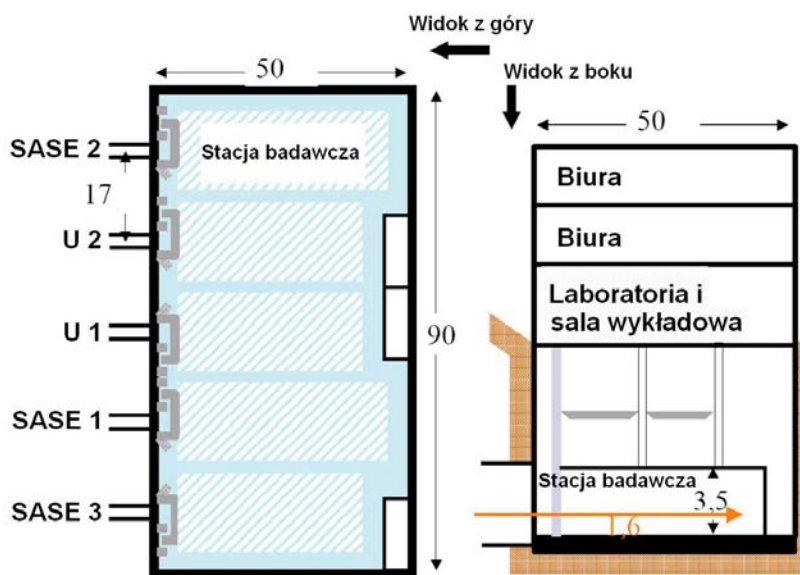
Parametr	SASE1	SASE2	SASE3	
Energia elektronów [GeV]	17.5	17.5	17.5	10.0
Długość fali [nm]	0.1	0.4	1.6	4.9
Energia fotonów [keV]	12.4	3.1	0.8	0.25
Moc szczytowa [GW]	20	80	130	150
Moc średnia [W]	65	620	420	490
Rozmiar wiązki świetlnej (szer. poł.) [ $\mu\text{m}$ ]	70	55	70	90
Rozbieżność wiązki świetlnej (szer. poł.) [ $\mu\text{rad}$ ]	1	3.4	11.4	18
Czas koherencji [fs]	0.2	0.38	0.88	1.4
Szerokość widmowa [%]	0.08	0.18	0.3	0.65
Długość impulsu [fs]	100	100	100	100
Liczba fotonów w impulsie	$10^{12}$	$1.6 \times 10^{13}$	$1.0 \times 10^{14}$	$3.7 \times 10^{14}$
Średni strumień fotonów [1/s]	$3.0 \times 10^{16}$	$4.8 \times 10^{17}$	$3.1 \times 10^{18}$	$1.1 \times 10^{19}$
Szczytowa jasność [B]	$5.0 \times 10^{33}$	$2.2 \times 10^{33}$	$5.0 \times 10^{32}$	$1.0 \times 10^{32}$
Średnia jasność [B]	$1.6 \times 10^{25}$	$6.5 \times 10^{24}$	$1.4 \times 10^{24}$	$2.8 \times 10^{23}$

**Tabela 2:** Przykładowe parametry promieniowania undulatorów U1 i U2 lasera XFEL – wyniki symulacji. Jednostką jasności jest  $B = 1 / (\text{s mrad}^2 \text{ mm}^2 0.1\% \text{ szer. pasmowej})$ .

Parametr	U1		U2	
Energia fotonów [keV]	20.2	30.6	60.1	90.1
Rozmiar wiązki świetlnej (szer. poł.) [ $\mu\text{m}$ ]	24.5	24.5	24.5	24.5
Rozbieżność wiązki świetlnej (szer. poł.) [ $\mu\text{rad}$ ]	3.0	2.6	2.2	2.0
Długość impulsu [fs]	200	200	200	200
Szerokość widmowa [%]	0.77	0.98	1.66	2.33
Kąt koherencji [ $\mu\text{rad}$ ]	0.25	0.16	0.08	0.05
Liczba fotonów w impulsie	$1.1 \times 10^9$	$1.7 \times 10^9$	$2.5 \times 10^9$	$1.9 \times 10^9$
Średni strumień fotonów [1/s]	$3.4 \times 10^{13}$	$4.8 \times 10^{13}$	$7.5 \times 10^{13}$	$5.6 \times 10^{13}$
Szczytowa jasność [B]	$3.1 \times 10^{27}$	$3.9 \times 10^{27}$	$4.3 \times 10^{27}$	$2.5 \times 10^{27}$
Średnia jasność [B]	$1.8 \times 10^{19}$	$2.3 \times 10^{19}$	$2.6 \times 10^{19}$	$1.8 \times 10^{19}$



**Rys. 5.** Schemat linii elektronowych i optycznych lasera XFEL. Na rysunku zaznaczono i nazwano planowane undulatory. e<sup>-</sup> oznacza absorbery wiązki elektronowej.



**Rys. 6.** Schemat układu podłogi w hali eksperymentalnej (po lewej) oraz przekrój przez budynek (po prawej) pokazujący 3 piętra ponad ziemią i podziemną halę eksperymentalną. Na rysunkach zaznaczono podstawowe wymiary [m].

W powyższym opisie przedstawiono podstawowe opcje XFEL. Jednak już teraz można przewidzieć rozwiązania fizyczne i techniczne, które pozwolą ulepszyć jego działanie, bez konieczności wprowadzenia znaczących zmian w infrastrukturze. Przykładowo możliwe będzie zwiększenie liczby stacji doświadczalnych pracujących równocześnie, co zapewni łatwiejszy i tańszy dostęp do lasera. Z drugiej strony, możliwa będzie poprawa jakości wiązki fotonowej, poprzez np. zwiększenie natężenia promieniowania do poziomu subterawatowego, skrócenie do attosekund czasu trwania impulsu, bądź wydłużenie - do pracy quasi-ciągłej.

### 5. Planowane doświadczenia z użyciem promieniowania XFEL

W trakcie specjalnych konferencji oraz szerokich konsultacji naukowcy wyodrębnili 7 grup tematycznych określających możliwe zastosowania lasera XFEL. Część z nich związana jest z określonymi obiektami badań (np. obiekty biologiczne), a część z zastosowanymi technikami pomiarowymi (np. spektroskopia korelacyjna). Należy tu podkreślić, że rozważano jedynie takie eksperymenty, których wykonanie nie jest możliwe z użyciem tradycyjnych źródeł światła, włączając w to źródła synchrotronowe III generacji. Poniżej zaprezentowano ich listę wraz z krótkimi opisami.

#### 1) Małe układy kwantowe

W skład tej grupy wchodzi badania zarówno liniowych, jak i nieliniowych procesów oddziaływania promieniowania rentgenowskiego z atomami i klastrami. Przykładem tych pierwszych są testy doświadczalne najbardziej zaawansowanych symulacji struktury atomowej dla potrzeb m.in. astrofizyki i techniki. Innym przykładem są badania nieliniowej optyki w zakresie rentgenowskim, z wykorzystaniem wielofotonowej nieliniowej jonizacji. W tej grupie tematycznej mieszczą się także eksperymenty z użyciem klastrów, które oferują możliwość zmierzenia, jak absorpcja promieniowania rentgenowskiego zmienia się w zależności od wielkości obiektu – od pojedynczego atomu do ciała stałego.

#### 2) Stany materii o wysokiej gęstości energii

Wytwarzane będą stany materii cechujące się wysoką gęstością energii, tzw. stany ciepłej i gorącej gęstej materii (ang. *warm and hot dense matter*). Występują one m.in. w jądrach planet olbrzymów (np. Jowisza) i w eksperymentach z fuzją inercyjną (czasem nazywaną źródłem energii XXI wieku), jednak nie były one do tej pory osiągalne w kontrolowanych warunkach laboratoryjnych. Doświadczenia będą miały na celu poznanie

właściwości takiej materii, jak i dynamiki procesów prowadzących do jej wytworzenia.

**3) Rozpraszanie spójnego promieniowania rentgenowskiego i bezsoczewkowe obrazowanie w naukach materiałowych**

Użycie promieniowania XFEL do obrazowania bezsoczewkowego i dyfrakcyjnego pozwoli analizować struktury cząsteczek nanometrowej wielkości oraz badać dynamikę ich zmian w femtosekundowej skali czasu. Przykładowymi zastosowaniami są: określenie właściwości pojedynczych nanocząsteczek w nanomateriałach oraz struktur typu kropek kwantowych, czy też trójwymiarowa charakterystyka strukturalna systemów w skali mezo (związanej z takimi właściwościami materii jak np. wytrzymałość na zniszczenie). Badana też będzie ewolucja w czasie nano- i mikrostruktur w tak różnych technologiach jak napylanie czy spawanie. Eksperymenty te pozwolą m.in. lepiej zrozumieć znaczenie procesów fizycznych zachodzących podczas szeroko rozumianej obróbki materiałów.

**4) Rentgenowska spektroskopia korelacyjna fotonów**

Głównym przedmiotem badań w tej grupie tematycznej jest dynamika procesów kolektywnych w nanoskali. Użycie spójnych, ultrakrótkich impulsów promieniowania XFEL umożliwi rozszerzenie dotychczasowych eksperymentów z użyciem źródeł III generacji z domeny energii do domeny czasu. Pozwoli to zmierzyć parametry fizyczne kluczowe dla zrozumienia np. nierównowagowej dynamiki procesów. Badane będą takie procesy kolektywne jak: wiskoelastyczne przepływy w cieczach, dynamika polimerów, zwijanie białek, przejścia fazowe w kryształach czy też przeorientowanie domen magnetycznych.

**5) Rentgenowska spektroskopia absorpcyjna**

Rentgenowska spektroskopia absorpcyjna z użyciem promieniowania XFEL umożliwi poznanie, obok struktur cząsteczkowych i krystalicznych, także zmiany w strukturze elektronowej. Wśród badanych zjawisk atomowych będą zmiany poziomów energetycznych w zjonizowanych atomach i ewolucja plazmy. W zakresie fizyki molekularnej i chemicznej możliwe będzie badanie np. dynamiki roztworów, kluczowej dla zrozumienia wielu zjawisk chemicznych i biologicznych. Wśród tematów badań związanych z fizyką ciała stałego i materiałową są n.p. nowoczesne materiały luminescencyjne oraz nośniki danych.

**6) Femtosekundowa dyfrakcja rentgenowska**

Celem eksperymentów dyfrakcyjnych będzie pokazanie jak materia ulega reorganizacji podczas reakcji chemicznych i fizycznych. Symulacje i wstępne eksperymenty z użyciem lasera FLASH wskazują, że już jeden impuls promieniowania XFEL pozwoli uzyskać wysokiej jakości obraz dyfrakcyjny protein czy też cieczy. Możliwa będzie m.in. ultraszybka dyfrakcja na cząsteczkach w fazie gazowej, pozwalająca na zarejestrowanie drgań atomów. Z kolei użycie dyfrakcji do badania dynamiki reakcji chemicznych w roztworach uzupełni informacje zdobyte za pomocą spektroskopii absorpcyjnej. W przypadku ciał stałych zaproponowano zastosowanie m.in. dyfrakcji Bragga do badania procesów

fotocemicznych i przejść fazowych. Pomogą one zrozumieć funkcjonowanie nanomateriałów (np. kryształów półprzewodnikowych) o dużym znaczeniu technologicznym.

**7) Ultraszybkie koherentne obrazowanie dyfrakcyjne pojedynczych cząsteczek, klastrów i biomolekul**

Femtosekundowa dyfrakcja rentgenowska może posłużyć także do poznania struktury dużych molekul biologicznych, wirusów czy też komórek, bez konieczności ich krystalizowania. Rozszerzy to możliwości badawcze na szeroką gamę obiektów biologicznych, których nie udawało się do tej pory odpowiednio spreparować (wykrystalizować). Poznanie ich struktury umożliwi biologom zrozumienie funkcji, jakie one pełnią. Z uwagi na fakt, że doświadczenia te znajdują się na granicy możliwości technologicznych, ale z drugiej strony mają potencjalnie ogromne znaczenie, zostały one wyodrębnione w osobnej grupie tematycznej.

Powyższe punkty należy uzupełnić o tematykę związaną z diagnostyką wiązki fotonowej i elektronowej lasera XFEL oraz diagnostyką elementów linii optycznych (luster, dzielników wiązki fotonowej, monochromatora itp.) i innych elementów infrastruktury. Ich głównym celem będzie dostarczanie podstawowych parametrów eksperymentalnych (takich jak natężenie impulsu, widmo spektralne promieniowania, spójność, rozkład frontu falowego, czas trwania i rozmiar impulsu itp.) dla właściwych stacji badawczych. Jednak z uwagi na niespotykany do tej pory stopień trudności tych pomiarów wymagały będą one wykonania specjalnie dedykowanych doświadczeń na osobnej, specjalnie do tego przeznaczonej stacji badawczej.

Zaprezentowana powyżej lista możliwych zastosowań lasera XFEL nie jest zamknięta i będzie rozwijana w trakcie prac badawczych.

**6. Zasady finansowania projektu XFEL**

W 2003 roku, rząd niemiecki zdecydował o utworzeniu Europejskiego Ośrodka dla zbudowania i uruchomienia Rentgenowskiego Lasera na Swobodnych Elektronach w Hamburgu i podpisał zobowiązanie o finansowaniu 60% kosztów jego konstrukcji i 40% kosztów jego eksploatacji. Wybór lokalizacji w Hamburgu motywowano doświadczeniem, jakie zdobyli naukowcy z DESY przy konstrukcji lasera FLASH, na którym w kwietniu 2006 uzyskano akcję laserowa dla długości fali 13.5 nm. Pozostałą część kosztów poniosą członkowie Europejskiego Ośrodka.

Budowa i funkcjonowanie XFEL zostaną powierzone spółce z ograniczoną odpowiedzialnością, podlegającej prawu niemieckiemu. Szczegółowy sposób działania reguluje statut spółki. Spółka będzie prowadzić wyłącznie działalność na rzecz pokoju. Będzie ona funkcjonować pod nazwą European X-ray Free-Electron Laser Facility GmbH (XFEL). Strony umowy zapewnią wkład udziałowców w koszty budowy. Zainteresowanie udziałem w projekcie wyraziło 13 krajów podpisując "Memorandum of Understanding". Są to następujące kraje:

Federalna Republika Niemiec, Królestwo Danii, Republika Francuska, Republika Grecka, Republika Węgierska,

Republika Włoska, Rzeczpospolita Polska, Federacja Rosyjska, Królestwo Hiszpanii, Królestwo Szwecji, Konfederacja Szwajcarska, Wielka Brytania i Chińska Republika Ludowa.

Kraje te w specjalnym porozumieniu określają swój procentowy udział zarówno w budowie jak i w eksploatacji urządzenia.

### 7. Warunki dostępu do lasera i eksperymentalnych stanowisk badawczych

Założono, że projekt wejdzie w fazę realizacji (budowy) w styczniu 2007 roku. Termin zakończenia budowy i przejścia do fazy uruchomienia urządzenia przewidziano na rok 2013.

Kraje, które podpisały konwencję o udziale w budowie i eksploatacji XFEL dążą do dalszego umocnienia pozycji Europy w świecie badawczym oraz do zintensyfikowania interdyscyplinarnej i transgranicznej współpracy naukowej. Podjęły one decyzję, że XFEL będzie wykorzystywany przez społeczność naukową w oparciu o kryteria doskonałości naukowej. Porozumienia dotyczące długoterminowego użycia XFEL przez rządy lub grupy rządów, które nie przystąpiły do niniejszej konwencji, lub przez przedsiębiorstwa lub organizacje z siedzibą na terenie takich krajów, mogą zostać zawarte przez spółkę pod warunkiem, iż zostaną jednogłośnie zatwierdzone przez radę spółki. Udział w europejskim projekcie XFEL pozwoli na stworzenie w jego ramach polskiego ośrodka naukowego przy XFEL, gdzie polscy badacze będą mogli zdobywać doświadczenie naukowe.

### 8. Zakończenie

Już za kilka lat w bezpośrednim zasięgu (zarówno naukowym jak i geograficznym) polskich naukowców znajdzie się nowoczesne źródło promieniowania rentgenowskiego o niespotykanych do tej pory parametrach promieniowania - XFEL. Zaprezentowana wcześniej lista możliwych zastosowań lasera XFEL zadziwia szerokością tematyki – od astrofizyki i fizyki plazmy przez badania materiałowe i chemiczne do nauk biologicznych. Wyjątkowe właściwości promieniowania lasera XFEL sprawiają, że obecnie nieosiągalne, a także potrzebne nauce techniki badawcze staną się standardem. Można się spodziewać, że przyniesie to jakościowy skok a nawet przełom we wszystkich tych dziedzinach na-

uki. Zaangażowanie polskich badaczy w projekt XFEL oznaczać będzie ich kontakt z najnowocześniejszymi technologiami i obecność w głównych nurtach nauki.

**Podziękowania:** Przedstawione informacje dotyczące historii rozwoju źródeł promieniowania synchrotronowego, zasady działania SASE FEL, budowy lasera XFEL, organizacji prac w projekcie XFEL, planowanych doświadczeń z użyciem promieniowania XFEL pochodzą z pracy p.t. *The European X-Ray Free-Electron Laser Technical Design Report*, w edycji zbiorowej pod kierunkiem Massimo Altarelli (ISBN 3-935702-17-5) dostępnej na stronie internetowej: <http://www.xfel.net>. Wszystkie zaprezentowane rysunki i tabele są przetłumaczonymi na język polski wersjami rysunków i tabel zawartych w powyższej wymienionym raporcie.

### Literatura:

- [1] R. Sobierajski, J. Krzywiński, A. Andrejczuk, U. Hahn, M. Jurek, D. Klinger, R. Nietubyc, J.B. Pelka, H. Reniewicz, M. Sikora, W. Sobala, R. Treusch, "Experimental station to study the interaction of intense femtosecond VUV pulses with matter at TTF1 Free Electron Laser", *Rev. Sci. Instrum.* **76** (2005) 013909.
- [2] J.B. Pelka, A. Andrejczuk, H. Reniewicz, N. Schell, J. Krzywiński, R. Sobierajski, A. Wawro, Z.R. Zytkeiwicz, D. Klinger, L. Juha, "Structure modification in silicon irradiated by ultra-short pulses of XUV free electron laser", *J. Alloys Compds* **382** (2004) 264-272.
- [3] B. Steeg, L. Juha, J. Feldhaus, S. Jacobi, R. Sobierajski, C. Michaelson, A. Andrejczuk, J. Krzywinski, "Total reflection amorphous carbon mirrors for vacuum ultraviolet free electron lasers", *Appl. Phys. Lett.* **84** (2004) 657-659.
- [4] M. Kirm, A. Andrejczuk, J. Krzywiński, R. Sobierajski, "Influence of excitation density on luminescence decay in  $Y_3Al_5O_{12}:Ce$  and  $BaF_2$  crystals excited by free electron laser radiation in VUV", *phys. stat. sol. (c)* **2** (2005) 649-652.
- [5] J. Krzywinski, R. Sobierajski, M. Jurek, R. Nietubyc, J.B. Pelka, L. Juha, M. Bittner, V. Létal, V. Vorlíček, A. Andrejczuk, J. Feldhaus, E.L. Saldin, E.A. Schneidmiller, R. Treusch, M.V. Yurkov, "Conductors, semiconductors and insulators irradiated with short-wavelength free-electron laser", *J. Appl. Phys.* **101** (2007), w druku.