



**Wydział  
Fizyki**

POLITECHNIKI WARSZAWSKIEJ

# **Promieniowanie synchrotronowe:** generacja, własności i zastosowania

Praca zaliczeniowa z przedmiotu Metody i Techniki Jądrowe

autor:  
Zuzanna Chochulska

prowadzący:  
prof. dr hab. Jan Pluta

WARSZAWA 2023

## Spis treści

<b>1</b>	<b>Wstęp</b>	<b>4</b>
<b>2</b>	<b>Promieniowanie synchrotronowe</b>	<b>4</b>
2.1	Historia odkrycia promieniowania synchrotronowego . . . . .	5
2.2	Promieniowanie synchrotronowe jako składowa promieniowanie elektromagnetycznego i jego własności . . . . .	5
<b>3</b>	<b>Sposób generowania promieniowania synchrotronowego</b>	<b>6</b>
3.1	Promieniowanie synchrotronowe z akceleratorów . . . . .	6
3.2	Promieniowanie synchrotronowe w przestrzeni kosmicznej . . . . .	7
3.2.1	Pulsar . . . . .	7
<b>4</b>	<b>Synchrotron SOLARIS jako przykład synchrotronu na terenie Polski</b>	<b>9</b>
4.1	Synchrotrony . . . . .	9
4.2	Synchrotron SOLARIS . . . . .	19
4.2.1	Budowa synchrotronu SOLARIS . . . . .	20
4.2.2	Badania prowadzone w synchrotronie SOLARIS . . . . .	21
<b>5</b>	<b>Metody wykorzystujące promieniowanie synchrotronowe stosowane w przemyśle</b>	<b>21</b>
5.1	Metody spektroskopowe . . . . .	21
5.1.1	Absorpcja promieniowania rentgenowskiego (XAS) . . . . .	22
5.1.2	Dichroizm magnetyczny kołowy i liniowy (XMCD) . . . . .	22
5.1.3	Spektroskopia fotoelektronów (PS) . . . . .	23
5.2	Metody mikroskopowe . . . . .	23
5.2.1	Mikroskopia fotoelektronów . . . . .	23
5.2.2	Kriomikroskopia elektronowa . . . . .	24
<b>6</b>	<b>Zastosowania promieniowania synchrotronowego w medycynie</b>	<b>24</b>
6.1	Mammografia . . . . .	24
6.2	Bronchografia . . . . .	25
6.3	Aniografia wieńcowa . . . . .	26
<b>7</b>	<b>Zastosowanie promieniowania synchrotronowego w badaniu zabytków</b>	<b>28</b>
<b>A</b>	<b>Wywiad z fizykiem akceleratorowym pracującym w synchrotronie SOLARIS</b>	<b>32</b>
A.1	Najlepsza część pracy fizyka akceleratorowego . . . . .	32
A.2	Typowy dzień pracy fizyków w SOLARIS . . . . .	32
A.3	Zdarzenia nadzwyczajne . . . . .	33
A.4	Co wyróżnia synchrotron SOLARIS na tle innych ośrodków naukowych? . . . . .	34
A.5	Ciekawe badania wykonywane w SOLARIS . . . . .	34

A.6	Szychty w synchrotronie SOLARIS . . . . .	34
A.7	Współpraca z innymi instytucjami z konsorcjum LEAPS . . . . .	34
A.8	Studenci w synchrotronie SOLARIS . . . . .	34
A.9	Wizja synchrotronu SOLARIS za 10 lat . . . . .	35
A.10	Wiadomość do młodych fizyków . . . . .	35

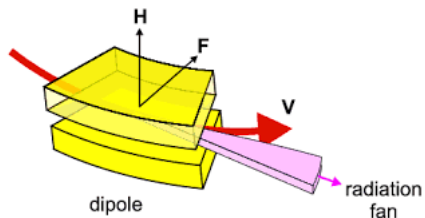
# 1 Wstęp

Człowiek poznając przyrodę i otaczający świat od zawsze korzysta z promieniowania elektromagnetycznego. Różne długości tego promieniowania wykorzystuje się do najrozmaitszych celów. Najdłuższe długości tego promieniowania - fale radiowe - umożliwiają obserwowanie rozszerzającego się ciągle wszechświata. Mikrofałe wykorzystywane są do wykrywania statków, samolotów, a nawet tajfunów. Promieniowanie podczerwone jest szeroko wykorzystywane w systemach noktowizyjnych poprzez śledzenie źródeł ciepła. Światło widzialne to jedyny zakres promieniowania elektromagnetycznego, który człowiek może zobaczyć "gołym okiem". Światło ultrafioletowe pozwala na badanie struktury cząsteczek gazów i materii skondensowanej, natomiast promienie rentgenowskie umożliwiają badanie struktur krystalicznych. Promienie gamma, o najkrótszej długości fali umożliwiają na badanie struktury wewnętrznej atomów.

To opracowanie poświęcone jest promieniowaniu synchrotronowemu, czyli promieniowaniu elektromagnetycznemu o ciągłym i bardzo szerokim zakresie widmowym (od promieniowania w dalekiej podczerwieni do twardego promieniowania rentgenowskiego). Praca ta stanowi opracowanie zaliczeniowe z przedmiotu Metody i Techniki Jądrowe w Środowisku, Przemysłe i Medycynie prowadzonego na Wydziale Fizyki Politechniki Warszawskiej. Jako uzupełnienie tego opracowania w dodatku A zamieszczono wnioski z wywiadu przeprowadzonego z pracownikiem synchrotronu SOLARIS.

## 2 Promieniowanie synchrotronowe

Promieniowanie synchrotronowe to promieniowanie generowane przez naładowane cząstki o prędkościach relatywistycznych gdy ich tor zakrzywiany jest polem magnetycznym [1]. Promieniowanie emitowane jest w kierunku ich ruchu.



Rysunek 1: Promieniowanie synchrotronowe generowane w magnesie dipolowym [2].

Z punktu widzenia fizyki cząstek wiąże się to ze ogromną utratą energii, co jest w tych eksperymentach znaczącym problemem. Dopiero dalsze badania pozwoliły na odkrycie szeregu zastosowań promieniowania synchrotronowego w badaniu struktur materiałów w skali zarówno atomowej jak i molekularnej. Pozwała ono

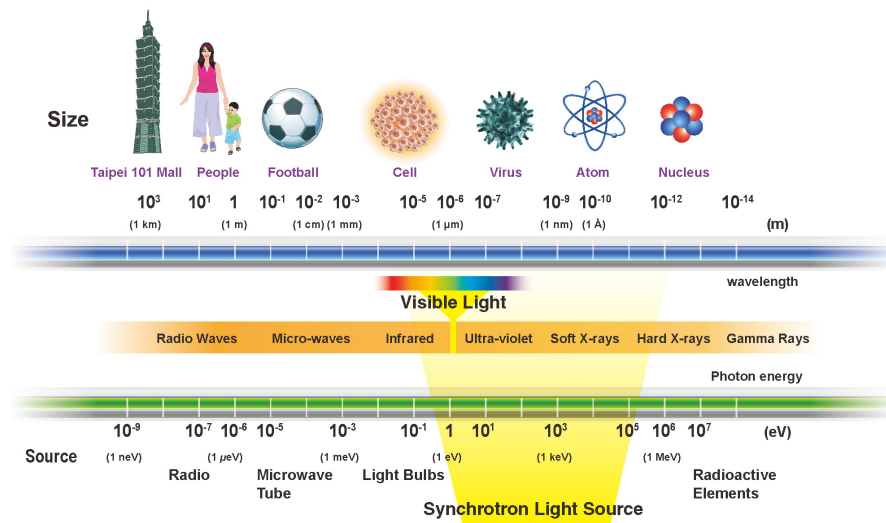
na badanie właściwości powierzchniowych materiałów jak również struktur molekuł.

## 2.1 Historia odkrycia promieniowania synchrotronowego

Promieniowanie synchrotronowe pierwszy raz zostało zaobserwowane 24 kwietnia 1947 roku w laboratorium General Electric w Schenectady, New York [3]. Pozwolił na to pierwszy synchrotron, który posiadał przezroczystą rurę próżniową, która umożliwiła obserwację tego zjawiska.

## 2.2 Promieniowanie synchrotronowe jako składowa promieniowanie elektromagnetycznego i jego własności

Promieniowanie synchrotronowe jest promieniowaniem elektromagnetycznym, o **bardzo szerokim i ciągłym zakresie widmowym** (od promieniowania w dalekiej podczerwieni do twardego promieniowania rentgenowskiego). Rysunek 2 przedstawia zakres widmowy dla promieniowania synchrotronowego.



Rysunek 2: Zakres widmowy promieniowania synchrotronowego [4].

Jest promieniowaniem o **bardzo dużej intensywności**, posiada również **wysoki stopień polaryzacji** liniowej lub kołowej. Jego możliwość monochromatyzacji sprawia, że jest ono silnym narzędziem umożliwiającym na dostarczenie

bardzo atrakcyjnych informacji dla przemysłu oraz dla nowych obszarów poznawczych i technologicznych [5].

### 3 Sposób generowania promieniowania synchrotronowego

Promieniowanie synchrotronowe powstaje, gdy naładowane cząstki o prędkości bliskiej prędkości światła są zakrzywane polem magnetycznym. Wypromieniują one wtedy cienką wiązkę promieniowania styczną do toru ruchu.

Moc promieniowania synchrotronowego dana jest relatywistycznym wzorem Larmora:

$$P_{\gamma} = \frac{1}{6\pi\epsilon_0} \frac{q^2 a^2}{c^3} \gamma^4, \quad (1)$$

gdzie:

- $\epsilon_0$  - przenikalność elektryczna próżni,
- $q$  - ładunek elektryczny cząstki,
- $a$  - przyspieszenie cząstki,
- $c$  - prędkość światła w próżni,
- $\gamma$  - czynnik Lorentza  $\left(\frac{1}{\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}}\right)$ .

#### 3.1 Promieniowanie synchrotronowe z akceleratorów

Akceleratory kołowe są źródłem promieniowania synchrotronowego, ze względu na to, że kołowy ruch cząstek wymuszany jest polem magnetycznym. Może powodować niepożądane straty energii lub może być wykorzystywany jako źródło promieniowania do wielu badań laboratoryjnych.

Wykorzystywane najczęściej do generacji promieniowania synchrotronowego - elektrony - rozpędzane są do dużych prędkości etapami, przy wykorzystaniu pola elektrycznego. Po uzyskaniu odpowiedniej energii (zwykle w zakresie GeV) ich tor ruchu zakrzywiany jest magnesami, co pozwala na generację promieniowania synchrotronowego.

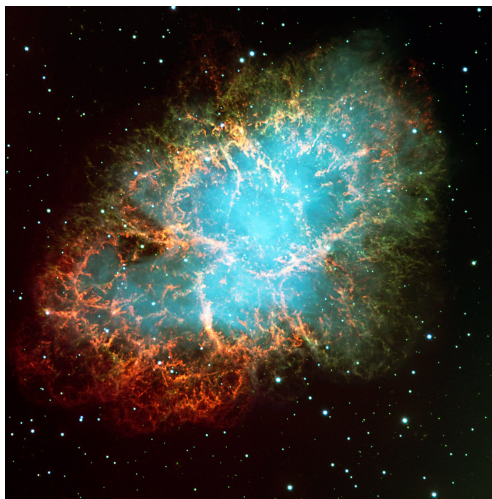
#### **Dlaczego stosuje się akceleratory elektronów a nie protonów?**

We wzorze 1 P jest proporcjonalne do  $\gamma^4$ , a dla elektronów i protonów o tych samych energiach czynnik Lorentza jest wielokrotnie większy dla elektronów niż dla protonów [6].

## 3.2 Promieniowanie synchrotronowe w przestrzeni kosmicznej

Promieniowanie synchrotronowe w przestrzeni kosmicznej wytwarzane jest przez promienie kosmiczne leptonów (najczęściej elektronów i pozytronów), które propagują się w międzygwiazdowym polu magnetycznym. Jest ono często używane do oszacowania siły dużych pól magnetycznych.

Na rysunku 3 zauważyć można niebieskie światło emitowane głównie przez bardzo wysokoenergetyczne (*relatywistyczne*) elektrony, które wirują w wielkoskalowym polu magnetycznym. Uważa się, że elektrony te są stale przyspieszane i wyrzucane przez szybko wirującą gwiazdę neutronową w centrum mgławicy, która jest pozostałością po eksplodującej gwiazdzie.

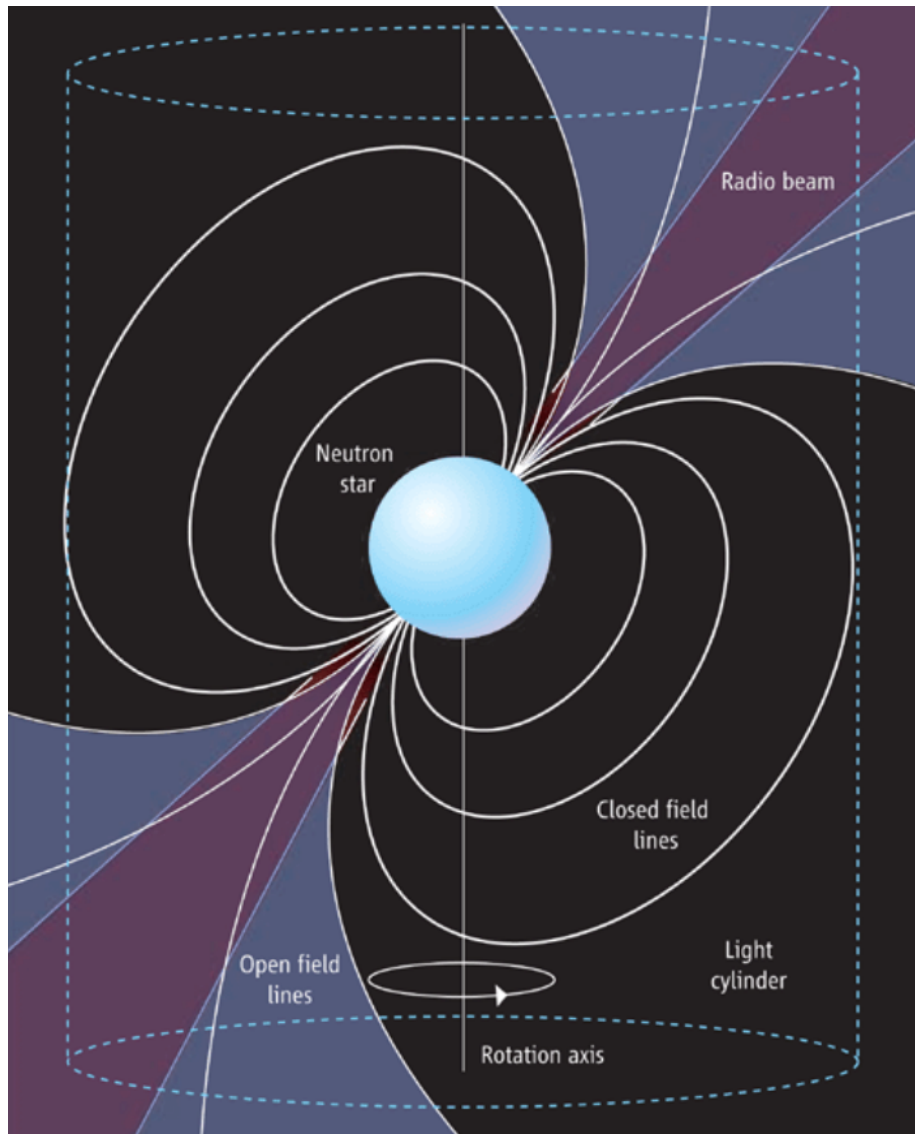


Rysunek 3: Mgławica Krab.

### 3.2.1 Pulsar

Pulsar jest rodzajem gwiazdy neutronowej. Gwałtowne zapadnięcie się jądra prowadzi do zwiększenia się tempa rotacji gwiazdy (ze względu na zachowanie momentu pędu) oraz wzrostu natężenia pola magnetycznego (ze względu na zachowanie strumienia magnetycznego). Powoduje to powstanie magnetosfery (obszaru, w którym ruchy i zjawiska cząstek naładowanych są zdominowane przez pole magnetyczne obiektu). Cząstki poruszające się wewnątrz magnetosfery są przyspieszane do prędkości relatywistycznych i wysyłają promieniowanie wewnątrz wąskiego stożka wzdłuż kierunku linii [7]. W literaturze często znaleźć można porównanie do latarni, ze względu na to, że promieniowanie może być obserwowane jedynie, gdy wiązka emisyjna skierowana jest w stronę Ziemi. Światło dociera więc do powierzchni Ziemi charakterystycznymi impulsami, które mo-

gą przypominać impulsy latarni morskiej. Rysunek 4 obrazuje promieniowanie synchrotronowe emitowane przez pulsar.



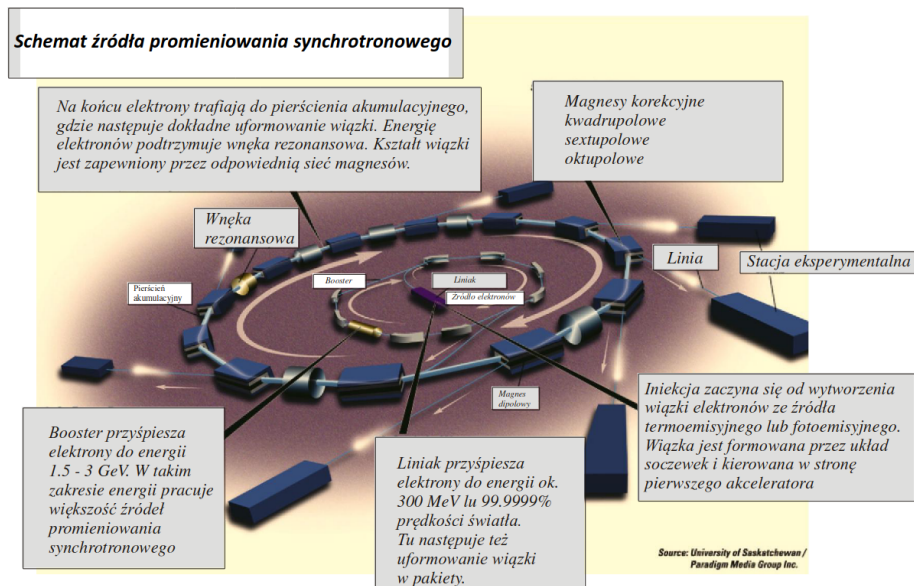
Rysunek 4: Wirujące pole magnetyczne pulsara tworzy bardzo silne pole, które wyciąga naładowane cząstki ze stałej skorupy gwiazdy [8].



## 4 Synchrontron SOLARIS jako przykład synchrotronu na terenie Polski

### 4.1 Synchrotrony

Synchrotron to typ akceleratora cząstek i źródło wyjątkowego synchrotronowego światła. Przyspiesza on, do prędkości bliskiej prędkości światła, cząstki naładowane po stałej, zamkniętej ścieżce. Pole magnetyczne zagina ścieżkę i jest ono zwiększane wraz z czasem procesu przyspieszania. Największym akceleratorem typu synchrotronowego, a także największym akceleratorem cząstek na świecie jest Wielki Zderzacz Hadronów (LHC) zlokalizowany w Szwajcarii, w pobliżu Genewy. Rysunek 5 przedstawia schemat źródła promieniowania synchrotronowego.



Rysunek 5: Schemat źródła promieniowania synchrotronowego. Źródło: [9].

Synchrotrony pozwalają zajrzeć w głąb materii i dokonać jej precyzyjnych analiz. Dzięki nim naukowcy mogą badać zarówno skład badanej substancji, jak i jej strukturę – światło synchrotronu może przenikać do wnętrza badanej materii. Może odwzorować ukryte warstwy lub ich wybrane fragmenty, bez uszkodzania tych położonych na zewnątrz. Synchrotrony otwierają zupełnie nowe możliwości badawcze. Dzięki nim można przeprowadzić analizy, które dotychczas dla badaczy były nieosiągalne. Synchrotrony pozwalają również uzyskać w krótszym czasie lepsze wyniki badań, które wcześniej były realizowane zwykłymi metodami. To obecnie najwszechstronniejsze urządzenie badawcze jakimi dysponują

nauki przyrodnicze i techniczne.

Do pierścienia synchrotronu dołączane są linie badawcze. Linie te możemy sobie wyobrazić jako obiektywy fotograficzne o znakomitych właściwościach optycznych. Można "fotografować" szerokie plany i małe detale, wyodrębniając lub uwypuklając fragmenty obrazów za pomocą całej gamy filtrów optycznych i cyfrowych. Do synchrotronu na raz można dołączyć kilkanaście linii badawczych, a do każdej z linii można dołączyć więcej niż jedno stanowisko badawcze. Stanowiska te mogą działać jednocześnie i niezależnie od siebie. W Polsce możemy pochwalić się najnowocześniejszym synchrotronem w Europie Środkowo-Wschodniej jakim jest synchrotron SOLARIS widoczny na rysunku 6.



Rysunek 6: Narodowe Centrum Promieniowania Synchrotronowego - Synchrotron SOLARIS.

Rysunek 7 przedstawia synchrotrony przynależące do Ligi Europejskich Akceleratorowych Źródeł Fotonów (LEAPS) [10]. Jego głównym celem jest aktywne i konstruktywne zapewnienie oraz promowanie jakości i wpływu badań zarówno podstawowych jak i przemysłowych prowadzonych w przynależących instytutach.



Rysunek 7: Mapa instytutów składających się na konsorcjum - League of European Accelerator based-Photon Sources – LEAPS [10].

Deklaracja konsorcjum, na której opiera się działanie LEAPS, została podpisana 13 listopada 2017 r. w Brukseli. Podpisali ją przedstawiciele obiektów członkowskich z 16 organizacji reprezentujących aż 19 obiektów [11]. Poniżej zebrałam informacje o każdym z przynależących obiektów. W kolejnej sekcji w szczególności opisany został synchrotron SOLARIS – polski synchrotron w konsorcjum LEAPS. Wszystkie logo wykorzystywane w tej części opracowania pochodzą z oficjalnej strony konsorcjum LEAPS [11].

## ALBA



ALBA to zlokalizowany 20km od Barcelony, hiszpański generator **3 generacji** i stanowi największą infrastrukturę naukową w tym kraju [12].

Obiekt składa się z akceleratora dostarczającego wiązkę elektronów o energii 3 GeV. Dostępne są w nim różne techniki promieniowania synchrotronowego, w tym dyfrakcja, spektroskopia i obrazowanie. Działający od 2012 roku synchrotron ALBA posiada 10 linii badawczych [13]. Instytut umożliwia badania dla ponad 2 000 badaczy z sektora zarówno akademickiego jak i przemysłowego.

### Czym różnią się od siebie różne generacje synchrotronów?

- 1 generacja (od 1956)- Akceleratory zbudowane dla fizyki wysokich energii wykorzystywane pasywnie do promieniowania synchrotronowego,
- 2 generacja (od 1981)- Akceleratory budowane jako synchrotronowe źródła światła [14],
- 3 generacja (od 1994)- Źródła promieniowania synchrotronowego trzeciej generacji charakteryzują się dużą jasnością dostarczanego przez nie światła [15].

## DESY



DESY to ośrodek położony w Niemczech. Naukowcy mają możliwość na badanie w nim mikrokosmosu w całej jego różnorodności - od wzajemnych oddziaływań najmniejszych cząstek elementarnych poprzez zachowanie się nowych nanomateriałów, aż po istotne procesy zachodzące pomiędzy biomolekułami. Akceleratory oraz instrumenty detekcyjne opracowane i budowane przez DESY są unikalnymi narzędziami badawczymi: generują najsilniejsze na świecie promieniowanie rentgenowskie [16]. Umożliwia na otrzymanie energii elektronów do aż 7 GeV. Synchrotron PETRA III wykorzystywany w DESY generuje promieniowanie twarde rentgenowskie [17], czyli promieniowanie z zakresu długości fal od 5 do 100 pm.

### Diamond light source



Diamond light source, to ośrodek położony w Wielkiej Brytanii. Jest średniej energii synchrotronem, ponieważ energia wiązki, którą produkuje wynosi 3 GeV. Jego obwód wynosi około 562 m [18]. Aktualnie wykorzystuje aż 32 linie badawcze.

## Elettra Sincrotrone Trieste



Elettra Sincrotrone Trieste

Elettra to międzynarodowe centrum badań zlokalizowane na przedmieściach Triestu we Włoszech. Aktualnie posiada 28 linii badawczych. W tym miejscu wykorzystywane są dwa zaawansowane źródła światła [19]. Pierwszym jest synchrotron Elettra trzeciej generacji, który pracuje przy energii 2 i 2.4 GeV [20], działający od października 1993 roku, natomiast drugim jest laser na swobodnych elektronach (free-electron laser FEL) FERMI.

FERMI jest najnowocześniejszym źródłem lasera na swobodnych elektronach o wysokim wzmocnieniu generacji harmonicznej [21]. Jest unikatowy na skale światową, ze względu na jego możliwość produkowania krótkich i bardzo intensywnych błysków światła. Działanie FERMI jest pięknie zobrazowane przez filmik zamieszczony przez instytut [22].

Światło uzyskane w instytucie, umożliwia szerokiemu gronu użytkowników z instytucji akademickich i przemysłu uzyskanie dostępu do zaawansowanych możliwości i technik badawczych oraz prowadzenie najnowocześniejszych eksperymentów w dziedzinie fizyki, chemii, biologii, nauk przyrodniczych, nauk o środowisku, medycyny, kryminalistyki i dziedzictwa kulturowego.

### ESRF



ESRF - The European Synchrotron Radiation Facility - jest zlokalizowane w Grenoble, we Francji. Instytut ten produkuje promieniowanie X 10 bilionów razy jaśniejsze od tego wykorzystywanego w szpitalach [23]. Synchrotron posiada również 44 wyspecjalizowane linie badawcze. Badania prowadzone w instytucie ESRF obejmują wiele dziedzin, w tym farmację i biotechnologię, chemię, kosmologię, badania produktów spożywczych, budownictwo, inżynierię transportu, nanotechnologie, półprzewodniki, naukę o środowisku, metalurgię i rozwój zaawansowanych materiałów.

### European XFEL



European X-ray Free Electron Laser, w skrócie European XFEL to rentgenowski laser na swobodnych elektronach, w synchrotronowym centrum badawczym DESY w Hamburgu. Emituje on impulsowe wiązki laserowe o zakresie fali od 0.05 do 4.7 nm. Urządzenie składa się z akceleratora i **undulatora**. Elektrony przyspieszane są do energii 17.5 GeV za pomocą liniaka o długości 1.7 km z naprzewodzącymi wnękami mikrofalowymi [24]. W undulatorze tor ruchu zakrzywiany jest polem magnetycznym, co powoduje emisję promieni X. Czas trwania jednego impulsu jest bardzo krótki i wynosi poniżej 100 fs. Ośrodek umożliwia na obserwowanie reakcji chemicznej, oglądanie trójwymiarowych obrazów struktur rozdzielczością atomową oraz umożli-

wia rejestrowanie filmów obrazujących dynamikę procesów z femtosekundową rozdzielczością czasową! W budowie uczestniczyło 12 państw, reprezentowanych przez instytucje, w tym Polska reprezentowana przez NCBJ.

### **FELIX**



Laboratorium FELIX (**F**ree-**E**lectron **L**asers for **I**nfrared **eX**periments) w Holandii skupia się na rozwoju i wykorzystaniu krótko pulsujących laserów na podczerwień i terahercowych laserów na swobodnych elektronach. Prowadzone są tam również prace, które mają na celu doprowadzić do powstania magnetycznych urządzeń pamięciowych, które zużywać będą od 6 do nawet 8 rzędów wielkości mniej energii. FELIX może być również wykorzystywany do badania właściwości ciał stałych, cząsteczek w roztworze i w fazie gazowej w stanie podstawowym. Jest tak, ponieważ energie promieniowania odpowiadają niskoenergetycznym wzbudzeniom wibracyjnym, spinowym i elektronowym [25]. Promieniowanie podczerwone laserów FELIX może ujawnić szczegółowe informacje o strukturze 3D materiałów oraz może pomóc poznać ich właściwości funkcjonalne i elektroniczne.

### **HZB**



Helmholtz-Zentrum Berlin für Materialien und Energie GmbH (HZB) jest instytutem zlokalizowanym w Niemczech. W HZB badana jest struktura i dynamika materiałów oraz rozwijana jest technologia paneli słonecznych. Bardzo ważnym narzędziem wykorzystywanym przez naukowców w centrum badawczym jest synchrotron BESSY II (synchrotron trzeciej generacji), który dostarcza intensywne światło z zakresu miękkiego promieniowania X (miękkie promieniowanie rentgenowskie ma zakres długości fali od 0.1 do 10 nm). Elektrony tożpędzane są tam do 1.7 GeV, a następnie ich tor ruchu zakrzywiany jest przy użyciu 32 magnesów [26].

### **HZDR**



Helmholtz-Zentrum Dresden-Rossendorf (HZDR) to ośrodek położony w Niemczech. Poza główną siedzibą w Dreźnie, HZDR posiada pięć innych ośrodków badawczych w: Grenoble, Freiberg, Görlitz, Leipzig i Schenefeld. W ośrodkach w Freiberg i Dresden bada się nowe technologie wydobywania i eksploatacji surowców mineralnych. W ośrodku w Leipzig prowadzą badania nad transportem substancji w systemach geologicznych (szczególnie toksycznych) oraz nad neurotraceraami do diagnozowania defektów (szczególnie toksycznych) oraz nad nowotworami. W ośrodku w Schenefeld naukowcy zajmują się badaniem struktury materiałów. W Grenoble zespół z HZDR pracuje w ESRF przy eksperymentach radiochemicznych. W Görlitz w instytucie CASUS prowadzone są interdyscyplinarne badania związane z najnowszymi i najbardziej innowacyjnymi metodami matematycznymi,



symulacyjnymi i związanymi z szeroko pojętym data i computer science w celu znalezienia odpowiedzi na pytania postawione w różnych obszarach badań nad środowiskiem, materiałami i biologią [27].

#### INFN



INFN (Istituto Nazionale di Fisica Nucleare) to położony we Włoszech ośrodek badawczy. Jednym z laboratoriów podlegających pod INFN jest LNF (Laboratori Nazionali di Frascati) [28]. Jednym z narzędzi wykorzystywanych przez LNF był ADONE (zderzacz cząstek, o energii 1.5 GeV). Zderzał on elektrony z pozytronami i był wykorzystywany w latach 1969 do 1993. Po zakończeniu

ADONE powstało DAΦNE (Double Annular  $\Phi$ -factory for Nice Experiments). Jest to również zderzacz elektronów z pozytronami, lecz ze względu na jego niską energię (0.51 GeV) i wysokie natężenie prądu (wyższe niż 1.5 A) DAΦNE dostarcza bardzo intensywną wiązkę z zakresu niskich energii, szczególnie z zakresu podczerwieni. Ten zakres promieniowania elektromagnetycznego jest szczególnie ciekawy, ze względu na możliwość interdyscyplinarnych aplikacji, od biologicznych po geologiczne [29]. Do synchrotronu podpięte jest pięć linii badawczych.

#### ISA



ISA (the Institute for Storage Ring Facilities) to duński ośrodek naukowy, w którym prowadzone są badania z zakresu biologii molekularnej oraz fizyki cząstek. Synchrotronem wykorzystywanym w ISA jest ASTRID2. Jest to synchrotron o średnicy 15 metrów, do którego wpadają elektrony o energii 580 MeV. Wytwarza on światło z zakresu od ultrafioletu do promieniowania rentgenowskiego

i stanowi wyjątkowe narzędzie do badania: działania leków, właściwości egzotycznych metali, nanorurek oraz molekuł biologicznych. Skupia przy sobie duże grupy studentów i naukowców nie tylko z Danii ale z całego świata. Współpraca duńskiego sektora przemysłu z duńskim zespołem budującym synchrotron ASTRID2 pozwoliło na rozwinięcie akceleratorów służących do terapii nowotworów [30]. ASTRID2 wykorzystuje 6 linii badawczych równocześnie [31]

#### MAX IV

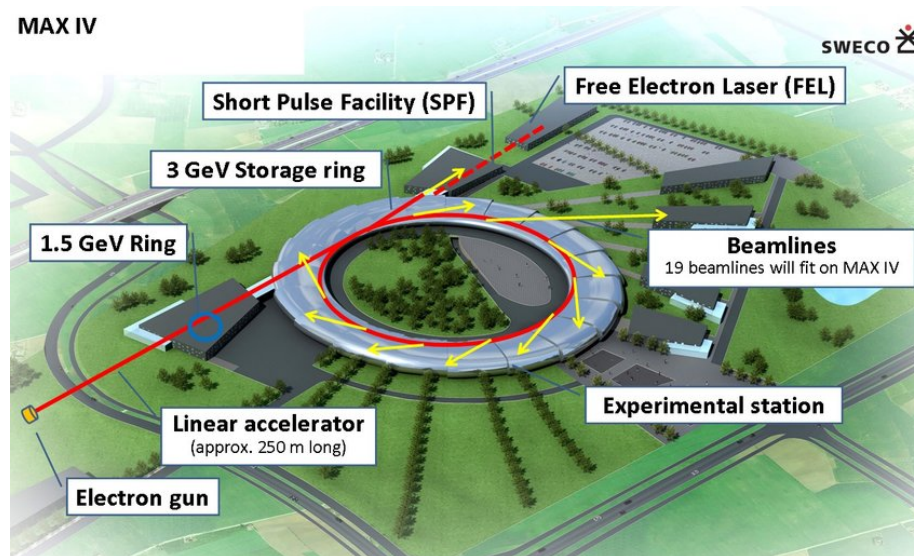


MAX IV jest ośrodkiem szwedzkim zlokalizowanym w miejscowości Lund. W skład MAX IV wchodzi dwa pierścienie akumulacyjne (3 GeV oraz 1.5 GeV) oraz liniak. W MAX IV dostępny jest również laser wolnych elektronów. Większy z pierścieni ma obwód 528 metrów, co jest

porównywalne z Koloseum w Rzymie. Cały ośrodek pomieścić może od 26 do 28 linii badawczych, aktualnie wykorzystuje ich 16. Linie te dostarczają nowoczesnych narzędzi wykorzystujących promieniowanie rentgenowskie. Przykładami przeprowadzanych tam badań [32] są m.in.:

- metody spektroskopowe (takie jak XAS (absorpcja promieniowania rentgenowskiego), XES (emisja promieniowania rentgenowskiego), ARPES (spektroskopowa fotoemisja z rozdzielaniem kątów), APXPS (spektroskopia fotoelektronów promieniowania rentgenowskiego w ciśnieniu otoczenia) i XPCS (spektroskopia rentgenowska korelacji fotonów)),
- makromolekularna krystalografia,
- metoda rozpraszania promieniowania rentgenowskiego pod małym kątem,
- rezonansowe nieelastyczne rozpraszanie promieniowania X,
- proszkowa dyfrakcja rentgenowska o wysokiej rozdzielczości,
- badania struktury i dynamiki materiałów,
- badania powierzchni w ultra wysokiej próżni,
- badania fotoluminescencji w ciałach stałych,

Rysunek 8 ilustruje rozmieszczenie komponentów składających się na ośrodek badawczy MAX IV.



Rysunek 8: Ilustracja ośrodka badawczego MAX IV [33].



## PSI



Paul Scherrer Institute (PSI) jest zlokalizowane w Villigen w Szwajcarii. Główne pola badań w ośrodku obejmują badania nad materiałami i materią, środowiskiem oraz nad ludzkim zdrowiem. Jednym z narzędzi wykorzystywanych w PSI jest SLS (Swiss Light Source). Jest to synchrotron trzeciej generacji o energii 2.4 GeV. Tor cząstek w pierścieniu akumulacyjnym o obwodzie 288 m zakrzywiany jest przez 36 magnesów dipolowych (1.4 T).

## PTB



Physikalisch-Technische Bundesanstalt (PTB) to instytut niemiecki. Jest krajowym instytutem metrologicznym Niemiec. Wraz z NIST w USA i NPL w Wielkiej Brytanii PTB należy do czołowych instytutów metrologicznych na świecie. PTB jest najwyższym i jedynym autorytetem Niemiec w zakresie prawidłowych i wiarygodnych pomiarów. Od 1982 do swoich badań ośrodek wykorzystuje światło synchrotronowe z synchrotronu BESSY II (HZB) oraz synchrotronu należącego do PTB – MLS (Metrology Light Source), zbudowany w pobliżu BESSY II. Pierścień akumulacyjny MLS jest przystosowany pod potrzeby metrologiczne [34]. W swoich stacjach doświadczalnych PTB oferuje szerokie spektrum usług, od wzorcowań poprzez badania kontraktowe do kompleksowych rozwiązań systemów metrologicznych realizowanych we współpracy z partnerami z przemysłu i badań.

## SOLEIL



SOLEIL to francuski instytut, zlokalizowany w okolicach Paryża. W SOLEIL elektrony rozpędzane są do energii 2.75 GeV, a później trafiają na pierścień akumulacyjny o obwodzie 354 m. Synchrotron posiada aż 29 działających linii badawczych, z możliwością rozbudowy do 43 i jest synchrotronem trzeciej generacji. Badania prowadzone w ośrodku SOLEIL obejmują badania fundamentalne fizyki, chemii, badań nad materiałami i szeroko pojętej nauki o życiu (w szczególności prowadzone są badania nad krystalografią biologicznych makromolekuł).

### Czym różni się synchrotron od cyklotronu?

- Cyklotron używa stałego pola magnetycznego i pole elektryczne o stałej częstotliwości. Synchrotron wykorzystuje zmienne pole magnetyczne i zmienne pole elektryczne. W miarę wzrostu energii przyspieszanych w synchrotronie cząstek, pole magnetyczne jest zwiększane by zachować stały promień obiegu cząstek.
- Cyklotron jest wykonany z cylindrycznej lub sferycznej komory, natomiast synchrotron jest wtkonany z rury w kształcie torusa.
- Synchrotrony są częściej wykorzystywane w dużych projektach naukowych, cyklotrony częściej znajdujemy w małych projektach.

### Co to cyklotron?

Cyklotron składa się z dwóch duantów, na które działa stałe pole magnetyczne  $B$  [35]. Oznacza to, że na naładowaną cząstkę działa siła Lorentza, która jest też siłą dośrodkową:

$$qvB = \frac{mv^2}{R} \implies v = \frac{qBR}{m}, \quad (2)$$

gdzie:  $m$  to masa cząstki,  $v$  to jej prędkość,  $B$  to indukcja pola magnetycznego,  $R$  to promień ruchu cząstki. Z tego otrzymać można okres, a dzięki temu częstotliwość:

$$T = \frac{2\pi R}{v} = \frac{2\pi m}{qB} \implies f = \frac{qB}{2\pi m}. \quad (3)$$

Częstotliwość jest więc stała, przy założeniu że cząstka nie porusza się z prędkością relatywistyczną. Tradycyjne cyklotrony mają praktyczny limit rozpędzania cząstek, związany z efektami relatywistycznymi (częstotliwość przestaje być stałą, tylko funkcją prędkości przez zmieniającą się masę). By uzyskać większe energie stosuje się dwa główne rozwiązania:

- zmienia się częstotliwość przy utrzymaniu stałego pola magnetycznego (synchrociklotrony),
- zmienia się pole magnetyczne, przy utrzymaniu stałej częstotliwości (izochroniczne cyklotrony).

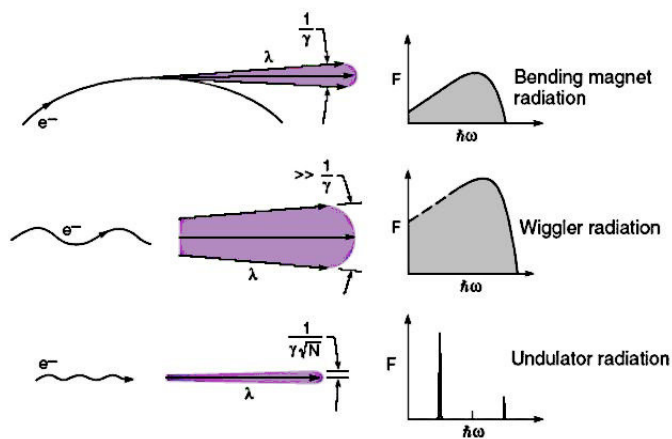
Jednym z cyklotronów izochronicznych jest cyklotron [36] w Środowiskowym Laboratorium Ciężkich Jonów (ŚLCJ), który mieliśmy okazję odwiedzić podczas jednej z wizyt w ramach przedmiotu MiTJ.

Do generowania silniejszego promieniowania stosuje się wyspecjalizowane urządzenia wstawkowe: **wigglery** i **undulatory**. Oba typy urządzeń wstawkowych

składają się z ułożonych naprzemiennie biegunami magnesów. Sprawia to, że naładowane cząstki zmuszone są do poruszania się po torze przypominającym zyg-zak. Wigglerzy składają się z kilku silnych magnesów. Undulatory natomiast składają się z wielu słabych magnesów [37].

Wigglerzy emitują promieniowanie synchrotronowe podobnie jak zginający magnes, ale intensywność jest wyższa ze względu na udział wielu dipoli magnetycznych składających się na wiggler. Wigglerzy emitują światło o krótszej długości fali, co przekłada się na większą energię.

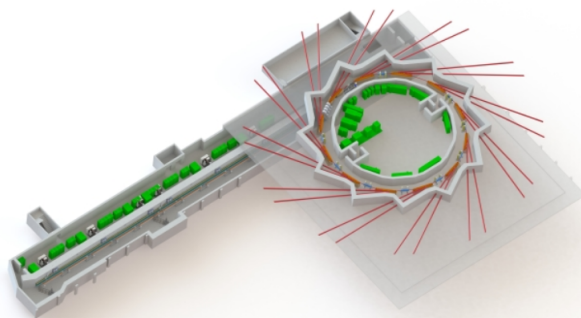
Undulatory, które składają się z wielu słabych magnesów, przez to ruch elektronów jest bardzo zbliżony do sinusoidy. Promieniowanie wytwarzane w undulatorze jest bardzo intensywne i skoncentrowane w wąskich pasmach energetycznych widma. Jest również skolimowane. Rysunek 9 przedstawia wykresy zależności intensywności od energii cząstki w wiązce.



Rysunek 9: Wpływ magnesów, wigglerów i undulatorów na promieniowanie synchrotronowe [38].

## 4.2 Synchrotron SOLARIS

Synchrotron SOLARIS jest obecnie największym w Polsce urządzeniem umożliwiającym prowadzenie badań naukowych. Wiązka elektronów w synchrotronie SOLARIS posiada nadzwyczajnie dobre parametry, pomimo niewielkich rozmiarów całego eksperymentu. Jest to zasługą najnowocześniejszych technologii użytych przez specjalistów ze szwedzkiego MAX VI Laboratory.



Rysunek 10: SOLARIS - polskie źródło promieniowania synchrotronowego, fot. Polski Synchrotron.

Tabela 1 przedstawia wybrane parametry synchrotronu SOLARIS.

obwód synchrotronu	96 m
energia elektronów	1.5 GeV
maksymalny prąd elektronów	500 mA
naturalna emitancja (bez urządzeń wstawkowych)	6 nm rad
całkowity czas życia elektronów	13 h

Tabela 1: Wybrane parametry synchrotronu SOLARIS.

#### 4.2.1 Budowa synchrotronu SOLARIS

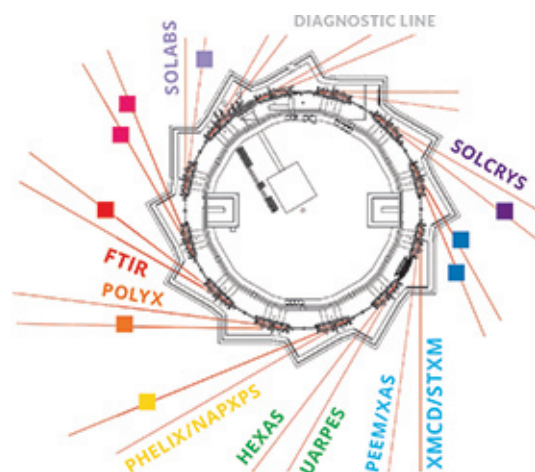


Synchrotron SOLARIS składa się z dwóch głównych części: akceleratora liniowego i pierścienia akumulacyjnego.

Elektrony pozyskiwane są z tzw. działa elektronowego. Działo elektronowe składa się z katody z tlenu baru. Wyemitowane elektrony trafiają do wstępnego akceleratora w postaci wnęki rezonansowej formującej paczki elektronów. Paczki trafiają następnie do akceleratora liniowego o długości 40m, gdzie przyspieszane są do energii 600 MeV.

Następnie z akceleratora liniowego paczki elektronów trafiają do pierścienia akumulacyjnego, który składa się z pierścienia 12 segmentów zakrzywiających i formujących wiązkę. Składają się one z magnesów dipolowych, które mają na celu zakrzywianie wiązki oraz z magnesów kwadrupolowych i sekstupolowych, które wiązkę ogniskują. W segmenty często wstawiane są undulatory i wiglery. Uzyskiwane promieniowanie jest przesyłane do linii badawczych.

#### 4.2.2 Badania prowadzone w synchrotronie SOLARIS



Rysunek 11: Linie badawcze w synchrotronie SOLARIS [39].

Synchrotron SOLARIS umożliwia na prowadzenie badań z użyciem promieniowania synchrotronowego. Są to unikatowe badania, które pozwalają na rozwój naukowcom z wielu dziedzin, takich jak: fizyka, chemia, biologia molekularna i wielu innych. Rysunek 11 przedstawia linie badawcze w synchrotronie SOLARIS.

Synchrotron SOLARIS pozwala badać m.in.:

- reakcje chemiczne zachodzące na powierzchni materiałów,
- powierzchnię materiałów i ich skład chemiczny z obrazowaniem,
- własności strukturalne materiałów,
- właściwości magnetyczne powierzchni materiałów,
- struktury makromolekuł komórek, wirusów i morfologii nanomateriałów.

Umożliwia on badania m.in. metodami: kriomikroskopii elektronowej, spektroskopii absorpcyjnej promieniowania rentgenowskiego, kątowno-rozdzielczej spektroskopii fotoelektronów, rentgenowskiej spektroskopii elektronów, mikroskopii fotoelektronów oraz skaningowej transmisyjnej mikroskopii rentgenowskiej.

## 5 Metody wykorzystujące promieniowanie synchrotronowe stosowane w przemyśle

### 5.1 Metody spektroskopowe

Do metod spektrowych zaliczyć można:

- XAS - absorpcja promieniowania rentgenowskiego,
- XES - emisja promieniowania rentgenowskiego,
- PS - spektroskopia fotoelektronów,
- ARPES - spektroskopowa fotoemisja z rozdzielaniem kątów,
- APXPS - spektroskopia fotoelektronów promieniowania rentgenowskiego w ciśnieniu otoczenia,
- XPCS - spektroskopia rentgenowska korelacji fotonów.

### 5.1.1 Absorpcja promieniowania rentgenowskiego (XAS)

Metoda ta pozwala na zidentyfikowanie składu chemicznego złożonych związków, poprzez badanie tego w jaki sposób dany materiał absorbuje fotony promieniowania rentgenowskiego. Energia, przy której obserwowana jest krawędź absorpcji jest cechą charakterystyczną dla danego pierwiastka i powłoki elektronowej. Dzięki tej metodzie możliwe jest również badanie lokalnego otoczenia geometrycznego i stopnia utlenienia atomów danego pierwiastka. Wykonuje się również pomiar całkowitego prądu próbki lub zebranie sygnału z objętości próbki.

Metoda ta jest wykorzystywana w obszarach takich jak:

- karaliza (np. badanie przebiegu reakcji chemicznych i ich optymalizacja),
- powłokach i cienkich warstwach (np. badanie reakcji zachodzących w powłokach antykorozyjnych),
- farmaceutykach (np. monitorowanie akumulacji leków w tkankach pacjentów),
- biomateriałach (np. badanie struktury i właściwości biopolimerów i hydrożeli),
- inżynierii środowiska (badanie procesów dezaktywacji substancji toksycznych).

### 5.1.2 Dichroizm magnetyczny kołowy i liniowy (XMCD)

Metoda dichroizmu magnetycznego kołowego i liniowego pozwala na zbadanie właściwości magnetycznych. Jej działanie opiera się na pomiarze różnicy absorpcji fotonów promieniowania rentgenowskiego. W przypadku dichroizmu magnetycznego kołowego badana jest różnica absorpcji promieniowania rentgenowskiego spolaryzowanego prawo- i lewo-skętnie. W metodzie dichroizmu magnetycznego liniowego mierzy się różnicę absorpcji promieniowania rentgenowskiego spolaryzowanego liniowo w kierunkach prostopadłych.

Ta metoda jest wykorzystywana w następujących obszarach:

- pamięci magnetyczne (np. badania stabilności temperaturowej pamięci),
- katalizatory (np. badanie nanocząstek magnetycznych),
- technologia związków żelaza (np. badanie magnesów stałych),
- biotechnologia (np. technologie krystalizacji materiałów magnetycznych z wykorzystaniem bakterii),
- spintronika (np. wytwarzanie i charakteryzacja niskowymiarowych elementów magnetycznych).

### 5.1.3 Spektroskopia fotoelektronów (PS)

Metoda spektroskopii fotoelektronów opiera się na analizie rozkładu energii fotoelektronów wybierajnych z wybranego materiału przez promieniowanie rentgenowskie lub ultrafioletowe. Wersja wykorzystująca promieniowanie rentgenowskie polega na wzbudzaniu elektronów z nisko położonych poziomów energetycznych, co pozwala na badanie składu chemicznego, a nawet samej stechiometrii materiału. Możliwe jest również badanie profilu głębokościowego składu chemicznego, bez niszczenia materiału. Wariant wykorzystujący promieniowanie ultrafioletowe polega na wybijaniu elektronów z powłoki walencyjnej co pozwala na badanie struktury elektronowej.

Metoda spektroskopii fotoelektronów wykorzystywana jest w obszarach:

- katalizy (np. badanie zmian właściwości chemicznych katalizatorów),
- elektroniki (np. struktura elektronowa półprzewodników i metali),
- materiałach niskowymiarowych (np. struktura elektronowa materiałów dwuwymiarowych, na przykład grafenu),
- cienkie warstwy (np. tworzenie profilu głębokościowego),
- branża stali i metali niezależnych (np. badanie procesów korozji i starzenia metali).

## 5.2 Metody mikroskopowe

### 5.2.1 Mikroskopia fotoelektronów

Metoda mikroskopii fotoelektronów pozwala na stworzenie mapy rozkładu pierwiastków. Możliwe jest to przez pomiar ilości i energii fotoelektronów, wybitych przez promieniowanie rentgenowskie lub ultrafioletowe w kolejnych punktach próbki. Pozwala na zebranie sygnału z warstwy o grubości do kilku nanometrów. Metoda mikroskopii fotoelektronów wykorzystywana jest w obszarach:

- materiały niskowymiarowe (np. obrazowanie materiałów dwuwymiarowych),
- magnetyzm (np. obrazowanie materiałów),
- inżynieria powierzchni (np. badanie przejść fazowych na powierzchni).

### 5.2.2 Kriomikroskopia elektronowa

Metoda kriomikroskopii elektronowej opiera się na elastycznym rozpraszaniu wiązki elektronów przez cienkie warstwy badanych materiałów. Pozwala na rozwiązywanie struktur atomowych cząstek organicznych bez konieczności ich uprzedniej krystalizacji. Substancje organiczne zamrażane są w ciekłym eanie, a następnie ich trójwymiarowa struktura jest rekonstruowana na podstawie automatycznej analizy setek obrazów mikroskopowych w różnych orientacjach.

Metoda kriomikroskopii elektronowej jest wykorzystywana w obszarach:

- biologii strukturalnej i biotechnologii (np. badanie struktury atomowych molekuł),
- przemysłu farmaceutycznego (np. rozwój nowych leków i szczepionek),
- przemysłu kosmetycznego (np. np. badanie przenikania substancji aktywnych przez struktury w ciele człowieka),
- nowoczesnych materiałów i nanotechnologii (np. badania nad umożliwieniem optymalizacji procesów produkcyjnych oraz badanie struktury atomowej materiałów),
- przemysłu energetycznego (np. badanie struktury materiałów porowatych).

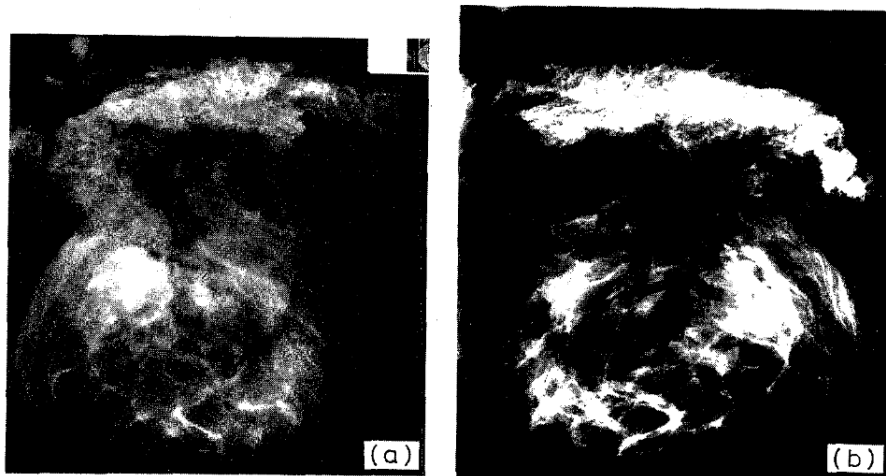
## 6 Zastosowania promieniowania synchrotronowego w medycynie

Wysoka intensywność promieniowania synchrotronowego i jego szerokie i ciągłe spektrum energii sprawia, że znajduje ono zastosowanie w badaniach medycznych. Możliwe do dostrojeia spektrum pozwala na wzmocnienie obrazowania i dawek terapeutycznych dla danego zabiegu.

### 6.1 Mammografia

Wysoka kolimacja i monochromatyzm i możliwość przestrajania promieniowania synchrotronowego umożliwiają na zwiększenie stosunku sygnału do szumu oraz pozwoli na zwiększenie rozdzielczości kontrastowej obrazów. Być może przy niższej dawce dla pacjenta przy naświetlaniu zmian patologicznych tkanek miękkich.





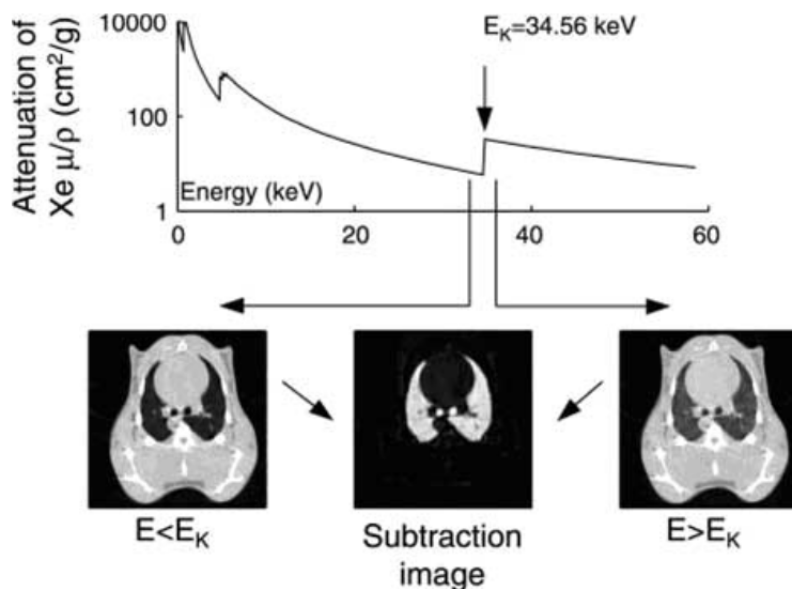
Rysunek 12: Radiogramy tej samej wyciętej chirurgicznie próbki piersi uzyskane (a) przy użyciu konwencjonalnego aparatu mammograficznego; (b) przy użyciu promieniowania synchrotronowego z użyciem techniki pionowej wiązki skanującej [40].

## 6.2 Bronchografia

Choroby płuc powodują patologiczne zmiany w strukturze i funkcjonowaniu płuc. Szeroko wykorzystywane metody obrazowania takie jak spirometria, PET lub MRI nie oferują równocześnie wysokiej rozdzielczości zarówno geometrii centralnych dróg oddechowych, jak i ilościowego rozkładu regionalnej wentylacji, co ogranicza możliwość badań funkcjonalności tych narządów.[41].

Zaproponowana przez Rubenstein i innych w 1986 roku metoda K-edge Subtraction (KES), z początku bazowała na obrazowaniu z użyciem jodu, później została rozszerzona o obrazowanie stabilnym ksenonem.

Obrazowanie KES polega na wykorzystaniu dwóch wiązek promieniowania rentgenowskiego o energii powyżej i poniżej krawędzi K ksenonu.



Rysunek 13: Poglądowy opis metody bronchografii synchrotronowej [41].

Odjęcie od siebie tych dwóch obrazów pozwala na obserwacje subtelných anatomicznych struktur wypełnionych środkiem kontrastowym z możliwym do pominięcia wpływem pochodzących z innych, sąsiednich struktur. Umożliwia to na jakość obrazowania niespotykaną przy konwencjonalnych metodach wykorzystujących promieniowanie rentgenowskie. Pozwoliło to na wykrywanie guzów o średnicy poniżej 1cm.

Pozwoliło to na wcześniejsze wykrywanie nowotworów, co oczywiście przekłada się na większe szanse na wyzdrowienie pacjentów. Modele zwierzęce pozwalają na badanie wpływu chorób płuc, takich jak astma i alergia na strukturę płuc. Podczas badania pacjenci wstrzymują powietrze na czas pomiaru. Cała procedura zbliżona jest do procedury anigiografii wieńcowej, z tą różnicą, że środek kontrastowy jest wdychiwany, a nie wstrzykiwany.

### 6.3 Anigiografia wieńcowa

Początki koncepcji synchrotronowej koronarografii sięgają Uniwersytetu Stanforda, a pierwsze badania na ludziach przeprowadzono w Stanford Synchrotron Radiation Laboratory Laboratorium [42].

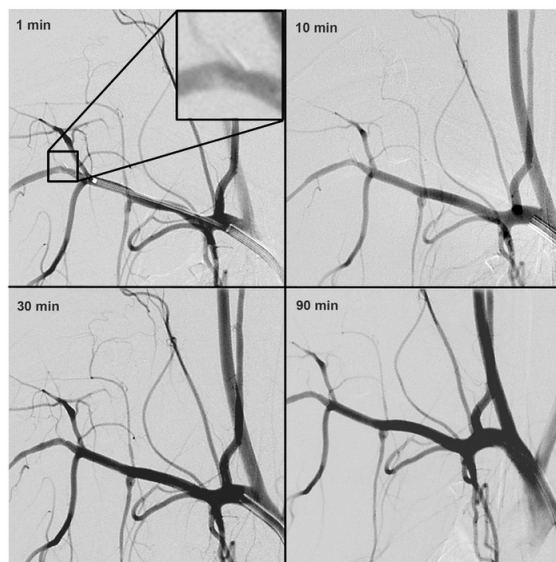
Na świecie w wielu laboratoriach promieniowania synchrotronowego opracowano różne systemy do cyfrowej angiografii subtrakcyjnej (DSA) w trybie subtrakcji energetycznej (dichromografia). Celem pracy jest uwidocznienie tętnic wieńcowych o średnicy do 1 mm przy gęstości masy jodowej  $1 \text{ mg/cm}^2$ , co umożliwia

nieinwazyjne badania poprzez dożylnie podanie środka kontrastowego.

Metoda DSA posiada dwie podstawowe wady:

- poprawny czas T od wstrzyknięcia środka kontrastowego do rozpoczęcia skanów zależy od osobniczego czasu krążenia pacjenta,
- na małe struktury, na których skupia się ta metoda nałożyć się mogą większe mniej interesujące w tym badaniu.

Otrzymane tą metodą anigografy porównano z tymi otrzymanymi konwencjonalnie. Nie są jeszcze jakości niezbędnej dla badań klinicznych, ale wskazują na duży potencjał metody jeżeli wykorzystywany system zostałby zoptymalizowany [43].



Rysunek 14: Seria cyfrowych angiografii subtrakcyjnych w tętnicy podobojczykowej w różnych punktach czasowych [44].

## 7 Zastosowanie promieniowania synchrotronowego w badaniu zabytków

Promieniowanie synchrotronowe pełni coraz bardziej znaczącą rolę w badaniach zabytków. Dostarcza niesłychanie potężną, a równocześnie nieinwazyjną metodę badania zabytków. Ta metoda pozwala na trójwymiarowe przedstawienie objętości i struktury wewnętrznej badanych obiektów. Daje to informacje niezbędne do poprawnej konserwacji zabytków.

Promieniowanie synchrotronowe jest niezastąpionym narzędziem przy badaniu obrazów. Zwykle techniki są bardzo ciężkie przez dużą ilość cienkich warstw farby. Ponadto obrazy posiadają bardzo złożoną strukturę chemiczną przez to, że składają się z różnych substancji mineralnych i organicznych, faz amorficznych i skryształizowanych. W tym zagadnieniu idealne zdają się być metody bazujące na promieniowaniu synchrotronowym.

Jako przykład podać można wykorzystanie promieniowania synchrotronowego, które z powodzeniem zostało wykorzystane do wizualizacji zaginionego obrazu Vincenta van Gogha [45]. Okazuje się, że wielokrotnie ponownie wykorzystywał on zamalowane poprzednio płótna. Ta metoda pozwoliła na otrzymanie obrazu znajdującego się pod powierzchnią obrazu *'Patch of Grass'* (1887) z niespotykaną precyzją. Efekt tej pracy zobaczyć można na rysunku 15.



Rysunek 15: Po lewej obraz: *'Patch of Grass'* Vincent van Gogh. Po prawej fluorescentne mapy otrzymane przy wykorzystaniu promieniowania synchrotronowego, pozwalające na odkrycie ukrytego obrazu.

## Literatura

- [1] Antonella Balerna and Settimio Mobilio. *Introduction to Synchrotron Radiation*, pages 3–28. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, 2015.
- [2] Lie Kong, Ranjith P.G, Jinzhou Zhao, Tharaka Rathnaweera, and Ma Zhaoyang. Tensile behaviors of granite: Grain scale cracking and fracture process zone. 07 2019.
- [3] F. R. Elder, A. M. Gurewitsch, R. V. Langmuir, and H. C. Pollock. Radiation from electrons in a synchrotron. *Phys. Rev.*, 71:829–830, Jun 1947.
- [4] <https://www.nsrrc.org.tw/english/lightsource.aspx>, dostęp: 28.11.2022.
- [5] <https://synchrotron.uj.edu.pl/promieniowanie-synchrotronowe>, dostęp: 28.11.2022.
- [6] Wykład 3 - Propagacja promieniowania jonizującego w ośrodku materialnym: <http://www.if.pw.edu.pl/~pluta/pl/dyd/mtj/Propagacja-promien-jon-w-materii.pdf>, dostęp: 01.02.2023.
- [7] [https://sites.ualberta.ca/~pogosyan/teaching/ASTRO\\_122/lect19/lecture19.html](https://sites.ualberta.ca/~pogosyan/teaching/ASTRO_122/lect19/lecture19.html), dostęp 02.01.2023.
- [8] E. P. J. van den Heuvel. Pulsar magnetospheres and pulsar death. *Science*, 312(5773):539–540, 2006.
- [9] Prezentacja - Promieniowanie synchrotronowe i jego zastosowania: [https://wodna.edu.pl/sites/default/files/media/pliki/2019/prom\\_synchr.pdf](https://wodna.edu.pl/sites/default/files/media/pliki/2019/prom_synchr.pdf), dostęp 01.02.2023.
- [10] <https://leaps-initiative.eu/about/>, dostęp: 28.11.2022.
- [11] <https://leaps-initiative.eu/consortium/>, dostęp 03.01.2023.
- [12] <https://leaps-initiative.eu/consortium/alba/>, dostęp 03.10.2022.
- [13] <https://www.cells.es/en/about/welcome>, dostęp 03.10.2022.
- [14] [https://indico.cern.ch/event/297045/contributions/1658343/attachments/557292/767843/FPerez\\_3GLS\\_AdvanceSchool-oPAC.pdf](https://indico.cern.ch/event/297045/contributions/1658343/attachments/557292/767843/FPerez_3GLS_AdvanceSchool-oPAC.pdf), dostęp 03.01.2023.
- [15] A. S. Schlachter. *Third-Generation Synchrotron Light Sources*, pages 1–22. Springer Netherlands, Dordrecht, 1994.
- [16] [https://www.desy.de/ueber\\_desy/desy/index\\_ger.html](https://www.desy.de/ueber_desy/desy/index_ger.html), dostęp 03.01.2023.
- [17] [https://www.desy.de/research/facilities\\_\\_projects/petra\\_iii/index\\_eng.html](https://www.desy.de/research/facilities__projects/petra_iii/index_eng.html), dostęp 04.01.2022.

- [18] <https://www.diamond.ac.uk/Science/Machine.html>, dostęp 03.01.2023.
- [19] <https://www.elettra.eu/>, dostęp 04.01.2022.
- [20] <https://lightsources.org/lightsources-of-the-world/europe/elettra/>, dostęp 04.01.2022.
- [21] [https://www.fels-of-europe.eu/fel\\_facilities/x\\_ray\\_facilities/fermi/](https://www.fels-of-europe.eu/fel_facilities/x_ray_facilities/fermi/), dostęp 04.01.2022.
- [22] <https://youtu.be/ELtsxPRzVjc>, dostęp 03.01.2022.
- [23] <https://www.esrf.fr/home/Industry/why-use-the-esrf.html>, dostęp 04.01.2022.
- [24] [https://www.xfel.eu/facility/overview/how\\_it\\_works/index\\_eng.html](https://www.xfel.eu/facility/overview/how_it_works/index_eng.html), dostęp 04.01.2022.
- [25] <https://www.ru.nl/felix/about-felix/about-felix/felix-laboratory/>, dostęp 04.01.2022.
- [26] [https://www.helmholtz-berlin.de/forschung/quellen/bessy/forschungshighlights/index\\_en.html](https://www.helmholtz-berlin.de/forschung/quellen/bessy/forschungshighlights/index_en.html), dostęp 04.01.2022.
- [27]
- [28] <https://w3.lnf.infn.it/chi-siamo/?lang=en>.
- [29] [https://w3.lnf.infn.it/wp-content/uploads/2018/07/LNF\\_brochure\\_ENG\\_web1.pdf](https://w3.lnf.infn.it/wp-content/uploads/2018/07/LNF_brochure_ENG_web1.pdf), str. 5, dostęp 04.01.2023.
- [30] <https://www.isa.au.dk/facilities/astrid2/astrid2.asp>, dostęp 04.01.2023.
- [31] <https://leaps-initiative.eu/consortium/isa/>, dostęp 04.01.2023.
- [32] <https://www.maxiv.lu.se/beamlines-accelerators/beamlines/>.
- [33] Raju Kumar. *MAX IV Laboratory: overview*. 04 2018. dostęp przez stronę internetową researchgate.
- [34] [https://www.ptb.de/cms/fileadmin/internet/fachabteilungen/abteilung\\_7/7.1\\_radiometrie/PTB\\_Mitt\\_2015\\_Web\\_ENG.pdf](https://www.ptb.de/cms/fileadmin/internet/fachabteilungen/abteilung_7/7.1_radiometrie/PTB_Mitt_2015_Web_ENG.pdf), dostęp 06.01.2023.
- [35] <https://www.ifj.edu.pl/str/dc/cyklotron.html>, dostęp 06.01.2023.
- [36] <https://www.slacj.uw.edu.pl/pl/cyklotron/>, dostęp 07.01.2023.
- [37] <https://mx.coursera.org/lecture/introduction-particle-accelerators/wigglers-and-undulators-Ff8jD>, dostęp 07.01.2023.

- [38] Emilio Melero García. Synchrotron radiation spectroscopy of molecular dynamics beyond the valence shell. 11 2022.
- [39] New beamlines at SOLARIS : [https://synchrotron.uj.edu.pl/en\\_GB/lista/-/journal\\_content/56\\_INSTANCE\\_EeYNQr99FP1d/1457771/143059252](https://synchrotron.uj.edu.pl/en_GB/lista/-/journal_content/56_INSTANCE_EeYNQr99FP1d/1457771/143059252), dostęp 01.02.2023.
- [40] <http://przyrbwn.icm.edu.pl/APP/PDF/91/a091z4p11.pdf>, dostęp 29.11.2022.
- [41] <https://www.esrf.fr/home/UsersAndScience/Experiments/CBS/ID17/bronchography-lung-structure-and-function-studied-by-k-edge-subtraction-imaging.html>, dostęp 29.11.2022r.
- [42] Zeman HD et al. Rubenstein E, Hofstadter R. Transvenous coronary angiography in humans using synchrotron radiation. *Proc Natl Acad Sci U S A*. 1986;83(24):9724-9728. doi:10.1073/pnas.83.24.9724.
- [43] W.-R. Dix, K. Engelke, W. Graeff, C. Hamm, J. Heuer, B. Kaempf, W. Kupper, M. Lohmann, B. Reime, and R. Reumann. Coronary angiography using synchrotron radiation—studies in human subjects with the system nikos ii. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 314(2):307–315, 1992.
- [44] Johan Lundberg, Stefan Jonsson, and Staffan Holmin. New endovascular method for transvascular exit of arteries and veins: Developed in simulator, in rat and in rabbit with full clinical integration. *PloS one*, 5:e10449, 05 2010.
- [45] Simona Quartieri. *Synchrotron Radiation in Art, Archaeology and Cultural Heritage*, pages 677–695. 01 2015.
- [46] SOLARIS - Machine Status Portal: <http://status.synchrotron.pl/>, dostęp 01.02.2023.
- [47] strona SOLARIS - Nowa orbita dla elektronów: [https://synchrotron.uj.edu.pl/aktualnosci/-/journal\\_content/56\\_INSTANCE\\_ZEhuXSihDJbq/1457771/151922026](https://synchrotron.uj.edu.pl/aktualnosci/-/journal_content/56_INSTANCE_ZEhuXSihDJbq/1457771/151922026), dostęp 04.02.2023.

## A Wywiad z fizykiem akceleratorowym pracującym w synchrotronie SOLARIS

W tej sekcji przedstawione zostały wnioski z wywiadu przeprowadzonego z dr Romanem Panasiem - koordynatorem sekcji utrzymania i optymalizacji wiązki, fizykiem akceleratorowym.

### A.1 Najlepsza część pracy fizyka akceleratorowego

Fizycy cenią sobie różnorodność, z którą wiąże się praca w tym instytucie. Rozumie się to przez możliwość pracy z urządzeniem (mechaniczne podpinanie, mierzenie różnych rzeczy) jak również aspekt pracy związany z fizyką bardziej teoretyczną i obliczeniową, czyli pracę przy komputerze.

W tej pracy możliwy jest też duży samorozwój. Fizycy rozwijają swoją wiedzę w dziedzinach, z których niekoniecznie pochodzą. Sam ekspert, z którym przeprowadzony został wywiad, swój doktorat napisał z optyki atomowej, która znacząco odbiegała od fizyki wykorzystywanej w synchrotronie. Umożliwia to więc, spojrzenie na szersze spektrum zastosowań fizyki i dostarcza wielu nowych doświadczeń. Pokazuje to, że można znaleźć bardzo wiele ciekawych rzeczy na styku różnych dziedzin.

### A.2 Typowy dzień pracy fizyków w SOLARIS

W synchrotronie mają miejsce różne okresy pracy i typowy dzień bardzo zależy od tego w jakim okresie znajduje się teraz synchrotron. W momencie przeprowadzania wywiadu (24.01.2023) synchrotron był w okresie rozruchu po długim shutdownnie. Wiąże się to z dużą ilością testów diagnostycznych, wszystkie systemy są włączane i testowane. W tym czasie ciężko mówić o rutynie, bo codziennie pojawiają się nowe wyzwania. Czas wybudzenia maszyny liczy się w tygodniach.

W okresie shutdownu, wykonuje się natomiast wiele prac związanych z rozbudową, które nie mogły być wykonywane, w okresie, w którym dostępna jest wiązka. Ostatnio miała miejsce rozbudowa całego budynku, co wiązało się z wyburzeniem ściany. Tego rodzaju drgania kompletnie uniemożliwiałyby poprawną pracę urządzenia. Delikatna zmiana pozycji wiązki wpływa na energię wiązki, ze względu na umieszczone monochromatory.

Najbardziej przewidywalnym okresem, przy założeniu oczywiście, że nie ma miejsca żadna awaria, jest czas w którym jest wiązka w synchrotronie. W poniedziałki, w tym okresie mają miejsce tzw. dni maszynowe. Polegają one na tym, że wykonywane są testy i skany maszyny. Są to dni na przetestowanie napisanych skryptów i dni, w których możliwa jest optymalizacja wiązki.

Poza dniami maszynowymi wiązka dostarczana jest dwa razy dziennie, o 8:00 i 20:00, od poniedziałku do piątku i czasem nawet w soboty. Praca ma miejsce w tzw *decay mode*, co oznacza, że wiązka wstrzykiwana jest rano, a następnie powoli zanika. Aktualny status wiązki zobaczyć można na stronie *Machine Status Portal* [46].



Typowo o 8:00 rano dokonywana jest iniekcja, ramping i wiązka dostarczana jest do użytkownika. Operatorzy na zmianie pilnują parametrów wiązki. Istnieją również dyżury pod telefonem, które zapewniają użytkownikom opiekę nad wiązką nawet do 2:00 w nocy. Gdyby nastąpiło jakiekolwiek zdarzenie nadzwyczajne operator może przyjechać na miejsce i interweniować. W przypadku większych błędów następuje interwencja całej grupy specjalistów. Praca w synchrotronie jest zdecydowanie pracą zespołową. Można wyszczególnić sekcje odpowiedzialne za różne sektory pracy maszyny, w przypadku potrzeby zwołania grupy interwencyjnej operator pełni swego rodzaju funkcję koordynatora. Musi poprawnie zdiagnozować i wiedzieć kogo wezwać na pomoc.

W czasie dostępu do wiązki fizycy mogą też pracować nad swoimi pracami badawczymi. Fizycy z tej instytucji biorą udział w konferencjach i aktywnie publikują prace. W tym czasie piszą często również skrypty do analizy, mają wiele seminariów naukowych i spotkań. Poza tym koordynatorzy biorą udział w planowaniu zakupów i przetargów.

Każda linia badawcza ma swoich opiekunów i zespół, który przy niej pracuje. Jedna linia jest komercyjna, reszta jest wykonana na zasadzie konkursowej i jeżeli ktoś chce przeprowadzić jakieś badania, na konkretnej linii może się do takiego konkursu zgłosić. Ciągłe napływa więcej zgłoszeń niż jest miejsc, zainteresowanie tym instytutem i jego możliwościami jest więc znaczne. Użytkownicy są zarówno z Polski jak i z zagranicy.

### A.3 Zdarzenia nadzwyczajne

Zdarzenia nadzwyczajne mogą być zarówno zewnętrzne jak i wewnętrzne. Zdarzeniem takim może być na przykład zanik sieci zewnętrznej. Pomimo tego, że istnieją systemy, które podtrzymują kluczowe segmenty, zasilacze magnesów nie są przez nie wspierane. Najwięcej prądu zużywane jest przez magnesy, z których składa się 12 sekcji zakrzywiających. W każdej sekcji umieszczone są magnesy dipolowe i same magnesy dipolowe operują na prądach rzędu 700 A.

Błąd może być spowodowany również przez dowolny zasilacz jakiegoś magnesu. Jakaś część instalacji może się przepalić. Podczas jednego ze zdarzeń nadzwyczajnych, wiązka w sposób niekontrolowany, na skutek awarii wypaliła dziurę w komorze. Spowodowało to utratę próżni, a naprawa tej awarii zajęła tygodnie.

Nie wszystkie błędy wiążą się z utratą wiązki, czasem może się okazać, że ze względu na fałszywy alarm systemu bezpieczeństwa blokuje się cała linia badawcza. Paleta możliwych scenariuszy jest więc bardzo szeroka i ciężko jest przewidzieć pojawienie się jakiegoś błędu. Niektóre elementy również ze względu na to ile są używane mogą się po prostu zużyć, ale pracownicy starają się je na bieżąco wymieniać, by do tego nie dopuścić.

#### **A.4 Co wyróżnia synchrotron SOLARIS na tle innych ośrodków naukowych?**

Najwięcej potencjału najprawdopodobniej leży w samych metodach pomiaru na liniach badawczych, które mogą być unikalne. Dwie z nich mogą szczyć się diagnostyką nieporównywalną na skalę światową. Jest to również jedyny synchrotron w Europie Środkowo-Wschodniej. Jest to też stosunkowo młody synchrotron. Aparatura jest młoda i bliźniacza z ośrodkiem MAX IV w Lund. Jest duża możliwość rozwoju. Są dalej wolne miejsca na linie badawcze. Z każdej sekcji zakrzywiającej możliwe jest stworzenie dwóch linii badawczych, jest więc miejsce na aż 24 linie. Zwiększa się również personel, co wiąże się z dużym zainteresowaniem tym ośrodkiem.

Większość ośrodków badawczych jest umiejscowionych na granicy miasta, co sprawia że bardzo utrudniony jest dojazd do tych placówek. Dojazd do synchrotronu jest prosty. Synchrotron nie jest bardzo oddalony od centrum Krakowa.

#### **A.5 Ciekawe badania wykonywane w SOLARIS**

Z ciekawych komercyjnych badań wykonywanych w synchrotronie SOLARIS wymienić można badania paliw, badania materiałów opon.

#### **A.6 Szychty w synchrotronie SOLARIS**

W tygodniu na każdej zmianie pracuje dwóch operatorów. Są dwie zmiany oraz dyżur pod telefonem w nocy. Osoby odpowiedzialne z każdej sekcji, wyznaczone są również na dyżur pod telefonem w przypadku jakichkolwiek zdarzeń nadzwyczajnych. Szychty te są kluczowe dla utrzymania poprawnych parametrów wiązki, co umożliwi użytkownikom możliwe stabilne warunki pracy.

#### **A.7 Współpraca z innymi instytucjami z konsorcjum LE-APS**

Uczestnictwo w tym konsorcjum wiąże się z możliwością wymiany doświadczeń i sposobów na rozwiązanie pojawiających się problemów. Taka wymiana doświadczeń i wiedzy jest bardzo dobra.

Możliwe są wyjazdy krótkie, na około 2 tygodnie do innych instytucji z tego konsorcjum. Dłuższe wymiany na ten moment się nie zdarzały. Ze względu na kameralność synchrotronu SOLARIS dłuższe wyjazdy są mniej możliwe.

#### **A.8 Studenci w synchrotronie SOLARIS**

Praktyki ogłaszane są co roku. Zwłaszcza poszukiwani są studenci fizyki i studenci kierunków inżynierskich, z różnych dziedzin zarówno elektrotechniki i informatyki. Ośrodek stale się rozwija i ręce do pracy są ciągle potrzebne.

Studenci Fizyki Komputerowej najczęściej mogą być potrzebni przy pisaniu skryptów, przy analizie danych. Przy dłuższych praktykach można brać czynny

udział przy różnego typu bardziej złożonych operacjach i asystować. Jest sporo pracy z systemem, można rozwijać GUI dla operatora podczas szycht.

## A.9 Wizja synchrotronu SOLARIS za 10 lat

Planowana jest rozbudowa linii badawczych. Planowana jest też zmiana trybu z *decay mode* na *top up*. Do tego konieczna byłaby kompletna przebudowa liniaka. Grupa synchrotronu SOLARIS pracuje również przy projekcie PolFEL czyli pierwszego polskiego lasera na swobodnych elektronach. Grupa SOLARIS odpowiada na diagnostykę tego projektu. W perspektywie 10 lat możliwa jest rozbudowa liniaka i przejście do trybu *top up*. Mogą pojawić się również undulatory nadprzewodzące.

Aktualnie trwają prace nad wprowadzeniem systemu szybkiej korekcji wiązki elektronów. Dotychczas przeprowadzane jest to raz na trzy sekundy, co przekłada się na zmianę ustawień magnesów z taką częstotliwością. Pozwala to na korekcję wiązki, na ten moment jest to za wolne. Praca nad systemem szybkiej korekcji (z częstotliwością 10 GHz), pozwoliłaby na poprawę parametrów wiązki. Oznaczałoby to przeciwdziałanie różnym zaburzeniom, które mogą pochodzić na przykład z undulatorów [47].

## A.10 Wiadomość do młodych fizyków

Największe osiągnięcia są związane ze współpracą dużej grupy ludzi. Dobrze jest też nie trzymać się sztywno jednej dziedziny. Należy być elastycznym i mieć otwarty umysł. Najwięcej ciekawych rzeczy można nauczyć się na styku różnych dziedzin.