

**Rada do Spraw Atomistyki**

**STRATEGIA  
ROZWOJU ATOMISTYKI  
W POLSCE**

**Warszawa, grudzień 2006 roku**



## SPIS TREŚCI

	TYTUŁ	Strona
1.	WPROWADZENIE.....	– 5
2.	FIZYKA ODDZIAŁYWAŃ ELEMENTARNYCH I ASTROFIZYKA CZĄSTEK .....	– 6
3.	FIZYKA JĄDROWA .....	– 12
4.	METODY JĄDROWE W FIZYCE FAZY SKONDEN- SOWANEJ .....	– 18
5.	CHEMIA JĄDROWA I RADIACYJNA .....	– 25
6.	ENERGETYKA JĄDROWA .....	– 29
7.	POZAENERGETYCZNE TECHNIKI JĄDROWE .....	– 36
8.	MEDYCZNE ZASTOSOWANIA PROMIENIOWANIA JONIZUJĄCEGO .....	– 39
9.	BEZPIECZEŃSTWO JĄDROWE I OCHRONA RA- DIOLOGICZNA .....	– 46
10.	PODSUMOWANIE .....	– 52



# 1. WPROWADZENIE

Niniejsze opracowanie powstało w oparciu o materiały przygotowane przez Komisję Rady do Spraw Atomistyki, przy czym wykorzystano również stanowiska członków Rady do Spraw Atomistyki wyrażone w korespondencji do Prezesa Państwowej Agencji Atomistyki i na posiedzeniu Rady w dniu 24 listopada 2006 r.

Dyscypliny objęte wspólną nazwą „atomistyka” dotyczą zarówno badań poznawczych służących rozszerzeniu wiedzy o wszechświecie i po których nie spodziewamy się na ogół aplikacji praktycznych, jak i badań podejmowanych w celu ich późniejszego wykorzystania w praktyce (na przykład dla diagnostyki i terapii medycznej), nie mówiąc o tematach wyłącznie ograniczonych do zastosowań wyników badań podstawowych. Granica pomiędzy badaniami poznawczymi i ich praktycznym wykorzystaniem bywa trudna do zdefiniowania, a analiza szczegółowych opracowań Komisji pozwala na spostrzeżenie, że podział taki bywa sztuczny i wyraźnie krępuje autorów.

W omówieniu poszczególnych dyscyplin reprezentowanych przez Komisję Rady autorzy – szefowie Komisji, działając w porozumieniu z pozostałymi członkami, a więc przedstawiając najszersze stanowisko swoich środowisk, starali się wyodrębnić:

- stan obecny (tematy, instytucje, liczby pracowników, kształcenie i rozwój kadry, współpraca międzynarodowa), w tym bardziej znaczące osiągnięcia,
- plany na lata najbliższe i w dalszym horyzoncie czasowym (główne tematy badawcze, główne inwestycje, możliwości aplikacyjne, potrzeby kadrowe oraz przedstawione odrębnie orientacyjne koszty).

Równolegle do niniejszego opracowania ich autorzy przygotowywali projekty nowych struktur organizacyjnych (konsorcja, wspólne przedsięwzięcia inwestycyjne itp.). W niniejszym opracowaniu nie eksponowano tego rodzaju projektów wychodząc z założenia, że proponowane struktury winny być wtórne do przedstawionej strategii.

W rozdziale 10 („Podsumowanie”) autorzy poszczególnych rozdziałów przedstawili, w formie streszczeń, główne kierunki badań oraz zestawili planowane tematy badawcze, wraz z oszacowaniem ich kosztów, wyróżniając odrębnie większe przedsięwzięcia inwestycyjne.

W Polsce nie ma obecnie przemysłu jądrowego, który w państwach realizujących programy energetyki jądrowej stwarza zapotrzebowanie na konkretne rozwiązania naukowe i techniczne oraz wspiera prace badawcze, czasem bardzo luźno związane z podejmowanymi przedsięwzięciami przemysłowymi, a ponadto - znacząco finansuje kształcenie i rozwój kadr w zakresie szeroko rozumianej atomistyki. Dyskutowany od początku 2005 roku powrót Polski do zaniechanego niegdyś programu energetyki jądrowej stworzyłby więc środowisko dla rozwoju polskiej atomistyki drastycznie nowe, zarówno pod względem podejmowanych tematów, współpracy międzynarodowej oraz programów i zakresu kształcenia, jak i skali wsparcia finansowego tych działań. Brak wyraźnie zdefiniowanych planów państwa odnośnie krajowego programu energetyki jądrowej utrudnia tworzenie strategicznych planów rozwoju niektórych gałęzi atomistyki, nie tylko w zakresie samych technologii jądrowych.

## 2. FIZYKA ODDZIAŁYWAŃ ELEMENTARNYCH I ASTRO-FIZYKA CZĄSTEK

### Stan obecny

Początki Fizyki Oddziaływań Elementarnych (FOE) w Polsce sięgają lat 30. ubiegłego wieku i związane były z badaniami promieniowania kosmicznego. Badania te, wznowione po II wojnie światowej w Krakowie, Warszawie i Łodzi, dały początek burzliwemu rozwojowi powojennej FOE w Polsce. Stopniowo zaczęły powstawać grupy doświadczalne i teoretyczne oraz zaczęła się rozwijać współpraca międzynarodowa w dziedzinie badań akceleratorowych i teoretycznych, oparta przede wszystkim na kontaktach z Europejską Organizacją Badań Jądrowych (CERN) w Genewie. Dynamiczny rozwój badań w Polsce otworzył drogę do formalnego związku z CERN – Polska została członkiem obserwatorem Organizacji w roku 1963, a członkiem regularnym w 1991 r. Polskie zespoły uczestniczą również w dużych eksperymentach przy akceleratorach w DESY (Niemcy), KEK (Japonia) oraz w BNL (USA), jak również w eksperymentach neutrinowych i astrofizycznych. Istotne jest również zaangażowanie w przygotowanie do budowy nowego zderzacza elektron-pozyton (ILC). Jednym z najbardziej wartościowych osiągnięć polskiej FOE lat 60., 70. i 80., jest wykształcenie w Krakowie i Warszawie, dzięki pracy badawczej i dydaktycznej prowadzonej w polskich instytucjach naukowych, wysokiej klasy kadry naukowej i zbudowanie bardzo silnych szkół naukowych. Te silne ośrodki w miarę upływu czasu, oprócz własnego rozwoju, przyczyniły się do powstania grup teoretycznych i doświadczalnych w wielu uczelniach i instytutach naukowych w Polsce. Obecnie (2006 rok) centra zaangażowane w badania FOE i liczby pracowników (naukowych i naukowo-technicznych oraz doktorantów) zajmujących się tą tematyką (T – prace teoretyczne, D – prace doświadczalne), to:

- Uniwersytet Warszawski – 20T, 39D,
- Instytut Problemów Jądrowych – 9T, 58D,
- Politechnika Warszawska – 12D,
- Instytut Fizyki Jądrowej PAN – 17T, 84D,
- Uniwersytet Jagielloński – 25T, 10D,
- Akademia Górniczo-Hutnicza – 36D,
- Uniwersytet Łódzki – 7T, 11D,
- Uniwersytet Śląski – 14T, 4D,
- Uniwersytet Wrocławski – 9T,
- Akademia Świętokrzyska – 5T, 6D.

Łącznie powyższa lista obejmuje 10 instytucji oraz 366 pracowników (106T i 260D).

**Prace eksperymentalne** w FOE pod wieloma względami trudno porównywać z badaniami doświadczalnymi w innych dziedzinach fizyki. Z uwagi na skalę (i koszt) podstawowych narzędzi: gigantycznych akceleratorów i ogromnych detektorów, eksperymenty mogą być prowadzone tylko w wielkich współpracach międzynarodowych. Projekt, budowa aparatury i wreszcie analiza danych i publikacja wyników to proces długofalowy, a wszystkie publikacje eksperymentalne firmują bardzo liczne grupy współautorów z wielu ośrodków naukowych. Z tej specyfiki badań doświadczalnych wynika, że osiągnięcia polskie trzeba zdefiniować jako uznany przez środowisko

międzynarodowe wiodący wkład polskich zespołów w projekt i uruchomienie eksperymentu i/lub widoczną inicjatywę w podjęciu tematu, przeprowadzenie analizy danych i ich opublikowanie. Lista takich osiągnięć, obejmująca również osiągnięcia aparaturowo-technologiczne (przede wszystkim, choć nie tylko, w ramach projektów CERN-owskich), zawiera między innymi następujące pozycje:

- komory iskrowe, proporcjonalne i dryfowe, dla eksperymentów WA3, NA11, NA32, DELPHI, BRAHMS, LHCb,
- kalorymetr uzupełniający i monitor świetlności w eksperymencie ZEUS,
- krzemowe detektory torów i wierzchołków oddziaływań dla eksperymentów NA32, Maer II, DELPHI, PHOBOS, BELLE, ATLAS,
- system wstępnej selekcji przypadków dla eksperymentu CMS,
- pierwsza ewidencja naruszenia symetrii zapachowej morza kwarkowego (eksperyment NMC),
- badania obszaru małych  $x$  w eksperymencie H1,
- poszukiwanie „nowej fizyki”, w szczególności oddziaływań punktowych i produkcji stanów rezonansowych  $I_q$  (leptokwarków) w eksperymencie ZEUS,
- udział w odkryciu nowego stanu materii w eksperymencie PHOBOS,
- zainicjowanie badania hadronowych rozpadów mezonu B w eksperymencie BELLE.

W **pracach teoretycznych** w **FOE** trzeba uwzględnić dwa okresy. W latach 70. i 80. bardzo istotny i szeroko uznany w świecie był wkład polskich prac teoretycznych w badania oddziaływań silnych. W ostatnim dwudziestoleciu polskie badania poświęcone były z jednej strony precyzyjnym testom teorii oddziaływań silnych i elektroślabych (Modelu Standardowego), wymagającym dużej pracy teoretycznej, z drugiej zaś poszukiwaniu głębszej teorii wyjaśniającej pewne paradoksy Modelu Standardowego. W obu tych dziedzinach polskie prace odgrywają wiodącą rolę w świecie. Jako przykłady takich badań można wymienić:

- podanie fenomenologicznych modeli procesów produkcji cząstek,
- podanie metod teoretycznych do badania procesów głęboko nieelastycznych i struktury hadronów oraz fotonów w chromodynamice kwantowej,
- obliczanie poprawek silnych do procesów zachodzących pod wpływem oddziaływań słabych,
- zbadanie struktury hadronów przy małych wartościach zmiennej  $x$  Björkena,
- zaproponowanie nowych hipotez dotyczących rozszerzenia Modelu Standardowego,
- analiza teoretyczna możliwości odkrycia supersymetrii lub innych efektów świadczących o konieczności rozszerzenia Modelu Standardowego w doświadczeniach w LHC i w przyszłym akceleratorze liniowym.

Do współpracy w wielkich międzynarodowych eksperymentach przyjmowane są tylko najlepsze zespoły, uczestniczące we wszystkich etapach przedsięwzięcia: w projekcie eksperymentu, w budowie wydzielonej części aparatury oraz w analizie danych i ich interpretacji. Polskie zespoły uczestniczyły w najważniejszych eksperymentach w CERN, w DESY w Hamburgu, w eksperymentach w B-factory w KEK (Japonia) i na akceleratorze RHIC (Relativistic Heavy Ion Collider) w Brookhaven National Laboratory (USA). Obecność polskich zespołów była i jest istotna również w działających już i projektowanych eksperymentach neutrinowych. Polacy uczestni-

czyli w projektowaniu i w budowie aparatury do eksperymentów, które trwały przynajmniej przez część dekady 1996-2006, a mianowicie DELPHI, NA48, NA49, NA50, WA98 i COMPASS w CERN, ZEUS i H1 w DESY, BELLE w KEK, PHOBOS, STAR i BRAHMS w BNL, AUGER w Pierre Auger Observatory, ICARUS w Gran Sasso oraz ALICE, ATLAS, CMS i LHCb – eksperymenty przyszłego akceleratora LHC w CERN. Imponująca jest również lista publikacji powstałych z udziałem Polaków w eksperymentach FOE w ww. latach.

W badaniach podstawowych o międzynarodowym zasięgu są dwa podstawowe parametry określające rangę wyników:

- liczba publikacji w czasopiśmie o międzynarodowym zasięgu,
- liczba cytowań tych artykułów.

Choć można mieć zastrzeżenia, co do znaczenia różnych ilościowych analiz cytawalności, to nie ulega wątpliwości, że prace niecytowane nie odgrywają roli w rozwoju danej dyscypliny. W ostatnim dziesięcioleciu ukazało się blisko 2000 prac teoretycznych polskich autorów w dziedzinie FOE, a całkowita liczba ich cytowań przekracza 40000.

**Możliwości aplikacyjne** wyników badań podstawowych w FOE, to:

- zastosowanie techniki detektorów pozycyjnych o dobrej rozdzielczości przestrzennej i czasowej, wyposażonych w czułą i szybką elektronikę odczytu, w dziedzinie krystalografii, biologii radiacyjnej, medycynie, neurobiologii itp.,
- rozwój techniki lekkich materiałów kompozytowych i wykorzystanie jej np. w medycynie,
- rozwój technologii układów scalonych dużej skali integracji (VLSI ASIC) i programowalnych matryc logicznych (FPGA) w przemyśle elektronicznym,
- rozwój centrów obliczeniowych z komputerami dużej mocy oraz technologii „gridowej”, pozwalającej wykorzystywać rozproszone zasoby sieciowe, pamięciowe i obliczeniowe jako jeden system.

**Planowane główne kierunki badawcze**

Przedstawione osiągnięcia polskich badaczy w dziedzinie FOE, organizacja badań, dotychczasowy potencjał eksperymentalny, silne zespoły teoretyczne i ustalona renoma w środowisku międzynarodowym pozwalają na stwierdzenie, że ten kierunek w polskiej fizyce zajmuje wyjątkowo wysoką pozycję. Zaproszenie polskich grup do udziału w eksperymentach na LHC w CERN jest potwierdzeniem silnej pozycji międzynarodowej polskich specjalistów. Polskie grupy doświadczalne i teoretyczne biorą również aktywny udział w projektach prac planowanych na lata późniejsze. Szczególna uwaga jest skoncentrowana na ewentualnym zwiększeniu świetlności i energii wiązek w LHC oraz na budowie liniowego zderzacza elektronów i pozytonów ILC (International Linear Collider) .

Należy podkreślić coraz silniejszy związek FOE z kosmologią i astrofizyką, które w znacznym stopniu stają się integralną jej częścią; ponadto część badań w FOE zazębia się z badaniami w fizyce jądrowej.

Generalnie można wyodrębnić trzy kierunki strategicznego rozwoju polskiej FOE, zgodne ze strategicznymi kierunkami rozwoju światowej FOE: program LHC w CERN, fizykę neutrin i astrofizykę cząstek oraz program następnego po LHC globalnego akceleratora cząstek, którym będzie najprawdopodobniej wspomniany ILC. Tendencją powinno być tworzenie silnych zespołów odgrywających istotną rolę w prowadzonych na świecie eksperymentach. Zapewnienie niezbędnej „masy kry-



tycznej" (liczby naukowców, właściwego zaplecza technicznego oraz finansowego) zespołów badawczych jest niezwykle ważne i powinno stanowić istotne kryterium wyboru właściwych aktywności. Dotyczy to zarówno prac kontynuowanych (np. program LHC) jak i nowych inicjatyw. Koncentracja badań w FOE musi jednak odbywać się w sposób nie zagrażający ich poziomowi naukowemu.

Pierwszoplanowe znaczenie będzie miało uczestnictwo polskie w programach naukowych LHC w CERN; polskie zespoły naukowe biorą udział w przygotowaniu czterech głównych eksperymentów przy LHC: ALICE, ATLAS, CMS i LHCb. Akcelerator LHC latach 2008-2010 dostarczy danych, które powinny pozwolić na odkrycia o fundamentalnym znaczeniu poznawczym: mechanizmów generacji masy (np. mechanizm Higgsa) oraz dowodów doświadczalnych efektów poza Modelem Standardowym. Badania doświadczalne prowadzone przez polskie zespoły naukowe będą miały, tak jak dotychczas, silne wsparcie w polskich badaniach teoretycznych. W latach 2008-2010 program naukowy LHC powinien mieć w Polsce priorytet. Uważamy, że utrzymanie polskiego udziału w 4 eksperymentach w ww. okresie jest bardzo ważne.

Wspomniany okres będzie w dużym stopniu poświęcony testowaniu złożonej aparatury detekcyjnej, w tym także tej wykonanej przez zespoły polskie. Udział polskich ekspertów w naświetleniach, analizie, testach i ew. naprawach będzie niezbędnym. Będzie to powodowało wzrost liczby fizyków (w tym doktorantów), przede wszystkim pracujących nad analizą danych z LHC. Pod koniec tego okresu podstawowy wysiłek badawczy będzie polegał na „rutynowym” zbieraniu danych i ich analizie. Lata 2011-2016 będą okresem zwiększania precyzji danych z LHC. Jednocześnie okres ten może charakteryzować się przepływem części polskiego personelu w kierunku budowy aparatury w dwóch pozostałych kierunkach: ILC i fizyki neutrin oraz astrofizyki cząstek z kosmologią. W latach 2013-2016 będzie podejmowana decyzja o ewentualnej rozbudowie LHC poprzez zwiększenie jego świetlności (SLHC) lub zwiększeniu energii (DLHC), oraz związana z nią decyzja o modernizacji układów doświadczalnych. Ten proces będzie zależał od uzyskanych wyników z LHC oraz podejmowanych w tym samym czasie ustaleń co do budowy ILC lub innego nowego akceleratora globalnego. Już obecnie w pracach teoretycznych dotyczących przyszłych pomiarów, jak i w pracach badawczo-rozwojowych nad elementami akceleratora i przyszłych detektorów, uczestniczą fizycy i inżynierowie z Krakowa, Łodzi i Warszawy. Równolegle tworzą się międzynarodowe zespoły mające na celu zaprojektowanie przyszłych spektrometrów. Polskie środowisko naukowe FOE powinno aktywnie uczestniczyć w tym procesie.

W latach 2008-2016 będzie wzrastała rola eksperymentów w dziedzinie astrofizyki cząstek i w badaniu oddziaływań neutrin. Przełomowe odkrycie oscylacji neutrin pod koniec lat dziewięćdziesiątych oraz burzliwy rozwój astrofizyki cząstek z kosmologią w tym samym okresie spowodowały szybki wzrost tych badań także w Polsce. Dziedziny te wymagają coraz bardziej kompleksowych i kosztownych eksperymentów. Polską społeczność, zajmującą się doświadczalną i teoretyczną fizyką neutrin, stanowią współpracujące z sobą grupy z Warszawy, Krakowa, Katowic i Wrocławia. Wszystkie te grupy uczestniczą w przygotowaniu eksperymentu ICARUS w Gran Sasso, ponadto fizycy z Warszawy biorą udział w japońskim programie badawczym (eksperymenty SuperKamiokande, K2K i T2K), zaś fizycy z Krakowa w eksperymencie Borexino. W ramach koncentracji badań celowe jest dołączenie do eksperymentu T2K pozostałych polskich zespołów i ich skoordynowany udział w przygotowaniu elementów detektora. Intensywne prace konstrukcyjne przypadną na lata 2007-2008, a zbieranie danych rozpocznie się w 2009 roku. Polscy fizycy

uczestniczą obecnie w kilku ważnych eksperymentach astrofizycznych. Prawdopodobnie należałoby skoncentrować wysiłki na 2-3 dużych eksperymentach, wśród których powinny się znaleźć Pierre Auger Observatory, zajmujący się badaniem wysokoenergetycznych kaskad, teleskopy dla obserwacji fotonów w zakresie TeV, HESS/MAGIC, oraz polski eksperyment zajmujący się badaniem rozbłysków optycznych i gamma "π of the Sky".

Polskie środowisko fizyki neutrin i astrofizyki cząstek dyskutuje o stworzeniu wysokiej klasy podziemnego laboratorium badawczego w kopalni miedzi w Sieroszowicach koło Lubina. Panują tam szczególne, unikatowe na skalę europejską warunki do takich badań – szczególnie niskie tło naturalne i osłona od promieniowania kosmicznego. Projekt ten mógłby nadać dużą rangę tym badaniom w Polsce. Budowa laboratorium w Sieroszowicach powinna być rozważona w kontekście umiędzynarodowienia tej inicjatywy i zapewnienia istotnego wkładu finansowego z Unii Europejskiej i innych zainteresowanych krajów. Inicjatywa ta jest koordynowana ze środowiskiem fizyki jądrowej.

Przedstawione wyżej kierunki priorytetowe nie wyczerpują całości polskich badań w FOE. Polskie zespoły uczestniczą w kilku eksperymentach w CERN – COMPASS, NA49, które związane są z programem naukowym SPS. Eksperymenty te mogą być kontynuowane po roku 2010; decyzje o dalszym udziale zespołów polskich w programie SPS będą musiały być podjęte w okresie 2008-2010.

Zespół polski uczestniczy też w eksperymencie BELLE przy fabryce KEKB w Japonii. W latach 2009-2011 rozważany jest projekt rozbudowy akceleratora do SuperKEKB i odpowiednia rozbudowa układu detekcyjnego. W okresie 2008-2010 powinna zostać podjęta w Japonii decyzja o realizacji tego projektu; należy oczekiwać również podjęcia decyzji dotyczącej udziału Polski w tym projekcie.

Obecnie znacząca grupa fizyków polskich uczestniczy w programie naukowym akceleratora HERA w ośrodku DESY k/Hamburga. Akcelerator HERA nie będzie już zbierał danych w latach 2008-2016, ale część fizyków będzie zapewne kontynuowała analizę danych. Udział polskich zespołów w programie naukowym zderzeń relatywistycznych ciężkich jonów przy akceleratorze RHIC w Brookhaven (USA) już zaowocował wieloma ciekawymi wynikami naukowymi, przy czym zbieranie danych będzie kontynuowane po roku 2009.

Dla efektywnego udziału w przygotowaniach, konstrukcji i analizie danych ww. eksperymentów potrzebna jest wspólna lokalna infrastruktura, zwłaszcza komputerowa - jej systematyczne odnawianie powinno zostać uwzględnione w wieloletnim programie strategicznym FOE. Ponadto powinno się przewidywać odnowę bazy pomiarowej i narzędziowej polskich laboratoriów (stanowisk pomiarowych szybkiej elektroniki, narzędzi programowania i symulacji). Dysponowanie nowoczesną, ciągle uaktualnianą infrastrukturą w laboratoriach polskich jest nie tylko istotne dla realizacji badań z FOE i możliwości włączania się w badania światowe, ale także ma ogromne znaczenie edukacyjne (wykształcenie studentów i doktorantów).

### **Potrzeby w zakresie kształcenia i rozwoju kadry**

Przyszłość FOE zależy od dobrze wyszkolonej kadry doktorantów i najmłodszych pracowników naukowych. Kształcenie doktorantów odbywa się głównie na Studiach Doktoranckich przy szkołach wyższych i instytutach badawczych. Obecny poziom ich finansowania powoduje, że są one atrakcyjne tylko dla nielicznych absolwentów fizyki. Trzeba zmienić sposób i poziom ich finansowania. Należałoby tu uwzględnić oferty edukacyjne CERN dla studentów i doktorantów zarówno z fizyki jak i z dziedzin technicznych. Studia w CERN dają możliwość bezpośredniego dostępu

do wiodącej fizyki i technologii, bez zrywania łączności z krajem. Obecnie kilka krajów członkowskich CERN finansuje dodatkowe stypendia dla swoich studentów i doktorantów. Takie dodatkowe finansowanie należy również zapewnić w Polsce (finansowanie programów FOE omówiono w rozdziale 10. PODSUMOWANIE).

### 3. FIZYKA JĄDROWA<sup>1</sup>

#### Stan obecny

Polscy fizycy jądrowi prowadzą badania podstawowe, których rozwój jest ważny zarówno ze względów poznawczych, jak i z uwagi na późniejsze zastosowania oraz rozwój kadry naukowej, mogącej stanowić krajowe zaplecze konsultacyjno-wdrożeniowe technik jądrowych. Instytucje naukowe, realizujące badania naukowe z fizyki jądrowej, to:

- Instytut Fizyki Jądrowej im. Henryka Niewodniczańskiego Polskiej Akademii Nauk (IFJ PAN),
- Instytut Problemów Jądrowych im. Andrzeja Sołtana,
- Uniwersytet Jagielloński – Wydział Fizyki, Astronomii i Informatyki Stosowanej,
- Uniwersytet Warszawski
  - Wydział Fizyki,
  - Środowiskowe Laboratorium Ciężkich Jonów,
- Uniwersytet Marii Curie-Skłodowskiej – Wydział Matematyki, Fizyki i Informatyki,
- Politechnika Warszawska – Wydział Fizyki,
- Akademia Górniczo-Hutnicza im. Stanisława Staszica – Wydział Fizyki i Informatyki Stosowanej,
- Uniwersytet Śląski – Wydział Fizyki,
- Uniwersytet Łódzki – Wydział Fizyki,
- Uniwersytet Zielonogórski – Wydział Fizyki i Astronomii,
- Akademia Świętokrzyska – Wydział Matematyczno-Przyrodniczy,
- Uniwersytet Wrocławski – Wydział Fizyki i Astronomii.

Problematyka badawcza (prace teoretyczne i doświadczalne) w zakresie badań podstawowych dotyczy następujących obszarów:

- struktura jąder atomowych i oddziaływania międzynukleonowe (jądra egzotyczne, jądra w warunkach ekstremalnych, struktura stanów wzbudzonych i procesy słabe),
- materia jądrowa (plazma kwarkowo-gluonowa), materia hadronowa.

Eksperymentalne prace badawcze prowadzone są na akceleratorach SIS w GSI Darmstadt i COSY w FZJ w Jülich w Niemczech, GANIL w Caen, Francja, ALPI w Legano, Włochy oraz JYFL w Jyväskylä, Finlandia, jak i na akceleratorach Zjednoczonego Instytutu Badań Jądrowych w Dubnej. Krajowe projekty eksperymetalne oparte są na akceleratorze w Środowiskowym Laboratorium Ciężkich Jonów Uniwersytetu Warszawskiego. Jednocześnie polscy fizycy biorą udział w pracach przygotowawczych projektu FAIR w Darmstadt i SPIRAL 2 w Caen. Badania w zakresie teoretycznej fizyki jądrowej mają charakter rozproszony. Na uwagę zasługują zwłaszcza prace teoretyczne dotyczące jąder egzotycznych, w tym jąder super-ciężkich. Polscy fizycy-teoretycy odgrywają istotną rolę w pracach centrum teoretycznych badań jądrowych ECT w Trento.

Liczba pracowników naukowych zaangażowanych w poszczególnych projektach fizyki jądrowej wynosi ok. 150 osób.

---

<sup>1</sup> Ze względu na specyfikę zagadnień fizyki plazmy przedstawiono je oddzielnie w drugiej części tego rozdziału.

## **Planowane główne tematy badawcze**

Największe zainteresowanie polskich fizyków jądrowych budzi projekt FAIR – *Facility for Antiproton and Ion Research* – w GSI w Darmstadt. 80% kosztów programu (wynoszących 950 mln €) pokrywa rząd niemiecki. Badania naukowe obejmą pięć dyscyplin fizyki, stanowiących filary FAIR: 1) fizyka struktury i astrofizyka jądrowa z użyciem wiązek radioaktywnych, 2) fizyka hadronów z wiązkami antyprotonów, 3) materia hadronowa o bardzo wysokiej gęstości, 4) fizyka plazmy przy bardzo wysokich ciśnieniach i wysokiej temperaturze, 5) fizyka atomowa i zastosowania. W FAIR wykorzystane zostaną najnowocześniejsze rozwiązania techniczne, co pozwoli na jednoczesne prowadzenie szeregu eksperymentów i programów badawczych przez różne zespoły. Dzięki swojej wszechstronności, FAIR stanowić będzie kluczowy ośrodek badawczy europejskiej fizyki jądrowej następnej dekady XXI wieku.

Drugim programem, w którym zaangażowana jest spora część społeczności fizyków polskich, jest projekt SPIRAL 2 (*Systeme de Production d'Ions Radioactifs Accélérés en Ligne 2*) w GANIL w Caen. SPIRAL 2 jest projektem francuskim (finansuje go rząd francuski w wysokości 135 mln €), ale o wymiarze europejskim. Do wytwarzania wiązek radioaktywnych wykorzystany zostanie akcelerator liniowy niskich energii. SPIRAL 2 rozpocznie pracę w 2011 roku i będzie dostarczał wiązki radioaktywne w oparciu o metodę ISOL (*Isotope Separation On-Line*) do badań struktury jądrowej i astrofizyki jądrowej, a także w badaniach (nowych) symetrii. Projekt ten jest prekursorem dużego europejskiego projektu EURISOL, który przewidziany jest około roku 2016.

Możliwości oferowane fizyce jądrowej w niedalekiej przyszłości przez akcelerator LHC w CERN będą wykorzystywane przez zastosowanie detektorów ALICE, CMS i ATLAS. Tematyka badań będzie dotyczyć badań plazmy kwarkowo-gluonowej powstającej w zderzeniach relatywistycznych (TeV) ciężkich jonów. Obecnie podobne prace prowadzone są na akceleratorze RHIC w USA, lecz w zakresie energii znacznie niższych od planowanych dla LHC.

Wśród nieakceleratorowych eksperymentów fizyki jądrowej należy wymienić poszukiwania podwójnego bezneutrinowego rozpadu beta. Eksperymenty tego typu, wymagające podziemnych laboratoriów z bardzo niskim poziomem naturalnego tła, mogą udzielić odpowiedzi na temat podstawowych własności neutrin. Zainteresowanie polskich fizyków jądrowych koncentruje się obecnie na planach udziału w budowie detektorów SuperNEMO (Frejus, Francja) i GERDA (Gran Sasso, Włochy); eksperymenty takie będzie można również prowadzić w przyszłym polskim laboratorium niskotłowym w Sieroszowicach koło Lubina (wspomnianym w rozdziale poprzednim).

## **Możliwości aplikacyjne**

W zakresie praktycznych zastosowań fizyki jądrowej przewiduje się:

- zastosowanie wiązek protonów w terapii hadronowej schorzeń nowotworowych,
- produkcję „akceleratorowych” izotopów promieniotwórczych,
- inne biologiczne zastosowania wiązek cząstek przyspieszanych w akceleratorach.

W powyższym wyliczeniu pominięto prace w zakresie energetyki jądrowej i syntezy jądrowej, omówione w rozdziale 4.

W Instytucie Fizyki Jądrowej PAN w Krakowie zaawansowane są prace nad radioterapią protonową nowotworów oka, z wykorzystaniem protonów o energii

58 MeV z istniejącego akceleratora AIC-144. Ośrodek ten planuje jednocześnie rozszerzenie medycznych zastosowań fizyki jądrowej z wykorzystaniem nowych cyklotronów, o energii protonów 30 MeV dla produkcji medycznych izotopów „cyklotronowych” oraz 250 MeV dla produkcji izotopów i rozbudowanej terapii protonowej. W Ministerstwie Nauki i Szkolnictwa Wyższego złożono wnioski utworzenia w Krakowie ośrodków Infrastruktury Badawczej IB z planowanym dofinansowaniem z Funduszy Strukturalnych UE, o nazwie IBRON (produkcja radiofarmaceutyków i metody diagnostyczne PET i SPECT) oraz BROTON (dla radioterapii protonowej).

Fizycy krakowscy oraz fizycy i medycy warszawscy wystąpili jednocześnie z podobnym wnioskiem o utworzenie ośrodka NCRH (Narodowe Centrum Terapii Hadronowej), opartego na nowym cyklotronie 200-300 MeV (protonów) dla terapii protonami i jądrami ciężkimi ( $^{12}\text{C}$ ). Ponadto Ośrodek Badawczo-Rozwojowy Izotopów POLATOM, we współpracy z pozostałymi jednostkami badawczo-rozwojowymi w Świerku, wystąpił z wnioskiem o utworzenie nowego ośrodka Infrastruktury Badawczej IB o nazwie CeRad (Centrum Badawczo-Produkcyjne Radionuklidów), przewidującym między innymi również zainstalowanie cyklotronu o energii protonów 30 MeV do produkcji izotopów.

Środowiskowe Laboratorium Ciężkich Jonów kontynuuje prace zmierzające do utworzenia w Warszawie Ośrodka Tomografii Pozytonowej – zarówno dla rozwoju diagnostyki medycznej, jak i prac badawczych w szeroko pojętych „naukach życia” (*life sciences*). Prace te wspierane są przez Międzynarodową Agencję Energii Atomowej w Wiedniu.

**Potrzeby w zakresie kształcenia i rozwoju kadry** zależą od rozwoju nie tylko jądrowych projektów badawczych, ale również wdrożeń i inwestycji w zakresie technologii jądrowych – energetyka jądrowa, terapia hadronowa, źródła promieniowania synchrotronowego, nowy reaktor badawczy, badania w zakresie nowych cykli paliwowych i wykorzystania reaktorów wysokotemperaturowych itp. Można wyrazić nadzieję, że podjęcie decyzji kierunkowych w zakresie badań i – przede wszystkim – dużych programów inwestycyjnych spowoduje znaczny wzrost liczby kandydatów do jądrowych studiów specjalistycznych, a tym samym wzrost liczby absolwentów i doktorantów. Konieczne w tym kontekście wydaje się zasadnicze wzbogacenie programów nauczania w szkolnictwie średnim i wyższym o tematykę jądrową. Ocenia się, że dla utrzymania badań i wdrożeń na obecnym poziomie minimalna liczba absolwentów studiów jądrowych winna wynosić około 20 osób rocznie.

## FIZYKA PLAZMY

### Stan obecny

Fizyka plazmy zajmuje się badaniami własności quasi-neutralnej mieszaniny swobodnych elektronów i jonów o różnych stopniach jonizacji. W gorącej plazmie mogą zachodzić reakcje syntezy (fuzji) jądrowej, w których wydzielają się ogromne ilości energii, np. we wnętrzach wielu gwiazd lub w wybuchach bomb termojądrowych. Badania nad syntezą jądrową stanowią w rzeczywistości tylko jeden z działów fizyki i technologii plazmy. We wszechświecie większość widocznej materii znajduje się właśnie w stanie plazmowym. W warunkach ziemskich plazma występuje w płomieniach, zorzach polarnych i wyładowaniach elektrycznych, np. jarzeniowych, łukowych i mikrofalowych. Parametry takiej plazmy różnią się zasadniczo. Dlatego bada-

nia plazmowe potrzebne są ze względów poznawczych i aplikacyjnych.

Ze względu na omówione wyżej fakty, badania z dziedziny fizyki i technologii plazmy obejmują wiele kierunków:

- badania procesów elementarnych (np. wzbudzenia, jonizacji, zderzeń) oraz zjawisk nieliniowych w plazmie, np. solitonów, różnych rodzajów fal elektromagnetycznych itd.;
- badania gorącej plazmy w pułapkach magnetycznych typu Tokamak lub Stellarator;
- badania gęstej i gorącej plazmy wytwarzanej przez silnoproudowe wyładowania impulsowe typu Plasma-Focus lub Z-Pinch;
- badania supergęstej plazmy wytwarzanej przez silne wiązki laserowe lub elektronowe;
- badania plazmy wytwarzanej w wyładowaniach mikrofalowych i jarzeniowych;
- badania plazmy wytwarzanej przez wyładowania iskrowe i łukowe;
- badania plazmy w kosmosie (w jonosferze, heliosferze oraz w przestrzeni kosmicznej);
- opracowanie nowych metod pomiarowych i urządzeń do badań plazmy;
- zastosowania plazmy quasi-stacjonarnej lub impulsowej do celów badawczych i technologicznych, np. do modyfikacji różnych materiałów (stopów, półprzewodników, ceramik).

W Polsce badania z dziedziny fizyki plazmy, zainicjowane na szerszą skalę w latach 50-tych ub. wieku, prowadzi obecnie:

- Instytut Problemów Jądrowych im. Andrzeja Sołtana w Świerku,
- Instytut Fizyki Plazmy i Laserowej Mikrosyntezy w Warszawie,
- Instytut Podstawowych Problemów Techniki PAN w Warszawie,
- Centrum Badań Kosmicznych PAN w Warszawie,
- Instytut Maszyn Przepływowych PAN w Gdańsku,
- Instytut Fizyki UJ w Krakowie,
- Instytut Fizyki UMCS w Lublinie,
- Instytut Fizyki Uniwersytetu Opolskiego w Opolu,
- Instytut Technologii Materiałowych Politechniki Warszawskiej,

oraz niewielkie, inne zespoły z Politechniki Warszawskiej, Poznańskiej i Wrocławskiej.

Opis stanu prac i planów związanych z energetyką opartą na wykorzystaniu syntezy jądrowej (głównie w drugim z ww. kierunków) przedstawiony jest oddzielnie w rozdziale „Energetyka jądrowa” części II. Dlatego w bieżącym rozdziale omówione są tylko prace realizowane w ramach pozostałych kierunków. Ocenia się, że w badaniach plazmy (poza badaniami nad syntezą jądrową) zaangażowanych jest ok. 100 osób.

Ze względu na wiele kierunków badań i stosunkowo nieliczne zespoły badawcze, wymiana informacji i współpraca w skali krajowej jest utrudniona, co jest częściowo rekompensowane przez regularne Środowiskowe Seminaria Plazmowe, organizowane przez członków Sekcji Fizyki Plazmy Komitetu Fizyki PAN. W odstępach dwuletnich organizowane są również konferencje międzynarodowe PLASMA-XXXX,

które umożliwiają dokonanie przeglądu stanu badań plazmowych w Polsce. Materiały z konferencji PLASMA-2005 zostały opublikowane jako monografia American Institute of Physics CP Vol. 812 (2006).

**Najważniejsze osiągnięcia w ostatnich latach** (z wyłączeniem drugiego z ww. kierunków) obejmują:

- nowe analizy teoretyczne procesów elementarnych w plazmie oraz komputerowe symulacje procesów plazmowych w różnych warunkach;
- nowe dane o dynamice wyładowań plazmowych typu Plasma-Focus (PF) i Z-Pinch, także dotyczące charakterystyk emisyjnych takich wyładowań oraz korelacji różnych rodzajów promieniowania elektromagnetycznego i korpuskularnego plazmy;
- nowe dane eksperymentalne o oddziaływaniu wiązek laserowych z materią, m.in. zbadanie emisji szybkich jonów wieloładunkowych, które mogą być wykorzystane do akceleratorów, oraz ultra-szybkich protonów, które można wykorzystać do badań nad laserową syntezą inercyjną jako alternatywą syntezy z utrzymaniem magnetycznym w układach typu Tokamak;
- nowe dane o wyładowaniach mikrofalowych lub jarzeniowych, a także o różnych możliwościach ich wykorzystania m.in. w nowoczesnych technologiach;
- nowe informacje o wyładowaniach iskrowych i łukowych realizowanych w różnych warunkach oraz ich wykorzystaniu w technologii;
- nowe dane z analizy eksperymentów kosmicznych i liczne publikacje nt. zachowania plazmy w jonosferze, heliosferze, astrosferach i przestrzeni kosmicznej;
- opracowanie nowych lub udoskonalenie znanych metod diagnostycznych oraz opracowanie i zbudowanie wielu urządzeń badawczych, w tym w technologii satelitarnej;
- praktyczne wykorzystanie wyładowań quasi-stacjonarnych (np. do oczyszczenia spalin) oraz impulsowych (np. do wytwarzania strumieni plazmowo-jonowych służących do modyfikacji różnych materiałów).

**Możliwości aplikacyjne** zależą silnie od właściwości wytwarzanej plazmy. Stosując różne konfiguracje elektrod i dobierając warunki eksperymentalne można zoptymalizować parametry wytwarzanych strumieni plazmowych.

Wielkie nadzieje wiąże się obecnie z wykorzystaniem impulsów plazmowych do zmian struktury powierzchni metali, stopów, półprzewodników, ceramik, a także materiałów nadprzewodzących. W ostatnich latach wiele uwagi poświęcono wykorzystaniu wyładowań typu łukowego realizowanych w warunkach ultrawysokiej próżni. Wyładowania takie mogą służyć do nakładania bardzo czystych i cienkich pokryć, np. warstw Nb na powierzchnie wnęk akceleratorów RF, co pozwoli zmniejszyć znacznie koszty budowy takich urządzeń.

Szerokie zastosowania mogą mieć także wyładowania mikrofalowe lub jarzeniowe, np. do efektywnego oczyszczania spalin i gazów wylotowych z substancji toksycznych dla otoczenia. Techniki laserowe mają także zastosowania w technologiach materiałowych (źródła jonów promieniowania X dla modyfikacji materiałów, ablacyjne modyfikowanie powierzchni i inne). Z kolei miniaturowe układy PF mają zastosowanie jako intensywne źródła neutronowe do detekcji materiałów niebezpiecznych.

Oddzielny problem stanowi praktyczne wykorzystanie wyników badań plazmy realizowanych w kosmosie, np. do projektowania dobrych konstrukcji rakiet i sateli-



tów, do przewidywania skutków zmian zachodzących w jonosferze itd.

**Planowane główne kierunki badawcze** odpowiadają kierunkom omówionym wyżej. Zachodzi konieczność stopniowego włączania różnych zespołów badawczych w duże programy międzynarodowe, które są organizowane i prowadzone pod auspicjami Unii Europejskiej lub w skali światowej. Należy tu wymienić na przykład program CARE, dotyczący badań związanych z projektowaniem i budową nowych akceleratorów cząstek naładowanych, programy międzynarodowe Europejskiej Agencji Kosmicznej, a także program SEMINANO (w ramach 6. Programu Ramowego UE), w którym polski zespół uczestniczy stosując laser impulsowy do implantacji jonów produkowanych laserem do implantacji w materiałach półprzewodnikowych celem wytwarzania nanokryształów półprzewodnikowych. Bardzo istotna jest możliwość udziału polskich specjalistów w projektach planowanych w ramach 7. Programu Ramowego. Wart podkreślenia jest fakt, że zbudowany w IFPiLM układ PF-1000 został włączony do europejskiej struktury badawczej (Structuring the European Research Area Research Infrastructure).

Aparatura pomiarowa używana w ww. ośrodkach badawczych i akademickich jest w znacznym stopniu przestarzała i wyeksploatowana. Można oceniać, że na wymianę i modernizację tej aparatury należałoby przeznaczyć przynajmniej ok. 20 milionów zł rocznie.

**Potrzeby w zakresie kształcenia i rozwoju kadry** – w Polsce nie prowadzono dotychczas regularnych studiów uniwersyteckich w dziedzinie fizyki plazmy. Sporadycznie organizowane seminaria i wykłady monograficzne nie gwarantują dopływu potrzebnej kadry. W rezultacie pracę zawodową rozpoczynają fizycy o innych specjalnościach, co między innymi wydłuża cykl szkolenia doktorantów. Biorąc pod uwagę szeroki zakres i specyfikę badań plazmowych i występujące potrzeby kadrowe celowe jest zorganizowanie regularnych studiów w dziedzinie fizyki plazmy na wydziałach fizyki kilku uniwersytetów. Jednocześnie studia politechniczne winny dostarczyć absolwentów przygotowanych do rozwiązywania, we współpracy z fizykami, problemów konstrukcyjnych i technologicznych. Pewne dodatkowe możliwości szkolenia fizyków plazmowych stwarzają organizowane obecnie studia w zagranicznych ośrodkach badawczych i akademickich. Można ocenić, że w skali krajowej rozwój badań z dziedziny fizyki i technologii plazmy wymaga dopływu 10-15 fizyków rocznie.

## 4. METODY JĄDROWE W FIZYCE FAZY SKONDENSOWANEJ

### Stan obecny

W Polsce w badaniach fazy skondensowanej wykorzystywane są głównie następujące metody jądrowe:

- rozpraszanie neutronów termicznych (19 ośrodków, ok. 130 osób),
- rozpraszanie i pochłanianie promieniowania synchrotronowego (25 ośrodków, ponad 300 osób),
- spektrometria mössbauerowska (18 ośrodków, ok. 80 osób),
- anihilacja pozytonów (10 ośrodków, 27 osób),
- wykorzystanie wiązek jonowych i plazmowych do modyfikacji własności ciał stałych (5 ośrodków, ok. 20 osób),
- spektrometria komptonowska (5 ośrodków - 10 osób).

Ponadto istnieją niewielkie zespoły wykorzystujące technikę rotacji spinów mionowych, zaburzonych korelacji kątowych promieniowania gamma oraz metody mikroanalizy jądrowej (RBS/C, NRA, PIXE itd.) Podana wyżej liczba pracowników obejmuje jedynie pracowników naukowych lub naukowo-dydaktycznych. Liczba ośrodków, w których wymienionymi technikami posługuje się co najmniej 5 osób, wynosi 42.

Największe osiągnięcia naukowe dotyczą krystalografii, badań struktury i dynamiki sieci kryształów molekularnych, metali i stopów oraz badań własności magnetycznych materii, w tym subtelnych efektów kwantowych. Prace, w których przebadano struktury krystaliczne i magnetyczne, w szczególności związków metali przejściowych, ziem rzadkich i aktynowców, są bardzo często cytowane w piśmiennictwie światowym i stanowią kanon literaturowy. W badaniach własności aktynowców Polska jest swoistym zagłębiem naukowym, podobnie jak w wytwarzaniu i badaniach własności półprzewodników półmagnetycznych, w tym o obniżonej wymiarowości, co ma istotne znaczenie dla rozwijającej się obecnie spinotroniki. Techniki mössbauerowska i anihilacji pozytonów są tradycyjnie stosowane do badania własności mikroskopowych materiałów o znaczeniu podstawowym i aplikacyjnym, jak kobałtyty i manganity. Ostatnim, znaczącym osiągnięciem było wykorzystanie techniki mössbauerowskiej do obrazowania holograficznego o atomowej rozdzielczości. Podobnie polską specjalnością stała się polarymetria mössbauerowska z wiązką spolaryzowaną kołowo, a także wyjaśnienie techniką mössbauerowska roli żelaza hemowego i niehemowego w procesie fotosyntezy w obrębie fotosystemu II c, czy opracowanie metody lokalizacji żelaza w ferrytynie. W zakresie badań techniką anihilacji pozytonów znaczącym osiągnięciem były pierwsze obserwacje tzw. hiperboli procesu anihilacji pozytonów w locie i stwierdzenie, że proces ten słabo zależy od liczby atomowej. Polską specjalnością stały się badania trybologiczne z wykorzystaniem technik pozytonowych. Teoretyczne i doświadczalne badania zjawiska transportu neutronów termicznych w niejednorodnych ośrodkach zaowocowały zaproponowaniem nowych metod oznaczania makroskopowego przekroju czynnego absorpcji neutronów termicznych, co ma istotne znaczenie dla określania np. zawartości wodoru/wody w ośrodkach skalnych. Uruchomienie w Świerku przy reaktorze MARIA stanowiska do radiografii neutronowej umożliwiło zbadanie zjawiska dyfuzji wody w materiałach porowatych i opracowanie modelowego opisu tego procesu. Warte odnotowania są też wyniki osiągnięte w badaniach strukturalnych białek i związków o znaczeniu bio-

logicznym.

Z badań typowo aplikacyjnych na pierwsze miejsce wysuwają się prace przy użyciu wiązek jonowych i plazmowych. Ciągłe i impulsowe wiązki jonów znajdują szerokie zastosowanie w przemyśle i pozwalają na modyfikację własności powierzchniowych materiałów, jakości części trących maszyn i narzędzi używanych w przemyśle. Implantacja azotu i węgla do stali powoduje zmniejszenie współczynnika tarcia, zmniejszenie zużycia oraz wzrost mikrotwardości warstwy powierzchniowej. Do najważniejszych osiągnięć w tej dziedzinie można zaliczyć zademonstrowanie możliwości wykonania paneli krzemowych ogniwo fotowoltaicznych wykonanych całkowicie techniką impulsowych wiązek plazmowych, poprawę zwilżalności składników złącz ceramika-metal oraz zademonstrowanie nadprzewodzących warstw dwuborku magnezu otrzymanych metodą implantacji jonów i impulsowego przetopienia wiązką plazmy. Do znaczących osiągnięć należy zaliczyć też skonstruowanie monochromatycznego źródła promieniowania spolaryzowanego kołowo i uruchomienie stanowiska do badań metodą elektronów konwersji wewnętrznej z użyciem takiego źródła, opracowanie metody holografii promieniowania gamma z atomową rozdzielczością oraz opracowanie nieniszczącej metody badania zdefektowania warstwy wierzchniej wykorzystującej profile implantacji pozytonów.

### **Planowane główne tematy badawcze**

**W dziedzinie rozpraszania neutronów** zamierzenia związane są wykorzystaniem naszego członkostwa (od 1 października 2006 r.) w Instytucie M. von Lauego – P. Langevina (ILL) w Grenoble (Francja). Równolegle utrzymywane będą starania o przydział czasu na wiązkach neutronowych w RAL w Anglii (źródło spalacyjne ISIS), Laboratorium Leona Brillouina w Saclay (Francja) oraz w Instytucie Hahn-Meitner w Berlinie (Niemcy). Ze względu na planowany remont reaktora IBR-2 czasowo wstrzymane zostaną eksperymenty neutronowe w ZIBJ w Dubnej. Planowana tematyka, to między innymi:

- wyznaczenie struktury krystalicznej i magnetycznej nowych związków międzymetalicznych na bazie pierwiastków d- i f-elektronowych oraz parametrów pola krystalicznego dla związków z cerem,
- określenie struktury krystalicznej i magnetycznej w polikrystalicznych oraz nanokrystalicznych materiałach tlenkowych wykazujących sprzężenie magnetoelektryczne. jak również badanie tych struktur w funkcji temperatury dla potrójnych związków międzymetalicznych na bazie pierwiastków grupy 3d wykazujących własności magnetokaloryczne oraz złożonych tlenków metali grupy 3d nadstruktur perowskitów,
- badanie struktury krystalicznej i magnetycznej w polikrystalicznych oraz nanokrystalicznych materiałach tlenkowych wykazujących sprzężenie magnetoelektryczne,
- uzyskanie informacji o magnetycznym stanie podstawowym w niskich temperaturach, wzbudzeniach elementarnych oraz zmianie stanu podstawowego pod wpływem temperatury i zewnętrznego ciśnienia w związkach z silnie skorelowanymi elektronami,
- badanie reorientacji molekuł i ich fragmentów w powiązaniu z sytuacją fazową w kryształach molekularnych i ciekłych kryształach oraz badanie korelacji bliskiego zasięgu i własności polimerów (jonomerów) i ich blend,
- badanie struktury nanorurek węglowych domieszkowanych borem i azotem, jed-

nościennych nanorurek węglowych, nanoproszków, substancji z wiązaniem wodowym oraz badania neutronowe magnetyków molekularnych.

**Promieniowanie synchrotronowe** będzie wykorzystywane do badania gazów, cieczy, materiałów amorficznych i krystalicznych oraz do próbek biologicznych. Badania te dostarczą między innymi informacji o:

- lokalnej strukturze atomowej, strukturze krystalicznej i stopniu jej zdefektowania,
- walencyjnych, nie zajętych orbitach w wybranym atomie,
- procentowym udziale poszczególnych faz w materiałach wielofazowych, w tym kompozytach i ceramikach,
- anizotropii wiązań chemicznych wynikającej z anizotropii struktury krystalicznej, rozłożenia defektów czy intencjonalnie wprowadzonych domieszek, bądź z magnetycznych przemian fazowych,
- uporządkowaniu magnetycznym materiału oraz wielkości spinowego i orbitalnego momentu magnetycznego.

Realizacja powyższych tematów wymaga dostępu do ośrodków synchrotronowych, jak ESRF w Grenoble (w tym celu konieczny jest udział Polski w międzynarodowym Konsorcjum) czy w Europejskim Centrum Lasera na Swobodnych Elektronach (XFEL) w Hamburgu. Dyskutuje się również budowę Narodowego Centrum Synchrotronowego w Polsce (Kraków).

**W dziedzinie badań mössbauerowskich** planuje się następujące badania i współpracy międzynarodowe:

- badanie właściwości fizycznych materiałów magnetycznych silnie anizotropowych typu  $R_2Fe_{14}B$  (R – pierwiastek ziem rzadkich),
- badanie wpływu wysokiego ciśnienia na parametry oddziaływań nadsubtelnych w związkach międzymetalicznych typu  $RAl_2$ , w których atomy ziem rzadkich wykazują mieszaną wartościowość – wspólnie z Instytutem Wysokich Ciśnień RAN w Troicku (Rosja) oraz Zjednoczonym Instytutem Badań Jądrowych w Dubnej,
- badanie oddziaływań magnetycznych w materiałach nanoporowatych (nanodrut),
- badania cienkich warstw i materiałów masywnych przy użyciu spektroskopii elektronów konwersji CEMS (współpraca z Uniwersytetem w Koszycach na Słowacji oraz z Uniwersytetem w Sheffield w Wielkiej Brytanii),
- badania półprzewodników półmagnetycznych stwarzających perspektywy zastosowań w spinotronice, kontynuacja badań nad nowoczesnymi materiałami nanokrystalicznymi i stapaniami mechanicznie (współpraca z Uniwersytetem w Koszycach na Słowacji),
- badanie mikrostruktury masywnych stopów amorficznych i nanokrystalicznych, stali amorficznych, badania składu fazowego materiałów z magnetyczną pamięcią kształtu (udział w programie koordynowanym przez UNESCO, we współpracy z Białorusią),
- badania struktury atomowej i elektronowej związków Heuslera zawierających Fe i Sn, badania struktury atomowej i defektowej związków międzymetalicznych Fe-Al-X oraz badania właściwości proszków związków międzymetalicznych – współpraca z Uniwersytetem w Ołomuńcu (Czechy), z Uniwersytetem we Lwowie (Ukraina), z Uniwersytetem na Balearach (Hiszpania) i z Politechniką w Marsylii (Francja),
- badania związków międzymetalicznych ziemia rzadka – metal przejściowy,

- badania perowskitów typu  $(\text{LaSr})_{n+1}\text{Fe}_n\text{O}_{3n+1}$  podstawianych metalami alkalicznymi, ziemiami rzadkimi oraz lantanowcami (współpraca z Instytutem Badań Jądrowych i Energetyki Jądrowej Bułgarskiej Akademii Nauk),
- badania nad materiałami szklistymi dla immobilizacji odpadów radioaktywnych i toksycznych,
- badania nanostruktury powłok implantów biomedycznych (współpraca z Uniwersytetem w Kuopio, Finlandia oraz z Uniwersytetem w Mittelwerdzie, Niemcy),
- kontynuacja badań układów międzymetalicznych ziemia rzadka – metale przejściowe grupy d, tlenków metali przejściowych i cienkich warstw tlenków (nadprzewodnictwo wysokotemperaturowe i materiały z dużym magnetooporem),
- badania rozkładów przestrzennych momentów magnetycznych w litych materiałach nieuporządkowanych,
- rozwinięcie technologii wytwarzania nanocząstek z powłokami powierzchniowo czynnymi,
- badania orientacji momentów magnetycznych w procesach magnesowania i przemagnesowywania w cienkich warstwach, wielowarstwach i nanocząstkach,
- wykorzystanie komplementarnych technik spektroskopii mössbauerowskiej, spektroskopii neutronowej, EXAFS, XANES, XMCD,  $\mu$ -SR do badań niekolinearnych struktur magnetycznych.

Planowana jest budowa laboratorium środowiskowego spektrometrii i polarymetrii mössbauerowskiej (pomiary polarymetryczne CEMS, pomiary polarymetryczne transmisyjne, cewki nadprzewodzące, monochromatyczne źródło promieniowania o polaryzacji kołowej lub liniowej) .

**W dziedzinie anihilacji pozytonów** planuje się prowadzenie między innymi następujących prac:

- badania zjawiska anihilacji pozytonów w locie, badania warstw wierzchnich powstałych w procesach zużycia, dla żelaza i tytanu i ich stopów, badania defektów powstałych podczas przepływu wysokich prądów,
- rozwój porozymetrii pozytonowej w badaniach materiałów nanoporowatych,
- zastosowanie metod anihilacji pozytonów do badań stanu zdefektowania odkształcanych metali, do badań polimerów, do ciśnieniowych i temperaturowych badań ośrodków molekularnych.

Ośrodki wykonujące badania anihilacyjne współpracują z Uniwersytetem w Halle (Niemcy), z Uniwersytetem w Delft (Holandia), z KEK w Japonii oraz z ośrodkami belgijskimi, a także z ośrodkiem w Trento we Włoszech (wykorzystanie wiązki powolnych pozytonów).

Planuje się także następujące duże inwestycje:

- dwa akceleratory powolnych pozytonów pozwalające implantować pozytony na głębokości ok. 1 mikrometra w celu badania stanu zdefektowania materiału na tych głębokościach, koincydencyjnego,
- dwa układy koincydencyjne spektrometrów poszerzenia dopplerowskiego linii anihilacyjnej,
- cyfrowy spektrometr czasów życia pozytonów,
- dwa spektrometry do pomiaru poszerzenia dopplerowskiego linii anihilacyjnej wykorzystującego tylko jeden detektor.

**W badaniach przy użyciu spektroskopii komptonowskiej planuje się:**

- kontynuację dotychczasowych prac nad badaniem elementarnej struktury elektronicznej i tworzenia się momentów magnetycznych w układach o interesujących własnościach transportowych (np. nadprzewodnikach) i magnetycznych,
- rozwijanie metod rekonstrukcji rozkładu gęstości pędów i topologii powierzchni Fermiego oraz rozwijanie teoretycznych metod wyznaczania struktury elektronicznej.

Planuje się kontynuację współpracy z ośrodkami synchrotronowymi ESRF w Grenoble, Spring-8 w Japonii, Uniwersytetem w Warwick, Anglia, Northeastern University w Bostonie, USA oraz Uniwersytetem Paryż VI w Paryżu, Francja.

Do większych inwestycji należy zakup displeksu dostosowanego do badań komptonowskich oraz niezbędnej skraplarki azotowej pracującej w obiegu zamkniętym.

**Prace z wykorzystaniem technik wiązek jonowych i plazmowych** będą koncentrowały się wokół następujących zagadnień:

- innowacyjne metody modyfikacji warstwy wierzchniej materiałów do zastosowań konstrukcyjnych i biomedycznych,
- zbadanie procesów domieszkowania, wygrzewania defektów poimplantacyjnych, mechanizmów wytwarzania warstw izolacyjnych w półprzewodnikach szeroko-przerwowych,
- eksperymentalna weryfikacja modelu wielostopniowej akumulacji defektów radiacyjnych w materiałach; określenie mechanizmów prowadzących do kolejnych transformacji fazowych i struktury materiałów na kolejnych etapach transformacji,
- nieniszczące metody analizy własności strukturalnych materiałów,
- wykorzystanie wiązek jonowych i technologii impulsowego przetapiania wiązką plazmową do wytwarzania w materiałach warstw powierzchniowych zawierających nanowytrącenia oraz warstw nanokrystalicznych.

Prace wykonywane są we współpracy z ZFR Rossendorf (Niemcy) oraz CSNSM Orsay, (Francja) i Uniwersytetem w Evry-Val d'Essonne (Francja).

Planowane są następujące większe inwestycje:

- dyfraktometr rentgenowski Bruker D8 Advance,
- implantator jonów o skupionej wiązce dla zastosowań w dziedzinie urządzeń elektronicznych i opto-elektronicznych,
- mikroskop sił atomowych.

Niezależnie od potrzeb poszczególnych grup, istnieje wyraźna potrzeba stworzenia bazy aparaturowej dla metod komplementarnych umożliwiających wytwarzanie nowych materiałów i określanie własności makroskopowych badanych związków. Jedną z takich inicjatyw jest stworzenie Ośrodka Spektroskopii Jądrowej Ciał Stałych na wschodniej ścianie Polski (UMCS i Politechnika w Lublinie, Uniwersytet w Białymstoku). Ośrodek taki prowadziłby prace technologiczne (wytwarzanie materiałów polikrystalicznych), charakterystyczne (własności magnetyczne, transportowe, cieplne, podstawowe dane strukturalne metodami neutronowymi i rentgenowskimi) oraz badawcze w zakresie struktury elektronicznej materiałów (spektroskopia mössbauerowska, komptonowska, anihilacja pozytonów itp.). Planuje się także rozwinięcie badań mössbauerowskich o krótkożyciowe źródła wytwarzane w reaktorze. Ist-

nieje także konieczność stworzenia laboratoriów, w których badania podstawowych własności magnetycznych, poprzedzające badania technikami jądrowymi, mogłyby być prowadzone w temperaturach milikelwinowych oraz pod wysokim ciśnieniem.

### **Możliwości aplikacyjne**

Zastosowania rozpraszania neutronów - to badanie nanomateriałów, nowych materiałów na bazie pierwiastków d- i f-elektronowych, ciekłych kryształów (składniki mieszanin, z których produkuje się nowoczesne wyświetlacze i ekrany), polimerów i ich blend, transportu neutronów (zastosowania m.in. w geologii i przemyśle wydobywczym) oraz badania neutronowe w zastosowaniach do zagadnień przemysłowych, rolniczych, ekologii itp.

Badania prowadzone z wykorzystaniem promieniowania synchrotronowego również służą do charakteryzacji materiałów, zarówno stosowanych w przemyśle elektronicznym, jak i farmakologii oraz w diagnostyce medycznej. Na przykład w IF PAN prowadzone są badania zmierzające do opracowania technologii produkcji nowych materiałów stosowanych w diagnostyce i terapii raka (fotouczulacze na bazie porfiry IX).

Badania mössbauerowskie mają szereg możliwości aplikacyjnych w dziedzinie spinotroniki, elektroniki i elektrotechniki, w przemyśle komputerowym (perowskity stosowane w głowicach magnetycznych), w badaniach warstw ochronnych, w medycynie (zastosowanie stopów z pamięcią kształtu, wykorzystanie wyników badań feroporfiryn w technologii otrzymywania sztucznych zamienników krwi oraz w technologiach farmaceutycznych m.in. przy produkcji leków stosowanych w terapii chorób nowotworowych), w energetyce przyszłości (materiały magazynujące wodór), ekologii (perowskity służące jako membrany do separacji tlenu, unieruchamianie pierwiastków promieniotwórczych – problem przechowywania odpadów promieniotwórczych) i w monitoringu środowiska

Technika anihilacji pozytonów i proponowane badania znajdują zastosowania w inżynierii powierzchni do oceny głębokościowego rozkładu defektów w skali atomowej powstałych np. w procesie produkcji materiału, odkształcenia plastycznego lub podczas ich tarcia i zużycia. Zastosowanie anihilacji pozytonów do badania półprzewodników jest szeroko stosowane w identyfikacji strukturalnych defektów powstałych w procesie ich produkcji lub modyfikacji. Sukcesem techniki anihilacyjnej ostatnich lat jest stwierdzenie korelacji między czasem życia pozytonu a rozmiarem nano-poru, w którym następuje jego anihilacja. Tu anihilacja pozytonów, jako jedyna technika pozwala w prosty i nieniszczący sposób określić rozmiary nawet zamkniętych nano-porów lub tzw. objętości swobodnych w polimerach. Daje to możliwość przemysłowych zastosowań dla badań materiałów o niskiej przenikalności dielektrycznej.

Metody oparte na wykorzystaniu wiązek jonów nie wymagają specjalnego przygotowanie detali do obróbki. Proces prowadzony jest w temperaturze zbliżonej do pokojowej i nie wprowadza zmian własności rdzenia materiału, nie pociąga za sobą żadnych zmian w technologii wytwarzania detali. Istniejące wyposażenie (zbudowany w IPJ w Świerku półprzemysłowy implantator jonów) pozwala na obróbkę elementów o wymiarach do 30x50 cm lub obiektów o długości do 1 metra i średnicy do 10 cm. W najbliższym czasie planowana jest dalsza rozbudowa tego urządzenia i dostosowanie go do modyfikacji polimerów. Zespół IPJ-ITME posiada wieloletnie doświadczenie w kontaktach przemysłowych, implantator w Świerku wykorzystywany jest do modyfikacji własności narzędzi (głównie narzędzi skrawających na potrzeby przemysłu łóżyskowego). Z kolei w IF UMCS implantator o energii 300 keV wykorzy-

stywany jest do zmian właściwości materiałów półprzewodnikowych, porowatego krzemu oraz poprawy właściwości trybologicznych stali i stopów. Techniki implantacyjne będą służyły również poprawie technologii złącz ceramika-metal, a także pokrywaniu endoprotez warstwami diamentopodobnymi.

Badania techniką spektroskopii komptonowskiej są typowymi badaniami podstawowymi, a ich ewentualne bezpośrednie przełożenie na zastosowania dotyczą pomocy w zrozumieniu głównie własności magnetycznych i transportowych fazy skondensowanej.

### **Potrzeby w zakresie kształcenia i rozwoju kadry**

We wszystkich wymienionych wyżej dziedzinach potrzebne jest zachęcenie większej liczby studentów do podejmowania studiów magisterskich, a następnie doktoranckich. Zachęcanie to będzie skuteczne wtedy, gdy powstaną realne możliwości zatrudnienia ludzi kończących takie studia. Można ocenić, że w przypadku członkostwa Polski w obydwu organizacjach ILL i EDSRF, roczne zapotrzebowanie na nowych pracowników będzie wynosiło ok. 10 magistrów i 10 doktorów, przy czym liczba ta wzrośnie po uruchomieniu polskiego synchrotronu.



## 5. CHEMIA JĄDROWA I RADIACYJNA

### Stan obecny

**Chemia radiacyjna** uprawiana jest obecnie głównie w dwóch ośrodkach (IChTJ - Instytut Chemii i Techniki Jądrowej w Warszawie i MITR - Międzyresortowy Instytut Techniki Radiacyjnej Politechniki Łódzkiej) przez łącznie 75 pracowników i 16 doktorantów. Największymi osiągnięciami tych zespołów było:

- zbudowanie dwóch systemów akceleratorowej analizy impulsowej,
- uruchomienie dwóch stacji sterylizacji sprzętu medycznego (jeden akcelerator 10 kW – 9/13 MeV i jeden akcelerator 10 kW – 10 MeV),
- uruchomienie stacji obróbki polimerów (akcelerator 20 kW, 2 MeV),
- uruchomienie stacji obróbki żywności (akceleratory 10 kW, 10 MeV i 1 kW, 10 MeV),
- zbudowanie pilotowej instalacji usuwania SO<sub>2</sub> i NO<sub>x</sub> z gazów spalinowych w Elektrociepłowni Kawęczyn (dwa akceleratory 50 kW, 700 keV) i udział w budowie instalacji przemysłowej (cztery akceleratory – 270 kW, 700 keV) w elektrociepłowni Pomorzany w Szczecinie,
- uruchomienie technologicznego źródła gamma małej mocy.

Wdrożone technologie, to:

- sterylizacja radiacyjna (IChTJ i MITR),
- wytwarzanie rur i taśm termokurczliwych z pamięcią kształtu (IChTJ),
- wytwarzanie opatrunków hydrożelowych (MITR),
- modyfikacje struktur półprzewodnikowych (IChTJ),
- radiacyjne utrwalanie żywności,
- usuwanie SO<sub>2</sub> i NO<sub>x</sub> z gazów spalinowych elektrowni (IChTJ + przemysł i współpraca międzynarodowa).

Utworzono dwa laboratoria akredytowane dozymetrii przemysłowej oraz kontroli napromieniowanej żywności (oba IChTJ).

**Chemia jądrowa i radiochemia**, w tym radioekologia, radiochemiczne metody rozdzielcze, chemia radiofarmaceutyczna oraz jądrowe metody analityczne uprawiane są w ok. 10 ośrodkach przez ok. 200 pracowników i 40 doktorantów, przy czym za najważniejsze osiągnięcia można uznać:

- zastosowanie metod NAA do analizy meteorytów i dzieł sztuki,
- opracowanie różnych technik XRF i PIXE w zastosowaniu do analizy materiałów geologicznych, biologicznych (w tym tkanek ludzkich) i przemysłowych (ultraczyste półprzewodniki, farmaceutyki itp.), w tym badania w mikroobszarze,
- opracowanie materiałów odniesienia do analizy śladowej próbek środowiskowych,
- opracowanie sorbentów nieorganicznych selektywnych względem radionuklidów cezu, strontu, sodu i radu,
- opracowanie metod oznaczania radionuklidów w próbkach środowiskowych i żywności – organizowanie porównań laboratoryjnych,
- opracowanie i wdrożenie instalacji membranowej do zateżnienia odpadów promieniotwórczych,

- opracowanie chemicznej metody dekontaminacji elementów stalowych reaktora jądrowego, wdrożonej w procesie likwidacji reaktora EWA w Świerku,
- opracowanie metod otrzymywania radionuklidów dla medycyny nuklearnej (np.  $^{177}\text{Lu}$ , generator  $^{188}\text{W}$ - $^{188}\text{Re}$ ) i prekursorów nowych radiofarmaceutyków.

### **Planowane główne tematy badawcze**

#### **Chemia i technologie radiacyjne**

Największym planowanym przedsięwzięciem, zgłoszonym przez MITR i IChTJ, jest budowa centrum obróbki radiacyjnej wyposażonego w akcelerator 150 kW, 10 MeV i źródło technologiczne  $^{60}\text{Co}$  (1 MCi). Ponadto planuje się:

- rozwijanie technologii produkcji materiałów polimerowych oraz oczyszczania gazów przemysłowych z VOC,
- określenie znaczenia procesów wolnorodnikowych w układach biologicznych, polimerowych oraz nano- i mezoporowatych, a w szczególności:
  - poznanie mechanizmów reakcji rodnikowych inicjowanych promieniowaniem jonizującym w układach związków o znaczeniu biologicznym z możliwością wykorzystania uzyskanych wyników przy opracowaniu określonych farmaceutyków, podniesienia jakości życia poprzez poznanie mechanizmów procesów starzenia, poznanie patologii wielu stanów chorobowych (choroba Alzheimera, Parkinsona),
  - ocena procesów z udziałem rodnikowych produktów przejściowych generowanych radiacyjnie w fazie stałej ze szczególnym uwzględnieniem polimerów naturalnych i syntetycznych oraz w układach nano- i mezoporowatych z możliwością wykorzystania uzyskanych wyników do optymalizacji budowy i składu materiałów przewidzianych do stosowania jako implanty medyczne w chirurgii rekonstrukcyjnej i zabiegowej, bankach tkanek oraz dozymetrii stosowanej w technologiach radiacyjnych,
- poznanie mechanizmów oddziaływania promieniowania jonizującego w materiałach jako podstawy opracowania metod ich radiacyjnej modyfikacji, a w szczególności:
  - wykorzystanie metod radiacyjnych do sieciowania i szczepiania polimerów przeznaczonych do celów medycznych, takich jak podłoża do hodowli tkanek oraz implantów medycznych,
  - zastosowanie modyfikacji radiacyjnej w procesie wytwarzania nanomateriałów i kompozytów polimerowych w celu poprawy ich parametrów użytkowych poprzez optymalne kształtowanie ich składu domieszkowego i kopolimerowego oraz uzyskanie nowych, unikalnych własności tych materiałów,
  - zastosowanie modyfikacji radiacyjnej materiałów półprzewodnikowych ze szczególnym uwzględnieniem węgla krzemu dla poprawy parametrów użytkowych nowej klasy wyrobów półprzewodnikowych opartych na węglu krzemu,
  - badanie procesów radiacyjnej degradacji materiałów z rozpoznaniem roli wielkości gniazd jonizacyjnych ze szczególnym uwzględnieniem polimerów przeznaczonych do zastosowań w energetyce jądrowej oraz recyklingu materiałów.

**Chemia jądrowa i radiochemia**, w tym radioekologia, radiochemiczne metody rozdzielcze, chemia radiofarmaceutyczna i jądrowe metody analityczne:

Największym przedsięwzięciem będzie budowa miniaturowego reaktora dla celów neutronowej analizy aktywacyjnej. Po uruchomieniu programu energetyki jądrowej szczególne znaczenie uzyskają tematy dotyczące chemicznych aspektów tej energetyki i radioekologii, ukierunkowane na zwiększenie bezpieczeństwa w elektrowniach jądrowych i składowiskach odpadów promieniotwórczych, których realizacja przewidywana jest już w ramach rozpoczynającego się 7 Programu Ramowego UE w części Euratom. Tematy te obejmują między innymi:

- hydrometalurgiczne metody rozdzielania aktywności i lantanowcowych produktów rozszczepienia,
- opracowanie nieorganicznych selektywnych sorbentów radionuklidów i ich zastosowanie do dekontaminacji ciekłych odpadów promieniotwórczych,
- oczyszczanie ciekłych odpadów promieniotwórczych metodami hybrydowymi – ultrafiltracja sprzężona z kompleksowaniem i sorpcją radionuklidów,
- badanie mechanizmów reakcji chemicznych produktów radiolizy w zależności od ciśnienia i temperatury.

Ponadto planuje się między innymi:

- dalszy rozwój prac mających na celu opracowanie i wdrożenie nowych radiofarmaceutyków ze szczególnym uwzględnieniem preparatów wykorzystywanych w diagnostyce PET,
- rozwój metod izotopów środowiskowych (stałych i promieniotwórczych) w badaniach cykli pierwiastków i wpływu źródeł antropogenicznych na ich stężenie oraz obieg w przyrodzie,
- doskonalenie metod radiometrycznych w kierunku miniaturyzacji analizowanego materiału oraz zwiększenia czułości i precyzji oznaczeń.

Wszystkie powyższe tematy będą realizowane w ścisłej współpracy z wiodącymi ośrodkami zagranicznymi.

### **Możliwości aplikacyjne**

Zastosowania praktyczne opracowywanych metod chemii jądrowej i radiacyjnej obejmują przede wszystkim:

- usługi radiacyjne Centrum Badań i Technologii Radiacyjnych (odbiorcy: przemysł materiałów medycznych, przemysł polimerowych materiałów instalacyjnych, przemysł rolniczy),
- opracowanie i wdrożenie do praktyki medycznej nowych generatorów radionuklidów oraz metod otrzymywania radionuklidów terapeutycznych i diagnostycznych (bezośnikowych),
- opracowanie i wdrożenie nowych hydrożeli i nanożeli (dla przemysłu materiałów medycznych i przemysłu spożywczego),
- opracowanie i wdrożenie nowych technik analitycznych dla izotopowego monitoringu środowiska i monitoringu skażeń radioaktywnych,
- opracowanie i wdrażanie nowoczesnych technologii przetwarzania odpadów niebezpiecznych, w tym radioaktywnych,
- opracowanie i wdrożenie nowych metod analizy.

### **Ocena potrzeb w zakresie kształcenia oraz rozwoju kadry**

Postuluje się następujące działania:

- wprowadzenie zajęć dydaktycznych z zakresu radiochemii i chemii jądrowej (obligatoryjnych w ramach standardów nauczania oraz fakultatywnych) na kierunkach studiów: chemia, medycyna nuklearna, ochrona środowiska, biologia i ekologia,
- wprowadzenie studiów podyplomowych z radiochemii i chemii jądrowej dla nauczycieli oraz pracowników jednostek i urzędów zajmujących się bezpieczeństwem jądrowym, ochroną radiologiczną i wdrażaniem energetyki jądrowej,
- stworzenie nowego, międzyuczelnianego kierunku studiów – Inżynieria Biomedyczna, jako wspólnej inicjatywy Politechniki Łódzkiej i Uniwersytetu Medycznego (nabór rozpocznie się w 2007 r.), przy czym jednym z głównych zadań nauczania będzie kształcenie wykwalifikowanej kadry dla potrzeb diagnostyki i radioterapii,
- utworzenie studiów w dziedzinie techniki radiacyjnej, regularnych lub indywidualnych, prowadzonych w języku angielskim, w oparciu głównie o kadre MITR i dotychczasowe doświadczenia z podobnymi studiami prowadzonymi po polsku (Wydział Chemiczny PŁ),
- kontynuowanie studiów doktoranckich z chemii radiacyjnej i jądrowej w IChTJ i zorganizowanie podobnych studiów na UW, UG, MITR PŁ i in. Programy tych studiów winny być zgodne z przyjętymi kierunkami badań i strategią gospodarczego rozwoju kraju.

## 6. ENERGETYKA JĄDROWA

### I. Energetyka oparta na reakcji rozszczepienia jądra atomowego

#### Stan obecny

Do końca roku 1990, przed przerwaniem programu energetyki jądrowej w Polsce, liczebność pracowników zajmujących się tą dziedziną, instytucje zaangażowane i programy edukacyjne w tym zakresie całkowicie odbiegały od stanu obecnego. Decyzja o zaniechaniu budowy elektrowni jądrowej w Żarnowcu (i następnych) spowodowała przede wszystkim zlikwidowanie podstaw finansowania programów, a więc zamieranie wielu programów badawczych, rozproszenie kadry i likwidację kierunków nauczania. Niektórzy polscy specjaliści znaleźli zatrudnienie w ośrodkach zagranicznych, ale raczej nie są zainteresowani podjęciem odpowiedniej tematyki w Polsce.

Obecnie kilka ośrodków badawczych deklaruje zainteresowanie tematyką energetyki jądrowej i technik reaktorowych. Są to:

- Instytut Energii Atomowej w Świerku,
- Instytut Chemii i Techniki Jądrowej w Warszawie,
- Akademia Górniczo-Hutnicza w Krakowie,
- Uniwersytet Warszawski,
- Politechnika Warszawska,
- Politechnika Śląska,

przy czym liczba pracowników naukowych i naukowo-technicznych oraz doktorantów zajmujących się tą tematyką prawdopodobnie nie przekracza 50 osób (znaczna liczba pracowników wkrótce osiągnie wiek emerytalny).

Do największych osiągnięć w ostatnim czasie można zaliczyć:

- realizowane w ramach szóstego Programu Ramowego Euratomu:
  - eksperyment MUSE do weryfikacji obliczeń transportu neutronów w układach podkrytycznych; (AGH),
  - wstępne studium projektowe eksperymentalnego prototypu systemów sterowanych akceleratorem XADS; (AGH),
- wdrożenie do bazy „NEA OECD Nuclear Data Bank” programu służącego do analizy cykli paliwowych i transmutacji - Monte Carlo Burnup Code – MCBC; (AGH),
- prace nad transportem neutronów w układach unieszkodliwiania odpadów jądrowych – Pu i aktynowców (w ramach funduszu Marii Curie, we współpracy z BNL); (AGH),
- prace nad unieszkodliwianiem wysokoaktywnych odpadów promieniotwórczych w układach z akceleratorowym źródłem neutronów; (AGH, IEA),
- badania modelowe wariantu energetyki jądrowej z cyklem torowo-uranowym; (AGH, IEA).

W tematyce energetyki jądrowej i fizyki reaktorów niesłychanie istotną rolę odgrywa współpraca międzynarodowa. Polskie ośrodki w takiej współpracy realizują następujące projekty w ramach VI PR EURATOM:

- EUROTRANS; zintegrowany projekt badań nad systemami ADS do transmutacji odpadów promieniotwórczych; (AGH),
- ELSY; projektowanie europejskiego reaktora krytycznego, chłodzonego oło-

- wiem, do wypalania plutonu oraz aktywności; (AGH),
- PUMA; projektowanie reaktora krytycznego chłodzonego helem do wypalania plutonu oraz aktywności; (AGH),
- MYRRHA; (IEA),
- EUROPART; (IChTJ),  
(dwa ostatnie programy, podobnie jak wymieniony poniżej program realizowany w ZIBJ, dotyczą reaktora podkrytycznego współpracującego z akceleratorem oraz problematyki transmutacji odpadów promieniotwórczych)

lub właśnie inicjują:

- RAPHAEL; projekt reaktora wysokotemperaturowego do produkcji wodoru; (Konsorcjum „Wysokotemperaturowy Reaktor Jądrowy w Polsce”),

oraz w ramach umów międzynarodowych:

- ELEKTROJAD; (ZIBJ w Dubnej).

Współpraca prowadzona jest z takimi instytucjami zagranicznymi, jak JRC w Petten (Holandia), AREVA (Francja), ANSALDO, CIEMAT i ENEA (Włochy), FZJ, FZK i SIEMENS (Niemcy) i innymi.

### **Planowane główne tematy badawcze**

Planowane badania zostały zdominowane przez trzy zagadnienia:

- rozwój energetyki jądrowej w Polsce, przy czym elektrownie jądrowe (generacji III) mają być istotnym czynnikiem w polskim bilansie elektroenergetycznym,
- przygotowanie infrastruktury badawczo-technicznej i edukacyjnej dla polskiej energetyki jądrowej,
- reaktory jądrowe jako źródło ciepła wysokotemperaturowego dla chemicznej przeróbki węgla i ewentualnie dla bezemisyjnej produkcji wodoru (i tlenu).

Zakres i tematyka prac objętych dwoma pierwszymi zagadnieniami zależy przede wszystkim od decyzji polityków polskich wobec rozwoju krajowej energetyki jądrowej, aczkolwiek niektóre tematy badawcze i ich praktyczne wdrożenia są raczej związane z energetyką jądrową w naszym regionie (zagadnienia bezpieczeństwa reaktorów i rozprzestrzeniania się izotopów promieniotwórczych w środowisku). Planuje się podjęcie w najbliższym czasie następujących tematów, w tym we współpracy międzynarodowej (niektóre zagadnienia są kontynuacją prowadzonych obecnie badań):

- udział w programach dotyczących:
  - projektów niektórych reaktorów nowych generacji,
  - możliwości wykorzystania cyklu torowo-uranowego w reaktorach,
  - uzupełniania i poprawy jakości danych jądrowych,
  - technologii reaktorów wysokotemperaturowych w zastosowaniu do produkcji energii elektrycznej, chemicznej przeróbki węgla i produkcji wodoru, a w tym między innymi wytwarzania i testowania materiałów konstrukcyjnych i paliw do reaktorów wysokotemperaturowych,
  - zastosowania podkrytycznych układów sterowanych akceleratorem do transmutacji wypalonego paliwa jądrowego,
  - hydrometalurgicznych metod rozdzielania aktywności i lantanowcowych produktów rozszczepienia w procesie przerobu wypalonego paliwa jądrowego,
- metody obliczeniowe do symulacji fizyki reaktorów i projektowania systemów ją-

drowych,

- selektywne nieorganiczne sorbenty radionuklidów i ich zastosowanie do dekontaminacji ciekłych czynników technologicznych i odpadów promieniotwórczych w elektrowniach jądrowych.

W razie podjęcia decyzji o uruchomieniu w Polsce programu energetyki jądrowej, niezależnie od programów przygotowania i kształcenia kadry, będzie trzeba podjąć programy umożliwiające:

- uruchomienie programów badawczo-rozwojowych ukierunkowanych na rozwiązywanie praktycznych problemów związanych z polskimi elektrowniami jądrowymi, w tym z gospodarką odpadami promieniotwórczymi i wypalonym paliwem jądrowym,
- dalszy i pełniejszy (tematycznie) udział polskich zespołów badawczych (fizyków, chemików, metaloznawców, elektroenergetyków i innych) w międzynarodowych programach badawczych.

Przed podjęciem decyzji o polskim programie energetyki jądrowej celowym wydaje się podjęcie tematów (żaden z obecnie zaangażowanych w problematykę jądrową zespołów badawczych nie deklaruje takich planów) związanych z:

- ekspertyzą w sprawie wyboru typu pierwszych elektrowni jądrowych w Polsce oraz ich lokalizacji („siting”), z uwzględnieniem również czynników bezpieczeństwa jądrowego i ochrony radiologicznej,
- kompleksowym planem zagospodarowania odpadów promieniotwórczych i wypalonego paliwa z polskich elektrowni jądrowych.

Szereg ośrodków w Polsce planuje podjęcie programów szkolenia kadr dla przyszłej polskiej energetyki jądrowej. W szczególności Instytut Energii Atomowej w Świerku zamierza, we współpracy (głównie) z Uniwersytetem Marii Curie-Skłodowskiej w Lublinie, uruchomić Centrum Szkolenia i Treningu, wyposażone między innymi w symulatory reaktora badawczego MARIA i reaktora energetycznego, jak również w pełny zestaw stosownej aparatury dozymetrycznej. Inne ośrodki badawcze planują uruchomienie studiów doktoranckich i kursów o tematyce w nich uprawianej, natomiast szereg ośrodków akademickich planuje uruchomienie, w niektórych przypadkach we współpracy z ośrodkami badawczymi (np. porozumienie AGH – IFJ PAN w Krakowie) lub odtworzenie niegdyś tam istniejących kierunków studiów, studiów podyplomowych i studiów doktoranckich. Wydaje się, że przed podjęciem przez różne ośrodki programu szkolenia kadr dla przyszłej energetyki jądrowej należałoby przeprowadzić studium określające ilościowe zapotrzebowanie na wyspecjalizowane kadry, potrzebne specjalności, a także określające optymalną organizację szkolenia.

W środowisku atomistyki powstały ostatnio bardziej lub mniej formalne struktury badawcze, w tym tak zwane Konsorcja, jak również propozycje utworzenia nowych ośrodków „Infrastruktury Badawczej z planowanym dofinansowaniem z Funduszy Strukturalnych UE”, w ramach programu „Innowacyjna Gospodarka”. W szczególności, w związku z tematyką dotyczącą wykorzystania jądrowego reaktora wysokoenergetycznego dla produkcji energii elektrycznej, chemicznej przeróbki węgla i produkcji wodoru, powstało konsorcjum (i projekt ośrodka Infrastruktury Badawczej) pod nazwą „Wysokotemperaturowy Reaktor Jądrowy w Polsce”. Na podkreślenie zasługuje fakt, że w programy te zamierzają zaangażować się, poza ośrodkami jądrowymi, również ośrodki związane z klasyczną karbochemią.

Niezależnie od dyskusji na temat problematyki budowy i wykorzystania jądrowej

wych reaktorów wysokotemperaturowych w Polsce, ostatnio pojawiły się głosy dotyczące podjęcia na szerszą skalę tematu reaktora opartego na cyklu torowo-uranowym. Należy przy tym podkreślić, że zarówno tematyka reaktorów wysokotemperaturowych, jak i wspomniana koncepcja reaktorów z wykorzystaniem cyklu torowo-uranowego, nie stanowi konkurencji dla programu budowy elektrowni jądrowych w Polsce, istotnego z punktu widzenia znaczącego uzupełnienia bilansu elektroenergetycznego kraju. Przeciwnie – trudno wyobrazić sobie realne (finansowo, kadrowo) zaangażowanie naszych ośrodków naukowych i przemysłowych w takie badania bez istniejącego w kraju sektora energetyki jądrowej.

Uruchomienie w Polsce projektu badawczego związanego z wysokotemperaturowym reaktorem jądrowym lub z reaktorami bazującymi na cyklu torowo-uranowym powinno oznaczać również budowę reaktora badawczego małej mocy opartego na badanej technologii, choć można sobie również wyobrazić wykorzystanie na etapie badań doświadczeń nabytych uprzednio (dawna współpraca Polski z FZJ w Jülich) lub współpracy z ośrodkami zagranicznymi i rozpoczęcie prac polskich od budowy instalacji przemysłowych (których koszty winny być liczone w miliardach euro). Jednocześnie jedyny pracujący w Polsce reaktor badawczy MARIA będzie ostatecznie wyłączony z eksploatacji w latach 2020-2025, co oznacza konieczność wybudowania i uruchomienia w tym czasie nowego reaktora badawczego. Jego istnienie wydaje się bezwzględnie konieczne dla produkcji radioizotopów, dla szkolenia i dla eksperymentów badawczych, przy czym trudno sobie wyobrazić kraj uruchamiający ambitny program energetyki jądrowej bez posiadania reaktora badawczego. Reaktor taki, wykorzystywany dla szerokich celów, mógłby być reaktorem opartym na wspomnianych wyżej nowych technologiach.

### **Potrzeby w zakresie kształcenia i rozwoju kadry**

Potrzeby kadrowe w przypadku uruchomienia polskiego programu jądrowego zostały wstępnie scharakteryzowane powyżej, przy czym zagadnienie to będzie wymagało podjęcia stosownych decyzji na najwyższym szczeblu. Zaniechanie programu energetyki jądrowej w Polsce i obserwowane w Europie w latach 80. i 90. odwołanie od tej opcji energetycznej spowodowały nie tylko rozproszenie specjalistów, ale również likwidację kierunków kształcenia, kierunków dyplomowania i tematów zajęć dydaktycznych związanych z energetyką jądrową (również likwidację specjalistycznego szkolnictwa średniego). Dla utrzymania odpowiedniego poziomu kompetencji społeczeństwa polskiego w tym zakresie niezbędne wydaje się:

- wprowadzenie (przywrócenie) tematyki jądrowej w programach fizyki, chemii i przedmiotów inżynierskich,
- uruchomienie (przywrócenie) na wyższych uczelniach kierunków (specjalności) nauczania związanych z energetyką jądrową,
- uruchomienie studiów podyplomowych i doktoranckich w tej tematyce, w tym również dla kandydatów reprezentujących specjalności inżynierskie (metalurgowie, cieplownicy, elektrycy, mechanicy i inni),
- uruchomienie odpowiednich programów stypendiów i staży zagranicznych,
- uruchomienie szerokiego programu edukacji i informacji społecznej w zakresie podstaw, wykorzystywania i zagrożeń pochodzących od technologii jądrowych.

Należy również opracować mechanizmy stwarzające zachętę dla kandydatów do podejmowania wybranych kierunków kształcenia (stypendia fundowane?).

Przystąpienie Polski do programu energetyki jądrowej oznaczać będzie ko-



nieczność zaangażowania znacznych środków w programy edukacyjno-szkoleniowe, obejmujące rozbudowane programy staży zagranicznych dla pracowników naukowo-dydaktycznych („nauczanie nauczycieli”), kadry naukowej ośrodków badawczych, pracowników elektrowni i inspektorów dozoru jądrowego. Część tych środków będzie pochodziło od przemysłu, ale – na wstępnym etapie – również z budżetu państwa. Utrzymanie ośrodków szkoleniowych (symulatory) dla eksploatowanych elektrowni będzie pozostawało w interesie przedsiębiorstw przemysłowych.

Niezależnie od powyższych rozważań należy przyjąć, że nawet uruchomienie programów badawczych nie związanych z polskim programem energetyki jądrowej będzie wymagało znacznego zwiększenia liczby pracowników (i doktorantów) z obecnego poziomu około 50 osób do około 100 osób.

## **II. Energetyka oparta na wykorzystaniu syntezy jądrowej**

### **Stan obecny**

Obecnie prace badawcze w zakresie syntezy (fuzji) jądrowej prowadzone są w następujących ośrodkach naukowych:

- Instytut Fizyki Plazmy i Laserowej Mikrosyntezy w Warszawie,
- Politechnika Warszawska, Wydział Inżynierii Materiałowej,
- Instytut Problemów Jądrowych w Świerku,
- Instytut Fizyki Jądrowej PAN w Krakowie,
- Uniwersytet Opolski,
- Politechnika Szczecińska, Wydział Fizyki,
- Akademia Morska w Szczecinie,
- Akademia Górniczo-Hutnicza, Wydział Fizyki i Informatyki Stosowanej,
- Instytut Niskich Temperatur i Badań Strukturalnych PAN we Wrocławiu,
- Instytut Energii Atomowej w Świerku,
- Szkoła Główna Gospodarstwa Wiejskiego w Warszawie,
- Uniwersytet Marii Curie-Skłodowskiej w Lublinie,
- Instytut Metali Nieżelaznych w Gliwicach.

Ogólna liczba pracowników (naukowych i naukowo-technicznych) zaangażowanych w tematykę syntezy jądrowej wynosi ok. 120 osób.

**Główne tematy badawcze** można podzielić na następujące grupy:

- A. Diagnostyka plazmy w urządzeniach magnetycznego utrzymania (tokamakach i stelaratorach):
  - a. spektrometria miękkiego promieniowania rentgenowskiego i analiza PHA,
  - b. detektory Czerenkowa,
  - c. detektory śladowe,
  - d. detekcja neutronów metodą aktywacji,
  - e. spektroskopia domieszek (węgla, tlenu, ...),
  - f. diagnostyka mikrofalowa.
- B. Teoria i komputerowe modelowanie zjawisk fizycznych w plazmie gorącej:
  - a. modelowanie zjawisk transportu w plazmie przyściennej,
  - b. modelowanie reżimów operacyjnych reaktora fuzyjnego,
  - c. nieliniowa dynamika plazmy (niestabilności wzbudzone cząstkami nadter-

- micznymi),
  - d. wykorzystanie neutronów w reaktorze termojądrowym.
- C. Analiza naprężeń mechanicznych, termicznych i elektromagnetycznych w urządzeniach syntezy:
- a. wsparcie inżynierskie projektu Wendelstein 7-X w IPP Greifswald, Niemcy.
- D. Inżynieria materiałowa:
- a. badania erozji materiałów pierwszej ściany reaktora,
  - b. inżynieria kompozytów W-Cu w postaci FGM (functionally graded material),
  - c. hydrostatyczne wyciskanie w celu optymalizacji materiałów dla fuzji.
- E. Inne badania technologiczne:
- a. laserowa detrytacja pierwszej ściany reaktora,
  - b. detekcja i usuwanie pyłu,
  - c. obliczenia transportu neutronów w reaktorze,
  - d. charakteryzacja materiałów nadprzewodników wysokotemperaturowych,
  - e. światłowody odporne na pola promieniowania w reaktorze fuzyjnym,
  - f. stopy lutownicze dla fuzji.
- F. Badania socjoekonomiczne:
- a. oszacowanie kosztów traktatów, porozumień w zakresie energii jądrowej,
  - b. badania dotyczące postrzegania fuzji jądrowej przez laików.
- G. Badania w zakresie fuzji inercyjnej (za pomocą laserów dużej mocy) – w ograniczonym zakresie.

W Polsce nie planuje się budowy urządzeń do badania fuzji. Polscy specjaliści uczestniczą w europejskich programach badawczych prowadzonych na istniejących urządzeniach (JET w Culham, TEXTOR w Jülich, MAST w Culham, Tore Supra w Cadarache i in.) oraz będących w budowie: COMPASS-D w Pradze, stellarator W7-X w IPP Greifswald. W dłuższej skali czasowej najważniejszy będzie udział w światowym programie ITER, jak również prace przygotowawcze (np. w zakresie oddziaływania i wykorzystania neutronów) dla reaktora DEMO. Jednostki naukowe wymienione powyżej (z wyjątkiem dwóch ostatnich z Lublina i Gliwic) tworzą Asocjację Euratom-IFPiLM, która na mocy Kontraktu Asocjacyjnego ze Wspólnotą EURATOM została włączona do Europejskiej Przestrzeni Badawczej w zakresie fuzji jądrowej. Kontrakt ten otwiera dla naukowców polskich wszystkie urządzenia fuzyjne w krajach Wspólnoty, w tym wspólnotowy, największy na świecie, tokamak JET. Polskie jednostki naukowe nawiązały współpracę z ośrodkami naukowymi w Niemczech (IPP Greifswald, IPP Jülich), Szwecji (Royal Institute of Technology, Chalmers University Goeteborg), Francji (CEA Cadarache), Wielkiej Brytanii (UKAEA Fusion Centre Culham), Belgii (Królewska Akademia Wojskowa, Uniwersytet w Gent), Czechach (Instytut Fizyki Plazmy i Instytut Fizyki w Pradze, Centrum PALS – Prague Asterix Laser System), Austrii (Akademia Nauk i Politechnika Wiedeńska) i Włoch (ENEA, Frascati/Rzym).

#### **Największe osiągnięcia w ostatnich latach, to:**

- utworzenie Asocjacji Euratom-IFPiLM, co pozwoliło na skoordynowanie w skali kraju prac na rzecz fuzji oraz włączenie programu Asocjacji do Europejskiej Przestrzeni Badawczej w zakresie fuzji jądrowej,
- komputerowe modele transportu w plazmie,
- obliczenia inżynierskie na potrzeby projektu W7-X,

- udział w eksperymentach na tokamaku TEXTOR (Niemcy) i Castor (Czechy),
- udział w kampanii eksperymentalnej na tokamaku JET w roku 2006,
- analiza transportu neutronów w obszarze diwertora.

**Możliwości aplikacyjne** – wykorzystanie wyników prowadzonych badań, tzn. komercyjny reaktor fuzyjny, przewidywane jest w dalszej przyszłości.

#### **Ocena potrzeb w zakresie kształcenia oraz rozwoju kadry**

Konieczne jest uruchomienie kierunków kształcenia w zakresie fizyki plazmy gorącej i technologii mających odniesienie do procesu fuzji. Pierwsze kursy będą uruchomione w AGH i na Politechnice Wrocławskiej oraz prawdopodobnie na Politechnice Szczecińskiej. Politechnika Warszawska kształci specjalistów w zakresie inżynierii materiałowej. Ponadto w wybranych uczelniach i instytutach należy uruchomić studia doktoranckie w tym zakresie. Polscy specjaliści powinni też korzystać z istniejących w UE programów kształcenia specjalistów dla fuzji, takich jak program EFTS (*European Fusion Training Scheme*) i Erasmus Mundus (*European Master in Nuclear Fusion Science and Engineering Physics*).

## 7. POZAENERGETYCZNE TECHNIKI JĄDROWE

### Stan obecny

Polska nie będąc „krajem jądrowym” (w sensie wykorzystania energetyki jądrowej) należy do państw zaawansowanych w stosowaniu techniki jądrowej w wielu dziedzinach gospodarki, o czym świadczy liczba ponad 2300 użytkowników źródeł promieniowania jonizującego w przemyśle. Problematyka ta jest również przedmiotem prac badawczo-rozwojowych w polskich ośrodkach naukowych. Łącznie opracowywaniem, rozwojem i wdrażaniem do praktyki przemysłowej technik jądrowych zajmuje się w Polsce 12 ośrodków, które zatrudniają ok. 80 pracowników naukowych i naukowo-technicznych, przy czym niektóre z wymienionych zagadnień są jednocześnie omówione w części dotyczącej chemii radiacyjnej i analiz radiometrycznych.

Do najbardziej znaczących osiągnięć należy zaliczyć:

- wdrożenie instalacji oczyszczania gazów kominowych w Elektrociepłowni Pomorzany,
- szerokie wdrożenie technologii radiacyjnych w innych zastosowaniach,
- pełne zabezpieczenie krajowych potrzeb na nowoczesną radioizotopową aparaturę do kontroli procesów przemysłowych z wykorzystaniem radioizotopów, jak również dla oceny parametrów węgla oraz bezprzewodowego monitoringu zapylenia powietrza,
- wdrożenie nowoczesnych metod i procedur analitycznych (NAA, XRF) na potrzeby medycyny, ochrony środowiska i przemysłu.

Technologie radiacyjne znalazły między innymi następujące zastosowania: sterylizacja radiacyjna, modyfikacja polimerów (wyroby termokurczliwe), radiacyjna higienizacja przypraw, produkcja opatrunków hydrożelowych. Metoda znaczników promieniotwórczych, jako metoda rutynowa znalazła zastosowania między innymi w ocenie szczelności obiektów, w badaniach procesów przemysłowych czy przeróbki rud; postęp technik informatycznych powoduje konieczność ciągłego dostosowywania metod akwizycji i przetwarzania danych do aktualnych możliwości technicznych. W obszarze radioizotopowej aparatury przemysłowej zwraca uwagę istnienie kilku przedsiębiorstw wytwarzających zaawansowane technicznie urządzenia pomiarowe. Asortyment wytwarzanych urządzeń jest dość szeroki, jednakże firmy te są stosunkowo niewielkie i nie stać ich na prowadzenie na szerszą skalę prac rozwojowych. Na podkreślenie zasługuje wysoki poziom technologiczny i różnorodność aparatury radioizotopowej stosowanej w procesie wydobywania i przeróbki węgla. Brakuje jednak w ofercie dla przemysłu nowoczesnych urządzeń do skaningu dużych obiektów technologicznych (typu kolumny rektyfikacyjne), czy aparatury diagnostycznej wykorzystującej metody przemysłowej tomografii komputerowej. Praktycznie zaprzestano w kraju produkcji detektorów i źródeł promieniowania przeznaczonych do zastosowań w aparaturze przemysłowej. W zakresie jądrowych instrumentalnych metod analizy składu rozwijana jest głównie laboratoryjna technika neutronowej analizy aktywacyjnej i fluorescencji rentgenowskiej. Na mniejszą skalę są prowadzone prace nad analizatorami przemysłowymi.

## **Planowane główne tematy badawcze**

Przewiduje się podjęcie następujących tematów:

### **Technologie radiacyjne**

- rozwój technologii oczyszczania gazów przy użyciu wiązki elektronów pod kątem zastosowań dla kotłów opalanych ropą czy spalarni śmieci (IChTJ),
- radiacyjna modyfikacja materiałów półprzewodnikowych ze szczególnym uwzględnieniem węgla krzemu (IChTJ),
- zastosowanie modyfikacji radiacyjnej w procesie wytwarzania nanomateriałów i kompozytów (IChTJ),
- wykorzystanie procesów sieciowania, szczególnie radiacyjnego, w polimerach przeznaczonych do celów medycznych (IChTJ),
- wykorzystanie hydrożeli w procesie kontrolowanego uwalniania leków (MITR),
- wykorzystanie technik radiacyjnych w procesach konserwacji dzieł sztuki i zabytków (MITR).

### **Miernictwo przemysłowe i diagnostyka**

- nowe generacje urządzeń radioizotopowych na potrzeby miernictwa przemysłowego (IChTJ, AGH, EMAG),
- wyznaczanie parametrów jakościowych węgla oraz pomiary wielkości fizycznych zawiesin pyłowo-powietrznych i wodnych za pomocą metod i urządzeń radiometrycznych, rozwój istniejących i opracowywanie nowych metod pomiarowych (EMAG),
- rozwój metod diagnostycznych w oparciu o przemysłową tomografię komputerową (IChTJ, AGH),
- zastosowania technik jądrowych do badania wielofazowych przepływów w układach przemysłowych (AGH).

### **Metody znacznikowe w ochronie środowiska i optymalizacji procesów technologicznych**

- optymalizacja ciągów technologicznych oczyszczalni ścieków komunalno-przemysłowych z wykorzystaniem metod znacznikowych oraz modelowania komputerowego przepływów (IChTJ),
- rozwój metod znacznikowych w zastosowaniach hydrogeologicznych (AGH),
- izotopy stabilne i radioaktywne jako wskaźniki w badaniach środowiskowych (IChTJ, AGH),
- identyfikacja i optymalizacja procesów oczyszczania ścieków (AGH),
- doskonalenie technik pomiaru promieniotwórczości naturalnej w środowisku (AGH).

### **Jądrowe metody analizy składu materii**

- neutronowa analiza aktywacyjna i techniki wspomagające jako narzędzie zapewnienia jakości w analizie śladowej (IChTJ),
- opracowanie procedur analitycznych w rentgenowskiej mikroanalizie fluorescencyjnej pojedynczych ziaren i pyłów atmosferycznych (AGH),
- jądrowe metody analityczne oznaczania śladowych zawartości pierwiastków izotopów promieniotwórczych na potrzeby ochrony środowiska naturalnego i dziedzictwa kulturowego (IChTJ, AGH, IFJ),

- rozwój techniki PGNAA opartej na wykorzystaniu źródła neutronów  $^{252}\text{Cf}$  oraz jej zastosowanie do nieniszczących oznaczeń boru w skałach i glebach (AGH),
- otworowy generator neutronowy dla potrzeb określania podstawowych parametrów geologiczno-złożowych skał (IFJ),
- wykorzystanie promieniowania synchrotronowego w badaniach procesów degeneracyjnych w tkankach centralnego układu nerwowego człowieka (AGH),
- doskonalenie metod oznaczania silnych absorbentów neutronów termicznych (AGH),
- badania dynamiki cyklu węglowego z wykorzystaniem metod jądrowych i technik chromatograficznych. (AGH).

Prezentowana tematyka ma charakter aplikacyjny i jest niemal pewne wdrożenie wszystkich planowanych tematów badawczych. Wdrożenia są realizowane albo poprzez produkcję aparatury i urządzeń w wyspecjalizowanych firmach, albo też poprzez wytwarzanie małoseryjnej aparatury czy świadczenie usług przez jednostki prowadzące prace badawczo-rozwojowe. Przewidywać również można podejmowanie produkcji i usług zewnętrznych przez spółki wyodrębnione z jednostek badawczo-rozwojowych czy przedsięwzięcia typu „spin-off”. Istotnym elementem programu będzie kontynuowanie współpracy z instytutami i szkołami wyższymi z całego kraju w realizacji programów badawczych i wdrożeniowych prowadzonych przy wykorzystaniu dużych źródeł promieniowania jonizującego.

### **Potrzeby w zakresie kształcenia i rozwoju kadry**

Wydaje się, że kadra na poziomie licencjackim i magisterskim kształcona na kierunkach uniwersyteckich jest generalnie wystarczająco dobrze przygotowana do realizacji zadań objętych proponowanym programem. Szkolenie specjalistyczne musi być realizowane w ramach studiów doktoranckich oraz praktyk w zagranicznych i krajowych ośrodkach badawczych. Brakuje natomiast elektroników-konstruktorów aparatury, którzy byliby gotowi podjąć pracę w dziedzinach związanych z atomistyką.

## 8. MEDYCZNE ZASTOSOWANIA PROMIENIOWANIA JONIZUJĄCEGO

Medyczne aspekty stosowania promieniowania jonizującego obejmują swoim zakresem wiele dziedzin jak: radiobiologia, radiologia i diagnostyka obrazowa, radioterapia, medycyna nuklearna, ochrona radiologiczna, hematologia radiacyjna, radiofarmacja, radiochemia, inżynieria biomedyczna, fizyka medyczna czy higiena radiacyjna. Poniżej wyróżniono następujące zagadnienia:

- zastosowanie otwartych źródeł promieniowania (radioizotopów lub preparatów znakowanych radioizotopami) w diagnostyce i terapii (medycyna nuklearna),
- otrzymywanie nowych radionuklidów i związków znakowanych dla medycyny, zarówno dla celów diagnostycznych jak i terapeutycznych.

Nie omówiono tu badań i zastosowań technik jądrowych w teleradioterapii; zagadnienia rutynowe (wykorzystanie akceleratorów liniowych i źródeł kobaltowych) pozostają domeną placówek służby zdrowia i są rozwijane między innymi z funduszy państwowych programów zwalczania chorób nowotworowych (na przykład uzupełnienie ciągle jeszcze niewystarczającego wyposażenia polskich placówek służby zdrowia w akceleratory terapeutyczne).

W części opracowania dotyczącej Fizyki Jądrowej wspomniano natomiast prace związane z radioterapią hadronową, którą można uznać za najszybciej rozwijającą się współcześnie dziedzinę radioterapii nowotworów. Zastosowanie wiązek protonów i ciężkich jonów (przede wszystkim  $^{12}\text{C}$ ) daje możliwość precyzyjnej lokalizacji podawanej dawki promieniowania, a dzięki własnościom radiobiologicznym użytych cząstek umożliwia wyleczenie niektórych rodzajów nowotworów radioopornych, których leczenie innymi metodami jest niemożliwe lub nieskuteczne. Ponadto należy również wymienić terapię z użyciem neutronów, przy czym w tym obszarze rozwija się tylko terapia borowo-neutronowa (Boron Neutron Capture Therapy, BNCT), z użyciem farmaceutyków zawierających związki boru ( $^{10}\text{B}$ ), możliwie wybiórczo osadzone w tkance nowotworowej i napromieniane neutronami termicznymi.

W Polsce w wymienionej wyżej tematyce realizowane są dwa projekty:

- w Instytucie Fizyki Jądrowej PAN, we współpracy z Kliniką Okulistyki i Radioterapii Okulistycznej CMUJ, zaawansowane są prace nad radioterapią protonową nowotworów oka, z wykorzystaniem protonów o energii 58 MeV z istniejącego akceleratora AIC-144,
- w Instytucie Energii Atomowej, we współpracy z kilkoma ośrodkami krajowymi i JRC Petten, wyprowadzono wiązkę pierwotną do terapii borowo-neutronowej z kanału poziomego reaktora MARIA i zrealizowano szereg projektów badawczych w zakresie BNCT. Obecnie rozpoczęto budowę terapeutycznego źródła neutronów epitermicznych na bazie wiązki wyprowadzonej z reaktora.

W najbliższej przyszłości planuje się dokończenie budowy stanowiska do radioterapii czerniaka oka w IFJ PAN, dokończenie budowy stanowiska do terapii borowo-neutronowej w IEA oraz budowę nowego cyklotronu w IFJ PAN o energii protonów 250 MeV. Umożliwi to przygotowanie dodatkowego stanowiska z wiązką skierowaną poziomo, głównie do radioterapii mózgu, guzów centralnego układu nerwowego, głowy i szyi oraz trudno dostępnych lokalizacji w obrębie tułowia. Planuje się również utworzenie Narodowego Centrum Radioterapii Hadronowej (NCRH) działającego na zasadzie współpracy krajowych ośrodków fizyki jądrowej (w tym IFJ PAN

oraz SLCJ UW), oraz Centrum Onkologii – Instytutu im. Marii Skłodowskiej-Curie (z Oddziałami w Warszawie, Krakowie i Gliwicach), opartego na dedykowanym cyklotronie umożliwiającym przyspieszanie protonów i jonów  $^{12}\text{C}$  do energii 200-300 MeV/u, prowadzącego radioterapię hadronową dla około 2000 pacjentów rocznie.

## **Medycyna nuklearna**

### **Stan obecny**

W Polsce zarejestrowanych jest około 60 zakładów medycyny nuklearnej wyposażonych co najmniej w jedno urządzenie do rejestracji scyntygraficznych (choć jednocześnie w placówkach służby zdrowia działa aż 171 pracowni radioizotopowych II i III klasy). Zakłady takie istnieją we wszystkich placówkach akademickich (13 jednostek) i w szpitalach wojewódzkich (13 zakładów), 10 zakładów zlokalizowanych jest w instytutach i innych placówkach naukowych (instytuty onkologii – 7 placówek, CZD – 1 placówka, instytuty kardiologii – 2 placówki), 6 zakładów zlokalizowanych jest w innych typach szpitali: szpitalach specjalistycznych i szpitalach miejskich oraz 6 placówek w szpitalach wojskowych (w tym 1 w ośrodku akademickim). Rozkład geograficzny zakładów medycyny nuklearnej jest dość zróżnicowany, skupiają się one w kilku dużych aglomeracjach miejskich: Warszawa, Kraków, Łódź, Poznań i region śląski. Ogólna liczba (w przybliżeniu) pracowników naukowych i naukowo-technicznych zajmujących się tą tematyką to około 600 osób w zakładach medycyny nuklearnej, w tym 125 lekarzy:

- 80 lekarzy z II stopniem specjalizacji,
- 25 lekarzy z I stopniem specjalizacji (z medycyny nuklearnej lub innej),
- 20 lekarzy bez specjalizacji,

w tym:

- 55 lekarzy ze stopniem doktora nauk medycznych,
- 8 lekarzy z tytułem dr habilitowanego,
- 10 lekarzy z tytułem profesora,

oraz 115 osób z wyższym wykształceniem (biologicznym, chemicznym, politechnicznym). Grupa ta jest szczególnie ważna dla rozwoju placówek medycyny nuklearnej. Decyduje ona o sprawności aparatury, rozwoju nowych technik diagnostycznych oraz rozwoju zastosowań radiofarmaceutyków.

### **Największe osiągnięcia polskiej medycyny nuklearnej, to:**

- wprowadzenie do diagnostyki w kilku zakładach medycyny nuklearnej nowej metody scyntygrafii receptorowej w rozpoznawaniu nowotworów złośliwych,
- wprowadzenie do praktyki leczniczej w kilku placówkach substancji biologicznie czynnych znakowanych izotopami promieniotwórczymi, takich jak peptydy, hormony, przeciwciała monoklonalne i ich wyizolowane fragmenty,
- opracowanie technologii wytwarzania radiofarmaceutyków opartych na peptydach, pochodnych somatostatyny ( $^{99\text{m}}\text{Tc-HYNIC-TOC}$  i  $^{99\text{m}}\text{Tc-HYNIC-TATE}$ ) stosowanych w diagnostyce nowotworów pochodzenia neuroendokrynnego,
- wprowadzenie do praktyki leczniczej zestawu diagnostycznego  $^{99\text{m}}\text{Tc}$ -Tektrotyd.

**Planowane główne tematy badawcze** są związane z techniką pozytonowej emisyjnej tomografii (PET), rutynowo już stosowanej w krajach rozwiniętych. Liczne opracowania wskazują, że zastosowanie techniki PET, dzięki jej wysokiej czułości,



zdecydowanie zmniejsza koszty procedury leczniczej – przede wszystkim w związku z możliwością ograniczenia liczby inwazyjnych procedur diagnostycznych oraz liczby zbędnych zabiegów operacyjnych. Szacuje się, że jeden skaner PET powinien przypadać na 1 milion ludności. Ustawa ustanawiająca Narodowy Program Zwalczania Chorób Nowotworowych (weszła w życie 1 stycznia 2006 r.) gwarantuje, że na realizację Programu w ciągu 10 lat zostanie przeznaczony ok. 3 mld zł - nie mniej niż 250 mln zł rocznie. Decyzję, na co przeznaczyć te pieniądze, podejmuje minister zdrowia na podstawie propozycji, które przygotowuje Rada Naukowa Programu. Zgodnie z decyzją Rady, do sieci ośrodków PET zakwalifikowano 5 ośrodków: Regionalne Centrum Onkologii w Bydgoszczy, Samodzielny Publiczny Centralny Szpital Kliniczny w Warszawie, Samodzielny Publiczny Szpital Kliniczny w Gdańsku, Centrum Onkologii - Instytut im. M. Skłodowskiej-Curie Oddział w Gliwicach i Świętokrzyskie Centrum Onkologii SP ZOZ w Kielcach

Opracowanie i wdrożenie technologii produkcji radiofarmaceutyków dla systemu diagnostyki medycznej opartego na pozytonowej tomografii emisyjnej obejmować będzie wykorzystanie ośrodków technologicznych w jednostkach wykorzystujących skanery lub znajdujących się w niewielkiej odległości od miejsca wykorzystania. Zadania realizowane wspólnie przez ośrodki produkujące radiofarmaceutyki i wykorzystujące je w diagnostyce PET polegałyby na opracowaniu technologii naświetlania materiałów tarczowych, obróbki radiochemicznej dla produkcji pożądaných radiofarmaceutyków, a także opracowywanie metod ich dystrybucji oraz planów ochrony radiologicznej dla systemu dystrybucji. Badania będą się koncentrować wokół:

- zastosowania fluoro-deoxy-glukozy (FDG) znakowanej izotopem  $^{18}\text{F}$  w diagnostyce pierwotnych zmian nowotworowych, zmian przerzutowych oraz stopnia zaawansowania choroby nowotworowej i oceny wznowy procesu nowotworowego,
- zastosowania PET w diagnostyce schorzeń neurologicznych (zmiany rozrostowe, lokalizacje ognisk padaczkowych i diagnostyka schorzeń otępiennych),
- zastosowania PET w diagnostyce choroby niedokrwiennej serca - w badaniach żywotności (myokardium).

### **Możliwości aplikacyjne**

Ze względu na swój interdyscyplinarny charakter i wartość badań radioizotopowych oraz terapii radionuklidowej, zwłaszcza terapii celowanej, medycyna nuklearna powinna być dalej rozwijana w naszym kraju. Wskaźniki przedstawiające udział medycyny nuklearnej w procesie diagnostycznym w odniesieniu do wskaźników w innych krajach europejskich obrazują zakres dotychczasowych zaniedbań. Zakłady medycyny nuklearnej wymagają pilnego wyposażenia w nowy sprzęt o różnym przeznaczeniu: gamma kamery ogólnego stosowania, kamery SPECT/CT, gamma kamery do badania małych narządów, mierniki dawek. Nadal istnieją zakłady, na wyposażeniu których nie ma gamma kamery, a nawet miernika dawek. Równie nagłym problemem jest organizacja zewnętrznej kontroli jakości stosowanych aparatów i jakości wykonywanych badań.

Większość przedstawionych zagadnień może zostać rozwiązana poprzez zmianę sposobu finansowania badań diagnostycznych. Tylko w nielicznych ośrodkach badania finansowane są bezpośrednio przez Narodowy Fundusz Zdrowia. Wprowadzenie tego systemu jako obowiązującego powinno spowodować zwiększenie dostępności do badań i przyczynić się do właściwego wykorzystania już istniejącego potencjału polskiej medycyny nuklearnej.

## **Potrzeby w zakresie kształcenia i rozwoju kadry**

Medycyna nuklearna jest specjalnością podstawową, a jej uzyskanie wymaga 5-letniego stażu specjalizacyjnego. Obecna liczba 40 miejsc specjalizacyjnych w zakładach medycyny nuklearnej jest wystarczająca. Obserwuje się mniejszą liczbę kandydatów do specjalizacji niż faktyczna liczba miejsc specjalizacyjnych. Zwiększenie zainteresowania tą specjalizacją wymagałoby zastosowanie bodźców finansowych.

## **Nowe radionuklidy i związki znakowane dla medycyny**

### **Stan obecny**

Opracowaniem nowych radionuklidów i związków znakowanych dla medycyny zajmują się przede wszystkim:

- Ośrodek Badawczo-Rozwojowy Izotopów POLATOM,
- Zakład Radiochemii Instytutu Chemii i Techniki Jądrowej, zatrudniające w tej tematyce ok. 20 pracowników naukowych i 15 pracowników naukowo-technicznych. Ponadto tematyką tą zajmuje się IFJ PAN w Krakowie, Uniwersytet Medyczny w Łodzi oraz kilka innych ośrodków. W roku 2008 w badania te powinno włączyć się Warszawskie Centrum PET.

### **Największe osiągnięcia w ostatnich latach to:**

- opracowanie techniki otrzymywania beznośnikowych izotopów  $\beta$ -promieniotwórczych ( $^{90}\text{Y}$ ,  $^{177}\text{Lu}$ ,  $^{188}\text{Re}$ ), które w połączeniu z wysoce specyficznymi antyciałami monoklonalnymi i peptydami wykazującymi powinowactwo do komórek receptorowych tworzą nową grupę leków bardzo skutecznych w walce z nowotworami i w terapii stanów zapalnych stawów,
- wdrożenie nowatorskich technologii otrzymywania zamkniętych źródeł promieniotwórczych do brachyterapii nowotworów gałki ocznej (aplikatory oftalmiczne  $^{106}\text{Ru}$  i  $^{125}\text{I}$ ),
- opracowanie technologii wytwarzania rdzenia aktywnego z osadzonym trwale jodem-125 oraz zastosowanie techniki spawania laserowego do otrzymywania miniaturowych źródeł jodu-125, (tzw. „ziaren jodowych”) stosowanych w brachyterapii nowotworowej guzów wewnątrzmożgowych, prostaty i gałki ocznej,
- uruchomienie we współpracy z zakładami medycyny nuklearnej pionierskich w Polsce prac nad wprowadzeniem do terapii nowotworowej radioimmunoterapii izotopami  $\beta$ -promieniotwórczymi,
- opracowanie metody otrzymywania jodometylootyrozyny znakowanej jodem-123, IMT- $^{123}\text{I}$ , znacznika do oceny diagnostycznej wznowy nowotworów mózgu,
- wdrożenie do produkcji opracowanej w OBRI POLATOM technologii wytwarzania generatorów  $^{188}\text{W}/^{188}\text{Re}$  jako wygodnego źródła  $^{188}\text{Re}$  stosowanego w medycynie do napromieniania naczyń wieńcowych po zabiegu ich udrażniania, w celu zapobiegania ich ponownemu zapadaniu się oraz do znakowania ligandów skutecznych w radioterapii wewnętrznej,
- opracowanie metody wytwarzania preparatu  $^{90}\text{Y}$ , co umożliwiło podjęcie prac nad znakowaniem tym izotopem analogu somatostatyny DOTATATE z przeznaczeniem do radioimmunoterapii guzów neuroendokrynnych nie poddających się innym formom leczenia; współpraca naukowa OBRI z placówkami medycznymi za-

owocowała przeprowadzeniem w 2004 r. pierwszej w Polsce terapii z użyciem  $^{90}\text{Y}$ -DOTATATE u pacjentki z rozsiałym procesem nowotworowym z bardzo dobrym efektem terapeutycznym.

### **Planowane główne tematy badawcze**

Badania w tematyce chemii radiofarmaceutycznej w IChTJ będą koncentrowały się na:

- otrzymywaniu beznośnikowych radionuklidów terapeutycznych i diagnostycznych dla medycyny nuklearnej, w tym opracowywaniu nowych generatorów radionuklidów,
- opracowaniu nowych metod przyłączania radionuklidów do biomolekuł i otrzymywania radiofarmaceutyków.

Planuje się opracowanie metod otrzymywania radionuklidów terapeutycznych o różnych energiach cząstek  $\beta^-$ , np.  $^{177}\text{Lu}$ ,  $^{47}\text{Sc}$ ,  $^{105}\text{Ru}$  i  $^{143}\text{Pr}$ ; oraz radionuklidów diagnostycznych - metalicznych emiterów cząstek  $\beta^+$  jako znaczników PET, np.  $^{86}\text{Y}$ ,  $^{61}\text{Cu}$  (współpraca w ramach Warszawskiego Konsorcjum PET). Opracowane zostaną nowe generatory beznośnikowych radionuklidów - emiterów gamma ( $^{87}\text{Y}/^{87\text{m}}\text{Sr}$ ),  $\beta^+$  ( $^{44}\text{Ti}/^{44}\text{Sc}$ ,  $^{82}\text{Sr}/^{82}\text{Rb}$ ), emiterów alfa ( $^{225}\text{Ac}/^{213}\text{Bi}$ ) oraz emiterów elektronów Augera ( $^{103}\text{Ru}/^{103\text{m}}\text{Rh}$ ). Opracowane zostaną również nowe metody przyłączania radionuklidów do związków biologicznie aktywnych i otrzymywania potencjalnych radiofarmaceutyków.

Do znakowania wybranymi radionuklidami związków biologicznie aktywnych stosowane będą nowe kompleksy z ligandami bifunkcjonalnymi, które będą badane pod kątem trwałości termodynamicznej i kinetycznej oraz właściwości hydrofilowo-lipofilowych.

Zbadana zostanie efektywność znakowania peptydów nuklidami  $^{99\text{m}}\text{Tc}$  i  $^{188}\text{Re}$  za pomocą nowych heteroleptycznych kompleksów typu [4+1] i [3+1] oraz kompleksów trikarbonylkowych. Do znakowania wybranych peptydów nuklidami innych metali zastosowane zostaną kompleksy makrocycliczne ( $^{47}\text{Sc}$ , lantanowce-emitory promieniowania  $\beta^-$ ,  $^{105}\text{Rh}$ ,  $^{103\text{m}}\text{Rh}$ ) oraz kompleksy anionu  $^{211}\text{At}$  z kationami metali ( $\text{Rh}^{3+}$ ,  $\text{Ir}^{3+}$ )

Działalność badawczo-rozwojowa OBRI POLATOM w latach 2007-2013 dotyczyć będzie

- opracowania metod otrzymywania i badań przedklinicznych nowych radiofarmaceutyków do diagnostyki i terapii izotopowej,
- izotopów o wysokiej aktywności właściwej i związków je kompleksujących jako materiałów wyjściowych do produkcji radiofarmaceutyków,
- z tarcz napromienianych w reaktorze jądrowym i akceleratorze cząstek naładowanych - radionuklidów beznośnikowych ( $^{177}\text{Lu}$ ,  $^{166}\text{Ho}$ ,  $^{149}\text{Pm}$ ,  $^{47}\text{Sc}$ ,  $^{105}\text{Rh}$ ,  $^{103\text{m}}\text{Ru}$ ,  $^{44}\text{Sc}$ ,  $^{123}\text{I}$ ,  $^{211}\text{At}$ ),
- kompleksów wybranych radionuklidów jako prekursorów potencjalnych radiofarmaceutyków,
- radiokoloidów zawierających  $^{90}\text{Y}$ ,  $^{177}\text{Lu}$ ,  $^{186/188}\text{Re}$ ,
- ligandów receptorowych znakowanych izotopami promieniotwórczymi do diagnostyki nowotworowej, obrazowania molekularnego i terapii receptorowej,
- stabilnych mikrosfer albuminowych znakowanych  $^{188}\text{Re}$  oraz  $^{188}\text{Re}$ -lipiodolu,
- analizy substancji chemicznych metodami przesiewowymi,

- projektowania, syntezy i znakowania radionuklidami pochodnych imidazolu do obrazowania hipoksji towarzyszącej procesom nowotworowym,
- radioznakowanej cytokiny i związków dendrymerycznych do obrazowania stanów zapalnych sterylnych i pochodzenia bakteryjnego,
- opracowania metodyki syntezy aktywnych dendrymerów peptydowych i badania ich cytotoksyczności,
- opracowania metod znakowania oraz badań *in vitro* i *in vivo* znakowanych izotopami promieniotwórczymi ( $^{99m}\text{Tc}$ ,  $^{131}\text{I}$ ) wybranych cytokin i związków dendrymerycznych,
- projektowania, syntezy i opracowania metody znakowania radionuklidami pochodnych gastryny,
- opracowania metod znakowania  $^{99m}\text{Tc}$  i  $^{131}\text{I}$  związków wielkocząsteczkowych do obrazowania apoptozy,
- oceny potencjalnej przydatności diagnostycznej i terapeutycznej wybranych preparatów izotopowych w testach *in vitro* i *in vivo*.

Jednocześnie we współpracy z ośrodkami klinicznymi będą realizowane następujące tematy:

- celowana terapia izotopowa (Radioterapia Receptorowa) jako nowa metoda leczenia nieoperacyjnych guzów neuroendokrynych; poszukiwanie czynników prognostycznych i predykcyjnych przez obrazowanie molekularne, badanie profilu molekularnego oraz optymalizacja algorytmu leczniczego,
- badanie profilu ekspresji genów w guzach neuroendokrynych (mikromacierze i QPCR),
- leczenie znakowanymi analogami somatostatyny,
- opracowanie i wdrożenie procedur diagnostyczno-terapeutycznych w rozsiaanych procesach nowotworowych z zastosowaniem opracowanych radiofarmaceutyków,
- opracowanie nowych radiofarmaceutyków do zastosowań terapeutycznych w oparciu o  $^{177}\text{Lu}$ ,
- diagnostyka i radioterapia wewnętrzna przy użyciu znakowanych izotopowo pochodnych gastryny,
- radioterapia nowotworów wątroby przy zastosowaniu radiofarmaceutyków znakowanych  $^{188}\text{Re}$ ,
- zastosowanie metod radioizotopowych w ocenie zjawiska apoptozy,
- dozymetria preparatów promieniotwórczych do radioterapii i zagadnienia ochrony radiologicznej związane z radioterapią wewnętrzną.

### **Możliwości aplikacyjne**

Przedstawione projekty badań mają charakter badań wyprzedzających, jednak dla niektórych prac istnieje możliwość wdrożenia. Szanse na wdrożenie ma produkcja niskoenergetycznych emiterów  $\beta^-$  w formie beznośnikowej,  $^{177}\text{Lu}$ ,  $^{47}\text{Sc}$ ,  $^{105}\text{Ru}$ , metalicznych radionuklidów PET oraz generatorów  $^{82}\text{Sr}/^{82}\text{Rb}$  i  $^{44}\text{Ti}/^{44}\text{Sc}$ . Wdrożenie metody otrzymywania  $^{177}\text{Lu}$  w formie  $\text{LuCl}_3$  jest znacznie zaawansowane. Perspektywa wdrożenia w Polsce terapii emiterami  $\alpha$  jest związana z możliwością produkcji odpowiednich radionuklidów. Dla rozwoju terapii radionuklidowej konieczne jest uruchomienie nowego cyklotronu o energii protonów rzędu 80 MeV i cząstek alfa 40 MeV. Na takich urządzeniach mogłyby być produkowane emitery  $\alpha$  w ilościach (aktywnościach) umożliwiającymi ich zastosowanie terapeutyczne.

Wdrożenie terapii emiterami elektronów Augera zależy od postępu w znalezieniu odpowiednich biomolekuł, które wykazywałyby powinowactwo do receptorów komórkowych oraz jednocześnie miały zdolność do internalizacji i interkalacji.

### **Potrzeby w zakresie kształcenia i rozwoju kadry**

W związku z dużym zapotrzebowaniem na stosowanie radioizotopowych metod diagnostycznych, a ostatnio także terapeutycznych, gwałtownie rozwijająca się medycyna nuklearna potrzebuje coraz więcej radiochemików wyspecjalizowanych w zagadnieniach radiofarmacji; potrzeby takie już zgłaszają nowopowstające ośrodki PET. Należy w tym celu zorganizować szkolenie w ramach studiów doktoranckich lub kursów podyplomowych, a dalszy rozwój naukowy tych specjalistów powinien dokonywać się poprzez udział w tematycznych międzynarodowych kursach i programach badawczych, organizowanych m.in. przez MAEA.

## 9. BEZPIECZEŃSTWO JĄDROWE I OCHRONA RADIOLOGICZNA

Ochrona radiologiczna i bezpieczeństwo jądrowe (ORiBJ) obejmują swoim zakresem dziedziny: fizyki jądrowej (fizyka radiacyjna i detekcja promieniowania jądrowego), biologii (radiobiologia) medycyny (diagnostyka obrazowa, radioterapia, medycyna nuklearna, epidemiologia), ekologii (inżynieria środowiska, organizacja zdarzeń awaryjnych i ich prewencja, w tym antyterrorystyczny) oraz prawa (w tym m.in. prawo pracy, prawo karne), jest to więc szeroka działalność multidyscyplinarna zarówno w aspekcie organizacyjnym jak i naukowym. Bezpieczeństwo jądrowe obejmuje aspekty związane przede wszystkim z bezpiecznym wykorzystaniem materiałów jądrowych m.in. dla potrzeb energetyki, zaś ochrona radiologiczna – działania związane z ochroną osób zawodowo narażonych i ogółu ludności (w tym pacjentów) przed niepożądanymi skutkami promieniowania jonizującego. Jeżeli przez *atomistykę* rozumieć ogólnie dziedziny podstawowej i stosowanej fizyki i chemii jądrowej oraz technik radiacyjnych stosowanych w przemyśle i medycynie, to nie jest możliwe uprawianie tych dyscyplin bez równoległego rozwoju ochrony radiologicznej i bezpieczeństwa jądrowego.

### Stan obecny

W skali światowej, badania naukowe dotyczące szeroko rozumianej ochrony radiologicznej i bezpieczeństwa jądrowego przeżywają swój renesans. Wynika to z ponownego zainteresowania pozyskiwaniem czystej energii z bezpiecznych elektrowni jądrowych, projektu budowy reaktora termojądrowego ITER, groźby stosowania materiałów promieniotwórczych i broni jądrowej w celach terrorystycznych jak i potrzeby jednoznacznego wyjaśnienia skutków działania niskich dawek promieniowania na organizm człowieka jako podstawy naukowej systemu ochrony radiologicznej. Rozwijana jest też koncepcja objęcia ochroną radiologiczną nie tylko człowieka, ale i środowiska, a więc i rozszerzenie ochrony radiologicznej na inne istoty żywe.

Działalność naukowa w zakresie ORiBJ w Polsce prowadzona jest na ogół przez niewielkie zespoły badawcze, rozproszone w wielu instytucjach, wykorzystujących większe urządzenia badawcze (reaktor, cyklotron, wysokoaktywne źródła promieniowania jonizującego) lub utworzone w związku z potrzebami branżowymi (medycyna, górnictwo, obrona kraju). Instytucje prowadzące badania w zakresie ORiBJ (oraz liczby pracowników naukowych N i naukowo-technicznych NT) to:

- Akademia Górniczo-Hutnicza, 5 N i 3 NT,
- Akademia Świętokrzyska, 3 N i 1 NT,
- Centralne Laboratorium Ochrony Radiologicznej, 23 N i 11 NT,
- Centrum Onkologii – Instytut im. Marii Skłodowskiej-Curie, 8 N i 6 NT,
- Główny Instytut Górnictwa, 3 N i 4 NT,
- Instytut Chemii i Techniki Jądrowej, 13 N, 2 NT,
- Instytut Energii Atomowej, 17 N i 12 NT,
- Instytut Fizyki Jądrowej PAN, 15 N i 10 NT,
- Instytut Medycyny Pracy, 12 N i 15 NT,
- Instytut Problemów Jądrowych, 5 N i 5 NT,
- Krajowe Centrum Ochrony Radiologicznej w Ochronie Zdrowia, 1 N i 1 NT,

- Państwowy Zakład Higieny, 5 N i 1 NT,
- Politechnika Warszawska, 3 N,
- Uniwersytet Warszawski, 2 N i 2 NT,
- Politechnika Częstochowska, (brak danych),
- Uniwersytet Łódzki, 9 N i 2 NT,
- Wojskowy Instytut Higieny i Epidemiologii, 8 N i 6 NT,
- Wojskowy Instytut Chemii i Radiometrii, (brak danych).

Powyższą listę należałoby prawdopodobnie uzupełnić o inne uczelnie Polski z ok. 15 pracownikami zajmującymi się problemami ORiBJ; ogólna liczba pracowników zajmujących się w polskich placówkach naukowo-badawczych i w uczelniach tą tematyką, to prawdopodobnie ok. 210 osób (130 N i 80 NT).

Większość zespołów współpracuje aktywnie z organizacjami międzynarodowymi takimi jak Międzynarodowa Agencja Energii Atomowej, Międzynarodowa Komisja Ochrony Radiologicznej (ICRP), Międzynarodowe Stowarzyszenie Ochrony przed Promieniowaniem (IRPA) oraz działają w różnego rodzaju sieciach naukowych i konsorcjach np. European Dosimetry Group (EURADOS), Centrum Radonowe - Poza-rządowa Międzynarodowa Sieć Naukowa. Struktura badań jest typowa dla państw europejskich nie posiadających energetyki jądrowej. Tylko duże państwa „jądrowe” (Niemcy, Francja, Wielka Brytania) dysponują specjalistycznymi i wszechstronnie wyposażonymi instytutami badawczymi w obszarze ORiBJ. W zakresie medycyny współpraca prowadzona jest również ze Światową Organizacją Zdrowia i z Komisją Europejską, aczkolwiek żaden z aktualnie prowadzonych projektów w programach ramowych EURATOM - Ochrona przed Promieniowaniem nie jest koordynowany przez instytucję polską. Jako powody takiego stanu można uznać znikome finansowanie tego rodzaju badań w kraju (w największej polskiej instytucji obszaru ORiBJ, Centralnym Laboratorium Ochrony Radiologicznej, pracuje 59 osób, które dysponują budżetem wynoszącym poniżej 2 mln €, podczas gdy we francuskim Instytucie Ochrony przed Promieniowaniem (IRSN) pracuje ponad 1500 osób z rocznym budżetem 300 mln €). Pozytywnie odbierany jest przez środowisko naukowe fakt przyznawania przez Prezesa Państwowej Agencji Atomistyki środków budżetowych w wysokości ok. 11 mln zł rocznie na dofinansowanie działalności zapewniającej bezpieczeństwo jądrowe i ochronę radiologiczną kraju, choć w znakomitej większości fundusze te wykorzystane są na zapewnienie bezpieczeństwa reaktora jądrowego MARIA.

### **Największe osiągnięcia w ostatnich latach**

Niewątpliwym osiągnięciem organizacyjnym ostatnich lat było uporządkowanie i zunifikowanie prawodawstwa dotyczącego ORiBJ przed przystąpieniem naszego kraju do Unii Europejskiej. W działaniach tych, inicjowanych i nadzorowanych przez Państwową Agencję Atomistyki (przy współpracy z Ministerstwem Zdrowia), uczestniczyli specjaliści z ogromnej większości instytucji wymienionych powyżej. Zgodnie z tendencjami europejskimi, wyodrębniono w nowym prawie tematykę związaną ze stosowaniem promieniowania jonizującego w medycynie oraz powołano Krajowe Centrum Ochrony Radiologicznej w Ochronie Zdrowia, w resorcie Ministerstwa Zdrowia. Instytut Medycyny Pracy w Łodzi, jako inicjator i koordynator projektu funduszy PHARE, wyposażył 25 ośrodków inspekcji sanitarnej w zestawy kontrolno-pomiarowe przeznaczone do kontroli jakości aparatury rentgenowskiej: konwencjonalnej, radiologii interwencyjnej, CT, a także mammografów. Doposażono Laborato-

rium Wzorców Wtórnych Instytutu Medycyny Pracy o dwa wzorcowe aparaty rentgenowskie (10 kV, 320 kV) oraz w iradiator kobaltowo-cezowy o aktywnościach po 1 GBq każdy.

Pozytywnym skutkiem wprowadzenia nowego Prawa atomowego była konieczność uzyskania akredytacji dla laboratoriów dozymetrycznych. Doprowadziło to do polepszenia ich wyposażenia, podniesienia jakości prowadzonych usług oraz ich standaryzacji na poziomie europejskim. Akredytację dozymetrycznych laboratoriów badawczych i pomiarowych przeprowadziły do roku 2006 m.in. CLOR, GIG, IChTJ, IEA, IFJ, IMP, PZH, WIHiE, WICHiR. Równolegle wprowadzono do działań medycyny wykorzystujących promieniowanie jonizujące wiele regulacji implementujących Dyrektywę 97/43 EURATOM, co pozwoliło korzystnie uregulować ochronę radiologiczną pacjentów, a równocześnie znacznie zwiększyło zakres obowiązków zespołów zajmujących się ORiBJ w służbie zdrowia i podniosło koszty leczenia (czego zresztą nie uwzględniono w przewidywaniach ekonomicznych skutków tych regulacji).

W wyniku systematycznych badań uzyskano rozległą wiedzę na temat skażeń ekosystemu w Polsce antropogenicznymi i naturalnymi pierwiastkami promieniotwórczymi. Rozbudowano sieć monitorowania radioaktywności powietrza i zintegrowano ją z systemem europejskim. Opracowano, wdrożono i utrzymano kompleksowy system monitoringu zagrożenia radiacyjnego związanego z występowaniem podwyższonej naturalnej promieniotwórczości w podziemnych zakładach górniczych.

Rozwijano techniki pomiarowe, częściowo wdrażając opracowany sprzęt do produkcji. Polską specjalnością okazały się komory rekombinacyjne opracowywane w IEA, radiometry górnicze do pomiaru stężenia radonu i jego pochodnych w kopalniach, opracowane i produkowane w IChTJ na skalę póltechniczną oraz detektory termoluminescencyjne (TL) opracowane i produkowane w IFJ PAN. W GIG opracowano i wdrożono pierwszy w świecie system oczyszczania z radu kopalnianych wód dołowych. W CLOR opracowano i opatentowano ultraczułe stacje do analizy promieniotwórczych skażeń powietrza ASS-500. Stacje te wdrożono w sieci radiacyjnego monitoringu Polski, jak również zainstalowano je poza Polską w 13 krajach, m.in. w Niemczech, Francji, Danii, Austrii, Hiszpanii, a także na poligonie atomowym Mururoa.

Opracowano metody kontroli jakości aparatury rentgenowskiej zarówno konwencjonalnej jak i TC oraz mammografów. Zebrano informacje nt. częstości różnego rodzaju badań rentgenowskich wykonanych w Polsce w roku 2005 (z uwzględnieniem rodzaju badań, wieku i płci pacjenta, stosowanych parametrów i typów aparatów rentgenowskich).

### **Główne tematy badawcze na lata 2007-2013**

Jako podstawowe cele na najbliższe lata należy uznać następujące działania:

- Integracja i poprawa spójności krajowych działań badawczych z działalnością w UE w takich dziedzinach jak naturalne źródła promieniowania, radioekologia, ochrona środowiska, dozymetria, narażenie na promieniowanie w miejscu pracy, zarządzanie sytuacjami kryzysowymi (w tym rekultywacja przypadkowo skażonych obszarów), szkolenie w zakresie ORiBJ, poprzez opracowywanie wspólnych instrumentów i strategii oraz demonstrację ich skuteczności.
- Uruchomienie programu działań na rzecz przemysłowych wdrożeń i promocji rynkowej dla detektorów promieniowania, aparatury i systemów dozymetrycznych oraz stworzenie zasad certyfikacji tych wyrobów.



- Uruchomienie odpowiednich kierunków kształcenia w wyższych uczelniach technicznych z wyprzedzeniem o ok. 5 do 10 lat przed rozpoczęciem budowy elektrowni jądrowej w Polsce, umożliwiające wyszkolenie kadr projektowych, budowniczych i personelu obsługi elektrowni jądrowej oraz inspektorów dozoru jądrowego i innych osób przygotowujących lokalizację elektrowni jądrowej.

Plany badawcze polskich instytucji powiązane są w znacznej mierze z zadaniami realizowanymi w ramach 6 Programu Ramowego UE i planowanymi w 7 PR. W poniższej tabeli zestawiono główne kierunki badawcze, opracowane przez Komisję ORiBJ do realizacji w latach 2007-2013. Są one w większości zgodne z priorytetami formułowanymi przez Komisję Unii Europejskiej w sprawie programu szczegółowego wdrażającego siódmy Program Ramowy (EURATOM).

**Tabela 1. Tematy planowane do realizacji w latach 2006-2013.**

<b>Ochrona przed promieniowaniem i radioekologia</b>	<b>Instytucje</b>
Opracowanie i wdrożenie systemu pomiarowo-obliczeniowego do kompleksowej analizy narażenia ludności na promieniowanie naturalne, sztucznych radionuklidów i innych źródeł promieniowania.	CLOR, IFJ, PZH, IEA
Rozwój metod analiz radiochemicznych oraz metod pomiaru aktywności radionuklidów do oceny narażenia wewnętrznego pracowników i skażeń środowiska.	IEA, CLOR, AGH, UW
Badanie transportu izotopów promieniotwórczych skażeń nimi wywołanych w środowisku lądowym, wodnym i morskim oraz w wodach wodociągowych i żywności.	AGH, CLOR, IFJ, GID, PZH, UG, UMCS, UW
Analiza zagrożeń radiacyjnych związanych z występowaniem obszarów i miejsc pracy o podwyższonym poziomie naturalnej promieniotwórczości, powstających wskutek działalności przemysłowej, niezwiązanej z energią jądrową.	GIG, IFJ, AGH
Rozwój technologii przetwarzania i składowania odpadów promieniotwórczych	PIG, ZUOP, IEA, AGH
<b>Metody pomiarowe, aparatura dozymetryczna i metrologia promieniowania jonizującego</b>	
Mikrodozymetria i nanodozymetria – metody pomiaru wielkości dozymetrycznych istotnych z punktu widzenia narażenia radiacyjnego.	IEA, IPJ, IFJ
Detektory i aparatura dozymetryczna – badania detektorów, metody pomiarowe, opracowania aparatury dozymetrycznej z uwzględnieniem potrzeb diagnostyki medycznej i radioterapii.	ICHTJ, IEA, IFJ, IPJ, CO, AGH
Rozwój metod dozymetrii biologicznej.	AŚ, ICHTJ, IFJ
Rozwój metod metrologii promieniowania jonizującego.	IEA, CLOR
Rozwój akredytowanych laboratoriów pomiarowych i wzorcowania.	IEA, CLOR, IFJ, OBRI, CO
<b>Ochrona radiologiczna pacjentów i personelu</b>	
Analiza narażenia pacjentów poddawanych napromienieniu w celach diagnostycznych lub terapeutycznych, szczególnie przy wprowadzaniu nowych technik i urządzeń.	PW, IMP, KCOR
Metody kontroli jakości i zarządzania ryzykiem przy stosowaniu promieniowania jonizującego w celach medycznych.	IEA, PW, IMP, KCOR, WSSE
Ocena ryzyka nowotworów w populacji zawodowo narażonej na promieniowanie	IMP, CO
<b>Radiobiologiczne aspekty ochrony radiologicznej</b>	
Badanie mechanizmów i skutków działania małych dawek promieniowania jonizującego.	AŚ, ICHTJ, IEA, IFJ, PZH, CLOR, AGH
Badanie mechanizmów warunkujących odpowiedź komórek normalnych i nowotworowych na promieniowanie jonizujące.	ICHtJ
Ocena dawek pochłoniętych w narządach człowieka przy skażeniach we-	IAE, CLOR, IChTJ

wewnętrznych i zewnętrznych.	
Badania nad nowymi związkami i strategiami radiochronnymi.	AŚ, WIHE, IChTJ
<b>Zagadnienia ochrony radiologicznej w sytuacjach zagrożenia terroryzmem</b>	
Ocena narażenia radiologicznego oraz rozprzestrzeniania się skażeń w sytuacjach nadzwyczajnych.	AŚ, CLOR, ICHTJ, IFJ, IEA
Metody oznaczania izotopów promieniotwórczych w próbkach nieznanego pochodzenia i w organizmie człowieka.	CLOR, PZH
Jądrowe metody wykrywania materiałów rozszczepialnych, promieniotwórczych i wybuchowych.	IFJ, IPJ, IEA
Opracowanie technik masowej dozymetrii indywidualnej.	IFJ
<b>Przygotowanie podstaw energetyki jądrowej w Polsce</b>	
Ocena tła promieniowania w miejscach przewidywanych lokalizacji elektrowni jądrowej i w jej otoczeniu.	CLOR, IFJ, GIG, IEA
Rozwój systemów monitorowania otoczenia elektrowni jądrowych i innych obiektów jądrowych oraz wzorcowania stacjonarnych jądrowych systemów pomiarowych.	CLOR, IFJ, GIG, IEA
Optimalizacja cyklu paliwowego reaktorów jądrowych, w tym rozwój technologii przechowywania wypalonego paliwa jądrowego.	IEA, ZUOP, PIG, AGH
Wypracowanie strategii oraz systemu komunikacji i promocji w celu budowania zaufania do bezpiecznego stosowania materiałów promieniotwórczych i społecznego przyzwolenia na rozwój energetyki jądrowej.	CLOR, PAA, IPJ, PW, AGH, UW i inne uczelnie

Zdecydowana większość projektów badawczych będzie realizowanych w ramach struktur europejskich lub we współpracy bilateralnej. Podstawowymi partnerami naszych zespołów badawczych będą:

- Wspólnotowe Centrum Badawcze JRC (*Joint Research Centre*) skupiające szereg instytutów (JRC ITU, JRC IES, JRC IRMM),
- Międzynarodowa Agencja Energii Atomowej, MAEA w Wiedniu,
- Europejska Organizacja Badań Jądrowych, CERN Genewie,
- Zjednoczony Instytut Badań Jądrowych, ZIBJ w Dubnej.

Niezależnie od zapewnienia możliwości kalibracji przyrządów dozymetrycznych w specjalistycznych polach promieniowania dostępnych w CERN (pole symulujące promieniowanie kosmiczne w samolotach), laboratorium dozymetrii neutronowej i metrologii IRSN w Cadarache i PTB Braunschweig, ważne rozważenie jest zorganizowanie w Polsce Laboratorium Dozymetrycznego Wzorców Pierwotnych. Takie laboratorium spełniałoby rolę usługową w stosunku do Laboratoriów Wzorców Wtórnych w zakresie promieniowania fotonowego.

W dziedzinie obronności i antyterroryzmu rozwijana będzie współpraca z instytutami działającymi w państwach NATO, a w szczególności z Instytutem Radiobiologii Bundeswehry, Badawczym Instytutem Radiobiologicznymi Sił Zbrojnych USA w Bethesda i innymi.

Potrzeba inwestycji zależy od programu budowy elektrowni jądrowych w Polsce. W przypadku decyzji o budowie elektrowni, potrzebne jest pilne uzupełnienie systemu monitorowania radiologicznego kraju o dodatkowy monitoring jej otoczenia, budowa trenażera dla obsługi EJ i oddziałów ochronnych.

### **Potrzeby w zakresie kształcenia i rozwoju kadry**

Podnoszenie kwalifikacji obecnej kadry winno nastąpić poprzez zwiększenie jej udziału w szkoleniach, konferencjach i stażach naukowych zarówno w ośrodkach krajowych jak i zagranicznych. Ważne jest zapewnienie środków na ten cel ze źródeł krajowych i zagranicznych, w tym środków unijnych i MAEA, na czynny udział pra-

owników w pracach legislacyjnych UE, MAEA oraz w opracowaniach zaleceń ICRP. Należy też przewidzieć środki na czynny udział polskich specjalistów w grupach roboczych ISO i IEC. Ze względów finansowych dotychczasowy udział ogranicza się jedynie do korespondencyjnego opiniowania dokumentów.

Zgodnie z rozporządzeniem MZ z 25.08.2005 r. w sprawie warunków bezpiecznego stosowania promieniowania jonizującego dla wszystkich rodzajów ekspozycji medycznych szkoleniem z zakresu ochrony radiologicznej pacjenta powinny zostać objęte osoby uczestniczące w wykonywaniu różnego rodzaju badań diagnostycznych i terapeutycznych z zastosowaniem promieniowania jonizującego. Szkolenia te muszą być prowadzone wg szczegółowych programów zawartych w załączniku nr 3 do powyższego rozporządzenia. Według szacunków, liczna osób wymagających tego typu szkolenia jest rzędu dwudziestu kilku tysięcy, co wymaga utworzenia studium podyplomowego, które przygotowałoby kadry do realizacji tych szkoleń.

Z uwagi na wzrost stosowania technik radiacyjnych w przemyśle i medycynie konieczny jest rozwój i intensyfikacja kształcenia w zakresie mechanizmów ochrony radiologicznej oraz podniesienie poziomu tego kształcenia. Duże znaczenie może mieć w najbliższych latach kwestia powiązania systemu kształcenia i nadawania uprawnień specjalistom OR z systemami europejskimi, co jest warunkiem dopuszczenia polskich specjalistów do pracy w innych krajach europejskich oraz zatrudnienia ekspertów europejskich w Polsce. Ma to szczególne znaczenie w przypadku założenia, iż w Polsce do roku 2020 zostanie uruchomiona elektrownia jądrowa. Biorąc pod uwagę czas realizacji takiej inwestycji konieczne jest już teraz rozpoczęcie szkolenia kadr (projektantów, menadżerów, operatorów i inspektorów). Potrzeby dotyczą również wszystkich służb operacyjnych i nadzoru na szczeblu zakładów pracy oraz na szczeblu organów nadzorczych (Państwowa Agencja Atomistyki, Państwowa Inspekcja Sanitarna).

Kształcenie to można realizować poprzez:

- uruchomienie odpowiednich specjalności w wyższych uczelniach technicznych z wyprzedzeniem o ok. 5 do 10 lat przed rozpoczęciem budowy elektrowni jądrowej w Polsce, w tym specjalności związanych z ochroną radiologiczną i bezpieczeństwem jądrowym (łącznie z problemami ochrony fizycznej materiałów jądrowych),
- uruchomienie szkolnictwa zawodowego o kierunku elektronika jądrowa w terminie jak wyżej,
- rozszerzenie programów nauczania w ramach specjalności fizyka i fizyka medyczna o problemy ORiBJ na wydziałach fizyki kilku wiodących uczelni w kraju,
- stałe uzupełnianie kwalifikacji niektórych zawodów istotnych dla poziomu ORiBJ w kraju, w tym inspektorów dozoru jądrowego, na stypendiach i stażach zagranicznych np. w instytutach JRC EU.

## 10. PODSUMOWANIE

### 10.1. FIZYKA ODDZIAŁYWAŃ ELEMENTARNYCH I ASTROFIZYKA CZĄSTEK

W latach 2008-2016 będą trzy priorytetowe kierunki badań doświadczalnych i teoretycznych w polskiej fizyce oddziaływań elementarnych (FOE):

1. program naukowy LHC w CERN,
2. fizyka neutrin oraz astrofizyka cząstek z kosmologią,
3. przygotowania programu nowego liniowego akceleratora – ILC.

Przewiduje się również kontynuację innych kierunków badań przy akceleratorze SPS w CERN, SuperKEKB w KEK, RHIC w BNL i HERA w DESY.

Program naukowy LHC obejmuje eksperymenty ALICE, ATLAS, CMS i LHCb, w których uczestniczą też polscy fizycy. Akcelerator LHC zacznie działać w 2007 r., a w latach 2008-2010 dostarczy danych, które, jak mamy nadzieję, pozwolą na odkrycia o fundamentalnym znaczeniu poznawczym: mechanizmów generacji masy (np. mechanizm Higgsa) oraz doświadczalnych dowodów efektów poza Modelem Standardowym. Lata 2011-2016 będą okresem zwiększania precyzji danych doświadczalnych. W tym czasie będzie również podjęta decyzja o ewentualnej rozbudowie LHC poprzez zwiększenie jego świetlności (SLHC) lub zwiększeniu energii (DLHC) oraz związana z nią decyzja o modernizacji układów doświadczalnych i kompleksu akceleratorowego CERN.

Fizyka neutrin oraz astrofizyka cząstek z kosmologią cieszy się rosnącym zainteresowaniem, spowodowanym odkryciem oscylacji neutrin, precyzyjnymi pomiarami mikrofalowego tła oraz szeregiem nowych obserwacji z dziedziny astrofizyki cząstek i kosmologii. Eksperymenty te wymagają kompleksowych i kosztownych układów pomiarowych. Środowisko fizyków zajmujących się doświadczalną i teoretyczną fizyką neutrin, stanowią współpracujące ze sobą grupy z Warszawy, Krakowa, Katowic i Wrocławia. Uczestniczą one w przygotowaniu eksperymentu ICARUS w Gran Sasso, a w październiku 2006 roku zostały przyjęte do T2K, który rozpocznie się w 2009 r. Fizycy z Warszawy biorą również udział w eksperymentach SuperKamionkande i K2K, a fizycy z Krakowa w Borexino. Fizycy z Łodzi, Krakowa i Warszawy uczestniczą w kilku eksperymentach astrofizycznych, m.in. Pierre Auger Observatory i HESS/MAGIC. W najbliższych latach planuje się wzrost udziału w wybranych, dużych eksperymentach astrofizycznych. Polskie środowisko fizyki neutrin i astrofizyki cząstek rozważa stworzenie wysokiej klasy podziemnego laboratorium badawczego w Sieroszowicach koło Legnicy.

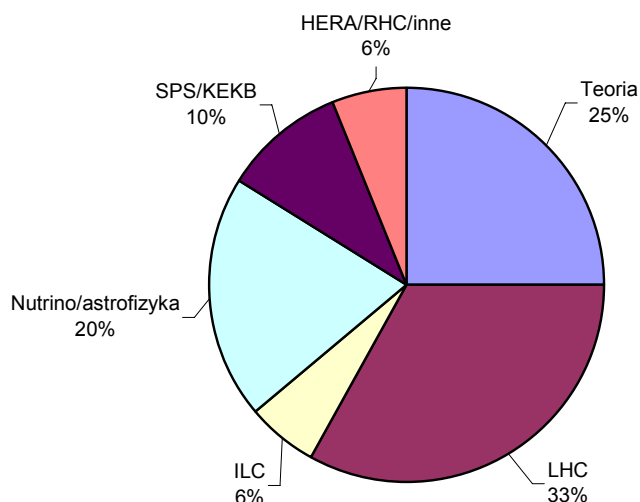
Przygotowania programu nowego liniowego zderzacza elektron-pozyton – ILC (naukowego, projektowanie elementów i detektorów) angażują fizyków z Krakowa, Łodzi i Warszawy. Akcelerator ten pozwoli na ugruntowanie i uściślenie wyników otrzymanych na LHC, a także stworzy możliwości nowych odkryć. Decyzja o jego budowie ma zapaść ok. 2010 r. i wtedy powinna zostać podjęta decyzja o udziale Polski w konstrukcji dużego detektora.

Inne kierunki badań kontynuowane w latach 2010-2016, w których polskie zespoły mają bardzo dobrą międzynarodową renomę, dotyczą: partonowej struktury materii (COMPASS w CERN), zderzeń relatywistycznych ciężkich jonów (NA49 w CERN, STAR w BNL) i fizyki kwarków b (BELLE w KEK). W wymienionych eksperymentach przewiduje się inwestycje aparaturowe. Kontynuowana będzie analiza

danych z eksperymentów H1 i ZEUS w DESY, które zakończą zbieranie danych w 2007 r.

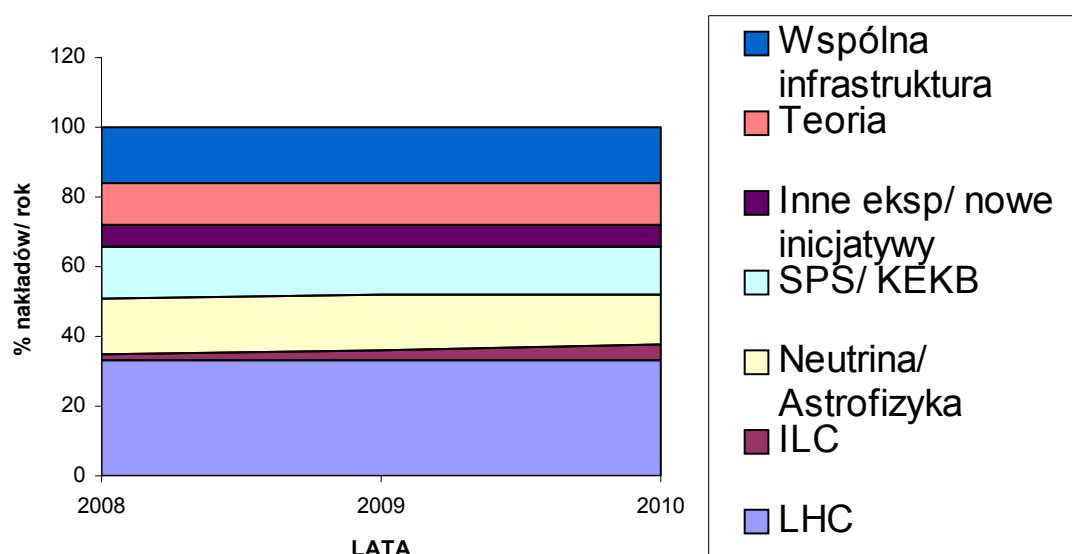
### Prognozy osobowe i finansowe

W dziedzinie FOE pracuje ok. **300** fizyków doświadczalnych i inżynierów oraz ok. **100** fizyków teoretyków. Jest 6 ośrodków badań doświadczalnych w Katowicach, Kielcach, Krakowie, Łodzi, Warszawie i Wrocławiu oraz 5 ośrodków badań teoretycznych w Katowicach, Krakowie, Łodzi, Warszawie i Wrocławiu. Na rys. 1 pokazana jest prognoza zaangażowania (równowartość pełnych etatów) w różnych aktywnościach naukowych FOE w 2010 r.



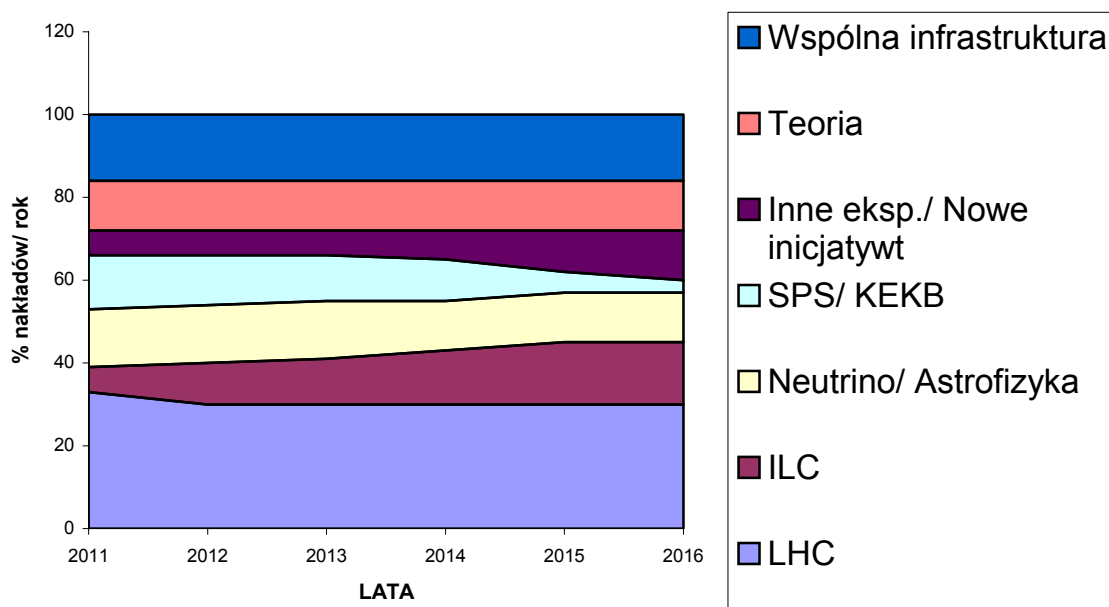
Rys. 1. Przewidywane zatrudnienie fizyków (FTE) FOE w 2010 r.

Szacuje się, że w latach 2008-2010 potrzeby finansowe w formie grantów i SPB na badania doświadczalne i teoretyczne, infrastrukturę oraz rozbudowę i modernizację laboratoriów wyniosą, niezależnie od składki Polski do CERN w wysokości ok. **55 mln zł** rocznie, ok. **12,5 mln zł** rocznie. Profil wydatków przedstawiony jest na rys. 2.



Rys. 2. Rozkład procentowych nakładów w poszczególnych dziedzinach FOE w latach 2008-2010 (z wyłączeniem składki członkowskiej do CERN).

Prognozy procentowych nakładów w latach 2011-2016 przedstawione są na rys. 3. Mogą się one zmienić, ponieważ w tym okresie oczekuje się kilku strategicznych decyzji dotyczących światowych, globalnych projektów. Należy spodziewać się, że roczne nakłady na polską FOE wzrosną wtedy ponad podaną wyżej kwotę.



Rys. 3. Prognoza nakładów w poszczególnych dziedzinach FOE w latach 2011-2016 (z wyłączeniem składki członkowskiej do CERN).

W tabeli 2 przedstawiony jest sumaryczny, roczny koszt badań FOE, w którym zostały uwzględnione płace oraz polska składka do CERN. Założono średnią płacę w wysokości 80 ksz i składkę w wysokości 21,1 MCHF (2006 r.).

**Tabela 2. Sumaryczny, roczny koszt badań FOE w latach 2008-2016.**

	Nakłady finansowe [mln zł]	Źródło finansowania
Granty i SPB na badania i inwestycje	12,5	MNiSW
Płace	32	MNiSW
Składka do CERN	55	PAA
<b>Razem:</b>	<b>99,5</b>	

## 10.2. FIZYKA JĄDROWA

Strategiczne plany polskich fizyków jądrowych dotyczą badania struktury jąder atomowych i materii hadronowej, a także mechanizmu reakcji jądrowych w szerokim zakresie energii, w tym fizyki rozszczepienia jąder atomowych (i fizyki plazmy, która przedstawiona jest oddzielnie). Są one ściśle związane z dążeniami światowej fizyki jądrowej, zmierzającymi w dwóch kierunkach: w stronę ekstremalnie małych odległości i poznania struktury jądra i nukleonów, będących układami uwięzionych kwarków, antykwarków i gluonów, oraz w stronę „dużych”, granicznych rozmiarów egzotycznych struktur nukleonowych, dla których możliwe jest jeszcze istnienie jądra atomowego, co powinno odpowiedzieć na pytanie, dlaczego pewne jądra powstają, a inne nie.

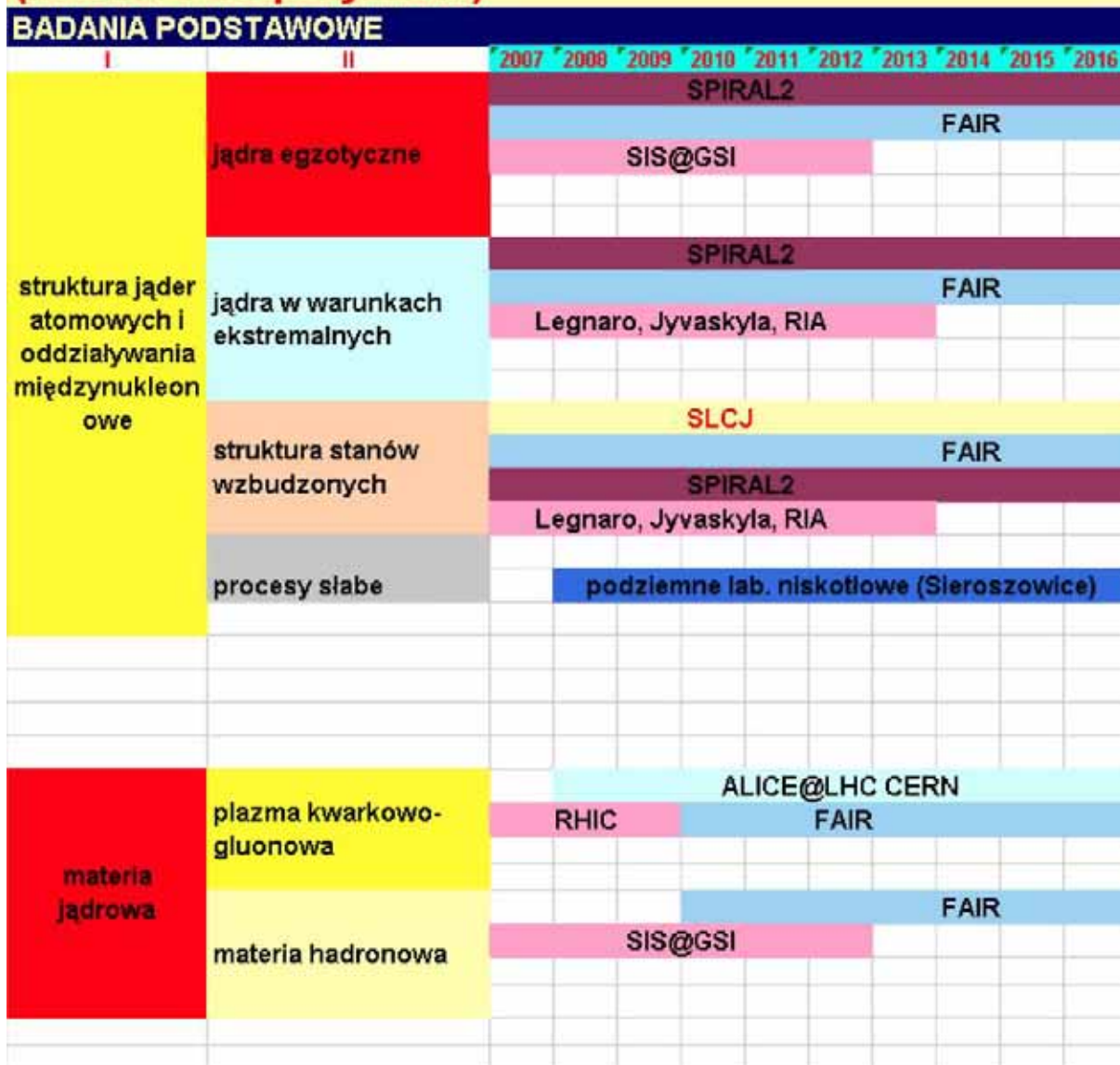
Potencjał środowiska polskich fizyków jądrowych wykorzystywany jest przy planowaniu i realizacji nowych europejskich inwestycji badawczych. Najnowszej generacji urządzenia badawcze, w budowie których uczestniczą polscy fizycy jądrowi, to między innymi akceleratory wiązek jąder izotopów radioaktywnych. Dzięki temu możliwe jest i będzie prowadzenie prac doświadczalnych na wysokim światowym poziomie. Udział polskich fizyków jądrowych dotyczy programów europejskich (np. FAIR, SPIRAL2), jak również badań w oparciu o aparaturę krajową, w tym także badań na cyklotronie ciężkich jonów w Warszawie. Należy tu wspomnieć również o udziale polskich zespołów w pracach Zjednoczonego Instytutu Badań Jądrowych w Dubnej.

Badania podstawowe w zakresie fizyki jądra atomowego przekładają się na badania poznawcze w ramach zastosowań fizyki jądrowej, w które angażują się fizycy jądrowi, w różnych działach ochrony zdrowia i gospodarki narodowej. Należy tu wspomnieć o nowych technikach w diagnostyce i terapii medycznej, energetyce jądrowej, geologii, biologii, archeologii i historii sztuki.

Roczny koszt badań fizyki jądrowej w latach 2010-2016 można ocenić na ok. 22,5 mln rocznie (w tym ok. 2,5 mln zł na przygotowanie laboratorium w Sieroszowicach), bez uwzględnienia składki członkowskiej Zjednoczonego Instytutu Badań Jądrowych (wynoszącej w roku 2007 ok. 2,2 mln USD).

Przedstawiona skala finansowania badań poznawczych w fizyce jądrowej jest zróżnicowana i obejmuje środki budżetowe poza finansowaniem podmiotowym, które określają liczby zatrudnionych fizyków w poszczególnych tematach. Finansowanie z kolei krajowej infrastruktury badawczej planowane jest ze środków zawartych w funduszach strukturalnych.

# STRATEGICZNE PLANY BADAWCZE POLSKIEJ FIZYKI JĄDROWEJ (2007-2016) (Teoria i eksperyment)



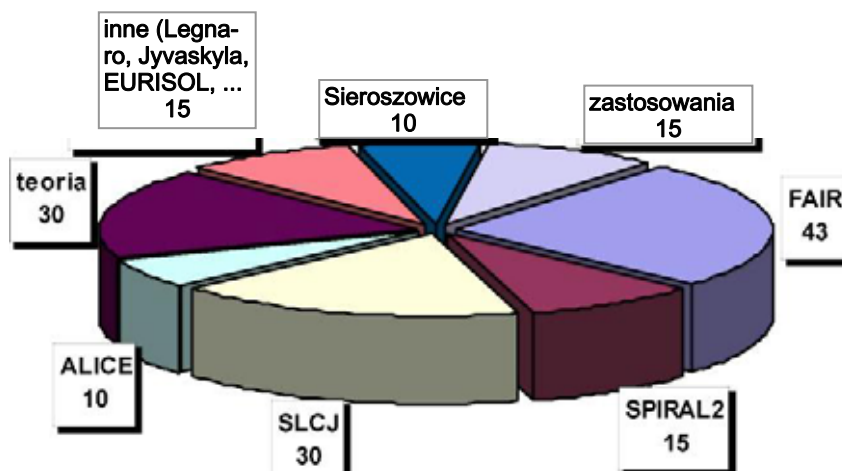
Rys. 4. Plany badawcze polskiej fizyki jądrowej.



ZASTOSOWANIA FIZYKI JĄDROWEJ		2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016
<b>energetyka</b>	REAKTOR WYSOKOTEMPERATUROWY IV GENERACJI PROJEKT, MODEL PILOTAŻ. energetyka termojądrowa										
<b>radioizotopy medyczne</b>	IZOTOPY REAKTOROWE										
	IZOTOPY POZYTONOWE										
<b>radioterapia hadronowa</b>	OŚRODEK TERAPII PROTONOWEJ										
	OŚRODEK TERAPII C12										
<b>bezpieczeństwo</b>	POSTĘPOWANIE Z ODPADAMI PROMIENIOTWÓRCZYMI										
	WYKRYWANIE MATERIAŁÓW										

Rys. 5. Zastosowania fizyki jądrowej.

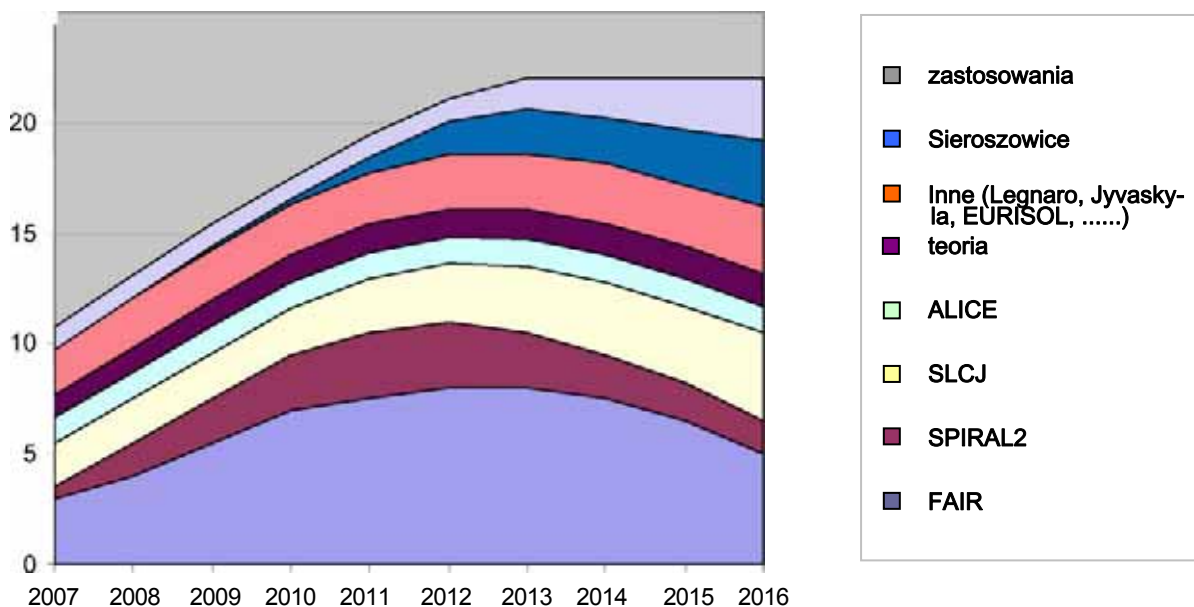
Na rys. 6 podana jest liczba pracowników, zaangażowanych w poszczególnych projektach, w pełnym wymiarze czasu pracy.



Rys. 6. Planowane, średnie zaangażowanie osobowe.

Przewidywane poniżej koszty na badania w poszczególnych projektach nie zawierają środków przyznawanych instytucjom naukowym w ramach dotacji podmiotowej.

mln zł



Rys. 7. Profil nakładów budżetowych.

## FIZYKA PLAZMY

Ze względu na swoje znaczenie poznawcze i aplikacyjne fizyka plazmy traktowana jest jako odrębny dział fizyki jądrowej. Badania z dziedziny fizyki i technologii plazmy obejmują wiele kierunków: od badań procesów elementarnych, poprzez badania własności plazmy wytwarzanej w pułapkach magnetycznych (np. tokamakach) lub przez silnoprądowe wyładowania impulsowe (układy PF i Z-Pinch), badania plazmy wytwarzanej impulsami laserowymi, badania wyładowań mikrofalowych, jarzeniowych, iskrowych i łukowych, do praktycznych zastosowań plazmy quasi-stacjonarnej lub impulsowej.

W Polsce badania z dziedziny fizyki i technologii plazmy prowadzi kilka instytutów badawczych i kilka ośrodków akademickich. Istnieją duże możliwości aplikacji plazmy do różnych celów badawczych i technologicznych, w związku z czym w instytucjach tych prowadzone są zarówno prace o charakterze poznawczym, jak i aplikacyjne. Najważniejsze wykorzystanie fizyki plazmy związane jest z opanowaniem reakcji syntezy jądrowej jako źródła energii.

Strategiczne plany badawcze w dziedzinie fizyki plazmy obejmują:

1. Badania charakterystyk plazmy występującej w przyrodzie i wytwarzanej w różnych urządzeniach badawczych i technicznych (zadanie o charakterze ciągłym).
2. Badania nad budową reaktora opartego na wykorzystaniu reakcji syntezy jądrowej, realizowane głównie w ramach programu EURATOM (zadanie to jest omówione oddzielnie w rozdziale pt. Energetyka Jądrowa) oraz w ramach europejskiego programu budowy układu laserowego (HiPER) dla opracowania reaktora termojądrowego wykorzystującego syntezę laserową (inercyjne utrzymanie plazmy).

3. Badania plazmy w kosmosie (w tym udział w ważnych międzynarodowych programach badawczych).
4. Badania nad wykorzystaniem wybranych metod plazmowych do celów technologicznych (w tym udział w Programie Ramowym 7 Unii Europejskiej).
5. Wykształcenie kadry potrzebnej do rozwoju fizyki i technologii plazmy (poprzez zorganizowanie regularnych studiów na wydziałach fizyki wybranych uniwersytetów oraz na odpowiednich wydziałach wybranych politechnik).

Sumaryczne koszty związane z badaniami plazmowymi (z wyłączeniem badań nad syntezą jądrową) w latach 2007-2013 szacuje się na ok. **12 mln zł** rocznie.

### 10.3. METODY JĄDROWE W FIZYCE FAZY SKONDENSOWANEJ

W Polsce, podobnie jak na całym świecie, w badaniach fazy skondensowanej wykorzystywane są głównie następujące metody jądrowe:

1. rozpraszanie neutronów termicznych (19 ośrodków, ok. **130** osób),
2. rozpraszanie i pochłanianie promieniowania synchrotronowego (25 ośrodków, ponad **300** osób),
3. spektrometria mössbauerowska (18 ośrodków, ok. **80** osób),
4. anihilacja pozytonów (10 ośrodków, **27** osób),
5. wykorzystanie wiązek jonowych i plazmowych do modyfikacji własności ciał stałych (5 ośrodków, ok. **20** osób) oraz
6. spektrometria komptonowska (5 ośrodków – **10** osób).

Inne techniki (np. rotacja spinów mionowych, PAC, RBS, NRA, PIXE itp.) są wykorzystywane okazjonalnie. W sumie w tego typu badaniach uczestniczą 42 ośrodki uczelniane, PAN-owskie i typu JBR, a liczba uczonych zaangażowanych w te badania jest bliska **600**.

Prowadzone badania mają charakter zarówno poznawczy (badanie organizacji materii - struktury i dynamiki ciał stałych, cieczy i tzw. materii miękkiej), jak też aplikacyjny, kiedy przedmiotem badań są materiały stosowane we współczesnej lub przyszłej elektronice (układy niskowymiarowe, w tym nanokrystaliczne), optoelektronice, spinotronice, czy mechanice (defektoskopia powierzchni, polepszanie własności powierzchni i złącz ceramika-metal, badania mechanizmów tarcia). Rozwija się także metody służące określaniu składu skał (zastosowania w geologii i przemyśle wydobywczym) i ekologii (składowanie odpadów promieniotwórczych).

Polacy korzystają z wielkich instalacji (reaktory jądrowe, synchrotrony) w ośrodkach europejskich (Instytut Lauego-Langevina ILL w Grenoble, Laboratorium Leona Brillouina w Saclay, Instytut Hahna-Meitner w Berlinie, Europejskie Źródło Promieniowania Synchrotronowego ESRF w Grenoble, synchrotron w DESY w Hamburgu). Zapewnienie możliwości prowadzenia tam badań jest warunkiem koniecznym prowadzenia badań na froncie badań światowych. Oznacza to niezbędność członkostwa w organizacjach międzynarodowych, jak ILL i ESRF, oraz w DESY. Badania tam prowadzone dotyczą zagadnień poznawczych.

Dla prowadzenia badań dotyczących mikroskopowej struktury materii niezbędne jest zbudowanie w kraju laboratoriów, w których będzie można prowadzić szeroko rozumiane prace technologiczne i charakteryzacyjne w temperaturach milikelwinowych i pod wysokim ciśnieniem, stanowiące punkt wyjścia do dalszych badań przy pomocy ww. subtelných narzędzi badawczych.

Badania aplikacyjne prowadzone są głównie w kraju przy pomocy technik nie wymagających wielkich instalacji. Wyjątkiem są tu plany wykorzystania synchrotronu, który powinien zostać zbudowany w Krakowie, m.in. do litografii. Ponadto planowana jest „na Ścianie Wschodniej Polski” budowa centrum badawczego, które rozwijałoby nowoczesne technologie i korzystało z technik jądrowych. Z tym projektem związane jest utworzenie laboratorium środowiskowego spektrometrii i polarymetrii mössbauerowskiej (pomiar polarymetryczny CEMS, pomiar polarymetryczny transmisyjny, cewki nadprzewodzące, monochromatyczne źródło promieniowania o polaryzacji kołowej lub liniowej), dla badań poznawczych i aplikacyjnych szczególnie w zakresie

magnetycznych własności materii, w tym układów niskowymiarowych. Planuje się także rozwinięcie badań mössbauerowskich o krótkożyciowe źródła wytwarzane w reaktorze. W dziedzinie anihilacji pozytonów planowana jest budowa dwóch akceleratorów powolnych pozytonów pozwalających implantować pozytony na głębokości ok. mikrometra w celu badania stanu zdefektowania materiału na tych głębokościach, dwóch układów koincydencyjnych spektrometrów poszerzenia dopplerowskiego linii anihilacyjnej, cyfrowego spektrometru czasów życia pozytonów oraz dwóch spektrometrów do pomiaru poszerzenia dopplerowskiego linii anihilacyjnej wykorzystującego tylko jeden detektor. Do niezbędnych inwestycji należy zaliczyć zakup dyfraktometru rentgenowskiego Bruker D8 Advance, implantatora jonów o skupionej wiązce dla zastosowań w dziedzinie urządzeń elektronicznych i opto-elektronicznych oraz mikroskopu sił atomowych.

Przewidywane koszty badań wyniosą ok. **140 mln zł** rocznie, czyli w latach 2007-2013 będą wynosiły łącznie:

Koszty zatrudnienia:	ok. 350 mln zł
Koszty bieżące badań:	ok. 120 mln zł
Koszt składek do ILL i ESRF:	ok. 56 mln zł
Koszty inwestycyjne (w tym budowa synchrotronu) (w tym ok. 180 mln zł w latach 2007-2009)	ok. 420 mln zł
Łącznie – ok. <b>950</b> mln zł	

Pełne wykorzystanie członkostwa Polski w organizacjach międzynarodowych (ILL i EDSRF) oznacza roczne zapotrzebowanie na nowych pracowników wynoszące ok. 10 magistrów i 10 doktorów, przy czym liczba ta wzrośnie po uruchomieniu polskiego synchrotronu.

## 10.4. RADIOCHEMIA, CHEMIA JĄDROWA, JĄDROWE METODY ANALITYCZNE I CHEMIA RADIACYJNA

Najlichniesze zespoły badawcze pracujące w dziedzinie **radiochemii, chemii jądrowej i analitycznych metod jądrowych** istnieją w Instytucie Chemii i Techniki Jądrowej oraz Ośrodku Badawczo-Rozwojowym Izotopów POLATOM. Ponadto mniejsze zespoły istnieją w Międzyresortowym Instytucie Techniki Radiacyjnej Politechniki Łódzkiej, Instytucie Fizyki Jądrowej PAN oraz na Wydziałach Chemii UW, UG i UWr. W sumie w zespołach tych pracuje około **10** profesorów tytularnych, **7** doktorów habilitowanych, **15** doktorów oraz **70** pracowników pomocniczych i technicznych, a prace doktorskie wykonuje **30** doktorantów.

Opracowano serię radio farmaceutyków (IMT-<sup>123</sup>I, IMT-<sup>131</sup>I, <sup>90</sup>Itr, <sup>177</sup>Lu, <sup>188</sup>Rn, ziaren jodowych, zamkniętych źródeł promieniotwórczych do leczenia nowotworów gałki ocznej, generatorów <sup>188</sup>W i <sup>188</sup>Re). Dzięki tym opracowaniom Polska jest jednym z nielicznych krajów rozwijających się posiadających dobrze rozwinięte przedsiębiorstwo produkcji i dystrybucji radiofarmaceutyków. Inne najważniejsze osiągnięcia w tej dziedzinie, to opracowanie metod NAA w zastosowaniu do analizy meteorytów i dzieł sztuki, opracowanie materiałów odniesienia (popiół lotny, apatyt, tytoń), opracowanie sorbentów organicznych cezu, strontu, sodu i radu oraz opracowanie i wdrożenie instalacji membranowej do zatężania odpadów promieniotwórczych. Oznaczenie stężenia radionuklidów w próbkach środowiskowych i żywności, pozwoliło na określenie radiacyjnego zagrożenia populacji promieniowaniem wywodzącym się od radionuklidów pochodzenia naturalnego i antropogenicznego. Metody izotopów środowiskowych są wykorzystywane w badaniach procesów środowiskowych i bezpieczeństwa produktów żywnościowych.

Szeroki rozwój izotopowych metod terapeutycznych i diagnostycznych (np. PET) spowoduje dalszy rozwój radiochemii, przy czym dla produkcji izotopów (w tym do zastosowań medycznych) oraz dla metody NAA konieczna będzie budowa nowego reaktora badawczego w Polsce. Wprowadzenie i rozwój energetyki jądrowej będzie wymagał opanowania radiochemicznych metod analizy promieniotwórczości środowiskowej, metod przerobu odpadów promieniotwórczych, przygotowania materiałów do procesu fuzji jądrowej, czy też rozdziału produktów procesu transmutacji.

Najlichniesze zespoły prowadzące prace w dziedzinie **chemii radiacyjnej** istnieją w IChTJ i MITR PŁ. Mniejsze zespoły działają w Akademii Podlaskiej. W sumie badania prowadzą zespoły, w których pracuje około **7** profesorów tytularnych, **6** doktorów habilitowanych, **14** doktorów, **50** pracowników pomocniczych i technicznych oraz **20** doktorantów. Dla celów badań podstawowych zbudowano dwa systemy akceleratorowej analizy impulsowej. Uruchomiono dwie stacje sterylizacji sprzętu medycznego (1 akcelerator 10 kW – 9/13 MeV i 1 akcelerator 10 kW – 10 MeV), jedną stację obróbki polimerów (akcelerator 20 kW, 2 MeV), obróbki żywności (akceleratory 10 kW, 10 MeV i 1 kW, 10 MeV) – wszystkie IChTJ. Zbudowano pilotową instalację usuwania SO<sub>2</sub> i NO<sub>x</sub> z gazów spalinowych w EC Kawęczyn (2 akceleratory 50 kW, 700 keV) i instalację przemysłową (4 akceleratory – 270 kW, 700 keV), uruchomiono źródło technologiczne gamma małej mocy. Wdrożono technologie: sterylizacja radiacyjna, sterylizacja przeszczepów, wytwarzanie rur i taśm termokurczliwych oraz opatrunków hydrożelowych, modyfikacja struktur półprzewodnikowych, radiacyjne utrwalanie żywności, usuwanie SO<sub>2</sub> i NO<sub>x</sub> z gazów spalinowych elektrowni. Utworzono laboratoria akredytowane dozymetrii przemysłowej oraz kontroli napromieniowanej

żywności. Ze sterylizacji radiacyjnej korzysta ponad 60 firm produkujących materiały medyczne, polski bank tkanek istnieje jedynie dzięki możliwości napromieniowania przeszczepów. Badania poznawcze dostarczają informacji o reakcjach wolnorodnikowych w systemach biologicznych, chemicznych i środowisku.

Dalszy rozwój tej dziedziny wymaga budowy Centrum Badań i Technologii Radiacyjnych wyposażonego w źródło technologiczne gamma (Co-60) o aktywności co najmniej 1 MCi i akcelerator elektronów 10 MeV, 150 kW. W centrum będą prowadzone prace o charakterze poznawczym i rozwojowym: badanie superszybkich reakcji rodnikowych w systemach biologicznych, materiałach polimerowych i cieczach jonowych, biomateriałach, wodzie znajdującej się w warunkach krytycznych itp. Wdrożone zostaną nowe systemy hydrożelowe, technologie obróbki polimerów syntetycznych i naturalnych oraz technologie sterylizacji nowych materiałów medycznych i leków. Zagadnienia testowania zachowania się materiałów w polu promieniowania, w zakresie wysokich dawek są ważne dla przemysłu elektronicznego i energetyki jądrowej.

**Tabela 3. Sumaryczne roczne koszty badań.**

	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016
Działalność statutowa	9,2	9,8	10,5	11,1	11,9	12,7	13,5	14,4	15,3	16,4
Projekty MNiSW	2,0	2,2	2,3	2,5	2,6	2,7	3,0	3,1	3,3	3,5
Projekty UE	1	3	4	6	10	6	8	5	4	6
Usługi, prace na zamówienie	8,0	8,5	9,1	9,7	10,3	11,0	11,7	12,5	13,3	14,2
ogółem	<b>20,2</b>	<b>23,5</b>	<b>25,8</b>	<b>29,3</b>	<b>34,8</b>	<b>32,4</b>	<b>36,2</b>	<b>35,0</b>	<b>36,0</b>	<b>40,1</b>

**Tabela 4. Planowane inwestycje.**

	Inwestycja	Koszty [mln zł]
1	Laboratorium radiochemiczne do prac z materiałami rozszczepialnymi	10
2	Akcelerator Rodothron	25
3	Stacja napromieniań gamma	20
4	Spektrometr ICP-MS	3
5	Spektrometr SNIF-NMR	4
6	Spektrometr masowy Delta V Advantage	2
7	Mini reaktor $10^{12}$ n/cm <sup>2</sup> ·s do analizy aktywacyjnej	4,5
8	Spektrometr gamma	2,5
9	Spektrometr MS-GS	1,5
10	Dyfraktometr rentgenowski, rentgenowski spektrometr (mikro) fluorescencyjny z dyspersją energii (M-EDXRF), spektrometr ESCA, mikroskop sił atomowych	10
11	Koincydencyjny system pomiarowy z miksowaniem impulsów do pomiaru aktywności radionuklidów o złożonym schemacie rozpadu	10
	ogółem:	<b>92,5</b>

**STRATEGICZNE PLANY BADAWCZE  
POLSKIEJ CHEMII JĄDROWEJ I RADIACYJNEJ (2007-2016)**

I	II	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016
radiochemia i chemia jądrowa	Badanie mechanizmów reakcji za pomocą efektów izotopowych	■	■	■	■	■	■				
	hydrometalurgiczne metody rozdzielania aktywności od lantanowców produktów rozszczepienia w procesie przerobu wypalonych paliw jądrowych (partitioning)				■	■	■	■	■	■	■
	kontynuacja prac dotyczących własności pierwiastków superciężkich (współpraca z ZIBJ Dubna)	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
	opracowywanie nowych metod przyłączania radionuklidów do biomolekuł i otrzymywania radiofarmaceutyków		■	■	■	■	■	■			
	opracowanie metod otrzymywania radionuklidów terapeutycznych w formie bezboźnikowej	■	■	■	■	■	■	■			
	metaliczne radionuklidy PET			■	■	■	■	■	■	■	■
	opracowanie nowych generatorów radionuklidów			■	■	■	■	■			
chemia radiacyjna	badanie procesów rodnikowych w układach biologicznych, polimerowych i katalitycznych	■	■	■	■	■	■	■	■	■	
	badanie mechanizmów oddziaływania promieniowania jonizującego z materiałami jako podstawy ich modyfikacji	■	■	■	■	■	■	■			
	badania nad inicjowanymi radiacyjnie reakcjami w polimerach, roztworach polimerów (syntetycznych, naturalnych i biopolimerów), żelach, układach micelarnych i supramolekularnych	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
	nowoczesne materiały: katalizatory, nanokompozyty, polimery biokompatybilne i polimery	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
	mechanizmy reakcji inicjowanych za pomocą promieniowania jonizującego, ultradźwięków, mikrofal i światła w układach polimerowych		■	■	■	■	■	■			
	charakterystyka mechanizmów reakcji chemicznych produktów radiolizy w zależności od warunków ciśnienia i temperatury (dla EJ)			■	■	■	■	■			
	wykorzystanie metod izotopowych i radiacyjnych - szczególnie w odniesieniu do roztworów polimerów i cieczy jonowych	■	■	■	■	■	■	■	■		
	oczyszczanie gazów przemysłowych przy użyciu wiązki elektronów (VOC - związki niebezpieczne, niszczące warstwę ozonową i wywołujące efekt cieplarniany)	■	■	■	■	■	■	■			
	medyczne materiały hydrożelowe		■	■	■	■	■	■			

Rys. 8. Plany badawcze w zakresie badań podstawowych.



**STRATEGICZNE PLANY BADAWCZE  
POLSKIEJ CHEMII JĄDROWEJ I RADIACYJNEJ (2007-2016)**

I	II	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016
radiochemia i chemia jądrowa	Otrzymywanie radionuklidów terapeutycznych i diagnostycznych o wysokich aktywnościach właściwych dla medycyny nuklearnej; opracowywanie nowych generatorów radionuklidów										
	Opracowanie i wdrażanie nowoczesnych technologii przetwarzania odpadów niebezpiecznych w tym radioaktywnych										
	Chemiczne aspekty energetyki jądrowej (chemia wody, wfwkty korozyjne, sorbenty radionuklidów, etc)										
	Radiochemiczna identyfikacja zanieczyszczeń środowiska, specjacje radionuklidów										
	Transport radionuklidów i izotopów trwałych w wybranych ekosystemach, specjacje geochemiczna										
	Opracowanie elementów izotopowego monitoringu środowiska (składowiska odpadów radioaktywnych, otoczenie EJ)										
chemia radiacyjna	Rozwój technologii radiacyjnych. Sterylizacja sprzętu medycznego i przeszczepów										
	Technologie radiacyjnej obróbki polimerów										
jądrowe metody analityczne	Zastosowanie NAA oraz technik izotopowych jako metody kontrolnej w stosunku do innych metod nieorganicznej analizy śladowej w analizach produktów żywnościowych, próbek środowiskowych, materiały odniesienia										

Rys. 9. Plany badawcze w zakresie zastosowań.

## 10.5. ENERGETYKA JĄDROWA

**Energetyka rozszczepieniowa i techniki reaktorowe** są przedmiotem zainteresowań zespołów w Instytucie Energii Atomowej w Świerku, Instytucie Chemii i Techniki Jądrowej w Warszawie, Akademii Górniczo-Hutniczej w Krakowie, Uniwersytecie Warszawskim, Politechnice Warszawskiej i Politechnice Śląskiej, przy czym liczba pracowników naukowych i naukowo-technicznych oraz doktorantów zajmujących się tą tematyką nie przekracza **50** osób. Współpraca międzynarodowa jest prowadzona (lub inicjowana) m.in. w ramach międzynarodowych programów: ELEKTROJAD, MYRRHA, EUROPART, RAPHAEL, EUROTRANS, ELSY oraz z instytucjami zagranicznymi JRC w Petten (Holandia), AREVA (Francja), ANSALDO, CIEMAT i ENEA (Włochy), FZJ, FZK i SIEMENS (Niemcy) i innymi.

Przewiduje się dwa główne obszary badawcze:

- A. Przygotowanie infrastruktury badawczo-technicznej i edukacyjnej dla rozwoju energetyki jądrowej w kraju. Przewiduje się prowadzenie prac m.in. nad problemami bezpieczeństwa jądrowego i ochrony radiologicznej, gospodarką odpadami promieniotwórczymi i wypalonym paliwem, kompleksem prac związanych z programami edukacyjno-szkoleniowymi i in.
- B. Reaktor HTR jako wysokotemperaturowe źródło ciepła dla chemicznej przeróbki węgla.

Ponadto przewiduje się udział polskich ośrodków we współpracy międzynarodowej w realizacji badań w zakresie wykorzystania cyklu torowo-uranowego w reaktorach i podkrytycznych układów sterowanych akceleratorem do transmutacji wypalonego paliwa.

Program budowy reaktora HTR powinien być sfinansowany z budżetu (MNiSW) oraz z funduszy w dyspozycji przemysłów węglowego i chemicznego. Prace badawczo-techniczne związane z budową elektrowni powinny być pokryte w głównej części przez inwestora elektrowni, programy edukacyjno-szkoleniowe powinny być pokryte przez MNiSW oraz MEN. Zakres finansowania zależy od decyzji w sprawie polskiego programu energetyki jądrowej.

W zakresie **energetyki termojądrowej** prace badawcze prowadzone są w Instytucie Fizyki Plazmy i Laserowej Mikrosyntezy w Warszawie, Politechnice Warszawskiej, w Instytucie Problemów Jądrowych w Świerku, Instytucie Fizyki Jądrowej PAN w Krakowie, na Uniwersytecie Opolskim, w Politechnice Szczecińskiej, Akademii Morskiej w Szczecinie, Akademii Górniczo-Hutniczej, w Instytucie Niskich Temperatur i Badań Strukturalnych PAN we Wrocławiu, Instytucie Energii Atomowej w Świerku, w Szkole Głównej Gospodarstwa Wiejskiego w Warszawie, na Uniwersytecie Marii Curie-Skłodowskiej w Lublinie oraz w Instytucie Metali Nieżelaznych w Gliwicach. Ogólna liczba pracowników (naukowych i naukowo-technicznych) zaangażowanych w tematykę syntezy jądrowej wynosi ok. **120** osób.

Główne tematy badawcze to: diagnostyka plazmy w urządzeniach magnetycznego utrzymania (tokamakach i stelaratorach), teoria i komputerowe modelowanie zjawisk fizycznych w plazmie gorącej, analiza naprężeń mechanicznych, termicznych i elektromagnetycznych w urządzeniach syntezy, inżynieria materiałowa, badania socjoekonomiczne oraz badania w zakresie fuzji inercyjnej. W Polsce nie planuje się budowy urządzeń do badania fuzji, natomiast polscy specjaliści uczestniczą w europejskich programach badawczych prowadzonych na istniejących urządzeniach (JET w Culham, TEXTOR w Jülich, MAST w Culham, Tore Supra w Cadarache i in.) oraz

będących w budowie: COMPASS-D w Pradze, stellarator W7-X w IPP Greifswald. Jednostki naukowe wymienione powyżej (z wyjątkiem dwóch ostatnich z Lublina i Gliwic) tworzą Asocjację Euratom-IFPiLM, która na mocy Kontraktu Asocjacyjnego ze Wspólnotą EURATOM została włączona do Europejskiej Przestrzeni Badawczej w zakresie fuzji jądrowej. Polskie jednostki naukowe nawiązały również współpracę z środkami naukowymi w Niemczech (IPP Greifswald, IPP Jülich), Szwecji (Royal Institute of Technology, Chalmers University Goeteborg), Francji (CEA Cadarache), Wielkiej Brytanii (UKAEA Fusion Centre Culham), Belgii (Królewska Akademia Wojskowa, Uniwersytet w Gent), Czechach (Instytut Fizyki Plazmy i Instytut Fizyki w Pradze, Centrum PALS – Prague Asterix Laser System), Austrii (Akademia Nauk i Politechnika Wiedeńska) i Włoch (ENEA, Frascati/Rzym). W dłuższej skali czasowej najważniejszy będzie udział w programie ITER, jak również prace przygotowawcze (np. w zakresie oddziaływania i wykorzystania neutronów) dla reaktora DEMO.

Szacunkowy roczny budżet programu w roku 2007 to około **12** mln zł, z czego Komisja Europejska pokrywa 20-30%. W najbliższych latach spodziewane jest rozszerzenie programu i jego budżetu do poziomu ok. **20** mln zł rocznie.

## 10.6. POZAENERGETYCZNE TECHNIKI JĄDROWE

W Polsce liczba użytkowników źródeł promieniowania jonizującego wynosi ok. 2300 (w zastosowaniach przemysłowych). Problematyka ta jest również przedmiotem prac badawczo-rozwojowych w 12 polskich ośrodkach naukowych, które zatrudniają ok. 80 pracowników naukowych i naukowo-technicznych.

Do najbardziej znaczących osiągnięć należy zaliczyć:

- wdrożenie instalacji oczyszczania gazów kominowych,
- szerokie wdrożenie technologii radiacyjnych w innych zastosowaniach,
- wykorzystanie radioizotopowej aparatury do kontroli procesów przemysłowych, dla oceny parametrów węgla oraz monitoringu zapylenia powietrza,
- wdrożenie nowoczesnych metod i procedur analitycznych (NAA, XRF),
- wdrożenie technologii radiacyjnych do jądrowych metod analizy składu.

Planowane tematy badawcze koncentrują się głównie w czterech obszarach, tzn. (1) technologie radiacyjne, (2) miernictwo przemysłowe i diagnostyka, (3) metody znacznikowe w ochronie środowiska i optymalizacji procesów technologicznych oraz (4) jądrowe metody analizy składu materii. Miedzy innymi przewidywana jest realizacja następujących tematów:

- rozwój technologii oczyszczania gazów spalinowych,
- radiacyjna modyfikacja materiałów półprzewodnikowych,
- zastosowanie modyfikacji radiacyjnej w procesie wytwarzania nanomateriałów i kompozytów,
- wykorzystanie procesów radiacyjnego sieciowania w polimerach,
- wyznaczanie parametrów jakościowych węgla oraz wielkości fizycznych zawiesin pyłowo-powietrznych i wodnych,
- rozwój metod diagnostycznych w oparciu o przemysłową tomografię komputerową,
- zastosowania technik jądrowych do badania wielofazowych przepływów w układach przemysłowych
- optymalizacja ciągów technologicznych oczyszczalni ścieków komunalno-przemysłowych,
- rozwój metod znacznikowych w zastosowaniach hydrogeologicznych,
- opracowanie procedur analitycznych w rentgenowskiej mikroanalizie fluorescencyjnej pojedynczych ziaren i pyłów atmosferycznych,
- wykorzystanie promieniowania synchrotronowego w badaniach procesów degeneracyjnych w tkankach centralnego układu nerwowego człowieka,
- badania dynamiki cyklu węglowego z wykorzystaniem metod jądrowych i technik chromatograficznych.

Poszczególne tematy powinny wdrażane przez komercyjne jednostki produkcyjno-usługowe. Istotnym elementem będzie kontynuowanie współpracy z instytutami i szkołami wyższymi z całego kraju w realizacji programów badawczych i wdrożeniowych prowadzonych przy wykorzystaniu dużych źródeł promieniowania jonizującego.

Koszty prac badawczo-rozwojowych w nadchodzących latach szacuje się na ok. 12 mln zł rocznie, natomiast koszt budowy kompleksu urządzeń radiacyjnych ocenia się na ok. 50 mln zł.

## 10.7. MEDYCZNE ZASTOSOWANIA PROMIENIOWANIA JONIZUJĄCEGO

Medyczne aspekty stosowania promieniowania jonizującego obejmują swoim zakresem zastosowanie otwartych źródeł promieniowania (radioizotopów lub preparatów znakowanych radioizotopami) w diagnostyce i terapii (medycyna nuklearna) oraz otrzymywanie nowych radionuklidów i związków znakowanych dla medycyny, zarówno dla celów diagnostycznych jak i terapeutycznych.

W Polsce zarejestrowanych jest około 60 zakładów medycyny nuklearnej wyposażonych co najmniej w jedno urządzenie do rejestracji scyntygraficznych (choć jednocześnie w placówkach służby zdrowia działa aż 171 pracowni radioizotopowych II i III klasy). Ogólna liczba pracowników naukowych i naukowo-technicznych zajmujących się tą tematyką to około **600** osób w zakładach medycyny nuklearnej, w tym **125** lekarzy oraz **115** osób z wyższym wykształceniem w zakresie innych specjalności.

Ze względu na swój interdyscyplinarny charakter i wartość badania radioizotopowego medycyna nuklearna powinna być dalej rozwijana w naszym kraju, zwłaszcza iż wskaźniki przedstawiające jej udział w procesie diagnostycznym w Polsce w odniesieniu do wskaźników w innych krajach europejskich obrazują zakres dotychczasowych zaniedbań. Zakłady medycyny nuklearnej wymagają pilnego wyposażenia w nowy sprzęt o różnym przeznaczeniu: gamma kamery ogólnego stosowania, kamery SPECT/CT, kamery PET/CT, gamma kamery do badania małych narządów, mierniki dawek. Szczególny nacisk należy położyć na rozwój techniki pozytonowej emisyjnej tomografii (PET), rutynowo już stosowanej w krajach rozwiniętych. Liczne opracowania wskazują, że zastosowanie techniki PET, dzięki jej wysokiej czułości, zdecydowanie zmniejsza koszty procedury leczniczej – przede wszystkim w związku z możliwością ograniczenia liczby inwazyjnych procedur diagnostycznych oraz liczby zbędnych zabiegów operacyjnych.

Badania w tematyce chemii radiofarmaceutycznej będą koncentrowały się na otrzymywaniu bežnośnikowych radionuklidów terapeutycznych i diagnostycznych dla medycyny nuklearnej, w tym na opracowywaniu nowych generatorów radionuklidów, nowych metod przyłączania radionuklidów do biomolekuł i otrzymywania radiofarmaceutyków. Planuje się opracowanie metod wytwarzania terapeutycznych o różnych energiach cząstek  $\beta^-$ , np.  $^{177}\text{Lu}$ ,  $^{47}\text{Sc}$ ,  $^{105}\text{Ru}$  i  $^{143}\text{Pr}$ ; oraz radionuklidów diagnostycznych - metalicznych emiterów cząstek  $\beta^+$  jako znaczników PET, np.  $^{86}\text{Y}$ ,  $^{61}\text{Cu}$  (współpraca w ramach Warszawskiego Konsorcjum PET). Opracowane zostaną nowe generatory bežnośnikowych radionuklidów - emiterów  $\gamma$  ( $^{87}\text{Y}/^{87\text{m}}\text{Sr}$ ),  $\beta^+$  ( $^{44}\text{Ti}/^{44}\text{Sc}$ ,  $^{82}\text{Sr}/^{82}\text{Rb}$ ),  $\alpha$  ( $^{225}\text{Ac}/^{213}\text{Bi}$ ) oraz elektronów Augera ( $^{103}\text{Ru}/^{103\text{m}}\text{Rh}$ ). Opracowane zostaną również nowe metody przyłączania radionuklidów do związków biologicznie aktywnych i otrzymywania potencjalnych radiofarmaceutyków.

Najszybciej rozwijającą się współcześnie dziedziną radioterapii nowotworów jest radioterapia hadronowa. Zastosowanie wiązek protonów i ciężkich jonów daje możliwość precyzyjnej lokalizacji podawanej dawki promieniowania, a dzięki właściwościom radiobiologicznym użytych cząstek umożliwi wyleczenie niektórych rodzajów nowotworów radioodpornych, których leczenie innymi metodami jest niemożliwe lub nieskuteczne.

## Strategiczne plany badawcze w latach 2007-2013, to:

- opracowanie metod otrzymywania i badania przedkliniczne nowych radiofarmaceutyków do diagnostyki i terapii izotopowej,
- zastosowanie izotopów o wysokiej aktywności właściwej i związków je kompleksujących jako materiałów wyjściowych do produkcji radiofarmaceutyków,
- stosowanie ligandów receptorowych znakowanych izotopami promieniotwórczymi do diagnostyki nowotworowej, obrazowania molekularnego i terapii receptorowej,
- ocena potencjalnej przydatności diagnostycznej i terapeutycznej wybranych preparatów izotopowych w testach in vitro i in vivo,
- celowana terapia izotopowa (Radioterapia Receptorowa) jako nowa metoda leczenia nieoperacyjnych guzów neuroendokrynych,
- leczenie znakowanymi analogami somatostatyny,
- dozymetria preparatów promieniotwórczych do radioterapii i zagadnienia ochrony radiologicznej związane z radioterapią wewnętrzną,
- znakowanie wybranymi radionuklidami związków biologicznie aktywnych (nowe kompleksy z ligandami bifunkcjonalnymi),
- badanie efektywności znakowania peptydów nuklidami  $^{99m}\text{Tc}$  i  $^{188}\text{Re}$  za pomocą nowych heteroleptycznych kompleksów typu [4+1] oraz kompleksów trikarbonylkowych,
- radioterapia hadronowa nowotworów radioopornych.

W najbliższym czasie należy dokonać zakupu co najmniej 15 gamma kamer dwugłowicowych, 5 gamma kamer SPECT/CT, ponad 10 gamma kamer jednogłowicowych oraz ponad 20 kalibratorów dawek. Szacunkowa wartość inwestycji w sprzęt medycyny nuklearnej wynosi ponad **40** mln zł (bez PET). Ministerstwo Zdrowia planuje zainwestować w zakup gamma kamer PET/CT do końca 2007 roku **20** mln zł.

Ponadto na zrealizowanie planowanych badań oraz ewentualne przygotowanie niektórych wyników do wdrożenia oraz programu kształcenia i rozwoju młodej kadry łączna wysokość niezbędnych środków finansowych na lata 2007-2013 (budżet MZ i MNiSW, środki własne) wynosi ok. **25** mln zł.

## 10.7. OCHRONA RADIOLOGICZNA I BEZPIECZEŃSTWO JĄDROWE

Ochrona radiologiczna i bezpieczeństwo jądrowe (ORiBJ) obejmują swoim zakresem: fizykę jądrową (fizyka radiacyjna i detekcja promieniowania jądrowego), biologię (radiobiologia), medycynę (diagnostyka obrazowa, radioterapia, medycyna nuklearna, epidemiologia), ekologię (inżynieria środowiska, postępowanie na wypadek zdarzeń awaryjnych i ich prewencję, w tym antyterroryzm) oraz prawo (w tym m.in. prawo pracy, prawo karne), jest to więc działalność multidyscyplinarna zarówno w aspekcie organizacyjnym jak i naukowym. W Polsce badania w zakresie ORiBJ prowadzone są w prawie 20 uczelniach i instytutach badawczych jednak z udziałem zaledwie około **210** osób, z czego **130** to pracownicy naukowci (rys. 1).

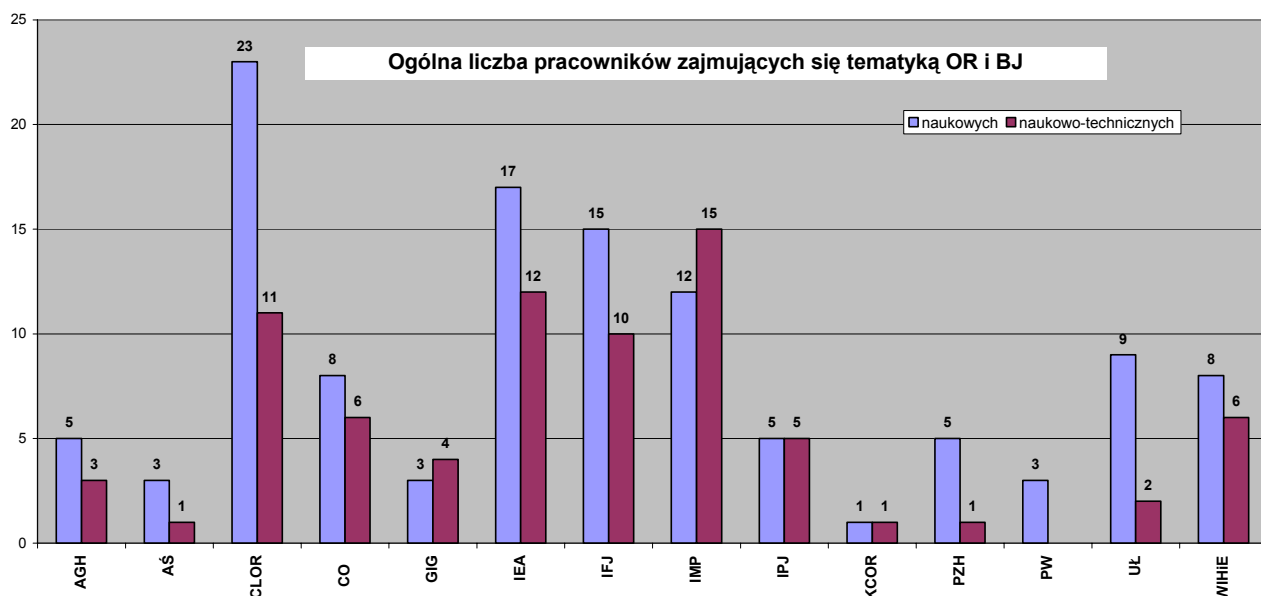
Jako podstawowe cele na najbliższe lata na lata (2007-2013) należy uznać następujące działania:

- integracja i poprawa spójności krajowych działań badawczych z działalnością w UE w takich dziedzinach jak naturalne źródła promieniowania, radioekologia, ochrona środowiska, dozymetria, narażenie na promieniowanie w miejscu pracy, zarządzanie sytuacjami kryzysowymi (w tym rekultywacja skażonych obszarów),
- uruchomienie programu działań na rzecz przemysłowych wdrożeń i promocji rynkowej dla detektorów promieniowania, aparatury i systemów dozymetrycznych oraz stworzenie zasad certyfikacji tych wyrobów,
- dostosowanie zakresu kształcenia uniwersyteckiego i szkolenia podyplomowego w zakresie ORiBJ do rosnących potrzeb, głównie zastosowań medycznych oraz planowanego rozwoju energetyki jądrowej w Polsce, jak również powiązanie systemu kształcenia i nadawania uprawnień specjalistom OR w Polsce z systemami europejskimi.

Plany badawcze powiązane są w znacznej mierze z zadaniami realizowanymi w ramach 6 Programu Ramowego UE i planowanymi w 7 PR UE. Lista tematów planowanych do realizacji w latach 2006-2013, wraz z nakładami finansowymi, przedstawiona jest na rys. 10. Powinny być one realizowane przez zespoły złożone ze specjalistów z różnych instytucji, w ramach np. sieci naukowych czy konsorcjów tematycznych. Nakłady finansowe zostały oszacowane na podstawie projektów realizowanych w ramach 7 PR. Pełną listę tematów oraz instytucji zainteresowanych ich realizacją przedstawia tabela 5.

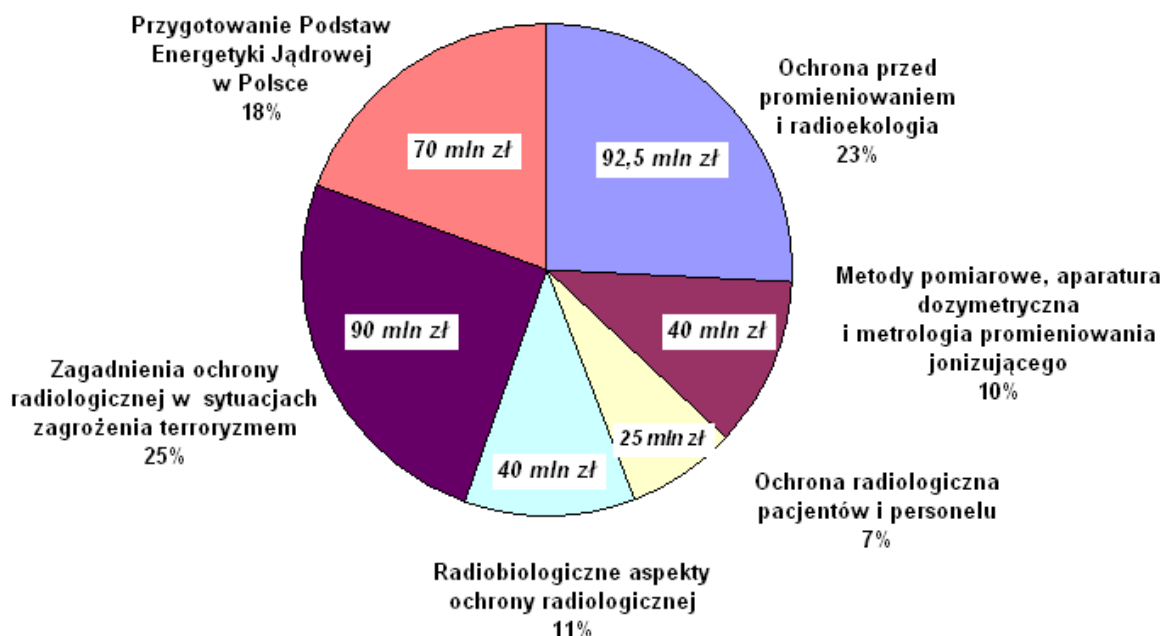
W tabeli 6 przedstawiono postulowane inwestycje w latach 2007-2013. Nakłady na te inwestycje pochodzić mogą w większości z funduszy strukturalnych Unii Europejskiej.

Dalszy rozwój badań i zastosowań w zakresie bezpieczeństwa jądrowego i ochrony radiologicznej powinien być związany z rozwojem energetyki jądrowej oraz z innymi programami inwestycyjnymi i badawczymi w zakresie atomistyki w Polsce.



Rys. 10. Szacunkowa liczba pracowników naukowych i technicznych, zaangażowanych obecnie w Polsce w badania w zakresie BJIOR.

**Lista zasadniczych tematów, planowanych do realizacji w latach 2006 - 2013  
wraz z planowanymi nakładami finansowymi**



Rys. 11. Lista zasadniczych tematów, planowanych do realizacji w latach 2006-2013 wraz z planowanymi nakładami finansowymi



**Tabela 5. Szczegółowa lista tematów, planowanych do realizacji w latach 2007-2013, wraz z instytucjami zainteresowanymi podaną tematyką.**

<b>Ochrona przed promieniowaniem i radioekologia</b>	<b>Instytucje</b>
Opracowanie i wdrożenie systemu pomiarowo-obliczeniowego do kompleksowej analizy narażenia ludności na promieniowanie naturalne, sztucznych radionuklidów i innych źródeł promieniowania.	CLOR, IFJ, PZH, IEA
Rozwój metod analiz radiochemicznych oraz metod pomiaru aktywności radionuklidów do oceny narażenia wewnętrznego pracowników i skażeń środowiska.	IEA, CLOR
Badanie transportu izotopów promieniotwórczych skażeń nimi wywołanych w środowisku lądowym, wodnym i morskim oraz w wodach wodociągowych i żywności.	CLOR, IFJ, GIG, PZH, UG, UMCS
Analiza zagrożeń radiacyjnych związanych z występowaniem obszarów i miejsc pracy o podwyższonym poziomie naturalnej promieniotwórczości, powstających wskutek działalności przemysłowej, niezwiązanej z energetyką jądrową.	GIG, IFJ
Rozwój technologii przetwarzania i składowania odpadów promieniotwórczych.	PIG, ZUOP, IEA, AGH
<b>Metody pomiarowe, aparatura dozymetryczna i metrologia promieniowania jonizującego</b>	
Mikrodozymetria i nanodozymetria – metody pomiaru wielkości dozymetrycznych istotnych z punktu widzenia narażenia radiacyjnego.	IEA, IPJ, IFJ
Detektory i aparatura dozymetryczna – badania detektorów, metody pomiarowe, opracowania aparatury dozymetrycznej z uwzględnieniem potrzeb diagnostyki medycznej i radioterapii.	ICHtJ, IEA, IFJ, IPJ, CO
Rozwój metod dozymetrii biologicznej.	AŚ, IChTJ, IFJ
Rozwój metod metrologii promieniowania jonizującego.	IEA, CLOR
Rozwój akredytowanych laboratoriów pomiarowych i wzorcowania.	IEA, CLOR, IFJ, OBRI, CO
<b>Ochrona radiologiczna pacjentów i personelu</b>	
Analiza narażenia pacjentów poddawanych napromienieniu w celach diagnostycznych lub terapeutycznych, szczególnie przy wprowadzaniu nowych technik i urządzeń.	PW, IMP, KCOR
Metody kontroli jakości i zarządzania ryzykiem przy stosowaniu promieniowania jonizującego w celach medycznych.	IEA, PW, IMP, KCOR, WSSE
Ocena ryzyka nowotworów w populacji zawodowo narażonej na promieniowanie.	IMP, CO
<b>Radiobiologiczne aspekty ochrony radiologicznej</b>	
Badanie mechanizmów i skutków działania małych dawek promieniowania jonizującego.	AŚ, IChTJ, IEA, IFJ,

	PZH, CLOR
Ocena dawek pochłoniętych w narządach człowieka przy skażeniach wewnętrznych.	IAE, CLOR
Badania nad nowymi związkami i strategiami radiochronnymi.	AŚ, WIHiE
<b>Zagadnienia ochrony radiologicznej w sytuacjach zagrożenia terroryzmem</b>	
Ocena narażenia radiologicznego oraz rozprzestrzeniania się skażeń w sytuacjach nadzwyczajnych.	AŚ, CLOR, IChTJ, IFJ, IEA
Metody oznaczania izotopów promieniotwórczych w próbkach nieznanego pochodzenia i w organizmie człowieka.	CLOR, PZH
Jądrowe metody wykrywania materiałów rozszczepialnych, promieniotwórczych i wybuchowych.	IFJ, IPJ, IEA
Opracowanie technik masowej dozymetrii indywidualnej.	IFJ
<b>Przygotowanie Podstaw Energetyki Jądrowej w Polsce</b>	
Ocena tła promieniowania w miejscach przewidywanych lokalizacji Elektrowni Jądrowej i w jej otoczeniu.	CLOR, IFJ, GIG, IEA
Rozwój systemów monitorowania otoczenia elektrowni jądrowych i innych obiektów jądrowych oraz wzorcowania stacjonarnych jądrowych systemów pomiarowych.	CLOR, IFJ, GIG, IEA
Optimalizacja cyklu paliwowego reaktorów jądrowych w tym rozwój technologii przechowywania wypalonego paliwa jądrowego.	IEA, ZUOP, GIG
Wypracowanie strategii oraz systemu komunikacji i promocji w celu budowania zaufania do bezpiecznego stosowania materiałów promieniotwórczych i społecznego przyzwolenia na rozwój energetyki jądrowej.	CLOR, PAA, IPJ

- AGH** Akademia Górniczo Hutnicza  
**AŚ** Instytut Biologii, Akademia Świętokrzyska  
**CLOR** Centralne Laboratorium Ochrony Radiologicznej  
**CO** Centrum Onkologii – Instytut im. Marii Skłodowskiej – Curie (Oddziały: Warszawa, Gliwice, Kraków)  
**GIG** Główny Instytut Górnictwa Laboratorium Radiometrii  
**IChTJ** Instytut Chemii i Techniki Jądrowej  
**IEA** Instytut Energii Atomowej  
**IFJ** Instytut Fizyki Jądrowej PAN  
**IMP** Instytut Medycyny Pracy  
**IPJ** Instytut Problemów Jądrowych  
**KCOR** Centrum Ochrony Radiologicznej w Ochronie Zdrowia  
**PZH** Państwowy Zakład Higieny  
**PW** Politechnika Warszawska  
**PCz** Politechnika Częstochowska  
**UŁ** Uniwersytet Łódzki, Katedra Fizyki Jądrowej i Bezpieczeństwa Jądrowego  
**WIHiE** Wojskowy Instytut Higieny i Epidemiologii  
**WICHiR** Wojskowy Instytut Chemii i Radiometrii

**Tabela 6. Postulowane inwestycje w dziedzinie ORiBJ w latach 2007-2013.**

<b>Temat</b>	<b>Instytucje</b>	<b>Kwota [mln zł]</b>	<b>2007</b>	<b>2008</b>	<b>2009</b>	<b>2010</b>	<b>2011</b>	<b>2012</b>	<b>2013</b>
Treningowy symulator kontroli technologicznej reaktora	IEA	10							
Sieć stacji monitoringu wysokiej rozdzielczości	CLOR	25							
Laboratorium Analizy Sądowej Materiałów Rozszczepialnych i Promieniotwórczych	CLOR, IEA, IFJ	100							
Podziemne Laboratorium Pomiarów Niskoenergetycznych (PLPN)	IFJ	20							