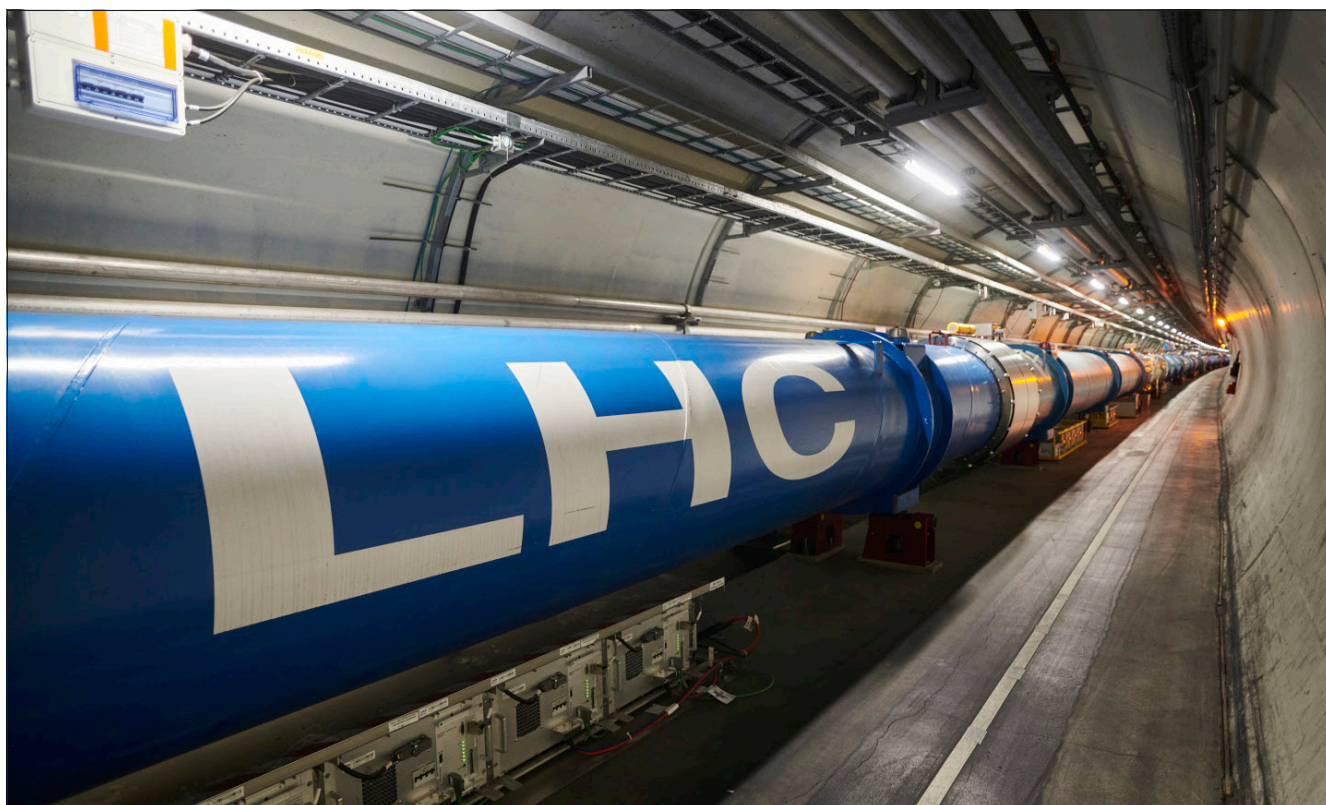


POSTĘPY TECHNIKI JĄDROWEJ

VOL. 65 Z. 2 ISSN 0551-6846 WARSZAWA 2022



**WIOSNA W CERN
NOWY ETAP EKSPERYMENTÓW,
NOWE WYNIKI**

(Fot. CERN, czytaj na str. 2)

2-2022

INSTYTUT CHEMII I TECHNIKI JĄDROWEJ
POLSKIE TOWARZYSTWO NUKLEONICZNE

SPIS TREŚCI NR 2/2022

WIOSNA W CERN: NOWY ETAP EKSPERYMENTÓW, NOWE WYNIKI Małgorzata Nowina Konopka	2
SYTUACJA ENERGETYKI JĄDROWEJ A WOJNA NA UKRAINIE Andrzej Mikulski	7
CZY NISKIE DAWKI PROMIENIOWANIA JONIZUJĄCEGO SĄ SZKODLIWE? Marek Krzysztof Janiak	11
SAFEGUARD W MAŁYCH REAKTORACH MODULARNYCH - SMR Krzysztof Rzymkowski.....	22
WIADOMOŚCI Z KRAJU	28
WIADOMOŚCI ZE ŚWIATA	37
WYDARZENIA	38
Z PRASY	42
INFORMACJE O KSIĄŻKACH ADAM HIGGINBOTHAM, O PÓŁNOCY W CZARNOBYLU NIEZNANA PRAWDA O NAJWIĘKSZEJ NUKLEARNEJ KATASTROFIE Krzysztof Rzymkowski	43
SIĘGAJĄC PO NIEZBADANE OSIĄGNIĘCIA NAUKOWE WSPÓŁFINANSOWANE PRZEZ FNP Wojciech Głuszewski	45
FELIETON NIE TYLKO ATOM NIEJEDNO MA IMIĘ Marek Bielski	46
IN MEMORIAM – PROF. DR HAB. KAZIMIERZ PRZEWŁOCKI	48
WSPOMNIENIE O PROF. DR HAB. LUDWIKU DOBRZYŃSKIM	48



Kwartalnik naukowo-informacyjny
Postępy Techniki Jądrowej

Wydawca:
Instytut Chemii i Techniki Jądrowej
ul. Dorodna 16, 03-195 Warszawa,

Kontakt Telefoniczny:
Tel. 22 504 12 48
Fax.: 22 811 15 32

Redaktor naczelny:
Stanisław Latek
S.Latek@ichtj.waw.pl

Komitet redakcyjny:
Wojciech Głuszewski
Marek Rabiński
Łukasz Sawicki
Elżbieta Zalewska

Współpracują z nami:
Marek Bielski
Andrzej Mikulski
Małgorzata Nowina-Konopka
Małgorzata Sobieszczak-Marciniak

Redakcja:
PTJ-redakcja@ichtj.waw.pl

Adres strony internetowej PTJ:
<http://ptj.waw.pl>

Opracowanie graficzne:
Daniel Jaskóła (Agencja Reklamowa TOP)

Zastrzegamy sobie prawo skracania i adjustacji
tekstów oraz zmian tytułów.

Recenzowanie artykułów
Większość manuskryptów przesyłana jest do recenzowania
przez 1-2 ekspertów z dziedziny, której dotyczy artykuł. Na
podstawie opinii recenzentów artykuły są akceptowane do
druku, kierowane do poprawy, lub odrzucone.

Prenumerata
Zamówienia na prenumeratę kwartalnika
POSTĘPY TECHNIKI JĄDROWEJ
należy składać na adres redakcji jak wyżej.
Wpłaty proszę przekazać na konto:
Bank Pekao SA,
45 1240 3480 1111 0000 4278 2935
Koszt prenumeraty rocznej
(4 zeszyty łącznie z kosztami przesyłki) wynosi 52 zł.
Składając zamówienie należy podać adres osoby
lub instytucji zamawiającej, na który
ma być przesłane czasopismo oraz numer NIP.

Skład i druk:
Agencja Reklamowa TOP,
ul. Chocimska 4, 87-800 Włocławek

Szanowni Państwo

W chwili, gdy piszę te słowa, mija już 114 dni trwania agresji Federacji Rosyjskiej na Ukrainę. Zagrożone zostały między innymi ukraińskie obiekty jądrowe. Jednak obiektywna i zgodna z polityką międzynarodową naszego kraju ocena zagrożeń dla bezpieczeństwa jądrowego wymaga czasu i dostępu do wiarygodnych źródeł informacji. Być może wrócimy do tematu w następnych numerach naszego czasopisma.

A tymczasem powracamy do czystej nauki. WIOSNA W CERN: NOWY ETAP EKSPERYMENTÓW, NOWE WYNIKI. Tak zatytułowała swój artykuł Małgorzata Nowina Konopka. Przypomnijmy: CERN – Europejskie Centrum Badań Jądrowych – największe na świecie laboratorium fizyki cząstek obsługuje sieć siedmiu akceleratorów. Największy z nich LHC (Wielki Zderzacz Hadronów) rozpoczął skuteczne działanie w listopadzie 2009 r. Po intensywnym zbieraniu danych, związanym z odkryciem bozonu Higgsa, LHC przechodził pierwszy dwuletni (2013-2015) okres przestoju, w celu osiągnięcia pełnej świetlności przy energii 14 TeV między innymi przez wzmocnienie urządzeń elektrycznych łączących magnesy. Ponownie został wyłączony na ponad trzy lata od grudnia 2018 r. do kwietnia 2022, aby wprowadzić w obiekcie kolejne ulepszenia i aktualizacje. W czasie przerw opracowywano dane zebrane z eksperymentów ATLAS, CMS, LHCb i ALICE oraz prowadzono badania zderzeń na innych niż LHC akceleratorach i urządzeniach jak np. AMS czy ASACUSA. W artykule przedstawiono najnowsze wyniki tych obliczeń i eksperymentów opublikowane w czasopiśmie Nature.

A oto pierwsze zdania artykułu. Największy i najpotężniejszy na świecie akcelerator cząstek został ponownie uruchomiony po ponad trzyletniej przerwie na konserwację, konsolidację i prace modernizacyjne. Dnia 22 kwietnia, o godzinie 12:16 CEST, dwie wiązki protonów krążyły w przeciwnych kierunkach wokół 27-kilometrowego pierścienia Wielkiego Zderzacza Hadronów z energią wtrysku 450 mld elektronowoltów (450 GeV). „Wiązki krążące z energią wtrysku zawierały stosunkowo niewielką liczbę protonów. Zderzenia o dużej intensywności i dużej energii będą realizowane za kilka miesięcy” – mówi Rhodri Jones, kierownik Departamentu Wiązek w CERN – „Ale pierwsze wiązki oznaczają udane ponowne uruchomienie akceleratora po całej ciężkiej pracy długiego przestoju”.

Kolejny artykuł – pośrednio – dotyczy agresji Rosji na Ukrainę. Dr Andrzej Mikulski przygotował artykuł pod tytułem: SYTUACJA ENERGETYKI JĄDROWEJ A WOJNA NA UKRAINIE. W streszczeniu autor napisał: „Inwazja Rosji na Ukrainę w dniu 24 lutego 2022 r. wiele zmieniła na świecie, w tym postrzeganie energetyki jądrowej w wielu państwach. W artykule omówiono szczegółowo sytuację energetyki jądrowej na Ukrainie po trzech miesiącach od tej daty oraz w krajach budujących (Bangladesz, Chiny i Turcja) lub przygotowujących się do budowy rosyjskich reaktorów (Egipt, Finlandia i Węgry), a także w krajach decydujących o przyszłości energetyki jądrowej u siebie (Belgia i Niemcy) oraz w UE. Na zakończenie przedstawione zostały działania podjęte w Polsce”.

CZY NISKIE DAWKI PROMIENIOWANIA JONIZUJĄCEGO SĄ SZKODLIWE? Taki jest tytuł artykułu prof. Marka Krzysztofa Jania. Autor, specjalista w zakresie nauk medycznych twierdzi, że: „... wiele już opublikowanych i nowo pojawiających się wyniki badań wyraźnie wskazują na korzystne, prozdrowotne działanie niskich dawek promieniowania jonizującego. Dane te przeczą dominującej opinii, że każda ekspozycja na promieniowanie jonizujące, nawet w najmniejszej dawce, może wywołać nowotwór i powinna być unikana. Co gorsza, opinia ta, w postaci tzw. hipotezy LNT (linear, no threshold), stanowi podstawę regulacji obowiązujących w ochronie radiologicznej. W artykule, po krótkim przedstawieniu genezy modelu LNT, przedstawiono przekonujące wyniki analiz epidemiologicznych i badań doświadczalnych oraz leczenia nowotworów u ludzi, które wyraźnie świadczą o braku podstaw naukowych dla tego modelu. Podano także przykłady brzemiennych w skutki konsekwencji stosowania hipotezy LNT w praktyce. Konkluzją jest postulat, aby porzucić fałszywą i szkodliwą „ideologię” LNT, która „wiąże nas w czasie przeszłym”, utrwała radiofobię i stanowi przeszkodę w poszukiwaniu stosowaniu nieszkodliwych, a często korzystnych dla zdrowia ekspozycji w niskich dawkach promieniowania jonizującego”.

Ostatni artykuł bieżącego numeru dotyczy modnych obecnie – także w Polsce – małych reaktorów modularnych. Tytuł artykułu: OCHRONA MATERIAŁÓW JĄDROWYCH SAFEGUARD W MAŁYCH REAKTORACH MODULARNYCH – SMR. Autorem jest Krzysztof Rzymkowski. W opracowaniu przedstawiono podstawowe cechy systemu zabezpieczeń w projektowanych Małych Reaktorach Modularnych – SMR. Rozpowszechnienie małych reaktorów jądrowych budzi uzasadnioną obawę przed ewentualnym rozprzestrzenieniem materiałów jądrowych. Międzynarodowa Agencja Energii Atomowej (MAEA) opracowuje zalecenia dotyczące kon-

troli tych materiałów w nowo powstających małych reaktorach o bardzo różnorodnych konstrukcjach na etapie projektowania.

W dziale doniesień znajdują się ciekawe informacje, z których kilka poniżej wymieniono.

SPOTKANIE W SPRAWIE PROJEKTÓW WDROŻENIOWYCH w dniu 5 maja br. odbyło się w Instytucie Chemii i Techniki Jądrowej (IChTJ) spotkanie Piotra Dziadzio, wiceministra klimatu i środowiska z dyrektorami Instytutów badawczych nadzorowanych przez Ministerstwo Klimatu i Środowiska. W spotkaniu wzięli również udział wiceprezes Narodowego Funduszu Ochrony Środowiska i Gospodarki Wodnej, dr Przemysław Ligenza oraz dyrektor Departamentu Innowacji i Wodoryzacji Gospodarki Piotr Dowżenko.

Głównym celem spotkania było omówienie możliwości finansowania technologii wybranych przez Ministerstwo do wdrożenia spośród projektów zgłoszonych przez instytuty. Wśród 8 projektów wdrożeniowych zakwalifikowanych do finansowania 3 projekty zostały opracowane w IChTJ, a mianowicie: • Radiacyjna technologia sterylizacji materiałów medycznych i przeszczepów, • Projekt i budowa pilotażowej instalacji termicznej przeróbki odpadów promieniotwórczych, • Biogazownia rolnicza. Autorem doniesienia jest prof. Jacek Michalik.

KONFERENCJA SIOR 2022 – NOWE KIERUNKI ROZWOJU BEZPIECZEŃSTWA JĄDROWEGO I OCHRONY RADIOLOGICZNEJ W POLSCE. W dniach 9-10 maja br. w poznańskim Hotelu Mercure odbyło się coroczne spotkanie Stowarzyszenia Inspektorów Ochrony Radiologicznej. W tym roku hasłem przewodnim były „Nowe kierunki rozwoju bezpieczeństwa jądrowego i ochrony radiologicznej w Polsce”. Wydarzenie zostało objęte patronatem Prezesa Państwowej Agencji Atomistyki. Stowarzyszenie kontynuuje cykliczne spotkania, których celem jest omówienie aktualnych kwestii prawnych związanych z przepisami w zakresie ochrony radiologicznej. Do udziału w spotkaniu zaproszono poza IOR również osoby związane z wykorzystaniem promieniowań jonizujących w przemyśle, ochronie zdrowia, rolnictwie, ochronie środowiska, nauce i kosmonautyce. Patronaty medialne nad konferencją objęły: Inżynier i Fizyk Medyczny oraz Postępy Techniki Jądrowej. O konferencji SIOR napisali Maria Kubicka i Wojciech Głuszewski.

Pan Wojciech Głuszewski jest także autorem innych doniesień. Oto tytuły niektórych z nich:

- WORLDFOOD I NATURAFOOD 2022, 25. PIKNIK NAUKOWY POLSKIEGO RADIA I CENTRUM NAUKI KOPERNIK, POLSKIE NOBLE 2021, XVI SZKOŁA STERYLIZACJI I MIKROBIOLOGICZNEJ DEKONTAMINACJI RADIACYJNEJ.

W dziale doniesienia ze świata zamieszczamy informację NucNetu pod tytułem: WĘGRY „POPYCHAJĄ” ROSJĘ DO BUDOWY NOWYCH REAKTORÓW „JAK SZYBKO, JAK TO MOŻLIWE”.

Do Wydarzeń zakwalifikowano tym razem wyróżnienie niżej podpisanego tytułem Złotego Inżyniera Przeglądu Technicznego i dziesięciolecie powtórnego przejścia przez IChTJ roli wydawcy „Postępów Techniki Jądrowej”. Wydarzenia te opisał Marek Bielski.

W nowej rubryce „Z prasy” dr Andrzej Mikulski omawia i polemizuje z autorem artykułu w Gazecie Wyborczej pod tytułem „Wyborcza o atomie dla Warszawy”.

O książkach piszą Krzysztof Rzymkowski (tytuł książki „O północy w Czarnobylu”) i Wojciech Głuszewski (pisze o książce „Sięgając po niezbadane”).

Marek Bielski – tym razem – napisał felieton pod tytułem: NIE TYLKO ATOM NIEJEDNO MA IMIĘ. Oto fragment felietonu. „We współczesnej debacie na temat energetyki w centrum powinien znajdować się interes społeczny (in gremio) związany z bezpieczeństwem państwa, ale też bez pominięcia tzw. indywidualnych korzyści dla każdego obywatela z osobna. (Przepraszam za nadużywanie słowa obywatel, ale nadal nie mogę zrozumieć, że w dobie nieustannej promocji zasad demokracji i sprawiedliwości nie wiadomo, dlaczego tego obywatela już nawet w urzędach nazywamy... klientem)”.

Na końcu czasopisma publikujemy wspomnienie o zmarłym prof. dr. hab. Kazimierzu Przewoźniku wieloletnim pracowniku Akademii Górniczo-Hutniczej. Publikujemy również dwa teksty wspomnieniowe o prof. Ludwiku Dobrzyńskim. Prof. Ludwik Dobrzyński był jednym z najwybitniejszych przedstawicieli polskiej atomistyki. Prawie całe swoje życie zawodowe związany był z ośrodkiem jądrowym w Świerku, był również autorem artykułów w PTJ.

Czytelnikom – i sobie – życząc udanych wakacji, dobrego wypoczynku i – konsekwentnie – zakończenia wojny na Ukrainie.

Stanisław Latek,
redaktor naczelny

WIOSNA W CERN: NOWY ETAP EKSPERYMENTÓW, NOWE WYNIKI

Spring at CERN: a new stage of experiments, new results

Małgorzata Nowina Konopka

Streszczenie: CERN – Europejskie Centrum Badań Jądrowych – największe na świecie laboratorium fizyki cząstek obsługuje sieć siedmiu akceleratorów. Największy z nich LHC (Wielki Zderzacz Hadronów) rozpoczął skuteczne działanie w listopadzie 2009 r. Po intensywnym zbieraniu danych, związanym z odkryciem bozonu Higgsa, LHC przechodził pierwszy dwuletni (2013-2015) okres przestoju, w celu osiągnięcia pełnej świetlności przy energii 14 TeV między innymi przez wzmocnienie urządzeń elektrycznych łączących magnesy. Ponownie został wyłączony na ponad trzy lata od grudnia 2018 r. do kwietnia 2022, aby wprowadzić w obiekcie kolejne ulepszenia i aktualizacje. W czasie przerw opracowywano dane zebrane z eksperymentów ATLAS, CMS, LHCb i ALICE oraz prowadzono zderzenia na innych niż LHC akceleratorach i urządzeniach jak np. AMS czy ASACUSA. W artykule przedstawiono najnowsze wyniki tych obliczeń i eksperymentów opublikowane w czasopiśmie Nature.

Abstract: CERN - The European Nuclear Research Center – the world's largest particle physics laboratory is operated by a network of seven accelerators. The largest of these, the LHC (Large Hadron Collider), started operating effectively in November 2009. After extensive data collection related to the discovery of the Higgs boson, the LHC went through the first two-year (2013-2015) downtime to achieve full luminosity at 14 TeV inter alia by strengthening the electrical devices that connect the magnets. It has been shut down again for over three years from December 2018 through April 2022 to bring further improvements and updates to the facility. During the breaks, data collected from the ATLAS, CMS, LHCb and ALICE experiments was processed, and collisions were carried out on accelerators and devices other than LHC, such as for example AMS or ASACUSA. This paper presents the latest results from these calculations and experiments published in the journal Nature.

Słowa kluczowe: kwarki, gluony, partony, dżety, antymateria, hybryda materii z antymaterią

Keywords: quarks, gluons, partons, jets, antimatter, a hybrid of matter and antimatter

Ponowne uruchomienie Wielkiego Zderzacza Hadronów

Największy i najpotężniejszy na świecie akcelerator cząstek został ponownie uruchomiony po ponad trzyletniej przerwie na konserwację, konsolidację i prace modernizacyjne. Dnia **22 kwietnia**, o godzinie 12:16 CEST, dwie wiązki protonów krążyły w przeciwnych kierunkach wokół 27-kilometrowego pierścienia Wielkiego Zderzacza Hadronów z energią wtrysku 450 miliardów elektronowoltów (450 GeV).

„Wiązki krążące z energią wtrysku zawierały stosunkowo niewielką liczbę protonów. Zderzenia o dużej intensywności i dużej energii będą realizowane za kilka miesięcy” – mówi Rhodri Jones, kierownik Departamentu Wiązek w CERN – „Ale pierwsze wiązki oznaczają udane ponowne uruchomienie akceleratora po całej ciężkiej pracy długiego przestoju”.

„Maszyny i urządzenia przeszły poważne modernizacje podczas drugiego długiego przestoju kompleksu akceleratorów CERN” – mówi dyrektor CERN ds. Akceleratorów i Technologii, Mike Lamont – „Sam wielki zderzacz LHC przeszedł szeroko zakrojony program konsolidacji i będzie teraz działał z jeszcze wyższą energią, a dzięki znacznym ulepszeniom w kompleksie wtryski-

waczy dostarczy znacznie więcej danych do zmodernizowanych eksperymentów LHC”.

Wiązki pilotażowe krążyły już w LHC przez krótki okres w październiku 2021 r. Jednak te, które krążyły dzisiaj, oznaczają nie tylko koniec drugiego długiego wyłączenia LHC, ale także początek przygotowań do czterech lat zbierania danych fizycznych, co planujemy, że rozpocznie się tego lata.

Do tego czasu eksperci LHC będą pracować przez całą dobę, aby stopniowo ponownie uruchamiać maszynę i bezpiecznie zwiększać energię i intensywność wiązek przed dostarczeniem zderzeń do eksperymentów przy rekordowej energii 13,6 biliona elektronowoltów (13,6 TeV).

W trzecim przebiegu LHC, zwanym Run 3, eksperymenty maszyny zbierają dane z kolizji nie tylko przy rekordowej energii, ale także w niezrównanej liczbie. Eksperymenty ATLAS i CMS mogą spodziewać się podczas tego przebiegu większej liczby zderzeń niż w dwóch poprzednich wersjach łącznie, natomiast eksperyment LHCb, który przeszedł całkowitą modernizację podczas wyłączenia, może mieć nadzieję, że liczba zderzeń wzrośnie trzykrotnie. Tymczasem ALICE, detektor wyspecjalizowany do badania zderzeń ciężkich jonów, dzięki niedawnemu zakończeniu ważnej modernizacji,

może spodziewać się aż pięćdziesięciokrotnego wzrostu całkowitej liczby zarejestrowanych zderzeń jonów.

Bezprecedensowa liczba zderzeń umożliwi międzynarodowemu zespołom fizyków w CERN i na całym świecie bardzo szczegółowe zbadanie bozonu Higgsa oraz poddanie Modelu Standardowego fizyki cząstek elementarnych i jego różnych rozszerzeń, najbardziej rygorystycznym testom, jakie dotychczas nie zostały przeprowadzone.

Inne zagadnienia, które są planowane w przebiegu Run 3, dotyczą uruchomienia dwóch nowych eksperymentów, FASER i SND@LHC, zaprojektowanych w celu poszukiwania fizyki poza Modelem Standardowym. W tych eksperymentach będą badane specjalne zderzenia proton-hel, aby zmierzyć, jak często w tych zderzeniach powstają antyprotony, czyli odpowiedniki protonów w antymaterii oraz zderzenia z udziałem jonów tlenu, które rozszerzą wiedzę fizyków na temat fizyki promieniowania kosmicznego i plazmy kwarkowo-gluonowej, stanu materii, który istniał wkrótce po Wielkim Wybuchu.

Eksperyment ALICE dokonuje pierwszej bezpośredniej obserwacji fundamentalnego efektu w fizyce cząstek elementarnych

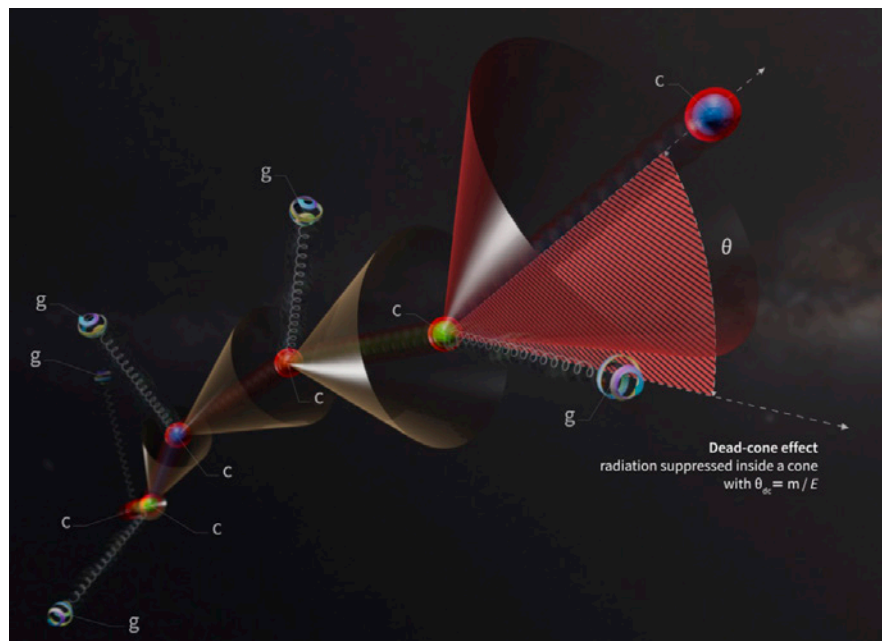
Współpraca ALICE na Wielkim Zderzaczu Hadronów (LHC) dokonała pierwszej bezpośredniej obserwacji efektu martwego stożka – fundamentalnej cechy teorii silnego oddziaływania, które wiąże kwarki i gluony razem w protony, neutrony i ostatecznie wszystkie jądra atomowe. Oprócz potwierdzenia tego efektu, obserwacje, opisane w artykule opublikowanym ostatnio w *Nature*, podają bezpośrednią eksperymentalną wartość przyczynku do masy pojedynczego kwarka powabnego, zanim zostanie on zamknięty wewnątrz hadronów.

„Obserwowanie martwego stożka było bardzo trudne” – mówi rzecznik eksperymentu ALICE Luciano Musa – „Ale dzięki wykorzystaniu danych z trzech lat ze zderzeń proton-proton w LHC oraz użyciu zaawansowanych technik analizy danych, w końcu udało nam się to odkryć”.

Kwarki i gluony, zwane łącznie partonami, powstają w zderzeniach cząstek, takich jak te, które mają miejsce

w LHC. Po powstaniu partony przechodzą kaskadę zderzeń zwaną deszczem partonów, w którym tracą energię, emitując promieniowanie w postaci gluonów, które również emitują gluony. Charakterystyka promieniowania takiego pęku zależy od masy partonu emitującego gluon i zachodzi w obszarze wokół kierunku lotu partonu, w którym emisja gluonu jest tłumiona – martwy stożek 1. Przewidywany trzydzieści lat temu na podstawie pierwszych zasad teorii oddziaływań silnych, martwy stożek zaobserwowano pośrednio w zderzacach cząstek. Jednak trudno było zaobserwować go bezpośrednio z wzorca promieniowania kaskady partonowej. Głównym tego powodem jest fakt, że martwy stożek może być wypełniony cząstkami, w które przekształca się emitujący parton oraz że trudno jest określić zmieniający się kierunek partonu w trakcie procesu kaskady.

Uczestnicy projektu ALICE przezwyciężyli te wyzwania, stosując najnowocześniejsze techniki analityczne do dużej próbki zderzeń proton-proton w LHC. Techniki te mogą cofnąć w czasie shower (prysznic) partonów od produktów końcowych – sygnałów pozostawionych w detektorze ALICE przez rozpylony strumień cząstek zwany dżetem. Szukając dżetów, które zawierały kwark powabny, naukowcy byli w stanie zidentyfikować dżet stworzony przez ten rodzaj kwarku i prześledzić całą historię emisji gluonów przez kwark. Porównanie prążków emisji gluonów kwarka powabnego z prążkami gluonów i praktycznie bezmasowych kwarków ujawniło martwy stożek jedynie w widmie kwarka powabnego. Wynik



Fot. 1. Kwark powabny (c) w pęku partonowym traci energię, emitując promieniowanie w postaci gluonów (g). Pęk ukazuje „martwy stożek” tłumionego promieniowania wokół kwarka dla kątów (θ) mniejszych niż stosunek masy kwarka (m) do energii (E). Energia maleje w każdym etapie pęku. Zmieniający się kolor kwarka ilustruje jego zmieniający się „kolor ładunku” (informacja z 18 maja 2022)

Photo 1. The charm quark (c) in the parton bundle loses energy, emitting radiation in the form of gluons (g). The tuft shows the „dead cone” of attenuated radiation around the quark for angles (θ) smaller than the ratio of the quark’s mass (m) to energy (E). The energy decreases with each stage of the bundle. The changing color of a quark illustrates its changing „charge color”

również bezpośrednio określa masę kwarka powabnego, ponieważ teoria przewiduje, że cząstki bezmasowe nie mają odpowiadających im martwych stożków.

„Masy kwarków są podstawowymi wielkościami w fizyce cząstek elementarnych, ale nie można ich uzyskać i zmierzyć bezpośrednio w eksperymentach, ponieważ z wyjątkiem kwarka górnego, kwarki są zamknięte w cząstkach kompozytowych” – wyjaśnia koordynatorka fizyki ALICE, Andrea Dainese – „Nasza skuteczna technika bezpośredniej obserwacji martwego stożka pęku partonów może stanowić metodę pomiaru mas kwarków”.

LHCb ujawnia tajemnicę powstawania antymaterii w kosmicznych zderzeniach

Na konferencjach Quark Matter i Rencontres de Moriond, współpracownicy LHCb przedstawili analizę zderzeń cząstek w Wielkim Zderzaczu Hadronów (LHC), która może pomóc w ustaleniu, czy jakkolwiek antymateria widziana w eksperymentach w kosmosie pochodzi z ciemnej materii, łączącej ze sobą galaktyki, takie jak np. Droga Mleczna.

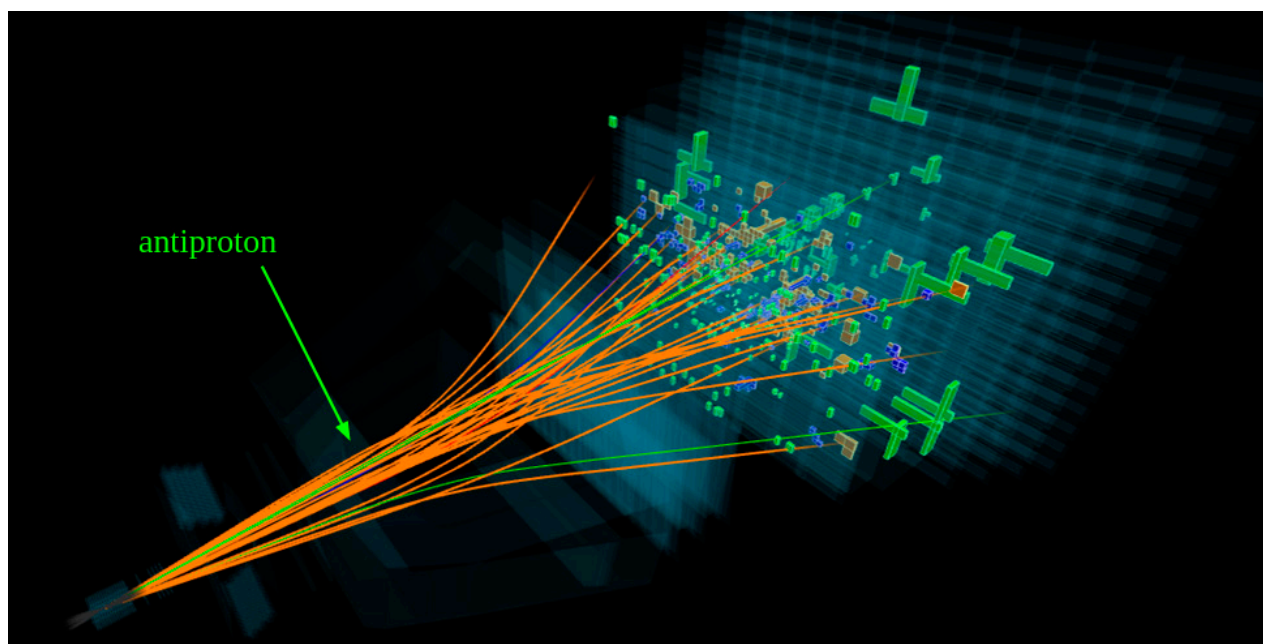
Eksperymenty kosmiczne prowadzono na spektrometrze AMS (Alpha Magnetic Spectrometer) w CERN, gdzie spektrometr został zmontowany, a od 2011 r. w kosmosie, gdzie zainstalowano go na pokładzie Kosmicznego Wahadłowca Endeavour z NASA stanowiącego Międzynarodową Stację Kosmiczną. W tych eksperymentach zaobserwowano frakcję antyprotonów (czyli odpowiedników protonów w antymaterii) w wysokoenergetycznych cząstkach zwanych promienia-

mi kosmicznymi. Antyprotony mogą powstawać, gdy cząstki ciemnej materii zderzają się ze sobą, ale mogą również powstawać w innych przypadkach, na przykład gdy protony zderzają się z jądrami atomowymi w ośrodku międzygwiazdowym, który składa się głównie z wodoru i helu.

Aby dowiedzieć się, czy którykolwiek z zarejestrowanych antyprotonów pochodzi z ciemnej materii, fizycy muszą zatem oszacować, jak często antyprotony powstają w zderzeniach protonów z wodorem, a jak często w zderzeniach protonów z helem. Wcześniej dokonano zaledwie kilku pomiarów zderzeń protonów z wodorem, a w 2017 r. LHCb zgłosił pierwszy w historii sygnał zderzeń protonów z helem, ale pomiar ten obejmował jedynie szybką produkcję antyprotonów – to znaczy antyprotonów wytwarzanych w miejscu zderzenia.

W swoim nowym badaniu zespół LHCb szukał również antyprotonów wytwarzanych w pewnej odległości od punktu zderzenia, poprzez transformację lub „rozpad” cząstek zwanych antyhiperonami w antyprotony. Aby dokonać tego nowego pomiaru i poprzedniego, badacze LHCb, którzy zwykle wykorzystują do swoich badań dane z kolizji proton-proton, wykorzystali zamiast tego dane z kolizji proton-hel, uzyskane przez wstrzyknięcie gazowego helu do punktu, w którym dwie wiązki protonów z LHC normalnie się zderzają.

Analizując próbkę około 34 milionów zderzeń proton-hel i mierząc stosunek szybkości produkcji antyprotonów z rozpadów antyhiperonów do szybkości wytwarzania antyprotonów, naukowcy z LHCb odkryli, że w skali energii zderzenia antyprotony wytwarzane



Fot. 2. Przypadek zderzenia proton-proton zarejestrowany przez detektor LHCb, pokazujący tor, po którym porusza się antyproton powstały podczas zderzenia. (Zdjęcie: LHCb/CERN) (informacja z 7 kwietnia 2022)

Photo 2. A proton-proton collision case recorded by an LHCb detector showing the path followed by the antiproton created by the collision. (Photo: LHCb / CERN)



Fot. 3. Masaki Hori, ASACUSA co-spokesperson

Photo 3. Masaki Hori, ASACUSA co-spokesperson (informacja z 16 marca 2022)

przez rozpady antyhiperonów przyczyniają się znacznie bardziej do całkowitego tempa produkcji antyprotonów niż ilość przewidywana przez większość modeli produkcji antyprotonów w zderzeniach proton-jądro.

„Ten wynik uzupełnia nasze poprzednie pomiary szybkiej produkcji antyprotonów i poprawi prognozy modeli” – mówi rzecznik LHCb, Chris Parkes – „To ulepszenie może z kolei pomóc eksperymentom kosmicznym znaleźć dowody na istnienie ciemnej materii”.

„Nasza technika wstrzykiwania gazu do punktu zderzenia LHCb została pierwotnie stworzona do pomiaru wielkości wiązek protonów” – mówi koordynator fizyki LHCb, Niels Tuning – „Naprawdę miło znów zobaczyć, że wzbogaca to również naszą wiedzę o tym, jak często antymateria powinna powstawać w kosmicznych zderzeniach protonów z jądrami atomowymi”.

ASACUSA dostrzega zaskakujące zachowanie hybrydowej materii – atomów antymaterii w nadciełym helu

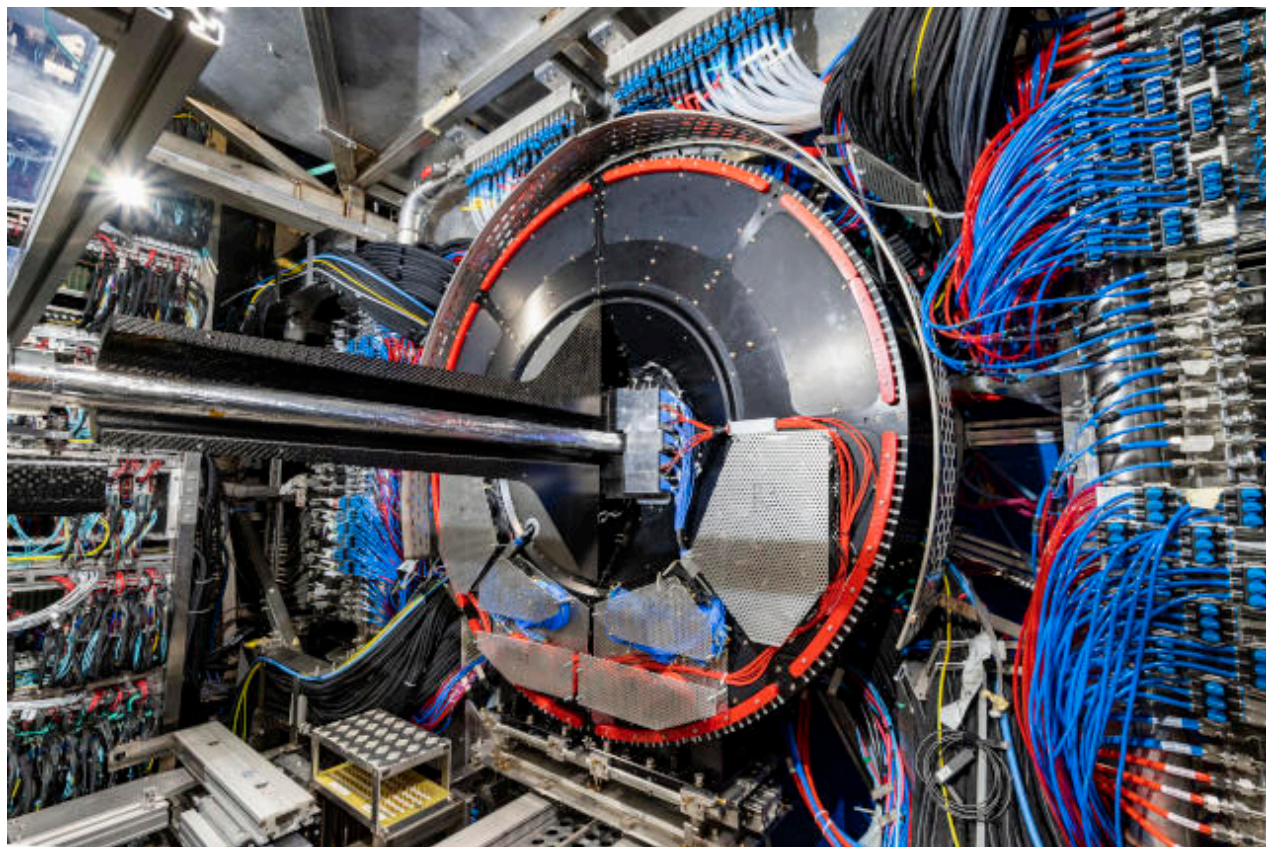
Zespół współpracy ASACUSA w CERN badał hybrydę materii z antymaterią helu. Zaobserwowano nieoczekiwaną reakcję mieszaniny na światło laserowe. Wynik, opisany w artykule opublikowanym w czasopi-

śmie Nature, otwiera szerokie perspektywy dla kilku kierunków badań.

„Nasze badanie sugeruje, że hybrydowe atomy helu materia-antymateria mogą być wykorzystywane poza fizyką cząstek elementarnych, w szczególności w fizyce materii skondensowanej, a być może nawet w eksperymentach astrofizycznych” – mówi rzecznik współpracy ASACUSA Masaki Hori – „Prawdopodobnie zrobiliśmy pierwszy krok w wykorzystaniu antyprotonów do badania materii skondensowanej”.

Współpraca ASACUSA tworzy i bada helową hybrydę atomów materia-antymateria w celu określenia masy antyprotonu i porównania jej z masą protonu. Na orbicie atomów hybrydowych wokół jądra helu zamiast dwóch elektronów krąży antyproton i elektron. Takie hybrydy są wytwarzane przez zmieszanie antyprotonów, produkowanych w fabryce antymaterii CERN, z gazowym helu o niskiej gęstości atomowej, utrzymanym w niskiej temperaturze.

Zarówno niskie gęstości gazu jak i niskie temperatury odgrywają kluczową rolę w badaniach antymaterii, polegających na pomiarze reakcji atomów hybrydowych na światło laserowe w celu określenia ich widma światła. Przy wysokich gęstościach gazu i wysokich temperaturach linie widmowe powstające wskutek



Fot. 4. Detektor Alice: instalacja FIT (wyzwalacza/trigera szybkiej interakcji)
Phot. 4. Detector Alice: FIT (Fast Interaction Trigger) installation

przejść antyprotonu lub elektronu między poziomami energii, są zbyt szerokie lub rozmyte, co utrudnia a nawet uniemożliwia określenie masy antyprotonu w stosunku do masy elektronu.

Dlatego badacze ASACUSA byli zaskoczeni, gdy okazało się, że użycie ciekłego helu, który ma znacznie większą gęstość niż hel gazowy, spowodowało zmniejszenie szerokości linii spektralnych antyprotonów. Co więcej, gdy obniżyli temperaturę ciekłego helu do wartości poniżej temperatury, w której ciecz staje się nadciekłą, czyli płynie bez oporów, stwierdzili gwałtowne dalsze zwężenie linii widmowych.

„To zachowanie było nieoczekiwane” – mówi Anna Sótér, która była główną doktorantką pracującą nad eksperymentem, a obecnie jest adiunktem w ETHZ – „Odpowiedź optyczna hybrydowego atomu helu w nadciekłym helu jest wyraźnie różna od odpowiedzi tego samego hybrydowego atomu w gazowym helu o dużej gęstości, a także wielu normalnych atomów w substancjach ciekłych lub nadciekłych”.

Naukowcy uważają, że obserwowane zaskakujące zachowanie jest związane z promieniem orbitalu elektronowego, czyli odległością pomiędzy jądrem atomu a elektronami. W przeciwieństwie do wielu normalnych atomów, promień orbity elektronowej atomu hybrydowego zmienia się bardzo nieznacznie, gdy światło lase-

ra pada na atom, a zatem nie wpływa na linie widmowe, nawet gdy atom jest zanurzony w nadciekłym helu. Jednak potrzebne są dalsze badania, aby potwierdzić tę hipotezę.

Wynik ma kilka konsekwencji. Po pierwsze, sugeruje możliwość stworzenia innych hybrydowych atomów helu, na przykład z pionami zamiast jednego elektronu na orbicie, zanurzonych w nadciekłym helu a następnie badania ich reakcji na światło laserowe w celu zmierzenia masy cząstek. Po drugie, znaczne zwężenie linii w nadciekłym helu sugeruje, że hybrydowe atomy helu można wykorzystać do badania tej formy materii i potencjalnie innych faz materii skondensowanej. Wreszcie, wąskie linie widmowe mogłyby w zasadzie zostać wykorzystane do poszukiwania kosmicznych antyprotonów lub antydeuteronów (jądra zbudowanego z antyprotonu i antyneutronu) o szczególnie małej prędkości, które uderzają w ciekły lub nadciekły hel, używany do chłodzenia eksperymentów w kosmosie lub w balony latające na dużych wysokościach. Zanim metoda stanie się komplementarna do istniejących technik poszukiwania tych form antymaterii jeszcze trzeba pokonać wiele wyzwań technicznych.

dr Małgorzata Nowina Konopka,
 Kraków

SYTUACJA ENERGETYKI JĄDROWEJ A WOJNA NA UKRAINIE

The situation of nuclear energy and the war in Ukraine

Andrzej Mikulski

Streszczenie: Inwazja Rosji na Ukrainę w dniu 24 lutego 2022 r. wiele zmieniła na świecie, w tym postrzeganie energetyki jądrowej w wielu państwach. W artykule omówiono szczegółowo sytuację energetyki jądrowej na Ukrainie po trzech miesiącach od tej daty oraz w krajach budujących (Bangladesz, Chiny i Turcja) lub przygotowujących się do budowy rosyjskich reaktorów (Egipt, Finlandia i Węgry), a także w krajach decydujących o przyszłości energetyki jądrowej u siebie (Belgia i Niemcy) oraz w UE. Na zakończenie przedstawione zostaną działania podjęte w Polsce.

Abstract: Russia's invasion of Ukraine on February 24, 2022 changed a lot in the world, including the perception of nuclear energy in many countries. The article discusses in detail the situation of nuclear energy in Ukraine three months after that date and in the countries that are building (Bangladesh, China and Turkey) or preparing to build Russian reactors (Egypt, Finland and Hungary), as well as in countries that decide about the future of nuclear energy at home (Belgium and Germany) and in the EU. Finally, the activities undertaken in Poland will be presented.

Słowa kluczowe: energetyka jądrowa, elektrownia jądrowa Ukraina, wojna 2022

Keywords: nuclear energy, nuclear power plant (NPP), Ukraine, war 2022

Wprowadzenie

Inwazja Rosji na Ukrainę w dniu 24 lutego 2022 r. wiele zmieniła na świecie, a w tym w sytuacji energetyki jądrowej. Po trzech miesiącach od tej daty warto zebrać autorski wybór dostępnych materiałów, które zostały opublikowane przez Międzynarodową Agencję Energii Atomowej (MAEA), na portalach internetowych (biznesalert.pl, cire.pl, nucnet.org, wnp.pl i world-nuclear-news.org) i w mediach drukowanych oraz zestawić je w jednym miejscu. Chodzi o to, aby:

- po pierwsze opisać, co działo się z elektrowniami jądrowymi na Ukrainie i jak świat zareagował na inwazję, a w tym wkroczenie wojska rosyjskiego na teren strefy zamkniętej wokół elektrowni jądrowej w Czarnobylu i przejście pod kontrolę elektrowni jądrowej Zaporozie,
- po drugie pokazać zmianę stosunku do energetyki jądrowej w Belgii, pozostanie Niemiec przy decyzji wyłączenia z końcem bieżącego roku ostatnich trzech reaktorów oraz rezygnację Finlandii z budowy zamówionego w Rosji kolejnego szóstego reaktora,
- po trzecie potwierdzić, że trwa niczym nie zakłócona budowa rosyjskich reaktorów w Bangladeszu, Chinach, Rosji i Turcji, a w Egipcie i na Węgrzech trwa ją przygotowania do rozpoczęcia budowy nowych elektrowni jądrowych.

Natomiast w Polsce uczyniono krok w kierunku budowy elektrowni jądrowej składając raport środowiskowy oraz rozpoczynając dialog z mieszkańcami okolic,

gdzie ma być zlokalizowana pierwsza elektrownia jądrowa.

Ukraina

Od jesieni 2021 r. pojawiały się w mediach różne spekulacje mówiące o możliwości wybuchu wojny na Ukrainie, ale nikt specjalnie nie wierzył im aż do poranka 24 lutego 2022 r. Tego dnia Ukraina została zaatakowana przez wojska rosyjskie od północy i od wschodu.

Od północnej granicy Ukrainy rosyjskie oddziały wojskowe weszły do strefy zamkniętej wokół wyłącznej elektrowni jądrowej w Czarnobylu i sterroryzowały personel tam pracujący. Odłączono system monitorujący poziom promieniowania i wykopano okopy wokół elektrowni. Wstrzymanie monitoringu wywołało ogromne zaniepokojenia Międzynarodowej Agencji Energii Atomowej (MAEA). Dyrektor generalny MAEA, Rafael Grossi interweniował w tej sprawie w Moskwie. W międzyczasie w mediach donoszono o ostrzale artyleryjskim i siedmiu pożarach, które wybuchły nieopodal elektrowni jądrowej. Prawdopodobnie w wyniku podpalenia lub ostrzału artyleryjskiego mogłoby pojawić się zagrożenie radiacyjne, ale Państwowa Agencja Atomistyki wielokrotnie stwierdzała w tym okresie, że nie ma zagrożenia i sytuacja radiacyjna w Polsce pozostaje w normie. Dokładnie, co stało się na terenie elektrowni można było zobaczyć dopiero, gdy wojska rosyjskie wycofały się z tego terenu po pięciu tygodniach (31 marca). Naszym oczom ukazał się wówczas obraz

zniszczeń całego systemu monitoringu. Do Rosji wywieziono zgromadzoną tam aparaturę oraz dokumentację techniczną. Są doniesienia, że żołnierze przebywający w okopach zostali skażeni i mogą cierpieć na chorobę popromienną. Wizyta techniczna dyrektora generalnego MAEA Rafaela Grossi w elektrowni (26 kwietnia) zbiegła się z 36-tą rocznicą katastrofy w EJ Czarnobyl i złożeniem hołdu ofiarom, ale przede wszystkim dotyczyła oceny sytuacji po wycofaniu się wojsk rosyjskich i potrzeby uzupełnienia sprzętu dozymetrycznego, urządzeń monitorujących poziom promieniowania oraz od-

tworzenia połączeń przekazujących zdalne informacje o stanie środowiska do MAEA w Wiedniu.

Od wschodniej granicy Ukrainy rosyjskie oddziały wojskowe posuwały się w kierunku miasta Enerгодар, gdzie zlokalizowana jest elektrownia jądrowa Zaporozże. Na drogach dojazdowych do elektrowni oddziały napotkały blokadę zbudowaną przez jej pracowników (2 marca) i pierwotny plan szybkiego zajęcia elektrowni nie udał się. Dwa dni później (4 marca) wojska atakujące ostrzelały rakietami elektrownię jądrową w Zaporozżu niszcząc budynek administracyjny. Następnie sterroryzowano personel operacyjny i zmuszono go do pracy



Fot. 1. Ogólny widok EJ Zaporozże, największej elektrowni jądrowej w Europie (fot. Zaporizhzhya Nuclear Power Plant, Ukraine - power-technology.com)
Photo.1. General view of NPP Zaporozhye, the largest nuclear power plant in Europe (photo: Zaporizhzhya Nuclear Power Plant, Ukraine - power-technology.com)



Fot. 2. Widok zniszczonego budynku administracyjnego na terenie EJ Zaporozże. (Pobrane z raportu IAEA o Ukrainie)
Photo. 2. View of the destroyed administrative building on the premises of the Zaporozhye NPP. (Taken from the IAEA Ukraine report)

przejmując całość produkcji energii elektrycznej na potrzeby zajętych terenów. Według doniesień prasowych ośmiu przedstawicieli Rosenergoatomu domagało się od kierownictwa elektrowni codziennych raportów na temat funkcjonowania elektrowni jądrowej i taka sytuacja pozostaje tam do dziś. Dyrektor generalny MAEA Grossi (10 maja) podejmuje wysiłki, by udać się z techniczną misją do EJ Zaporozie, która jest pod rosyjskim nadzorem wojskowym. Obie strony konfliktu żądają, by wizyta odbyła się pod flagą jednej ze stron konfliktu, co jest nie do przyjęcia przez MAEA.

Ostatnio (22 maja) władze ukraińskie zapowiedziały po zakończeniu wojny kontynuowanie zamierzeń budowy amerykańskich reaktorów AP1000 na terenie EJ Chmielnicka oraz w nowej lokalizacji w obwodzie Czerkaskim w centralnej Ukrainie, gdzie już w 1987 r. planowano budowę nowej elektrowni jądrowej.

Niemcy

Bezpośrednio po inwazji Ukrainy (27 lutego) pojawiły się w prasie niemieckiej sugestie by odłożyć w czasie planowane na dzień 31 grudnia br. wyłączenie ostatnich trzech reaktorów w tym kraju, a nawet uruchomić na nowo trzy reaktory wyłączone 31 grudnia 2021 r. Minister gospodarki i ochrony klimatu Robert Habeck początkowo stwierdził, że mógłby sobie wyobrazić, że elektrownie jądrowe będą działały dłużej, niż przewidują to obecne plany i nie jest ideologicznie przeciwny takim planom. Ale po kilku dniach (7 marca) zaprezentował raport rządowy stwierdzający, że przedłużenie pracy obecnie trzech eksploatowanych reaktorów w elektrowniach: Isar blok nr 2, Emsland i Neckarwestheim blok nr 2 jest niemożliwe. W raporcie powoływano się przy tym na następujące argumenty jak: trwający proces przygotowywania wyłączenia reaktorów, który spowodował wstrzymanie wszelkich modernizacji i remontów, wystąpienie braków paliwa jądrowego na dalszą eksploatację i przewidywane braki kadrowe. Argumenty te zostały zdecydowanie skrytykowane w opublikowanej (8 marca) ekspertyzie Niemieckiego Stowarzyszenia Jądrowego (Kerntechnik Deutschland e.V.), ale nie zmieniło to stanowiska rządu federalnego i pozostaje nadal aktualny termin wyłączenia ostatnich reaktorów.

Belgia

Zupełnie inaczej przedstawia się sytuacja w Belgii, gdzie parlament, a następnie rząd (19 marca) podjął decyzję o przesunięciu terminu wyłączenia dwóch reaktorów z 2025 na 2035 rok, czyli o kolejne 10 lat. W tym przypadku chodzi o blok nr 3 o mocy 1038 MWe w EJ Tihange i blok nr 4 o mocy 1039 MWe w EJ Doel, które najpóźniej oddano do eksploatacji, czyli w 1985 r.

Finlandia

Fińska firma odpowiedzialna za budowę w nowej lokalizacji szóstego reaktora w tym kraju, elektrowni ją-

drowej Hanhikivi z rosyjskim reaktorem WWER-1200 postanowiła zerwać kontrakt ze względu na znaczne opóźnienia, jak oficjalnie podano, ale wiadomo, że ostateczną przyczyną była inwazja Rosji na Ukrainę. Zerwanie kontraktu narazi firmę na proces sądowy i przypuszczalnie na zapłacenie odszkodowania.

Z drugiej strony trwa procedura uruchomienia bloku nr 3 typu EPR w EJ Olkiluoto, który rozpoczął regularne dostawy energii elektrycznej do sieci (14 marca). Niestety wystąpiły dodatkowe trudności i termin uruchomienia bloku na pełnej mocy został przesunięty o 2 miesiące do września br.

Czechy

Koncern energetyczny ČEZ zrezygnował z zakupu paliwa z Rosji do bloków WWER-1000 w EJ Temelín. Przyszły rok będzie, zatem ostatnim, w którym Czesi wykorzystają jeszcze paliwo dostarczone przez Rosatom. Natomiast bloki WWER-440 w EJ Dukovany nadal będą korzystały z rosyjskiego paliwa.

Egipt

Ogłoszono (19 kwietnia), że Rosjanie przystępują do budowy elektrowni jądrowej El Dabaa w Egipcie. Elektrownia będzie składać się z czterech bloków WWER-1200 o łącznej mocy 4,800 MWe z planowanym uruchomieniem pierwszego bloku w 2028 r.

Korea Południowa

Prezydent-elekt Korei Południowej zapowiedział (6 kwietnia) przedłużenie życia dziesięciu reaktorów tamtejszych elektrowni jądrowych w celu zwiększenia bezpieczeństwa energetycznego kraju w obliczu inwazji Rosji na Ukrainę.

Turcja

Budowa elektrowni Akkuyu z blokami WWER-1200 postępuje zgodnie z harmonogramem i na przykład w tym okresie (17 marca) dostarczono części turbiny i generatora do bloku nr 1, którego uruchomienie przewidziane jest do końca przyszłego roku.

Wielka Brytania

Oczekuje się, że w nowej strategii energetycznej (14 marca) rząd uwzględniając obecną sytuację z surowcami energetycznymi zobowiąże się do wsparcia budowy, co najmniej dwóch nowych dużych elektrowni do 2030 r., a także małych reaktorów modułowych o mocy 470 MWe firmy Rolls-Royce.

Węgry

Rosatom zapewnił Węgry (6 maja), że Rosja w zakresie technologii jest zdolna prowadzić budowę EJ Paks II, a minister spraw zagranicznych Węgier Péter Szijjártó stwierdził, że budowa przechodzi do następnej fazy. Dodał, że projekt spowoduje, że dostawy energii staną się

„bardziej bezpieczne i przewidywalne” w czasach, gdy światowy rynek energii staje w obliczu „prerażających zmian”.

Unia Europejska

Komisja Europejska wezwana została rezolucją Parlamentu Europejskiego (7 kwietnia) do „natychmiastowego wprowadzenia pełnego embarga na rosyjski import ropy, węgla, paliwa jądrowego i gazu”. Niestety Komisja uznała, że natychmiastowe ograniczenie importu paliwa jądrowego do rosyjskich reaktorów typu WWR jest niewykonalne i zezwoliła na transport lotniczy już zakupionego paliwa. Do tej pory wiadomo o dwóch transportach lotniczych nad Polską paliwa do reaktorów WWR-440 na Słowację (1 marca) i na Węgry (7 kwietnia). Jednocześnie Komisja będzie wspomagać zakup paliwa do reaktorów WWR-1000 od innego niż Rosja dostawcy. Pomoc ta ma dotyczyć takich państw jak: Bułgaria, Czechy, Finlandia, Słowacja i Węgry.

Innym zagadnieniem rozpatrywanym ostatnio przez organy unijne (luty 2022) jest uzupełniający akt delegowania do rozporządzenia w sprawie taksonomii gazu ziemnego i energii jądrowej jako zrównoważonego sposobu wytwarzania energii elektrycznej, na który będzie można pozyskiwać środki na rynkach finansowych i od UE. Sytuację może jednak zmienić trwająca wojna na Ukrainie. Ostatnio (19 maj) rząd niemiecki zapowiedział, że będzie głosował przeciw takim uzgodnieniom. Ma w tym względzie sojuszników w takich państwach jak: Austria, Hiszpania i Luksemburg, ale głosowanie to nie wymaga jednomyślności. Panuje przekonanie, że na Radzie Europejskiej 23 państwa poprą włączenie energetyki jądrowej do taksonomii. Dalszym etapem prac jest zatwierdzenie tej delegacji przez Parlament Europejski w głosowaniu przewidywanym w lipcu br., ale w tym względzie według ostatnich wiadomości wcale nie ma pewności, że tak się stanie.

Polska

W omawianym okresie pod wpływem sytuacji na Ukrainie i szybkiego ograniczenia importu rosyjskich surowców energetycznych przystąpiono do aktualizacji polityki energetycznej kraju PEP2040 (22 marca) w kierunku budowy zeroemisyjnego systemu energetycznego.

Ponadto przesłano (30 marca) do Generalnej Dyrekcji Ochrony Środowiska (GDOŚ) raport oddziaływania na środowisko pierwszej elektrowni jądrowej. W raporcie analizom poddano dwa warianty lokalizacyjne elektrowni, tj. pierwszy - lokalizacja Lubiatowo-Kopalino w gminie Choczewo oraz drugi - lokalizacja Żarnowiec na terenie gmin Krokowa i Gniewino. Poza tym rozpoczęto serię spotkań z władzami samorządowymi i mieszkańcami tego regionu.

Należy też odnotować przystąpienie do realizacji projektu naukowego dotyczącego zbadania możliwości

zastąpienia starych bloków węglowych o mocy 200 MW reaktorami jądrowymi III/III+ i IV generacji. Projekt realizowany jest przez konsorcjum kierowane przez Politechnikę Śląską w Gliwicach.

Podsumowanie

Inwazja rosyjska na Ukrainę wprowadziła pewne zmiany i korekty w programie jądrowym wielu krajów, co zostało tu opisane. Ale przede wszystkim spowodowała zajęcie się na nowo transformacją energetyczną we wszystkich państwach, zarówno europejskich jak i światowych. Przewidywane zmiany mają dotyczyć terminu odejścia od korzystania z paliw kopalnych, tj. węgla i gazu ziemnego jako paliwa dla energetyki oraz ograniczenia stosowania gazu jako paliwa przejściowego w drodze do gospodarki zeroemisyjnej. Występują tu dwie tendencje. Jedni dążą do skrócenia tego terminu, a drudzy przeciwnie do jego wydłużenia. Kluczowym zagadnieniem jest określenie sposobu zastępowania tych paliw w produkcji energii elektrycznej. W jednych państwach lukę tą mogą wypełnić źródła odnawialne jak wiatraki i fotowoltaika wspomagane przez magazyny energii. W innych pozostając przy źródłach odnawialnych, które nie zawsze są dostępne planuje się uwzględnić energetykę jądrową. Jeszcze jest za wcześnie by stwierdzić wyższość któregoś rozwiązania pod względem ekonomicznym i na pewno przyjdzie nam jeszcze na to poczekać kilka lat obserwując jak realizowana jest gospodarka niskoemisyjna w poszczególnych krajach.

Inwazja wpłynęła też pośrednio na podejście do małych reaktorów modułowych. Obserwujemy dynamiczne zainteresowanie się nimi w Polsce, ale tylko w sprawdzonej technologii lekkowodnej jak: BWRX-300 firmy General Electric Hitachi i VOYGR firmy NuScale Power. Działania na tym polu podjęły krajowe firmy prywatne Synthos Green Energy (SGE) i Zespół Elektrowni PAK oraz spółki skarbu państwa (PKN Orlen i KGHM) obiecując uruchomienie pierwszych reaktorów już w 2028 r. Równolegle prowadzona jest praca nad dużo bardziej obiecującą technologią wysokotemperaturowego reaktora chłodzonego gazem w dwóch zastosowaniach. Pierwsze do bezpośredniej produkcji ciepła technologicznego w zakładach chemicznych, nad którą prowadzone są prace w Narodowym Centrum Badań Jądrowych. Drugie zastosowanie to w miejskich systemach ciepłowniczych, jako modułowy mikro-reaktor (MMR) eksploatowany bez wymiany paliwa przez 20 lat, którym zajmuje się wspólnie SGE i PKN Orlen. Niestety perspektywa szerszego przemysłowego zastosowania tego reaktora to druga połowa czwartego dziesięciolecia, czyli lata 2035-2040.

Oddano do druku 24 maja 2022 r.

dr inż. Andrzej Mikulski,
Polskie Towarzystwo Nukleoniczne,
Warszawa

CZY NISKIE DAWKI PROMIENIOWANIA JONIZUJĄCEGO SĄ SZKODLIWE?

Can low level ionizing radiation do us harm?

Marek Krzysztof Janiak

Streszczenie: Wiele już opublikowanych i nowo pojawiające się wyniki badań wyraźnie wskazują na korzystne, prozdrowotne działanie niskich dawek promieniowania jonizującego (p.j.). Dane te przeczą dominującej opinii, że każda ekspozycja na p.j., nawet w najmniejszej dawce, może wywołać nowotwór i powinna być unikana. Co gorsza, opinia ta, w postaci tzw. hipotezy LNT (linear, no threshold), stanowi podstawę regulacji obowiązujących w ochronie radiologicznej. W niniejszym artykule, po krótkim przedstawieniu genezy modelu LNT, przedstawiono przekonujące wyniki analiz epidemiologicznych i badań doświadczalnych oraz leczenia nowotworów u ludzi, które wyraźnie świadczą o braku podstaw naukowych dla tego modelu. Podano także przykłady brzemiennych w skutki konsekwencji stosowania hipotezy LNT w praktyce. Konkluzją jest postulat, aby porzucić fałszywą i szkodliwą „ideologię” LNT, która „więzi nas w czasie przeszłym”, utrwala radiofobię i stanowi przeszkodę w powszechnym stosowaniu nieszkodliwych, a często korzystnych dla zdrowia ekspozycji w niskich dawkach p.j.

Abstract: The linear no-threshold (LNT) hypothesis of cancer risk assessment resulting from exposure to ionizing radiation (IR) constitutes the basis of our radiological protection philosophy and regulations. This hypothesis assumes that each absorbed dose of IR, no matter how small, is potentially carcinogenic and that the effects of low doses (not exceeding 100 mGy and 0.1 mGy/min for acute and chronic exposures, respectively) can be extrapolated from those of high doses of IR. However, evidence accumulated over many years clearly indicates that absorption of low radiation doses does not cause harm and often promotes health. In this review I provide examples of the results of both epidemiological analyses and controlled experimental studies which indicate that there is a qualitative difference between the effects of low vs. high doses of IR and that the LNT tenet lacks scientific justification. I also outline the genesis and reasons for its persistence as well as numerous negative consequences of using the latter and conclude it's high time to replace the LNT dogma with a scientifically-based relationship such as a hormetic or a threshold dose-response model.

Słowa kluczowe: promieniowanie jonizujące, hipoteza zależności liniowej, bezprogowej (LNT), hormeza radiacyjna

Keywords: ionizing radiation, linear no-threshold hypothesis (LNT), radiation hormesis

Wprowadzenie

W dzisiejszym świecie ludzie są ekspozowani na działanie promieniowania jonizującego (p.j.) z różnych źródeł i w różnych sytuacjach (celowo piszę „ekspozowani”, a nie „narażeni”, bo ten drugi termin implikuje działanie szkodliwe, które – jak pokażę – nie występuje

przy ekspozycjach na niskie dawki p.j.). Wybrane sytuacje, w których ludzie poddawani są działaniu p.j. oraz towarzyszące temu dawki pochłonięte przedstawione są w Tabeli 1.

Jak widać, we wszystkich przypadkach pochłaniane dawki wyrażane są w µGy i mGy, a więc w milionowych

Tabela 1. Dawki energii pochłaniane przez ludzi w czasie różnych typowych ekspozycji na promieniowanie jonizujące
Table 1. Doses of IR absorbed on various occasions in everyday life

Aktywność	Dawka [mGy]
Zjedzenie jednego banana	0,0001
Przejście przez bramkę na lotnisku	0,0001
Przebywanie w okolicy elektrowni jądrowej przez rok	0,0001 -0,003
Przelot z Nowego Jorku do Los Angeles	0,02-0,04
Zdjęcie rtg klatki piersiowej	0,05-0,1
Pochłanianie promieniowania naturalnego w ciągu roku (średnio na świecie)	2,5-3,5
Palenie 1,5 paczki papierosów codziennie przez rok	13
Badanie CT głowy	20
Dopuszczalna dawka roczna dla pracownika przemysłu jądrowego	20
Maksymalna dawka roczna mieszkańca miasta Guarapari (Brazylia)	do 175
Maksymalna dawka roczna mieszkańca miasta Ramzar (Iran)	do 260
Przebywanie przez rok w strefie skażonej po katastrofie w Czarnobylu	ok. 5

i tysięcznych częściach greja¹. Takie ilości pochłanianej energii, których górny próg wynosi 100 mGy (przy ekspozycji krótkotrwałej) i 100 μ Gy/min (tzw. moc dawki odnosząca się do ekspozycji przewlekłej) definiuje się w radiobiologii, jako dawki niskie lub małe (ang. *low doses*). Także w większości innych przypadków zarówno zawodowej, jak i środowiskowej ekspozycji na p.j., takich jak mieszkanie w rejonach o wysokim naturalnym „tł” promieniowania, przy stosowaniu źródeł promieniowania do celów diagnostycznych, w pracy z takimi źródłami w przemyśle i w laboratoriach badawczych, a nawet w rejonach skażonych po awariach radiacyjnych i wybuchu „brudnej bomby” (klasycznego materiału wybuchowego zmieszanego z substancjami radioaktywnymi) ludzie pochłoną dawki nie przekraczające ww. progów dawek niskich. Proszę zwrócić uwagę na fakt, że mieszkańcy okolic skażonych po katastrofie w Czarnobylu zostali przymusowo ewakuowani ze względu na możliwość pochłonięcia w ciągu roku około 5 mGy p.j., podczas gdy w niektórych zaludnionych okolicach Ziemi, roczna dawka promieniowania naturalnego dochodzi do 175, a nawet 260 mGy.

Hipoteza liniowej, bezprogowej zależności (LNT) między dawką a skutkiem

Według powszechnego przekonania, każda ekspozycja na p.j. stanowi poważne, nawet śmiertelne, zagrożenie dla człowieka. Opinia ta, podzielana – niestety – także przez wielu lekarzy i innych specjalistów mających do czynienia z promieniowaniem, wynika przede wszystkim z braku lub niewłaściwej wiedzy o rzeczywistych skutkach działania szczególnie niskich dawek p.j. Można powiedzieć, że ten stan świadomości, nazywany „radiofobią”, powstał i podtrzymywany jest od wielu lat przez uznawaną za obowiązującą w ochronie radiologicznej hipotezę o liniowej, bezprogowej (ang. *linear, no-threshold, LNT*) zależności między dawką promieniowania a wywołanym przez nie skutkiem. Geneza tej hipotezy sięga roku 1946, kiedy to genetyk amerykański Hermann Joseph Muller (1890-1967) otrzymał nagrodę Nobla w dziedzinie fizjologii lub medycyny za „odkrycie, że mutacje mogą być indukowane przez promienie X”. Nagroda była uhonorowaniem badań z lat 1920-tych, w których wykazano, że u muszek owocowych *Drosophila melanogaster* poddawanych działaniu promieniowania X w dawkach śmiertelnych dla człowieka powstają dziedziczne zmiany cech zewnętrznych, takich jak kolor

oczu i ciała czy stopień rozwoju i barwa skrzydeł. Muller traktował te zmiany jako wynik popromiennych mutacji [Muller 1927], nie wykazał jednak ich istnienia (obecnie wiemy, że bardzo wysokie dawki promieniowania stosowane przez tego badacza prowadziły do powstania rozległych ubytków w chromosomach, a nie mutacji). W swoim noblowskim wykładzie, wygłoszonym w grudniu 1946 r., Muller – ignorując odmienne wyniki uzyskiwane przez swoich współpracowników – stwierdził, że nie istnieje próg dawki dla mutacji popromiennych, czyli że ich liczba rośnie wraz dawką liniowo od zera. Nadmiernie ambitny H. J. Muller koniecznie chciał jako pierwszy wykazać, że p.j. indukuje mutacje, co by wiązało proces ewolucji organizmów z działaniem promieniowania naturalnego (jednakże – aby wykryć te „mutacje” – musiał stosować dawki o kilka rzędów większe od poziomu naturalnego promieniowania tła). Nagroda i wykład noblowski Mullera nastąpiły tuż po wybuchach bomb atomowych w Hiroszimie i Nagasaki, które przerażały wizją nieuchronnych deformacji u dzieci, rozwoju nowotworów i innych chorób popromiennych. W tym czasie rozpoczął się także „wyścig zbrojeń”, czemu towarzyszyły kolejne próby atomowe i globalne skażenie atmosfery opadem promieniotwórczym. W efekcie, powołany przez Narodową Akademię Nauk USA (*the National Academy of Sciences, NAS*) Panel Genetyczny BEAR – (*Biological Effects of Atomic Radiation*) w roku 1956 zarekomendował zastąpienie – przy szacowaniu ryzyka nowotworów popromiennych – dotychczas obowiązującego modelu progowego działania p.j. przez hipotezę LNT. W następnych latach kilka innych gremiów naukowych i regulacyjnych w USA – ignorując, z przyczyn politycznych, koniunkturalnych i innych, publikowane w tym czasie wyniki wielu badań i analiz zaprzeczających poprawności tezy Mullera (w tym, obszerny Raport Wspólny francuskiej Narodowej Akademii Medycyny oraz Akademii Nauk stwierdzający, że „ponieważ koncepcja LNT nie jest oparta na współczesnej wiedzy o mechanizmach biologicznych nie powinna być ona nierozważnie stosowana do szacowania, poprzez esktrapolację, ryzyka związanego z działaniem niskich, a zwłaszcza bardzo niskich dawek i nie powinna być narzędziem w procesach regulacyjnych.” [Tubiana et al. 2005]) – zaleciły uznanie tezy Mullera, już w postaci modelu LNT, za podstawę przepisów ochrony przed promieniowaniem [Calabrese 2015; Golden, Bus i Calabrese 2019; Calabrese 2021]. Czy słusznie? Poniżej przedstawione wyniki, z konieczności tylko niektórych, badań epidemiologicznych i doświadczalnych, pokażą jednak, że hipoteza LNT nie ma podstaw naukowych i nie powinna być podstawą regulacji w ochronie radiologicznej.

Wyniki analiz epidemiologicznych

W badaniach epidemiologicznych, pierwszorzędne znaczenie mają wyniki analiz zachorowań i zgonów

¹ w przypadku p.j. jednostką dawki pochłoniętej jest grej (Gy), który odpowiada energii 1 dżula (J) przekazanej ośrodkowi o masie 1 kg, a więc 1 Gy = 1 J/kg. W radiobiologii stosuje się też tzw. dawki równoważne (ang. *equivalent dose*) i dawki skuteczne (*effective dose*), które uwzględniają różnice w działaniu różnych rodzajów promieniowania (dawka równoważna) oraz wrażliwość poszczególnych tkanek organizmu człowieka na promieniowanie (dawka skuteczna). W obu przypadkach jednostką jest siwert (Sv), przy czym dla promieniowania X i gamma 1 Sv = 1 Gy.

wśród osób, które przeżyły ataki jądrowe na Hiroshimę i Nagasaki. Osoby te, poczynawszy od roku 1950, są obserwowane do końca swego życia, więc analiza ta nosi angielską nazwę *Life Span Study* (LSS), a wszyscy objęci nią ludzie to tzw. kohorta LSS. W sumie jest to ponad 120 tys. kobiet i mężczyzn ze wszystkich przedziałów wiekowych, podzielonych na grupy, które w momencie wybuchów znajdowały się w promieniu 2,5 km od epicentrum wybuchów oraz te, które przebywały między 2,5 a 10 km od epicentrum; u ponad 86 600 z tych osób udało się dość dokładnie określić wielkość pochłoniętego promieniowania, która w większości przypadków tej drugiej grupy nie przekraczała progu dawek niskich; grupę „kontrolną” stanowiło ok. 26 tys. mieszkańców Hiroszimy i Nagasaki, którzy nie przebywali w tych miastach w dniu eksplozji, więc nie pochłonęli dodatkowego promieniowania. Pomimo wielu wad analiz kohorty LSS, jest ona wyjątkowym źródłem informacji o skutkach zdrowotnych krótkotrwałej ekspozycji na promieniowanie gamma i neutronowe. Zgodnie z przewidywaniami, obserwacje prowadzone w latach 1950-2000 pozwoliły wykryć wiele przypadków zachorowań i zgonów na nowotwory, które mogły mieć związek z działaniem p.j. Jednakże, prowadzone w ostatnich latach bardziej szczegółowe analizy tych przypadków wykazały, że – jeśli dawki promieniowania pochłoniętego nie przekraczały 100-200 mGy – liczba zachorowań i zgonów była *mnij*sza niż w grupie kontrolnej; dotyczyło to nie tylko raków i mięsaków (czyli tzw. guzów litych), ale także białaczek – najwcześniej pojawiających po ekspozycji nowotworów popromiennych. Ponadto, z badań prowadzonych w latach 1970-1976 wynikało, że umieralność ogólna (ze wszystkich przyczyn) mieszkanki Nagasaki, które pochłonęły po atakach jądrowych niskie dawki p.j. była *mnij*sza niż umieralność odpowiednio „dopasowanych” Japończyków, nie eksponowanych na żadne inne promieniowanie niż naturalne [Luckey 2008; Jaworowski 2010a; Doss 2012; Ozasa i wsp. 2012; Sutou 2018]. Wreszcie, wśród 75 300 dzieci urodzonych w latach 1946-1984 z rodziców, którzy byli w Hiroszimie lub Nagasaki w dniach wybuchów bomb jądrowych (gonady rodziców pochłonęły średnio 264 mGy) śmiertelność z powodu nowotworów i, w nieco mniejszym stopniu, z innych przyczyn, była *ni*ższa niż wśród dzieci osób nie napromieniowanych po wybuchach jądrowych [Grant i wsp. 2015].

Interesujące wyniki przyniosła dokładna analiza danych zawartych w pracy Antoniego B. Millera i współpracowników, która ukazała się w roku 1989 w prestiżowym amerykańskim *New England Journal of Medicine*. Autorzy badali zgony z powodu raka piersi wśród 31 710 kobiet chorych na gruźlicę, które w latach 1930-1952 leczone były za pomocą odmy opłucnowej – w tamtym czasie powszechnie stosowanej metody terapii gruźlicy. Skuteczność tej terapii sprawdzano za pomocą częstych badań fluoroskopowych (naświetlania klatki piersiowej promieniami X), które mogły prowadzić do rozwoju raka

gruczołu sutkowego. Rzeczywiście, częstość zgonów z powodu raka piersi (wyrażona w postaci tzw. standaryzowanego współczynnika umieralności, SWU) wśród kobiet, które pochłonęły dawki powyżej 300 mGy była wyższa niż w grupie kobiet, których dawki nie przekraczały 90 mGy. Jednakże, jeżeli otrzymane dawki zawierały się w przedziale od 100 do 190 mGy SWU był wyraźnie *ni*ższy niż wśród kobiet z grupy „kontrolnej”, które pochłonęły mniej niż 90 mGy promieniowania. Niestety, autorzy tego badania nie „zauważyli” tej ostatniej różnicy i stwierdzili, że ich „dane najbardziej odpowiadają liniowej zależności między dawką a skutkiem” [Miller i wsp. 1989].

Wśród osób zawodowo narażonych na działanie p.j. dużą grupę stanowią lekarze radiolodzy (po ustanowieniu radiologii jako specjalności medycznej w końcu XIX wieku aż do połowy XX wieku lekarze pochłaniali w czasie badań spore dawki promieni X). W roku 2005 grupa naukowców kierowana przez znanego epidemiologa Richarda Dolla opublikowała statystykę śmiertelności wśród prawie 2700 radiologów brytyjskich zarejestrowanych w zawodzie od 1897 do 1979 r. Badanych podzielono na cztery grupy, zależnie od okresu rejestracji, które odpowiadały różnym limitom dopuszczalnych dawek; 339 radiologów płci męskiej było zarejestrowanych przed rokiem 1921, kiedy nie było przepisów określających dopuszczalne maksymalne dawki jakie mogliby otrzymywać radiolodzy. Okazało się, że – w porównaniu z grupą lekarzy innych specjalności – rzeczywista liczba zgonów z powodu nowotworów i innych przyczyn (wyrażona jako SWU) wśród radiologów była we wszystkich grupach *ni*ższa niż spodziewana (na podstawie pochłoniętych dawek i posługując się modelem LNT): największą różnicę wykryto oczywiście dla okresu rejestracji przed rokiem 1921, ale wyraźna niezgodność z liczbą „spodziewanych” zgonów dotyczyła także lat 1955-1979, gdy limit ten wynosił 50 mSv/rok. (Tabela 2) [Doll 2005].

Inną grupę zawodowo poddawaną działaniu p.j. w dawkach niskich są pracownicy zakładów produkujących paliwo do reaktorów i ładunków jądrowych, osoby zatrudnione przy budowie i remontach okrętów z napędem atomowym, a także obserwatorzy próbnych eksplozji jądrowych. Analiza umieralności z powodu nowotworów złośliwych wśród takich osób z USA, Kanady i W. Brytanii pokazała, że śmiertelność ta jest – we wszystkich wymienionych grupach pracowników – *ni*ższa niż „spodziewana”, czyli taka, jaka występuje w populacji ogólnej (Tabela 3) [Luckey 1999].

Prosty, choć niewątpliwie pracochłonny, test „poprawności” modelu LNT przeprowadził Bernard Cohen, profesor fizyki Uniwersytetu w Pittsburgu (USA), który sprawdził jak w ponad 1600 hrabstwach Stanów Zjednoczonych Ameryki Północnej (tj. w połowie wszystkich hrabstwach USA) wygląda zależność między zachorowaniem na raka płuc a stężeniem radonu (Rn) w domach mieszkańców. Występujący w powietrzu radon jest ra-

Tabela 2. Zgony na nowotwory wśród radiologów brytyjskich płci męskiej zarejestrowanych w latach 1897-1979 (według Doll 2005)**Table 2.** Cancer mortality among British male radiologists registered between 1897 and 1979 compared to other male medical practitioners (from Doll 2005)

Okres rejestracji	Limit ekspozycji	Zgony przewidywane*	Zgony faktyczne*
1897-1920	> 1 Sv/rok	4,80	1,75
1921-1935	< 1 Sv/rok	1,70	1,24
1936-1954	2 mSv/dzień (0,5 Sv/rok)	1,20	1,12
1955-1979	0,05 Sv/rok	1,02	0,71

*standaryzowane współczynniki umieralności (SMU) w stosunku do innych lekarzy płci męskiej.

Tabela 3. Zgony na nowotwory wśród pracowników przemysłu nuklearnego w Kanadzie, USA i W. Brytanii (według Luckey, 1999)**Table 3.** Deaths from cancer among various groups of nuclear workers from the USA, Great Britain, and Canada (after Luckey, 1999)

Grupa pracowników	Dawka życiowa [mGy]	Średnia liczba zgonów wśród 1000 osób	
		spodziewana	rzeczywista
Pracownicy laboratorium w Los Alamos (USA)	20	20,1	17,7
Pracownicy stoczni (USA)	≥10	29,8	19,4
Obserwatorzy wybuchów nuklearnych (USA)	13	26,5	22,0
Obserwatorzy wybuchów nuklearnych (Kanada)	13	38,1	33,4
Pracownicy fabryk w Oak Ridge (USA)	32	34,8	20,8
Pracownicy fabryk broni jądrowej (W.Brytania)	34	9,9	2,3
Pracownicy przemysłu nuklearnego (Kanada)	20	23,7	20,3

dioaktywnym gazem szlachetnym (jego najstabilniejszym izotopem jest Rn-222) pochodzącym z rozpadu obecnych w skorupie ziemskiej toru i uranu: w skali globu produkowany jest radon o aktywności około 90 eksaBq (9×10^{19} rozpadów na sekundę), a jego stężenie na otwartej przestrzeni wynosi od 1 do 100 Bq/m³ powietrza, natomiast w kopalniach, jaskiniach i w niewietrzonych suterrenach i piwnicach może dochodzić do 2000 Bq/m³. Radon jest tak powszechny, że ponad 50% dawki p.j. jaką przeciętny mieszkaniec Ziemi pochłania ze źródeł naturalnych i sztucznych pochodzi od tego pierwiastka. Rn-222 emituje silnie jonizujące cząstki α (jądra helu), które absorbowane są w czasie oddychania przez nabłonek oskrzeli i oskrzelików. Typowym i najgroźniejszym tego następstwem są zaburzenia w chromosomach, które – jeśli nie zostaną naprawione – mogą prowadzić do rozwoju raka płuc. Czy jednak każda dawka pochłoniętego „promieniowania radonowego” jest tak samo groźna? Otóż, całkowicie wbrew oczekiwaniom, okazało się, że – do określonego poziomu stężenia radonu w powietrzu – liczba zgonów na raka płuc była tym *mniejsza* im większe było to stężenie [Cohen 1995]. Wyniki te były tak zaskakujące, że Cohen kilkakrotnie je sprawdzał, zapraszając różnych statystyków medycznych do pomocy. Ciągłe jednak zależność między stężeniem radonu a umieralnością na raka pozostawała dokładnie odwrotna niż przewiduje to hipoteza LNT. Wyniki te poddano oczywiście krytyce, jako pochodzące z badania typu ekologicznego (geograficznego), które nie analizuje ekspozycji indywidual-

nych osób i nie może wykryć faktycznego związku między przyczyną (w tym przypadku – promieniowaniem emitowanym przez radon) a skutkiem (rakiem płuc). Bernard Cohen jednak od początku twierdził, że jego celem było jedynie *przetestowanie* hipotezy LNT, a nie wykrywanie potencjalnego związku przyczynowo-skutkowego między poziomem radonu w powietrzu a rakiem płuc [Cohen 2006]. Aby sprawdzić czy taki związek rzeczywiście istnieje Richard E. Thompson przeprowadził bardziej wyrafinowane badanie epidemiologiczne typu „przypadek-kontrola”, polegające na porównaniu zachorowań wśród osób poddanych działaniu czynnika chorobowego, czyli stężenia radonu we wdychanym powietrzu powyżej 25 Bq/m³ („przypadki”), z osobami oddychającymi powietrzem zawierającym niższe stężenie radonu („kontrolę”). Wszyscy badani pochodzili z jednego hrabstwa USA, przy czym 200 osób zakwalifikowano do grupy „przypadków”, które skonfrontowano z odpowiednio dobranymi 397 „kontrolami”. Okazało się, że wśród osób oddychających powietrzem zawierającym od 25 do 250 Bq/m³ prawdopodobieństwo zachorowania na raka płuc jest *znamiennie niższe* niż w grupie kontrolnej (największą różnicę wykryto porównując tych ostatnich z osobami wdychającymi radon w stężeniu od 150 do 249 Bq/m³) i dopiero po przekroczeniu 250 Bq/m³ prawdopodobieństwo to wzrastało 2,5-krotnie (Tabela 4) [Thompson i wsp. 2008]. Wyniki te potwierdziły obserwacje Cohena wskazujące, że zależność między stężeniem radonu w powietrzu domowym a zapadalnością

na raka płuc ma, w określonym zakresie tych stężeń, charakter odwrotny do przewidywanego przez model LNT. Wyniki Thompsona i wsp. potwierdzili, m.in. polscy naukowcy z Narodowego Centrum Badań Jądrowych, którzy w swych kilkukrotnych analizach wykazali, że oddychanie 'radonem' o stężeniu nawet kilkuset Bq/m³ nie jest szkodliwe [Dobrzyński i wsp. 2018; Pylak i wsp. 2021].

Tabela 4. Zapadalność na raka płuc zależnie od stężenia radonu w powietrzu domowym (badanie kliniczno-kontrolne mieszkańców hrabstwa Worcester, USA) [według Thompson i wsp. 2008]

Table 4. Incidence of lung cancer vs. concentration of radon in breathing air among inhabitants of the Worcester county, USA [from Thompson et al. 2008]

Stężenie radonu [Bq/m ³]	SIS*
< 25	1,00 (punkt odniesienia)
25 – < 50	0,53
50 – < 75	0,31
75 – < 150	0,47
150 – < 250	0,22
≥250	2,50

*Skorygowany iloraz szans: uwzględnia palenie tytoniu, warunki mieszkaniowe, narażenie zawodowe, dochód i poziom wykształcenia.

Hipotezy LNT nie potwierdzają też obserwacje epidemiologiczne populacji mieszkańców okolic skażonych po największej katastrofie radiacyjnej, jaką spowodował wybuch jednego z reaktorów elektrowni jądrowej w Czarnobylu. Uzyskane dane, wielokrotnie weryfikowane przez Komitet Naukowy ONZ ds. Skutków Promieniowania Atomowego (*United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation*, UNSCEAR) [UNSCEAR Reports 2000, 2008, 2012] dowodzą, że napromienowanie doprowadziło do śmierci nie więcej niż 70 osób: spośród 134 osób, u których rozpoznano ostrą chorobę popromienną (OChP), zmarło 47 osób, pozostali mieli inne schorzenia wywołane lub spotęgowane przez działanie p.j. Co ciekawe, umieralność ogólna (ze wszystkich przyczyn) wśród osób, które przeżyły OChP była w roku 2000 niższa niż osób z populacji „kontrolnej”: 1,09% wobec 1,4%. Nie są więc prawdą doniesienia i „prognozy” różnych mediów, książek (np. ostatnio wydanej w Polsce „O północy w Czarnobylu”) i innych źródeł mówiące o tysiącach, a nawet setkach tysięcy „ofiar Czarnobyla”. W rzeczywistości, wśród mieszkańców najbardziej skażonych terenów Ukrainy, Białorusi i Rosji do dzisiaj nie zanotowano zwiększonej zapadalności i śmiertelności z powodu nowotworów ani innych chorób, które mogłyby być wywołane działaniem p.j. Jedyny wyjątek stanowią raki tarczycy wykryte u osób, które w dniach katastrofy byli dziećmi. Rak ten może powstać po zgromadzeniu w tarczycy uwalnianego w czasie wybuchu reaktora radioaktywnego jodu, który gruczoł ten wychwytuje – tak jak jod stabilny – do produkcji hormonów. Wiele dzieci i ludzi młodych przebywających w strefach skażonych po katastrofie wchłonęło duże ilości promieniotwórczego

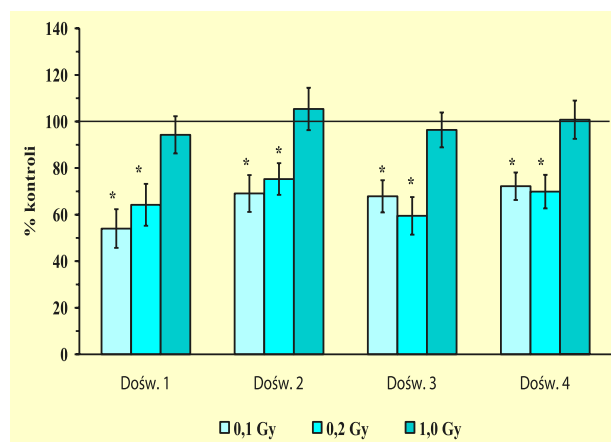
jodu, co w dużej mierze wyjaśnia przyczynę licznych zachorowań na raka tarczycy. Większość przypadków tego nowotworu zdiagnozowano dzięki masowym badaniom skринingowym (nigdy wcześniej nie prowadzonych na tych terenach) „począrnobylskiej” populacji, które ujawniły istnienie tzw. raków „niemych”, na ogół nie dających żadnych dolegliwości i nie prowadzących do zgonu. Na szczęście, nowotwór ten jest skutecznie leczony, dlatego do dzisiaj zmarło nie więcej niż dwadzieścia-trzydzieści osób spośród około 10 tys. Białorusinów i Ukraińców, u których po katastrofie w Czarnobylu rozpoznano raka tarczycy.

Kończąc przegląd badań epidemiologicznych należy zacytować ostatnio opublikowane wyniki analizy wpływu niskich dawek promieniowania naturalnego (pochodzenia ziemskiego i kosmicznego), jakie wszyscy stale pochłaniamy na długość życia i śmiertelność z powodu nowotworów. Badaniami objęto 320 mln mieszkańców USA, czyli praktycznie całą populację tego kraju. Wyniki pokazują, że oczekiwana dalsza długość życia (ang. *life expectancy*, uważana za najbardziej obiektywny wskaźnik zdrowia populacyjnego) mieszkańców regionów o względnie wysokim poziomie promieniowania naturalnego (średnio 1,8 mSv/rok) jest o 2,5 roku dłuższa niż ludzi z rejonów o niższym poziomie tego promieniowania (średnio 1 mSv/rok); różnica ta jest wysoce znamienna statystycznie ($p < 0,005$). Według autorów, ten przedłużający życie wpływ p.j. jest związany ze spadkiem liczby zgonów z tak powszechnych nowotworów jak rak płuca, jelita grubego, mózgu i pęcherza moczowego [David i wsp. 2021].

Wyżej wymienione dane David i współpracowników są o tyle wyjątkowe, że pozwoliły z odpowiednią „mocą statystyczną” określić korzystny wpływ p.j. na ludzi. Na ogół jednak, w większości badań epidemiologicznych analizowane populacje są zbyt małe, aby taka zależność mogła być „udowodniona”, czyli uzyskać znamienność statystyczną ($p < 0,05$). Jedną z przyczyn takiego stanu rzeczy jest to, że – ze względu na niewielkie prawdopodobieństwo wywołania choroby, w tym nowotworu, przez niskie dawki p.j. – dla wykazania wymaganej znamienności statystycznej przeciwnowotworowego działania niskich i bardzo niskich dawek promieniowania – liczba badanych osób (napromieniowanych i „kontrolnych”) musi być bardzo duża: np. przy badaniu wpływu dawki o mocy 50 mGy/rok badana kohorta musi liczyć blisko 1000 osób, a przy mocy dawki = 1 mGy/rok – już ponad 1 800 tys. [Preston i wsp. 2013; Shore i wsp. 2018]. Tym bardziej, skoro nie można udowodnić, że czegoś nie ma, analizy epidemiologiczne nie są w stanie wykazać, że pochłanianie niskich dawek p.j. nie działa szkodliwie. Paradoksalnie – świadomi tego „dylematu epidemiologicznego” – zwolennicy hipotezy LNT „domagają się”, aby jej przeciwnicy wykazali taką znamienność w badaniach epidemiologicznych.

Dane z badań doświadczalnych

Skoro „radioepidemiologia” nie jest w stanie jednoznacznie potwierdzić lub odrzucić poprawności modelu LNT, trzeba odwołać się do badań prowadzonych w ściśle kontrolowanych warunkach na zwierzętach doświadczalnych. Pierwsze doniesienia o przeciwnowotworowym i wydłużającym życie działaniu niskich dawek p.j. u myszy publikowane były już w latach 1950-tych [Lorenz i wsp. 1955]. Ponowne badania tego typu podjęto w latach 80-tych XX wieku w Japonii. W roku 1987 dwaj badacze z Wydziału Medycznego Uniwersytetu w Tokio opublikowali wyniki doświadczeń, w których 12 dni po przeszczepieniu złośliwego, tj. dającego przerzuty do płuc, nowotworu tkanki łącznej myszy były – jednorazowo lub kilkakrotnie – napromieniowywane w dawkach od 0,1 do 0,5 Gy. Takie ekspozycje wyraźnie hamowały powstawanie przerzutów w płucach [Suzuki i Mizukoshi 1987]. Nieco później, inni badacze z Uniwersytetu Medycznego Tohoku w mieście Sendai posłużyli się uznaną metodą indukcji ognisk nowotworowych (sztucznych przerzutów) w płucach myszy przez dożylną wstrzykiwanie komórek raka płaskonabłonkowego. W okresie od 9 godzin przed do 3 godzin po podaniu tych komórek myszy napromieniano w dawkach od 0,15 do 0,2 Gy, co w sposób statystycznie znamieny blokowało rozwój ognisk raka [Hosoi i Sakamoto 1993]. Co ciekawe, te ostatnie wyniki udało nam się prawie dokładnie powtórzyć na początku lat 2000-tych w Zakładzie Radiobiologii i Ochrony Radiacyjnej Wojskowego Instytutu Higieny i Epidemiologii, którym wówczas kierowałem, stosując inne komórki nowotworowe i inny szczep zwierząt, co potwierdziło, że wyniki Japończyków nie były czymś wyjątkowym. W naszych badaniach, myszy były jednorazowo ekspozowane na promieniowa-

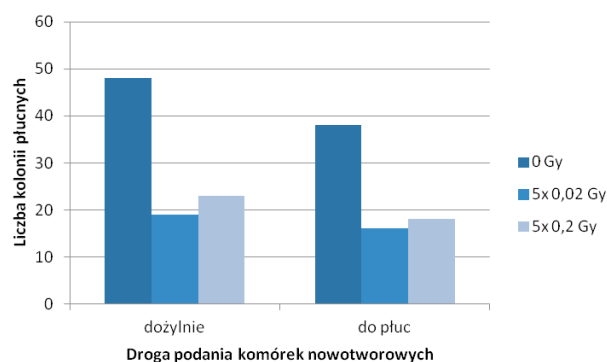


Rys 1. Wpływ jednorazowych ekspozycji myszy w dawkach 0,1, 0,2 lub 1,0 Gy promieniowania X na rozwój nowotworowych kolonii płucnych (przedstawionych w postaci odsetka kolonii zliczanych u nienapromieniowanych myszy kontrolnych) [według Cheda i wsp. 2004]

Fig. 1. Development of neoplastic colonies in the lungs of mice treated with single exposures to X-rays at 0.1, 0.2, or 1.0 Gy compared to the control rate (100%) observed in the non-exposed mice [after Cheda et al. 2004]

nie X w dawkach 0,1 lub 0,2 Gy; dla porównania osobną grupę myszy napromieniano w dawce 1,0 Gy. Wielokrotne powtarzanie tych eksperymentów za każdym razem dawało bardzo podobne wyniki: ekspozycje w niższych dawkach wyraźnie hamowały rozwój ognisk nowotworowych w płucach, podczas gdy pochłonięcie dawki 1,0 Gy nie dawało takiego efektu [Cheda i wsp. 2004] (rys. 1); podobne wyniki uzyskaliśmy, gdy myszy były napromieniane codziennie przez 10 dni w dawkach od 0,01 do 0,1 Gy [Nowosielska i wsp. 2011].

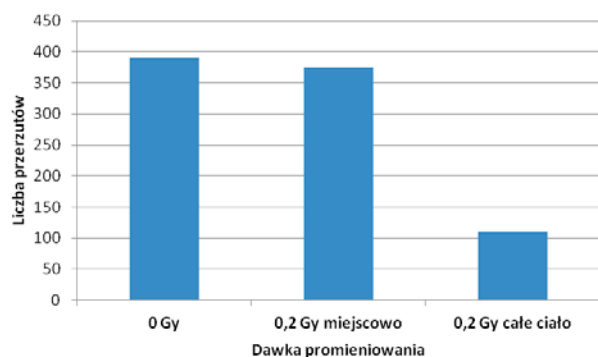
Tę powtarzalność potwierdziliśmy ostatnio stosując inny układ doświadczalny, w którym ogniska nowotworowe indukowane były przez podanie komórek raka do żyły ogonowej lub bezpośrednio do płuc myszy, które były następnie pięciokrotnie napromieniane w dawkach dziennych 0,02 lub 0,2 Gy: w obu przypadkach ekspozycje na p.j. wyraźnie hamowały rozwój nowotworu w płucach (rys. 2) [Nowosielska i wsp. 2021].



Rys. 2. Rozwój ognisk nowotworowych u myszy, którym komórki raka wstrzykiwano dożylnie lub bezpośrednio do płuc i które od 7. dnia po podaniu przez 5 dni ekspozowano na promieniowanie X w dawkach dziennych 0,02 lub 0,2 Gy [według Nowosielska i wsp. 2021]

Fig. 2. Tumour colonies in the lungs of mice after intravenous (dożylnie) or orthotopic (do płuc) injection of LLC1 cells followed by five daily irradiations with X-rays at 0.02 or 0.2 Gy/day [after Nowosielska et al. 2021]

Ciekawe wyniki uzyskali także badacze z Uniwersytetu Medycznego Hokkaido w Sapporo w Japonii u szczurów: dwa tygodnie po podskórnym wszczepieniu komórek nowotworowych dających przerzuty do płuc i innych narządów całe ciała zwierząt lub tylko okolicę rosnącego guza poddawano ekspozycjom na promieniowanie X w dawce 0,2 Gy. Okazało się, że liczba przerzutów nowotworowych jakie po 50 dniach rozwinęły się w płucach była ponad dwukrotnie niższa po napromieniowaniu całego ciała, ale nie zmniejszyła się po ekspozycji miejscowej (rys. 3) [Hashimoto i wsp. 1999]. W tym pierwszym przypadku, do przerzutów w płucach i węzłach chłonnych napłynęło wiele cytotoksycznych limfocytów, co świadczy o tym, że pochłonięcie niskiej dawki p.j. pobudza przeciwnowotworowe działanie układu odpornościowego. Potwierdzają to wyniki wielu innych badań, w tym także naszych własnych [przeglądu tych badań dokonali Liu i wsp. 1987 oraz Janiak i wsp. 2017].

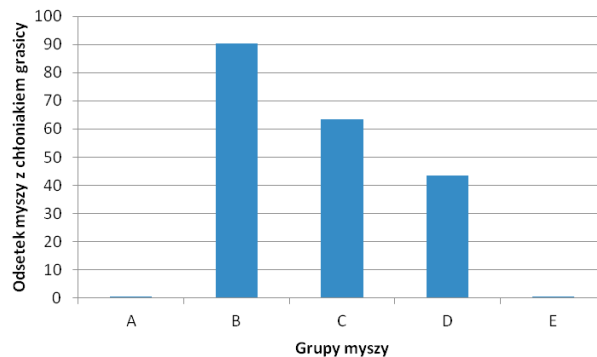


Rys. 3. Przerzuty do płuc z rosnącego pod skórą nowotworu szczurów po ekspozycji całego ciała zwierząt lub tylko podskórnego guza na promieniowanie X w dawce 0,2 Gy [według Hashimoto i wsp. 1999]

Fig. 3. Development of lung metastases 50 days post subcutaneous implantation of the KDH-8 hepatoma cells to the WKHA rats which 14 days after the implantation were exposed to either whole-body (0,2 Gy całe ciało) or local (0,2 Gy miejscowo) irradiation at 0.2 Gy of X-rays [according to Hashimoto et. al. 1999]

Badacze japońscy i inni wykazali również, że także *długotrwałe* napromienianie w niskich dawkach skutecznie działa przeciwnowotworowo. Wyniki jednego z badań dokumentujących ten efekt pokazuje rys. 4: u myszy podatnych na rozwój popromiennego chłoniaka grasicy (po czterokrotnej ekspozycji na wysoką dawkę promieniowania X; grupa B), wcześniejsze „naświetlanie” przez 258-450 dni promieniami gamma o niskiej mocy dawki (20 μ Gy/min) ponad dwukrotnie obniżało częstość występowania nowotworu (grupa D), natomiast sama ekspozycja na promienie gamma trwająca nieprzerwanie przez 258-450 dni w ogóle nie prowadziła do rozwoju chłoniaka (grupa E). Co także ważne, aplikacja niskiej dawki (75 mGy) prom. X przed każdą dużą dawką tego promieniowania także wyraźnie hamowała indukcję chłoniaka (grupa C) [Ina i wsp. 2005]. Ten ostatni, tzw. adaptacyjny efekt działania niskich dawek odkryto na początku lat 1980-tych, a potem potwierdzono w wielu innych badaniach [przegląd tych badań w Takahashi i Ohnishi 2009]. Ponieważ przewlekłe napromienianie w niskiej dawce wyraźnie zwiększało w śledzeniu liczbę aktywnych limfocytów T i B, świadczyło to o tym, że blokada rozwoju chłoniaka była wynikiem pobudzenia układu odpornościowego. Co istotne, 450-dniowe ekspozycje na promieniowanie gamma o niskiej mocy wyraźnie poprawiały kondycję zwierząt: w porównaniu do nienapromienianych „kontroli” myszy napromieniane ważyły więcej i nie miały „starczych” ubytków sierści (rys. 5) [Ina i wsp. 2005].

Taki dobroczynny wpływ przewlekłych ekspozycji na p.j. w niskich dawkach ci sami badacze wykazali także w innej serii doświadczeń, w których myszy z wadą genetyczną prowadzącą do ciężkich chorób były przez całe swoje życie ekspozowane na promieniowanie gamma o niskiej mocy dawki (20 μ Gy/min). Takie napromienianie niemal 4-krotnie wydłużało czas życia tych zwierząt, co było związane z pobudzeniem niektórych



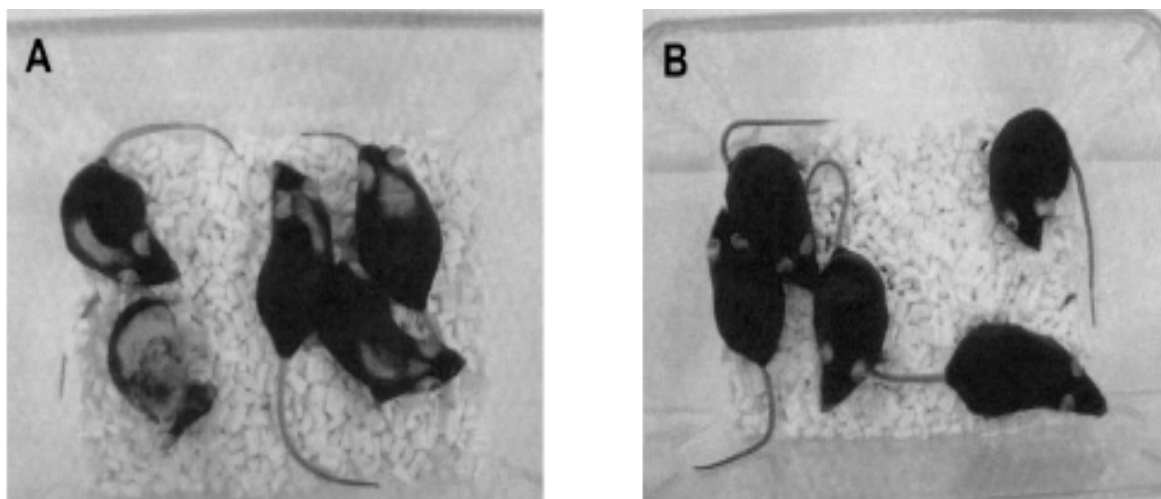
Rys. 4. Rozwój chłoniaka grasicy u myszy napromienianych w dawkach dużych i/lub małych: A – myszy nienapromieniowywane (kontrolne); B – myszy ekspozowane 4 x co tydzień każdorazowo w dawce 1,8 Gy prom. X; C – myszy ekspozowane na 75 mGy prom. X aplikowanego 6 godz. przed każdą dawką 1,8 Gy (jak w B); D – myszy jak w B + ciągle przez 450 dni ekspozowane na prom. γ o mocy 20 μ Gy/min; E – myszy poddawane jedynie ciągle (przez 258-450 dni) ekspozycji na prom. γ o mocy 20 μ Gy/min [według Ina i wsp. 2005]

Fig. 4. Incidence of thymic lymphoma in susceptible mice exposed to single and/or continuous irradiations with X- and/or γ -rays. A – control mice not exposed to radiation. B – mice exposed four times with week-long intervals to X-rays at 1.8 Gy/dose. C – mice exposed as in group B and additionally irradiated at 75 mGy of X rays given 6 h before each 1.8-Gy irradiation. D – mice exposed as in group B and additionally continuously 450 days irradiated with γ -rays at 1.2 mGy/h dose rate. E – mice exposed only to the continuous irradiation as in group D [according to Ina et al. 2005]

reakcji układu odpornościowego i zahamowaniem rozwoju autoagresyjnych zaburzeń w różnych tkankach (rys. 6) [Ina i Sakai 2005].

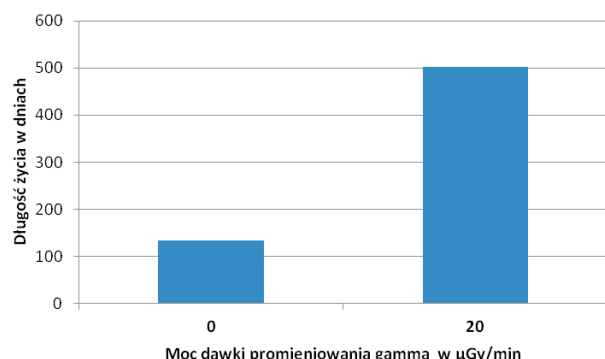
Próby kliniczne

Bardzo zachęcające są też wyniki wielu przeprowadzonych dotychczas prób klinicznych stosowania ekspozycji w niskich dawkach do leczenia nowotworów u ludzi [przegląd tych prób w Janiak i wsp. 2021]. Już w 1903 r., a więc tuż po odkryciu promieniowania X przez Wilhelma Conrada Röntgena (w listopadzie 1895 r.), William Allen Pusey z Chicago napromieniał całe ciało mężczyzny z uogólnionym nowotworem, jakim jest białaczka, co szybko poprawiło stan chorego. Zaraz potem, a więc na długo przed pojawieniem się wyżej przytoczonych i innych danych o przeciwnowotworowym działaniu ekspozycji całego ciała w niskich dawkach p.j. u zwierząt laboratoryjnych, lekarze w Europie i USA zaczęli stosować taką radioterapię w klinice. Ogółem, w latach 1920-2020 opisano ponad 50 kontrolowanych prób ekspozycji całego ciała lub tylko tułowia na promieniowanie X lub gamma, głównie w niskich dawkach. Do dzisiaj, takiemu leczeniu poddano ponad 2000 chorych, przede wszystkim z chłoniakami i białaczkami limfatycznymi, ale także z licznymi guzami litymi w zaawansowanym stadium, tj. z licznymi przerzutami do różnych narządów. W większości przypadków pełne remisje choroby uzyskiwano u ponad połowy napromienianych pacjentów, a czasem rozwój nowotworu ulegał zahamowaniu u ponad 90%



Rys. 5. Wygląd myszy szczepu C57BL/6 poddanych trwałej całej życie ekspozycji na promieniowanie γ o mocy dawki 20 $\mu\text{Gy}/\text{min}$: A – myszy nienapromieniowywane (kontrolne); B – myszy napromieniowywane przez 450 dni [według Ina i wsp. 2005]

Fig. 5. Effect of the lifetime exposure of C57BL/6 mice to γ -rays delivered at 20 $\mu\text{Gy}/\text{min}$ dose rate on the animals' condition: A – control mice not exposed to γ -rays; B – mice irradiated with γ -rays for 450 days [according to Ina et al. 2005]



Rys. 6. Wydłużenie życia myszy z genetycznie uwarunkowanymi ciężkimi chorobami z autoagresji za pomocą trwałych całej życie ekspozycji na promieniowanie gamma o mocy dawki 20 $\mu\text{Gy}/\text{min}$ [według Ina i Sakai 2005]

Fig. 6. Significant prolongation of longevity of the autoimmunity-prone MRL-lpr/lpr mice irradiated throughout their lives with γ -rays at 20 $\mu\text{Gy}/\text{min}$ dose rate (according to Ina and Sakai 2005)

chorych. Co bardzo istotne, w odróżnieniu od chemioterapii, która zaczęła być stosowana w latach 1940-tych, taka radioterapia okazała się prawie zupełnie nietoksyczna (występujące czasem spadki liczby płytek i limfocytów we krwi były niegroźne i zwykle szybko mijały), za to mniej uciążliwa (kontrolne stanu pacjenta były rzadsze) oraz szybciej hamowała postęp choroby (zmniejszając wielkość i/lub liczbę ognisk nowotworowych) [Janiak i wsp. 2021]. Niestety, oparte na hipotezie LNT przepisy ochrony radiologicznej oraz powszechna radiofobia – obejmująca także wielu lekarzy – do dzisiaj utrudniają lub uniemożliwiają prowadzenie szerszej zakrojonych, opartych o współczesne kryteria, prób klinicznych ekspozycji całego ciała na p.j. o niskim liniowym współczynniku przekazywania energii (*linear energy transfer*, LET), co mogłoby doprowadzić do uznania tej formy radioterapii za standardową metodę leczenia nowotworów i innych poważnych chorób.

Hormeza radiacyjna

Zacytowane wyżej, ale też ciągle pojawiające się nowe wyniki badań eksperymentalnych i prób klinicznych jednoznacznie pokazują, że różnice w działaniu dużych i małych dawek p.j. mają nie tylko charakter ilościowy, ale przede wszystkim jakościowy (Tabela 5). Różnice te obserwowane są na wszystkich poziomach organizacji organizmu: molekularnym, komórkowym, tkankowym, narządowym i ogólnoustrojowym. Mamy tu więc do czynienia ze zjawiskiem tzw. hormezy radiacyjnej (*hormáe-in* w antycznej grece znaczyło „wprawiać w ruch”), czyli pobudzania funkcji komórek i tkanek przez niskie dawki p.j., natomiast hamowania tych funkcji przez dawki wysokie. Mimo swego powszechnego charakteru, zjawisko hormezy odkryto dopiero w końcu XIX wieku, a sam termin został po raz pierwszy użyty w literaturze naukowej w roku 1943. Paradoksalnie, jeszcze dzisiaj są osoby, które myślą hormezę z pseudonaukowym systemem medycyny niekonwencjonalnej – homeopatią (sam odkrywca hormezy mylnie przypuszczał, że tłumaczy ona zjawisko homeopatii). W efekcie, nawet niektórzy naukowcy mają „problem” z wytłumaczeniem pozytywnych skutków zdrowotnych pochłaniania niskich dawek p.j. W dużej mierze wynika to z faktu, że hormeza radiacyjna pozostaje w konflikcie z hipotezą LNT [Calabrese i Baldwin. 2000; Luckey 2006; Jaworowski 2010b; Doss 2012].

Trwałość i konsekwencje stosowania hipotezy LNT

Co więc sprawia, że pomimo istnienia tak wielu danych podważających lub wprost negujących zasadność modelu LNT ciągle dominuje on w myśleniu o skutkach działania p.j. i – co więcej – stanowi podstawę regulacji w ochronie radiologicznej obowiązujących w USA i Europie? Zwolennicy hipotezy LNT wymieniają kilka argu-

Tabela 5. Różnice jakościowe między skutkami ekspozycji w dawkach wysokich i niskich
Table 5. Qualitative differences between biological effects of high and low doses of ionizing radiation

DAWKI WYSOKIE	DAWKI NISKIE
Zabijają komórki prawidłowe, uszkodzają zdrowe tkanki	Nie zabijają komórek prawidłowych i nie uszkodzają tkanek zdrowych
Wywołują stany zapalne	Działają przeciwzapalnie
Hamują aktywność układu odpornościowego	Pobudzają układ odpornościowy
Indukują nowotwory wtórne	Nie indukują wtórnych nowotworów
Nie nadają się do leczenia nowotworów uogólnionych i przerzutów nowotworowych	Przy ekspozycjach całego ciała są skuteczne w leczeniu nowotworów uogólnionych i przerzutów.

mentów przemawiających na jej korzyść. Po pierwsze więc, model ten słusznie zakłada, że nawet najmniejsza dawka pochłoniętego promieniowania może doprowadzić do uszkodzenia DNA i mutacji i, w konsekwencji, do przemiany (transformacji) komórki prawidłowej w nowotworową. Taka argumentacja jednak zupełnie ignoruje fakt, że każda stransformowana komórka (a wiele z nich codziennie pojawia się w naszym organizmie) jest rozpoznawana i eliminowana przez siły obronne organizmu – inaczej, wszyscy umieralibyśmy na nowotwory w młodym wieku. Ponadto – co leży u podstaw przeciwnowotworowego działania niskich dawek p.j. – każda zmiana w DNA (także wywołana pojedynczym aktem jonizacji, a więc najmniejszą możliwą „dawką” p.j.) uruchamia proces naprawczy, który usuwa nie tylko uszkodzenie popromienne, ale także już istniejące zaburzenia DNA powstałe podczas podziałów i normalnego metabolizmu każdej żywej komórki (dzięki temu, eliminowane są potencjalne mutacje, które mogą doprowadzić do rozwoju nowotworu „spontanicznego”, niezwiązanego z działaniem p.j.). Również kolejne argumenty „za” modelem LNT, takie jak to, że: a) nawet jeśli zawiąże się w ten sposób prawdopodobieństwo wystąpienia choroby, to celem jest ochrona zdrowia ludzi² oraz b) że nie ma innego, lepszego modelu szacowania ryzyka, wyraźnie mijają się z prawdą³.

Istnieją również inne przyczyny genezy i trwałości hipotezy LNT. W jej powstaniu i ugruntowaniu istotną rolę odegrał autorytet i pozycja noblisty, jakim – najwyraźniej niezaskuszenie – został Hermann J. Muller. Przyznanie tej nagrody było w dużej mierze wynikiem nieetycznego postępowania ówczesnego redaktora czasopisma Science, który sprawił, że „przełomowy” artykuł Mullera o „sztucznej transmutacji genu” [Muller 1927] opublikowano bez wymaganej recenzji, bez danych doświadczalnych i bez wykazu literatury! [Calabrese 2015; 2021]. Później, poglądy Mullera przejęło kilka ważnych ciał opiniotwórczych i regulacyjnych w USA

(NAS, NCRP, ICRP, EPA), które – ignorując dane przeczące zasadzie LNT – koniunkturalnie i/lub z przyczyn politycznych – uwiarygodniały tę hipotezę i zalecały jej stosowanie do celów regulacyjnych. Po drugie, skoro „dylemat epidemiologiczny” nie pozwala na jednoznaczne wykazanie braku szkodliwości ekspozycji w niskich dawkach, zastosowano „zasadę ostrożności” (ang. *precautionary principle*), zgodnie z którą, jeśli istnieje prawdopodobne ryzyko negatywnych skutków działania jakiegoś czynnika, lepiej jest go unikać zamiast ryzykować niepewne, ale potencjalnie szkodliwe, konsekwencje tego działania [NCRP 1966]. Mimo iż zasada ostrożności była już wielokrotnie krytykowana, jako nieracjonalna i nienaukowa⁴, w ochronie radiologicznej funkcjonuje jako tzw. reguła ALARA (*as low as reasonably achievable*) [ICRP 2007], która mówi, że – po uwzględnieniu czynników medycznych, ekonomicznych, technicznych i innych – dawka pochłanianego przez ludzi p.j. powinna być jak najniższa. W praktyce oznacza to, że, świadomie pozbawiamy się wielu korzystnych skutków działania dawek niskich, często niewiele większych od tej „najniższej” (jednego aktu jonizacji). Stanowisko wymienionych wyżej „autorytetów” oraz wynikające z niego regulacje prawne są przyczyną rozpowszechniania „ideologii” LNT wśród profesjonalistów (dzięki nauczaniu, szkoleniom i publikacjom fachowym), a także wśród ogółu społeczeństwa (poprzez filmy i literaturę popularnonaukową i beletrystyczną). W efekcie p.j. jawi się powszechnie jako zagrożenie niebezpieczne w każdej dawce i w każdych warunkach, co tworzy i utrwała powszechny strach przed tym promieniowaniem, czyli radiofobię.

Co ciekawe, taki stan rzeczy sprawia, że czasem ciężej jeszcze łatwiej uzyskać pieniądze na badania, które akcentują domniemane negatywne skutki działania p.j, pomijając potencjalne korzyści, jakie mogą przynieść ekspozycje w niskich dawkach.

² oparte na hipotezie LNT przepisy ochrony radiologicznej spowodowały pogorszenie stanu zdrowia, a nawet zgony, wśród tysięcy osób przymusowo ewakuowanych z terenów skażonych po katastrofie w Czarnobylu (by zapobiec pochłonięciu przez nich dawki rocznej rzędu 5 mGy), wskutek pozbawienia ich domów, opieki medycznej, stygmatyzacji napromieniowaniem itd.;

³ bardziej wiarygodne, oparte na współczesnych danych radiobiologicznych, są modele „progowy” i/lub „hormetyczny”.

⁴ WIKIPEDIA: według Davida Deutscha, zasada ostrożności jest „wrazem głębokiego konserwatyizmu i cały postęp ludzkości jest historią łamania istniejących w różnych kulturach «zasad ostrożności». ... zaś jedyną metodą zdobywania wiedzy jest podejmowanie eksperymentów, a co za tym idzie ryzyka eksperymentów nieudanych. Szkoda płynąca z innowacji jest zawsze skończona, tymczasem korzyści mogą być potencjalnie nieskończone.”

Uwagi końcowe

Model LNT, jako idea i podstawa regulacji w ochronie radiologicznej i codziennym korzystaniu z p.j., nie jest jedynie kwestią prawn-administracyjną czy zarzewiem akademickich dyskusji. Dominacja „ideologii” LNT ma brzemienne skutki praktyczne. Najważniejsze z nich to: a) niepotrzebna, a często zgubna, wstrzeźliwość w stosowaniu źródeł p.j. w diagnostyce medycznej; b) tworzenie, zamiast zapobiegania powstawaniu, ofiar wśród ludzi ewakuowanych z terenów skażonych po awariach jądrowych; c) skuteczność różnych „ekologów”, przedstawicieli branży paliw kopalnych i OZE, lobby administracyjnego w ochronie radiologicznej itd. w torpedowaniu rozwoju najwydajniejszego, najbezpieczniejszego i najbardziej stabilnego źródła energii, jakim są elektrownie jądrowe oraz – co należy pokreślić – d) uniemożliwienie stosowania ekspozycji całego ciała w niskich dawkach p.j. o niskim LET jako, pod wieloma względami, lepszej od innych metod leczenia uogólnionych nowotworów i innych chorób.

Pora więc już najwyższa aby porzucić fałszywą i szkodliwą hipotezę LNT (która „więzi nas w czasie przeszłym”) na rzecz modelu progowego lub hormetycznego opartego na współczesnej wiedzy o działaniu niskich dawek p.j. [Dobrzyński i wsp. 2017; Cardarelli i Ulsh, 2018; Hansen i Hingorani 2019; Ulsh i Calabrese 2019; Kaminski i wsp. 2020]. W tym kontekście, warto przytoczyć słowa Charlesa L. Sandersa z jego książki pt. „Radiobiologia i Hormeza Radiacyjna” opublikowanej w roku 2017: „Liczba ludzi, których życie może być rocznie uratowane i wydłużone przez [stosowanie] niskich dawek promieniowania jonizującego jest znacznie większa, niż łączna liczba Amerykanów poległych w wojnach w całej naszej historii.”

*prof. dr n. med. Marek Krzysztof Janiak,
były dyrektor Wojskowego Instytutu Higieny i Epidemiologii,
członek Rady ds. Bezpieczeństwa Jądrowego
i Ochrony Radiologicznej
przy Prezesie Państwowej Agencji Atomistyki*

Literatura:

- Calabrese EJ. On the origins of the linear no-threshold (LNT) dogma by means of untruths, artful dodges and blind faith. *Environ. Res.* 142: 432–442, 2015.
- Calabrese EJ, Baldwin LA. Radiation hormesis: the demise of a legitimate hypothesis. *Hum Exp Toxicol.* 19(1):76–84, 2000. doi: 10.1191/096032700678815611.
- Calabrese EJ. Ethical failings: The problematic history of cancer risk assessment. *Environ Res* 193: 110582, 2021. doi: 10.1016/j.envres.2020.110582.
- Cardarelli JJ II, Ulsh BA. It Is Time to Move Beyond the Linear No-Threshold Theory for Low-Dose Radiation Protection. *Dose Response* 16(3):1559325818779651, 2018. doi: 10.1177/1559325818779651.
- Cohen BL. Test of the linear-no threshold theory of radiation carcinogenesis for inhaled radon decay products. *Health Phys.* 68(2): 157–174, 1995. doi: 10.1097/00004032-199502000-00002.
- Cohen BL. Test of the linear-no threshold theory: rationale for procedures. *Dose Response* 3(3):369–390, 2006. doi: 10.2203/dose-response.003.03.007.
- Cheda A, Wrembel-Wargocka J, Lisiak E, Nowosielska EM, Marciniak M, Janiak MK. Single low doses of X-Rays inhibit the development of experimental tumor metastases and trigger the activities of NK cells in mice. *Radiat. Res.* 161: 335–340, 2004. doi: 10.1667/rr3123.
- David E, Wolfson M, Fraifeld VE. Background radiation impacts human longevity and cancer mortality: reconsidering the linear no-threshold paradigm. *Biogerontology* 22: 189–195, 2021. doi.org/10.1007/s10522-020-09909-4.
- Dobrzyński L, Janiak MK, Strupczewski A, Waligórski M. O konieczności zmiany paradygmatu ochrony radiologicznej - komentarz SARI - Stowarzyszenia Uczonych dla Rzetelnej Informacji o Promieniowaniu. Scientists for Accurate Radiation Information, On the need to replace the present paradigm of radiation protection - comments by SARI (Scientists for Accurate Radiation Information). *Postech Jądr.* 60(3): 2–11, 2017.
- Dobrzyński L, Fornalski KW, Reszczyńska J. Meta-analysis of thirty-two case-control and two ecological radon studies of lung cancer, *J Rad Res.* 59: 149–163, 2018. doi: 10.1093/jrr/rrx061.
- Doll R. Mortality of British Radiologists: A Lecture Note. *J. Radiat. Res.*, 46: 123–129, 2005.
- Doss M. Evidence supporting radiation hormesis in atomic bomb survivor cancer mortality data. *Dose Response* 10(4): 584–592, 2012. doi: 10.2203/dose-response.12-023.Doss.
- Golden R, Bus J, Calabrese E. An examination of the linear no-threshold hypothesis of cancer risk assessment: Introduction to a series of reviews documenting the lack of biological plausibility of LNT. *Chem Biol Interact.* 301: 2–5, 2019.
- Grant EJ, Furukawa K, Sakata R, Sugiyama H, Sadakane A, Takahashi I, Utada M, Shimizu Y, Ozasa K. Risk of death among children of atomic bomb survivors after 62 years of follow-up: a cohort study. *Lancet Oncol.* 16(13): 1316–23, 2015. doi: 10.1016/S1470-2045(15)00209-0.
- Hansen CL, Hingorani R. LNT RIP: It is time to bury the linear no threshold hypothesis. *J Nucl Cardiol.* 26(4): 1358–1360, 2019. doi: 10.1007/s12350-019-01646-7.
- Hashimoto S, Shirato H, Hosokawa M, Nishioka T, Kuramitsu Y, Matsushita K, Kobayashi M, Miyasaka K The suppression of metastases and the change in host immune response after low-dose total-body irradiation in tumor-bearing rats. *Radiat Res.* 151(6):717–124, 1999.
- Hosoi Y, Sakamoto K. Suppressing effect of low dose total body irradiation on lung metastasis: dose dependency and effective period. *Radiother Oncol.* 26(2): 177–179, 1993. doi: 10.1016/0167-8140(93)90101-d.
- ICRP [International Commission on Radiological Protection] ICRP publication 9: Recommendations of the ICRP, 1966: <http://www.icrp.org/publication.asp?id=ICRP%20Publication%209>.
- ICRP. The 2007 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. ICRP Publication 103. *Ann ICRP* 37: 2–4, 2007.

- [20] Ina Y, Tanooka H, Yamada T, Sakai K. Suppression of thymic lymphoma induction by life-long low-dose-rate irradiation accompanied by immune activation in C57BL/6 mice. *Radiat Res.* 163(2): 153-158, 2005. doi: 10.1667/rr3289.
- [21] Ina Y, Sakai K. Further study of prolongation of life span associated with immunological modification by chronic low-dose-rate irradiation in MRL-lpr/lpr mice: effects of whole-life irradiation. *Radiat Res.* 163(4): 418-423, 2005. doi: 10.1667/rr3316.
- [22] Janiak MK, Wincenciak M, Cheda A, Nowosielska EM, Calabrese EJ. Cancer immunotherapy: how low-level ionizing radiation can play a key role. *Cancer Immunol Immunother* 66: 819-832, 2017. doi.org/10.1007/s00262-017-1993-z.
- [23] Janiak MK, Pocięgiel M, Welsh JS. Time to rejuvenate ultra-low dose whole-body radio-therapy of cancer. *Crit Rev Oncol Hematol.* 160:103286, 2021. doi: 10.1016/j.critrevonc. 2021.103286.
- [24] Jaworowski Z. Observations on the Chernobyl Disaster and LNT. *Dose Response* 8(2): 148-71, 2010a. doi: 10.2203/dose-response.09-029.Jaworowski.
- [25] Jaworowski Z. Radiation hormesis—a remedy for fear. *Hum Exp Toxicol.* 29(4): 263-270, 2010b. doi: 10.1177/0960327110363974.
- [26] Kaminski CY, Dattoli M, Kaminski JM. Replacing LNT: The Integrated LNT-Hormesis Model. *Dose Response* 8(2): 1559325820913788, 2020. doi: 10.1177/1559325820913788.
- [27] Liu SZ, Liu WH, Sun JB. Radiation hormesis: its expression in the immune system. *Health Phys.* 52(5): 579-583, 1987. doi: 10.1097/00004032-198705000-00008.
- [28] Lorenz E, Hollcroft WJ, Miller E, Congdon CC, Schweisthal R. Long-term effects of acute and chronic irradiation in mice. I. Survival and tumor incidence following chronic irradiation of 0.11 r per day. *J Natl Cancer Inst.* 15(4): 1049-1058, 1955.
- [29] Luckey TD. Nurture with ionizing radiation: a provocative hypothesis. *Nutr Cancer* 34(1): 1-11, 1999. doi: 10.1207/S15327914NC340101.
- [30] Luckey TD. Radiation hormesis: the good, the bad, and the ugly. *Dose-Resp.* 4(3): 169-190, 2006. doi: 10.2203/dose-response.06-102.luckey
- [31] Luckey TD. Atomic bomb health benefits. *Dose-Response*, 6: 369-382, 2008. doi: 10.2203/dose-response.08-009.Luckey.
- [32] Miller AB, Howe GR, Sherman GJ, Lindsay JP, Yaffe MJ, Din-ner PJ, Risch HA, Preston DL. Mortality from breast cancer after irradiation during fluoroscopic examinations in pa-tients being treated for tuberculosis. *N Engl J Med.* 321(19): 1285-1289, 1989. doi: 10.1056/NEJM198911093211902
- [33] Muller HJ. Artificial transmutation of the gene. *Science* 66(1699): 84-87, 1927.
- [34] Nowosielska EM, Cheda A, Wrembel-Wargocka J, Janiak MK. Anti-neoplastic and immunostimulatory effects of low-dose X-ray fractions in mice. *Int. J. Radiat. Biol.* 87(2): 202-212, 2011. doi: 10.3109/09553002.2010.519422.
- [35] Nowosielska EM, Cheda A, Pocięgiel M, Cheda L, Szymański P, Antoni Wiedlocha A. Effects of a unique combination of the whole-body low dose radiotherapy with inactivation of two immune checkpoints and/or a heat shock pro-tein on the transplantable lung cancer in Mice. *Int J Mol Sci.* 22(12): 6309, 2021. doi: 10.3390/ijms22126309.
- [36] Ozasa K, Shimizu Y, Suyama A, Kasagi F, Soda M, Grant EJ, Sakata R, Sugiyama H, Kodama K. Studies of the mor-tality of atomic bomb survivors, report 14, 1950-2003: An overview of cancer and noncancer diseases. *Radiat Res.* 177(3): 229-243, 2012. doi: 10.1667/rr2629.1.
- [37] Preston RJ, Boice JD Jr, Brill AB, Chakraborty R, Conolly R, Hoffman FO, Hornung RW, Kocher DC, Land CE, Shore RE, Woloschak GE. Uncertainties in estimating health risks as-sociated with exposure to ionising radiation. *J Radiol Prot.* 33(3): 573-588, 2013. doi: 10.1088/0952-4746/33/3/573.
- [38] Pylak M, Fornalski KW, Reszczyńska J, Kukulski P, Wali-górski MPR, Dobrzyński L. Analysis of indoor radon data using Bayesian, random binning and maximum entropy methods. *Dose Response* 19(2):15593258211009337, 2021. doi: 10.1177/15593258211009337.
- [39] Shore RE, Beck HL, Boice JD Jr, Caffrey EA, Davis S, Gro-gan HA, Mettler FA Jr, Preston RJ, Till JE, Wakeford R, Walsh L, Dauer LT. Recent epidemiologic studies and the linear no-threshold model for radiation protection-considera-tions regarding NCRP Commentary 27. *Health Phys.* 116: 235-246, 2019. doi.org/10.1097/HP.0000000000001015.
- [40] Sutou S. Low-dose radiation from A-bombs elongated lifespan and reduced cancer mortality relative to un-ir-radiated individuals. *Genes Environ.* 40: 26, 2018. doi: 10.1186/s41021-018-0114-3.
- [41] Suzuki N, Mizukoshi T. Effect of low doses of whole body irradiation on spontaneous lung metastasis of NFSA-2ALM1 mouse tumors. *Radiat Med.* 5(6): 212-214. 1987.
- [42] Takahashi A, Ohnishi T. Molecular mechanisms involved in adaptive responses to radiation, UV light, and heat. *J Ra-diat Res.* 50(5): 385-393, 2009. doi: 10.1269/jrr.09048s. Epub 2009 Jun 13.
- [43] Thompson RE, Nelson DF, Popkin JH, Popkin Z. Case-con-trol study of lung cancer risk from residential radon expo-sure in Worcester county, Massachusetts. *Health Phys.* 94(3): 228-241, 2008. doi: 10.1097/01.HP.0000288561.53790.5f.
- [44] Tubiana M, Aurengo A., Averbek D., Bonnin A, Le Guen B, Masse R, Monier R, Valleron A-J, de Vathaire F. Dose-effect relationship and estimation of the carcinogenic effects of low doses of ionizing radiation. *Académie Nationale de Médecine, Institut de France Académie de Science.* Joint report no. 2, March 30, 2005.
- [45] Ullsh BA and Calabrese EJ. Time for Radiation Regulation to Evolve. *The Cato Institute's magazine, Regulation*, Fall 2019.
- [46] UNSCEAR. Sources and Effects of Ionizing Radiation. Vol. II: Effects. United Nations Scientific Committee on the Ef-fects of Atomic Radiation, 2000 Report to the General As-sembly, with scientific annexes. Annex J. United Nations sales publication E.00.IX.4. United nations, New York, 2000.
- [47] UNSCEAR. Sources and Effects of Ionizing Radiation. Vol. II: Effects: Scientific Annexes C, D and E. UNSCEAR 2008 Re-port. United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation. Annex D. United Nations sales publi-cation E.00.IX.4. United nations, New York, 2011.
- [48] UNSCEAR. Sources, Effects and Risks of Ionizing Radiation. Report to the General Assembly and Scientific Annexes A and B. UNSCEAR 2012 Report. United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation. Annex A. United Nations sales publication E.00.IX.4. United nations, New York, 2015.

SAFEGUARD W MAŁYCH REAKTORACH MODULARNYCH - SMR

Safeguard in Small Modular Reactors – SMR

Krzysztof Rzymkowski

Streszczenie: W opracowaniu przedstawiono podstawowe cechy systemu zabezpieczeń w projektowanych Małych Reaktorach Modularnych – SMR. Rozpowszechnienie małych reaktorów jądrowych budzi uzasadnioną obawę przed ewentualnym rozprzestrzenieniem materiałów jądrowych. Międzynarodowa Agencja Energii Atomowej (MAEA) opracowuje zalecenia dotyczące kontroli tych materiałów w nowo powstających małych reaktorach o bardzo różnorodnych konstrukcjach na etapie projektowania.

Abstract: The paper presents the basic features of the safeguard at the designed Small Modular Reactors – SMR. The spreading of small nuclear reactors gives rise to a well-founded fear of the possible proliferation of nuclear material. The International Atomic Energy Agency (IAEA) is developing recommendations for the control of these materials in newly developed small reactors of a wide variety of designs at the design stage.

Słowa kluczowe: system zabezpieczeń, pokolenia reaktorów, materiał jądrowy, paliwo jądrowe, iPWR, HTR, LMFR

Keywords: : safeguards, reactors generation, nuclear material, nuclear fuel, iPWR, HTR, LMFR

Idea budowy małych reaktorów jądrowych przeznaczonych do wytwarzania energii elektrycznej i ogrzewania, dla baz wojskowych stacjonujących w trudno dostępnych obszarach powstała w Stanach Zjednoczonych w roku 1954. Budowę realizowano w ramach Wojskowego Programu Jądrowego. W końcu XX wieku rozpoczęto w cywilnych instytucjach prace nad podobnymi rozwiązaniami, otwierając nową erę w technikach jądrowych.

Obecnie powstaje wiele bardzo nowatorskich projektów dla bardzo różnorodnych zastosowań.

Przewidywane szerokie wykorzystanie małych modularnych reaktorów jądrowych (SMR – *Small Modular Reactor*) może budzić uzasadnioną obawę przed ewentualnym rozprzestrzenieniem materiałów jądrowych i ich użyciem w celach militarnych lub przestępczych. Kontrola nierozprzestrzeniania materiałów jądrowych jest prowadzona przez Międzynarodową Agencję Energii Atomowej (MAEA). Agencja opracowuje również zalecenia dotyczące standardów bezpieczeństwa. Innym zadaniem MAEA jest ułatwianie wymiany informacji naukowych i stymulacja pokojowego zastosowania energii jądrowej. Jednakże zagrożenie terroryzmem wymusza konieczność wzmożonej i dokładniejszej kontroli i ochrony materiałów jądrowych, które, mogą być użyte do budowy broni jądrowej, jak i do celów dywersyjnych np. skażenia środowiska. MAEA rozpoczęła przygotowania do wprowadzenia systemu zabezpieczeń nowych konstrukcji małych reaktorów już na etapie projektowania.

Ochrona materiałów jądrowych

Kontrola i ochrona materiałów jądrowych wykorzystywanych w przemyśle jądrowym obejmuje cały cykl produkcyjny paliwa jądrowego, od chwili uzyskania materiałów wyjściowych, poprzez produkcję paliwa, przetwarzanie paliwa wypalonego, aż do składowania odpadów promieniotwórczych. Nielegalne uzyskanie materiałów jest możliwe na każdym etapie cyklu paliwowego. Reaktory jądrowe stanowią istotny i wrażliwy etap ochrony materiału jądrowego.

Przy projektowaniu systemu zabezpieczeń obiektu jądrowego rozważane są różne scenariusze nielegalnego pozyskiwania materiału jądrowego przez organizacje terrorystyczne. W projekcie uwzględnia się technologiczne możliwości dostępne w danym kraju, możliwość ukrycia, przesunięcia materiału jądrowego do innego wykorzystania niż deklarowane, zastąpienia elementów materiału atrapami oraz przesuwanie drobnych ilości materiału przez długi okres z różnych lokalizacji. Jest to bardzo istotne przy wprowadzaniu wielu małych reaktorów w rozproszonych lokalizacjach.

System zabezpieczeń materiałów jądrowych koncentruje się przede wszystkim na: uniemożliwieniu wykorzystania ich do produkcji broni jądrowej poza układem NPT oraz zabezpieczeniu przed kradzieżą i wykorzystaniem do działań terrorystycznych. Zgodnie z podstawową Umową o Zabezpieczeniach Wszechstronnych (*Comprehensive Safeguards Agreement*), dotyczącą wszystkich materiałów jądrowych we wszystkich obiektach państwa związanych z jądrowym cyklem paliwowym, międzynarodowe kontrole mają na celu wykrycie niezadeklarowanego

materiału jądrowego i niezadeklarowanych działań na tym materiale, niezgłoszonej produkcji lub przetwarzania materiału jądrowego w zadeklarowanych obiektach lub lokalizacjach poza obiektami, przekierowania zadeklarowanego materiału do innych zastosowań niż zadeklarowano.

Podstawowym dokumentem na podstawie, którego projektowany jest system zabezpieczeń dla danego obiektu jest **informacja projektowa** (*Design information*) zawierająca informacje dotyczące zabezpieczeń materiału jądrowego i jego wykorzystania w obiekcie. Zawierająca informacje identyfikujące obiekt jego charakterystykę ogólną, położenie geograficzne adresy urzędowe, postać, ilość, rozmieszczenie i przepływ materiału jądrowego, plan obiektu z uwzględnieniem elementów, w których materiał jest wytwarzany lub przetwarzany, elementów związanych ewidencją materiału stosowanego zamykania (plombowania) i nadzoru, opis procedur ewidencji i przeprowadzania spisu z natury, pomiarów, rejonów bilansu materiałowego.

W systemie zabezpieczeń obiekty jądrowe podzielono na dwie kategorie:

- obiekt z elementami policzalnymi, w którym materiał jądrowy jest używany w postaci elementów policzalnych (sztuk),
- obiekt z materiałem niepoliczalnym indywidualnie, w którym materiał jądrowy jest używany w postaci masowej (proszek, ciecz).

Reaktory SMR w większości należą do pierwszej kategorii. Wyjątek stanowią reaktory z rdzeniem ze stopionymi solami.

Podstawowym parametrem systemu zabezpieczeń jest miara określana jako – **znacząca ilość** (*Sinificant Quantity – SQ*). Znacząca ilość – jest to przybliżona ilość materiału rozszczepialnego, dla której nie można wykluczyć prawdopodobieństwa budowy jądrowego urządzenia wybuchowego przy zastosowaniu różnych metod przetwarzania tego materiału. Ponieważ w czasie procesu produkcyjnego występują ubytki materiału wartość SQ nie musi odpowiadać wartości masy krytycznej. Np. 8 kg Pu, 8 kg ^{233}U , 25 kg ^{235}U , 75 kg ^{235}U , 20 t Th. Ilość materiału jądrowego w rdzeniu małego reaktora modularnego jest w porównaniu z reaktorami energetycznymi niewielka, co zmniejsza ryzyko pozyskiwania go do budowy urządzeń wybuchowych i ułatwia ochronę fizyczną ze względu na małe wymiary rdzenia.

Podstawą systemu kontroli jest **ewidencja materiałów jądrowych**, prowadzona oddzielnie dla każdego rejonu bilansu materiałowego, zawierająca informacje o materiale jądrowym (składzie, ilości, lokalizacji, zmianach składu, ruchu materiału). Uzupełnieniem ewidencji materiałowej są **systemy obserwacyjno-rejestrujące** umożliwiające zachowanie ciągłości informacji o materiale jądrowym, śledzenie jego transportu wewnątrz obiektu po ustalonych trasach, spraw-

dzenie, czy materiał jest testowany w wyznaczonych miejscach pomiarowych, potwierdzenie nienaruszalności plombowanych partii materiału.

System kontroli materiałów jądrowych, powinien zapewnić, jak najskuteczniejsze i najwydajniejsze spełnienie międzynarodowych zobowiązań kraju w zakresie zabezpieczeń. Wszystkie obiekty jądrowe w państwie, w którym obowiązuje kompleksowa umowa o zabezpieczeniach podlegają kontroli MAEA. System zabezpieczeń reaktorów SMR musi uwzględniać różnorodność stosowanych konstrukcji reaktorów (np. budowy rdzenia, rodzaju paliwa) sposób postępowania z wypalonym paliwem, odpadami radioaktywnymi, transportem. Dlatego tak ważne jest rozpoczęcie opracowania systemu na wczesnym etapie projektowania reaktora. Weryfikacja materiałów powinna być przeprowadzana w najbardziej efektywny sposób przy minimalnym obciążeniu operatora. Takie przygotowanie na etapie projektowania pozwoli uniknąć późniejszych, kosztownych modyfikacji w eksploatowanych reaktorach. Dlatego współpraca z konstruktorami SMR i władzami państwowymi jest bardzo istotna.

Opracowanie procedur oraz utrzymanie optymalnego stanu systemu zabezpieczeń zależy od procesów technologicznych, do których będzie używany reaktor jądrowy. Znajomość specyfiki obiektu, umożliwia projektantowi systemu zabezpieczeń określenie istotnych punktów przepływu materiałów jądrowych, wyboru punktów pomiarowych i metod pomiaru, wyboru systemów i miejsc monitorowania wykorzystania i składowania materiałów jądrowych, przygotowanie planu i sposobów weryfikacji informacji projektowej stanowiącej jeden z ważniejszych elementów weryfikacji wykorzystania materiałów jądrowych w obiekcie.

Przewidywane szerokie zastosowanie małych modularnych reaktorów jądrowych w różnych dziedzinach wynika z ich podstawowych zalet, przede wszystkim z obniżenia kosztów i skrócenie czasu budowy. Reaktor i cały zestaw urządzeń będzie produkowany w warunkach fabrycznych, a następnie przetransportowany do przygotowanego miejsca pracy reaktora. Modułowa konstrukcja umożliwi zwiększenie mocy zestawu reaktorowego. Projekty SMR powstają w wielu krajach głównie w Rosji, USA, Chinach, Kanadzie, Wielkiej Brytanii, Japonii. Na świecie powstało około 55 projektów.

Zgodnie z klasyfikacją przyjętą przez MAEA, małe reaktory to reaktory o mocy elektrycznej mniejszej niż 300 MW(e). Reaktory średniej wielkości to reaktory o mocy elektrycznej 300–700 MW(e). Konstrukcje reaktorów SMR są bardzo różnorodne. Oprócz lądowych reaktorów stacjonarnych pojawiły się projekty reaktorów przewoźnych zarówno lądowych, jak i morskich (elektrownie na barkach) lub jako jednostki napędowe, a nawet zdalnie sterowane reaktory umieszczane pod wodą (również, jako elektrownie). Planowane są także instalacje wielomodułowe (tj. 2–12 połączonych indy-

widualnych energetycznych modułów reaktorowych o mocy 10–300 MW(e) na moduł. Różnorodność wynika z przeznaczenia reaktora i ma wpływ na konstrukcję budowy, sposób chłodzenia, wprowadzenia automatyzacji, a nawet stosowanie zdalnego sterowania. W większości proponowanych rozwiązań dąży się do większego upakowania elementów automatyki sterującej i pomiarowej wewnątrz obudowy reaktora. Systemy chłodzenia reaktorów są również bardzo zróżnicowane począwszy od klasycznych metod chłodzenia wodą, stosowane są inne metody chłodzenia gazem i metalami ciekłymi (sód, ołów, mieszanina ołowiowo bizmutowa). Różnorodność koncepcji budowy reaktorów SMR wymaga wdrożenia bardziej wyrafinowanych metod ich kontroli dostosowanych indywidualnie do danego typu reaktora.

W tabelach przedstawiono aktualne zaawansowane propozycje będące w trakcie opracowywania. Powstające nowe propozycje budowy reaktorów wymagają opracowania nowych dokładniejszych metod weryfikacji dla rzadkich rozwiązań, jak np. reaktorów z rdzeniem kulowym, reaktorów z ciekłymi solami, reaktorów modularnych. Jednym z ważnych problemów wymagających nowego podejścia do opracowywania systemu weryfikacji w proponowanych rozwiązaniach jest zmiana wzbogacenia uranu w paliwie reaktora. Dotychczas w reaktorach jądrowych stosowano paliwo o niskim wzbogaceniu, do 4% LEU (ang. *Low Enrichment Uranium*) (wzbogacenie to stosunek sumarycznej wagi izotopów U^{233} i U^{235} do całkowitej wagi używanego uranu wyrażany w %). W niektórych reaktorach badawczych wykorzystywane jest paliwo

Tabela 1. SMR chłodzone wodą

Projekt firmy	Typ	Twórca technologii	Ilość modułów	Moc MWe
CAREM -25	iPWR	CNEA Argentina	1	27
mPOWER	iPWR	B&W Stan.Zjed.	2	360
NuScale	iPWR	NuSale Stan.Zjed.	12	340
SMART	iPWR	KAERI Korea Pł	1	1000
IRIS	iPWR	IRIRS Włochy	1	125
SMR – 160	iPWR	Holtec Stan.Zjed.	1	160
ACP100	iPWR	CNNC//NPC Chiny	2	200
VBR -100	iPWR	OKHM Afrikanow Rosja	1	300
Westinghouse SMR	iPWR	Westinghouse Electric Stan.Zjed.	1	225
AHWR – 100 LEU	iPWR	BARC Indie	1	300

iPWR – Integral Pressurized Water SMR – zintegrowany ciśnieniowo – wodny SMR

Tabela 2. SMR chłodzone gazem

Projekt firmy	Typ	Twórca technologii	Ilość modułów	Moc MWe
HTR - PM	HTGR	INET Tsinghua Uniwersytet Chiny	2	210
EM	HTGR	General Atomic Stan.Zjed.	1	240
PBMR	HTGR	Eskom PBMR RPA	1	165

HTGR – High Temperature Gas Reactor – Wysoko temperaturowy chłodzony gazem reaktor

Tabela 3. SMR chłodzone metalami

Projekt firmy	Typ	Twórca technologii	Ilość modułów	Moc MWe
SYBE - 100	LMFR	AKME Rosja	1	101
BREST – OD 300	LMF	RDIPE Rosja	1	100
PRISM	LMF	GE Nuckear Energy Stan.Zjed.	4	1244
4S	LMF	Toshiba Japonia	1	10-30

LMFR – Liquid Metal Fast Reactor – reaktor prędkie chłodzony ciekłym metalem

Tabela 4. SMR oparte o doświadczenia morskie

Projekt firmy	Typ	Twórca technologii	Ilość modułów	Moc MWe
KLT – 40S	FPU,TNPP	OKHM Afrikanow Rosja	2	70
Flexblue		DCNS Francja	1	160

o wyższym wzbogaceniu HEU (ang. *High Enrichment Uranium*), nawet powyżej 20%. Przy wykorzystywaniu paliwa HEU w tych reaktorach stosowane są zaostrzone kryteria kontroli i podobne rozwiązanie zalecane będzie dla SMR. Obecnie pojawiają się projekty małych reaktorów modularnych z paliwem wzbogaczonym do 20%. Wynika to częściowo z konieczności wydłużenia czasu wymiany paliwa w rdzeniu, która jest utrudniona. Wydłużenie czasu pracy reaktora powoduje większe wypalenie redukując jego przydatność do wykorzystania w nieuprawnionych działaniach np. budowy broni jądrowej. W skrajnym przypadku załadowane paliwo przez producenta i zaplombowaniu rdzenia może być wykorzystywane przez cały okres eksploatacji reaktora wynoszący 25-30 lat. Takie rozwiązanie stosowane jest dla systemów napędowych łodzi podwodnych i wymaga wzbogacenia, około 95%, co w zastosowaniach cywilnych jest niedopuszczalne. Wydłużenie czasu pomiędzy kolejnymi wymianami paliwa przez zwiększenie wzbogacenia do np. 20% wymaga dodatkowych zabezpieczeń. Niewielkie wymiary fizyczne paliwa powodują, że elementy paliwowe nie zawierają większej ilości materiału jądrowego i aby uzyskać znaczącą jego ilość, trzeba ukryć dużo elementów.

Modularna konstrukcja reaktorów umożliwia budowę elektrowni jądrowej składającą się z indywidualnych bloków energetycznych o określonej mocy łączone w zestawy zależnie od potrzeb energetycznych. Każdy moduł stanowi zintegrowany blok np. lekko-wodnego reaktora jądrowego podłączonego z własnym zestawem urządzeń, włącznie z turbiną parową i generatorem. Basen wypalonego paliwa jest wspólny dla wszystkich modułów. Wymiana paliwa w każdym z modułów następuje po kolei zgodnie zaplanowanym czasem wypalenia paliwa. Podczas operacji wymiany reaktor zostaje fizycznie przesunięty ze swojego roboczego pola do stanowiska, gdzie następuje przeładowywanie paliwa. Wypalone paliwo jest transportowane do basenu. Przy większej liczbie reaktorów proces wymiany paliwa zbliża się, z punktu widzenia kontroli systemu zabezpieczeń do systemu pracy ciągłej obiektu, ponieważ jeden reaktor lub kilka zawsze są otwarte. Wymaga to stałej (całodobowej) obecności inspektora MAEA. Jednocześnie przeniesienie reaktora do innego pomieszczenia związane jest z przepływem materiału jądrowego w obiekcie, co też wymaga kontroli. Nowym problemem dla projektantów systemu zabezpieczeń jest nieprzezroczystość chłodziwa. Przy innym chłodziwie niż woda, np. ciekły metal, utrudniona jest identyfikacja elementów paliwowych wymagająca specjalizowanego legalizowanego urządzenia. Dodatkową trudność identyfikacji elementów paliwowych jest sposób ich składowania.

Małe reaktory posiadają mniejsze rozmiary rdzenia i automatycznie mniejsze i krótsze elementy paliwo-

we. Wpływa to na sposób składowania wypalonego paliwa, które zwykle składowane jest w pozycji pionowej w celu chłodzenia. W celu zmniejszania powierzchni przechowywania i względów ekonomicznych paliwo układane jest warstwami, co utrudnia jego identyfikację. Sposób kontroli paliwa wymaga uzgodnień. Jednym z proponowanych rozwiązań jest umieszczenie sprawdzonych elementów paliwowych w zaplombowanym koszu. Późniejsze kontrole polegają na sprawdzeniu nienaruszalności plomb.

Małe wymiary paliwa ułatwiają ukrycie większej liczby elementów do niekontrolowanego wykorzystania materiału jądrowego.

Uzupełnieniem ewidencji materiałowej przy kontroli przepływu materiału są systemy obserwacyjno-rejestrujące umożliwiające zachowanie ciągłości informacji o materiale jądrowym. Śledzenie transportu materiału wewnątrz obiektu jest powiązane ze sprawdzeniem, czy jest on testowany w wyznaczonych punktach pomiarowych. Pozwala również obserwować czy nie manipulowano przy zainstalowanych urządzeniach MAEA oraz potwierdzić nienaruszalność plomb. Zdalnie sterowane systemy obserwacyjno-rejestrujące są używane w trudno dostępnych obszarach obiektu, a w odległych lokalizacjach np. wyspach, słabo zaludnionych terenach stanowią kluczowe narzędzie systemu zabezpieczeń. Dlatego ważna jest współpraca projektantów systemu zabezpieczeń i projektantów reaktorów modułowych pozwalająca ustalić istotne procesy i obszary, w których używany jest materiał jądrowy, położenie stacjonarnych przyrządów pomiarowych, miejsca położenia plomb i innych elementów narażonych na działania dywersyjne i sabotaż.

Reaktory iPWR

Projektowane zintegrowane reaktory modularne iPWR moderowane i chłodzone wodą są podobne do energetycznych reaktorów typu PWR i najprawdopodobniej najszybciej uzyskają licencje dopuszczające je do użytkowania. Większość sprawdzonych w reaktorach PWR metod kontroli materiału jądrowego można dostosować do nowych konstrukcji. Wynika to głównie z podobieństwa budowy elementów paliwowych, które są elementami policzalnymi (sztuki). Cały materiał jądrowy używany w obiekcie jest zawarty w poszczególnych elementach paliwowych przed i po wypaleniu. Kontrola materiału jądrowego sprowadza się do sprawdzenia deklaracji o składzie izotopowym materiału po wypaleniu, który jest przypisany do poszczególnych elementów paliwowych.

Nowym problemem związanym z reaktorami iPWR jest załadowanie paliwa do rdzenia reaktora i jego zaplombowanie, co ma nastąpić u producenta. Ponieważ obiekt gdzie budowany jest reaktor nie jest

obiektem jądrowym objętym umową NPT wymaga specjalnych uzgodnień i ustalenia nowych procedur. W tym celu należałoby wprowadzić w Kwestionariusz Informacji Projektowej (DIQ) producenta reaktorów, a przed załadowaniem paliwa i jego plombowaniem powinna być przeprowadzona inspekcja zgodnie z obowiązującymi kryteriami zabezpieczeń. Wszystkie operacje dotyczące materiału jądrowego (zarówno u producenta jak i w miejscu instalacji reaktora) powinny być wykonywane pod kontrolą dublowanych systemów obserwacyjno rejestrujących z możliwością zdalnej komunikacji.

Przewidywane są też pewne trudności formalne przy eksporcie zaplombowanych reaktorów iPWR do innego kraju i ewentualnego tranzytu, ponieważ będą transportowane materiały jądrowe, co wymaga uzgodnień międzypaństwowych.

Reaktory HTR

Wysokotemperaturowe modularne reaktory HTR (lub VHTR – *Very High Temperature Reactor*, HTGR – *High Temperature Gas Reactor*) należą do reaktorów IV generacji. Powstały dwa podstawowe typy reaktorów wykorzystujących nową kulową konstrukcję elementów paliwowych – paliwo TRISO. Paliwo ma postać nieoznakowanych kulek o średnicy mniejszej niż milimetr. Każda kulka zawiera jądro (około 0,5 mm) tleno węgliku uranu U^{235} (lub dwutlenku uranu), wzbogaconego do 20% (od 3% do 19%). Paliwo jest otoczone warstwami węgla i węgliku, który w warunkach awaryjnych może przetrwać wzrost temperatury do 1600°C.

W konstrukcji reaktora ze złożem kulowym (*pebble-bed reactor*) elementem paliwowym w reaktorze są kule grafitowe (moderator) o średnicy 60 mm otoczone warstwą ceramiczną z węgliku krzemu, zawierające tysiące kulek paliwa TRISO. Wszystkie kule paliwowe są umieszczone w pojemniku grafitowym będącym jednocześnie reflektorem neutronów. Znajdują się w nim również pręty sterujące.

Reaktory z rdzeniem pryzmatycznym składają się z sześciokątnych bloków grafitowych, przylegających szczelnie do siebie. Paliwo TRISO umieszczone w grafitowych cylindrach jest wsuwane w kanały paliwowe. W blokach pryzmatycznych znajdują się pionowe kanały przepływu chłodziwa – gazu, pręty regulacyjne. Chłodziwem w reaktorach HTR jest hel, azot lub dwutlenek węgla. Osiągana temperatura pracy wynosi 700-950°C do około 1000°C. Nie są stosowane aktywne systemy bezpieczeństwa. Wymiana paliwa w reaktorze z rdzeniem kulowym odbywa się w sposób ciągły bez przerw w pracy reaktora. W reaktorach z rdzeniem pryzmatycznym wymiana paliwa jest dokonywana w okresach od 1 do 3 lat. Reaktor jest wyłączany (co około 6-10 lat) w celu wymiany struktur grafitowych w rdzeniu. Reaktory HTR o ujemnym współczynniku

temperaturowym reaktywności, są z natury bezpieczne, ale dla bezpieczeństwa są instalowane poniżej poziomu gruntu.

Duża ilość nieoznakowanych (bez własnych numerów identyfikacyjnych) elementów paliwowych, sposób jego wymiany paliwa i składowania wypalonego paliwa nie pozwala na bezpośrednią adaptację systemu zabezpieczeń ze stosowanego w reaktorach energetycznych. Reaktory tego typu stanowią coś pośredniego pomiędzy obiektami z elementami policzalnymi i elementami niepoliczalnymi używanymi w postaci masowej. W systemie zabezpieczeń brakuje wypracowanych zaleceń kontroli. Wydaje się, że najlepszym rozwiązaniem jest podejście hybrydowe, w którym stosuje się monitorowanie przepływu paliwa przez dodatkowe zaawansowane systemy obserwacji i zamykania (plombowania) oraz wprowadzanie weryfikacji i księgowości materiału stosowanej przy kontroli masowych materiałów jądrowych. Systemy zamykania/obserwacji są umieszczane głównie w miejscach przepływu paliwa (w śluzach) magazynu świeżego paliwa, reaktora i przechowalnika paliwa wypalonego. Powinny to być systemy bezobsługowe z możliwością komunikacji zdalnej, a w bardziej wrażliwych miejscach dublowane. W obszarach składowania pojemniki z paliwem powinny być plombowane. Proponuje się również wprowadzenie monitorów przepływu rozróżniających paliwo świeże od wypalonego, wykrywających paliwo uszkodzone oraz wprowadzenie systemu identyfikacji elementów paliwowych metodą rozpoznawania ich za pomocą ultradźwięków. Wybór systemu zależy od ilości używanego materiału jądrowego oraz jego składu (izotopy uranu, pluton, tor). Pewien problem, nie do końca rozwiązany stanowi zagadnienie postępowania z wypalonym paliwem PBMR (*Pebble Bed Modular Reactor*) z reaktora z rdzeniem kulowym. Początkowo uznawano, że materiał jądrowy w zużytym paliwie PBMR jest nie do odzyskania. Ostatecznie opracowano laboratoryjnie metodę odzyskiwania użytecznych izotopów.

Reaktory LMFR

Reaktory SMR chłodzone metalami są reaktorami powielającymi (ang. *Fast Breeder Reactor* – FBR), w których rozszczepienia jąder paliwa wywoływane są przez neutrony prędkie, tzn. przez neutrony o dużej energii (posiadające energie powyżej 0,5 MeV lub więcej), w przeciwieństwie do neutronów termicznych wykorzystywanych w reaktorach termiczno-neutronowych stosowanych np. w reaktorach energetycznych. W reaktorach (ang. *Liquid Metal Fast Reactor* – LMFR) nie stosuje się moderatora neutronów. Reaktory na neutrony prędkie są zaprojektowane tak, aby efektywniej wykorzystywać materiał jądrowy zawarty w paliwie.

W reaktorach LMFR, jako paliwo wykorzystuje się U^{238} . Prędkie neutrony są idealne do produkcji plutonu, ponieważ absorbowane przez U^{238} , tworzą Pu^{239} . Wysoka efektywność produkcji składnika paliwa jądrowego może znacznie zmniejszyć obawy dotyczące braku dostaw paliwa. Reaktory powielające charakteryzują się wysokim stopniem wypalenia paliwa, ponieważ produkty rozszczepienia są również wypalane. Chłodziwem w obecnie projektowanych reaktorach SMR LMFR jest ołów lub mieszanina ołowiu i bizmutu, oraz sód.

Przewiduje się, że ten typ reaktorów będzie w przyszłości dominujący.

Reaktory prędkie chłodzone stopionym ołowiem stopiony ołów lub mieszanina ołowiu i bizmutu, są obojętne w stosunku do wody lub powietrza, ale są silnie korozyjne i wymagają bardziej wytrzymałych materiałów w systemie chłodzenia. Przewidywany czas użytkowania projektowanych obecnie konstrukcji modułowych o mocy 300-400 MWe wynosi 15-20 lat przy temperaturze pracy wynosi, około 550°C . W dalszej przyszłości przy specjalizowanej konstrukcji i użyciu bardzo wytrzymałych na korozję materiałów temperatura pracy może osiągać 800°C . Reaktory te przewidziane są do produkcji wodoru. Odpowiada to rosyjskiej technologii szybkiego reaktora BREST stosowanego w reaktorach w okrętach podwodnych.

Reaktory chłodzone ciekłym sodem

SFR (*Sodium Fast Reactor*) umożliwia osiągnięcie wysokiej mocy przy małej objętości chłodziwa i niskim ciśnieniu. Sód ma wysoką temperaturę wrzenia (883°C), nie ma więc potrzeby stosowania ciśnienia wyższego od atmosferycznego. Wyższe ciśnienie wymaga kosztownej instalacji systemu chłodzenia. Temperatura pracy reaktora wynosi $500-550^{\circ}\text{C}$. Opracowano różne warianty reaktorów:

- modułowy o mocy typ 50-150 MWe z aktywnymi zawartymi w paliwie metalicznym uranowo-plutonowym, wymagającym obróbki elektrometalurgicznej,
- basenowy o mocy 300-1500 MWe,
- pętlowy o mocy 600-1500 MWe z konwencjonalnym paliwem MOX z dodatkiem aktywności.

Praktyczne zastosowanie reaktorów prędkich chłodzonych sodem jest bardzo ograniczone, mimo że teoretycznie reaktor powielający jest w stanie wytworzyć znacznie więcej energii niż reaktor LWR, używając tej samej ilości uranu.

Budowa reaktorów chłodzonych sodem wykorzystanych w energetyce jest bardziej złożona w porównaniu z reaktorami LWR. Sód, pochłaniając neutrony przy przepływie przez rdzeń, tworzy izotop emitujący promieniowanie gamma. Powoduje to konieczność stosowania pośredniego obiegu chłodzenia między obie-

giem pierwotnym, a parowym obiegiem roboczym. Reaktory sodowe mają 3 obiegi chłodzenia: pierwotny zawierający radioaktywny sód, wtórny z nieaktywnym sodem i trzeci będący obiegiem parowo-wodnym. Każda drobna awaria powoduje znaczne koszty, ponadto sód charakteryzuje się wysoką aktywnością chemiczną, w zetknięciu z wodą reaguje on gwałtownie.

Paliwo reaktorów wykorzystujących neutrony prędkie, zarówno świeże, jak i wypalone zawiera znaczne ilości Pu oraz HEU. Wymusza to wprowadzenie ściślejszej kontroli materiałów jądrowych, zwiększając ilość kontroli, rozszerzenia zakresu pomiarów, rozbudowy specjalizowanych systemów obserwacyjno-rejestrujących. Paliwo stosowane w reaktorach LMFR jest bardziej wzbogacone niż w reaktorach energetycznych. W czasie reakcji jądrowych podczas pracy reaktora z uranu (U^{238}) powstaje pluton (Pu^{239}). Reaktor wytwarza więcej Pu niż go zużywa. Pluton (Pu^{239}) jest używany w broni jądrowej. Reaktory są przewidziane do bardzo długiej eksploatacji.

Budowa reaktorów LMFR jest zbliżona do budowy reaktorów energetycznych i wiele elementów systemu zabezpieczeń może być bezpośrednio do nich adaptowana uwzględniając zaostrożenia kryteriów. Pewien problem stanowi obecność plutonu w świeżym i wypalonym paliwie. Powstawanie w dużych ilościach izotopu Pu^{239} o wysokiej czystości w reaktorach LMFR i jego odzyskiwanie z wypalonego paliwa w zamkniętym cyklu paliwowym wymaga specjalnej uwagi ze względu na konieczność stałej obserwacji transferów elementów paliwowych w obiektach i między nimi. Obecnie prowadzone są prace badawcze nad opracowaniem schematu przepływu zużytego materiału jądrowego znajdującego się w każdym z obiektów, FBRFC; opracowanie narzędzia do oceny skuteczności ochrony materiału jądrowego i barier wewnętrznych i zewnętrznych zapobiegających ukryciu wypalonego paliwa; oraz uszczelnienie systemu zabezpieczeń w rejonach bilansu materiałowego, okresu bilansu materiałowego, kluczowych punktów pomiarowych i programu monitoringu.

Szerokie wprowadzenie reaktorów SMR wymaga:

- opracowania umów międzypaństwowych dotyczących ochrony i transportu wysokowzbogaczonego paliwa,
- opracowania i analizy możliwych scenariuszy sabotażu i ataków terrorystycznych na SMR oraz instrukcji ich zapobiegania,
- opracowania nowych koncepcji zabezpieczeń, nowych detektorów i systemów obserwacyjno-rejestrujących sterowanych zdalnie,
- opracowania rozwiązań systemu zabezpieczeń dla transportu elementów paliwowych zawierających pluton.

Przy wprowadzaniu nowych rozwiązań konstrukcyjnych reaktorów IV generacji należy zwrócić uwagę

nie tylko na zapewnienie warunków weryfikacji wymagań układu NPT, ale i na bezpieczeństwo jądrowe, szczególnie przy rozbudowaniu sieci małych reaktorów modułowych. System zabezpieczeń wymaga stałego unowocześniania i ulepszania krajowych systemów kontroli materiałów jądrowych, zwiększenia efektywności i sprawności kontroli materiałów jądrowych i radioaktywnych, ulepszenia i modernizowania krajowych regulacji prawnych oraz ich ścisłego powiązania z systemami międzynarodowymi. Dotyczy to w szczególności procedur powiadamiania o kradzieży, czy akcie sabotażu oraz wzmocnienia systemów kontroli handlu materiałami jądrowymi w celu eliminacji ich nielegalnego obrotu i przemytu.

*dr inż. Krzysztof Rzymkowski,
Stowarzyszenie Ekologów na
Rzecz Energii Nuklearnej,
Warszawa*

Literatura:

- [1] Virgli Nicole, The Impact of Small Modular Reactors on Nuclear Non-Proliferation and IAEA Safeguards Disarmament and Non-Proliferation (VCDNP) Vienna May 2020
- [2] IAEA Nuclear Energy Series, Instrumentation and Control Systems for Advanced Small Modular Reactors, No. NP-T-3.19 Vienna 2017
- [3] IAEA Nuclear Energy Series, Technology Road Map for Advanced Small Modular Reactors, No. NR_T-1.18 Vienna 2021
- [4] Rzymkowski Krzysztof, Międzynarodowy system zabezpieczeń w nowych reaktorach jądrowych. BJOR PAA Nr 3-4 2020, Warszawa
- [5] Lankevich Alexxey, The main nonproliferation and safeguards challenges facing the small modular reactors, AtomInfoRu April 2020
- [6] Boyer Brian D., Understanding the Specific Small Modular Reactors Safeguards, INPRO Vienna. 18-21 October 2016



SPOTKANIE W SPRAWIE PROJEKTÓW WDROŻENIOWYCH

W dniu 5 maja br. odbyło się w Instytucie Chemii i Techniki Jądrowej (IChTJ) spotkanie Piotra Dziadzio, wiceministra klimatu i środowiska z dyrektorami Instytutów badawczych nadzorowanych przez Ministerstwo Klimatu i Środowiska.

W spotkaniu wzięli również udział wiceprezes Narodowego Funduszu Ochrony Środowiska i Gospodarki Wodnej, dr Przemysław Ligenza oraz dyrektor Departamentu Innowacji i Wodoryzacji Gospodarki Piotr Dowżenko.

Głównym celem spotkania było omówienie możliwości finansowania technologii wybranych przez Ministerstwo do wdrożenia spośród projektów zgłoszonych przez instytuty. Wśród 8 projektów wdrożeniowych zakwalifikowanych do finansowania 3 projekty zostały opracowane w IChTJ, a mianowicie:

- Radiacyjna technologia sterylizacji materiałów medycznych i przeszczepów,
- Projekt i budowa pilotażowej instalacji termicznej przeróbki odpadów promieniotwórczych,
- Biogazownia rolnicza.

Wprowadzeniem do dyskusji było wystąpienie dyrektora Dowżenka, który omówił różne formy finansowania projektów wdrożeniowych przez Narodowy



Fot. 1. Od lewej, wiceminister klimatu i środowiska Piotr Dziadzio, wiceprezes NFOŚiGW Sławomir Mazurek, z MKiŚ Tomasz Mieczkowski, dyrektor Instytutu Chemii i Techniki Jądrowej prof. dr. hab. Andrzej Chmielewski

Fundusz Ochrony Środowiska i Gospodarki Wodnej – NFOŚiGW. Dyskusja w znacznej części poświęcona była sfinansowaniu zakupu nowego akceleratora dla Stacji Sterylizacji ICHTJ. Stacja wyposażona jest w rosyjski akcelerator „Elektonika”, który wymaga corocznej wymiany magnetronu produkowanego jedynie w Rosji. Jest to jedyna duża stacja sterylizacji radiacyjnej produktów medycznych oraz przeszczepów (zob. schemat kolorowy asortymentów i tabela dotycząca przeszczepów).

W wystąpieniu podsumowującym Minister Działo zapewnił, że prace nad zapewnieniem finansowania wybranych projektów wdrożeniowych będą kontynuowane oraz zaapelował do dyrektorów IB o podjęcie działań w celu przygotowania wspólnych planów badawczych związanych z ochroną środowiska.

*prof. dr hab. Jacek Michalik,
Instytut Chemii i Techniki Jądrowej,
Warszawa*



KONFERENCJA SIOR 2022 NOWE KIERUNKI ROZWOJU BEZPIECZEŃSTWA JĄDROWEGO I OCHRONY RADIOLOGICZNEJ W POLSCE

W dniach 9-10 maja br. w poznańskim Hotelu Mercure odbyło się coroczne spotkanie Stowarzyszenia Inspektorów Ochrony Radiologicznej. W tym roku hasłem przewodnim były „Nowe kierunki rozwoju bezpieczeństwa jądrowego i ochrony radiologicznej w Polsce”.



Fot. 1. Prezes PAA dr Łukasz Młynarkiewicz, za stołem siedzą Prezes SIOR Maria Kubicka i prof. Maciej Budzanowski (fot. SIOR)

Wydarzenie zostało objęte patronatem Prezesa Państwowej Agencji Atomistyki. Stowarzyszenie kontynuuje cykliczne spotkania, których celem jest omówienie aktualnych kwestii prawnych związanych z przepisami w zakresie ochrony radiologicznej. Do udziału w spotkaniu zaproszono poza IOR również osoby związane z wykorzystaniem promieniowań jonizujących w przemyśle, ochronie zdrowia, rolnictwie, ochronie środowiska, nauce i kosmonautyce. Patronaty medialne nad konferencją objęły: Inżynier i Fizyk Medyczny oraz Postępy Techniki Jądrowej.

Posiłkując się materiałami konferencyjnymi staraliśmy się wymienić zasadnicze kwestie poruszane w czasie spotkania. Odsyłamy jednocześnie do obszernych prezentacji zamieszczonych na stronie SIOR i kontaktów z autorami wykładów.

W otwierającym konferencję wykładzie dr Łukasz Młynarkiewicz, Prezes Państwowej Agencji Atomistyki omówił wyzwania, jakie stoją przed PAA w kontekście Programu Polskiej Energetyki Jądrowej. W trakcie realizacji PPEJ podstawowym zadaniem będzie sprawowanie nadzoru oraz egzekwowanie przestrzegania wymagań i norm bezpieczeństwa dla elektrowni jądrowych. Prezes PAA będzie realizował swoje funkcje na wszystkich etapach cyklu życiowego obiektów jądrowych, począwszy od etapu oceny środowiskowej i lokalizacji, przez projektowanie, budowę, rozruch, eksploatację, aż do ich likwidacji. Będzie sprawdzał i potwierdzał wypełnienie przez inwestora wymagania bezpieczeństwa jądrowego i ochrony radiologicznej. W tym celu oceni przedłożoną dokumentację i wykona niezbędne analizy bezpieczeństwa. Prezes PAA i inspektorzy dozoru jądrowego będą również prowadzić kontrole obiektu jądrowego w trakcie jego budowy, rozruchu i eksploatacji.

W kolejnych wystąpieniach Iwona Matujewicz i Agnieszka Jaworska-Sobczak z Departamentu Ochrony Radiologicznej PAA omówiły najnowsze zmiany w prawie atomowym. W 2021 r. weszły w życie m.in. następujące akty wykonawcze: rozporządzenie Rady Ministrów z dnia 10 marca 2021 r. w sprawie przypadków, w których działalność związana z narażeniem na promieniowanie jonizujące nie wymaga zezwolenia, zgłoszenia albo powiadomienia, oraz przypadków, w których może być wykonywana na podstawie zgłoszenia albo powiadomienia (Dz. U. poz. 796, data wejścia w życie: 29 lipca 2021 r.), zwane dalej „rozporządzeniem o wyłączeniach”; rozporządzenie Rady Ministrów z dnia 30 sierpnia 2021 r. w sprawie dokumentów wymaganych przy składaniu wniosku o wydanie zezwolenia na wykonywanie działalności związanej z narażeniem na działanie promieniowania jonizującego albo przy zgłoszeniu wykonywania tej działalności (Dz. U. poz. 1667, data wejścia w życie: 25 września 2021 r.), zwane dalej „rozporządzeniem dokumentowym”; rozporządzenie Rady Ministrów z dnia 1 października 2021 r. w sprawie



Fot. 2. Większość uczestników wzięła udział w konferencji w trybie stacjonarnym (fot. SIOR)

zabezpieczenia źródeł promieniotwórczych (Dz. U. poz. 1958, data wejścia w życie: 12 listopada 2021 r.). Wydanie nowych rozporządzeń do ustawy – Prawo atomowe spowodowane było m. in. koniecznością wprowadzenia do prawa polskiego nowej formy reglamentacji działalności związanej z narażeniem na działanie promieniowania jonizującego w postaci powiadomienia (rozporządzenie o wyłączeniach). Ponadto w nowym rozporządzeniu dokumentowym należało uwzględnić zmiany katalogu działalności wymagających autoryzacji, o których mowa w art. 4 ustawy – Prawo atomowe. Dodatkowo należało w myśl art. 43 ust. 10 ustawy – Prawo atomowe wprowadzić do krajowego porządku prawnego nowe uregulowania określające wymagany poziom zabezpieczeń dla poszczególnych kategorii źródeł promieniotwórczych oraz określić dla poszczególnych poziomów zabezpieczeń źródeł promieniotwórczych środki organizacyjno-techniczne zabezpieczeń, cele zabezpieczeń oraz funkcje zabezpieczeń, jakie mają zostać spełnione.

O historii postępowania z odpadami promieniotwórczymi w Polsce opowiedział Krzysztof Madaj dyrektor Zakładu Unieszkodliwiania Odpadów Promieniotwórczych w Otwocku. W ostatnim czasie ZUOP obchodził dwa ważne jubileusze. W 2021 r. upłynęło 60 lat od rozpoczęcia eksploatacji jedyne w Polsce Krajowego Składowiska Odpadów Promieniotwórczych (KSOP) w Róźnie, a 1 stycznia 2022 r. minęło 20 lat od wydzielenia Zakładu Doświadczalnego Unieszkodliwiania Odpadów Promieniotwórczych (ZDUOP) z Instytutu Energii Atomowej (IEA) i przekształcenia

go w przedsiębiorstwo państwowej użyteczności publicznej ZUOP. Ważnym elementem jego działalności jest edukacja i informowanie społeczeństwa w zakresie postępowania z odpadami promieniotwórczymi. W ostatnich latach zostały stworzone nowe i usprawnione dotychczasowe kanały komunikacyjne, tak, aby dotrzeć do jak największej liczby odbiorców. Od 2012 r. organizowane są Dni Otwarte KSOP, dzięki którym osoby z całego kraju mogą zobaczyć i dowiedzieć się jak funkcjonuje tego typu obiekt. Ponadto został stworzony profil ZUOP na Facebooku oraz LinkedIn, gdzie regularnie publikowane są informacje związane z działalnością ZUOP oraz ciekawostki o odpadach promieniotwórczych, promieniotwórczości i energetyce jądrowej. Niezbędnym elementem funkcjonowania KSOP jest również współpraca operatora składowiska z lokalnymi władzami. Działania prowadzone przez ZUOP są transparentne dla całego społeczeństwa, ze szczególnym uwzględnieniem Gminy Różan i powiatu makowskiego. Bardzo ściśle Zakład współpracuje z Komisją Ochrony Radiologicznej funkcjonującą w strukturach Rady Miejskiej w Róźnie, która również weryfikuje działalność składowisk.

„Niskie dawki promieniowania do leczenia powikłań oddechowych przy infekcji SARS-CoV-2 – niewykorzystany potencjał” to tytuł kolejnego wykładu, który wygłosił dr Sylwester Sommer z Instytutu Chemii i Techniki Jądrowej w Warszawie. Na początku roku 2020 zaproponowano terapię polegającą na napromienianiu płuc niskimi dawkami promieniowania, rzędu 500 mSv (LDR). LDR od lat 20 XX wieku używane były, z dobrym

skutkiem, w leczeniu zapalenia płuc. Znanie są również właściwości immunomodulujące LDR. Te dwie cechy LDR oraz grupa ludzi, którzy lobbują za dobroczynnym działaniem promieniowania jonizującego, zaowocowały około 10 próbami klinicznymi i ponad 60 publikacjami, w większości teoretycznymi, na temat możliwości leczenia SARS-CoV-2 przy pomocy LDR.

O roli, jaką odgrywają polimery w ochronie przed radonem opowiedział dr Wojciech Głuszewski z IChTJ. Poruszył kwestie radiolizy folii i membran, oraz poliwęglanów, z których wykonuje się bierne, śladowe dozymetry radonu. Było również miejsce na krótkie przypomnienie historii kwartalnika PTJ w związku z 10. leciem jego działalności w ramach IChTJ.

W następnej prezentacji Michał Zuba z PAA dokonał analizy zagrożeń w jednostkach organizacyjnych. Nowelizacja ustawy – Prawo atomowe z 2019 r. ustanowiła obowiązek opracowania przez kierowników jednostek organizacyjnych wykonujących działalność związaną z narażeniem systemu zarządzania sytuacjami zdarzeń radiacyjnych opisujący całokształt rozwiązań jednostki organizacyjnej w zakresie przygotowania i reagowania na zdarzenia radiacyjne. W myśl art. 86 d. ust. 4. ustawy Prawo atomowe, elementem systemu zarządzania sytuacjami zdarzeń radiacyjnych jest m. in. analiza zagrożeń. System zarządzania sytuacjami zdarzeń radiacyjnych powinien być zaprojektowany tak, aby był współmierny do wyników przeprowadzonej analizy zagrożeń i pozwalał na skuteczne reagowanie.

Monitoring radiologiczny środowiska w Polsce z użyciem pasywnych detektorów termoluminescencyjnych (TLD) to temat wykładu prof. Macieja Budzanowskiego z Instytutu Fizyki Jądrowej PAN. Detektory MCP-N zostały wykorzystane w akredytowanym laboratorium LADIS IFJ PAN do dozymetrii środowiskowej. Obecnie wykonywane jest średnio 18 tys. pomiarów rocznie w ponad 5000 punktach w Polsce.

W sposób zdalny o aspektach ochrony radiologicznej w programie budowy polskiej elektrowni jądrowej mówił dr Krzysztof Fornalski ze spółki Polskie Elektrownie Jądrowe i Narodowego Centrum Badań Jądrowych. Wszystkie przeprowadzone analizy pokazały jednoznacznie, iż z punktu widzenia ochrony radiologicznej pierwsza polska elektrownia jądrowa nie będzie stanowić zagrożenia dla okolicznych mieszkańców.

Dr Andrzej Mikulski reprezentujący Polskie Towarzystwo Nukleoniczne przedstawił historię trzech scenariuszy wprowadzania energetyki jądrowej w Polsce z lat 1957, 1971 i 2009. W dalszej części odniósł się do planów budowy małych modułowych reaktorów jądrowych (SMR) VOYGR firmy NuScale Power i BWRX-300 firmy GEH Nuclear.

O problemach z radonem na terenach górniczych opowiedziała prof. Małgorzata Wysocka z Głównego Instytutu Górnictwa. Jednym z głównych czynników wpływających na migrację radonu jest dezintegracja

górotworu, powodowana eksploatacją węgla kamiennego, a w przeszłości rud metali. Szacuje się, że w obszarze GZW, w około 2% mieszkań, stężenie radonu może przekraczać poziom 300 Bq/m^3 . Obecnie część kopalń węgla kamiennego jest zamknięta, lub przygotowana do procesu likwidacji. W związku z tym postawiono pytanie: czy procesy zamykania kopalni zwiększają migrację radonu? Jak długi jest okres występowania zmian stężeń radonu w budynkach po zaprzestaniu działalności górniczej? Chcąc uzyskać wiedzę i odpowiedzieć na postawione pytania, porównano aktualne wyniki stężeń radonu w pomieszczeniach z wynikami archiwalnymi z lat 90. ubiegłego wieku. Stwierdzono, że w niektórych obszarach, zwłaszcza w piwnicach budynków, stężenie radonu znacznie wzrosło w porównaniu z danymi sprzed ponad 30 lat.

Wykłady zatytułowane „Radon ciekawostka czy problem?” oraz „Radon w podziemnych trasach turystycznych” wygłosił dr hab. Jerzy Olszewski z Instytutu Medycyny Pracy im. Prof. dr J. Nofera w Łodzi. Powszechne występowanie radonu w połączeniu z aktualnymi przepisami prawnymi powoduje, iż przestaje on być ciekawostką, a staje się problemem szczególnie dla pracodawców. Rozpatrując natomiast średnie arytmetyczne pomiarów dla poszczególnych podziemnych tras turystycznych stwierdzono, że tylko w jednej z nich średnie stężenie radonu było poniżej progu czułości, natomiast w 67% przekroczyło wartość 300 Bq/m^3 . Obecnie w Polsce jest czynnych około 200 podziemnych tras turystycznych. Są to jaskinie, kopalnie, podziemne budowle. Jak wynika z przedstawionych wyników, w świetle zapisów zawartych w Prawie atomowym, radon występujący w podziemnych trasach turystycznych stanowi problem zarówno techniczny, jak i zdrowotny.

Konferencję zakończył ciekawy wykład dr. Krzysztofa Kozaka z Instytutu Fizyki Jądrowej PAN „Promieniotwórczość gamma indukowana w placówkach medycznych na przykładzie cyklotronu Proteus C-235 w Centrum Cyklotronowym Bronowice IFJ PAN – aspekty fizyczne i dozymetryczne”. Przedstawione zostały wyniki, jednych z pierwszych kompleksowych pomiarów promieniotwórczości gamma, indukowanej w hali cyklotronu, na stanowisku terapii oka, na stanowiskach gantry i w materiałach konstrukcyjnych budynku, w trakcie rutynowej pracy ośrodka CCB IFJ PAN w Krakowie.

Maria Kubicka,
Prezes Stowarzyszenia Inspektorów
Ochrony Radiologicznej,
Poznań
Wojciech Głuszewski,
Instytut Chemii i Techniki Jądrowej,
Warszawa



WORLDFOOD I NATURAFOOD 2022

W Warszawie w dniach 5-7 kwietnia br. odbyła się kolejna edycja targów WorldFood 2022. Spotkania te poświęcone sektorowi spożywczemu są największymi tego typu wydarzeniami w Polsce i Europie Środkowo-Wschodniej. O dużym sukcesie mogą mówić w tym roku organizatorzy, którzy mimo wielu przeciwności po raz ósmy połączyli całą branżę w trakcie jednego wydarzenia. Targom zorganizowanym w centrum wystawienniczym Expo XXI towarzyszyły liczne prelekcje i seminaria, których tematem były kwestie dotyczące sytuacji rolno-spożywczej w Polsce. Ekspertki zastanawiali się m.in. nad realnym wpływem konfliktu Rosja-Ukraina na bezpieczeństwo żywnościowe w kraju i Europie. W ich ocenie przodująca w eksporcie Polska, jest bezpiecznym obszarem, jeśli chodzi o produkcję żywności. Jednym z tematów debat było działanie, opracowanego przez francuskich naukowców z zespołu ds. Badań nad Epidemiologią Żywności systemu Nutr-Score. Jest to pięciokolorowa etykieta, będąca próbą uproszczenia systemu ogólnej oceny wartości żywieniowej produktu spożywczego. Na targach zwracał uwagę popularny ostatnio trend Eko, żywność funkcjonalna i produkty BIO. Podkreślano znaczenie niezależnej wiedzy naukowej niezbędnej do produkcji żywności. W tym aspekcie podejmowano tematy: zafałszowań żywności, znaków towarowych, dodatków do żywności oraz rynku e-commerce. Głównym obiektem zainteresowania zwiedzających było jednak ponad 250 stoisk wystawców z całego świata. Można było odwiedzić pawilony narodowe Sri Lanki, Tajlandii, Tunezji, Korei, Grecji oraz z zapoznać się z ofertą produktów spożywczych z Włoch i Hiszpanii. Mimo sytuacji geopolitycznej na targach nie zabrakło przedsiębiorców z Ukrainy. Niewątpliwą atrakcją targów były pokazy kulinarne najlepszych kucharzy.

W dyskusjach podnoszono również tematy radiacyjnej konserwacji ziół, przypraw ziołowych, suszonych grzybów i żywności oraz identyfikacji napromieniowania żywności. Problematyka ta jest aktualna głównie w kontekście suplementów diety, żywności i napojów funkcjonalnych, farmaceutyków, medycyny naturalnej, naturalnych składników i surowców prezentowanych na równolegle odbywających się targach Natura Food. Tradycyjnych produktów żywnościowych oznaczonych zieloną radurą, symbolem radiacyjnej konserwacji próżno było szukać na opakowaniach. Producenci obawiają się nadal, że konsumenci pomylą napromieniowanie ze skażeniem promieniotwórczym. Warto jednak zwrócić uwagę, że na cenzurowanym w ostatnich latach nie jest napromieniowanie, a tlenek etylenu. Zgodnie z przepisami

obowiązującymi w UE, żywność nie może być poddawana działaniu ETO. Europejska Agencja ds. Chemikaliów (ECHA) sklasyfikowała tlenek etylenu, jako substancję mutagenną (Muta. 1B), rakotwórczą (Carc. 1B) i działającą szkodliwie na rozrodczość (Repr. 1B). Tymczasem od września 2020 r. urzędowe laboratoria służb odpowiedzialnych za bezpieczeństwo żywności w państwach członkowskich UE oraz laboratoria kontrolne działające na rzecz producentów żywności zaczęły wykrywać obecność tlenku etylenu początkowo w ziarnie sezamu importowanym z Indii, a następnie w różnych innych produktach pochodzących przede wszystkim z tego regionu, takich jak przyprawy, substancje dodatkowe do żywności (mączka drzewa świętojańskiego – E410, guma guar – E-412) czy suplementy diety. Przypuszcza się, że tlenek etylenu jest wykorzystywany w celu eliminacji patogenów takich jak pałeczki Salmonella, których obecność skutkowałaby niedopuszczeniem produktu do obrotu na terenie Unii Europejskiej. Również w Polsce GIS wycofywał w poprzednim roku ze sklepów wiele produktów z powodu obecności tlenku etylenu. Znalaziono go m.in. w wędlinach, mięsie, lodach, a wcześniej także w przyprawach i sezamie.

W większości przypadków w celu higienizacji suchych przypraw, w tym suszonych aromatycznych ziół, przyprawach korzennych oraz przyprawach warzywnych można zastosować promieniowanie jonizujące. Jest to zupełnie legalne pod warunkiem, że producent zaznaczy sposób konserwacji na opakowaniu. Napromieniowanie nasion sezamu jest jedną z najskuteczniejszych metod poprawy ich jakości w procesie przechowywania. Udowodniły to badania właściwości biochemicznych i mikrobiologicznych również w przypadku oleju. W celu określenia efektów radiolizy nasiona poddano działaniu promieniowania gamma w zakresie dawek od 3 do 12 kGy. Niewielkie zmiany zaobserwowano jedynie w zawartości białka i cukru. Napromieniowane próbki zachowały aktywność antyoksydacyjną oraz wysoką zawartość fenoli, flawonoidów. Ponadto obróbka radiacyjna zapewniła dużą stabilność podczas całego eksperymentu pod względem kwasowości i wskaźnika nadutlenkowego. Wszystkie próbki potraktowane różnymi dawkami pozostały całkowicie wolne od bakterii w badanym okresie jednego roku. W przypadku „guar gum” zalecana jest, jako optymalna dawka 2,5 kGy.

*dr Wojciech Głuszewski,
Instytut Chemii i Techniki Jądrowej,
Warszawa*



XVI SZKOŁA STERYLIZACJI I MIKROBIOLOGICZNEJ DEKONTAMINACJI RADIACYJNEJ

W dniach 8-9 grudnia 2021 r. w Instytucie Chemii i Techniki Jądrowej (ICH TJ) w Warszawie odbyła się w formie on-line kolejna szkoła radiacyjnej sterylizacji. Tematyka nabrała na aktualności w związku z pandemią zakaźnej choroby COVID-19 wywołanej przez koronawirusa SARS-CoV-2. W ICH TJ działa jedyna w kraju przemysłowa Stacja Sterylizacji Radiacyjnej Wyro-

być zainteresowani tą metodą sterylizacji, organizowane są, co dwa lata dwudniowe szkolenia. Zasadniczym celem spotkań jest próba podsumowania dorobku krajowych instytucji naukowo-badawczych i produkcyjnych w dziedzinie sterylizacji i mikrobiologicznej dekontaminacji radiacyjnej. Omawiane są również zagadnienia radiacyjnej modyfikacji tworzyw polimerowych w kontekście wyjaławiania wyrobów jednorazowego użytku i opakowań. Warto dodać, że promieniowanie jonizujące w unikatowy sposób pozwala sterylizować wyroby w opakowaniu jednostkowym i zbiorczym. Unika się w ten sposób wtórnego zakażenia opakowań w trakcie konfekcjonowania. W zeszłym roku podobnie jak w latach poprzednich przedstawiono obiektywne informacje na temat różnych metod wyjaławiania

Tabela 1. Tytuły wykładów, których prezentacje są dostępne za pośrednictwem organizatorów szkoły (m.rzepna@ichtj.waw.pl)

Najważniejsze informacje dla klientów SSR	Dr inż. Andrzej Rafalski, ICH TJ
Oddziaływanie promieniowania jonizującego na materię	Dr inż. Wojciech Głuszewski, ICH TJ
Sterylizacja radiacyjna na tle innych metod sterylizacji	Dr inż. Andrzej Rafalski, ICH TJ
Biologiczne działanie i ryzyko promieniowania jonizującego	Dr Sylwester Sommer, ICH TJ
Wyznaczanie dawki sterylizacyjnej	Mgr inż. Magdalena Rzepna, ICH TJ
Mikrobiologiczne aspekty produktu w procesie sterylizacji radiacyjnej	Mgr Elżbieta Uler, Technochemia Grójec
Zastosowanie technik radiacyjnych do wytwarzania, modyfikacji i sterylizacji biomateriałów polimerowych	Dr hab. inż. Piotr Ulański, prof. nadzw. MITR Politechnika Łódzka
Sterylizacja przeszczepów tkankowych i ich zastosowanie	Dr n. med. Grzegorz Gut, Warszawski Uniwersytet Medyczny
Walidacja procesu sterylizacji radiacyjnej	Dr inż. Radosław Wach, MITR Politechnika Łódzka
Modyfikacja materiałów polimerowych pod wpływem promieniowania jonizującego	Dr hab. inż. Grażyna Przybytniak, prof. nadzw. ICH TJ
Akceleratorzy elektronów – zastosowanie na potrzeby sterylizacji	Dr inż. Zbigniew Zimek, ICH TJ
Kontrola dozymetryczna radiacyjnej sterylizacji wyrobów medycznych	Dr inż. Andrzej Rafalski, ICH TJ
Rola opakowań w sterylizacji radiacyjnej	Dr inż. Marta Walo, ICH TJ
Zmiany wymagań prawnych w odniesieniu do wytwórców produktów leczniczych	Dr inż. Rafał Kocia, ICH TJ

bów Medycznych i Przeszczepów, świadcząca usługi dla ponad 60 firm wytwarzających wyroby medyczne, produkty lecznicze, produkty kosmetyczne i inne. Wiązka elektronów przyspieszana przez akcelerator Elektronika 10/10 jest wykorzystywana również w wielu pracach badawczych prowadzonych przez krajowe i zagraniczne instytucje naukowe. Stacja posiada Certyfikat Systemu Zarządzania, Jakością (PN-EN ISO 13485: 2016) w zakresie projektowania i przeprowadzania procesu napromieniowania wyrobów medycznych oraz certyfikat GMP wydany przez Główny Inspektorat Farmaceutyczny. Z myślą o obecnych użytkownikach, jak również o przedsiębiorcach, którzy potencjalnie mogą

w taki sposób, aby wytwórcy mogli wybrać najlepsze, z punktu widzenia ich produktu. Do udziału w Szkole w charakterze wykładowców zaproszono specjalistów z: Instytutu Chemii i Techniki Jądrowej, Międzyresortowego Instytutu Techniki Radiacyjnej w Łodzi, Warszawskiego Uniwersytetu Medycznego, Technochemii Grójec. W szkole zdalnie wzięło udział ponad 80 uczestników.

Wojciech Głuszewski,
Instytut Chemii i Techniki Jądrowej,
Warszawa



25. PIKNIK NAUKOWY POLSKIEGO RADIA I CENTRUM NAUKI KOPERNIK

W sobotę, 21 maja miał miejsce 25. Piknik Naukowy Polskiego Radia i Centrum Nauki Kopernik. Motywem przewodnim Pikniku Naukowego była woda – substancja niezwykła, będąca jednocześnie jedną z najważniejszych, jeśli nie najważniejszą, dla życia na Ziemi. Podczas Pikniku odbywały się wykłady popularnonaukowe, dyskusje i pokazy. Miały na celu nie tylko przybliżyć gościom właściwości wody, ale też przedstawić dziedziny życia, nauki i przemysłu, w których znajduje ona swoje zastosowanie, jak również omówić zagrożenia niesione przez jej niedobór, nadmiar bądź zanieczyszczenie.

Impreza odbyła się na terenie Centrum Nauki Kopernik. Jednym z wystawców było Narodowe Centrum Badań Jądrowych. Na stoisku 507, przygotowanym przez Dział Edukacji i Szkoleń, organizowane były poka-



Fot. 1. Stoisko Narodowego Centrum Badań Jądrowych (fot. W. Głuszewski)

zy wyjaśniające, jakie właściwości czynią wodę istotną z punktu widzenia fizyki jądrowej, fizyki reaktorowej, medycyny nuklearnej czy ochrony radiologicznej. Odwiedzający mogli dowiedzieć się, jak zbudowana jest elektrownia z reaktorem jądrowym typu PWR i jakie zadania w takiej elektrowni spełnia woda.

Z wykorzystaniem liczników promieniowania Geigera-Müllera oraz zegarków z farbą radową goście mogli badać zależność natężenia promieniowania przechodzącego przez warstwę wody od grubości tej warstwy. Wykorzystując promieniowanie jonizujące mierzyli też poziom wody w nieprzezroczystym naczyniu.

Na stoisku NCBJ znajdowały się także radioaktywne przedmioty domowego użytku, jak i promieniotwórcze materiały występujące naturalnie. Dzięki temu odwiedzający mogli przekonać się, że promieniowanie joni-

zujące jest obecne na każdym kroku, w ziemi, powietrzu oraz w wodzie, którą pijemy. Wspomniano również o właściwościach leczniczych „wód radonowych”, a także informowano o prowadzonych przez NCBJ kontrolach poziomu aktywności rzek, ścieków komunalnych i wód drenażowych.

Na stanowisku poświęconym projektowi GOSPOSTRATEG HTR omawiano działanie i konstrukcję reaktorów wysokotemperaturowych chłodzonych gazem. Poruszono kwestię planów wdrożenia takich reaktorów do polskiego przemysłu oraz zalety takiego rozwiązania.

Wojciech Głuszewski,
Instytut Chemii i Techniki Jądrowej,
Warszawa

Na podstawie materiałów dostarczonych przez Narodowe Centrum Badań Jądrowych



POLSKIE NOBLE 2021

Fundacja na rzecz Nauki Polskiej – FNP po raz kolejny przyznała nagrody za szczególne osiągnięcia i odkrycia naukowe, które przesuwają granice poznania i otwierają nowe perspektywy poznawcze, wnosząc wybitny wkład w postęp cywilizacyjny i kulturowy naszego kraju oraz zapewniają Polsce znaczące miejsce w podejmowaniu najbardziej ambitnych wyzwań współczesnego świata. Polskie Noble w tym roku otrzymało czterech uczonych.



Fot. 1. Prof. Bożena Kamińska-Kaczmarek

W obszarze nauk o życiu i o Ziemi **prof. Bożena Kamińska-Kaczmarek** z Instytutu Biologii Doświadczalnej im. M. Nenckiego PAN w Warszawie za odkrycie mechanizmów, które powodują, że glejaki złośliwe tak przeprogramowują komórki odpornościowe, aby wspierały rozwój nowotworów mózgu. Okazało się, że,

podczas gdy patogeny wywołują odpowiedź zapalną mobilizującą układ odpornościowy to w przypadku glejaka jest odwrotnie. Głównie przeprogramowuje działanie mikrogleju i zmienia funkcje komórek odporności. Aktywowany jest inny zestaw genów i czynników zaangażowanych w migrację i różnicowanie komórek układu odpornościowego w taki sposób, że układ ten zaczyna działać wadliwie. Dokonania Lauretaka już przyczyniły się do opracowania zaawansowanych terapii w leczeniu glejaka i mogą dać początek kolejnym. Celując w różne populacje makrofagów, można będzie w przyszłości zahamować rozwój guza lub odpowiednio zmobilizować układ odpornościowy chorego do walki, by mógł zwalczyć nowotwór. W tym celu prof. Kamińska-Kaczmarek pracuje m.in. nad specjalistyczną platformą do kompleksowej diagnostyki i spersonalizowanej terapii w neuroonkologii. Odkrycia te mają znaczenie nie tylko w leczeniu glejaków, ponieważ wadliwe działanie mikrogleju występuje również w chorobie Alzheimera. Mogą przyczynić się, więc do rozpoczęcia podobnych badań nad różnorodnymi zaburzeniami neurologicznymi i neurodegeneracyjnymi.



Fot. 2. Prof. Jacek Jemielity

W obszarze nauk chemicznych i o materiałach nagrodę otrzymał **prof. Jacek Jemielity** z Centrum Nowych Technologii Uniwersytetu Warszawskiego za opracowanie chemicznych modyfikacji mRNA, jako narzędzi do zastosowań terapeutycznych i badań procesów komórkowych, mRNA to rodzaj kwasu rybonukleinowego, który powstaje w jądrze komórki. Jako skopiowany z DNA fragment kodu niesie przepis na budowę konkretnego białka. Wyprodukowanie białka jest już zadaniem rybosomów, do których mRNA trafia po opuszczeniu jądra komórkowego. Badania pokazały, że odpowiednio zaprojektowane mRNA można dostarczyć do komórki, aby organizm mógł wyprodukować na jego podstawie konkretne białko. Otwiera to drogę do prac nad leczeniem rozmaitych chorób. Terapeutyczne wykorzystanie mRNA przez wiele lat pozostawało bardzo obiecującą technologią, która jednak nie mogła

doczekać się pierwszego powszechnego wykorzystania. Sytuacja uległa zmianie wraz z nadejściem pandemii COVID-19, kiedy to szczepionki na bazie mRNA opracowano bardzo szybko i okazały się one wyjątkowo skuteczne. Wyniki badań prof. Jemielitego dotyczących opracowania chemicznych modyfikacji mRNA są istotne dla projektowania wielu nowych terapii. Obecnie prowadzonych jest kilkadziesiąt badań klinicznych z wykorzystaniem mRNA. Syntetyczne mRNA może być wykorzystane przy tworzeniu leczniczych szczepionek przeciwnowotworowych, czyli podawanych, jako lek osobom, które chorują na nowotwór. Szczepionki te mają powodować, że układ immunologiczny, będzie lepiej rozpoznawał chorobę nowotworową i ją niszczył. Jeden z wynalazków prof. Jemielitego jest obecnie stosowany w kilkunastu badaniach klinicznych nad leczniczymi szczepionkami przeciwnowotworowymi. Kolejnym obszarem zastosowania mRNA są szczepionki przeciwwirusowe, już stosowane przeciwko koronawirusowi SARS-CoV-2. Obecnie trwają też prace nad szczepionkami, np. przeciwko wirusowi Zika lub przeciwko grypie. Możliwe są też zastosowania w terapii genetycznych chorób rzadkich, takich jak rdzeniowy zanik mięśni (SMA), czy mukowiscydoza, a także przeciwko chorobom bakteryjnym, a nawet w medycynie regeneracyjnej.



Fot. 3. Prof. Grzegorz Pietrzyński

W obszarze nauk matematyczno-fizycznych i inżynierskich wyróżniono **prof. Grzegorza Pietrzyńskiego** z Centrum Astronomicznego im. M. Kopernika PAN w Warszawie za precyzyjne wyznaczenie odległości do Wielkiego Obłoku Magellana (WOM). WOM to galaktyka satelitarna zlokalizowana najbliżej Drogi Mlecznej i najważniejszy kalibrator kosmicznej skali odległości, wzorzec odległości we Wszechświecie. Odległość do WOM stanowi obecnie podstawę do prawie wszystkich empirycznych wyznaczeń tzw. stałej Hubble'a za pomocą supernowych. Z kolei wartość parametru Hubble'a jest konieczna, aby móc poznać ewolucję naszego Wszechświata i zbadać istotę ciemnej energii. Każde

udoskonalenie tego parametru prowadzi do kolejnych odkryć i ważnych ustaleń. Jednym z głównych problemów wyznaczenia stałej Hubble'a była precyzja pomiaru odległości do WOM. Osiągnięcie prof. Pietrzyńskiego polega na wykonaniu pomiaru odległości do galaktyki Wielkiego Obłoku Magellana z największą jak dotąd dokładnością – wynoszącą 1%. Z jego ustaleń wynika, że WOM znajduje się w odległości 49,59 kiloparseków od Ziemi, czyli około 161 tys. lat świetlnych. Laureat Nagrody FNP udoskonalił metody pomiaru odległości kosmicznych do poziomu, który jest obecnie standardem w astrofizyce. Proces pomiaru odległości do WOM składał się z kilku elementów, które prowadziły do oszacowania dystansu do dwudziestu tzw. zaćmieniowych układów gwiazd podwójnych, krążących wokół siebie i znajdujących się w omawianej galaktyce. Naukowcy mierzyli zaćmienia, prędkości wspomnianych gwiazd, a następnie przy użyciu prostych praw fizyki wyznaczyli precyzyjne parametry fizyczne badanych obiektów oraz ich odległość. Wszystko to było możliwe dzięki trwającemu już ponad dwie dekady projektowi Araucaria, którym kieruje właśnie prof. Pietrzyński (wraz z prof. Wolfgangiem Gierenem). Celem naukowców pracujących w jego ramach jest kalibracja kosmicznej skali odległości. Wyniki dotychczasowych prac prezentowano już w wielu publikacjach, kilkakrotnie ukazywały się one m.in. w prestiżowym *Nature*.

W obszarze nauk humanistycznych i społecznych nagrodę odebrał **prof. Cezary Cieśliński** z Wydziału Filozofii Uniwersytetu Warszawskiego za rozwiązanie kluczowych problemów deflacionistycznej teorii praw-



Fot. 4. Prof. Cezary Cieśliński

dy. Ustaleniem definicji pojęcia prawdy filozofowie zajmowali się od czasów starożytności. Twórcą klasycznej definicji prawdy, według której zgodność treści sądu z rzeczywistym stanem rzeczy, którego ten sąd dotyczy był Arystoteles. Do tej pory ujęcie pojęcia prawdy nasyca wiele trudności, a przez wieki powstało wiele definicji. Prof. Cezary Cieśliński w swoich pracach nawiązuje do tradycji Szkoły Lwowsko-Warszawskiej logiki i filozofii, której początki sięgają końca XIX wieku. Do szkoły tej należy też logik, matematyk i filozof Alfred Tarski, który dążył do stworzenia formalnie precyzyjnego pojęcia prawdy. Określił ją, jako pewną cechę zdań logicznych. To umożliwiło rozwój badań nad m.in. logiką i filozofią matematyki. Podążający za jego poglądami zwolennicy deflacionistycznej teorii prawdy uważają, że najrozsądniejsze koncepcje prawdy zarówno



Fot. 5. Pamiątkowe zdjęcie osób odznaczonych (fot. FNP)

dawne, jak i bardziej współczesne (m.in. klasyczne, nie-klasyczne, koherencyjne, pragmatyczne, realistyczne, antyrealistyczne, epistemiczne) różnią się jedynie detalami, które są tylko niepotrzebnym uzupełnieniem pojęcia prawdy. Wobec tego, z tak mnogich teorii, można – ich zdaniem – „spuścić powietrze”, odejmując kolejne zbędne elementy. Pozbawione tych nadmiarowych szczegółów teorie będą spełniały kryteria prawdy opisane przez wspomnianego wyżej Alfreda Tarskiego. W języku angielskim można opisać ten proces, jako „deflation”, skąd już prosta droga do polskiego „deflacionizmu”. Prof. Cezary Cieśliński wniósł przełomowy wkład w prace w tej dziedzinie, a jego nagradzana monografia „The Epistemic Lightness of Truth” z 2017 r. znacząco przyczyniła się do rozwoju deflacionizmu. W nawiązaniu do tytułu pracy prawdę można określić, jako „lekką”.

Zgodnie z myślą przewodnią monografii: prawda jest raczej narzędziem do dokonywania generalizacji, niż istotną cechą np. wypowiedzi. Wyrażana przez kogoś myśl, aby była prawdziwa, nie musi wcale strukturalnie odzwierciedlać stanu rzeczy w świecie.

Z okazji 30-lecia FNP odbyła się również dyskusja na temat, „Dlaczego w Polsce tak trudno jest stworzyć nowe struktury w nauce – nowe centra doskonałości?”. Udział w niej wzięli: prof. Tomasz Dietl, prof. Ewelina Knapska, prof. Justyna Olko oraz prof. Maciej Wojtkowski.

Wojciech Głuszewski,
Instytut Chemii i Techniki Jądrowej,
Warszawa



WĘGRY „POPYCHAJĄ” ROSJĘ DO BUDOWY NOWYCH REAKTORÓW „TAK SZYBKO, JAK TO MOŻLIWE”

Węgry i Rosja prowadziły rozmowy na temat planów budowy nowych reaktorów w elektrowni jądrowej Paks, a Budapeszt stwierdził, że oba bloki muszą zostać ukończone „jak najszybciej”.

Péter Szijjarto, minister spraw zagranicznych Węgier, potwierdził w mediach społecznościowych, że w Stambule w Turcji odbyły się rozmowy z Aleksiejem Lichaczowem, dyrektorem naczelnym rosyjskiej państwowej korporacji jądrowej Rosatom.

Powiedział, że budowa nowych reaktorów w Paks, w którym działają już cztery reaktory, jest niezbędna dla bezpieczeństwa energetycznego kraju. „Im więcej energii Węgry są w stanie wytworzyć samodzielnie, tym lepiej są chronione przed turbulencjami na globalnym rynku energetycznym” – powiedział Szijjarto na Facebooku.

Czteroelementowa elektrownia Paks jest jedyną komercyjną elektrownią jądrową na Węgrzech. Jej dostarczone przez Rosję reaktory dostarczają około 48% energii elektrycznej w kraju.

Szijjarto powiedział w marcu, że Węgry nie planują anulować projektu Paks, wartego 12,5 mld euro z Rosatom, z powodu rosyjskiej inwazji na Ukrainę.

W ramach projektu Rosja dostarczyłaby dwie jednostki nowej generacji WWER-1200 PWR w ramach umowy finansowanej głównie z rosyjskiego kredytu.

Premier Węgier Viktor Orban i prezydent Rosji Władimir Putin zgodzili się na projekt budowy dwóch rosyjskich reaktorów ciśnieniowych WWER-1200 w 2014 r.,

ale miał on opóźnienia i problemy z pozwoleniem na budowę.

Obecnie Rosatom podobno przygotowuje dodatkowe informacje, które mają zostać przekazane węgierskiemu dozorowi jądrowemu w związku z procedurą licencjonowania projektu.

W październiku 2021 r. Węgierski Urząd Energii Atomowej stwierdził, że w niektórych obszarach projektu potrzebne są dalsze oceny i analizy, zanim będzie mógł wydać pozwolenia na realizację projektu.

Rosyjska państwowa agencja informacyjna Tass cytowała Rosatom, który oświadczył, że projekt nadal postępuje zgodnie ze zobowiązaniami umownymi, a prace pomocnicze są prowadzone na terenie nad Dunajem w środkowych Węgrzech.

Nacjonalistyczny rząd Orbana, który za rządów Putina utrzymywał bliskie stosunki z Rosją, twierdzi, że ekspansja energetyki jądrowej jest konieczna, aby kraj był bardziej samowystarczalny pod względem produkcji energii.

„To zdumiewające, że na lewicy są politycy, którzy wzywają do zaprzestania budowy elektrowni jądrowej” – powiedział Szijjarto na konferencji prasowej, zgodnie z wcześniejszymi doniesieniami prasowymi.

„Jeśli elektrownia jądrowa nie zostanie zbudowana, będziemy musieli stawić czoła brutalnemu wzrostowi kosztów energii” – powiedział. „Nie możemy pozwolić, by Węgrzy zapłacili cenę wojny toczącej się za granicą”.

W kwietniu doniesienia prasowe mówiły, że Węgry otrzymały pierwszą dostawę paliwa jądrowego dla Paks z Rosji drogą lotniczą, bo wojna na Ukrainie uniemożliwiła transport paliwa koleją.

Autor: David Dalton, NUCNET,
9 maja 2022 r.

tłumaczył: Stanisław Latek,
Instytut Chemii i Techniki Jądrowej,
Warszawa

ZŁOTO Z INŻYNIERSKĄ „PRÓBĄ JAKOŚCI”

Dzień uhonorowania laureatów konkursu „Złoty Inżynier” odbierany jest w środowiskach naukowo-technicznych jako dzień ze wszech miar wyjątkowy i zyskał on sobie nawet miano nieformalnego „inżynierskiego święta”.

W Warszawskim Domu Technika ta szczególna uroczystość, tym razem będąca podsumowaniem już XXVII edycji finału plebiscytu Złoty Inżynier „Przeglądu Technicznego” odbyła się 30 marca br., gromadząc bardzo liczne (około 250 osób) grono uczestników. Największa sala konferencyjna „WDT” była wypełniona do ostatniego miejsca. Wśród obecnych oczywiście inżynierowie nominowani do tytułu i laureaci „Złotego Inżyniera” z lat poprzednich oraz przedstawiciele świata polityki i gospodarki, członkowie stowarzyszeń naukowo-technicznych.



Fot. 1. Tytuł „Złotego Inżyniera” przyznawany jest w corocznym plebiscycie Czytelników „Przeglądu Technicznego” już od dwudziestu siedmiu lat, a symbolizuje go właśnie ta charakterystyczna statuetka (fot. Janusz Kowalski)

Do laureatów okolicznościowy list gratulacyjny wystosował prezydent RP Andrzej Duda i w swym przesłaniu prezydent RP gratulując laureatom osiągnięć i zasług dla rozwoju wiedzy i gospodarki narodowej i ich wkładu, który polscy inżynierowie wnoszą w wielkie dzieło modernizacji naszego kraju podziękował także całemu Państwu środowisku za aktywne włączenie się w niesienie pomocy Ukrainie. Podziękował też Federacji Stowarzyszeń Naukowo-Technicznych – Naczelnej Organizacji Technicznej za zorganizowanie zbiórki na zakup sprzętu inwalidzkiego, rehabilitacyjnego i ortopedycznego dla inwalidów wojennych z Politechniki Kijowskiej.

Listy gratulacyjne skierowane do uhonorowanych tytułem „Złoty Inżynier Przeglądu Technicznego” przesłali także m.in. minister infrastruktury Andrzej

Adamczyk, podsekretarz stanu w Ministerstwie Rozwoju i Technologii, Piotr Uściński, prezes Głównego Urzędu Miar, Jacek Semaniak, marszałek mazowiecki, Adam Struzik.

Dyplomy laureatom wręczali: Ewa Mańkiewicz-Cudny, prezes FSNT-NOT i przewodnicząca Rady Programowo-Konsultacyjnej „PT”, Martyna Jachimowicz, redaktor naczelna „Przeglądu Technicznego”, Andrzej Dera, sekretarz stanu w Kancelarii Prezydenta RP, Wojciech Murdzek, sekretarz stanu w MEiN i pełnomocnik Rządu ds. reformy funkcjonowania instytutów badawczych, Michał Kleiber przewodniczący Polskiego Komitetu ds. UNESCO, prezes PAN w l.2007-2015.



Fot. 2. Laureaci XXVII edycji „Złotego Inżyniera” na chwilę przed spotkaniem członków Klubu Złotego Inżyniera, od lewej dr Tomasz Schweitzer, prof. Tadeusz Więckowski, dr Stanisław Latek. (fot. Janusz Kowalski)



Fot. 3. Posiedzenie Klubu Złotego Inżyniera (fot. Janusz Kowalski)

Wśród tegorocznych laureatów znalazła się postać, w wypadku której piszący te słowa – mam nadzieję – zostanie w pewnym sensie usprawiedliwiony z podejmowania w tym tekście szerszego przedstawieniago Jego dorobku i wybitnych dokonań, osiągnięć i zasług w wielu dziedzinach. Powód z jednej strony jest nader prozaiczny – brak odpowiedniej ilości miejsca w periodyku wydawanym w formie papierowej, zaś z drugiej, że owa osoba w środowisku naukowo-technicznym jest po prostu osobą bardzo szeroko znaną. I trudno tu o zdziwienie, skoro postacią tą jest dr Sta-



Fot. 4. Wśród laureatów plebiscytu o tytuł Złotego Inżyniera Roku 2021 wyróżniony został dr inż. Stanisław Latek. Aktu wręczenia statuetki i dyplomu dokonali od lewej: Andrzej Dera – Sekretarz Stanu w Kancelarii Prezydenta RP, Martyna Jachimowicz – Redaktor Naczelny Przeglądu Technicznego, laureat Stanisław Latek redaktor naczelny Postępów Techniki Jądrowej, Michał Kleiber przewodniczący Polskiego Komitetu ds. UNESCO, prezes PAN w l.2007-2015, Wojciech Murdzek – Sekretarz Stanu w Ministerstwie Edukacji i Nauki, Ewa Mańkiewicz-Cudny – Prezes Zarządu Głównego Federacji Stowarzyszeń Naukowo-Technicznych Naczelnej Organizacji Technicznej



Fot. 5. Laureaci plebiscytu. Do tradycji Inżynierskiej Gali w Warszawskim Domu Technika NOT należy wspólna fotografia laureatów i osób, które wręcały „Złotym Inżynierom” statuetki i dyplomy (fot. Janusz Kowalski)

niśław Latek – atomista, redaktor, działacz Klubu Inteligencji Katolickiej, harcmistrz, żeglarz. (Lista zajęć i zainteresowań daleka od wyczerpania). Gorąco także polecam Czytelnikom „PTJ” lekturę ostatnich numerów „Przeglądu Technicznego”, gdzie więcej miejsca poświęcono „Złotym Inżynierom”, a wśród tekstów m.in. krótki artykuł „Fizyk z „renesansowym backgroundem” „PT” nr 3).

Z kronikarskiego już obowiązku nie można nie odnotować żartobliwego komentarza, jaki wypowiedziała jedna z osób biorących udział w gali inżynierskiej w momencie ogłoszenia przez redaktora Romana Czajarkę z Polskiego Radia, że dr Stanisław Latek, zostaje wyróżniony tytułem Honorowego Złotego Inżyniera „Przeglądu Technicznego”: *grupę trzech muszkieterów tworzy zawsze inżynierów czterech.*

Przypomnijmy, iż pierwszym laureatem tegoż konkursu „Przeglądu Technicznego” reprezentującym naukowe środowisko nukleoników był prof. Andrzej Grzegorz Chmielewski. Potem nastąpiła dłuższa przerwa i drugim „Złotym Inżynierem” reprezentującym energetykę jądrową został mgr inż. Adam Rozwadowski. W roku minionym był to mgr inż. Jacek Burski.

Laureaci XXVII edycji „Złotego Inżyniera” są specjalistami reprezentującymi różne dyscypliny nauki i sektory przemysłu. Swoimi dokonaniem zawodowymi przekonują nas, że kluczową rolę dla przyszłości gospodarki polskiej odegra maksymalnie efektywna współpraca instytutów naukowo-badawczych i uczelni technicznych z gospodarką. Zakładając jednocześnie, że w tym niełatwym dziele modernizowania i rozwijania gospodarki wszyscy uczestnicy tegoż procesu znajdą niezbędną i pełną pomoc ze strony administracji państwowej.

Marek Bielski,
Przegląd Techniczny,
Warszawa

JUBILEUSZOWA „DZIESIĄTKA” „POSTĘPÓW TECHNIKI JĄDROWEJ”

Rosnące liczby od zawsze i nieodmiennie znaczą rytm egzystencji. W ten naturalny sposób ukształtowała się tradycja rocznicowych podsumowań. Za najlepszy do tego moment powszechnie uznano pojawianie się na osi czasu kolejnych liczb okrągłych. Taką pierwszą dwucyfrową liczbą okrągłą jest właśnie 10. A jubileuszowa dziesiątka „Postępów Techniki Jądrowej” przypada właśnie w bieżącym roku. W tym wy-

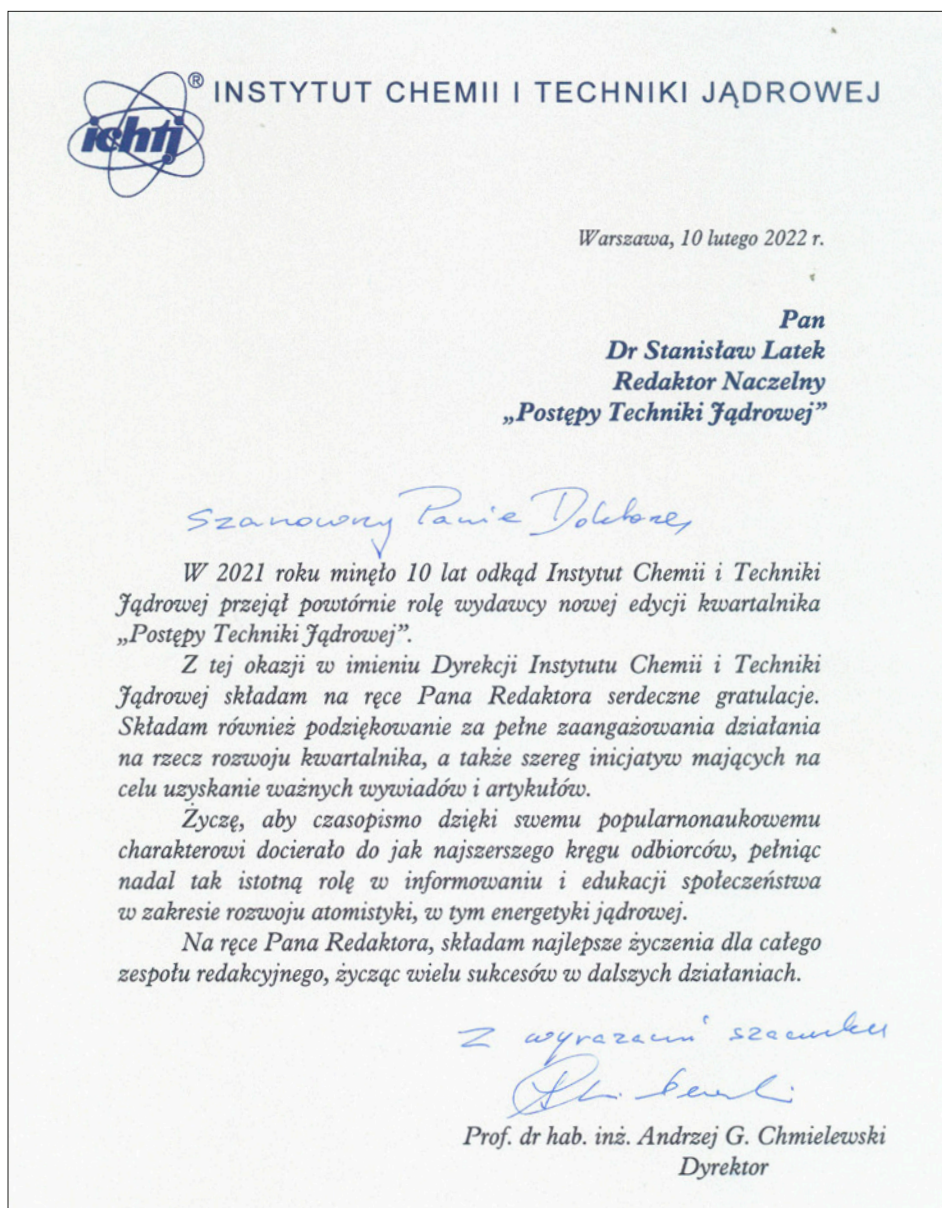
padku nie oznacza ona jednak upływu czasu od momentu powstania tegoż periodyku do roku 2022, lecz obejmuje czas, kiedy rolę wydawcy od Państwowej Agencji Atomistyki przejął Instytut Chemii i Techniki Jądrowej. W tym dziele edytorskim instytut badawczy wspomagany jest przez Polskie Towarzystwo Nukleoniczne.



Fot. 1. Uczestnicy spotkania Dyrekcji IChTJ z redaktorem naczelnym PTJ z okazji 10-lecia wydawania czasopisma przez instytut. Od lewej: Roman Janusz, Andrzej Chmielewski, Stanisław Latek, Bożena Bursa, Jacek Michalik (fot. Sylwester Wojtas)

Dziesięć lat w stosunku nie tylko do całych dziejów przyrodoznawstwa, w tym fizyki i chemii, ale i historii samej nukleoniki wydaje się niewielkim odcinkiem czasu. A jednak na tyle wystarczająco długim, aby czasopismo „Postępy Techniki Jądrowej” mogło dać się poznać Czytelnikom, jako potrzebna środowisku nie tylko naukowemu, specjalistom w tej dziedzinie, ale większemu gronu Czytelników, w tym także politykom, działaczom samorządowym, ekologom, jako – istotna poznawczo platforma prezentacji zagadnień dotyczących współczesnej nauki i gospodarki w szeroko rozumianym aspekcie atomistyki.

Zanim przedmiotem opracowań specjalistów będą ukazujące się aktualnie na rynku wydawniczym czasopisma – w tym zajmujące się publikowaniem sensu stricto rozpraw naukowych, jak i problematyką upowszechnia wiedzy – możemy pokusić się o sformułowanie tezy, że właśnie obecny czas jest czasem szczególnym. Ten aspekt wyjątkowości związany jest z coraz większym poczuciem cywilizacyjnych zagrożeń wynikających nie tylko z postępu technologicznego. Owe cywilizacyjne zagrożenia są generowane nie przez technologię tylko przez konkretnych, znanych z imienia i nazwiska ludzi, którzy wykorzystują potencjał tkwiący w technice do swoich partykularnych i często moralnie nagannych celów. Żyjemy w epoce medialnych „fake newsów”, dotyczących wszystkich dziedzin ludzkiej aktywności, nie wyłączając nauki i techniki.



Fot. 2. Tekst listu gratulacyjnego Dyrektora IChTJ do redakcji PTJ



Fot. 3. Dyrektor IChTJ prof. Andrzej Chmielewski wręcza list gratulacyjny redaktorowi naczelnemu „PTJ” Stanisławowi Łatkowi. W środku Bożena Bursa, kierownik Działu Informacji Naukowo-Ekonomicznej IChTJ

I tym większe i trudniejsze wydają się zadania, jakie mają do zrealizowania czasopisma o charakterze naukowo-informacyjnym. A takim właśnie periodykiem są „Postępy Techniki Jądrowej”. Z okazji Jubileuszu należy więc życzyć tego, co wydaje się najcenniejsze dla każdego Wydawcy, coraz liczniejszego grona stałych Czytelników, dla których lektura „PTJ” będzie zarówno pożyteczna, jak i ciekawa.

Marek Bielski,
Przegląd Techniczny,
Warszawa

„WYBORCZA” O ATOMIE DLA WARSZAWY

Kwestia przyszłości ciepłownictwa w Warszawie poruszona została na łamach gazety WYBORCZEJ w artykule Michała Wojtczuka pt. „Reaktor atomowy w Warszawie? Czy ogrzać miasto po rezygnacji z węgla” opublikowanym 22 lutego br. Jest to istotny problem dla miasta w przyszłości. Poszukiwane są różne możliwe rozwiązania. Autor artykułu sugeruje, że może to być tylko atom, czyli elektrociepłownia jądrowa zlokalizowana, jeśli nie w obrębie samego miasta to bardzo blisko jego granic.

Nie jest to nowy pomysł, gdyż chyba po raz pierwszy został zaprezentowany w artykule Jacka Burskiego pt. *Ciepłownictwo jądrowe dla Warszawy* w miesięczniku „Górnictwo i Energetyka” nr 6 z 1985 r. Później przez wymienionego wyżej autora powtórzony w referacie pt. *Jak ogrzać i oczyścić Miasto Stołeczne, czyli Elektrociepłownie dla Warszawy* oraz w wygłoszonym na międzynarodowej konferencji „Energetyka jądrowa – technologia, inwestor, finansowanie” w dniach 19-20 listopada 2009 r. w hotelu Sofitel Victoria w Warszawie organizowanej przez firmę doradczo-szkoleniową MOST WANTED. W międzyczasie temat został poruszony w referacie pt. *Przystosowanie energetyki jądrowej do oddawania ciepła dla potrzeb bytowo-komunalnych* wygłoszonym przez prof. Andrzeja Reńskiego na konferencji NOT „Przyszłość energetyki jądrowej w Polsce” w dniu 6 grudnia 2007 r. w Warszawie. Monografia „Energetyka jądrowa w Polsce” przygotowana przez prof. Kazimierza Jelenia i dr. Zbigniewa Raua w 2012 r. zawiera rozdział autorstwa Jacka Burskiego i Pawła Żbikowskiego zatytułowany „Jak zasilić w energię elektryczną, ogrzać i oczyścić Warszawę, czyli elektrociepłownie jądrowe dla Stolicy” z jasnym postulatem budowy koniecznej zmiany. Dwa lata później pomysł ten znalazł się w raporcie z II-go Kongresu Elektryki Polskiej w 2014 r. (tom III, s.53), gdzie napisano „W Polsce, gdzie układ centralnego ogrzewania Warszawy należy do największych w Europie, a konieczność obniżenia skażeń powietrza jest niewątpliwa, wprowadzenie elektrociepłowni jądrowych do systemu energetycznego stanowi atrakcyjną perspektywę”. W tamtych czasach rozważano tylko budowę dużego reaktora jądrowego w odległości 20-40 km od Warszawy i transport ciepła do systemu ciepłowniczego miasta. Po raz ostatni argumenty za ciepłownią jądrową można było usłyszeć w wypowiedzi na Konferencji FSNT-NOT „Przyszłość Elektroenergetyki w Polsce” w listopadzie 2019 r.

Autor artykułu opierając się na pracy dyplomowej Daniela Radomskiego pt. „Ocena roli energetyki jądrowej w Polsce w perspektywie dochodzenia do energetyki zeroemisyjnej” obronionej w Instytucie Elektroenergetyki Politechniki Warszawskiej w listo-

padzie 2021 r. pisze o „co najmniej dwóch projektach reaktorów dla ciepłownictwa miejskiego” wymieniając niestety tylko jeden z nich. Na podstawie podanej temperatury wylotowej wody z reaktora wynoszącej 98°C. można łatwo zidentyfikować, że jest to projekt chińskiego reaktora DHR-400 o mocy 400 MWt. Reaktor ten ze względu na temperaturę i moc cieplną nie nadaje się do ogrzania Warszawy. Według dostępnej literatury miał być uruchomiony w 2021 r., ale brak jest jakiegokolwiek potwierdzenia tej informacji w dostępnych doniesieniach medialnych, wygląda, że jest to tylko projekt daleki od realizacji. O drugim reaktorze brak jest jakiegokolwiek dokładniejszych informacji. Ciekawe mogą być tylko propozycje ulokowania reaktora ciepłowniczego w aglomeracji warszawskiej. Autor słusznie odrzuca Żerań i Siekierki, jako lokalizację ciepłowni jądrowej i podaje pomysł ulokowania jej w Kawęczynie, w sąsiedztwie stacji energetycznej GPZ Mościska na Bielaniech lub na terenach Huty Warszawa. Ze swojej strony wymieniałbym jeszcze okolice Pruszkowa, gdzie kiedyś była planowana elektrociepłownia dla lewobrzeżnej Warszawy i z budowy pozostał tylko ogromny komin.

Popierając w pełni pomysł zastosowania reaktorów jądrowych w systemie ciepłowniczym Warszawy warto skupić się na małych i mikro reaktorach modułowych tzw. SMRach i MMRach, które będą dostępne w ciągu kilku lat i są obiektem zainteresowania kilku polskich przedsiębiorstw. Charakteryzują się polepszonymi parametrami bezpieczeństwa eksploatacji, zatem mogą być lokalizowane bliżej aglomeracji miejskich. Mam tu na myśli trzy reaktory, nad którymi pracują firmy amerykańskie.

Reaktor BWRX-300 (SMR) opracowywany przez firmę General Electric Hitachi Nuclear (GEH) jest przedmiotem zainteresowania trzech polskich przedsiębiorstw: Synthos Green Energy (SGE) i PKN Orlen i Zespół Elektrowni PAK. Jest to reaktor wodny wrzący o mocy cieplnej 900 MWt i elektrycznej 300 MWe, wywodzący się z ponad 50-letniego doświadczenia GEH Nuclear w budowie reaktorów w tej technologii. Konstrukcja jego oparta jest na podobnym reaktorze o znacznie większej mocy, który posiada od 2014 r. zezwolenie na budowę amerykańskiego urzędu dozoru jądrowego (US NRC) i uzyskanie licencji na obiekt o mniejszej mocy jest aktualnie rozpatrywane. Poza tym dwa reaktory o podobnych rozwiązaniach technicznych (naturalny obieg chłodzenia) pracowały łącznie 29 lat w ubiegłym wieku. Według konstruktorów reaktor przeznaczony jest zasadniczo do produkcji energii elektrycznej, ale może też pracować dla sieci ciepłowniczej przy odpowiedniej konstrukcji turbiny.

Reaktor VOYGR (SMR) opracowywany przez firmę NuScale Power o mniejszej mocy równej 77 MWe bardziej nadaje się do celów ciepłowniczych i są nim zainteresowane dwie firmy: KGHM i Tauron. Wykonane analizy dla Finlandii pokazały, że jeden lub dwa takie

reaktory mogą dostarczać 61-97% ciepła wymaganego przez takie miasta jak Turku, Tampere lub Espoo. Problem w tym, że nie ma jeszcze zbudowanego prototypu tego reaktora i wszystko opiera się na posiadanym zezwoleniu na budowę wydanym w 2020 r. przez amerykański urząd dozoru jądrowego (US NRC) na podstawie analiz teoretycznych i badań modelowych tego reaktora.

Reaktor MMR firmy Ultra Safe Nuclear Corporation (USNC) o mocy 15 MWt i ok. 5 MWe wydaje się najbardziej predysponowany do celów ciepłowniczych ze względu na zastosowane super bezpiecznego paliwa i możliwość ciągłej pracy przez 20 lat bez wymieniać paliwa. Projekt jest w drugiej fazie (od czerwca 2021 r.) trójfazowego procesu zatwierdzania lokalizacji w Kanadzie i w końcowym stadium oceny środowiskowej. Zakończenie budowy i oddanie do eksploatacji spodziewane do 2026 r. Również tym reaktorem zainteresowana jest w Polsce spółka SGE.

W artykule czytamy jeszcze, że miasto zleciło przygotowanie opracowania pt. „Model energetyczny dla m.st. Warszawy do roku 2050 uwzględniający warunki elektroprosumeryzmu”. Dokument ma być gotowy we wrześniu 2022 r., a opracują go Zakłady Pomiarowo-Badawcze Energetyki „Energopomiar” sp. z o.o. z Gliwic.” Chciałoby się mieć pewność, że dokument ten zostanie opracowany w części dotyczącej reaktorów jądrowych w oparciu o rzetelne informacje jakie reaktory będą dostępne i sprawdzone pod względem bezpieczeństwa w najbliższym czasie, a następnie poddany zostanie rzetelnej ocenie przez niezależnych specjalistów z dziedziny energetyki jądrowej i uzyska akceptację mieszkańców stolicy.

dr inż. Andrzej Mikulski,
Polskie Towarzystwo Nukleoniczne,
Warszawa

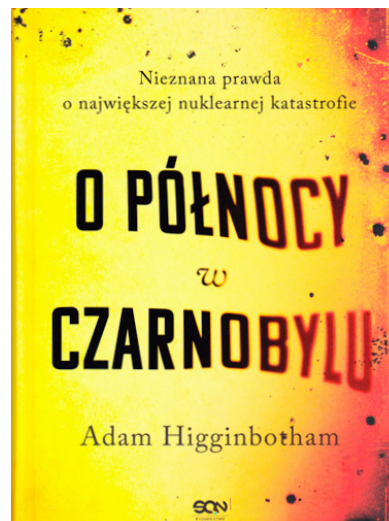


ADAM HIGGINBOTHAM O PÓŁNOCY W CZARNOBYLU NIEZNANA PRAWDA O NAJWIĘKSZEJ NUKLEARNEJ KATASTROFIE

WYDAWNICTWO SQN KRAKÓW 2019
TYTUŁ ORYGINAŁU: MIDNIGHT IN CHERNOBYL
THE UNTOLD STORY OF THE WORLD'S
GREATEST NUCLEAR DISASTER
TŁUMACZENIE: ROBERT FILIPOWSKI

Niezwykle obszerna, solidnie udokumentowana publikacja (537 stron), przedstawiająca największą katastrofę elektrowni jądrowej w Czarnobylu, powody, jej przebieg, działania władz w czasie i długo po katastrofie, tragedie ludzi bezpośrednio biorących udział w likwidacji skutków katastrofy i ich losy po wielu latach. Jest to publikacja z pogranicza literatury sensacyjnej i popularno-naukowej, wciągająca czytelnika od pierwszych stron i utrzymująca go w napięciu do końca. Szczegółowy opis przebiegu katastrofy poczynając od przedstawienia ludzi obsługujących reaktor, opis jego konstrukcji i zachodzących tam zjawisk fizycznych, brak spójnego systemu kontroli technicznej, chaos decyzyjny, chęć ukrycia samej katastrofy, a później jej skutków w czasie ogromnych zmian politycznych w ZSRR, pokazuje ją w zupełnie nowym świetle.

Opisy te przypominają problemy przedstawione w publikacji Erica **Schlossingera** „TO TYLKO ILUZJA,



Fot. 1. Projekt okładki Paweł Szczepanik (adaptacja)

że wszystko jest pod kontrolą”, w której opisano chaos w systemach dowodzenia w Stanach Zjednoczonych, gdzie podejmowanie jakichkolwiek decyzji dotyczących nawet błahych spraw wymagało uruchomienia bardzo bezwładnej maszyny biurokratycznej. Podobnie wielkim problemem było przygotowanie kadry, szkolenie, opracowanie odpowiednich procedur szczególnie dla sytuacji awaryjnych. W większości obsługą lub podejmowaniem decyzji zajmują się ludzie nie zawsze rozumiejący swoje zadania, co jest dodatkową przyczyną wielu wypadków. Brak krajowego systemu współdziałania w chwilach kryzysowych potęguje chaos i straty materialne.

ZSRR jako jedno z państw założycieli Międzynarodowej Agencji Energii Atomowej było zobowiązane do in-

formowania o wszelkich wypadkach powiązanych z wykorzystaniem energii jądrowej czego starannie unikano powodując wrażenie, że radziecka technologia jądrowa jest bezawaryjna i najbezpieczniejsza, co w znacznym stopniu przyczyniło się do zwiększenia rozmiarów katastrofy.

Reaktor RBMK (*Reaktor Bolszaj Moszczynosti Kanalnyj* – *Reaktor Kanałowy Dużej Mocy*) był rozwinięciem wcześniejszych konstrukcji opracowanych dla celów wojskowych, głównie do wytwarzania plutonu. Rozwinięcie polegało przede wszystkim na powiększeniu rozmiarów reaktora, który wśród atomistów nazywany był narodowym reaktorem ZSRR, w odróżnieniu od powstającego reaktora WWER (*Wodno Wodjannoj Energeticzeskij Reaktor*) zbliżonego konstrukcyjnie do opracowań zachodnich konstrukcji PWR (*Pressurized Water Reactor* – *Cisnieniowy Reaktor Wodny*) „tzw. reaktor amerykański”.

Od początku naukowcy zwracali uwagę na możliwość powstania dodatniego współczynnika reaktywności, co może wywołać eksplozję. Potrzeby gospodarki planowanej centralnie wymusiły budowę czterech potężnych reaktorów typu RBMK dostosowanych do potrzeb energetyki, co wymagało pewnych zmian, które ostatecznie zakończono w 1968 r. Zaczęto wdrażać na masową skalę produkcję tych nowych opracowań z pominięciem badań prototypowych. Pierwszy reaktor uruchomiono w Leningradzie w 1973 r. Przed jego włączeniem rozpoczęto budowę Elektrowni Czarnobylskiej. W pierwszym reaktorze potwierdziły się przewidywania niestabilności pracy reaktora w wyniku wzrostu współczynnika reaktywności w przestrzeni parowej i ze względu na znaczne rozmiary reaktora możliwości wzrostu reaktywności w innych obszarach. Dodatkowym źródłem powstania katastrofy była utrata możliwości sterowania mocą reaktora przez wadliwy system redukcji mocy, nieprzystosowany do nagłego wprowadzenia prętów kontrolnych.

Innym problemem była precyzja wykonania elementów reaktora, która była powodem opóźnienia uruchomienia reaktora RBMK w Leningradzie i późniejszej jego awarii, o której nie powiadomiono nikogo, a zalecane poprawki nie zostały wprowadzone w reaktorach czarnobylskich.

Początkowo starano się ukryć katastrofę czarnobylską, ale jej rozmiar i opinia międzynarodowa spowodowały, że ZSRR przedstawił jej przebieg i działania podjęte by ograniczyć jej skutki na forum międzynarodowym w Międzynarodowej Agencji Energii Atomowej. Raport taki został przedstawiony i został przyjęty, ale po latach okazało się, że był bardzo niepełny.

Odrębnym zagadnieniem było wygaszenie reaktora i odseparowanie go od środowiska. W całym ZSRR zbierano potrzebne materiały i ogłoszono coś na kształt mobilizacji wojennej. Cały wysiłek ogromnego kraju został skupiony na usuwaniu zagrożeń. Kosztowało to życie oficjalnie 31 osób łącznie z tymi, którzy zginęli w chwili

katastrofy. Problemem, mimo przygotowań do ewentualnej wojny nuklearnej był brak specjalistów od chorób popromiennych i początkowa niechęć do korzystania z pomocy zagranicznej.

Późno zaczęta ewakuacja (nie doceniano rozległości zdarzenia i chciano je ukryć) bez opracowanego wcześniej planu była improwizowana, ale bez paniki, ponieważ nie odczuwano niepokoju i wierzono w doskonałość techniki krajowej. W wyniku ewakuacji ludzie musieli zostawić swój dobytek (mieli zabrać dokumenty i tylko podręczne rzeczy) i rodziny się pogubiły.

W książce opisano także przypadki znikania ze strefy zamkniętej mebli, części samochodowych itp. Poruszony został temat dzikiej zwierzyny, upraw rolniczych niedługo po katastrofie i w odległym od niej czasie.

Losy ludzi biorących udział we wszystkich działaniach były bardzo pogmatwane. Autor zwraca uwagę na fakt niedoceniania ich poświęcenia, niesłuszne oskarżenia, nagradzanie osób będących daleko od pierwszej linii największego narażenia.

W zakończeniu autor przedstawia oprócz opisu współczesnej elektrowni w Czarnobylu sumaryczny obraz dzisiejszego stanu energetyki jądrowej i konieczność jej rozwijania ze względu na ochronę klimatu.

Książka daje bardzo szeroki obraz rzeczywistych powodów katastrofy wywołanej wadami projektu reaktora, błędów ludzkich, niekompetencji podejmujących decyzje, nadmiernej tajności i pewności starszego kierownictwa naukowego o swojej nieomyślności, wewnętrznej walki politycznej, chęci ukrycia prawdy przed światem. O treści i charakterze wystąpienia w MAEA zaważyła opinia fizyka jądrowego Andrieja Sacharowa.

W książce podano bogatą bibliografię (18 stron) i przypisy wyjaśniające do każdego rozdziału (1579 na 68 stronach), podziękowania wszystkim osobom, którzy brali udział przy powstaniu tej książki oraz mapy okolic Czarnobyla i elektrowni. Ponadto zamieszczono spis osób odgrywających znaczną rolę w czasie katastrofy.

Pewną wadą książki jest używanie starych jednostek określających stopień promieniowania zamiast jednostek SI dotyczących promieniowania. Zamieszczony dodatek nie ułatwia, a nawet utrudnia zorientowanie się w granicznych dopuszczalnych dawkach. Można by było w polskim wydaniu załączyć obecnie akceptowaną tablicę dawek wraz z przeliczeniami. Jest to o tyle istotne, że autor często powołuje się na jednostki w różnych miejscach książki. W tak rozległym tekście daje się zauważyć trudności w tłumaczeniu. Np. MAEA występuje w trzech postaciach, jako Międzynarodowa Agencja Energetyki Jądrowej, IAEA i Międzynarodowa Agencja Energii Atomowej tworząc wrażenie, że są to różne instytucje.

Krzysztof Rzymkowski,
Stowarzyszenie Ekologów na
Rzecz Energii Nuklearnej,
Warszawa



SIĘGAJĄC PO NIEZBADANE OSIĄGNIĘCIA NAUKOWE WSPÓŁFINANSOWANE PRZEZ FNP

AUTORKI: PATRYCJA DOŁOWY, KAROLINA
GŁOWACKA, ANNA MATEJA
WYDAWCA: FUNDACJA NA RZECZ NAUKI
POLSKIEJ



Fot. 1. Projekt okładki

To tytuł publikacji, którą przygotowała Fundacja na rzecz Nauki Polskiej z okazji jubileuszu 30-lecia działalności. W popularnonaukowej formie przedstawiono 30 dokonań polskich uczonych. Punktem wyjścia w wyborze konkretnych historii, był ścisły związek między wsparciem udzielanym badaczom przez Fundację, a rozwojem badań naukowych i ich miejscem w światowej nauce. Ważnym kryterium, które przyjęto przy wyborze bohaterów, była liczba ich cytowań w latach 1991-2020. Ustalono ją za pomocą bazy danych Web of Science. Wszystkie opowieści o odkryciach z szeroko rozumianych nauk ścisłych, humanistycznych i społecznych odbiły się szerokim echem w światowej nauce. Warto dodać, że wśród prac współfinansowanych przez FNP i należących do grupy HCF (Highly Cited in the Field) znalazło się: 36 publikacji z zakresu fizyki cząstek elementarnych, 14 z zakresu astronomii i astrofizyki, 14 z zakresu chemii ogólnej, 10 z fizyki wielodyscyplinowej, 10 z fizyki jądrowej, 7 z nauk o materiałach, po 6 z biochemii i biologii molekularnej, chemii fizycznej, zastosowań fizyki, nauk inżynierskich tworzenia instrumentów, 5 z zakresu nanonauk, po 4 z optyki, inżynierii chemicz-

nej, ochrony środowiska i ekologii, po 2 z biofizyki, chemii organicznej, nowych źródeł energii, chorób krążenia, fizyki ciała stałego, psychologii eksperymentalnej, technologii kwantowych oraz pojedyncze prace z zakresu: akustyki, automatyki, matematyki, biologii komórki, chorób serca, demografii, chemii analitycznej, elektroniki, badań etnicznych, hematologii, gastroenterologii, interny, farmakologii, onkologii, nauki o polimerach oraz urologii. W książce, czytelnicy znajdą w przystępny sposób napisane teksty na temat badań z zakresu m.in. chemii, fizyki, matematyki, biotechnologii, astronomii, ochrony środowiska, onkologii, psychologii, demografii, archeologii oraz historii. Ich autorkami są dziennikarki i pisarki zajmujące się popularyzacją nauki. Premiera książki miała miejsce 12 kwietnia w siedzibie FNP. Otwartą dyskusję z udziałem m.in. bohaterów publikacji poprowadzili prof. Krzysztof Meissner, wybitny fizyk oraz popularyzator nauki, oraz dr Patrycja Dołowy, jedna ze współauterek książki. Książka jest dostępna również w formie elektronicznej (https://www.fnp.org.pl/assets/siegajac_2022-01-19.pdf).

Z punktu widzenia zainteresowań naszego kwartalnika godny polecenia jest rozdział zatytułowany „Teoria wystarczająco dobra”. Jest to przyczynik do dyskusji nad tym czy Model Standardowy to punkt zwrotny w rozwoju fizyki cząstek elementarnych? Jakie znaczenie ma tak precyzyjna wiedza o budowie materii dla mieszkańców Ziemi pozbawionych dostępu do wody czy umierających z powodu chorób, na które brakuje lekarstwa? Historia ta dotyczy badań Artura Kalinowskiego, fizyka cząstek elementarnych i doktora habilitowanego z Uniwersytetu Warszawskiego. Korzystając z grantu FNP HOMING PLUS (2011), pracował on przy Wielkim Zderzaczu Hadronów w Europejskiej Organizacji Badań Jądrowych (CERN) na przedmieściach Genewy. Nie kryje on braku złudzeń. Ustalenia, które stały się udziałem jego i sporej grupy naukowców zaangażowanych do podzespołu badającego możliwości rozpadu bozonu Higgsa, to sukcesy jedynie tzw. Pierwszego Świata. Pytanie, na ile osiągnięcia naukowe zmieniają świat na lepsze miejsce do życia, to już zagadnienie z innej dziedziny niż fizyka cząstek elementarnych.

Wojciech Głuszewski,
Instytut Chemii i Techniki Jądrowej,
Warszawa

NIE TYLKO ATOM NIEJEDNO MA IMIĘ

Próba skonfrontowania słabych i mocnych stron energetyki jądrowej na felietonowych kolumnach „PTJ”? Takowy zamiar jawi się jako ewidentnie karkołomny! Niczym próba zdobycia Mount Everest jednośladem! Jeśli nawet nie wjechania na sam wierzchołek, przynajmniej zaimponowania chęcią wniesienia na szczyt roweru. Oczywiście koniecznie górskiego, co w naszej wciąż pełnej niespodzianek współczesności miało już miejsce.

Trudno czynić zarzut, że media wzorem wielu innych instytucji – o biznesowych korporacjach taktownie szerzej nie wspominając – poszukują najskuteczniejszych metod dotarcia do odbiorców. Na trudnym polu uwodzenia serc i bezstresowego opróżniania naszych portfeli pod każdą szerokością geograficzną każda innowacja zawsze jest na wagę złota. Dotarcie do największej liczby klientów stanowi priorytet dla sieci handlowych, a w wypadku polityków przekłada się na przekonanie do swoich racji rzesz przyszłych wyborców.

Podobnie w wypadku mediów. Szybkie tempo zdobywania umysłów czytelników, widzów i słuchaczy jest tu równoznaczne ze zwielokrotnieniem szansy na sukces. Skoncentrujmy się wyłącznie na stosowanej często w mediach konwencji, którą nazwijmy – na użytek tego felietonu – metodą konfrontacyjną. Media zderzają ze sobą zebrane często w dziennikarskim pośpiechu „plusy” i „minusy”. Ufamy, iż zawsze w dobrej wierze. A wszystko w celu ułatwienia nam drogi przejścia na „jasną stronę mocy”. Środki masowego przekazu stwarzają realnie istniejącą, acz nie rzadko tylko iluzję, iż uczestniczymy w merytorycznej dyskusji. Byłoby dobrze, gdybyśmy w wyniku konsumpcji intelektualnych treści przekazywanych nam przez media stali się bardziej świadomi swojej społecznej roli. Wszak chyba zawsze chcieliśmy i nadal chcemy być podmiotem dziejów. Tocząca się teraz wirtualna wojna na słowa i realna wojna tuż za naszymi granicami stanowi dramatyczne wyzwanie dla naszego człowieczeństwa. Tragiczne w skutkach wydarzenia wymagają od nas pogłębionej refleksji, ale też cierpliwości i pokory. Chcielibyśmy na pewno mieć moralną i merytoryczną siłę pozwalającą odpowiedzialnie kierować naszym życiem.

Wróćmy jednak na obszary związane już wyłącznie z szeroko rozumianą energetyką. Tam też potrzebne jest sprawcze uczestnictwo każdego z nas w procesie decyzyjnym. I to, dlatego pojawiła się idea energetyki prosumenckiej. Jeśli kiedykolwiek doszłoby do rozpisania konkursu na przygotowanie budżetu obywatelskiego dla energetyki proponuję: konkursowy awers dotyczyłby oblicza technologicznego

różnych źródeł energetyki, zaś rewers osiągniętych zysków, ewentualnie ponoszonych strat z tytułu ich wykorzystywania w praktyce gospodarczej z tym, że nie każdy obywatel dysponuje potrzebną do tego wiedzą. Stąd eksperci występujący w mediach nigdy nie pozostaną bez zajęcia. Obywatele zaś sfrustrowani ponad dopuszczalną normę – mają też prawo do wyrażenia zdziwienia, że rozpatruje się zazwyczaj tylko dwie strony medalu. Zapominając często o trzeciej stronie, której na imię kant.

W wypadku problematyki generowania energii (wraz z nieuniknionymi stratami nie tylko na jej przesyśle) duża aktywność mediów pośrednio poświadcza, że już sam temat jest ważny, wręcz społecznie gorący. I aby odbiorca zaangażował się emocjonalnie, sam przekaz musi wyróżniać się odpowiedniej mocy ładunkiem emocjonalnym. Jest on sprokurowany dzięki zabiegowi, który można określić zabiegiem kontrastującym. Obecny w kształtowaniu społecznego dyskursu chyba od zawsze, choć nie został do tej pory tak nazwany.

We współczesnej debacie na temat energetyki w centrum powinien znajdować się interes społeczny (in gremio) związany z bezpieczeństwem państwa, ale też bez pominięcia tzw. indywidualnych pożytków dla każdego obywatela z osobna. (Przepraszam za nadużywanie słowa obywatel, ale nadal nie mogę zrozumieć, że w dobie nieustannej promocji zasad demokracji i sprawiedliwości nie wiadomo, dlaczego tego obywatela już nawet w urzędach nazywamy... klientem).

Za odsłonami – techniczną, finansową i ekologiczną tych energetycznych przedsięwzięć kryje się wiele niewiadomych. I tu liczymy na odpowiedź ekspertów. Niepodważalnym ustaleniem obu stron sporu jest uznanie, że istnieje powszechna zgoda, że podejmowany temat jest ważny. A nawet ze wszech miar ważny. A dalej? A dalej jest już tylko gorzej. Dlaczego?

W większości toczonych przez naszych rodaków debat można wynieść przekonanie, że nikt z biorących w dyskusji osób nie chce wysłuchać do końca argumentów strony przeciwnej. A jak już wysłucha to nie bierze ich pod uwagę. I nic w tym dziwnego! Przecież każdy dobrze wykształcony i przygotowany do pełnienia swej misji ekspert doskonale wie, że tylko on ma – w głowie i w rękę – argumenty *racjonalne*, a zatem jedynie ważne dla poświęcenia im baczej uwagi. Słuchanie adwersarza to tylko oznaka dobrego (pardon – b. dobrego!) wychowania. Kindersztuba. Tylko tyle. I aż tyle. I nic więcej. Taki współczesny *savoir vivre* demokratycznych społeczeństw.

Argument nr 1 przeciwników energetyki jądrowej. Stanowczo za droga! W budowie? W eksploatacji? Czy tego nie da się skrupulatnie liczyć? Widocznie nie w tym rzecz! Po pierwsze za droga i już! Perfumy też

są drogie, a panie z nich nie rezygnują! Nie wspomnę szerzej o cenach gazu! Acz jak wiemy z rezygnacją z gazu w europejskim kontekście jest już nader różnie. A praktyka gospodarcza przetestuje nas już bezpłatnie. Wiatr wieje zupełnie za darmo, ale i tak państwo do niego dopłaca. Chciałoby się sparafrazować – a' rebours – przekonanie króla Ludwika XIV, że jednak *państwo to my*. I to nikt inny nie płaci, tylko my. A wiatr nawet nie bierze naszego ogromnego finansowego wysiłku pod uwagę, tylko wieje gdzie chce, jak chce i kiedy chce! Podobnie nie zawsze słońce jest po naszej, to jest ludzkiej stronie.

Zatem argument pierwszy, powtarzany jak mantra, że choć może jądrowka byłaby i droga naszemu sercu, wtedy gdyby nie była tak horrendalnie droga w budowie, więc oczekuję tylko precyzyjnego wyliczenia, dlaczego naszego kraju miałyby nie stać na... nie budowanie atomu! Są bowiem i tacy eksperci, którzy twierdzą, że w aktualnej sytuacji politycznej, surowcowej i ekologicznej trzeba być bardzo bogatym, aby odwrócić się do pomysłu budowy elektrowni tyłem.

Argument numer 2 – elektrownię jądrową buduje się stanowczo za długo. Racja! Szybko rozpala się tylko ognisko! Za przykład długiego czasu budowy podaje się inwestycje dotyczące rozbudowy EJ w Olkiluoto oraz we Flamanville. Czy są to jedyne bloki jądrowe budowane obecnie na świecie? A jeśli nie – czy nie można się pokusić o dokładne obliczenie, ile wynosi średni czas budowy standardowej elektrowni jądrowej w świecie. Włączając do obliczeń dane z czasu budowy elektrowni chińskich, czy koreańskich i także rekordowo ekspresowych inwestycji, jak np. białoruska. Przeglądając się ekstremom można oczywiście wiele się nauczyć, ale nie należy zaniedbywać oglądu całości – większy materiał porównawczy, wyższa trafność późniejszych wniosków.

Argument numer 3 – mitem jest informacja, iż przy budowie elektrowni jądrowych znacząco wzrośnie liczba miejsc pracy, gdyż *„miejsca pracy będą przy laniu betonu i dowożeniu pizzy”*. W efekcie zamawiając elektrownię jądrową za granicą stworzymy wysokopłatne miejsca pracy. *Polskim firmom skapnie lanie betonu, układanie kabli i dostarczanie pizzy* – komentuje Marcin Popkiewicz, zaanonsowany przez Gazetę Wyborczą, jako fizyk jądrowy i klimatolog komentujący rządowe plany energetyczne¹. *Stąd m.in.* – konstatuje Marcin Popkiewicz – *bierze się też mój sceptycyzm wobec programu jądrowego, bo technologię kupilibyśmy za granicą. Zapłacimy więc jakiemuś państwu i wygenerujemy w nim wysokopłatne miejsca pracy zamiast w Polsce*.

Czy trudno się dziwić, że jeden z internautów zainspirowany realizmem poznawczym komentatora ogłosił nawet, że dałoby się sfinansować budowę tak

długo oczekiwanej elektrowni jądrowej, gdyby przekierować na ten cel koszty ponoszone z tytułu wypłat „500 plus”. I został przez swojego adwersarza skarcony. Notabene nie za sam pomysł, tylko za późną datę jego ogłoszenia. Należało to uczynić wtedy, kiedy złotówka trzymała się mocno.

Czy te sytuacje – niczym z Gombrowicza, czy Mrożka – nie tchną w nas tak wciąż nam potrzebnego optymizmu? Czy dziś żart w wirtualu tak jak dawniej tzw. żart ulicy nie jest dobrym prognostykiem dla też długo oczekiwanego renesansu zwykłej ludzkiej normalności. W tym umiejętności dystansowania się od absurdu?

„Pijarowski zaciąg” chwytą za oręż marketingowy i święci triumfy, gorzej się mają „szare komórki”, postawione do kąta za wcześniejszą niesubordynację. A kiedy owe „szare” zostaną zamienione na „złote”, zamiast proponowanego umysłowego tombaku? Tego nawet nie wiedzą najtęższe prezesowskie głowy największych gabarytowo banków.

Energetyka – i tu rozbieżności nie ma – przez wszystkich uważana jest za klucz do naszego dobrobytu. Zatem poszukują go wszyscy. I to na wielu polach, poczynawszy od polityki, poprzez gospodarkę, ekologię, na technice bynajmniej nie kończąc. Na dodatek każdy z tych nader licznych problemów odznacza się własną specyfiką. Trudną do analizy w swoich licznych odsłonach zaskakujących dynamiką zmian. Każda z nich jest różna pod inną flagą państwową. Jeden jest tylko wspólny mianownik. Każdy ruch na energetycznej szachownicy nie pozostaje bez wpływu dla grubości portfela każdego mieszkańca naszej globalnej wioski o nazwie Ziemia. Nie wyłączając krezusów. Z tym, iż im portfele pęcznieją, reszcie chudną. Tylko jedno wiemy na pewno! Prezesom wciąż rośnie (współczuje im, iż tylko wynagrodzenie). Kredytobiorcom z kolei też już rośnie tylko – niestety – rata kredytu. A rzeszom „drobnych ciułaczy”, będących opoką państwowego bezpieczeństwa finansowego znika oprocentowanie z kont.

Na koniec – w nawiązaniu do treści pierwszego akapitu tego tekstu – pragnę serdecznie pogratulować panu Marcinowi Korzonkowi, który wjechał rowem samodzielnie, a więc – jak napisano w „National Geographic” – *bez zewnętrznej pomocy* na Ojos del Salado (5920 m.n.p.m.). Będąc zagorzałym zwolennikiem jazdy jednoślადami, zachęcam wszystkich do uprawiania tego rodzaju rekreacji. Tanio, zdrowo, ekologicznie. I nie musicie Państwo od razu nastawiać się na „kolarstwo wyżynne”. Większość z nas to „górale niskopienni”.

Marek Bielski,
Przegląd Techniczny,
Warszawa

¹ (Zob. <https://wyborcza.pl/7,177851,26763189,marcin-popkiewicz-budujac-elektrownie-atomowe-damy-sie-skolonializowac.html> (dostęp 22.03.2022 godz. 10.31)).



PROF. DR HAB.
KAZIMIERZ PRZEWŁOCKI
(16.11.1929 – 03.09.2021) –
WSPOMNIENIE



Fot. 1. Prof. dr hab. Kazimierz Przewłocki

3 września 2021 r. zmarł prof. Kazimierz Przewłocki, były wieloletni pracownik Akademii Górniczo-Hutniczej.

Prof. Kazimierz Przewłocki urodził się 16 listopada 1929 r. w Wilnie. Pracę na Akademii Górniczo-Hutniczej rozpoczął w 1955 r., jako młodszy asystent w Katedrze Fizyki AGH kierowanej przez prof.

Mariana Mięśowicza. Na Akademii Górniczo-Hutniczej Profesor zdobywał kolejne stopnie i tytuły naukowe: doktora w 1959, dr habilitowanego w 1966, profesora w 1977 oraz profesora zwyczajnego 1988 r. Wypromował 9 doktorów.

Od początku swojej drogi naukowej Profesor interesował się technicznymi zastosowaniami fizyki jądrowej. Jego działalność naukowa koncentrowała się wokół rozwoju metod i przyrządów dla geofizyki poszukiwawczej jak również rozwoju metod kontroli procesów w przemyśle wydobywczym i przetwórstwie rud. Prof. Przewłocki był jednym ze współtwórców geofizyki jądrowej w naszym kraju. Od początku lat 90-tych Profesor współpracował z Instytutem Gospodarki Surowcami Mineralnymi i Energią PAN w dziedzinie podziemnego

składowania wypalonego paliwa reaktorowego w formacjach geologicznych.

Prof. Przewłocki przez cztery lata, od 1971 do 1974 pracował w Międzynarodowej Agencji Energii Atomowej w Wiedniu. Wyjeżdżał do krajów rozwijających się, jako ekspert Agencji (m.in. do Indii, Ceylonu, Meksyku i Libii). Był zapraszany, jako wykładowca na kursy regionalne UNESCO zastosowań technik jądrowych w hydrologii.

Profesor pełnił szereg funkcji na Akademii Górniczo-Hutniczej. Kazimierz Przewłocki przez 9 lat kierował Międzyresortowym Instytutem Fizyki i Techniki Jądrowej AGH (1979-1988). Ponadto, w okresie 1974-2000 prof. Kazimierz Przewłocki kierował Zakładem Radiometrii Przemysłowej i Znaczników Promieniotwórczych (1974-2000). Tradycję Instytutu kontynuuje obecnie Wydział Fizyki i Informatyki Stosowanej AGH, a Zakładu, Katedra Fizyki Medycznej i Biofizyki AGH.

Obok działalności organizacyjnej na Uczelni Profesor pełnił w latach 1990-1993 funkcję Przewodniczącego Rady ds. Atomistyki przy Prezesie Państwowej Agencji Atomistyki. Za swoje zasługi dla Akademii Górniczo-Hutniczej został odznaczony Krzyżem Kawalerskim Orderu Odrodzenia Polski oraz Medalem Komisji Edukacji Narodowej.

Drugą obok działalności naukowej pasją Profesora była niewątpliwie jego działalność dydaktyczna. Z jego inicjatywy, w roku 1976 powstał w Międzyresortowym Instytucie Fizyki i Techniki Jądrowej Zakład Dydaktyki Fizyki. Włożył wiele serca i wysiłku w ciągłe podnoszenie poziomu nauczania fizyki podstawowej na Akademii Górniczo-Hutniczej. Był uznanym autorytetem w zakresie nauczania fizyki na uczelniach technicznych. Jego wykładów wysłuchały tysiące studentów naszej Uczelni.

prof. dr hab. inż. Bartłomiej Szafran,
Dziekan WFiS,
Akademia Górniczo-Hutnicza,
Kraków



WSPOMNIENIE
O PROF. DR HAB.
LUDWIKU DOBRZYŃSKIM
(UR. 27 STYCZNIA 1941 R. W ASINO
(B. ZSRR), ZM. 11 STYCZNIA 2022R.
W WARSZAWIE)

Z głębokim smutkiem przyjąłem informację o śmierci profesora Ludwika Dobrzyńskiego. Zналиśmy się prawie 40 lat. Pamiętam Jego pierwszy „obchód” nowego miejsca pracy w Katedrze Fizyki Filii UW w Białymstoku w październiku 1983 r. Wówczas to dr hab. Ludwik Dobrzyński i dr Tadeusz Krogulski (obaj 40-latkowie, od kilku miesięcy bezrobotni, zwolnieni z pracy w Instytucie Badań Jądrowych w Świerku w grudniu 1982 r.

za „nieprawomyślność” w działalności związkowej w NSZZ Solidarność) zostali pracownikami naukowymi na stanowisku adiunkta w dalekim Białymstoku. Stało się to za sprawą doc. Michała Świąckiego, który kompletował kadrę Katedry Fizyki w trudnym okresie stanu wojennego. Jak doc. Michał Świącki wspominał po latach, odbył w tej sprawie „dramatyczne rozmowy



Fot. 1. prof. dr hab. Ludwik Dobrzyński

w Komitecie Wojewódzkim PZPR". W 1983 r. w Katedrze Fizyki Filii UW w Białymstoku było zatrudnionych tylko kilkanaście osób, w tym dwóch doktorów habilitowanych (wspomniany doc. Michał Świącki i doc. Antoni Kuszell – obaj byli pracownicy IBJ, obaj już nieżyjący) oraz kilku doktorów. Każde nowe zatrudnienie pracowników po habilitacji lub doktoracie było wówczas bardzo cenne. Doświadczenia z pracy dydaktycznej w Białymstoku ma również prawie połowa obecnego składu dydaktyki NCBJ (prof. Krzysztof Kurek i prof. Ewa Rondio).

Wracając do prof. Ludwika Dobrzyńskiego. Na pewno konieczność cotygodniowych dojazdów do Białegostoku i praca dydaktyczna w nowym miejscu była dużym wyzwaniem dla ambitnego, młodego naukowca. Od początku ujawnił się Jego talent organizacyjny. W tym czasie w Katedrze Fizyki była kilkusobowa grupa młodych fizyków bez formalnej opieki naukowej, po wyjeździe za granicę jej kierownika w przeddzień wprowadzenia stanu wojennego, a potem już bez perspektyw jego powrotu do Polski. Z tym zespołem ówczesny dr hab. Ludwik Dobrzyński zorganizował od podstaw Pracownię Metod Jądrowych Fizyki Ciała Stałego, przekształconą później w Zakład Fizyki Ciała Stałego z czterema Pracowniami specjalistycznymi. Na potrzeby Zakładu zagospodarowano pomieszczenia sali gimnastycznej, która po latach została rozbudowana. Pojawiła się nowa aparatura kupowana z projektów badawczych i inwestycji aparaturowych dzięki osobistemu zaangażowaniu i aktywności kierownika zakładu. Profesor Ludwik Dobrzyński sprawował opieką naukową nad kilkunastoosobowym zespołem do 2007 r. Przez ćwierć wieku pracowałem w tym zespole pod Jego kierunkiem.

W tym miejscu na moment chciałbym cofnąć się w czasie i przywołać najważniejsze fakty z biografii i przypomnieć niektóre aspekty działalności Pana Profesora Dobrzyńskiego. Było to możliwe po analizie dość obszernej dokumentacji, która pozostała po okresie, kiedy sprawowałem funkcje administracyjne, a prof. Ludwik Dobrzyński „musiał” dostarczać dodatkowych informacji na swój temat przy wnioskach o wyróżnienie za kolejne wybitne osiągnięcie naukowe, dydaktyczne czy organizacyjne. Postaram się, unikając zbędnego panegiryzmu, zrobić to w sposób na pewno niedoskonały, uproszczony i nieoddający wszystkich zasług Pana Profesora. O części z nich na pewno nie wiemy.

Ludwik Roman Dobrzyński, syn Jerzego i Teofili, urodził się 27 stycznia 1941 r. w Asino nad rzeką Człym na Syberii w obwodzie tomskim w byłym Związku Radzieckim. Ukończył Wydział Matematyczno-Fizyczny Uniwersytetu Warszawskiego w 1964 r., broniąc pracę magisterską „Badanie rotacji jonów amonowych w roztworach stałych”, napisaną pod kierunkiem prof. Bronisława Burasa. W 1969 r. w IBJ obronił rozprawę doktorską „Badania rozkładu wewnętrznego namagnesowania w stopach Co-Fe”. Promotorem rozprawy

był prof. dr hab. Jerzy Kociński. Habilitował się w 1975 r. również w IBJ na podstawie rozprawy „Analiza fourierska magnetycznych czynników kształtu niektórych stopów metali 3d o strukturze fcc”.

Miejszem pierwszego zatrudnienia Ludwika Dobrzyńskiego (jeszcze przed magisterium) w latach 1963-1982 był Instytut Badań Jądrowych w Świerku, gdzie pracował na stanowiskach od technika, poprzez asystenta do adiunkta. W Zakładzie II Fizyki Ciała Stałego zajmował się badaniem struktur i dynamiki sieci krystalicznej i magnetycznej techniką rozpraszania neutronów termicznych. W końcowym okresie był zastępcą kierownika Zakładu. Od 1964 r. był członkiem Polskiego Towarzystwa Fizycznego. W latach 1964-1980 należał również do Związku Nauczycielstwa Polskiego. W okresie 1975 – 13 grudnia 1981 r. prowadził grupy młodzieżowe w KIK. Od września 1980 r. zostaje członkiem NSZZ Pracowników Nauki, Techniki i Oświaty. Organizuje koło związkowe w zakładzie, zostaje wybranym delegatem na zjazd założycielski Solidarności, której członkiem zostaje w październiku 1980 r. W latach 1980-1981 był przewodniczącym Solidarności w Zakładzie II IBJ. Był jednocześnie sekretarzem redakcji i autorem publikacji w Biuletynie Informacyjnym NSZZ „Solidarność” w tym Instytucie. W 1981 r. zostaje członkiem Rady Naukowej IBJ, a w grudniu 1982 r. został zwolniony z pracy w IBJ za działalność związkową. Przez parę miesięcy w 1983 r. był pracownikiem Krajowego Biura Koncertowego.

Jak już wspominałem, od października 1983 r. dalsza kariera naukowa prof. Ludwika Dobrzyńskiego była związana z białostocką fizyką. Stanowisko docenta otrzymał 1 grudnia 1986 r., a stanowisko profesora UwB – 1 lutego 1991 r. 14 stycznia 1992 r. uzyskał tytuł profesora nauk fizycznych. Od 1 września 1995 r. był profesorem zwyczajnym w Uniwersytecie Warszawskim, a następnie w Uniwersytecie w Białymstoku.

Profesor Ludwik Dobrzyński sprawował szereg funkcji kierowniczych. Poza kierowaniem zakładem, przez kilka miesięcy pełnił funkcje kierownika Katedry Fizyki. W latach 1990-1993 był dziekanem Wydziału Matematyczno-Przyrodniczego. Kierował dużym wydziałem skupiającym 4 kierunki: biologię, chemię, fizykę i matematykę. W latach 1999-2002 był przewodniczącym Rady Naukowej Instytutu Fizyki Doświadczalnej UwB. W latach 2007-2008 prof. Ludwik Dobrzyński był pierwszym dziekanem obecnego Wydziału Fizyki Uniwersytetu w Białymstoku. Zorganizował od podstaw jego pracę. Od 1997 r. był również dyrektorem Działu Szkolenia i Doradztwa w Instytucie Problemów Jądrowych (obecnie Narodowe Centrum Badań Jądrowych) w Świerku.

Profesor Ludwik Dobrzyński był członkiem kilku towarzystw, rad i komisji w organizacjach naukowych krajowych i zagranicznych, na przykład: Komitet Fizyki PAN (1991-1993), Sekcja Fizyki Materii Skondensowanej Komitetu Fizyki PAN (1993-1996), Rada Naukowa Instytutu Energii Atomowej w Świerku (1995-1999), Se-

nacka Komisja ds. Budżetu i Finansów UW (1996-1999), Towarzystwo Popierania i Krzewienia Nauk (od 1997), Komisja Edukacji i Informacji Społecznej w Państwowej Radzie ds. Atomistyki (1997-2000), grupa europejska Public Awareness of Nuclear Science (PANS) (od 1999). Ponadto od 2001 r. uczestniczył w charakterze doradcy w sesjach Komitetu Naukowego ONZ ds. Skutków Promieniowania Atomowego (UNSCEAR), a od roku 2009 był zastępcą delegata Polski. Był też członkiem redakcji czasopisma naukowego *Physica Scripta*.

Prof. Ludwik Dobrzyński zajmował się badaniem struktur krystalicznych i magnetycznych ciała stałego z wykorzystaniem technik dyfrakcji rentgenowskiej i neutronów, spektroskopii Mössbauera, rozpraszania Comptona, technik magnetometrycznych. Pracownia Spektroskopii Komptonowskiej organizowana przez Profesora od podstaw w latach 80. ubiegłego wieku, była jedyną tego typu pracownią w Polsce i jedną z nielicznych w świecie, wykorzystując wysokoaktywne źródła promieniowania gamma do badania rozkładów pędów elektronów. Zasadą prof. Ludwika Dobrzyńskiego jest również wprowadzenie i rozwijanie w bezparametrycznej analizie danych doświadczalnych tzw. metody maksymalnej entropii, dostarczającej optymalnych wyników przy ograniczonej informacji początkowej.

Profesor Ludwik Dobrzyński odbył staże naukowe w Instytucie Energii Atomowej w Kjeller (Norwegia, 1965-1966, 1993-1994), Zjednoczonym Instytucie Badań Jądrowych w Dubnej (ZSRR, 1969-1971), Brookhaven National Laboratory (USA, 1985), Instytucie Badań Jądrowych w Kassaccia (Włochy, 1994), Uniwersytecie w Delft (Holandia, 1995), na Uniwersytecie Paryż VI (Francja, wizyty w okresie 1991-2001), nie licząc sesji pomiarowych na synchrotronach w ESRF w Grenoble i Daresbury Laboratory w Wielkiej Brytanii. Te staże i aktywna współpraca z wieloma krajowymi i zagranicznymi ośrodkami naukowymi owocowały licznymi kontaktami i przez to wyjazdami pracowników zakładu na staże naukowe do tych ośrodków, umożliwiając kolejne awanse naukowe w zakładzie prof. Ludwika Dobrzyńskiego.

Prof. Ludwik Dobrzyński opublikował ponad 240 prac naukowych i artykułów popularnonaukowych oraz – wspólnie z Konradem Blinowskim - monografię „Neutrons and solid state physics”, wyd. Ellis Horwood (1994). Jest również autorem rozdziału w monografii „X-Ray Compton Scattering”, wyd. Oxford University Press (2004). Jest autorem i współautorem licznych materiałów edukacyjnych i raportów z tematyki ochrony radiologicznej i biologicznego działania promieniowania jonizującego, adresowanych do uczniów, studentów i nauczycieli, zamieszczonych na stronach Działu Edukacji i Szkoleń NCBJ. Napisał wiele artykułów do prasy lokalnej popularyzujących energetykę jądrową i badania z zakresu fizyki jądrowej.

W 1986 r. prof. Ludwik Dobrzyński otrzymał zespołową Nagrodę Ministra Szkolnictwa Wyższego, w 1994 r.

– również nagrodę naukową Ministra Edukacji Narodowej. W 1996 r. został wyróżniony odznaką Zasłużony dla Białostockizny, a w 2003 r. został uhonorowany Złotym Krzyżem Zasługi. W 2010 r. otrzymał Medal Komisji Edukacji Narodowej, w 2011 r. – Medal Uniwersytetu w Białymstoku, najwyższe odznaczenie naszej uczelni. Otrzymał również kilkanaście Nagród Rektora UW, Prorektora UW oraz Rektora UWB.

Poza wymienionymi wcześniej, szczególne zasługi prof. Ludwika Dobrzyńskiego dla Uniwersytetu w Białymstoku i białostockiej fizyki można podsumować w kilku następnych punktach. Wypromował 5 doktorów w swoim zakładzie i wspierał naukowo trzy rozprawy habilitacyjne w swoim zespole. Był inicjatorem i wieloletnim przewodniczącym najpierw Szkół Magnetyzmu, potem Międzynarodowych Szkół Fizyki i Chemii Fazy Skondensowanej odbywających się w Białowieży, organizowanych przez Zakład Fizyki Ciała Stałego do 2009 r. Przez 20 lat Szkoła zyskała renomę dobrego miejsca, gdzie spotykają się młodzi naukowcy z wielu krajów i wymieniają doświadczenia oraz wysłuchują wykładów poświęconych najnowszym trendom w badaniach fazy skondensowanej. Zorganizował wraz ze swoim zakładem po raz pierwszy w Polsce w 2000 roku prestiżową, cykliczną konferencję na temat rozkładów gęstości ładunku, spinów i pędów elektronów „Sagamore XIII” oraz 23-cią Ogólną Konferencję Oddziału Materii Skondensowanej Europejskiego Towarzystwa Fizycznego „CMD23” w roku 2010.

Profesor Ludwik Dobrzyński aktywnie zajmował się popularyzacją fizyki. Prowadził po kilka wykładów popularnonaukowych rocznie (w tym wykłady zaproszone na Zjazdach Fizyków Polskich), brał regularny udział w Festiwalach Nauki i Sztuki w Białymstoku oraz w Piknikach naukowych w Warszawie. Zorganizował - i przez 27 lat prowadził - Seminarium Fizyki Ciała Stałego, gdzie prezentowane były aktualne wyniki badań zakładów doświadczalnych, a zapraszani goście, często wybitni fizycy, przedstawiali najnowsze osiągnięcia ich ośrodków. Jednym z „koników” Profesora była hormeza radiacyjna. Był ekspertem hipotezy (dobrze udokumentowanej, ale mało wykorzystywanej w praktyce), korzystnego wpływu małych dawek promieniowania jonizującego na żywe organizmy i stymulacji przez to promieniowanie wzrostu oraz procesów naprawczych w komórkach.

Profesor był bardzo dobrym wykładowcą, lubianym i cenionym przez studentów, często ujmującym temat z odniesieniem do dziedzin daleko odbiegających od podstawowej domeny swoich badań. Przygotował 5 skryptów do cenionych przez studentów wykładów kursowych i monograficznych. Na marginesie: dość dokładnie zapoznałem się z tymi skryptami dokonując przed laty hobbistycznie transferu tekstu z ulubionego przez Profesora edytora ChiWriter do nowszego edytora MSWord, w szczególności polubiłem wtedy pracę z edytorem równań.

Na szczególne podkreślenie zasługiwała sumienność Profesora, rzetelność i terminowość w wykonywaniu przez Niego podjętych zadań. Trudno znaleźć naukowca-przyrodnika bardziej kompetentnego, sumiennego i wnikliwego, o rozległych horyzontach, niestroniącego od zagadnień z pogranicza fizyki i biologii, chemii czy medycyny, zajmującego się na co dzień badaniami z wykorzystaniem metod jądrowych. W swych działaniach wykazywał ogromną energię i talent organizatorski. Poza tym zawsze interesował się życiem prywatnym współpracowników, służył radą i doświadczeniem. W czasach kiedy spotkania w restauracjach nie były jeszcze tak popularne (przynajmniej tutaj na Podlasiu) „podsumowywanie” awansów naukowych Koleżanek i Kolegów często było organizowane w mieszkaniach samych zainteresowanych, zawsze z udziałem Pana Profesora, zawsze z dużą dozą humoru. Osobiście użyczałem kilkakrotnie swoje skromne lokum na nieformalne spotkania z zaproszonymi gośćmi z zagranicy, oczywiście też z udziałem samego Profesora. Również z nostalgią wspominam robocze wizyty w domu Państwa Dobrzyńskich w Warszawie i miłą atmosferę stwarzaną przez małżonkę Gospodarza, Panią Marię.

Hobby prof. Ludwika Dobrzyńskiego to m.in: gra na skrzypcach i fortepianie. Poza Polyhymnią, nieobce mu były muzy innych dziedzin sztuki: teatru, poezji czy ... tańca. Okazało się, że w latach 1965-1967 był On uczestnikiem międzynarodowych konkursów tańca towarzyskiego, startując w reprezentacji Polski. Talenty te ujawniały się podczas bankietów konferencyjnych, w szczególności podczas Szkół Fizyki i Chemii Fazy Skondensowanej w Białowieży, ulubionego międzynarodowego spotkania Profesora. Zawsze ze swadą wygłaszał toast powitalny z dużą dozą humoru, zawsze organizowane były tańce, w których brylował na parkiecie i, jeżeli tylko była taka możliwość, grał na fortepianie lub pianinie. Do dzisiaj z sentymentem wspominamy te spotkania sprzed kilkunastu lat i ich efekty, pomimo, że organizacja kolejnych Szkół kosztowała cały Zakład parę miesięcy dodatkowej pracy.

Rok akademicki 2010/2011 był ostatnim rokiem pracy prof. Ludwika Dobrzyńskiego na Wydziale Fizyki Uniwersytetu w Białymstoku. Dotychczasowe osiągnięcia Wydziału Fizyki w ciągu ponad 50-letniej historii rozwoju fizyki uniwersyteckiej w Białymstoku to również wynik jego prawie 30-letniej obecności i twórczej pracy w naszym środowisku. Po pożegnaniu się z Wydziałem Fizyki UwB w 2011 roku, prof. Ludwik Dobrzyński do końca swych dni w dalszym ciągu pracował w Dziale Szkolenia i Doradztwa w NCN w Świerku.

Ostatnie kontakty prof. Ludwika Dobrzyńskiego z naszym Wydziałem Fizyki, od 2014 roku w nowym budynku w kampusie UwB, to Jego seminarium wydziałowe 13 października 2020 r. „Klimat, energetyka ... i zdrowy rozsądek”, połączone ze zwiedzaniem nowego Obserwatorium Astronomicznego z Planetarium

w kampusie UwB oraz - okazuje się, że ostatnie - sympatyczne popołudnie w restauracji w gronie byłych współpracowników. Przy okazji odwiedziliśmy dawne miejsce pracy Profesora, a ściślej miejsce, w którym już po dawnym budynku Wydziału Fizyki (wcześniej Katedry i Instytutu Fizyki) nie ma śladu, a wznoszą się tam nowoczesne budynki mieszkalne i hotel.

Przez ostatnie lata od czasu do czasu wymienialiśmy się bieżącymi informacjami. Ostatnio Profesor pochwalił się swoimi córkami i wnukiem. Donosił, np. że wnuk studiuje informatykę i uczą ich ... jak się włamywać do różnych miejsc komputerowych. W charakterystyczny dla siebie sposób skomentował to: „mądre dziecko – ma takie szlachetne cele”. W liście z końca października dyskretnie dał do zrozumienia, że niestety, życie staje się coraz krótsze, coraz słabsze i coraz bardziej męczące ... biorąc pod uwagę efekty zdrowotne w moim jestestwie, myślę, że z Nowym Rokiem zrezygnuję z pracy w Świerku. Życzenie to się spełniło, ale, niestety, nie w sposób zaplanowany przez Profesora. Zmarł w Warszawie w nocy 10/11 stycznia 2022 r. w wieku prawie 81 lat. Pozostawił żonę Marię, córki Luizę i Dorotę z mężem oraz wnuka. Po wielu latach współpracy z nieodżałowanej pamięci Profesorem Ludwikiem Dobrzyńskim z całym przekonaniem stwierdzam, że było dla mnie wielkim zaszczytem, mogąc czerpać doświadczenie z dyskretnej obserwacji Jego aktywności naukowej, dydaktycznej i organizacyjnej. Po wielu latach współpracy w dalszym ciągu nasze kontakty pozostawały na szczeblu „Szanowny Panie Profesorze” – „Drogi Panie Gienku”. Tak się umówiliśmy i odpowiadała mi relacja Mistrz – uczeń, chociaż przez jakiś czas Profesor był formalnie moim podwładnym. Mistrz – pozostaniesz na zawsze w naszej pamięci.

Białystok, 12.01.2021 r.
prof. Eugeniusz Żukowski
emerytowany pracownik Wydziału Fizyki UwB
(dziekan Wydziału Fizyki w latach 2008-2016)

OSTATNIE PRACE NAUKOWE PROFESORA LUDWIKA DOBRZYŃSKIEGO

Czytając różne wspomnienia o Panu Profesorze Ludwiku Dobrzyńskim autorstwa wielu Jego współpracowników popadłem w pewnego rodzaju zakłopotanie związane z moim wiekiem. Siłą biologicznej rzeczy nie mogłem być świadkiem wielu wydarzeń z Jego życia, gdyż pojawiłem się w całej tej historii w zasadzie pod jej koniec. Niemniej jednak od początku do końca miałem zaszczyt uczestniczyć w ostatnim wielkim projekcie

naukowym Pana Profesora – próbie zrozumienia skomplikowanego wpływu niskich dawek promieniowania jonizującego na organizmy.

Poznałem prof. Ludwika Dobrzyńskiego, jako student pierwszego roku fizyki w trakcie wycieczki do Świerku wraz z grupą kolegów z Koła Naukowego Fizyków Politechniki Warszawskiej. Było to pod koniec 2002 r., a więc Pan Profesor miał już niespełna 62 lata. Jednakże nasze realne kontakty zaczęły się 5 lat później, gdy starałem się o przyjęcie na studium doktoranckie w ówczesnym Instytucie Problemów Jądrowych im. A. Sołtana (IPJ). Zanim jednak to nastąpiło, Pan Profesor zaprosił mnie do siebie do domu na rozmowę. Zmierzył mnie swym przenikliwym wzrokiem, wypytał o motyw i dotychczasowe osiągnięcia, po czym dostałem szansę.

Jako doktorant Profesora Dobrzyńskiego w IPJ, a po kilku latach już w NCBJ, miałem wyjątkową indywidualną relację Mistrz – uczeń, którą doceniłem dopiero po latach. Z nostalgią wspominam nasze codzienne rozmowy i dysputy naukowe na temat zawłości problemów, z którymi przyszło mi się zmierzyć. Siłą spokoju, opanowania, ale też humoru Pana Profesora w połączeniu z wysoką kulturą osobistą pojawiają się w moich wspomnieniach bardzo często. Gdy przychodziłem do Profesora z jakimś problemem czy pytaniem, siadaliśmy wspólnie na żółtej kanapie przy szklanym stoliku w Jego gabinecie w ówczesnym Dziale Szkolenia i Doradztwa IPJ, po czym z charakterystyczną dykcją, lekkim uśmiechem i spokojem brał do ręki długopis i tłumaczył wszystko językiem matematyki. Część kartek z tymi zapiskami mam po dziś dzień.

Nasza współpraca zbiegła się w czasie z zainteresowaniami Pana Profesora w odniesieniu do tzw. problemu niskich dawek promieniowania. Byłem pierwszym doktorantem, który podjął się tego tematu leżącego na pograniczu fizyki, radiobiologii i epidemiologii. Nasze pierwsze prace skupiły się na problemie właściwej analizy danych relacji dawka-efekt przy użyciu analizy bayesowskiej. Naturalną konsekwencją były badania wpływu narażenia zawodowego pracowników ośrodka w Świerku na ich stan zdrowia, a także wpływu promieniowania naturalnego – przede wszystkim radonu – na ryzyko wystąpienia chorób nowotworowych. Istotny impuls do dalszych prac badawczych przyniosło modelowanie efektów biofizycznych na poziomie komórkowym, co stało się głównym tematem naszych wspólnych prac naukowych na kolejną dekadę. Tuż przed obroną mojej pracy doktorskiej wybraliśmy się nawet wspólnie na konferencję NARE-2012 do miasta Hirosaki w Japonii, gdzie prezentowaliśmy nasze modele. Wyjazd ten wspominam z dużym sentymentem także, dlatego iż relacje z Panem Profesorem zaczęły ewoluować w kierunku bardziej przyjacielskich.

Należy podkreślić, iż prof. Ludwik Dobrzyński interesował się także życiem poza-naukowym swoich podopiecznych. W czasie naszych wielokrotnych roz-

mów telefonicznych pytał o żonę i dzieci, czy też aktualną sytuację zawodową. Martwił się, że podjęta praca w przemyśle zbyt odciągnie mnie od pracy naukowej. Wielokrotnie zapraszał do siebie na ciekawe dyskusje czy wieczorek pieśni patriotycznych, do których dawał podkład muzyczny grając na pianinie. Z rzeczy bardziej przyziemnych muszę przyznać, iż to Profesor nauczył mnie degustacji różnych wytwornych trunków. Oczywiście częstokroć wchodziliśmy w polemiki, nawet gruntowne, ale wyrozumiałość i spokój Profesora nadawały dyskusji właściwy ton.

Wracając do badań naukowych należy wspomnieć, iż nasze wspólne prace naukowe poświęcone modelowaniu odpowiedzi organizmów na promieniowanie jonizujące mocno się zintensyfikowały w ciągu ostatnich trzech lat. Wspólnie z innymi współautorami udało nam się modelować procesy popromiennej kancerogenezy komórkowej i wpływu na nią odpowiedzi adaptacyjnej. Opisaliśmy także biofizyczne podstawy stosowania krzywej Gomperta do opisu rozwoju nowotworu, wreszcie udało się szczegółowo opisać proces transformacji nowotworowej za pomocą formalizmu bazującego na fizyce procesów zarodkowania i wzrostu kryształów, co Profesor Dobrzyński postulował już wiele lat temu. Kilka tygodni przed śmiercią Profesor wystąpił w Gliwicach na międzynarodowej konferencji prezentując nasz najnowszy model, który na bazie teorii radiacyjnej odpowiedzi adaptacyjnej opisywał dokładnie tzw. efekt Yonezawy, zwany też efektem poprzedzającej dawki. Ostatnia publikacja naukowa Pana Profesora poświęcona jest właśnie temu zagadnieniu – została zaakceptowana do druku w czasopiśmie *Radiation and Environmental Biophysics* dokładnie dzień po Jego śmierci. Tym samym wygląda na to, iż dostąpiłem zaszczytu bycia współautorem i jednym z najbliższych współpracowników ostatnich prac naukowych Pana Profesora Ludwika Dobrzyńskiego.

Pan Profesor zmarł w nocy z dnia 10 na 11 stycznia 2022 roku przeżywszy 81 lat. Zналиśmy się kilkanaście lat, przez które wywarł na moje życie olbrzymi wpływ. Z pełną świadomością przyznaję, iż żaden inny człowiek, poza oczywiście moją najbliższą rodziną, nie dał mi tak wiele, jak Pan Profesor.

Prof. Ludwik Dobrzyński był jednym z najwybitniejszych przedstawicieli polskiej atomistyki. Prawie całe swoje życie zawodowe związany był z ośrodkiem jądrowym w Świerku. Był wybitnym naukowcem, wspaniałym i dobrym człowiekiem, niestrudzonym popularyzatorem nauki oraz społecznikiem. Dla wielu swoich studentów, doktorantów i współpracowników był przede wszystkim Mistrzem i Mentorem. Dla mnie również – i za to bardzo Mu dziękuję.

Krzysztof Fornalski,
Warszawa

SPOTKANIE W SPRAWIE PROJEKTÓW WDROŻENIOWYCH

WARSZAWA, 5 maja 2022



Wiceminister klimatu i środowiska Piotr Dziadzio z gospodarzem spotkania dyrektorem Instytutu Chemii i Techniki Jądrowej prof. dr. hab. Andrzejem Chmielewskim



Wiceminister Piotr Dziadzio podczas swojego wystąpienia

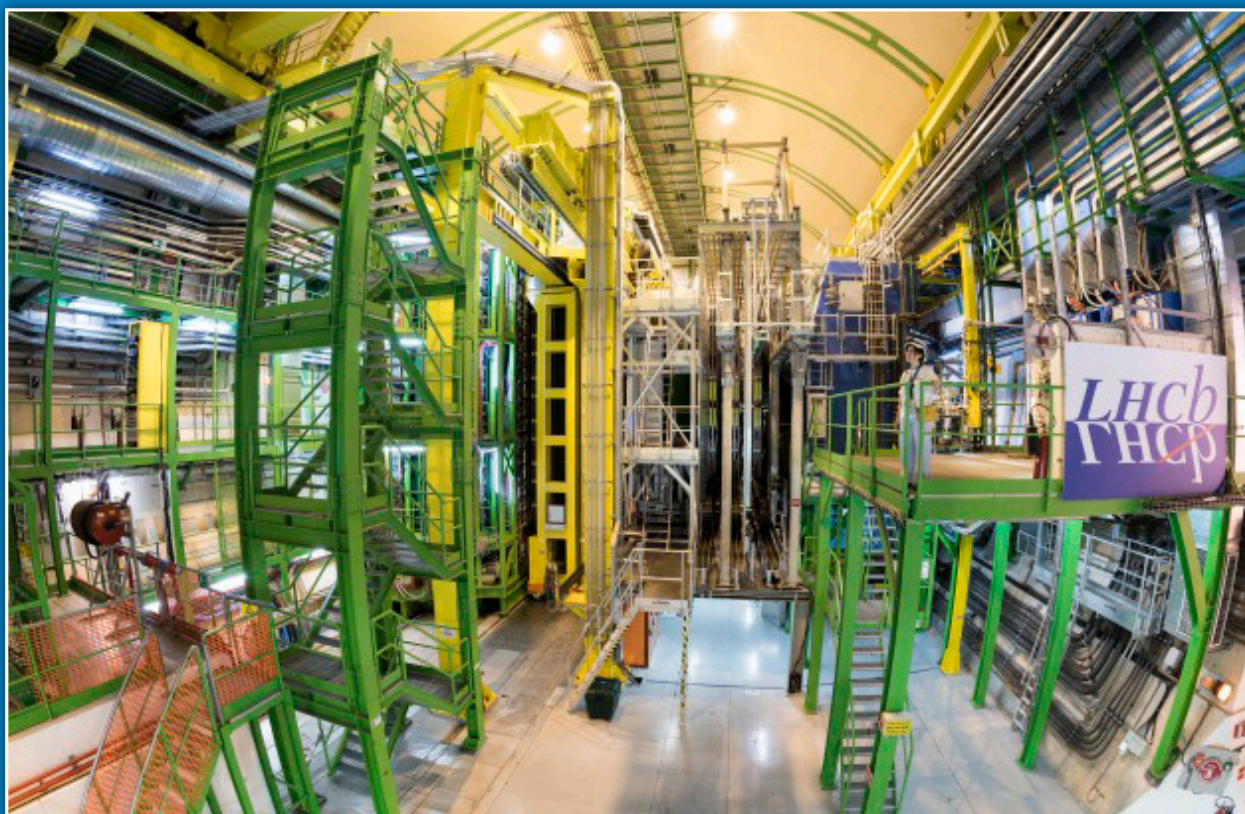


W prezydium, dr hab. inż. Tomasz Galka (dyktor Instytutu Energetyki), prof. Krzysztof Kurek (dyktor Narodowego Centrum Badań Jądrowych), xxx, wiceminister klimatu i środowiska Piotr Dziadzio, dr Piotr Szrek (zastępca dyrektora PIG-PIB ds. badań i rozwoju)



Od lewej: Sławomir Mazurek wiceprezes NFOŚiGW, Piotr Dowżenko, dyrektor Departamentu w NFOSiGW, Krystian Szczepański dyrektor IOŚ PIB

WIOSNA W CERN



Eksperymentalna komora LHCb w LHC-IP 8
LHCb experiment cavern at LHC-IP 8



Nowe wyniki eksperymentu AMS w przestrzeni kosmicznej
New results from the AMS experiment in space