



KAPITAŁ LUDZKI
NARODOWA STRATEGIA SPÓJNOŚCI

UNIA EUROPEJSKA
EUROPEJSKI
FUNDUSZ SPOŁECZNY



Co nowego w nauce?

Promieniowanie jonizujące – wróg czy
przyjaciel?

CZŁOWIEK – NAJLEPSZA INWESTYCJA



KAPITAŁ LUDZKI
NARODOWA STRATEGIA SPÓJNOŚCI

UNIA EUROPEJSKA
EUROPEJSKI
FUNDUSZ SPOŁECZNY



Co nowego w nauce?

Promieniowanie jonizujące – wróg czy przyjaciel?

„Człowiek – najlepsza inwestycja”

Siedlce, 8 kwietnia 2011

Projekt współfinansowany ze środków Unii Europejskiej
w ramach Europejskiego Funduszu Społecznego

**Bezpłatne materiały szkoleniowe związane z Projektem
Uniwersytetu Przyrodniczo-Humanistycznego w Siedlcach,
realizowanym w partnerstwie z Miastem Siedlce**

"Praktyki pedagogiczne – kompetentnie, twórczo, przyjemnie"

**Program Operacyjny Kapitał Ludzki
Priorytet III. Wysoka jakość systemu oświaty,
Działanie 3.3 Poprawa jakości kształcenia
Poddziałanie 3.3.2. Efektywny system kształcenia i doskonalenia nauczycieli**

NR PROJEKTU: WND-POKL.03.03.02-00-041/10

NR UMOWY DOFINANSOWANIA: UDA-POKL.03.03.02-00-041/10-01

Okres realizacji projektu: 1.09.2010 r. – 20.10.2014 r.
Wartość projektu: 3 833 175,00 zł

Redakcja materiałów: dr Ryszard Kowalski, mgr Olga Szyrkarczyk

Biuro Projektu: ul. Bolesława Prusa 12, 08-110 Siedlce, p. 39
e-mail: praktyki@uph.edu.pl www.praktyki.uph.edu.pl
tel./fax. 25 6431380

Spis treści

Wstęp	4
Rola i znaczenie Marii Skłodowskiej-Curie w rozwoju nauki	7
Promieniowanie jonizujące – wróg czy przyjaciel?.....	19
Wstęp.....	19
1.Podstawowe własności najmniejszych obiektów w przyrodzie.....	22
Rozpad promieniotwórczy.....	25
Rozpad alfa.....	31
Rozpad beta	32
Rozpad gamma	33
Reakcje rozszczepienia i syntezy jąder.....	34
2. Współczesne badanie struktury i dynamiki jądrowej	37
Ważne pytania	40
Siły jądrowe.....	42
Badanie jąder lekkich	44
W poszukiwaniu jąder superciężkich	45
3. Wpływ promieniowania na organizmy żywe	49
Rodzaje dawek.....	51
Silne dawki	55
Słabe dawki	56

Wstęp

*„Była jedynym niezepsutym przez
sławę człowiekiem spośród tych,
których przyszło mi poznać”*

Albert Einstein o Marii Skłodowskiej-Curie

Rok 2011 jest Międzynarodowym Rokiem Chemii. Zawdzięczamy to Marii Skłodowskiej-Curie, która dokładnie sto lat temu została uhonorowana Nagrodą Nobla za odkrycia w dziedzinie promieniotwórczości. Biorąc pod uwagę to wielkie wydarzenie z przeszłości, jak również specyfikę naszego Projektu, skupiającego się na dobrym praktycznym przygotowaniu studentów do nauczycielskiej profesji, postanowiliśmy tegoroczne szkolenie z cyklu „Co nowego w nauce” poświęcić na przypomnienie sylwetki naszej Noblistki i problematyki promieniotwórczości, której poświęciła ona swoje naukowe życie. Być może nasi studenci, którzy w tym roku będą odbywać praktyki w szkołach, zetkną się z różnymi rocznicowymi inicjatywami, bo z pewnością w niejednej szkole okoliczność ta będzie powodem do organizowania dydaktycznych projektów, apeli, konferencji. Szczególne cechy osobowości Marii Skłodowskiej-Curie można wykorzystać w dyskusji z młodzieżą na temat skromności w codziennym życiu, konsekwencji w dążeniu do realizacji życiowych celów, naukowych idei, patriotyzmu.... Jest ona pod tym względem wzorem godnym naśladowania, dlatego warto przeznaczyć trochę szkolnego czasu na przypomnienie jej dokonań i życiowej filozofii.

W pierwszej części materiałów szkoleniowych zamieszczony jest artykuł dr Krystyny Wojciechowskiej i prof. Krzysztofa Wojciechowskiego, pracowników Instytutu Chemii na Wydziale Nauk Ścisłych w Uniwersytecie Przyrodniczo-Humanistycznym w Siedlcach, omawiający wkład Marii Skłodowskiej-Curie w rozwój nauki. Autorzy przytaczają w nim różne

zdarzenia z jej prywatnego i naukowego życia. Z pewnością takie przypomnienie jest potrzebne, a fakty z biografii Marii Skłodowskiej-Curie z pewnością zostaną wykorzystane w rocznicowych obchodach.

W drugiej części Czytelniczy znajdą obszerne fachowe opracowanie nt. „Promieniowanie jonizujące – wróg czy przyjaciel?”, którego autorem jest dr Michał Kowal z Instytutu Problemów Jądrowych. Tekst ten wzbogaca naszą wiedzę o promieniotwórczości i różnorodnym wykorzystaniu tego zjawiska, a jednocześnie dostarcza argumentów do zabrania głosu w toczącej się w społeczeństwie dyskusji na temat energetyki jądrowej, szczególnie gorącej teraz, po awarii elektrowni atomowej w Japonii, spowodowanej przez silne trzęsienie Ziemi. W Polsce dyskutowało się na ten temat po awarii elektrowni w Czarnobylu, a teraz powraca się do tej dyskusji i toczą się społeczne spory w kontekście zamiaru rządu RP zbudowania w niedalekiej przyszłości dwóch elektrowni tego typu na terenie naszego kraju.

Temat ten jest interesujący także z punktu widzenia pracy nauczyciela-wychowawcy. Aby rozmawiać z młodzieżą na tematy promieniotwórczości i praktycznego wykorzystania tego zjawiska, nie można opierać się na powtarzanych obiegowo opiniach, nie mających potwierdzenia w naukowej wiedzy. Powinnością nauczyciela jest bowiem, zgodnie z kodeksem nauczycielskiej etyki, *„głoszenie i obrona prawdy w nauce” oraz „przekazywania uczniom i studentom swojej wiedzy zgodnie z prawdą naukową i własnym sumieniem”*.

Wyrażam przekonanie, że informacje zamieszczone w tym zeszycie będą przydatne wszystkim uczestnikom naszego projektu, pomogą im w pracy dydaktycznej i wychowawczej prowadzonej w szkołach i w społecznym otoczeniu. Wydając te materiały chcemy także dorzucić naszą projektową cegielkę do licznych inicjatyw podejmowanych w kraju i na świecie dla uczczenia naszej Wielkiej Rodaczki – Marii Skłodowskiej-Curie w Międzynarodowym Roku Chemii.

Autorom dziękuję za przygotowanie tekstów, a uczestnikom szkolenia życzę miłej i pożytecznej lektury. Z podziękowaniem za udział w szkoleniu, które jest kolejnym krokiem umacniającym wspólnotę dydaktyczną w naszym Mieście i z należnym wszystkim szacunkiem.

Ryszard Kowalski

Rola i znaczenie Marii Skłodowskiej-Curie w rozwoju nauki

Krystyna Wojciechowska, Krzysztof Wojciechowski

Instytut Chemii, Uniwersytet Przyrodniczo-Humanistyczny w Siedlcach

*„Jestem z tych, którzy wierzą,
że Nauka jest czymś bardzo pięknym”¹⁾*

Maria Skłodowska- Curie

Maria Skłodowska urodziła się w Warszawie 7 listopada 1867 roku jako piąte dziecko Władysława Skłodowskiego i Bronisławy z Boguskich. W domu, w którym się urodziła (ul. Freta 16) mieści się obecnie muzeum jej poświęcone oraz siedziba Polskiego Towarzystwa Chemicznego. Od dzieciństwa „Mania”, jak ją nazywano, wykazywała się wyjątkowymi uzdolnieniami, nie tylko w zakresie nauk ścisłych. Po ukończeniu w roku 1883 III Żeńskiego Gimnazjum w Warszawie, ze złotym medalem i po rocznym odpoczynku w majątku swojego dziadka rozpoczęła pracę jako guwernantka w majątku państwa Żorawskich pod Płockiem. Wcielając w życie ideały pozytywizmu, organizowała wówczas zajęcia dla dzieci wiejskich ucząc ich języka polskiego, historii, algebry. Tu przeżyła swój pierwszy zawód miłosny, gdy Żorawscy nie zgodzili się na jej ślub z synem Kazimierzem.

Maria powróciła do Warszawy w roku 1890 roku, gdzie uczęszczała na wykłady „*uniwersytetu latającego*” utworzonego dla kobiet, które nie mogły wówczas legalnie studiować. W pracowni chemicznej Muzeum Rolnictwa i Przemysłu, kierowanej przez swego brata ciotecznego Józefa Boguskiego (ucznia Mendelejewa), zajęła się wykonywaniem doświadczeń chemicznych. W późniejszych latach stale podkreślała, że wiedza i umiejętności uzyskane w tym czasie były kluczowymi w jej badaniach nad wydzieleniem radu i polonu. Obiektem zainteresowań Marii były nie tylko

nauki ścisłe, ale również literatura. Czytała w oryginale utwory poetów rosyjskich, francuskich, niemieckich. Sama też pisała wiersze.

Pod koniec 1891 roku postanowiła wyjechać do Paryża, aby tam zdobyć wyższe wykształcenie w zakresie fizyki i matematyki na Uniwersytecie Sorbońskim. Podjęła taką decyzję, po odmowie przyjęcia jej na Uniwersytet Warszawski, z powodu tego, że była kobietą. W 1893 roku uzyskała licencjat z fizyki z pierwszą lokatą, a rok później z drugą lokatą z matematyki. Pragnęła prowadzić badania naukowe w Polsce, ale niestety spotkała się z odmową uczelni w naszym kraju (Uniwersytet Jagielloński). Powróciła więc do Paryża, gdzie pod kierunkiem profesora Gabriela Lippmana (1845 - 1921) podjęła pierwsze badania naukowe w zakresie magnetyzmu stali. W 1894 poznała Piotra Curie, znanego już wówczas fizyka, współodkrywcę zjawiska piezoelektryczności. W lipcu 1895 roku odbył się ich ślub. Koniec XIX wieku obfitował w wiele sensacyjnych, przełomowych odkryć naukowych. W 1895 roku Roentgen (1845 - 1923) opisał przenikliwe promieniowanie X, a w następnym roku Henri Becquerel (1852 - 1908) przenikliwe promieniowanie uranowe.

Te odkrycia zainspirowały Marię do podjęcia pod koniec 1897 roku badań w tym zakresie. Zaowocowały one w krótkim czasie odkryciem znacznie bardziej promieniotwórczych pierwiastków. W sprawozdaniu Francuskiej Akademii Nauk z lipca 1898 roku czytamy: *„Przypuszczamy, że ciało, które wyodrębniliśmy ze smółki uranowej zawiera nieznaną jeszcze metal zbliżony ze swoich właściwości chemicznych do bizmutu. Jeśli istnienie tego metalu się potwierdzi, proponujemy dla niego nazwę polon (Po) - od imienia ojczyzny jednego z nas”²⁾*.

Efektorem dalszych prac prowadzonych wspólnie przez Marię i Piotra było odkrycie drugiego pierwiastka promieniotwórczego radu (Ra) i otrzymanie czystego chlorku radu (0.1 g) oraz zbadanie jego właściwości

chemicznych i fizycznych. Należy podkreślić, że badania wymagały od nich wielkiego wysiłku i samozaparcia ze względu na wyjątkowo trudne warunki, w jakich przebiegały (nieocieplana szopa, „przerobienie” kilku ton tzw. blendy smolistej).

25 czerwca 1903 Maria obroniła pracę doktorską pod tytułem „*Badania ciał radioaktywnych*”, a pod koniec roku wspólnie z Piotrem otrzymała Nagrodę Nobla z fizyki za badania zjawiska promieniotwórczości (połowę nagrody otrzymał Henri Becquerel). Była to pierwsza nagroda Nobla dla osoby narodowości polskiej i to jeszcze kobiety.

Dalsze badania Marii i Piotra koncentrowały się na otrzymaniu czystego radu oraz określeniu właściwości emitowanego przez niego promieniowania. Niestety, od roku 1906 Maria była zmuszona prowadzić je bez Piotra, który zginął w nieszczęśliwym wypadku (wpadł prosto pod ciężki wóz konny), do którego doszło na skutek jego złego stanu zdrowia, nieuwagi, złej pogody i widoczności (padał deszcz, było ciemno).

Piątego listopada 1906 roku miało miejsce historyczne wydarzenie. Maria jako pierwsza kobieta wygłosiła wykład na Sorbonie zaczynając go takimi słowami „*Gdy się rozważa postępy, jakie uczyniła fizyka w ostatnich dziesięciu latach, uderza zmiana, która zaszła w naszych pojęciach o elektryczności i materii*”²⁾.

W roku 1908 Maria została mianowana na stanowisko profesora - kierownika Katedry Chemii Fizycznej paryskiej Sorbony. Była pierwszą kobietą na świecie, która uzyskała takie stanowisko.

Po śmierci męża, Maria starała się urzeczywistniać jego ideały. Opublikowała artykuł rozpoczęty przez Piotra na temat ciężaru gatunkowego substancji radioaktywnych, odmówiła przyjęcia Legii Honorowej

uzasadniając, że jest to „.....kwestia sumienia, wyrastająca z szacunku dla pamięci Piotra Curie, który nie chciał być udekorowany”²⁾.

Zwieńczeniem prowadzonych przez nią badań było przyznanie jej w roku 1911 po raz drugi Nagrody Nobla. Uzasadnienie Komitetu Naukowego Chemii Fundacji Nobla brzmiało: „*Nagroda indywidualna za rozwój chemii dzięki odkryciu polonu i radu oraz zbadanie metalicznego radu i jego związków chemicznych*”²⁾.

Maria była członkiem wielu zagranicznych akademii nauk, z wyjątkiem Francuskiej Akademii Nauk. Historyczne głosowanie członków Akademii w dniu 23 stycznia 1911 roku zakończyło się wyborem Edouarda Branlyego (przewagą dwóch głosów w drugiej turze głosowania). Maria poczuła gorycz porażki i nigdy więcej nie kandydowała na członka Akademii.

W czasie I wojny światowej została szefem wojskowej komórki medycznej zajmującej się organizowaniem ambulansów do prześwietlania rannych zwanych „*małymi Curie*”. Przebadano w nich 10 tysięcy żołnierzy. Maria jako jedna z pierwszych kobiet (lipiec 1916 rok) zdobyła prawo jazdy, aby samodzielnie prowadzić ambulans. Założyła 220 stacji radiologicznych, w których przebadano 3 mln francuskich żołnierzy. Zdaniem Marii badania te to dowód, że „*czysta nauka*” może służyć dobru ludzkości.

Po uzyskaniu przez Polskę niepodległości, po 123 latach niewoli, spełniło się marzenie Marii: „*Marzyłam o zasłużonym odrodzeniu narodu polskiego, który nigdy nie zapomniał o swej chlubnej przeszłości, mimo długiego, prawie beznadziejnego ucisku.*”²⁾

W 1918 roku Maria objęła kierownictwo stworzonego dla niej Instytutu Radowego w Paryżu, którego działem chemicznym kierowała aż do

śmierci. Traktowała go jako swoją własność używając określeń „*moje laboratoria*”, „*moi pracownicy*”, co roku mierzyła obwód lip, które kazała posadzić na dziedzińcu. Do roku 1933 prowadziła wykłady na Sorbonie.

Zmarła o świcie 4 lipca 1934 roku w klinice Sancellemoz pod Paryżem. W oficjalnym komunikacie można przeczytać „*Brak odpowiedzi szpiku kostnego, prawdopodobnie spowodowany przewlekłym narażeniem na promieniowanie*”. Jej pogrzeb odbył się w Sceaux z udziałem tylko najbliższych przyjaciół i rodziny, brata Józefa i siostry Bronisławy, którzy do jej grobu wrzucili garść przywiezionej z kraju ziemi. Hołd jej pamięci złożyli wielcy uczeni, np. Niels Bohr wspominał „*dobroć*” okazaną mu podczas spotkania, Rutherford „*wielkie zdolności*”²⁾, Albert Einstein napisał, że „*była jedynym niezepsutym przez sławę człowiekiem spośród tych, których przyszło mu poznać*”¹⁾. Pozostała również w pamięci tych wszystkich osób, które z nią pracowały. Andre Broca napisał „*Myśl o tym, że wejdę do jej gabinetu i nie znajdę jej za stertą starannie poukładanych papierów, sprawiła, że płakałem jak dziecko*”²⁾.

Swoje naukowe zainteresowania Maria przekazała starszej córce Irenie Joliot-Curie (1897- 1956), która w 1935 roku - wraz z mężem Fryderykiem - również otrzymała Nagrodę Nobla za odkrycie sztucznej promieniotwórczości. Druga córka Ewa (1904 - 2007), z wykształcenia pianistka, została znaną dziennikarką i autorką biografii swojej matki.

Od czasu odkrycia radu, aż do śmierci, Maria Skłodowska-Curie była czołową postacią światowej nauki. Otrzymała wiele honorowych doktoratów w prestiżowych uniwersytetach, w tym Uniwersytetu Jagiellońskiego (1924 r.). W Wielkiej Brytanii otrzymała medal im. Dave’go, najwyższe odznaczenie przyznawane naukowcom przez Królewskie Towarzystwo Naukowe w Londynie. Została także członkiem Akademii Nauk, między innymi w Petersburgu, Bolonii, Pradze oraz Polskiej Akademii Umiejętności

w Krakowie. W 1925 roku została członkiem Francuskiej Akademii Medycyny (instytucji niezależnej od Francuskiej Akademii Nauk). W roku 1934 Towarzystwo Naukowe Warszawskie wybiło na jej cześć pamiątkowy medal.

Maria utrzymywała przyjacielskie kontakty z wieloma wybitnymi uczonymi swojej epoki, między innymi z Albertem Einsteinem, a także pamiętała o swoim rodzinnym kraju. Wraz z dziećmi Ireną i Ewą często spędzała wakacje w Zakopanem, gdzie jej siostra Bronisława Dłuska wraz z mężem prowadzili sanatorium przeciwgruźlicze. W 1925 roku wzięła udział w położeniu kamienia węgielnego pod budowę Instytutu Radowego w Warszawie przy ul. Wawelskiej, a w roku 1932 roku, podczas jednej z wielu wizyt w Warszawie, uczestniczyła w jego otwarciu (obecnie Centrum Onkologii - Instytut im. Marii Skłodowskiej - Curie). Podarowała wówczas Instytutowi 0,1g radu. Drzewo, które tam posadziła rośnie do dziś, a na skwerze przed budynkiem Instytutu stoi jej pomnik.

Maria Skłodowska-Curie wniosła także ogromny wkład w rozwój badań na promieniotwórczością w innych krajach. W jej laboratoriach dziesiątki młodych naukowców z całego świata, między innymi z Niemiec, Wielkiej Brytanii, USA, Norwegii, Japonii i Chin, zdobywało wiedzę i umiejętności prowadzenia badań w zakresie radiochemii. Wśród nich byli także liczni Polacy, których Maria Curie ze szczególną troskliwością szkolila, aby później mogli organizować swoje szkoły naukowe w Polsce.

W tym miejscu należałoby wymienić przynajmniej dwa nazwiska. Jedną z tych osób była Alicja Dorabalska (1897 - 1975), która w 1934 roku została mianowana na stanowisko profesora na Politechnice Lwowskiej jako pierwsza kobieta - profesor w tej uczelni. W 1945 roku zorganizowała Katedrę Chemii Fizycznej na Politechnice Łódzkiej, która w latach siedemdziesiątych ubiegłego wieku pod kierunkiem jej ucznia prof. Jerzego

Kroh przekształciła się w Międzyresortowy Instytut Chemii Radiacyjnej. Do chwili obecnej jest on czołową placówką naukową nie tylko w Polsce, ale i na świecie. Drugą postacią istotną dla rozwoju polskich badań w zakresie chemii jądrowej był profesor Ignacy Złotowski (1907 - 1966), który staż naukowy odbył w Instytucie Radowym w Paryżu w latach 1933 - 1936. Kierował on najpierw Katedrą Chemii Jądrowej Uniwersytetu Jagiellońskiego (1949 - 1953), a następnie Katedrą Radiochemii na Uniwersytecie Warszawskim (1953 - 1966).

W Instytucie Radowym w Paryżu pierwsze kroki w nauce stawiało jeszcze wielu innych wybitnych polskich uczonych. Ich nazwiska i osiągnięcia można poznać studiując karty książki „*Z dziejów polskich badań nad oddziaływaniem promieniowania z materią*”.

Maria Skłodowska-Curie nie doczekała, niestety, drugiego istotnego odkrycia z zakresu promieniotwórczości, a mianowicie zjawiska rozszczepienia jądra atomowego. Dokonali tego niemieccy chemicy Otto Hahn (1879 - 1968) i Fritz Strassman (1902-1980) w roku 1939. Odkryli oni, że w wyniku pęknięcia jądra uranu o masie atomowej 235 pojawiają się lżejsze pierwiastki oraz 2-3 neutrony, a zjawisku temu towarzyszy wydzielenie się ogromnych ilości energii, w wyniku zamiany części masy atomu uranu w energię.

Należy nadmienić, że podobne eksperymenty w tym samym czasie wykonywała również Irena Joliot-Curie w Paryżu. Trzy miesiące później eksperyment ten powtórzono w Warszawie w Pracowni Radiologicznej działającej od 1910 do 1939 roku, najpierw w Krakowie, a od 1913 roku w Warszawie. Była ona pod szczególną opieką Marii Skłodowskiej - Curie, honorowego jej kierownika, aż do śmierci.

Uczeni bardzo szybko uświadomili sobie, że to odkrycie, można wykorzystać do produkcji energii elektrycznej. Niestety, 1 września 1939 roku wybuchła II wojna światowa, która spowodowała, że priorytetem stało się inne jego zastosowanie, do produkcji niszczycielskiej broni jądrowej. W ramach projektu „Manhattan”, 6 grudnia 1942 roku, w Chicago, pod kierunkiem włoskiego fizyka Enrico Fermiego (1901-1954), uruchomiono pierwszy doświadczalny reaktor jądrowy. Natomiast pierwszy duży reaktor, służący do produkcji nowo odkrytego sztucznego pierwiastka – plutonu, został uruchomiony dwa lata później w budowanym od podstaw ośrodku atomowym Hanford.

Świat wkroczył w erę broni masowej zagłady, gdy 6 sierpnia 1945 roku zrzucono bombę atomową na Hiroszimę w Japonii, a dwa dni później na Nagasaki. Przez następne dekady XX wieku trwał intensywny wyścig zbrojeń jądrowych, w którym uczestniczyły wielkie „mocarstwa” atomowe - USA, ZSRR, Wielka Brytania, Francja i Chiny. Wyprodukowano dziesiątki tysięcy ładunków jądrowych, które mogłyby wielokrotnie zniszczyć życie na Ziemi.

Dopiero w 1954 roku rozpoczęła się era energetyki jądrowej. W Obnińsku pod Moskwą uruchomiony został pierwszy niewielki reaktor o mocy 6 MW, a w roku 1958 w Calder Hall w Wielkiej Brytanii pierwsza komercyjna elektrownia jądrowa (EJ) o mocy 60 MW. Obecnie na świecie pracuje ich około 455 i produkują one około 17% energii elektrycznej. W wielu krajach stanowią one podstawowe źródło energii elektrycznej, np. we Francji, gdzie ok. 80% energii elektrycznej pochodzi z 59 reaktorów jądrowych.

W Polsce przygotowania do budowy elektrowni jądrowej rozpoczęto już w latach 50-tych ubiegłego wieku. W Świerku k/Otwocka zbudowano Instytut Badań Jądrowych, w którym pracował reaktor doświadczalny „Ewa”

(1958 - 1995). W 1974 roku uruchomiono zaprojektowany i zbudowany przez polskich specjalistów reaktor „*Maria*” o mocy 30 MW (1974 r.). Pracuje on do chwili obecnej i jest wykorzystywany, między innymi do produkcji radioizotopów do celów przemysłowych i medycznych.

Rozwój badań naukowych z zakresu chemii i fizyki jądrowej w Polsce umożliwił na początku lat 80-tych ubiegłego wieku rozpoczęcie w Żarnowcu budowy pierwszej polskiej elektrowni jądrowej. Budowę jej przerwano roku 1991, a przyczyną decyzji o przerwaniu budowy były zmiany polityczne w Polsce (reaktory były zaprojektowane w ZSRR) oraz powszechny brak akceptacji społecznej dla korzystania z energii jądrowej po katastrofie elektrowni jądrowej w Czarnobylu w 1986 roku.

Początek XXI wieku skierował ponownie cały świat ku energetyce jądrowej. Przeważały szalę istotne zalety energetyki jądrowej takie jak:

- brak emisji dwutlenku węgla,
- minimalna emisja izotopów promieniotwórczych,
- mała ilość odpadów – wypalonego paliwa,
- bezpieczne przechowywanie odpadów,
- koszty energii mniejsze niż z elektrowni konwencjonalnych.

Jednocześnie zaprojektowano nowe typy reaktorów jądrowych, takie jak reaktor EPR (Franceatom - Francja i Siemens - Niemcy) oraz reaktor AP-1000 (Westinghouse -USA), które w istotny sposób podniosły poziom bezpieczeństwa EJ.

Również w Polsce, w październiku 2010 roku, uruchomiany został program rozwoju EJ, zgodnie z którym pierwszy reaktor będzie uruchomiony w 2020 roku. Ministerstwo Gospodarki planuje, że do 2030 r. powstaną trzy elektrownie jądrowe o łącznej mocy ok. 5 tys. MW.

Należy pamiętać, że techniki jądrowe to nie tylko broń jądrowa i energetyka jądrowa, ale liczne inne ich zastosowania. W szczególności należy tu wspomnieć o medycynie nuklearnej, dzięki której uzyskano możliwość skutecznej walki z nowotworami. Pierwsze badania nad zastosowaniem promieniowania jonizującego emitowanego przez rad do leczenia nowotworów prowadziła już Maria Curie-Skłodowska. Obecnie w leczeniu nowotworów stosuje się też izotop kobaltu-60 produkowany w reaktorach jądrowych oraz akceleratory elektronów i protonów. Izotopy jodu-131 (^{131}I) wykorzystuje się w diagnostyce tarczycy, a izotopy technetu (^{99}Tc) do badań diagnostycznych (np. tzw. scyntygrafia np. kości).

Sztucznie otrzymywane w reaktorach jądrowych izotopy kobaltu (Co), strontu (Sr), cezu (Cs) oraz inne wykorzystuje się w przemyśle, między innymi, do badań radiograficznych, np. kontroli jakości odlewów stalowych i spawów w rurociągach, kontroli grubości warstw galwanicznych. Izotopy ameryku (Am) powszechnie stosowane są w instalacjach przeciwpożarowych jako tzw. czujki dymu. Techniki jądrowe znalazły także zastosowanie w archeologii tzw. datowanie za pomocą pomiaru zawartości węgla C-14.

Z kolei techniki chemii radiacyjnej wykorzystuje się do sterylizacji jednorazowego sprzętu medycznego (nici chirurgiczne, igły, strzykawki, urządzenia do przetaczania krwi, itp.) i żywności. Dzięki nim otrzymuje się także polimery o nowych właściwościach (np. zwiększona twardość konieczna przy produkcji rur z polietylenu) czy stosowane w leczeniu oparzeń tzw. „sztuczne skóry” oraz opatrunki hydrożelowe.

Jednym ze spektakularnych sukcesów technik radiacyjnych jest opracowana w Instytucie Chemii i Techniki Radiacyjnej w Warszawie metoda radiacyjnego usuwania tlenków siarki i azotu ze spalin w elektrowniach węglowych. Jako źródło promieniowania wykorzystywane

są w niej akceleratory elektronów. Pierwszą w skali światowej taką instalację uruchomiono w elektrowni „*Pomorzany*” w Szczecinie.

W dziedzinie biologii, jednym z najbardziej doniosłych osiągnięć jest wykorzystanie techniki jądrowej, a ściślej izotopów węgla C-14, do wyjaśnienia mechanizmu procesu fotosyntezy.

Podsumowując można stwierdzić, iż odkrycia Marii Skłodowskiej – Curie miały istotny wpływ na rozwój chemii i fizyki. Badania prowadzone z wykorzystaniem promieniowania radu i polonu pozwoliły na wniknięcie w strukturę atomu i jądra atomowego, umożliwiły rozwój nowych dziedzin fizyki i chemii takich jak fizyka jądrowa, radiochemia, chemia radiacyjna, chemia kwantowa, radiobiologia, medycyna nuklearna, a więc dziedzin, które są fundamentem współczesnej nauki.

Maria Skłodowska-Curie jest postacią wyjątkową w skali światowej nie tylko dla nauki, ale także dla całej cywilizacji XX i XXI wieku. W 2009 roku brytyjski magazyn „*New Scientist*” uznał polską uczoną za największą kobietę naukowca wszechczasów. W przeprowadzonej przez pismo ankiecie wzięło udział 800 osobistości z międzynarodowego świata nauki. Skłodowska zdobyła ponad 25 proc. głosów, wyprzedzając m.in. Rosalind Franklin, współodkrywczynię podwójnej helisy DNA. Do dziś pozostaje jedyną kobietą, która otrzymała nagrodę Nobla dwukrotnie, a także jedyną uczoną w historii rozwoju nauki, uhonorowaną tą nagrodą w dwóch różnych dziedzinach nauk przyrodniczych. Za swoje ogromne zasługi, jako pierwsza kobieta, została pochowana w paryskim Panteonie (1995 r.) i otrzymała order Legii Honorowej.

Przedstawiony powyżej życiorys Marii Skłodowskiej- Curie nie byłby pełny, gdyby nie wspomnieć o niej jako o Człowieku. Lubiła wyjeżdżać na wieś, pływać, spacerować po lasach z plecakiem. Troszczyła się o córki

i była z nich dumna. Dla pracowników była szefową (la patronne) interesującą się ich pracą, ale zwracającą się do nich w sposób oficjalny Monsieur, Madame, Mademoiselle. Niektórzy uważali ją za apodyktyczną, inni podkreślali jej troskliwość. Maria do końca życia pozostała osobą życzliwą wobec ludzi. Krąży anegdota o jej spotkaniu z prezydentem Polski, Stanisławem Wojciechowskim. Prezydent spytał: „*Czy pamięta Pani jasiiek, który mi pożyczyła na drogę, gdy jechałem z Paryża do Warszawy? Pamiętam nawet, że Pan mi go zapomniał zwrócić*” - odpowiedziała Maria³). Nie chciała, aby inni jej okazywali współczucie i w związku z tym starała się ukryć przed nimi swoje problemy zdrowotne (zaćmę, dokuczliwy szum w uszach).

Maria nie dbała o dobra materialne, np. stroje, wyposażenie mieszkania. Bardzo interesowały ją drzewa, ogrody i nieruchomości, a zwłaszcza jedna - Instytut Radowy, który w krótkim czasie dzięki niej znacznie się rozrósł. Wspólnie z Piotrem zdecydowali nie opatentować technologii otrzymywania radu wykorzystywanej przez długi czas w przemyśle. Twierdziła później, że ich decyzja była słuszna, choć trochę żałowała, bo pieniądze mogłaby dać córkom, a także dzięki nim „...stworzyć doskonały Instytut, bez tylu przeszkód...”²).

Maria była tytanem pracy i mimo pogarszającego się stanu zdrowia nie chciała odejść na emeryturę. Pisała „*Czasem opuszcza mnie odwaga i myślę, że powinnam zaprzestać pracy, zamieszkać na wsi i poświęcić się ogrodnictwu. Ale tysiące nici mnie wiąże i zatrzymuje...Nie wiem też, czy - nawet pisząc książki naukowe - potrafiłabym się obejść bez laboratorium*”. Lubiała cytować Pasteura, który uważał laboratoria za „*święte przybytki*”, gdzie „*ludzkość rośnie, umacnia się i doskonali*”²).

Maria mimo wielu zaszczytów zawsze była przede wszystkim uczoną dążącą do zgłębienia tajników przyrody. Uważała, że „*Uczony jest w swojej*

pracowni nie tylko technikiem, lecz również dzieckiem wpatrzonym w zjawiska przyrody, wzruszające jak czarodziejska baśń.”¹⁾

Przypisy

1. http://pl.wikiquote.org/wiki/Maria_Skłodowska_Curie, dostęp z dnia 17.03.2011
2. S. Quinn "Życie Marii Curie", wyd. Prószyński i S-ka, Warszawa 1997
3. www.fizyka.net.pl/ciekawostki/ciekawostki_aou.html dostęp z dnia 17.03.2011

Bibliografia

1. S. Quinn "Życie Marii Curie", wyd. Prószyński i S-ka, Warszawa 1997
2. „Z dziejów polskich badań nad oddziaływaniem promieniowania z materią. Wspomnienia" praca zb. pod red. J. Kroh, wyd. Fundacja Badań Radiacyjnych, Łódź 2003.
3. J. Hurwic „Maria Skłodowska-Curie i promieniotwórczość” wyd. Żak, Warszawa 1993
4. G. Jezierski "Energia jądrowa wczoraj i dziś" wyd. WN-T, Warszawa 2005.
5. http://pl.wikipedia.org/wiki/Maria_Skłodowska-Curie, dostęp z dnia 17.03.2011
6. Maria Skłodowska Curie i jej dokonania, <http://www.agcia.yoyo.pl/curie/index.html> dostęp z dnia 16.03.2011
7. www.muzeum.if.pw.edu.pl dostęp z dnia 17.03.2011



Promieniowanie jonizujące – wróg czy przyjaciel?

Michał Kowal

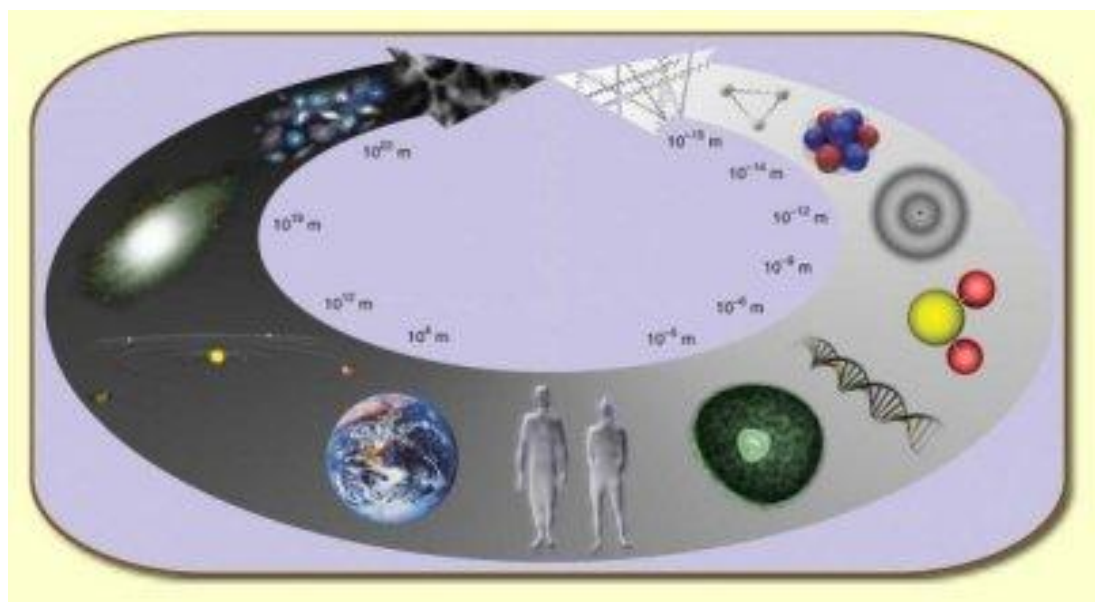
Instytut Problemów Jądrowych
ul. Hoża 69, 00-681 Warszawa

Wstęp

Mija właśnie 100 lat od chwili, gdy nasza rodaczka Maria Skłodowska-Curie, wraz z mężem Piotrem, otrzymała Nagrodę Nobla z chemii, w uznaniu jej prac nad radem. Przypomnijmy, że 8 lat wcześniej otrzymała ona Nagrodę Nobla z fizyki za badania nad promieniotwórczością naturalną.

Rocznica ta skłania nas do zastanowienia się nad współczesnym stanem wiedzy na temat fizyki i chemii jądrowej, a także nad obecnymi możliwościami jej zastosowań. Bilans zysków i strat musi zostać zrobiony, jeśli poważnie myślimy o budowie pierwszej w Polsce elektrowni jądrowej. Wdrażany jest właśnie pierwszy etap przygotowań do tego ogromnego przedsięwzięcia, czyli etap konsultacji społecznych mających za zadanie przekonać obywateli naszego kraju do tego pomysłu. W kontekście ostatnich wydarzeń w Japonii wydaje się to zadaniem arcytrudnym. Wykład ten ma się stać pretekstem do takiej dyskusji. Postaram się podać naukowe argumenty wspierające obie strony tej trudnej debaty tj. przeciwników jak i zwolenników rozwoju energetyki jądrowej. W drugiej części wykładu opowiem o najciekawszych naukowych eksperymentach w dziedzinie szeroko rozumianej fizyki jądrowej, między innymi: o eksperymencie LHC. Jest rzeczą zadziwiającą jak wiele informacji na temat ewolucji i przyszłości naszego Wszechświata można uzyskać badając najmniejsze obiekty fizyczne.

Pięknie ilustruje to poniży rysunek gdzie obie strzałki reprezentujące skale mikroskopową i makroskopową świata spotykają się w jednym miejscu.



RYSUNEK 1. Wielkość rzeczy. ¹

Rysunek ten uzmysławia olbrzymi rozmiar rozpiętości skali badanych przez fizykę obiektów tj. od 10^{-19} m w przypadku kwarków przez jądra atomowe 10^{-14} m, atomy 10^{-10} m, planety 10^6 aż po gromady galaktyk o rozmiarach rzędu 10^{22} m.

Widać ponadto z tego schematycznego rysunku, że fizyka jądrową (rozumiana tu szeroko) zaglądając do wnętrza bardzo małych, jak powiedzielibyśmy fundamentalnych, obiektów niejako cofa się bardzo daleko w czasie, bo aż do kilku chwil po wielkim wybuchu.

¹ Rysunek zaczerpnięty z wykładów NUPEX, źródło: <http://www.nupex.org/>

1. Podstawowe własności najmniejszych obiektów w przyrodzie

Zdefiniujmy obiekty, o których chcemy tu mówić, opiszmy ich podstawowe własności zwracając uwagę na ich wyjątkowość.

Idea, że otaczająca materia zbudowana jest z drobnych niepodzielnych elementów - atomów pochodzi jeszcze od Demokryta (ur. ok. 460 p.n.e., zm. ok. 370 p.n.e.). Na początku wieku XIX Dalton oraz Gay-Lucas wykonali serie eksperymentów chemicznych nad rozpuszczalnością gazów w cieczach. Wniosek z tych badań tj. że rozpuszczalność jest zależna od masy cząsteczek pozwolił dalej twierdzić, że cząsteczki zbudowane są z mniejszych niewidzialnych, niepodzielnych elementów – atomów. Dzięki temu odkryciu rozwinięto dalej kinetyczną teorię gazów, w której takie własności jak ciśnienie, objętość oraz temperatura mogą zostać zrozumiane przy założeniu chaotycznego, izotropowego ruchu pojedynczych atomów, zderzających się ze sobą w sposób doskonale sprężysty. Kulminacją tego było sformułowanie przez Maxwella, Boltzmana i Gibbsa termodynamiki statystycznej. Koncept atomowy wydawał się być ogólnie akceptowalny. Chemiczne własności atomów znajdują swoje odbicie w reakcjach chemicznych prowadzących do powstania nowych molekuł. Te własności są unikalne dla każdego atomu, ale jednocześnie istnieją grupy atomów o zbliżonych własnościach. Regularności te zostały usystematyzowane przez Mendelejewa (1872) w układzie okresowym pierwiastków. Typowy rozmiar atomu mieści się w granicach $(0.5-2.5) \times 10^{-10}$ m. Masy atomowe wyrażone w atomowych jednostkach masy ($1u = 1.6605 \times 10^{-10}$ kg) wahają się od 1u (dla wodoru) do ok. 207 (dla ołowiu) i więcej dla transuranowców.

Doświadczenia przeprowadzone przez Geigera-Marsdena oraz Rutheforda polegające na rozpraszaniu cząstek alfa na foliach złota jednoznacznie wskazywały na istnienie bardzo ciężkich naładowanych centrów rozpraszających – nazwanych później jądrami atomowymi. Dzięki tym badaniom w roku 1911 obecnie akceptowany pogląd na budowę atomu był już znany. Na tej podstawie w roku 1913 Bohr sformułował prostą i intuicyjną, ale bardzo użyteczną koncepcję elektronów krążących po stacjonarnych orbitach niepromieniujących w trakcie tego ruchu. Dało to początek do dziś intensywnie rozwijającej się mechanice kwantowej – teorii stanowiącej matematyczny język mikroświata. Język, którym nauczyliśmy się dziś posługiwać nie rozumiemy do końca znaczenia wszystkich słów.

Jądro atomowe, o którym tu mówimy zbudowane jest z dwu typów nukleonów o podobnej masie; dodatnio naładowanych protonów i elektrycznie obojętnych neutronów. Rozmiar jądra atomowego łatwo można oszacować na podstawie przybliżonej formuły:

$$R = r_0 A^{1/3} ; \text{ gdzie } A \text{ jest masą atomową (suma nukleonów w jądrze)}$$

$$\text{a } r_0 \approx 1.2 \times 10^{-15} \text{ m}$$

Widzimy więc, że w stosunku do atomu, jądro atomowe jest obiektem kilka rzędów wielkości mniejszym, i to dlatego można czasem usłyszeć, że materia, która nas otacza jest w gruncie rzeczy „pusta w środku”. Warto dodać w tym miejscu, że znakomita większość jąder posiada w stanie podstawowym kształty kuliste (na tym założeniu opiera się podany wyżej wzór) niektóre z nich są jednak zdeformowane, przybierając bardzo ciekawe formy geometryczne, czemu poświęcimy dalej osobny paragraf. Od niedawna wiemy, że nukleony składają się z jeszcze mniejszych obiektów zwanymi

kwarkami, których rozmiary są mniejsze niż 10^{-19} m. Obrazowo można to próbować sobie wyobrazić następująco. Załóżmy, że protony i neutrony mają średnicę 10 cm, wówczas kwarki i elektrony miałyby średnicę mniejszą niż

0.1 mm, a cały atom miałby średnicę około 10 km! tj. więcej niż 99.99% całego atomu. Ze względu na specyfikę sił jądrowych charakteryzujących oddziaływania pomiędzy nukleonami, w jądrze o danej liczbie protonów Z (tzw. *liczbie atomowej*) mogą znajdować się różne liczby neutronów. Inaczej mówiąc, dany pierwiastek chemiczny, składający się z atomów o ustalonej liczbie Z , może mieć jądra zawierające różne liczby neutronów. Mówimy wtedy, że istnieje szereg *izotopów* danego pierwiastka. Izotopy oznaczamy przy pomocy liczby Z , pisanej, jako dolny wskaźnik przy nazwie pierwiastka (powiedzmy – X) oraz *liczby masowej* A , będącej sumą liczb nukleonów w jądrze i pisanej, jako wskaźnik górny. Każdy pierwiastek chemiczny może mieć wiele izotopów. Np. jod ma 23 izotopy o liczbach masowych A od 117 do 139. Jądra o takiej samej liczbie masowej A mogą różnić się względną zawartością protonów i neutronów. Mówimy wtedy o *izobarach*.

Na zakończenie tych wstępnych informacji powiedzmy jeszcze słów kilka na temat stosowanych jednostek energii. W fizyce atomowej, jądrowej oraz w fizyce cząstek elementarnych, najczęściej używaną jednostką jest eV (czyt. elektronowolt) i jego wielokrotności (keV, MeV, GeV). Ponieważ energie, z którymi tu mamy do czynienia są bardzo małe takie jednostki są po prostu wygodne. Podajmy przykład: Najpotężniejsze urządzenie badawcze naszych czasów LHC (ang. Large Hadron Colider) wytwarza energie zderzenia rzędu 14 TeV. Jeżeli jednak zamienimy tę energię na podstawowe jednostki w układzie SI, czyli dżule okaże się, że to zaledwie milionowa część dżula. Podczas gdy samochód o masie jednej tony poruszający się z prędkością około 100 km/h ma energie rzędu milionów dżuli! Energię jest równoważna masie i odwrotnie. Przekształcenie jednej formy w drugą można wykonać dzięki słynnej relacji Einsteina ($E=mc^2$). Dlatego masę i energię można w fizyce jądrowej podawać w tych samych jednostkach.

Rozpad promieniotwórczy

Na początku wieku XX było już jasne, że niektóre ciężkie atomy wysyłają nieznanego typu promieniowania. Zjawisko promieniotwórczości (radioaktywności) polega na spontanicznych przemianach niestabilnych jąder atomowych (radionuklidów) i emisji promieniowania jądrowego, głównie α , β i γ . Jest to własność materii od czasu powstania jąder atomowych. Samorzutny charakter rozpadów promieniotwórczych oznacza, że rozpad danego jądra nie jest powodowany żadnymi czynnikami zewnętrznymi i nie zależy jego wcześniejszych losów. To, czy w danym momencie czasu nastąpi rozpad danego jądra możemy opisać jedynie z pomocą pojęć statystycznych określając prawdopodobieństwo takiego rozpadu. Rozpady poszczególnych jąder następują niezależnie od siebie. Oznaczając przez N_0 liczbę jąder w chwili początkowej, Liczba jąder, które **nie rozpadły się** w czasie t wynosi;

$$N(t) = N_0 \cdot e^{-\lambda \cdot t}$$

Średni czas życia jądra promieniotwórczego τ równy jest odwrotności stałej rozpadu; $\tau = 1/\lambda$

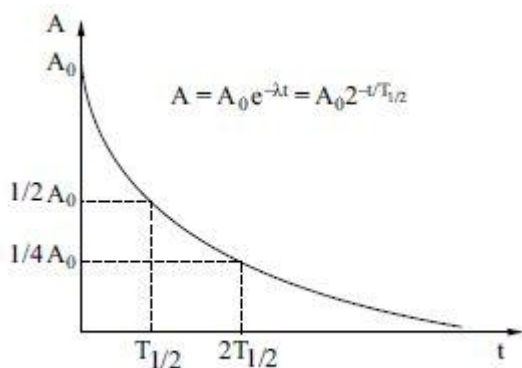
Czas, w którym rozpadowi ulega połowa początkowej liczby jąder nazywany jest **czasem połowicznego zaniku**. Czas ten wyznaczyć można ze związku

$$\frac{N_0}{2} = N_0 \cdot e^{-\lambda \cdot T} \quad \rightarrow \quad T = \frac{\ln 2}{\lambda} = \ln 2 \cdot \tau$$

Liczba rozpadów zachodzących w jednostce czasu w źródle promieniotwórczym nosi nazwę aktywności A . Aktywność źródła określona jest, więc jako stosunek liczby rozpadów w danym przedziale czasu do wielkości tego przedziału:

$$A = \left| \frac{dN(t)}{dt} \right| = \lambda \cdot N(t) = \lambda \cdot N_0 \cdot e^{-\lambda t}$$

Jednostką aktywności jest **bekerelel (Bq)**. Jeden bekerel, to aktywność źródła, w którym zachodzi jeden rozpad na sekundę. Zależność aktywności źródła promieniotwórczego od czasu pokazuje poniższy schematyczny rysunek.



Zależność aktywności źródła od czasu

RYSUNEK 2. Zależność aktywności źródła od czasu

Obecnie, w naturalnym środowisku ziemskim izotopy występują w różnym stężeniu²:

- 29 radionuklidów pochodzenia geologicznego (utworzonych przy formowaniu się Układu Słonecznego) o okresie połowicznego zaniku porównywalnym z wiekiem Ziemi (4,5 mld lat). Wśród nich izotopy: potasu K-40, rubidu Rb-87, toru Th-232, uranu U-238 i 235 i in.
- 43 radionuklidów pochodnych z naturalnych szeregów promieniotwórczych U-235, U-238 i Th-232, m.in. izotopy: radu Ra-226, radonu Rn-222, ołowiu Pb-214, bizmutu Bi-214, talu Ta-208.

² Rozporządzenie Rady Ministrów w sprawie dawek granicznych promieniowania jonizującego (Dz. U., Nr 20, poz. 168 z 2005 r.)

- Ponad 30 radionuklidów (dwudziestu kilku pierwiastków) od H-3 do Bi-205, w tym 25 nuklidów o okresie połowicznego zaniku dłuższym niż 1 miesiąc, a 15 radionuklidów dłuższym niż 1 rok, wytwarzanych w oddziaływaniu pierwotnego promieniowania kosmicznego z atmosferą. Są one najczęściej wytwarzane w sposób ciągły w reakcjach w reakcjach jądrowych wysokoenergetycznych cząstek (p, n, α) tego promieniowania z jądrami atomów atmosferycznych. Tak powstają m.in. izotopy: węgla C-14, trytu H-3, berylu Be-7 i in. Śladowe ilości tych izotopów przychodzą wprost z Kosmosu.

Niektóre z nich znajdują się, w śladowych ilościach, również w człowieku: C-14 i K-40, we wszystkich tkankach, Pu-239 i Sr-90 - w kościach, U-238(235) - w nerkach, J-131 - w tarczycy. Trafiają tam z otaczającego środowiska głównie drogą oddechową i pokarmową. Naturalne radionuklidy są, więc wszechobecne na Ziemi. Ich promieniowanie wraz z promieniowaniem kosmicznym tworzy naturalne tło promieniowania jonizującego działającego stale na człowieka.

Zestawienie przykładowych czasów życia odnajdujemy w Tabeli 1. Z tabeli tej widzimy jak olbrzymia rozpiętość czasów połowicznego zaniku występuje w przyrodzie. Uderzająca jest różnica czasów życia dla Th 232 i U 238 są to jądra różniące się między sobą jedynie pięcioma nukleonami; dwoma protonami i trzema neutronami, a czas życia zmienia się dla nich o kilkanaście rzędów wielkości. Już tu uzmysławiamy sobie jak trudno opisać będzie taką zmienność.

Tabela 1. Przykładowe czasy życia różnych izotopów

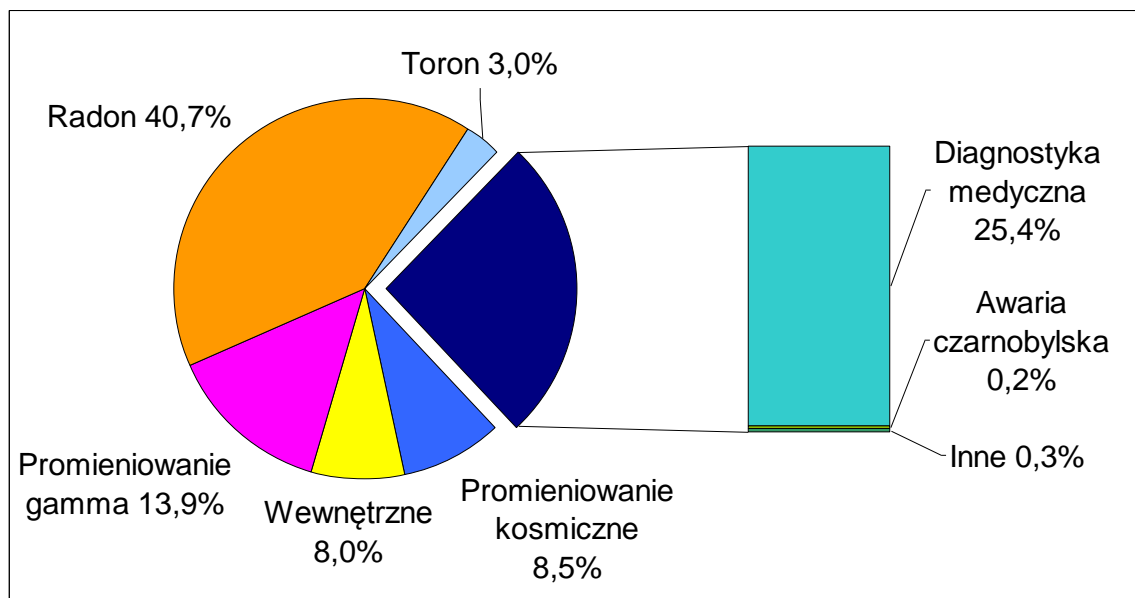
Izotop	Okres półrozpadu
$^{238}_{92}\text{U}$	4.5 miliarda lat
$^{233}_{90}\text{Th}$	0.1 sekundy
$^{131}_{53}\text{I}$	8.04 dni
$^{137}_{55}\text{Cs}$	30 lat
$^{60}_{27}\text{Co}$	5.28 lat
$^{40}_{19}\text{K}$	1.28 miliarda lat

Rozkład zawartości poszczególnych radionuklidów w naturalnym środowisku ziemskim nie jest jednorodny. W niektórych miejscach (komponentach środowiska) jest ona anormalnie duża, przekraczając wartości średnie nawet wiele razy. Dla scharakteryzowania natężenia promieniowania jądowego i zawartości poszczególnych radionuklidów podaje się ich aktywność, wyrażaną w bekerelach ($\text{Bq} = 1 \text{ rozpad/s}$), w jednostkowej masie (objętości) danego ośrodka.

Przeciętna całkowita aktywność ciała człowieka wynosi ok. 100 Bq/kg. Typowe aktywności najczęściej spotykanych radionuklidów w glebach Polski: U-238, zawierają się w przedziale 4,8 - 118 Bq/kg (średnio 26 Bq/kg), Th-228 - w przedziale 3,6 - 77 Bq/kg (średnio 21 Bq/kg), K-40 - w przedziale 111 - 967 Bq/kg (średnio 413 Bq/kg). Średnia aktywność

Rn-222 w powietrzu przy ziemi wynosi ok. 4,4 Bq/m³, ale w parterowych zabudowaniach może przekraczać 200 Bq/m³.

Działalność człowieka związana z wydobywaniem i przeróbką kopalin, spalaniem węgla, energetyką jądrową, wybuchami jądrowymi itp. powoduje redystrybucję naturalnych radionuklidów i podwyższenie poziomu tła naturalnego, zwłaszcza w wymiarze lokalnym. W następstwie spalania w Polsce ok. 150 mln ton węgla kamiennego rocznie do środowiska trafia ok. 150 ton promieniotwórczego uranu i 300 ton promieniotwórczego toru. Gromadzą się one głównie w popiołach, skąd przedostają się do wód gruntowych i do gleby. Są również uwalniane bezpośrednio do atmosfery wraz z dymem i kurzem. Aktywność takich popiołów może przekraczać nawet 2000 Bq/kg.



RYSUNEK 3. Roczny efektywny równoważnik dawki promieniowania jonizującego (3,4 mSv) w roku.³

³ Materiały edukacyjne działu szkolenia i dworactwa Instytutu Problemów Jądrowych

Dzięki różnym typom rozpadów oraz rozmaitej stabilności izotopy różnych pierwiastków znajdują olbrzymie zastosowanie w życiu codziennym, oto niektóre z nich:

Ameryk - ^{241}Am - (wykorzystywane promieniowanie α , okres połowicznego rozpadu 432,7 lat) zastosowanie czujniki dymu (instalacje przeciwpożarowe)

Cez - ^{137}Cs - (wykorzystywane promieniowanie gamma, okres połowicznego rozpadu 30 lat) zastosowanie radiografia przemysłowa, bomba cezowa, pomiary grubości

Iryd - ^{192}Ir - (wykorzystywane promieniowanie gamma, okres połowicznego rozpadu 73,8 lat) zastosowanie radiografia przemysłowa

Jod - ^{131}I - (wykorzystywane promieniowanie gamma, okres połowicznego rozpadu 8 dni) zastosowanie badanie tarczycy (medycyna)

Kobalt - ^{60}Co - (wykorzystywane promieniowanie gamma, okres połowicznego rozpadu 5,3 lat) zastosowanie bomba kobaltowa (medycyna), radiografia przemysłowa, urządzenia radiacyjne, waga izotopowa, sprzęt do pomiaru: grubości, poziomu cieczy w zbiornikach.

Pluton - ^{239}Pu - (wykorzystywane promieniowanie α , okres połowicznego rozpadu 24000 lat) zastosowanie czujniki dymu

Pluton - ^{238}Pu (wykorzystywane promieniowanie α , okres połowicznego rozpadu 87,7 lat) zastosowanie stymulatory serca, czujniki dymu

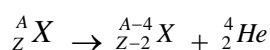
Tal - ^{204}Tl - (wykorzystywane promieniowanie β okres połowicznego rozpadu 3,8 lat) zastosowanie sprzęt do pomiaru grubości

Wodór - ^3H - (wykorzystywane promieniowanie β okres połowicznego rozpadu 12,3 lat) zastosowanie farby świecące

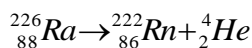
.

Rozpad alfa

Cząstka α jest jądrem helu-4 i składa się więc z dwóch protonów i dwóch neutronów - można ją zatem traktować również jako dwuwartościowy jon helu. Jest więc rzeczą zrozumiałą, że jeśli jądro A_ZX rozpada się i w wyniku rozpadu emituje tę (i tylko tę) cząstkę, samo musi przejść w jądro o liczbie masowej mniejszej o cztery jednostki i liczbie atomowej mniejszej o dwie jednostki:



Przykładem tego typu rozpadu jest rozpad radu-226 emitującego cząstkę α o energii 4,78 MeV:



Niestabilne jądro (nuklid) może rozpadać się na więcej sposobów. W szczególności, w przypadku radu-226 powyższy rozpad dotyczy nie wszystkich, lecz "tylko" 95% rozpadów. Pozostałe 5% zachodzi z emisją cząstki α o energii 4,60 MeV, co oznacza, że w tym rozpadzie energia tworzonego ${}^{222}_{86}Ra$ jest o 0,18 MeV wyższa niż w poprzednim. Jądro to, przechodząc do stanu o swej najniższej energii, będzie pozbywało się energii wzbudzenia, tym razem emitując foton o energii 0,18 MeV. Nie jest to jednak koniec historii, gdyż izotop radu-222 jest izotopem niestabilnym i rozpada się dalej. W istocie rzeczy mamy tu do czynienia z całą serią rozpadów α , β i γ zanim osiągnięte zostanie jądro stabilne ${}^{206}_{82}Pb$. W takich sytuacjach mówimy o istnieniu szeregów promieniotwórczych (więcej na ich temat powiemy w rozdziale 2).

Rozpad alfa jest dosyć typowym rozpadem jąder ciężkich, mechanizm zaś polega na tzw. zjawisku tunelowym. Istotną cechą tego rozpadu jest

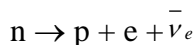
emisja cząstki o ściśle określonej energii, jednej dla danego typu rozpadu (jako że w rozpadach możemy mieć kilka grup cząstek), co wiąże się z faktem, że w wyniku rozpadu powstaje tylko ta cząstka oraz nowe jądro: rozdział nadmiarowej energii jądra początkowego (tu - radu-226) pomiędzy obie cząstki jest jednoznacznie określony z zasad zachowania energii i pędu.

Rozpad beta

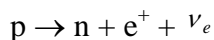
Stabilność jądra jest związana z pewną równowagą pomiędzy liczbą neutronów i protonów w danym jądrze. Jądro nietrwale może polepszyć swój stosunek liczby neutronów do protonów na drodze jednego z trzech procesów:

- rozpadu β^-
- rozpadu β^+
- wychwytu elektronu (EC, od angielskiej nazwy *electron capture*)

W dwóch ostatnich przemianach proton zmienia się w neutron, w rozpadzie β^- zaś neutron rozpada się i tworzy się proton. We wszystkich tych przemianach liczba masowa A jądra nie zmienia się, natomiast zmienia się o jeden liczba atomowa Z . Ponieważ mechanizmy przemian β są inne, związane z tzw. *oddziaływaniami słabymi*, oprócz emitowanego w nich elektronu (cząstki β^- , czyli e^-) czy pozytonu (cząstki β^+ , czyli e^+), odpowiednio emitowane jest także antyneutrino elektronowe ($\bar{\nu}_e$), lub neutrino elektronowe (ν_e) Opisane przemiany nukleonów zapisujemy jako



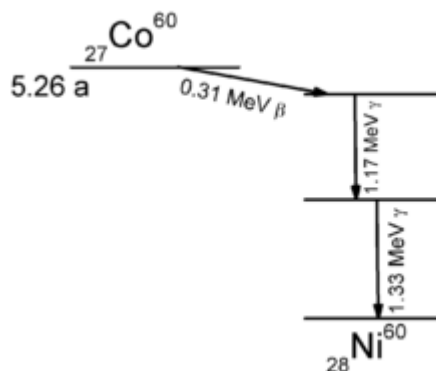
i



W tym ostatnim przypadku proces rozpadu jest złożony. Mianowicie, gdy jądro ma nadmiar energii większy niż $1,02 \text{ MeV}$, a więc równoważną energię dwóch mas spoczynkowych elektronu, może powstać para elektron-pozyton, a następnie proton w oddziaływaniu z elektronem przekształca się w neutron i neutrino. Ponieważ w obu typu przemianach nukleonów energia wzbudzenia jądra rozkłada się, jak widać, na trzy cząstki, energia emitowanych elektronów czy pozytonów może być zarówno równa całej energii przemiany (tj. różnicy energii jądra początkowego i końcowego) jak i zero, kiedy to energia przemiany będzie unoszona przez neutrino (lub antyneutrino).

Rozpad gamma

Jądro atomowe jest kwantowym układem wielu cząstek naładowanych elektrycznie i mających momenty magnetyczne. W wyniku oddziaływania takiego układu ze zmiennym polem elektromagnetycznym następować mogą przejścia między określonymi stanami energetycznymi, związane z emisją lub absorpcją fotonu promieniowania elektromagnetycznego wysokiej energii, zwanego promieniowaniem gamma. W szczególności jądro znajdujące się w stanie wzbudzonym o energii wyższej E_i od energii jakiegoś innego stanu E_j może ulec spontanicznej deekscytacji polegającej na przejściu ze stanu o energii wyższej do stanu o energii niższej z emisją fotonu gamma o energii równej różnicy tych energii $E_i - E_j$. Mierząc za pomocą metod spektroskopii promieni gamma energię tego fotonu i znając energie jednego z poziomów wyznaczyć można energię drugiego. Postępując w ten sposób dla różnych przejść zbadać można schemat poziomów energetycznych jądra. Zadanie to komplikuje zwykle fakt, iż pomiędzy tymi poziomami jądra mogą zachodzić różne przejścia. Przykład przemiany beta a następnie sekwencji emisji kwantów gamma znajduje się poniżej:

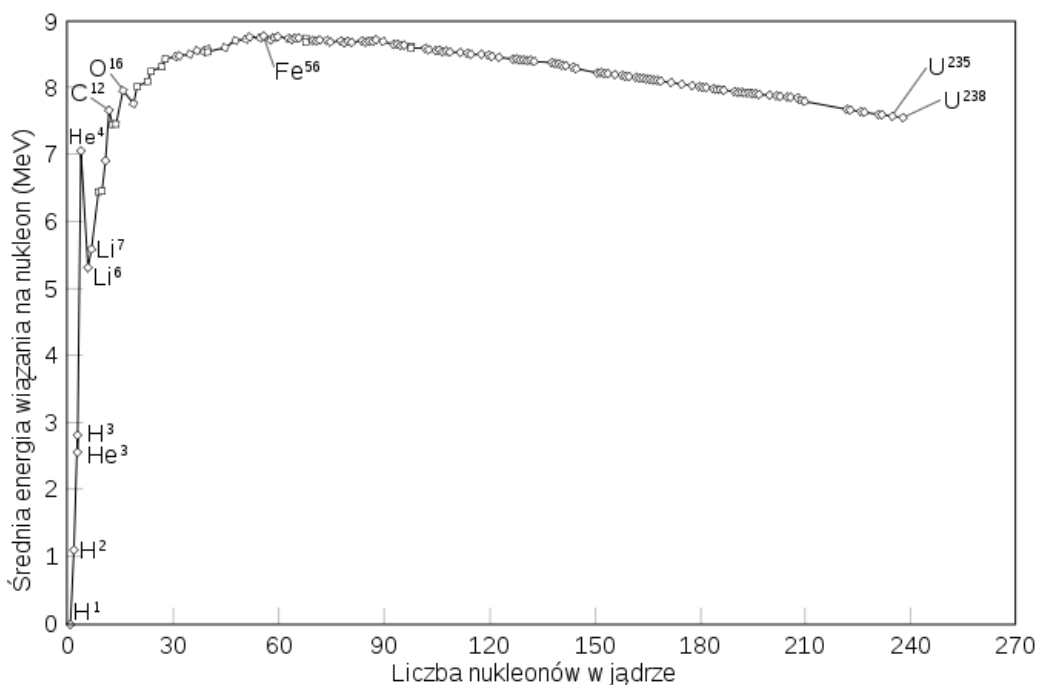


RYSUNEK 2. Schemat rozpadu Kobaltu z wyraźnymi przejściami gamma.⁴

Reakcje rozszczepienia i syntezy jąder

Możliwość występowania procesu rozszczepienia na dwa lub więcej fragmentów oraz jego praktycznego zastosowania wiąże się bezpośrednio z zależnością energii wiązania przypadającą na jeden nukleon oraz zależy od liczby nukleonów w jądrze atomowym. Ponieważ jądra najcięższe związane są słabiej niż jądra o dwukrotnie mniejszej masie, zatem w procesie rozszczepienia musi być wyzwolana różnica tych energii wiązania. Wynosi ona około 1 MeV na nukleon, co daje około 200 MeV na jedno rozszczepienie jądra ciężkiego o A w pobliżu 200. Jądra lekkie są słabiej związane niż cięższe, w wyniku obniżonego wiązania na powierzchni, co stwarza możliwość wyzwolania różnicy tych energii w reakcjach syntezy.

⁴ Źródło - Wikipedia

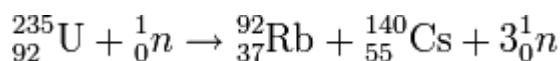
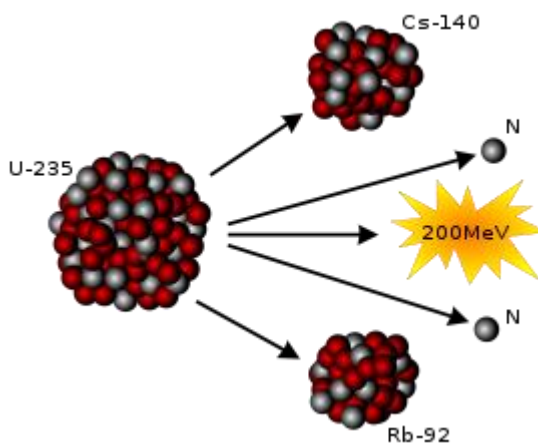


RYSUNEK 3. Energia wiązania przypadająca na jeden nukleon w funkcji liczby masowej.⁵

Rozczepienie jądrowe występuje głównie dzięki silnym ruchom kolektywnym o skomplikowanym charakterze, szczególne znaczenie ma tu mechanizm wytwarzania się bariery potencjału i tunelowanie przez nią fragmentów rozszczepienia. Natomiast reakcje syntezy jąder zachodzą głównie w wyniku zderzeń pod wpływem ruchów cieplnych. Dla jąder cięższych od Cyrkonu o $A=90$ rozszczepianie jest procesem energetycznie dozwolonym a zatem może zachodzić samorzutnie. Należy jednak pamiętać, że nawet dla najcięższych jąder zachodzi ona z bardzo małym prawdopodobieństwem. Okazuje się jednak, że rozszczepienie może być wywołane przez bombardowanie cząstkami lub promieniowaniem

⁵ Źródło - Wikipedia

elektromagnetycznym, doprowadzającym do rozszczepianego jądra dostateczna dla zajścia tego procesu energie. Szczególnie dobrze do tego celu nadają się neutrony, które jako elektrycznie obojętne mogą łatwo wnikać do wnętrza jądra. Energia pochłanianego neutronu musi być przy tym większa od pewnej wartości progowej, charakterystycznej dla rozszczepianego jądra. Na energie te składa się zarówno energia wiązania neutronu w wytworzonym jądrze złożonym oraz energie kinetyczna ruchu względnego. W pewnych przypadkach, jak to mam miejsce w Uranie o $A=235$, już sama energia wiązania neutronu jest wyższa od energii progowej i rozszczepienie może zostać wywołane przez neutrony nawet o niższych energiach dla innego izotopu Uranu 238 rozszczepienie następuje dopiero przy pochłonięciu neutronu prędkiego. Okazuje się że szczególnie łatwo ulegają rozszczepieniu te jądra, w których pochwylenie neutronu prowadzi do jądra złożonego o parzystej liczbie protonów i neutronów. Związane to jest z występowanie dodatkowej energii na wiązanie nukleonów w pary.



RYSUNEK 4. Schematyczny rysunek przebiegu procesu rozszczepienia w jądra.⁶

⁶ Źródło - Wikipedia

Jądra powstające w wyniku procesu rozszczepienia są w stanie silnie wzbudzonym i ulegają deekscytacji przez emisję kwantów gamma po czasie rzędu 10^{-14} s. Ponieważ względna zawartość neutronów jest większa dla jąder ciężkich niż dla tych o średniej masie, powstające fragmenty mają stosunkowo duży nadmiar neutronów. Pewna ich liczba zostaje wyemitowana w bardzo krótkim czasie rzędu 10^{-16} . Neutrony te nazywamy natychmiastowymi. Liczba ich zależy od rozszczepiającego się fragmentu dla Uranu 236 wynosi średnio 2,43 neutronów na jedno rozszczepienie. Następnie z powodu wzbronienia negatonowego emitowane są neutrony opóźnione mające ogromne znaczenie dla wykorzystanie zjawiska rozszczepienia do produkcji energii w sposób kontrolowany.

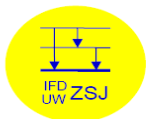
2. Współczesne badania struktury i dynamiki jądrowej

Zadajmy pytanie o to jak wygląda dziś front badań w fizyce jądrowej, opiszmy najciekawsze, eksperymenty te już wykonywane i te planowane. Zastanówmy się, na jakie trudne pytania próbujemy dziś odpowiadać.

Obecne zrozumienie zarówno struktury jądrowej oraz dynamiki jądrowej a także nukleon-syntezy oparte jest w głównej mierze na danych pochodzących z badań nad jądrami stabilnymi (lub prawie stabilnymi) oraz długo żywymi. Pomędzy tymi nuklidami a granicą wyznaczoną przez linię separacji ostatniego nukleonu leży więcej niż 90% wszystkich możliwych związanych systemów jądrowych. Znamy obecnie około 3000

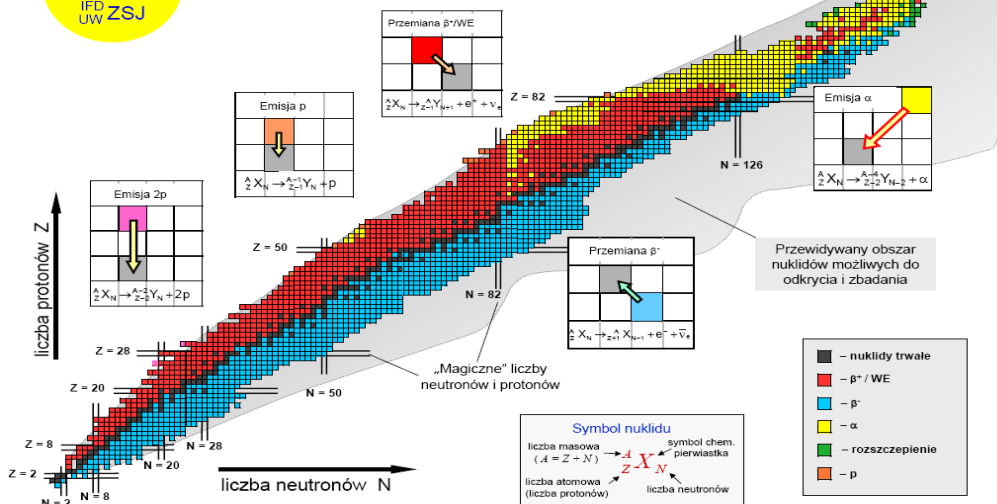
izotopów. Tylko 10% procent z nich stanowią izotopy stabilne. Tak więc najciekawsze obecnie doświadczenia w fizyce jądrowej planowane są w obszarze jąder bardzo krótko życiowych, czyli tych najbardziej niestabilnych, to, dlatego eksperymenty te są tak trudne i wymagające. Lekkie, trwałe nuklidy mają niemal równe liczby protonów i neutronów. W przypadku ciężkich nuklidów wzrasta nadmiar neutronów. W przyrodzie zawartość procentowa poszczególnych izotopów jest prawie stała, zaś masa atomowa danego pierwiastka jest średnią liczoną z zawartości i mas atomowych wszystkich izotopów dla danego pierwiastka. Różnice w ilościach poszczególnych izotopów w przyrodzie wynikają z różnych przemian zachodzących w złożach na Ziemi danego pierwiastka na przełomie epok geologicznych. Naturalne izotopy są w większości trwałe, rzadko, kiedy wchodzą w przemiany promieniotwórcze. Jest to odmienne dla izotopów sztucznych, zwane izotopami promieniotwórczymi, które powstają w wyniku procesów jądrowych.

Stabilność izotopową przedstawia się zwykle na tak zwanej mapie (ścieżce) beta stabilności. Na poniższym rysunku znaleźć można zbiór dziś znanych nuklidów.



Mapa znanych nuklidów

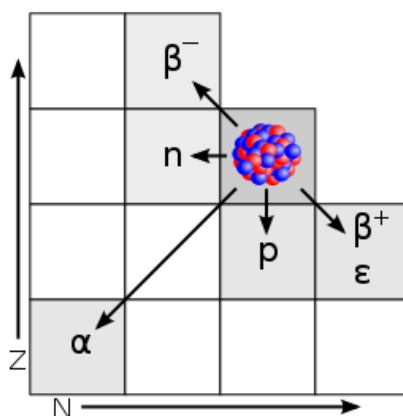
Kolorami zaznaczono dominujące przemiany promieniotwórcze



RYSUNEK 5. Ścieżka beta stabilności nuklidów.⁷

Czarne kwadraty reprezentują jądra stabilne w tym sensie że ich czas życia jest znacznie dłuższy niż wiek Ziemi. Tworzą one właśnie wspomnianą dolinę stabilności.. Kolor czerwony oraz niebieski wskazuje jądra wytworzone sztucznie w laboratoriach. O znacznie krótszych czasach życia. Dodając jeden proton lub neutron można się, poruszać” w stronę granicy stabilności osiągając linie oderwania nukleonu. (drip line) w miejscu, którym siły jądrowe są już za słabe, aby układ pozostawał związany.

⁷ Źródło - Materiały zakładu spektroskopii jądrowej Uniwersytetu Warszawskiego.



RYSUNEK 6. Różne możliwe ścieżki rozpadu na mapie (Z, N).⁸

Bardzo wiele jąder egzotycznych tj. posiadających duży stosunek N/Z może zostać dopiero wytworzone nie przekraczając linii oderwania (szary obszar).

Ważne pytania

Jak już mówiliśmy jądro atomowe, czyli rdzeń – środek atomów jest wielociałowym układem kwantowym, którym rządzą oddziaływania silne. Tak jak hadrony zbudowane są z kwarków tak jądra atomowe składają się z hadronów właśnie – tj. z neutronów i protonów. Fundamentalne pytanie, zatem jest, w jaki sposób silne oddziaływanie jądrowe wiąże te nukleony ze sobą. Kilka minut po wielkim wybuchu wzajemne oddziaływanie między nukleonami doprowadziło do uformowania jąder lekkich w wyniku procesu nukleosynety. Następnie synteza jądrowa zachodząca w gwiazdach prowadziła do wytworzenia cięższych pierwiastków. Centralnym zadaniem fizyki jądrowej, zatem jest zrozumienie tych procesów. Aby osiągnąć ten cel fizycy jądrowi zadają sobie pytanie bardziej szczegółowe. Między innymi:

⁸ Źródło - Wikipedia

- Jak oddziaływanie między karkami powoduje wytworzenie sił jądrowych odpowiedzialnych za energie wiązania jąder a więc za ich stabilność?
- Jaka jest mikroskopowa struktura jąder w skali jednego nukleonu, czy zrozumienie tej struktury przez włączenie do rozważań kwarków i glonów pomoże lepiej zrozumieć strukturę jąder atomowych?
- W jaki sposób różne przybliżone symetrie występujące w jądrze atomowym ujawniające się w badaniach strukturalnych związane są z oddziaływaniami silnymi (jądrowymi) i jak można je otrzymać w ramach teorii wielu ciał?
- Jakie są warunki graniczne, przy których jądro może pozostawać układem związanym?
- Jakich nowych cech jądrowych możemy się spodziewać blisko granic stabilności?
- Jakie jest pochodzenie pierwiastków naturalnie występujących w przyrodzie?

Ilościowe odpowiedzi na te pytania są istotne dla naszego zrozumienia świata jąder atomowych, ale mają także istotny impakt dla fizyki, jako całości. Słabo rozumiane własności jąder w obszarze mas pośrednich oraz neutronowo nadmiarowych nie pozwalają zrozumieć obecnie eksplozji zachodzących w gwiazdach supernowych. Wytwarzając ciężkie pierwiastki w laboratorium fizycy jądrowi rozszerzają istniejący układ okresowy o zupełnie nowe pierwiastki. Wśród nowych izotopów są takie, których rozpady promieniotwórcze stanowią zasadniczy nowy test fundamentalnych zasad symetrii występujących w fizyce.

Progres w zrozumieniu i odpowiedzi na te wszystkie pytania jest możliwy dzięki jednoczesnemu rozwojowi techniki pozwalającej budować nowe akceleratory i detektory, metod komputerowych i istnieniu superkomputerów przy użyciu, których można, testować najbardziej wyrafinowane metody

teoretyczne. Badania krótko skalowej struktury w jądrach atomowych są wspierane przez rozwój akceleratorów protonowych oraz przez rozbudowę urządzeń do wysoko energetycznych zderzeń elektronów. Znaczenie kwarków i glonów w takich strukturach jest najwybitniejsze w jądrach lekkich, dla których dane eksperymentalne mogą już być w tej chwili porównywane z bardzo dokładnymi - wychodzącymi z fundamentalnych założeń oddziałujących nukleonów obliczeń teoretycznych. Te rachunki wykorzystują najnowsze kwantowo mechaniczne metody Monte-Carlo. Z drugiej strony dobrze wiadomo we wszystkich dziedzinach fizyki że bezpośrednie podejście do dynamiki układów wielociałowych oparte o oddziaływania elementarne nie zawsze jest użyteczne. Na przykład wiele własności jąder ciężkich może być dokładnie opisany przy użyciu prostych, przybliżonych modeli. Głębszy wgląd w zrozumienie tematu otrzymamy, jeśli zrozumiemy, przy jakich warunkach te modele przestają „pracować” i dlaczego? Szczególnie znaczenie ma to w kontekście rozmaitych ruchów kolektywnych nukleonów w ciężkim jądrze oraz fascynującego zjawiska nadprzewodnictwa w fizyce jądrowej. Znaczący postęp w tym zrozumieniu będzie możliwy dzięki coraz bardziej wyrafinowanym eksperymentom w tym obszarze. Innym ważnym osiągnięciem eksperymentalnym są badania elementów krótko życiowych, o czym napiszemy dalej.

Siły jądrowe

Istnieją inne siły działające pomiędzy nukleonami i to właśnie wtedy, kiedy te znajdują się blisko siebie. Siły te nazwiemy siłami jądrowymi w odróżnieniu od sił grawitacyjnych odpowiedzialnych za struktury planetarne i elektromagnetycznych, odpowiedzialnych za strukturę atomu. Siły te mają zupełnie inną naturę niż wymienione siły elektromagnetyczne bądź grawitacyjne. Wymieńmy ich charakterystyczne cechy:

- Siły jądrowe są niezależne od ładunku elektrycznego. Rzeczywiście, muszą działać także pomiędzy dwoma neutronami oraz pomiędzy neutronami i protonami, bo składnikami jądra są protony i neutrony.
- Siły jądrowe są krótkozasięgowe. Zasięg ich jest rzędu 10^{-15} metra. Rzeczywiście, w doświadczeniu Rutherforda siły jądrowe nie zakłócały opisu rozpraszania cząstek alfa, kiedy te nie zbliżały się na odległości porównywalne z rozmiarami jądra.
- Siły jądrowe charakteryzuje własność wysycania. Oznacza to, że każdy nukleon oddziałuje tylko z najbliższymi sąsiadami. Rzeczywiście, gdyby tak nie było, to energia wiązania nie byłaby wprost proporcjonalna do liczby atomowej, ale do liczby wszystkich możliwych kombinacji dwucząstkowych, których liczba proporcjonalna jest w przybliżeniu do drugiej potęgi liczby nukleonów w jądrze. (Sprawdź, że liczba takich kombinacji równa jest $A(A-1)/2$.)
- Siły jądrowe zależne są od wzajemnej orientacji spinów nukleonów, a nie tylko od odległości między nimi, jak to ma miejsce w przypadku ładunków elektrycznych. Ta właściwość sił jądrowych oznacza, że siły te nie są siłami centralnymi, tj. nie są skierowane wzdłuż prostej łączącej środki nukleonów.

Trzeba tu podkreślić że charakter długo-zasięgowy sił jądrowych jest raczej dobrze znany. Niestety nasza wiedza na temat ich krótkozasięgowego charakteru jest wciąż niesatysfakcjonująca. Głównym narzędziem badawczym są reakcje nukleonu z nukleonem na ich podstawie udało się skonstruować ostatnio kilka efektywnych oddziaływań. Pewne nadzieje wiążemy z produkcją mezonów w takich reakcjach. Te eksperymenty mają także na celu badania oddziaływań mezonów z nukleonami przy bardzo małych energiach progowych. Powiedzmy jednak wyraźnie, iż nawet najlepsza parametryzacja oddziaływania nukleon-nukleon nie będzie w stanie

wyjaśnić wiązania jądrowego. Aby o tym myśleć należy uwzględnić także oddziaływanie trójciałowe. Pomimo iż wierzymy, iż te oddziaływania będą słabe mogą one ujawnić się w rozpraszaniu trzy ciałowym. Obecnie jedyne, co umiemy zrobić to dopasować natężenia sił trzyciałowych do eksperymentalnie znanych mas jąder lekkich. Mikroskopowy opis takiego oddziaływania jest wciąż bardzo odległy. Stajemy tu przed największym problemem fizyki jądrowej.

Okazuje się, że po stu latach od odkrycia promieniotwórczości nie umiemy opisać sił nim rządzących!

Badania jąder lekkich

Istotny dziś wysiłek eksperymentalny jest poświęcony badaniu własności jąder lekkich tj. mających kilka nukleonów. Te jądra wydają się najprostsze do opisu ze wszystkich i w pierwszym rzędzie ilościowe porównanie pomiędzy danymi eksperymentalnymi a teorią ich globalnej i krótko zasięgowej struktury może zostać wykonane. Te jądra są idealne dla sprawdzania teorii mikroskopowych, szczególnie tych wykorzystujących głębszy poziom struktury, czyli kwarki i glony. Lekkie jądra mają także ważne znaczenie w astrofizyce, cząstkach elementarnych i produkcji energii w reakcjach syntezy jądrowej. I tak np. większość materii w świecie widzialnym jest złożona z tych właśnie lekkich jąder. Fizyka jądrowa Wielkiego wybuchu a także fizyka konwencjonalnych gwiazd takich jak Słońce opiera się na zrozumieniu (a właściwie wciąż jego braku) reakcji syntezy lekkich jąder. Podobnie w planowanych reaktorach wykorzystujących fuzję jądrową używać się będzie jąder lekkich. Jedno z kluczowych doświadczeń w tym obszarze polega na bombardowaniu lekkich jąder elektronami pochodzącymi z nowej generacji akceleratorów przyśpieszających. Pomiar polega na detekcji rozproszonych elektronów

a także wybijanych z jądra protonów lub neutronów. Te pomiary pomagają zrozumieć, jaki jest rozkład protonów i neutronów w jądrze atomowym. Energie i Kąty rozprożeń mierzone są w specjalnych spektrometrach. Z takich rozkładów energii w funkcji kąta dostajemy precyzyjne informacje na temat struktury jądrowej. Myśli się w przyszłości także nad badaniem emisji dwu protonów pod wpływem zderzeń z takimi wysoko energetycznym elektronami. Szczególne znaczenie ma dla tych pomiarów możliwość użycia od niedawna ciągłej wiązki elektronowej, co radykalnie zmniejsza tło w doświadczeniu i pozwala na klarowną identyfikację produktów po reakcji. Ze strony teoretycznej z powodu postępu w technikach komputerowych wszystkie stany związane dla kilku nukleonów a więc dla tych jąder mogą zostać policzone dokładnie z realistycznych oddziaływań między nukleonowych. Szczególne miejsce odgrywają tu metody Monte-Carlo wykorzystujące równoległe procesory. Pytanie o korelacje w jądrach atomowych, czyli jak separacja pomiędzy nukleonami jest rozłożona w jądrze atomowym jest wyraźnie związane z naturą sił jądrowych. Korelacje te także najlepiej badać w jądrach lekkich. Opis tych doświadczeń i metod teorii wykracza jednak poza ramy tego wykładu.

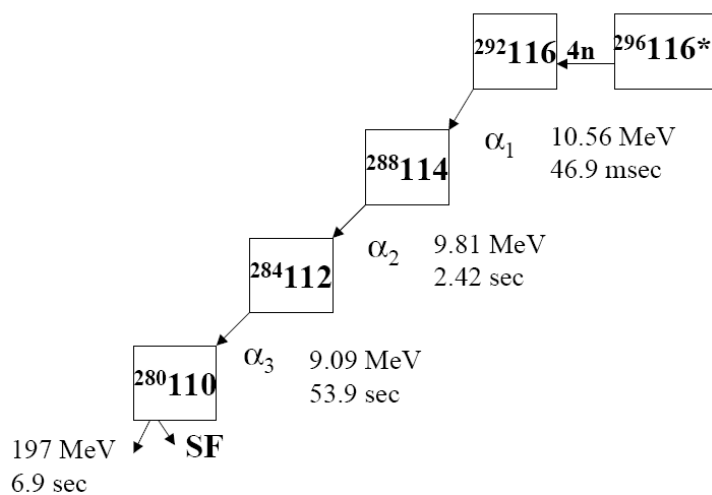
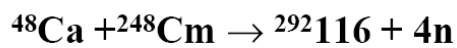
W poszukiwaniu jąder superciężkich

Jądra superciężkie cechują się wzrostem roli odpychającego oddziaływania kulombowskiego wraz ze wzrastającą liczbą protonów w jądrze. Wydawałoby się więc, że oddziaływanie to powinno prowadzić do szybkiego rozpadu takich jąder. Najcięższe z dotychczas znanych jąder superciężkich wykazują jednak zaskakująco dużą stabilność (względnie długie czasy życia). Zwiększona stabilność tych jąder została przewidziana przez fizyków polskich, a następnie potwierdzona w rosyjsko-amerykańskim eksperymencie przeprowadzonym w roku 1993 w Zjednoczonym Instytucie

Badań Jądrowych w Dubnej w Rosji. Niedługo potem, w Instytucie Ciężkich Jonów (GSI) w Darmstademie w Niemczech, międzynarodowa grupa fizyków również potwierdziła przewidywania teorii, dokonując syntezy nowych pierwiastków 110, 111 i 112, 114, 116, 117, 118. Zwiększona stabilność tych jąder, szczególnie ze względu na podział jądra na porównywalne fragmenty (samorzutne rozszczepienie), wynika z istnienia kwantowych efektów powłokowych. Protony i neutrony w jądrach atomowych wypełniają dostępne dyskretne poziomy energetyczne. W znanych nam lżejszych jądrach o kształtach kulistych poziomy te grupują się w powłoki jądrowe oddzielone dużymi przerwami energetycznymi. Zewnętrzne powłoki (powłoki zawierające poziomy o najwyższych energiach) wypełnione są całkowicie lub prawie całkowicie przez nukleony. Taka konfiguracja nukleonów tworzących jądro jest bardziej stabilna ze względu na samorzutne rozszczepienie oraz emisję jądra atomu helu ${}^4\text{He}_2$, czyli rozpad α . Zaskakujący jest jednak fakt, że powłoki te pojawiają się także w jądrach superciężkich, które według przewidywań teoretycznych powinny być zdeformowane.

Jednym z zasadniczych celów badań nad pierwiastkami superciężkimi ($Z > 103$) jest eksperymentalne odkrycie, przewidywanej przez teorię, wyspy stabilnych (czasy życia rzędu tysięcy lat) superciężkich pierwiastków ($Z=114$ i $N=184$). Pierwiastki te produkowane są na drodze reakcji jądrowych przeprowadzanych w laboratoriach (jak dotąd nie zaobserwowano ich istnienia w naturze). Podstawową, jak do tej pory, metodą ich wytwarzania jest reakcja syntezy dwóch zderzających się jąder, jądra-pocisku i jądra-tarczy. Energia zderzenia w tych reakcjach jest na tyle mała (w pobliżu bariery kulombowskiej), że jądro złożone powstałe w wyniku tej syntezy schładza się do swojego stanu podstawowego jedynie przez emisję neutronów (zwykle wystarczy 1-3 neutrony). Wytwarzane dotychczas superciężkie jądra żyją od mikrosekund do kilkadziesiątu sekund. Jądra te następnie rozpadają się emitując cząstki alfa o ściśle zdefiniowanych

energiach, bądź ulegają spontanicznemu rozszczepieniu. To właśnie rozpady alfa dostarczają obecnie podstawowej sygnatury eksperymentalnej, pozwalającej stwierdzić, że istotnie poszukiwany pierwiastek został wyprodukowany. Stosując powyższą technikę zsyntetyzowano pierwiastki do liczby atomowej $Z=118$. Warto na koniec tego rozdziału dodać bardzo przyjemna dla nas Polaków informacje otóż Nowy pierwiastek chemiczny $Z=112$ i $A=277$ odkryty przez międzynarodowy zespół naukowców kierowany przez prof. Sigurda Hofmanna od tego roku nosi nazwę na cześć Mikołaja Kopernika. Copernicium - taka nazwa została zatwierdzona przez Międzynarodową Unię Chemii Czystej i Stosowanej. Nazwa obowiązuje od rocznicy urodzin Kopernika - 19 lutego. Przykład sekwencji rozpadów alfa po emisji 4 neutronów z jądra wzbudzonego pokazany jest na poniższym rysunku. Jest to dominujący kanał rozpadu we wszystkich ostatnio odkrywanych pierwiastkach Superciężkich. Warto dodać tu, że obecnie grupa Dubieńska przystąpiła do syntezy elementu $Z=120$. Nie znamy jej wyniku w chwili pisania tego wykładu. Badania pierwiastków superciężkich, mimo iż nie posiadają bezpośrednio zastosowań w przemyśle i życiu codziennym jak inne gałęzie fizyki jądrowej odpowiadają jednak, czy raczej próbują odpowiedzieć, na fundamentalne pytanie czy istnieje maksymalna ilość protonów w jądrze, powyżej której jądro nie może już istnieć, innym słowy, ilu jeszcze „cegiełek” brakuje w układzie okresowym?



RYSUNEK 7 Łącuch rozpadu alfa w syntezie pierwiastka Z=116, A=296.

3. Wpływ promieniowania na organizmy żywe

Zdefiniujmy podstawowe pojęcia z radiobiologii tj. rodzaje dawek promieniotwórczych. Opiszmy dalej jak moc dawki wpływa na organizmy żywe i jakie skutki (negatywne oraz te pozytywne) wywiera promieniowanie jonizujące na nasz organizm.

Promieniowanie jądrowe działa na człowieka od zarania jego dziejów podobnie, jak promieniowanie kosmiczne, dochodzące stale z przestrzeni międzygwiazdnej i ze Słońca. Oddziaływanie promieniowania na układy biologiczne prowadzi do zmiany ich struktury komórkowej. Zmiany te mogą prowadzić do modyfikacji lub śmierci komórki, w szczególności, gdy uszkodzeniu ulegnie struktura DNA. Klonowanie zmodyfikowanych komórek może prowadzić do powstania nowotworu. W organizmie istnieją mechanizmy naprawy uszkodzonych komórek, pojawia się, więc relacja pomiędzy wielkością dawki pochłoniętej na jednostkę czasu a końcowym skutkiem napromienienia. Także różne typy komórek są w różny sposób wrażliwe na promieniowanie jonizujące. Duże dawki promieniowania są zawsze szkodliwe, natomiast małe dawki mogą dawać efekty korzystne. W zakresie małych dawek uszkodzenia naprawiane są przez stosunkowo silne, indukowane przez promieniowanie komórkowe mechanizmy obronne i naprawcze. Substancje chemiczne, czy inne czynniki wewnątrz- lub zewnątrzkomórkowe, powodują podobne uszkodzenia materiału genetycznego, co promieniowanie jonizujące, dzięki temu komórka jest ciągle w stanie „gotowości”, a to stawia ją w korzystnej sytuacji. Jednak

w miarę zwiększania mocy dawki wydajność komórkowych mechanizmów obronnych maleje. Napromienienie ciała małymi dawkami (poniżej 0,2Sv), które rozłożone są w czasie, może przyczynić się do zwiększenia siły odpowiedzi immunologicznej, ale już zastosowanie większej dawki może przynieść działanie negatywne. Jako przykład można tutaj podać ludność Nagasaki, która została napromieniona dawką ok. 0,1Sv. W przypadku tej populacji zaobserwowano zmniejszenie zapadalności na białaczkę, raka płuc i raka jelita grubego. Takie działanie promieniowania jonizującego wykorzystuje się w terapii, polegającej na ekspozycji całego ciała lub jego połowy 3 razy w tygodniu przez 5 tygodni, na działanie dawki ok.0,1Gy. Taki rodzaj leczenia może być stosowany, jako metoda uzupełniająca w leczeniu np. nowotworów. Oczywiście istnieje koncepcja, że zbyt małe napromienienie organizmu jest szkodliwe. Jeżeli komórka znajdzie się w sytuacji niedoboru czynników stresujących, to może dojść do zmniejszenia sprawności jej mechanizmów obronnych i nie będzie w stanie reagować na małe zagrożenia. Taki mechanizm jest prawdziwy w odniesieniu do wybranych tkanek, jednak ciągle wymaga szerszych badań. Jak pisano wcześniej, różne komórki, a co za tym idzie tkanki i narządy, charakteryzują się większą lub mniejszą promienioczułością i dlatego odpowiedź organizmu na promieniowanie nie jest rzeczą prostą, gdyż uwzględnia różne regulacyjne mechanizmy tkankowe, narządowe i ogólnoustrojowe. Skutki napromieniowania ciała dużymi dawkami, powyżej 1Sv, są dobrze znane. Wiadomo, że im większa dawka tym większe uszkodzenia. Mniejsze dawki uszkadzają tylko te tkanki, które charakteryzują się większą promieniowrażliwością, natomiast duże dawki uszkadzają wszystkie tkanki lub ich większość.

Rodzaje dawek

Dawka jest miarą energii przekazanej przez promieniowanie jednostce masy absorbenta (pochłaniacza). W zależności od sposobu, w jaki będziemy ten przekaz energii opisywać wyróżniamy kilka rodzajów dawek.

Dawka pochłonięta (D) jest miarą energii przekazanej przez promieniowanie jednostce masy. Jednostką jest Gy (grej) = 1 J/kg. Jednostką historyczną jest [rad] od ang. *radiation absorbed dose*.

Ponieważ poszczególne rodzaje promieniowania różnią się **gęstością jonizacji** na swej drodze w pochłaniaczu wywierają odmienny skutek w odniesieniu do napromieniowanych przez nie tkanek.

Dlatego do określenia skutków biologicznych napromienienia nie wystarczy znajomość dawki pochłoniętej. Dlatego zdecydowano wprowadzić tkz.

Dawka równoważna H uwzględniającą

zależność skutków biologicznych od typu i energii promieniowania. Dawka równoważna H , można zapisać w formie:

$$H_T = \sum_R w_R \cdot D_{TR}$$

gdzie indeks T odnosi się do danej tkanki, a indeks R do promieniowania danego typu i danej energii. Przez w_R oznaczony jest tzw. czynnik wagowy promieniowania, zaś D_{TR} jest średnią dawką promieniowania danego typu i energii pochłoniętego przez daną tkankę.

Tabela 2 Czynniki wagowe dla poszczególnych typów promieniowania

Typ promieniowania	Energia, E (MeV)	w_R
Fotony	wszystkie energie	1
Elektrony i miony	wszystkie energie	1
Neutrony	$E < 0.01$	5
"	$0.01 < E < 0.1$	10
"	$0.1 < E < 2$	20
"	$2 < E < 20$	10
"	$E > 20$	5
Protony (z wyłączeniem protonów odrzutu)	> 2	5
Cząstki alfa, ciężkie jony	"nierelatywistyczne"	20

Zależność skutków biologicznych od rodzaju tkanki wyraża dawka efektywna E określona następująco:

$$E = \sum_T w_T \cdot H_T$$

gdzie czynnik wagowy w_T odnosi się do danej tkanki. W tabeli poniżej zamieszczone są czynniki wagowe tkanek.

Tabela 3. Czynniki wagowe dla poszczególnych tkanek

Tkanka lub narząd	w_R
Gruczoły płciowe	0.20
Czerwony szpik kostny	0.12
Jelito grube	0.12
Płuca	0.12
Żołądek	0.12
Pęcherz moczowy	0.05
Gruczoły sutkowe	0.05
Wątroba	0.05
Przełyk	0.05
Tarczycyca	0.05
Skóra	0.01
Powierzchnia kości	0.01
Pozostałe	0.05
Całe ciało	1.00

Wywołane napromieniowaniem zmiany w komórkach mogą przejawiać się także w bardziej złożony sposób. Niektóre uszkodzenia, np. mutacje DNA, mogą (choć nie muszą) po pewnym czasie przerodzić się np. w guz nowotworowy. Proces ten uzależniony jest od wielu dodatkowych czynników i pojawia się w sposób przypadkowy. Tak, więc prawdopodobieństwo jego zajścia może, (ale nie musi) wzrastać ze wzrostem dawki, co nie oznacza, że musi. Ponadto, dolegliwość powstałego nowotworu, jeśli już powstanie, także może, (ale nie musi) być funkcją dawki. Takie efekty nazywano (i często nazywa się do dziś) *stochastycznymi* i dotyczą one

głównie, jeśli nie jedynie, nowotworów⁹. Objawy mogą wystąpić po stosunkowo długim czasie od chwili napromieniowania (napromienienia), co bardzo utrudnia stwierdzenie, że właśnie ono je spowodowało. To, że mamy tu do czynienia z efektami wyłącznie natury statystycznej jest istotnym założeniem, z którego niestety często wyprowadza się błędny wniosek, że rozpatrywane efekty muszą być wprost proporcjonalne do wielkości pochłoniętej dawki. Biorąc pod uwagę naturalne siły obronne organizmu i złożoność procesów rozwoju nowotworów, założenie to można podważać, a co za tym idzie podważać również sens wprowadzania pojęcia tak rozumianych efektów stochastycznych do oceny skutków promieniowania. W gruncie rzeczy chodzi tu bardziej o *addytywność*, a więc możliwość sumowania się skutków uszkodzeń, niż o stochastyczność rozpatrywanych efektów. Na addytywności, bowiem opierają się wnioski wyciągane na podstawie liczenia sumarycznych dawek, otrzymanych przez badanego osobnika w różnych okresach życia. O ile dawka jest z definicji wielkością addytywną, zależność efekt-dawka bynajmniej nie musi być, liniowa i wnioski wyciągane w oparciu o tak mocne założenie mogą być kwestionowane. Do "stochastycznych" efektów również zalicza się zmiany w komórkach rozrodczych (jaja i plemniki), które mogą prowadzić do mutacji u potomstwa. Jak dotąd jednak nie zanotowano, na wiarygodnym poziomie statystycznym, takich zmian u ludzi. Z wielu zatem względów bezpieczniej jest mówić o skutkach *późnych* niż *stochastycznych*. Mówiąc o chorobach wywoływanych promieniowaniem jonizującym, jesteśmy z reguły nastawieni na problem tworzenia się nowotworów. Sytuacja bynajmniej nie jest prosta z punktu widzenia zdobywania w pełni wiarygodnej informacji. Przede wszystkim należy pamiętać, iż czas utajnienia choroby nowotworowej jest na ogół długi, czasem 30-40 lat.

⁹ W znacznej części wg L.Dobrzyński, W.Trojanowski, Raport Nr 15, Dział Szkolenia i Doradztwa IPJ, Świerk (2002) oraz L. Dobrzyński, Postępy Techniki Jądrowej, 3 (2001)14, a także monografii R.A.Powsner E.R.Powsner, *Nuclear MedicinePhysics*, Blackwell

Oznacza to, że należy prowadzić długotrwałe obserwacje zarówno narażonych, jak i odpowiedniej grupy kontrolnej. Z drugiej strony, nie mamy możliwości odróżnienia nowotworu wywołanego promieniowaniem od nowotworu wytworzonego z innych przyczyn. Tak, więc jedyne, na co możemy liczyć, to na pokazanie korelacji pomiędzy chorobą a konkretną przyczyną. Jednakże stwierdzona korelacja może być przypadkowa, gdyż może okazać się, że w badaniach nie uwzględniliśmy istotnych czynników obciążających, a nawet zastosowaliśmy nie najlepszą metodę analizy. Jak widać, prowadząc analizę badań musimy zachować ogromną ostrożność, szczególnie wtedy, jeśli wnioski w jakiś sposób przeczą dotychczasowej wiedzy, a w szczególności podstawom biologii.

Silne dawki

Stosunkowo dobrze znane są dziś skutki ostrego napromieniowania. Należy tu wyjaśnić, że tzw. skutki deterministyczne oraz dawki śmiertelne dotyczą właśnie ostrego napromieniowania, a więc wysokiej dawki (rzędu dawki śmiertelnej), która została podana w przeciągu paru sekund, minut, kilkudziesięciu godzin lub kilku dni. Efekty ostrego napromienienia można już wyraźnie zaobserwować w parę dni po jego zajściu. Źródłem informacji o tego typu procesach są sytuacje "awaryjne" (wybuch bomby atomowej, awaria reaktora, jak w Czarnobylu itp.) lub efekty uzyskiwane w wyniku radioterapii. Przy wydłużeniu czasu naświetlania tą samą sumaryczną dawką, dawka śmiertelna będzie wyższa. Istotną jest, więc nie tylko dawka, ale i moc dawki tj. dawka dostarczana w jednostce czasu.

Wiadomo, że przede wszystkim na uszkodzenia podatny jest układ krwiotwórczy (szpik kostny), następnie układ rozrodczy, skóra, układ pokarmowy i centralny układ nerwowy (mózg). Napromieniowanie dawką rzędu 1-2 Gy może doprowadzić do śmierci komórek szpiku kostnego

i w konsekwencji do zmniejszenia lub zatrzymania dostarczania do organizmu czerwonych i białych krwinek. W rezultacie tego procesu, po około 3 tygodniach, bariera immunologiczna gwałtownie się obniża, a naświetlony człowiek gorączkuje, jest podatny na infekcje, występują krwawienia, a nawet śmierć, o ile szpik kostny w tym czasie nie zacznie się regenerować. Pierwotnymi efektami, występującymi tuż po napromieniowaniu dużymi dawkami, mogą być zmęczenie, nudności, czy wymioty. Ocenia się, że śmiertelne uszkodzenie układu krwiotwórczego, które może doprowadzić do zgonu połowy (50%) naświetlonej populacji w ciągu 60 dni od naświetlenia (tzw. dawka LD50/60), wynosi 3 do 3,5 Sv. Z takimi dawkami możemy spotkać się w wyniku wybuchu jądrowego. Wielkość tej dawki zależy też od tego, czy osoba napromieniowana miała, czy nie miała dostępu do pomocy lekarskiej po naświetleniu, a także od osobniczej odporności. Znane są przypadki przeżycia osób, które pomimo otrzymanej dawki 4-5 Gy przeżyły dzięki szybko udzielonej pomocy lekarskiej.

Słabe dawki

O ile skutki naświetlania silnymi dawkami promieniowania są dosyć dobrze zbadane i opisane, wciąż istnieje wiele kontrowersji wokół wpływu małych dawek promieniowania, powiedzmy poniżej 200 mSv. W tym obszarze dawek stosunkowo trudno jest znaleźć wiarygodny materiał statystyczny, a znaczna część wniosków wyciągana jest nie tyle z samej obserwacji skutków popromiennych, ile z ich braku. W wypadku małych dawek promieniowania czynnik ryzyka jest niewielki. Wynika stąd konieczność przebadania dużych populacji ludzkich, aby móc możliwie precyzyjnie go określić. Sprawa ta ma wymiar naukowy, ale także jest osadzona w ważkim kontekście społecznym, gdyż jej jednoznaczne

rozstrzygnięcie powinno przesądzić o stosunku społeczeństw do powszechnego wykorzystywania promieniowania jonizującego. Powszechnie dzisiaj odczuwana radiofobia stanowi pożywkę dla działań politycznych i licznych manipulacji opinią publiczną. Przesądza ona też o kosztach ponoszonych przez ludzkość na ochronę radiologiczną. Znakomite, pełne pasji, przeglądy tego zagadnienia można znaleźć w artykułach Z. Jaworowskiego¹⁰. W szczególności ten pierwszy wywołał prawdziwą burzę, o czym świadczą polemiki zamieszczone w kolejnych numerach *Physics Today*. Bez względu jednak na obecny stan wiedzy i ocenę wiarygodności pewnych obserwacji i interpretacji jest faktem, że w ochronie radiologicznej przyjmuje się za podstawę wspomnianą już tzw. hipotezę liniową bezprogową, zgodnie, z którą ryzyko śmiertelnego zachorowania w wyniku naświetlenia promieniowaniem jonizującym jest proporcjonalne do dawki. Jest to typowa hipoteza wynikająca z przyjęcia addytywności efektów. Hipoteza ta, choć stanowi podstawę zaleceń Międzynarodowej Komisji Ochrony Radiologicznej (ICRP), staje się sama przedmiotem manipulacji i to przez tę samą Komisję, która uznaje, iż współczynnik ryzyka śmiertelnej choroby zainicjowanej przez promieniowanie zależy od tego, czy dawka była "duża", czy "mała" (same te pojęcia nie są podawane zbyt precyzyjnie, choć można przyjąć, że "mała" dawka, to dawka poniżej 200 mSv), zmniejsza ten współczynnik o czynnik 2 (a proponowano zmiany od dwu- do dziesięciokrotnych), ale nie kwestionuje przy tym słuszności hipotezy liniowej! Konsekwentnie należałoby, więc przyjąć specyficzny próg dla zmian popromiennych zachodzących w organizmie po przekroczeniu "małej" dawki. Pomimo tej, wydawałoby się oczywistej niespójności, zalecenia ICRP

¹⁰Z. Jaworowski, "Radiation Risk and Ethics", *Physics Today*, September(1999) 24-29.
Z. Jaworowski, "Radiation folly" *Environment and Health. Myths and Realities*, K. Okonski and J. Morris, Eds., Int. Policy Press (2003) 68-86

stanowią w wielu krajach podstawę prawnych uregulowań w ochronie radiologicznej.

Jeśli pominiemy niespójność LNT w odniesieniu do zmiany stosowanego współczynnika w ocenie ryzyka, pozostaje problem logicznej spójności tej hipotezy w obszarze małych dawek. Sprawa ta wielokrotnie była podnoszona przez wielu oponentów hipotezy liniowej, którzy posługiwali się argumentami typu, że jeśli jakaś dawka wywoła skutek śmiertelny z prawdopodobieństwem np. 50%, a więc 500 zgonów na każde 1000 osób, to z tego nie wynika, że w wyniku dawki 100 razy mniejszej zanotujemy 5 zgonów na 1000 mieszkańców. Prawdą jest, że nie wynika. Nie jest natomiast prawdą, że nie może tak być. A o tym jak jest nie mogą świadczyć czyjeś przekonania, tylko wynik rzetelnych obserwacji. Istotnie, przeciwnicy LNT mają argumenty znacznie poważniejsze niż przytoczony wyżej.

Spośród znanych dziś faktów można wymienić:

- Napromienienie ciała małą dawką rozłożoną w czasie może zwiększyć siłę odpowiedzi immunologicznej, choć zastosowanie większej dawki ma działanie przeciwne. Stwierdzono np. , że napromienienie myszy dawką 0,2 Sv zaowocowało znacznym wzrostem poziomu przeciwciał w surowicy. Napromieniowanie myszy dawką 0,5-1 Gy (promieniowaniem gamma Cs-137, 662 keV) przyniosło dwukrotne zmniejszenie częstości występowania raków i mięsaków. Tego rodzaju reakcja na małą dawkę promieniowania nazywana jest odpowiedzią adaptacyjną
- U mieszkańców Nagasaki napromienionych dawką poniżej 0,1 Sv stwierdzono zmniejszenie zapadalności na białaczkę, raka płuc i raka jelita grubego;
- Napromieniowanie całego ciała lub połowy ciała małymi dawkami przyniosło pozytywne skutki w eksperymentalnym leczeniu

nowotworów;

- W obszarach o podwyższonym (dziesięciokrotnie lub więcej) poziomie promieniowania naturalnego nie obserwuje się zwiększenia zapadalności na choroby nowotworowe i inne;
- W dużych populacjach naświetlanych małymi dawkami zmniejsza się śmiertelność



Projekt „Praktyki pedagogiczne – kompetentnie, twórczo, przyjemnie”

Numer Projektu WND-POKL.03.03.02-00-041/10
Numer umowy dofinansowania UDA-POKL.03.03.02-00-041/10-01

Projekt jest współfinansowany ze środków Unii Europejskiej
w ramach Europejskiego Funduszu Społecznego.
Egzemplarz bezpłatny.