

Fizyka jądra w medycynie

Dorota Wierzuchowska

Instytut Fizyki

Uniwersytet Pedagogiczny im. KEN Kraków

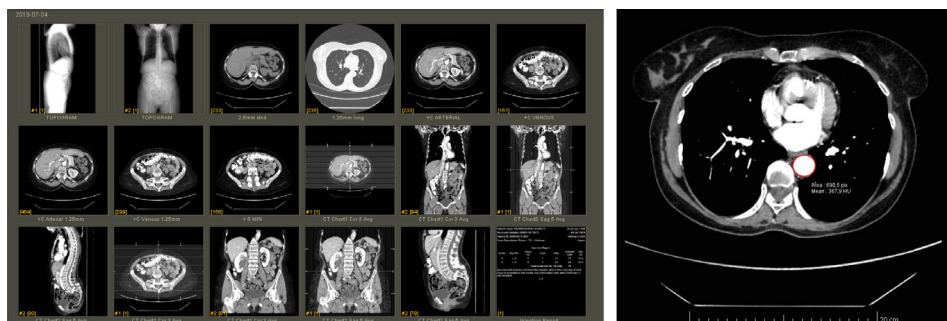
Odkrycia i rozwój fizyki jądrowej w ostatnich dziesięcioleciach przyniosły znaczący postęp w diagnostyce i terapii medycznej, dając lekarzom nowe narzędzia przede wszystkim w walce z chorobami nowotworowymi i innymi zmianami patologicznymi.

Dzięki wiedzy o procesach zachodzących w jądrach atomowych możliwa jest identyfikacja i precyzyjna lokalizacja źródła promieniowania, a następnie obrazowanie wewnętrznej struktury żywych organizmów i tkanek bez ich naruszenia.

Początkiem na tej drodze było odkrycie przez Wilhelma Roentgena w 1895 roku (8 listopada) promieni X, za pomocą których można wykonywać stosowane dzisiaj rutynowo dwuwymiarowe **prześwietlenia rentgenowskie** (rys. 1) oraz przekroje i obrazy przestrzenne, stosując wprowadzoną w 1971 roku przez Godfreya Hounsfielda i Allana Cormacka bardziej zaawansowaną technikę **tomografii komputerowej (CT)** (rys. 2). Promieniowanie rentgenowskie początkowo stosowane było również do naświetlań powierzchniowych, niszczących nowotwory skóry.



Rys. 1. Fotografia z lewej (domena publiczna) zdjęcie rentgenowskie zaprezentowane przez W. Roentgena w 1896 r. i współczesne rutynowe prześwietlenie stóp (zdjęcie własne)



Rys. 2. Obrazy uzyskane techniką tomografii komputerowej (CT)

Medycynę nuklearną zapoczątkowało odkrycie i wydzielenie przez Marię Skłodowską i Piotra Curie *pierwiastków promieniotwórczych*: polonu (Po) i radu (Ra) w 1898 roku. Separacja radu-226 z blendy uranowej umożliwiła wytworzenie i zastosowanie do **radioterapii** (niszczenia tkanek nowotworowych) silnych źródeł promieniowania o dużej przenikliwości. W radioterapii wykorzystuje się najczęściej wiązki promieniowania X, γ , elektrony i neutrony. Ważna jest możliwość ograniczenia zasięgu działania promieniowania do obszaru niszczonego guza. Lepszą lokalizację przestrzenną promieniowania uzyskuje się w przypadku stosowanych od początku lat sześćdziesiątych terapii z wykorzystaniem protonów i ciężkich jonów.

Techniki, wynalezione na potrzeby wojenne w latach czterdziestych, umożliwiły produkcję *radioizotopów* w akceleratorach cząstek i reaktorach jądrowych, wśród których kobalt-60 stosowany jest w tzw. bombach kobaltowych do napromieniowań za pomocą zewnętrznych wiązek promieniowania (**teleradioterapia**), cez-137 i iryd-192 aplikowane na określony czas w postaci „igieł” i „tubek” bezpośrednio w pobliże nowotworu (**brachyterapia**) lub jod-131, fosfor-32, stront-89 podawane doustnie lub dożylnie odkładają się wybiórczo w objętości guza jako wewnętrzne źródła promieniowania w **terapii radioizotopowej**.

Na podobnej zasadzie **scyntygrafia** do obrazowania wykorzystuje radiofarmaceutyki zawierające najczęściej technet-99m lub tal-201, jod-131, gal-67, połączone z odpowiednio dobranymi związkami chemicznymi (nośnikami) powodującymi gromadzenie się ich w tym, a nie w innym narządzie. I tak: koloidalna siarka wychwytywana jest przez komórki Browicza-Kupfera wątroby; kuleczki albumin zatrzymują się w naczyniach włosowatych płuc; technet połączony z fosforanami gromadzi się w kościach. Izotopy podawane są zwykle bezpośrednio do naczyń, wyjątkowo doustnie. Istnieją specjalne monogramy i wzory, na podstawie których oblicza się dawkę izotopu w zależności od masy i powierzchni ciała. Rozmieszczenie izotopów oraz drogi ich przepływu, wydzielania i wydalania rejestruje się przy pomocy umieszczonego nad pacjentem scyntygrafu albo gamma kamery. Scyntygrafy są aparatami, w których detektor przesuwany jest nad badanym narządem. Jego obraz drukowany jest na papierze. Aparaty te są dziś już przestarzałe, a czas badania bardzo długi, więc używa się ich przede wszystkim

kim do badania małych narządów (np. tarczycy, nerek). Gamma kamery są nowszą generacją aparatów medycyny nuklearnej. Duża głowica tego aparatu obejmuje swoim polem widzenia całość badanego narządu (wątroby, serca, mózgu, nerek), a badanie w porównaniu ze scyntygrafia trwa znacznie krócej. Wynik badania można otrzymać na błonie fotograficznej, chociaż obecnie utrwała się znacznie częściej w pamięci komputera. W obrazie komputerowym, zależnie od potrzeb, możliwa jest zmiana skali barwnych, filtrowanie, wygładzanie, a przede wszystkim badanie czynności narządów. Gamma kamery ruchome (rotujące) umożliwiają uzyskanie obrazów warstwowych (tomograficznych), podobnie jak w tomografii komputerowej. Obrazy te uzyskuje się przez okrężny ruch głowicy aparatu wokół ciała pacjenta. Technika ta określana jest jako **tomografia emisyjna pojedynczego fotonu (SPECT)**.

Badanie izotopowe nie jest badaniem niebezpiecznym. Radioizotopy używane w badaniach scyntygraficznych emitują względnie mało szkodliwe dla organizmu promieniowanie gamma. Pochłonięta dawka nie przekracza dwukrotności dawki rentgenowskiego badania płuc, a w niektórych przypadkach jest zdecydowanie mniejsza. Badania izotopowe nie stwarzają wymiernego zagrożenia dla domowników osoby poddanej badaniu, nie są też badaniami drogimi. Ich koszt jest nieco wyższy od badań ultrasonograficznych, a znacznie niższy od tomografii komputerowej i rezonansu magnetycznego.

Inną izotopową techniką jest **pozytonowa tomografia emisyjna (PET)**. Pacjentowi podaje się substancję (glukozę) znakowaną radionuklidem (fluor-18), ulegającym rozpadowi β^+ , ze względów bezpieczeństwa o krótkim czasie zaniżu. Powstający pozyton (e^+) szybko anihiluje z elektronem (e^-) i powstają dwa emitowane w przeciwnych kierunkach kwanty gamma, które są jednocześnie rejestrowane przez dwa z wielu detektorów rozmieszczonych na pierścieniu wokół pacjenta. Rejestracja koincydencji czasowych zadziałania detektorów znajdujących się po przeciwnych stronach badanego obszaru pozwala na wyznaczenie punktu, z którego nastąpiła emisja. Metodami tomograficznymi można uzyskać rozkład przestrzenny i czasowy znakowanej substancji w ciele pacjenta i wnioskować o morfologii narządów. Obrazy uzyskiwane metodami radioizotopowymi (SPECT i PET) nie mają dużej zdolności rozdzielczej, czas badania jest długi, a pochłonięta dawka promieniowania, choć niewielka, jest znacząca, ale uzyskiwane informacje są nieosiągalne innymi metodami np. magnetycznego rezonansu jądrowego **MRI**. Z tego względu stosuje się urządzenia hybrydowe, łączące PET z tomografem CT lub rezonansem magnetycznym.

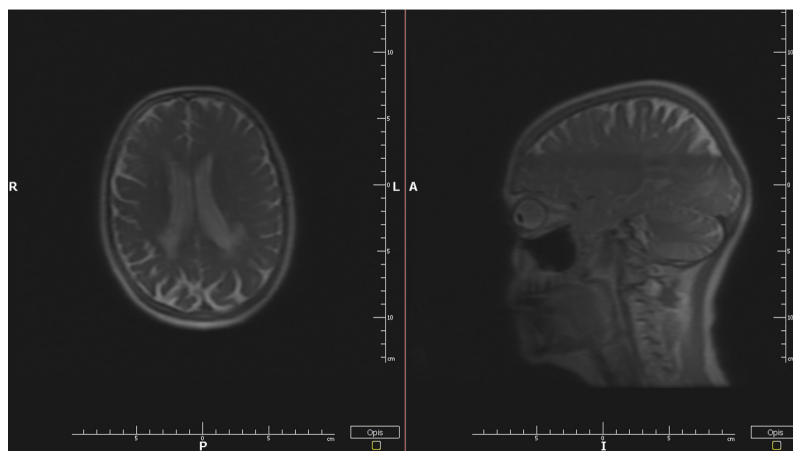
Przełomem w rozwoju metod obrazowania było odkrycie w 1946 roku zjawiska rezonansu magnetycznego (MR) i wykorzystanie go po raz pierwszy w 1973 roku do obrazowania z użyciem metod opracowanych dla tomografii komputerowej CT.

Jądra pierwiastków o nieparzystej liczbie protonów i neutronów charakteryzują się niezerowym wewnętrznym momentem pędu, zwanym spinem, i związanym z nim momentem magnetycznym. W przyrodzie występuje 117 izotopów



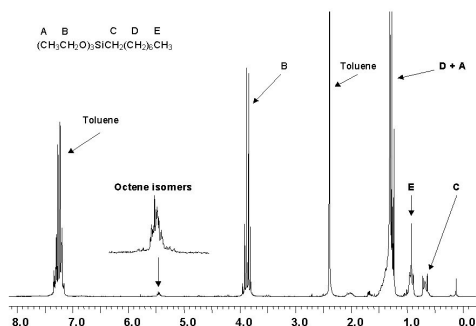
Rys. 3. Skaner PET-CT i wynik badania (źródło: Wikipedia)

o takiej własności, z których najpowszechniejszy, zwłaszcza w organizmach żywych, jest wodór o spinie $\frac{1}{2}$ i z tego powodu jest on najczęściej wykorzystywany do obrazowania. Po umieszczeniu badanego obiektu w zewnętrznym polu magnetycznym o indukcji magnetycznej B_0 momenty magnetyczne orientują się względem pola, zajmując tylko określone, dozwolone poziomy energetyczne. Po zadziałaniu impulsu zmiennego pola elektromagnetycznego o częstotliwości radiowej możliwe są przejścia między tymi poziomami, jeśli spełniony jest warunek rezonansu tzn., gdy jego częstotność ω odpowiada energii przejścia $\Delta E = \omega = \gamma B_0$, gdzie γ jest czynnikiem zależnym od rodzaju izotopu pierwiastka. Następuje absorpcja promieniowania, a następnie emisja sygnału, który jest analizowany. Można precyzyjnie określić położenie i rodzaj źródła emisji i na tej podstawie, stosując metody tomografii, wykonać obrazowanie wnętrza badanego obszaru. Najpierw wykonywane są obrazy warstw będących przekrojem przez ciało pacjenta, a złożenie obrazów sąsiednich warstw daje obraz trójwymiarowy.



Rys. 4. Tomografia MR głowy, dwa z wykonanych w tym badaniu 729 przekrojów

Częstość rezonansowa w danym polu o indukcji magnetycznej B_0 zależy od rodzaju jądra, ale również od jego otoczenia, tzn. od rodzaju cząsteczki, w której ono się znajduje. Oznacza to, że jednakowe jądra mogą dawać rezonanse o różnych częstościach. Zespół rezonansów obserwowanych w danej substancji nosi nazwę widma, a poszczególne rezonanse uwidaczniają się w postaci linii widmowych. Cząsteczka danego rodzaju posiada swoje charakterystyczne widmo, a natężenia linii zależą od stężenia związku. Analiza widm, czyli spektroskopia MRS (spektroskopia zlokalizowana wysokiej rozdzielczości) pozwala np. na określenie rodzaju i stężenia metabolitów występujących w tkance badanego narządu.



Rys. 5. Aparat MRI i przykładowe widmo ^1H NMR (źródło: Wikipedia)

W metodach magnetycznego rezonansu stosowane są pola magnetyczne stałe i zmienne o częstościach radiowych, co jest bezpieczne dla pacjenta i nie naraża na działanie szkodliwego promieniowania jonizującego. Wadą jest stosunkowo wysoki koszt i długi czas pojedynczego badania.

Niszczące dla komórek działanie promieniowania **jądrowego**, polegające na trwałym uszkodzeniu błon komórkowych i zakłóceniu procesu replikacji DNA, wykorzystywane jest do **sterylizacji radiacyjnej** narzędzi chirurgicznych, leków i przeszczepów tkankowych.

W chirurgii odtwórczo-naprawczej, przeszczepy (przede wszystkim z grupy tkanek łącznych: kości, ścięgien, skóry, rogówki, twardówki, zastawek serca i in), pełnią funkcje protez biologicznych. Oprócz funkcji podporowych, stymulują procesy regeneracji w organizmie biocy. Do przeszczepów tego rodzaju stosuje się tkanki pozbawione komórek żywych. W tym celu wykorzystuje się promieniowanie jądrowe, minimalizując równocześnie ryzyko przeniesienia zakażeń do organizmu biocy. Zaletą sterylizacji radiacyjnej jest prostota i szybkość procesu przeprowadzanego w temperaturze pokojowej, oraz – dzięki przenikliwości promieniowania gamma – możliwość stosowania całkowicie szczelnych opakowań zabezpieczających przed dostępem powietrza i zanieczyszczeniami po sterylizacji. Należy podkreślić, że ten sposób nie wywołuje radioaktywności sterylizowanego materiału.

Przedstawione zostały najpowszechniejsze zastosowania fizyki jądrowej w medycynie, bez których diagnostyka i leczenie wielu trapiących ludzkość chorób nie byłaby możliwa. Dziedzina ta dynamicznie się rozwija, dając lekarzom coraz skuteczniejsze narzędzia ratujące ludzkie życie.

Zalecana literatura

- [1] B. Ciesielski, W. Kuziemski, Obrazowanie metodą magnetycznego rezonansu w medycynie, Gdańsk-Toruń 1994.
- [2] B. Gonet, Obrazowanie magnetyczno-rezonansowe. Zasady fizyczne i możliwości diagnostyczne, Wydawnictwo Lekarskie PZWL, Warszawa 1997.
- [3] J.W. Hennel, T. Kryst-Wydźwigowska, Na czym polega tomografia magnetyczno-rezonansowa? Kraków 1995.
- [4] A. Hrynkiewicz, E. Rokita, Fizyczne metody diagnostyki medycznej i terapii, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 2000.
- [5] W. Łobodziec, Podstawy fizyki promieniowania jonizującego na użytek radioterapii i diagnostyki radiologicznej, Wydawnictwo Uniwersytetu Rzeszowskiego, Rzeszów 2016.
- [6] M. Nałęcz red., Fizyka medyczna, Akademicka Oficyna Wydawnicza EXIT 2002.
- [7] M. Nałęcz red., Obrazowanie biomedyczne, Akademicka Oficyna Wydawnicza EXIT 2003.
- [8] B. Pruszyński., Diagnostyka obrazowa. Podstawy teoretyczne i metodyka badań, Wyd. Lekarskie PZWL, Warszawa 2000.