



## Zastosowanie promieniotwórczości w medycynie

- Wprowadzenie
- Przeczytaj
- Film edukacyjny
- Sprawdź się
- Dla nauczyciela



## Zastosowanie promieniotwórczości w medycynie

Źródło: Universitätsklinikum Schleswig-Holstein, Stabsstelle Integrierte Kommunikation, dostępny w internecie: [https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Linearbeschleuniger\\_Kiel.jpg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Linearbeschleuniger_Kiel.jpg) [dostęp 21.03.2022 r.], licencja: CC BY-SA 3.0.

## Czy to nie ciekawe?

Medycyna nuklearna wykorzystuje radioizotopy do celów diagnostycznych oraz do leczenia zmian chorobowych. W wielu przypadkach, zastosowanie metod medycyny nuklearnej pozwala na szybką diagnozę stanu zdrowia pacjenta. Organy takie, jak tarczyca, serce czy wątroba mogą zostać szczegółowo zobrazowane przy użyciu procedur, które obecnie można już uznać za standardowe. W niektórych przypadkach, promieniowanie może zostać wykorzystane do leczenia chorobowo dotkniętych organów lub do leczenia zmian nowotworowych. W tym e-materiale dowiesz się, w jaki sposób promieniowanie jonizujące i radioizotopy wykorzystywane są w medycynie.

### Twoje cele

- dowiesz się, w jaki sposób radioizotopy wykorzystywane są w medycynie,

- przeanalizujesz różne metody diagnostyczne, stosowane w medycynie nuklearnej,
- zrozumiesz, na jakim zjawisku fizycznym opiera się badanie PET,
- oszacujesz dawkę pochłoniętą dla pacjenta, któremu podano radiofarmaceutyk,
- zrozumiesz, czym jest biologiczny czas połowicznego zaniku.

# Przeczytaj

---

## Warto przeczytać

Izotopy promieniotwórcze (radioizotopy) znalazły szerokie zastosowanie w medycynie. Kilkadziesiąt radioizotopów różnych pierwiastków wykorzystuje się obecnie do celów diagnostycznych, leczenia chorób lub do badań naukowych. Wszystkie medyczne radioizotopy są izotopami syntetycznymi. Są one otrzymywane w wyniku napromieniania odpowiednio przygotowanej próbki, a w innych przypadkach, bombardowania jej strumieniem neutronów z reaktora jądrowego lub protonami albo jonami, przyspieszonymi w akceleratorze (na przykład w cyklotronie). Kilka radioizotopów używanych w medycynie powstaje w reakcjach rozszczepienia w reaktorach jądrowych. Najpowszechniej wykorzystywane w medycynie radioizotopy, takie jak jod-131, technet-99m, cez-137 i kobalt-60, zostały odkryte na przełomie lat 30-tych i 40-tych XX wieku.

Obecnie (stan na rok 2020) na świecie jest ponad dziesięć tysięcy szpitali, w których wykorzystuje się radioizotopy. W krajach rozwiniętych, co roku, średnio jedna osoba na pięćdziesiąt jest diagnozowana lub leczona z użyciem radioizotopów. Około 90% przeprowadzanych procedur dotyczy diagnostyki. Pozostałe 10%, to zabiegi mające na celu poprawę stanu zdrowia pacjenta. Najczęściej używanym radioizotopem w diagnostyce jest technet-99m, który wykorzystuje się w około 40 milionach procedur rocznie (85% wszystkich skanów diagnostycznych). Medycyna jądrowa jest najbardziej rozpowszechniona w Stanach Zjednoczonych (ponad 20 milionów zabiegów różnego typu rocznie). W Europie wykonuje się około 10 milionów zabiegów rocznie. Szacuje się, że liczba zabiegów medycyny jądrowej wykonywanych na świecie będzie zwiększać się w tempie 10% rocznie.

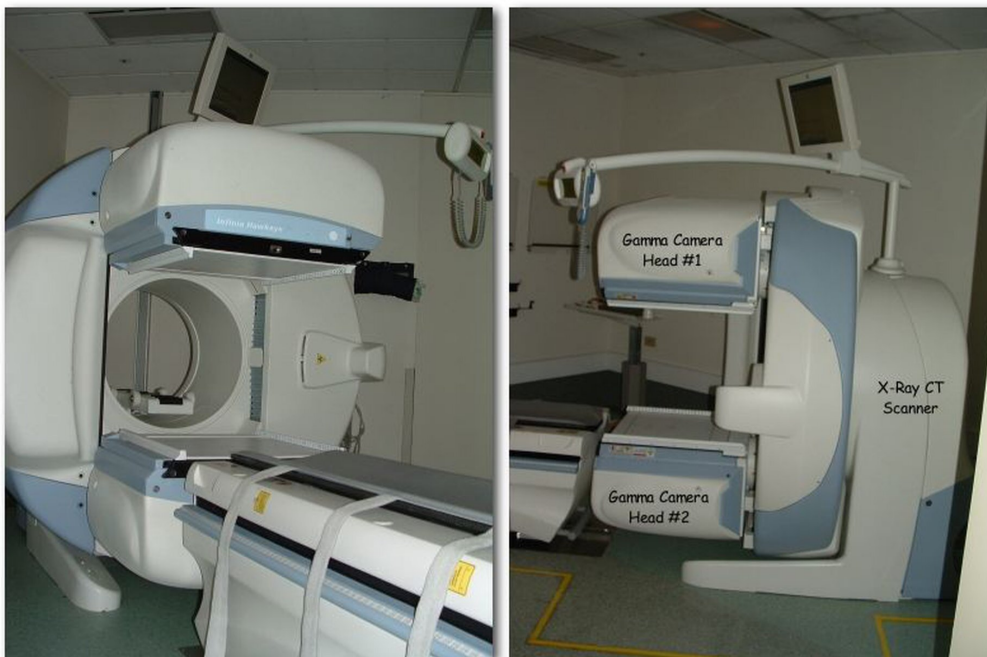
## Diagnostyka medyczna

W procedurach diagnostycznych radioizotopy są używane w roli tzw. **wskaźników promieniotwórczych**. Krótkożyciowe radioizotopy medyczne dołącza się do związków chemicznych, podawanych pacjentom. Tak przygotowane substancje nazywane są **radiofarmaceutykami**. W zależności od celu badania, stosuje się radiofarmaceutyki, które są przetwarzane przez organizm w odpowiedni sposób, na

przykład mają tendencję do koncentrowania się w miejscach dotkniętych zmianami chorobowymi lub gromadzą się w konkretnych organach. W diagnostyce wykorzystuje się głównie radioizotopy o [czasie połowicznego rozpadu](#) do kilku godzin (rzadziej dni), które w wyniku przemian promieniotwórczych, pośrednio lub bezpośrednio, powodują emisję promieniowania gamma. W rezultacie podania pacjentowi radiofarmaceutyku (na przykład doustnie lub w formie zastrzyku), zmienione chorobowo miejsce lub badany organ staje się na pewien czas źródłem promieniowania gamma.

Promieniowanie emitowane z wnętrza ciała pacjenta jest rejestrowane przez urządzenia obrazujące, dostarczając informacji o procesach i zmianach zachodzących w organizmie pacjenta. Tego typu badanie daje możliwość obrazowania tkanek miękkich.

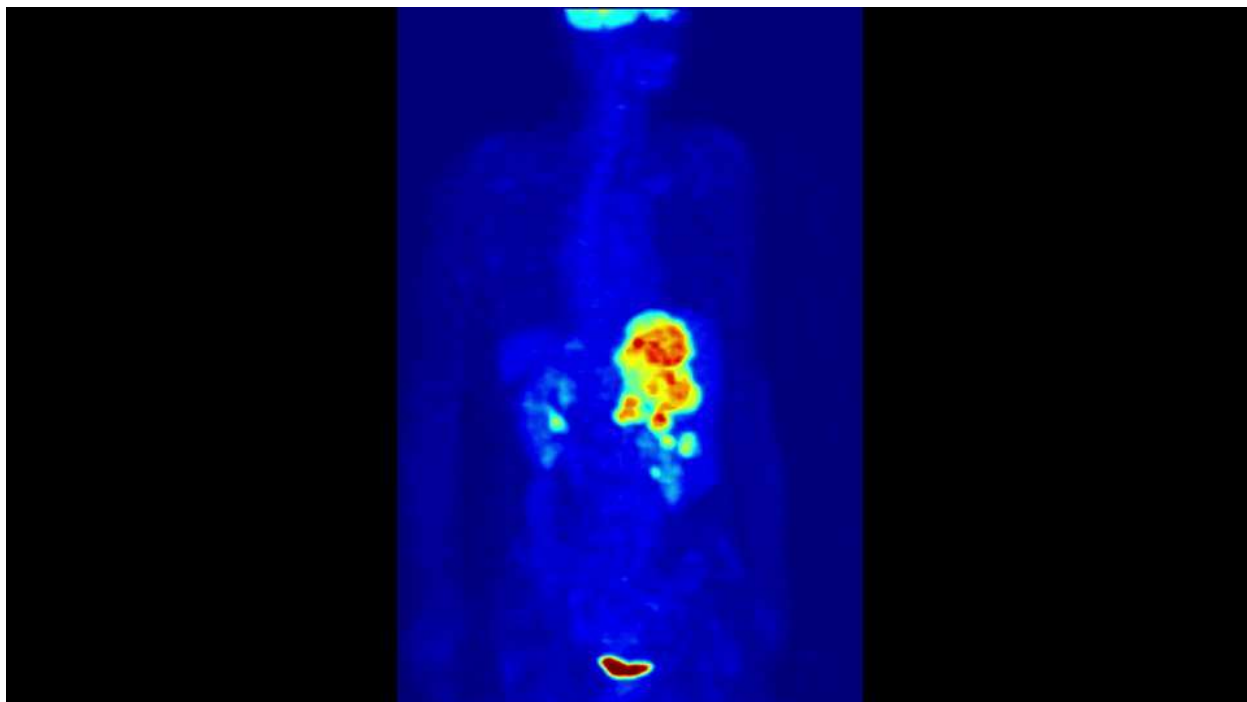
Przykładem urządzenia obrazującego (detektora promieniowania) używanego w badaniach diagnostycznych jest **gamma kamera**, która może rejestrować pojedyncze kwanty gamma emitowane z różnych miejsc wewnątrz ciała pacjenta i pod różnymi kątami. Gamma kamery wykorzystywane są np. w badaniu [SPECT](#) (**tomografia emisyjna pojedynczych fotonów**), które umożliwia stworzenie trójwymiarowego obrazu dowolnego obszaru ciała pacjenta. Przykładowe urządzenie do badania SPECT, z dwiema gamma kamerami, zostało pokazane na rysunku 1. Najczęściej używanym radioizotopem w diagnostyce nuklearnej i w badaniach SPECT jest technet-99m. Wykorzystuje się go między innymi do diagnozowania zmian nowotworowych, badania organów wewnętrznych, struktury kości czy przepływu krwi.



Rys. 1. Urządzenie SPECT, w którym znajdują się dwie gamma kamery.

Źródło: KieranMaher, dostępny w internecie: [https://commons.wikimedia.org/wiki/File:NM19\\_290.jpg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:NM19_290.jpg) [dostęp 21.03.2022], domena publiczna.

Badanie **PET (pozytonowa tomografia emisyjna)** opiera się na podobnej zasadzie, co badanie SPECT. Pacjentowi podaje się radiofarmaceutyk zawierający izotop promieniotwórczy, będący emiteryem pozytonów (antyelektronów). Pozyton, po przebyciu zaledwie kilku milimetrów w ciele pacjenta, ulega anihilacji z elektronem ośrodka. Anihilacja prowadzi do powstania dwóch kwantów gamma o tej samej energii, emitowanych w przeciwnych kierunkach. Oba kwanty gamma rejestrowane są w koincydencji przez detektory rozmieszczone naokoło pacjenta (zazwyczaj w postaci pierścienia), co umożliwia precyzyjną lokalizację miejsca ich emisji w ciele badanej osoby. Na rysunku 2. pokazano przykładowy obraz uzyskany podczas badania PET. Pacjentowi podano fluorodeoksyglukozę (FDG), zawierającą promieniotwórczy fluor-18. FDG jest podstawowym radiofarmaceutykiem wykorzystywanym w badaniach PET.



Film dostępny pod adresem </preview/resource/R1K7O0WGZrRPg>

Rys. 2. Trójwymiarowy obraz ciała pacjenta uzyskany w badaniu PET.

Źródło: Jens Maus, [https://commons.wikimedia.org/wiki/Jens\\_Maus/File:PET-MIPS-anim.gif](https://commons.wikimedia.org/wiki/Jens_Maus/File:PET-MIPS-anim.gif), domena publiczna.

Rys. 2. Animacja, przedstawiona bez udziału lektora, prezentuje trójwymiarowy obraz pacjenta, uzyskany w badaniu o nazwie PET. Na ciemnoniebieskim tle widoczna jest obracająca się, ustawiona pionowo, jasnoniebieska sylwetka człowieka. W zarysie ciała pacjenta widoczne są jasnoniebieskie elementy jego szkieletu. Kości są jaśniejsze, ponieważ część promieniowania gamma, wykorzystywana do uzyskania obrazu jest przez nie pochłaniana mocniej niż przez inne tkanki. Wewnątrz klatki piersiowej pacjenta widać kilka jaśniejszych, zielonych, żółtych oraz czerwonych elementów. Elementami tymi są organy wewnętrzne pacjenta żołądek, wątroba, pęcherz moczowy.

---

PET jest metodą dokładniejszą od SPECT i pozwala na uzyskanie zdjęć o większej rozdzielczości. Koszty badania PET, jak i samego urządzenia diagnostycznego, są jednak dużo wyższe od kosztów aparatury i badania SPECT. Obecnie badania SPECT i PET są często wykonywane jednocześnie z badaniami CT (tomografia komputerowa) czy MRI (obrazowanie metodą rezonansu magnetycznego), co pozwala na uzyskanie jeszcze pełniejszej informacji na temat stanu zdrowia pacjenta.

## Terapia

Niektóre radioizotopy wykorzystywane są do leczenia zmian nowotworowych lub innych chorób. Najczęściej wykorzystywanym radioizotopem do celów terapeutycznych jest jod-131, który podany pacjentom w małych ilościach, leczy raka tarczycy i inne choroby tego narządu. Jod-131 jest podawany chorym w postaci tabletki. Inną metodą leczenia zmian nowotworowych jest brachyterapia, która polega na umieszczeniu zamkniętego źródła promieniotwórczego bezpośrednio w guzie lub jego sąsiedztwie.

W radioterapii zmiany nowotworowe są leczone poprzez naświetlanie promieniowaniem jonizującym, pochodzącym ze źródeł zewnętrznych. Powszechnie stosowanym urządzeniem w radioterapii jest tzw. bomba kobaltowa, zawierająca intensywne źródło kobaltu-60. Izotop ten jest wykorzystywany między innymi do mało inwazyjnego leczenia nowotworów mózgu (metoda leczenia tak zwanym nożem gamma). Inną metodą leczenia nowotworów jest napromienianie zmian chorobowych wiązkami neutronów lub przyspieszonymi w akceleratorze protonami albo ciężkimi jonami. Naświetlanie cząstkami naładowanymi lub ciężkimi jonami pozwala na bardzo precyzyjne deponowanie energii w zmianach nowotworowych wewnątrz ciała pacjenta. W przeciwieństwie do promieniowania gamma, które podczas przechodzenia przez ciało pacjenta lokuje energię równomiernie, zarówno w zdrowych, jak i chorych tkankach, cząstki naładowane i ciężkie jony oddają większość swojej energii tuż przed zatrzymaniem się. Jeżeli odpowiednio dobierze się energię wiązki, większość tej energii zostanie zdeponowana w guzie, a nie w otaczających go zdrowych tkankach. Obecnie w Polsce znajduje się jeden ośrodek terapii protonowej (Centrum Cyklotronowe Bronowice IFJ PAN w Krakowie). Placówka ta specjalizuje się w radioterapii protonowej nowotworów narządu wzroku.

## **Sterylizacja**

Promieniowanie jonizujące jest wykorzystywane do sterylizacji sprzętu medycznego – strzykawek, rękawiczek, fartuchów i innych przyrządów, które nie mogą być odkażone za pomocą wysokich temperatur. Sterylizacji radiacyjnej poddaje się również niektóre organy do przeszczepów. Do wyjaławiania wykorzystuje się najczęściej intensywne źródła promieniowania gamma.

## **Słowniczek**

## **Bekerel, Bq**

(ang.: *becquerel*) jednostka aktywności promieniotwórczej,  $1 \text{ Bq} = \frac{1 \text{ rozpad}}{1 \text{ s}}$ .

## **czas połowicznego rozpadu**

(ang.: *half-life*) czas, w którym liczba nietrwałych obiektów w próbce maleje o połowę, oznaczany  $T_{1/2}$ . Czasami zamiast słowa „czas” używa się „okres”, zamiast „rozpadu” – „zaniku”.

## **SPECT**

(ang.: *single-photon emission computed tomography*) tomografia emisyjna pojedynczych fotonów.

## **PET**

(ang.: *positron emission tomography*) pozytonowa tomografia emisyjna.

# Film edukacyjny

---

## Zastosowanie promieniotwórczości w medycynie

Obejrzyj wywiad z prof. nadzw. dr hab. n. med. Pawłem Kukołowiczem, kierownikiem Zakładu Fizyki Medycznej Narodowego Instytutu Onkologii im. Marii Skłodowskiej-Curie w Warszawie.

Oglądając film, poszukaj odpowiedzi na pytania umieszczone poniżej.

Trwa wczytywanie danych ..



Film dostępny pod adresem </preview/resource/Ricbsm9BjGJSt>

Źródło: Politechnika Warszawska Wydział Fizyki, licencja: CC BY 4.0. Licencja:  
<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.pl>.

Prof. nadzw. dr hab. n. med. Paweł Kukołowicz, kierownik Zakładu Fizyki Medycznej Narodowego Instytutu Onkologii im. Marii Skłodowskiej-Curie w Warszawie, przedstawia metody leczenia pacjentów z chorobą nowotworową wykorzystywane w medycynie nuklearnej.

---

**Polecenie 1**

**Polecenie 2**

**Polecenie 3**

Opisz własnymi słowami, czym jest radioterapia.

# Sprawdź się

---

Pokaż ćwiczenia:   

Ćwiczenie 1



Ćwiczenie 2



Ćwiczenie 3



Ćwiczenie 4

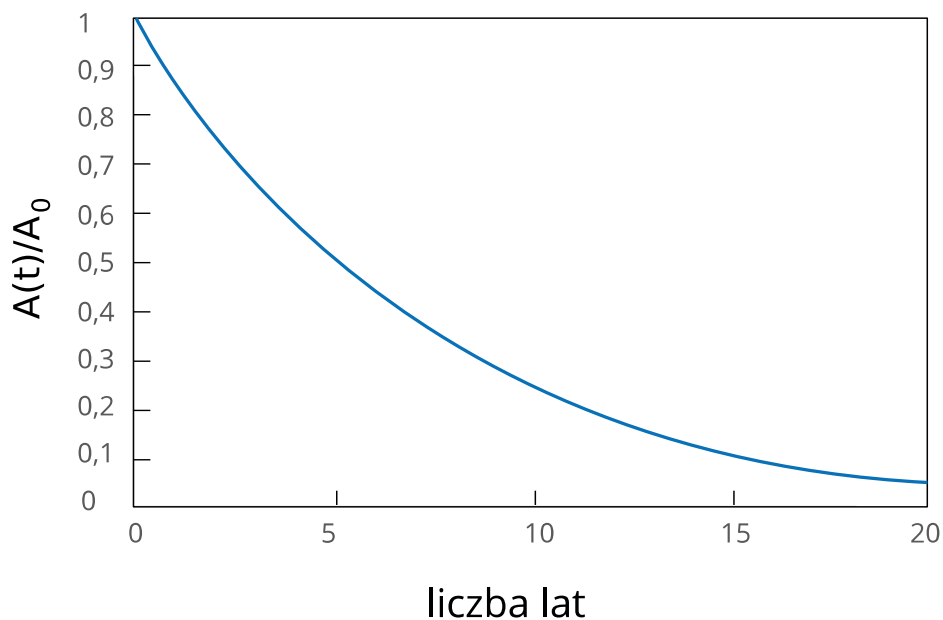


## Ćwiczenie 5



Bomba kobaltowa jest urządzeniem medycznym wykorzystywanym w teleradioterapii, czyli w leczeniu zmian nowotworowych za pomocą promieniowania jonizującego. W bombach kobaltowych stosuje się źródła kobaltu-60, o aktywnościach sięgających  $10^{14}$  Bq. Źródło promieniotwórcze umieszczane jest w ołowianych osłonach z kanałami, przez które wiązki promieniowania wydostają się na zewnątrz.

Na rysunku przedstawiono, jak aktywność źródła kobaltu-60 zamontowanego w bombie kobaltowej zmienia się w czasie. Aktywność została wyrażona w jednostkach aktywności początkowej  $A_0$ .



Źródło: Politechnika Warszawska Wydział Fizyki, licencja: CC BY 4.0.

## Ćwiczenie 6



## Ćwiczenie 7



## Ćwiczenie 8



Technet-99m,  $^{99m}\text{Tc}$ , jest najczęściej stosowanym radionuklidem w diagnostyce nuklearnej. Litera *m* przy liczbie masowej oznacza, że jest to izomer metastabilny (izomery to jądra atomowe o tej samej liczbie protonów i neutronów, różniące się od siebie stanem kwantowym). Technet-99m otrzymuje się jako produkt przemiany promieniotwórczej molibdenu-99,  $^{99}\text{Mo}$ . Urządzenie do otrzymywania technetu-99m nazywa się generatorem izotopowym. Na rysunku przedstawiono generator izotopowy produkowany przez ośrodek radioizotopów POLATOM. W osłoniętej kolumnie wewnątrz generatora umieszcza się małą ilość roztworu zawierającego molibden-99 o aktywności około kilkudziesięciu GBq. W wyniku przemian promieniotwórczych molibdenu-99 w kolumnie nagromadza się związek zawierający technet-99m. Po kilku godzinach związek technetu jest wmywany za pomocą roztworu soli fizjologicznej, a następnie modyfikowany chemicznie, w wyniku czego powstaje radiofarmaceutyk gotowy do podania pacjentowi.



Rys. 1. Generator izotopowy służący do produkcji  $^{99m}\text{Tc}$ .

Źródło: Narodowe Centrum Badań Jądrowych, dostępny w internecie: <https://www.ncbj.gov.pl/en/aktualnosci/new-tc-99m-production-line-will-soon-start-operations-swierk> [dostęp 21.03.2022 r.].

Aktywność źródła promieniotwórczego po czasie  $t \geq 0$  można opisać funkcją:

$$A(t) = A_0 \left(\frac{1}{2}\right)^{\frac{t}{T_{1/2}}}$$

gdzie  $A_0$  to początkowa aktywność źródła, a  $T_{1/2}$  to czas połowicznego zaniku, czyli czas, w którym liczba nietrwałych obiektów w źródle maleje o połowę. Czas połowicznego zaniku molibdenu-99 wynosi 66 godzin. Typowy generator izotopowy do produkcji  $^{99m}\text{Tc}$  nadaje się do użycia przez dwa tygodnie od dostarczenia do placówki medycznej.

# Dla nauczyciela

---

<b>Imię i nazwisko autora:</b>	Tomasz Cap
<b>Przedmiot:</b>	Fizyka
<b>Temat zajęć:</b>	<b>Zastosowania promieniowania jonizującego i radioizotopów w medycynie</b>
<b>Grupa docelowa:</b>	III etap edukacyjny, liceum, technikum, zakres podstawowy i rozszerzony

---

### **Cele kształcenia – wymagania ogólne**

I. Wykorzystanie pojęć i wielkości fizycznych do opisu zjawisk oraz wskazywanie ich przykładów w otaczającej rzeczywistości.

II. Rozwiązywanie problemów z wykorzystaniem praw i zależności fizycznych.

### **Zakres podstawowy**

#### **Treści nauczania – wymagania szczegółowe**

I. Wymagania przekrojowe. Uczeń:

4) przeprowadza obliczenia liczbowe posługując się kalkulatorem;

15) wyodrębnia zjawisko z kontekstu, nazywa je oraz wskazuje czynniki istotne i nieistotne dla jego przebiegu.

XI. Fizyka jądrowa. Uczeń:

8) wymienia przykłady zastosowania zjawiska promieniotwórczości w technice i medycynie.

### **Zakres rozszerzony**

#### **Treści nauczania – wymagania szczegółowe**

I. Wymagania przekrojowe. Uczeń:

4) przeprowadza obliczenia liczbowe posługując się kalkulatorem;

19) wyodrębnia zjawisko z kontekstu, nazywa je oraz wskazuje czynniki istotne i nieistotne dla jego przebiegu.

XII. Elementy fizyki relatywistycznej i fizyka jądrowa. Uczeń:

14) wymienia przykłady zastosowania zjawiska promieniotwórczości w technice i medycynie.

**Podstawa programowa:**

<p><b>Kształtowane kompetencje kluczowe:</b></p>	<p><b>Zalecenia Parlamentu Europejskiego i Rady UE z 2018 r.:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• kompetencje w zakresie rozumienia i tworzenia informacji,</li> <li>• kompetencje matematyczne oraz kompetencje w zakresie nauk przyrodniczych, technologii i inżynierii,</li> <li>• kompetencje cyfrowe,</li> <li>• kompetencje osobiste, społeczne i w zakresie umiejętności uczenia się.</li> </ul>
<p><b>Cele operacyjne:</b></p>	<p>Uczeń:</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. omawia, czym są radiofarmaceutyki i w jaki sposób promieniowanie jonizujące jest wykorzystywane w medycynie;</li> <li>2. korzysta z jednostki aktywności promieniotwórczej;</li> <li>3. oblicza aktywność substancji promieniotwórczej, znając jej czas połowicznego zaniku;</li> <li>4. wyjaśnia pojęcie dawki pochłoniętej.</li> </ol>
<p><b>Strategie nauczania:</b></p>	<p>blended-learning</p>
<p><b>Metody nauczania</b></p>	<p>wykład informacyjny, rozwiązywanie zadań rachunkowych</p>
<p><b>Formy zajęć:</b></p>	<p>praca indywidualna, praca w parach</p>
<p><b>Środki dydaktyczne:</b></p>	<p>monitor interaktywny lub rzutnik do wyświetlania multimedium, laptop lub tablet na parę uczniów</p>
<p><b>Materiały pomocnicze:</b></p>	<p>-</p>
<p><b>PRZEBIEG LEKCJI</b></p>	

**Faza wprowadzająca:**

Nauczyciel organizuje burzę mózgów na temat wykorzystania promieniowania jonizującego i radioizotopów w medycynie. Zbiera pomysły uczniów i rozdziela je na trzy kategorie: diagnostyka, leczenie, inne zastosowania. Nauczyciel uzupełnia pomysły uczniów o nie wymienione zastosowania.

Nauczyciel wyjaśnia, czym są radiofarmaceutyki. Koncentruje się na wybranych, często stosowanych radioizotopach w medycynie (np. jod-131, kobalt-60, technet-99m, fluor-18). Wymienia ich zastosowania, metody produkcji oraz pokazuje przykładowe zdjęcia badań diagnostycznych i aparatury medycznej, dedykowanej konkretnym badaniom (SPECT, PET, bomba kobaltowa).

Nauczyciel omawia metody terapii nowotworowej z wykorzystaniem wiązek protonów i ciężkich jonów.

**Faza realizacyjna:**

Nauczyciel prosi uczniów o przypomnienie pojęcia czasu połowicznego zaniku. Następnie ogłasza konkurs, kto najszybciej rozwiąże zadanie 4 z zestawu ćwiczeń i nagradza trzy pierwsze osoby. Dotyczy ono czasu połowicznego zaniku jodu-131 i można je rozwiązać bez wykonywania obliczeń.

Nauczyciel nawiązuje do terapii z wykorzystaniem jodu-131 i czasu jego przebywania w organizmie oraz rozmawia z uczniami o biologicznych skutkach podania pacjentowi substancji zawierającej izotopy promieniotwórcze. Wyjaśnia uczniom, w jaki sposób promieniowanie jonizujące wpływa na organizmy żywe. Uczniowie rozwiązują w parach zadanie 7 z zestawu ćwiczeń, dotyczące dawki otrzymanej przez pacjenta w badaniu diagnostycznym. Nauczyciel wyjaśnia, jakie mogą być skutki nadmiernego napromieniowania i mówi uczniom, że dawki otrzymywane w badaniach diagnostycznych nie są niebezpieczne dla pacjenta. W następnym etapie lekcji uczniowie rozwiązują w parach zadanie nr 6, dotyczące naturalnej aktywności promieniotwórczej człowieka. Nauczyciel prosi ich o to, by starali się wykonywać samodzielnie obliczenia dotyczące kolejnych pytań, a w razie potrzeby przeanalizowali formuły podane w informacjach zwrotnych. Na koniec, zwraca uczniom uwagę na to, że wykonali właśnie bardzo trudne zadanie, ale bardzo ważne dla każdego, kto chce w przyszłości zajmować się medycyną nuklearną.

**Faza podsumowująca:**

Dla rozluźnienia toku lekcji oraz podsumowania wiadomości, uczniowie rozwiązują na czas krzyżówkę z zadania 3, a najszybsi otrzymują nagrody.

Uczniowie oglądają film edukacyjny, zawierający wywiad z profesorem Pawłem Kukołowiczem i rozmawiają, kto chciałby się w przyszłości zajmować radioterapią i dlaczego.

**Praca domowa:**

W ramach powtórzenia i utrwalenia wiadomości, uczniowie rozwiązują zadania: 1, 2, 5 i 8 z zestawu ćwiczeń oraz wykonują polecenia aktywizujące, umieszczone pod filmem edukacyjnym.

**Wskazówki metodyczne**  
**opisujące różne**  
**zastosowania danego**  
**multimedium**

Film może być wykorzystany przez uczniów jako praca domowa przed lekcją lub stanowić wprowadzenie do tematu lekcji.