



W jakich warunkach zachodzi reakcja łańcuchowa?

- [Wprowadzenie](#)
- [Przeczytaj](#)
- [Film samouczek](#)
- [Sprawdź się](#)
- [Dla nauczyciela](#)

A large, fiery mushroom cloud from a nuclear explosion, with a bright orange and yellow core and a dark, billowing top, set against a dark background.

W jakich warunkach zachodzi reakcja łańcuchowa?

Czy to nie ciekawe ?

Jednym z najpopularniejszych związków frazeologicznych wywodzących się ze świata nauki jest wyrażenie masa krytyczna. W języku popularnym oznacza ono granicę, której przekroczenie zapoczątkowuje procesy lub wydarzenia, których nie da się powstrzymać.



Rys. a. Ruch społeczny mający na celu przejęcie ulic przez rowerzystów również wykorzystał termin *masa krytyczna* jako odzwierciedlenie idei tego ruchu: *w liczbie siła*.

Fizyka jest dużo bardziej powściągliwa. Pojęcie masy krytycznej określa granicę, którą należy przekroczyć, aby zaczęły się dziać rzeczy ciekawe, a konkretnie aby otrzymać samopodtrzymujący się cykl rozszczepień, zwany reakcją łańcuchową.

Za chwilę dowiesz się, czym dokładnie jest reakcja łańcuchowa rozszczepienia i jakie muszą być spełnione warunki aby ją przeprowadzić.

Twoje cele

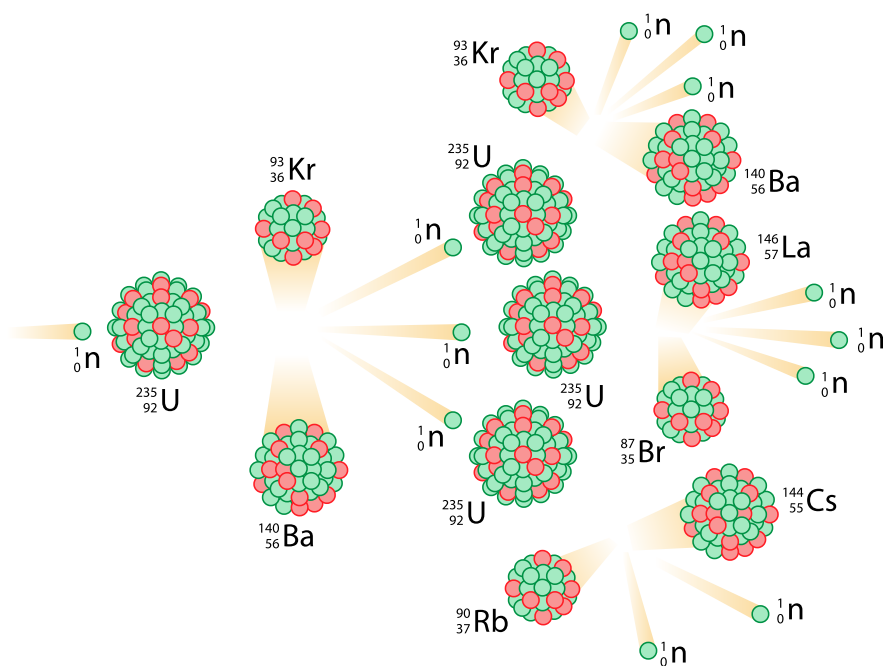
W tym e-materiale:

- dowiesz się, czym jest reakcja łańcuchowa i masa krytyczna,
- poznasz problemy, jakim należy sprostać, aby przeprowadzić kontrolowaną reakcję łańcuchową,
- zrozumiesz, dlaczego naturalny uran nie jest wykorzystywany w elektrowniach jądrowych,
- dowiesz się, czym jest i do czego służy moderator,
- rozwiążesz zadania dotyczące reakcji łańcuchowej

Warto przeczytać

Indukowanemu neutronami **rozszczerpieniu** jądra uranu ^{235}U , oprócz uwolnienia solidnej porcji energii (ok 200 MeV), towarzyszy emisja 2-3 neutronów. Gdyby powstałe neutrony mogły zostać wykorzystane do indukcji kolejnych aktów **rozszczerpienia**, można by uzyskać samopodtrzymującą się silnie egzoenergetyczną reakcję. Taki proces nazywamy reakcją łańcuchową.

Czym dokładnie jest reakcja łańcuchowa? Spójrz na poniższy rysunek wizualizujący reakcję łańcuchową rozszczepienia jądra uranu ^{235}U . W pierwszym kroku na jądro uranu ^{235}U pada neutron powodując jego rozszczepienie. Wyemitowane w tym procesie trzy neutrony napotykają kolejne jądra ^{235}U indukując ich rozszczepienie. Powstała trzecia generacja neutronów także indukuje akty kolejnych rozszczepień. W ten sposób następuje cały łańcuch **rozszczerpień** wzajemnie się podtrzymujących.



Rys 1. Wizualizacja reakcji łańcuchowej rozszczepienia jądra U-235.

Źródło: dostępny w internecie: <https://nuclear.pl/podstawy,reakcja,reakcja%E2%80%911ancuchowa,0,0.html> [dostęp 21.03.2022 r.].

Aby reakcja łańcuchowa nie ulegała wygaszeniu, średnio przynajmniej jeden z wyemitowanych neutronów musi zapoczątkować kolejne rozszczepienie. Warunek ten określa wartość **współczynnika mnożenia (powielenia) neutronów k** , zdefiniowanego jako stosunek liczby neutronów w $i+1$ pokoleniu rozszczepienia do liczby neutronów w i -tym pokoleniu. Warunkiem podtrzymania reakcji łańcuchowej jest, aby **współczynnik mnożenia** wynosił przynajmniej 1.

Ile wynosi parametr k w reakcji pokazanej na Rys. 1? Policzmy! W pierwszym rozszczepieniu powstają 3 neutrony, w kolejnym 8 neutronów. Parametr k wynosi więc $8/3 \approx 2,7$. To dużo więcej od 1. Rysunek pokazuje reakcję łańcuchową na samym jej początku, w trakcie rozruchu. Kontrolowana reakcja łańcuchowa z czasem przyjmie parametr k równy 1.

W teorii brzmi łatwo, w praktyce należy sprostać kilku opisanym poniżej problemom.

1. Materiał rozszczepialny

Materiałem rozszczepialnym wykorzystywanym w reaktorach jądrowych jest głównie uran ^{235}U . Izotop ten występuje naturalnie w rudzie uranu, jednakże stanowi jej jedynie niespełna 0,7 %. To za mało, aby wyemitowane w rozszczepieniu neutrony miały szansę spotkać jądro ^{235}U i wywołać kolejny akt rozszczepienia. Ponadto niemalże nieuczestniczący w rozszczepieniu izotop uranu ^{238}U , stanowiący pozostałe 99,3% rudy, może także pochłaniać neutrony jeszcze bardziej zmniejszając prawdopodobieństwo otrzymania samopodtrzymującej się reakcji.

Stosowanym rozwiązaniem jest wzbogacanie uranu naturalnego w taki sposób, aby izotop ^{235}U stanowił ok. 3–5 % próbki. Ponieważ izotopy uranu mają bardzo zbliżone własności chemiczne, do rozdzielania frakcji wykorzystuje się ich różnice w masie atomowej. Jedną z metod polega na umieszczeniu próbki w cylindrycznych wirówkach. Pod wpływem działania siły odśrodkowej cięższe cząstki gromadzą się w zewnętrznej części wirówki, podczas gdy cząstki lżejsze bliżej osi obrotu. Tym samym frakcja znajdująca się w środku wirówki posiada zwiększoną ilość izotopu ^{235}U .

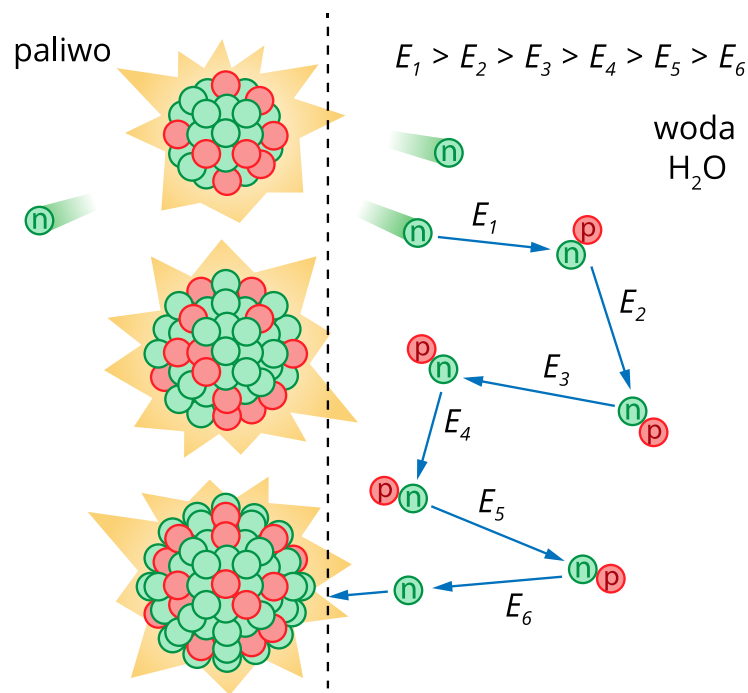
2. Energia neutronów

Energia kinetyczna neutronów wyemitowanych w rozszczepieniu przyjmuje najczęściej wartości kilku megaelektronowoltów (MeV). Jest to zdecydowanie za dużo, aby neutron mógł zostać pochłonięty przez jądro ^{235}U i spowodować jego rozszczepienie. Prawdopodobieństwo zajścia tego procesu zależy od energii neutronów. Jest tym większe, im mniejsza jest ich energia. Prawdopodobieństwo zajścia rozszczepienia dla neutronów o energii 0,01 eV jest aż o trzy rzędy wielkości większe niż dla neutronów pochodzących bezpośrednio z rozszczepienia. Aby móc efektywnie indukować kolejne akty rozszczepienia energia neutronów musi ulec znacznemu zredukowaniu, co realizuje się z wykorzystaniem tzw. [moderatorów](#).

Mechanizm zmniejszania energii kinetycznej, czyli spowalniania neutronów w [moderatorach](#) bardzo łatwo zrozumieć w oparciu o analogię do sprężystych zderzeń kul. Rozpędzona kula zderzając się z dużo cięższym obiektem przekazuje mu tylko niewielką część swojej energii kinetycznej, po prostu się odbija i leci z niemalże tą samą prędkością w przeciwnym kierunku. Jednakże w zderzeniu z kulą o tej samej masie może dojść do całkowitego przekazania energii. Możesz to zaobserwować grając w bilard. Bila zderzając się z bandą – dużo cięższym obiektem – odbija się od niej i porusza się w przeciwnym

kierunku z niemalże tą samą prędkością. Z drugiej strony bilardowa kula może się całkowicie zatrzymać po zderzeniu z inną, początkowo nieruchomą bilą, przekazując jej całą swoją energię kinetyczną. W sytuacji idealnej rozprężona bila wpadnie do wybranego dołka.

Spowalnianie neutronów również odbywa się wskutek szeregu zderzeń z cząsteczkami **moderatora**. Aby proces zachodził efektywnie materiał **moderatora** dobiera się tak, aby masa cząsteczek była możliwie zbliżona do masy neutronów. W praktyce najczęściej stosuje się wodę (H_2O) lub ciężką wodę (D_2O). Wykorzystanie materiału o dużej masie atomowej, np. ołowiu, spowodowałoby, że neutrony ulegałyby zderzeniom z atomami ośrodka bez utraty swojej energii kinetycznej. Mechanizm spowalniania neutronów w wodzie prezentuje Rys. 2.



Rys. 2. Mechanizm spowalniania neutronów w wodzie.

Źródło: A. Czerwiński, *Energia jądrowa i promieniotwórczość*.

3. Masa krytyczna

Aby uzyskać reakcję łańcuchową średnio przynajmniej jeden z wyemitowanych 2-3 neutronów musi zapoczątkować kolejne rozszczepienie. W przeciwnym wypadku proces nie będzie podtrzymywany i ulegnie wygaszeniu. Aby się to stało, należy dysponować odpowiednią ilością materiału rozszczepialnego. Przy zbyt małej masie materiału neutrony wyemitowane w rozszczepieniu opuszczą próbkę zanim napotkają jądro ^{235}U , lub zostaną pochłonięte przez materiał nie ulegający rozszczepieniu. Minimalna masa materiału rozszczepialnego niezbędna do podtrzymania reakcji łańcuchowej nazywa się **masą krytyczną**. Konkretna wartość **masy krytycznej** zależy od geometrii i postaci chemicznej materiału rozszczepialnego, stopnia wzbogacenia, rodzaju **moderatora**, obecności dodatkowych materiałów, które mogą zarówno pochłaniać, jak i odbijać neutrony. Każda konstrukcja reaktora jądrowego ma swoją własną **masę krytyczną**.

Rozwiązanie tych trzech z pozoru małych problemów otworzyło drogę do przeprowadzenia kontrolowanej reakcji łańcuchowej i wykorzystania energii emitowanej w rozszczepieniu w elektrowniach jądrowych.

Słowniczek

rozszczerpieenie

(*ang.: fission*) Przemiana jądrowa polegająca na samoczynnym rozpadzie jądra atomowego na dwa lżejsze fragmenty o zbliżonej masie, czemu towarzyszy emisja neutronów oraz uwolnienie energii. Rozszczepienie może zachodzić samoistnie (spontaniczne rozszczepienie), lub pod wpływem działania czynnika zewnętrznego, np. pochłonięcia neutronu lub protonu (rozszczerpieenie wymuszone).

moderator neutronów

(*ang.: neutron moderator*) Materiał służący do zmniejszania energii kinetycznej neutronów emitowanych w rozszczepieniu (spowalniania neutronów), w celu zwiększenia wydajności indukowania przez nie kolejnych aktów rozszczepienia. Najczęściej stosowanymi moderatorami są woda lub ciężka woda.

współczynnik powielenia neutronów k

(*ang.: effective neutron multiplication factor*) Stosunek ilości n neutronów w chwili kolejnej $i+1$ (pokoleniu) do ilości neutronów w chwili bieżącej i (wcześniejszym pokoleniu). Warunkiem podtrzymania reakcji łańcuchowej jest, aby współczynnik ten wynosił przynajmniej 1.

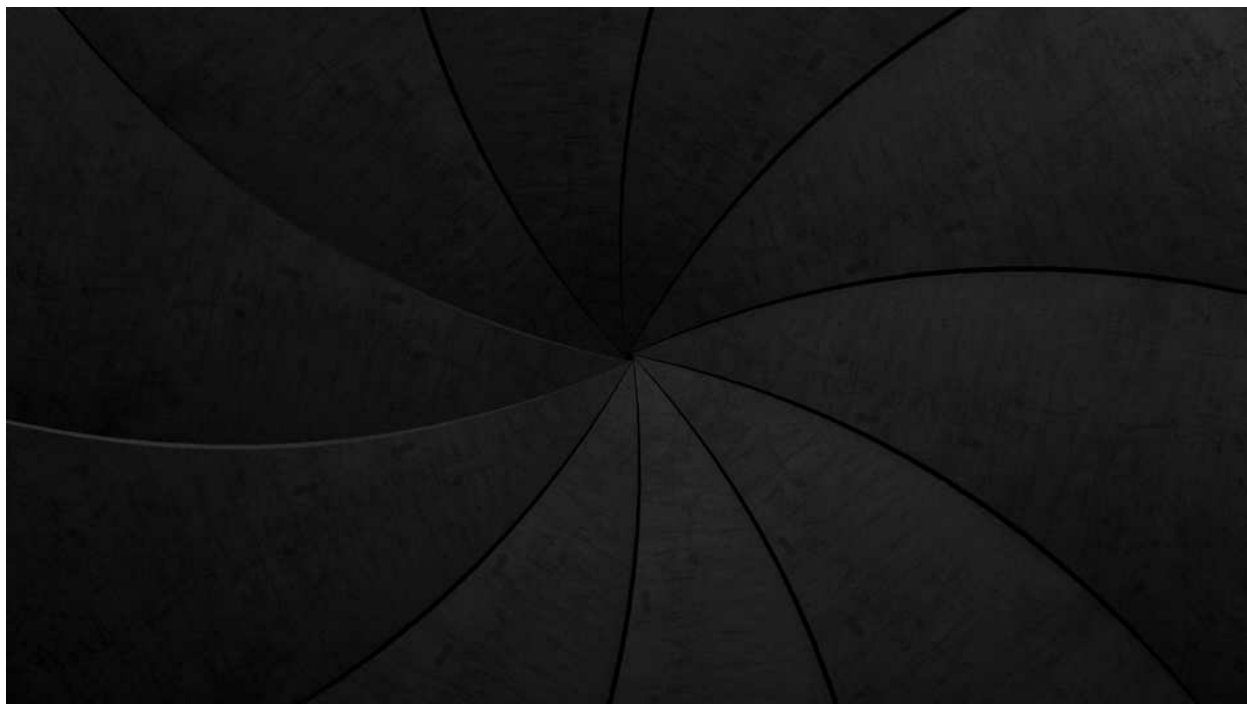
masa krytyczna

(*ang.: critical mass*) Minimalna masa materiału rozszczepialnego niezbędna do podtrzymania reakcji łańcuchowej. Wartość masy krytycznej zależy od rodzaju, geometrii i postaci chemicznej materiału rozszczepialnego, stopnia wzbogacenia, rodzaju moderatora, obecności dodatkowych materiałów, które mogą zarówno pochłaniać, jak i odbijać neutrony.

Film samouczek

W jakich warunkach zachodzi reakcja łańcuchowa?

Film przedstawia łańcuchową reakcję rozszczepienia uranu ^{235}U . W pierwszej części omawiane są pojedyncze akty rozszczepienia, a w drugiej pełna reakcja łańcuchowa.



Film dostępny pod adresem </preview/resource/RUKBi3pKiC8W>

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

Zapoznaj się z audiodeskrypcją samouczka.

Polecenie 1

Uzupełnij tekst.

Jądro o masie atomowej , pod wpływem o bardzo małej energii, może podzielić się na dwa fragmenty, czyli ulec , emitując kilka swobodnych neutronów. W wyniku reakcji zostaje uwolniona energia wynosząca około .

236

237

rozwarstwieniu

elektronów

protonów

20

10

238

berylu

megaelektronowoltów

500

kobaltu

megawatów

uranu

megadżuli

rozszczerpieniu

235

neutronów

dekompozycji

200

dezintegracji

200

Polecenie 2

Czy już wiesz, do czego służy i z czego jest zbudowany moderator neutronów?

Sprawdź się

Pokaż ćwiczenia:   

Ćwiczenie 1



Wybierz prawdziwe stwierdzenia opisujące reakcję łańcuchową rozszczepienia jąder uranu ^{235}U .

- ☐ polega na tym, że produkt jednej reakcji stanowi substrat dla kolejnej reakcji
- ☐ jej przeprowadzenie wymaga dysponowania odpowiednio dużą masą materiału rozszczepialnego.
- ☐ jest reakcją samopodtrzymującą się
- ☐ propaguje się w sposób przypominający chemiczną reakcję spalania

Ćwiczenie 2



Zaznacz poprawną odpowiedź. Zadaniem moderatora neutronów jest:

- ☐ rozkładanie deuteru zawartego w ciężkiej wodzie na proton i neutron zwiększając w ten sposób bilans neutronów w reaktorze
- ☐ wychwytywanie neutronów o zbyt wysokiej energii, aby mogły spowodować rozszczepienie jądra ^{235}U
- ☐ spowalnianie neutronów
- ☐ zwiększanie energii kinetycznej jąder ^{235}U , tak aby zbliżyć ją do energii kinetycznej neutronów

Ćwiczenie 3



Wybierz cechy, którym powinien się charakteryzować moderator neutronów. Powinien on

☐ posiadać małą gęstość

☐ być izolatorem

☐ być zbudowany z cząsteczek o małej masie

☐ posiadać duże prawdopodobieństwo zajścia zderzenia z padającymi neutronami

☐ silnie pochłaniać neutrony prężkie, czyli takie, które posiadają dużą energię kinetyczną

Ćwiczenie 4



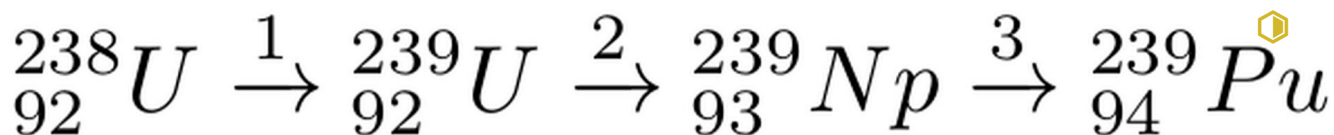
Wybierz słowa, dla których zdanie jest prawdziwe.

Masa atomowa uranu wzbogaconego jest ☐ mniejsza / ☐ większa od masy atomowej uranu naturalnego.

Przeprowadzenie reakcji łańcuchowej wymaga zastosowania odpowiednio dużej ☐ masy / ☐ temperatury ☐ materiału rozszczepialnego.

Reakcja łańcuchowa jest podtrzymywana, jeśli współczynnik mnożenia neutronów jest ☐ mniejszy / ☐ większy od 1.

Ćwiczenie 5



Jednym z najważniejszych izotopów rozszczepialnych obecnych w paliwie jądrowym jest pluton ${}^{239}\text{Pu}$. Pluton nie występuje jednak w przyrodzie. Skąd w reaktorach bierze się izotop ${}^{239}\text{Pu}$? Za jego powstanie w reaktorze odpowiedzialne są dwa procesy - wychwyt neutronu oraz przemiana β^- . Poniższy zapis przedstawia sekwencję procesów, które prowadzą do powstania jąder plutonu ${}^{239}\text{Pu}$. Dla każdego z trzech procesów wybierz n , jeśli jest on pochłonięciem neutronu, lub β , jeśli jest on przemianą β^- .

1	n	/	β
2	n	/	β
3	n	/	β

Ćwiczenie 6



Współczynnik powielenia neutronów wynosi $k = 1,04$. Ile razy zwiększy się liczba neutronów w poszczególnej generacji rozszczepienia? Wynik podaj z dokładnością do trzech cyfr znaczących.

w trzeciej	
w dziesiątej	
w dwusetnej	

Ćwiczenie 7



Współczynnik powielenia neutronów wynosi $k=1,05$. W której generacji rozszczepienia liczba powstających neutronów będzie 1,5 razy wyższa od początkowej liczby neutronów wywołujących reakcję łańcuchową? Wynik podaj, zaokrąglając dokładną wartość do jedności w górę.

Skorzystaj z definicji logarytmu, która mówi, że logarytm przy podstawie a z liczby b równy jest c ($\log_a b = c$), jeśli liczba a podniesiona do potęgi c równa jest b ($a^c = b$).

Odpowiedź:

Ćwiczenie 8



Współczynnik powielenia neutronów wynosi $k=1,04$. W której generacji rozszczepienia liczba powstających neutronów będzie o 1000 razy większa od początkowej liczby neutronów wywołujących reakcję łańcuchową? Wynik podaj, zaokrąglając dokładną wartość do jedności w górę.

Skorzystaj z definicji logarytmu, która mówi, że logarytm przy podstawie a z liczby b równy jest c ($\log_a b = c$), jeśli liczba a podniesiona do potęgi c równa jest b ($a^c = b$).

Odpowiedź:

Dla nauczyciela

Imię i nazwisko autora:	Aleksandra Fijałkowska
Przedmiot:	Fizyka
Temat zajęć:	Warunek zajścia reakcji łańcuchowej
Grupa docelowa:	III etap edukacyjny, liceum, technikum, zakres podstawowy i rozszerzony
Podstawa programowa:	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 rozszerzony Treści nauczania – wymagania szczegółowe I. Wymagania przekrojowe. Uczeń: 15) wyodrębnia zjawisko z kontekstu, nazywa je oraz wskazuje czynniki istotne i nieistotne dla jego przebiegu. XI. Elementy fizyki relatywistycznej i fizyka jądrowa. Uczeń: 9) opisuje reakcję rozszczepienia jądra uranu zachodzącą w wyniku pochłonięcia neutronu; podaje warunki zajścia reakcji łańcuchowej. Zakres rozszerzony Treści nauczania – wymagania szczegółowe I. Wymagania przekrojowe. Uczeń: 19) wyodrębnia zjawisko z kontekstu, nazywa je oraz wskazuje czynniki istotne i nieistotne dla jego przebiegu. XII. Elementy fizyki relatywistycznej i fizyka jądrowa. Uczeń: 15) opisuje reakcję rozszczepienia jądra uranu ^{235}U zachodzącą w wyniku pochłonięcia neutronu; podaje warunki zajścia reakcji łańcuchowej.

Kształtowane kompetencje kluczowe:	Zalecenia Parlamentu Europejskiego i Rady UE z 2018 r. • kompetencje w zakresie rozumienia i tworzenia informacji, • kompetencje matematyczne oraz kompetencje w zakresie nauk przyrodniczych, technologii i inżynierii, • kompetencje osobiste, społeczne i w zakresie umiejętności uczenia się.
Cele operacyjne:	Uczeń: 1. dowiaduje się czym jest reakcja łańcuchowa, 2. dyskutuje problemy, które należy rozwiązać aby przeprowadzić kontrolowaną reakcję łańcuchową, 3. dowiaduje się czym jest oraz jaki jest cel wzbogacania naturalnego uranu w izotop ^{235}U, 4. rozumie postać wykresu przekroju czynnego na indukcję rozszczepienia indukowanego neutronami jądra ^{235}U w funkcji energii neutronów oraz jego implikacje w procesie projektowania reaktorów jądrowych, 5. dowiaduje się czym jest masa krytyczna.
Strategie nauczania:	informacyjna
Metody nauczania:	wykład informacyjny
Formy zajęć:	praca zespołowa
Środki dydaktyczne:	komputer z rzutnikiem
Materiały pomocnicze:	–
PRZEBIEG LEKCJI	
Faza wprowadzająca:	
Nauczyciel przypomina uczniom, czym jest reakcja indukowanego neutronami termicznymi rozszczepienia jądra ^{235}U. Nauczyciel wspomina, że w reakcji zostaje uwolnione ok. 200 MeV energii, czyli ok 50 milionów razy więcej niż w procesie spalania atomu węgla oraz, że następuje emisja neutronów, które w pewnych okolicznościach mogą inicjować kolejne reakcje rozszczepienia.	
Faza realizacyjna:	

Nauczyciel wprowadza pojęcie reakcji łańcuchowej i neutronowego współczynnika mnożenia oraz nadmienia, że reakcja będzie podtrzymana jeśli współczynnik wynosi przynajmniej 1. Nauczyciel omawia warunki uzyskania reakcji łańcuchowej:

1. Wzbogacenie uranu izotopem ^{235}U . Uczniowie zastanawiają się nad możliwością zwiększenia w uranie, jako mieszkanki dwóch izotopów ^{235}U i ^{238}U , lżejszej frakcji, czyli ^{235}U . Po dyskusji nauczyciel omawia metodę wykorzystującą wirówkę.
2. Zmniejszenie energii kinetycznej neutronów. Nauczyciel zwraca uwagę uczniów, że prawdopodobieństwo zajścia reakcji rozszczepiania silnie zależy od energii neutronów. Neutrony emitowane w rozszczepieniu mają zbyt wysoką energię aby efektywnie indukować rozszczepienie. Uczniowie wspólnie zastanawiają się nad możliwością zmniejszenia energii neutronów. Po dyskusji nauczyciel omawia zasadę działania moderatorów neutronów.
3. Nauczyciel omawia pojęcie masy krytycznej.

Faza podsumowująca:

W celu utrwalenia wiedzy uczniowie rozwiązują zadania 1-4 z zestawu ćwiczeń. Nauczyciel ocenia pracę uczniów.

Praca domowa:

Nauczyciel zadaje uczniom zadanie: 6 i 7 z zestawu ćwiczeń oraz zapoznanie się z animacją w celu utrwalenia wiadomości.

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

Multimedium można wykorzystać w fazie wstępnej lekcji.