

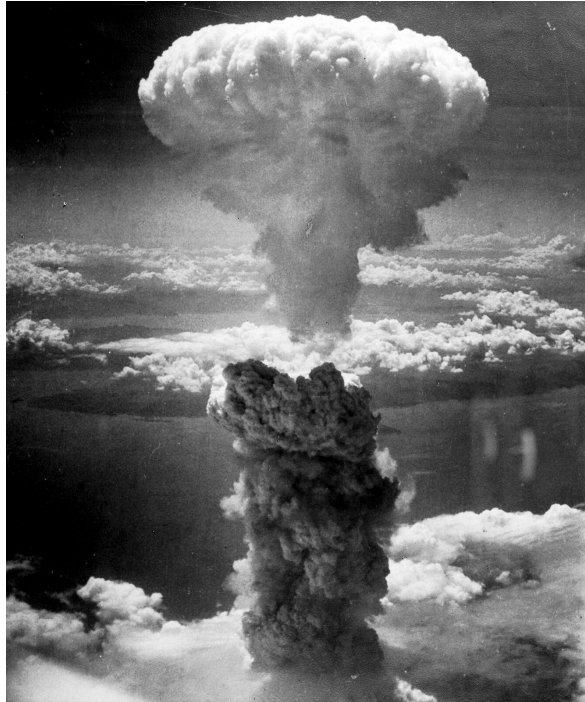
Reakcja łańcuchowa

Elementy zasobu:

1. Starter: ogólny wstęp do tematu, fotografię przedstawiającą eksplozję bomby Fat Man zrzuconej na Nagasaki, odwołanie do wcześniejszej wiedzy ucznia oraz cele lekcji sformułowane w języku ucznia.
2. Zawartość tekstowa: rys historyczny związany z fermionami i badaniami Enrico Fermiego nad promieniotwórczością; analiza przyczyny spowalniania neutronów przez parafinę przez analogię do zderzeń kul bilardowych; określenie rozszczepienia jądra atomowego; film animowany przedstawiający rozszczepienie izotopu uranu U-235 (czas: 1:14 s); analiza rozszczepienia pod kątem deficytu masy i energii wiązania; tabelaryczne zestawienie "Składowe wyzwalonej energii w procesie przemian jądrowych"; zapis reakcji rozpadu jądra uranu i jądra plutonu; określenie reakcji łańcuchowej; film animowany przedstawiający reakcję łańcuchową (czas: 0:26 s); określenie warunków zajścia reakcji łańcuchowej; polecenie dla ucznia.
3. Podsumowanie: siedem sformułowań podsumowujących dotyczących zagadnień: rozszczepienie jądra atomowego, reakcja jądrowa, reakcja łańcuchowa, deficyt masy w reakcji rozszczepienia.
4. Zadania podsumowujące modu: ćwiczenie interaktywne zawierające trzy sformułowania, z których uczeń ma wybrać prawdziwe.
5. Praca domowa: zestaw dwóch poleceń dla ucznia związanych z reakcją rozszczepienia.
6. Słowniczek: fermiony, masa krytyczna, reakcja łańcuchowa, rozszczepienie jądra atomowego
rozszczepienie jądra atomowego
7. Biogramy: Enrico Fermi, Otto Frisch, Otto Hahn, Lise Meitner, Fritz Strassmann

Reakcja łańcuchowa

Podczas reakcji jądrowych emitowane są cząstki. Co się jednak stanie, gdy te cząstki napotkają kolejne jądra? Wtedy te jądra się rozpadną i wyrzucą cząstki, te z kolei zderzą się z innymi jądrami, które również się rozpadną i... tak właśnie powstaje reakcja łańcuchowa.



Do przeprowadzenia niekontrolowanej reakcji łańcuchowej rozszczepienia jąder atomowych nie potrzeba zbyt wiele: wystarczy odpowiednia ilość właściwego materiału. W przypadku bomby Fat Man zrzuconej na Nagasaki, której eksplozja pochłonęła ponad 40 tysięcy istnień ludzkich, był to pluton-239 w ilości zaledwie 6 kg

Źródło: Autor Charles Levy / U.S. Army, dostępny w internecie: <http://commons.wikimedia.org>, domena publiczna.

Przed przystąpieniem do zapoznania się z tematem, należy znać poniższe zagadnienia

- deficyt masy;
- definicja promieniowania jądrowego;
- rodzaje promieniowania jonizującego i jego właściwości;
- aktywność pierwiastka i jej jednostka w układzie SI;
- prawo rozpadu promieniotwórczego;
- definicja reakcji jądrowej;
- zastosowania izotopów promieniotwórczych w przemyśle, medycynie i nauce;
- zależność energii wiązania od liczby nukleonów.

Ich opracowanie znajdziesz materiałach:

- Dlaczego jądro jest trwałe – deficyt masy i energia wiązania,
- Promieniowanie jądrowe α , β i γ ,
- Przemiany jądrowe,

- Reakcje jądrowe,
- Zastosowanie promieniowania jądrowego i energii jądrowej.

Nauczysz się

- opisywać reakcję łańcuchową;
- uzupełniać zapisy reakcji rozszczepienia.

Enrico Fermi, urodzony w 1901 r., był uważany za bardzo zdolnego fizyka. Już w 1926 r. opublikował prace na temat cząstek, które obecnie nazywamy **fermionami** (należą do nich m.in. elektron, proton czy neutron).

W 1934 r. prowadził badania nad sztucznymi pierwiastkami promieniotwórczymi (odkrytymi przez Irenę i Fryderyka Joliot-Curie). Próbował w ten sposób znaleźć odpowiedź na pytanie, czy można zwiększyć promieniotwórczość ciał poprzez naświetlanie ich neutronami (odkrytymi dwa lata wcześniej).

Na drodze strumienia neutronów stawiał różne materiały. Planował użyć ołowiu jako swego rodzaju filtra, ale pewnego dnia wpadł na pomysł, aby między źródłem neutronów a badanym materiałem (srebrna folia) umieścić parafinę zamiast ołowiu. Efekt był zdumiewający: naświetlane srebro zaczęło bardzo intensywnie promieniować.



Schemat doświadczenia Fermiego

Źródło: Gromar Sp. z o. o., licencja: CC BY 3.0.

Stosowanie materiałów wykonanych z innych substancji nie dawało podobnych efektów. Fermi zrozumiał, że kluczowe jest ich spowolnienie, gdyż neutrony są wówczas lepiej pochłaniane przez srebro.

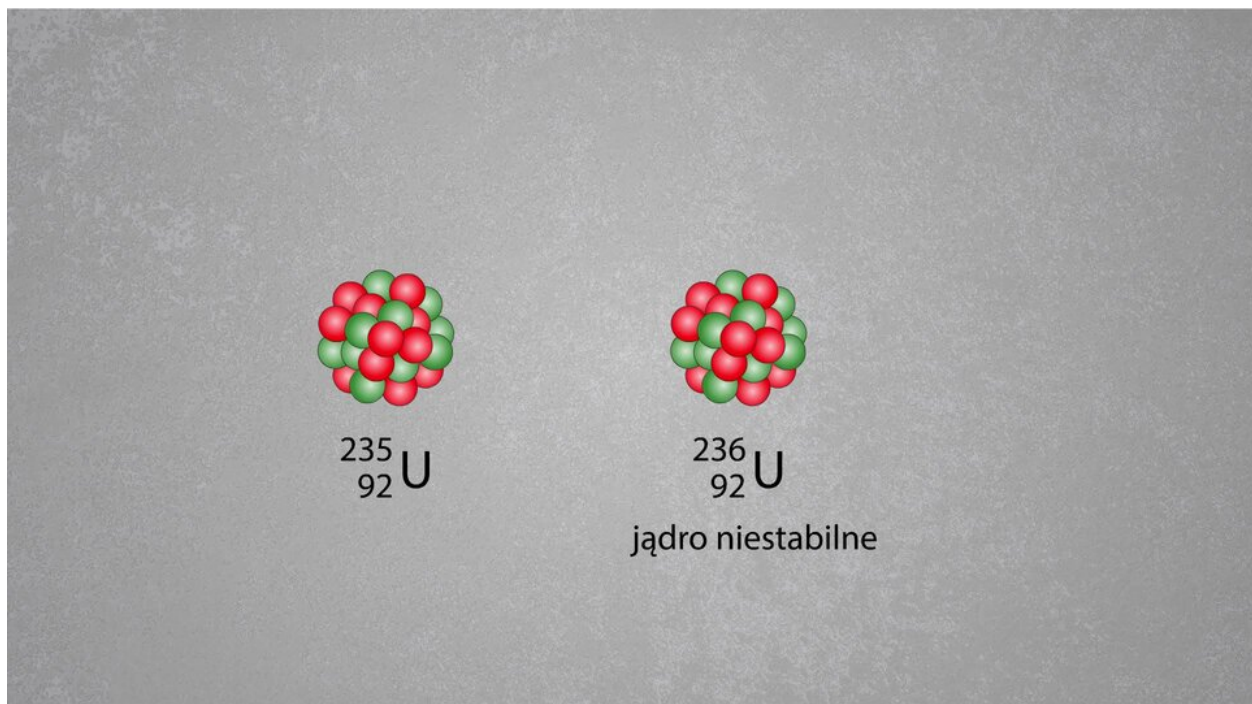
Dlaczego parafina spowalnia przechodzące przez nią neutrony? Posłużmy się analogią do zderzających się kul bilardowych. Kule o jednakowych masach mogą się zderzyć w taki sposób, że jedna z nich się zatrzyma, a druga zostanie wprowadzona w ruch (dzięki przekazanej energii). Jeśli kule znacznie różnią się od siebie pod względem masy (np. piłeczka pingpongowa zderza się z kulą bilardową), istnieje duża szansa na to, że kula o mniejszej masie odbije się od kuli o większej masie i prawie nie zmieni swojej prędkości (a zatem i energii kinetycznej).

Oznacza to, że jeżeli neutron uderza w jądro o małej masie, to strata energii jest duża, a jeżeli uderza w jądro o dużej masie – prawie w ogóle nie traci energii. Parafina, która składa się głównie z węglowodorów, czyli jąder lekkich (węgla i wodoru), w doświadczeniu Fermiego pełniła funkcję spowalniacza neutronów.

Dalsza historia badania zjawiska rozszczepienia jąder ciężkich związana jest z nazwiskami niemieckich i austriackich uczonych, takich jak **Lise Meitner**, **Otto Hahn**, **Fritz Strassmann** i **Otto Frisch**.

W wyniku bombardowania uranu neutronami odkryto atomy baru – pierwiastka, który ma masę atomową dwa razy mniejszą od masy atomowej uranu. Proces ten nazwano **rozszczepieniem jądra atomowego**. Stwierdzono także, że fragmenty rozszczepionego jądra atomu uranu mają bardzo dużą energię.

W 1944 r. Otto Hahn otrzymał za odkrycie rozszczepienia jądra Nagrodę Nobla w dziedzinie chemii. Spodziewano się, że Lise Meitner otrzyma Nagrodę Nobla w dziedzinie fizyki. Tak się jednak nie stało, ale odkryty (a właściwie wyprodukowany) w 1982 r. pierwiastek o liczbie porządkowej 109 został nazwany „meitner”.



Film dostępny pod adresem </preview/resource/R1To7tDETueym>

Rozszczepienie izotopu uranu U-235

Źródło: Tomorrow Sp.z o.o., licencja: CC BY 3.0.

Animacja przedstawiająca rozszczepienie jądra izotopu uranu ($^{92}_{235}\text{U}$).

Analiza wykresu energii wiązania jąder przypadającej na jeden nukleon w różnych pierwiastkach prowadzi do wniosku, że najsilniej związane są nukleony w jądrach żelaza i w jądrach pierwiastków o liczbach masowych zbliżonych do liczby masowej żelaza (nikiel,

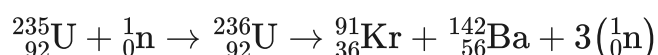
molibden). Właściwa energia wiązania jest mniejsza dla jąder zawierających zarówno więcej, jak i mniej nukleonów.

Jeśli z jednego jądra powstają dwa, mamy do czynienia z większym **deficytem masy na jeden nukleon** w każdym z nowo powstałych jąder. Innymi słowy sumaryczna masa wszystkich produktów rozszczepienia jest mniejsza od masy jądra przed rozszczepieniem. Co się stało z brakującą masą? Zgodnie ze wzorem $E = \Delta mc^2$ została ona zamieniona na energię. Przykładowo: dla jądra o 240 nukleonach energia wiązania przypadająca na jeden nukleon jest większa o ok. 0,8 MeV niż dla jądra o 120 nukleonach. Oznacza to, że podczas rozpadu jądra o 240 nukleonach wydzielili się energia równa ok. 200 MeV (dla porównania energia uzyskana przy rozpadzie cząsteczki trotylu wynosi w przybliżeniu 30 eV). Energia będąca rezultatem reakcji rozszczepienia jądra przybiera głównie postać energii kinetycznej nowo powstałych jąder i neutronów oraz promieniowania gamma.

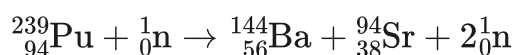
Składowe wyzwanej energii w procesie przemian jądrowych

Składowe wyzwanej energii	Wartość [MeV]
Energia kinetyczna fragmentów rozszczepienia (X i Y)	167
Energia kinetyczna neutronów	5
Energia promieniowania beta	17
Energia promieniowania gamma	7
Razem	196

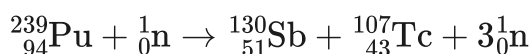
Reakcję rozszczepienia jądra uranu ^{235}U możemy zapisać następująco:



Reakcja rozszczepienia jądra plutonu ^{239}Pu może zachodzić według kilku schematów:

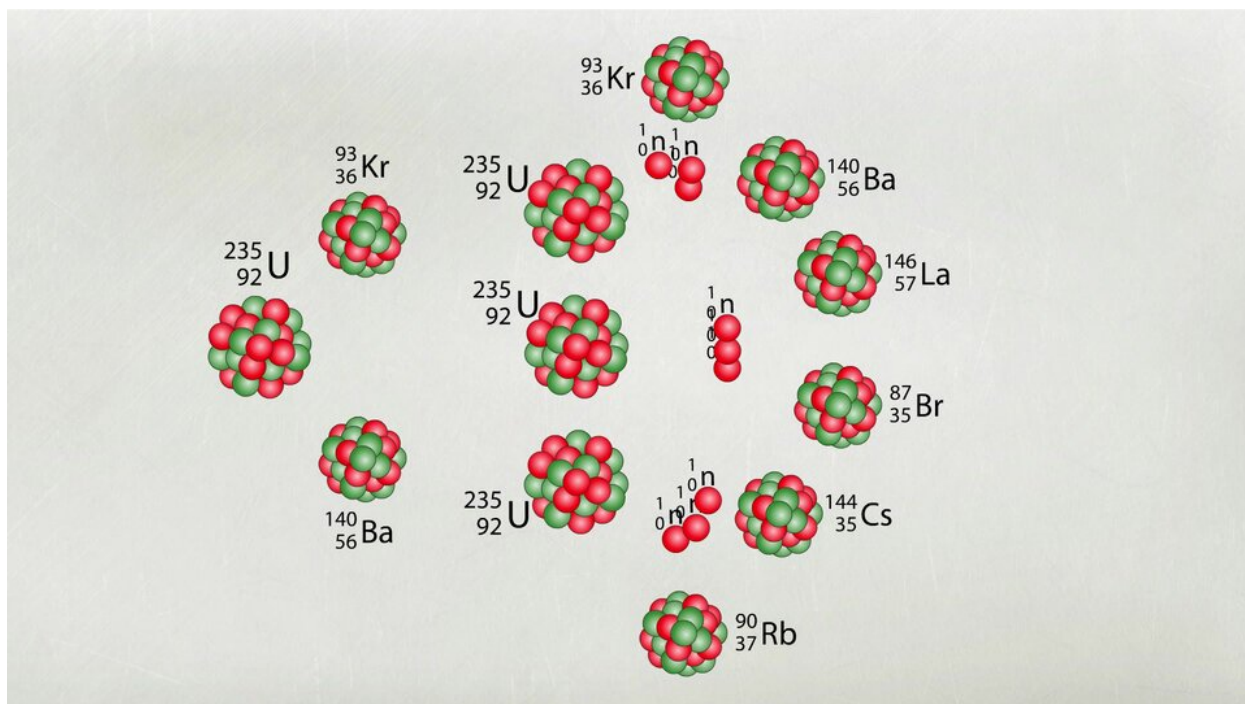


lub



a jego wynikiem mogą być pary zupełnie innych jąder, np. ^{37}Rb i ^{55}Cs lub ^{35}Br i ^{57}La . Jak widać, zazwyczaj jedno z jąder ma większą masę. Podział na części o równych masach zdarza się bardzo rzadko.

Naukowców badających to zjawisko zaskoczyło to, że mogło się ono samo podtrzymywać. Każda reakcja rozpadu wytwarzała kolejne neutrony, które bombardowały sąsiadujące jądra i powodowały kolejne reakcje rozszczepienia. Proces ten trwał, dopóki dostępne były jądra izotopu uranu. Wszystkie opisane tutaj procesy składają się na tzw. **reakcję łańcuchową**.



Film dostępny pod adresem </preview/resource/R1CgOdRiUlgwc>

Reakcja łańcuchowa zachodzi samorzutnie. Na jeden neutron pochłonięty przypada większa od jedności liczba wyrzuconych w procesie rozszczepienia neutronów swobodnych

Źródło: Tomorrow Sp. z o.o., licencja: CC BY 3.0.

Animacja przedstawiająca reakcję łańcuchową.

Aby mogła zajść reakcja łańcuchowa, muszą zostać spełnione pewne warunki. Reakcja ta nie zachodzi w metalicznym uranie, ponieważ izotop ^{235}U stanowi zaledwie 0,7% jego składu, a pozostałe 99,3% to słabo promieniotwórczy izotop ^{238}U , który pochłania neutrony, ale nie prowadzi to do reakcji rozszczepienia. Ponadto masa izotopu ^{235}U musi być wystarczająco duża, by neutrony wywołały reakcję łańcuchową i nie opuściły próbki. Musi zostać przekroczona **masa krytyczna**, powyżej której reakcja łańcuchowa zachodzi samorzutnie.

W bombach atomowych dochodzi do wybuchu, gdy dwie części substancji radioaktywnej zostaną połączone i ich masa sumaryczna przekroczy masę krytyczną. Gwałtownie zachodząca reakcja łańcuchowa wyzwala wówczas ogromne ilości energii. Gdy dwie części substancji są oddalone od siebie, w każdej z nich reakcja rozszczepienia się wygasza.

Polecenie 1

Kiedy na zewnątrz próbki uranu wydobędzie się więcej neutronów: gdy stanowi ona jedną całość czy gdy jest podzielona na dwie równe części? Odpowiedź uzasadnij.



Podsumowanie

- Rozszczepienie jądra atomowego polega na podziale jądra na dwa (rzadziej na trzy) fragmenty – jądra innych pierwiastków lub ich izotopów, w tym co najmniej dwa, dla których liczba masowa $A > 20$. Jest rezultatem pochłonięcia cząstki (najczęściej neutronu) lub promieniowania γ . Rozszczepieniu jądra towarzyszy emisja promieniowania jonizującego.
- Reakcje jądrowe najczęściej zachodzą w wyniku wychwytu neutronów przez jądro. Neutrony nie oddziałują elektrycznie z jądrami izotopów promieniotwórczych (jądra te – jak wszystkie jądra atomowe – mają ładunek dodatni), co upraszcza zaplanowanie i przeprowadzenie reakcji jądrowych.
- Reakcja łańcuchowa zachodzi samorzutnie. W wyniku każdej reakcji rozszczepienia powstają co najmniej dwie cząstki (neutrony), które bombardują sąsiednie jądra atomowe. Cząstki zostają pochłonięte przez jądra, które się rozpadają i wytwarzają następne neutrony. Proces zachodzi lawinowo w całej objętości substancji.
- Reakcji łańcuchowej towarzyszy wydzielanie olbrzymich ilości energii będącej skutkiem deficytu masy. W wyniku reakcji rozszczepienia jądra uranu ${}^{235}_{92}\text{U}$ wydzielą się energia wynosząca ok. 200 MeV.
- Deficyt masy to różnica między masą jądra przed rozpadem, a sumą mas wszystkich nukleonów uzyskanych w wyniku reakcji. W wypadku reakcji rozszczepienia jest dodatni i podlega przemianie w energię (zgodnie ze wzorem $\Delta E = mc^2$).
- Reakcja łańcuchowa nie zachodzi w każdych warunkach. Materiał rozszczepialny musi przekroczyć masę krytyczną.
- Izotop uranu ${}^{238}_{92}\text{U}$ jest metalem o słabych właściwościach promieniotwórczych, ponieważ zawiera tylko 0,7%, niestabilnego uranu ${}^{235}_{92}\text{U}$. Izotop ${}^{235}_{92}\text{U}$ ulega wymuszonemu rozszczepieniu wskutek bombardowania neutronami. Wychwyt neutronów przez izotop ${}^{238}_{92}\text{U}$ nie prowadzi do łańcuchowej reakcji rozszczepienia.

Zadania podsumowujące moduł

Ćwiczenie 1



Oceń, czy poniższe zdania są prawdziwe czy fałszywe. Zaznacz wszystkie zdania prawdziwe.

☐

Neutrony wytworzone w pojedynczym procesie rozszczepienia mogą inicjować kolejne procesy rozszczepienia. Jeśli średnio więcej niż jeden z wytworzonych neutronów zainicjuje nową reakcję, to liczba rozszczepień rośnie lawinowo. Taki proces nazywamy reakcją łańcuchową.

☐

Szczególnym przypadkiem reakcji rozszczepienia jądra jest reakcja łańcuchowa. Jest to reakcja rozszczepienia jądra, która może się rozwijać podobnie jak chemiczne reakcje spalania.

☐

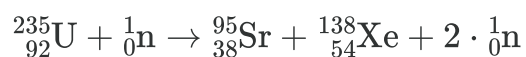
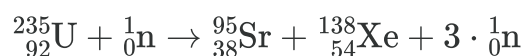
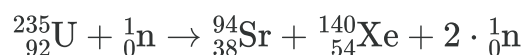
Reakcja rozszczepienia, zachodzi zawsze gdy bombardujemy jądra pierwiastków ciężkich neutronami.

Źródło: ZPE, licencja: CC BY 3.0.

Ćwiczenie 2



Poniżej widzisz schematy reakcji rozszczepienia izotopu uranu ^{235}U . Zaznacz te, które zostały prawidłowo zapisane.

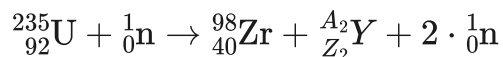
☐☐☐☐

Źródło: GroMar Sp. z o. o., licencja: CC BY-SA 3.0.

Ćwiczenie 3



Izotop uranu $^{235}_{92}\text{U}$, który został poddany bombardowaniu neutronami, rozpadł się zgodnie z poniższym schematem reakcji:

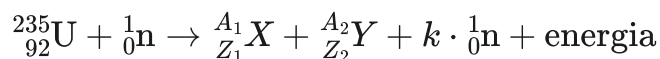


Skorzystaj z układu okresowego pierwiastków i zidentyfikuj pierwiastek Y.

Ćwiczenie 4



Podczas bombardowania neutronami termicznymi jądro izotopu $^{235}_{92}\text{U}$ rozpada się według ogólnego schematu:



przy czym wydzielana energia wynosi ok. 10^{-11} J. Oszacuj ilość uzyskanej energii pochodzącej z rozpadu 10 g izotopu uranu $^{235}_{92}\text{U}$.

Słownik

fermiony

wszystkie cząstki elementarne (elektrony, pozytony, neutrino, lepton μ) o spinie połówkowym, które podlegają statystyce Fermiego-Diraca; w jednym stanie kwantowym mogą znajdować się co najwyżej dwa fermiony.

masa krytyczna

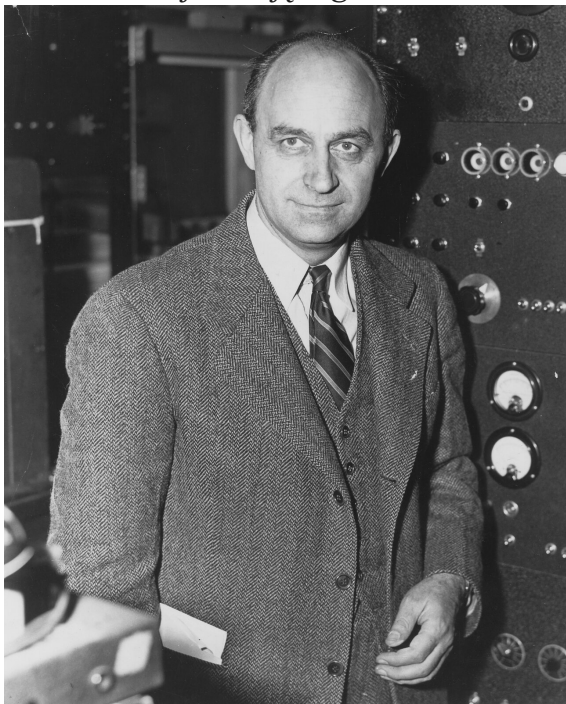
masa próbki **pierwiastka promieniotwórczego**, niezbędna to podtrzymywania **reakcji łańcuchowej**.

reakcja łańcuchowa

reakcja będąca serią kolejnych reakcji rozszczepienia. Każda reakcja rozszczepienia wytwarza co najmniej dwie cząstki (neutrony), które bombardują sąsiednie jądra. Cząstki zostają pochłonięte przez jądra, które się rozpadają i wytwarzają następne neutrony. Proces zachodzi lawinowo w całej objętości substancji; reakcji łańcuchowej towarzyszy wydzielanie olbrzymiej ilości energii. Reakcja łańcuchowa zachodzi samorzutnie.

rozszczepienie jądra atomowego

podział jądra na dwa (rzadziej trzy) fragmenty – jądra innych pierwiastków lub ich izotopów, w tym co najmniej dwa, dla których liczba masowa $A > 20$. Jest rezultatem pochłonięcia cząsteczki (najczęściej neutronu) lub promieniowania γ ; rozszczepieniu towarzyszy emisja promieniowania jonizującego.



Enrico Fermi

Źródło: Department of Energy. Office of Public Affairs, dostępny w internecie: <https://commons.wikimedia.org>, domena publiczna.

Enrico Fermi

1901.09.29 Rzym – 1954.11.28 Chicago

[enriko fermi] Jeden z najbardziej uzdolnionych fizyków wszech czasów. Jako pierwszy skonstruował reaktor jądrowy. Brał czynny udział w pracach nad bombą atomową (projekt Manhattan). Wniósł nieoceniony wkład do fizyki teoretycznej – stworzył statystykę kwantową dla cząstek o spinie połówkowym (statystyka Fermiego-Diraca).



Otto Frisch

Źródło: Los Alamos National Laboratory, dostępny w internecie: <https://commons.wikimedia.org>, domena publiczna.

Otto Frisch

1904.10.1 Wiedeń – 1979.09.22 Cambridge

[ato frysz] Fizyk urodzony w Austrii, który swoje prace prowadził na terenie Wielkiej Brytanii. Otto Frisch razem ze swoją ciotką Lise Meitner opisał teoretycznie reakcję rozszczepienia jądra uranu.



Otto Hahn

Źródło: Nobel foundation, dostępny w internecie: <http://commons.wikimedia.org>, domena publiczna.

Otto Hahn

1879.03.8 Frankfurt nad Menem – 1968.07.28 Getynga

[ato han] Niemiecki fizyk, chemik, współodkrywca reakcji rozszczepienia jądra uranu, za co w 1944 r. został uhonorowany Nagrodą Nobla w dziedzinie chemii. Odkrywca zjawiska izomerii jąder atomu oraz izotopów ^{228}Ra , ^{228}Ac , ^{228}Th i proaktynu.



Lise Meitner

Źródło: N.N., dostępny w internecie: <http://commons.wikimedia.org>, domena publiczna.

Lise Meitner

1878.11.7 Wiedeń – 1968.10.27 Cambridge

[liz majtna] Współpracowniczka Ottona Hahna, uważanego za prekursora technologii jądrowej. Meitner i Hahne wspólnie odkryli zjawisko odrzutu promieniotwórczego i trwały izotop proaktynu. Ze względu na swoje żydowskie pochodzenie Meitner musiała opuścić Niemcy. W Szwecji prowadziła badania w Instytucie Nobla, a następnie na Uniwersytecie Technicznym w Sztokholmie. Pod koniec życia przeprowadziła się do Wielkiej Brytanii, gdzie zamieszkała razem ze swoim siostrzeńcem Otto Frischem.



Fritz Strassmann

Źródło: Tomorrow Sp.z o.o., licencja: CC BY 3.0.

Fritz Strassmann

1902.02.22 Boppard (powiat Rhein-Hunsrück) w Niemczech – 1980.04.22 Moguncja

[fryc sztrasman] Niemiecki chemik, który razem z Otto Hahnem odkrył zjawisko rozszczepienia jądra uranu, za co w 1944 r. obaj badacze otrzymali wspólnie Nagrodę Nobla. Prowadził także prace nad praktycznym wykorzystaniem promieniotwórczości, m.in. do określania wieku tworów geologicznych.