

Zasada zachowania energii w reakcjach jądrowych.

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



Zasada zachowania energii w reakcjach jądrowych.

Czy to nie ciekawe?

W niektórych reakcjach jądrowych zderzenie dwóch cząstek powoduje wyzwolenie się części energii zmagazynowanej w postaci ich energii spoczynkowej. Dzieje się tak na przykład w reakcjach termojądrowych na Słońcu. W innych przypadkach, aby reakcja mogła w ogóle zajść, musimy dostarczyć pewną ilość energii. O tym, czy reakcja wymaga dostarczenia energii, czy też może być jej źródłem, mówi nam wielkość zwana ciepłem reakcji. Ciepło reakcji jest jedną z podstawowych wielkości służących do opisu reakcji jądrowych. W tym e-materiale dowiesz się, jak definiujemy ciepło reakcji i w jaki sposób je wyznaczamy, korzystając z prawa zachowania energii.

Twoje cele

W tym e-materiale:

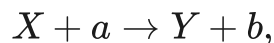
- dowiesz się, jak definiujemy ciepło reakcji jądrowej,

- poznasz różne sposoby obliczania ciepła reakcji,
- zrozumiesz, czym są reakcje endoenergetyczne i egzoenergetyczne,
- oszacujesz ciepła reakcji różnych procesów,
- zrozumiesz, jak stosować zasadę zachowania energii w reakcjach jądrowych.

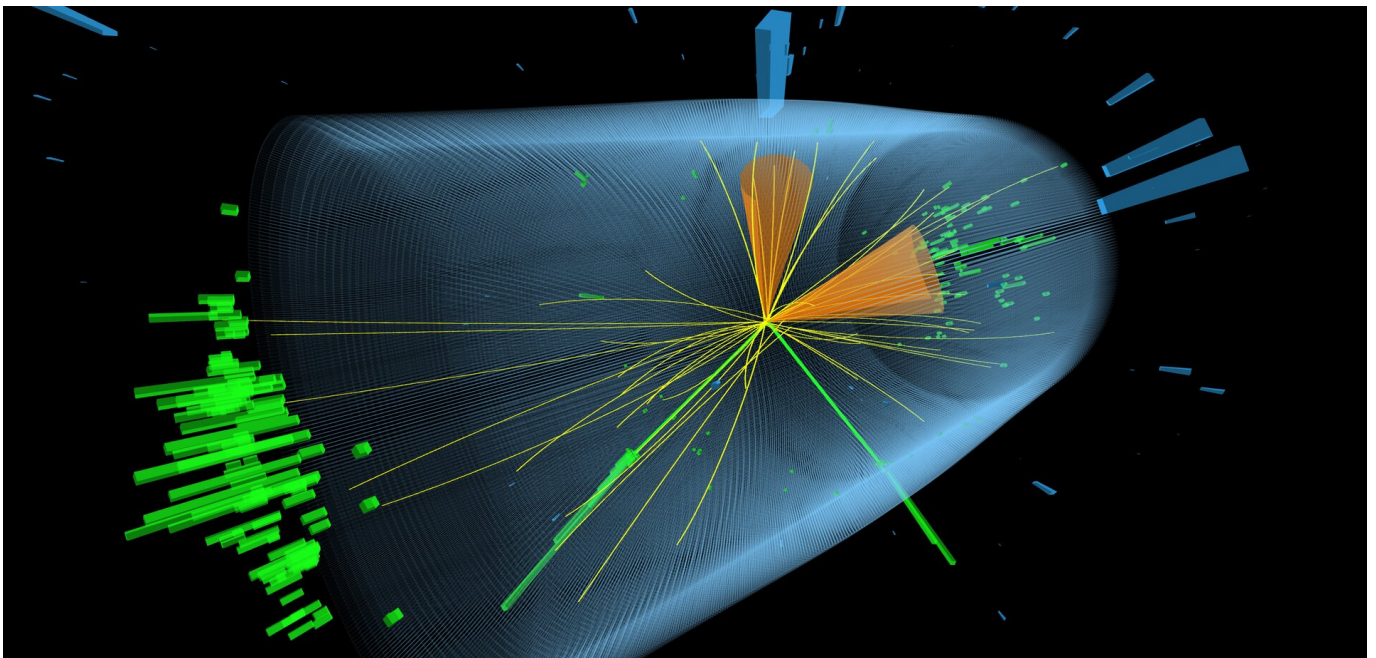
Przeczytaj

Warto przeczytać

W każdej reakcji jądrowej zawsze obowiązują zasady zachowania energii, pędu i momentu pędu oraz zasada zachowania ładunku elektrycznego i całkowitej liczby [nukleonów](#). Rozpatrzmy reakcję typu



gdzie X to tzw. **jądro początkowe**, które w wyniku zderzenia z cząstką a wywołującą reakcję ulega przemianie w **jądro końcowe** Y , emitując przy tym cząstkę b . Cząstki a oraz b mogą być neutronami (n), fotonami (γ), [lekkimi cząstkami naładowanymi](#), takimi jak proton (p), czy cząstka alfa (α), lub [ciężkimi jonami](#), czyli jonami pierwiastków cięższych od helu. Dla uproszczenia wszystkie obiekty biorące udział lub powstające w reakcji, w tym jądra atomowe, będziemy w tych e-materiałach nazywać cząstkami.



Rys. 1. Symulacja zderzenia cząstek w akceleratorze.

Źródło: CERN.

Zasada zachowania energii w reakcjach jądrowych wymaga, aby całkowita energia w [kanale wejściowym reakcji](#) była taka sama, jak w [kanale wyjściowym reakcji](#), co

możemy zapisać jako

$$E_X + E_a \rightarrow E_Y + E_b,$$

gdzie dolny indeks informuje nas o energii E której cząstki chodzi (dla uproszczenia zapisu i zachowania ogólności naszych rozważań, tam, gdzie będzie to możliwe, będziemy pomijać dolne indeksy). W powyższym równaniu energia E to **energia całkowita** danego obiektu, czyli suma energii kinetycznej i energii spoczynkowej. Oznaczmy energię kinetyczną przez T . Energia spoczynkowa dowolnej cząstki, zgodnie ze wzorem Einsteina, jest równa iloczynowi jego masy spoczynkowej m i kwadratu prędkości światła c^2 . Należy mieć jednak na uwadze, że cząstki Y i b mogą zostać utworzone w stanach wzbudzonych. Fakt, że dana cząstka znajduje się w stanie wzbudzonym, oznacza się poprzez dodanie gwiazdki do jej symbolu, pisząc Y^* lub b^* . Masa cząstki w stanie wzbudzonym jest większa od jej masy w stanie podstawowym, co jest konsekwencją posiadania przez cząstkę pewnej dodatkowej wewnętrznej energii zwanej **energią wzbudzenia**. Możemy zatem zapisać, że energia całkowita danej cząstki to

$$E = T + mc^2,$$

gdzie masa m uwzględnia energię wzbudzenia cząstki, jeżeli taka występuje.

Przepiszmy zasadę zachowania energii, zapisując jawnie energię całkowitą danego obiektu jako sumę jego energii kinetycznej i energii spoczynkowej. Wykonując odpowiednie podstawienia, otrzymujemy

$$T_X + m_X c^2 + T_a + m_a c^2 = T_Y + m_Y c^2 + T_b + m_b c^2.$$

Przenosząc energie spoczynkowe na lewą stronę równania, a energie kinetyczne na prawą stronę równania otrzymujemy

$$m_X c^2 + m_a c^2 - m_Y c^2 - m_b c^2 = T_Y + T_b - T_X - T_a$$

Różnicę energii spoczynkowych cząstek w kanale wejściowym, $(m_X + m_a) \cdot c^2$, i w kanale wyjściowym, $(m_Y + m_b) \cdot c^2$, nazywamy **cieplem reakcji**

$$Q = (m_X + m_a) \cdot c^2 - (m_Y + m_b) \cdot c^2.$$

W warunkach laboratoryjnych możemy ustalić energię kinetyczną T_a padającej cząstki a na przykład przyspieszając ją w akceleratorze. Przyspieszone cząstki uderzają

zazwyczaj w tarczę wykonaną z odpowiedniego materiału, w skład którego wchodzi atomy zawierające w sobie jądra X . Możemy zatem przyjąć, że jądro początkowe spoczywa w układzie laboratoryjnym i nie posiada energii kinetycznej. W dalszych rozważaniach założymy, że energia kinetyczna jądra tarczy T_X wynosi zero. Możemy zatem zapisać, że

$$Q = T_Y + T_b - T_a.$$

Suma energii kinetycznych produktów reakcji, $T_Y + T_b$, nie może być ujemna, zatem, aby reakcja mogła zajść, musi być spełniony warunek $Q + T_a > 0$. Warunek ten jest warunkiem koniecznym, jednak nie wystarczającym, aby zaszła reakcja, zwłaszcza gdy padająca cząstka posiada ładunek dodatni (przypadek ten omówimy pod koniec tego e-materiału). Poza zasadą zachowania energii, zasadą zachowania ładunku i liczby nukleonów, w reakcjach jądrowych obowiązuje również zasada zachowania pędu i momentu pędu, która określa nam kinematykę reakcji i nakłada dodatkowe warunki, które muszą być spełnione. Więcej na ten temat można przeczytać w e-materiale „Zasada zachowania pędu i momentu pędu w reakcjach jądrowych”.

Ciepło reakcji Q może być dodatnie lub ujemne. Gdy $Q > 0$ mówimy, że reakcja jest **egzoenergetyczna** (lub **egzotermiczna**), gdy $Q < 0$ mówimy, że reakcja jest **endoenergetyczna** (**endotermiczna**). Dodatnie ciepło reakcji oznacza, że suma energii kinetycznych produktów reakcji jest większa od energii kinetycznej padającej cząstki. W reakcjach egzoenergetycznych jest zatem wydzielana energia – przemiana cząstek X i a w cząstki Y i b skutkuje uwolnieniem części energii zmagazynowanej w postaci energii spoczynkowej. W przypadku reakcji endoenergetycznych część dostępnej energii kinetycznej jest zużywana na przemianę lub wzbudzenie cząstek, czego efektem jest wzrost masy układu. W rezultacie całkowita energia kinetyczna produktów reakcji jest mniejsza niż energia kinetyczna pocisku. Ciepło reakcji $Q = 0$ tylko w przypadku elastycznego rozpraszania, gdy nie występuje przemiana cząstek biorących udział w reakcji w inne oraz cząstki te nie ulegają wzbudzeniu. W tego typu procesach suma energii kinetycznych cząstek w kanale wyjściowym jest równa energii kinetycznej cząstki-pocisku.

W powyższych rozważaniach założyliśmy, że mamy do czynienia z **reakcją dwuciałową**, czyli reakcją z dwiema cząstkami w kanale wyjściowym. Przedstawione wzory łatwo jednak uogólnić na **reakcje wielociałowe**, czyli z wieloma produktami, lub

reakcje kompletnej fuzji, prowadzące do powstania tylko jednego obiektu, będącego wynikiem połączenia się jądra początkowego z padającą cząstką. Należy jednak pamiętać, że niezależnie od liczby produktów reakcji, ciepło reakcji jest zawsze liczone jako różnica energii spoczynkowych cząstek w kanale wejściowym i w kanale wyjściowym. Ciepło reakcji można również wyznaczyć mierząc różnicę pomiędzy sumaryczną energią kinetyczną produktów reakcji i energią kinetyczną padającej cząstki lub jako różnicę sumy energii wiązań produktów i sumy energii wiązań substratów (metoda ta jest omówiona w samouczku).

Dla przykładu obliczmy ciepło reakcji dla przyłączenia neutronu do jądra kobaltu ^{59}Co . Kobalt-59 jest jedynym stabilnym izotopem tego pierwiastka. Dodatkowo, jest to jedyny izotop występujący naturalnie. Naświetlając próbkę kobaltu ^{59}Co strumieniem neutronów pochodzących z reaktora jądrowego można otrzymać promieniotwórczy izotop ^{60}Co , który ma szerokie zastosowanie w przemyśle i medycynie. Izotop ten służy na przykład do radiacyjnego utrwalania żywności oraz jest wykorzystywany w radioterapii. Przyjmijmy, że masa spoczynkowa neutronu $m_n = 939,6 \frac{\text{MeV}}{c^2}$, a masy spoczynkowe izotopów kobaltu ^{59}Co i ^{60}Co wynoszą kolejno $m_{^{59}\text{Co}} = 54895,9 \frac{\text{MeV}}{c^2}$ oraz $m_{^{60}\text{Co}} = 55828,0 \frac{\text{MeV}}{c^2}$. Ciepło reakcji obliczamy ze wzoru: $Q = (m_{^{59}\text{Co}} + m_n) \cdot c^2 - m_{^{60}\text{Co}} \cdot c^2 = 939,6 \text{ MeV} + 54895,9 \text{ MeV} - 55828,0 \text{ MeV} = 7,5 \text{ MeV}$. Zatem przyłączenie neutronu do jądra kobaltu-59 jest reakcją egzoenergetyczną, w której wyzwalane jest 7,5 MeV. Energia ta jest uwalniana w postaci promieniowania gamma i energii kinetycznej jądra kobaltu-60. Przyłączenie neutronu do dowolnego jądra atomowego jest zawsze reakcją egzoenergetyczną, w której uwolniona energia jest równa energii wiązania neutronu w jądrze końcowym. Więcej na temat energii wiązania i energii potrzebnej do oderwania neutronu od jądra atomowego możesz przeczytać w e-materiale „Jak obliczyć energię wiązania dla dowolnego izotopu?”.

Aby reakcja jądrowa mogła zajść, cząstki X i a muszą znaleźć się w zasięgu działania sił jądrowych. Neutron nie posiada ładunku elektrycznego i oddziałuje z jądrem atomowym jedynie poprzez oddziaływania jądrowe. Nawet neutrony o bardzo małych energiach kinetycznych (rzędu pojedynczych meV, czyli milielektronowoltów) mogą zbliżyć się do jądra dostatecznie blisko. Jeżeli padająca cząstka jest naładowana dodatnio, zbliżenie jej na odpowiednią odległość będzie wymagało przewyciężenia występującego między jądrem i cząstką odpychającego oddziaływania kulombowskiego. W miarę zbliżania się padającej cząstki do jądra atomowego, jej

energia kinetyczna maleje, a wzrasta jej energia potencjalna. Jeżeli energia kinetyczna cząstki jest niewystarczająca do tego, aby dostatecznie zbliżyć się do jądra, nie dochodzi do reakcji jądrowej, a tor lotu padającej cząstki ulega zmianie (jak to ma miejsce w reakcjach elastycznego rozpraszania). Na przykład, w zderzeniach centralnych padająca cząstka o zbyt małej energii zostaje wyhamowana i w wyniku odpychającego oddziaływania zaczyna poruszać się w kierunku, z którego nadlatywała. Reakcja pomiędzy padającą cząstką naładowaną dodatnio i jądrem atomowym jest możliwa, gdy energia kinetyczna padającej cząstki jest większa od pewnej energii potencjalnej zwanej **kulombowską barierą potencjału**. Jednak nawet gdy energia kinetyczna padającej cząstki jest poniżej bariery kulombowskiej, istnieje pewne prawdopodobieństwo zajścia reakcji w wyniku kwantowego [zjawiska tunelowania](#).

Słowniczek

nukleony

(*ang.: nucleons*) składniki jąder atomowych, wspólna nazwa dla protonów i neutronów.

lekke cząstki naładowane

(*ang.: light charged particles*) protony, jądra deuteru, jądra trytu i cząstki alfa. Ogólnie jądra lekkich pierwiastków o liczbach atomowych $Z < 3$.

kanał wejściowy reakcji

(*ang.: substrates*) inaczej substraty reakcji jądrowej.

kanał wyjściowy reakcji

(*ang.: products*) inaczej produkty reakcji jądrowej.

ciężkie jony

(*ang.: heavy ions*) jony pierwiastków cięższych od helu.

$$1 \frac{MeV}{c^2}$$

(czyt. megaelektronowolt na c^2 , gdzie c oznacza prędkość światła w próżni).
Jednostka masy używana w fizyce subatomowej równa $1,783 \cdot 10^{-30}$ kg.

1 fm

(czyt. femtometr) jednostka długości równa 10^{-15} m.

zjawisko tunelowe

(*ang.: quantum tunnelling*) sprzeczne z przewidywaniami mechaniki klasycznej zjawisko, polegające na przejściu cząstek przez barierę potencjału, której energia jest większa od energii cząstek.

Film samouczek

Zasada zachowania energii w reakcjach jądrowych

Film pokazuje, jak obliczyć ciepło reakcji Q stosując zamiast energii spoczynkowych energie wiązań substratów i produktów reakcji jądrowej.

Wystąpił błąd

$$\begin{aligned} Q &= (m_x + m_a) \cdot c^2 - (m_y + m_b) \cdot c^2 = \\ &= m_x \cdot c^2 + m_a \cdot c^2 - m_y \cdot c^2 - m_b \cdot c^2 = \\ &= Z_x m_p \cdot c^2 + (A_x - Z_x) m_n \cdot c^2 - B_x + Z_a m_p \cdot c^2 + (A_a - Z_a) m_n \cdot c^2 - B_a - Z_y m_p \cdot c^2 \\ &\quad - (A_y - Z_y) m_n \cdot c^2 + B_y - Z_b m_p \cdot c^2 - (A_b - Z_b) m_n \cdot c^2 + B_b = \\ &= (\cancel{Z_x} + \cancel{Z_a} - \cancel{Z_y} - \cancel{Z_b}) \cdot m_p \cdot c^2 + (\cancel{A_x} - \cancel{Z_x} + \cancel{A_a} - \cancel{Z_a} - \cancel{A_y} + \cancel{Z_y} - \cancel{A_b} + \cancel{Z_b}) \cdot m_n \cdot c^2 - \\ &\quad B_x - B_a + B_y + B_b \end{aligned}$$

$Z_x + Z_a = Z_y + Z_b$ Zasada zachowania ładunku elektrycznego
 $A_x + A_a = A_y + A_b$ Zasada zachowania całkowitej liczby nukleonów

Film dostępny pod adresem </preview/resource/R3KldcvXk6wQh>

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

Zapoznaj się z audiodeskrypcją samouczka.

Polecenie 1

Oblicz ciepło reakcji Q dla zderzenia jądra litu- ${}^6_3\text{Li}$ z jądrem deuteru ${}^2_1\text{H}$, w wyniku którego powstają dwa jądra helu- ${}^4_2\text{He}$. Schemat tej reakcji możemy zapisać jako ${}^6_3\text{Li} + {}^2_1\text{H} \rightarrow {}^4_2\text{He} + {}^4_2\text{He}$. Przyjmij, że energia wiązania jądra litu-6 $B_{6\text{Li}} = 32,00$ MeV, energia wiązania deuteru $B_{2\text{H}} = 2,22$ MeV, a energia wiązania jądra helu-4 $B_{4\text{He}} = 28,30$ MeV. Wynik podaj z dokładnością do czterech cyfr znaczących.

Polecenie 2

W wyniku wychwytu neutronu n przez jądro kobaltu-59 (^{59}Co) powstaje jądro kobaltu-60 (^{60}Co). Energia wiązania jądra kobaltu-59 $B_{^{59}\text{Co}} = 517,3$ MeV, natomiast energia wiązania jądra kobaltu-60 $B_{^{60}\text{Co}} = 524,8$ MeV. Oblicz ciepło reakcji Q tego procesu. Wynik podaj z dokładnością do dwóch cyfr znaczących.

Sprawdź się

Pokaż ćwiczenia:   

Ćwiczenie 1



Ćwiczenie 2



Ćwiczenie 3



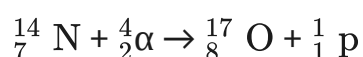
Ćwiczenie 4



Ćwiczenie 5



Pierwszą reakcją jądrową w warunkach laboratoryjnych przeprowadził w 1919 roku Ernest Rutherford, noblista i odkrywca jądra atomowego. Rutherford bombardował jądra azotu-14 ${}^14_7\text{N}$ cząstkami alfa pochodzącymi ze źródła promieniotwórczego i odkrył, że w wyniku zderzenia tych dwóch obiektów emitowany jest proton oraz powstaje jądro tlenu-17 ${}^{17}_8\text{O}$. Schemat reakcji przeprowadzonej przez Rutherforda można zapisać jako:



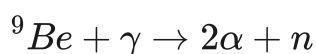
Oblicz ciepło reakcji Q tego procesu. Masy cząstek biorących udział w reakcji podane są w tabeli. Wynik podaj z dokładnością do dwóch cyfr znaczących.

Obiekt	Symbol	Masa ($\frac{MeV}{c^2}$)
Proton	${}^1_1\text{p}$	938,3
cząstka alfa	${}^4_2\alpha$	3727,4
azot-14	${}^{14}_7\text{N}$	13040,2
tlen-17	${}^{17}_8\text{O}$	15830,5

Ćwiczenie 6



Jądro berylu-9 ${}^9\text{Be}$ w wyniku pochłonięcia kwantu gamma rozpada się na dwie cząstki alfa oraz neutron zgodnie ze schematem:

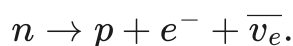


Oblicz ciepło reakcji Q tego procesu. Przyjmij, że masa jądra berylu-9 $m_{{}^9\text{Be}} = 8392,8 \frac{\text{MeV}}{c^2}$, masa cząstki alfa $m_\alpha = 3727,4 \frac{\text{MeV}}{c^2}$, masa neutronu $m_n = 939,6 \frac{\text{MeV}}{c^2}$, a kwant gamma jest cząstką bezmasową. Wynik podaj z dokładnością do dwóch cyfr znaczących.

Ćwiczenie 7



Poza jądrem atomowym neutron n jest cząstką niestabilną i średnio po około 15 minutach ulega przemianie na proton p , elektron e^- oraz antyneutrino elektronowe $\bar{\nu}_e$. Schemat rozpadu neutronu możemy zapisać jako:



Oblicz ciepło reakcji Q tego procesu. Ciepło reakcji spontanicznych przemian promieniotwórczych oblicza się jako różnicę pomiędzy energią spoczynkową cząstki lub jądra ulegających przemianie i sumą energii spoczynkowych produktów przemiany. Przyjmij, że masa neutronu $m_n = 939,565 \frac{\text{MeV}}{c^2}$, masa protonu $m_p = 938,272 \frac{\text{MeV}}{c^2}$, masa elektronu $m_e = 0,511 \frac{\text{MeV}}{c^2}$, a neutrino jest cząstką bezmasową. Wynik podaj z dokładnością do trzech cyfr znaczących.

Ćwiczenie 8



Energia potencjalna ładunku q znajdującego się w odległości r od ładunku Q wytwarzającego centralne pole elektryczne dana jest wzorem:

$$E_p = k \frac{q \cdot Q}{r},$$

gdzie stała $k = 9 \cdot 10^9 \text{ N} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{C}^{-2}$

Rozpatrzmy reakcję, w której cienka tarcza wykonana ze złota ${}_{79}^{197}\text{Au}$ jest bombardowana cząstkami alfa ${}^4_2\alpha$. Oszacuj jaką energię powinna mieć nadlatująca cząstka alfa, aby mogła znaleźć się w zasięgu działania sił jądrowych, czyli w odległości około 8,5 fm od środka jądra złota. Wynik podaj w megaelektronowoltach (MeV). W obliczeniach przyjmij, że ładunek elementarny $e = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C}$, $1 \text{ fm} = 10^{-15} \text{ m}$, $1 \text{ MeV} = 1,6 \cdot 10^{-13} \text{ J}$. Wynik podaj z dokładnością do dwóch cyfr znaczących.

Ćwiczenie 9



Ćwiczenie 10



Dla nauczyciela

Scenariusz lekcji:

Imię i nazwisko autora:	Tomasz Cap
Przedmiot:	Fizyka
Temat zajęć:	Zasada zachowania energii w reakcjach jądrowych i ciepło reakcji
Grupa docelowa:	III etap edukacyjny, liceum, technikum, zakres rozszerzony
Podstawa programowa:	<p>Cele kształcenia – wymagania ogólne</p> <p>II. Rozwiązywanie problemów z wykorzystaniem praw i zależności fizycznych.</p> <p>Zakres rozszerzony</p> <p>Treści nauczania – wymagania szczegółowe</p> <p>I. Wymagania przekrojowe. Uczeń:</p> <p>4) przeprowadza obliczenia liczbowe posługując się kalkulatorem;</p> <p>19) wyodrębnia zjawisko z kontekstu, nazywa je oraz wskazuje czynniki istotne i nieistotne dla jego przebiegu.</p> <p>XII. Elementy fizyki relatywistycznej i fizyka jądrowa. Uczeń:</p> <p>7) stosuje zasadę zachowania energii do opisu reakcji jądrowych; posługuje się pojęciem energii wiązania.</p>

<p>Kształtowane kompetencje kluczowe:</p>	<p>Zalecenia Parlamentu Europejskiego i Rady UE z 2018 r.</p> <ul style="list-style-type: none"> • kompetencje w zakresie rozumienia i tworzenia informacji, • kompetencje matematyczne oraz kompetencje w zakresie nauk przyrodniczych, technologii i inżynierii, • kompetencje cyfrowe, • kompetencje osobiste, społeczne i w zakresie umiejętności uczenia się.
<p>Cele operacyjne:</p>	<p>Uczeń:</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. podaje definicję ciepła reakcji, 2. stosuje zasadę zachowania energii do opisu reakcji jądrowych, 3. wskazuje, czy reakcja jest endoenergetyczna, czy egzoenergetyczna, 4. wyznacza ciepło reakcji dla rozpadu neutronu.
<p>Strategie nauczania:</p>	<p>blended - learning</p>
<p>Metody nauczania:</p>	<p>wykład informacyjny, rozwiązywanie zadań rachunkowych</p>
<p>Formy zajęć:</p>	<p>praca indywidualna, praca w parach</p>
<p>Środki dydaktyczne:</p>	<p>rzutnik lub ekran do wyświetlania multimedium</p>
<p>Materiały pomocnicze:</p>	<p>-</p>
<p>PRZEBIEG LEKCJI</p>	
<p>Faza wprowadzająca:</p>	

Nauczyciel przypomina definicję reakcji jądrowej i wykorzystując przykładowy schemat reakcji wprowadza pojęcia substratów, produktów, kanału wejściowego, kanału wyjściowego itd. Wygodnie jest się posłużyć w tym miejscu konkretną reakcją, np. reakcją przeprowadzoną przez Rutherforda omówioną w zadaniu 5 z zestawu ćwiczeń. Nauczyciel następnie omawia zasadę zachowania ładunku elektrycznego i całkowitej liczby nukleonów w reakcjach jądrowych i zapisuje zasadę zachowania energii. Przy omawianiu zasady zachowania energii nauczyciel pokazuje, że energia całkowita danej cząstki składa się z dwóch komponentów: energii kinetycznej oraz energii spoczynkowej, zależnej od masy cząstki. Następnie zostaje wprowadzone pojęcie energii wzbudzenia i zostają omówione konsekwencje posiadania przez cząstkę pewnej nadwyżki energii ponad energię jej stanu podstawowego (takie jak np. zwiększenie masy cząstki). Nauczyciel wyprowadza wzór na ciepło reakcji i go omawia.

Faza realizacyjna:

Nauczyciel prosi uczniów o wyznaczenie ciepła reakcji dla reakcji przeprowadzonej przez Rutherforda (zadanie 5 z zestawu ćwiczeń), a następnie prosi uczniów o policzenie ciepła reakcji dla fuzji dwóch jąder deuteru (zadanie 4 z zestawu ćwiczeń). Ciepło reakcji w zadaniu 5 wychodzi ujemne, a w zadaniu 4 dodatnie. Nauczyciel aktywizuje uczniów do dyskusji dotyczącej interpretacji tych wyników. Nauczyciel nawiązuje do faktu, że ciepło reakcji można również wyznaczyć jako różnicę pomiędzy sumą energii kinetycznych produktów i sumą energii kinetycznych substratów reakcji. W rezultacie dyskusji wprowadzone i omówione zostają pojęcia reakcji egzoenergetycznej i reakcji endoenergetycznej. Nauczyciel podkreśla, że dodatnie ciepło reakcji nie gwarantuje zajścia procesu, tak samo, jak dostarczenie energii powyżej niezbędnej ilości w przypadku reakcji endoenergetycznych. Nauczyciel mówi uczniom, że większość reakcji posiada pewien próg energetyczny, dopiero po przekroczeniu którego proces ma realne szanse zajść. Nauczyciel podaje jako przykład bombardowanie cząstkami alfa cienkiej folii złota i wyjaśnia, że do kontaktu jąder pocisku i tarczy może dojść tylko, gdy energia padającej cząstki przewyższy barierę energetyczną będącą wynikiem odpychania kulombowskiego pomiędzy dodatnio naładowanymi jądrami atomowymi (nauczyciel może posłużyć się obliczeniami i wynikami z rozwiązania zadania 8 z zestawu ćwiczeń).

Nauczyciel pokazuje, w jaki sposób można uogólnić wzór na ciepło reakcji, aby można było wyznaczyć ciepło reakcji dla procesów wielociałowych. Nauczyciel następnie prosi uczniów o rozwiązanie zadania 6 z zestawu ćwiczeń (reakcja z trzema cząstkami w kanale wyjściowym).

Nauczyciel prosi uczniów o przypomnienie definicji masy jądra atomowego, pojęcia deficytu masy oraz pojęcia energii wiązania. Nauczyciel pokazuje, w jaki sposób policzyć ciepło reakcji korzystając z energii wiązań zamiast z mas spoczynkowych jąder atomowych.

Uczniowie oglądają film samouczek i rozwiązują 1 zadanie aktywizujące.

Faza podsumowująca:

Nauczyciel zapisuje trzy metody wyznaczania ciepła reakcji. Następnie omawia na przykładzie zadania 7 z zestawu ćwiczeń (rozpad swobodnego neutronu), w jaki sposób wyznacza się ciepło reakcji dla spontanicznych przemian jądrowych.

Praca domowa:

Zadania 1, 2 i 3 z zestawu ćwiczeń.

Zadanie 2 z zestawu zadań aktywizujących do multimedium.

**Wskazówki metodyczne
opisujące różne zastosowania
danego multimedium**

Multimedium może być wykorzystane przez uczniów po lekcji do powtórzenia i utrwalenia wiadomości.