

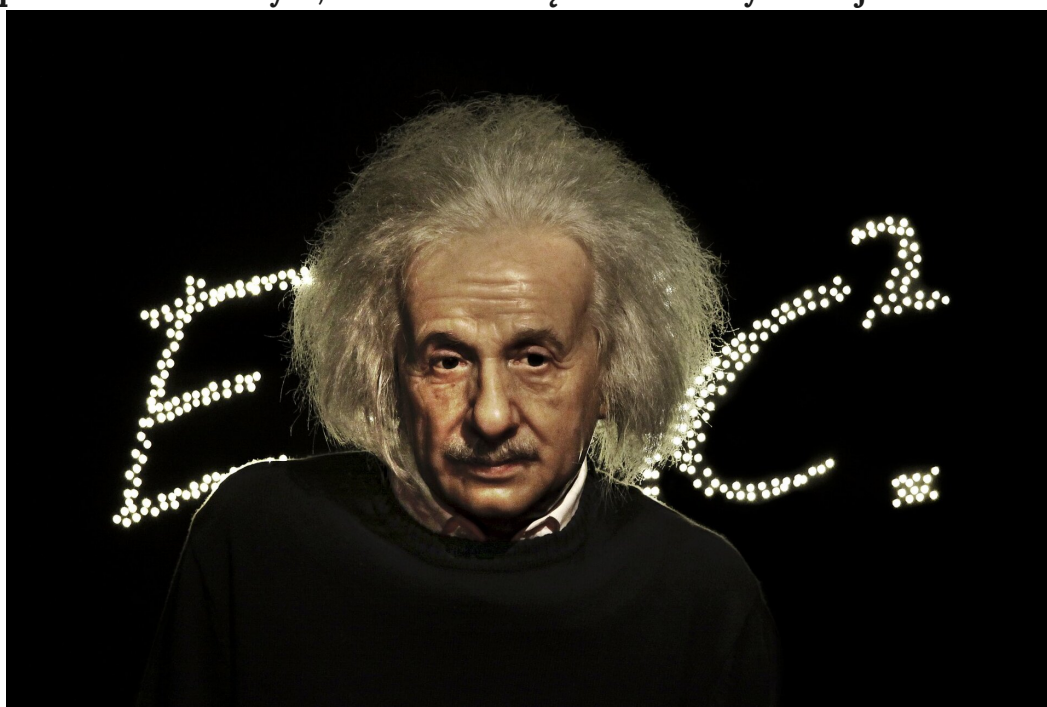
Dlaczego jądro jest trwałe – deficyt masy i energia wiązania

Elementy zasobu:

1. Starter: ogólny wstęp do tematu, rysunek przedstawiający twarz A. Einsteina na le wzoru $E=mc^2$, odwołanie do wcześniejszej wiedzy ucznia oraz cele lekcji sformułowane w języku ucznia.
2. Zawartość tekstowa: słowo wstępne na temat równoważności masy i energii; zapisanie masy jądra przy pomocy liczby A i Z; informacja dotycząca niezgodności wzoru z danymi eksperymentalnymi; określenie deficytu masy, zapisanie deficytu masy za pomocą wzoru; obliczenia deficytu masy i energii wiązania dla jądra helu; tabelaryczne zestawienie "Wartości energii wiązania dla wybranych pierwiastków"; wyjaśnienie dotyczące jednostek używanych w tabeli; tabelaryczne zestawienie "Wybrane wielokrotności jednostki 1 eV"; informacja dotycząca energii uzyskiwanych w Wielkim Zderzaczu Hadronów; rysunek przedstawiający wykres zależności energii wiązania jądra w funkcji liczby masowej wraz z wyjaśnieniem; wyjaśnienie czym jest energia wiązania przypadająca na jeden nukleon; rysunek przedstawiający wykres zależność energii wiązania przypadającej na jeden nukleon od liczby masowej wraz z wyjaśnieniem; dwa polecenia dla ucznia obliczeniowe.
3. Podsumowanie: siedem sformułowań podsumowujących dotyczących energii wiązania, równoważności masy i energii, związku energii z liczbą nukleonów w jądrze, energii wiązania przypadającej na jeden nukleon w jądrze.
4. Zadania podsumowujące modu: zestaw dwóch ćwiczeń interaktywnych (prawda/fałsz, wybranie słowa z listy).
5. Praca domowa: zestaw trzech poleceń dla ucznia dotyczących obliczenia deficytu masy i energii wiązania
5. Słowniczek: wyjaśnienia pojęć: energia spoczynkowa, deficyt masy, elektronowolt, energia wiązania jądra, kilowatogodzina, masa spoczynkowa, SI, średnia energia wiązania przypadająca na jeden nukleon, Wielki Zderzacz Hadronów
6. Biogram: Albert Einstein.

Dlaczego jądro jest trwałe – deficyt masy i energia wiązania

Co wiąże nukleony w jądrze? Jaka energia jest potrzebna, aby rozbić jądro na mniejsze fragmenty? Jednym z elementów szczególnej teorii względności ogłoszonej przez **Alberta Einsteina** w 1905 r. była równoważność masy i energii. Jego odkrycie pozwoliło wyjaśnić pochodzenie energii wiązania – energii łączącej składniki jądra atomowego w jedną spójną strukturę. Jeśli chcesz poznać podstawowe prawa rządzące materią i masą na poziomie atomowym, to znalazłeś się we właściwym miejscu.



Najsłynniejsze równanie świata, wiążące masę z energią, odkrywa przed nami tajemnicę ogromu sił wiążących cząstki elementarne wewnątrz jąder atomów, a jednocześnie stanowi swego rodzaju obietnicę: A gdyby tak udało się tę energię wykorzystać?

Źródło: Dominik Bartsch, dostępny w internecie: flickr.com, licencja: CC BY-NC-ND 2.0.

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

- założenia budowy modelu atomu według Bohra;
- podstawowe oddziaływania, które zachodzą między nukleonami;
- definicję liczby masowej i atomowej (porządkowej);
- definicję izotopu oraz jak odróżnić izotopy na podstawie liczby masowej i atomowej (porządkowej);
- jak podać skład jądra na podstawie znajomości liczby masowej A i porządkowej Z ;
- przykłady samorzutnego rozpadu niestabilnych jąder atomowych oraz zapis schematów takich rozpadów za pomocą zasady zachowania ładunku i zasady zachowania liczby nukleonów.

Nauczysz się

- podawać definicję deficytu masy i wymieniać warunek jego występowania;
- zapisywać warunek równoważności masy i energii $E = m \cdot c^2$;
- podawać definicję energii wiązania jądra atomowego;
- obliczać wartość energii wiązania jądra i energii wiązania przypadającej na jeden nukleon dla dowolnego pierwiastka.

Energia wiązania

Świat zna [Alberta Einsteina](#) głównie dzięki wzorowi $E = mc^2$, który okazał się sztandarowym przykładem nowego sposobu postrzegania rzeczywistości przez fizykę współczesną. Wzór ten stwierdza równoważność masy i energii. Zmiana masy układu może zachodzić wskutek wymiany nie tylko substancji z otoczeniem, lecz także energii. Masa i energia stały się jakościowo różnymi postaciami materii.

Jeśli znamy masę protonu i neutronu oraz wiemy, że atom składa się z protonów (Z) i neutronów ($A - Z$), to możemy obliczyć masę jądra atomu. W tym celu korzystamy ze wzoru:

$$m_{\text{jądra}} = Z \cdot m_p + (A - Z) \cdot m_n$$

Okazuje się jednak, że wzór ten daje niezgodne wyniki w porównaniu z danymi eksperymentalnymi. **Masa jądra jest bowiem zawsze mniejsza niż suma mas jego poszczególnych składników** (nukleonów).

Ten ubytek masy, czy też **deficyt masy**, obliczamy według wzoru:

$$\Delta m = Z \cdot m_p + (A - Z) \cdot m_n - M_j,$$

gdzie M_j to rzeczywista masa jądra danego pierwiastka.

Ubytek masy związany jest z oddziaływaniami jądrowymi i energią potrzebną do utrzymania jądra atomowego w całości. Podczas powstawania jądra energia związana z ubytkiem masy została zamieniona na inną formę energii równą $\Delta E = \Delta mc^2$.

Obliczmy zatem energię wiązania dla jąder atomowych. Weźmy pod uwagę jądro helu. Składa się ono z 4 nukleonów: dwóch protonów i dwóch neutronów.

Masa protonu: $1,673 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$

Masa neutronu: $1,675 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$

Masa jądra helu: $6,645 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$

Deficyt masy: $\Delta m = Z \cdot m_p + (A - Z) \cdot m_n - M_j$

Czyli:

$$\Delta m = 2 \cdot 1,673 \cdot 10^{-27} \text{ kg} + 2 \cdot 1,675 \cdot 10^{-27} \text{ kg} - 6,645 \cdot 10^{-27} \text{ kg} = 5,1 \cdot 10^{-29} \text{ kg}$$

Jak widać, deficyt masy stanowi zaledwie drobny ułamek masy czterech nukleonów – około 0,7%.

Deficytowi masy tej wielkości odpowiada równoważna mu energia obliczona z zależności $\Delta E = \Delta mc^2$.

Skoro $c = 3 \cdot 10^8 \frac{\text{m}}{\text{s}}$, to:

$$\Delta E = 5,100 \cdot 10^{-29} \text{ kg} \cdot 9 \cdot 10^{16} \frac{\text{m}^2}{\text{s}^2} = 4,590 \cdot 10^{-12} \text{ J}$$

Energię tę nazywamy **energią wiązania jądra** danego atomu.

Wartości energii wiązania dla wybranych pierwiastków

Nazwa	A	$E_{\text{wiązania}}[\text{J}]$	$E_{\text{wiązania}}[\text{eV}]$	$E_{\text{wiązania}}[\text{MeV}]$	$\frac{E_w}{A} \left[\frac{\text{MeV}}{\text{nukleon}} \right]$
deuter	2	$3,57 \cdot 10^{-13}$	2231663	2,2	1,1
hel	4	$4,59 \cdot 10^{-12}$	28687500	28,4	7,1
lit	7	$6,07 \cdot 10^{-12}$	37956938	38,0	5,4
węgiel	12	$1,48 \cdot 10^{-11}$	92394563	92,4	7,7
tlen	16	$2,05 \cdot 10^{-11}$	$1,28 \cdot 10^8$	127,9	8,0
uran	238	$2,89 \cdot 10^{-10}$	$1,80 \cdot 10^9$	1804,9	7,6

W fizyce obowiązuje międzynarodowy układ jednostek (**SI**), w którym jednostką energii jest jeden dżul (1 J). Jednak jednostka ta jest czasami zbyt duża, a czasami – zbyt mała.

Przykładowo: gdyby energia elektryczna zużywana w gospodarstwie domowym była wyrażana w dżulach, musielibyśmy operować ogromnymi liczbami sięgającymi setek milionów. Z tego powodu używamy jednostki energii elektrycznej zwanej **kilowatogodziną** (poznaliście ją już w gimnazjum) – 1 kWh. Jest ona równa 3600000 J.

W świecie atomów i cząstek elementarnych energia jednego dżula jest energią gigantyczną. Z obliczeń wynika (patrz wyżej), że energia wiązania jąder atomów jest równa w odniesieniu do małych jąder około jednej bilionowej dżula, a dla najcięższych jąder – jednej dziesięciomiliardowej dżula. Energia atomu wodoru na poziomie podstawowym wynosi $-2,1 \cdot 10^{-18} \text{ J}$. Z tych powodów fizycy używają jednostki energii zwanej **elektronowoltem**.

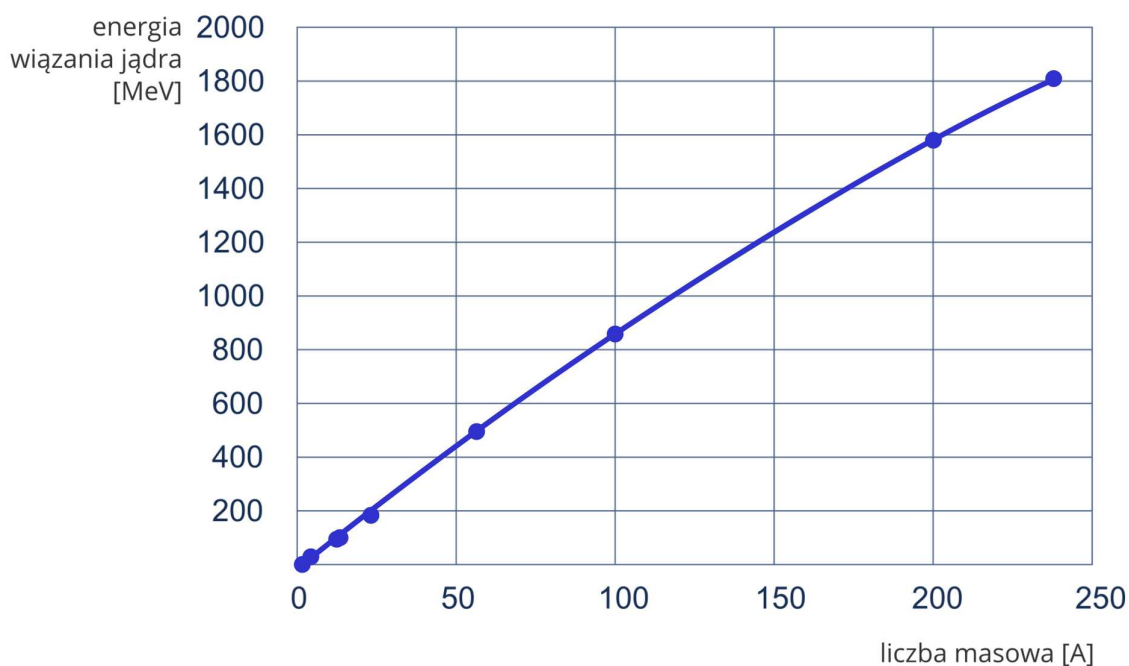
Jeden elektronowolt (eV) jest jednostką energii, która jest równoważna pracy wykonywanej przez siły elektryczne, kiedy przemieszczają elektron w polu elektrostatycznym między dwoma punktami, pomiędzy którymi panuje napięcie elektryczne 1 V. Odpowiada to w przybliżeniu wartości $1,6 \cdot 10^{-19}$ J. Pracę tę można wyrazić w dżulach, ale wygodniej jest to zrobić w elektronowoltach lub też posłużyć się wielokrotnościami tej jednostki: kiloelektronowoltem (keV), megaelektronowoltem (MeV) lub gigaelektronowoltem (GeV)

Wybrane wielokrotności jednostki 1 eV

Mnożnik	Nazwa	Symbol
10^0	elektronowolt	eV
10^3	kiloelektronowolt	keV
10^6	megaelektronowolt	MeV
10^9	gigaelektronowolt	GeV
10^{12}	teraelektronowolt	TeV

Współczesne urządzenia do badania cząstek rozpędzają je do energii ponad 100 GeV (gigaelektronowoltów, czyli 10^9 eV), a **Wielki Zderzacz Hadronów** (największa maszyna świata) uzyskuje energię cząstek rzędu kilku TeV (10^{12} eV), czyli kilku bilionów elektronowoltów. Energie wyrażone w elektronowoltach wydają się być gigantyczne, ale są to tak naprawdę wartości mniejsze niż jedna milionowa dżula. Należy jednak pamiętać, że energiami tymi obdarzone są cząstki o masach rzędu 10^{-27} kg (w spoczynku).

Wróćmy teraz do wartości liczbowych zawartych w tabeli energii wiązania wybranych pierwiastków. Dane te można przedstawić graficznie na wykresie zależności energii wiązania jądra od liczby masowej (wykres zawiera dane większej liczby pierwiastków niż w tabelce).

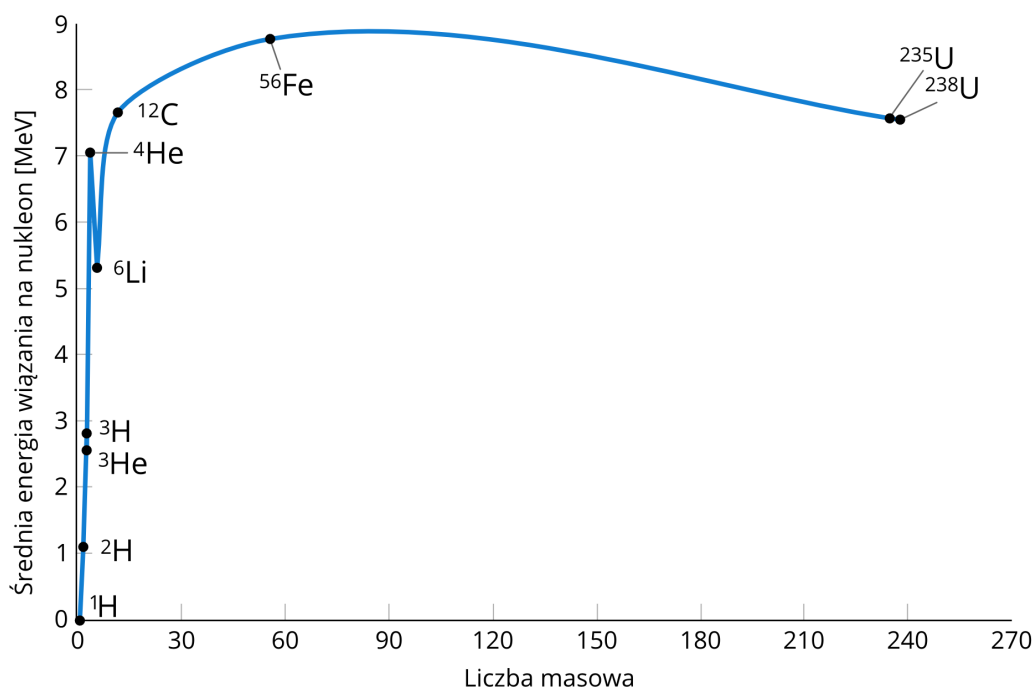


Na podstawie danych z tabeli można zauważyć, że energia wiązania jest tym większa, im większa jest liczba nukleonów w jądrze. Jest to zrozumiałe – większa liczba protonów oznacza większe siły odpychania, zatem jądro może być stabilne, pod warunkiem że energia wiązania będzie większa. Właśnie dlatego ciężkie jądra mają duży nadmiar neutronów.

Ponowna analiza danych umieszczonych w tabeli prowadzi do jeszcze jednego ciekawego wniosku: Energia wiązania każdego nukleonu w jądrze helu jest większa niż energia wiązania takiego nukleonu w jądrze litu. Z wykresu wynika, że energia wiązania rośnie wraz ze wzrostem liczby masowej, ale nie jest to wzrost liniowy (wzrost energii wiązania jest coraz wolniejszy).

Czym jest **energia wiązania przypadająca na jeden nukleon**? Jest to ilość energii, jaką trzeba dostarczyć do jądra, aby wyrwać z niego jeden nukleon. Jeżeli chcemy zamiast jądra uzyskać niezależne cząstki swobodne, to musimy w tym celu dostarczyć energię równą całkowitej energii wiązania.

Ciekawy wynik otrzymamy, gdy na wykresie przedstawimy zależność energii wiązania przypadającej na jeden nukleon od liczby masowej (A) – liczby nukleonów.



Wykres zależności energii wiązania przypadającej na jeden nukleon od liczby masowej

Analiza wykresu pozwala stwierdzić, że największa średnia energia wiązania przypada na jądra znajdujące się w środkowej części wykresu. W porównaniu z tymi jądrami zarówno jądra najlżejsze (zaczynając od deuteru, helu czy węgla), jak i te cięższe (takie jak uran) mają mniejszą energię przypadającą na jeden nukleon.

Zapamiętaj!

Najbardziej trwałe są jądra leżące w środkowej części wykresu zależności energii wiązania jądra od liczby masowej.

Maksymalną wartość energii wiązania ma żelazo – 8,8 MeV na nukleon. Jest to tylko jeden z wniosków wynikających z przebiegu tego wykresu.

Warto też zwrócić uwagę na fakt dużej, w porównaniu z sąsiednimi jądrami, energii wiązania na nukleon jądra helu ${}^4_2\text{He}$. Lit, który ma większą energię wiązania i większą masę, ma mniejszą energię przypadającą na jeden nukleon. Oznacza to, że jądro helu jest związane silniej niż jądra o mniejszej i nieco większej masie. Z tego wynikają istnienie cząstki α i przekonanie (żywione długo przez Rutherforda), że w jądrach atomów takie cząstki istnieją cały czas. Obszary wykresu dotyczące zarówno mniejszych, jak i większych liczb masowych spowodowały prawdziwą rewolucję. Dzięki niemu możliwa stała się produkcja energii jądrowej na dwa sposoby (ale również możliwość zbudowania dwóch rodzajów bomb jądrowych). Ponadto za pomocą tego wykresu wyjaśniono, co jest źródłem energii gwiazd, a także wytłumaczono, jak tworzyły się pierwiastki podczas powstania i ewolucji Wszechświata. Tymi kwestiami zajmiemy się na najbliższych lekcjach.

Ćwiczenie 1



Oblicz z dokładnością do czterech cyfr znaczących energię wiązania jądra żelaza ${}^{56}\text{Fe}$, którego jądro ma masę 55,93 u i jądra sodu ${}^{23}\text{Na}$, którego jądro ma masę 22,99 u.

Energia wiązania jądra żelaza wynosi MeV.

Energia wiązania jądra sodu wynosi MeV.

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

Ćwiczenie 2

Jaki procent masy Słońca zamienił się na energię od momentu jego powstania 5 miliardów lat temu? Wiadomo, że w ciągu sekundy wysyła ono energię równą $4 \cdot 10^{26}$ J. Wynik zaokrąglaj do dwóch cyfr znaczących.

Od momentu powstania, % masy Słońca zamieniło się na energię.

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

Podsumowanie

- Masa i energia całkowita są miarą tej samej wielkości fizycznej. Zmiana masy układu może zachodzić wskutek wymiany nie tylko substancji, lecz także energii.

- Równoważność masy i energii Albert Einstein opisał za pomocą wzoru:

$$E = mc^2,$$

gdzie:

m – masa ciała, c – prędkość światła w próżni.

- Masa jądra jest mniejsza od sumy mas nukleonów, z którego jest ono utworzone. Tę różnicę nazywamy deficytem masy.
- Energia wiązania jest równa wartości pracy, którą należy wykonać, aby układ rozłożyć na pojedyncze cząstki (w przypadku jądra – są to nukleony).
- Energia wiązania jest równa wartości energii ΔE związanej z deficytem masy Δm :

$$\Delta E = \Delta mc^2,$$
 gdzie: c – prędkość światła w próżni.
- Energia wiązania zmienia się wraz liczbą nukleonów w jądrze; im większa liczba nukleonów, tym jądro jest silniej związane.
- Charakterystyczną wielkością dla danego jądra jest energia wiązania przypadająca na jeden nukleon w jądrze. Jest to energia, jaką trzeba dostarczyć do jądra, aby uwolnić z niego jeden nukleon.

Zadania podsumowujące

Ćwiczenie 3



Oceń prawdziwość poniższych zdań. Przy każdym zdaniu w tabeli zaznacz „Prawda” albo „Fałsz”.

Zdanie	Prawda	Fałsz
Im większa energia wiązania przypadająca na jeden nukleon $\Delta E = \Delta mc^2$, tym więcej energii potrzeba, aby rozbić takie jądro.	☐	☐
Defektowi masy odpowiada równoważna mu energia $\Delta E = \Delta mc^2$	☐	☐
Gdyby porównać masę jądra atomowego z sumą mas jego składników, wówczas okaże się, że jądro jako układ nukleonów związanych siłami jądrowymi jest cięższy niż suma mas tych nukleonów.	☐	☐

Źródło: Dariusz Kajewski <dariusz.kajewski@up.wroc.p>, licencja: CC BY 3.0.

Ćwiczenie 4



Uzupełnij poniższą lukę. Kliknij w nią, aby rozwinąć listę, a następnie wybierz poprawną odpowiedź.

Jądra, które są stabilne to właśnie te, w których energia wiązania przypadająca na jeden nukleon jest .

najmniejsza

zerowa

największa

Źródło: Dariusz Kajewski <dariusz.kajewski@up.wroc.p>, licencja: CC BY 3.0.

Ćwiczenie 5

Ile wynosi energia uwolniona w czasie reakcji, jeżeli masa substancji ulegającej tej reakcji zmniejszyła się o 0,2 g? Zaznacz poprawną odpowiedź.

☐ Energia uwolniona w czasie reakcji to $1,7 \cdot 10^{13}$ J.

☐ Energia uwolniona w czasie reakcji to $1,3 \cdot 10^{12}$ J.

☐ Energia uwolniona w czasie reakcji to $2,1 \cdot 10^{13}$ J.

☐ Energia uwolniona w czasie reakcji to $1,8 \cdot 10^{13}$ J.

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

Ćwiczenie 6

Tryt jest izotopem wodoru o symbolu ${}^3_1\text{H}$. Masa jądra trytu wynosi $5,00 \cdot 10^{-27}$ kg. Ile wynosi deficyt masy tego jądra i jego energię wiązania? Zaznacz poprawne odpowiedzi.

☐ Energia wiązania wynosi ok. 10 MeV

☐ Energia wiązania wynosi ok. 15 MeV

☐ Deficyt masy wynosi ok. $2,31 \cdot 10^{-29}$ kg

☐ Deficyt masy wynosi ok. $2,64 \cdot 10^{-29}$ kg

☐ Deficyt masy wynosi ok. $2,15 \cdot 10^{-28}$ kg

☐ Energia wiązania wynosi ok. 13 MeV

☐ Deficyt masy wynosi ok. $2,31 \cdot 10^{-29}$ kg

☐ Energia wiązania wynosi ok. 12 MeV

Ćwiczenie 7

Ile wynosi deficyt masy i energia wiązania izotopu polonu 208? Zaznacz poprawne odpowiedzi.

☐ Energia wiązania wynosi ok. 1775 MeV

☐ Energia wiązania wynosi ok. 1715 MeV

☐ masy wynosi ok. $1,96 \cdot 10^{-27}$ kg

☐ masy wynosi ok. $2,25 \cdot 10^{-26}$ kg

☐ Energia wiązania wynosi ok. 1605 MeV

☐ masy wynosi ok. $2,86 \cdot 10^{-27}$ kg

☐ masy wynosi ok. $1,36 \cdot 10^{-26}$ kg

☐ Energia wiązania wynosi ok. 1688 MeV

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

Słownik

energia spoczynkowa

energia cząstki pozostającej w spoczynku względem inercjalnego układu odniesienia.

deficyt masy

różnica między masą cząstek swobodnych a masą jądra utworzonego z tych cząstek.

elektronowolt

jednostka energii równoważna pracy, jaką wykonują siły elektryczne, kiedy przemieszczają elektron w polu elektrostatycznym między dwoma punktami, pomiędzy którymi panuje napięcie 1 V. Odpowiada to w przybliżeniu wartości $1,6 \cdot 10^{-19}$ J.

energia wiązania jądra

energia równoważna deficytowi masy. Odpowiada pracy, którą należy wykonać, aby podzielić jądro na pojedyncze nukleony. Wartość energii wiązania jądra równa jest energii uzyskanej kosztem różnicy masy między nukleonami swobodnymi a nukleonami związanymi w jądrze atomu.

kilowatogodzina

jednostka energii równoważna ilości energii zużywanej przez urządzenie o mocy 1 kW (1000 W).

masa spoczynkowa

stała masa charakteryzująca ciało niezależnie od rozpatrywanego układu odniesienia, w którym to ciało spoczywa.

SI

Międzynarodowy Układ Jednostek Miar (*Système international d'unités*), używany w Polsce od 1966 r.

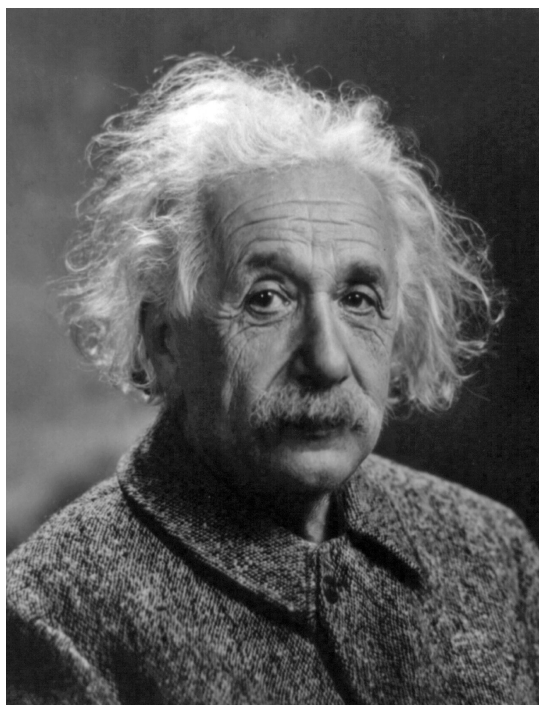
średnia energia wiązania przypadająca na jeden nukleon

energia wiązania jądra podzielona przez liczbę wszystkich nukleonów w jądrze danego pierwiastka; inaczej: energia wiązania przypadająca na jeden nukleon lub właściwa energia wiązania.

Wielki Zderzacz Hadronów

największy na świecie akcelerator (przyspieszacz) cząstek, znajdujący w CERN-ie (Europejski Ośrodek Badań Jądrowych) pod Genewą.

Biogram



Albert Einstein

Źródło: dostępny w internecie: commons.wikimedia.org, domena publiczna.

Albert Einstein

1879.03.14 Ulm – 1955.04.18 Princeton

[albert ajnsztajn]

Jeden z najwybitniejszych fizyków teoretyków wszech czasów, twórca szczególnej (1905 r.) i ogólnej teorii względności (1915 r.). Laureat Nagrody Nobla w dziedzinie fizyki (1921 r.).