

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).

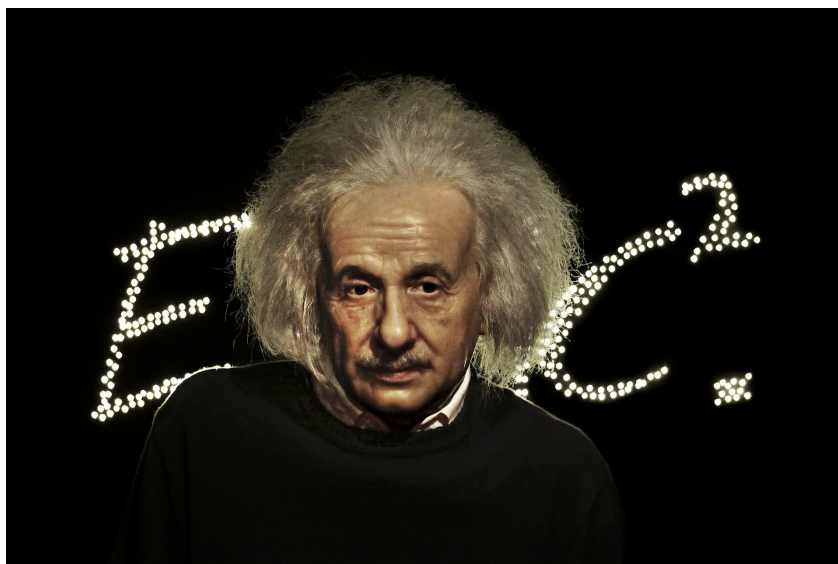
5. Praca domowa: zestaw trzech poleceń dla ucznia dotyczących obliczenia deficytu masy i energii wiązania

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 chcecie poznać podstawowe prawa rządzące materią i masą na poziomie atomowym, to znaleźliście się we właściwym miejscu naszego podręcznika.



Najstynniejsze 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?

Już potrafisz

- wymienić założenia budowy modelu atomu według Bohra;
- wymienić cząstki wchodzące w skład jąder atomów (nukleony);
- wymienić dwa podstawowe oddziaływania, które zachodzą między nukleonami – elektryczne oddziaływania odpychające oraz jądrowe oddziaływania przyciągające silne;
- podać definicję liczby masowej i atomowej (porządkowej);
- podać definicję izotopu i odróżnić izotopy na podstawie liczby masowej i porządkowej (atomowej);
- podać skład jądra na podstawie znajomości liczby masowej „A” i porządkowej „Z”;
- wymienić przykłady samorzutnego rozpadu niestabilnych jąder atomowych, zapisać schematy 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.

1. 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 dowiódł, że masa i energia są równoważne. 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, o którym tak wiele mówiliśmy. 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:

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

Energia ta nazywamy **energiją wiązania jądra** danego atomu.

$1,80 \cdot 10^9$

Wartości energii wiązania dla wybranych pierwiastków

Nazwa	A	$E_{\text{wiązania}}[\text{J}]$	$E_{\text{wiązania}}[\text{eV}]$	$E_{\text{wiązania}}[\text{MeV}]$	$\frac{E_w}{A} \left[\begin{array}{c} \text{MeV} \\ \text{nukleon} \end{array} \right]$
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 tabelce pojawiły się jednostki, z których jak dotąd nie korzystaliśmy. 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 3 600 000 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 $1,6 \cdot 10^{-19} \text{J}$. 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

Wielokrotność		
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

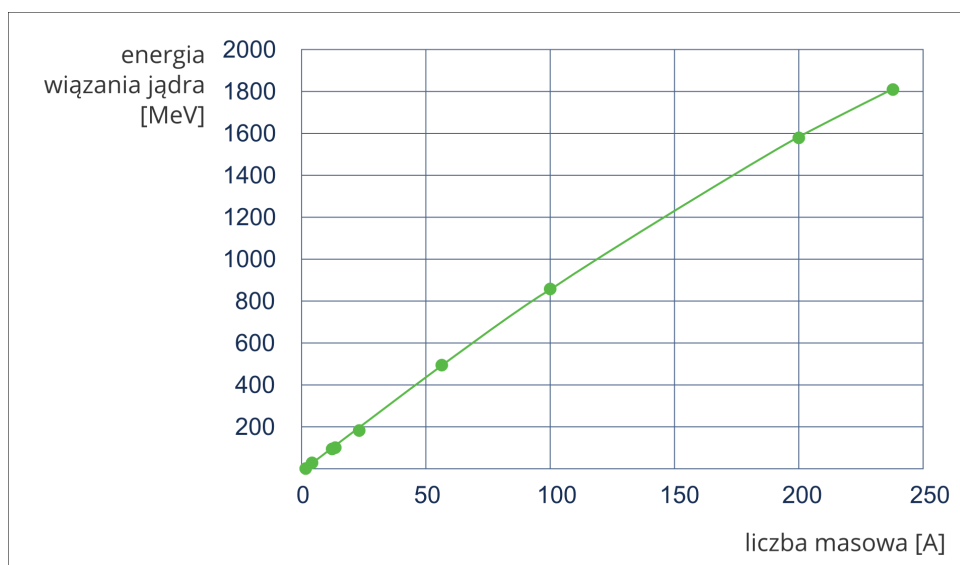
(gigaelektronowoltów, czyli 10^9

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).



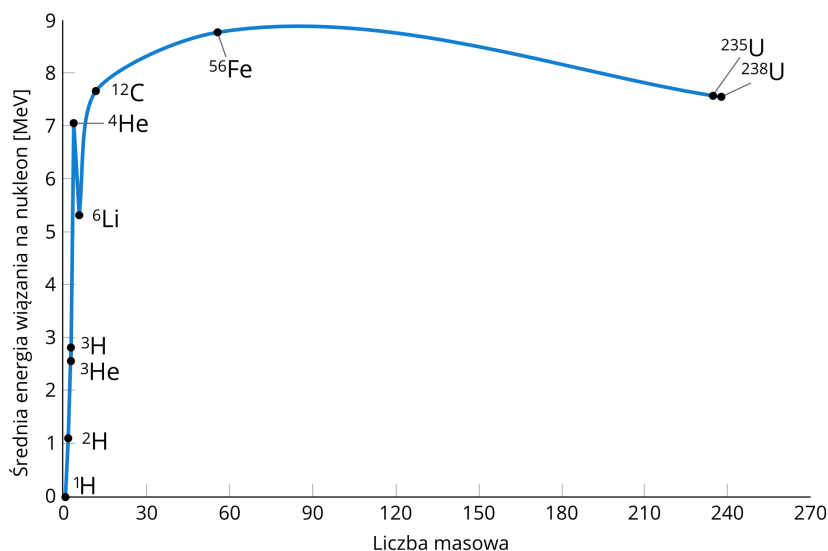
Źródło: Anita Mowczan, licencja: CC BY 3.0.

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. Na wykresie widać, 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.



Źródło: Persino (<https://commons.wikimedia.org>), Krzysztof Jaworski, licencja: CC BY 3.0.

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 He^4 .

. 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 jądram 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 dwu 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.

Polecenie 1

Oblicz energię wiązania jądra żelaza i jądra sodu. Potrzebne dane odszukaj w tablicach.

Polecenie 2

Oblicz procent masy Słońca zamienionej na energię od momentu jego powstania, czyli 5 mld lat, jeżeli w ciągu sekundy wysyła ono energię równą $4 \cdot 10^{26} \text{J}$

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 ta 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 moduł

Ćwiczenie 1

Które informacje są prawdziwe, a które fałszywe?

	Prawda	Falsz
Im większa energia wiązania przypadająca na jeden nukleon $\Delta E = \Delta mc^2$, tym więcej energii potrzeba, aby rozbić takie jądro.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Defektowi masy odpowiada równoważna mu energia $\Delta E = \Delta mc^2$	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
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.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

Ćwiczenie 2

Uzupełnij lukę.

zerowa, najmniejsza, największa

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

.....

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

Praca domowa

Praca domowa

Polecenie 3.1

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

Polecenie 3.2

Tryt jest izotopem wodoru o symbolu H^3

. Masa jądra trytu wynosi $5,00 \cdot 10^{-27} \text{kg}$

. Oblicz deficyt masy tego jądra i jego energię wiązania.

Polecenie 3.3

Oblicz deficyt masy i energię wiązania izotopu polonu 208.

Słowniczek

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 $1,6 \cdot 10^{-19} \text{J}$

.

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

masa spoczynkowa

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

SI

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

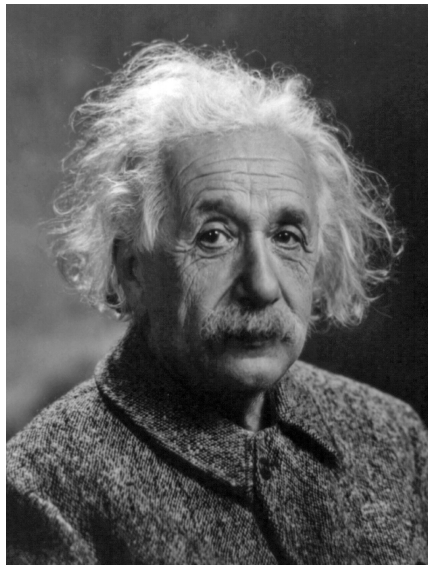
średnia energia wiązania przypadająca na jeden nukleon

– 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



Źródło: Jack Turner, PM_Poon, Dantadd. (<http://commons.wikimedia.org>), public domain.

Albert Einstein

14.03.1879–18.04.1955

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.).