

# Reakcje termojądrowe

Elementy zasobu:

1. Starter: ogólny wstęp do tematu, fotografia tokamaka, odwołanie do wcześniejszej wiedzy ucznia oraz cele lekcji sformułowane w języku ucznia.

2. Zawartość tekstowa jest podzielona na części:

2.1. Reakcja syntezy jąder atomowych: wykresy zależności średniej energii wiązania przypadającej na jeden nukleon od liczby masowej dla jąder lekkich i jąder ciężkich; tabelaryczne zestawienie energii wiązania w jądrach lekkich przypadająca na jeden nukleon dla wodoru, helu, litu i węgla; określenie reakcji syntezy jąder; zapis reakcji syntezy jąder deuteru oraz trytu i deuteru; film animowany przedstawiający reakcję syntezy jądra deuteru i trytu w jądro helu (czas: 0:24 s.); opis warunków, jakie muszą być spełnione, aby umożliwić przebieg reakcji syntezy lekkich jąder; polecenie dla ucznia polegające na określeniu różnic między uzyskiwaniem energii podczas spalania np. węgla a uzyskiwaniem jej w reakcji łączenia się jąder pierwiastków (syntezy).

2.2. Skąd pochodzi energia słoneczna: określenie źródła energii gwiazd; rysunek przedstawiający schemat reakcji syntezy na Słońcu; zapis protonowo-protonowego cyklu reakcji; film animowany przedstawiający protonowo-protonowy cykl reakcji (czas: 0:43 s); polecenie dla ucznia polegające na określeniu cząstki powstającej po połączeniu dwóch jąder deuteru.

2.3. Bomba wodorowa i perspektywy kontrolowanej syntezy termojądrowe: informacje dotyczące wykorzystania reakcji termonuklearnej do celów militarnych; film ukazujący niszczące skutki wybuchu bomby wodorowej (czas: 1:56 s); określenie skutków wybuchu bomby wodorowej; ilustracja konstrukcji bomby wodorowej; określenie tokamaka; film przedstawiający budowę i zasadę działania reaktora termojądrowego (czas: 1:32s); polecenie dla ucznia dotyczące form wyzwalanej energii w reakcji termojądrowej.

3. Podsumowanie: zestaw dziesięciu sformułowań podsumowujących dotyczących reakcji syntezy lekkich jąder atomowych, energii Słońca, cykl protonowo-protonowego i kontrolowania łańcuchowych reakcji termojądrowych.

5. Praca domowa: zestaw czterech poleceń dla ucznia dotyczących: energii uzyskiwanych w reakcjach rozpadu i syntezy, zapisu reakcji syntezy, dlaczego w promieniowaniu

wychodzącym z powierzchni Słońca przeważa promieniowanie widzialne oraz tokamaków.

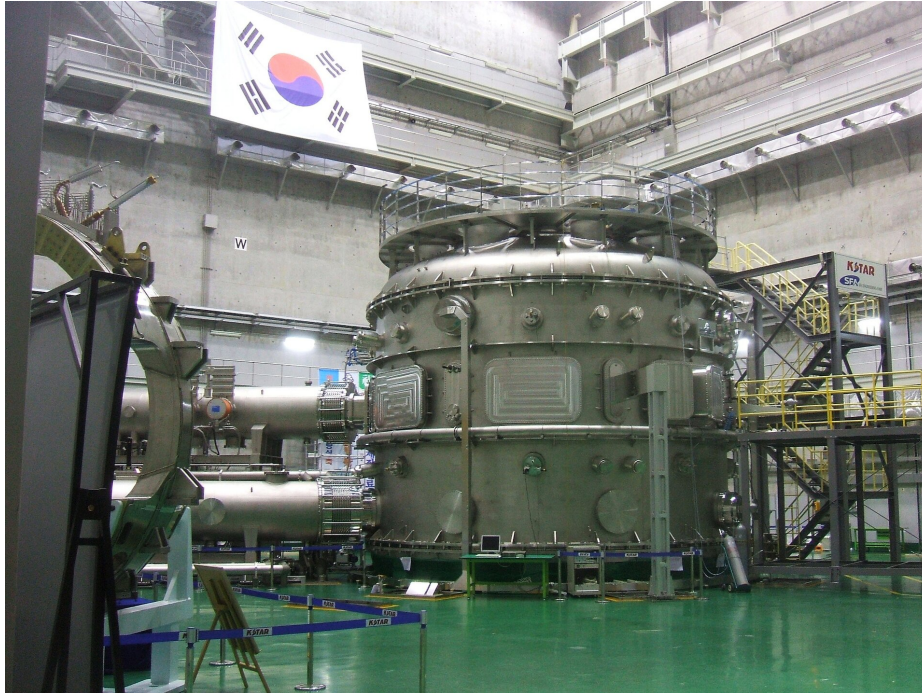
6. Słowniczek: bomba wodorowa (bomba termojądrowa), cykl protonowo-protonowy, gorąca plazma (plazma termojądrowa), ITER, megatona TNT (MT), neutrino elektronowe, plazma, reakcja syntezy jądrowej, reakcja termojądrowa, tokamak

7. Zadanie podsumowujące modu: ćwiczenie interaktywne polegające na uzupełnieniu trzech luk w zdaniach z możliwością sprawdzenia.

# Reakcje termojądrowe

---

Na wykresie zależności właściwej energii wiązania przewidziano drugi typ reakcji jądrowych (inny niż rozszczepienie), w których wydzielana jest energia. Są to reakcje syntezy. Polegają one na tym, że z połączenia lekkich jąder powstają jądra pierwiastków cięższych. W tym rozdziale przeczytasz, jak doprowadzić do takiej reakcji, dlaczego jej wydajność jest większa, niż wydajność reakcji rozszczepiania i czemu synteza jądrowa nie stała się jeszcze powszechnie wykorzystywanym źródłem energii.



Reakcje zachodzące w sposób naturalny we wnętrzu Słońca ludzkość próbuje odtworzyć na kilka sposobów, m.in. poprzez magnetyczne uwięzienie plazmy w urządzeniach zwanych tokamakami.

Źródło: Michel Maccagnan, dostępny w internecie: <http://commons.wikimedia.org> [dostęp 30.05.2022], licencja: CC BY-SA 3.0.

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

- definicja promieniowania jądrowego;
- rodzaje promieniowania jądrowego;
- właściwości promieniowania alfa, beta i gamma;
- definicja izotopu promieniotwórczego;
- wpływ promieniowania jonizującego na organizm ludzki;
- ogólny schemat reakcji rozszczepienia jądra atomowego;
- na czym polega łańcuchowa reakcja rozszczepienia;
- budowa i działanie reaktora jądrowego;
- korzyści płynące z energetyki jądrowej;
- budowa i funkcjonowanie elektrowni jądrowej.

Ich opracowanie znajdziesz materiałach:

- [Dlaczego jądro jest trwałe – deficyt masy i energia wiązania,](#)

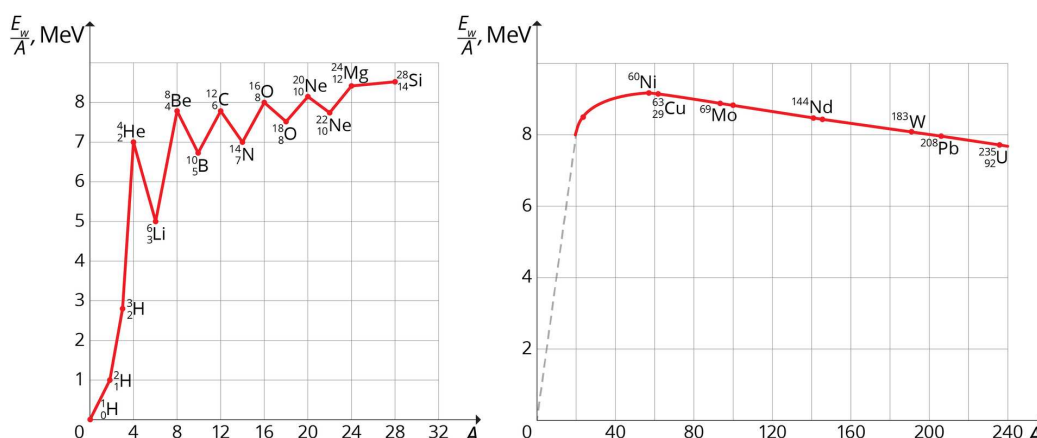
- Promieniowanie jądrowe  $\alpha$ ,  $\beta$  i  $\gamma$ ,
- Przemiany jądrowe,
- Reakcje jądrowe,
- Zastosowanie promieniowania jądrowego i energii jądrowej,
- Działanie elektrowni jądrowej.

### Nauczysz się

- zapisywać reakcje syntezy jąder atomowych;
- opisywać warunki, w jakich można doprowadzić do połączenia się dwóch jąder;
- wymieniać reakcje termojądrowe jako źródła energii gwiazd.

## Reakcja syntezy jąder atomowych

Reakcje rozszczepienia jąder ciężkich nie są jedynym dostępnym źródłem energii związanym z przemianami jednych atomów w inne.



Średnia energia wiązania przypadająca na jeden nukleon. Wykres a) reprezentuje obszar jąder lekkich, natomiast wykres b) – obszar jąder ciężkich

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

Energia jądrowa wydzielana jest w reakcjach, w których końcowe produkty mają większy deficyt masy przypadający na jeden nukleon, niż pierwiastki stanowiące substraty tych reakcji. Taka sytuacja zachodzi w wyniku połączenia dwóch lekkich jąder w jedno o większej masie.

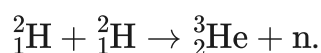
### Energia wiązania w jądrach lekkich przypadająca na jeden nukleon

| Jądro            | $E_{\text{wiązania}}$ [MeV] | $\frac{E_{\text{wiązania}}}{\text{nukleon}}$ [MeV] |
|------------------|-----------------------------|----------------------------------------------------|
| ${}^1_1\text{H}$ | –                           | –                                                  |

| Jądro               | $E_{\text{wiązania}} \text{ [MeV]}$ | $\frac{E_{\text{wiązania}}}{\text{nukleon}} \text{ [MeV]}$ |
|---------------------|-------------------------------------|------------------------------------------------------------|
| ${}^2_1\text{H}$    | 2, 22                               | 1, 11                                                      |
| ${}^3_1\text{H}$    | 8, 47                               | 2, 82                                                      |
| ${}^3_2\text{He}$   | 7, 72                               | 2, 57                                                      |
| ${}^4_2\text{He}$   | 28, 30                              | 7, 08                                                      |
| ${}^7_3\text{Li}$   | 37, 95                              | 5, 42                                                      |
| ${}^{12}_6\text{C}$ | 92, 20                              | 7, 68                                                      |

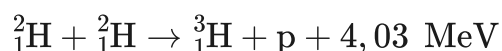
Z powyższego wykresu wynika, że połączenie dwóch jąder lekkich w jedno cięższe również może być źródłem energii. Ponadto możemy zauważyć, że energia wiązania nukleonu helu  ${}^4_2\text{He}$  wielokrotnie przewyższa energię w jądrze deuteru  ${}^2_1\text{H}$ .

Jądro helu jest więc znacznie stabilniejsze niż jądro deuteru, zatem żeby oderwać nukleon od jądra helu, trzeba dostarczyć o wiele więcej energii, niż w przypadku jądra deuteru. Gdyby zatem połączyć ze sobą dwa jądra deuteru w jedno jądro helu, to w takim procesie zostałaby uwolniona duża nadwyżka energii (kosztem deficytu masy). Takie reakcje nazywamy **reakcjami syntezy jąder**:

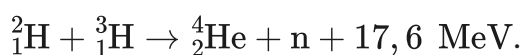


Ilość wydzielanej energii podczas takiej reakcji wynosi ok. 3, 25 MeV.

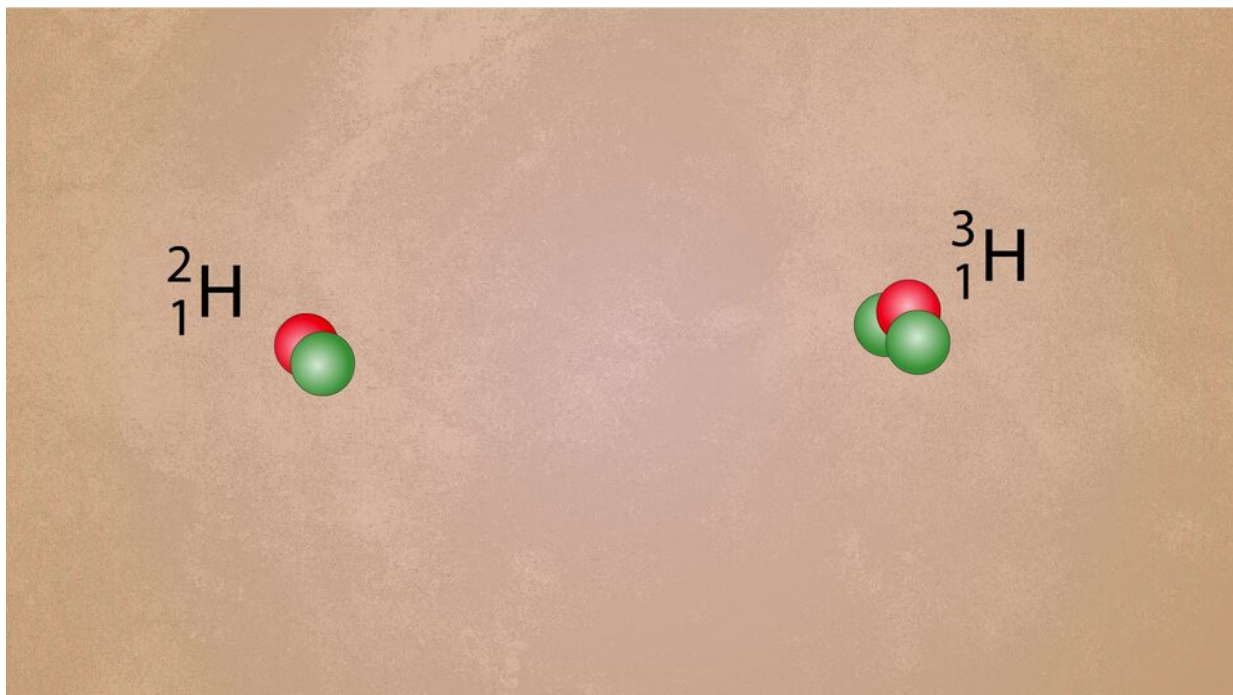
Możliwe są inne schematy przebiegu reakcji syntezy jąder, znacznie korzystniejsze energetycznie:



lub



Podczas syntezy jądra trytu i deuteru (ostatni schemat) zostaje uwolniona energia która, w przeliczeniu na nukleon, czterokrotnie przewyższa energię uzyskaną z rozszczepienia jądra uranu  ${}^{238}\text{U}$ .



Film dostępny pod adresem </preview/resource/R1HPkSFTQmOLi>

Reakcja syntezy jądra deuteru i trytu w jądro helu

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

Animacja przedstawia reakcję syntezy jądra deuteru i trytu w jądro helu.

---

Spróbujmy teraz odpowiedzieć na pytanie: jakie należy stworzyć warunki, aby umożliwić przebieg reakcji syntezy lekkich jąder?

Główną przeszkodą są oddziaływania elektryczne między jądrami, mającymi zawsze ładunek dodatni. Aby mogła zajść reakcja, jądra muszą się znaleźć w wystarczająco małej odległości (dla jąder deuteru jest to ok.  $10^{-15}$  m). Należy więc wytworzyć tak wysoką temperaturę, żeby energia kinetyczna jąder była na tyle duża, aby mogły one się do siebie zbliżyć i w rezultacie zainicjować przebieg reakcji. Przykładowo: łączenie ze sobą dwóch jąder deuteru wymaga temperatury, jaka panuje na Słońcu:  $T \approx 10^7$  K. Reakcję syntezy jąder, która zachodzi pod wpływem wysokiej temperatury, nazywamy **reakcją termojądrową**.

Jak widać, przeprowadzenie reakcji termojądrowej wymaga dostarczenia ogromnych ilości energii. Aby równoważyła ona wkład energetyczny niezbędny do wywołania reakcji, temperatura próbki materiału powinna być jeszcze wyższa i wynosić co najmniej  $35 \cdot 10^7$  K. Wzrost temperatury sprawia, że zwiększa się liczba zderzeń, a tym samym zwiększa prawdopodobieństwo zachowania ciągłości procesu. Jednak materia znajduje się wówczas w stanie **plazmy** i jest całkowicie zjonizowana. Kontrola przebiegu reakcji termojądrowej wymaga więc nie tylko wytworzenia **gorącej plazmy**, lecz także odizolowania jej od otoczenia. Wieloletnie próby uzyskania korzystnego bilansu energetycznego fuzji termojądrowej nie przyniosły pomyślnych rezultatów. Dotychczas żadnemu z ośrodków prowadzących nad nią badania nie udało się wytworzyć większej ilości energii niż ta, którą należało dostarczyć w celu podtrzymania przebiegu reakcji.

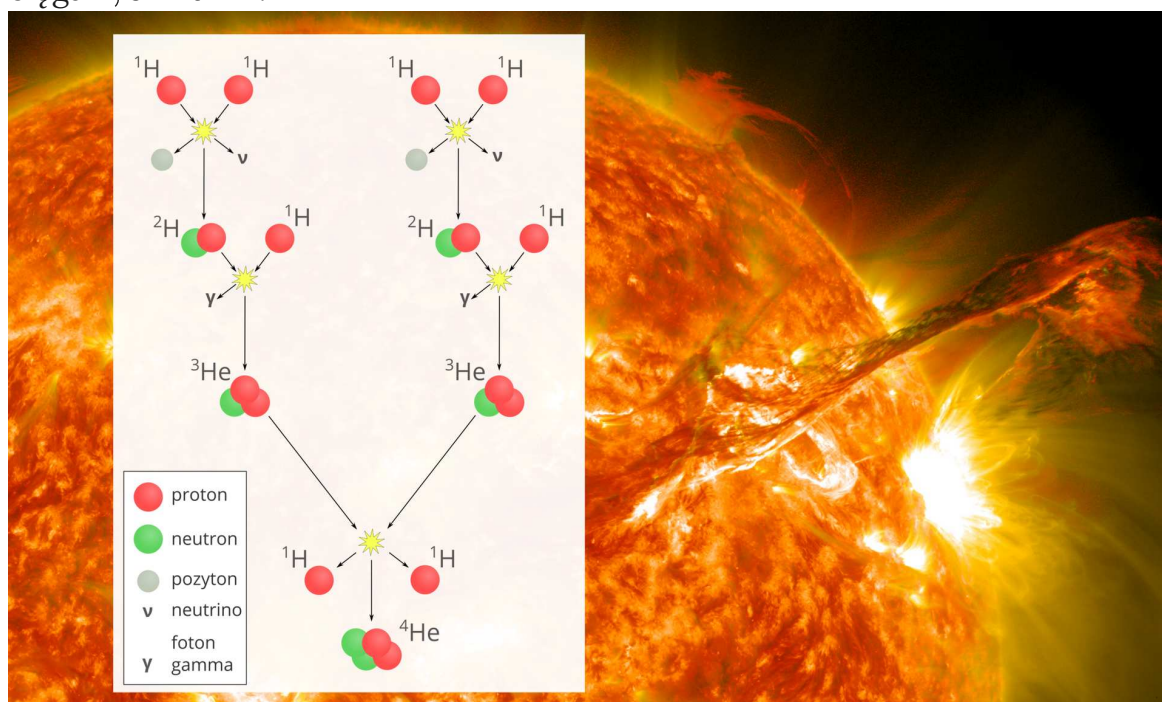
## Polecenie 1

Wymień różnice między uzyskiwaniem energii podczas spalania np. węgla a uzyskiwaniem jej w reakcji łączenia się jąder pierwiastków (syntezy).

Źródło: Uniwersytet Przyrodniczy we Wrocławiu, licencja: CC BY 3.0.

## Skąd pochodzi energia słoneczna?

Reakcje termojądrowe są głównym źródłem energii gwiazd, w tym Słońca. W ciągu jednej sekundy Słońce wypromieniowuje energię rzędu  $10^{26}$  J, a temperatura jego centralnej części sięga  $1,3 \cdot 10^7$  K.



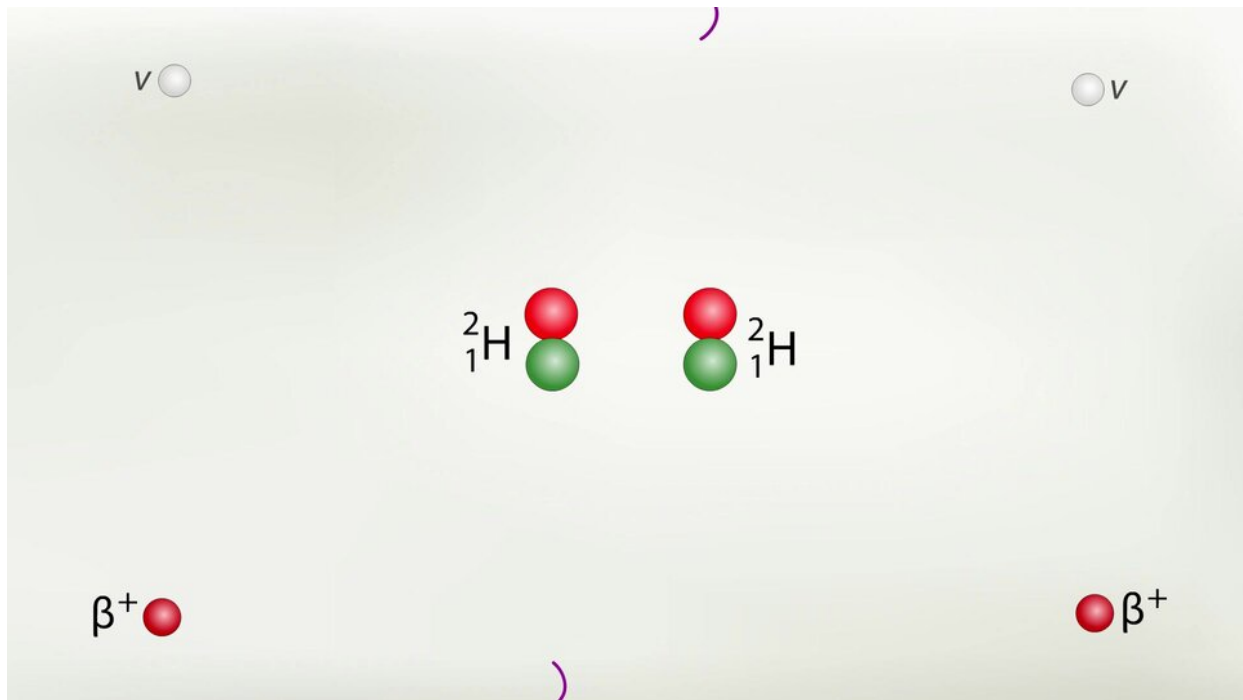
Reakcje termojądrowe są źródłem energii słonecznej

Źródło: NASA Goddard Photo and Video, edycja: Uniwersytet Przyrodniczy we Wrocławiu, dostępny w internecie: <https://www.flickr.com>, licencja: CC BY 2.0.

Aby wytłumaczyć emisję tak olbrzymich ilości energii, w 1938 r. zaproponowano protonowo-protonowy cykl reakcji.



Cykl protonowo-protonowy opiera się na reakcjach syntezy jąder wodoru, które to reakcje prowadzą do wytworzenia jąder helu, czemu towarzyszy wydzielanie olbrzymich ilości energii, w tym promieniowania gamma. Jądro  ${}^2_1\text{H}$  powstałe w pierwszej reakcji nazywa się deuteronem (od nazwy izotopu wodoru – deuteru).



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

Cykl protonowo-protonowy

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

Animacja przedstawiająca cykl protonowo-protonowy.

### Polecenie 2

Po połączeniu dwóch jąder deuteru  ${}^2_1\text{H}$  powstają izotop helu  ${}^3_2\text{He}$  oraz pewna cząstka. Jak się ona nazywa?

Źródło: Uniwersytet Przyrodniczy we Wrocławiu, licencja: CC BY 3.0.

## Bomba wodorowa i perspektywy kontrolowanej syntezy termojądrowej

Stosunkowo łatwo udało się wykorzystać reakcję termonuklearną do celów militarnych. Skonstruowano tzw. bombę wodorową, która wykorzystuje niekontrolowaną reakcję syntezy

jąder helu z deuteru i trytu. Energia wyzwolona podczas wybuchu takiej bomby znacznie przewyższa energię wybuchu zwykłych bomb jądrowych i jest równoważna energii wyzwolonej podczas wybuchu ponad 50 **megaton TNT** (trójnitrotoluenu), czyli 50 milionów ton trotylu.

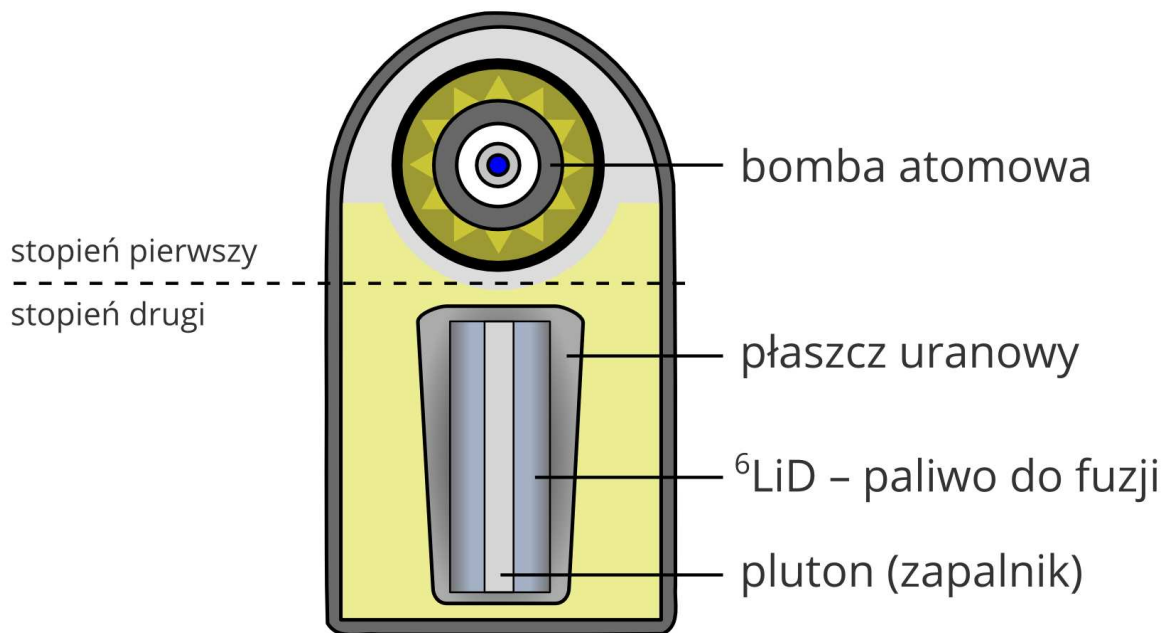


Pierwsza brytyjska próba bomby wodorowej, przeprowadzona na Wyspie Bożego Narodzenia

Źródło: Royal Air Force, dostępny w internecie: <http://commons.wikimedia.org> [dostęp 28.07.2022], domena publiczna.

Głównym problemem, jaki napotkali konstruktorzy bomb wodorowych, było utrzymanie przez odpowiednio długi czas na tyle wysokiej temperatury i wysokiego ciśnienia, aby zainicjować reakcję syntezy. W tym celu wykorzystano bombę jądrową, która pełni funkcję zapalnika. Masa reagująca (deuterek litu) otacza bombę atomową. Może być pokryta dodatkową warstwą uranu  $^{238}\text{U}$ , co dodatkowo zwiększa efektywną moc bomby.

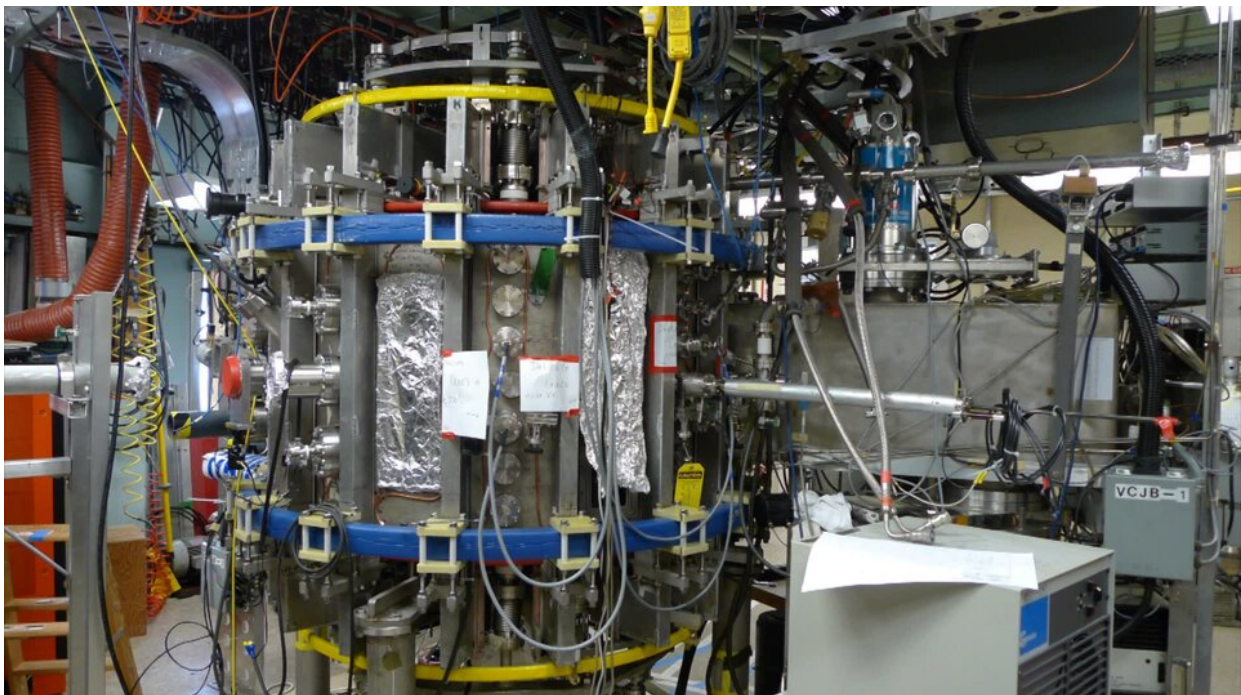
Skutki wybuchu bomby wodorowej są przerażające. Temperatura w epicentrum może osiągnąć nawet do  $10^8\text{ K}$ , skażeniem promieniotwórczym jest objęty zdecydowanie większy obszar niż w przypadku „zwykłej” bomby atomowej, a zniszczenia wywołane falą uderzeniową są ogromne.



#### Konstrukcja bomby wodorowej

Źródło: Dake, Fastfission, Ireneusz Benzar, edycja: Uniwersytet Przyrodniczy we Wrocławiu, dostępny w internecie: <https://commons.wikimedia.org> [dostęp 31.05.2022], licencja: CC BY-SA 3.0.

Wykorzystanie energii syntezy jądrowej do celów inne niż militarne okazało się znacznie trudniejsze. Utrzymywanie reakcji przez długi czas oraz ciągłe odprowadzanie uzyskiwanej energii są niezwykle skomplikowane. Pamiętajmy, że w temperaturze, w której zachodzi ta synteza wszystkie znane materiały są w stanie lotnym. Na razie cały proces pochłania więcej energii niż jej dostarcza. Zachodzi w urządzeniach nazywanych **tokamakami**. Tokamak to (z ros. *toroidalna kamiera s magnitnymi katuszkami*) **toroidalna komora z cewkami magnetycznymi**. Koncepcję tokamaka w 1950 r. opracowali Igor Tamm i Andriej Sacharow, a pierwszy egzemplarz tego urządzenia zbudowano w Moskwie w 1956 roku. Obecnie największy tokamak o nazwie JET (a ang. *Joint European Torus*) pracuje w Wielkiej Brytanii i służy do przygotowania pracy reaktora **ITER**.



Film dostępny pod adresem </preview/resource/RaNCunWLvi2kN>

Budowa reaktora termojądrowego

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

Na filmie wyświetlane są zdjęcia przedstawiające wygląd reaktora termojądrowego – Tokamak.

Tokamak wytwarza plazmę w komorze wyładowań i utrzymuje ją kosztem energii dostarczanej przez prąd elektryczny o natężeniu zależnym od typu tokamaka, sięgającym nawet miliona amperów. Plazma dodatkowo stabilizowana jest przez pole magnetyczne. Komora wyładowań ma kształt toroidalny.

Pierwszym reaktorem termojądrowym, który ma wytwarzać więcej energii niż zużywać, będzie reaktor ITER. Jego nazwa pochodzi od pierwszych liter angielskiej nazwy: *International Thermonuclear Experimental Reactor*. Powstaje na południu Francji, a jego rozruch planowany jest na rok 2025.

### Polecenie 3

W jakiej formie wyzwala się energia w reakcji termojądrowej? Zastanów się nad odpowiedzią.

Źródło: Uniwersytet Przyrodniczy we Wrocławiu, licencja: CC BY 3.0.

## Podsumowanie

- Reakcje syntezy lekkich jąder atomowych są niezwykle wydajnym źródłem energii, ale trudno jest kontrolować te reakcje.
- W wyniku reakcji syntezy, jądra helu zwykle tworzone są z jąder izotopów wodoru – deuteru i trytu. Wydzielana energia jest wynikiem deficytu masy (masa jądra helu jest mniejsza od sumy mas jąder wodoru):
  - ${}^2_1\text{H} + {}^2_1\text{H} \rightarrow {}^3_2\text{He} + n + 3,25 \text{ MeV}$
  - ${}^2_1\text{H} + {}^2_1\text{H} \rightarrow {}^3_1\text{H} + p + 4,03 \text{ MeV}$
  - ${}^2_1\text{H} + {}^3_1\text{H} \rightarrow {}^4_2\text{He} + n + 17,6 \text{ MeV}$
- Żeby zaszła reakcja syntezy, energia kinetyczna jąder musi być na tyle duża, aby pokonać siły odpychania kulombowskiego. Ponadto temperatura musi wynosić ok.  $10^7 \text{ K}$ , co sprawia, że takie reakcje nazywamy reakcjami termojądrowymi.
- W reakcjach syntezy jądrowej masa krytyczna nie ma znaczenia.

- Do przeprowadzenia reakcji termojądrowej potrzebna jest duża ilość energii, która powoduje gwałtowny wzrost temperatury. Materia w tak wysokiej temperaturze znajduje się w stanie plazmy.
- Reakcje termojądrowe trudno kontrolować, ponieważ plazma nie może mieć kontaktu z pozostałymi elementami aparatury pomiarowej i dodatkowo musi być stabilizowana polem magnetycznym. Ponadto, trudno uzyskać bardzo wysoką temperaturę, która jest potrzebna, aby reakcja syntezy była korzystna energetycznie.
- Energia, którą emituje Słońce powstaje w wyniku naturalnych reakcji termojądrowych, zwanych cyklem protonowo-protonowym.
  - ${}^1_1\text{H} + {}^1_1\text{H} \rightarrow {}^2_1\text{H} + e^+ + \text{neutrino elektronowe} + 1,44 \text{ MeV}$
  - ${}^1_1\text{H} + {}^2_1\text{H} \rightarrow {}^3_2\text{He} + 5,49 \text{ MeV}$
  - ${}^3_2\text{He} + {}^3_2\text{He} \rightarrow {}^4_2\text{He} + 2 \cdot {}^1_1\text{H} + 12,85 \text{ MeV}$
- Cykl protonowo-protonowy opiera się na reakcjach syntezy jąder wodoru, które to reakcje prowadzą do wytworzenia jąder helu. Temu procesowi towarzyszy wydzielanie olbrzymich ilości energii, w tym promieniowania gamma.
- Przykładem niekontrolowanej i sztucznie wywołanej reakcji jądrowej jest bomba termojądrowa (wodorowa).
- Próby kontrolowania łańcuchowych reakcji termojądrowych odbywają się w reaktorach termojądrowych np. w tokamakach. Nie udało się jednak przeprowadzić takiej reakcji korzystnej energetycznie (reaktor zużywa więcej energii niż jej wytwarza). Na koniec 2021 r., w chińskim EAST (*Experimental Advanced Superconducting Tokamak*), udało się osiągnąć rekordowy wynik czasu utrzymania plazmy w stanie wysokiej temperatury, wynoszący 1056 sekund. Reaktor ITER – budowany obecnie na południu Francji przez Unię Europejską, Japonię, Rosję, USA, Chiny, Koreę Południową i Indie – powinien umożliwić praktyczne wykorzystanie energii syntezy jader.

#### Polecenie 4

Najpierw mówiliśmy o otrzymywaniu energii z reakcji rozpadu, a teraz opisujemy otrzymywanie energii w reakcji syntezy jądrowej. Dlaczego w dwóch przeciwstawnych reakcjach jesteśmy w stanie uzyskiwać energię? Która z tych reakcji jest wydajniejsza, jeśli chodzi o uzyskiwanie energii? Zastanów się nad odpowiedzią. Ewentualne notatki możesz zapisać w polu poniżej.

## Ćwiczenie 1

Z jądra deuteru i jądra  $^3\text{He}$  w reakcjach syntezy możemy otrzymać jądro  $^4\text{He}$ . Zapisz tę reakcję i oblicz wartość wydzielanej energii.

Źródło: Uniwersytet Przyrodniczy we Wrocławiu, licencja: CC BY 3.0.

### Polecenie 5

Reakcje termojądrowe zachodzą wewnątrz Słońca i produkują duże ilości promieniowania gamma. Dlaczego w promieniowaniu wychodzącym z powierzchni Słońca przeważa promieniowanie widzialne? Zastanów się nad odpowiedzią. Ewentualne notatki możesz zapisać w polu poniżej.

Źródło: Uniwersytet Przyrodniczy we Wrocławiu, licencja: CC BY 3.0.

### Polecenie 6

Znajdź i przeczytaj informacje o budowie tokamaków oraz projekcie ITER. Być może już niedługo będzie można korzystać z energii produkowanej przez te urządzenia. Ewentualne notatki możesz zapisać w polu poniżej.

Źródło: Uniwersytet Przyrodniczy we Wrocławiu, licencja: CC BY 3.0.

## Zadanie podsumowujące moduł

## Ćwiczenie 2

Uzupełnij luki w zdaniach, wstawiając w nie odpowiednie kafelki lub klikając i wybierając odpowiedź z listy rozwijalnej.

Reakcje syntezy jądrowej wymagają  temperatur. Jest to spowodowane tym, że biorące udział w reakcji cząstki  się i muszą mieć odpowiednio dużą , aby się mogły do siebie zbliżyć.

przyciągają

energię kinetyczną

wysokich

odpychają

niskich

Zródło: Uniwersytet Przyrodniczy we Wrocławiu, licencja: CC BY 3.0.

## Słownik

### bomba wodorowa (bomba termojądrowa)

zapalnikiem bomby wodorowej jest bomba jądrowa umieszczona wewnątrz masy reagującej – deuterku litu. Aby zwiększyć moc wybuchu bomby termojądrowej, jej wsad jest pokryty dodatkową warstwą uranu  $^{238}\text{U}$ ; wybuch bomby jądrowej stwarza warunki, w których może dojść do lawinowej (niekontrolowanej) reakcji syntezy termojądrowej.

### cykl protonowo-protonowy

cykl reakcji termosyntezy zachodzących na Słońcu; proces, w wyniku którego z jąder izotopów wodoru powstają jądra helu, czemu towarzyszy wydzielanie olbrzymich ilości energii.

### gorąca plazma (plazma termojądrowa)

całkowicie zjonizowany gaz o temperaturze sięgającej kilku milionów kelwinów, w którym mogą zachodzić reakcje syntezy termojądrowej.

### ITER

międzynarodowy projekt badawczy, którego celem jest uruchomienie eksperymentalnego reaktora termonuklearnego (tokamaka). Ma to być pierwsze urządzenie, w którym zostanie uzyskany dodatni bilans energetyczny, tj. ilość wyprodukowanej energii uzyskanej w cyklu jego pracy ma przekroczyć ilość energii zużytej na podtrzymanie kontrolowanej reakcji syntezy jądrowej, która według założeń powinna produkować 500 MW mocy w 400-sekundowym impulsie. Reaktor ma być uruchomiony w 2025 roku.

### megatona TNT (MT)

milion ton trotylu (TNT); energia bomby o mocy 1 MT odpowiada ilości energii powstałej podczas wybuchu miliona ton trotylu.

### neutrino elektronowe

cząstka obojętna elektrycznie, która nie posiada masy spoczynkowej; towarzyszy emisji elektronu w procesie rozpadu beta.

### **plazma**

niemal całkowicie zjonizowany gaz; ze względu na swoje własności nazywany jest czwartym stanem skupienia materii.

### **reakcja syntezy jądrowej**

reakcja polegająca na łączeniu dwóch jąder atomowych w jedno. Powstałe jądro ma mniejszą masę od sumy mas jąder, z których zostało utworzone, i jednocześnie większą energię wiązania od energii wiązania każdego z jąder biorących udział w reakcji. Kosztem różnicy mas (deficyt masy) wydzielą się ogromna energia, m.in. w postaci promieniowania gamma.

### **reakcja termojądrowa**

reakcja syntezy jądrowej, która może zachodzić tylko w bardzo wysokiej temperaturze.

### **tokamak**

rodzaj reaktora termojądrowego o toroidalnej komorze wyładowań.