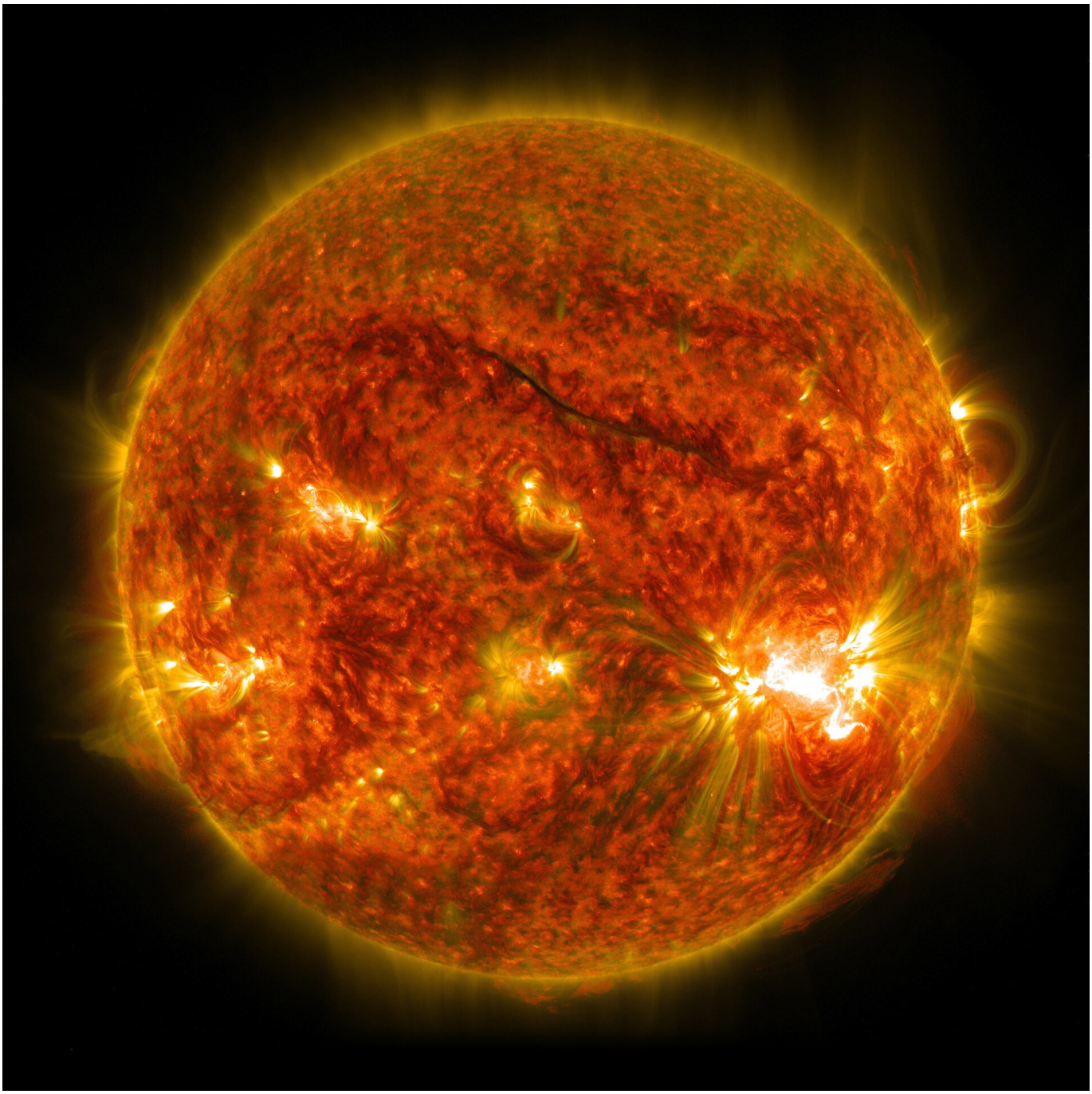


Reakcje termojądrowe zachodzące w gwiazdach - cykl protonowy

- Wprowadzenie
- Przeczytaj
- Film samouczek
- Sprawdź się

- Dla nauczyciela

Czy to nie ciekawe?

Gwiazdy świecą – obserwujemy to zjawisko codziennie, ponieważ w ciągu dnia świeci najbliższa nam gwiazda, wokół której krąży Ziemia – Słońce. Nocą zaś widzimy na niebie świecące punkty – inne gwiazdy. Wszystkie ciała niebieskie krążące w kosmosie powstały w ten sam sposób – z zapadającej się grawitacyjnie chmury materii i pyłu. W jej skład wchodziły głównie wodór i hel z niewielką ilością innych pierwiastków. Dlaczego więc gwiazdy świecą intensywnie, a inne ciała niebieskie jedynie odbijają światło? Skąd w gwiazdach bierze się energia emitowanego promieniowania elektromagnetycznego?

Z reakcji termojądrowych zachodzących w centrum gwiazd! Podczas fuzji jądrowych wewnątrz gwiazdy wydzielana jest energia, która przedostaje się na jej powierzchnię i stamtąd zostaje wyświecona w postaci promieniowania elektromagnetycznego w przestrzeń kosmiczną.

Dlaczego tak się dzieje?
Jakie dokładnie reakcje dają taki efekt?
Czy reakcje te mają związek z wiekiem lub rodzajem gwiazdy?
Czemu nie zachodzą w mniejszych ciałach niebieskich?

O tym dowiesz się w tym e-materiale.

Twoje cele

- poznasz reakcje cyklu protonowego,
- opiszesz sposób wyświecania energii w gwiazdach,
- określisz, na jakim etapie życia gwiazd zachodzi cykl protonowy,
- wyjaśnisz, dlaczego gwiazdy świecą, a inne ciała, jak planety jedynie odbijają światło.

Przeczytaj

Warto przeczytać

Niewielkie świecące punkciki, które każdy widział na nocnym niebie, to tak naprawdę ogromne kule gorącego gazu. Jest kilka wyjątków, które można odróżnić po stałym, nie zmieniającym się wskutek „mrugania" blasku - to są planety. Gwiazdy, które widzimy, są oddalone od nas o kilka, kilkanaście, niekiedy nawet o setki lat świetlnych (1 rok świetlny to odległość równa około 10^{13} km). Nasze Słońce jest oddalone od Ziemi o zaledwie 150 mln km, dzięki temu w ciągu dnia tak skutecznie oświetla i ogrzewa Ziemię. Z kolei planety (w tym Ziemia) i inne ciała niebieskie praktycznie nie świecą – jedynie odbijają światło od Słońca.

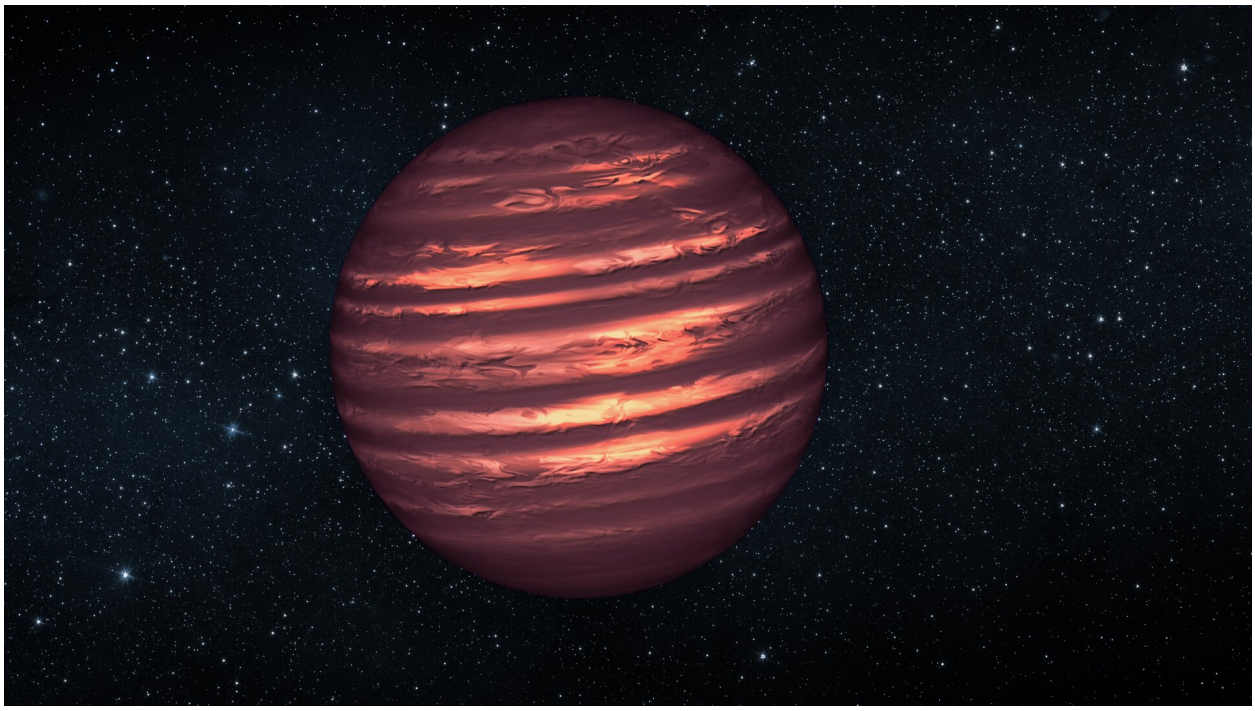
> **Ciekawostka**
>
> Każde ciało niebieskie emituje promieniowanie elektromagnetyczne, na przykład kosztem swojej energii wewnętrznej. Jednak ten zasób energii w planetach, planetoidach, kometach i temu podobnych ciałach jest nieodnawialny, podczas gdy w gwiazdach może on ulegać odnawianiu nawet przez miliardy lat.

Reakcje termojądrowe

Dlaczego tak się dzieje? Otóż źródłem emitowanej energii są reakcje jądrowe zachodzące we wnętrzu gwiazd. Te reakcje to łączenie jąder lżejszych pierwiastków w cięższe, zwane reakcjami termojądrowymi. Stanowią one kategorię wysoce wydajnych, egzoenergetycznych reakcji, bardzo często wieloetapowych. Najprostsze polegają na oddziaływaniu protonów ze sobą i powstawaniu w wyniku tego neutronów. Te następnie łączą się z protonami i tworzą cięższe jądra, na przykład deuteru czy helu.

Reakcje termojądrowe tylko dla gwiazd

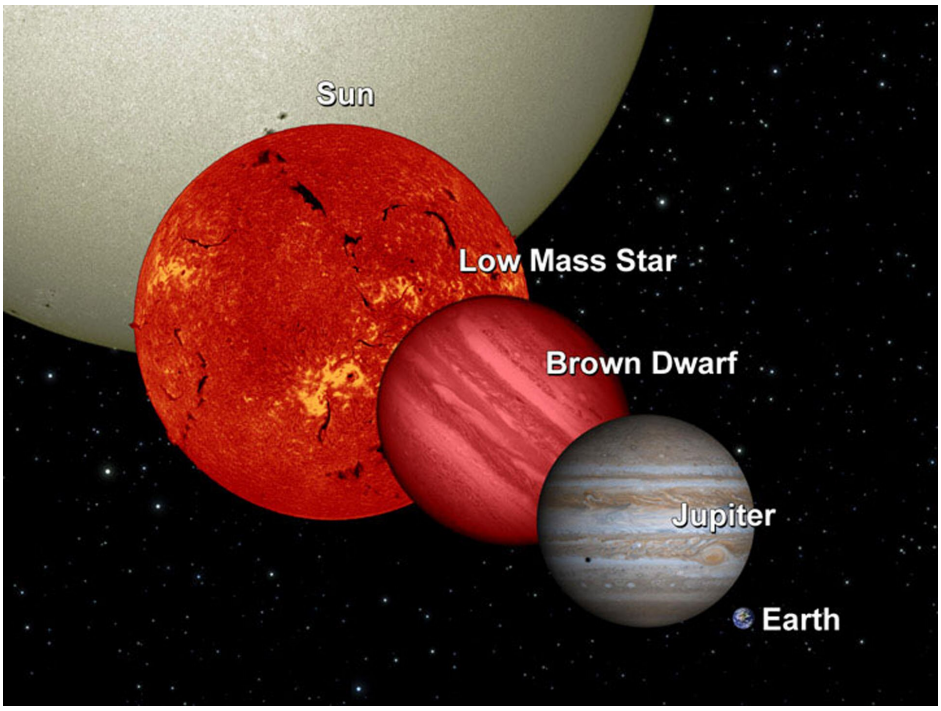
Do rozpoczęcia reakcji termojądrowej i utrzymania jej stabilnego przebiegu potrzebne są odpowiednio wysoka temperatura i duża gęstość materii. Planety i tak zwane brązowe karły (Rys. 1.) mają zbyt małą masę i zbyt niską temperaturę, aby zapoczątkować stabilny przebieg takich reakcji.



Rys. 1. Koncepcja artysty przedstawiająca brązowego karła, mającego atmosferę planety i emitującego szczątkowe światło niedoszłej gwiazdy.
Źródło: dostępny w internecie: https://www.nasa.gov/images/content/717825main_pia16609-full_full.jpg [dostęp 12.06.2022], domena publiczna.

Wprowadza się podział największych ciał niebieskich na trzy grupy ze względu na początkową masę obłoku materii, z którego się formują oraz na temperaturę, jaką może osiągnąć wnętrze takiego obłoku:

- **planety**: masy poniżej około 13 mas Jowisza, czyli $M < 2{,}5 \cdot 10^{28}$ kg oraz temperatury wnętrza poniżej miliona kelwinów;
- **brązowe karły**: masy większe niż 13 mas Jowisza, lecz mniejsze niż około 80 mas Jowisza, czyli $2{,}5 \cdot 10^{28}$ kg $< M < 15 \cdot 10^{28}$ kg oraz temperatura wnętrza rzędu kilku milionów kelwinów;
- **gwiazdy**: masy powyżej 80 mas Jowisza, czyli $M > 15 \cdot 10^{28}$ kg (masa Słońca w tej skali to $200 \cdot 10^{28}$ kg, czyli około tysiąca mas Jowisza) i temperaturach rzędu dziesięciu milionów kelwinów i więcej.



Rys. 2. Porównanie wielkości Ziemi, Jowisza, brązowego karła, gwiazdy małomasowej i naszego Słońca.
Źródło: dostępny w internecie: https://www.nasa.gov/images/content/402717main_pia12462-full.jpg [dostęp 12.06.2022], domena publiczna.

Podział ten pozwala wyróżnić gwiazdy jako obiekty wystarczająco masywne, by w ich wnętrzu rozpoczęły się i stabilnie przebiegały reakcje termojądrowe.
Planety i mniejsze ciała niebieskie mają zbyt mało materii, są zbyt chłodne, aby zaszły w ich wnętrzach jakiekolwiek procesy termojądrowe, których wynikiem jest świecenie.
W brązowych karłach natomiast dochodzi, losowo, do zainicjowania nietrwałych przemian jądrowych: deuteru z wodorem oraz litu z wodorem. Obszary objęte takimi reakcjami są niewielkie, a wydzielana energia nie wystarcza na podtrzymanie odpowiednio wysokiej temperatury takiego obszaru. Przez to reakcje te są bardzo nietrwałe i nie stanowią stabilnego źródła energii w skali całego wnętrza obiektu. Dlatego brązowe karły nie są uznawane za gwiazdy, ani też za planety.

> **Ciekawostka**
>
> Reakcje termojądrowe zachodzą spontanicznie jedynie w gwiazdach. Na Ziemi umiemy zainicjować takie reakcje, natomiast nie nauczyliśmy się skutecznie kontrolować ich przebiegu. Dlatego właśnie potrafimy doprowadzić do wybuchu bomby wodorowej, natomiast nie opanowaliśmy jeszcze działania reaktora termojądrowego, mimo ponad pół wieku wysiłków.
> Nadzieje ludzkości na „zapalenie Słońca na Ziemi” staną się, być może, realne dzięki międzynarodowemu przedsięwzięciu ITER (International Thermonuclear Experimental Reactor – Międzynarodowy Eksperymentalny Reaktor Termonuklearny).

Gwiazdy małomasywne i cykl protonowy

Gwiazdy małomasywne to takie, które po uformowaniu się z mgławicy miały początkową masę mniejszą niż 1,5 masy obecnego Słońca:

$$M < 1,5 M_{\odot}$$

czyli

$$M < 3 \cdot 10^{30} \text{ kg}.$$

Głównym źródłem energii w małomasywnych gwiazdach, gdy są one we wczesnym stadium swego życia i występują na ciągu głównym, jest **seria reakcji termojądrowych nazywana cyklem protonowym**.

> **Ciekawostka**
>
> Cykl protonowy nazywa się również fuzją wodoru, ponieważ jądrem wodoru jest właśnie pojedynczy proton. Często w fizyce jądrowej, także w astronomii, używa się określenia „spalanie wodoru", mimo że proces ten nie ma związku z ogniem, utlenianiem, czy z jakąkolwiek reakcją **chemiczną**.
> Określenie to bierze się stąd, że jądra wodoru, protony, zamieniają się w jądra innych pierwiastków (najczęściej są to jądra helu). Powstają przy tym inne cząstki i emitowana jest energia, co przywodzi na myśl „ziemskie spalanie".

Reakcje w cyklu protonowym mogą przebiegać różnymi ścieżkami. Całościowy bilans tego cyklu można schematycznie zapisać jako:

$$4\,{}^{1}_{1}\mathrm{H} \rightarrow {}^{4}_{2}\mathrm{He} + 2\mathrm{e}^{+} + 2\nu_e + \mathrm{n}\gamma$$

Oznacza to, że z czterech protonów (czterech jąder wodoru) otrzymujemy jedno jądro czwartego izotopu helu, dwa pozytony (e^{+}), dwa neutrina elektronowe (ν_e) oraz fotony, najczęściej dwa lub trzy.

Bilans energetyczny cyklu protonowego

Cykl ten ma charakter egzoenergetyczny. Połączenie czterech protonów w jądro czwartego helu powoduje wydzielenie około 26 MeV (megaelektronowoltów) energii. Neutrina unoszą od połowy do jednego megaelektronowolta energii bezpośrednio poza gwiazdę; reszta pozostaje w gwieździe w postaci energii kinetycznej produktów reakcji. Ta jest stopniowo przetwarzana w energię wewnętrzną gwiazdy, przekazywana ku jej powierzchni, skąd jest emitowana w przestrzeń, głównie w postaci promieniowania elektromagnetycznego, ale także strumienia naładowanych cząstek, zwanych wiatrem słonecznym.
Oba pozytony anihilują z elektronami obecnymi we wnętrzu gwiazdy. Każdy proces anihilacji zwiększa energię wewnętrzną gwiazdy o około 1 MeV.

Wydzielona energia ΔE związana jest ze zmniejszeniem się masy produktów reakcji w porównaniu z substratami o Δm, zgodnie z równaniem

$$\Delta E = \Delta m \cdot c^2$$

Choć Δm stanowi niecały procent masy czterech protonów będących substratami reakcji, to gwiazda taka jak nasze Słońce zmniejsza swą masę w tempie milionów ton na sekundę.

Przebieg ścieżki ppI cyklu protonowego

Jedna ze ścieżek cyklu protonowego, najkrótsza, nazywana jest ppI. Składają się na nią trzy reakcje, w których uczestniczą jedynie protony i powstałe z nich jądra deuteru oraz trzeciego i czwartego izotopów helu. W tym sensie jest to ścieżka najmniej wymagająca, gdyż nie wymaga obecności żadnych innych, bardziej złożonych jąder atomowych. Ścieżka ppI nie wymaga też temperatur powyżej 10 milionów kelwinów - dominuje ona więc w gwiazdach młodych.

W pierwszej reakcji **ścieżki ppI**, zderzają się dwa protony i dają w wyniku deuteron, czyli jądro deuteru (jest to drugi izotop wodoru; stan związany protonu i neutronu) oraz pozyton i neutrino.

1. ${}^1_1\mathrm{H} + {}^1_1\mathrm{H} \rightarrow {}^2_1\mathrm{H} + e^+ + \nu_e$,

W drugiej reakcji tej ścieżki deuteron zderza się z protonem tworząc trzeci izotop helu; towarzyszy temu emisja fotonu.

2. ${}^1_1\mathrm{H} + {}^2_1\mathrm{H} \rightarrow {}^3_2\mathrm{He} + \gamma$,

W reakcji trzeciej, dwa jądra helu trzy tworzą jądro helu cztery, czemu towarzyszy emisja dwóch protonów.

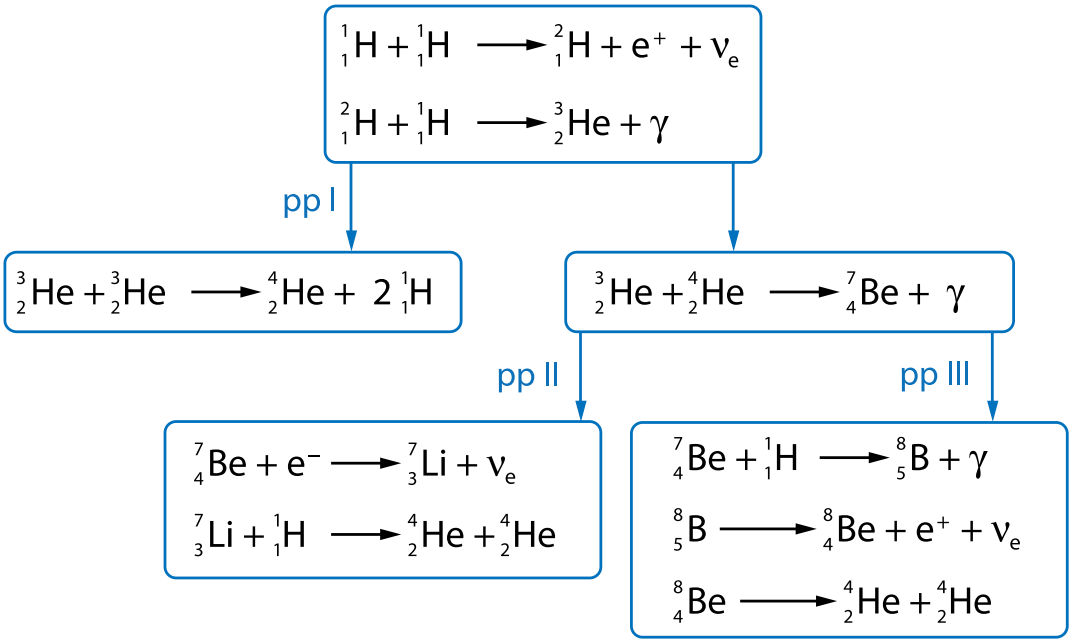
3. ${}^3_2\mathrm{He} + {}^3_2\mathrm{He} \rightarrow {}^4_2\mathrm{He} + 2{}^1_1\mathrm{H}$,

Bez trudu zauważysz, że na jedną reakcję (3) muszą przypadać po dwie reakcje (1) oraz (2).

Udział ścieżki ppI w produkcji energii w Słońcu to niecałe 70%. Wynika to faktu, że jest ono gwiazdą w „wieku średnim" - temperatura w jego wnętrzu wynosi około piętnastu milionów kelwinów i powstały już w nim jądra pierwiastków cięższych, niż hel. Chodzi tu o lit, beryl i bor - jądra tych pierwiastków umożliwiają realizację dwóch pozostałych ścieżek cyklu protonowego.

Ścieżki ppII i ppIII cyklu protonowego

Wraz ze wzrostem temperatury wewnątrz gwiazdy i pojawieniem się coraz większych ilości jąder helu, litu, berylu i boru, coraz wydajniejsze stają się dwie kolejne ścieżki cyklu protonowego: ppII i ppIII. Na rys. 3. pokazano schematy reakcji we wszystkich trzech ścieżkach:



Rys. 3. Przebieg trzech ścieżek cyklu protonowego.

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

Zwróć uwagę, że wytworzone w wyniku fuzji jądra berylu i litu, a w ścieżce ppIII także boru, w dalszych etapach zostają przekształcone lub się rozpadają. Dlatego też nie pojawiają się one w całościowym bilansie.

W Słońcu na ścieżce ppII powstaje nieco ponad 30%, natomiast na ścieżce ppIII jedynie około 0,1% całkowitej energii wyzwalanej w cyklu protonowym. Ten ostatni, bardzo niewielki udział wynika z niezbyt wysokiej temperatury wnętrza Słońca - około piętnastu milionów kelwinów - podczas gdy ścieżka ppIII staje się prawdopodobna dopiero przy temperaturach około dwudziestu pięciu milionów kelwinów. W większych, bardziej masywnych i przez to gorętszych gwiazdach ścieżka ppIII ma większy udział w wyzwalaniu energii.

> **Ciekawostka**
>
> Gdy temperatura wnętrza gwiazdy wzrasta, przekraczając kolejne dziesiątki milionów kelwinów, coraz wydajniejszy staje się inny cykl reakcji termojądrowych, tzw. cykl CNO. Polega on także na syntezie jądra helu z czterech protonów, jednak wymaga istnienia w gwieździe jąder węgla, azotu i tlenu - stąd nazwa cyklu. Na temat fuzji w masywnych gwiazdach możesz się dowiedzieć w e-materiale „Reakcje termojądrowe zachodzące w gwiazdach – cykl węglowo-azotowo-tlenowy”.

Tempo przebiegu reakcji termojądrowych - bomba czy reaktor?

Reakcje termojądrowe we wnętrzu gwiazd przebiegają na ogół bardzo powoli. Przez większą część swego życia typowa gwiazda - taką właśnie jest Słońce - znacznie bardziej przypomina spokojnie i stabilnie pracujący reaktor termojądrowy niż wybuchającą w niekontrolowany sposób bombę wodorową.

Dla zainteresowanych

Kontrola - a dokładniej: samokontrola - tempa spalania wodoru w hel wynika ze specyfiki samych reakcji. Przypomnij sobie pierwszą reakcję cyklu:

$$ {}^{1}_{1}\mathrm{H} + {}^{1}_{1}\mathrm{H} \rightarrow {}^{2}_{1}\mathrm{H} + e^{+} + \nu_{\mathrm{e}} $$

By w zderzeniu dwóch protonów mógł powstać deuteron, jeden z nich musi zamienić się w neutron z jednoczesną emisją pozytonu i neutrina. Wiesz zapewne, że jest to schemat przemiany β^{+}. Taka przemiana wymaga, by nukleony były ze sobą ściśnięte jak w jądrze atomowym. Jednak zbliżenie do siebie dwóch odpychających się elektrycznie protonów na odległość rzędu jednego femtometra (10^{-15} m) jest niezmiernie mało prawdopodobne, nawet w temperaturze milionów kelwinów. Mówimy, że reakcje, w których biorą udział elektrony, pozytony czy neutrina są powolne - w porównaniu z reakcjami, w których uczestniczą jedynie nukleony.
To właśnie powoduje, że protony w gwieździe tworzą jądra deuteru bardzo powoli, a liczebność tych ostatnich warunkuje tempo zachodzenia kolejnych reakcji w cyklu.

Dlatego wodór nie zostaje szybko wyczerpany i Słońce, mimo że ma 4,6 miliarda lat, nadal świeci w miarę stabilnie. Tak będzie jeszcze przez ponad 5 miliardów lat. Jądro Słońca będzie wtedy składało się głównie z helu. W otoczce wokół jądra nadal będą zachodziły reakcje z wodorem, ale dojdzie do zainicjowania zupełnie nowego zestawu reakcji termojądrowych. Hel będzie w nich substratem, a produktami fuzji będą coraz cięższe pierwiastki. Przejście do tego etapu może mieć charakter nieco wybuchowy. Także reakcje w tym etapie przebiegają szybciej i bardziej burzliwie. Więcej na temat przyszłych losów Słońca, również innych gwiazd, w tym o epizodach prawdziwie wybuchowych, przeczytasz w e-materiale „Ewolucja gwiazd".

Słowniczek

brązowy karzeł

(ang.: *brown dwarf*) - obiekt gwiazdopodobny o masie zbyt małej, by mogły zachodzić w nim reakcje przemiany wodoru w hel, które są głównym źródłem energii gwiazd ciągu głównego. Od planet-olbrzymów odróżnia je to, że są zdolne do syntezy deuteru przynajmniej na początku swojego istnienia.

fuzja termojądrowa

(ang.: *nuclear fusion*) - zjawisko polegające na łączeniu się dwóch lżejszych jąder w jedno cięższe. Wynikiem fuzji mogą być, poza ciężkim jądrem, wolne neutrony, protony, także inne cząstki elementarne.

deuteron

(ang.: *deuteron*) - cząstka składająca się z protonu i neutronu; jądro drugiego izotopu wodoru, oznaczana czasami symbolem $^{1}_{1}\mathrm{H}$, a czasami symbolem D.

neutrino

(ang.: *neutrino*) - cząstka elementarna. Ma masę bliską zeru, lecz nie zerową, bardzo słabo oddziałuje z materią. Powstaje między innymi w wyniku przemiany beta, na przykład czternastego izotopu węgla, a także w reakcjach termojądrowych. Przez jeden centymetr kwadratowy Ziemi zwrócony prostopadle do Słońca przelatuje nieodczuwalnie dla Ziemi co sekundę ponad 60 miliardów neutrin.

pozyton

(ang.: *positron*) - nazywany również antyelektronem, to elementarna cząstka, która jest antycząstką elektronu. Jego masa jest równa masie elektronu.
Oddziaływanie elektronu z pozytonem często kończy się **anihilacją** obu cząstek - procesem, w którym obie zmieniają się w dwa fotony γ.

gwiazdy ciągu głównego

(ang.: *main-sequence stars*) - gwiazdy, w których jądrach zachodzą reakcje syntezy wodoru w hel. Jest to najbardziej stabilny etap życia gwiazdy. Czas, jaki dana gwiazda pozostaje w ciągu głównym, zależy od jej masy początkowej. Im gwiazda jest bardziej masywna, tym krótszy jest jej czas życia.

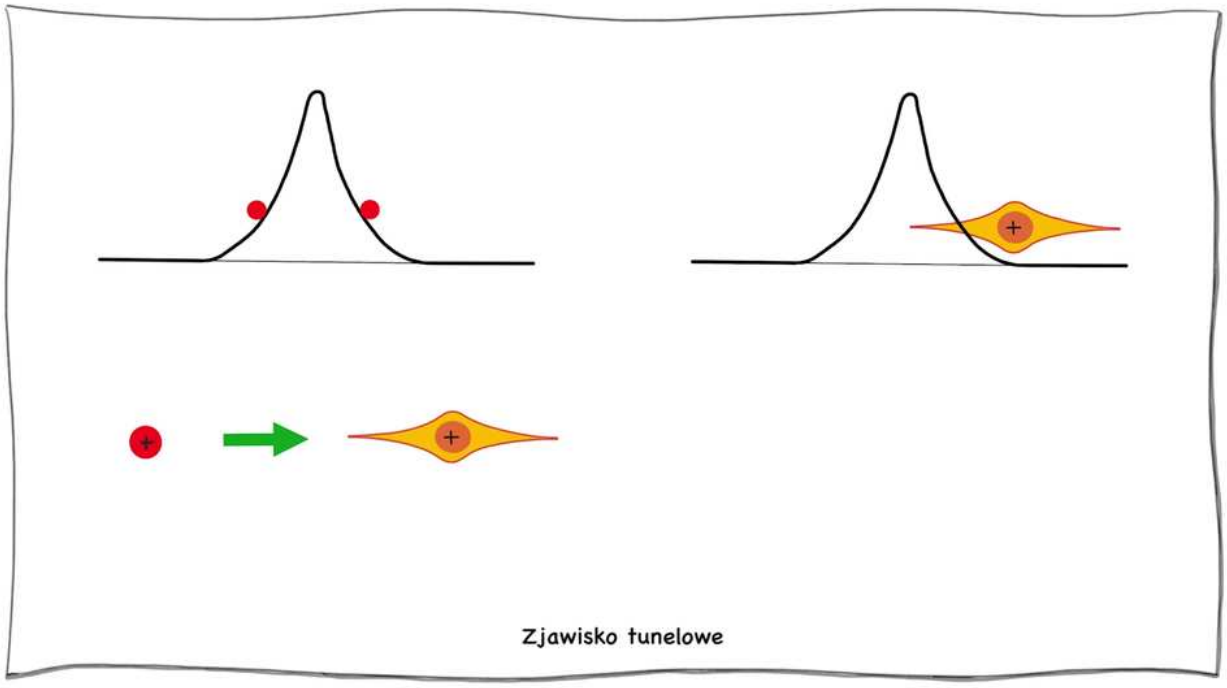
Film samouczek

Dlaczego temperatura wpływa na wydajność reakcji termojądrowych?

Polecenie 1

Wykorzystaj przygotowane pole i zapisz odpowiedź na tytułowe pytanie.

Obejrzyj następnie film samouczek i przekonaj się, czy w Twojej odpowiedzi zostały uwzględnione wszystkie czynniki występujące w zjawisku tunelowym. Nie przejmuj się, jeśli pierwszy raz w ogóle słyszysz o tym zjawisku - nie jest ono ujęte w obowiązkowym programie szkolnym.



Film dostępny pod adresem /preview/resource/R1LIXatlcxlSl

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

Zapoznaj się z audiodeskrypcją samouczka.

Polecenie 2

Oblicz wysokość bariery energii potencjalnej elektrostatycznego odpychania przy zbliżaniu do siebie dwóch protonów na odległość $r = d = 10^{-15}\ \mathrm{m}$. Odszukaj stosowne wyrażenie w samouczku i wyraź wynik w megaelektronowoltach. Przyjmij wartości stałych:

$$k = 9 \cdot 10^{9}\ \frac{\mathrm{Nm}^2}{\mathrm{C}^2};\ q_1 = q_2 = 1e = 1,6 \cdot 10^{-19}\ \mathrm{C}$$

Polecenie 3

W ostatniej scenie filmu samouczka pokazano schematycznie trzy reakcje termojądrowe. Z każdą z nich wiążemy barierę energii potencjalnej, oznaczmy je:

- E_{p1} dla reakcji syntezy deuteru z dwóch protonów;
- E_{p2} dla reakcji syntezy jądra ^{3}He z protonu i deuteru;
- E_{p3} dla reakcji syntezy jądra ^{4}He z dwóch jąder ^{3}He;

Przyjmij, że wysokości każdej z barier obliczamy dla tej samej odległości *d* pomiędzy substratami reakcji. Wskaż właściwe porównanie tych wysokości:

- ○ $E_{p1} = E_{p2} = E_{p3}$
- ○ $E_{p1} < E_{p2} < E_{p3}$
- ○ $E_{p1} < E_{p2}$; $E_{p2} = E_{p3}$
- ○ $E_{p1} = E_{p2}$; $E_{p2} < E_{p3}$
- ○ $E_{p1} > E_{p2} > E_{p3}$

Polecenie 4

Oblicz wartość średniej energii kinetycznej protonów, w warunkach przedstawionych w samouczku; wynik wyraź w kiloelektronowoltach. Odszukaj stosowne wyrażenie i przyjmij wartość stałej Boltzmanna:

$$k_{\mathrm{B}} = 1,38 \cdot 10^{-23}\ \frac{\mathrm{J}}{\mathrm{K}}$$

Sprawdź się

Pokaż ćwiczenia:

Ćwiczenie 1

Która ze ścieżek reakcji termojądrowych cyklu protonowego jest dominująca w Słońcu pod względem wydajności energii?

- ppI
- ppII
- ppIII
- Wszystkie trzy ścieżki mają porównywalną wydajność energetyczną.

Ćwiczenie 2

Ustalone jest, ponad wszelką naukową wątpliwość, że Jowisz wypromieniowuje w przestrzeń więcej energii, niż otrzymuje od Słońca. Wskaż najbardziej trafny komentarz do tego faktu:

- Mimo tego faktu, Jowisz jest planetą. Świadczy o tym jego masa, połączona z rozmiarem: w jego wnętrzu nie mogą panować warunki wymagane do zachodzenia reakcji termojądrowych, a nadwyżka emitowanej energii może pochodzić ze zgromadzonych zasobów energii wewnętrznej lub z tzw. kontrakcji grawitacyjnej – Jowisz się powoli kurczy pod własnym ciężarem.
- W związku z tym faktem, Jowisz powinien być uznany za brązowego karła. W jego wnętrzu muszą zachodzić reakcje termojądrowe, bez których nie byłoby owej nadwyżki emisji energii. Ze względu na stosunkowo niewielką masę Jowisza, reakcje te mogą być mniej wydajne, niż w przeciętnym brązowym karle, ale jednak zachodzą.
- Ten fakt wymaga uznania, że Jowisz jest gwiazdą, choć nietypową: ze względu na niską temperaturę powierzchni nie emituje promieniowania w zakresie widzialnym, lecz w dalekiej podczerwieni. Należy uznać też, że we wnętrzu Jowisza zachodzą reakcje termojądrowe z cyklu dwuprotonowego, wskutek których syntetyzowane są jądra deuteru, bez możliwości powstawania jąder helu – na to we wnętrzu Jowisza jest zbyt niska temperatura.
- Jowisz nie należy do żadnej z tych kategorii – jest gazowym olbrzymem (planetą-olbrzymem). Jest to zupełnie inna klasyfikacja obiektów, niż planeta – brązowy karzeł – gwiazda, gdyż dotyczy wyłącznie naszego Układu Słonecznego. Poza nim takie planety, jak Jowisz, Saturn, Uran czy Neptun w ogóle nie występują.

Ćwiczenie 3

Jakie warunki muszą być spełnione, aby we wnętrzu obiektu doszło do stabilnej fuzji termojądrowej i by zaczął on świecić?

- [ ] masa mniejsza niż 8 mas Jowisza
- [ ] masa powyżej 13 mas Jowisza
- [ ] masa powyżej 80 mas Jowisza
- [ ] niewielka temperatura jądra
- [ ] temperatura jądra co najmniej 10^5 K
- [ ] temperatura jądra powyżej 10^7 K

Ćwiczenie 4

Zachodzenie stabilnych reakcji termojądrowych cyklu protonowego wymaga (wskaż po jednym warunku wobec temperatury, ciśnienia i gęstości):

- [ ] temperatur odpowiednio wysokich
- [ ] temperatur odpowiednio niskich
- [ ] nie ma bezpośrednich wymagań wobec temperatury, wynika ona ze spełnienia wymagań wobec ciśnienia i gęstości
- [ ] ciśnień odpowiednio wysokich
- [ ] ciśnień odpowiednio niskich
- [ ] nie ma bezpośrednich wymagań wobec ciśnienia, wynika ono ze spełnienia wymagań wobec temperatury i gęstości
- [ ] gęstości odpowiednio wysokich
- [ ] gęstości odpowiednio niskich
- [ ] nie ma bezpośrednich wymagań wobec gęstości, wynika ona ze spełnienia wymagań wobec ciśnienia i temperatury

Ćwiczenie 5

Wskaż właściwe uzupełnienia zdań:

Stan materii w jądrze gwiazdy takiej jak Słońce, jest najbardziej zbliżony do

stanu skupienia stałego ☐ | stanu skupienia ciekłego ☐ | stanu skupienia lotnego ☐ | plazmy ☐ .

Zatem stwierdzenie, że jądro to zawiera wodór wymaga dodania określenia

metaliczny ☐ | ciekły ☐ | gazowy ☐ | w postaci swobodnych i niezwiązanych ze sobą protonów i elektronów ☐ .

Ćwiczenie 6

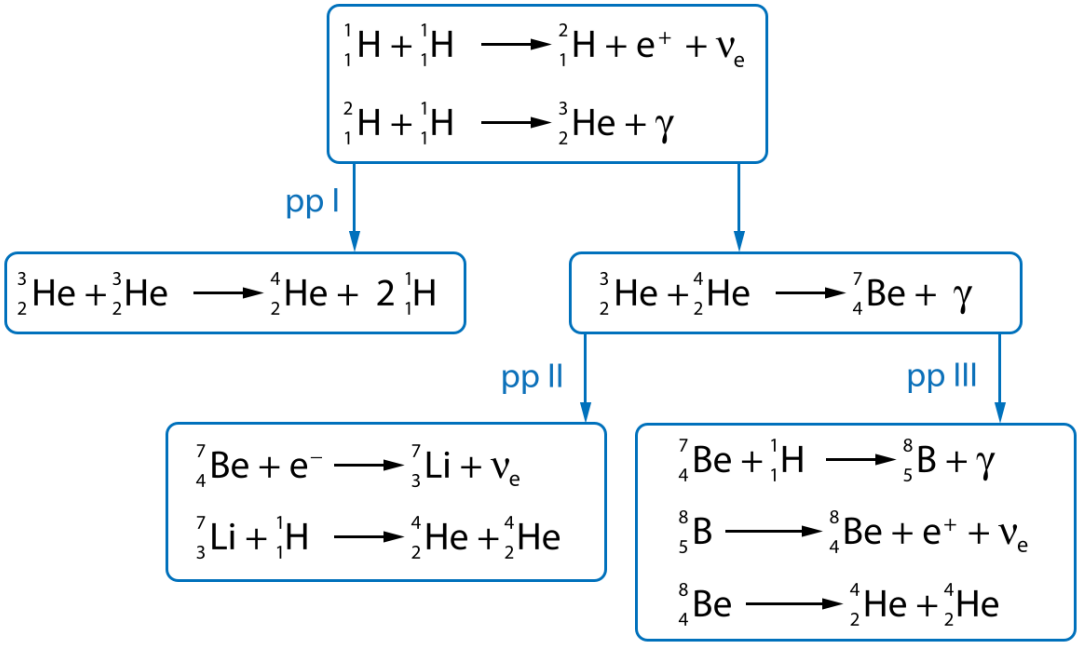
Przyjmij, że materię wewnątrz gwiazdy takiej jak Słońce, można jakościowo opisać równaniem stanu podobnym do równania Clapeyrona. Uzupełnij zdania:

Jednoczesne spełnienie wymagań wobec temperatury i gęstości (patrz poprzednie ćwiczenie) może następować nawet przy stałym ciśnieniu materii ☐ | wymaga warunków, w których ciśnienie mogłoby maleć – w gwieździe sprzyja temu emisja | wymaga warunków, w których ciśnienie mogłoby rosnąć – w gwieździe sprzyja temu jej wł . W rezultacie, w miarę upływu życia młodej gwiazdy, temperatura jej jądra stopniowo rośnie, podczas gdy ciśnienie pozostaje praktycznie stałe ☐ | ciśnienie zaś maleje ☐ | a wraz z nią rośnie ciśnienie ☐ .

Ćwiczenie 7

Porównaj „całościowy bilans cyklu protonowego” podany w części „Przeczytaj”:

$$4\,{}^{1}_{1}\mathrm{H} \rightarrow {}^{4}_{2}\mathrm{He} + 2\mathrm{e}^{+} + 2\nu_{e} + \mathrm{n}\gamma$$



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

z przebiegiem ścieżek ppII i ppIII tego cyklu pokazanym na rysunku.

1. Wskaż tę ścieżkę, w której łączny zestaw substratów i, oddzielnie, produktów jest inny, niż przedstawiony w „bilansie całościowym”.
2. Rozstrzygnij (i odpowiednio uzasadnij), czy we wskazanej ścieżce spełnione są zasady zachowania ładunku elektrycznego oraz całkowitej liczby nukleonów.

Zapisz swoje rozwiązanie w przygotowanym polu i porównaj je następnie z rozwiązaniem wzorcowym.

Ćwiczenie 8

Uzupełnij poniższy zapis:

Pierwsze równanie cyklu protonowego jest _____.

Można je zapisać następująco (po prawej stronie wstaw symbole cząstek według kolejności malejącej ich masy):

_____ + _____ → _____ + _____ + _____

Przypomina ono, spośród jądrowych przemian promieniotwórczych, przemianę _____

n | p | β^- | γ | 2γ | D | inne dla ścieżki ppI, inne zaś dla ścieżek ppII i ppIII | e^-

p | α | β^+ | ν_e | różne dla każdej ze ścieżek | n | e^+

jednakowe dla wszystkich ścieżek

Ćwiczenie 9

Wyobraź sobie, że pierwszą reakcję cyklu protonowego:

$$p + p \rightarrow D + e^{+} + \nu_e$$

dzielimy na trzy etapy, następujące jeden po drugim. Uzupełnij zdania, opisujące wymianę energii z otoczeniem w każdym z etapów.

Plerwszy etap to zbliżenie do siebie dwóch protonów na odległość rzędu femtometra (10^{-15} m).

Jest to proces _____ gdyż _____

są one wprawdzie jednoimiennie naładowane, ale przyciągają się magnetycznie.

egzoenergetyczny,

endoenergetyczny,

są one jednoimiennie naładowane.

Drugi etap to zamiana jednego z protonów na neutron, pozyton i neutrino.

Jest to proces _____ gdyż _____

przeniesienie dodatniego ładunku z protonu na pozyton jest energetycznie korzystne ze względu na mniejszą masę pozytonu.

egzoenergetyczny,

endoenergetyczny,

suma mas neutronu, pozytonu i neutrina jest większa od masy protonu.

Trzeci etap to synteza deuteronu z protonu i neutronu.

Jest to proces _____ gdyż powstaje układ związany tych cząstek, _____

do czego potrzebna jest energia wiązania z zewnątrz.

endoenergetyczny,

egzoenergetyczny,

a energia wiązania wydzielana jest poza układ.

Ćwiczenie 10

Określ, z dokładnością do dwóch cyfr znaczących, procentowy ubytek masy $\Delta m/m$ na pojedynczej ścieżce w cyklu protonowym. Przyjmij, że:

- przeciętna energia wydzielona w takiej reakcji $\Delta E = 26$ MeV,
- masa protonu $m_p = 1{,}67 \cdot 10^{-27}$ kg,
- 1 MeV = $1{,}6 \cdot 10^{-13}$ J.

$\frac{\Delta m}{m} =$ _____ %

Dla nauczyciela

Imię i nazwisko autora:	Monika Sitek
Przedmiot:	fizyka
Temat zajęć:	**Jakie reakcje termojądrowe zachodzą w małych gwiazdach?**
Grupa docelowa:	III etap edukacyjny, liceum, technikum, zakres podstawowy i rozszerzony
Podstawa programowa:	**Cele kształcenia – wymagania ogólne** I. Wykorzystanie pojęć i wielkości fizycznych do opisu zjawisk oraz wskazywanie ich przykładów w otaczającej rzeczywistości. IV. Posługiwanie się informacjami pochodzącymi z analizy materiałów źródłowych, w tym tekstów popularnonaukowych. **Zakres podstawowy** **Treści nauczania – wymagania szczegółowe** I. Wymagania przekrojowe. Uczeń: 15) wyodrębnia zjawisko z kontekstu, nazywa je oraz wskazuje czynniki istotne i nieistotne dla jego przebiegu. XI Fizyka jądrowa. Uczeń: 11) opisuje reakcję termojądrową przemiany wodoru w hel zachodzącą w gwiazdach. **Zakres rozszerzony** **Treści nauczania – wymagania szczegółowe** I. Wymagania przekrojowe. Uczeń: 19) wyodrębnia zjawisko z kontekstu, nazywa je oraz wskazuje czynniki istotne i nieistotne dla jego przebiegu. XII. Elementy fizyki relatywistycznej i fizyka jądrowa. Uczeń: 17) opisuje reakcję termojądrową przemiany wodoru w hel zachodzącą w gwiazdach.

Kształtowane kompetencje kluczowe:	**Zalecenia Parlamentu Europejskiego i Rady UE z 2018 r.:** • kompetencje w zakresie rozumienia i tworzenia informacji, • kompetencje cyfrowe, • kompetencje matematyczne oraz kompetencje w zakresie nauk przyrodniczych, technologii i inżynierii, • kompetencje osobiste, społeczne i w zakresie umiejętności uczenia się.
Cele operacyjne:	Uczeń: 1. wskazuje warunki niezbędne, by w gwiazdach zachodziły reakcje termojądrowe, 2. podaje reakcje cyklu protonowego, 3. rozumie i objaśnia sposób wyzwalania energii w gwiazdach, 4. analizuje reakcje zachodzące na poszczególnych ścieżkach cyklu pp, 5. porównuje wartości energii wyzwalanych w każdej ze ścieżek.
Strategie nauczania:	flipped-classroom
Metody nauczania:	pokaz multimedialny, analiza pomysłów
Formy zajęć:	praca wspólna całej klasy
Środki dydaktyczne:	rzutnik i ekran do wyświetlania multimedium
Materiały pomocnicze:	e-materiały: „Reakcje termojądrowe zachodzące w gwiazdach - cykl węglowo-azotowo-tlenowy” , „Definicja i charakterystyka gwiazd”, „Ewolucja gwiazd”
PRZEBIEG LEKCJI	
Faza wprowadzająca:	

Materiał należy połączyć z lekcją o gwiazdach oraz cyklu CNO w gwiazdach. Dodatkowo można wprowadzić materiał o ewolucji gwiazd, w którym zaznacza się na jakich etapach ewolucji dominują konkretne cykle.
Uczniowie samodzielnie zapoznają się z e-materiałem w domu – czytają tekst, oglądają multimedium.
Nauczyciel rozpoczynając lekcję pyta uczniów – Dlaczego gwiazdy świecą? Skąd bierze się energia w gwiazdach? Uczniowie opowiadają, jakie jest pochodzenie światła w gwiazdach. Wspólnie dyskutują zagadnienie, jeżeli w grupie pojawiają się różne odpowiedzi. Nauczyciel kontroluje dyskusję, notuje na tablicy najważniejsze wypowiedzi w postaci kluczowych słów, jak na przykład: fuzja, reakcja termojądrowa, łączenie się protonów, synteza helu.

Faza realizacyjna:

Nauczyciel prezentuje na ekranie uczniom diagram Hertzprunga-Russella obrazujący rodzaje gwiazd. Pokazuje gdzie jest ciąg główny. Uczniowie mają za zadanie zidentyfikować, na którym etapie ewolucji, w którym miejscu na diagramie HR znajduje się gwiazda, której dominującą energią jest energia pochodząca z cyklów pp, a gdzie cyklu CNO. Uczniowie następnie opisują wspólnie schemat ścieżek cyklu protonowego – rozrysowują je na tablicy. Wyjaśniają, skąd bierze się ta energia, jak zmienia się gwiazda z biegiem lat wskutek zachodzących w niej reakcji termojądrowych. Nauczyciel cały czas kontroluje debatę, upewnia się, że wszyscy rozumieją, o czym jest mowa, uzupełnia brakujące informacje.
Następnie w ten sam sposób uczniowie opisują cykl CNO.

Faza podsumowująca:

Uczniowie rozwiązują przygotowaną przez nauczyciela kartkówkę – może to być jedno pytanie, inne dla każdego ucznia. Uczniowie mogą korzystać z informacji zapisanych wcześniej na tablicy oraz z własnych notatek. Następnie uczniowie przekazują sobie wzajemnie własne odpowiedzi i sprawdzają rozwiązania kolegi lub koleżanki. Dokonują opisowej oceny odpowiedzi – co było dobrze, co było źle i dlaczego. Po lekcjach nauczyciel sprawdza zarówno odpowiedzi jak i ocenianie danej „kartkówki”.
Przykładowe pytania w kartkówce:

- Opisz elementy składowe ścieżek cyklu protonowego.
- Wyjaśnij różnice energetyczne pomiędzy cyklami protonowymi.
- Opisz źródło energii w reakcjach termojądrowych.
- Opisz warunki, w jakich zachodzić mogą reakcje termojądrowe.

Praca domowa:

Zadania sprawdzające z tego e-materiału.

Wskazówki metodyczne opisujące różne zastosowania danego multimedium	Uczniowie mogą obejrzeć multimedium na lekcji.