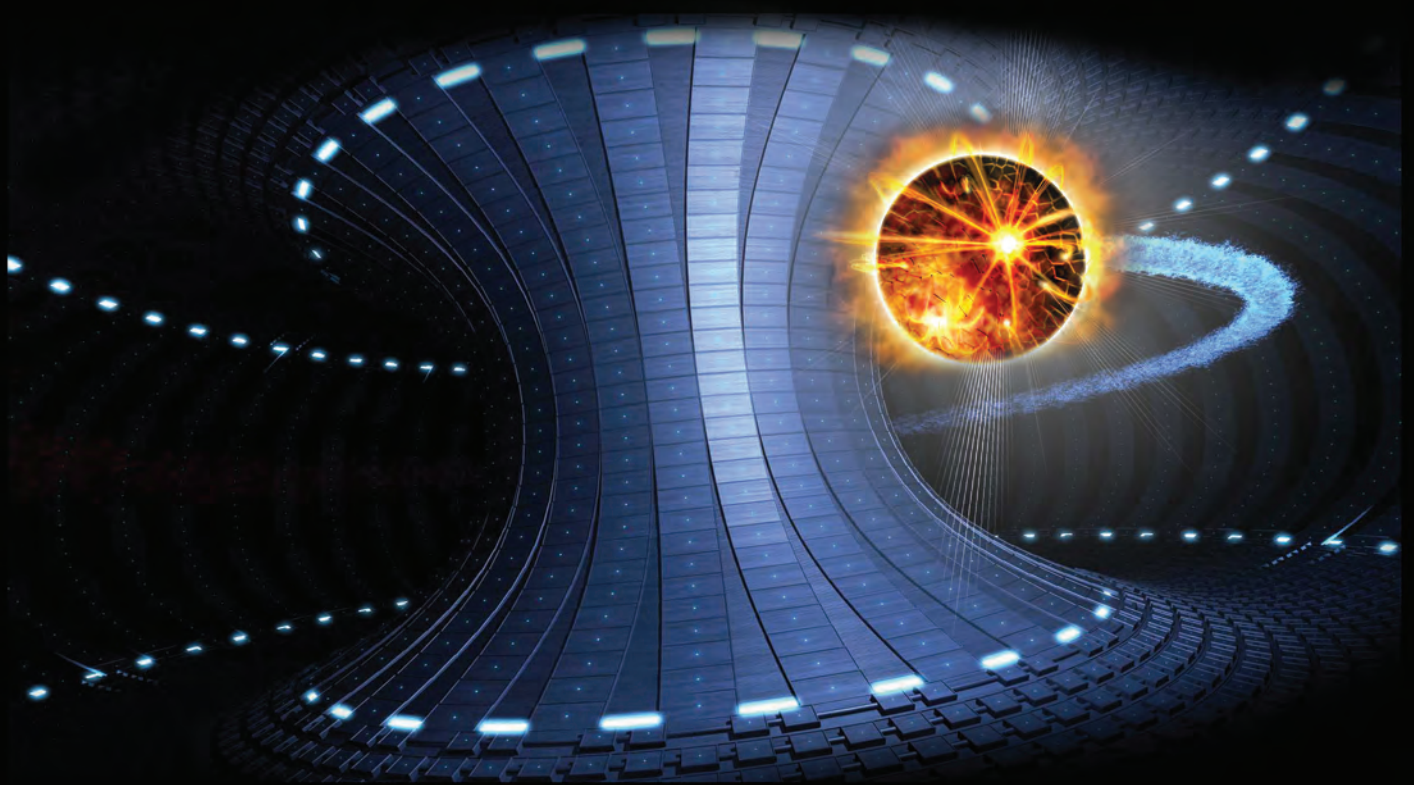




Słońce na Ziemi

energia termojądrowa
ante portas



Słońce na Ziemi

energia termojądrowa
ante portas

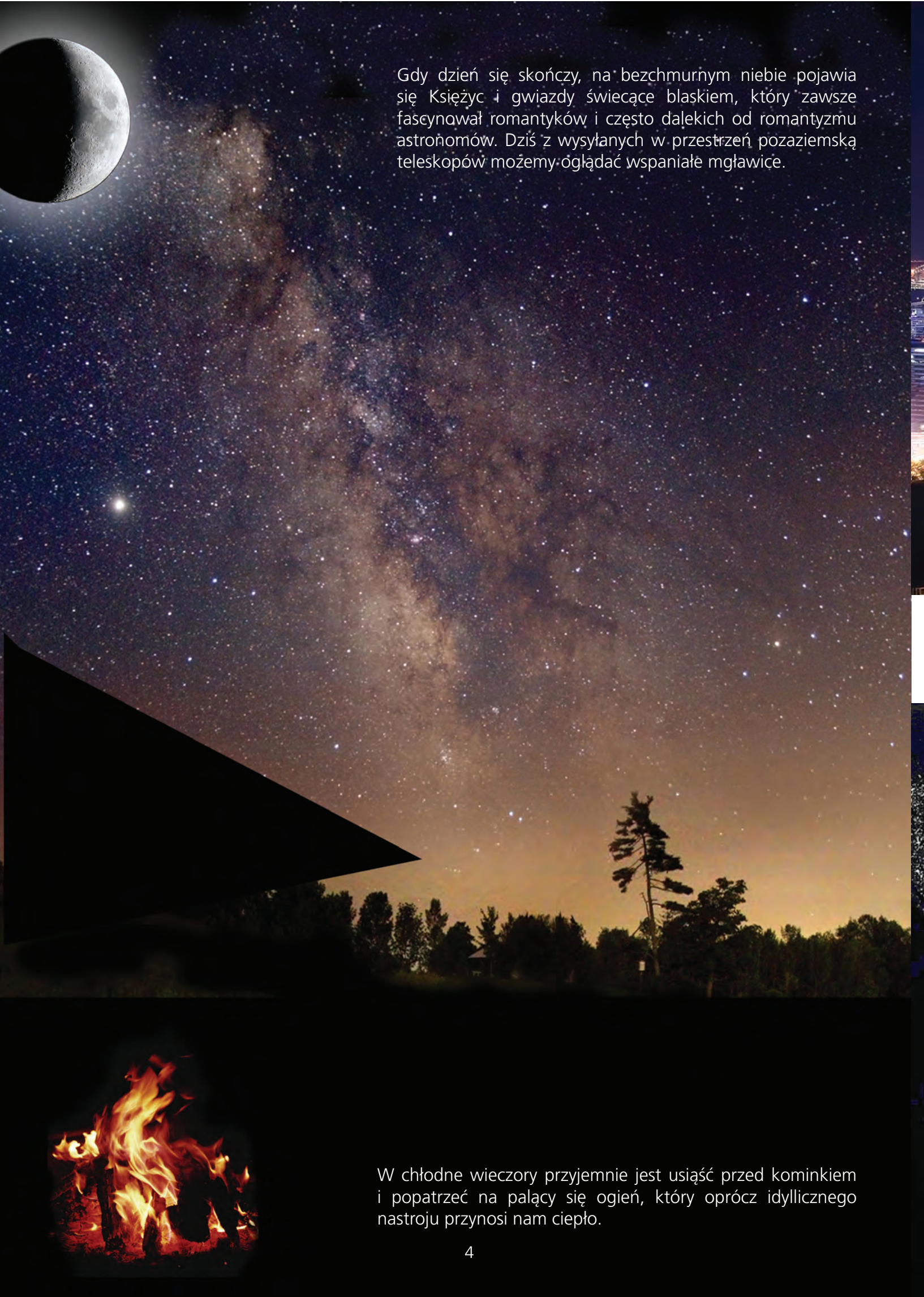
Od autorów:

Synteza jądrowa, nazywana także fuzją jądrową, to zjawisko niezwykle. Tworzący się Wszechświat musiał zaczynać swój rozwój od stworzenia jąder atomowych, które znacznie później, gdy Wszechświat się ochłodził, po przyłączeniu elektronów stawały się pierwiastkami o dobrze określonych własnościach chemicznych. Pracowite przyłączanie do siebie nukleonów okazało się skuteczne aż do otrzymania żelaza, którego dziś mamy w tak znaczącej ilości w naszej skorupie ziemskiej. Łączeniu się nukleonów, a więc syntezie jądrowej, towarzyszyło zawsze wyzwalamie energii. Procesy te, zachodzące w bardzo wysokich temperaturach, stąd nazwa – termojądrowe, są typowe dla wnętrza Słońca i innych gwiazd. Tam wyzwalamie są w sumie ogromne ilości energii. Czy możemy w jakikolwiek sposób naśladować procesy zachodzące w gwiazdach? W dobie rosnącego zapotrzebowania na energię jest to ważne pytanie. Nasza broszura próbuje przybliżyć to zagadnienie i pokazać, że w dającej się przewidzieć perspektywie będziemy umieli zaprząć energię termojądrową do naszych celów.

**Ludwik Dobrzyński
Łukasz Adamowski**

Nasze życie
na Ziemi jest
nierozzerwalnie
związane
ze Słońcem,
z jego światłem
i ciepłem
do nas
dobiegającym





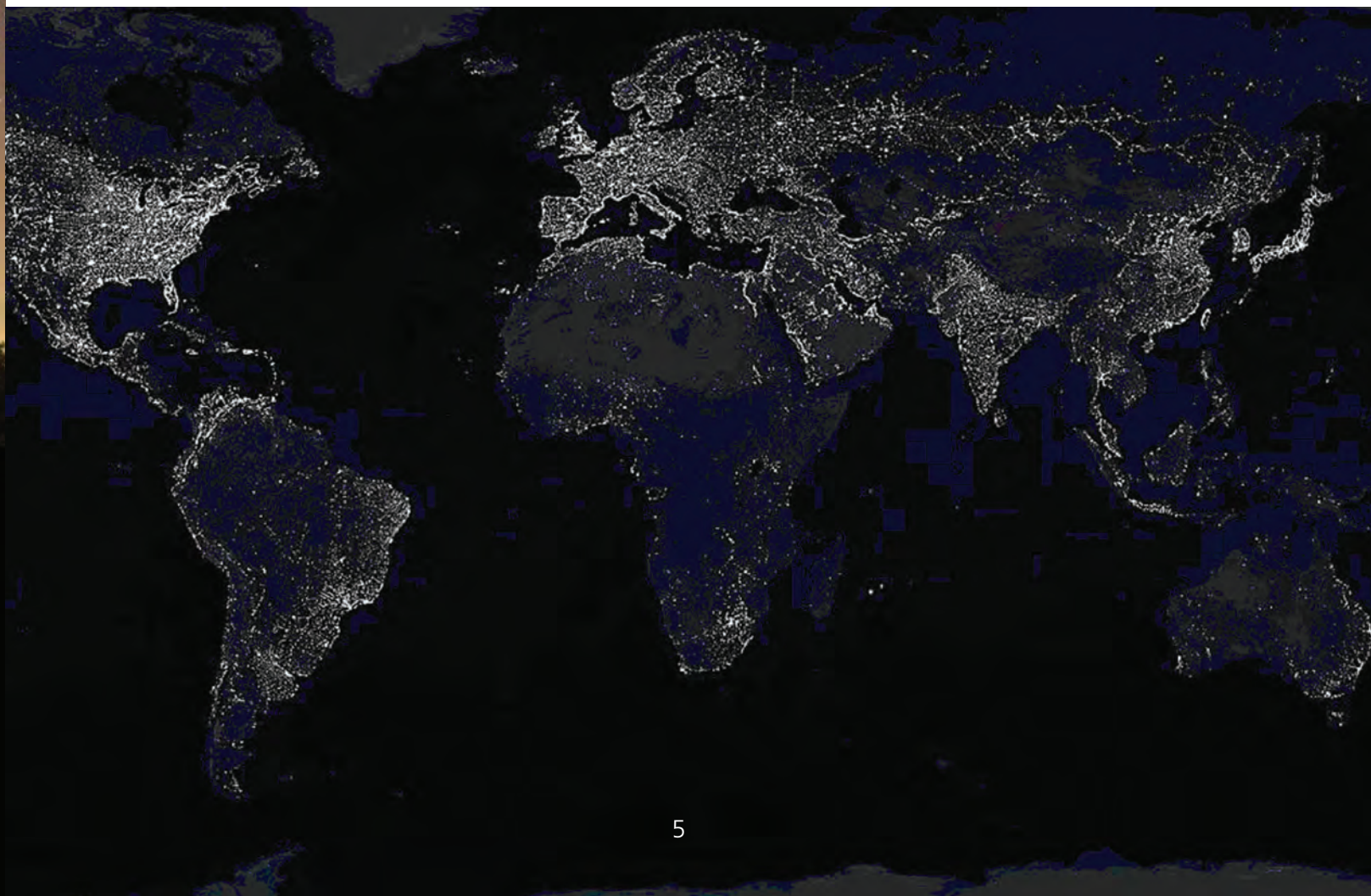
Gdy dzień się skończy, na bezchmurnym niebie pojawia się Księżyc i gwiazdy świecące blaskiem, który zawsze fascynował romantyków i często dalekich od romantyzmu astronomów. Dziś z wysyłanych w przestrzeń pozaziemską teleskopów możemy oglądać wspaniałe mgławice.



W chłodne wieczory przyjemnie jest usiąść przed kominkiem i popatrzeć na palący się ogień, który oprócz idyllicznego nastroju przynosi nam ciepło.



Na pogrążonej w nocy, w ciemności Ziemi rozbłyskują światła – sztuczne, miniaturowe słoneczka, które zastąpiły ognie ognisk, światła świec i lamp naftowych. Wystarczy jednak spojrzeć na rozkład tych światełek na Ziemi, aby stwierdzić, że nie wszędzie, dalece nie wszędzie mogą się ludzie cieszyć z energii elektrycznej.



1. O energii

Na ostatnim zdjęciu widać na jak ogromnych obszarach Ziemi brakuje energii elektrycznej. A przecież energia ta jest równie nierozdzielnie związana z naszym życiem, jak energia słoneczna. Cała ludzka cywilizacja jest na tej energii oparta. Bez niej nie istnieją systemy komunikacji, bez niej nie istnieje też medycyna, dzięki której udało się w ciągu kilku dziesięcioleci niemal dwukrotnie wydłużyć przeciętny czas życia ludzi. Energia ta jest także niezbędna do odsalania wody morskiej, aby zapewnić wodę pitną tym, którzy mieszkają w rejonach tej wody pozbawionych. Dziś, w XXI wieku, w roku 2011, prawie milion ludzi umiera rocznie ze względu na brak wody, a ok. 2 miliardów jest pozbawionych dostępu do energii elektrycznej ze wszystkimi tego konsekwencjami. To przerażające liczby. Ponadto sytuacja energetyczna świata wcale nie jest wesoła również tam, gdzie dzisiaj energii elektrycznej nie brakuje. W większości krajów podstawowym źródłem energii jest spalanie naturalnych zasobów Ziemi: węgla, ropy i gazu. Te wyczerpują się i z czasem stają się coraz trudniej osiągalne, a ich wydobywanie wiąże się z coraz większymi zagrożeniami, co szczególnie ostro widać w wypadku przemysłu wydobywczego węgla. Kto z nas chciałby,

aby jego dzieci i wnuki pracowały w dusznej i wilgotnej kopalni, kilometr pod ziemią, w stałym zagrożeniu wybuchem metanu i zawaleniami szybów? Prędzej czy później naturalne zasoby wyczerpią się, a z obecnych pokoleń nikt nie zdejmie odpowiedzialności za przygotowanie się do wykorzystania innych źródeł energii. Stąd też energiczna praca nad wykorzystaniem energii wodnej, słonecznej, wiatrowej, geotermalnej, biogazu itp., ale też energii jądrowej, która towarzyszy nam od około 60 lat i zaspokaja około 17% zapotrzebowania na energię elektryczną.

Czy w perspektywie najbliższego stulecia uda się rozwinąć wykorzystanie tzw. energii odnawialnej (niektórzy wolą – „zielonej”) do takiego stopnia, aby stała się ona podstawowym źródłem energii jest dość wątpliwe, natomiast znacznie łatwiej zapewnić ludzkości energię elektryczną wykorzystując znane nam reakcje jądrowe stanowiące podstawę energetyki jądrowej. Więcej na te tematy można znaleźć w broszurze „Spotkanie z promieniotwórczością” autorstwa L. Dobrzyńskiego i in., wydanej przez Dział Szkolenia i Doradztwa Instytutu Problemów Jądrowych (obecnego Narodowego Centrum Badań Jądrowych) w 2010 r. Przypomnijmy tu jednak dane zamieszczone w tej broszurze (oparte na informacjach z CERN), a dotyczące problemów zaspokojenia zapotrzebowania na energię elektryczną tylko w Europie Zachodniej.

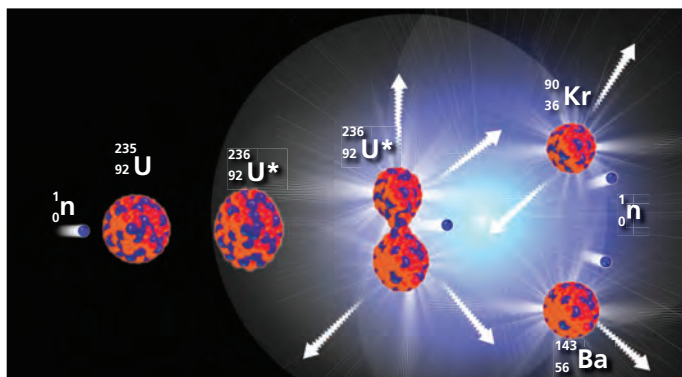
Źródło energii	Potrzeby	Dla porównania
Biomasa	2000 km ² upraw	3-krotna wielkość Jeziora Bodeńskiego
Wiatr	2700 wiatraków o mocy 1,5 MW każdy	486 km ²
Słońce (fotowoltaika)	23 km ² paneli słonecznych na równiku	2555 boisk piłkarskich
Biogaz	20 000 000 świń	
Gaz	1,2 km ³	470 piramid Cheopsa
Ropa	1 400 000 ton	10 000 000 baryłek lub 100 supertankowców
Węgiel	2 500 000 ton	26 260 wagonów towarowych
Rozszczepienie jąder	35 ton UO ₂	210 ton rudy uranowej
Reakcja fuzji (termojądrowa)	100 kg D + 150 kg T	2850 m ³ wody morskiej oraz 10 ton rudy litowej

Przypomnijmy także wartości opałowe różnych paliw. Wartości te podano niżej.

Paliwo	Wartość opałowa [MJ/kg*]
Drewno	16
Węgiel brunatny	9
Węgiel kamienny	13-30**
Gaz naturalny	45
Ropa nieoczyszczona	45-46
Uran naturalny	500 000

* 1 MJ ≈ 0,278 kWh ** w zależności od jakości węgla

Dzisiejsza „energia jądrowa” to energia biorąca się z reakcji rozszczepienia jąder izotopu uranu – ^{235}U . Przebieg takiej reakcji ilustruje rysunek.



Możliwy przebieg reakcji rozszczepienia ^{235}U
Znak gwiazdki oznacza jądro w stanie wzbudzonym. Rozszczepienie na bar i krypton to tylko jedna z wielu możliwości. Podobnie, liczba neutronów wyzwolonych w pojedynczej reakcji może być różna. Wyzwała się od 0 do 8 neutronów – średnio 2,4.

2. Reakcja syntezy (fuzji) jądrowej

W odróżnieniu od reakcji rozszczepienia, reakcja syntezy (fuzji) jądrowej polega na połączeniu się dwóch lekkich jąder w jedno cięższe. Reakcje te, zwane także termojądrowymi, to typowe reakcje zachodzące w Słońcu i innych gwiazdach. Po raz pierwszy myśl, że emitowana przez Słońce energia może brać się z oddziaływania cząstek subatomowych została wypowiedziana około roku 1920 przez angielskiego astrofizyka, Arthura S. Eddingtona (1882-1944). To on zwrócił uwagę na to, że liczba reakcji jądrowych, jak i temperatury potrzebne w Słońcu do ich zajścia muszą być znacznie wyższe niż na Ziemi. W tak wysokich temperaturach materia może mieć szczególne właściwości – jest *plazmą*. Jak powiemy dalej, ten szczególny stan materii jest wielce osobliwy i dlatego nazywamy go często *czwartym stanem materii*.

W latach dwudziestych ubiegłego stulecia wiedzano już, że głównym składnikiem Słońca jest wodór. Jednak sądzono, że stanowi on ponad 80% objętości słonecznej. W roku 1929 inny astronom, profesor Uniwersytetu w Princeton, USA, Henry Norris Russell (1877-1957) stwierdził, że tego wodoru jest znacznie mniej, zaledwie 60% i musi być on w swoisty sposób spalany w Słońcu. Uwalnianie się spalane-gazu widać dobrze na zdjęciu Słońca otwierającym naszą broszurę. Zbadanie szczegółów tego spalania zajęło jednak kolejne 10 lat.

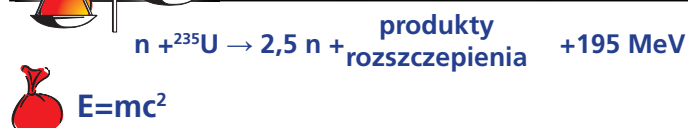
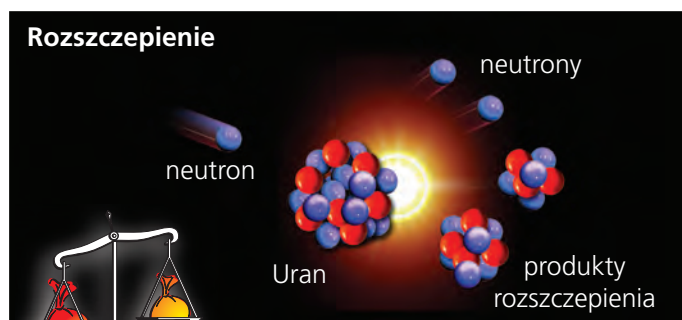


Arthur Stanley Eddington
 Źródło: Wikipedia



Henry Norris Russell
 Źródło: <http://www.phys-astro.sonoma.edu/brucemedalists/russell/index.html>

Gdy jedna materia przemienia się w drugą oznacza to zawsze, że nowy stan jest energetycznie korzystniejszy niż poprzedni. Jeśli jądro ^{235}U rozszczepia się na lżejsze jądra, to łączna energia produktów rozszczepienia musi być mniejsza niż energia jądra uranu. Ponieważ jednak energia nie może nigdzie zniknąć, różnica obu energii objawia się w energii kinetycznej produktów rozszczepienia i neutronów, ale także i w energii promieniowania gamma towarzyszącego procesowi rozszczepienia. Energia związana z wyjściowym izotopem uranu czy produktami reakcji (bez względu na ich energię kinetyczną i energię promieniowania gamma) jest pewną energią wewnętrzną, którą łatwo związać z masą odkąd Einstein pokazał, że obiekt o masie m dysponuje energią $E = mc^2$, gdzie c oznacza prędkość światła¹. W takim razie zmniejszeniu energii powinno towarzyszyć zmniejszenie się masy – różnica mas zostaje przekształcona w energię. Ta różnica mas nazywana jest często defektem masy.



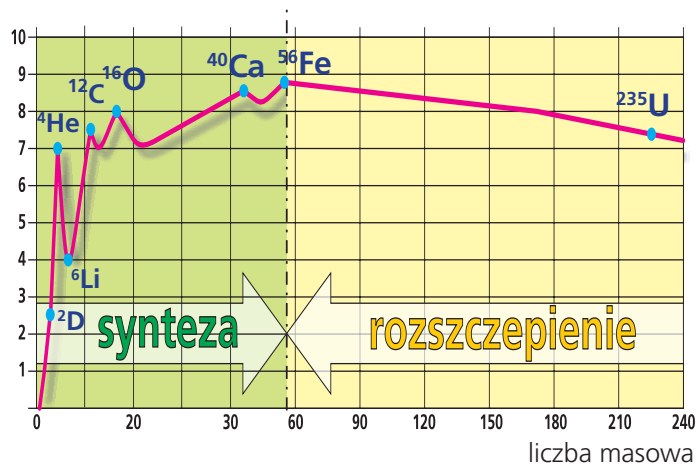
Masa rozszczepiającego się uranu jest większa niż suma mas jąder i neutronów powstających w rozszczepieniu

W naszym Słońcu syntezie ulega w każdej sekundzie 657 milionów ton wodoru, z którego powstaje 653 milionów ton helu. Brakująca masa nukleonów², wynosząca 4 miliony ton, przekształcana jest na energię promieniowania – dzięki temu Słońce świeci. Niezwykle wysokie temperatury i wysokie ciśnienia prowadzą do wspomnianego szczególnego stanu materii zjonizowanej – plazmy, utrzymywanej w gwiazdach siłami grawitacyjnymi.

¹ $c = 3 \times 10^8 \text{ m/s}$

²tj. protonów i neutronów

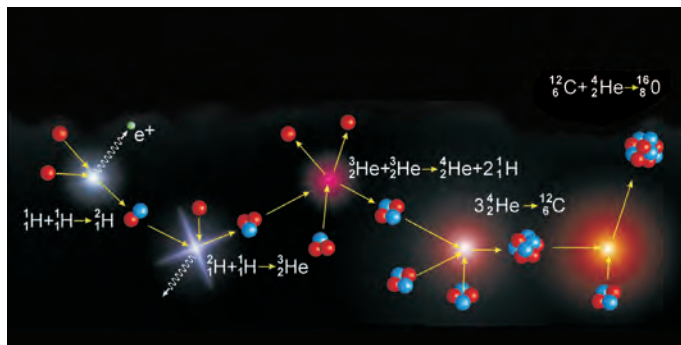
Interesująca reakcja syntezy, w której wyzwala się stosunkowo duża ilość energii, polega np. na reakcjach z udziałem czterech protonów i utworzeniu z nich jądra helu (cząstki alfa). W takiej reakcji wydzielą się energia około 27,7 MeV. Można się dziwić, że zarówno w rozpadach ciężkich jąder (np. uranu) jak i w łączeniu się lekkich jąder, jak jądra wodoru – protony, wydzielą się energia. W gruncie rzeczy, to jedna z najważniejszych informacji potrzebnych dla zrozumienia natury Wszechświata.



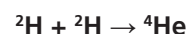
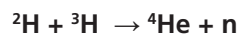
Energia wiązania na nukleon [MeV]³

Na powyższym rysunku przedstawiona jest energia wiązania przypadająca na jeden nukleon w jądrze. Przez tę energię rozumiemy pracę jaką należy wykonać, aby nukleon wyrwać z jądra. W takim razie, im energia wiązania na nukleon jest niższa, tym nukleon w jądrze jest słabiej związany. Rozszczepienie uranu prowadzi do powstania jąder o wyższych wartościach energii wiązania na nukleon, co oznacza dla układu zysk energetyczny. Bez korzystnego bilansu energetycznego nie powstałyby bowiem pierwiastki, z którymi mamy na co dzień do czynienia na Ziemi. Podobnie jak w wypadku rozszczepienia, masa cząstek pierwotnych biorących udział w syntezie jądrowej jest większa niż masa powstałego cięższego jądra.

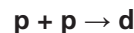
Prześledźmy przez chwilę drogę powstawania pierwiastków – nukleosyntezę, której ideę przedstawia również rysunek pokazany niżej.



Najprostsze reakcje syntezy zachodzące w Słońcu, to

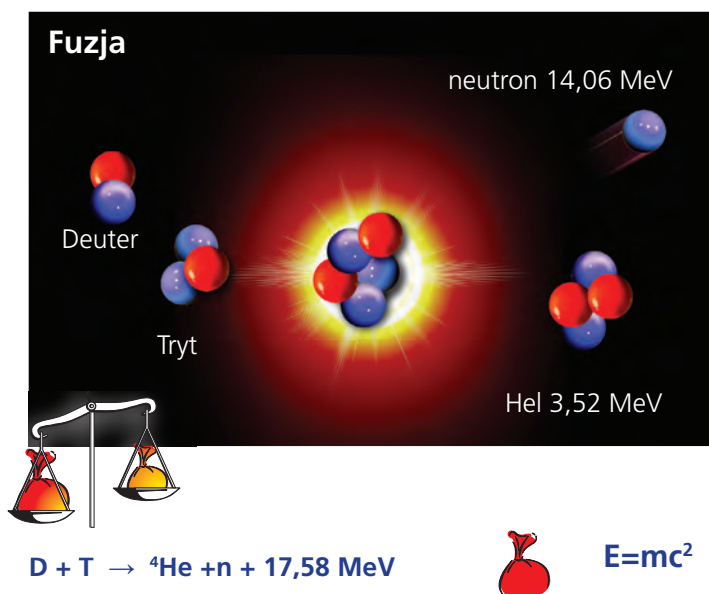


Zauważmy: dwa protony łącząc się stworzyły deuteron – jądro ciężkiego izotopu wodoru, ${}^2\text{H}$, zwanego deuterem. Pierwszą reakcję moglibyśmy więc zapisać jako



Deuteron składa się jednakże z protonu i neutronu, co oznacza, że w trakcie reakcji jeden z protonów musiał przekształcić się w neutron. Jeśli tak, to w takiej reakcji musiała powstać cząstka o ładunku dodatnim, antycząstka w stosunku do elektronu – pozyton (β^+). W drugiej reakcji deuteron w połączeniu z protonem wytworzył jądro izotopu helu, tu ${}^3\text{He}$. Jeśli dwa izotopy ${}^3\text{He}$ połączą się powstaje jądro innego izotopu helu – ${}^4\text{He}$. To nic innego jak znana nam cząstka α , składająca się z dwóch protonów i dwóch neutronów. Aby powstał tryt wystarczy, że znajdzie czwarta reakcja: deuteronu z neutronem. Tryton (jądro trytu) jest nietrwały – promieniotwórczy. Kolejna reakcja, deuteru z trytem, zaowocowała powstaniem ${}^4\text{He}$. Przy tej okazji powstał neutron. Dwa deuterony reagują tworząc cząstkę α , wreszcie trzy takie cząstki mogą doprowadzić do utworzenia się jądra izotopu węgla ${}^{12}\text{C}$. Oczywiście, za każdym razem, aby z jądra powstał pierwiastek chemiczny, muszą to jądro otoczyć elektrony.

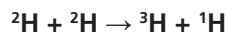
Tworzenie się kolejnych pierwiastków w drodze syntezy ma swoją barierę: wytworzenie pierwiastka cięższego od żelaza jest już energetycznie niekorzystne, co oznacza, że cięższe pierwiastki muszą powstawać w inny sposób. W wielkim skrócie, te cięższe pierwiastki powstawały w drodze wybuchów gwiazd. Tych procesów jednak nie będziemy omawiać.



Przykład syntezy deuteru i trytu, w wyniku której powstaje ${}^4\text{He}$ i neutron

³ W fizyce atomowej i jądrowej energie wyrażamy w elektronowoltach. Zgodnie z definicją, 1 elektronowolt (eV) jest energią uzyskiwaną przez elektron w polu elektrycznym o różnicy potencjałów wynoszącej 1 V. Energia ta jest niewielka w porównaniu z typową energią mechaniczną: 1 eV = $1,6 \cdot 10^{-19}$ J. 1 keV = 10^3 eV; 1 MeV = 10^6 eV

Historycznie rzecz ujmując, pierwszą zaobserwowaną reakcją syntezy nie była żadna z przedstawionych dotąd reakcji, ale



Reakcję tę zaobserwowali po raz pierwszy w 1934 roku Ernest Rutherford (1871-1937) oraz australijski fizyk Marcus Lawrence Elwin Oliphant (1901-2000).



Ernest Rutherford
Źródło: Wikipedia



Marcus Lawrence Elwin
Oliphant
Źródło: Wikipedia

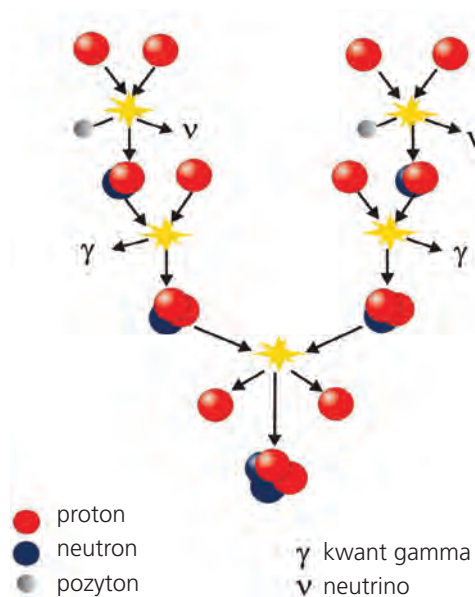
Zauważmy, że w każdej z omawianych reakcji syntezy powinna wydzielać się energia, aby reakcja była „opłacalna”, a więc prowadziła do defektu masy. Z drugiej strony, reagujące cząstki mają elektryczny ładunek dodatni, a więc odpychają się i to tym silniej im bliżej siebie się znajdują. Oznacza to, że aby zaszła reakcja musimy wpierw spowodować, aby cząstka inicjująca reakcję miała odpowiednią energię kinetyczną zdolną do przezwyciężenia sił odpychania. Pomijając nadawanie cząstkom energii w akceleratorach niezbędną energię kinetyczną cząstek można uzyskać, jeśli znajdują się one w gazie o odpowiednio wysokiej temperaturze.

Właśnie wysoka temperatura jest siłą sprawczą zachodzenia reakcji syntezy w gwiazdach. Zaznaczone na czerwono reakcje (str. 8), to tzw. *cykl protonowo-protonowy*, który może zachodzić, gdy temperatura wewnątrz gwiazd jest wyższa niż 15 milionów stopni.

W innym wariancie cyklu protonowo-protonowego wytwarzanie deuteronu zachodzi w tzw. reakcji *pep*, której schemat to

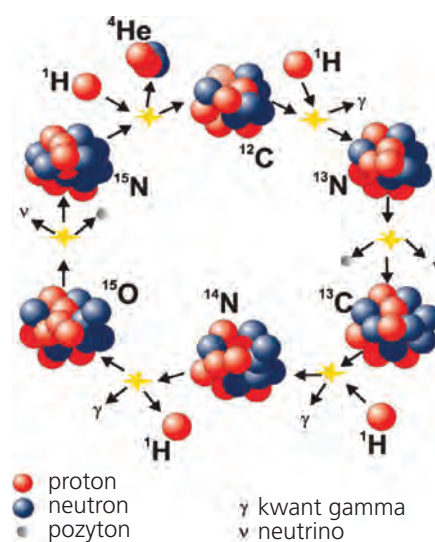


Jak widać, w reakcji biorą udział elektrony i dwa protony, a w jej wyniku powstaje deuteron potrzebny dla dalszego cyklu, który przebiega jak cykl protonowo-protonowy.



Cykl protonowo-protonowy Źródło: Wikipedia

Przereagowanie czterech protonów i utworzenie jądra ${}^4\text{He}$ (którego masa wynosi 3,97 sumy mas czterech protonów) skutkuje wyzwoleniem się stosunkowo dużej energii 27,7 MeV, jednakże nawet w Słońcu, gdzie ilości wodoru są ogromne, prawdopodobieństwo zderzenia się czterech protonów jest bardzo niewielkie. Dlatego też w Słońcu możliwy jest inny cykl produkcji energii, tzw. *cykl Bethego* lub *węglowo-azotowo-tlenowy (CNO)*. Cykl ten przedstawia rysunek poniżej. Jak widać, cykl zapoczątkowany reakcją protonu z izotopem węgla ${}^{12}\text{C}$ uruchamia tworzenie się izotopu azotu ${}^{13}\text{N}$ w stanie wzbudzonym i jego przejście drogą rozpadu beta do ${}^{13}\text{C}$. Ten w reakcji z protonem utworzy izotop ${}^{14}\text{N}$, który w kolejnej reakcji z protonem utworzy ${}^{15}\text{O}$ w stanie wzbudzonym. Ten izotop tlenu w drodze rozpadu beta przechodzi w izotop azotu ${}^{15}\text{N}$, który po przereagowaniu z protonem daje ${}^{12}\text{C}$ i cząstkę alfa. Mamy więc znów izotop węgla, który może zapoczątkować nowy cykl. Może warto dodać, że wzbudzony izotop ${}^{13}\text{N}$ może także wchłonąć proton i stać się wzbudzonym ${}^{14}\text{O}$, który deekscytuje (czyli traci energię) do ${}^{14}\text{N}$. Która z dróg zostanie wybrana przez wzbudzony ${}^{13}\text{N}$ jest dziełem przypadku – znamy tylko prawdopodobieństwa rozpadów na różnych drogach. Autor tego cyklu, Hans Albrecht Bethe, otrzymał w 1967 roku Nagrodę Nobla za badanie źródeł energii w gwiazdach.

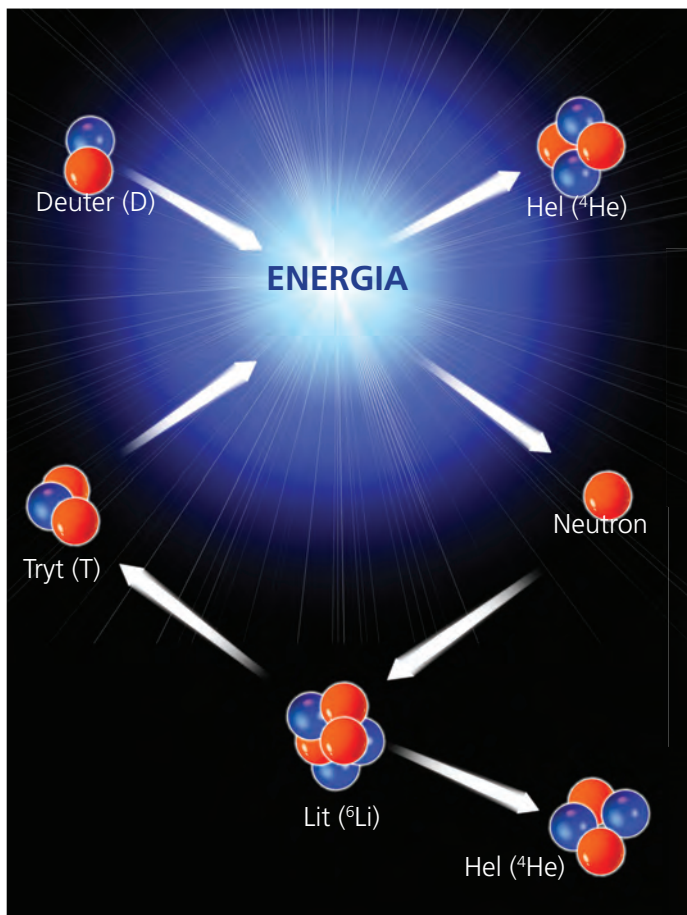


Cykl Bethego Źródło: Wikipedia



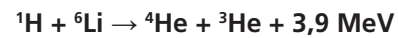
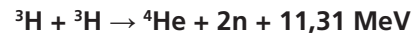
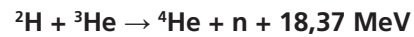
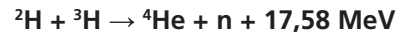
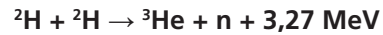
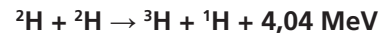
Hans Albrecht Bethe
(1906-2005)
Źródło: Wikipedia

Mysząc o praktycznym wykorzystaniu reakcji syntezy, najczęściej dziś pracuje się nad reakcją deuteru i trytu. Jak wynika z przebiegu reakcji opisanej wcześniej, tworzy się w niej neutron o wysokiej energii kinetycznej. Zderzając się z otoczeniem neutron oddaje swoją energię, a więc można przekształcać energie tak powstających neutronów na ciepło i wytworzyć np. parę wodną. Ta będzie mogła poruszać turbinę, a ta z kolei uruchamiać generator prądu elektrycznego. Ten schemat jest dość bliski schematowi pracy dzisiejszej elektrowni jądrowej. Neutron może też inicjować reakcję jądrową z ${}^6\text{Li}$, w wyniku której powstaje tryt potrzebny do reakcji deuteru z trytem.

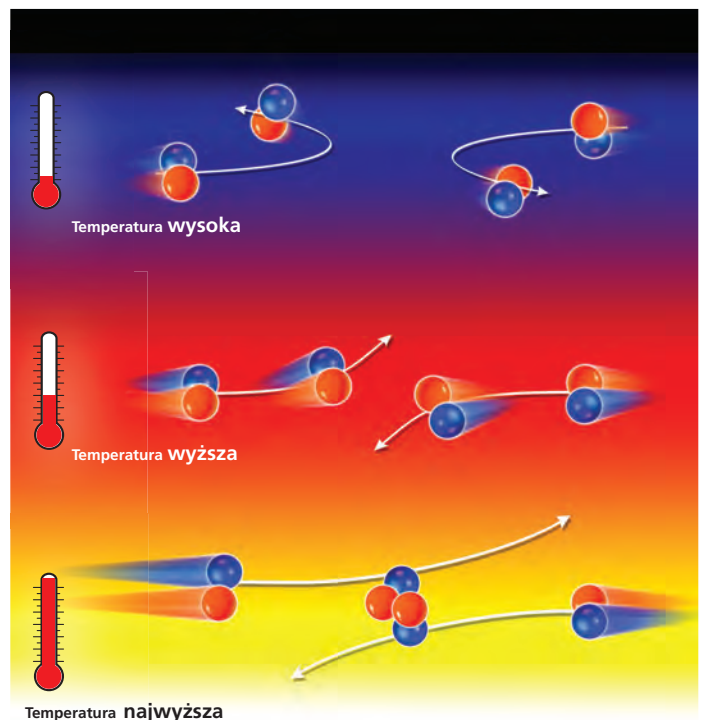


Powstające w reakcji syntezy jądrowej deuteru i trytu neutrony mogą inicjować reakcję jądrową z izotopem litu ${}^6\text{Li}$, w wyniku której będzie powstawał tryt niezbędny do syntezy. Część neutronów w zderzeniu z ośrodkiem będzie oddawała swą energię kinetyczną na ciepło. To ciepło może posłużyć do produkcji pary wodnej, a ta do napędzania turbiny parowej

Aby zorientować się w możliwych do uzyskania energiach podajemy kilka typowych reakcji syntezy jądrowej wraz z wyzwalaną w nich energią.



Jak wspomnieliśmy już, kluczem do zajścia którejkolwiek z reakcji syntezy jest przezwycięzenie sił odpychania kulombowskiego między dwoma jonami. Siły te byłyby znacznie mniejsze, gdyby elektrony w jonach dało się zastąpić mionami, a więc cząstkami o ponad 200-krotnej masie elektronu i takim samym ładunku elektrycznym jak elektron. Spowodowałoby to zmniejszenie rozmiaru np. jonu deuteru, a więc ułatwiło jego zbliżenie się do innego jonu. Pomysł ten, będący podstawą tzw. *katalizy mionowej*, jest jedną z idei – chyba jednak niepraktyczną. W normalnej sytuacji niezbędne temperatury, w których mogą zajść reakcje syntezy jądrowej, to $10^7 - 10^9 \text{ K}$. W tak wysokich temperaturach elektrony odrywane są od atomów – tworzy się *plazma*, w rozpatrywanym wypadku *plazma wysokotemperaturowa*.



Aby dwie cząstki naładowane dodatnio mogły przereagować i utworzyć cięższe jądro, należy przezwyciężyć siły ich odpychania kulombowskiego, a to jest możliwe tylko wtedy, gdy energie kinetyczne cząstek są wystarczająco wysokie. Tak wysokie energie cząstek możemy uzyskać w wysokich temperaturach

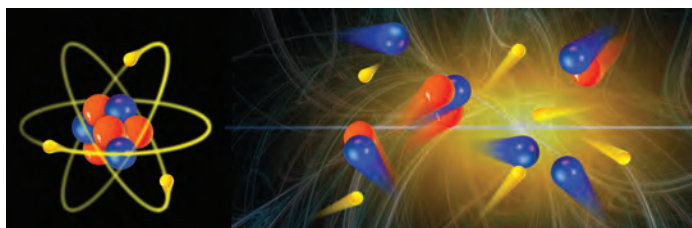
3. Plazma – bardzo nietypowy stan materii

Nazwa „plazma” została zaproponowana w roku 1923 przez amerykańskiego fizyka Irvinga Langmuira. Jego prace były poprzedzone badaniami Crookesa nad wyładowaniami w gazach rozrzedzonych. Sam Crookes zaobserwowane przez siebie promienie katodowe nazwał czwartym stanem skupienia materii albo materią promienistą.



Irving Langmuir (1881-1957)
z lampą Crookesa do wyładowań
i obserwacji promieni
katodowych

Źródło: <http://www.arjenboogaard.nl>



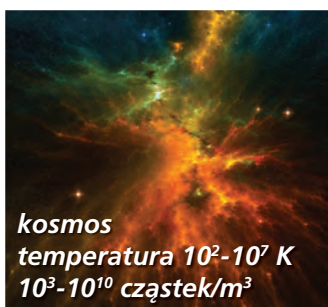
**Atomy materii w stanach:
stałym, ciekłym i gazowym**

Plazma

Chociaż dla naszych celów najbardziej interesująca jest właśnie plazma wysokotemperaturowa, warto samemu stanowi plazmy poświęcić trochę uwagi. Własności tego stanu są tak intrygujące, że ochrzczenie go czwartym stanem skupienia materii jest w pełni uzasadnione. Przede wszystkim należy uzmysłowić sobie, że stan ten może powstać w różnym zakresie temperatur i różnej koncentracji cząstek, co ilustrują dalsze rysunki. Teraz jest jasne dla czego rozpoczynając nasze opracowanie przywołaliśmy m.in. płomień kominka. Palący się gaz stanowi w istocie plazmę, tyle że o niezbyt wysokiej temperaturze. Świetłówki, żarówki energooszczędne – te także świecą dzięki wytworzeniu się w nich niskotemperaturowej plazmy, choć w tym drugim wypadku gęstość plazmy musi być znacząco większa niż w pierwszym. Zdecydowanie najbardziej egzotyczną plazmę o bardzo niskiej temperaturze i gęstości przedstawia zorza polarna.



zorza polarna
temperatura 10^2 - 10^4 K
 10^6 - 10^{10} cząstek/ m^3



kosmos
temperatura 10^2 - 10^7 K
 10^3 - 10^{10} cząstek/ m^3



płomień
temperatura 10^2 - 10^4 K
 10^{11} - 10^{18} cząstek/ m^3



pioruny
temperatura 10^4 - 10^6 K
 10^{20} - 10^{26} cząstek/ m^3



świełówka
temperatura 10^3 - 10^5 K
 10^{20} - 10^{24} cząstek/ m^3



lampa plazmowa
temperatura 10^3 - 10^5 K
 10^{20} - 10^{24} cząstek/ m^3

Przykłady plazm powstających w różnych temperaturach i przy różnej gęstości cząstek

Podstawową cechą plazmy jest jej lokalna neutralność, tj. równa liczba dodatnich i ujemnych ładunków elektrycznych. Wbrew częstemu osądowi, wcale nie oznacza to, że atomy muszą zostać całkowicie zjonizowane. Istnienie jednak gazu swobodnych ładunków elektrycznych dwójga rodzajów oznacza istnienie lokalnych, silnych pól elektrycznych – tym silniejszych im gęstość plazmy jest większa. W zależności od tej gęstości generowane są w plazmie charakterystyczne oscylacje pola elektrycznego, a więc i magnetycznego. Po przyłożeniu pola magnetycznego powstają w niej tzw. fale magnetohydrodynamiczne, które rozchodzą się w kierunku przyłożonego pola i fale magnetoakustyczne, które rozchodzą się prostopadle do przyłożonego pola. Gaz ładunków w plazmie wykazuje szereg własności cieczy żywo reagującej na przyłożone pola elektryczne i magnetyczne.

Istnienie drgań plazmowych prowadzi nieuchronnie do promieniowania plazmy. Widmo tego promieniowania zależy zarówno od temperatury jak gęstości plazmy i stopnia jej jonizacji. Elektrony są wychwytywane przez jony dodatnie, są także hamowane w polu jonów dodatnich – zjawisko znane nam z działania każdej lampy rentgenowskiej pod nazwą promieniowania hamowania. Taka plazma pochłania też padające na nią promieniowanie z tego samego co emisja zakresu widmowego. W istocie rzeczy, łagodna temperatura na Ziemi jest skutkiem pochłaniania promieniowania słonecznego z najgorętszych warstw Słońca w plazmie tej gwiazdy. Do Ziemi dociera jedynie promieniowanie z zewnętrznych partii Słońca.

Kolejną cechą plazmy jest łatwość z jaką przewodzi ona prąd elektryczny. W odróżnieniu jednak od metali, w których mamy wiele swobodnych elektronów poruszających się pomiędzy dodatnimi jonami (rdzeniami jonowymi), opór plazmy maleje, a nie zwiększa się wraz ze wzrostem temperatury. Ze względu na wysoką temperaturę plazmy jest on więc bardzo niewielki.

Gdy gęstość plazmy rośnie, zachowuje się ona bardziej jak ośrodek ciągły niż gaz. To właśnie te niezwykle własności

uzasadniają nadanie plazmie nazwy czwartego stanu materii. Zwróćmy uwagę, że w sprzyjających warunkach znaczna część energii wydzielanej w omawianych wcześniej reakcjach syntezy jądrowej może zostać zużyta do grzania plazmy np. deuterowo-trytowej. Mechanizm ten będzie prowadził do wytworzenia samopodtrzymującej się reakcji, która będzie zachodziła aż do wyczerpania paliwa. Tak właśnie dzieje się w najbliższej nam gwiazdzie – w Słońcu.

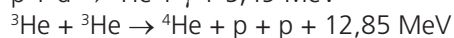
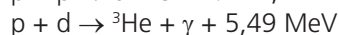
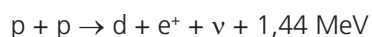
4. Jak naśladować to, co dzieje się w Słońcu?

Przeprowadzenie reakcji syntezy na Ziemi nie jest łatwe. Jak pokazywaliśmy, jej zapoczątkowanie wymaga wytworzenia najpierw niezwykle wysokiej temperatury, rzędu kilkuset milionów stopni, a gdy się już otrzyma taką gorącą plazmę, należy umieć ją utrzymać w określonej objętości. Gdy się taki cel osiągnie i zajdzie wystarczająca liczba reakcji syntezy, dostawa świeżego paliwa powinna zapewnić tworzenie energii w sposób ciągły.

Konieczność utrzymania wysokiej temperatury oznacza, że plazma nie może znaleźć się w kontakcie ze ścianami jakiegokolwiek naczynia. Dlatego też należy wypracować specyficzne techniki jej utrzymywania. Istnieją trzy takie metody: grawitacyjna, magnetyczna i bezwładnościowa.

Utrzymanie plazmy w gwiazdach jest wynikiem siły ciężkości. Im bliżej środka gwiazdy, tym ciśnienie i temperatura wyższe – powstaje plazma. Zapoczątkowana reakcja syntezy podgrzewa plazmę jeszcze bardziej. Mówimy, że plazma zostaje *spułapkowana*, a mechanizm utrzymywania plazmy nazywamy *pułapkowaniem grawitacyjnym*. Poniższy rysunek przypomina to, co mówiliśmy o powstawaniu plazmy w Słońcu. W centrum Słońca, w którym panuje temperatura rzędu 10^7 K, a gęstość dochodzi do 100 kg/dm^3 , panują idealne warunki do utrzymywania plazmy.

cykl protonowy (główne reakcje w Słońcu):



Słońce jako przykład układu, w którym następuje grawitacyjne pułapkowanie plazmy

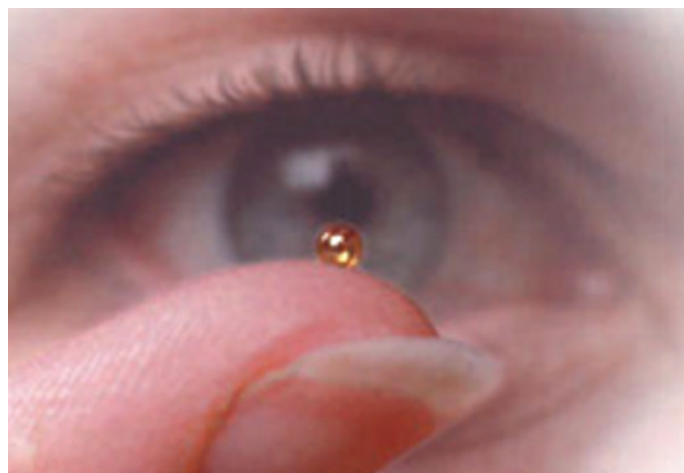
W każdej sekundzie 657 mln ton wodoru zmienia się w Słońcu w 653 mln ton helu. Brakujące 4 mln ton jest zamieniane na energię

Pułapkowanie grawitacyjne nie jest możliwe do zrealizowania na Ziemi. Korzystamy z dwóch innych metod: *pułapkowania magnetycznego*, w którym pułapkę tworzą silne pola magnetyczne oraz *pułapkowania bezwładnościowego (inercyjnego)*, w którym pastylki zawierające wodór ściska się (metodą tzw. ablacji⁴) przy użyciu silnej wiązki promieniowania laserowego lub korpuskularnego.



Urządzenie do wytwarzania plazmy i jej pułapkowania inercyjnego

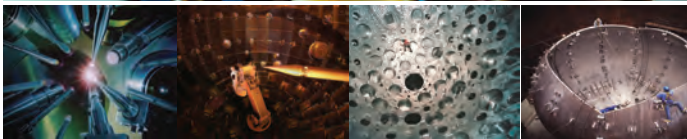
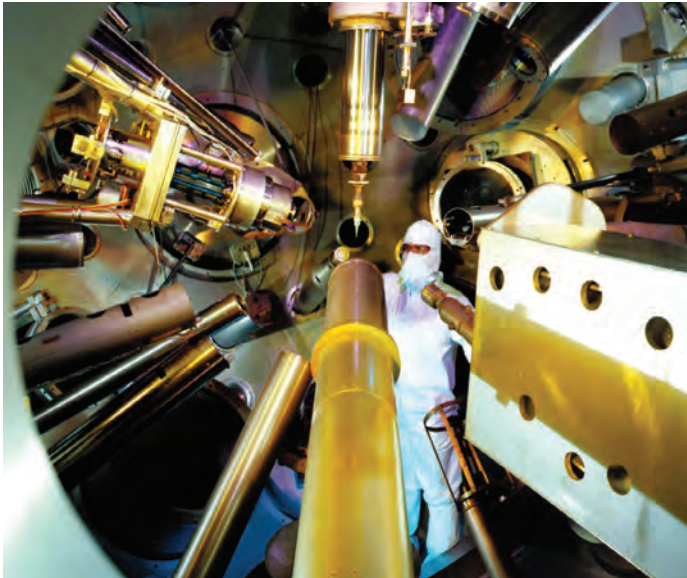
Na kulkę materii zawierającą np. tryt i deuter (patrz zdjęcie niżej) kieruje się ze wszystkich stron światło potężnych laserów. Pod wpływem odparowania powierzchni kulka zapada się i nagrzewa, a inercja tego procesu utrzymuje plazmę przez czas bardzo krótki, jednak wystarczający do zajścia reakcji syntezy jądrowej. Przebieg procesu pokazany jest schematycznie na pasku pod zdjęciem.



Aż trudno uwierzyć, że tak mała porcja materii (pelet) może wystarczyć do efektywnego wywołania reakcji syntezy jądrowej

Badania nad inercyjnym utrzymaniem plazmy prowadzone były intensywnie w Laboratorium w Livermore (USA) w zestawie o akronimie NOVA, jednakże używano laserów o bardzo małej sprawności, co spowodowało, że choć uzyskano 225 razy więcej energii niż potrzeba do zainicjowania reakcji (dla równomiernie grzanego peletu D+T), to energia wymagana do efektywnego wykorzystania reakcji syntezy jądrowej jest około 10 000 razy większa.

⁴błyskawicznego odparowania powierzchni



Fragmety instalacji NOVA, NIF (National Ignition Facility) w Livermore, USA

Warunkiem koniecznym dla produkowania energii w reaktorze termojądrowym jest spełnienie tzw. *kryterium Lawsona*, które głosi, że iloczyn gęstości jąder w plazmie i efektywnego czasu utrzymania plazmy w temperaturze zapłonu powinien przewyższać określoną wartość. W wypadku mieszaniny 1:1 deuteru z trytem i metody magnetycznej, o której za chwilę powiemy więcej, kiedy to gęstość cząstek przewyższa około $10^{20}/\text{m}^3$, czas utrzymywania plazmy, zgodnie z kryterium Lawsona, jest dłuższy od 1 sekundy. Odpowiadające tej sytuacji temperatury to 100-200 milionów stopni.

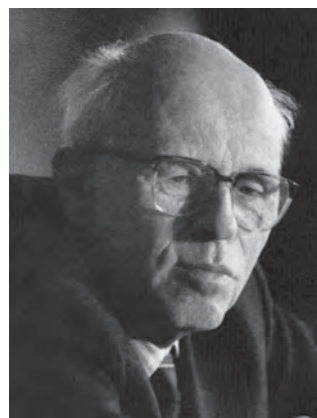
Kryterium Lawsona dla bezwładnościowego utrzymywania plazmy, kiedy to gęstość cząstek jest mniejsza od około $10^{31}/\text{m}^3$, oznacza zapewnienie efektywnego czasu utrzymywania plazmy tylko nieco ponad 10^{-11} s.

Ruchem cząstek naładowanych w plazmie można sterować przy użyciu pola magnetycznego. W układach tworzących zamknięte pętlaki magnetyczne, w reaktorach zwanych *tokamakami*, grzeje się i gromadzi plazmę (na przykład deuterowo-trytową) o gęstości około 10^{21} lub mniej cząstek na metr sześcienny.

Jak się okazało, najefektywniejszą konfiguracją pola magnetycznego jest konfiguracja toroidalna. Wygląda ona jak pączek amerykański i tworzy zamkniętą "butelkę magnetyczną". Dla zapewnienia stabilności plazmy linie pola magnetycznego powinny układać się na linii śrubowej (helisie). Taki typ pęłaki tworzą zarówno tokamaki, jak i układy znane pod nazwą *stellaratorów*.

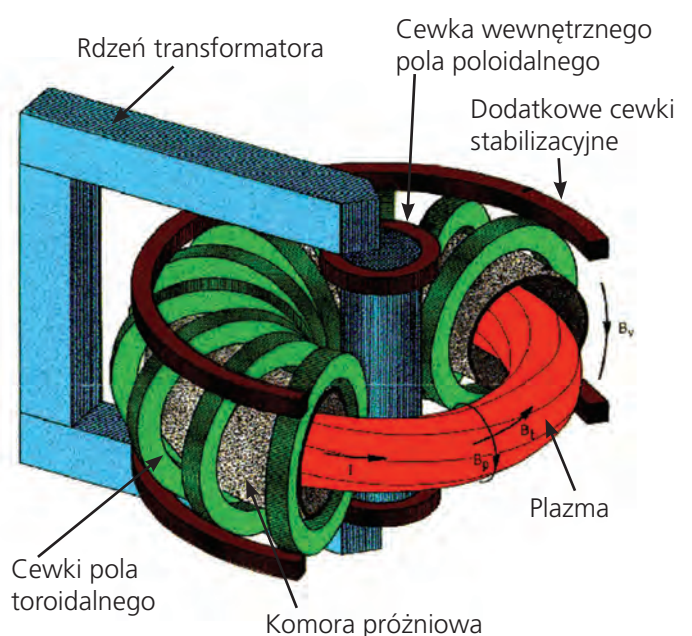
W tokamaku (nazwa pochodzi od ros. *toroidalnaja kamera w magnitnych katuszkach*), wokół komory próżniowej w kształcie torusa znajduje się szereg cewek pola magnetycznego. Rdzeń transformatora przechodzi przez środek tokamaka, prąd w plazmie odpowiada zaś uzwojeniu wtórnemu w typowym transformatorze. Zmienne pole magnetyczne w rdzeniu transformatora generuje wewnątrz toroidu wi-

rowe pole elektryczne, które przyspiesza jony i elektrony plazmy. Prostopadłe do pola toroidalnego pole magnetyczne (tzw. poloidalne) wytwarzane jest bezpośrednio przez indukowany w plazmie prąd. Prąd ten także ogrzewa plazmę do wymaganej temperatury około 10^6 stopni (mamy tu do czynienia z tzw. *grzaniem omowym*). Z kolei pole magnetyczne wytwarzane przez prąd płynący przez plazmę wywołuje efekt samozaciskania się sznura plazmowego (tzw. *pinch effect*), skutkujący zwiększeniem gęstości plazmy. Dodatkowe cewki nawinięte na obwodzie torusa wytwarzają zewnętrzne poloidalne pole magnetyczne stabilizujące sznur plazmowy. Opisana konfiguracja pól magnetycznych powoduje, że cząstki w plazmie poruszają się po torach śrubowych wzdłuż osi torusa, nie dotykając ścianek komory. Pomysł tokamaka pochodzi od fizyków rosyjskich: Andrieja Sacharowa i Igora Tamma. Największą wadą tych urządzeń jest fakt, iż zakres możliwych parametrów ich pracy jest bardzo ograniczony.



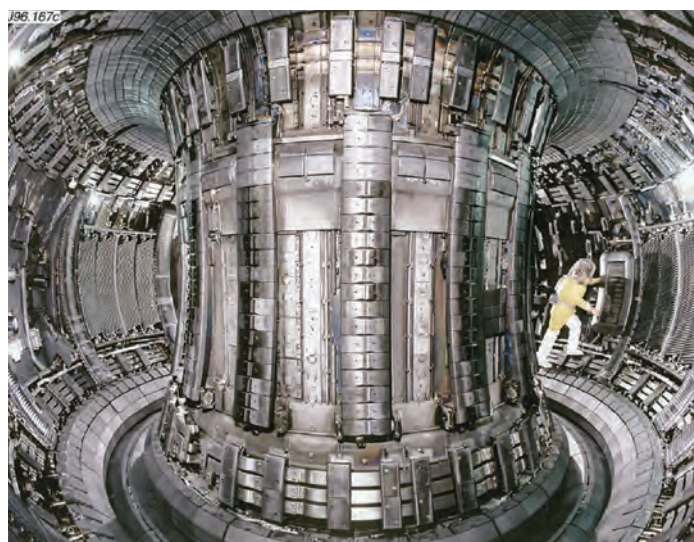
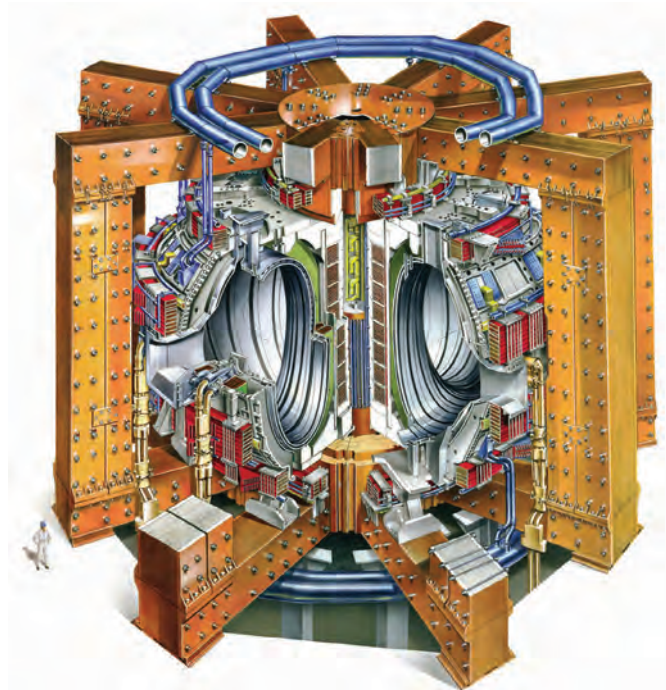
Andriej Dmitrijewicz Sacharow
(1921-1989)
Źródło: Wikipedia

Igor Jewgienjewicz Tamm
(1895-1971)
Źródło: Wikipedia



Zasada tokamaka - cewki pionowe (wokół torusa) wytwarzają pole toroidalne, cewki poziome wytwarzają poloidalne pole magnetyczne

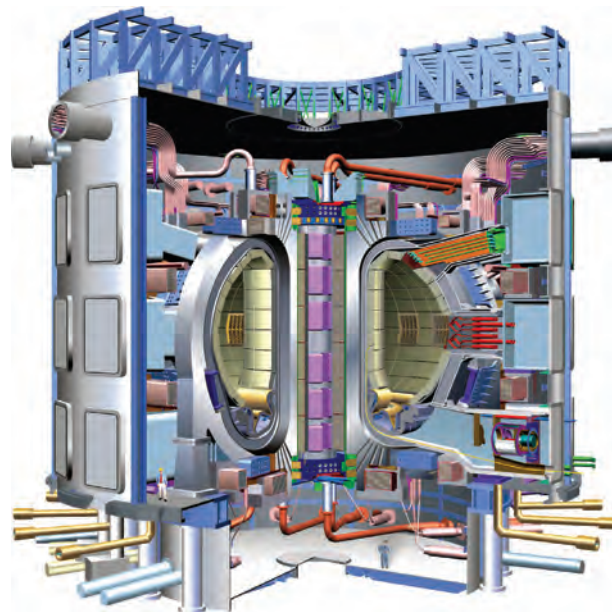
Pierwszym zbudowanym na świecie tokamakiem był układ uruchomiony w Instytucie Energii Atomowej w Moskwie (obecnie im. Kurczatowa). Największym zbudowanym dotąd był JET (od ang. *Joint European Torus*) w miejscowości Culham w Anglii. Rysunki pokazują w przejrzysty sposób – przez porównanie z rozmiarami człowieka – gigantyczne rozmiary tego urządzenia.



Schemat (góra) i wnętrze komory JET

W roku 2007 rozpoczęto ogólnoświatowy projekt budowy tokamaka III generacji o nazwie ITER (od ang. *International Thermonuclear Experimental Reactor*), w którym objętość komory na plazmę będzie dziesięciokrotnie przewyższała komorę w JET, a o rozmiarze całości może świadczyć sylwetka człowieka u dołu kolejnego rysunku. Po stacji orbitalnej ISS (od ang. *International Space Station*) jest to obecnie najdroższy projekt naukowy realizowany na świecie (ok. 10 miliardów euro), a uczestniczą w nim Unia Europejska, USA, Rosja, Japonia, Korea Południowa, Chiny i Indie (de facto w projekcie pracują uczeni z 34 państw). Wyniki uzyskane na instalacji ITER mają posłużyć do zbudowania tokamaka IV generacji – DEMO, będącego już przygotowaniem do budowy prototypu pierwszej elektrowni termojądrowej, która powinna powstać w tym stuleciu. Przewiduje się, że w instalacji ITER czas utrzymania plazmy

(o objętości 837 m³, ponad 8 razy większej niż w JET!) wyniesie 1000 sekund, a moc potrzebna do uzyskania syntezy jądrowej około 50 MW. Reaktor o promieniu 6,2 metra ma być zbudowany z 25 ogromnych elektromagnesów, z których największy ma ważyć 840 ton. Natężenie pola magnetycznego we wnętrzu ITERa ma być rzędu 2 tesli. Temperatura wewnątrz plazmy będzie 10 razy większa niż w rdzeniu Słońca i wyniesie 150 milionów stopni!



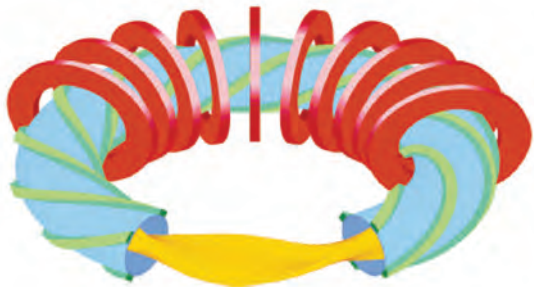
Rysunek projektu ITER realizowanego obecnie w Cadarache na południu Francji. Proszę zwrócić uwagę na rozmiary tego urządzenia: w dole rysunku widać postać człowieka

Zamknięte w ITERze paliwo zapłonie na 500 sekund, osiągając temperaturę 100 milionów stopni. W owym czasie reaktor wytworzy 500 megawatów energii, a więc dziesięć razy więcej, niż pobrał. 75% tej energii będzie konieczne do podtrzymania reakcji, a więc na zewnątrz będzie można wykorzystać jedynie 25% wytwarzanej mocy. ITER nie będzie jednak elektrownią, a jedynie instalacją pozwalającą na zbadanie wszystkich procesów, które będą zachodzić w przyszłej elektrowni termojądrowej. Planowane pierwsze użycie mieszanki deuterowo-trytowej wyznaczono na rok 2027.



Model komory próżniowej ITERa Źródło: Wikipedia

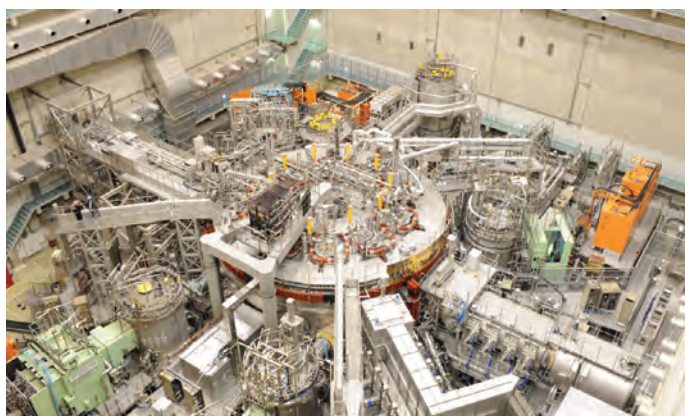
Innym rozwiązaniem technicznym dla utrzymania plazmy jest stellarator, w którym pole magnetyczne wytwarzane jest przez cewki o silnie zdeformowanym (lecz precyzyjnie obliczonym) kształcie. Rysunek i zdjęcie pokazują kształt takich cewek i równie specyficznie ukształtowanego sznura plazmowego. Stellaratory są budowane w kilku krajach. Największy z nich LHD (od ang. *Large Helical Device*) został zbudowany w Japonii.



Schemat stellaratora



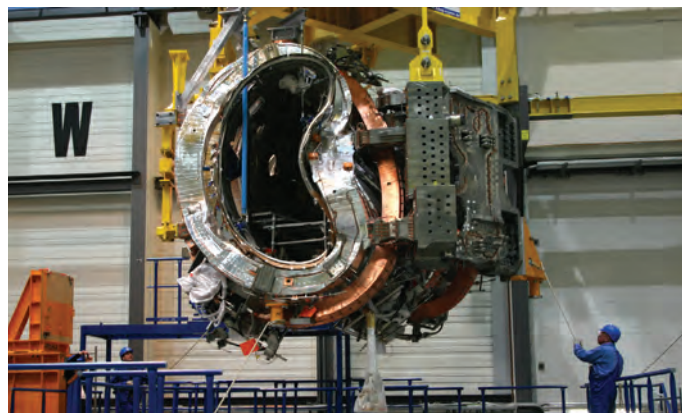
Fragmentu układu cewek pola magnetycznego



Widok LHD Japonia



Wendelstein 7-X, Niemcy



Wendelstein 7-X, Niemcy, w budowie którego Polacy mają swój udział

W odróżnieniu od tokamaka w sznurze plazmowym nie płynie prąd, a plazmę podgrzewa się mikrofalami lub strumieniem cząstek, którymi mogą być odpowiednio rozpędzone atomy paliwa. Jak dotąd wszystkie obietnice i nadzieje na wytwarzanie energii z reakcji termojądrowej okazały się przedwczesne - jedynie stosunkowo niedawno wyprodukowana przez chwilę energia zrównała się z energią dostarczoną do układu (najpierw w amerykańskim reaktorze TFTR i japońskim JT60, ostatnio w europejskim JET). Nie wydaje się, aby można było oczekiwać powstania wydajnych źródeł energii tego typu przed końcem XXI wieku, choć taką nadzieję na wykorzystanie energii termojądrowej w regularnej energetyce stwarza obecnie budowa instalacji ITER. ITER ma posłużyć do zbudowania pierwszego energetycznego reaktora termojądrowego o mocy rzędu 3000-4000 MW. Niestety, energia termojądrowa została już wykorzystana do celów militarnych w tzw. bombie wodorowej.



Testowa eksplozja bomby wodorowej Ivy Mike w dniu 1.11.1952, na atolu Eniwetok Źródło: Wikipedia



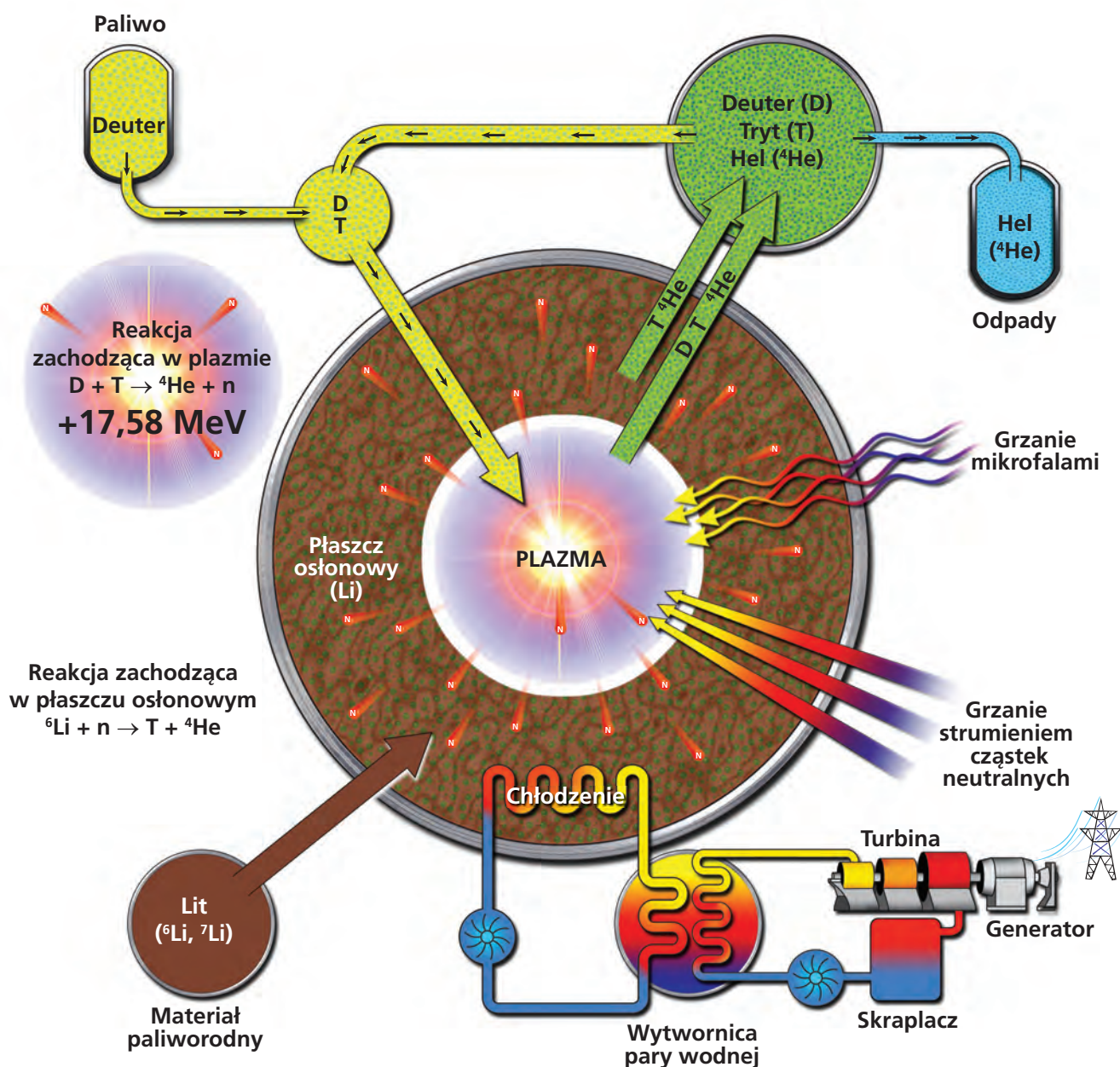
Test „Castle Bravo” 01.03.1954 na atolu Bikini
(www.donaldedavis.com/CASTBRAV)

5. Reaktor termojądrowy

Reakcją, którą się prawdopodobnie wykorzysta w przyszłości będzie przede wszystkim synteza deuteru i trytu, choć rozpatruje się też syntezę dwóch atomów deuteru. Deuter można łatwo znaleźć w wodzie (30 g na metr sześcienny, jeden na 6000 atomów wodoru). Tryt, którego w całej przyrodzie jest zapewne nie więcej niż jedna szklanka, musi być wytworzony albo w reaktorze jądrowym, albo powstać w reaktorze termojądrowym z litu - pierwiastka, który znajduje się w dużych ilościach w skorupie ziemskiej. Taki reaktor termojądrowy składałby się z grubego (ok. 1 m) kożucha litowego, zawierającego także beryl, otaczającego rdzeń reaktora. Sam lit pochłaniałby neutrony spowalniane w tymże kożuchu. Ostatecznie lit przekształcałby się w tryt i hel. Wyzwalana w reakcji deuteru z trytem energia ogrzewałaby kożuch litowy i byłby to punkt startowy do wytwarzania energii użytecznej. Beryl w tym układzie jest natomiast niezbędny dla podtrzymania liczby neutronów.

Od lat próbuje się zatem stworzyć jakąś instalację wykorzystującą reakcję syntezy, gdyż zapasów paliwa dla tych celów starczy nawet na miliardy lat! Dla porównania: do wyprodukowania energii elektrycznej 1 GW-roku z reakcji rozszczepienia jądrowego potrzebujemy około 35 ton UO_2 , natomiast otrzymanie jej z reakcji syntezy wymaga posiadania około 100 kg deuteru oraz 150 kg trytu. Co dodatkowo czyni reakcję syntezy atrakcyjną, to także niemal kompletny brak ubocznych produktów promieniotwórczych (jeśli nie liczyć trytu!), a w szczególności bardzo ważny fakt, że działanie elektrowni opartej na reakcji syntezy nie może powodować powstawania materiałów, których można użyć do produkcji broni jądrowej. Prawdopodobny schemat reaktora termojądrowego pokazuje rysunek niżej.

Schemat reaktora termojądrowego



W odróżnieniu od reaktorów jądrowych wykorzystujących proces rozszczepienia, ewentualny wybuch instalacji termojądrowej jest z zasady niemożliwy, gdyż zanim wybuch nastąpi, plazma musi się rozszerzyć i obniżyć temperaturę, co automatycznie zatrzyma proces syntezy jądrowej. Nie oznacza to jednak, że z tego typu instalacją nie wiążą się żadne niebezpieczeństwa. W szczególności należy mieć na uwadze znaczną produkcję neutronów i promieniotwórczego trytu. Obecność stopionych soli litu oraz rakotwórczego berylu tworzy również pewne zagrożenie.

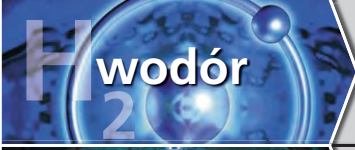
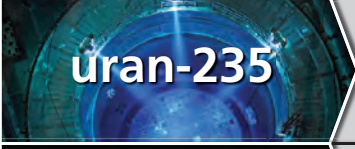
W reaktorach termojądrowych będzie tworzyła się, podobnie jak w obecnych reaktorach jądrowych, ogromna ilość promieniowania jonizującego (szczególnie neutronowego). Z tego względu zasadniczą sprawą staje się konstrukcja właściwej osłony biologicznej przed tym promieniowaniem. Jednak nawet w najgorszym scenariuszu uwolnienie

materiałów promieniotwórczych do atmosfery nie będzie nigdy tak groźne, żeby zmuszało do ewakuowania pobliskiej ludności. Ponadto, wytwarzane w trakcie pracy elektrowni materiały promieniotwórcze szybko się rozpadają i nie wymagają specjalnego odizolowywania ich od środowiska. Problemem szczególnym jest natomiast możliwość uwolnienia promieniotwórczego trytu. Ten gaz promieniotwórczy ma dużą zdolność penetracji, łatwo rozpuszcza się w wodzie i może być niebezpieczny jeszcze wiele lat po jego utworzeniu (okres połowicznego zaniku trytu to około 12 lat). Dlatego też zwraca się uwagę na rozwiązanie zagadnień związanych z reakcją deuter-deuter, a nie reakcjami, w których bierze udział tryt.

Na koniec warto porównać ilość potrzebnego paliwa do produkcji energii elektrycznej, a także rodzaje odpadów produkowanych podczas produkcji.

6. Potrzebne paliwo i rodzaje odpadów produkowanych podczas produkcji energii elektrycznej

Przybliżone zużycie paliwa w elektrowni o mocy elektrycznej 1000 MWe, produkującej rocznie 8000 GWh energii elektrycznej, a także rodzaje wytwarzanych odpadów przedstawione są niżej.

paliwo	masa/objętość	odpowiednik
 drewno	$\frac{3\,700\,000\,000\text{ kg}}{7\,400\,000\text{ m}^3}$	 2 500 000 drzew ponad 6000 ha lasu
 węgiel kamienny	$\frac{3\,200\,000\,000\text{ kg}}{640\,000\text{ m}^3}$	 1 000 pociągów po 40 wagonów
 olej opałowy	$\frac{1\,700\,000\,000\text{ kg}}{2\,000\,000\text{ m}^3}$	 60 000 ciężarówek cystern
 gaz ziemny	$\frac{1\,500\,000\,000\text{ kg}}{2\,000\,000\,000\text{ m}^3}$ *	 10 000 sterowców takich jak Hindenburg
 wodor	$\frac{600\,000\,000\text{ kg}}{6\,500\,000\,000\text{ m}^3}$ *	 34 000 sterowców takich jak Hindenburg
 uran-235	$\frac{1\,000\text{ kg}}{8\text{ m}^3}$ **	 1 ciężarówka rocznie
 deuter i tryt	$\frac{257\text{ kg}}{1145\text{ m}^3}$ ***	 1 furgonetka rocznie

* objętości gazów w warunkach normalnych (ciśnienie 1013 hPa, temperatura 273 K)

** jedna tona uranu uzyskiwana jest z przerobu 150 ton uranu naturalnego

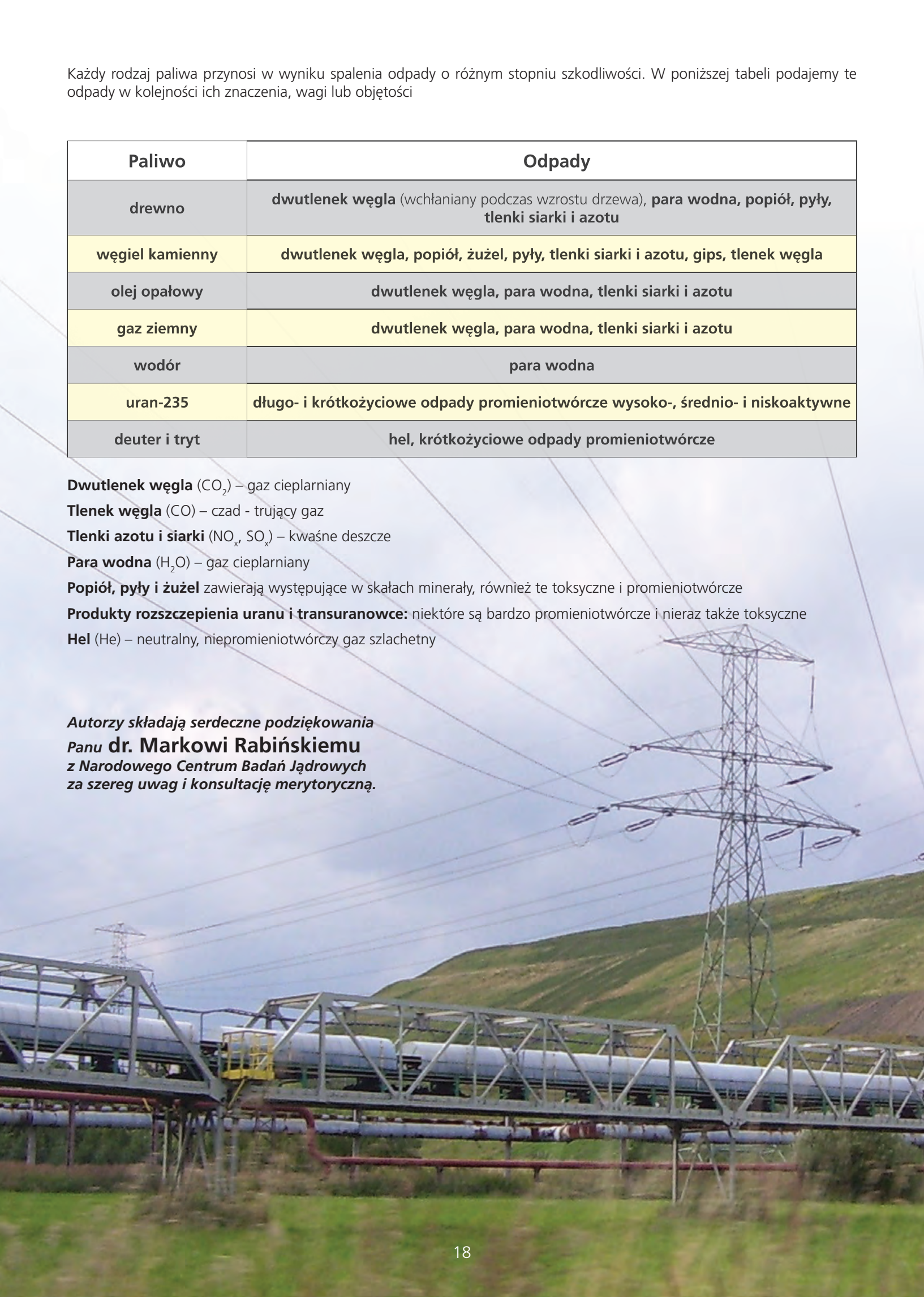
*** potrzebny deuter można uzyskać z 3 000 ton wody, tryt zaś wyprodukować już w samej elektrowni z zaledwie 10 ton rudy litu, którego w skorupie ziemskiej jest pod dostatkiem

Każdy rodzaj paliwa przynosi w wyniku spalania odpady o różnym stopniu szkodliwości. W poniższej tabeli podajemy te odpady w kolejności ich znaczenia, wagi lub objętości

Paliwo	Odpady
drewno	dwutlenek węgla (wchłaniany podczas wzrostu drzewa), para wodna, popiół, pyły, tlenki siarki i azotu
węgiel kamienny	dwutlenek węgla, popiół, żużel, pyły, tlenki siarki i azotu, gips, tlenek węgla
olej opałowy	dwutlenek węgla, para wodna, tlenki siarki i azotu
gaz ziemny	dwutlenek węgla, para wodna, tlenki siarki i azotu
wodór	para wodna
uran-235	długo- i krótkożyciowe odpady promieniotwórcze wysoko-, średnio- i niskoaktywne
deuter i tryt	hel, krótkożyciowe odpady promieniotwórcze

- Dwutlenek węgla (CO_2) – gaz cieplarniany
- Tlenek węgla (CO) – czad - trujący gaz
- Tlenki azotu i siarki (NO_x , SO_x) – kwaśne deszcze
- Para wodna (H_2O) – gaz cieplarniany
- Popiół, pyły i żużel zawierają występujące w skałach minerały, również te toksyczne i promieniotwórcze
- Produkty rozszczepienia uranu i transuranowce: niektóre są bardzo promieniotwórcze i nieraz także toksyczne
- Hel (He) – neutralny, niepromieniotwórczy gaz szlachetny

Autorzy składają serdeczne podziękowania
Panu **dr. Markowi Rabińskiemu**
z Narodowego Centrum Badań Jądrowych
za szereg uwag i konsultację merytoryczną.



7.

Uzupełnienie - wartość energetyczna materiałów

Nośnik energii	kJ/kg
D–D (synteza)	3×10^{11}
^{235}U (całkowite rozszczepienie przez neutrony termiczne)	$7,0 \times 10^{10}$
D ₂ O (reakcja syntezy D-D)	3×10^9
paliwo typu UO ₂ , wzbogacenie 2,5%, neutrony termiczne	$1,5 \times 10^9$
naturalny uran, neutrony termiczne	5×10^8
^{210}Po (rozpad α) $T_{1/2} = 138,4$ dni	moc wydzielana ~ 200 W/g
^{238}Pu (rozpad α) $T_{1/2} = 87,74$ lat	moc wydzielana $\sim 0,5$ W/g

Nośniki konwencjonalne

Materiał	kJ/kg
wodór	$\sim 120 \times 10^3$
metan	$\sim 50 \times 10^3$
paliwa kopalne	$(10 \div 50) \times 10^3$
wodospad wysokość 100m	~ 1
różne baterie chemiczne	$100 \div 400$
sprężyna	$0,16$

Porównanie typowych paliw	Ciepło spalania kJ/kg
węgiel kamienny	$(20 \div 37) \times 10^3$
węgiel brunatny	$\sim 17 \times 10^3$
koks	$\sim 32 \times 10^3$
drewno (suche)	$(10 \div 15) \times 10^3$
ropa	$(40 \div 42) \times 10^3$
benzyny	$(41 \div 44) \times 10^3$
oleje opałowe	$(37 \div 42) \times 10^3$

