



Przeszłość, teraźniejszość i przyszłość energetyki termojądrowej

Opracowanie tematu w ramach przedmiotu *Metody i Technologie Jądrowe w Środowisku Przemysłu i Medycynie*

Fizyka Medyczna – Semestr 7

Prowadzący:

Prof. dr hab. Jan Pluta

Autor:

Bartosz Gruszewski

Warszawa 2011

Spis treści

1. Geneza	3
1.1. Gdzie w naturze istnieje energia termojądrowa, pojęcie plazmy.	3
1.2. W jaki sposób wytwarza się energia termojądrowa, jakie zachodzą w niej reakcje.	4
1.3. Czym jest ‘paliwo’ wykorzystywane w reakcji termojądrowej oraz jakie jest jego miejsce w naturze (szkodzi czy jest neutralne).	5
2. Czy na Ziemi możliwe jest przeprowadzenie reakcji termojądrowej	6
2.1. Dostępne paliwo, jak je uzyskać i jakie są jego zasoby na Ziemi. Koszt uzyskania paliwa do kosztu energii oraz okres czasu, na jaki to paliwo będzie starczyło.	6
2.2. Warunki konieczne do uzyskania reakcji termojądrowej, czy jest możliwe ich spełnienie. ...	6
2.3. Niekontrolowana reakcja termojądrowa, czyli bomba wodorowa.	7
3. Czy jest sens inwestowania w energię termojądrową? Porównanie możliwych źródeł energii elektrycznej, ich szkodliwość oraz zapotrzebowanie na paliwo	7
3.1. Dane zestawiające aktualne źródła i ich procent użycia na świecie.	7
3.2. Tabela przedstawiająca przykładowe źródła energii, energię jaką można z nich otrzymać i ich szkodliwość.	8
3.3. Inne plusy idące z istnieniem reaktora termojądrowego, czyli możliwość dokładniejszego obserwowania reakcji, które zachodzą na słońcu.	9
3.4. Energia termojądrowa jako konkurencja dla energii słonecznej: czy następuje konflikt pomiędzy obiema technologiami?	9
4. Próby okiełznania energii termojądrowej	10
4.1. Aktualne reaktory badawcze	10
4.2. Koncepcja i próba przeprowadzenia zimnej fuzji.	11
5. Problemy, na które natrafiono oraz sposoby, które pozwoliły pójść krok dalej	11
5.1. Dwie koncepcje zapanowania nad plazmą – magnetyczne oraz inercyjne uwięzienie plazmy.	11
5.2. Energia potrzebna do podtrzymania reakcji termojądrowej, czyli czy tak naprawdę reaktor nie pożera więcej energii niż produkuje i czy to się opłaca.	12
6. Kolejne kroki w celu okiełznania słońca, czyli projekt ITER.	13
6.1. Koncepcja projektu, jego założenia, finansowanie oraz aktualny stan	13
6.2. Innowacyjne rozwiązania, które planowane są w projekcie ITER	14
6.3. Plan badawczy, czyli kiedy tak naprawdę reaktor będzie gotowy do użytku komercyjnego.	14
7. Bibliografia	15

1. Geneza

1.1. Gdzie w naturze istnieje energia termojądrowa, pojęcie plazmy.

Energia termojądrowa powstaje w wyniku reakcji termojądrowej (nazywanej też syntezą jądrową lub fuzją jąder). Zjawisko to polega na złączeniu się dwóch lżejszych jąder w jedno cięższe, w wyniku czego powstawać mogą obok nowych jąder wolne neutrony, protony, cząstki elementarne oraz cząstki alfa.

W wyniku reakcji egzotermicznej wydzielona energia (w postaci kinetycznej produktów oraz promieniowania gamma), zostaje rozproszona na otaczających atomach i przekształca się w energię cieplną. Energię wydzielającą się podczas takiej reakcji można wyznaczyć przez przeprowadzenie analizy deficytu masy, czyli różnicy mas składników i produktów reakcji.

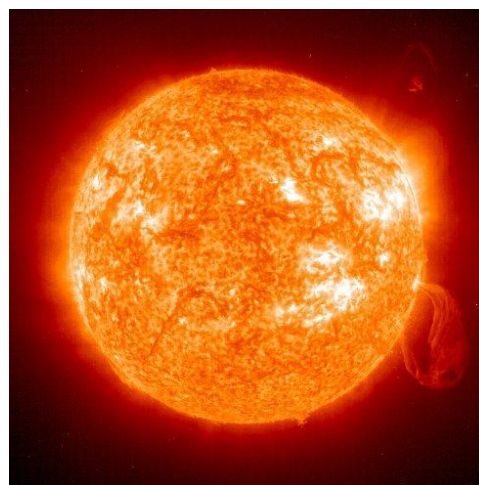
Aby doprowadzić do fuzji termojądrowej, czyli połączenia się dwóch jąder atomowych, potrzebne jest by zbliżyły się na takie odległości, aby siły oddziaływań jądrowych pokonały odpychanie elektrostatyczne pomiędzy jądrami atomowymi. Warunki te uzyskuje się wskutek bardzo wysokich temperatur lub podczas przyspieszania cząstek w akceleratorach.

Przedrostek termo pochodzi od głównego sposobu, w jaki wywoływana jest ta reakcja w gwiazdach i bombie wodorowej, czyli przez podniesienie temperatury do kilkunastu milionów kelwinów. W skali atomowej oznacza to bardzo dużą energię zderzania cząstek. Substancja, która składa się ze zjonizowanych atomów, pomiędzy którymi w określonych warunkach mogą zachodzić reakcje termojądrowe, nazywa się plazmą.

Plazma jest zjonizowaną materią w stanie skupienia przypominającą gaz. Jest ona złożona z cząstek naładowanych elektrycznie jak i obojętnych. Plazma, która znajduje się w gwiazdach, nazywana jest plazmą tworzącą gwiazdy (tak zwana plazma gorąca). Składa się ona z



Rysunek 2 - Plazma, a potem wiatr słoneczny wpadający w pole magnetyczne Ziemi ^[3]



Rysunek 1 - Zdjęcie słońca - naturalnego 'reaktora' termojądrowego ^[2]

naładowanych i obojętnych cząstek elementarnych oraz jąder atomowych, jednak ze względu na dużą gęstość i wysoką temperaturę nie można mówić o obecności atomów lub jonów. Inne rodzaje plazmy to np. plazma zimna lub plazma wyładowania

pierścieniowego.

Plazmę można również obserwować na Ziemi w postaci zorzy polarnej. Zorza powstaje w wyniku działania wiatru słonecznego, który powstaje w konsekwencji wyrzucania przez słońce plazmy w kosmos. Wiatr ten trafiając w pole magnetyczne Ziemi przenoszony jest w kierunku bieguna północnego, na którym można obserwować kolorowe światła, które nie są niczym innym



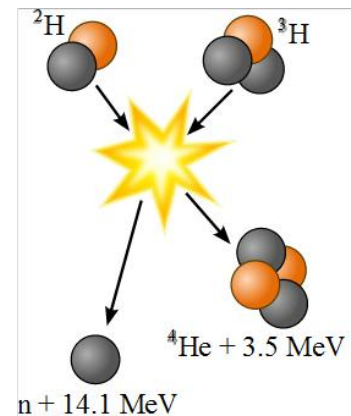
Rysunek 3 - Zorza polarna na Ziemi widziana z kosmosu [4]

jak plazmą pochodzącą ze Słońca.

1.2. W jaki sposób wytwarza się energia termojądrowa, jakie zachodzą w niej reakcje.

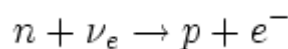
Energia termojądrowa powstaje w dwóch możliwych cyklach. Pierwszym z nich jest cykl protonowy, który występuje w niezbyt masywnych gwiazdach. Kolejnym cyklem jest cykl węglowo-azotowo-tlenowy, charakterystyczny dla bardziej masywnych gwiazd.

Cykl protonowy opiera się głównie na reakcji syntezy helu. Aby synteza ta nastąpiła, jądra wodoru (protony) muszą się zbliżyć na odległość zasięgu oddziaływania jądrowego (około $1\text{fm} = 10^{-13}$ m). Protony odpychają się jednak elektrostatycznie, zatem muszą pokonać barierę potencjału o wartości około $E = 1$ MeV. Taką energię termiczną mają cząstki o temperaturze 10^{10}K . Tak wysokiej temperatury nie ma we wnętrzu gwiazd, ale przebieg zjawiska w niższej temperaturze tłumaczy zjawisko tunelowe.

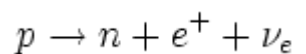


Rysunek 4 - Reakcja fuzji termojądrowej, jądra deuteru i trytu łączą się, powstaje jądro helu, neutron i wydzielana jest energia [5]

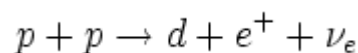
Proces syntezy helu zachodzi w wyniku kilku reakcji:



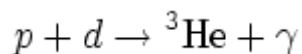
Proces ten jest konsekwencją oddziaływań słabych (wymiany bozonu W). Podczas syntezy występuje odwrotny rozpad β :



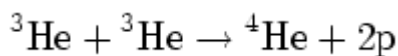
Reakcja ta, jako konsekwencja oddziaływań słabych, jest bardzo powolna. Powoduje to, że gwiazdy świecą się długo, a nie spalają się w jednej chwili, lecz w ciągu milionów czy miliardów lat. W wyniku tej reakcji i w wyniku oddziaływania jądrowego tworzy się deuter:



Reakcja ta jest bardzo powolna. Następnie w wyniku reakcji:

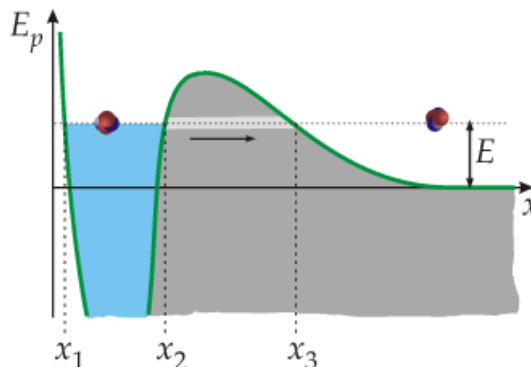


Powstaje izotop helu, po którym następuje fuzja dwóch jąder helu:



Opisany powyżej ciąg reakcji jądrowych zwany jest cyklem wodorowym. W pojedynczym cyklu tworzenia 1 jądra helu z 4 protonów emitowane jest 26,7MeV energii i jest to główne źródło energii gwiazd. Część energii jest tracona przez uchodzące neutrino (około 1,6MeV).

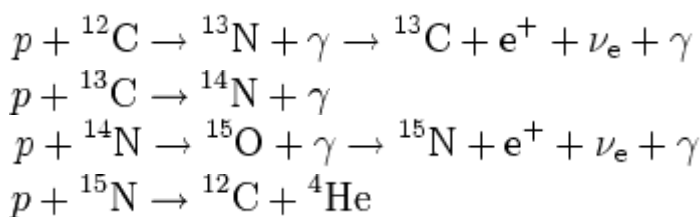
Zderzające się jądra mają zazwyczaj energię mniejszą od energii potrzebnej do pokonania bariery potencjału elektrycznego, ale przenikają przez nią na skutek zjawiska kwantowego zwanego efektem tunelowym. W wyniku syntezy produkowane są nowe jądra, neutrino i fotony. Wysokoenergetyczne fotony przekazują najpierw energię materii gwiazd, podgrzewając ją, aby po pewnym czasie jako



Rysunek 5 - Cząstka α uwalniająca się z potencjału jądra (zielona linia) dzięki zjawisku tunelowemu [6]

promieniowanie ciepłe wydostać się z gwiazdy. Dla fotonów środowisko wnętrza gwiazdy nie jest przezroczyste. Średnia droga swobodna wysokoenergetycznego fotonu we wnętrzu Słońca wynosi około 10^{-3} m. Wydostawanie się energii z wnętrza gwiazdy na zewnątrz następuje w wyniku promieniowania wysokoenergetycznego, promieniowania ciepłego oraz konwekcji gazu w gwieździe. Na procesy te wpływa też miana ruchu cząstek w polu magnetycznym.

Cykl węglowo-azotowo-tlenowy zachodzi dla bardziej masywnych gwiazd. Wymaga on obecności jąder ${}^{12}\text{C}$ jako katalizatora. Cykl składa się z następujących reakcji:



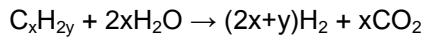
W procesie tych reakcji wyłaniana jest energia 23,8MeV. Około 98,4% energii w Słońcu produkowana jest w cyklu wodorowym, a tylko 1,6% w wyniku cyklu węglowo-azotowego. Znaczenie tego ostatniego cyklu wzrasta, gdy temperatura gwiazdy jest wyższa.

1.3. Czym jest 'paliwo' wykorzystywane w reakcji termojądrowej oraz jakie jest jego miejsce w naturze (szkodzi czy jest neutralne).

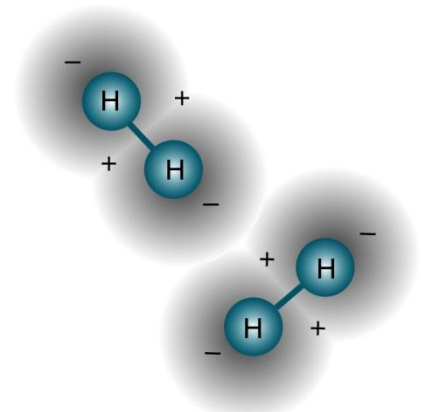
Paliwem w reakcji jądrowej są lekkie pierwiastki, takie jak wodór i jego izotopy, tj. deuter oraz tryt. Wodór jest najpowszechniej występującym pierwiastkiem we Wszechświecie. Występuje w

gwiazdach oraz obłokach międzygalaktycznych. W stanie wolnym występuje w postaci gazowych cząsteczek dwuatomowych H_2 , tworząc wodór cząsteczkowy.

Na Ziemi wodór można uzyskać przede wszystkim z wody, np. w reakcji konwersji realizowanej podczas przepuszczania alkanu nad parą wodną:



Wiadomo, że woda na Ziemi jest bardzo powszechna, zatem z uzyskaniem lekkich pierwiastków do reakcji termojądrowej nie byłoby problemów. Jednocześnie samo pozyskiwanie tego surowca nie byłoby szkodliwe dla środowiska. W przypadku pozyskiwania innych surowców, np. węgla czy ropy, zmiany w środowisku są ogromne. Można więc uznać, że paliwa do reakcji termojądrowej na Ziemi jest dużo oraz jest ono bezpieczne.



Rysunek 6 - Cząsteczki wodoru ^[19]

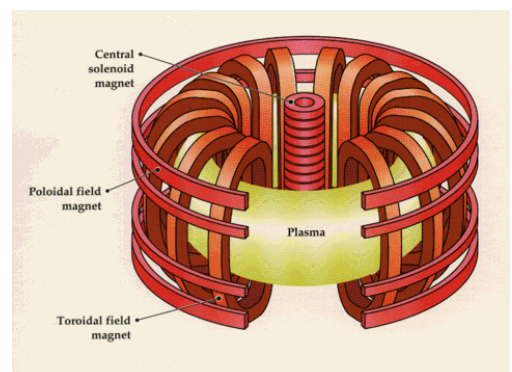
2. Czy na Ziemi możliwe jest przeprowadzenie reakcji termojądrowej

2.1. Dostępne paliwo, jak je uzyskać i jakie są jego zasoby na Ziemi. Koszt uzyskania paliwa do kosztu energii oraz okres czasu, na jaki to paliwo będzie starczyło.

Paliwem używanym do reakcji termojądrowej jest jeden z izotopów wodoru – deuter. Izotop ten można uzyskać z wody przy stosunkowo niewielkich kosztach. Ze względu na to, że wody w litosferze jest bardzo dużo, można uznać, że paliwo to jest niewyczerpywalne. Stawia to deuter w bardzo korzystnym świetle i stwarza to wymarzoną perspektywę dla energii termojądrowej na Ziemi.

2.2. Warunki konieczne do uzyskania reakcji termojądrowej, czy jest możliwe ich spełnienie.

Wiadomo, że do zajścia reakcji termojądrowej wymagana jest ogromna temperatura. Bardzo trudno w sposób kontrolowany jest wytworzyć kontrolowaną reakcję termojądrową. Głównym problemem jest kontrola bardzo gorącej plazmy. Kwestię tę rozwiązano poprzez tworzenie odpowiedniego pola magnetycznego, w którym trzymana jest plazma. Pole to tworzy z plazmy tak zwany tokamak (słowo to pochodzi od pierwszych głosek rosyjskiej nazwy *trois kamera magnit katuszka*, czyli komora w kształcie torusa z cewką magnetyczną).



Rysunek 7 - Obraz tokamaka (cewki wytwarzające pole magnetyczne i torus z plazmy) ^[10]

2.3. Niekontrolowana reakcja termojądrowa, czyli bomba wodorowa.

Pierwsza reakcja termojądrowa zainicjowana przez człowieka powstała w wyniku wybuchu bomby wodorowej Mike. Detonacja tej bomby miała miejsce 1 listopada 1952 roku.

Bomba wykorzystywała deuter i tryt jako paliwo termojądrowe. Siłę wybuchu oszacowano na 10,4 megaton (MT) czyli 700 bomb jądrowych zrzuconych na Hiroszimę.



Rysunek 8 - Wybuch bomby termojądrowej^[11]

Najpotężniejszą bombą wodorową była bomba Car Bombie, która została zdetonowana 30 października 1961 roku na wysokości 4km na Nowej Ziemi. Jej siłę oszacowano na 58 megaton czyli prawie 4000 bomb zrzuconych na Hiroszimę i nadano jej miano Zabójcy Miast. Konstrukcja tej bomby umożliwiała wybuch z mocą 150MT, jednakże ostatecznie siła eksplozji została ograniczona ze względu na obawy przez trudnymi do przewidzenia skutkami wybuchu.



Rysunek 9 - Bomba termojądrowa^[11]

3. Czy jest sens inwestowania w energię termojądrową? Porównanie możliwych źródeł energii elektrycznej, ich szkodliwość oraz zapotrzebowanie na paliwo

3.1. Dane zestawiające aktualne źródła i ich procent użycia na świecie.

W dzisiejszym świecie istnieje wiele sposobów uzyskiwania energii elektrycznej. Możliwość pozyskiwania energii elektrycznej można podzielić na następujące źródła:

- Energię pochodzącą z różnych paliw, takich jak ropa, węgiel, uran, gaz
- Energię ze źródeł odnawialnych, takich jak energia słoneczna, wiatr, woda, źródła geotermalne, energia pływów wodnych oraz biomasa.

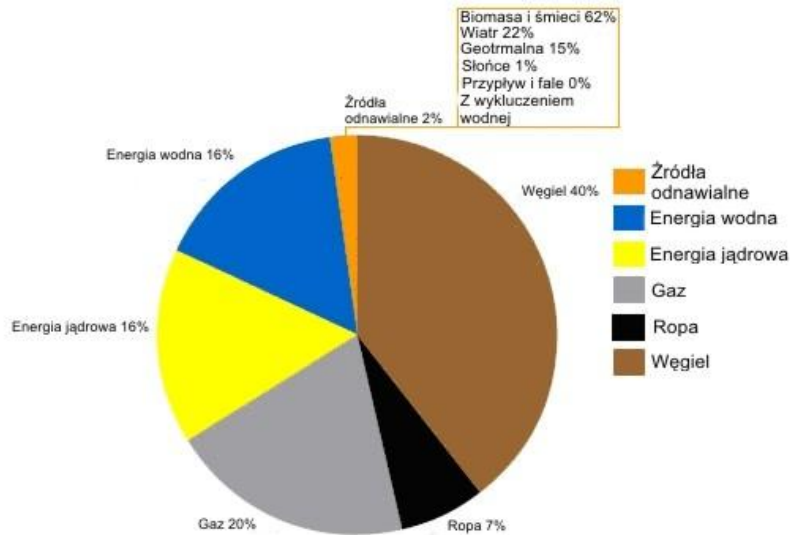
Obiekty, które wytwarzają energię z powyższych źródeł to:

- Elektrownia na paliwa kopalne (węglowa, na ropę, na gaz)
- Elektrownia słoneczna
- Elektrownia wiatrowa
- Elektrownia słoneczna
- Elektrownia atomowa
- Elektrownia geotermalna
- Itd.



Rysunek 10 - Elektrownia węglowa^[22]

Poniższy wykres przedstawia udział poszczególnych źródeł w produkcji energii elektrycznej [12].



Na powyższym diagramie widać, że na Ziemi energie głównie pozyskiwana jest z surowców kopalnianych, których wyczerpanie się to perspektywa kolejnych 100 lat. W tej chwili jednym z najpewniejszych źródeł na przyszłość jest energia słoneczna, która jest mało szkodliwa dla środowiska. Jednak koszt jej wytworzenia oraz warunki, których potrzebuje (duży obszar, duże naświetlenie) sprawia, że jest jeszcze ona mało popularna oraz nie można polegać na niej w perspektywie dłuższego czasu

Bardzo dobrym rozwiązaniem pomiędzy szkodliwością dla środowiska a możliwością uzyskania dużej ilości energii są elektrownie atomowe. Jednak nawet przy bardzo nowoczesnych sposobach wykorzystania przez nie paliwa jądrowego, paliwo to z czasem będzie wyczerpywać się coraz bardziej. Po 200 latach może go zabraknąć i wtedy elektrownie atomowe staną się bezużyteczne.

3.2. Tabela przedstawiająca przykładowe źródła energii, energię jaką można z nich otrzymać i ich szkodliwość.

Surowiec	Masa	Możliwa do uzyskania energia	Szkodliwość dla środowiska
węgiel	1kg	do 7 kWh	duża
uran	1kg	do 7 000 000 kWh	średnia
deuter	1kg	do 24 000 000 kWh	znikoma

Z powyższej tabeli widać, iż aktualnie z najbardziej używanego surowca, czyli węgla, można uzyskać najmniejszą ilość energii elektrycznej. Uran stosowany w elektrowniach jądrowych

przedstawia się już dużo lepiej, jednak zawsze pozostaje problem odpadów promieniotwórczych oraz problem z uzyskaniem odpowiedniego paliwa. Deuter w tym zestawieniu wypada najlepiej. Jego produkcja z wody ma znikomą wpływ na środowisko, a energia możliwa do wytworzenia robi wrażenie. Pozostaje jeszcze tylko kwestia wyprodukowania odpowiedniej technologii reaktora termojądrowego i energia elektrycznie stanie się zasobem wręcz nieograniczonym.

3.3. Inne plusy idące z istnieniem reaktora termojądrowego, czyli możliwość dokładniejszego obserwowania reakcji, które zachodzą na słońcu.

Poza takimi plusami, jak czysta energia oraz łatwe pozyskanie paliwa, za reaktorami termojądrowymi przemawiają także inne plusy. Podobnie, jak teraz reaktory jądrowe, tak reaktory termojądrowe byłyby głównymi punktami wycieczek, na których można byłoby obserwować zjawiska, które naturalnie na Ziemi nie zachodzą. Warto tutaj zwrócić uwagę na to, że reaktor termojądrowy to zminiaturyzowana gwiazda, którą można oglądać na Ziemi. Do tego samo działanie reaktora pozwoli na prowadzenie badań, które jeszcze bardziej przybliżą rasie ludzkiej zjawiska zachodzące we wszechświecie.



Rysunek 11 - Nauka przez doświadczenie (reaktor atomowy) ^[13]

3.4. Energia termojądrowa jako konkurencja dla energii słonecznej: czy następuje konflikt pomiędzy obiema technologiami?

Najbardziej przyszłościowymi technologiami pozyskiwania energii są następujące technologie:

- Energia jądrowa
- Energia termojądrowa
- Energia słoneczna

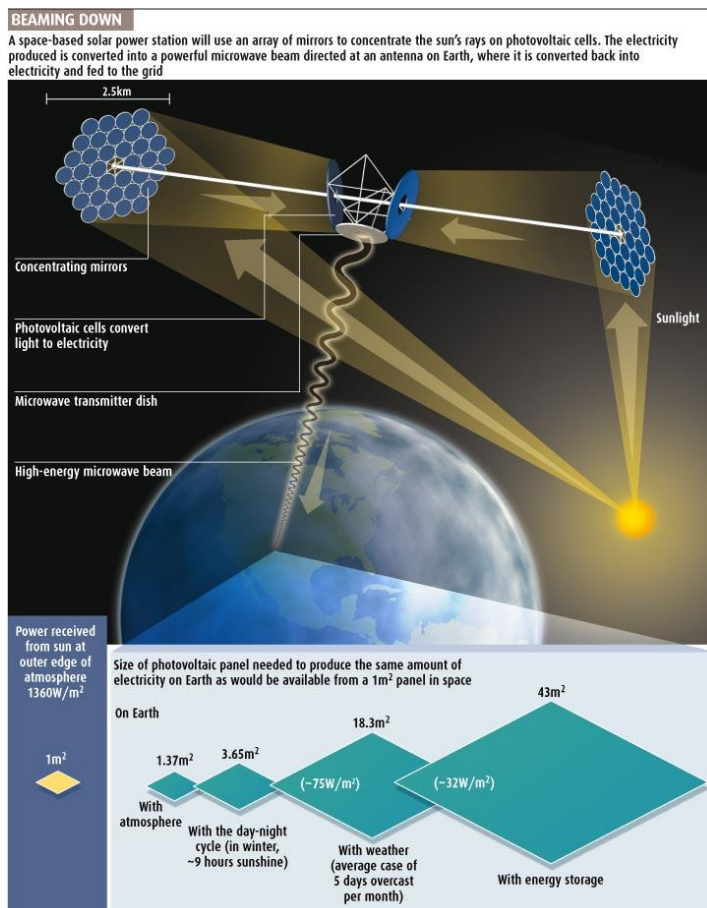
Energia słoneczna jest o tyle interesująca, że właściwie ciepło uzyskuje się przez odpowiednie zbieranie promieni słonecznych emitowanych przez Słońce. Technologię tę ogranicza jednak to, iż uzyskanie jej na Ziemi wymaga specyficznych warunków, takich jak długi czas oświetlania obszaru promieniami słonecznymi w ciągu dnia.



Rysunek 12 - Nowoczesna elektrownia słoneczna ^[21]

Istnieje jednak bardzo wiele ciekawych technologii oraz koncepcji, które uskuteczniłyby uzyskiwanie energii słonecznej. Te technologie to np.:

- Tworzenie ogromnej ilości luster, które z dużego obszaru kierują strumień w jeden punkt. Lustra te sterowane komputerowo w ciągu dnia przemieszczałyby się razem ze słońcem, co optymalizowałoby uzyskiwanie energii.
- Ciekawą koncepcją jest zbieranie energii słonecznej w kosmosie przez satelity (odpada czynnik dnia/nocy oraz pogody) i przesyłanie na Ziemię skupionej wiązki świetlnej, która następnie trafiając w odpowiedni odbiornik przetwarzałaby energię tej wiązki na energię elektryczną.
- Sama energia słoneczna jest bardzo ważnym źródłem pozyskiwania energii w kosmosie (np. na stacjach kosmicznych). Jest ona dostępna cały czas i nie wymaga niczego innego, jak uzyskania w sprawności baterii słonecznych.



Rysunek 13 - Koncepcja przesyłania energii słonecznej na Ziemię ^[14]

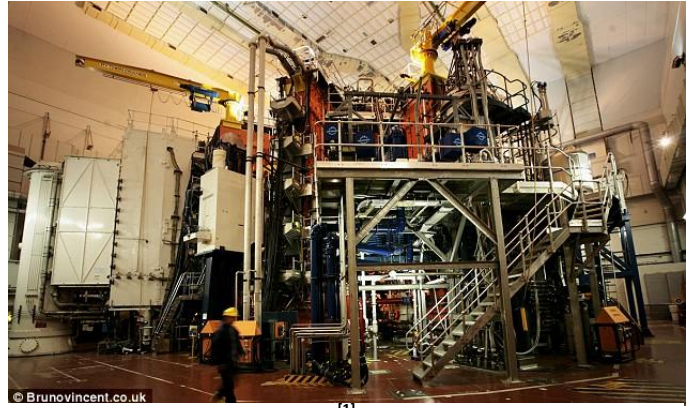
Jak widać, energia słoneczna jest bardzo dobrym uzupełnieniem energii jądrowej i termojądrowej, zatem w przyszłości wszystkie te energie powinny się uzupełniać w odpowiednich warunkach i każda z nich będzie miała odpowiednią rolę bardziej sprawdzającą się w danych warunkach.

4. Próby okiełznania energii termojądrowej

4.1. Aktualne reaktory badawcze

Największym reaktorem termojądrowym aktualnie wykorzystywanym do badań jest reaktor *Joint European Torus* (w skrócie JET). Jest to aktualnie największy do tej por zbudowany reaktor termojądrowy opierający się o koncepcję tokamaka. Znajduje się on w Wielkiej Brytanii w pobliżu miasta Culham.

Budowa tego reaktora została przeprowadzona wspólnie przez kraje europejskie. Rozpoczęta została w 1978 roku, a pierwsze eksperymenty zostały przeprowadzone już 1983 roku. Badania przeprowadzane z użyciem JET koordynuje *European Fusion Development Agreement*.



Rysunek 14- Zdjęcie reaktora JET ^[1]

Reaktor JET przystosowany jest do reakcji syntezy termojądrowej z wykorzystaniem deuteru i trytu. Rekordowa moc, jaka została osiągnięta przez ten reaktor to 16MW.

Aktualnie prowadzone eksperymenty mają głównie posłużyć do projektowania reaktora ITER.

4.2. Koncepcja i próba przeprowadzenia zimnej fuzji.



Rysunek 15 - Stoik z elektrodami, w którym rzekomo zachodzi zimna fuzja ^[7]

Jak wcześniej wspomniano, reakcja termojądrowa zachodzi w bardzo wysokich temperaturach. Istnieje jednak nadzieja, że można uzyskać tak zwaną zimną fuzję, czyli syntezę jądra w temperaturze niższej niż temperatura konieczna do pokonania odpychania elektrostatycznego między jądrami.

W 1989 roku Fleischmann i Pons z uniwersytetu w Utah ogłosili, że dokonali zimnej fuzji przeprowadzonej w temperaturze pokojowej podczas elektrolizy ciężkiej wody za pomocą palladowych elektrod. Stwierdzono wydzielanie nadmiarowej energii, co interpretowano jako zajście reakcji termojądrowej. W Utah otwarto pośpiesznie Instytut Zimnej Fuzji, na który przyznano 5 milionów dolarów grantu. Wybuchła badawcza gorączka, na całym świecie próbowano powtórzyć eksperyment, ale na próżno. Otrzymywane wartości są na granicy błędów. Po kilku miesiącach uznano to doświadczenie za nierealne i odmówiono dalszego finansowania. Jednak co jakiś czas powraca się do idei zimnej fuzji i prowadzone są sporadyczne badania.

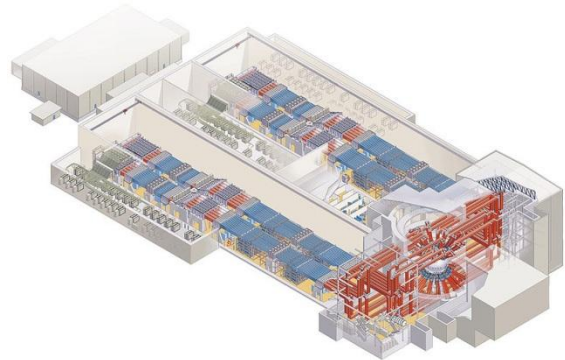
5. Problemy, na które natrafiono oraz sposoby, które pozwoliły pójść krok dalej

5.1. Dwie koncepcje zapanowania nad plazmą – magnetyczne oraz inercyjne uwięzienie plazmy.

Istnieje kilka sposobów, które teoretycznie mogą pozwolić wykorzystywać syntezę jądrową jako źródło energii. Obecnie najintensywniej badane są dwa podejścia: inercyjne uwięzienie plazmy oraz magnetyczne uwięzienie plazmy. Prace na mniejszą skalę prowadzone są też nad

metodą polywell (łącząca cechy dwóch poprzednich) oraz nad kilkoma niekanonicznymi metodami: piroelektryczną, soniczną i elektrolityczną (określaną jako zimna fuzja).

Inercyjne uwięzienie plazmy to nic innego, jak detonowanie małych bomb termojądrowych. . Po zainicjowaniu reakcji plazma swobodnie się rozprzestrzenia. Czas jaki jej to zajmuje jest jednak wystarczająco długi, aby przebiegła synteza. To podejście nazywane jest inercyjnym uwięzieniem plazmy. W takim procesie reakcja obejmuje całe dostępne paliwo, co w praktyce oznacza, że już

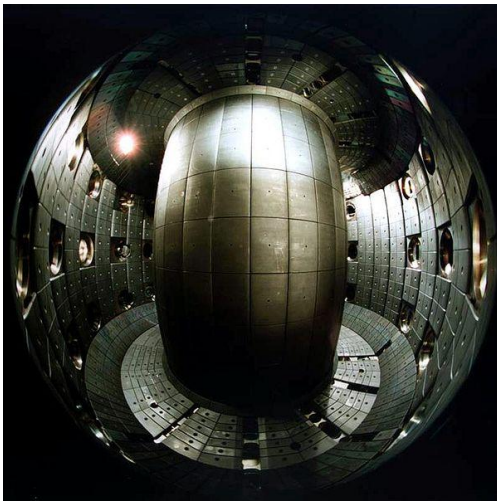


Rysunek 16 - Schemat urządzenia NIF ^[15]

miligramowe jego ilości wywołują eksplozję mogącą uszkodzić elektrownię. Teoretycznie można jednak stworzyć w ten sposób stabilne źródło energii, jeśli reakcja będzie wywoływana kilka razy na sekundę w niewielkich porcjach paliwa. Wymaga to niezależnego podgrzewania każdej porcji do wysokiej temperatury i kompresowania jej pod wysokim ciśnieniem.

Obecnie najbardziej zaawansowane projekty zakładają wykorzystanie silnego lasera, którego impuls byłby skupiany na zbiorniku zawierającym niewielką kulkę paliwa. Światło zaabsorbowane przez zbiornik byłoby reemitowane w postaci promieni rentgenowskich, które kompresowałyby

paliwo i podgrzewały je, inicjując syntezę. Największym ośrodkiem prowadzącym badania w tym kierunku jest obecnie National Ignition Facility w USA.



Rysunek 17 - Wnętrze tokamaka TCV, znajdującego się w EPFL w Szwajcarii ^[15]

Magnetyczne uwięzienie plazmy wykorzystuje fakt, że podgrzane paliwo jądrowe jest bardzo dobrym przewodnikiem prądu. Otwiera to możliwość uwięzienia jej przy użyciu pola magnetycznego. W takim polu, naładowane cząstki krążą wokół linii pola. Dodatkowo mogą poruszać się równoległe do linii pola, ale jeśli te linie są zamknięte, to cząstka jest uwięziona.

Najbardziej zaawansowanymi urządzeniami wykorzystującymi to zjawisko są tokamaki. Największym działającym urządzeniem tego typu jest JET, a w trakcie budowy jest o wiele większy ITER. Prowadzone są też badania nad bardziej

skomplikowanymi układami takimi jak stellaratory i sferomaki.

5.2. Energia potrzebna do podtrzymania reakcji termojądrowej, czyli czy tak naprawdę reaktor nie pożera więcej energii niż produkuje i czy to się opłaca.

W reakcji termojądrowej otrzymywanej w wyniku fuzji zachodzącej w tokamaku potrzebna jest duża energia do podtrzymania jej. W tej chwili nie udało się uzyskać dodatniego bilansu energetycznego. Pierwszym reaktorem, który ma tego dokonać, jest reaktor ITER, który obecnie

jest w fazie budowy. Otrzymanie dodatniego bilansu energetycznego byłoby kolejnym krokiem ku wykorzystaniu energii termojądrowej w życiu codziennym. Można wtedy byłoby zacząć budować reaktory na większą skalę o dostarczać z nich energię elektryczną, która powstaje w wyniku ciepła pochodzącego z reakcji termojądrowych zachodzących w tym reaktorze.

6. Kolejne kroki w celu okiełznania słońca, czyli projekt ITER

6.1. Koncepcja projektu, jego założenia, finansowanie oraz aktualny stan

ITER (International Thermonuclear Experimental Reactor) (łac. droga) – międzynarodowy projekt badawczy, którego celem jest zbadanie możliwości produkowania na wielką skalę energii z fuzji jądrowej. Głównym zadaniem jest budowa wielkiego tokamaka, wzorowanego na wcześniej budowanych mniejszych DIII-D, TFTR, JET, JT-60 i T-15. Projekt jest przewidywany na 30 lat (10 lat budowy i 20 lat pracy reaktora), i ma kosztować w przybliżeniu 10 miliardów €.



Rysunek 19 - Lokalizacja ITER ^[16]

tańszy jedynie od Międzynarodowej Stacji Kosmicznej. Według decyzji z dnia 28 czerwca 2005 tokamak powstanie w Cadarache w pobliżu Marsylii, na południu Francji. W projekcie uczestniczą finansowo i naukowo: Unia Europejska, Japonia, Rosja, Stany Zjednoczone, Chiny (od 2003), Korea Południowa (od 2003) i Indie (od 2005). Przed przystąpieniem do projektu Indii zakładano, że Unia Europejska pokryje 50% kosztów jego budowy, a pozostałe strony po 10% każda w formie komponentów.



Rysunek 18 - Model części reaktora ITER ^[16]

Pierwszy zapłon przewidywany jest na rok 2016. Według projektów ITER ma każdorazowo podtrzymywać reakcję fuzyjną przez około 1000 sekund, osiągając wydajność 500 MW. Dla porównania JET utrzymuje reakcję przez mniej niż sekundę i uzyskuje moc 16 MW. Energia w tym reaktorze będzie wydzielana się w postaci ciepła, nie jest przewidywane przetwarzanie jej na energię elektryczną. Na bazie ITER ma powstać przyszła generacja reaktorów fuzyjnych, mogących produkować 3000–4000 MW mocy.

6.2. Innowacyjne rozwiązania, które planowane są w projekcie ITER

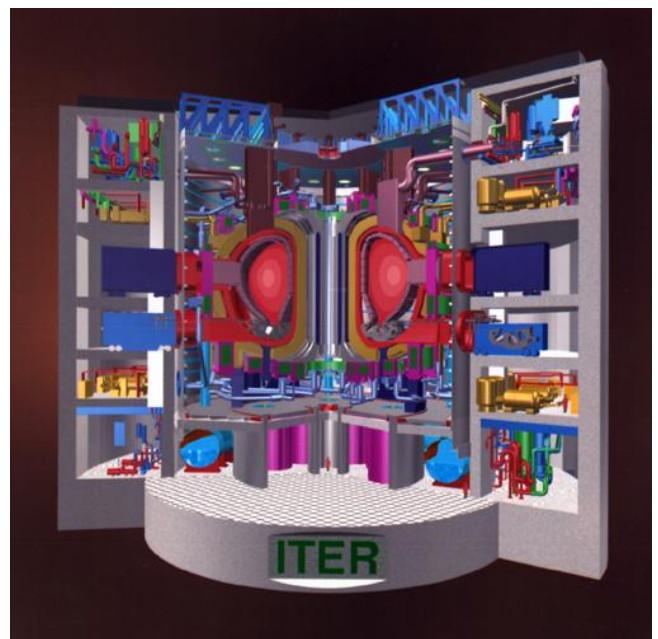
ITER jest bardzo zaawansowanym technologicznie i drogim projektem. Jego celem jest opracowanie jak najbardziej optymalnych metod radzenia sobie z takimi zjawiskami towarzyszącymi reakcji termojądrowej, jak wytwarzanie się wysokoenergetycznych neutronów czy ujemny bilans energii, tj. celem jest, aby podtrzymanie reakcji było mniej kosztowne energetycznie, niż energia, którą reaktor faktycznie będzie produkował. Ważnym celem jest również zebranie jak największej ilości danych na temat zachowania się plazmy. Ze względu na łatwe rozpadanie się torusa w reaktorze z powodu pojawienia się chaosu, wręcz niemożliwe jest teoretyczne modelowanie tego zjawiska. Wiedza zdobyta podczas doświadczeń będzie kluczowa w tworzeniu przyszłej energetyki termojądrowej na Ziemi i nie tylko.



Rysunek 20 - Parcela przygotowana pod budowę reaktora ITER ^[17]

6.3. Plan badawczy, czyli kiedy tak naprawdę reaktor będzie gotowy do użytku komercyjnego.

Zastosowanie fuzji na masową skalę pozwoliłoby uzyskiwać energię całkowicie bez zanieczyszczania środowiska. Według ekspertów wymaga to postępu w pewnych dziedzinach (jak np. wyprodukowanie odpowiednich materiałów do konstrukcji tokamaka), aby ludzkość mogła zacząć wprowadzać tę technologię na masową skalę jeszcze w pierwszej połowie XXI wieku. Ostatecznie dałoby to możliwość całkowitej rezygnacji z elektrowni zasilanych paliwami kopalnymi, a w połączeniu z innymi technologiami (jak ogniwa paliwowe) całkowicie zlikwidować zapotrzebowanie na ich wydobycie. Dążenie do tego celu jest wskazane, niezależnie od tego czy wymaga to 30, 50 czy 100 lat badań.



Rysunek 21 - Model konstrukcji reaktora ITER ^[20]

Obfitość paliwa do takich elektrowni uniezależniłaby ludzkość od ograniczeń, którym podlegają wszelkie nieodnawialne źródła energii.

7. Bibliografia

1. Zdjęcie reaktora JET - http://i.dailymail.co.uk/i/pix/2009/06/19/article-1194169-05469D12000005DC-533_634x378.jpg
2. Zdjęcie słońca - http://www.teleskopy.pl/porady/images/obslo/slonce_w_maks_aktywn.jpg
3. Zdjęcie plazmy na linii Słońce – Ziemia - <http://www.astro-czemierniki.pl/images/news/sun1.jpg>
4. Zorza Polarna - <http://m.onet.pl/m/a28565ac507c5704bdfe74d797737a60,14,1.jpg>
5. Artykuł o energii termojądrowej - http://pl.wikipedia.org/wiki/Reakcja_termoj%C4%85drowa
6. Efekt tunelowy - <http://pl.wikipedia.org/w/index.php?title=Plik:AlphaDecay.svg&filetimestamp=20090227214606>
7. http://www.fizyka.net.pl/index.html?menu_file=aktualnosci/m_aktualnosci.html&former_url=http://www.fizyka.net.pl/aktualnosci/aktualnosci_zf.html
8. Magazyn *Newsweek* – Artykuł *Słońce na Ziemi* – numer z 2003-12-07
9. Magazyn *Newsweek* – Artykuł *Energia przyszłości* – numer z 2010-03-05
10. Obraz tokamaka
http://4.bp.blogspot.com/_O6BE7E7JI9M/TN2n_9HYaGI/AAAAAAAAAQY/eWokMxwgc40/s1600/tokamak_comp.gif
11. Artykuł o bombie termojądrowej - http://pl.wikipedia.org/wiki/%C5%81adunek_termoj%C4%85drowy
12. <http://ziemianarozdrozu.pl/encyklopedia/42/energetyka>
13. Wycieczka - http://www.nicholas.duke.edu/insider/trenches/davidsblog/images/P3070340.JPG/image_preview
14. Nowoczesna energetyka słoneczna - <http://www.newscientist.com/data/images/archive/2631/26311601.jpg>
15. Kontrolowana synteza termojądrowa - http://pl.wikipedia.org/wiki/Kontrolowana_synteza_termoj%C4%85drowa
16. Artykuł o ITER - <http://pl.wikipedia.org/wiki/ITER>
17. Zdjęcie aktualnego stanu ITER - <http://www.iter.org/doc/www/edit/Lists/WebsiteText/Attachments/55/aerial.jpg>
18. Magazyn *Newsweek* – Artykuł *Energia jutra* – numer z 2010-06-06
19. <http://sitemaker.umich.edu/section4group1/files/hydrogen.jpg>
20. <http://crppwww.epfl.ch/crppfusion/images/iter.jpg>
21. http://www.nettg.pl/media/site/files/images/Elektrownie/solar-plant_ekozone-pl.jpg
22. <http://www.piotrlaskowski.de/polski/energetykapl.html>