



WYDZIAŁ FIZYKI POLITECHNIKI WARSZAWSKIEJ

PRACA ZALICZENIOWA PRZEDMIOTU *Metody i Techniki Jądrowe w Środowisku, Przemysle i Medycynie*

Synteza termojądrowa we Wszechświecie i na Ziemi - magnetyczne uwięzienie plazmy, energetyka termojądrowa, ITER

Autor:
Arkadiusz Komarzewski

Prowadzący przedmiot:
prof. dr hab. Jan Pluta

Warszawa 2010

Spis treści

1	Wstęp	2
1.1	Fuzja	2
1.2	Synteza termojądrowa w gwiazdach	4
2	Magnetyczne uwięzienie plazmy	6
2.1	Stellarator	7
2.2	Tokamak	9
2.2.1	Działające urządzenia	10
2.3	Spheromak	12
2.4	Lewitujący dipol	12
3	ITER	14
3.1	Cele projektu	14
3.2	Szczegóły techniczne - elementy tokamaka	15
3.3	Kolejne kroki na drodze do urządzeń komercyjnych	18
	Spis rysunków	19
	Bibliografia	20

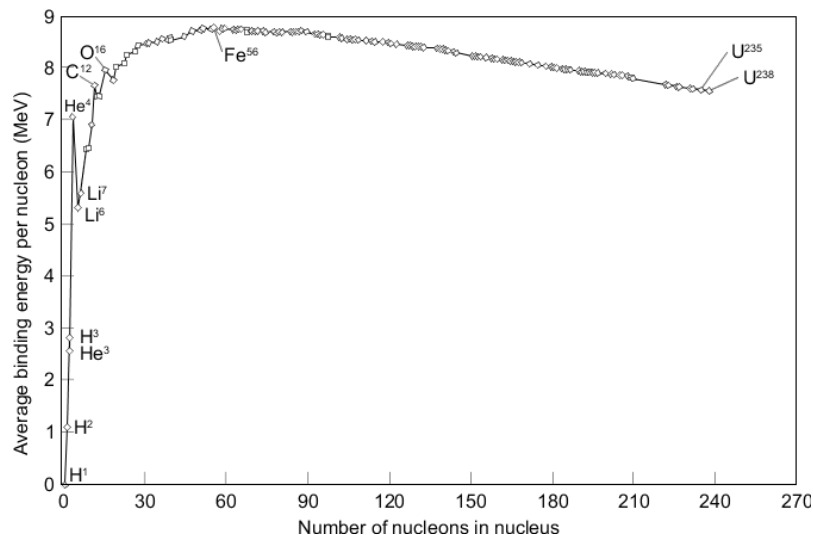
1 Wstęp

Wzrost zużycia energii na Ziemi jest nieunikniony. Liczba ludności rośnie w postępie geometrycznym. Społeczeństwa rozwijają się, równocześnie rośnie ich zapotrzebowanie na energię. W ostatnich latach rośnie poparcie dla „zielonych” źródeł energii - ludzkość zaczyna uświadamiać sobie, że paliwa kopalne (ropa naftowa, gaz ziemny, węgiel) nie powinny być po prostu spalane. Przykładem niech będzie ropa naftowa - wykorzystywana jest do produkcji tworzyw sztucznych. Czy jesteśmy sobie w stanie wyobrazić świat bez nich, gdy skończy się ropa? Mówiąc „zielone źródła energii” zwykle myślimy o energii słonecznej, wiatrowej, geotermalnej. Jednak nie są rozwiązaniem problemu. Oczywiście, należy z nich korzystać najlepiej jak się da, ale czy ktoś chciałby mieć za oknem „farmę wiatrową”?

Rozwiązaniem problemu energii może być energetyka jądrowa. Przykładem niech będą Chiny - zużycie energii na osobę jest tam niskie w porównaniu z krajami rozwiniętymi, rząd planuje budowę elektrowni jądrowych o mocy 200 GW do 2030 roku. Ta moc odpowiada 133000 wiatraków o mocy 5 MW przy optymalnym wietrze, a należy pamiętać, że wiatr nie wieje bez przerwy. Potrzeba więc źródła energii czystego, niezawodnego, o dużej mocy. Energetyka jądrowa jest takim źródłem, ma jednak kilka wad: pozostawia odpady promieniotwórcze oraz w pewnych sytuacjach może stwarzać ryzyko rozprzestrzeniania materiałów rozszczepialnych (terroryzm). Warto wiedzieć jednak, że ludzkość ma w perspektywie jeszcze lepsze źródło energii - fuzję jądrową, proces sprawdzony i działający od milionów lat - w gwiazdach.

1.1 Fuzja

Fuzja jądrowa to zjawisko polegające na łączeniu się dwóch lżejszych jąder w jedno cięższe. Towarzyszy mu wydzielanie lub absorpcja energii. Podczas syntezy jąder o masach mniejszych od masy żelaza wydzielana jest energia. Jest to reakcja egzotermiczna, która w odpowiednich warunkach może stać się samopodtrzymującą. W przypadku jąder cięższych należy dostarczyć energię, aby zaszła reakcja (proces endotermiczny). Odwrotną reakcją jest rozszczepienie - rozpad jądra cięższego od żelaza jest reakcją egzotermiczną. Wynika to z zależności energii wiązania na nukleon od liczby nukleonów w jądrze - największą energię wiązania ma żelazo (oraz nikiel - patrz rysunek 1).



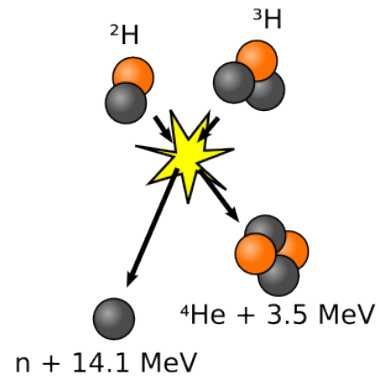
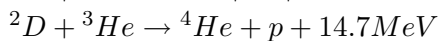
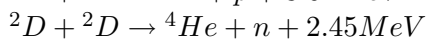
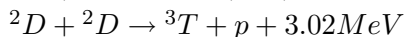
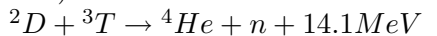
Rysunek 1: Energia wiązania na nukleon w zależności od liczby nukleonów w jądrze.[5]

Reakcje syntezy mogą zajść tylko wtedy, gdy zderzające się ze sobą jądra zostaną rozpędzone do prędkości pozwalających na pokonanie bariery kulombowskiej i zblizną się do siebie na odległość rzędu 10^{-15} m. Warunki takie można stworzyć rozpędzając jądra w akceleratorze

(jednak jest to nieefektywne na większą skalę) lub podgrzewając je do temperatur rzędu 10 keV ($1\text{ eV} \approx 10^4\text{ K}$). W takich temperaturach materia występuje w postaci plazmy - gazu, w którym pewna część cząsteczek jest zjonizowana. Reakcje syntezy mogą zachodzić na dużą skalę tylko w plazmie - wysoka temperatura i duże energie jąder pozwalają na przewyciężenie odpychania elektrostatycznego.

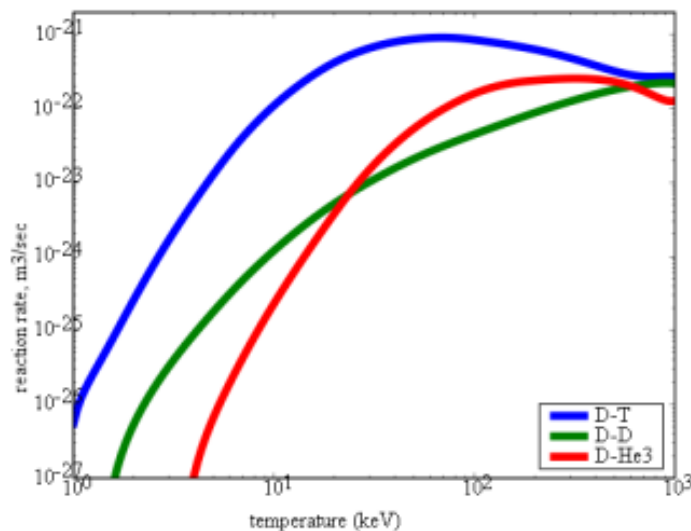
Plazma to gaz, który zawiera taką ilość zjonizowanych cząstek, że staje się dobrym przewodnikiem. Materia jonizuje się do plazmy powyżej około 5000 K , warto zaznaczyć też że większość widzialnej materii we wszechświecie istnieje w tym stanie.

Reakcje syntezy, które najłatwiej jest przeprowadzać na Ziemi zachodzą między izotopami wodoru (deuterem, trytem) i helem:



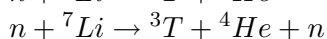
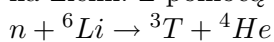
Rysunek 2: Fuzja jąder deuteru i trytu. W wyniku powstaje jądro helu i neutron, wydzielana jest energia.[5]

Reakcja D-T wydaje się być najlepszą do zastosowań na dużą skalę. Deuter i tryt mają po jednym protonie w jądrze, co skutkuje niską barierą kulombowską. Dodatkowo ma korzystny przekrój czynny oraz maksimum tempa reakcji wyższe i osiągnięte przy niższych temperaturach niż w reakcjach D-D i D-He (patrz rysunek 3).



Rysunek 3: Fuzja jąder deuteru i trytu. W wyniku powstaje jądro helu i neutron, wydzielana jest energia.[5]

Deuter można pozyskiwać z wody morskiej, jest to proces opanowany przez człowieka. Problemem wydawać by się mógł tryt, który ze względu na krótki czas życia niemal nie występuje na Ziemi. Z pomocą „przychodzą” tutaj neutrony z reakcji D-D:



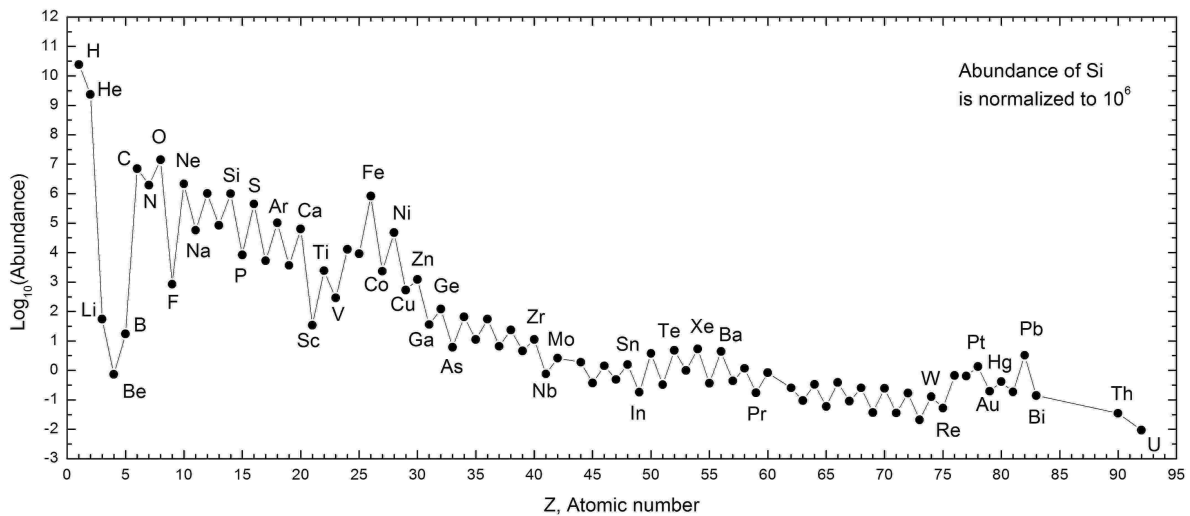
Jak widać, tryt można uzyskać z reakcji litu z neutronami. Tak więc w przyszłej elektrowni fuzyjnej paliwem może być lit i deuter - pierwiastki powszechnie występujące na Ziemi (lit można pozyskiwać ze skał).

1.2 Synteza termojądrowa w gwiazdach

Starożytni astronomowie byli przekonani, że Słońce jest kulą ognia. Jednak energii pochodzącej z reakcji chemicznych wystarczyłoby w nim tylko na około 3 tysiące lat.

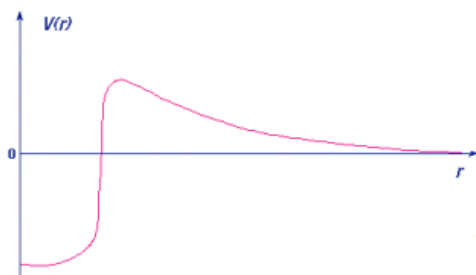
W XIX w. Helmholtz i Kelvin zaproponowali model, wg którego gwiazda mogłaby świecić kosztem swojej energii grawitacyjnej. Jednak zgodnie z tą teorią Słońce świeciłoby tylko ≈ 10 mln lat, a wiadomo że jego wiek jest równy w przybliżeniu 5 mld lat.

Dzisiaj (m.in. po pracach duetu Bethe–Weizsäcker z lat 30. XX w.) wiadomo, że to naturalnie zachodzące reakcje syntezy są źródłem energii gwiazd. Widoczny jest też wpływ tych reakcji na częstość występowania pierwiastków we wszechświecie (patrz rysunek 4). Wodór i hel, które zostały stworzone na wczesnym etapie rozszerzania się wszechświata, występują najczęściej. Następne są: tlen, neon, węgiel - produkty fuzji helu - oraz azot - powstający z tlenu i węgla podczas fuzji wodorowej.



Rysunek 4: Częstość występowania pierwiastków w układzie słonecznym w zależności od liczby atomowej.[5]

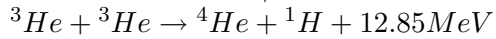
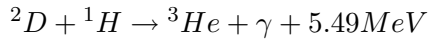
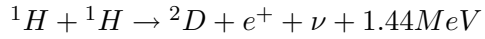
Jak już wspomniano wcześniej, aby mogły zajść reakcje syntezy termojądrowej cząstki muszą zbliżyć się do siebie na tyle, aby mogły zadziałać siły jądrowe (patrz rysunek 5). Dla jąder wodoru wysokość bariery wynosi ok. 1,4 MeV, jednak we wnętrzu Słońca średnia energia kinetyczna cząstek wynosi ok. 1 keV ($T \approx 15$ mln K). Wydawać by się więc mogło, że fuzja w gwiazdach nie ma prawa zachodzić. Z pomocą przychodzi tu efekt tunelowy - nawet cząstki o energiach mniejszych od wysokości bariery mogą (z pewnym małym prawdopodobieństwem) przez nią przetunelować.



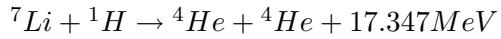
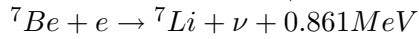
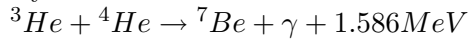
Rysunek 5: Bariera potencjału.[5]

Syntezę helu z wodoru przedstawia się jako skomplikowaną sieć reakcji, którą to można podzielić na dwie grupy cykli. Pierwszy z nich - cykl protonowy (PP) - zależy tylko od ilości wodoru i helu w gwiazdzie, drugi to cykl węglowo-azotowo-tlenowy (CNO). Jego (CNO) przebieg zależy od ilości węgla, azotu i tlenu znajdujących się w gwiazdzie, a te wynikają ze składu gazu międzygwiazdowego, z którego tworzyła się gwiazda. Reakcje składające się na opisywane cykle:

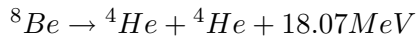
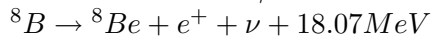
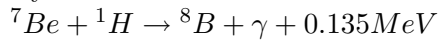
Cykl PPI



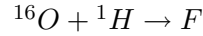
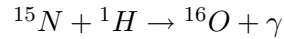
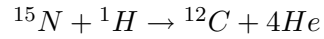
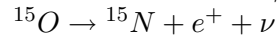
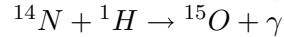
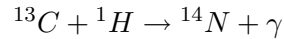
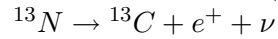
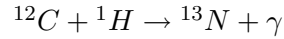
Cykl PPII



Cykl PPIII



Cykl CNO



Łańcuch PP dominuje w gwiazdach o masach mniejszych od ok. $1,2 M_{\odot}$ (mas słońca). W gwiazdach o masach powyżej ok. $3 M_{\odot}$ praktycznie cała energia pochodzi z cyklu CNO.

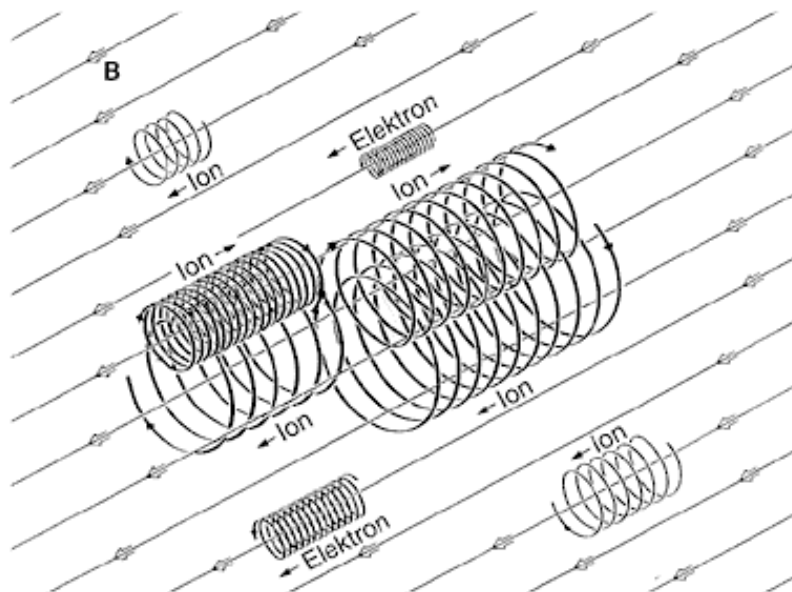
Rozdział ten jest tylko ogólnym potraktowaniem tematu fuzji jądrowej w gwiazdach, zainteresowanemu czytelnikowi polecam lekturę pozycji [2] i [3].

2 Magnetyczne uwięzienie plazmy

Ze względu na wysoką temperaturę, gorąca plazma nie może być utrzymywana bezpośrednio w jakiegokolwiek materialnej komorze. Po zetknięciu ze ścianą gaz natychmiast ochłodziłby się, nie wspominając o tym, że żaden materiał nie wytrzyma temperatur rzędu milionów Kelwinów. Możemy wyróżnić trzy sposoby utrzymania plazmy (z czego dwa mogą być wykorzystane przez człowieka):

- grawitacyjne - obserwowane w gwiazdach. Oddziaływania grawitacyjne kompresują materię do ogromnych gęstości (rzędu 10^{33} cząstek/ m^3) i temperatur ($3 \times 10^7 K$), w takich warunkach zachodzą reakcje syntezy.
- inercyjne - reakcja termojądrowa jest inicjowana przez impuls promieniowania (rentgenowskiego lub laserowego) zogniskowany na kapsułce z paliwem.
- magnetyczne - plazma utrzymywana jest w zamkniętej pułapce magnetycznej.

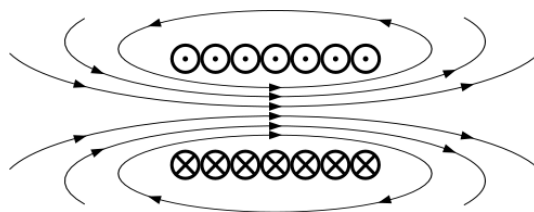
Podejście magnetyczne jest obecnie bardziej rozwinięte od inercyjnego. Uważane jest też za bardziej obiecujące dla produkcji energii, w tym kierunku koncentruje się większość prac badawczych. Magnetyczne utrzymanie plazmy polega na wykorzystaniu przewodności elektrycznej plazmy do uwięzienia jej w polu magnetycznym. Przez analogię do płynu można to opisać jako równowagę między ciśnieniem magnetycznym i ciśnieniem plazmy lub jako pojedyncze naładowane cząstki poruszające się po spiralnych orbitach wzdłuż linii pola (rysunek 6).



Rysunek 6: Cząstki naładowane poruszające się po spiralnych orbitach wzdłuż linii pola magnetycznego.[6]

Najprostszą konfiguracją pola jest solenoid, w którym cewki magnetyczne ustawione są wzdłuż osi. Wytwarzają one pole, którego linie sił biegną równoległe do osi (rysunek 7).

Jednak takie pole nie zapobiega ucieczce jonów na końcach cylindra. Istnieją dwa rozwiązania tego problemu. Pierwsze - zwierciadło magnetyczne, powodujące „odbijanie się” jonów od obszaru wysokiego pola jest niepraktyczne z powodu niestabilności i rozpraszania cząstek jakie wywołuje. Drugim - praktycznie stosowanym - rozwiązaniem jest ukształtowanie walca z polem magnetycznym w torus, dzięki czemu nie ma już problemu ucieczki jonów.

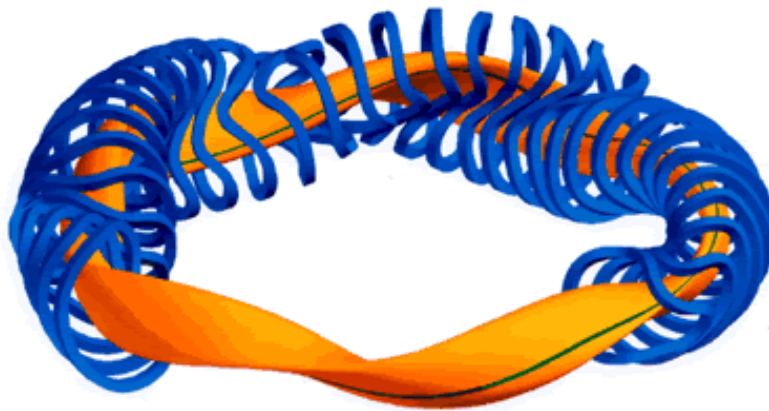


Rysunek 7: Pole magnetyczne wytwarzane w solenoidzie (przekrój).[6]

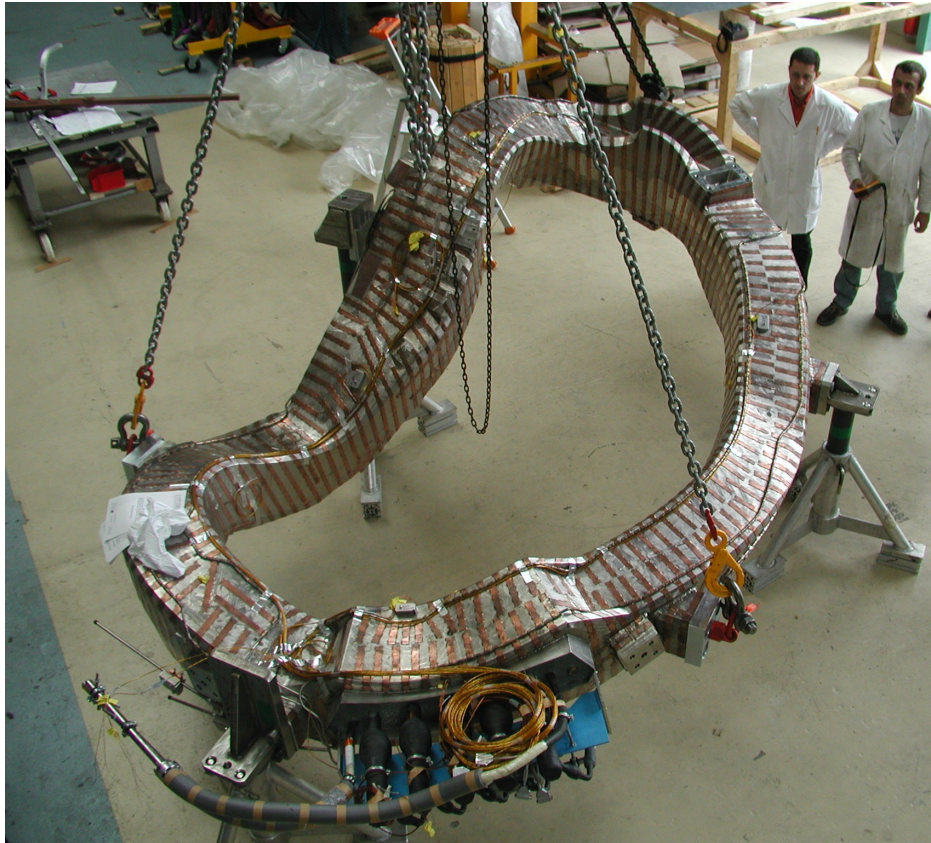
2.1 Stellarator

Stellarator był pierwszą próbą zbudowania urządzenia do magnetycznego uwięzienia plazmy, podjętą w 1951 r. przez Lymana Spitzera. Wytwarza on pułapkę magnetyczną wyłącznie przez układ cewek - w przeciwieństwie do tokamaka, gdzie wykorzystywany jest też prąd elektryczny płynący w plazmie. Powoduje to, że stellarator jest urządzeniem pracującym w trybie ciągłym, podczas gdy tokamak (bez dodatkowych urządzeń) pracuje w trybie impulsowym.

Pole magnetyczne w stellaratorze jest skręcone śrubowo, co powoduje konieczność odpowiedniego skręcenia cewek magnetycznych (patrz rysunek 8). Ich skomplikowany układ poddawany jest optymalizacji, tak aby otrzymać najlepszą konfigurację pola pozbawioną niestabilności i zapewniającą dobre utrzymanie. Obecnie w Max-Planck-Institut für Plasmaphysik w Greifswaldzie (Niemcy) budowany jest stellarator Wendelstein 7-X (patrz rysunki 9, 10). Urządzenie ma być ukończone w 2015 r., a jego celem jest ocena możliwości wykorzystania stellaratora do produkcji energii. Po ukończeniu będzie to największe urządzenie tego typu. Czas wyładowania jest przewidywany na 30 minut, co byłoby dużym krokiem naprzód w kierunku komercyjnego wykorzystania (w obecnych urządzeniach czasy te wynoszą poniżej minuty).



Rysunek 8: Pole magnetyczne wytwarzane w solenoidzie (przekrój).[6]



Rysunek 9: Cewka urządzenia Wendelstein 7-X.[6]



Rysunek 10: Jeden z 20 elementów komory plazmy stellaratora Wendelstein 7-X podczas produkcji.

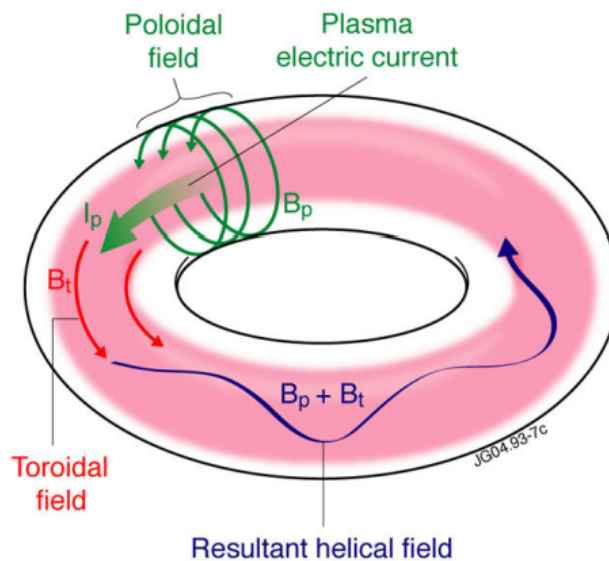
2.2 Tokamak

Koncepcję tokamaka stworzyli w 1950 r. Igor J. Tamm i Andriej D. Sa-charow. W 1956 r. w Instytucie Energii Atomowej w Moskwie powstało pierwsze urządzenie tego typu. Plazma grzana jest w nim w komorze o kształcie torusa. Utrzymywana jest z dala od ścianek przez pole magnetyczne będące superpozycją dwóch pól składowych: poloidalnego i toroidalnego. Linie sił pola wynikowego mają kształt śrubowy, są owinięte wokół torusa (rysunek 12).

Pole magnetyczne w tokamaku wytwarzane jest przez system cewek (rysunek 13). Składową toroidalną wytwarzają cewki toroidalne, dodatkowe cewki poloidalne odpowiadają za kontrolę stabilności i kształtu plazmy. Składowa poloidalna powstaje wraz z przepływem prądu w plazmie, który jest indukowany przez centralną cewkę transformatora. Jest to powodem impulsowej (nie ciągłej) pracy obecnych tokamaków. Tylko w ograniczonym czasie można uzyskać narastający prąd w uzwojeniu pierwotnym transformatora, co zaindukuje przepływ prądu w plazmie. Następnie transformator musi zostać „rozładowany”, wtedy proces może być powtórzony. Obecnie prowadzone są badania nad innymi metodami indukcji prądu w plazmie działającymi w trybie ciągłym (fale o wysokich częstotliwościach).



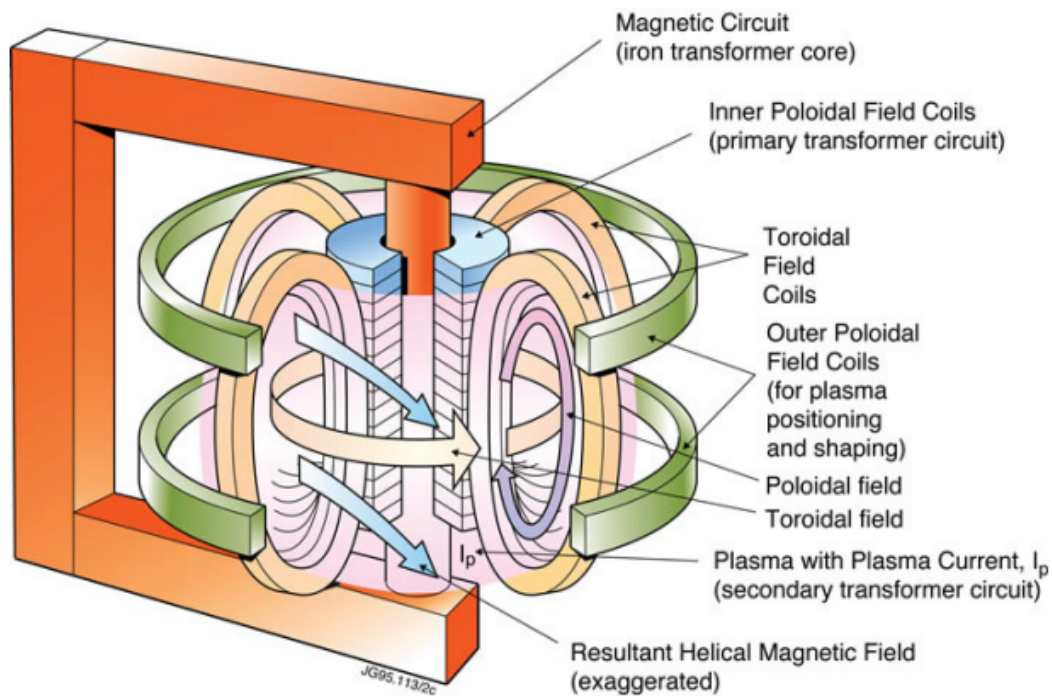
Rysunek 11: Znaczek pocztowy z 1987 r. z ZSRR upamiętniający badania fuzji termojądrowej w tokamakach.



Rysunek 12: Składowe pola magnetycznego w komorze tokamaka.[14]

Aby rozpocząć reakcje termojądrowe, plazma w tokamaku musi być odpowiednio ogrzana (temperatury rzędu milionów Kelwinów). Istnieje kilka sposobów osiągnięcia tego warunku:

- Grzanie omowe - opisane powyżej, centralny solenoid działa jak uzwojenie pierwotne transformatora, plazmę można traktować jak uzwojenie wtórne. Po zaindukowaniu prądu plazma ogrzewa się w ten sam sposób, jak włókno żarówki. Wraz ze wzrostem temperatury spada opór elektryczny plazmy - grzanie omowe staje się mniej efektywne.
- Wstrzykiwanie cząstek neutralnych - wysokoenergetyczne cząstki neutralne po „wstrzeleniu” w plazmę oddają swoją energię poprzez zderzenia z jonami.
- Grzanie falami elektromagnetycznymi - fale o wysokich częstotliwościach (odpowiednio dobranych do parametrów plazmy) mogą przekazywać energię cząstkom naładowanym.



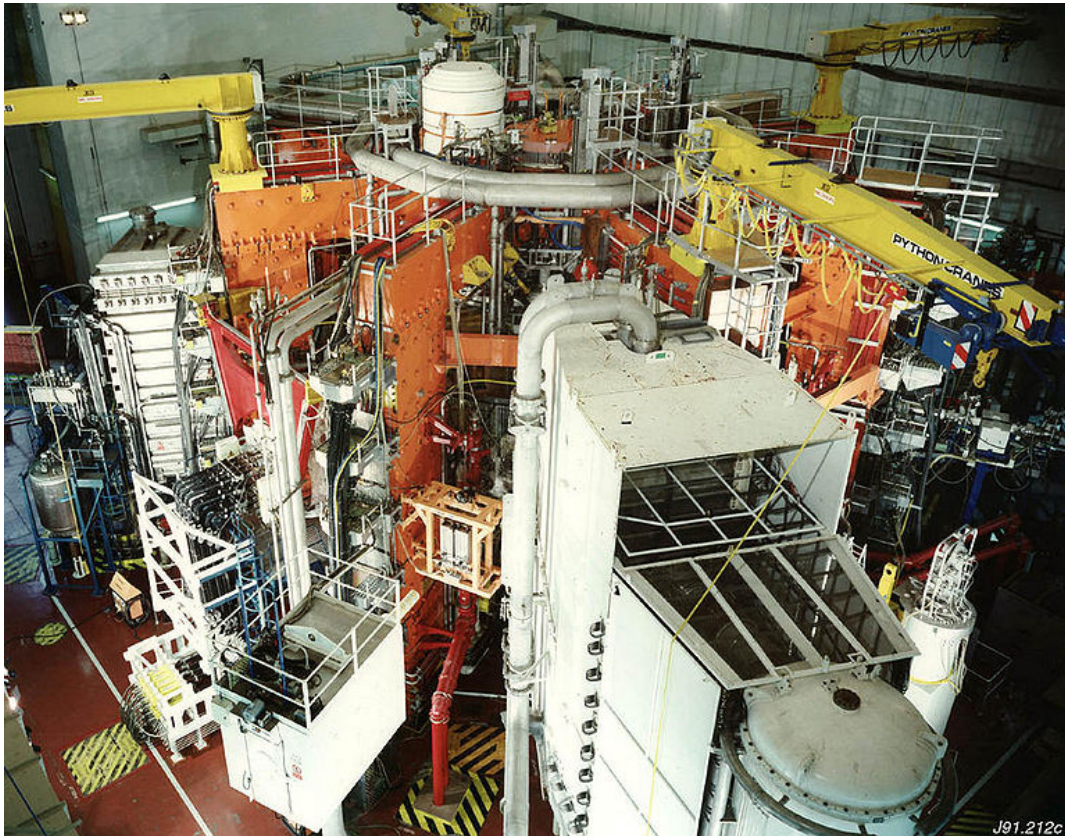
Rysunek 13: Schemat cewek wytwarzających pole magnetyczne w tokamaku.[14]

- Kompresja magnetyczna - temperatura plazmy rośnie podczas jej kompresowania przez zwiększanie natężenia pola magnetycznego (Analogicznie gaz ogrzewa się podczas kompresji).
- Samonagrzewanie się - cząstki α powstałe z reakcji DT mogą przekazywać swoją energię deuteronom i trytonom. W idealnym przypadku samopodtrzymującej się reakcji ten proces wystarczy do utrzymania odpowiedniej temperatury plazmy.

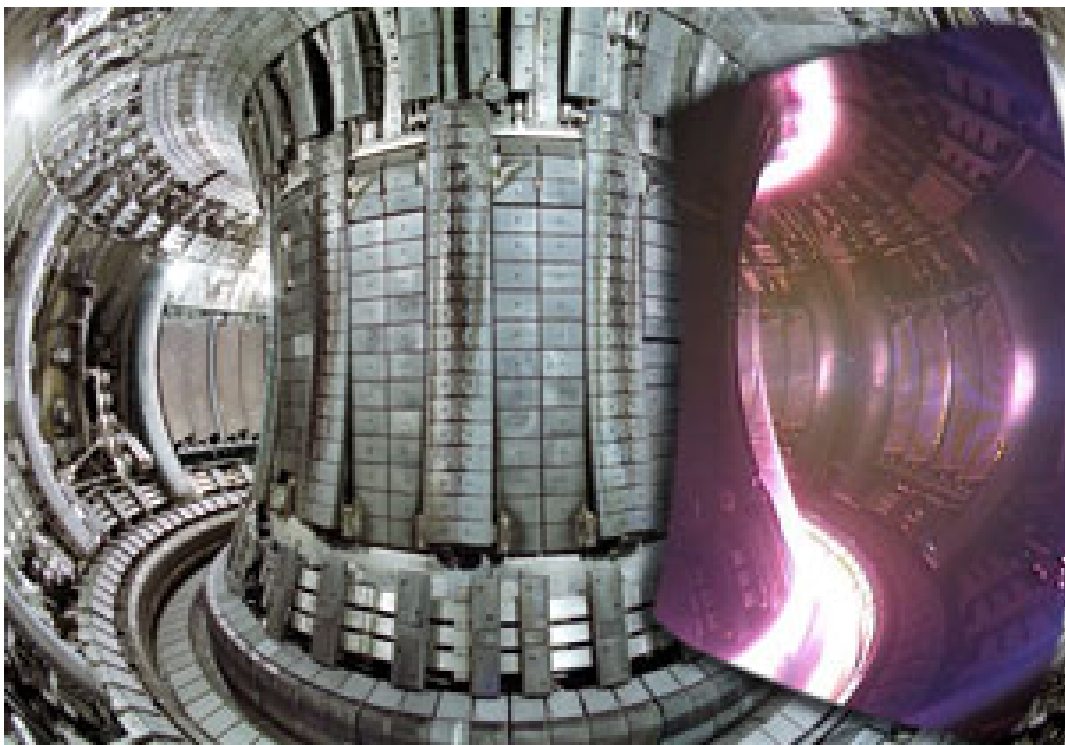
2.2.1 Działające urządzenia

Tokamaki są jednymi z najlepiej zbadanych urządzeń do przeprowadzania syntezy termojądrowej. Obecnie na świecie działa 21 takich urządzeń:

- Joint European Torus (JET), Culham, Wielka Brytania; 16 MW; od 1983 - największy działający obecnie tokamak (patrz rysunki 14, 15)
- T-10, Kurchatov Institute, Moskwa, Rosja; 2 MW; od 1975
- TEXTOR, Jülich, Niemcy; od 1978
- Novillo Tokamak, Instituto Nacional de Investigaciones Nucleares, Meksyk; od 1983
- JT-60, Naka, Japonia; od 1985
- STOR-M, Uniwersytet Saskatchewan; Kanada od 1987; Pierwszy tokamak pracujący na prądzie zmiennym.
- Tore Supra, Cadarache, Francja; od 1988
- Aditya, Institute for Plasma Research, Gujarat, Indie; od 1989
- DIII-D, San Diego, USA; tokamak firmy General Atomics, od końca lat 80 XX w.



Rysunek 14: JET, widok z zewnątrz.[9]



Rysunek 15: Wnętrze komory JETa z nałożonym zdjęciem z wyładowania plazmowego.[9]

- COMPASS, Praga, Czechy; od 2008, wcześniej pracował od 1989 do 1999 w Culham.
- FTU, Frascati, Włochy; od 1990
- Tokamak ISTTOK, Instituto Superior Técnico, Lizbona, Portugalia; od 1991
- ASDEX Upgrade, Garching, Niemcy; od 1991
- Alcator C-Mod, MIT, Cambridge, USA; od 1992
- Tokamak a configuration variable (TCV), EPFL, Szwajcaria; od 1992
- TCABR, Uniwersytet w Sao Paulo, Brazylia;
- HT-7, Hefei, Chiny; od 1995
- MAST, Culham, Wielka Brytania; od 1999
- NSTX, Princeton, New Jersey; od 1999
- EAST (HT-7U), Hefei, China; od 2006
- KSTAR, Daejeon, Korea Południowa; od 2008

2.3 Spheromak

Spheromak jest urządzeniem wytwarzającym plazmę w równowadze magneto hydrodynamicznej[4]. Wykorzystuje się do tego głównie samoindukujące się prądy w plazmie (inaczej niż w tokamaku, w którym wytwarza się duże, zewnętrzne pola magnetyczne). Powodem ich powstawania są turbulencje w plazmie (tzw. efekt „dynamo”). Jest to zjawisko analogiczne do tego, w jaki sposób w jądrze Ziemi, poprzez konwekcję płynu, generowane jest jej pole magnetyczne. Termin „Spheromak” oznacza również plazmę w kształcie kuli utrzymywaną w polu magnetycznym generowanym przez prądy w niej płynące.

Spheromak jest „alternatywnym” podejściem do otrzymywania energii z fuzji. Przez większość fizyków plazmy jest uważany za mniej obiecujący od tokamaka i stellaratora, z tego powodu badania mu poświęcone są znacznie słabiej finansowane. Mimo tego, kanadyjska firma *General Fusion*[15] prowadzi prace nad konstrukcją komercyjnego spheromaka.

2.4 Lewitujący dipol

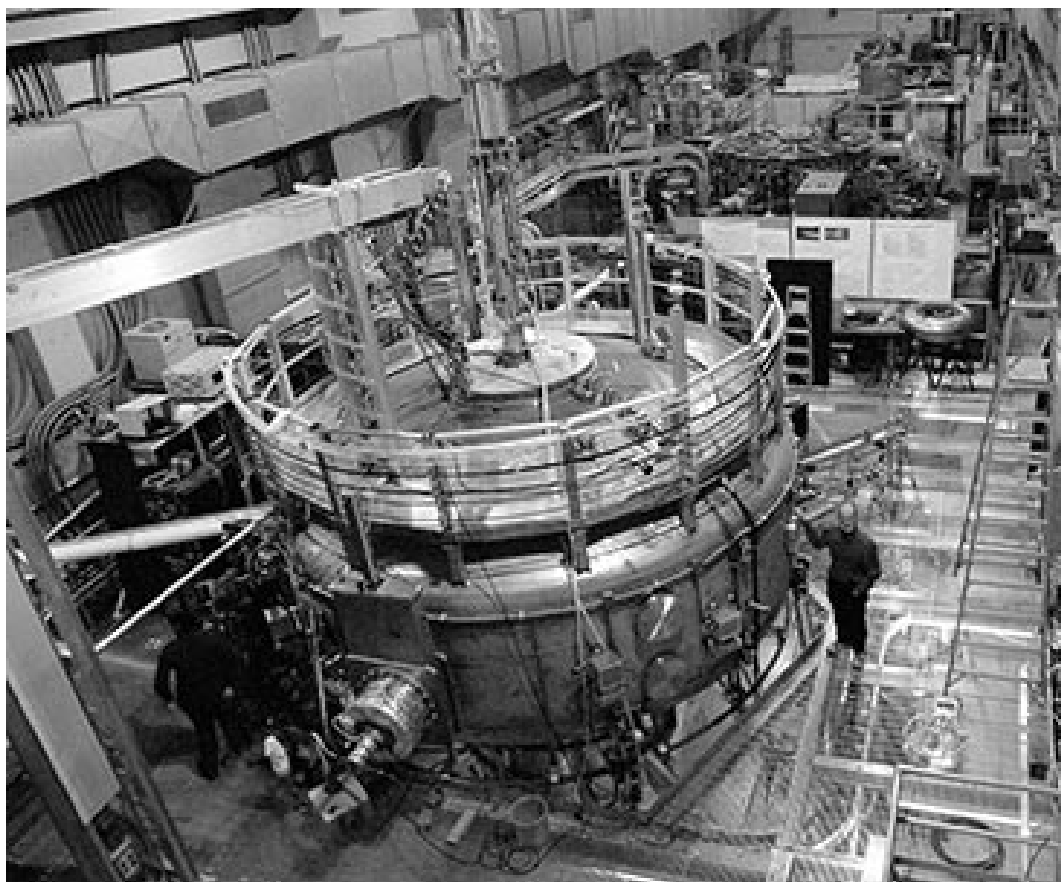
Lewitujący dipol jest stosunkowo nowym typem reaktora termojądrowego. Wykorzystuje on nadprzewodzący torus lewitujący w polu magnetycznym w komorze reaktora. Nadprzewodnik wytwarza osiowo symetryczne pole w konfiguracji podobnej do magnetosfery ziemskiej. Naukowcy z MIT twierdzą, że taki układ może utrzymywać plazmę efektywniej od innych.[10]

Koncepcja lewitującego dipola jest badana od 2004 roku w eksperymencie LDX[11] (Levitated Dipole Experiment) w MIT (rysunki 17, 18). W przeciwieństwie do innych reaktorów z magnetycznym uwięzieniem, ten typ jest odporny na zewnętrzne fluktuacje pól elektromagnetycznych. W większości eksperymentów małe fluktuacje powodują znaczące straty energii plazmy. Natomiast w dipolowym polu magnetycznym fluktuacje powodują kompresję plazmy bez strat energii (efekt ten został odkryty podczas misji sondy Voyager 2 w polu magnetycznym Urana).

W eksperymencie LDX wykorzystywana jest reakcja D-D. W przypadku badań tokamaków pod kątem zastosowania w przyszłej elektrowni termojądrowej przewiduje się wykorzystanie reakcji D-T - ma ona mniejsze wymagania co do temperatury i ciśnienia. Jednakże reakcja D-D ma jedną niezaprzeczalną zaletę: brak wysokoenergetycznych neutronów, które wymagają dobrego ekranowania i silnie aktywują elementy reaktora.



Rysunek 16: Spheromak w Lawrence Livermore National Laboratory.[4]



Rysunek 17: Reaktor z lewitującym dipolem - LDX w MIT.[11]



Rysunek 18: Wnętrze reaktora LDX podczas eksperymentu. Widoczny lewitujący nadprzewodzący torus.[11]

3 ITER

ITER (International Thermonuclear Experimental Reactor) (łac. droga) to międzynarodowy projekt badawczy, którego celem jest zbadanie możliwości produkowania na wielką skalę energii z fuzji termojądrowej. Porozumienie o budowie reaktora zostało podpisane w 2006 r. przez przedstawicieli Unii Europejskiej, Indii, Japonii, Chin, Rosji, Korei Południowej oraz USA. Budowa rozpoczęła się w 2008 roku w Cadarache na południu Francji (rysunek 19), uruchomienie planowane jest na rok 2018.

Koszt projektu jest przewidywany na 10 bln euro, co czyni go jednym z najdroższych mega-projektów naukowo-technicznych. Projekt zakłada, że reaktor będzie mógł pracować przez 1000 sekund z mocą 500 MW (dla porównania największy obecnie JET wytworzył maksymalnie 16 MW przez około 1 sekundę). Do przeprowadzenia tej reakcji potrzeba będzie ok. 0,5 g mieszanki deuteru i trytu.

3.1 Cele projektu

Jak już wspomniano ITER jest budowany w celu demonstracji wykonalności komercyjnej elektrowni termojądrowej [12]. Dokładniej, muszą być osiągnięte następujące cele:

- Wytwarzanie co najmniej 10 razy więcej energii cieplnej z gorącej plazmy, niż będzie dostarczane z zewnątrz (współczynnik $Q \geq 10$).
- Utrzymanie plazmy w stanie stabilnym ze współczynnikiem $Q > 5$.
- Podtrzymanie reakcji przez ok. 8 minut.
- „Zapłon” plazmy - reakcja samopodtrzymująca się, jest to warunek uzyskania $Q > 1$.
- Rozwój technologii i procesów niezbędnych w przyszłej elektrowni (m.in. nadprzewodzące magnesy i zdalnie sterowane roboty do obsługi komory tokamaka).
- Sprawdzenie możliwości uzyskiwania trytu w reaktorze.



Rysunek 19: Budowa ITERa. Obecnie (III 2010) idealnie wyrównano teren o wymiarach 400 x 1000 m.[14]

- Udoskonalenie osłon przed neutronami i metod odprowadzania z nich ciepła.

3.2 Szczegóły techniczne - elementy tokamaka

ITER będzie niezwykle skomplikowanym i największym na świecie urządzeniem swojego typu - całość ma mieć wysokość 30 metrów i wagę 23000 ton.

System magnesów będzie się składał z 18 nadprzewodzących cewek pola toroidalnego, 6 - poloidalnego, centralnego solenoidu oraz zestawu cewek korekcyjnych. W sumie będzie to 48 elementów.

Centralny solenoid i cewki pola toroidalnego będą wytwarzały pole o natężeniu 13 Tesli. Wszystkie cewki będą wykonane z materiałów nadprzewodzących, chłodzonych helem w temperaturze 4 K. Warto zwrócić uwagę na ogromną amplitudę temperatur na małej odległości - kilkanaście metrów dalej, za ścianą komory i warstwą płaszczka temperatura będzie 8 rzędów wielkości wyższa.

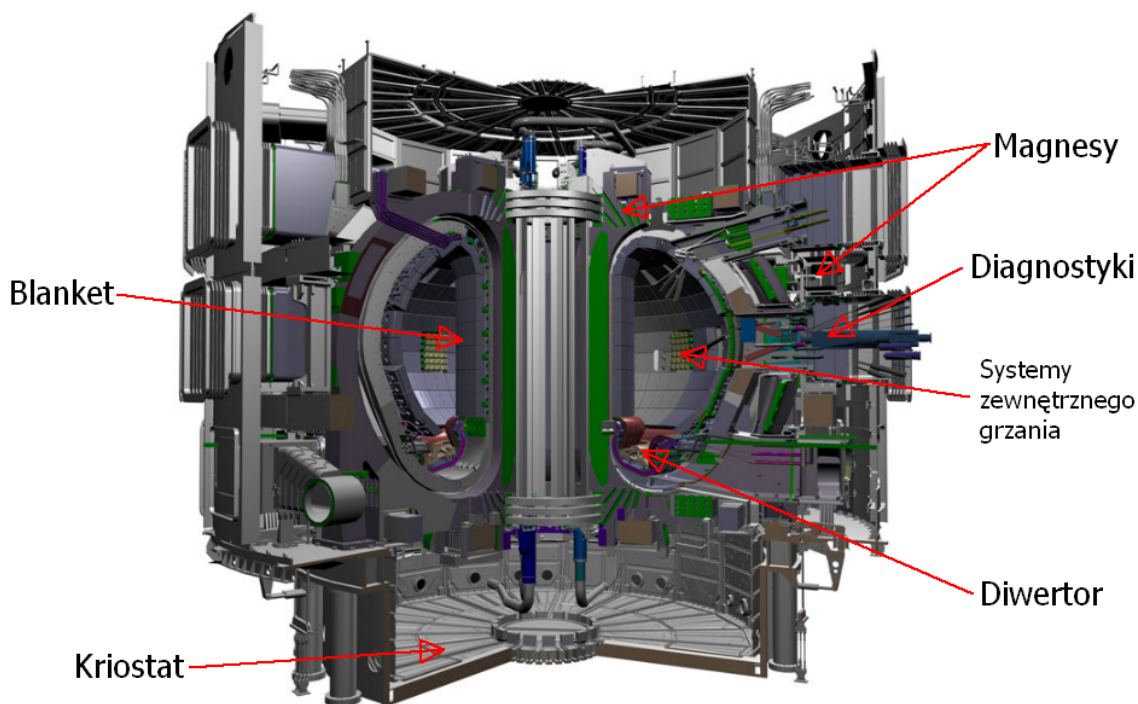
Komora próżniowa to hermetycznie zamknięty kontener w kształcie torusa, w którym zachodzić będą reakcje syntezy. Jest to pierwsza bariera bezpieczeństwa, będzie zbudowana z dwóch warstw stali z kanałami do chłodzenia wodą między nimi, ma mieć 44 wejścia („porty”, patrz kriostat).

Rozmiary komory są czynnikiem ograniczającym maksymalną objętość plazmy - im większa, tym więcej mocy z fuzji można uzyskać. Komora ITERa będzie 2 razy większa i 16 razy cięższa od tej zamontowanej w tokamaku JET.

Blanket (płaszcz) składający się z 440 segmentów (każdy ważący ok. 4,5 tony, zbudowany z berylu, miedzi i stali nierdzewnej) będzie pokrywał wewnętrzne powierzchnie komory próżniowej. Jego zadaniem jest osłona komory i nadprzewodzących magnesów przed ciepłem i neutronami. Będą one spowalniane w Blankecie, ich energia zamieni się w ciepło, które będzie odbierane przez system chłodzący. W przyszłej elektrowni fuzyjnej to ciepło ma posłużyć do produkcji energii.

Na późniejszym etapie projektu będą testowane segmenty zawierające lit - służące do uzyskiwania trytu, niedostępnego powszechnie w przyrodzie.

Diwertor jest jednym z najważniejszych elementów ITERa. Umieszczony będzie w dolnej części komory próżniowej. Jego zadaniem będzie odbieranie ciepła i tzw. „popiołu helowego” (cząstek α , które oddały swoją energię plazmie) - można go nazwać ogromnym „układem wydechowym”.



Rysunek 20: ITER - przekrój przez tokamak.[14]

Diwertor będzie składał się z 54 kaset (każda z nich ma być wymieniana korzystając ze zdalnie sterowanego ramienia robota). Jest to jedyny element reaktora, który będzie bezpośrednio stykał się z plazmą, dlatego ważny jest tu odpowiedni dobór materiałów. Niewiele z nich wytrzyma temperatury do 3000 °C przez 20 lat. Jednym z celów projektu jest właśnie ocena materiałów możliwych tu do zastosowania. Będą testowane diwertory z kompozytów węglowych (ich zaletą jest dobre przewodnictwo cieplne) oraz wolframowe (ze względu na większą odporność na erozję).

Diagnostyki pomogą w kontroli i ocenie jakości pracy reaktora oraz w lepszym zrozumieniu fizyki plazmy. ITER będzie miał około 50 oddzielnych układów pomiarowych, między innymi: spektrometry laserowe, promieni X, cząstek, kamery neutronowe, monitory domieszek, kamery bolometryczne, systemy do pomiarów ciśnienia gazów, układy światłowodowe.

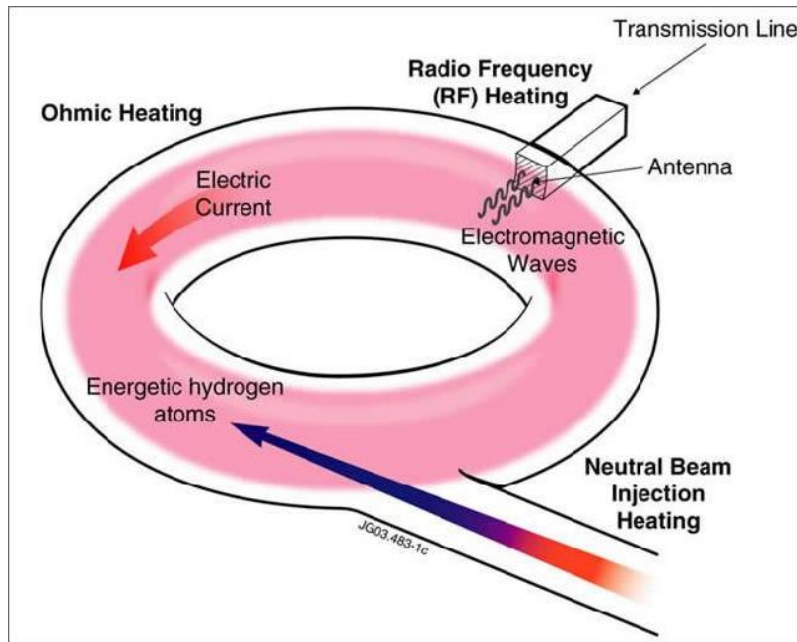
Systemy zewnętrznego grzania będą podobne do tych stosowanych obecnie (rysunek 21).

Plazmę trzeba będzie podgrzać do 150 milionów °C i utrzymać tę temperaturę. W tokamaku będą zainstalowane trzy zewnętrzne źródła podgrzewające o sumarycznej mocy 50 MW:

- Akcelerator wiązek neutralnych przyspieszający i wstrzykujący atomy deuteru do plazmy.
- Antena fal radiowych o częstotliwościach 30-50 MHz przekazujących energię jonom.
- Antena fal radiowych o częstotliwościach 100-200 MHz, które mają podgrzewać elektrony.

Ostatecznie, celem jest otrzymanie „zapłonu” plazmy. W tym stanie energia cząstek α (produktów reakcji syntezy) wystarczy do podtrzymania temperatury plazmy - układy zewnętrznego grzania będą mogły być wyłączone. Jest to niezbędne jeśli chcemy wykorzystywać fuzję jako źródło energii.

Kriostat zapewni będzie izolację magnesów nadprzewodzących i innych układów. Będzie to ogromna (31 m wysokości, 36.5 m średnicy) struktura otaczająca komorę próżniową. Ma być



Rysunek 21: Podgrzewanie plazmy w ITERze[14].

zbudowany z dwóch koncentrycznych warstw stali nierdzewnej (izolatorem między nimi będzie hel pod ciśnieniem ok 1 atm).

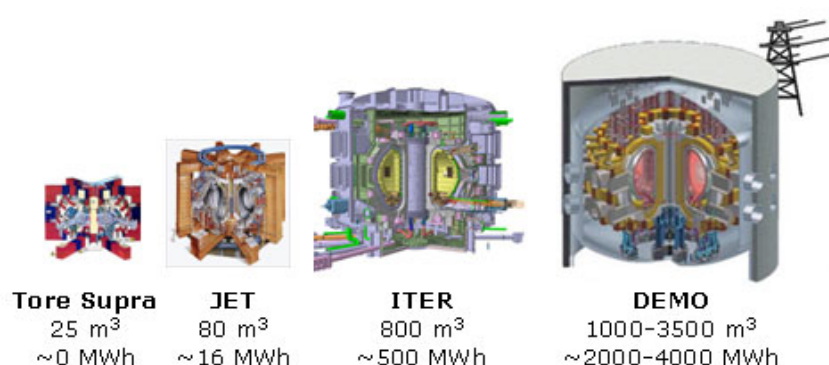
Kriostat będzie zawierał wiele wejść („ports”) służących do doprowadzenia aparatury pomiarowej, układów chłodzenia, a także elementów reaktora (kaset diwertora, moduły blanketu) do komory próżniowej. Otoczony będzie dwumetrową warstwą betonu (tzw. „bioshield”).

3.3 Kolejne kroki na drodze do urządzeń komercyjnych

ITER nie jest celem samym w sobie, nie będzie podłączony do sieci energetycznej. Jest raczej krokiem do pierwszej, demonstracyjnej elektrowni termojądrowej - DEMO. Podejście zwane „szybką ścieżką” przewiduje:

- budowę (rozpoczęta w Japonii) równoległe z ITERem urządzenia IFMIF (International Fusion Material Irradiation Facility) służącego do testów materiałów w wysokich strumieniach neutronów,
- jeszcze w trakcie pracy ITERa zaprojektowanie i budowę DEMO, które zaczęłoby pracę w latach 2030.

Gdyby projekty ITER i DEMO zakończyły się sukcesem, w ostatnim kwartale XXI wieku świat wszedłby w Erę Fuzji - potrzeby energetyczne byłyby zaspokajane przez niemal niewyczerpane, powszechnie dostępne i nieszkodliwe dla środowiska zasoby.



Rysunek 22: Ewolucja tokamaków (nazwa / objętość komory / moc grzewcza plazmy)[13].

Spis rysunków

1	Energia wiązania na nukleon w zależności od liczby nukleonów w jądrze.[5] . . .	2
2	Fuzja jąder deuteru i trytu. W wyniku powstaje jądro helu i neutron, wydzielana jest energia.[5]	3
3	Fuzja jąder deuteru i trytu. W wyniku powstaje jądro helu i neutron, wydzielana jest energia.[5]	3
4	Częstość występowania pierwiastków w układzie słonecznym w zależności od liczby atomowej.[5]	4
5	Bariera potencjału.[5]	4
6	Cząstki naładowane poruszające się po spiralnych orbitach wzdłuż linii pola magnetycznego.[6] 6	
7	Pole magnetyczne wytwarzane w solenoidzie (przekrój).[6]	7
8	Pole magnetyczne wytwarzane w solenoidzie (przekrój).[6]	7
9	Cewka urządzenia Wendelstein 7-X.[6]	8
10	Jeden z 20 elementów komory plazmy stellaratora Wendelstein 7-X podczas produkcji.	8
11	Znaczek pocztowy z 1987 r. z ZSRR upamiętniający badania fuzji termojądrowej w tokamakach.	9
12	Składowe pola magnetycznego w komorze tokamaka.[14]	9
13	Schemat cewek wytwarzających pole magnetyczne w tokamaku.[14]	10
14	JET, widok z zewnątrz.[9]	11
15	Wnętrze komory JETa z nałożonym zdjęciem z wyładowania plazmowego.[9] . . .	11
16	Spheromak w Lawrence Livermore National Laboratory.[4]	13
17	Reaktor z lewitującym dipolem - LDX w MIT.[11]	13
18	Wnętrze reaktora LDX podczas eksperymentu. Widoczny lewitujący nadprzewodzący torus.[11]	14
19	Budowa ITERa. Obecnie (III 2010) idealnie wyrównano teren o wymiarach 400 x 1000 m.[14] 15	
20	ITER - przekrój przez tokamak.[14]	16
21	Podgrzewanie plazmy w ITERze[14].	17
22	Ewolucja tokamaków (nazwa / objętość komory / moc grzewcza plazmy)[13]. . .	18

Bibliografia

- [1] D. A. Gurnett, A. Bhattacharjee, *Introduction to Plasma Physics: With Space and Laboratory Applications*, Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2005.
- [2] *The Astrophysics Spectator: Stars* - <http://www.astrophysicsspectator.com/topics/stars/>
- [3] Alak K. Ray, *Stars as thermonuclear reactors: their fuels and ashes*, Cambridge, 2004.
- [4] *Sustained Spheromak Physics Experiment* - <http://www.mfescience.org/sspx/index.html>
- [5] *Wikipedia (niektóre rysunki)* - <http://www.wikipedia.org>
- [6] *Max-Planck-Institut für Plasmaphysik* - <http://www.ipp.mpg.de/ippcms/eng/pr/fusion21/index.html>
- [7] Allen H. Boozer, *Physics of magnetically confined plasmas*, Rev. Mod. Phys., Vol. 76, No. 4, October 2004
- [8] *Culham Centre for Fusion Energy* - <http://www.fusion.org.uk>
- [9] *Joint European Torus (JET)* - <http://www.jet.efda.org/>
- [10] „*MIT tests unique approach to fusion power*” - <http://web.mit.edu/newsoffice/2008/ldx-tt0319.html>
- [11] „*Levitated Dipole Experiment*” - <http://www.psfc.mit.edu/ldx/>
- [12] „*Why ITER?*” *The ITER Organization* - <http://www.iter.org/proj/Pages/ITERMission.aspx>
- [13] *European Commission - Energy Research* - <http://ec.europa.eu/research/energy>
- [14] *ITER* - <http://www.iter.org>
- [15] *General Fusion* - <http://www.generalfusion.com/>