

ROZDZIAŁ VII. ENERGIA TERMOJĄDROWA

7.1. Synteza jądrowa¹

Myśl, iż energia emitowana przez Słońce może być związana z oddziaływaniem cząstek subatomowych została wyrażona po raz pierwszy przez angielskiego astronoma A.S.Eddingtona (1882-1944; rys. 7.1) około roku 1920. To on pierwszy obliczył, że potrzebne temperatury i gęstości dla reakcji jądrowych, w których wyzwala się energia słoneczna, są nieporównanie wyższe niż znane na Ziemi. Z kolei odkrycie w 1929 r. przez amerykańskiego astronoma H.N.Russela (1877-1957; rys. 7.1), że wodór nie stanowi, jak wówczas uważano, 80% objętości materii słonecznej, ale należy przyjąć, że zajmuje on tylko 60% tej materii, oznaczało, że jeśli energia bierze się z reakcji jądrowych, to wodór musi w nich uczestniczyć i to w znacznym stopniu. Rozpracowanie właściwego przebiegu reakcji syntezy i wyjaśnienie historii Słońca zajęło jednak kolejne 10 lat. Obecnie wierzymy, że w każdej sekundzie 657 milionów ton wodoru ulega syntezie do helu (tworzy się 653 miliony ton helu), a przemianie tej towarzyszy utrata masy wynosząca 4,6 milionów ton². Ta brakująca masa nukleonów przekształcana jest na energię promieniowania - dzięki temu Słońce świeci.

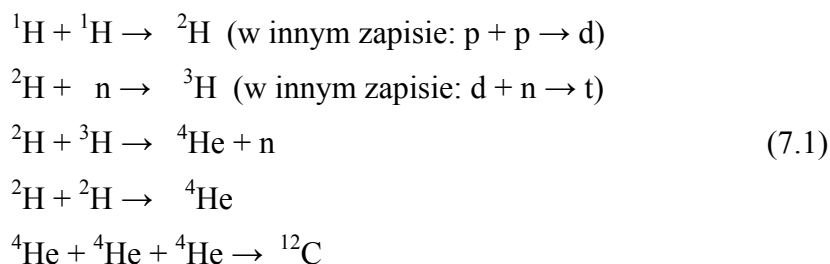


Rys. 7.1 Arthur Stanley Eddington (z lewej), Henry Norris Russel (w środku) i Marcus Laurence Elwin Oliphant (z prawej)

¹ Podziękowania należą się dr M.Rabińskiemu za konsultacje tekstu i użyczenie swej prezentacji. Ponadto korzystamy tu obszernie z materiału edukacyjnego zamieszczonego na stronie www.ipj.gov.pl : *Czym się zajmuje fizyka i technika jądrowa?*

² Ocena tych mas powstała w oparciu o przyjęcie średniej energii reakcji 27,7 MeV

Na Słońcu zachodzą m.in. następujące reakcje:



Historycznie biorąc, pierwszą reakcję syntezy zauważył w roku 1934 Ernest Rutherford (rys. 1.7) oraz fizyk australijski M.L.E.Oliphant (1901-2000; rys. 7.1). W reakcji tej następowała synteza jąder deuteru i otrzymywało się tryt:



Reakcja syntezy (fuzji) jądrowej polega na połączeniu się dwóch lekkich jąder w jedno cięższe, czemu towarzyszy oczywiście defekt masy. Wiemy, że zmiana masy może zostać przekształcona w energię promieniowania. Reakcje te, zwane także termojądrowymi, to typowe reakcje zachodzące w Słońcu i innych gwiazdach. Niezwykle w nich wysokie temperatury i wysokie ciśnienia prowadzą do powstania szczególnego stanu materii całkowicie zjonizowanej - zwanego **plazmą**³, utrzymywaną siłami grawitacyjnymi.

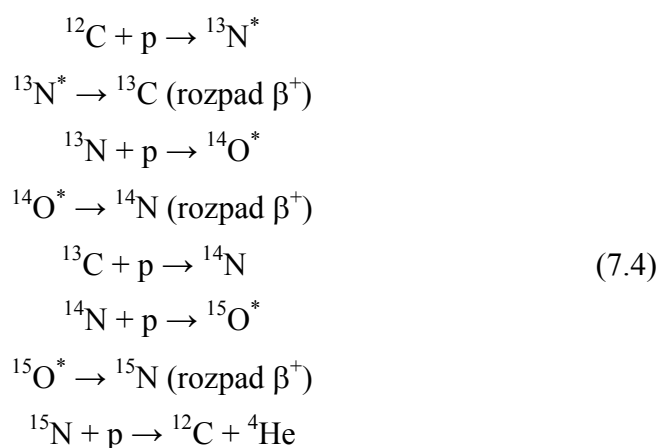
Reakcja syntezy, w której wyzwala się stosunkowo duża ilość energii (27,7 MeV), polega na przereagowaniu czterech protonów i utworzeniu jądra helu (cząstki α , patrz rys. 1.6). Ponieważ syntezie ulegają izotopy wodoru, a wodór znajduje się wszędzie w naszym otoczeniu, idea otrzymywania energii z syntezy wodoru jest niezwykle atrakcyjna: stwarza ona nadzieję na niemal nieograniczone źródło energii dla przyszłych pokoleń. Zwykle reguły prawdopodobieństwa mówią jednak, że jednoczesne zderzenie czterech protonów jest nawet w warunkach panujących na Słońcu czymś bardzo rzadkim i w takim razie synteza helu powinna zachodzić częściej w inny sposób.

³ Stan skupienia materii, na ogół silnie zjonizowany gaz, w którym suma ładunków ujemnych swobodnych elektronów i jonów jest kompensowana przez identyczną sumę ładunków jonów dodatnich. Równowaga ta obowiązuje globalnie, ale nie lokalnie, stąd też mówimy o *kwazineutralności ładunkowej* plazmy. Plazmę czasem nazywamy, ze względu na jej specyficzne własności, czwartym stanem skupienia materii. Pojawia się ona w przestrzeni międzygwiazdnej, w jonosferze ziemskiej, płomieniu, wyładowaniach jarzeniowych i łuku elektrycznym. Wytwarzamy ją także w warunkach ekstremalnie wysokich temperatur i ciśnień - w badaniach nad reakcjami termojądrowymi.

Istotnie, w gwiazdach, w których temperatura wnętrza przewyższa ok. 15 mln K podstawowym źródłem energii jest wystąpienie reakcji cyklicznej, tzw. **cyklu protonowo-protonowego**:



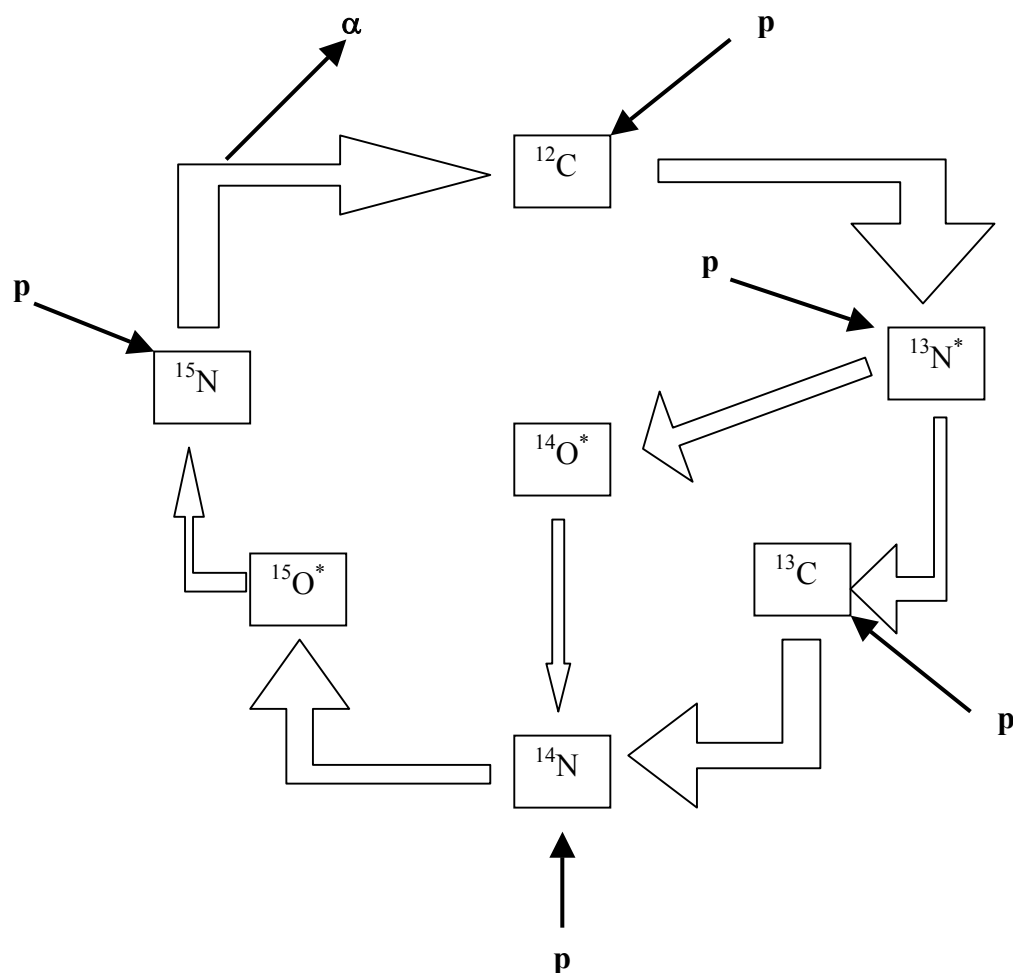
Możliwy jest także tzw. **cykl Bethego** (patrz także dalej), będący cyklem węglowo-azotowo-tlenowym (CNO – od ang. *Carbon-Nitrogen-Oxygen*), w którym niejako węgiel jest z jednej strony odtwarzany, z drugiej zaś spalany jest na hel –popiół w następującej sekwencji reakcji:



Cykl ten przedstawiony jest też w formie diagramu na rys. 7.2. Wywołanie reakcji syntezy na Ziemi nie jest łatwe. By je zainicjować w wysokiej temperaturze należy mieć na uwadze, że należy dysponować niezwykle wysoką temperaturą, rzędu kilkuset milionów stopni, a gdy się już otrzyma taką gorącą plazmę, należy umieć ją utrzymać.

Reakcja syntezy przebiega niejako odwrotnie do reakcji rozszczepienia jądrowego. W tej ostatniej, z jądra o większej masie tworzone są jądra o masach mniejszych, a suma ich mas jest mniejsza od masy jądra wyjściowego. W reakcji syntezy masa cięższego jądra jest mniejsza od początkowych mas lżejszych jąder. Łatwo zauważyć, że aby zapoczątkować taką reakcję energie zderzających się jąder (cząstek o ładunku dodatnim!) muszą być wystarczająco wysokie, by przewyciężyć odpychanie elektrostatyczne. Aby utworzyć atomy

helu, powiedzmy z syntezy deuteru i trytu (trzecia reakcja w (7.1)), oba jądra muszą znajdować się w warunkach ekstremalnie wysokiej temperatury i wysokiego ciśnienia. W opisanej tu reakcji tworzy się neutron o wysokiej energii, która zmniejsza się dzięki zderzeniom neutronu z otoczeniem. Przekazywaną energię można przekształcić w energię cieplną potrzebną do wytworzenia pary, a ta następnie będzie mogła poruszać turbinę i generator prądu elektrycznego. Neutrony wytwarzane w reakcji syntezy można też wykorzystać do produkcji paliwa reaktorowego ze zubożonego uranu, tj. uranu zawierającego mniej izotopu uranu-235 niż w uranie naturalnym (0,72%). Łatwo się też domyśleć, że reakcja ta może zostać wykorzystana w tworzeniu broni jądrowej.



Rys.7.2 Cykl węglowo – azotowo - tlenowy

W praktyce możemy myśleć o wykorzystaniu reakcji syntezy lekkich jąder podanych w Tabeli 7.1:

Tab. 7.1 Typowe reakcje syntezy jądrowej

$D + D$	$\rightarrow$	$T + H + 4,04 \text{ MeV}$
$D + D$	$\rightarrow$	${}^3\text{He} + n + 3,27 \text{ MeV}$
$D + T$	$\rightarrow$	${}^4\text{He} + n + 17,58 \text{ MeV}$
$D + {}^3\text{He}$	$\rightarrow$	${}^4\text{He} + n + 18,37 \text{ MeV}$
$T + T$	$\rightarrow$	${}^4\text{He} + 2n + 11,31 \text{ MeV}$
$H + {}^6\text{Li}$	$\rightarrow$	${}^4\text{He} + {}^3\text{He} + 3,9 \text{ MeV}$
$H + {}^{11}\text{B}$	$\rightarrow$	$3({}^4\text{He}) + 8,68 \text{ MeV}$
$D + {}^6\text{Li}$	$\rightarrow$	$2({}^4\text{He}) + 22,3 \text{ MeV}$

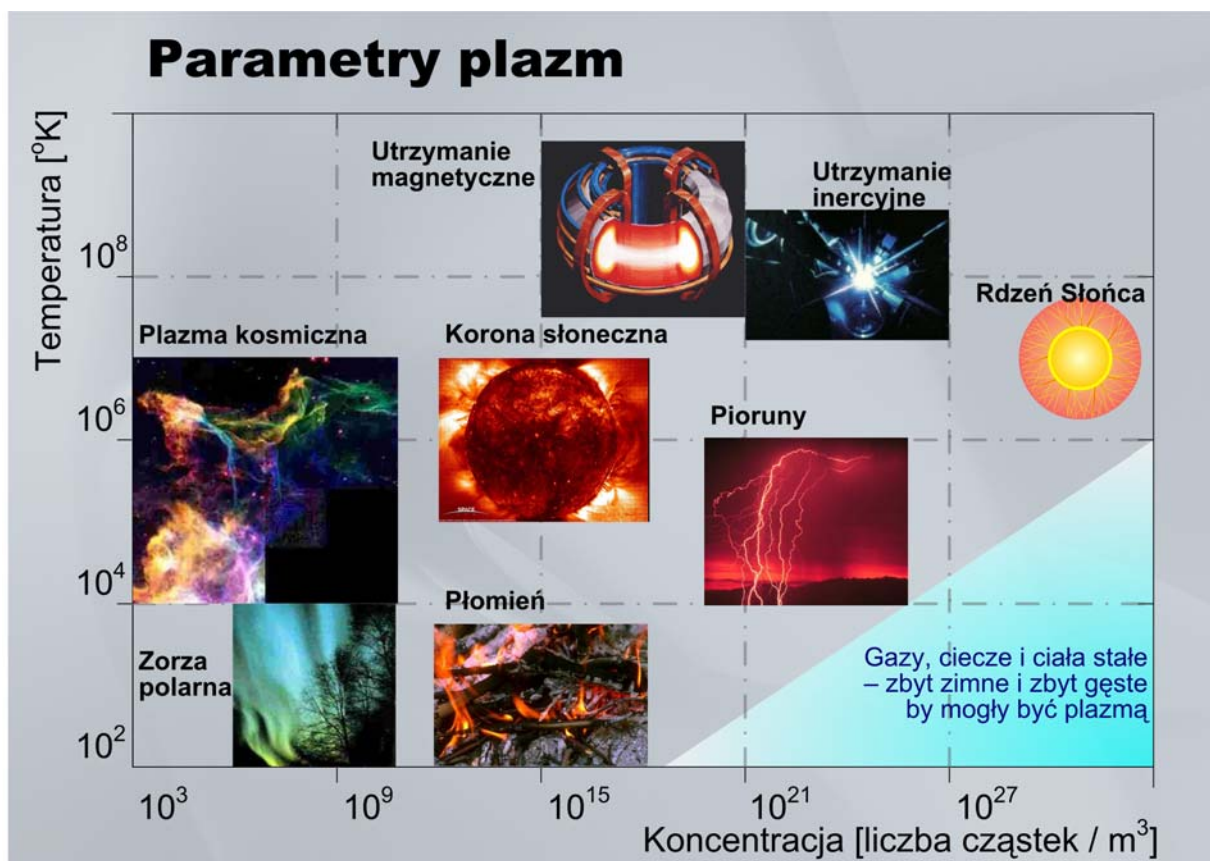
Dla zainicjowania tych reakcji należy we wszystkich wypadkach przezwyciężyć odpychanie kulombowskie między dwoma jonami - cząstki te muszą mieć więc wysoką początkową energię kinetyczną (od kilku keV do kilkuset keV; pomijamy tu możliwość przeprowadzenia reakcji syntezy jądrowej w niskich temperaturach metodą tzw. *katalizy mionowej*⁴).

Energie cząstek potrzebne dla reakcji podanych w powyższej tabeli odpowiadają temperaturom rzędu $10^7 - 10^9 \text{ K}$. Lekkie cząstki dość łatwo przyspieszyć do takich energii. Jednakże energia potrzebna do pracy akceleratora znacznie przewyższałaby energię, którą otrzymalibyśmy z reakcji syntezy. Z tego względu, aby inicjować reakcje syntezy należy wykorzystać inne podejście: energie kinetyczne reagujących cząstek powinny być wynikiem wysokiej temperatury gazu takich cząstek. W temperaturach rzędu dziesiątków i setek milionów stopni, elektrony są odrywane od atomów, reagujące cząstki istnieją więc jako gorąca *plazma*. I dlatego też mówimy o reakcji termojądrowej i plazmie wysokotemperaturowej. Choć plazma ta silnie promieniuje, energia tracona na promieniowanie maleje w miarę wzrostu temperatury i energii z reakcji termojądrowych.

⁴ Gdy elektrony w atomach deuteru zastąpimy ujemnie naładowanymi mionami, będącymi 207 razy cięższymi od elektronów, promień powstałego atomu ("deuteru mionowego") będzie odpowiednio mniejszy od promienia atomu deuteru. Taki mały atom może się łatwiej zbliżyć do innego atomu deuteru i zainicjować reakcję syntezy. Mówimy tu o reakcji syntezy katalizowanej mionami.

Temperatura, w której straty energii są równe energii wydzielanej nazywana jest **temperaturą zapłonu plazmy**. Dla reakcji d-d wynosi ona ok. 350 mln K, a dla d-t ok. 45 mln K.

Choć w tym rozdziale będziemy mówili głównie o plazmie wysokotemperaturowej warto zwrócić uwagę, że pojęcie plazmy jest dość szerokie. Na rys. 7.3 pokazujemy⁵ różne rodzaje plazmy w zależności od gęstości cząstek naładowanych i temperatury.



Rys. 7.3 Różne rodzaje plazm. O plazmie utrzymywanej magnetycznie i inercyjnie będziemy mówili w kolejnych paragrafach.

Kończąc ten paragraf warto poświęcić trochę uwagi niezwykłym własnościom plazmy, które uzasadniają nazywanie jej **czwartym stanem skupienia materii**. Po pierwsze, należy zdać sobie sprawę z tego, że konsekwencją istnienia rozsuniętych ładunków dodatnich i ujemnych

⁵ Z prezentacji dr M.Rabińskiego w 2006 r. za pozwoleniem Autora

jest powstawanie w ośrodku pól elektrycznych tym silniejszych im gęstość plazmy jest większa. Powstawanie tego pola stabilizuje plazmę. Rozpatrzenie elektrodynamicznych własności plazmy pokazuje, że generowane są w niej charakterystyczne oscylacje o częstościach zależnych od gęstości elektronów plazmy, a po przyłożeniu doń pola magnetycznego powstają podłużne *fale magnetohydrostatyczne* – tzw. *fale van Alphéna*, które rozchodzą się w kierunku przyłożonego pola i *fale magnetoakustyczne*, które rozchodzą się w kierunku prostopadłym do pola magnetycznego.

Po drugie, plazma promieniuje, a widmo promieniowania zależy od temperatury i stopnia jonizacji plazmy. W wysokich temperaturach promieniowanie to pochodzi w znacznej mierze z rekombinacji elektronów i jonów dodatnich oraz hamowania swobodnych elektronów w polu elektrycznym jonów. Taka plazma także pochłania promieniowanie z tego samego zakresu widmowego. W istocie rzeczy, łagodna temperatura na Ziemi jest skutkiem pochłaniania promieniowania słonecznego z najgorętszych warstw Słońca w plazmie Słońca. Do Ziemi dociera jedynie promieniowanie z warstw zewnętrznych.

Trzecią cechą, na którą warto zwrócić uwagę jest naturalna zdolność przewodzenia prądu, odróżniająca plazmę od zwykłego gazu. Opór elektryczny plazmy jednak nie rośnie ze wzrostem temperatury, jak w typowych przewodnikach, ale maleje jak $T^{-3/2}$. Stąd też bierze się nadzwyczajnie niski opór plazmy wysokotemperaturowej.

Na koniec zauważmy, że o ile w plazmie o małej gęstości wszystkie cząstki można traktować jak prawie niezależne, gdy gęstość plazmy wzrasta coraz silniej dochodzą do głosu własności ośrodka ciągłego, wrażliwego na przyłożone pole elektryczne czy magnetyczne.

7.2 Otrzymywanie plazmy wysokotemperaturowej

7.2.1 Podstawowe problemy

Zasadniczym problemem jest wytworzenie ekstremalnie wysokiej temperatury i ciśnienia w zjonizowanym gazie - plazmie oraz utrzymanie jej w tych warunkach wystarczająco długo,

aby zainicjować emisję energii. Gdy się taki cel osiągnie i zajdzie wystarczająca liczba reakcji syntezy, dostawa świeżego paliwa powinna zapewnić tworzenie energii w sposób ciągły.

Warunkiem koniecznym dla produkowania energii w reaktorze termojądrowym przy plazmie deuterowo-trytowej (w stosunku 1:1) jest spełnienie tzw. *kryterium Lawsona*, które głosi, że iloczyn gęstości jąder w plazmie i czasu utrzymania plazmy w temperaturze zapłonu plazmy powinien przewyższać wartość progową 10^{20} - 10^{21} s/m³.

Konieczność utrzymania wysokiej temperatury oznacza, że plazma nie może znaleźć się w kontakcie ze ścianami jakiegokolwiek naczynia. Jest rzeczą oczywistą, że żadne ścianki materialne nie są w stanie wytrzymać tak wysokich temperatur a realizacja reakcji syntezy jądrowej na Ziemi stanowi niezwykle wyzwanie dla uczonych i techników. Dlatego też należy wypracować specyficzne techniki utrzymywania plazmy.

W centrum Słońca, w którym panuje temperatura rzędu 10^7 K, a gęstość dochodzi do 100



kg/dcm³ panują idealne warunki do utrzymywania plazmy. Utrzymywanie to nazywamy z naturalnych względów *grawitacyjnym*, a zachodzące reakcje syntezy zostały podane wcześniej, patrz (7.1). Opis cykli syntezy termojądrowej w Słońcu i innych gwiazdach zawdzięczamy fizykowi niemieckiemu, Hansowi Albrechtowi Bethemu (1916 - 2005), rys. 7.4. Ten typ *pułapkowania grawitacyjnego* nie jest jednak możliwy w warunkach ziemskich.

Rys.7.4 Hans Albrecht Bethe

Prócz metody grawitacyjnej istnieją jeszcze dwie inne metody utrzymania plazmy w zamknięciu, a mianowicie: magnetyczna i inercyjna.

W wypadku metody magnetycznej, gdzie gęstość cząstek przewyższa około 10^{20} /m³, czas utrzymywania plazmy, zgodnie z kryterium Lawsona, powinien przewyższać 1 s. Przy inercyjnym utrzymywaniu plazmy gęstość cząstek jest mniejsza od około 10^{31} /m³, a czas utrzymywania plazmy dłuższy od 10^{-11} s.

Reakcją, którą się wykorzysta w przyszłości, jest synteza deuteru i trytu, choć rozpatruje się też syntezę dwóch atomów deuteru. Deuter można łatwo znaleźć w wodzie (30 g na metr sześcienny). Tryt jednak 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) płaszcza litowego, zawierającego także beryl, otaczającego rdzeń reaktora. Sam lit pochłaniałby neutrony spowalniane w tymże płaszczu. Ostatecznie lit przekształcałby się w tryt i hel. Wyzwalana energia ogrzewałaby płaszcz litowy i byłby to punkt startowy do wytwarzania energii użytecznej. Beryl jest natomiast niezbędny dla podtrzymania liczby neutronów w układzie.

7.2.2 Magnetyczne utrzymywanie plazmy

Ruchem cząstek naładowanych w plazmie można sterować przy użyciu pola magnetycznego. W układach tworzących zamknięte pułapki 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. W przeciwnym wypadku plazma natychmiast się schładza i zachodzenie reakcji syntezy staje się niemożliwe. Przy atmosferycznej gęstości cząstek (około 10^{27} na metr sześcienny) i ich energii termicznej wynoszącej 10 keV, ciśnienie magnetyczne musi przewyższać 10^8 hPa. Tak wielkiego ciśnienia nie mogą wytrzymać ani cewki pola magnetycznego, ani związana z nimi mechaniczna konstrukcja! Aby zmniejszyć ciśnienie należy obniżyć gęstość cząstek. Ponieważ jednak reakcja syntezy zachodzi, gdy cząstki zderzają się ze sobą, gorącą plazmę trzeba utrzymać przez dość długi okres. Z tego względu, aby zaszła konkretna reakcja syntezy, należy spełnić wspomniane już kryterium Lawsona, podające wartość krytyczną iloczynu gęstości cząstek i czasu ich zgromadzenia w temperaturze zapłonu plazmy. Dla plazmy deuterowo-trytovej ma ono postać

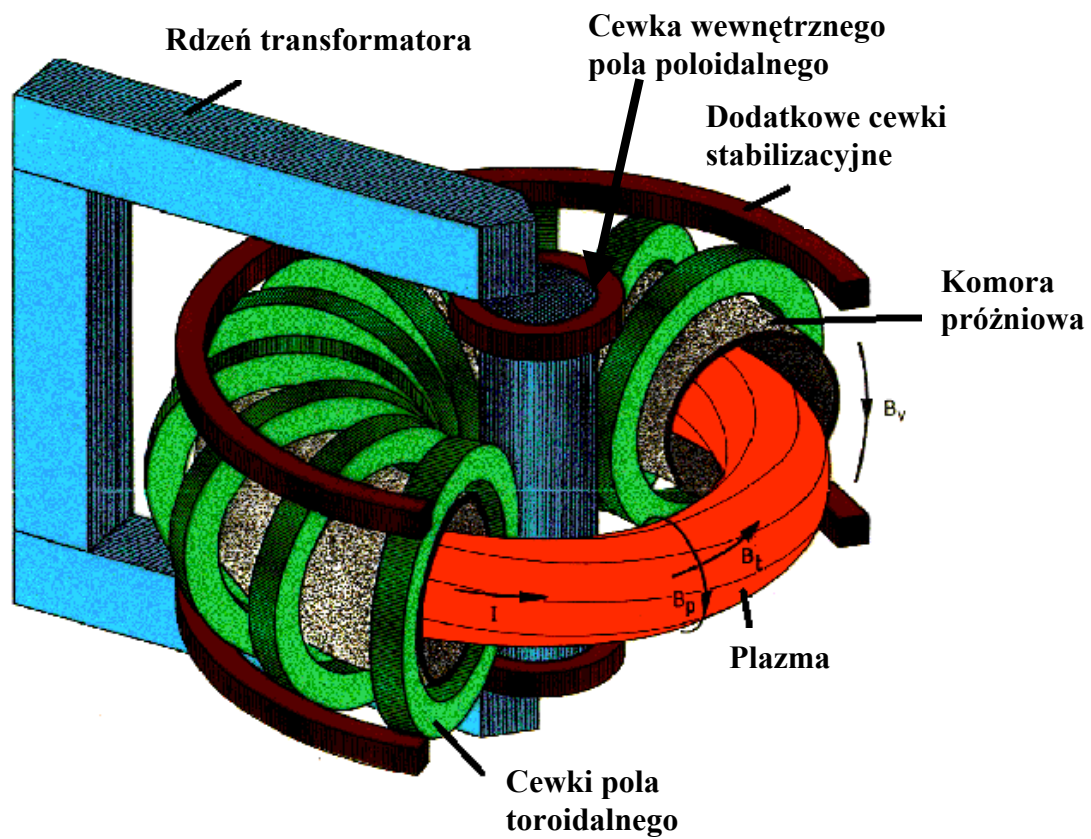
$$n_0 \tau > 3 \cdot 10^{20} \text{ m}^{-3} \text{ s} \quad (7.5)$$

Dla plazmy deuterowej i reakcji d-d powyższy iloczyn powinien przekraczać $10^{22} \text{ m}^{-3} \text{ s}$.

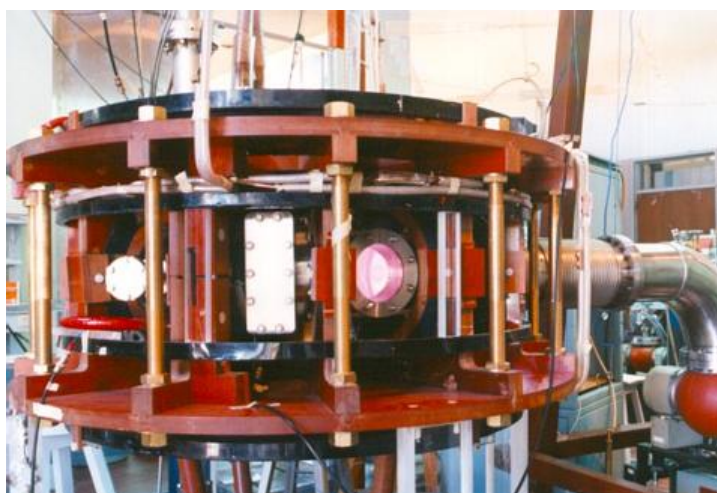
Jak się okazało, najefektywniejszą konfiguracją pola magnetycznego jest konfiguracja toroidalna. Wygląda ona jak pączek amerykański i tworzy zamkniętą "butelkę magnetyczną". Dla zapewnienia stabilności plazmy linie pola magnetycznego powinny układać się na helisie. Taki typ pułapki tworzą układy znane pod nazwą **tokamaków**, **stellaratorów** i **układów „pinchu”** (z samozaciskającym się sznurem plazmy) z odwróconym polem magnetycznym (RFP - od ang. *Reversed Field Pinch*).

W Tokamaku (nazwa pochodzi od ros. *toroidalnaja kamiera, magnitnaja katuszka*), rys. 7.5, wokół reaktora w kształcie torusa znajduje się szereg cewek pola magnetycznego. Rdzeń transformatora przechodzi przez środek Tokamaka, prąd w plazmie tworzy zaś uzwojenie wtórne. Zmienne pole magnetyczne w rdzeniu transformatora generuje wewnątrz toroidu wirowe 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 K (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 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 (rys. 1.15). Największą wadą tych urządzeń jest fakt, iż zakres możliwych parametrów ich pracy jest silnie ograniczony.

Pierwszym zbudowanym na świecie tokamakiem był tokamak uruchomiony w Instytucie Energii Atomowej w Moskwie. Na rysunkach 7.6 - 7.8 pokazujemy odpowiednio jeden z najmniejszych na świecie tokamaków: „Novillo” i największy zbudowany dotąd - JET (od ang. **Joint European Torus**). Rysunki 7.7 i 7.8 pokazują w przejrzysty sposób – przez porównanie z rozmiarami człowieka - gigantyczne rozmiary tego urządzenia.

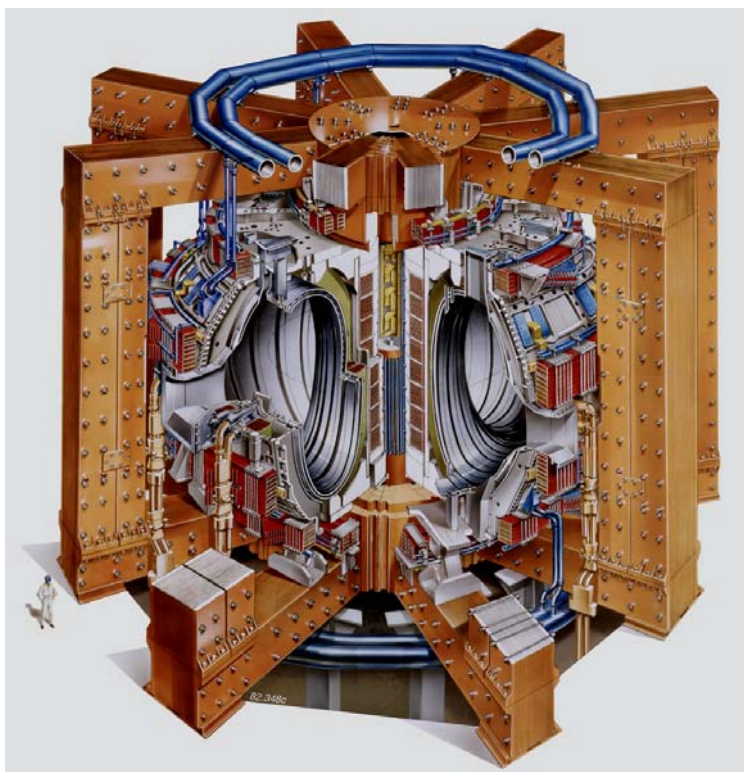


Rys. 7.5 Zasada tokamaka z pokazanym sznurem plazmowym (rys. oryg. *Forschungszentrum Jülich GmbH*)



Rys.7.6 Jeden z najmniejszych na świecie tokamak „Novillo”

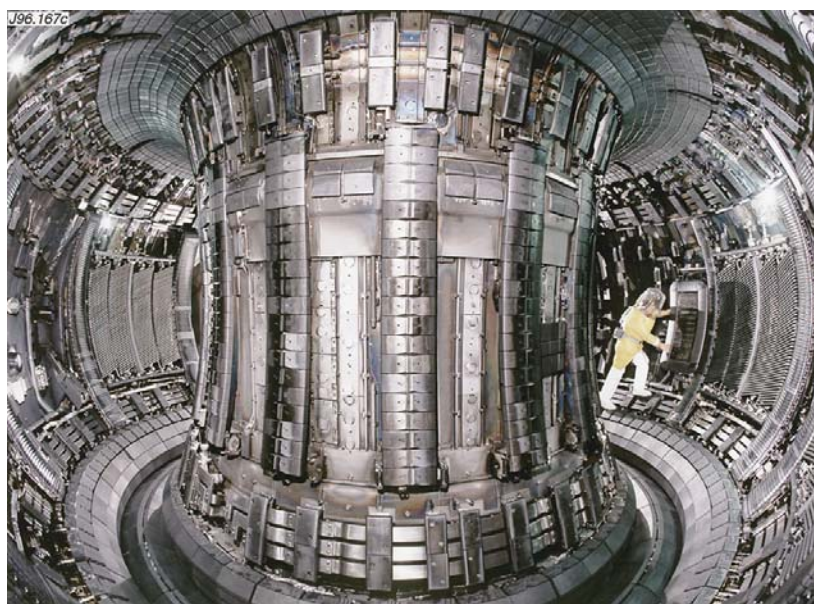
Podobnie, jak w wypadku reaktorów jądrowych tak i w budowie tokamaków można wyróżnić kilka generacji. I tak, do generacji I zaliczamy układy małe i średnie, które budowano głównie do lat 1970. Kolejna generacja II objęła cztery układy dużej skali, a mianowicie wspomniany już JET oraz TFTR (*Tokamak Fusion Test Reactor* w USA), JT60 (w Japonii) oraz T15 w b. ZSRR. Warto zwrócić uwagę, że typowe natężenia prądów w tokamaku, to wiele megaamperów.



Rys. 7.7 Schemat JET

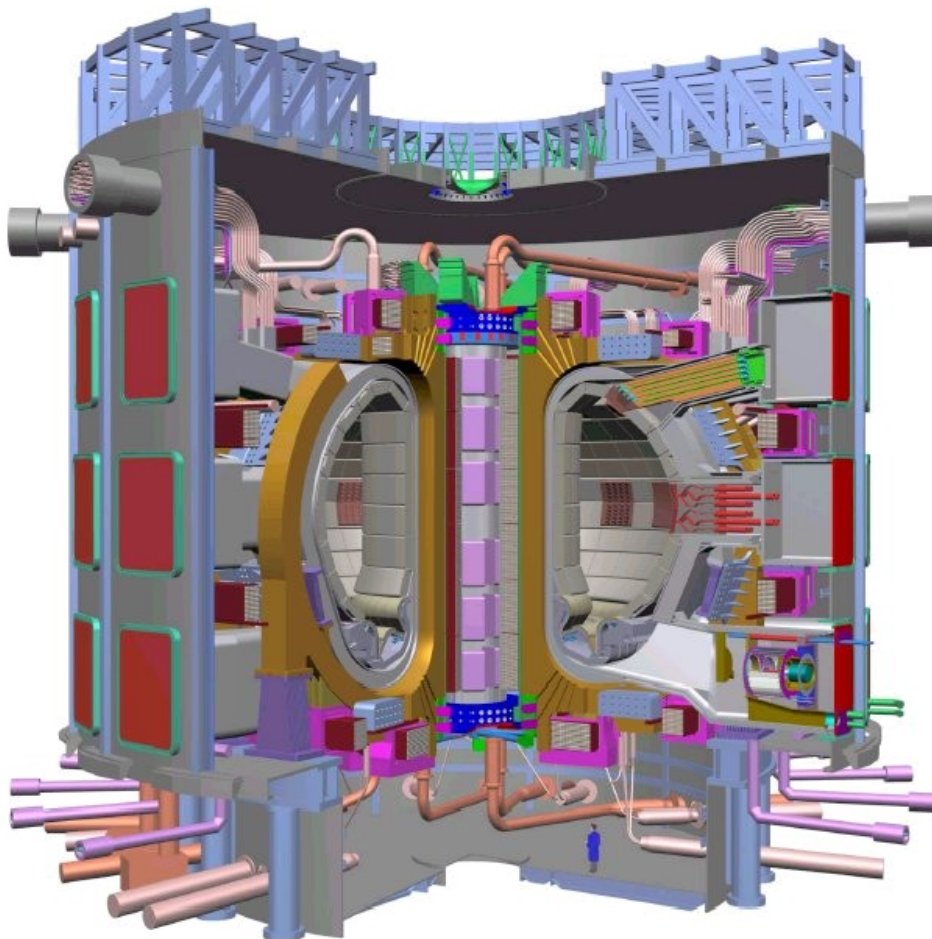
Generacja III, to rozpoczęty właśnie projekt ogólnościatowy budowy tokamaka o nazwie ITER (od ang. *International Thermonuclear Experimental Reactor*), w której objętość komory będzie dziesięciokrotnie przewyższała komorę w JET, a o rozmiarze całości może świadczyć sylwetka człowieka u dołu rys. 7.9. Po stacji orbitalnej Alfa jest to obecnie najdroższy projekt naukowy realizowany na świecie (ok. 10 miliardów Euro), a uczestniczą w nim Unia Europejska, USA, Rosja, Japonia, Korea Południowa i Chiny. Wyniki uzyskane na instalacji ITER mają posłużyć do zbudowania tokamaka czwartej generacji – DEMO, będącego już przygotowaniem do budowy prototypu pierwszej elektrowni termojądrowej –

PROTO. Ta ostatnia być może nawet nie będzie budowana i od razu przystąpi się do budowy regularnej elektrowni.

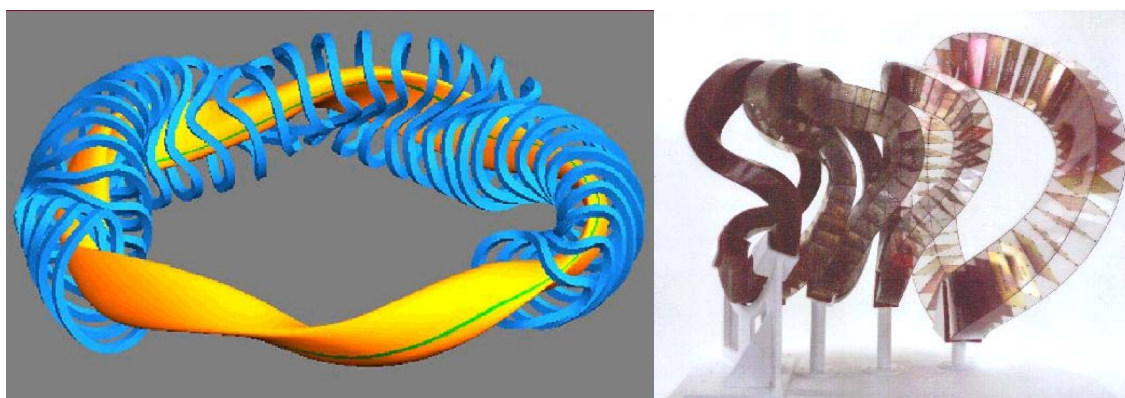


Rys. 7.8 Wnętrze komory tokamaka JET

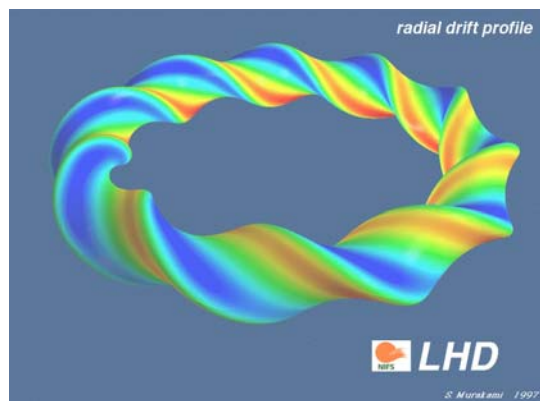
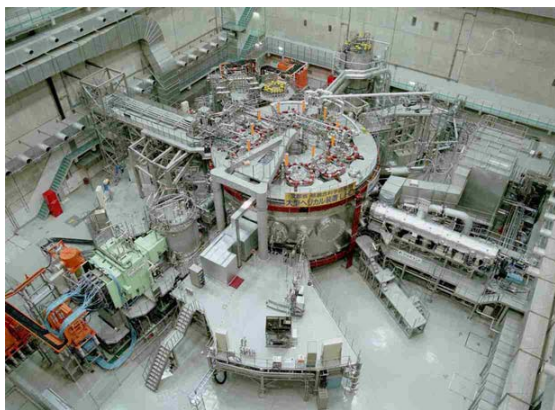
Innym rozwiązaniem technicznym dla utrzymania plazmy jest *stellarator*, w którym pole magnetyczne wytwarzane jest przez cewki o silnie zdeformowanym (lecz precyzyjnie obliczonym) kształcie. Rys. 7.10 pokazuje kształt takich cewek. Oczywiście pole wytwarzane przez takie cewki prowadzi również do specyficznego kształtu sznura plazmowego. Stellaratory są budowane w kilku krajach. Największy z nich LHD (od ang. *Large Helical Device*) został zbudowany w Japonii, patrz rys. 7.7.



Rys. 7.9 Schemat reaktora ITER



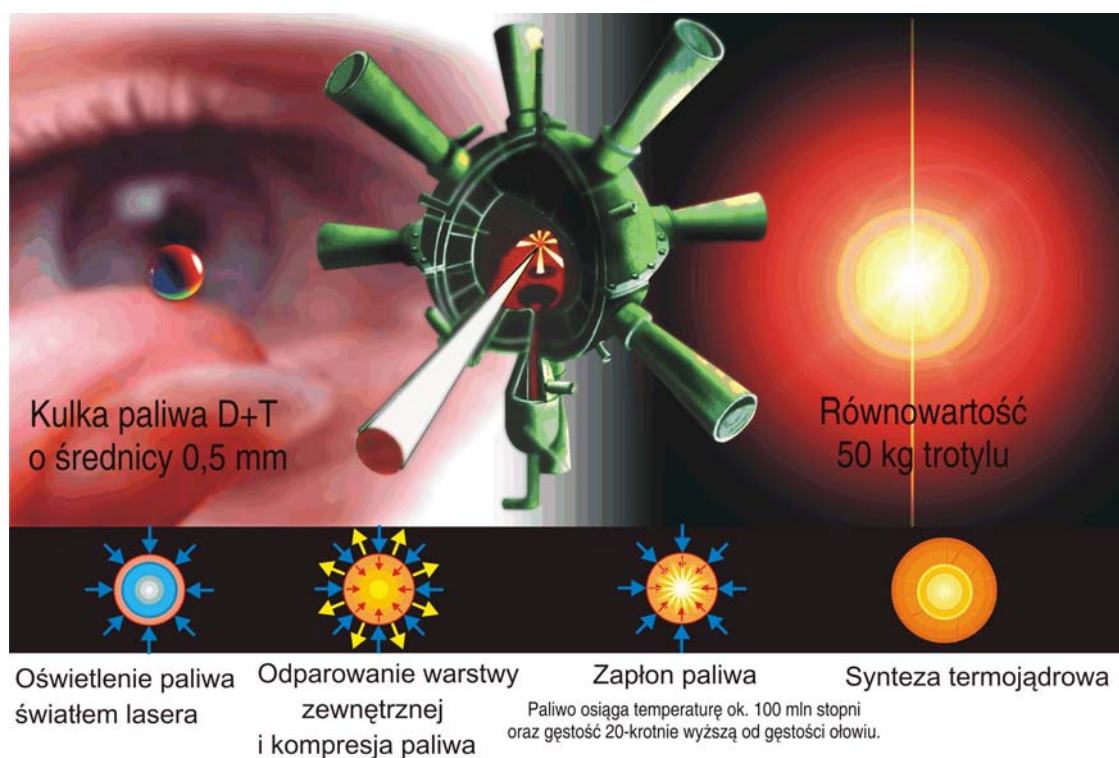
Rys. 7.10 Wygląd cewek pola magnetycznego stellaratora



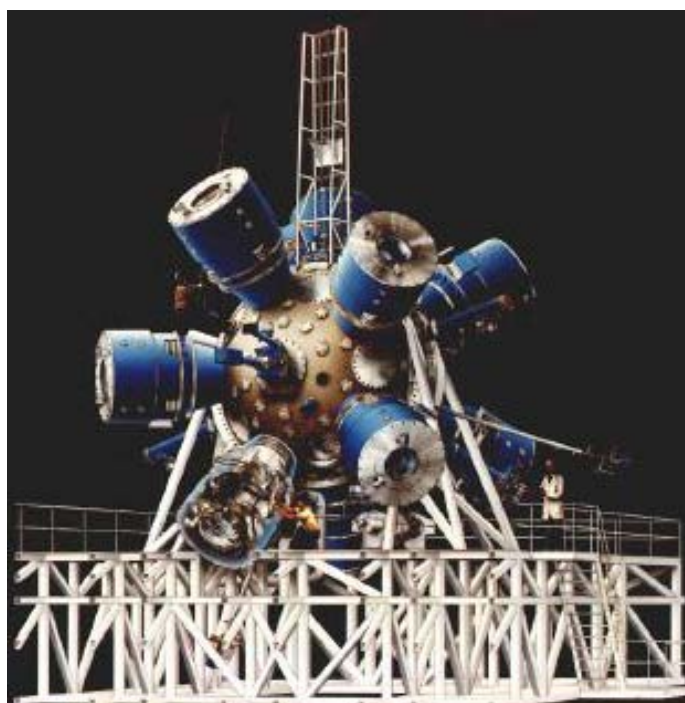
Rys. 7.11 Największy na świecie układ stellaratora w Japonii. Z prawej pokazany jest kształt sznura plazmowego w tym stellaratorze

7.2.3 Inercyjne utrzymywanie plazmy

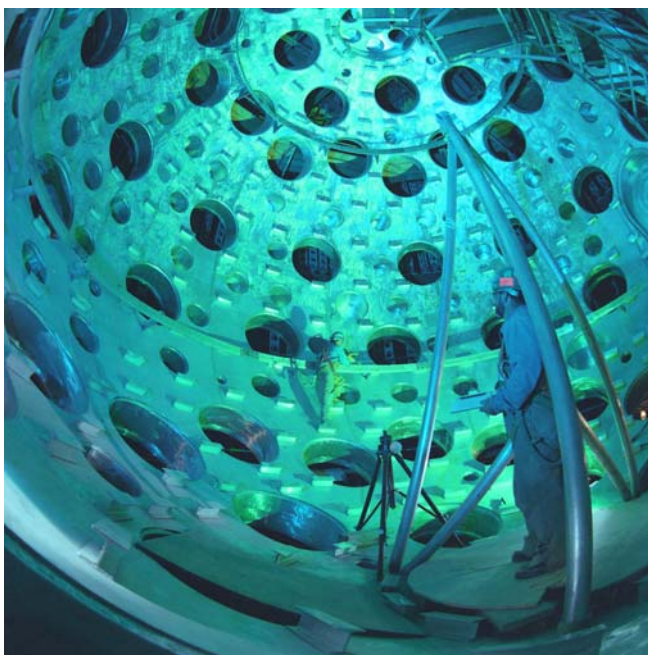
Idea pułapki inercyjnej sprowadza się do przygotowania pastylki z paliwem termojądrowym, a następnie spowodowania znacznej jej kompresji przez bombardowanie silnymi, dobrze zogniskowanymi, symetrycznymi impulsami światła laserowego lub wiązkami jonów. Powierzchnia pastylki w tych warunkach odparowuje i tworzy koronę plazmową. Rozszerzająca się plazma tworzy falę uderzeniową biegnącą w kierunku pastylki, co skutkuje implozją pastylki i krótkotrwałym zajściem reakcji syntezy. Schematyczny przebieg całego procesu ilustruje rys. 7.12. Najbardziej zaawansowanym układem, w którym wykorzystuje się ten typ pułapki plazmowej jest NOVA w Lawrence Livermore Laboratory w USA (rys. 7.13). Pokazano tam, że podczas ściskania plazmy można otrzymać gęstości 600 razy większe niż gęstość cieczy D-T (deuterowo-trytowej) i 20 razy większe niż gęstość ołowiu. Niestety raczej niska sprawność laserów nie pozwala na bardzo efektywne wykorzystanie metody utrzymywania inercyjnego.



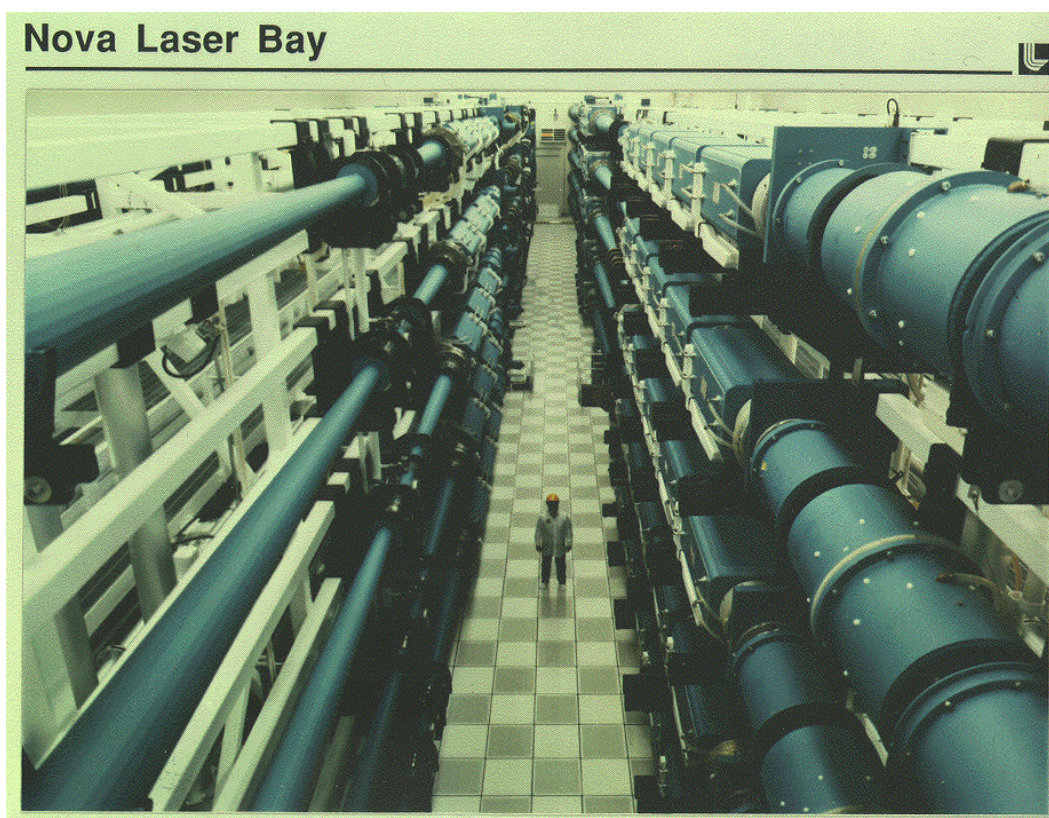
Rys. 7.12 Przebieg wywołania reakcji syntezy jądrowej z utrzymywaniem inercyjnym



Rys. 7.13 Instalacja NOVA w Lawrence Livermore Laboratory (USA)



Rys. 7.14 Wnętrze komory zestawu NOVA do utrzymywania plazmy metodą inercyjną. Średnica komory wynosi 10 m, waga zaś (aluminium), to 450 ton. Jakże przy tym maleńka jest pokazana wyżej kuleczka mieszaniny D+T (pelet), będąca równoważna w mocy wybuchu 50 kg TNT.



Rys. 7.15 Hala laserowa w układzie NOVA

Przyjęte rozwiązanie cechuje się kilkoma wadami:

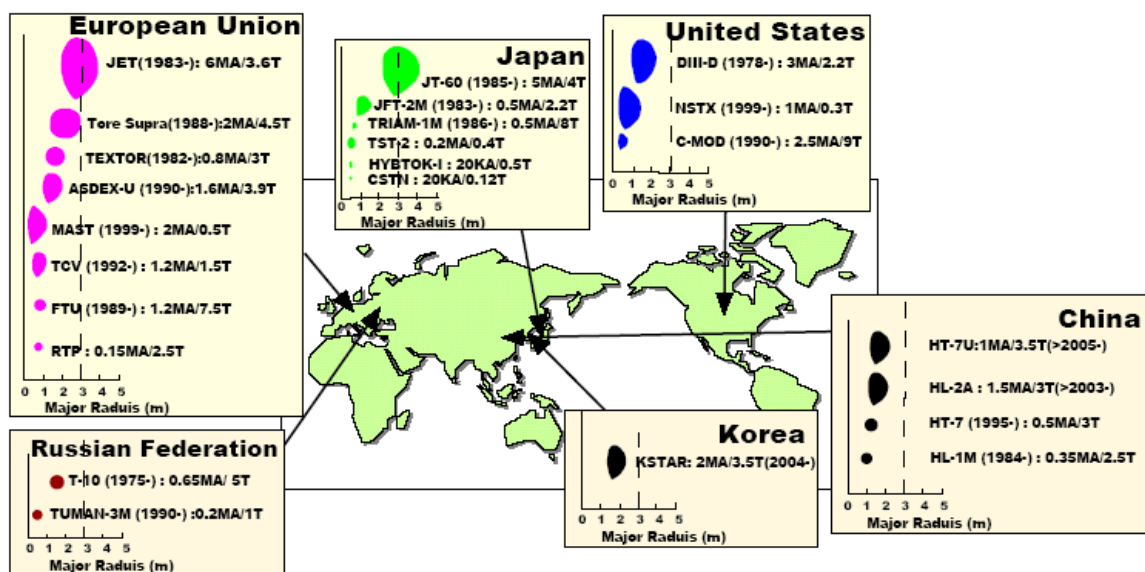
- Stosunek energii uzyskanej z syntezy do energii niezbędnej do jej zainicjowania wynosi (dla równomiernie grzanego peletu D+T) około 225.
- Niska efektywność laserów i źródeł jonów powoduje konieczność dostarczenia do układu energii co najmniej 10^4 razy większej.
- Zainicjowanie syntezy wymaga energii 100 kJ, co oznacza, że zbudowanie reaktora wymagałoby laserów o mocy kilku megawatów. A już obecna hala laserów (rys. 7.15) wygląda imponująco.
- Trudności zagwarantowania odpowiedniej częstości repetycji laserów i wytrzymałości ich okien.

W Stanach Zjednoczonych w Sandia National Laboratories miast laserów korzysta się z nanosekundowych impulsów promieniowania rentgenowskiego o energii około 1 keV, wysyłanego z tzw. *układu Z*. Układ ten wykorzystuje opisane przez nas wcześniej zjawisko samozaciskania (pinchu) sznura plazmowego w tokamakach. Odpowiednia technologia pozwala na wyzwalamie impulsów elektrycznych dużej mocy podczas rozładowania baterii kondensatorów. Dzięki połączeniu tych impulsów ze zjawiskiem Z-pinchu i wytwarzanym promieniowaniem rentgenowskim można inicjować reakcje syntezy w kuleczkach z paliwem deuterowo-trytowym. Technika ta ma, jak dotąd, tylko skalę laboratoryjną.

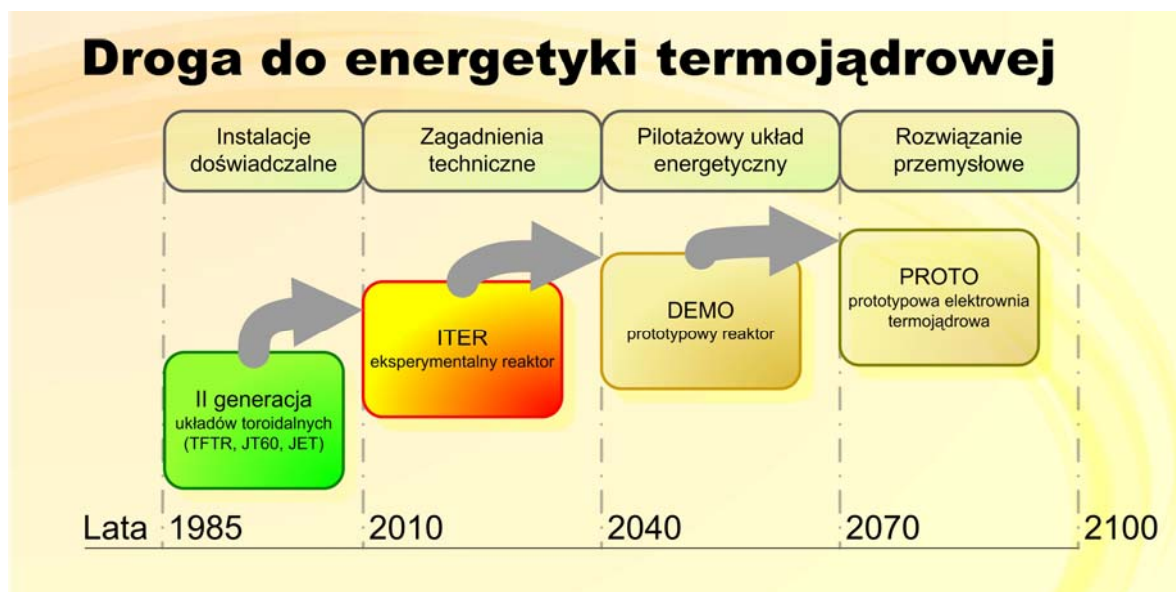
7.3 Jakie perspektywy?

Na rys. 7.16 pokazujemy rozmieszczenie instalacji termojądrowych na świecie. Cadarache we Francji (Prowansja), w której będzie budowany ITER, zaznaczone jest na tej swoistej mapce pośrednio przez wskazanie miejsca instalacji Tora Supra.

Jak mówiliśmy, plany rozwoju energetyki termonuklearnej kształtują się, jak na rys. 7.17. Nie jest to droga łatwa pomimo znaczących środków międzynarodowych skierowanych obecnie na jej rozwój.



Rys. 7.16 Instalacje termojądrowe na świecie



Rys. 7.17 Droga do energetyki termojądrowej widziana w początku XXI wieku

Problemem jest czas utrzymania energii, który rośnie m.in. wraz z objętością urządzenia. Jak się pokazuje, moc grzania plazmy rośnie proporcjonalnie do objętości komory V:

$$P_{\alpha} = 3nT V/\tau_E , \quad (7.6)$$

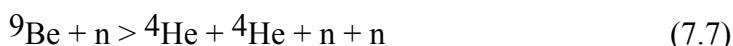
gdzie n oznacza gęstość plazmy, a τ_E oznacza czas utrzymania energii.

Prototypowy reaktor termojądrowy PROTO ma mieć następujące parametry:

- Promień zewnętrzny urządzenia – 17 m
- Duży promień torusa – 7 m
- Wysokość sznura plazmy – 6 m
- Szerokość sznura plazmy – 3.4 m
- Objętość plazmy – 760 m³
- Pole magnetyczne – 9 Tesli
- Indukowany prąd w plazmie – do 12 MA
- Moc rozruchowa – 60 MW
- Obciążenie ścianki strumieniem neutronów – $\sim 3 \text{ MW/m}^3$
- Moc uzyskiwana z syntezy – 3 000 MW (równoważnik dwóch dużych elektrowni jądrowych)

Około jeden na 6000 atomów otaczającego nas wodoru (włączając wodór, który mamy w wodzie) jest atomem deuteru. Od lat próbuje się zatem stworzyć jakąś instalację wykorzystującą reakcję syntezy, gdyż ta mogłaby zapewnić dostawę energii nawet przez miliardy lat! Dla porównania: do wyprodukowania energii elektrycznej 1GW rok z reakcji rozszczepienia jądrowego potrzebujemy około 35 ton UO₂, natomiast otrzymanie jej z reakcji syntezy wymaga posiadania około 100 kg deuteru oraz 150 kg trytu. Co czyni reakcję syntezy atrakcyjną, to także niemal kompletny brak ubocznych produktów promieniotwórczych, a w szczególności fakt, iż działanie elektrowni opartej na reakcji syntezy nie może powodować powstawania materiałów, których można użyć do produkcji broni jądrowej. W odróżnieniu od reaktorów jądrowych wykorzystujących proces rozszczepienia, ewentualny wybuch instalacji termojądrowej jest z zasady niemożliwy: bowiem zanim wybuch nastąpi plazma musi się rozszerzyć i obniżyć temperaturę, co automatycznie zatrzyma proces syntezy jądrowej.

Optymizm związany z „niewyczerpywalnym” źródłem energii należy jednak nieco miarkować⁶, szczególnie przy porównaniach energetyki termojądrowej z energetyką jądrową. Po pierwsze, do wytworzenia tej samej ilości energii w reaktorze termojądrowym potrzebne jest ponad czterokrotnie więcej neutronów niż w reaktorze jądrowym, a dla podtrzymania bilansu neutronów niezbędnym będzie wykorzystanie berylu, który w reakcji z neutronem dostarcza dwóch cząstek alfa oraz dwóch neutronów, zgodnie z reakcją:



Zwiększona produkcja neutronów może mieć wpływ na własności materiałów konstrukcyjnych całej instalacji. Po drugie, cyrkulacja stopionego litu i berylu w płaszczu reaktora termojądrowego będzie równie złożona jak chłodzenie sodem powielających prędkich reaktorów jądrowych, a sama obecność stopionych soli litu stwarza zagrożenie. Po trzecie, bombardowanie komory neutronami będzie powodowało zniszczenia radiacyjne materiału i wzbudzenie niektórych pierwiastków. Po czwarte, po 15 latach eksploatacji trzeba będzie 30 lat aby poziom promieniowania materiału komory obniżył się poniżej tła naturalnego (analogicznie jak w reaktorach jądrowych). Wreszcie należy też mieć na uwadze, że tryt niezbędny do reakcji syntezy jest β -promieniotwórczy. 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 12,3 lat). Dlatego też zwraca się przede wszystkim uwagę na rozwiązanie zagadnień związanych z reakcją deuter-deuter, a nie reakcjami, w których bierze udział tryt. Wszystko to powoduje, że koszt rozwoju energetyki termojądrowej ocenia się na dziesiątki miliardów dolarów i nie jest pewne, czy na ten rodzaj energetyki będzie stać wiele państw.

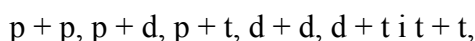
W reaktorach termojądrowych będzie tworzyła się, podobnie jak w reaktorach jądrowych, ogromna ilość promieniowania jonizującego (szczególnie neutronowego). Z tego względu zasadniczą sprawą staje się konstrukcja właściwej osłony biologicznej przed tym promieniowaniem. Należy również bardzo serio brać pod uwagę niebezpieczeństwa związane z układem magnetycznym, wewnątrz którego gromadzi się gigantyczna ilość energii. W roku 1992 powstał komitet o nazwie European Safety and Environmental Assessment of Fusion Power (SEAFP), którego zadaniem jest wypracowanie podstaw konstrukcji elektrowni

⁶ Z prezentacji dr M.Rabińskiego w r. 2006

opartych na reakcji syntezy termojądrowej, zasad ich bezpiecznego użytkowania oraz oceny ich wpływu na środowisko. Zgodnie z ocenami SEAFP, podstawową zaletą instalacji termojądrowych w stosunku do reaktorów jądrowych jest fakt, że 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 będą się szybko rozpadać i nie wymagają więc specjalnego odizolowywania ich od środowiska. Pozostaje natomiast problem możliwych uwolnień do środowiska promieniotwórczego trytu.

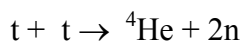
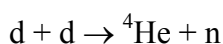
7.4 Broń termojądrowa

Możliwość wyzwalań wielkiej ilości energii w reakcjach syntezy jądrowej nie uszła uwadze specjalistów od broni jądrowej, którzy byli świadomi faktu, że objętości bomb atomowych czy plutonowych, a więc ich możliwa siła niszczenia, są ograniczone. Zwiększając ilość uranu (233 lub 235) lub plutonu-239 nieuchronnie powstaje problem szybkiego połączenia elementarnych mas w masę wielokrotnie przekraczającą masę krytyczną. Istotnie, jeśli takie połączenie nie nastąpi w sposób niemal natychmiastowy, reakcja łańcuchowa zacznie się niezależnie w różnych miejscach, w których została przekroczona masa krytyczna i wprawdzie nastąpi wybuch lecz tylko część materiału rozszczepialnego zostanie wykorzystana. W tej sytuacji zdano sobie sprawę, że zaprzęgnięcie reakcji syntezy jądrowej do maszyny wojennej stwarza możliwość tworzenia bomb, których rozmiary będą tylko limitowane przez możliwości uniknięcia skutków wybuchu przez stronę zrzucającą taką bombę. Jeśli tak, to podstawowymi problemami stają się wytworzenie odpowiednio wysokiej temperatury i utrzymanie jej przez czas niezbędny do wywołania reakcji syntezy wszystkich jąder przewidzianych do produkcji. Z naturalnych względów chodzi o syntezę najlżejszych jąder, gdyż dla wytworzenia cięższych wymagane jest pokonywanie wyższych barier kulombowskich, a więc i wyższych temperatur. Stąd też naturalnymi kandydatami do wywołania syntezy stają się izotopy wodoru. Ponieważ mamy trzy takie izotopy istnieje sześć możliwych do rozważenia reakcji, a mianowicie:



gdzie p, d i t oznaczają odpowiednio proton, deuteron i tryton. Jak się okazuje, pierwsze trzy reakcje przebiegają stosunkowo wolno, w czasach nie krótszych niż kilka setnych sekundy, a utrzymanie wysokiej temperatury w takim czasie jest trudne. Reakcja d+d przebiega szybciej – w czasie rzędu 10^{-5} s, dwie ostatnie reakcje zaś przebiegają w czasie jeszcze o rząd wielkości krótszym. Dla zbudowania bomby opartej na reakcji syntezy, zwanej *bombą wodorową*, potrzeba więc deuteru i trytu. O ile zdobycie tego pierwszego nie jest szczególnie trudne, gdyż w każdym kilogramie wody znajdujemy, jak już wspominaliśmy, 1/30 g deuteru, tryt, mimo jego stałej obecności w atmosferze⁷, trzeba wytworzyć. Z deuterem też nie jest tak zupełnie lekko, gdyż dla uzyskania odpowiednio wysokiej gęstości należałoby go skroplić. Z kolei trudno sobie wyobrazić urządzenia kriogeniczne zamontowane w bombie. Na szczęście mamy deuterok litu (LiD), który jest ciałem stałym. W wyniku reakcji neutronów z ${}^6\text{Li}$ tworzy się tryt i ${}^4\text{He}$. To z kolei nasuwa pomysł, aby wykorzystać „klasyczną” bombę atomową jako źródło neutronów, które z kolei tworzyłyby tryt w reakcji z ${}^6\text{Li}$, a ten wraz z deuterem mógłby być wykorzystany do reakcji syntezy jądrowej.

Aby ocenić potrzebną masę produktów wyjściowych zauważmy, że z 1 kg ${}^{235}\text{U}$ możemy otrzymać (przy całkowitym rozszczepieniu!) około $3,7 \cdot 10^{24}$ neutronów (liczba ta wzrasta do ok. $4,8 \cdot 10^{24}$ w wypadku rozszczepienia 1 kg ${}^{239}\text{Pu}$). W wypadku 1 kg związku ${}^6\text{LiD}$ mamy $75 \cdot 10^{24}$ atomów litu i tyleż deuteru. Jeśli wszystkie izotopy litu miałyby być przekształcone na tryt i hel, potrzebowalibyśmy rozszczepić (75/3,7), a więc ok. 20 kg ${}^{235}\text{U}$ lub (75/4,8), tj. ok. 16 kg ${}^{239}\text{Pu}$. W istocie rzeczy potrzebujemy znacznie mniej, gdyż neutrony tworzone są także w trakcie reakcji deuteronu z trytonem oraz trytonu z trytonem:



Wynika stąd, że każdy zużyty do syntezy tryton produkuje jeden neutron, a to oznacza, że liczba neutronów w układzie nie zmienia się, gdyż każdy neutron produkuje tryton, a z każdego trytonu pojawia się w wyniku reakcji syntezy ($\text{d} + \text{t} \rightarrow \alpha + \text{n}$) jeden neutron. Oznacza to, że przemianie ulegnie cały ${}^6\text{Li}$, jaki mielibyśmy do dyspozycji. Produktem końcowym, „popiołem” pozostanie ${}^4\text{He}$ oraz początkowa liczba neutronów.

⁷ Tryt w atmosferze tworzy się w reakcji protonów z atomami azotu. Pomimo faktu, że tryt jest nietrwały i rozpada się z okresem połowicznego zaniku rzędu 12 lat, jest on stale uzupełniany dzięki ww. reakcji. W sumie jest go jednak niewiele, rzędu 1 kg w całej atmosferze ziemskiej.

Ponieważ neutrony rozszczepieniowe są neutronami prędkimi, a takie uzyskujemy też w trakcie syntezy, możemy je wykorzystać do rozwinięcia reakcji łańcuchowej w ^{238}U . Można więc zbudować bombę o następującym schemacie logicznym: bomba atomowa (uranowa lub plutonowa), wykorzystywana w charakterze detonatora, otoczona jest płaszczem z ^6LiD , ten zaś płaszczem z uranu. W rezultacie istnienia płaszcza uranowego zostanie znakomicie zwiększony strumień wysokoenergetycznych neutronów powstających w wybuchu. Bomba pracująca na takiej zasadzie będzie miała wielką siłę rażenia i spowoduje silne skażenie terenu promieniotwórczymi fragmentami rozszczepienia. Powyższy, prosty z pozoru pomysł na zbudowanie bomby wodorowej w praktyce nie jest łatwy. Techniczne rozwiązanie znane jest – od nazwisk pomysłodawców, patrz rys. 7.18 – konfiguracją Tellera – Ulama.



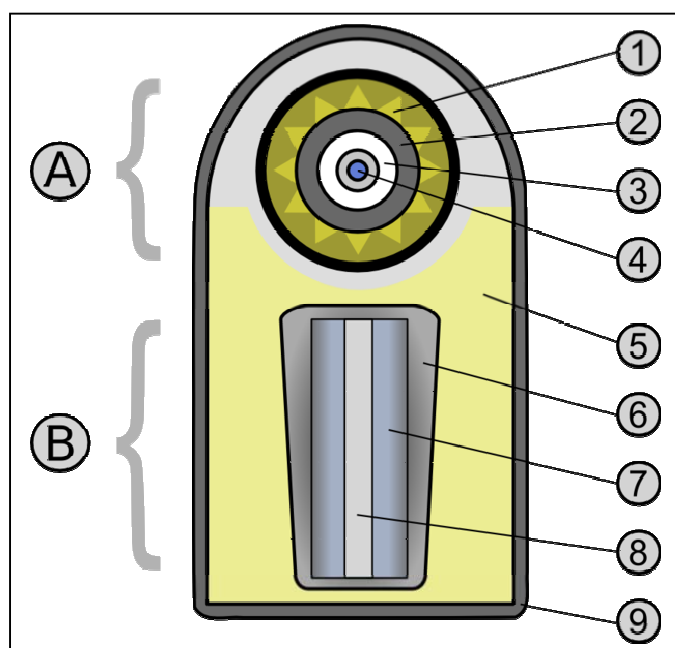
Rys. 7.18 Edward Teller (zdjęcie z 1958 r.) i Stanisław Ulam (zdjęcie z 1950 r.)

Konfiguracja Tellera-Ulama, zwana też dwustopniową implozją radiacyjną (ang. - *staged radiation implosion*) nie jest jedynym możliwym schematem technicznym bomby wodorowej, jest jednak schematem najpowszechniej stosowanym. Korzysta on z reakcji deuteru z trytem⁸. Punktem wyjściowym jest stwierdzenie faktu, że w wysokich temperaturach podczas

⁸ reakcja deuteru z deuterem była wykorzystana przynajmniej raz w pierwszym teście, w którym wykorzystano reakcję syntezy jądrowej - Ivy Mike 1 listopada 1952 r. na atolu Enewetak

wybuchu konwencjonalnej bomby atomowej większość pojawiającej się energii (ok. 80%) to energia miękkiego promieniowania rentgenowskiego, a nie energia kinetyczna. Ta energia (ciśnienie) promieniowania może być użyta do ściśnięcia i zapłonu (w drugim stopniu) paliwa dla syntezy wcześniej niż rozszerzający się zapalnik (bomba atomowa) w sposób wybuchowy przerwie proces. Na rysunku 7.19 pokazujemy schemat Tellera-Ulama⁹.

Bomba ma w przybliżeniu kształt cylindryczny. Na jednym jej końcu jest zapalnik (pierwszy człon bomby). Paliwo termojądrowe (${}^6\text{LiD}$) ma kształt cylindra lub elipsoidy wewnątrz popychacza – warstwy bardzo gęstego materiału („płaszcz” z uranu lub wolframu). Wewnątrz znajduje się pręt o średnicy ok. 2-3 cm wykonany z ${}^{239}\text{Pu}$ lub ${}^{235}\text{U}$. Wnętrze całości wyłożone jest pianką lub plastikiem. Pierwszy człon jest oddzielony od ładunku paliwowego grubą warstwą gęstego materiału, a więc znów uranu lub wolframu.



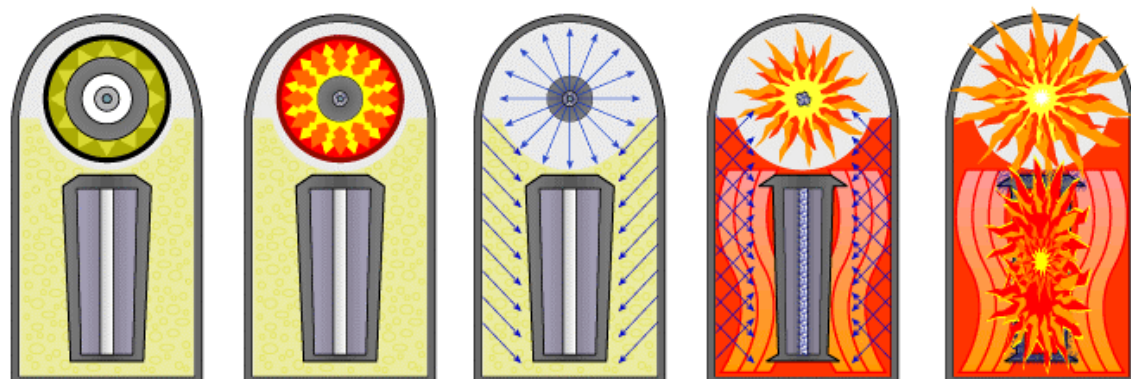
Rys. 7.19 Konfiguracja Tellera-Ulama. *A – oznacza pierwszy, a B – drugi człon bomby. 1 – soczewki materiału detonatora, 2 – płaszczy z ${}^{238}\text{U}$, 3 – pustka, 4 – tryt gazowy w wydrążonym rdzeniu z ${}^{239}\text{Pu}/{}^{238}\text{U}$, 5 – pianka polistyrenowa, 6 – płaszczy z ${}^{238}\text{U}$ (popychacz), 7 – ${}^6\text{LiD}$, 8 – pluton (zapalnik), 9 – Kadłub bomby*

Rys. 7.20 pokazuje schemat wybuchu bomby wodorowej działającej w oparciu o mechanizm Tellera-Ulama, a przynajmniej jedno z możliwych wyjaśnień tego mechanizmu. Podczas eksplozji pierwszego członu, promieniowanie X wypełnia całe wnętrze układu, stanowiące

⁹ Rysunki 7.19 i 7.20 wzięte ze stron Wikipedii Commons

coś w rodzaju kanału dla promieniowania¹⁰. Materiał pianki, a więc pewna mieszanina węgla i wodoru, zostaje całkowicie zjonizowany (staje się gorącą plazmą wywierającą ciśnienie na popychacz w drugim członie) i przezroczysty dla promieniowania rentgenowskiego. Wnętrze bomby i zewnętrzna warstwa ładunku paliwowego (drugi człon bomby) nagrzewa się do wysokiej temperatury. Ściskany z obu stron deuterok litu poddawany jest silnej kompresji i nagrzewa się do wysokiej temperatury pozwalającej na zapłon - rozpoczęcie reakcji syntezy. W trakcie tych reakcji powstaje duży strumień neutronów, który z kolei naświetla popychacz z ^{238}U , w tym zaś zainicjowywane są reakcje rozszczepienia wnoszące ostatecznie około połowę całkowitej energii wybuchu.

Istnieje nie jedna teoria mechanizmu Tellera-Ulama. Na pewno wersja przedstawiona na rys. 7.21 jest równie sensowna, jak opisana wyżej. Według tej koncepcji, najistotniejszym jest mechanizm ablacji popychacza. Tu także mówi się o pięciu etapach działania bomby. Te etapy opisujemy kolejno w tekście pod rysunkiem.



1. Bomba przed wybuchem

2. Zapalniki w pierwszym stopniu uruchamiają ściskanie plutonowego rdzenia, który staje się nadkrytyczny

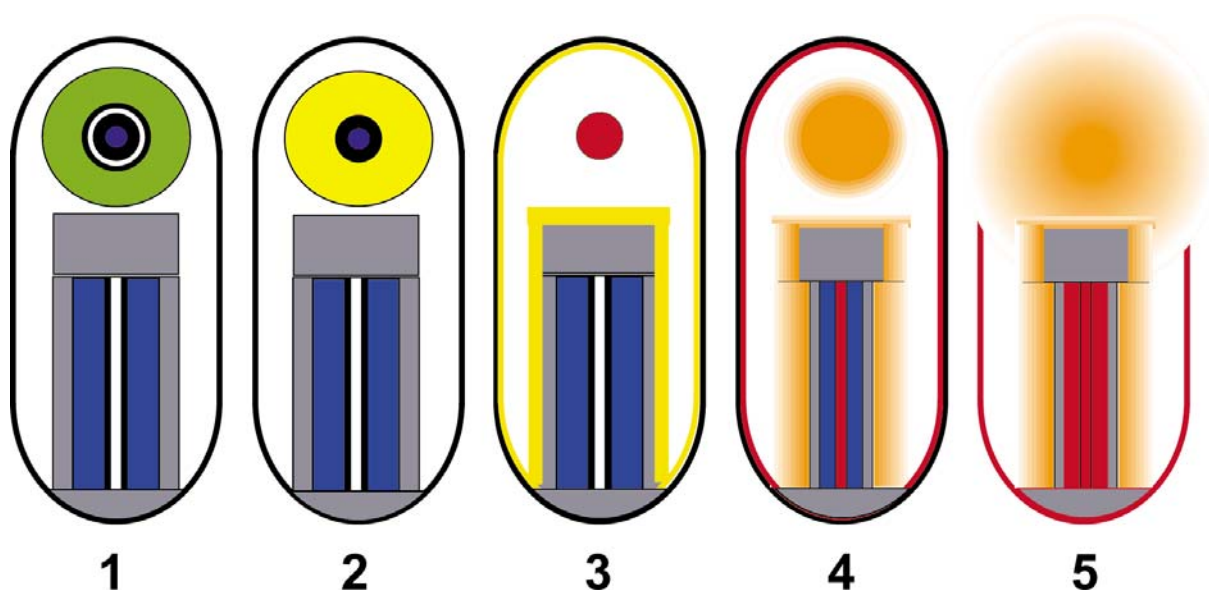
3. Rozszczepienie wywołuje emisję promieniowania X, które naświetla piankę polistyrenową

4. Pianka polistyrenowa staje się plazmą, która ściska drugi stopień i powoduje zapłon Pu - reakcje rozszczepienia

5. W ściśniętym i rozgrzanym ^6LiD zaczyna się synteza. Strumień neutronów inicjuje reakcje rozszczepienia w osłonie. Pojawia się kula ognia.

Rys. 7.20 Uproszczona sekwencja wybuchu bomby wodorowej

¹⁰ Jeśli w pierwszym stopniu znajdzie się trochę trytu gazowego, jak na rys. 7.19, gaz zostanie sprężony podczas eksplozji i zacznie w nim zachodzić reakcja syntezy. Neutrony, które powstaną w tych reakcjach będą inicjowały z kolei reakcje rozszczepienia w ^{239}Pu lub ^{238}U , znajdującym się w pierwszym stopniu bomby. Wykorzystanie paliwa termojądrowego dla podwyższenia wydajności reakcji rozszczepienia nosi angielską nazwę *boosting*. Bez wprowadzenia tego mechanizmu znaczna część paliwa rozszczepialnego nie zostaje wykorzystana dla wybuchu.



Rys. 7.21 Inna możliwa sekwencja zjawisk w mechanizmie Tellera-Ulama. Poszczególne fazy działania (1-5) opisane są w tekście.

Na powyższym rysunku widzimy kolejne etapy działania bomby. 1 – bomba przed wybuchem. 2 – Materiał wybuchowy w pierwszym członie bomby zostaje zdetonowany i powoduje wgniecenie materiału rozszczepialnego w pierwszym członie do wydrążonego otworu (pustki). 3 – Reakcja rozszczepienia w pierwszym członie dobiegła końca. W członie tym panuje temperatura kilku milionów stopni i wysyła on wysokoenergetyczne promieniowanie rentgenowskie ogrzewające wnętrze bomby (kanału radiacyjnego). Oslona uranowa (lub wolframowa) pomiędzy dwoma członami układu nie pozwala na przedwczesne rozgrzanie się paliwa plazmowego. 4 – Materiał pierwszego członu wybucha i ulega rozszerzeniu, a silnie rozgrzana powierzchnia płaszcza z uranu (wolframu) powoduje rozszerzanie się materiału i jego ablację, ten proces zaś wyzwala przyspieszoną implozję. By była ona rozłożona równomiernie w całej objętości, wewnątrz muszą panować warunki równowagi termodynamicznej. Proces ablacji powoduje powstanie fali uderzeniowej (implozji) rozchodzącej się do wnętrza ładunku w drugim członie bomby. Z kolei ciśnienie wewnątrz plazmy wodorowo-węglovej powoduje cylindryczną (lub sferyczną) implozję kapsuły z paliwem plazmowym. W geometrii cylindrycznej kapsuła zostaje ściśnięta do 1/30 swej oryginalnej średnicy (do 1/10 w wypadku sferycznym), co prowadzi do ponad 1000-krotnego wzrostu gęstości. W istocie rzeczy siłę wybuchu regularnej bomby atomowej

wykorzystuje się do ściśnięcia kilku kilogramów paliwa. To, co jednak się dzieje, to przede wszystkim silne grzanie rdzenia (zapalnika) przez falę uderzeniową, gęstość materiału rozszczepialnego wzrasta zaś tylko około czterokrotnie. To jednakże wystarczy aby rdzeń stał się nadkrytyczny. W tym momencie zaczyna się również gwałtowna produkcja neutronów, podczas gdy reszta kapsuły podlega wciąż implozji i działa jak odpowiednik świecy zapłonowej w układzie zapłonowym samochodu. 5 – Proces ten powoduje z kolei podniesienie temperatury paliwa plazmowego (termojądrowego) do poziomu wystarczającego do rozpoczęcia reakcji syntezy jądrowej. Samopodtrzymująca się reakcja syntezy rozszerza się na zewnątrz, podczas gdy masywne otoczenie deuterku litu powstrzymuje generację ciepła na zewnątrz, co prowadzi do wzrostu temperatury (nawet do ok. 300 milionów K). Oczywiście w miarę wzrostu temperatury reakcje syntezy ulegają przyspieszeniu. W sumie reakcja ta zajmuje czas 20-40 nanosekund, gdyż później rozszerzający się układ powoduje zmniejszenie się gęstości i zanik reakcji.

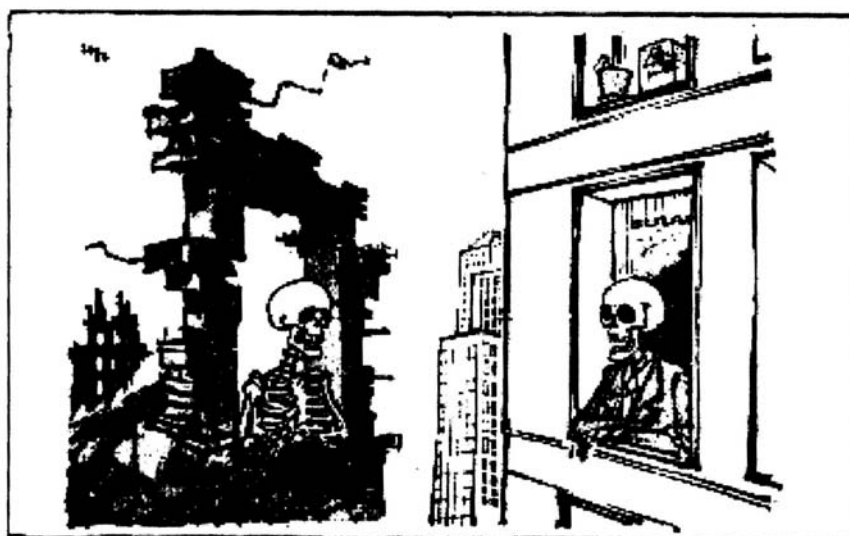
Imponująca jest moc wybuchu kapsuły. W największej dotychczas eksplozji wyemitowana energia sięgnęła 50 Mt TNT, tj. $2,1 \cdot 10^{17}$ J, co oznacza moc ok. $5,3 \cdot 10^{24}$ W. To więcej niż 1% całkowitej mocy promieniowania Słońca ($4,3 \cdot 10^{26}$ W)! Jeśli lit w LiD nie jest wyłącznie¹¹ izotopem ^6Li , w reakcji trytu z ^7Li tworzą się neutrony o energiach 2,45 MeV i 14,1 MeV, które indukują dodatkowe reakcje rozszczepienia w płaszczu uranowym (jeśli jest), a te mogą wnieść nawet do 85% całkowitej energii wybuchu (mówimy tu o bombach typu „rozszczipienie- synteza – rozszczepienie”). Liczba stopni w bombach tego typu może być większa niż dwa, gdyż eksplozja drugiego stopnia może służyć jako zapalnik dla jeszcze większego trzeciego stopnia itd. Wspomniane 50 Mt zostało osiągnięte podczas wybuchu bomby trzystopniowej.

Analogiem bomby wodorowej, tyle że w mniejszej skali, jest bomba neutronowa, uznawana przez niektórych za broń wręcz szlachetną, humanitarną. Za ojca tej bomby uważany jest Samuel Cohen, który już w 1958 r. przekonywał, że gdyby z bomby wodorowej usunąć uranową osłonę, a więc pozbawić tę bombę części rozszczepieniowej, to neutrony z syntezy jądrowej, mające z natury daleki zasięg, mogłyby niemal swobodnie przenikać nawet przez pancerze czołgów lub kilkumetrowe obwałowania ziemne.

¹¹ Jak się później okazało, można skonstruować bombę zawierającą naturalny lit

Wyzwalane w wybuchu wielkie strumienie neutronów stanowią śmiertelne zagrożenie dla życia, jednak ze względu na pochłanianie neutronów w atmosferze zasięg działania takiej bomby ogranicza się do kilkuset metrów. Z tego względu jest to raczej broń taktyczna, którą można wykorzystać np. przeciw załogom pojazdów opancerzonych (czołgów). Wybuch takiej bomby nie powoduje niszczenia budowli i infrastruktury miejskiej (np. wodociągów), a także poziom skażeń promieniotwórczych jest nieporównanie mniejszy, gdyż skażenia te ograniczone są co najwyżej do rozproszenia zaaktywowanych materiałów bomby. Właśnie z tego powodu bombę neutronową uznaje się za „czystą” i „humanitarną”. W zasadzie podział energii wybuchu jest następujący: 50% energii związanej jest z promieniowaniem jądrowym (neutrony, promieniowanie gamma), 30% z podmuchem oraz 20% z promieniowaniem cieplnym. Dla porównania przypomnijmy, że w wybuchu klasycznej bomby atomowej ok. 50% wyzwolonej energii, to energia podmuchu, 35% - promieniowania cieplnego i tylko 15% - promieniowania jądrowego. Zoptymalizowanie techniki wybuchu bomb neutronowych spowodowało, że można wyprodukować je o rozmiarach porównywalnych z rozmiarami piłki bejsbolowej. Takie bomby można więc łatwo przenosić przy użyciu małych rakiet, mogą także być wystrzeliwane z dział artyleryjskich. Ich moc wybuchu jest ograniczona na ogół do kilku kiloton TNT.

Przedstawione niżej rysunki satyryczne dotyczące bomby neutronowej śmieszą, ale i zatrważają. W konstrukcji najwymyślniejszych rodzajów broni biorą udział znakomici fizycy i technicy, którzy znajdują tysiące argumentów usprawiedliwiających ich zaangażowanie w produkcji narzędzi służących do zabijania ludzi. Dzieje się tak w czasie pokoju, kiedy to nie można posługiwać się np. argumentem o konieczności szybkiego wyeliminowania agresora. Mówienie o humanitaryzmie jakiegokolwiek broni jest bardzo poważnym nadużyciem. Mam wielką nadzieję, że żaden z moich studentów nigdy nie odda swego talentu na rzecz rozwoju najbardziej niehumanitarnego przemysłu, jakim jest przemysł zbrojeniowy.



Czy uważasz, że bomba neutronowa jest bardziej humanitarna?

Horst Heitzinger, *Nordwest Zeitung*

