

Metody i Techniki Jądrowe w Środowisku,  
Przemysle i Medycynie rok akademicki 2009/2010

# INERCYJNA SYNTEZA TERMOJĄDROWA

**Wojciech Kossakowski**

praca zaliczeniowa  
prowadzący przedmiot:  
*prof. dr hab. Jan Pluta*

Politechnika Warszawska  
Wydział Fizyki  
fizyka techniczna  
optoelektronika



WARSZAWA 2009

*Składam serdecznie podziękowania  
Panu mgr inż. Włodzimierzowi Stępniewskiemu (IFPiLM)  
za udostępnienie swojej bogatej biblioteki naukowej*

## Spis treści

<b>WSTĘP</b> .....	<b>4</b>
1.1. SYNTEZA TERMOJĄDROWA .....	5
1.2. WARUNKI WYSTĄPIENIA SYNTEZY .....	6
1.3. PLAZMA - CZWARTY STAN MATERII .....	8
1.4. PIERWIASTKI LEKKIE - TYPOWE REAKCJE .....	10
1.5. KIERUNKI BADAWCZE .....	11
<b>METODY INERCYJNE</b> .....	<b>12</b>
2.1. NIF .....	15
2.2. HIPER .....	19
2.3. MASZYNA Z .....	22
<b>NIEKONTROLOWANA FUZJA</b> .....	<b>28</b>
3.1. BOMBA WODOROWA .....	29
3.2. BOMBA LITOWA - BOMBA FF I FFF .....	29
3.3. BOMBA NEUTRONOWA .....	30
3.4. BOMBA KOBALTOWA .....	30
<b>PODSUMOWANIE</b> .....	<b>31</b>
<b>BIBLIOGRAFIA</b> .....	<b>32</b>
4.1. POLSKOJĘZYCZNA .....	32
4.2. ANGLOJĘZYCZNA .....	32

## WSTĘP

Działalność człowieka zawsze determinowana była przez chęć zaspokojenia konkretnej potrzeby. Powiedzenie "potrzeba matką wynalazków" potwierdza tylko tę tezę. Nie inaczej jest w przypadku energetyki. Już od najdawniejszych czasów chęć ekspansji człowieka wymagała zapewnienia zasobów energetycznych. W zamierzczłych czasach przejawiało się to w opanowaniu umiejętności posługiwania się ogniem, a współcześnie poprzez korzystanie z energetyki węglowej czy elektrowni jądrowych jak np. budowana w Flamanville (Francja) o mocy 1,6 GW.

W obliczu dużej niechęci społecznej do klasycznej energetyki węglowej, spowodowanej głównie emisją tlenków siarki i węgla podczas procesu spalania, oraz wysoce niewystarczającej sprawności urządzeń wytwarzających energię z tzw. procesów "odnawialnych", zastosowanie energetyki jądrowej wydaje się być interesującym rozwiązaniem.

Jedynym procesem natury jądrowej, z którego człowiek potrafi w sposób kontrolowany i jednocześnie nie przynoszący strat czerpać energię jest rozszczepienie ciężkich jąder. Niestety reakcje rozpadu wykorzystywane przez ludzkość generują tzw. "odpady promieniotwórcze" są to produkty reakcji rozpadu, które nie nadają się do celów energetycznych, a jednocześnie są wysoce promieniotwórcze. Dodatkową wadą stosowania tej metody jest niska dostępność paliwa jądrowego, która jest uwarunkowana przez położenie i relacje dyplomatyczne danego państwa z krajami posiadającymi takie złoża.

W obliczu szeregu problemów przy produkcji tzw. "energii atomowej" interesująca wydaje się być koncepcja stojąca niejako w opozycji do rozpadu czyli synteza lekkich jąder.

Ilość, a w szczególności sposób wytwarzania przez dane państwo energii jest wskaźnikiem jego zamożności i zaawansowania technologicznego. Nakłady na rozwój energetyki termojądrowej sięgają miliardów dolarów i mogą sobie na nie pozwolić tylko państwa uznane za "mocarstwa" lub stowarzyszenia wielu państw jak przy projekcie ITER.

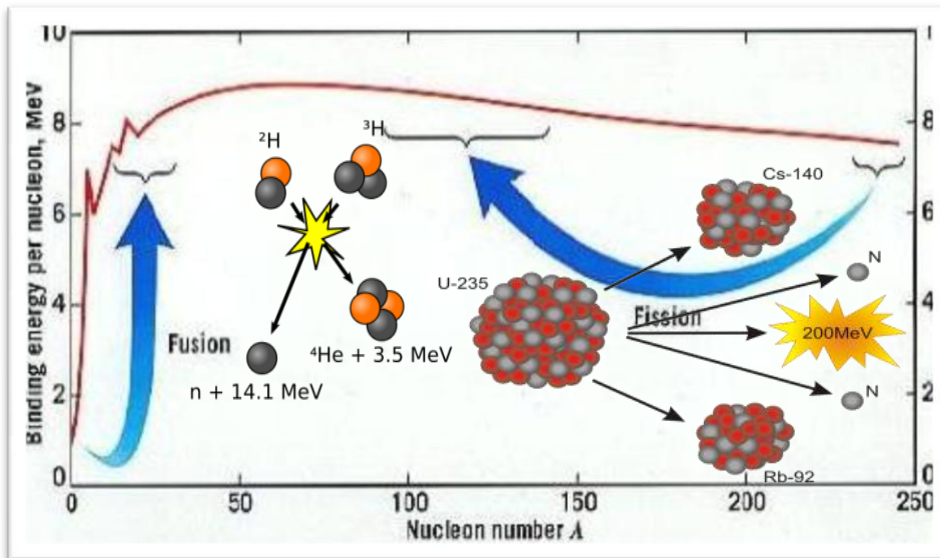
Energia to nie tylko elektryczność dostarczana do naszych domów, energia to również siła w rozumieniu militarnym. Mam na myśli nie tylko napęd do pojazdów morskich i lądowych oraz statków kosmicznych, ale również różnego rodzaju środków zagłady - np. bomby. Zastosowanie bomby atomowej przez USA niemal od razu zakończyło wojnę z Japonią. Do dnia dzisiejszego tylko nieliczne państwa mogą się poszczycić potencjałem nuklearnym, który chyba można kontrowersyjnie nazwać gwarantem bezpieczeństwa w czasie "zimnej wojny".

Niniejsza praca traktuje o inercyjnej syntezie termojądrowej. Na początku opiszę warunki, w jakich zachodzi synteza lekkich jąder. W dalszej części szerzej przedstawię syntezę przeprowadzoną za pomocą lasera dużej mocy. Następnie przedstawię niekontrolowaną syntezę zastosowaną w typowych bombach termojądrowych detonowanych w latach 50.

W niektórych miejscach pracy będę używał nomenklatury angielskiej jest to spowodowane tym, że często brakuje właściwego określenia w języku polskim. Niestety współcześnie obok matematyki językiem fizyki jest również język angielski.

## 1.1. Synteza termojądrowa

Jednym z najpopularniejszych wykresów z fizyki jądrowej obok ścieżki stabilności jest wykres energii wiązania na nukleon dla jąder różnych pierwiastków.



Rysunek 1.1 - energia wiązania<sup>[\*\*]</sup>

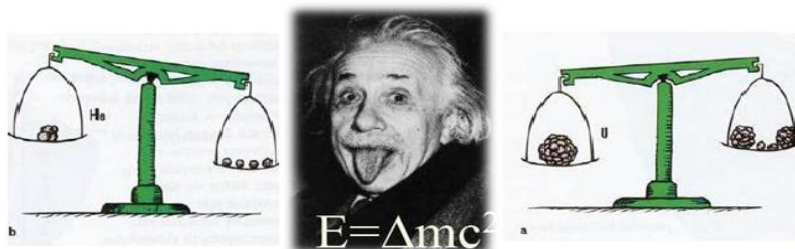
Sens fizyczny energii wiązania jądra (protonów i neutronów) to praca jaką należałoby wykonać przy "rozkładzie" jądra na pojedyncze nukleony. Liczbowo energia wiązania jest równa tzw. deficytowi masy czyli różnicy masy pomnożonej przez kwadrat prędkości światła, między sumą składników jądra a jądrem.

$$E_w = \Delta M c^2 = (Z \cdot m_p + N \cdot m_n - M_j) c^2$$

gdzie  $M_j$  - masa jądra,  $m_{p/n}$  - masa spoczynkowa protonu/neutronu, Z/N - ilość protonów/neutronów w jądrze.

### Tajemnica zaniku masy

Energia wiązania jądra jest to również energia, która wyzwala się kiedy cząstki łączą się ze sobą. Synteza protonu i neutronu daje jądro deuteru. Masy składników wynoszą odpowiednio:  $m_p=1,007276$  u,  $m_n=1,008665$  u zaś deuter (deuteron) ma masę  $2,013553$  u.  $1,00728+1,00866=2,01594 \neq 2,013553$ . Różnica mas tj.  $0,002388$  u ( $2,224\text{MeV}$ ) jest więc energią wiązania jądra deuteru.



Rysunek 1.2 - deficyt masy

Największa energia wiązania na jeden nukleon przypada na żelazo, z czego wynika, że jest to najbardziej stabilne jądro w przyrodzie.

Mówiąc o syntezie mamy na myśli łączenie lekkich jąder pierwiastków ze sobą. Jako produkt reakcji otrzymujemy cięższe jądro oraz energię kinetyczną produktów. Możliwa jest również synteza cięższych jąder, są to jednak reakcje endoenergetyczne i nie będą omawiane w niniejszym opracowaniu.

### "Ciężka" nukleosynteza

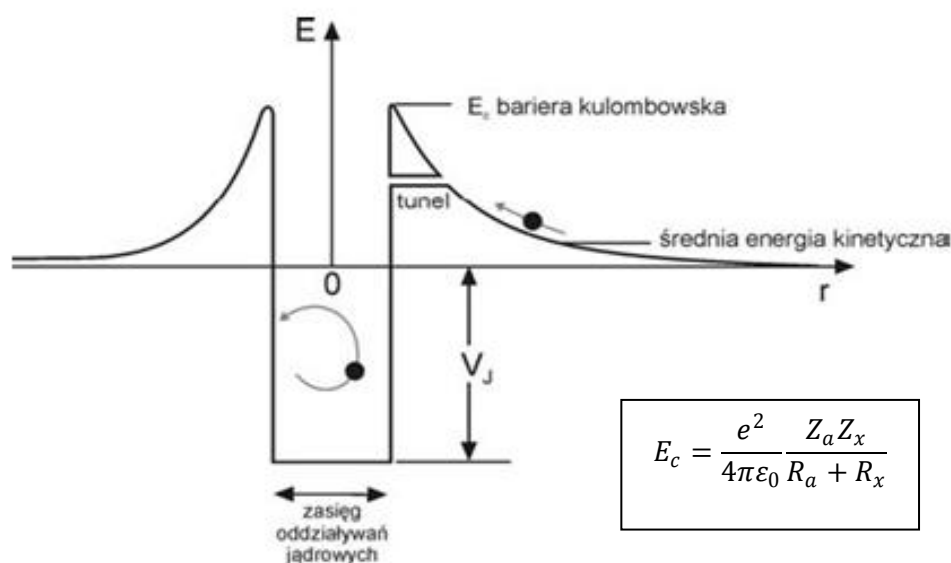
*Synteza cięższych jąder jest procesem energochłonnym i bardzo chaotycznym, polega na wychwycie cząstek i eksplozji. Są trzy typy wychwytywania. Dwa to wychwyty neutronów (procesy r i s) jeden to wychwyt protonu (proces p).*

Siły jądrowe wiążące jądro mają charakter krótkozasięgowy. Zbliżając do siebie dwa jądra musimy pokonać odpychającą siłę kulombowską między protonami wchodzącymi w skład jąder. Warunkiem koniecznym zajścia syntezy jest więc odpowiednio duża prędkość składników reakcji. Dużą prędkość cząstek można uzyskać na dwa sposoby. Przyspieszając cząsteczki w akceleratorze lub przeprowadzając reakcję w bardzo wysokiej temperaturze. Przedrostek "termo" oznacza reakcje syntezy powstałe przez podgrzanie składników reakcji. W dalszej części opracowania pisząc synteza lub fuzja jądrowa będę miał zawsze na myśli reakcję typu termojądrowego (zderzenie cząstek w akceleratorach nie jest tematem niniejszego opracowania). Przyspieszanie lekkich cząstek jest stosunkowo łatwe jednakże energia potrzebna do pracy akceleratora znacznie przewyższałaby energię, którą uzyskalibyśmy z reakcji syntezy. Dlatego też należy wykorzystać inne podejście: duża energia kinetyczna cząstek reagujących musi pochodzić z energii termicznej gazu.

## 1.2. Warunki wystąpienia syntezy [9]

Aby zaszła fuzja musi dojść do zbliżenia protonów na odległość rzędu  $10^{-15}$  m. Przy takiej odległości krótkozasięgowo siły jądrowe przeważają nad kulombowskimi ( $F \sim 1/r^2$ ), mówimy, że protony muszą pokonać barierę kulombowską.

Sytuacja fizyczna ma prostą interpretację graficzną we współrzędnych odległość-energia.



Rysunek 1.3 bariera potencjału [9]

Wielkość  $r$  oznacza odległość jednego protonu od drugiego. Po przekroczeniu odległości  $r_c$  protony znajdują się w zasięgu sił jądrowych i są przyciągane. Głębokość jamy nazywana jest energią fuzji. Wysokość bariery kulombowskiej dla reakcji p+p wynosi  $0,55 \text{ MeV}$ . Jak widać na rysunku możliwy jest również efekt tunelowania, czyli zajścia fuzji protonów, gdy nie była osiągnięta energia równa barierze kulombowskiej. Fakt tunelowania jest niezwykle pomocy przy realizacji fuzji.

W przypadku reakcji termojądrowych czynnikiem decydującym o zajściu reakcji jest temperatura. Prawdopodobieństwo zajścia fuzji jest iloczynem dwóch prawdopodobieństw: prawdopodobieństwa przeniknięcia protonu przez barierę  $P(E)$  i prawdopodobieństwa tego, że proton będzie miał energię  $E$ .

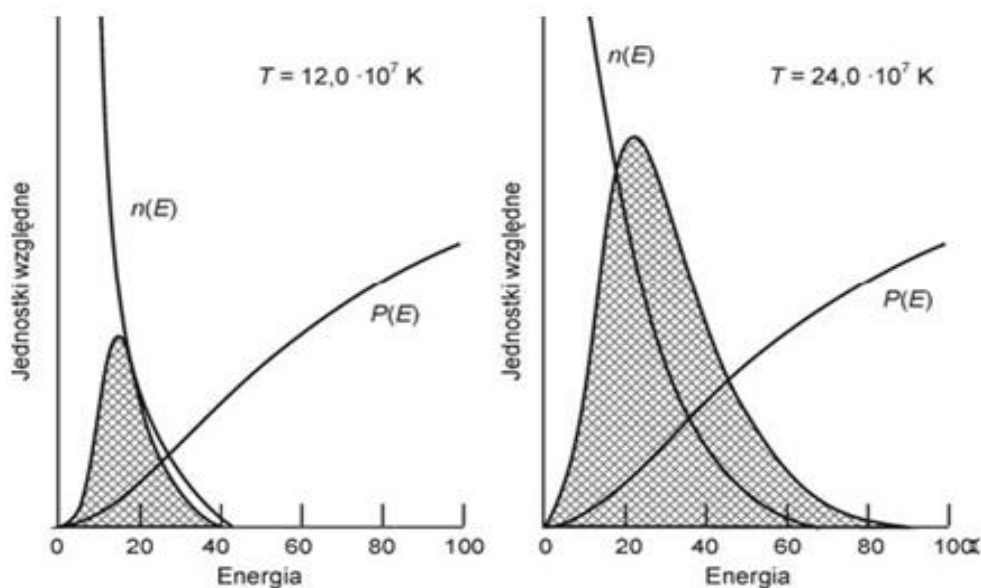
Prawdopodobieństwo tunelowania jest określone przez wzór Gamowa i Energię Gamowa  $E_G$ .

$$P(E) = \exp\left(-\sqrt{\frac{E_G}{E}}\right)$$

Rozkład energii cząstek gazu doskonałego opisuje rozkład Maxwella-Boltzmann.

$$n(E_k) = 4 \sqrt{\left(\frac{m}{2\pi kT}\right)} \left(\frac{E_k}{kT}\right) \exp\left(-\frac{E_k}{kT}\right)$$

Poniżej przedstawione są wykresy w funkcji energii dla dwóch różnych temperatur, obszar zakreskowany określa prawdopodobieństwo zajścia fuzji.



Rysunek 1.4 prawdopodobieństwo zajścia reakcji p+p<sup>[9]</sup>

Jak widać prawdopodobieństwo zajścia fuzji silnie zależy od temperatury.

Uzyskanie wysokiej temperatury jest tylko warunkiem koniecznym zajścia fuzji. Zapewniając wysoką temperaturę uzyskamy tylko plazmę. Chcąc uzyskać syntezę zdolną do samopotrzymania się (ang. **ignition**) musimy zapewnić dodatkowe warunki: wystarczającą gęstość cząstek i odpowiednio długi czas utrzymania ich w odpowiedniej temperaturze. Kryterium uwzględniające wszystkie trzy czynniki

jest nazywane iloczynem podwójmy lub, od nazwiska twórcy, kryterium Lawsona. Dla plazmy deuterowo-trytowej warunek ten na postać:

$$n \cdot T \cdot \tau > 5 \cdot 10^{21} [keV \cdot s \cdot m^{-3}]$$

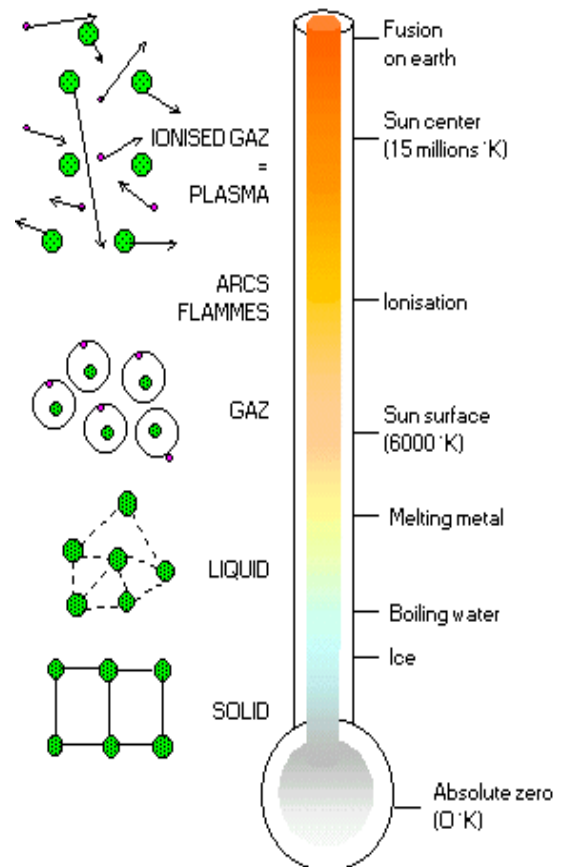
Czasem kryterium to podaje się jako iloczyn tylko czasu i gęstości (dla d+t:  $n \cdot \tau > 10^{14} [s \cdot m^{-3}]$ ). Należy zaznaczyć, że dla dowolnej reakcji syntezy kryterium Lawsona będzie spełnione dla innej wartości iloczynu podwójnego/zwykłego.

### 1.3. Plazma - czwarty stan materii

Należy podkreślić, że warunki, w jakich zachodzi synteza termojądrowa są tak ekstremalne (szczególnie temperatura), że używany do reakcji gaz jest całkowicie zjonizowany. Gaz taki nazywany jest plazmą (wysokotemperaturową). Jest to nowy stan materii - plazma często nazywana jest czwartym stanem materii (Irvingowi Langmuirowi w 1928). Wynika to z prostej analogii. Nieustannie podgrzewając materię możemy zaobserwować następujące przejścia fazowe: siało stałe-ciecz, ciecz-gaz i gaz-plazma.

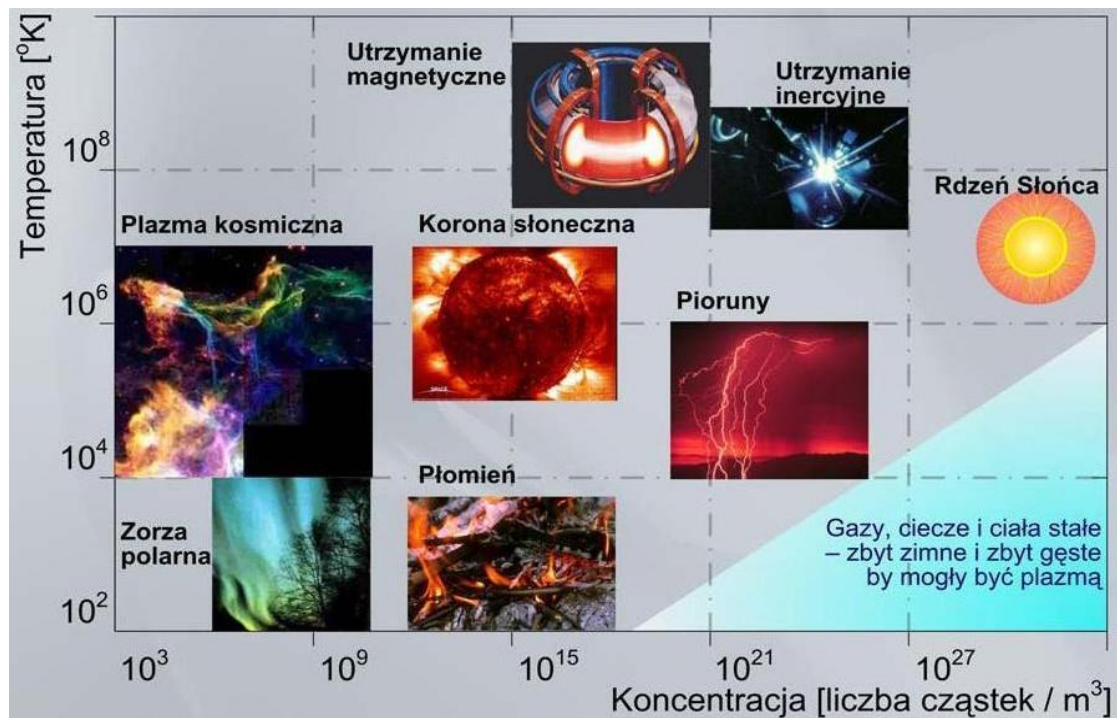
Fizyka plazmy jest odrębną gałęzią fizyki. Do opisu dynamiki plazmy (wysokotemperaturowej) używa się praw hydrodynamiki, a dokładniej magneto hydrodynamiki. Modele numeryczne symulujące zachowanie się plazmy są bardzo skomplikowane i wymagają użycia tzw. "superkomputerów" do obliczeń.

W zależności od gęstości i temperatury plazmy ma ona inne właściwości, a co za tym idzie używane są inne modele obliczeniowe (czym innym jest zjonizowany gaz w telewizorze plazmowym, a czym innym materia w reaktorze termojądrowym, a jeszcze czym innym tzw. plazma kwarkowo-gluonowa). Poniżej prezentuję wykres z zaznaczonymi różnymi rodzajami plazmy - wykres jest niepełny i schematyczny, ale daje ogólny pogląd jak szerokie jest pojęcie plazmy.



Rysunek 1.5 plazma 4. stan materii [1]





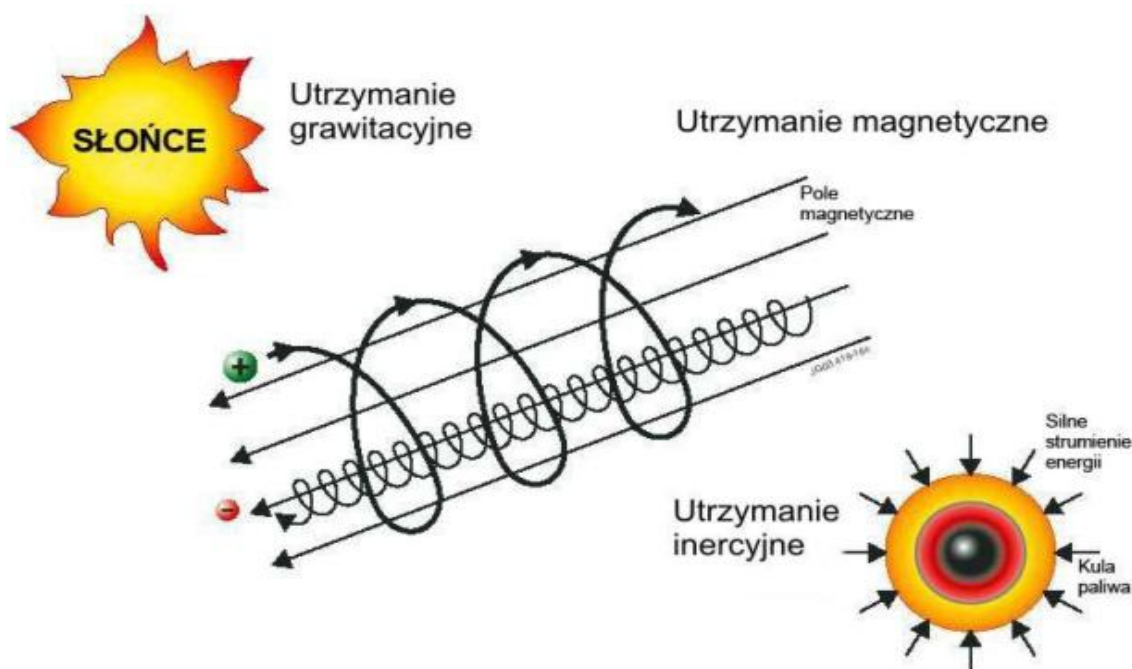
Rysunek 1.6 rodzaje plazmy

Z ciekawszych właściwości plazmy należy wspomnieć to, że wraz ze wzrostem prądu płynącego w niej spada opór plazmy. Plazma ma również bardzo wiele interesujących właściwości natury magnetycznej. Z racji tego, że składa się z naładowanych cząstek silnie oddziałuje z polami magnetycznymi i elektrycznymi.

Odrębnym problemem jest diagnostyka plazmy. Z powodu ekstremalnej temperatury wymaga się używania wyrafinowanych metod badawczych, które same w sobie mogą być tematem do dłuższego opracowania. Jako ciekawostkę warto zaznaczyć, że temperaturę plazmy podaje się zazwyczaj w elektronowoltach, a powszechnie stosowanym układem jednostek jest CGS.

Warto zwrócić uwagę na jeden interesujący fakt. W warunkach ziemskich plazma jest swego rodzaju osobliwością natomiast w całym Wszechświecie jest najbardziej rozpowszechnioną formą istnienia materii.

Fizyka plazmy jest bardzo szerokim tematem i niestety nie będzie szerzej omówiona w tym opracowaniu. Należy zaznaczyć, że plazma, z którą mamy do czynienia przy fuzji nie może fizycznie stykać się z żadnym materiałem. Jest to oczywiście spowodowane wysoką temperaturą. Zasadniczo istnieją trzy metody na wyizolowanie i utrzymanie takiej plazmy.



Rysunek 1.5 pułapkowanie plazmy [8]

Pierwszym jest grawitacja. Z takim przypadkiem mamy do czynienia na Słońcu. Ciśnienie grawitacyjne powoduje uzyskiwanie wysokiej temperatury. Drugim sposobem są różnego rodzaju pułapki magnetyczne. W tym przypadku źródłem ciepła jest zazwyczaj ciepło Jula dodatkowo plazma jest ściskana oraz izolowana zewnętrznym polem magnetycznym (siła Lorenza). Trzecim sposobem pułapkowania plazmy jest użycie sił inercji. Źródłem ciepła w tym przypadku jest bardzo często wiązka laserowa dlatego też zazwyczaj nazywa się tę metodę pułapkowaniem laserowym. Idea w skrócie sprowadza się do pogrzenia bezpośrednio paliwa jądrowego, bądź pośrednio po reemitowaniu promieniowania laserowego przez obudowę tarczy. Ogrzewana w ten sposób pastylka paliwowa na swojej powierzchni zaczyna odparowywać i zamieniać się w plazmę. Rozszerzająca się plazma tworzy falę uderzeniową ściskając paliwo jądrowe (implozja) - następuje synteza. Podobny mechanizm zastosowano w bombach termojądrowych. Tyle tylko, że w bombie siła ściskająca pochodzi z reakcji rozszczepienia, a sama reakcja syntezy ma charakter niekontrolowany.

#### 1.4. Pierwiastki lekkie - typowe reakcje [5]

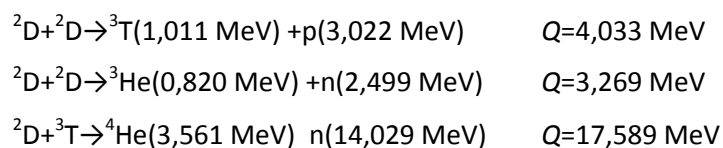
Typowymi reagentami reakcji fuzji termojądrowej są trzy pierwiastki: wodór, hel i lit.

Wodór występuje w postaci trzech izotopów. Zwykłego wodoru  $^1\text{H}$ , deuteru D lub  $^2\text{H}$  (deuteron składa się z protonu i neutronu) oraz trytu T lub  $^3\text{H}$  (tryton składa się z dwóch protonów i neutronu). Zwykły wodór jest najbardziej powszechnym pierwiastkiem w przyrodzie. Deuter (składnik tzw. "ciężkiej wody"  $\text{D}_2\text{O}$ ) występuje wraz z wodorem w ilości 0,016%. Występowanie trytu jest znikome i wynosi jak  $1:10^{18}$ .

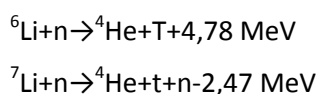
Hel występuje w dwóch odmianach. Zwykły hel  $^4\text{He}$ , którego jądro nazywane jest cząstką  $\alpha$  (dwa protony i dwa neutrony) oraz  $^3\text{He}$  (dwa protony i jeden neutron w jądrze), który występuje w naturalnym helu w proporcji  $1:10^3$ .

Lit również ma dwa izotopy są to  $^6\text{Li}$  oraz  $^7\text{Li}$ , bardziej rozpowszechnionym jest  $^7\text{Li}$ , którego jest 93% w licie naturalnym.

Ilość zachodzących reakcji syntezy jest bardzo duża. Ja wypiszę te, które mają duże przekroje czynne, a więc są łatwiejsze do przeprowadzenia.



Reakcje te są dobrze znane fizykom i często wykorzystywane do produkcji neutronów prędkich. Dwie pierwsze mają podobne prawdopodobieństwo zajścia. Reakcja z trytem jest najłatwiejsza do przeprowadzenia. Problemem jest zdobycie trytu, który rzadko występuje w przyrodzie (ulega szybkiemu rozpadowi) i jest droższy od deuteru. Dlatego też tryt należałoby produkować z reakcji litu z neutronem.



Hipotetyczny reaktor musi być nieustannie uzupełniany paliwem w celu zachowania odpowiedniej gęstości paliwa gdyż w czasie reakcji paliwo ulega nie tylko wypaleniu, ale również zanieczyszczeniu przez inne atomy np. Hel stanowiący swego rodzaju popiół.

## 1.5. Kierunki badawcze

Z trzech rodzajów pułapkowania plazmy pułapkowanie grawitacyjne z wiadomych względów nie jest możliwe do zrealizowania w warunkach ziemskich.

Układy laboratoryjne służące do pułapkowania magnetycznego to między innymi **tokamaki** (torusy) oraz **stellatory** (skomplikowane układy cewek magnetycznych). W tym miejscu należy wspomnieć o ogromnym eksperymencie przygotowywanym we Francji przez międzynarodową grupę badawczą nazywaną **ITER**. Ma być to największy tokamak służący jako "przedpole" do wybudowania elektrowni termojądrowej nazywanej roboczo **DEMO**. Pułapkowanie magnetyczne nie jest tematem niniejszego opracowania i nie będzie dalej omawiane. Należy jednak zaznaczyć, że pułpkowanie magnetyczne jest bardzo intensywnie rozwijane szczególnie w Europie. Najpopularniejszy działający obecnie tokamak to **JET** w Anglii.

Pułapkowanie inercyjne w zależności od sposobu ogrzewania (bezpośrednio, pośrednio, użycie lasera lub jonów itp.) może zostać zaprojektowane w najróżniejszych układach. W swojej pracy skupię się na kilku projektach badawczych. Dwa z nich będą to istniejące układy: **NIF** oraz **Maszyna Z**. Opiszę też idę projektu **HiPER**, który ma być budowany w Europie. Na zakończenie przedstawię też zasadę działania bomby wodorowej, która oprócz zastosowania militarne jest również interesująca ze względów naukowych. Wybór tych projektów jest głównie podyktowany tym, że są to najdroższe spośród wszystkich projektów o charakterze inercyjnym.

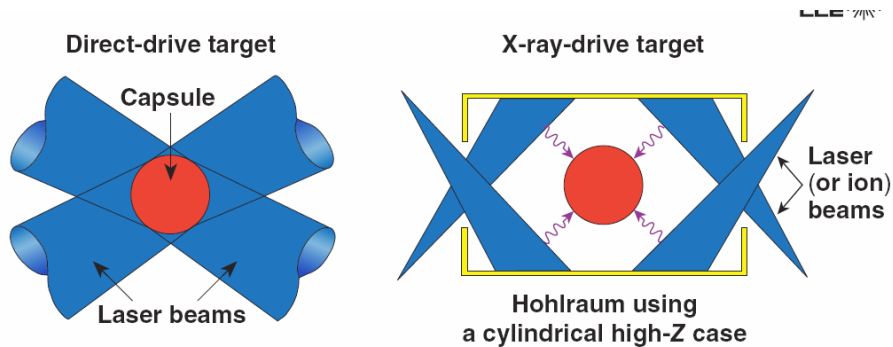
## METODY INERCYJNE [11]

W literaturze anglosaskiej metody inercyjne nazywa się w skrócie **ICF (Inertial Confinement Fusion)**. Zgodnie z kryterium Lawsona należy przy tej samej temperaturze: albo dostatecznie długo utrzymywać plazmę, albo dostatecznie mocno ją ścisnąć. Typowe czasy przy inercyjnej syntezie są bardzo krótkie ( $<10^{-10}$ s), co jest okupione koniecznością otrzymania wysokiej gęstości plazmy ( $>10^{25}$   $cm^{-3}$ ). Wszystkie układy wykorzystujące siłę inercji są typu impulsowego. Jest to jeden z zarzutów podnoszonych przez zwolenników pułapowania magnetycznego, które zazwyczaj jest ciągłe (**JET**, **ITER**). Odparciem tego zarzutu może być przykład silnika spalinowego, który działa na zasadzie mikrowybuchów. Po dokonaniu rozruchu silnika dalsza jego praca nie wymaga dostarczania energii z zewnątrz - podobna idea przyświeca twórcom układów impulsowych fuzji termojądrowej.

Paliwo jądrowe jest umieszczone w kapsule o kształcie sferycznej pastylki (ściskanie paliwa musi się wykonywać symetrycznie - dlatego całość ma kształt sfery). Środek jest wypełniony gazem trytowo-deuterowym ( $\leq 1mg/cm^3$ ). Zewnętrzna obudowa wykonana jest z materiału o dużej liczbie atomowej. W celu podgrzania kapsułki o średnicy 1 mm do temperatury 10 keV należy dostarczyć do jej obrzeży  $10^5$  J energii w czasie pikosekund. Dostarczona energia powoduje podgrzanie, jonizację i natychmiastowe parowanie zewnętrznej części kapsuły - taki proces nazywamy w skrócie ablacją.

Po wybuchu zewnętrznej części kapsuły środkowa część pastylki jest ściskana - następuje implozja w skutek, której osiągamy zapłon. Ważne jest aby proces kompresji odbywał się symetrycznie, adiabatycznie, a paliwo miało jak najniższą entropię. Fala uderzeniowa spręża paliwo do kilkuset gramów na  $cm^3$ . Następnie w skutek zajścia syntezy następuje eksplozja produktów reakcji. Głównym celem jest uzyskanie takich warunków, aby po fazie zapłonu wystarczyło dostarczenie paliwa, a reakcja będzie się samopodtrzymywać (tak jak silnik po rozruchu nie wymaga obecności rozrusznika) (tzw. **ignition**).

Zasadniczą różnicą między różnymi eksperymentami jest sposób dostarczenia energii do pastylki paliwowej. Źródłem energii może być laser, wiązka jonów oraz **pinch**. Kolejną różnicą może być to: czy źródło jest wykorzystywane bezpośrednio, czy pośrednio. W metodzie bezpośredniej użyte źródło bezpośrednio powoduje ablację zewnętrznej ścianki kulki paliwowej. W metodach pośrednich źródło energii powoduje emisję promieniowania X z materiału otaczającego paliwo jądrowe i to właśnie promieniowanie X jest odpowiedzialne za powstanie fali uderzeniowej. Zazwyczaj w przypadku pośredniego grzania pastylka paliwowa jest umieszczana w wydrążonym cylindrze (nazywanym **Hohlraum**) wykonanym z materiału o dużej liczbie atomowej. Mimo strat energetycznych pośrednie ściskanie ma dwie zasadnicze zalety: wymaga mniejszej jednorodności wiązek lasera oraz powoduje mniejsze niestabilności typu hydrodynamicznego.



Key physics issues are common to both

- Energy coupling
- Drive uniformity
- Hydrodynamic instabilities
- Compressibility

Rysunek 2.1 grzanie bezpośrednie i pośrednie<sup>[1]</sup>

Obecnie nie można mówić o wyższości jednej z metod nad pozostałymi. Ciężko jest jednoznacznie określić czy grzanie pośrednie, czy bezpośrednie będzie miało szersze zastosowanie oraz, które źródło (tzw. **driver**) jest efektywniejsze.

Oczywiście konstrukcja samych pastylek paliwowych (tzw. **targetów**) jest bardzo skomplikowana i różnorodna w zależności od **drivera**. Jednakże niezależnie czy grzanie jest pośrednie czy bezpośrednie zawsze występuje wewnątrz paliwowe i zewnętrzna warstwa ablatora (inne materiały absorbują promieniowanie X, a inne bezpośrednie promieniowanie np. lasera).

Niezależnie od wyboru sposobu ściskania paliwa w ośrodku pojawiają się niestabilności Rayleigh-Taylor. Jest to jeden z głównych problemów występujących przy uzyskiwaniu plazmy wysokotemperaturowej. Tego rodzaju niestabilności pojawiają się gdy gęsty materiał naciska na rzadszy (przykład oleju i wody). W eksperymentach **ICF** taki rodzaj niestabilności występuje w przypadku ściskania się plazmy zimnej i gorącej. Konsekwencją tego rodzaju niestabilności jest niepożądane ochłodzenie się plazmy. Okazuje się, że decydującym parametrem, przy unikaniu niestabilności plazmowych jest stosunek promienia całej pastylki do grubości warstwy zewnętrznej.

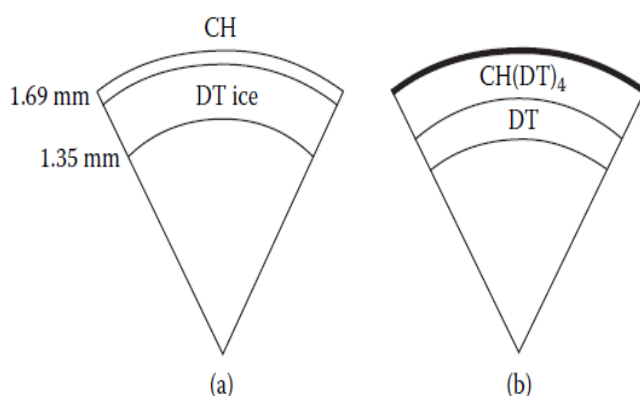


Figure 8.3. Schematic capsule design of direct-drive target design for NIF experiments: a) full DT-target; b) foam target.

Rysunek 2.2a pastylka paliwowa (NIF) - grzanie bezpośrednie<sup>[11]</sup>

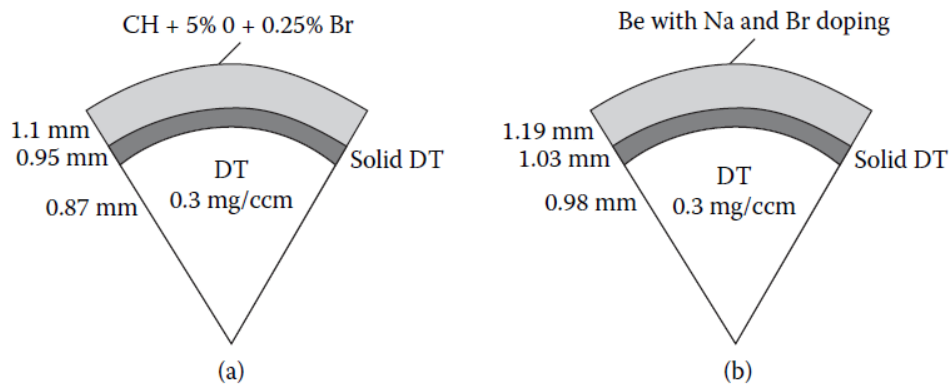


Figure 8.6. NIF capsule designs a) shows a CH-capsule designed for a 300 eV target, which absorbs 1.35 MJ energy; b) shows a beryllium capsule designed for a 250 eV target.

Rysunek 2.2b pastylka paliwowa (NIF) - grzanie pośrednie<sup>[11]</sup>

Często używanym parametrem w kontekście reakcji termojądrowych jest współczynnik wzmocnienia energii G. Jest to stosunek energii otrzymanej z fuzji do energii niezbędnej do jej przeprowadzenia.



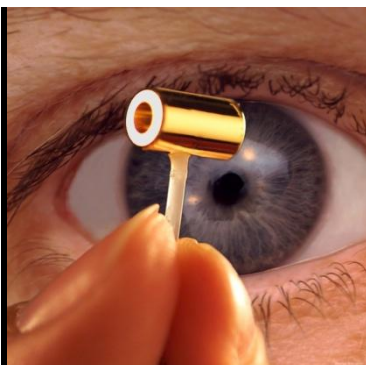
## 2.1. NIF<sup>[19]</sup>

Po około 50 latach od pierwszych badań mających doprowadzić do inercyjnej syntezy termojądrowej rozpoczyna się kolejny eksperyment z użyciem lasera o moc 1.8 MJ w impulsie. Pierwsze wyniki z National Ignition Facility (tam znajdują się ośrodek badawczy - Livermore, California) mają się pojawić w latach 2010-2011. Podobny laser budowany jest w Europie, a dokładniej we Francji w Bordeaux, i nazywa się Laser MegaJoule LMJ, jego uruchomienie planowane jest na lata 2012-2013.

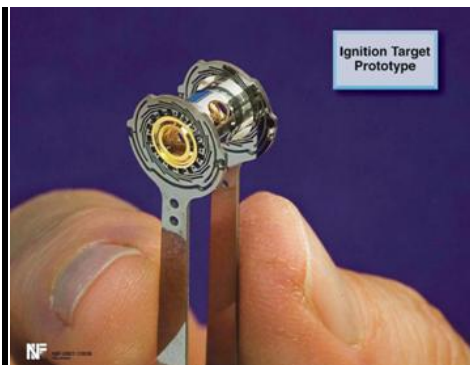
Początkowo chciano doprowadzić do sytuacji, w której całe paliwo osiąga wysoką gęstość po fazie ściskania. Koncepcję tą nazywa się **volume ignition** (zapłon zachodzi w całej objętości paliwa), szacuje się, że wymaga ona użycia lasera o mocy *60 MJ*, co na dzień dzisiejszy jest nieosiągalne (konstrukcja lasera dużej mocy jest jednym z głównych problemów technologicznych). Materiały, które są chłodniejsze łatwiej jest ścisnąć, co w połączeniu z faktem, że więcej energii potrzeba na ogrzanie niż na ściśnięcie paliwa spowodowało powstanie nowej koncepcji tzw **hot spot**.



Rysunek 2.3 pastylka paliwowa<sup>[20]</sup>



Rysunek 2.4 Hohlräum<sup>[20]</sup>

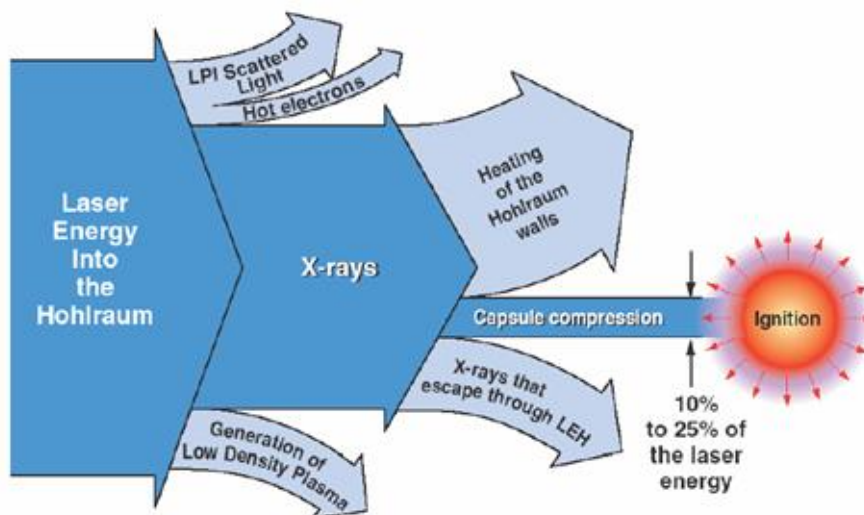


Rysunek 2.5 umocowanie<sup>[20]</sup>

Zasadniczą różnicą jest to, że paliwo w samym środku kapsułki jest znacznie rzadsze ( $100 \text{ g/cm}^3$ ) niż na zewnątrz ( $\geq 800 \text{ g/cm}^3$ ). W skutek ściskania w środku kapsuły osiągamy wyższą temperaturę ( $5-10 \text{ keV}$ ) niż na zewnątrz ( $1 \text{ keV}$ ). Zapłonowi podlega początkowo tylko środkowa część paliwa, która w przybliżeniu ma promień  $1 \mu\text{m}$  i czas życia na poziomie  $100-200 \text{ ps}$ . Następnie zapłon jądrowy propaguje się w stronę głównego paliwa. Transport energii ze środka odbywa się za pomocą cząstek alfa, elektronów i neutronów z reakcji syntezy. Cały proces (propagacja zapłonu) trwa około  $10 \text{ ps}$ .

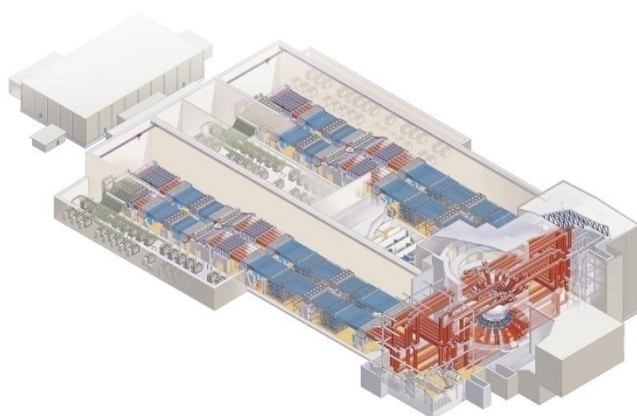
Jest kilka zalet stosowania metody **hot spot**. Przede wszystkim potrzebujemy podgrzać znacznie mniejszą ilość paliwa, a co za tym idzie można użyć słabszego lasera ( $1-2 \text{ MJ}$ ). Dodatkowo zewnętrzna warstwa paliwa stanowi swego rodzaju izolację układu.

Konieczność użycia silnego lasera przy reakcji fuzji wynika z tego, że z powodu wielu różnych procesów zachodzących podczas transportu promieniowania nie jest możliwe, aby całą energię wiązki lasera przekazać paliwu jądrowemu (również przy grzaniu bezpośrednim).

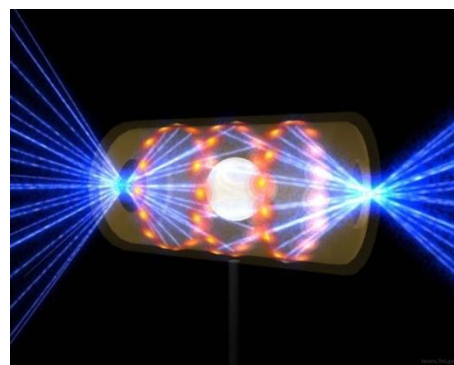


Rysunek 2.6 straty energetyczne<sup>[\*]</sup>

Instalacja NIF mieści się w dziesięciopiętrowych halach na powierzchni trzech boisk piłkarskich. Jej budowa trwała 12 lat, kosztowała blisko 5 mld dolarów amerykańskich.



Rysunek 2.7 budynek NIF<sup>[20]</sup>



Rysunek 2.8 symulacja wyładowania<sup>[20]</sup>

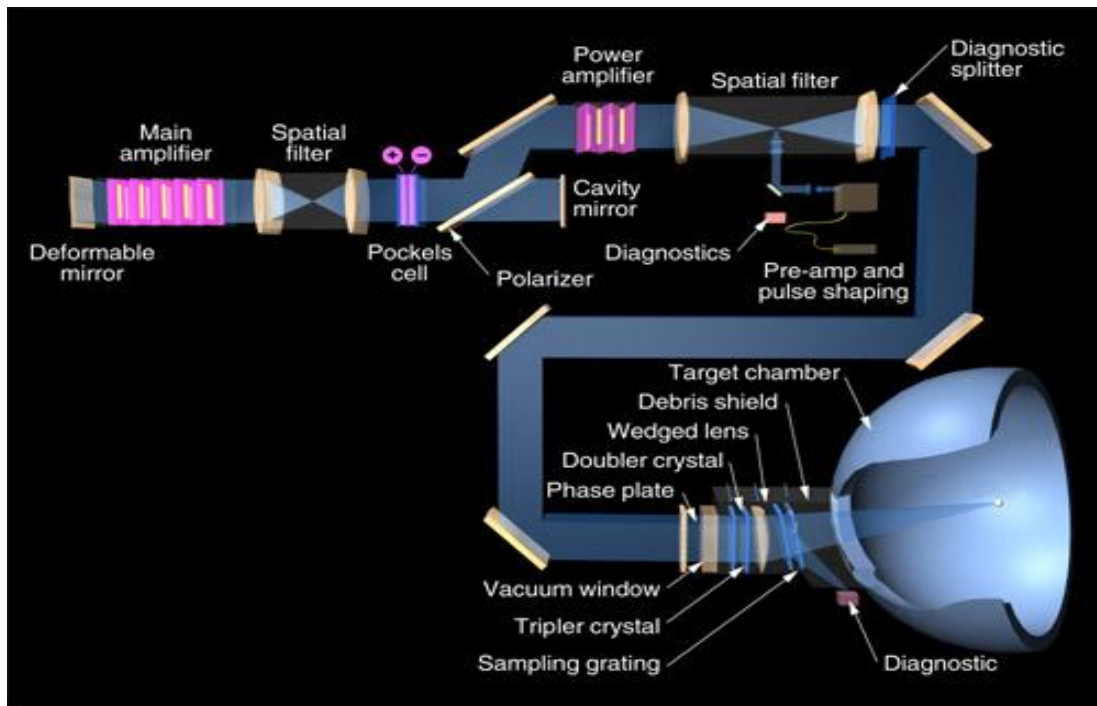
Niech o trudności całego eksperymentu świadczy to, że cały reaktor ma około 10 metrów średnicy, a **Hohlraum** ma średnicę 5-6 mm i 10 mm długości. Precyzja ustawienia ramienia trzymającego **Hohlraum** musi być poniżej 1 mm przy 10 metrach średnicy, a wszystko to z dokładnością pikosekundy w czasie!!!

Impuls pochodzi z jednego źródła, co zapewnia jednorodność wiązek. Początkowo impuls jest niskiej mocy, wygenerowany w laserze światłowodowym domieszkowanym iterbem (linia 1053 nm). Na rysunku jest to "**Pre-amp and puls shaping**". Następnie impuls jest dzielony na 48 wiązek (rysunek przedstawia bieg jednej z takich wiązek) i wzmacniany za pomocą szkieł neodymowych (pompowanie optyczne za pomocą fleszy ksenonowych - przechodzący impuls powoduje emisję wymuszoną).

Najpierw impuls przechodzi przez system przedwzmacniaczy (**power amplifier**), które wzmacniają go około miliarda razy. Następnie dzięki użyciu komórek pokelsa impuls cztery razy przechodzi przez główny wzmacniacz (**main amplifier**). Opuszczając główny wzmacniacz impuls ponownie zostanie "dowzmoconiony" przez przedwzmacniacz. Lampy ksenonowe w czasie procesu wzmocnienia używają 400 MJ energii elektrycznej.



W celu zachowania jednorodności wiązki jest przepuszczana również przez system filtrów przestrzennych. Światło od samego początku do celu przebywa drogę długości około 300 metrów.

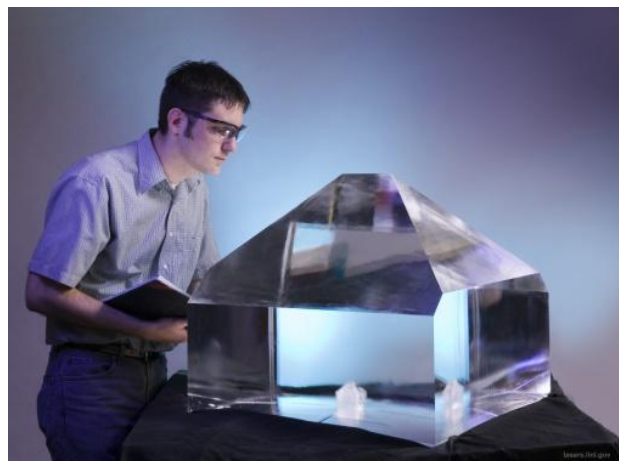


Rysunek 2.9 schemat biegu impulsu lasera<sup>[20]</sup>

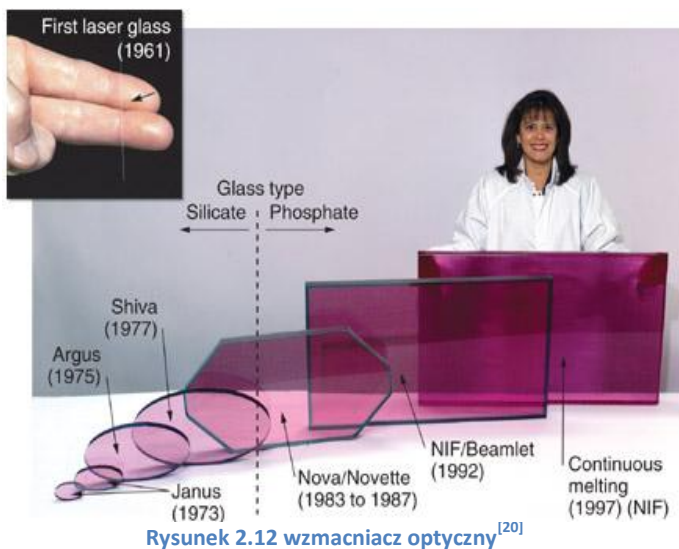
Pod koniec swej drogi wiązki ponownie są dzielone, tym razem na 192 wiązki. Należy zaznaczyć, że niektóre z wiązek mają różną drogę do celu, dlatego część z nich musi zostać spowolniona, tak aby droga optyczna była jednakowa dla wszystkich (precyzja uderzenia jeśli chodzi o czas jest poniżej pikosekundy). Na samym końcu dzięki użyciu kryształów nieliniowych (KDP) następuje generacja drugiej i trzeciej harmonicznej w skutek czego otrzymujemy ze światła podczerwonego ( $1053\text{ nm}$ ) światło ultrafioletowe ( $351\text{ nm}$ ). Proces konwersji częstotliwości powoduje około dwukrotny spadek mocy. Jednak jest on konieczny gdyż podczerwień słabiej podgrzewa paliwo jądrowe.



Rysunek 2.10 pompy optyczne<sup>[20]</sup>



Rysunek 2.11 kryształ KDP<sup>[20]</sup>



Rysunek 2.12 wzmacniacz optyczny<sup>[20]</sup>



Rysunek 2.13 kapsuła reaktora<sup>[20]</sup>

Należy podkreślić, że praktycznie każdy element, przez który przechodzi wiązka może być ciekawym tematem do oddzielnej analizy. Przy konstrukcji **NIFu** praktycznie wiedza z każdej dziedziny fizyki była wykorzystywana (wyhodowanie dużych kryształów KDP, budowa ogromnych soczewek dla podczerwieni, czy chociażby precyzja w czasie i przestrzeni).



Rysunek 2.14 hala NIFa<sup>[20]</sup>



Rysunek 2.15 wnętrze kapsuły reaktora<sup>[20]</sup>

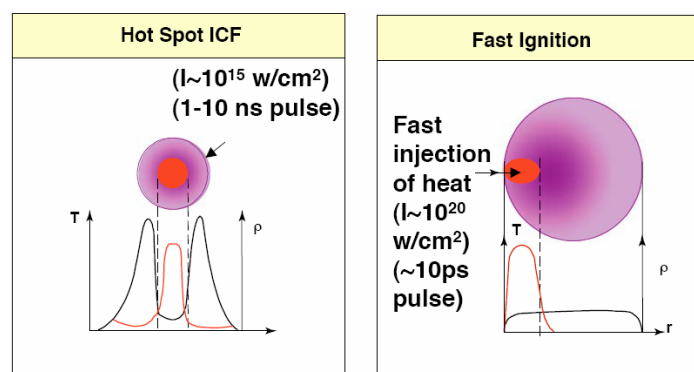
Paliwem w **NIF** jest oczywiście deuter i tryt. W dalszej perspektywie przewiduje się również eksperymenty z bezpośrednim grzaniem. Przewidywana wartość współczynnika  $G$  dla podejścia **hot spot** wynosi nawet  $G=50$  (w **NIFie** ma to być 10). Jednym z głównych wad urządzenia jest to, że ma ono niski czas repetycji (np. długiego chłodzenia wymagają wzmacniacze lasera).

Na zakończenie w oczekiwaniu na pierwsze wyniki z **NIFa** polecam obejrzenie krótkiego filmiku przedstawiającego bieg światła laserowego w układzie. Na uwagę zasługuje fakt, że falowody są prostokątne.

## 2.2. HiPER [20]

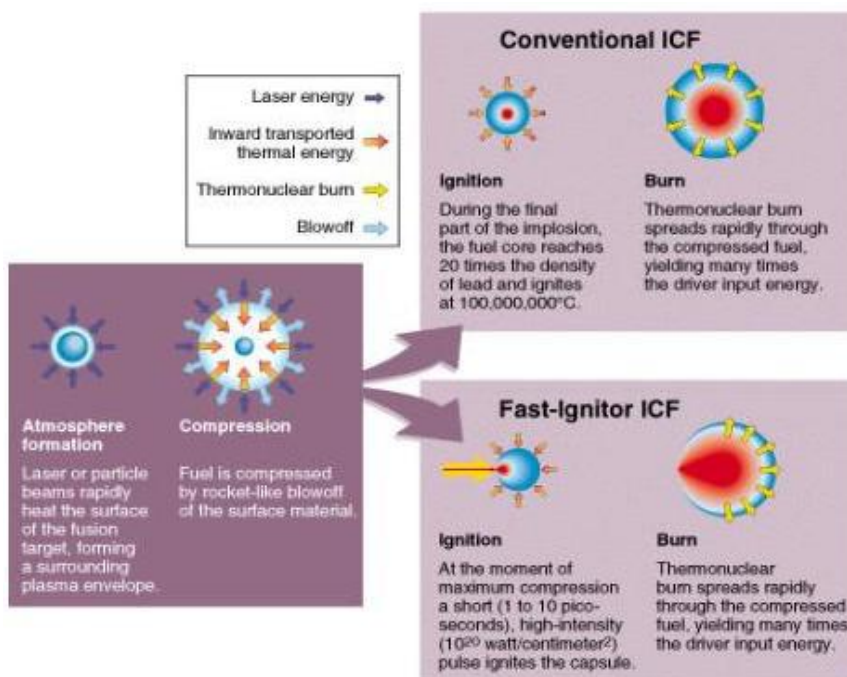
Nowszą w stosunku do **hot spot** koncepcją jest **fast ignition**, która powstała w 1994 roku. Koncepcja ta zakłada, że najpierw paliwo zostaje poddane kompresji (mniejszej niż w metodzie **hot spot**) za pomocą np. wielowiązkowego lasera, a następnie całość ulega gwałtownemu podgrzaniu przez intensywny strumień ( $\sim 10^{20} \text{ W/cm}^2$ ) cząstek elektronów albo jonów lub uderzenie mikropocisku o masie  $10^{-5}-10^{-4} \text{ g}$  przyspieszonego do prędkości  $>1000 \text{ km/s}$ .

Bardzo ciekawe porównanie znajduje się na stronie internetowej projektu **HiPER**. Typowe podejście zapłonu jądrowego porównano do pracy silnika Diesla. W silniku tym ściska się paliwo, aż ulegnie samozapłonowi. Metoda **fast ignition** jest porównana do pracy silnika benzynowego, w którym na początku paliwo jest poddawane kompresji przez tłoki, a następnie podpalane przez świecę zapłonową.



Rysunek 2.16 porównanie obu metod<sup>[\*]</sup>

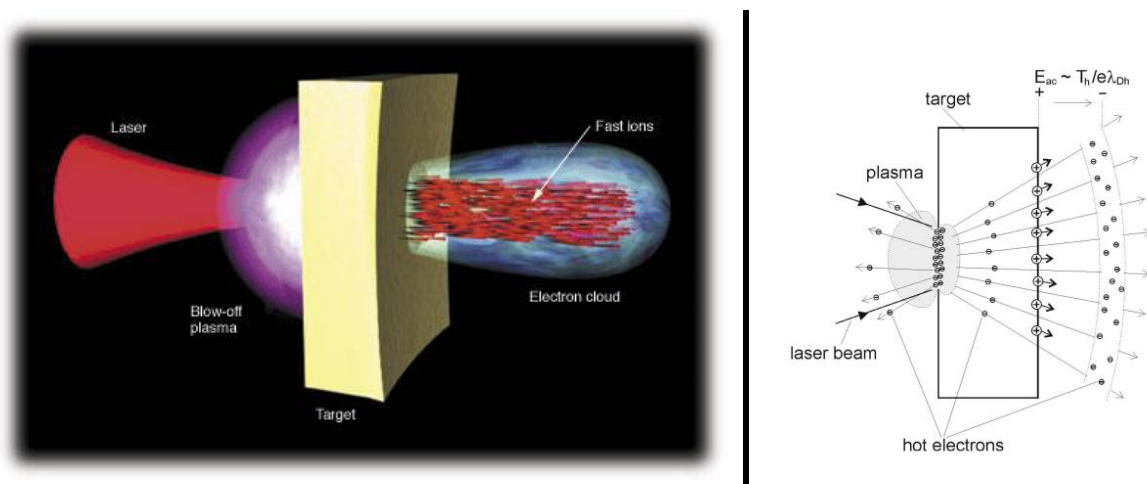
Najbardziej oczywistą realizacją fazy kompresji wydaje się być laser na wzór **NIFa**. Jednakże rozpatrywana jest również możliwość użycia akceleratora ciężkich jonów lub układu **Z-pinch**.



Rysunek 2.17 porównanie obu metod<sup>[\*]</sup>

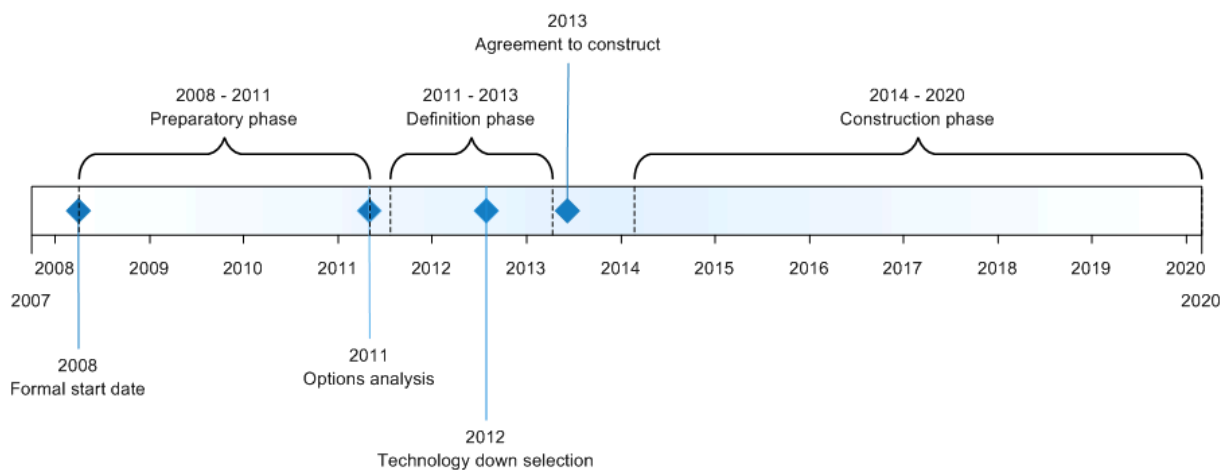


Jeśli chodzi o fazę zapłonu możliwości jest znacznie więcej. Dla wiązek elektronów lub protonów można wykorzystać laser pikosekundowy o mocy kilkudziesięciu PW. W przypadku pocisku wystarczy słabszy laser poniżej PW o impulsie nano- lub subnanosekundowym (jest to tańsze rozwiązanie). Istnieje także możliwość użycia jednego lasera do kompresji i podgrzania paliwa. Tzw. koncepcja **shock ignition** zakłada, że wiązka w swej końcowej fazie będzie bardzo intensywna, co wygeneruje sferyczną falę uderzeniową, jest to jednak jak na razie tylko teoretyczna koncepcja.



Rysunek 2.18 symulacja produkcji wiązki protonów<sup>[21]</sup>

Podejście **fast ignition** ma wiele zalet. Daje możliwość uzyskania większego współczynnika wzmocnienia energii nawet  $G > 100$  przy użyciu słabszego lasera (lasera kompresującego paliwo). Dzięki mniejszej kompresji pozwala na obniżenie wymagań technologicznych, a co za tym idzie spadek kosztów. Największą zaletą jest jednak zwiększenie powtarzalności strzałów.



Rysunek 2.19 HiPER - harmonogram prac<sup>[21]</sup>

Między innymi z powodu tych zalet zdecydowano się w Europie na projekt **HiPER**, czyli **High Power laser Energy Research facility**, który formalnie ruszył w 2006 roku. Obecnie projekt ten jest w trzyletniej fazie przygotowań. W projekcie uczestniczy 30 laboratoriów z 9 krajów UE (w Polsce IFPiLM), z Rosji, USA, Kanady, Chin, Japonii oraz Korei Płd. Głównym celem projektu jest realizacja fuzji termojądrowej za pomocą metody **fast ignition** oraz uzyskanie wzmocnienia  $G$  na poziomie 50-100. Jako jedyny na świecie projekt ten zakłada użycie lasera z dużą częstotliwością repetycji (5-10 Hz). Oczywiście projekt z racji swojego stopnia trudności wymaga ogromnego nakładu pracy oraz

wykorzystania wiedzy z różnych dziedzin fizyki (relatywistyczne oddziaływanie lasera z materią, generacja pikosekundowych wiązek jonów o dużych natężeniach, symulacje komputerowe skutków mikroeksplozji na elementy komory plazmowej czy wreszcie opracowanie urządzeń diagnostycznych).



Rysunek 2.20 HiPER - członkowie z UE<sup>[21]</sup>



Rysunek 2.21 budynek HiPER<sup>[21]</sup>

Ponieważ jesteśmy dopiero w pierwszej fazie projektu nie ma jeszcze jednoznacznych decyzji jak dokładnie cały eksperyment ma wyglądać. Jest tak duża ilość niuansów technologicznych (dlatego harmonogram prac nad **HiPERem** uwzględnia inne ważne wydarzenia, jak między innymi pierwsze rezultaty z **NIFa** oraz uruchomienie lasera pikosekundowym **PETAL** we Francji (2011-2012)), że nie ma potrzeby w tym opracowaniu ich wszystkich omawiać. Zainteresowanym polecam lekturze stronę internetową projektu **HiPER**, ja przedstawię jako ciekawostkę tylko dwa z takich problemów.

Chcąc mieć możliwość wykonywania częstych wybuchów potrzebujemy zbudować układ, który nie wymaga częstego i długiego chłodzenia. Wzmacniacze impulsu laserowego oparte na szkłe neodymowym są zazwyczaj pompowane optycznie za pomocą błysku lampy. Lamy te oprócz tego, że mocno się grzeją są bardzo nieefektywne. Błysk zazwyczaj jest to całe spektrum częstotliwości światła przy czym do pompowania używana jest jedna lub kilka linii widmowych. Rozwiązaniem tego problemu jest użycie pompy optycznej opartej na diodach laserowych, które nie wymagają długiego chłodzenia i z reguły świecą monochromatycznie.



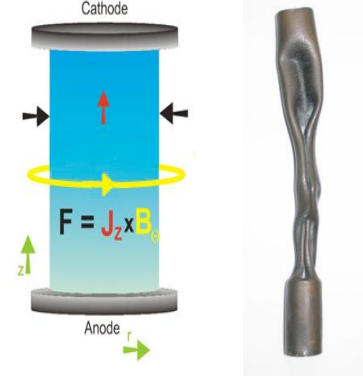
Rysunek 2.22 schemat "metody stożkowej"<sup>[21]</sup>

Są dwa możliwe sposoby wprowadzenia światła lasera w fazie po kompresji. Pierwszy sposób testowany w USA na układzie **OMEGA-EP** zakłada użycie innego lasera, który niejako wypali dziurę w zewnętrznej warstwie paliwa aż do samego rdzenia. Drugi sposób był testowany w Japonii na laserze **GEKKO XII** zakłada użycie złotego stożka, który od początku swoim wierzchołkiem sięga do wnętrza paliwa. Drugi sposób jest zazwyczaj przedstawiany na różnego rodzaju wizualizacjach. Jedną z nich wraz z filmem dotyczącym **HiPERa** polecam obejrzeniu.

### 2.3. Maszyna Z [22]

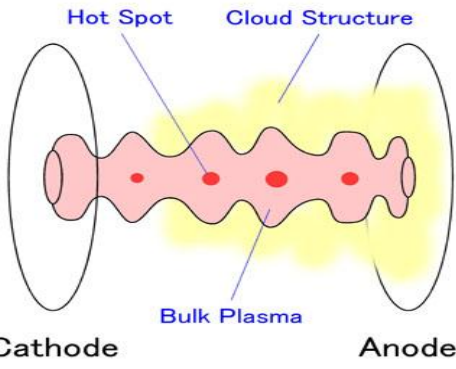
Nieco innym, od dotychczas omawianego, sposobem przeprowadzania fuzji jest użycie eksplodujących drutów. Jest to nieco zapomniana, ale bardzo interesująca metoda.

Nie wchodząc zbyt głęboko w szczegóły zjawiska **pinchu** można powiedzieć, że polega ono na ścisaniu przewodzącej substancji polem magnetycznym prądu płynącego w tej substancji. Za powstanie siły ścisającej odpowiedzialny jest wektorowy iloczyn gęstości prądu i pola magnetycznego - siła Lorentza. Pole magnetyczne wytworzone przez przewodnik może być dodatkowo wspomagane zewnętrznym polem. W zależności od orientacji pola magnetycznego wyróżniamy między innymi: **z-pinch**, **theta-pinch** oraz **pinch toroidalny**.

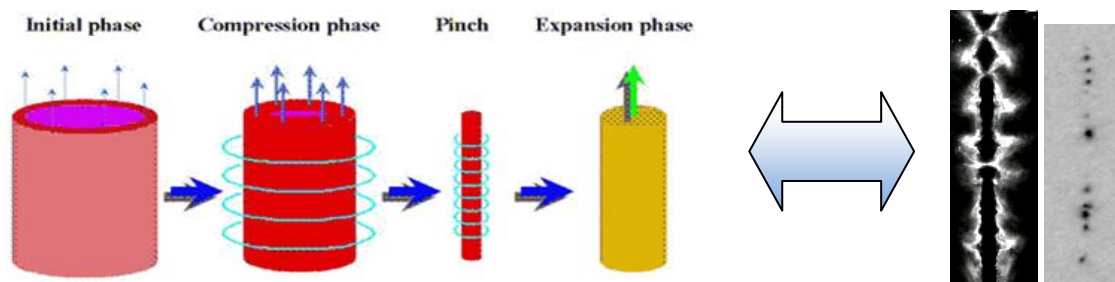
<p style="text-align: center;">z-pinch – opis jakościowy</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>➤ komora wypełniona gazem roboczym (np. deuter)</li> <li>➤ inicjacja wyładowania elektrycznego między liniowymi elektrodami</li> <li>➤ wyładowanie elektryczne przy dielektrycznych ściankach komory</li> <li>➤ jonizacja – tworzenie się przy ściankach warstwy prądowej – plazmy</li> <li>➤ siła Lorentza - „ściągnięcie” plazmy do osi cylindra</li> <li>➤ w wyniku niestabilności szybki rozłot plazmy na ścianki komory</li> </ul>	 <p style="text-align: center;">Rysunek 2.23 z-pinche</p>
---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

Oczywiście zjawisko to obserwowane jest również w przewodniku wykonanym z ciała stałego. W takim przypadku mówimy o "eksplodujących drutach".

Zaobserwowanie "eksplodującego drutu" wymaga użycia generatorów wysokiej mocy (silnopiętrowy impuls przepuszczony w krótkim czasie typowo:  $I \sim 0,1-2 \text{ MA}$ ,  $U \sim 0,1-2 \text{ MV}$ ,  $\tau_{nar} \sim 200 - 20 \text{ ns}$ ). np w bezpiecznikach ze względu na zbyt małą moc impulsu nie uzyskamy sznura plazmowego (szybciej nastąpi koniec przepływu prądu) choć początkowo fizyka zjawiska jest podobna.

 <p style="text-align: center;">Rysunek 2.24 z-pinch</p>	<p>eksplodujący drut – opis jakościowy</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>➤ zwarcie baterii kondensatorów</li> <li>➤ nagrzewanie i topienie się metalu przewodnika</li> <li>➤ powstawanie pęcherzyków par w metalu</li> <li>➤ tworzenie się gęstego rdzenia i otaczającej go rzadkiej, zjonizowanej korony</li> <li>➤ im większa jonizacja plazmy tym mniejsza jej przewodność – następuje błysk (eksplozja)</li> <li>➤ szybkie ochłodzenie plazmy zanik prądu</li> </ul>
---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

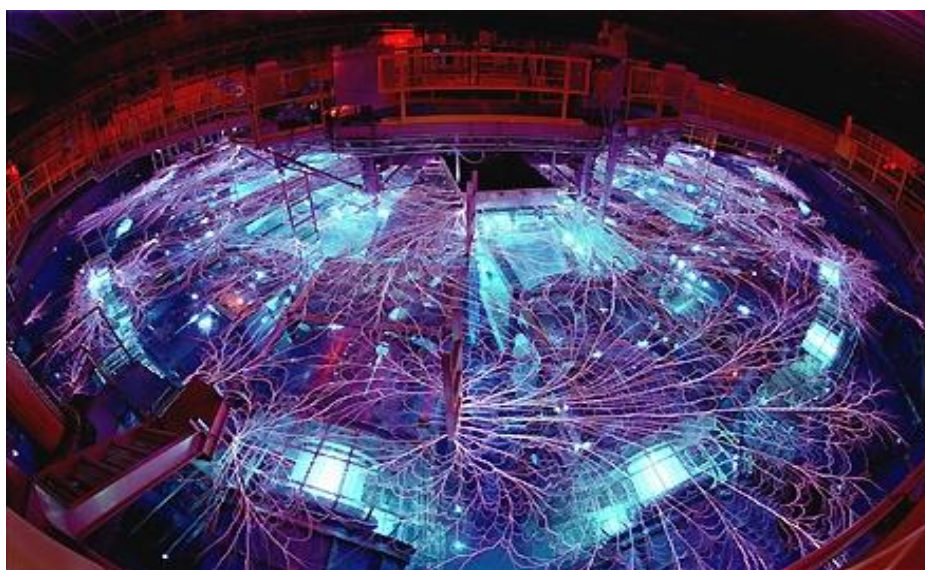
Rysunek poniżej pokazują kolejne etapy "eksplodującego drutu". Po prawej stronie widać zdjęcie wykonane w fazie eksplozji (obrazowanie Schlieren i rentgenowskie)



Rysunek 2.25 kolejne fazy eksplodującego drutu

Warte odnotowanie jest to, że krzyżując dwa przewodniki pole magnetyczne w przewężce będzie się dodawać, co oznacza wzrost siły ściskającej. Mówimy wtedy o zjawisku **X-pinch**. Ważne jest również to, że z obszaru przewężki (jak i z pojedynczego eksplodującego drutu) następuje silna radiacja w postaci promieniowania X (1-15 keV), materiałami druczika mogą być np. wolfram (Z=74), niob (Z=41), molibden (42), tytan (Z=22).

Wracając do syntezy można by użyć powstałej siły ściskającej do ściśnięcia materii tak mocno, że możliwe będzie zajście fuzji termojądrowej lub użyć powstającego promieniowania jako siły ściskającej. Pierwsza metoda jest na chwilę obecną uważana za zbyt trudną (chodzi głównie o problemy z niestabilnościami MHD plazmy, głównie modu  $m=0$ ). Drugi sposób jest realizowany na układzie nazywanym Maszyna Z w **Sandia National Laboratories** (Albuquerque, New Mexico, USA).

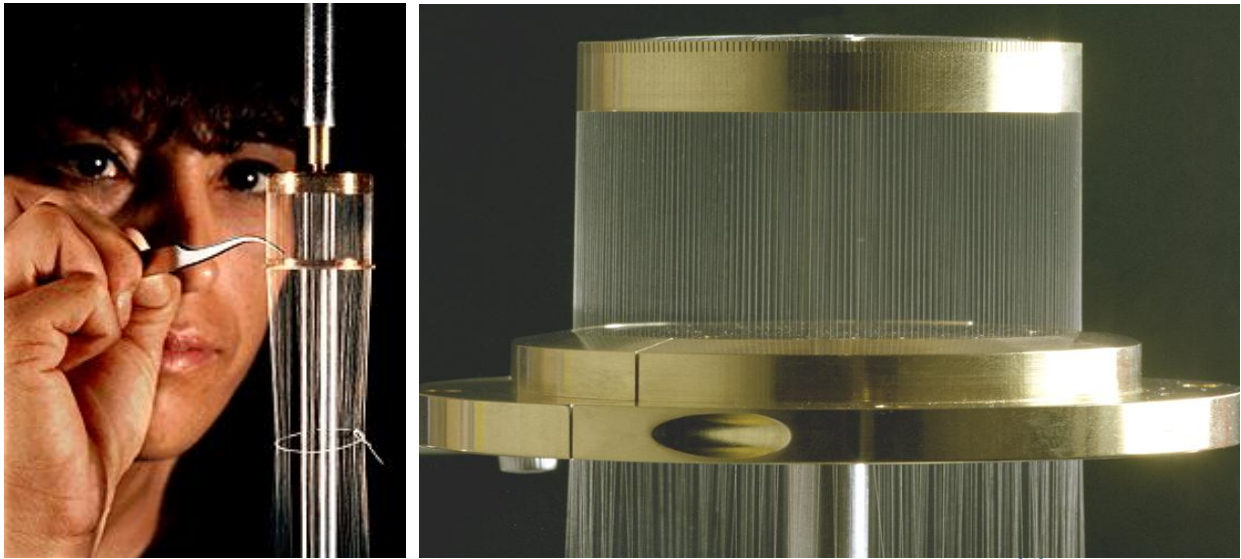


Rysunek 2.26 Widok na Z Maszynę w czasie wyładowania<sup>[23]</sup>

Schemat doświadczenia jest względnie prosty czego nie można powiedzieć o realizacji. Cienkie drucziki ustawia się równolegle dookoła osi walca. Układ taki nazywany jest **wire-array**. Przez układ drucików przepuszczany jest prąd kilkudziesięciu milionów amperów w czasie poniżej 100 nanosekund. Plazma powstała przy eksplozji drucików jest źródłem wysokiej temperatury i impulsu promieniowania X, który może powodować postawienie fali uderzeniowej skierowanej od środka walca. Obiekt poddawany działaniu fali uderzeniowej, "**target**" jest umieszczony na osi walca - cały walec z drucikami nazywany jest **Hohlraum**. Pionowa oś układu zwyczajowo oznaczana jest jako "Z" stąd

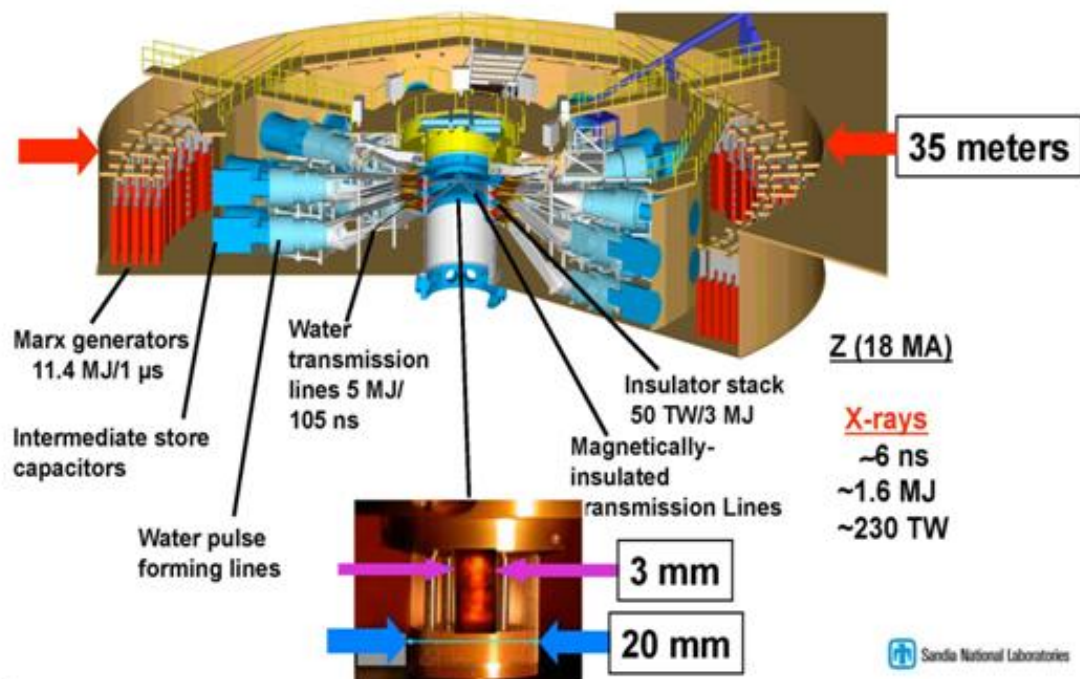


nazwa układu Maszyna Z oraz samego zjawiska **z-pinch**. Niestety taka metoda ma bardzo niską wydajność, około 15% mocy elektrycznej jest przetwarzana na promieniowanie X.



Rysunek 2.27 wire-array (240 drucików o średnicy  $7,5 \mu\text{m}$  w walcu o średnicy 40 mm) <sup>[23]</sup>

Jednym z problemów w Maszynie Z jest dostarczenie impulsu do **Hohlraum**. Do tego celu stosuje się wodę dejonizowaną.



Rysunek 2.28 schemat układu Maszyny Z (dane liczbowe dotyczą układu przed przebudową) <sup>[12]</sup>

W kwietniu 2003 ogłoszono, że układ doprowadził do syntezy deuteru. Niestety z powodu np. małej ilości deuteru w **Hohlraum** oraz innych trudności (dostarczenie produktów do dalszego spalania) układ nie może zostać użyty jako zapalnik reakcji fuzji termojądrowej.



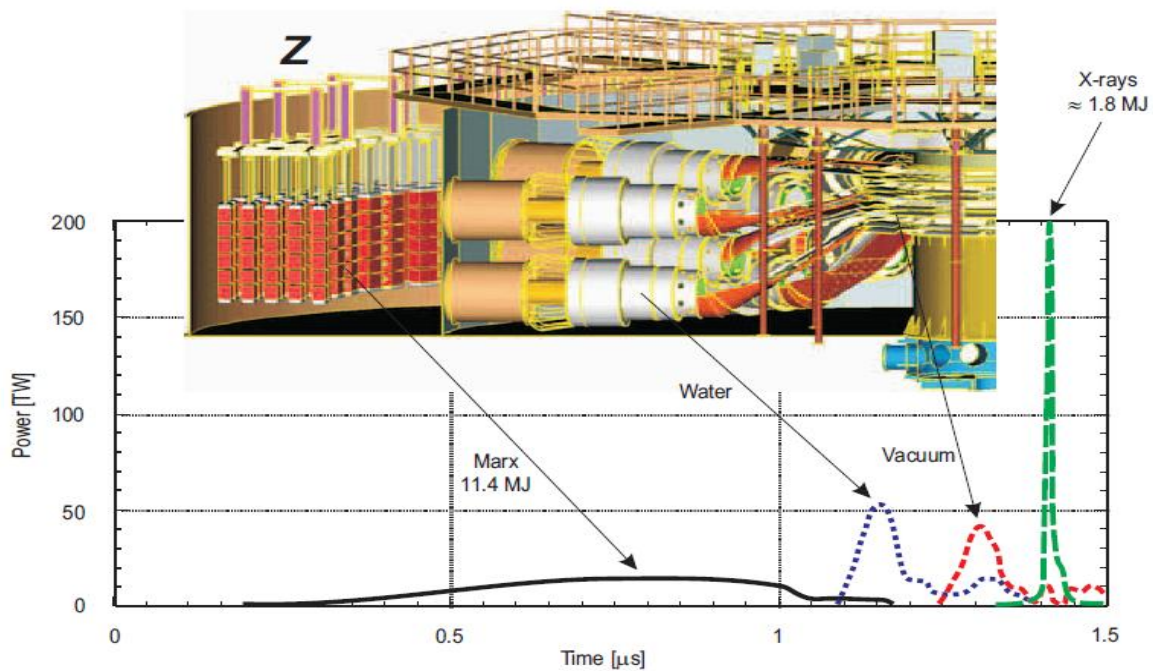
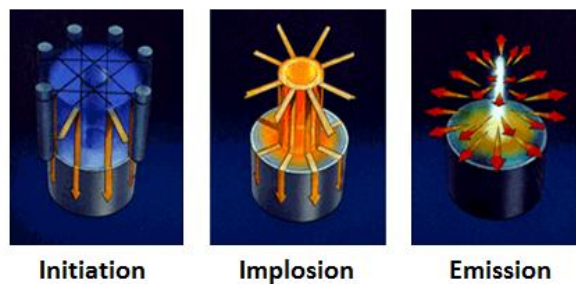


Fig. 9.5. The Z accelerator at SNL [96Spi].

Rysunek 2.29 schemat wyładowania (dane liczbowe dotyczą układu przed przebudową)<sup>[12]</sup>

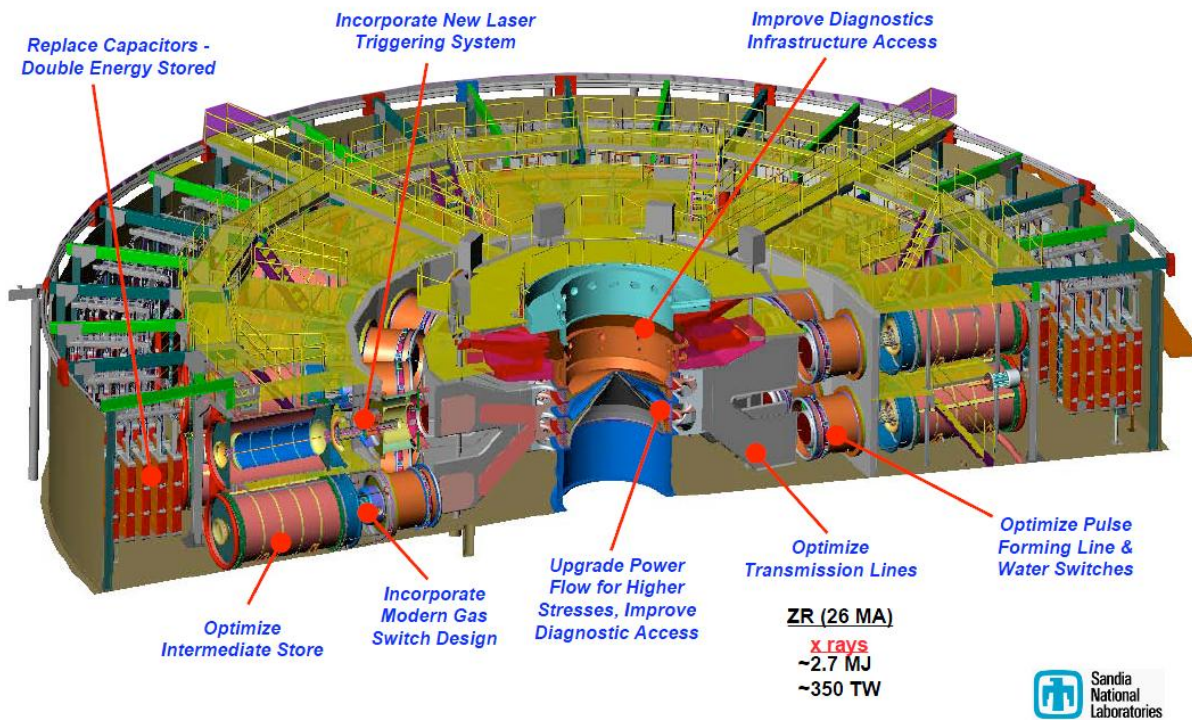


Rysunek 2.30 schemat reakcji w Maszynie Z<sup>[12]</sup>

W 2006 roku w laboratorium osiągnięto plazmę o najwyższej temperaturze (3.7 GK) na Ziemi. Temperatura ta jest tak wysoka, że teoretycznie umożliwia syntezę lekkiego wodoru z cięższymi pierwiastkami jak lit lub bor. Reakcje tego typu są o tyle fascynujące, że nie produkują neutronów, co wyeliminowałoby problem radioaktywnych odpadów.

Pod koniec 2007 roku układ Maszyny Z został przebudowany. Jego obecne parametry umożliwiają wykonywanie strzałów o natężeniu 27 milionów amper (wcześniej było to 18 milionów amper) w czasie 95. nanosekund.

## ZR - Refurbishing the Entire Accelerator



Rysunek 2.31 Z-maszyna<sup>[12]</sup>

W przyszłości planowane jest uruchomienie tzw. Neutron Z, ZN, a jeszcze później elektrowni inercyjnej o roboczej nazwie Z-IFE (**Z-inertial fusion energy**) i planowanym prądzie wyładowania 70 milionów amper. Jednym z największych problemów konstrukcyjnych przeszłej elektrowni będzie szybki przetładunek urządzenia.

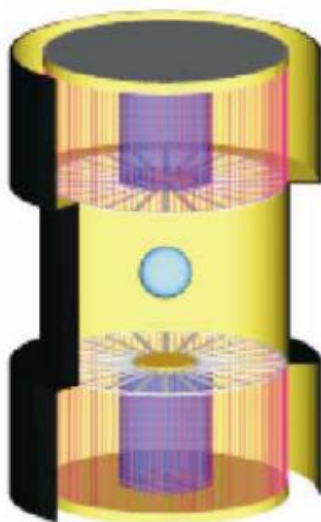


Fig. 9.22. The double-ended hohlraum target [99Ham].

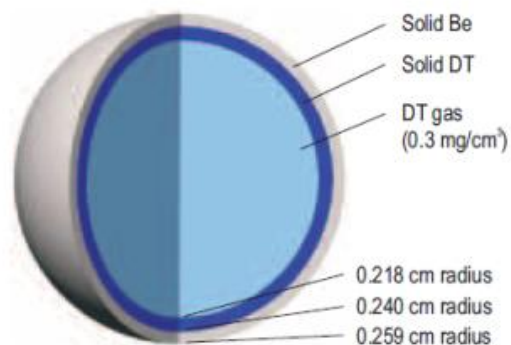


Fig. 9.23. The baseline capsule design for the double-ended hohlraum target [99Ham].

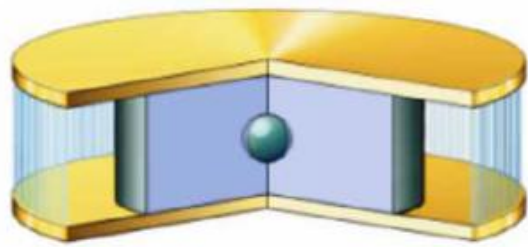


Fig. 9.25. The dynamic hohlraum target concept [00Las].

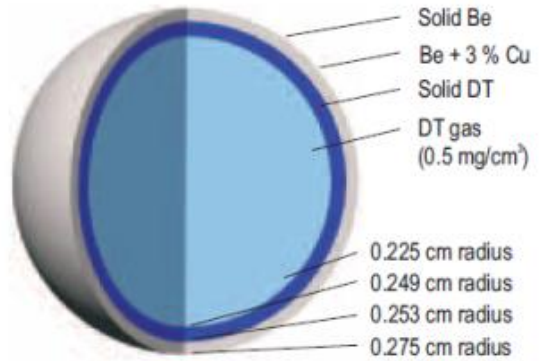


Fig. 9.26. The baseline capsule design for the dynamic hohlraum target [00Las].

Rysunek 2.32 różne koncepcje budowy wire-arrey <sup>[12]</sup>

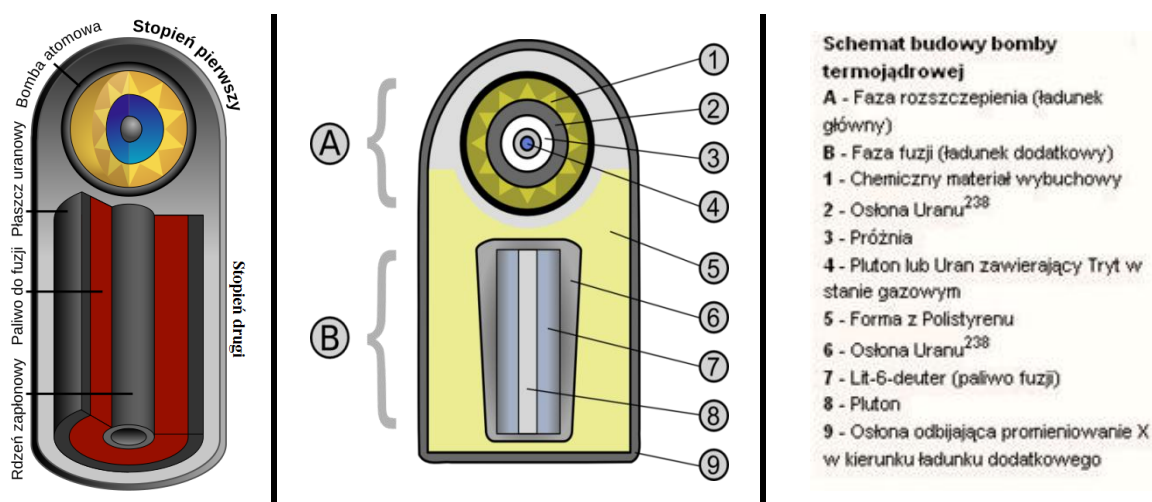
Jako ciekawostkę niezwiązaną z fuzją dodam informację, że Maszyna Z jest również używana do produkcji lodu VII czyli tzw. gorącego lodu.

## NIEKONTROLOWANA FUZJA

Wypuch bomby termojądrowej był pierwszym niezbitym dowodem na to, że w warunkach ziemskich możliwe jest przeprowadzenie syntezy termojądrowej. Należy szczerze powiedzieć, że głównym celem układu typu inercyjnego jest poznanie fizyki wybuchu termojądrowego i optymalizacji warunków zachodzenia syntezy (w typowych reakcjach termojądrowych nie całe paliwo ulega wypaleniu). Jedynym skutecznym (jak dotąd) sposobem na przeprowadzenie syntezy termojądrowej jest ściśnięcie materiału za pomocą fali uderzeniowej pochodzącej od wybuchu konwencjonalnej bomby jądrowej. W świetle dwóch traktatów tj. Układzie o nieprolifracji broni jądrowej (**Nuclear Non-Proliferation Treaty, NPT**) oraz jeszcze nie obowiązującym Traktacie o całkowitym zakazie prób z bronią jądrową (**Comprehensive Nuclear-Test-Ban Treaty, CTBT**) niemożliwe jest przeprowadzanie tego rodzaju eksperymentu.

Sposobem niejako obejścia tego problemu jest właśnie eksperyment **ICF** czyli przeprowadzenie eksplozji termojądrowej bez użycia tzw. "broni jądrowej". Dlatego prace nad projektami inercyjnej syntezy mają bardzo często tajny, militarny charakter.

Kluczem do produkcji bomb termojądrowych jest tak zwana konfiguracja Tellera-Ulama (wynaleziona została przez Stanisława Ulama i Edwarda Tellera). Jest to wykorzystanie faktu, że w bombie atomowej 80% energii jest transportowane przez radiację (promienie X), a nie jako energia kinetyczna. Prędkość radiacji przekracza prędkość ekspansji rozszczepialnego rdzenia, co powoduje, że można tę energię użyć do kompresji i zapłonu paliwa fuzyjnego zanim rozszerzający się rdzeń je zniszczy.



Rysunek 3.1 schemat budowy bomby termojądrowej<sup>[\*\*]</sup>

Oczywiście konstrukcja bomby jest znacznie trudniejsza, rysunki mają jedynie charakter schematyczny. Fizyka samego zjawiska jest słabo znana gdyż prace w tej dziedzinie są tajne.

Największą bombą była bomba **Cara** zdetonowana przez Związek Radziecki 30 października 1961 roku na wyspie Nowa Ziemia położonej na Morzu Arktycznym. Moc tej bomby to 4000 bomb zrzuconych na Hiroszimę, sama konstrukcja była bardzo duża i miała raczej charakter pokazowy niż użyteczny do ewentualnych zastosowań militarnych. Jej eksplozja spowodowała, że pobliskie wysepki wyparowały.



Do niniejszego sprawozdania dołączam dwa filmiki eksplozji największej Amerykańskiej (**Castle Bravo**) i Radzieckiej (**Cara**) bomby termojądrowej.

### 3.1. bomba wodorowa

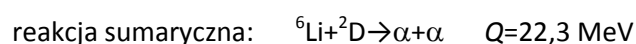
Pierwszą bombą, w której wykorzystano reakcję syntezy była bomba wodorowa **Ivy Mike** skonstruowana przez Amerykanów i zdetonowana 1 listopada 1952 roku na atolu Eniwetok na Oceanie Spokojnym. Tak naprawdę w kontekście tej konstrukcji ciężko mówić o bombie gdyż cały układ ważył około *80 ton*. Dodatkowo paliwem była mieszanina deuteru i trytu, co uwzględniając czas rozpadu trytu powodowało, że takiej "bomby" nie można by przechowywać. Siła eksplozji tego ładunku znacznie przekraczała siłę "zwykłych" bom atomowych opartych na rozszczepieniu (*700* bomb zrzuconych na Hiroszimę). Zapalnik użyty w tej konstrukcji swoimi parametrami przypominał bombę zrzuconą na Hiroszimę: moc *20 kt TNT*, wytworzona temperatura w czasie *1 μs* wynosiła *50 mln K*. Jako ciekawostkę warto wiedzieć, że przy konstrukcji tej bomby użyto komputera **MANIAC I** (**M**athematical **A**nalyzer, **N**umerator, **I**ntegrator, and **C**omputer - pamięć operacyjna *600* słów, pamięć zewnętrzna *80K*, taktowany zegarem *11kHz*, zbudowany z *2 400* lamp elektronowych)



Rysunek 3.2 eksplozja bomby Ivy Mike <sup>[\*\*]</sup>

### 3.2. bomba litowa - bomba FF i FFF

Oczywiście lata 50' to tzw. "wyścig zbrojeń" dlatego już w sierpniu 1953 została przeprowadzona eksplozja pierwszej radzieckiej bomby termojądrowej. Była to jednak konstrukcja znacznie lepsza niż pierwsza bomba wodorowa. W bombie litowej paliwem jest deuterok litu-6  ${}^6\text{LiD}$ , który jest ciałem stałym w temperaturze pokojowej. Oczywiście również w tej konstrukcji użyto bomby atomowej jako zapalnika lecz w tym przypadku neutrony z rozszczepienia zostały użyte do produkcji trytu w reakcji z w/w litem. Tak powstały tryt służył do syntezy z deuterem.



W odpowiedzi Amerykanie zdetonowali swoją bombę litową na atolu Bikini. Bomba litowa jest konstrukcją lekką w porównaniu z bombą wodorową (1 t i około 2 m średnicy), co powoduje, że jest możliwe zastosowanie jej do celów militarnych (za pomocą samolotu lub rakiety interkontynentalnej)

W zależności od konstrukcji wyróżniamy bomby typu **FF**, 2. fazowe i typu **FFF (fission-fusion-fission, czyli rozszczepienie-synteza-rozszczepienie)**, 3. fazowe. Bomby **FF** nazywa się czasem bombami czystymi gdyż większość energii wydzielonej podczas wybuchu pochodzi w nich z syntezy, co powoduje zmniejszenie opadu radioaktywnego.

W bombach typu **FFF**, neutrony powstałe w reakcji syntezy używa się do przeprowadzenia trzeciej fazy - rozszczepienia. W tym przypadku mogą to być materiały słabo wzbogacone gdyż ilość i energia powstałych neutronów wystarczy do zainicjowania rozszczepienia. Bomby te z racji tego, że energia przy ich detonacji pochodzi głównie z rozszczepienia powodują powstanie radioaktywnego opadu dlatego mówi się o nich "brudne bomby". Bomby litowe są przeważnie typu **FFF**.

### 3.3. bomba neutronowa

Przez jej twórców nazywana najbardziej humanitarną bombą, przez przeciwników humanitarną tylko dla budynków i urządzeń. W bombie tej "pozwała się" na ucieczkę neutronów, co skutkuje tym, że sam wybuch jest słaby. Zasięg fali uderzeniowej wynosi około 60 metrów od wybuchu i jako tako nie jest źródłem "głównego zniszczenia". Głównym czynnikiem rażenia tej bomby jest pochodzący z reakcji syntezy wysokoenergetyczny strumień neutronów, które są bardzo przenikliwe. Z wojskowego punktu widzenia użycie tej bomby ma dwie zasadnicze zalety. Po pierwsze eliminuje wroga bez zniszczenia jego instalacji (opad radioaktywny jest minimalny). Dodatkowo strumień neutronów może zaktywować ewentualne ładunki jądrowe wroga.

### 3.4. bomba kobaltowa

Ten rodzaj bomby stoi niejako w opozycji do bomby neutronowej. W tym przypadku chodzi o wywołanie jak największego skażenia terenu. W tym celu osłonę takiej bomby wykonują się z kobaltu lub z innych pierwiastków (w zależności od tego jak długo powstały izotop ma być aktywny). Silny strumień neutronów aktywuje powłokę zmieniając kobalt w izotop kobaltu-60, który jest źródłem promieniowania gamma. Inne możliwe w użyciu pierwiastki to złoto, cynk i tantal.

## PODSUMOWANIE

Metody, które zostały przeze mnie omówione są to tylko metody z tzw. "głównego nurtu". Jest wiele układów pracujących nad syntezą za pomocą zupełnie innych niż przeze mnie przedstawione metod lub metod mieszanych. Ze względu na ograniczony charakter tego sprawozdania temat nie jest przerobiony wyczerpująco nawet w aspekcie metod inercyjnych.

Czytelnikowi zainteresowanemu inercyjną syntezą polecam lekturze bibliografię oraz zapoznanie się z następującymi zagadnieniami: układ **plasma-focus, gas puff, IEC (Inertial electrostatic confinement** - Inercyjne uwięzienie elektrostatyczne plazmy) oraz **Polywell** (połączenie magnetycznego i inercyjnego elektrostatycznego uwięzienia plazmy). Zachęcam również do poznania metod magnetycznych i reakcji syntezy zachodzących w gwiazdach.

Na zakończenie warto wspomnieć o roli Polski w badaniach nad fuzją termojądrową. Ponieważ nie jesteśmy krajem zamożnym nie możemy sobie pozwolić na miliardowe inwestycje w instalacje fuzyjne. Na dobrą sprawę nie jesteśmy nawet w stanie współuczestniczyć finansowo w ewentualnych projektach.

Na szczęście istnieje obszar badań, w którym każdy może wziąć udział - niezależnie od statusu materialnego - są to symulacje komputerowe. Zaletą tego rodzaju prac (prac nad modelowaniem) jest taka, że nie wymaga wielkich nakładów finansowych, a jednocześnie jest niezwykle pomocna. W szczególności w obszarach słabo poznanych przez człowieka jak np. fizyka plazmy wysokotemperaturowej symulacje okazują się nieocenione.

W Polsce badania nad syntezą zarówno metodami inercyjnymi jak i magnetycznymi prowadzi się w Instytucie Fizyki Plazmy i Laserowej Mikrosyntezy w Warszawie. Instytut powstał w latach siedemdziesiątych i od samego początku prowadził pracę nad fuzją. Jednym z bardziej znanych pracowników ubiegłego wieku był, nie żyjący już Sylwester Kaliski. W Instytucie znajdują się między innymi układ Plasma-Focus 1000 oraz laser terawatowy. Dziś jako że jesteśmy członkiem UE mamy możliwość współuczestniczyć intelektualnie w dużych projektach europejskich typu ITER czy HiPER (Polska zaangażowana jest w tzw. pakiety robocze WP2 i WP6 oraz WP9 i WP12). Bardzo ciekawa i szczegółowa analiza na temat roli Polski (między innymi IFPiLM, IFJ, IEA, PW) w badaniach nad syntezą termojądrową znajduje się w materiale źródłowym numer [9].

Podsumowując całość badań nad syntezą warto zwrócić uwagę na bardzo interesujący fakt. Czytając literaturę z lat 80 niezależnie czy polską (np. S. Kaliski) czy zagraniczną (np. Frank-kmamieniecki) rzuca się w oczy entuzjizm związany z badaniami. Autorzy wyraźnie rozbudzają nadzieje na szybkie ukończenie prac nad fuzją. Jak wiemy dziś nie jest to jednak takie proste i moje subiektywne odczucie jest takie, że we współczesnych publikacjach brakuje nieco optymizmu.

Wielkie odkrycia z reguły są niespodziewane dlatego może moje spostrzeżenie jest dobrym prognozą dla fuzyj. Z drugiej strony często podnoszony jest zarzut o cenie (finansowej) prac nad syntezą. Trzeba uczciwie przyznać, że tylko badania kosmiczne pochłaniają więcej pieniędzy. Należy jednak pamiętać, że tak zmasowane prace jakie są obecnie prowadzone w końcu muszą dać interesujący rezultat - nie musi to być koniecznie fuzyje lecz np. nowoczesne rozwiązanie technologiczne.

Twierdzenie że "fuzja jest i zawsze będzie przyszłym źródłem energii dla ludzkości" osobiście uważam za nadmiernie złośliwe. Mam głęboką nadzieję, że ludzkość osiągnie również cel uzyskania energii z fuzji. Może będzie to za pomocą jakiejś zupełnie nowej dziś nieznannej metody lub jakieś hybrydowe połączenie kilku metod.

## BIBLIOGRAFIA

### 4.1. polskojęzyczna

#### KSIAŻKI

- [1.] D. A. Frank-Kamieniecki „Plazma czwarty stan materii”, 1963
- [2.] D. A. Frank-Kamieniecki „Wykład z fizyki plazmy”, 1968
- [3.] W. Cernetskij „Wstęp do fizyki plazmy”, 1971
- [4.] L. A. Arcimowicz „Czwarty stan materii”, 1972
- [5.] Z. Celiński „Plazma”, 1980
- [6.] S. Kaliski. "Lasery-synteza jądrowa", 1982
- [7.] pod redakcją Z. Składanowski i A. Marchewka "Foresight dla energetyki termojądrowej", 2009

#### PUBLIKACJE

- [8.] Instytut Fizyki Jądrowej, Raport Nr 4/POP, Urszula Woźnicka "Synteza termojądrowa – źródło energii dla elektrowni przyszłości", 2008
- [9.] FOTON 95, Lucjan Jarczyk, Energia gwiazd – Hans Bethe, 2006

### 4.2. anglojęzyczna

#### KSIAŻKI

- [10.] Andre Gsponer, Jean-Pierre Hurni "Fourth Generation Nuclear Weapons", 1999
- [11.] S. Pfalzner, Series in Plasma Physics: "An Introduction to Inertial Confinement Fusion", 2006
- [12.] C.L. Olson, Landolt-Börnstein New Series VIII/3B "Inertial confinement fusion: z-pinch"

#### PUBLIKACJE

- [13.] Plasma Phys. Control. Fusion 51 (2009) 124029 (14pp), S Atzeni, "Laser driven inertial fusion: the physical basis of current and recently proposed ignition experiments"
- [14.] Rep. Prog. Phys. 59 1071, S Nakai and H Takabe, "Principles of inertial confinement fusion - physics of implosion and the concept of inertial fusion energy"

#### WWW

- [15.] The Laboratory of Plasma Studies - <http://www.lps.cornell.edu/>
- [16.] Plasma Center - <http://www.plasmacenter.cornell.edu/ExplodingWires.html>
- [17.] The Edgerton Center - <http://web.mit.edu/Edgerton/www/Intro.html>
- [18.] Introduction to Plasma Physics - <http://silas.psfc.mit.edu/introplasma/index.html>
- [19.] Laser MegaJoule - <http://www-lmj.cea.fr>
- [20.] National Ignition Facility - <https://lasers.llnl.gov/>
- [21.] European High Power laser Energy Research - <http://www.hiper-laser.org/>
- [22.] Sandia National Laboratories - <http://www.sandia.gov/>
- [23.] Z Machine - <http://zpinch.sandia.gov/>

\* - materiał pochodzi z prezentacji wygłoszonych podczas Ósmej Letniej Szkoły w Kudowie Zdrój „Towards Fusion Energy” (21-25 IX 2009 r.)

\*\* - grafika pochodzi z <http://www.wikipedia.org/>