

Fizyka plazmy w aspekcie kontrolowanej fuzji
termojądrowej

Maciej Jakubczak
Wydział Fizyki, Politechnika Warszawska

6 lutego 2015

Spis treści

1	Wstęp	2
2	Plazma	3
2.1	Długość Debye'a i parametr plazmy	3
2.2	Kwazineutralność i oscylacja plazmy	4
2.3	Tłumienie Landau'a	4
2.4	Wytwarzanie plazmy	4
3	Kontrola plazmy	5
3.1	Grzanie	5
3.2	Formowanie	6
3.3	Oddziaływania plazma-ściana	7
3.4	Niestabilności	7
4	Diagnostyka plazmy	8
5	Jądrowe reakcje fuzyjne	10
6	Reaktory	11
6.1	Tokamak	11
6.2	Stellarator	12
6.3	Laserowy	12

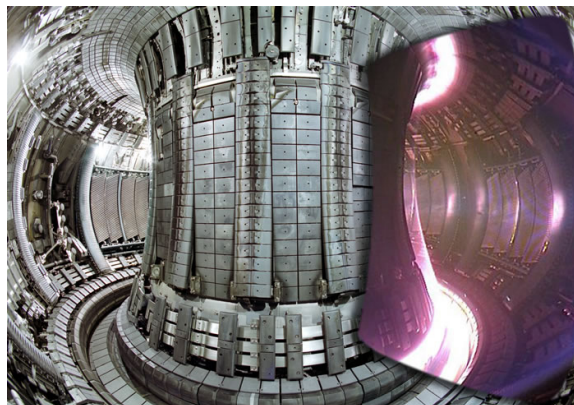
Rozdział 1

Wstęp

Plazma, z greckiego $\pi\lambda\alpha\sigma\mu\alpha$, to jeden z czterech podstawowych stanów materii. Słowniki definiują ją jako w przybliżeniu neutralny elektrycznie, silnie zjonizowany gaz, złożony z niezwiązanych, naładowanych elektrycznie cząstek.

Cechą charakterystyczną plazmy jest kolektywne zachowanie tworzących ją cząstek, które oddziałują ze sobą nie tylko w wyniku zderzeń typowych dla gazów, ale też poprzez tworzone przez nie pola elektromagnetyczne. Stanowi to o wielu makroskopowych właściwości plazmy, które przyczyniły się do zakwalifikowania jej jako odrębnego stanu materii. Uważa się, że w tym stanie występuje ponad 99% materii widzialnego Wszechświata. Naturalnie występuje, między innymi, jako budulec większości gwiazd, duża część pyłu międzygwiazdowego, a na Ziemi objawia się przy okazji zjawisk takich jak uderzenie błyskawicy czy zorza polarna.

Człowiek nauczył się wytwarzać i kontrolować plazmę, zaś od kilku dekad stara się także zaprząć ją do pracy poprzez fuzję termojądrową. O kontroli plazmy w tym aspekcie jest niniejsza praca.



Rysunek 1.1: Joint European Torus (JET) [1]

Rozdział 2

Plazma

Plazma składa się z jonów dodatnich i ujemnych (elektrony) oddziałującymi elektromagnetycznie z sąsiednimi cząsteczkami. Powoduje to kolektywne zachowanie się cząstek, co przyczynia się do posiadania przez plazmę szeregu interesujących właściwości i pozwala opisywać plazmę jak „elektryczną ciecz”. Główne z nich zostały przybliżone poniżej.

2.1 Długość Debye’a i parametr plazmy

Gdy wewnątrz plazmy umieszczony zostanie pewien elektryczny potencjał, zostanie on zneutralizowany przez rozdział (polaryzację) otaczających go jonów, co jest nazywane **ekranowaniem Debye’a**. W przypadku, gdy umieścimy pewien ładunek $-Q$, jony dodatnie zostaną do niego przyciągnięte, zostawiając za sobą warstwę jonów ujemnych. Odległość, na jakiej znajdują się ekranujące resztę plazmy cząsteczki, nazywana jest **długością Debye’a** i oznaczana jest przez λ_D , przy czym:

$$\lambda_{De,i} = \sqrt{\frac{\epsilon_0 k_B T_{e,i}}{n_{e,i} e^2}} ,$$

gdzie e, i oznacza odpowiednio elektron lub jon dodatni, ϵ_0 to stała dielektryczna próżni, k_B - stała Boltzmanna, T - temperatura, n - koncentracja i e - ładunek elementarny. Ostateczna długość Debye’a wynosi:

$$\lambda_D^{-2} = \lambda_{De}^{-2} + \lambda_{Di}^{-2} .$$

Bezpośrednio z długością Debye’a jest związany **parametr plazmy** N_D , który oznacza liczbę cząstek wewnątrz sfery o promieniu długości Debye’a dla danej średniej koncentracji cząstek n , czyli:

$$N_D = n \frac{4}{3} \pi \lambda_D^3 .$$

2.2 Kwazineutralność i oscylacja plazmy

Plazma nie jest idealnie obojętna elektrycznie; możliwa jest niewielka przewaga jednego ładunku nad drugim, a także w lokalne odchylenia spowodowane ruchami elektronów i jonów. Dlatego w odniesieniu do plazmy mówi się o jej **kwazineutralności**.

Z fluktuacjami ładunku elektrycznego elektronów związane jest pojęcie **oscylacji plazmy**, której częstotliwość (**częstość plazmowa**) wyraża się zależnością:

$$\omega^2 = \frac{n_e e^2}{\epsilon_0 m_e},$$

gdzie n_e - koncentracja elektronów, e - ładunek elementarny, ϵ_0 - stała dielektryczna próżni, m_e - masa elektronu.

2.3 Tłumienie Landau'a

Stopień oddziaływania plazmy z zewnętrznymi falami elektromagnetycznymi zależy silnie od prędkości poruszających się cząstek plazmy. Kiedy jest ona zbliżona do prędkości fazowej fali elektromagnetycznej przechodzącej przez plazmę, fala wytłumia się, przekazując swoją energię cząstkom plazmy. Zjawisko to nosi nazwę **tłumienia Landau'a** i jest jedną z metod na ogrzanie plazmy w zupełnie bezkolizyjny sposób.

2.4 Wytwarzanie plazmy

Plazmę wytwarza się poprzez silne ogrzanie i jonizację gazu, co można osiągnąć na szereg sposobów:

- stopniowe ogrzewanie - wraz ze wzrostem temperatury gazu rośnie częstość nieelastycznych zderzeń, w wyniku czego zachodzi jonizacja;
- wyładowanie elektryczne - w powietrzu przy ciśnieniu 1 atm wyładowanie następuje na odległości 1 cm przy osiągnięciu napięcia ok. 30 kV . W rezultacie powstaje duży prąd ogrzewający ośrodek, przez który przepływa, jonizując go;
- ogrzewanie mikrofalami - cząsteczki gazu są rozgrzewane i jonizowane przez fale elektromagnetyczne o ustalonej częstotliwości;
- laserowe - wystrzelwane są wysokoenergetyczne impulsy laserowe, które deponują swoją energię na materiale, który wyparowuje i zamienia się w plazmę.

Rozdział 3

Kontrola plazmy

Plazma jest dla człowieka stanem dość egzotycznym, pojawiającym się w określonych warunkach i na krótką chwilę (np. błyskawica). W celu zaprzęgnięcia jej do pracy w fuzji termojądrowej należy nauczyć się ją kontrolować. Istnieją trzy sposoby utrzymania plazmy: grawitacyjna (gwiazdy), magnetyczna (tokamaki) oraz inercyjna (lasery). O niektórych aspektach kontroli plazmy i trudnościach z tym związanych jest ten rozdział.

3.1 Grzanie

Podstawową kwestią, jeśli mowa o kontrolowanej fuzji termojądrowej, jest grzanie plazmy. Musi mieć ona odpowiednio wysoką temperaturę, by cząstki mogły pokonać barierę kulombowską i mogła zajść fuzja. Jest na to kilka sposobów:

- grzanie omowe
Plazma jest przewodnikiem elektrycznym o pewnym oporze, więc indukując w niej przepływ prądu za pomocą np. zewnętrznego transformatora, możliwe jest jej ogrzanie. Wydajność takiego grzania zależy od oporności plazmy, która jest proporcjonalna do $T_e^{-3/2}$. Oznacza to, że wraz ze wzrostem temperatury plazmy, ten typ grzania będzie coraz mniej wydajny, a maksymalne temperatury osiągane przez grzanie omowe w tokamakach są rzędu setek eV, gdzie dla zajścia fuzji termojądrowej wymagane są temperatury rzędu dziesiątek eV.¹
- strumień neutralnych cząstek
Do plazmy wstrzykuje się wysokoenergetyczne neutralne atomy (wodór, deuter, tryt). Ze względu na obojętność elektryczną mogą one spenetrować pułapkę magnetyczną więżącą plazmę, po czym już w plazmie poddają się jonizacji. Nowe jony mają dużo większą prędkość od

¹1 eV \approx 11 605 K

średniej i na skutek kolejnych zderzeń przekazują swoją energię pozostałym cząstkom. W efekcie średnia prędkość ruchu chaotycznego cząstek rośnie, a z nią również temperatura plazmy.

- grzanie rezonansowe

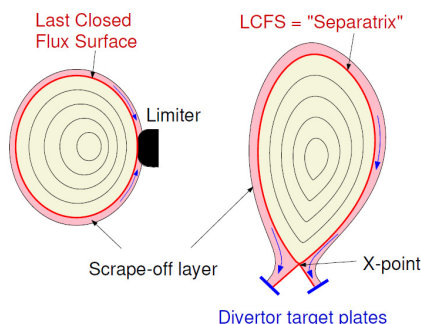
Ponieważ jony i elektrony mają ładunek elektryczny, to w obecności pola magnetycznego poruszają się wokół linii tego pola z tzw. częstotliwością cyklotronową, która jest proporcjonalna do $\frac{Z}{A}B(R)$, gdzie Z - ładunek jonu (elektronu), A - masa jonu (elektronu), $B(R)$ - wartość indukcji pola magnetycznego zależna od promienia. Wartości częstotliwości cyklotronowej dla składników plazmy są rzędu częstotliwości radiowych (MHz – GHz). Gdy wygenerujemy falę elektromagnetyczną o częstotliwości równej częstotliwości cyklotronowej wybranego składnika, nastąpi rezonans między nimi i fala przekaże tym cząstkom energię, które w wyniku kolizji przekażą ją sąsiednim jonom i elektronom, zwiększając temperaturę plazmy.

3.2 Formowanie

Formowanie plazmy, w szczególności w układach tokamakowych, odbywa się za pomocą pól elektromagnetycznych oraz mechanicznych ograniczników.

Kształt plazmy zależy od toroidalnego i poloidalnego pola magnetycznego wytwarzanego przez cewki w tokamakach. Może on być w przekroju eliptyczny dla pól kwadrupolowych lub bardziej trójkątny dla pól heksapolowych. Ich kombinacja pozwala uzyskać plazmę o przekroju w kształcie litery D.

Wierzchnie warstwy plazmy oddziałują ze ścianami reaktora, co powoduje ich niszczenie oraz zanieczyszcza plazmę. W celu ograniczenia tych oddziaływań stosuje się limityry, które mechanicznie „zdrapują” zewnętrzną warstwę plazmy, oraz diwertory, które modyfikują pole magnetyczne tak, że ostatnia warstwa plazmy zostaje skierowana na specjalnie przygotowane ściany, z którymi się zderza (rys. 3.1).



Rysunek 3.1: Konfiguracja limitera oraz diwertora [2]

3.3 Oddziaływania plazma-ściana

Oddziaływania plazma-ściana, mimo prób ich ograniczenia poprzez zastosowanie limiterów i diwertorów, są wciąż obecnym elementem, z którym borykają się inżynierowie. Na skutek uderzania cząstek plazmy o ściany reaktora następuje ich erozja, a jej produkty zanieczyszczają plazmę. Przez ściany reaktora zostaje pochłonięta również około połowa energii pochodzącej z fuzji, a także zostaną zbombardowane wysokimi strumieniami neutronów.

Istotną sprawą jest więc odpowiedni dobór materiałów, z której zbudowane są ściany reaktora, tak by były jednocześnie odporne na erozję, miały dobre przewodnictwo cieplne i niską liczbę atomową. Obecnie najczęściej rozpatrywanymi materiałami są kompozyty węglowe (cele w diwertorze), beryl (ściany komory głównej) i wolfram (diwertor).

3.4 Niestabilności

W plazmie powstają niestabilności, mające najczęściej negatywny wpływ na pracę reaktora. Muszą one być ograniczane lub kompensowane, by nie doprowadzić do wygaszenia reakcji termojądrowej bądź zniszczenia reaktora. Przykładowymi niestabilnościami są:

- wygaszenie - przekroczenie któregoś z parametrów plazmy, powodujące zakłócenie plazmy i uwolnienie energii w ścianę;
- VDE (ang. *Vertical Displacement Event*) - przemieszczenie się plazmy w stronę ściany, na skutek czego dochodzi do zakłócenia i wygaszenia plazmy;
- piła (ang. *Saw-tooth*) - oscylacje temperatury elektronowej w kształcie piły (powolnego narastania i gwałtownych spadków);
- MARFE (ang. *Multifaceted Asymmetric Radiation From the Edge*) - niestabilność przy dużej gęstości na obrzeżach plazmy;
- wyspy magnetyczne - helikalne struktury w polu magnetycznym;
- ELMs (ang. *Edge Localised Modes*) - niestabilność plazmy brzegowej związana z trybem pracy H-mode.

Rozdział 4

Diagnostyka plazmy

Istnieje mnogość parametrów plazmy, jak temperatura, gęstość, ciśnienie itd., które są dodatkowo zwielokrotnione przez obecność różnych rodzajów cząstek (elektrony, jony różnych pierwiastków o różnym stopniu zjonizowania, cząstki neutralne). Nie jest możliwe zbadanie ich wszystkich na raz, dlatego stosuje się wiele detektorów, które badają plazmę w różny sposób.

Można je podzielić na mierzoną właściwość:

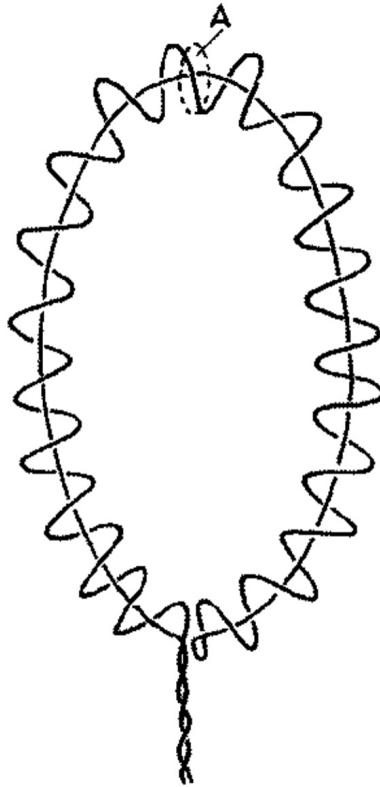
- pomiary magnetyczne - bezpośrednie badanie pola magnetycznego wewnątrz i na zewnątrz plazmy za pomocą różnych typów cewek i sond;
- strumień cząstek plazmy - bezpośrednie badanie strumienia cząstek przez sondy w kontakcie z plazmą;
- współczynnik refrakcji - badanie współczynnika refrakcji fal elektromagnetycznych o ustalonej częstotliwości przechodzących przez plazmę;
- emisja promieniowania elektromagnetycznego przez wolne elektrony - badanie promieniowania cyklotronowego, hamowania i Czerenkowa;
- emisja promieniowania elektromagnetycznego przez związane elektrony - badanie linii radiacyjnych nie w pełni zjonizowanych atomów i jonów;
- rozproszenie fal elektromagnetycznych - badanie rozproszenia fal na cząstkach plazmy;
- produkty reakcji jądrowych - produkty reakcji mogą mieć wystarczającą energię na ucieczkę z plazmy, co pozwala je wykryć przez specjalne sensory.

Wybór metod badania zależy od rodzaju plazmy, którą chce się zbadać, na przykład w tzw. gorąca plazma nie może być zdiagnozowana przez sondy badające wewnątrz plazmy, które łatwo by uległy zniszczeniu, zaś liczba reakcji

jądrowych w zimnej plazmie jest zbyt mała, by otrzymać jakąś informację o niej poprzez produkty tych reakcji.

Przykładowe metody, sondy i detektory:

- cewka Rogowskiego (pomiar magnetyczne);
- sonda Langmuira (pomiar strumienia cząstek);
- interferometria, polarymetria, reflektometria (współczynnik refrakcji);
- LIDS, LIAS, LIBS (ang. *Laser Induced Desorption/Ablation/Breakdown Spectroscopy*), GEM (ang. *Gas Electron Multiplier*) (prom. EM związanych elektronów).



—
Rysunek 4.1: Cewka Rogowskiego [2]

Rozdział 5

Jądrowe reakcje fuzyjne

W plazmie o wystarczającej temperaturze może dojść do fuzji termojądrowej. Składniki plazmy mają wtedy na tyle wysoką energię kinetyczną, by pokonać barierę kulombowską i złączyć się w jedno jądro. Ze względu, że nawet dla dwóch protonów temperatura potrzebna do zajścia fuzji wynosi około 200 keV, pokonanie bariery odpychania elektrostatycznego odbywa się poprzez tunelowanie kwantowe. Dzięki zjawisku defektu masy z zajścia syntezy termojądrowej powstaje duża ilość energii.

Reakcje rozpatrywane w kontekście kontrolowanej fuzji termojądrowej są związane z izotopami wodoru ze względu na mniejsze wymagania niż reakcje zachodzące wewnątrz gwiazd. Są to:

- ${}^2_1\text{D} + {}^3_1\text{T} \rightarrow {}^4_2\text{He} + {}^1_0\text{n} + 17.6\text{ MeV}$;
- ${}^2_1\text{D} + {}^2_1\text{D} \rightarrow {}^3_2\text{He} + {}^1_0\text{n} + 3.27\text{ MeV}$;
- ${}^2_1\text{D} + {}^2_1\text{D} \rightarrow {}^3_1\text{T} + {}^1_1\text{H} + 4.03\text{ MeV}$;
- ${}^2_1\text{D} + {}^3_2\text{He} \rightarrow {}^4_2\text{He} + {}^1_1\text{H} + 18.3\text{ MeV}$.

Z tych czterech reakcji największe nadzieje wiąże się z fuzją deuteru i trytu, ponieważ ma z nich największy przekrój czynny na reakcję dla temperatur poniżej 300 keV z maksimum dla temperatury 64 keV. Deuter, zwany też ciężką wodą, jest wszechobecny w naturze i może być pozyskiwany z wody morskiej. Tryt, z drugiej strony, jest praktycznie niespotykany w przyrodzie. Aby go uzyskać w ilościach wystarczających do potrzeb energetyki jądrowej, przewiduje się wytwarzanie trytu poprzez reakcje z litem pod wpływem neutronów wewnątrz reaktora. Są to:

- ${}^6_3\text{Li} + {}^1_0\text{n} \rightarrow {}^4_2\text{He} + {}^3_1\text{T}$;
- ${}^7_3\text{Li} + {}^1_0\text{n} \rightarrow {}^4_2\text{He} + {}^3_1\text{T} + {}^1_0\text{n}$.

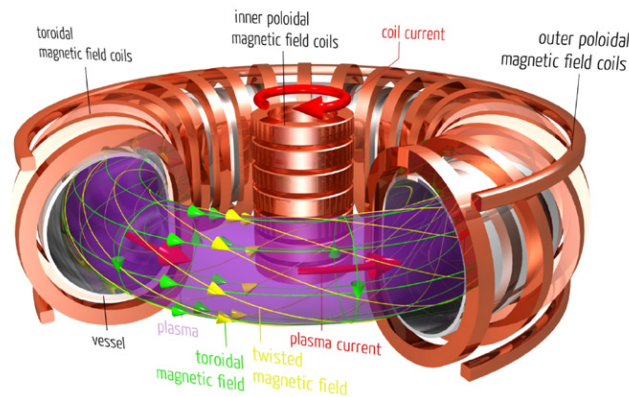
Rozdział 6

Reaktory

Mimo trwających kilkadziesiąt lat starań, nie udało się jeszcze uzyskać wydajnej energetycznie reakcji fuzyjnej. W toku badań wymyślono wiele potencjalnych sposobów na osiągnięcie tego celu, z mniejszym lub większym powodzeniem. Obecnie funkcjonuje kilkadziesiąt eksperymentalnych urządzeń fuzyjnych. W tym rozdziale przybliżone zostaną najważniejsze z nich.

6.1 Tokamak

Tokamaki (ros. *Toroidalnaja Kamiera s Magnitnymi Katuszkami*) jest chyba najślawniejszym typem reaktora termojądrowego. Koncepcja sięga 1950 roku i opiera się na magnetycznym uwięzieniu plazmy. Składa się z toroidalnych i poloidalnych cewek formujących plazmę na kształt torusa.



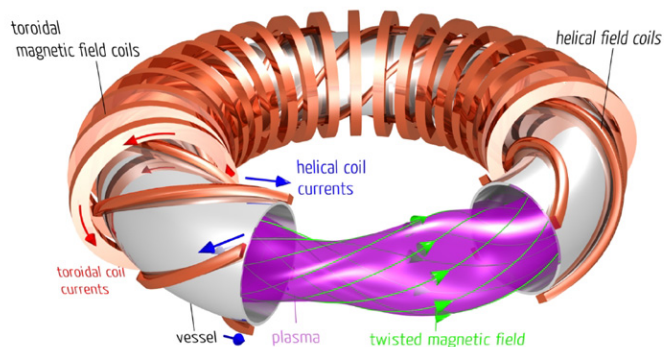
Rysunek 6.1: Schemat tokamaka [3]

Największym obecnie tokamakiem na świecie jest JET (ang. *Joint European Torus*) znajdujący się w Wielkiej Brytanii. Innymi dużymi tokamakami są francuski Tore Supra, niemiecki ASDEX Upgrade czy japoński

JT-60. Obecnie we Francji w ramach międzynarodowej współpracy budowany jest ITER (ang. *International Thermonuclear Experimental Reactor*, łac. droga), który będzie największym tokamakiem na świecie i pierwszym reaktorem mającym produkować więcej energii niż jest zużywana, tym samym zostając drogą do pierwszych elektrowni termojądrowych. Pierwszą demonstracyjną elektrownią fuzyjną ma zostać następca ITERa, DEMO (ang. *Demonstration Power Plant*).

6.2 Stellarator

Innym typem reaktora wykorzystującym więzienie magnetyczne jest Stellarator, którego koncepcja została wysunięta w latach 50. ubiegłego wieku. Stellaratory również tworzą toroidalną plazmę, lecz ich budowa powoduje, że nie ma prądu plazmy (ang. *plasma current*), a więc i powiązanych z nim niestabilności, a także możliwa jest dłuższa praca. Ich budowa jest jednak bardziej skomplikowana od relatywnie prostych tokamaków, lecz od pewnego czasu trwają wznowione badania nad tym typem reaktora.

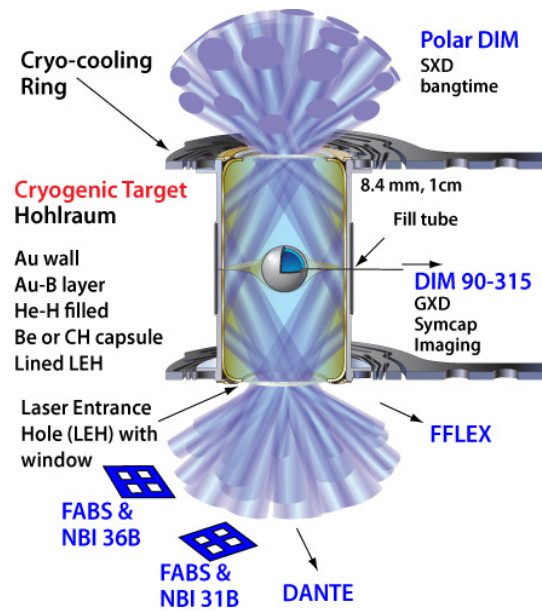


Rysunek 6.2: Schemat stellaratora [4]

Najważniejszymi eksperymentami są niemiecki Wendelstein 7-X, amerykański HSX oraz japoński LHD.

6.3 Laserowy

Innym podejściem do syntezy termojądrowej jest doprowadzenie do warunków fuzji poprzez inercyjne ściśnięcie plazmy za pomocą laserów. Silne wiązki laserowe uderzają bezpośrednio w małe kapsuły z paliwem lub w ścianki specjalnych pojemników, tzw. *hohlraum*, z których powstaje wtórne promieniowanie ściskające paliwo.



Rysunek 6.3: Schemat hohlraum z paliwem [2]

Obecnie najważniejszymi projektami tego typu są europejski HiPER, francuski LMJ oraz amerykański NIF.

Bibliografia

Źródła informacji:

- <http://www.thefreedictionary.com/plasma>;
- <http://books.google.pl/books?id=VcueZlunrbcC>;
- M. Kubkowska, P. Gąsior. Skrypt do wykładu „Wstęp do fizyki plazmy i energetyki jądrowej”.
- materiały do wykładu Thermonuclear Synthesis

Źródła rysunków:

- 1 http://en.wikipedia.org/wiki/Joint_European_Torus#mediaviewer/File:JointEuropeanTorus_internal.jpg
- 2 materiały do wykładu Thermonuclear Synthesis
- 3 http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/c/cb/Tokamak_%28scheme%29.jpg
- 4 http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/6/63/Classical_stellarator_%28scheme%29.jpg