

# Energetyka fuzyjna

Autor: Jakub Czerniawski

Fizyka komputerowa, rok IV, nr indeksu: 274370

Praca zaliczeniowa z przedmiotu Metody i Techniki Jądrowe

Rok akademicki 2018/19

## Spis treści

1. Teoria
  - 1.1 Plazma
  - 1.2 Fuzja
  - 1.3 Energetyka fuzyjna
  
2. Energetyka fuzyjna
  - 2.1 Obecny stan rzeczy – rekordy i najważniejsze istniejące ośrodki fuzyjne
  - 2.2 Planowany rozwój
  - 2.3 Dezinformacja publiczna – „fake news”
  
3. Bibliografia i referencje

# 1. Teoria

## 1.1 Plazma

Plazma, zwana niekiedy czwartym stanem skupienia materii – jest to bardzo silnie zjonizowana materia przypominająca gaz. Zawiera w sobie naładowane elektrycznie swobodne cząstki, jednak jako całość jest obojętna elektrycznie.

Plazmę można podzielić na 3 typy:

1. Plazma gorąca – najbardziej popularna we wszechświecie widzialnym forma materii [1] będąca budulcem gwiazd. Aby zaistniała potrzebna jest bardzo wysoka temperatura i gęstość materii, z której się składa.  
Tworzą ją całkowicie zjonizowane jądra i niezwiązane elektrony.
2. Plazma zimna – to typ plazmy, który może zaistnieć w mniej ekstremalnych warunkach – nie jest potrzebna ekstremalnie wysoka temperatura i ciśnienie. Tego typu plazma jest wytwarzana przez większość urządzeń zbudowanych przez człowieka, innym przykładem jej występowania są pioruny.  
W tym typie plazmy jonizacja jest tylko częściowa – atomy są odarte tylko z zewnętrznych powłok elektronowych.
3. Plazma wyładowania pierścieniowego – określenie to wprowadził polski fizyk prof. Henryk Zbigniew Wrembel. Ten typ plazmy występuje w obniżonym ciśnieniu (rzędu 100 Pa), dzięki wpływowi przemiennego pola elektrycznego (o częstotliwości rzędu 100 MHz).

Inny podział mówi o plazmie nisko- i całkowicie zjonizowanej (ang. fully ionized). Takie rozróżnienie wiąże się z wartością zwaną stopniem jonizacji opisaną wzorem (1):

$$\alpha = \frac{n_j}{n_j + n_n} \quad (1)$$

gdzie  $n_j$  oznacza gęstość jonów, a  $n_n$  – gęstość neutralnych elektrycznie jąder.

Wbrew mylącej nazwie – plazma zwana całkowicie zjonizowaną jest klasyfikowana jako taka, kiedy częstotliwość zderzeń jon-elektron jest większa od częstotliwości zderzeń elektronu z cząstką neutralną (atomem niezjonizowanym), co przy szczególnych warunkach może zachodzić nawet przy zaledwie 0,01% jonizacji [2].

Wartą nadmienia jest też plazma astrofizyczna, z której zbudowane są obszary międzygwiazdne. Klasyfikacja, której twórcami byli Hannes Alfvén i Carl-Gunne Fälthammar dzieli plazmę w kontekście kosmicznym na trzy kategorie (podane na następnej stronie):

1. O wysokiej gęstości –  $\lambda \ll \rho$ ; do tego typu plazmy można zaklasyfikować wnętrza gwiazd, słoneczne fotosfery
2. O średniej gęstości –  $\lambda \ll \rho \ll l_c$  – do tego typu plazmy można zaklasyfikować koronę słoneczną i przestrzeń międzygwiazdową.
3. O niskiej gęstości –  $l_c \ll \lambda$  – do tego typu plazmy można zaklasyfikować magnetosferę podczas zaburzeń magnetycznych i przestrzeń międzyplanetarną.

Gdzie:

$\lambda$  – Średnia droga swobodna,  $\rho$  – promień Larmora elektronu,

$l_c$  – długość charakterystyczna

Wspomniana droga swobodna jest to odległość przebyta pomiędzy kolejnymi zderzeniami.

Promień Larmora jest to promień toru, po którym poruszają się cząstki naładowane w danym jednorodnym polu magnetycznym

### Długość Debye'a

Jednym z najważniejszych parametrów plazmy jest długość Debye'a – wartość charakterystyczna dla plazmy i elektrolitów, będąca miarą zasięgu wpływu pola. Wraz z każdą kolejną długością Debye'a potencjał elektryczny maleje  $e$ -krotnie, gdzie  $e$  jest stałą Eulera. Wielkość ta wyznacza także odległość, w której quasi neutralność plazmy (jej neutralność jako całości, lecz nie jej części składowych) nie jest zachowana, wyznacza ona średnią odległość od sąsiadów o ładunkach różnoimiennych.

Wielkość ta jest także związana z tzw. ekranowaniem elektrycznym czyli w przypadku plazmy – otaczaniem ładunków jednoimiennych przez ładunki przeciwnoimienne – zjawisko takie spowodowane jest dążeniem plazmy do zniwelowania pola cząstek poprzez przykrycie go polem cząstek o znaku przeciwnym

Powoduje to układanie się cząstek o tych samych znakach na okręgu o promieniu równym długości Debye'a zwanym z tego powodu promieniem Debye'a.

Długość Debye'a można wyznaczyć za pomocą wzoru (2):

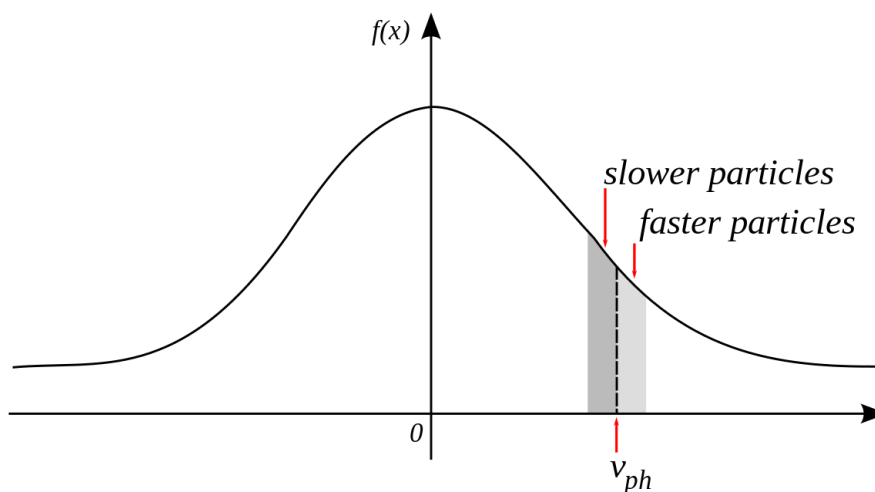
$$\lambda_D = \sqrt{\frac{\varepsilon_0 k_B / q_e^2}{\frac{n_e}{T_e} + \sum_{ij} j^2 n_{ij} / T_i}} \quad (2)$$

gdzie  $\epsilon_0$  – przenikalność dielektryczna próżni;  $k_B$  – stała Boltzmanna;  $q_e$  – ładunek elektronu;  $T_e$  – temperatura elektronów;  $T_i$  – temperatura jonów;  $n_e$  – gęstość elektronów;  $n_{ij}$  – gęstość atomów  $i$ -tego typu z dodatnim jonowym ładunkiem  $j q_e$ .

## Tłumienie Landau'a

Tłumienie Landau'a jest to efekt, który zachodzi, gdy prędkość cząstek plazmy jest zbliżona do prędkości fazowej fali elektromagnetycznej (E-M) przez nią przechodzącej. W takim wypadku cząstki plazmy rezonują z przechodzącą falą odbierając (jeśli mają energię niższą od niej) lub dodając (dla energii wyższych) jej energię – synchronizując się do energii fali. Jeżeli dla danej prędkości fali zbocze rozkładu Maxwellowskiego plazmy jest malejące, wtedy więcej będzie cząstek o zbliżonej energii mniejszej niż energia cząstek fali. Tym samym więcej cząstek będzie przyspieszanych, niż spowalnianych przez taką falę. Zatem energia cząstek plazmy będzie rosła – energia fali będzie maleć, czyli fala będzie tłumiona. W przeciwnym przypadku – gdy zbocze rozkładu jest rosnące zajdzie odwrotny efekt i to fala będzie wzmacniana kosztem energii oddanej przez plazmę.

Rys. 1. Przypadek tłumienia fali – zbocze opadające [3]



## 1.2 Fuzja

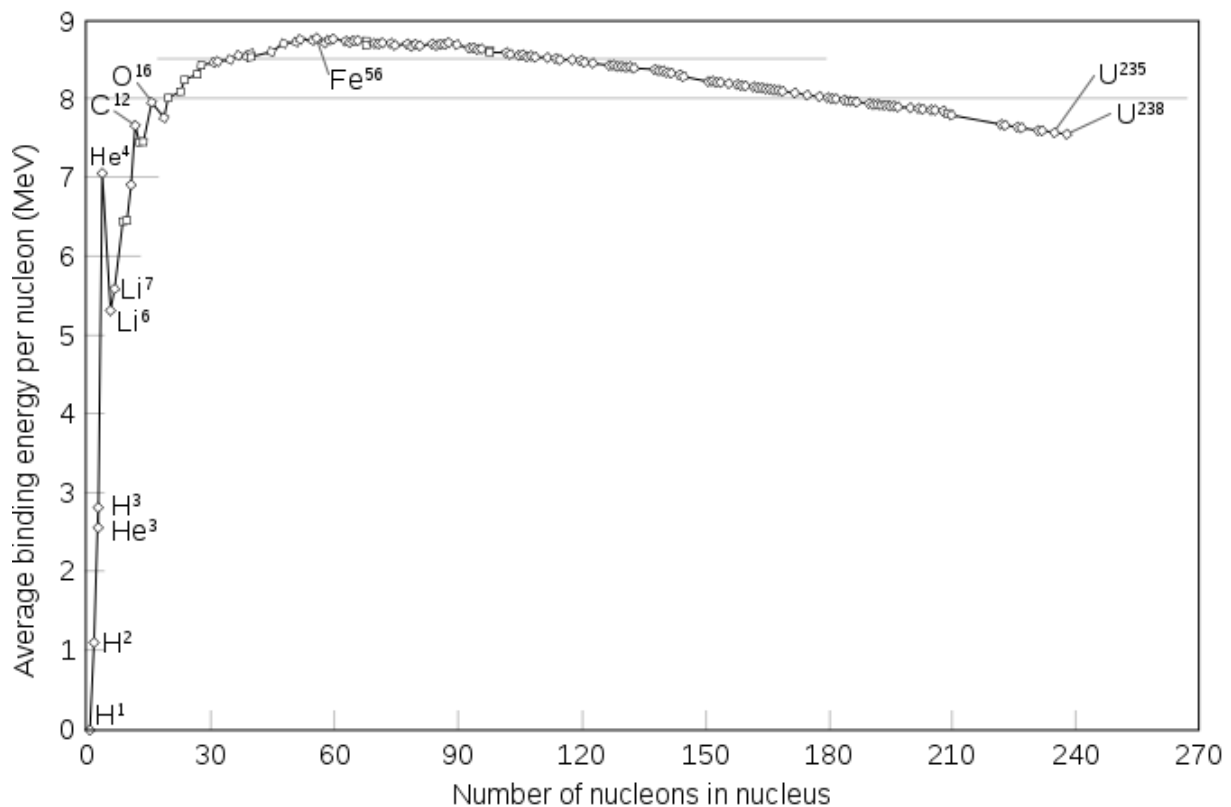
Reakcja fuzji jądrowej zwana też reakcją syntezy jądrowej lub reakcją termojądrową polega na połączeniu dwóch lżejszych jąder w jedno cięższe, z ew. obecnością innych produktów reakcji (cząstek elementarnych lub cząstek alfa). Reakcja fuzji może być endoenergetyczna, gdy po złączeniu dwie produkty reakcji mają mniejszą masę spoczynkową niż substraty. Aby taki efekt uzyskać musi wzrosnąć energia wiązania przypadająca na jeden nukleon, co zachodzi tylko dla cząstek lżejszych od żelaza ( $Fe_{56}$ ), ze względu na fakt, iż wyznacza ono maksimum tejże energii wiązania na nukleon. Im większa różnica między energiami wiązań między substratami, a

produktami reakcji, tym większa możliwa do uzyskania energia.

Przedstawiony na następnej stronie, na rysunku 2 rozkład energii wiązania na nukleon wynika z faktu, iż owa energia zawiera w sobie dwie składowe – sił kulombowskich i sił jądrowych (będących szczególnym przypadkiem oddziaływań silnych). Dla dużych jąder (większych od wspomnianego żelaza 56) ze względu na krótki zasięg oddziaływań silnych tracą one na znaczeniu, zatem energia wiązania spada. Efekt ten jest też wzmacniany przez większe zagęszczenie protonów w cięższych jądrach, a wraz z nim – zwiększenie oddziaływań kulombowskich, które rozpychają jądra.

Zależność między liczbą atomową, a energią wiązania przypadającą na jeden nukleon jest przedstawiona dokładniej na rys. 2:

Rys. 2. Rozkład energii wiązania na nukleon w zależności od liczby nukleonów w jądrze [4]



Reakcja fuzji jest – podobnie jak towarzyszący jej stan plazmy – bardzo rozpowszechniona we wszechświecie – to właśnie ona jest siłą napędową gwiazd. Aby reakcja taka zaszła potrzebna jest ogromna ilość energii, by rozprężyć cząstkę do wystarczających prędkości, by były w stanie przebić się przez barierę potencjału kulombowskiego na tyle daleko by wejść w zasięg oddziaływania silnego drugiej cząstki. Do tego stanu taki trzeba utrzymać na tyle długo, by efekt tunelowania – przechodzenia przez barierę potencjału większą od energii cząstki – zdążył zaistnieć.

## 1.3 Energetyka fuzyjna

W trakcie fuzyji uzyskana energia jest w stanie znacznie przekroczyć energię potrzebną do osiągnięcia odpowiednich warunków, by fuzyję utrzymać. Tak więc teoretycznie pozwala to utrzymywać reakcję przekierowując uzyskaną energię w następane reakcje i uzyskiwać nadwyżkę energii. Dla energetyki fuzyjnej bardzo istotnym jest właśnie taki proces – uzyskiwanie większej ilości energii z fuzyji, niż ta włożona do podtrzymania jej – otrzymanie dodatniego bilansu energetycznego.

Ważną rolę w określaniu efektywności energetycznej pełnią kryteria Lawsona. W swojej pracy [5] Lawson rozważa dwa typy układów – zamknięte, gdzie produkty reakcji pozostają w układzie dalej go napędzając, oraz pulsacyjne – z całkowitą ucieczką poza układ produktów reakcji w każdym cyklu. Do obu tych typów stosuje się jednak te same kryteria.

Pierwotnie zaproponowane przez Lawsona kryteria opierały się na gęstości cząstek  $n_e$  i stałej czasu uwięzienia (ang. confinement time)  $\tau$ , które dla warunków stacjonarnych (zmiana pracy w czasie  $\left[\frac{dw}{dt}\right] = 0$ ) jest opisane wzorem (3):

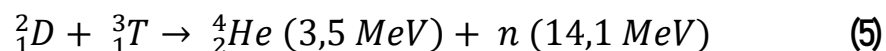
$$\tau = \frac{W_p}{P_{loss}} \quad (3)$$

gdzie  $W_p$  jest gęstością energii plazmy (ilością energii na jednostkę przestrzeni), a  $P_{loss}$  wskaźnikiem straty energii na jednostkę przestrzeni.

Kryterium Lawsona wynika z faktu, iż aby uzyskać dodatni bilans potrzeba spełnić warunek zapisany jako wzór (4):

$$f \cdot E_f \geq P_{loss} \quad (4)$$

gdzie  $f$  jest ilością reakcji w jednostce objętości w czasie, a  $E_f$  energią wydzieloną podczas jednej reakcji fuzyji (dla reakcji deuter-tryt jest to 17,6 MeV), co przedstawia wzór (5):



Gdzie D jest symbolem deuteru, T trytu, He helu, a n symbolizuje neutron, zaś wartości energii podane w nawiasach – wyprodukowaną energię kinetyczną produktów

Teoretycznie można uzyskać dodatni bilans energii spełniając warunek ze wzoru (6):

$$n_e \tau \geq 10^{20} \frac{s}{m^3} \quad (6)$$

dla reakcji deuter-tryt, dla optymalnej temperatury około 26 keV ( $\sim 3 \cdot 10^8$  K).

Późniejsze analizy doprowadziły jednak do wniosku, że skuteczniej będzie stosować produkt potrójny (ang. triple product) składający się z gęstości  $n_e$ , stałej czasu uwięzienia  $\tau$  i temperatury  $T$ , który można opisać wzorem (7):

$$n_e \tau T \geq 3 \cdot 10^{21} \text{keV} \frac{\text{s}}{\text{m}^3} \quad (7)$$

dla reakcji deuter-tryt, dla optymalnej temperatury około 14 keV ( $\sim 1,5 \cdot 10^8$  K).

W pracy Lawson pomija efekty związane z promieniowaniem wynikającym z ruchu spiralnego elektronów, a także spadku przewodnictwa (ang. conduction loss), które realnie są znaczną przeszkodą, tak więc o ile spełnienie podanych przez niego kryteriów jest konieczne, o tyle nie jest, ze względu na wspomniane straty, wystarczające.

Ważną stałą jest także współczynnik wzmocnienia mocy (ang. Power Amplification Factor) opisany wzorem (8):

$$Q = \frac{P_f}{P_h} \quad (8)$$

Gdzie  $P_f$  jest mocą reaktora fuzyjnego, a  $P_h$  jest mocą potrzebną do ogrzewania reaktora, by utrzymać fuzję

Dwie wartości  $Q$  są kluczowe:

$Q=1$   $\rightarrow$  będące punktem przelomowym dla którego zachodzi stan zrównowazony (ang. breakeven), gdzie energia potrzebna do ogrzania reaktora jest równoważona przez energię uzyskaną z fuzji, tak więc jest stanem określonym przez kryterium Lawsona.

$Q=\infty$   $\rightarrow$  zachodzące dla  $P_h=0$ , będące punktem dla którego zachodzi stan zapłonu (ang. ignition), gdzie nie jest potrzebne dokładanie energii w celu ogrzania reaktora.

Ważne jest odnotowanie, że  $QNE$  jest bilansem energetycznym ponieważ odnosi się tylko do balansu między zewnętrznym ogrzewaniem a energią fuzji – nie uwzględnia strat na ogrzewaniu ścian reaktora, utrzymania pól magnetycznych itp. Przewidywana wartość  $Q$  potrzebna do uzyskania dodatniego bilansu energii wynosi przynajmniej 5 i taka wartość bywa nazywaną inżynierskim breakeven.

Spśród różnych typów reaktorów fuzyjnych zdecydowanie najpopularniejsze (ze względu na najlepsze wyniki) są tokamaki (schemat na kolejnej stronie, na rys. 3), składające się z komory próżniowej o toroidalnym kształcie otoczonej cewkami tworzącymi toroidalne pole magnetyczne. W połączeniu z cewkami umieszczonymi wewnątrz otworu toroidu, które tworzą pole poloidalne uzyskuje się śrubowe pole magnetyczne. Służy ono do rozpędzania plazmy, i nadawania jej wysokiej energii – wykorzystując tłumienie Landau'a dla przypadku zbocza opadającego (rys. 2). Odpowiada ono także za jonizację gazu w celu uzyskania plazmy, co następuje dzięki indukcji prądu wynikającej z obecności wspomnianego śrubowego pola.

Oprócz tych cewek umieszcza się także zewnętrzne magnesy poloidalne mające na celu

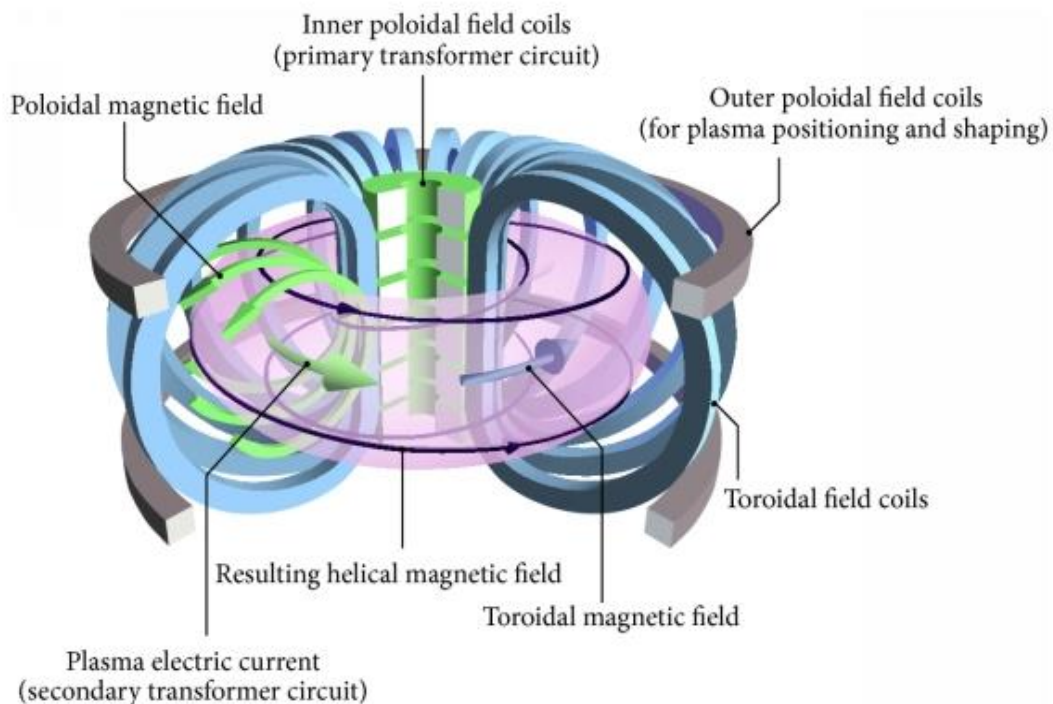


formowanie i pozycjonowanie plazmy.

Podstawową reakcją wspólną dla wszystkich typów reaktorów jest docelowo synteza deuteru i trytu (obecnie w niewielu reaktorach ze względu na problematyczność przechowywania trytu, w pozostałych jest stosowana mniej efektywna fuzja deuteru z deuterem), której produktem jest hel i neutron oraz 17,6 MeV energii w postaci energii kinetycznej (co zostało przedstawione we wzorze (5)).

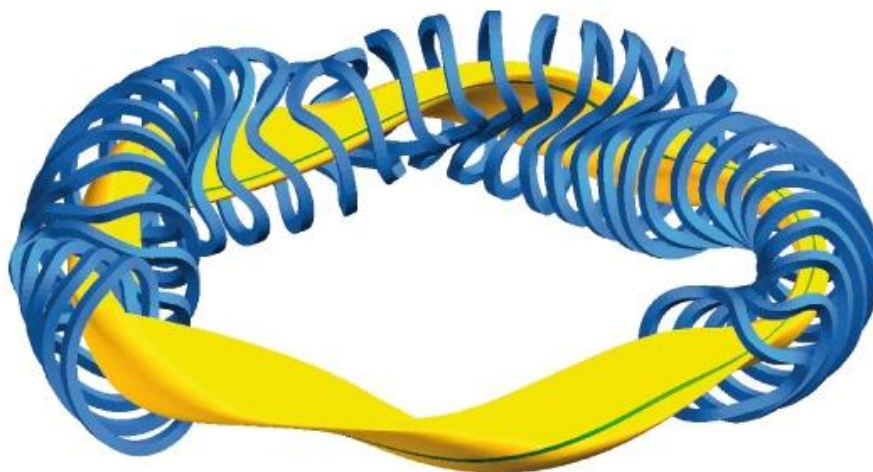
Tak uzyskane ciepło docelowo ma być wykorzystane do podgrzewania pary, która zostanie wykorzystana do obracania turbiny tak, jak w klasycznym silniku parowym

Rys. 3. Szkic budowy tokamaka [6]



Drugim, nie tak popularnym, ale wciąż liczącym się typem reaktora jest stellarator, czyli reaktor, który kształtem przypominający kilkakrotnie skręconą wstęgę Möbiusa otoczoną cewkami o podobnym kształcie. Ten typ reaktora powstawał, by uniknąć tworzenia się niestabilności w plazmie, które pojawiają się w reaktorach o kształcie toroidalnym

Rys. 4. Schemat stellaratora [7]



Znaczną zaletą energetyki fuzyjnej jest fakt, iż jest ona wysoce ekologiczna – deuter, który jest paliwem dla reakcji fuzyjnych można uzyskiwać z wody morskiej[8], tak samo jak lit, który za pomocą reaktorów neutronowych można przekształcić w tryt[9].

## Energetyka fuzyjna

### 21 Obecny stan rzeczy – rekordy i najważniejsze istniejące ośrodki fuzyjne

Wobecnej chwili znajdujemy się w historycznym momencie, gdy technologia związana z energetyką fuzyjną przechodzi wyjątkowo dynamiczny rozwój. W ciągu ostatniego dziesięciolecia kluczowe różne rekordy związane z działalnością reaktorów fuzyjnych zostały wielokrotnie pobite, a wydajność reaktorów fuzyjnych już w latach 60-90 wzrosła ponad 10 000-krotnie[10].

Maksymalna otrzymana w reaktorze temperatura jonów osiągnęła poziom około  $5 \cdot 10^8$  K[11] w japońskim reaktorze JT-60, czyli osiągnęła, a nawet kilkakrotnie przekroczyła już optymalną temperaturę dla fuzyji deuteru i trytu ( $1,5 \cdot 10^8$  K). W tym samym reaktorze osiągnięto także największą gęstość cząstek i najdłuższy czas uwięzienia, a w efekcie maksymalny produkt potrójny, który wyniósł  $1,53 \cdot 10^{21} \text{ keV} \frac{\text{s}}{\text{m}^3}$  [12]. Te wyniki są szczególnie zadziwiające ze względu na ich uzyskanie w latach 90.

Maksymalny uzyskany czas utrzymania plazmy (który jest problematycznym czynnikiem ze względu na rozgrzewający się układ) do niedawna wynosił 6 minut i 30 sekund[13], co zostało uzyskane we Francuskim reaktorze WEST (dawniej Tore-Supra), jednak w 2015 roku tokamak ST-25 znacząco podbił poprzeczkę osiągając wynik 29 godzin! Osiągnął to dzięki nowemu typowi magnesów z nadprzewodników wysokotemperaturowych opisanych w dalszej części pracy [22 Planowany rozwój, SPARC].

Maksymalny czas utrzymania plazmy w stanie wysokiej gęstości to 102 sekundy[14] w chińskim reaktorze EAST.

Maksymalny otrzymany poziom  $Q$  wyniósł 0,67[15] w europejskim reaktorze JET na terenie Anglii, a także rekordowy poziom mocy fuzji na poziomie 16 MW[16]; ten sam reaktor przystąpił się na drodze do znalezienia sposobu na kontrolowanie niestabilności w plazmie[17], jednak japoński reaktor JT-60 osiągnąłby poziom 1,25, gdyby był wyposażony w technologię pozwalającą utrzymać tryt[18, 19].

Zestawienie różnych, mniej znaczących rekordów tokamaków zostało podane w przypisie[20].

Warty wspomnienia jest też niemiecki stellarator (w odróżnieniu od pozostałych rekordzistów - tokamaków) Wendelstein 7-X, który jako pierwszy stellarator osiągnął energię plazmy na poziomie MJ i zdołał ją utrzymać przez 100 sekund, a także otrzymał produkt potrójny na poziomie

$5 \cdot 10^{19} \text{ keV } \frac{\text{s}}{\text{m}^3}$  [21], co stanowi rekord dla stellaratorów.

Tak więc w chwili obecnej największą skutecznością cieszą się reaktory typu tokamak, jednak wyniki otrzymane przez stellarator Wendelstein 7-X przywracają do łask także ten typ reaktorów.

Innym ośrodkiem nie bijącym rekordów, ale wartościowym ze względu na odmienną technologię, którą prezentuje jest Narodowy Zakład Zapłonu (ang. National Ignition Facility) – reaktor, którego działanie jest oparte na silnym impulsie laserowym. W tym reaktorze drobną ampułkę zawierającą paliwo w postaci gazowej lub lodowej mieszaniny deuteru i trytu oświetla równomiernie światło 192 laserów o łącznej mocy sięgającej 500 TW w szczytowych momentach. Doprowadza to paliwo jądrowe do temperatury kilku milionów K i ciśnienia 50 megabarów w szczytowych momentach, co jednak pozwala na zaledwie około 10–30 % planowanej wydajności, potrzebnej do zajścia zapłonu według książki *An Assessment of the Prospects for Inertial Fusion Energy*[22] lub poniżej 1% według artykułu opublikowanego w *ScienceMag*[23].

W 2009 roku udało się uzyskać stan w którym energia uzyskana przez reakcje fuzji była wyższa od zaabsorbowanej energii laserowej, jednak nie można tego zjawiska określić jako mitycznego breakeven, gdyż całkowita energia lasera – źródła energii – była znacznie większa.

## 2.2 Planowany rozwój

Ze względu na wielką skalę przedsięwzięcia jakim jest budowa reaktora fuzyjnego – czas potrzebny od początku procesu jego powstawania do pierwszego uruchomienia liczony jest w dziesięcioleciach. Nawet wprowadzanie modyfikacji często planowane jest na kilkanaście lat w przód. W tej pracy zdecydowano się wyróżnić trzy planowane modernizacje.

## JT-60 → JT-60SA

Rys. 5. Zdjęcie reaktora JT-60SA w trakcie ostatnich modernizacji [24]



Japoński reaktor, który pojawia się w zestawieniu rekordzistów wielokrotnie jest modernizowany oficjalnie od 2013 roku, a pierwsze uruchomienie po ulepszeniu jest przewidziane na wrzesień 2020 roku. Ma ono na celu, podobnie jak i większości pozostałych tokamaków, w znacznym stopniu przyczynienie się rozwoju technologii, który ma wspomóc kolejne dwa planowane projekty [25] – ITER i DEMO, opisane w dalszej części pracy [2.2 Planowany rozwój]. W kontekście reaktora DEMO japoński tokamak ma przysłużyć się w określeniu realistycznych wartości parametrów dla tego detektora poprzez osiągnięcie możliwie wysokich kluczowych parametrów. Na tej podstawie zostaną zaplanowane (z uwzględnieniem racjonalnego marginesu błędów) parametry dla reaktora DEMO.

Kluczowym celem rozwoju jest dokładniej zoptymalizowanie na uzyskanie wysokiej stabilności i długiego czasu utrzymania plazmy, a także wysokiego parametru beta [26], który można opisać wzorem (9):

$$\beta = \frac{p}{p_{mag}} = \frac{nk_B T}{B^2/2\mu_0} \quad (9)$$

Gdzie  $p$  to ciśnienie plazmy,  $p_{mag}$  ciśnienie magnetyczne,  $n$  – gęstość cząstek,  $k_B$  – stała Boltzmana,

$T$  – temperatura,  $B$  – wartość wektora pola magnetycznego,  $\mu_0$  – stała magnetyczna próżni.

Ten parametr jest kluczowy dla efektywnej, kosztowej, kompaktowej fuzji, gdyż jest on ściśle związany z gęstością mocy fuzji.

## Wendelstein 7-X – faza 2

Rys. 6. Zdjęcie reaktora Wendelstein 7-X w trakcie konstrukcji [27]



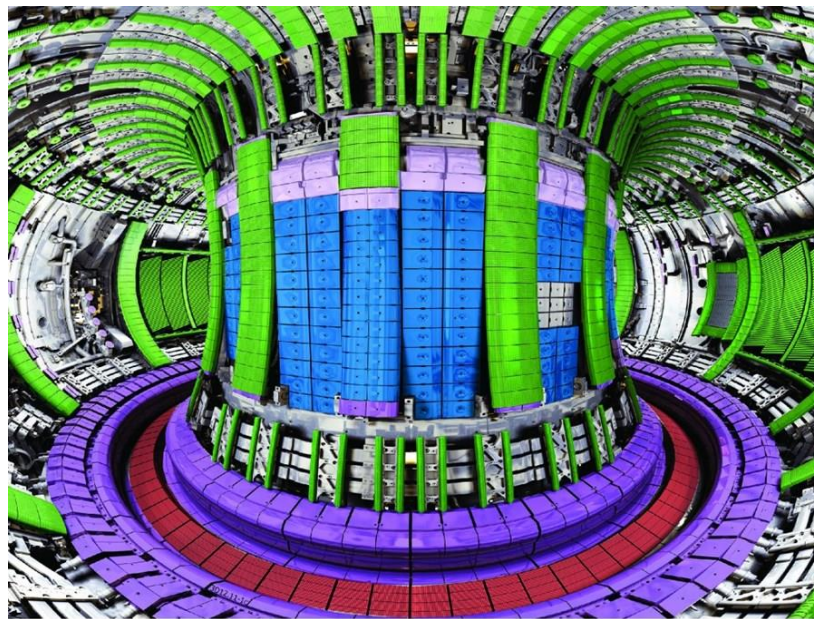


Ten wspomniany już wcześniej rekordzista stellaratorów funkcjonuje od niedawna (pierwsza faza działania przypada na 2015 rok), tak więc właściwie nie osiągnął jeszcze pełni swoich pierwotnie planowanych możliwości. W tym roku planowane jest jego wejście w drugą fazę działania, której celem jest uzyskanie długotrwałego trybu pracy – warunków, które pozwalałyby na utrzymanie plazmy przez 30 minut, co byłoby znacznym krokiem w stronę nieograniczonego trybu pracy, która jest bardzo ważna dla przybliżenia realizacji elektrowni fuzyjnych.

Kolejnym aspektem już zaznaczonym w pracy są przyszłe obiekty, szczególnie ze względu na fakt, że dwa z nich jednoczą fizyków ze znacznej części świata i naukowy dorobek z większości wcześniej wspomnianych placówek i wielu innych jest przelewany w rozwiązania, które w tych dwóch projektach zostaną zaimplementowane.

# JET

Rys. 7. Widok wnętrza reaktora JET z pokolorowanymi elementami w zależności od materiału [28]



■ Beryllium    ■ CFC tungsten coated    ■ Inconel tungsten coated  
■ Tungsten    ■ Inconel beryllium coated

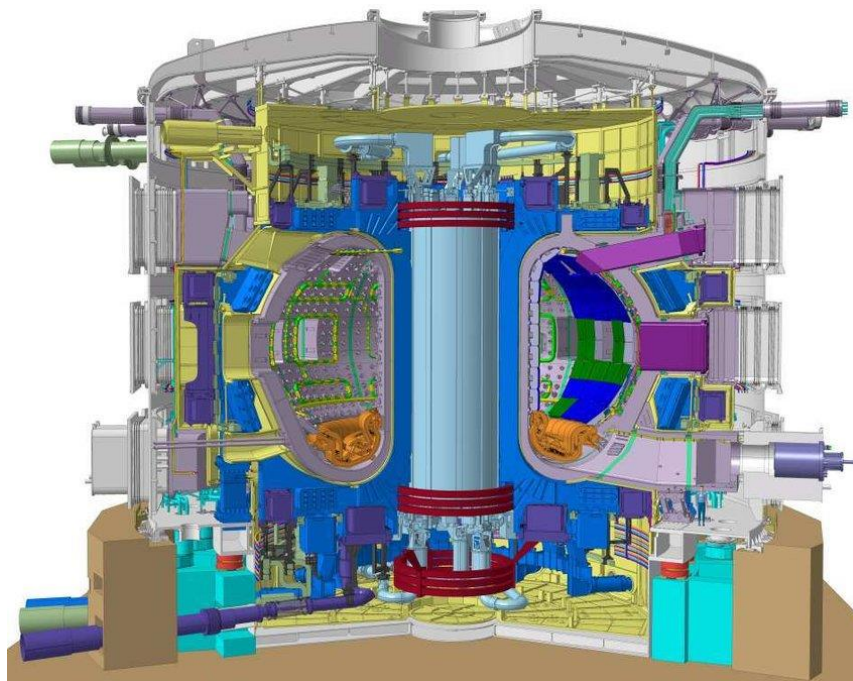
Reaktor, który jest obecnym rekordzistą w maksymalnej mocy i osiągniętej wartości współczynnika  $Q$  kończy w tym roku swój 5 letni kontrakt podpisany w lipcu 2014. Nowy plan eksperymentów, które mają być w nim przeprowadzone w 2019 roku miał być planowo „próbą generalną” związaną z budową reaktora ITER[29], co wiąże się z faktem że JET jako jedyny posiada takie samo środowisko materiałowe, jak planowane dla reaktora ITER<sup>30</sup>. Plan ten jednak stanął pod znakiem zapytania ze względu na Brexit, który, jeżeli się zrealizuje odłączyłby Wielką Brytanię od Euratomu, a także dopływu środków Unii Europejskiej[31].

## Planowane lub budowane reaktory

Spośród wielu reaktorów, będących w trakcie planowania lub budowy, w tej pracy zdecydowano się wyróżnić trzy, które będą najprawdopodobniej mieć największy wpływ na rozwój energetyki fuzyjnej.

# ITER

Rys. 8. Schemat reaktora ITER [32]



Rozwinięcie skrótu to International Thermonuclear Experimental Reactor, czyli Międzynarodowy Eksperymentalny Reaktor Termojądrowy. Jedną z kluczowych cech projektu jest zaznaczony w nazwie fakt, że na współpracę nad nim zdecydowały się wszystkie grające kluczową rolę w rozwoju fizyki fuzyjnej kraje – członkami ITER są:

Unia Europejska, USA, Rosja, Chiny, Japonia, Korea i Indie, tak więc projekt gromadzi kraje stanowiące około połowę ziemskiej populacji i ponad 85% PKB. Każde z państw członkowskich otrzymuje 100% dorobku naukowego wynikającego z projektu [33]. Wszystkie wspomniane wcześniej reaktory zostały stworzone przez jednego z członków projektu i dorobek naukowy z nich zostanie wykorzystany przy konstrukcji reaktora ITER.

Współpracownikami technicznymi projektu nie będącymi członkami są także Kazachstan i Australia. Oprócz tego podpisane jest ponad 40 umów kooperacyjnych z międzynarodowymi organizacjami, uniwersytetami i szkołami oraz laboratoriami narodowymi.

ITER to tokamak, który jest tworzony w Cadarache na terenie Francji. Ma on docelowo produkować 500 MW (czyli ponad 30-krotnie więcej niż poprzedni rekordzista – JET z wynikiem 16 MW) z 50 MW dostarczonej mocy. Osiągnięcie takiego wyniku niesło by ze sobą otrzymanie wartości  $Q$  na poziomie 10 (czyli ponad 15-krotnie więcej, niż poprzedni rekordzista – JET z wynikiem 0,67), co nie tylko pozwoliłoby przejść przez stan breakeven, ale także znacznie ponad granicę  $Q=5$ , a więc w efekcie powinno pozwolić na produkcję energii – kluczowy dla energetyki fuzyjnej dodatni bilans energetyczny.

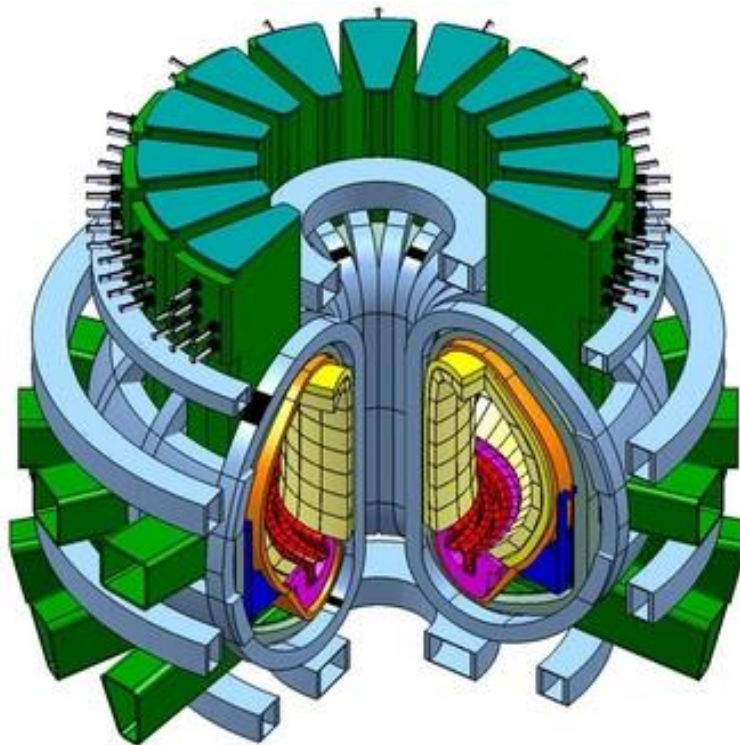


Mimo tak ambitnych planów ITER ma pozostać placówką w pełni naukową i nie jest planowane przeznaczenie go do użytku komercyjnego.

Projekt rozpoczął się w 2005 roku wraz z decyzją dotyczącą umieszczenia tokamaka we Francji, jednak pierwsze plany zostały ustalone w 1985 roku przez Ronalda Regana i Mkhaila Gorbaczowa na szczycie Genewskim. Konstrukcja budynku ruszyła w 2010 roku, zaś od 2015 transportowane są główne – największe części. W 2020 roku ma ruszyć zasadniczy montaż, zaś pierwsze planowane uruchomienie jest wyznaczone na rok 2025. Rozpoczęcie pracy w pełnej wydajności (operacji deuter-tryt) jest planowane na rok 2035.

## DEMO

Rys. 9. Schemat reaktora DEMO [34]



DEMOstration Power Plant – Demonstracyjna Elektrownia jest to projekt tokamaka, który ma czerpać z dorobku reaktora ITER i podnieść kluczowe parametry tak, by uzyskać wartość  $Q$  na poziomie około 50, a także ma być wedle założeń pierwszą (choć istnieją inne projekty, które planowa mają zostać zrealizowane wcześniej) komercyjną elektrownią fuzyjną lub bezpośrednim wzorem dla takich.

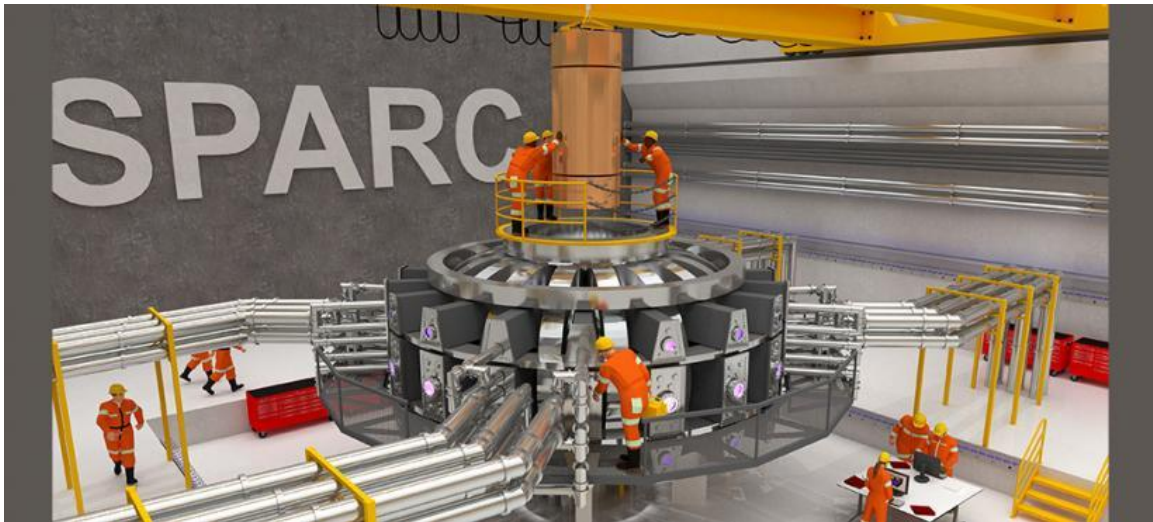
Planowo elektrownia ma dostarczać kilkaset MW mocy netto [35], a także ma być



samowystarczalna pod kątem zapotrzebowania na tryt[36] i zdolna do pracy przez dwie do czterech godzin lub nawet w trybie ciągłym  
Według planów DEMO ma być zdolna do pracy jako elektrownia w roku 2050.

## SPARC

Rys. 10. Proces budowy reaktora – grafika komputerowa [37]



SPARC to tokamak, którego konstrukcja jest zaplanowana przez Amerykański Commonwealth Fusion Systems (CFS) we współpracy z Massachusetts Institute of Technology (MIT), który warto jest wyróżnić ze względu na fakt, iż celuje on w wartość  $Q$  na poziomie 3, a ma znaczne szanse na powstanie zanim ITER będzie w pełni funkcjonalny, tak więc jest szansa, że stanie się on pierwszym reaktorem który przebije się przez punkt breakeven.

Tak wysoki wynik nie łączy się w przypadku tokamaka SPARC z wielkimi rozmiarami, gdyż tokamak ma mieć zaledwie 3.30 m średnicy[38]. W przypadku tego reaktora kluczową zaletą są znacznie silniejsze magnesy – z nadprzewodnika wysokotemperaturowego. Tego typu magnesy z tlenku baru miedzi itrowej (ang. Yttrium barium copper oxide [YBCO])[39] już w tym momencie, przy małych rozmiarach są w stanie generować pole magnetyczne o wartości 42T[40], czyli znacznie więcej, niż zaprojektowana wartość pola reaktora ITER – 5T.

Ne wykorzystanie magnesów typu YBCO przy trwającej już budowie reaktora ITER wynika z faktu dostosowania tych magnesów do użytku na potrzeby fuzji dopiero w ciągu ostatnich czterech-sześciu lat[41], czyli w momencie, kiedy postęp prac nad budową i kompleksowość planu tego reaktora była zbyt duża, by wprowadzać tak znaczące zmiany koncepcyjne.

Program jest też nastawiony na energetykę, raczej, niż rozwój technologii naukowej związanej z fuzją i, mimo wciąż obecnego zapotrzebowania na badania dotyczące magnesów i ich

zastosowania, snuje ambitne plany wybudowania funkcjonującej elektrowni fuzyjnej do roku 2033, czyli 15 lat od daty przedstawienia projektu[42], co jeżeli zostałoby zrealizowane wyprzedziłoby reaktor ITER w osiągnięciu dodatniego bilansu energetycznego.

Warto jeszcze przywołać jeszcze jeden reaktor, który podobnie jak SPARC mają ambitne plany prześcignąć ITER w uzyskaniu inżynierskiego breakeven – Chiński reaktor CFETR, którego planowana moc to GW a wartość Q – 12 [43].

## 23 „Fake news”

Energetyka fuzyjna, jako potencjalne źródło niemalże nieskończonej energii uzyskiwanej niewielkim kosztem doczekała się, jak wiele podobnych tematów, swoich odłamów pseudonaukowych, czy tych, które zdawały się być naukowe, ale po weryfikacji okazały się być dalekie od postulowanych osiągnięć. W tej pracy zdecydowano się przedstawić kilka z nich:

### Zimna fuzja

Bardzo popularnymi kilkakrotnie podnoszonym tematem w kontrowersyjnym podejściu do energetyki fuzyjnej jest zimna fuzja. Zwolnicy tej hipotezy postulują, że da się przeprowadzić fuzję „na zimno” – nie zapewniając wspomnianych wcześniej kryteriów Lawsona, a w szczególności nie zapewniając temperatury liczonej w milionach stopni, a przeprowadzić ją w temperaturze pokojowej. Sama idea sięga lat 20., a pierwszy raz termin zimnej fuzji pojawił się już w latach 50. na łamach czasopisma New York Times.

Najbardziej znanymi przedstawicielami tego podejścia byli Martin Fleischmann i Stanley Pons, i to dzięki nim temat zimnej fuzji został nagłośniony w końcówce lat 80. Byli oni autorami eksperymentu mianowanego od ich nazwisk eksperymentem Fleischmanna–Ponsa, w którym to za pomocą baterii elektrolitycznej skonstruowanej z użyciem palladu podgrzewano ciężką wodę (zawierającą duże ilości deuteru) za pomocą prądu generowanego przez tę baterię. Choć przez większość czasu temperatura utrzymywała się na poziomie 30°C, to w niektórych eksperymentach, w pewnych momentach odnotowano temperatury na poziomie 50°C, bez zmiany mocy podgrzewającej wodę, te temperatury miały się utrzymywać przez parę dni, co wskazywałoby na wydzielanie się nadmiarowego ciepła – dodatni bilans energetyczny.

Autorzy próbowali opatentować swój sposób uzyskania energii, jednak ze względu na ich niezdolność do określenia mechanizmu działania ich eksperymentu patent nie został im przydzielony.

Eksperyment został wielokrotnie przeprowadzany przez niezależne zespoły badawcze i zdecydowana większość nie uzyskała postulowanych przez Fleischmanna i Ponsa wyników. Jednakże dwa ośrodki naukowe zdawały się potwierdzać uzyskane wyniki – jeden (Georgia Institute of Technology) zaobserwował produkcję neutronów, która wskazywałaby na zajście fuzji, zaś drugi (Texas A&M University) – produkcję nadmiarowego ciepła. Z tego powodu, mimo, iż krytyka podejścia była bardzo stanowcza zyskało ono na tyle duży rozgłos, że zostało zaplanowane spotkanie naukowców z ówczesnym prezydentem, a na badania uniwersytet w Utah przeznaczył 25 milionów dolarów.

Badania te doprowadziły do spotkania Amerykańskiego Zgromadzenia Fizyków obierającego na temat przewodni zimną fuzję. Spotkanie przedstawiało wiele raportów dokumentujących brak możliwości powtórzenia otrzymanych przez Fleischmanna i Ponsa wyników i zakończyło się jednogłośnie (z wykluczeniem jednego głosu wstrzymanego) uznaniem pierwotnego postulatu Fleischmanna i Ponsa za martwy. Przez kolejne dwa lata kilka ośrodków kontynuowało badania, jednak żaden z nich nie otrzymał pozytywnych wyników i ostatecznie wszystkie wycofały się z badania tej gałęzi energetyki fuzyjnej.

Wciąż jednak pojedynczy naukowcy zajmują się tematem zimnej fuzji, która funkcjonuje pod zmienioną nazwą w kilku wersjach – Niskoenergetycznych Reakcji Jądrowych, Chemicznie Wspomaganych Reakcji Jądrowych itp.

## E-Cat

Rys. 11. Zdjęcie urządzenia ECAT HT [44]



Energy Catalizer to urządzenie powstałe w 2011 roku, którego autor Anrea Rossi postulował, że jest ono w stanie za pomocą rozgrzanego wodoru dostarczanego do proszku niklowego przeprowadzić reakcję fuzji, w której wyniku otrzymuje się miedź i nadwyżkę energii. Podobnie jak Fleischmann i Pons, tak i Rossi ubiegał się o patent, którego jednak nie otrzymał na terenie Ameryki ze względu na niezgodność z powszechnie uznanymi i akceptowanymi teoriami naukowymi. Nie przeszkodziło mu to jednak w uzyskaniu patentu na terenie Europy. Co ciekawe – z czasem udało mu się uzyskać patent na terenie USA jednak nie na urządzenie jako całość, a jedynie na część – grzałkę do cieczy, która według informacji na stronie jest kluczową częścią urządzenia E-Cat.

Wprzeciwieństwie do eksperymentów Fleischmanna i Ponsa – Rossi, jako jedyny posiadając urządzenie zdolne do przeprowadzenia reakcji, był jedynym który otrzymał taki wynik, ale prezentował swoje urządzenie publicznie. Pokazy te jednak były mało wiarygodne, a Rossi odmówił weryfikacji jego postulatu proponowanej przez Dicka Sitha, który oferował milion dolarów, jeżeli

E-Cat będzie funkcjonował tak, jak było to opisane przez twórcę, przy pomiarze przepływu prądu przez kabel przechodzący przez ziemię (który to przepływ nie był mierzony przez Rossiego podczas jego pokazów).

Poprawiona wersja E-Cat została udostępniona do niezależnych testów, jednak wciąż z pewną kontrolą Rossiego – to on wlewał paliwo, on włączał i wyłączał silnik, a także wydobywaniu zużytego paliwa. Badania rzeczywiście wykazały nadmiarowe ciepło nie do wyjaśnienia przez nienuklearne procesy, jednak kłóciło to się z faktem iż nie zaobserwowano promieniowania, które takim procesom powinno towarzyszyć, co więcej tego typu reakcja według uznawanych teorii powinna zachodzić dopiero w temperaturze, która przekracza temperaturę w jądrze gwiazd.

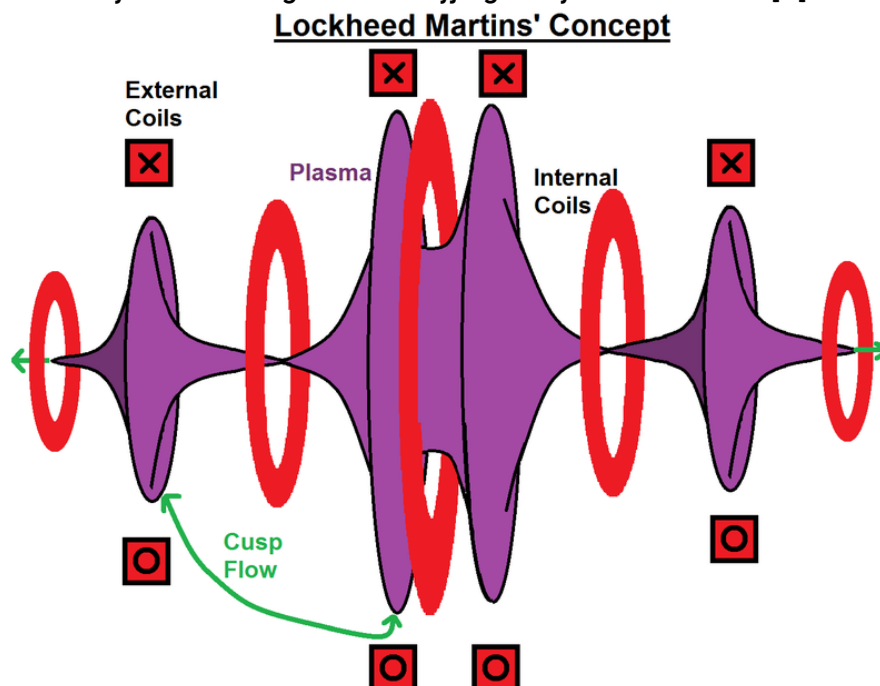
Historia związana z urządzeniem E-Cat zdaje się kończyć się na spółce Heat LLC, która zakupiła od Rossiego prawa do tejże technologii. Po upływie ponad roku Rossi pozwał spółkę o niezapłacenie 89 milionów dolarów związanych z testowaniem urządzenia, Heat LLC broniło się tym że przez ten czas nie byli w stanie odtworzyć rezultatów uzyskanych przez Rossiego. Sprawa została zamknięta w 2017 roku bez ujawnienia wyników.

Okazuje się jednak, że spółka Leonardo Corporation, której CEO jest Rosii wciąż prowadzi stronę internetową Ecat.com i sprzedaje kilka wersji urządzenia. Do jeszcze większej konsternacji prowadzi fakt, że na stronie umieszczony jest też certyfikat wydany przez SGS (jedną z największych firm zajmujących się inspekcją, weryfikacją i testowaniem oraz certyfikowaniem urządzeń) dotyczący urządzenia E-Cat[45], a także patenty Rossiego. Co ciekawe – na stronie przypisuje się własność praw intelektualnych do urządzenia E-Cat, jako wciąż należną spółce Leonardo Corporation[46].

O popularności urządzenia E-Cat, świadczy chociażby fakt ukazania się kilku [min. 47, 48, 49, 50] artykułów na Polskich stronach, które to strony jednak w większości są paranaukowe.

## Lockheed Martin – miniaturowy generator fuzyjny

Rys. 12. Schemat generatora fuzyjnego firmy Lockheed Martins [51]



Wspominane we wcześniejszej części pracy reaktory fuzyjne (z wyłączeniem opartego na nadprzewodnikach reaktora SPARC) mają rozmiary od około dwóch metrów do 8 metrów średnicy samego reaktora pomijając wszystkie dodatkowe układy związane z zasilaniem, chłodzeniem itp. Tak więc zajmują znaczną ilość miejsca. Co więcej wspomniany wcześniej ITER, który ma być pierwszym reaktorem, który uzyska dodatni bilans energetyczny, ma planowaną średnicę ponad 12 metrów, gdyż w tematyce generatorów fuzyjnych większa moc oznacza też większy rozmiar (ze względu na fakt, iż z dwukrotnym wzrostem rozmiaru linowego wiąże się 8-krotny wzrost objętości i związanego z nią ciepła uwięzienia). Tymczasem amerykański koncern zbrojeniowy Lockheed Martin postulował stworzenie reaktora, który zmieściłby się w samochodzie ciężarowym (o wymiarach około 1x2 metry)! Taki reaktor miał podobno produkować moc netto na poziomie 100 MW.

Rzeczywistość szybko zweryfikowała plany i z miniaturowego reaktora, którego masowa produkcja miała się rozpocząć w 2025 roku, koncern zmienił plany na reaktor większych rozmiarów – 7x18 metrów, zaś do roku 2025 projekt nawet nie zacznie się rozkręcać ze względu na fakt, iż cewki, które Lockheed planuje umieścić w swoim reaktorze, będą dostępne najprędzej wtedy [52].

Oczywiście zanim doszło do zmiany planów, polskie i zagraniczne fora i strony popularno-naukowe bardzo wychwalały reaktor Lockheeda, bez zauważalnej nuty sceptycyzmu [53, 54].

Ne mniej nawet taki planowany reaktor byłby znacznie tańszy w produkcji i docelowo miałby osiągać znacznie zbliżoną skuteczność do wspomnianego wcześniej reaktora ITER, który

powstaje przy współpracy największych potęg naukowych związanych z technologią fuzyjną, tak więc i taka wizja zdaje się mieć małe szanse na zrealizowanie, jednak jak pokazuje przykład tokamaka SPARC – nowa technologia potrafi wiele zmienić, więc nic nie jest pewne. Szczególnie zważywszy na fakt, iż, choć Lockheed nie planuje korzystać z magnesów borowych, to ma wizję nowego typu reaktora o kompletnie innej konstrukcji.

Ocenę utrudnia fakt, iż koncern nie chętnie dzieli się ze środowiskiem naukowym konkretnymi informacjami.

### 3. Bibliografia i referencje

#### Bibliografia

Poniższe źródła nie zostały ujęte w referencjach, ze względu na fakt, iż zostały wykorzystane w obszernych fragmentach tekstu, do których nie sposób jednoznacznie dodać referencji.

1. <https://pl.wikipedia.org/wiki> - różne artykuły, 03.2019
2. <https://en.wikipedia.org/wiki> - różne artykuły, 03.2019
3. <http://plazmowy-wszechswiat.shoutwiki.com/wiki/Plazma>, 03.2019
4. [http://plazmowy-wszechswiat.shoutwiki.com/wiki/Plazma\\_astrofizyczna](http://plazmowy-wszechswiat.shoutwiki.com/wiki/Plazma_astrofizyczna), 03.2019
5. Dominik Suszalski, <https://www.almukantarat.pl/wiedza/09plazma/>, 03.2019
6. Richard Fitzpatrick, <http://farside.ph.utexas.edu/teaching/plasma/Plasma.html/node86.html>, 03.2019
7. <https://www.scienceworldreport.com/articles/5763/20130323/lawson-criteria-make-fusion-power-viable-iter.htm>, 03.2019
8. Piotr Hytós, <http://atamedu.pl/index.php/technologie/technologie-przyszlosci/synteza-termojadrowa.html>, 03.2019
9. J. Ongena, <https://www.sif.it/media/204d06fb.pdf>, 03.2019
10. <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/NucEne/lawson.html>, 03.2019
11. <http://www-fusion-magnetique.cea.fr/gb/fusion/physique/lawson2.htm>, 03.2019
12. Chinese Academy of Sciences, <https://phys.org/news/2017-07-china-artificial-sun-world-steady-state.html>, 03.2019



13. Ecole Polytechnique Federale de Lausanne, <https://phys.org/news/2012-01-closer-nuclear-fusion.html?y>, 03.2019
14. Daniel Clery, <https://www.sciencemag.org/news/2013/10/fusion-breakthrough-nif-uh-not-really>, 03.2019
15. EUROfusion Consortium Research Institutions, <https://www.euro-fusion.org/programme/demo/>, 03.2019
16. Max-Planck-Gesellschaft, <https://www.ipp.mpg.de/16355/demo>, 03.2019

## Referencje

- 
- <sup>1</sup> DA Gurnett, A Bhattarjje, *Introduction to Plasma Physics: With Space and Laboratory Applications*, Cambridge Press syndicate of the University of Cambridge, 2005, s. 2
  - <sup>2</sup> B Chapman, *Glow Discharge Processes: Sputtering and Plasma Etching*, USA, John Wiley & Sons Inc.1980, s. 64
  - <sup>3</sup> [https://en.wikipedia.org/wiki/Landau\\_damping#/media/File:Maxwell\\_dist\\_res\\_partic\\_landau.svg](https://en.wikipedia.org/wiki/Landau_damping#/media/File:Maxwell_dist_res_partic_landau.svg), 03.2019
  - <sup>4</sup> [https://en.wikipedia.org/wiki/File:Binding\\_energy\\_curve\\_-\\_common\\_isotopes.svg](https://en.wikipedia.org/wiki/File:Binding_energy_curve_-_common_isotopes.svg), 03.2019
  - <sup>5</sup> <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/0370-1301/70/1/303/pdf>, 03.2019
  - <sup>6</sup> [https://en.wikipedia.org/wiki/Tokamak#/media/File:Schematic\\_of\\_a\\_tokamak\\_chamber\\_and\\_magnetic\\_profile.jpg](https://en.wikipedia.org/wiki/Tokamak#/media/File:Schematic_of_a_tokamak_chamber_and_magnetic_profile.jpg), 03.2019
  - <sup>7</sup> [https://en.wikipedia.org/wiki/Stellarator#/media/File:W7X-Spulen\\_Plasma\\_blau\\_gelb.jpg](https://en.wikipedia.org/wiki/Stellarator#/media/File:W7X-Spulen_Plasma_blau_gelb.jpg), 03.2019
  - <sup>8</sup> [https://en.wikipedia.org/wiki/Heavy\\_water#Production](https://en.wikipedia.org/wiki/Heavy_water#Production)
  - <sup>9</sup> JAEA TANAKA, <https://pro.tanaka.co.jp/en/topics/fileout.html?f=166>, str 2, 03.2019
  - <sup>10</sup> Plasma Science and Fusion Center, <http://www.psf.mit.edu/sparc/faq>, (pytanie: „How much progress has been made so far?”), 03.2019
  - <sup>11</sup> JAEA, <https://web.archive.org/web/20160223140234/http://www-jt60.naka.jaea.go.jp/english/jt60/project/html/history.html>, 03.2019
  - <sup>12</sup> JAEA, <https://web.archive.org/web/20160223140234/http://www-jt60.naka.jaea.go.jp/english/jt60/project/html/history.html>, 03.2019
  - <sup>13</sup> ITER organization, <https://www.iter.org/proj/itemilestones#18>, 03.2019
  - <sup>14</sup> <https://phys.org/news/2017-07-china-artificial-sun-world-steady-state.html>, 03.2019
  - <sup>15</sup> ITER organization, <https://www.iter.org/sci/BeyondITER>, 03.2019
  - <sup>16</sup> ITER organization, <https://www.iter.org/proj/inafewlines>, 03.2019
  - <sup>17</sup> <https://phys.org/news/2012-01-closer-nuclear-fusion.html?y>, 03.2019
  - <sup>18</sup> JAEA, <https://web.archive.org/web/20160223140234/http://www-jt60.naka.jaea.go.jp/english/jt60/project/html/history.html>, 03.2019
  - <sup>19</sup> <https://en.wikipedia.org/wiki/JT-60>, 03.2019
  - <sup>20</sup> <http://home.clara.net/balshaw/tokamak/records.htm>, 03.2019
  - <sup>21</sup> Isabella Mlch, [https://www.ipp.mpg.de/4413312/04\\_18](https://www.ipp.mpg.de/4413312/04_18), 03.2019
  - <sup>22</sup> National Research Council, *An Assessment of the Prospects for Inertial Fusion Energy*, Washington, National Academies Press, 2013: [https://books.google.pl/books?id=HBFwAAQBAJ&pg=PA1&hl=pl&source=gbs\\_toc\\_r&cad=3#v=onepage&q&f=false](https://books.google.pl/books?id=HBFwAAQBAJ&pg=PA1&hl=pl&source=gbs_toc_r&cad=3#v=onepage&q&f=false)
  - <sup>23</sup> <https://www.sciencemag.org/news/2013/10/fusion-breakthrough-nif-uh-not-really>, 03.2019
  - <sup>24</sup> [http://www.firefusionpower.org/FPA2016\\_JT-60SA\\_Ide.pdf](http://www.firefusionpower.org/FPA2016_JT-60SA_Ide.pdf), 03.2019
  - <sup>25</sup> JAEA, [http://www.jt60sa.org/pdfs/JT-60SA\\_Res\\_Plan.pdf](http://www.jt60sa.org/pdfs/JT-60SA_Res_Plan.pdf) - rozdziały 1.2 i 1.3, 03.2019
  - <sup>26</sup> JAEA, [http://www-jt60.naka.qst.go.jp/english/jt60/project/html/future\\_plan.html](http://www-jt60.naka.qst.go.jp/english/jt60/project/html/future_plan.html), 03.2019
  - <sup>27</sup> <https://www.researchgate.net>, 03.2019
  - <sup>28</sup> <https://www.iter.org/newsline/-/3172>, 03.2019
  - <sup>29</sup> Sara Stefanini, <https://www.politico.eu/article/world-leading-nuclear-fusion-project-threatened-by-brexit/>, akapit „For me, it is a concern”, 03.2019
  - <sup>30</sup> ITER organization, <https://www.iter.org/newsline/-/3172>, 03.2019
  - <sup>31</sup> Sara Stefanini, <https://www.politico.eu/article/world-leading-nuclear-fusion-project-threatened-by-brexit/>, 03.2019, pierwszy akapit
  - <sup>32</sup> <https://www.researchgate.net>, 03.2019
  - <sup>33</sup> ITER organization, <https://www.iter.org/proj/Countries>, 03.2019

- 
- <sup>34</sup> [http://www.fz-juelich.de/iek/iek-4/DE/Forschung/08\\_DEMO/\\_node.html](http://www.fz-juelich.de/iek/iek-4/DE/Forschung/08_DEMO/_node.html), 03.2019
- <sup>35</sup> EUROfusion Consortium Research Institutions, <https://www.euro-fusion.org/programme/demo/>, 03.2019
- <sup>36</sup> <https://www.ipp.mpg.de/16355/demo>, 03.2019
- <sup>37</sup> <http://www.psf.mit.edu/sparc>, 03.2019
- <sup>38</sup> Plasma Science and Fusion Center, <http://www.psf.mit.edu/sparc>, 03.2019
- <sup>39</sup> [https://en.wikipedia.org/wiki/Tttrium\\_barium\\_copper\\_oxide](https://en.wikipedia.org/wiki/Tttrium_barium_copper_oxide), 03.2019
- <sup>40</sup> Plasma Science and Fusion Center, <http://www.psf.mit.edu/sparc/faq>, pytanie „Have magnets been built with this new superconductor?”), 03.2019
- <sup>41</sup> Plasma Science and Fusion Center, <http://www.psf.mit.edu/sparc/faq> (pytania „Why doesn't ITER use HTS magnets?” i „When did HTS become available with the performance necessary for the SPARC mission?”), 03.2019
- <sup>42</sup> David Chandler, <http://news.mit.edu/2018/mit-newly-formed-company-launch-novel-approach-fusion-power-0309>, 03.2019
- <sup>43</sup> Xiaogang Liu, Zhaoliang Wang, Yong Ren, Junjun Li, Dapeng Yin, Lei Li, Xiang Gao and Yu Wu, *Mechanical performance evaluation of the CFETR central solenoid model coil design*, I 2018 Nucl. Fusion 58 016035, sl: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1741-4326/aa9866/meta>
- <sup>44</sup> <https://ecat.com/>, 03.2019
- <sup>45</sup> Hydro Fusion Ltd, <https://ecat.com/ecat-technology/ecat-certificate>, 03.2019
- <sup>46</sup> Hydro Fusion Ltd, <https://ecat.com/contact>, 03.2019
- <sup>47</sup> <https://www.polskieradio.pl/23/266/Artykul/849820,Uzadzenie-do-zirnej-fuzji-sprawdzone-Czy-to-przelom> 03.2019
- <sup>48</sup> <https://www.fakt.pl/wydarzenia/swiat/zamkna-elektrownie-na-swiecie-wlosi-wymyslili-niesamowita-maszynę/71gzl4m#slajd-1>, 03.2019
- <sup>49</sup> <http://www.nowaswiadomosc.pl/633-reaktor-zirnej-fuzji-przetestowany-i-potwierdzony.html>, 03.2019
- <sup>50</sup> <http://secondlife.neon24.pl/post/117913,doczekalismy-sie-testow-urzadzenia-e-cat-do-zirnej-fuzji>, 03.2019
- <sup>51</sup> [https://en.wikipedia.org/wiki/Lockheed\\_Martin\\_Compact\\_Fusion\\_Reactor#/media/File:Lockheed\\_Martins%27\\_Compact\\_Fusion\\_Reactor.png](https://en.wikipedia.org/wiki/Lockheed_Martin_Compact_Fusion_Reactor#/media/File:Lockheed_Martins%27_Compact_Fusion_Reactor.png), 03.2019
- <sup>52</sup> Brian Wang, <https://www.nextbigfuture.com/2018/08/lockheed-compact-reactor-is-100-or-more-times-worse-than-initial-claims.html>, 03.2019
- <sup>53</sup> John Moll, <https://tylkonauka.pl/wiadomosc/lockheed-martin-zademonstruje-przelomowy-miniaturowy-reaktor-fuzyjny>, 03.2019
- <sup>54</sup> Tom Metcalfe, <https://www.livescience.com/62929-plasma-fusion-reactor-tokamak.html>, 03.2019, ostatni akapit