

# REGIONALNE CENTRUM EDUKACJI ZAWODOWEJ W NISKU



Praca konkursowa

***„Fuzja - bezemisyjna energia przyszłości v3”***

Wykonali:

Karol Sawicki 5C  
Jakub Tutka 5C  
Kamil Surowiak 5C

Opiekun pracy:

mgr Jacek Piotrowski

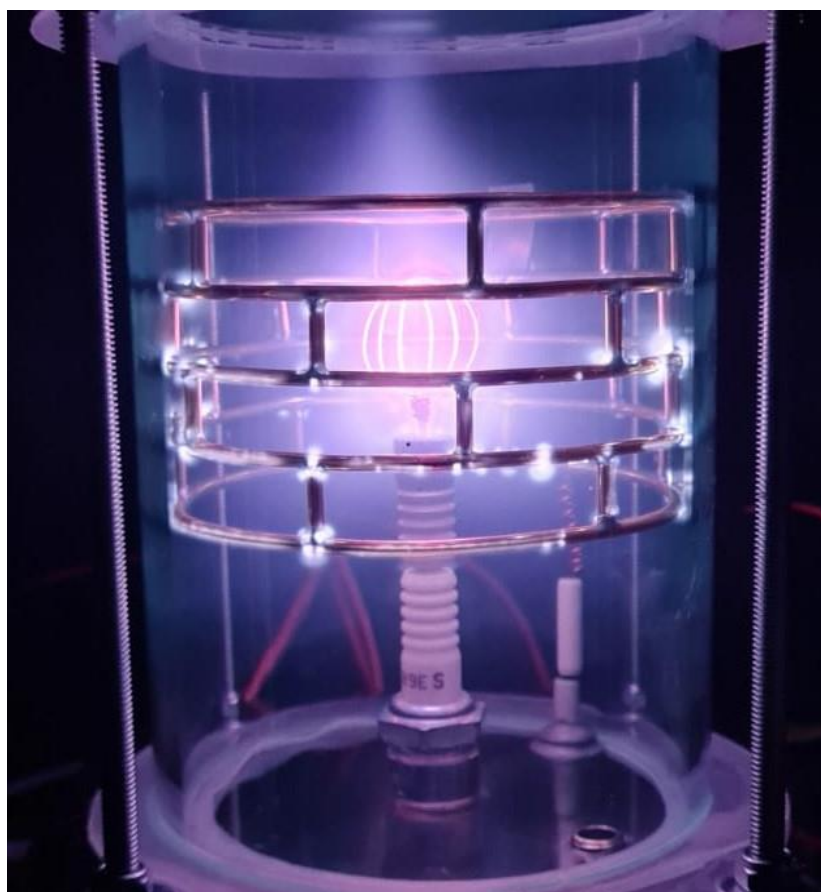
# Spis treści

1.	Streszczenie .....	3
2.	Wstęp teoretyczny .....	4
2.1.	Tematyka .....	4
2.2.	Izotop.....	5
2.3.	. Nukleosynteza .....	6
2.4.	Plazma .....	7
2.5.	Co to jest fuzja termojądrowa.....	9
2.6.	Fuzor .....	10
2.7.	IEC.....	11
2.8.	Metody opanowania plazmy .....	13
2.9.	Polywell .....	14
2.10.	Średnia droga swobodna.....	15
2.11.	Warunki wystąpienia fuzji. ....	16
2.12.	Różne zachowania plazmy w reaktorze.....	17
3.	Opis stanowiska v3 .....	19
3.1.	Schemat blokowy sterowania .....	19
3.2.	Schemat pneumatyczny .....	19
3.3.	Schemat elektryczny zasilania reaktora .....	20
3.4.	Schemat elektryczny przetwornicy.....	20
3.5.	Schemat Trafo-powielacza .....	21
3.6.	Elektroliza .....	21
3.5.	Schemat blokowy programu sterującego.....	22
3.6.	Menu sterowania .....	24
3.7.	Zdjęcia z reaktora v1.....	25
3.8.	Zdjęcie stanowiska badawczego v2.....	27
3.8.	Zmiany w rozmiarze i konstrukcji komory reaktora pomiędzy poszczególnymi wersjami. ..	31
3.9.	Zdjęcia stanowiska badawczego v3 (obecnego).....	32
3.10.	Lista elementów .....	33
3.11.	Cel urządzenia .....	34
4.	Przeprowadzenie testu .....	35
4.1	Sposób przeprowadzenia testu .....	35
4.2	Obserwacje .....	36
<b>4.3</b>	<b>Wnioski z przeprowadzonego testu .....</b>	<b>37</b>
5.	Zastosowanie.....	39

6. Czynności serwisowe .....	39
6.1. Zalewanie paliwa .....	39
6.2. Opis pinów w złączach .....	40
6.1. Adresy w magistrali I2C .....	40
6.2. Wymiana oleju w pompie próżniowej .....	41
Literatura .....	42

## 1. Streszczenie

W części teoretycznej pracy objaśniono podstawowe zagadnienia związane z tematem fuzji jądrowej. Przytoczono kilka metod przeprowadzania fuzji. Część praktyczna to fizyczne urządzenie - stanowisko do przeprowadzenia fuzji jądrowej w warunkach domowych. Przedstawiono projekt stanowiska do przeprowadzania fuzji jądrowej. Stanowisko oparte jest na bazie Fuzora Farnswortha–Hirscha. Do przeprowadzenia testów wybrano Fuzję izotopów wodoru. Zbudowane i działające urządzenie w porównaniu do wcześniejszych wersji zostało rozbudowane o bardziej zaawansowany sterownik, więcej czujników, większą komorę oraz mocniejszą prężnię. Automatyzacja stanowiska znacznie ułatwia przeprowadzenie procesu oraz poprawia bezpieczeństwo. Praca zawiera dokumentację fotograficzną z przeprowadzonych testów oraz wnioski z obserwacji.



## 2. Wstęp teoretyczny

### 2.1. Tematyka

W dzisiejszych czasach mamy wiele możliwości na pozyskanie energii. Niestety w większości źródła te emitują odpady. Węgiel zanieczyszcza atmosferę, gdyż podczas spalania powstają tlenki azotu ( $\text{NO}_x$ ) i dwutlenek siarki ( $\text{SO}_2$ ) oraz trójtlenki siarki ( $\text{SO}_3$ ), elektrownie atomowe z kolei produkują odpady radioaktywne. Odnawialne źródła energii są mało stabilne.

Fotowoltaika i elektrownie wiatrowe zależne są od pogody. W miarę stabilne są elektrownie wodne, ale stanowią niewielki procent udziału energii na rynku, gdyż wymagają budowy tamy i zalania sporej części terenu. Samo postawienie elektrowni wodnej w dużym stopniu zanieczyszcza środowisko z uwagi na konstrukcję, która jest betonowa, a produkcja 1 tony betonu powoduje wyrzucenie do atmosfery od 510KG  $\text{CO}_2$ . Poszukujemy więc nowych rozwiązań tak zwanych

bezemisyjnych. Jednym z kierunków jest fuzja jądrowa.

Według teoretycznych wyliczeń bilans energetyczny takiej reakcji jest dodatni.

Warto więc rozwijać to

zagadnienie. Warto

napomnieć, że elektrownie atomowe w razie awarii są bardzo niebezpieczne.

Odpady radio aktywne trzeba składować co generuje koszty.

Koleiny problem to

prawidłowe składowanie.

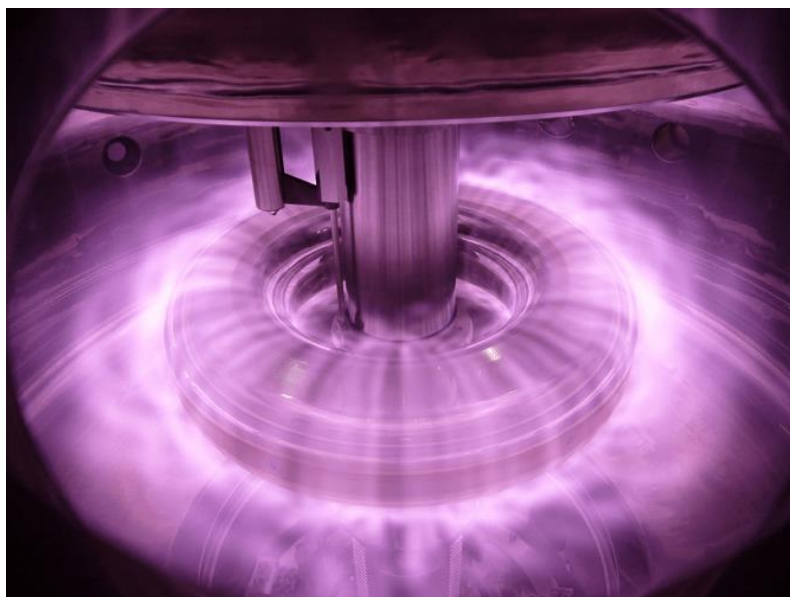
Słyszeliśmy niejednokrotnie o

wydostaniu się odpadów z pojemników co jest opłakane w skutkach dla środowiska. Znowu jeśli chodzi o elektrownie słoneczne konieczna jest okresowa wymiana ogniów a ich koszt jest spory w dodatku konieczne jest poddanie tych paneli recyklingowi. Farmy wiatrowe zajmują sporą ilość miejsca oraz są stosunkowo głośne, a same wiatraki są zagrożeniem dla ptaków oraz nietoperzy. Natomiast fuzja jądrowa prawdopodobnie jest swego rodzaju złotym

środkiem, nie jest uzależniona od warunków pogodowych w przeciwieństwie do

odnawialnych źródeł energii. W razie awarii fuzja jest przerywana i nie ma ryzyka wybuchu i rozprzestrzenienia radioaktywnego opadu jak w przypadku elektrowni atomowych. Nie ma

też konieczność składowania przez setki lat odpadów radioaktywnych. Dostępność paliwa jest dużo większa w porównaniu do elektrowni węglowych czy atomowych z uwagi na możliwe wyczerpanie się uranu, plutonu czy węgla. W przypadku elektrowni fuzyjnych paliwo to wodór, który jest najpowszechniejszym pierwiastkiem we wszechświecie.



## 2.2. Izotop

Atomy tego samego pierwiastka występują w kilku odmianach zwanych izotopami. Wszystkie izotopy tego samego pierwiastka (np. wszystkie izotopy tlenu) mają identyczną liczbę protonów w jądrze, ale różnią się ilością neutronów.

Np. izotop węgla  $^{12}\text{C}$  jest wzorcem masy; z kolei ten sam pierwiastek w odmianie  $^{14}\text{C}$  jest promieniotwórczy i służy naukowcom do określania wieku próbek.

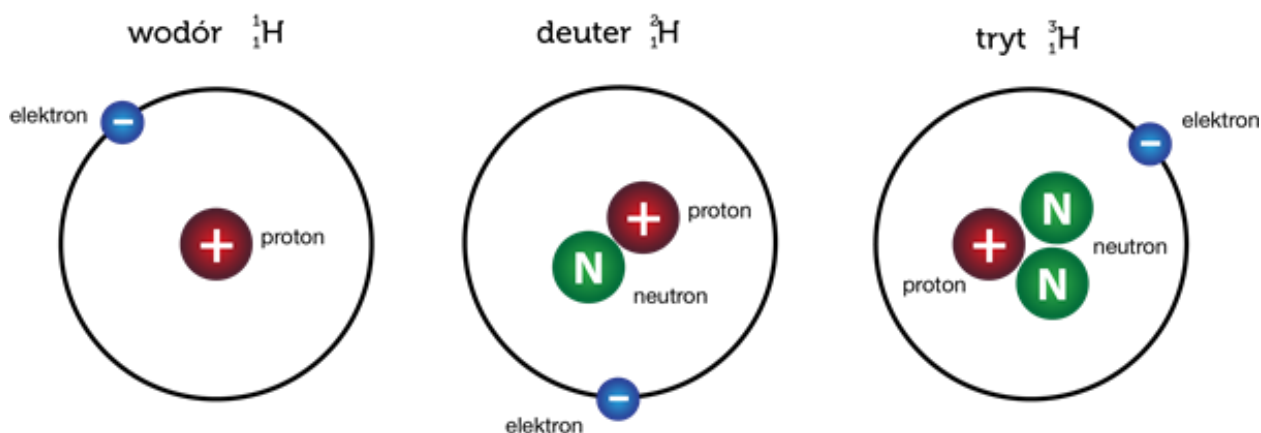
$^{12}\text{C}$  posiada w jądrze 6 protonów i 6 neutronów

$^{14}\text{C}$  posiada w jądrze 6 protonów i 8 neutronów

Izotopy tego samego pierwiastka nie różnią się (prawie, bo minimalne różnice się zdarzają) właściwościami chemicznymi i fizycznymi. Wyjątkiem od tej reguły jest jedna cecha - promieniotwórczość. Z zasady duża część izotopów jest promieniotwórcza, co oznacza, że izotopy te mają tendencję do samorzutnego rozpadania się i emitowania przy tym cząstek promieniowania.

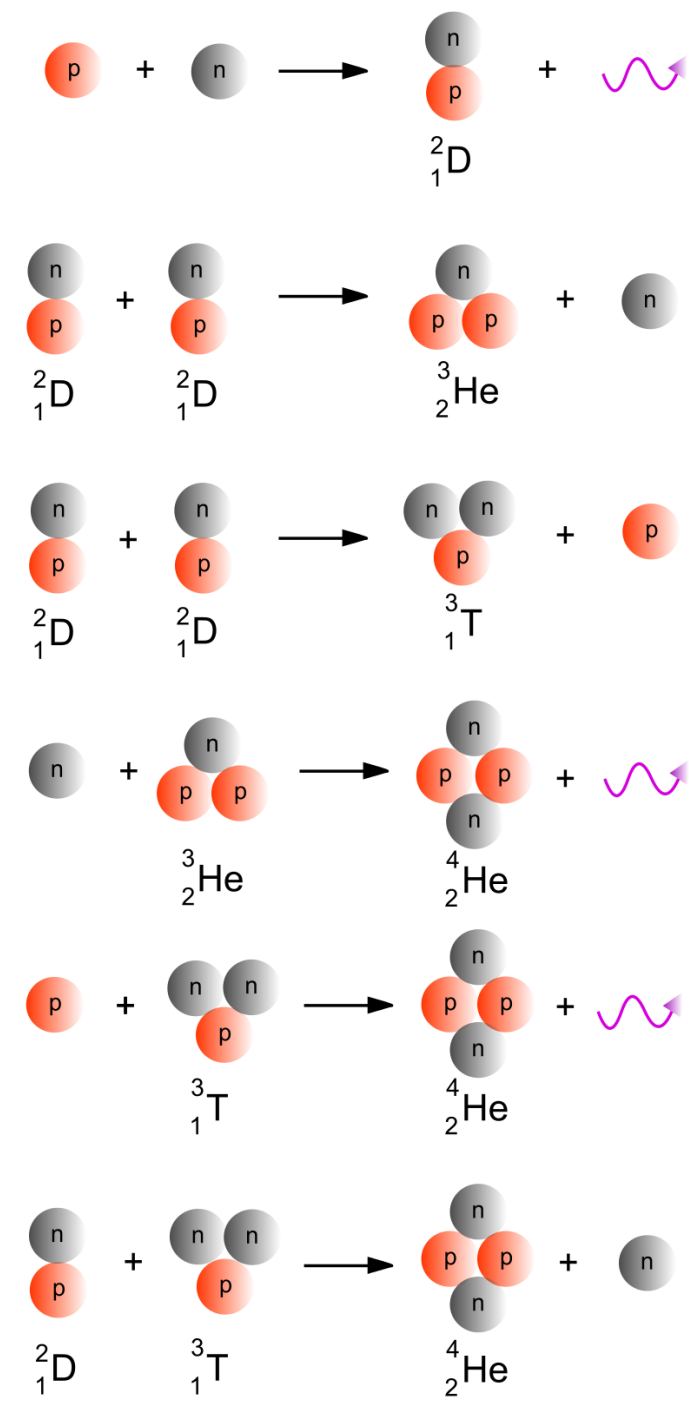
Zapisywanie symboliczne różnych izotopów polega na umieszczeniu przy symbolu danego pierwiastka odpowiedniej liczby masowej przed symbolem danego pierwiastka.

Przykładowe izotopy wodoru:



## 2.3. Nukleosynteza

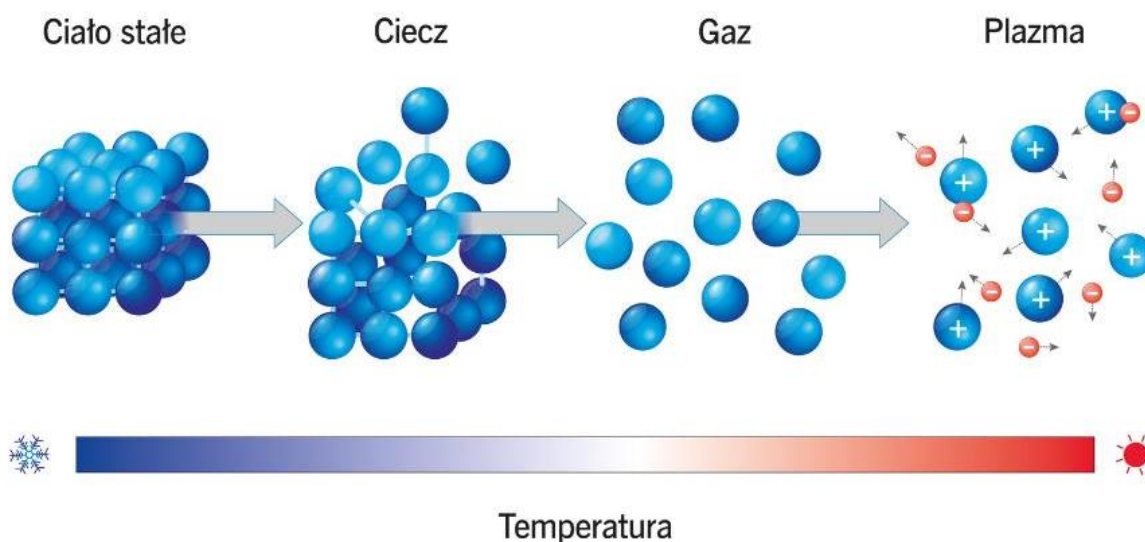
Nukleosynteza – proces, w którym powstają nowe jądra atomowe w wyniku łączenia się nukleonów, czyli protonów i neutronów, lub istniejących już jąder atomowych i nukleonów.



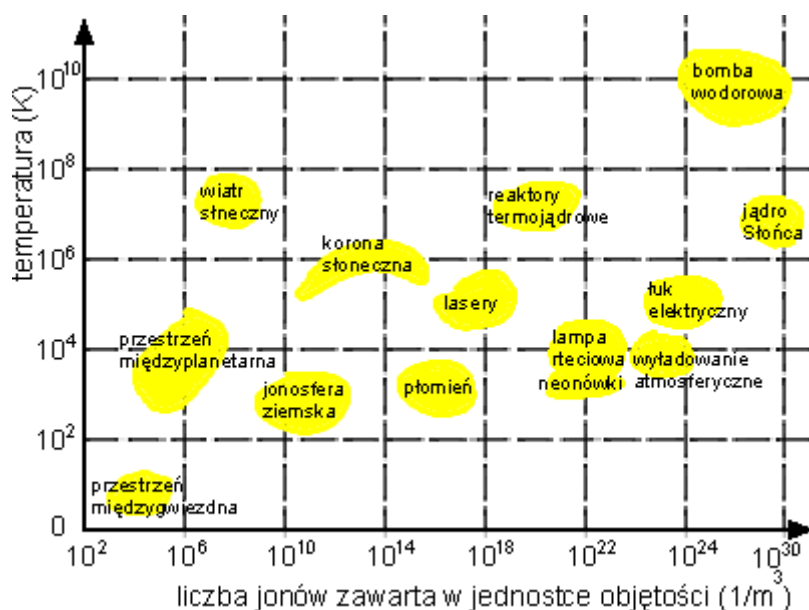
## 2.4. Plazma

Plazma to czwarty stan skupienia materii. Jest to silnie zjonizowany gaz, w którym znaczna część cząstek jest naładowana elektrycznie. Mimo że plazma zawiera swobodne cząstki naładowane (jony i elektrony), to w skali makroskopowej jest elektrycznie obojętna.

Aby łatwiej zrozumieć pojęcie Plazmy warto posłużyć się ilustracją:

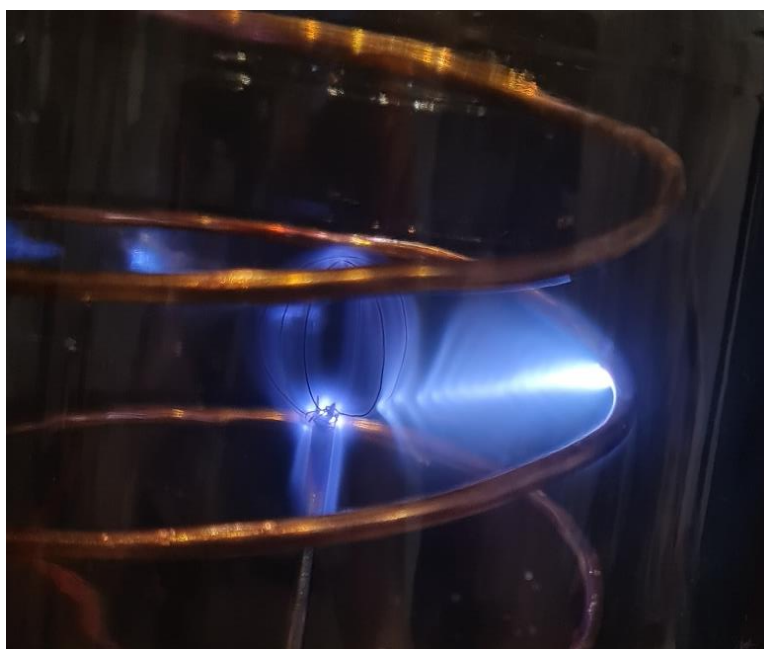


Widzimy, że aby zmienić stan skupienia potrzebujemy dostarczyć energię do naszej materii. Począwszy od ciała stałego które po dostarczeniu energii zamienia się w ciecz następnie gaz, analogicznie jest z plazmą. Należy do gazu dostarczyć odpowiednią ilość energii by powstała plazma. Plazma silnie oddziałuje z polem elektrycznym i magnetycznym oraz przewodzi prąd elektryczny. W warunkach ziemskich trudne jest utrzymanie jej w stanie równowagi termicznej.





Przykładowe zdjęcia plazmy uzyskanej w warunkach domowych:





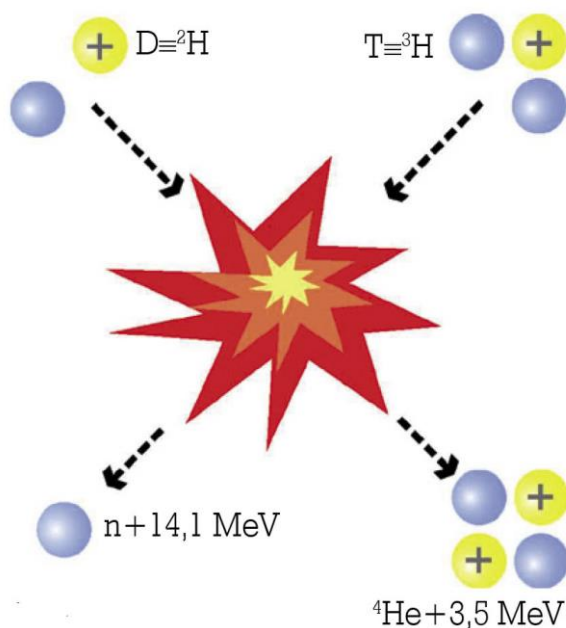
## 2.5. Co to jest fuzja termojądrowa

Fuzja to proces, w którym jądra atomowe zderzają się ze sobą ulegając syntezie, tworząc przy tym jedno cięższe jądro i uwalniając energię.

W wyniku fuzji mogą powstawać obok nowych jąder też wolne neutrony, protony, cząstki elementarne i cząstki alfa. W wyniku fuzji wydzielona energia (w postaci energii kinetycznej produktów i promieniowania gamma), zostaje rozproszona na otaczających atomach i przekształca się na energię cieplną.

Jądra atomowe mają dodatni ładunek elektryczny i dlatego się odpychają – aby doszło do ich połączenia muszą zbliżyć się na tyle, aby siły oddziaływań jądrowych pokonały odpychanie elektrostatyczne. Niezbędnym warunkiem do tego jest prędkość (energia kinetyczna) jąder. Wysoką energię jąder uzyskuje się w bardzo wysokich temperaturach lub rozpędzając jądra w akceleratorach cząstek.

Przedrostek termo pochodzi od głównego sposobu, w jaki wywoływana jest ta reakcja w gwiazdach i bombie wodorowej, czyli przez podniesienie temperatury do kilkunastu milionów kelwinów. Oznacza to bardzo dużą energię zderzenia cząstek. Synteza jądrowa może zachodzić również w niższych temperaturach (zimna fuzja) - co zaprezentuje w tej pracy. Reakcja termojądrowa jest głównym, poza energią grawitacyjną, źródłem energii gwiazd.



## 2.6. Fuzor

Zimna fuzja to metoda fuzji jąder atomu, którą można przeprowadzić w temperaturze znacznie niższej niż w fuzji termojądrowej co postanowiliśmy wykorzystać.

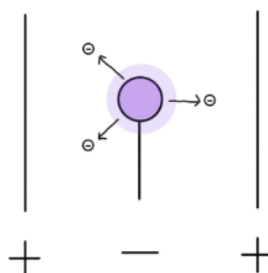
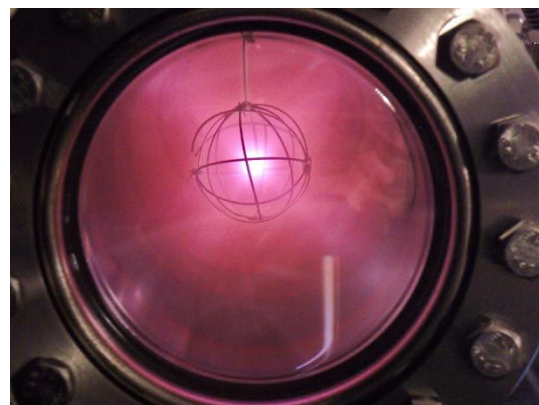
Jednym z urządzeń do uzyskania zimnej fuzji jest fuzor, gdzie plazma jest uwięziona elektrostatycznie.

Tradycyjny fuzor Farnswortha–Hirscha składa się z komory próżniowej zawierającej dodatnio naładowaną siatkę

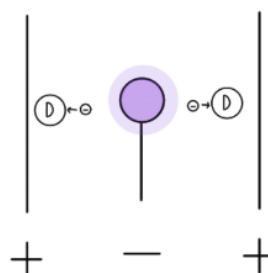
zewnętrzną i ujemnie naładowaną siatkę wewnętrzną umieszczoną wewnątrz dodatniej. Jest to w zasadzie lampa elektronowa ze sferycznymi siatkami.

Syntezywalne jądra atomowe są wstrzykiwane jako jony do fuzora. Są one odpychane przez zewnętrzną siatkę naładowaną dodatnio, a przyciągane przez wewnętrzną siatkę naładowaną ujemnie. Kiedy siatki są naładowane do wysokiego napięcia, paliwo gazowe ulega jonizacji. Jony są przyspieszane przez pole elektryczne występujące pomiędzy siatkami. Gdy jony trafiają do wnętrza siatki wewnętrznej nie są przyspieszane przez pole, lecz kontynuują ruch w kierunku środka układu. W większości przypadków jony nie napotykają na siebie oraz siatkę. Robią to okazjonalnie. Gdy jądra zderzają się z siatką nagrzewają siatkę. Jeśli zderzą się z innym jonem, mogą ulec fuzji. Jeśli tego nie zrobią, przemieszczają się z obszaru reakcji do obszaru naładowanego pola, gdzie są ponownie przyspieszane do wewnątrz. Co widać n załączonej obok ilustracji. Większość zderzeń jąder nie powoduje wystąpienia syntezy jądrowej, ale od czasu do czasu synteza taka zachodzi.

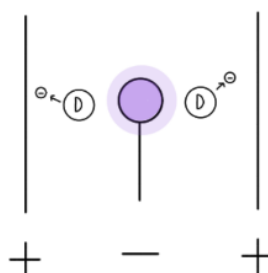
Nasze stanowisko opiera się o budowę fuzora ze względu na prostotę tej konstrukcji.



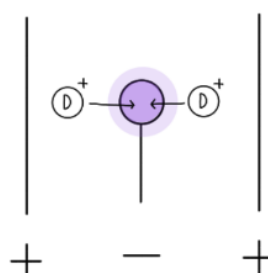
emisja elektronów



zderzenie elektronu z atomem deuteru



wybiecie elektronu z atomu deuteru

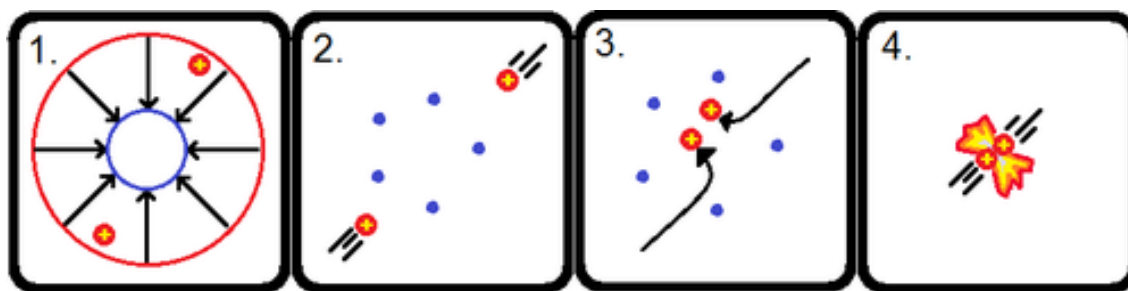


zderzenie w plazmie

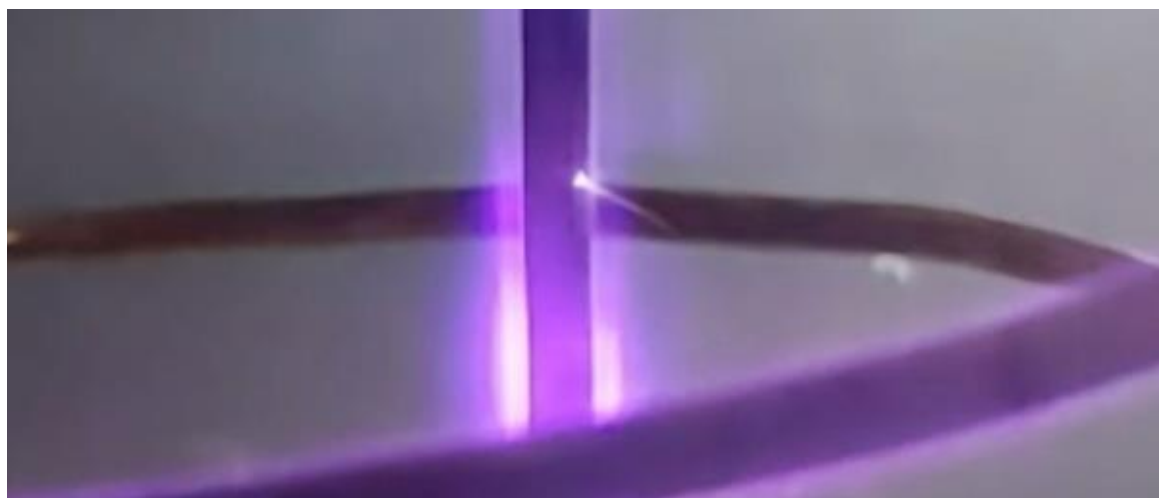
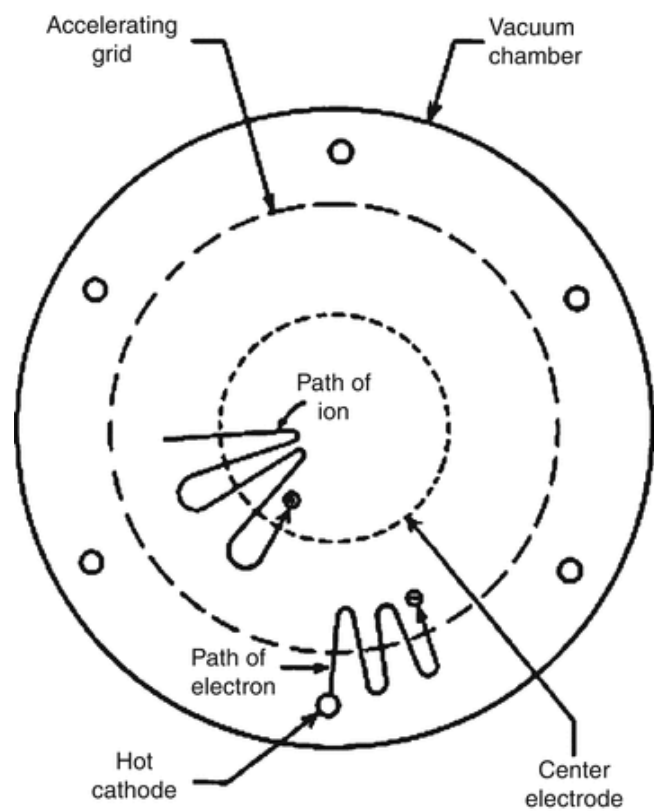
## 2.7. IEC

W fuzorach stosuje się Inercyjne uwięzienie elektrostatyczne (IEC) to urządzenia, które wykorzystują pola elektryczne do ograniczania plazmy. Większość urządzeń IEC bezpośrednio przyspiesza ich paliwo do warunków syntezy jądrowej, unikając w ten sposób strat energii w porównaniu do urządzeń MFE. MFE to urządzenia, które do ograniczenia plazmy wykorzystują pole magnetyczne.

W jednolitym polu tylko ujemnie naładowane elektrony i dodatnio naładowane jony poruszają się w przeciwnych kierunkach. Oznacza to, że pole to musi być ułożone w taki sposób, aby dwa jony mogły się poruszać w przeciwnych kierunkach do siebie (rys 1). Większość projektów IEC osiąga to poprzez przeciąganie elektronów lub jonów przez studnię potencjału, poza którą potencjał spada, a cząstki nadal poruszają się z powodu ich bezwładności (rys 2). Fuzja zachodzi w tym obszarze o niższym potencjale, gdy jony poruszające się w różnych kierunkach zderzają się (rys 4). Ponieważ to ruch przeciwnie skierowanych jonów zapewniany przez pole daje warunki do powstania fuzji, a nie przypadkowe zderzenia z resztą paliwa (rys 3). W związku z tym w urządzeniach IEC większość plazmy nie musi być gorąca, a system jako całość pracują w znacznie niższych temperaturach i na niższym poziomie energii niż urządzenia MFE.



Jednym z prostszych urządzeń IEC jest opisany już wcześniej fuzor. Szereg szczegółowych badań teoretycznych wykazało, że podejście IEC podlega wielu mechanizmom utraty energii, które nie występują, jeśli paliwo jest równomiernie podgrzewane tak jak w MFE. Te mechanizmy strat wydają się być większe niż energia uzyskana z syntezy jądrowej w takich urządzeniach.



Zdjęcie rozpędzonej cząstki uderzającej w elektrodę

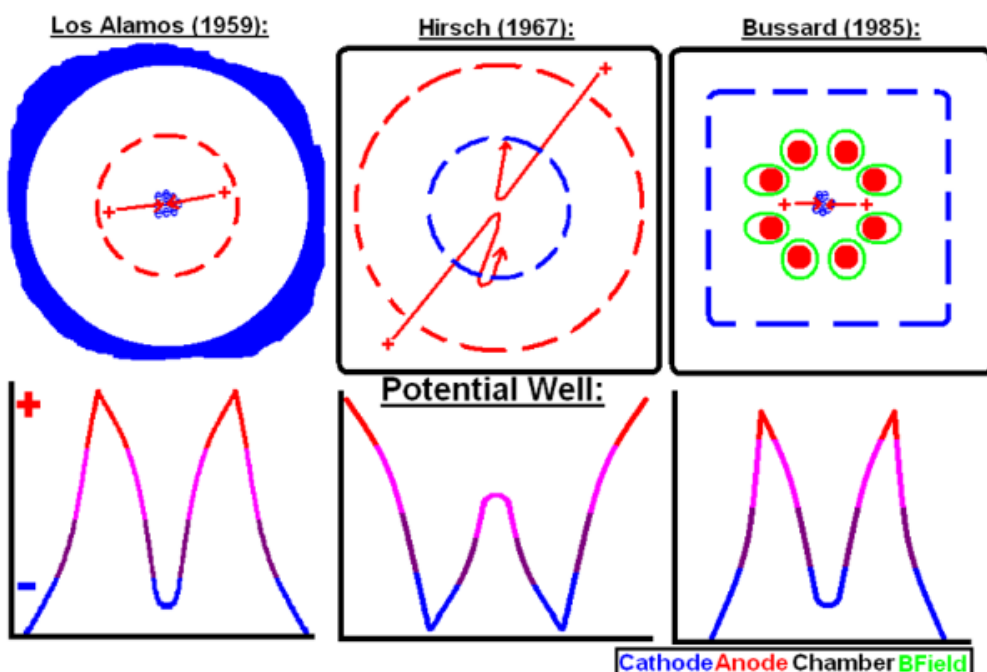
## 2.8. Metody opanowania plazmy

Trzech badaczy z LANL, w tym Jim Tuck, po raz pierwszy zbadało metodę Los Alamos, teoretycznie, w artykule z 1959 roku. Koncepcja polegała na wychwytywaniu elektronów w dodatniej klatce. Elektrony przyspieszyłyby jony do warunków fuzji. W swojej pracy z lampami próżniowymi Philo Farnsworth zaobserwował, że ładunek elektryczny gromadzi się w obszarach lampy. Dziś efekt ten znany jest jako efekt wieloczynnikowy. Farnsworth doszedł do wniosku, że jeśli jony są wystarczająco skoncentrowane, mogą zderzać się i stapiać. W 1962 roku złożył patent na projekt wykorzystujący dodatnią klatkę wewnętrzną do koncentracji plazmy w celu osiągnięcia fuzji jądrowej.

W tym czasie Robert L. Hirsch dołączył do laboratoriów Farnsworth Television i rozpoczął pracę nad tym, co stało się fuzorem. Hirsch opatentował projekt w 1966 i opublikował projekt w 1967r. Maszyna Hirscha była maszyną o średnicy 17,8 cm z spadkiem napięcia 150 kV i używała wiązek jonów do wspomagania wstrzykiwania materiału.

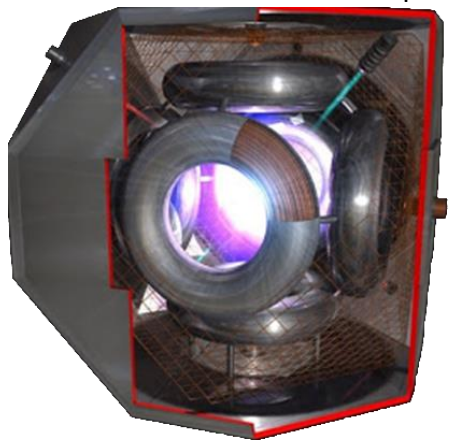
W 1980 r. Robert W. Bussard opracował skrzyżowanie fuzora i lustra magnetycznego, Polywell. Pomysł polegał na ograniczeniu nieochojnej plazmy za pomocą pól magnetycznych. To z kolei przyciągnęłoby jony.

### Illustrations of Various IEC Concepts:



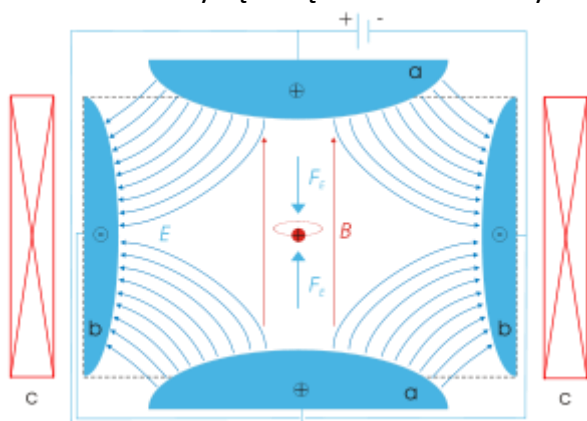
## 2.9. Polywell

Polywell więzi jony dodatnie poprzez ich przyciąganie do ujemnie naładowanych elektronów. Różnica w stosunku do fuzora polega na tym, że w fuzorze ładunki ujemne rezydują na siatce



z ciała stałego. W Polywell są one uwięzione w wewnętrznym rejonie reaktora przy użyciu pól magnetycznych. Obszar reaktora jest wyznaczony przez cewki wytwarzające pole magnetyczne, zamiast przez elektrycznie naładowane siatki. Przewaga cewek nad siatkami polega na tym, że pola magnetyczne wytwarzane przez cewki pomagają również ochronić je przed wysokoenergetycznymi elektronami i jonami. Z drugiej strony, Polywell gromadzi elektrony i jony w jednej zamkniętej przestrzeni, co skutkuje wystąpieniem promieniowania hamowania, które nie występuje w

fuzorze ze względu na jego konstrukcję. Pole magnetyczne jest wytwarzane przez wielościanowe ułożone cewek, wszystkie skierowane do wewnątrz (lub na zewnątrz) reaktora. Pole magnetyczne zanika w centrum, a strumień indukcji magnetycznej wchodzący do reaktora przez cewki wychodzi z niego z powrotem przez przestrzeń pomiędzy cewkami. Zatem elektrony są uwięzione w centralnym obszarze przez lustro magnetyczne.



Bussard twierdził, że to urządzenie może działać produkując więcej energii niż pochłaniając, na fuzji  $\alpha$ -neutronowej opartej na paliwie z boru-11 i protonów. Todd Rider oblicza, że straty na promieniowaniu hamowania z tym paliwem w odniesieniu do produkcji energii z syntezy wyniosą 1,20:1,00. Bussard twierdził, że według jego obliczeń straty stanowią około 5% tej wartości, a zatem uzyski większe od jedności są możliwe.

## 2.10. Średnia droga swobodna

Aby lepiej zrozumieć, dlaczego w komorze reaktora tworzymy próżnię przyda nam się pojęcie średniej drogi swobodnej.

W gazach cząsteczki nigdy nie poruszają się po prostej linii, zderzają się z innymi cząsteczkami w danym ośrodku zmieniając prędkość i kierunek.

Średnia drogą swobodna określa średnią długość drogi jaką przebywa cząsteczka pomiędzy poszczególnymi zderzeniami w danym ośrodku.

Im mniejsze zagęszczenie cząsteczek, czyli ciśnienie to tym dłuższą drogą swobodna

Co widać również na poniższej tabeli.

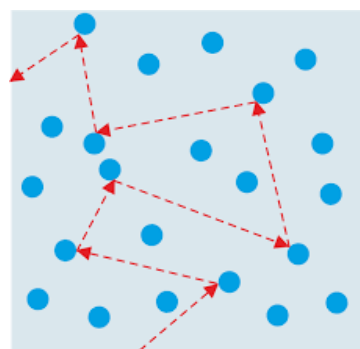
Vacuum range	Pressure in hPa (mbar)	Pressure in mmHg (Torr)	number density (Molecules / cm <sup>3</sup> )	number density (Molecules / m <sup>3</sup> )	Mean free path
Ambient pressure	1013	759.8	$2.7 \times 10^{19}$	$2.7 \times 10^{25}$	64 – 68 nm <sup>[5]</sup>
Low vacuum	300 – 1	$220 - 8 \times 10^{-1}$	$10^{19} - 10^{16}$	$10^{25} - 10^{22}$	0.1 – 100 μm
Medium vacuum	$1 - 10^{-3}$	$8 \times 10^{-1} - 8 \times 10^{-4}$	$10^{16} - 10^{13}$	$10^{22} - 10^{19}$	0.1 – 100 mm
High vacuum	$10^{-3} - 10^{-7}$	$8 \times 10^{-4} - 8 \times 10^{-8}$	$10^{13} - 10^9$	$10^{19} - 10^{15}$	10 cm – 1 km
Ultra-high vacuum	$10^{-7} - 10^{-12}$	$8 \times 10^{-8} - 8 \times 10^{-13}$	$10^9 - 10^4$	$10^{15} - 10^{10}$	1 km – $10^5$ km
Extremely high vacuum	$<10^{-12}$	$<8 \times 10^{-13}$	$<10^4$	$<10^{10}$	$>10^5$ km

li.

Jeżeli rozpędzona cząsteczka uderzy w inną cząsteczkę to wytrąca swoją energię. Więc jeśli średnią drogą swobodną będzie krótsza niż przerwa pomiędzy elektrodą ujemną a dodatnią to rozpędzona jony nie dotrą do rdzenia lub dotrą z wytrąconą energią niezdolne do fuzji.

Jeśli z kolei ciśnienie będzie zbyt niskie to prawdopodobieństwo zderzenia cząsteczek w rdzeniu będzie bardzo małe więc fuzja będzie zachodzić rzadko.

Więc ciśnienie, w którym natężenie fuzji będzie najlepsze jest również zależne od przerwy pomiędzy elektrodami w komorze reaktora.

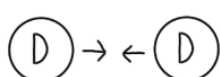




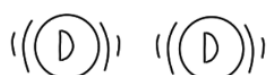
## 2.11. Warunki wystąpienia fuzji.

Do przeprowadzenia fuzji należy stworzyć odpowiednie warunki, aby pokonać siły odpychania dodatni naładowanych jąder atomowych. Możemy albo rozpędzić atomy albo rozgrzać je do takiego stopnia, aby ich energia pokonała ich odpychanie. Zdecydowaliśmy się na połączenie tych metod, aby uzyskać bardziej kompaktowe stanowisko. Co to oznacza w praktyce.

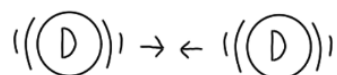
1. Należy rozrzedzić przestrzeń reaktora do momentu, gdzie na drodze, na której rozpędzamy jądra atomowe, nie wystąpi przypadkowe zderzenie. Gdyż zderzenie to wyhamuje rozpędzane jądra atomowe.
2. W reaktorze należy umieścić odpowiedni pierwiastek.
3. Do rozpędzenia jąder atomowych oraz wytworzenia wysokiej temperatury można użyć pola elektrycznego.
4. Użyte pole musi zapewnić rozpędzanie jąder atomowych na tym samym kierunku, lecz przeciwnie zwrócone. Ma to zapewnić odpowiedni kształt i rozmieszczenie elektrod.
5. Pole elektryczne musi być odpowiednio mocne. W celu nadania odpowiedniej prędkości oraz temperatury reakcji.



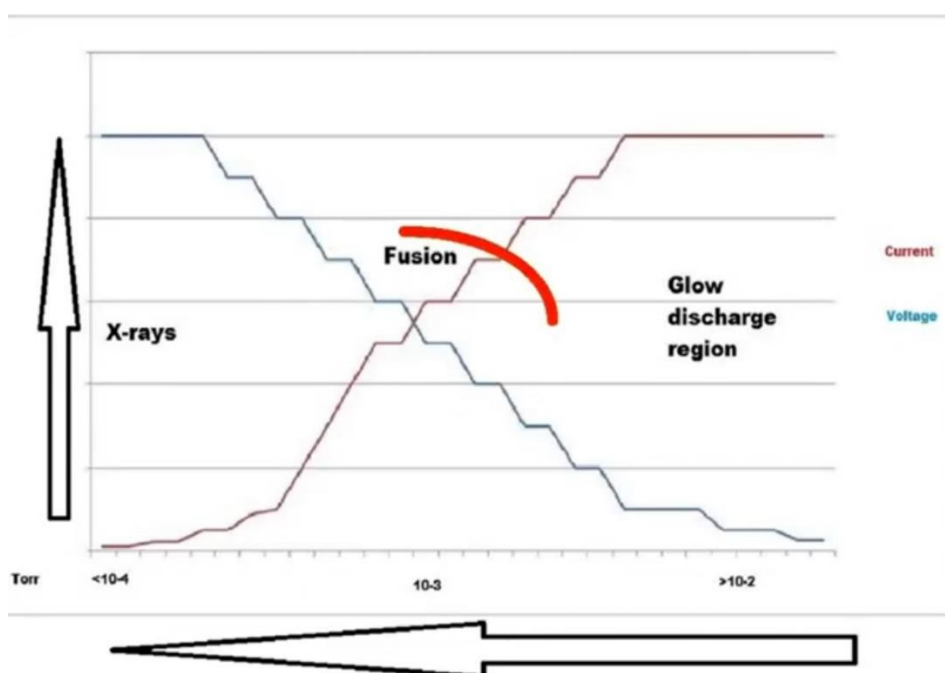
zderzenie atomów



wysoka  
temperatura



zderzenie w wysokiej  
temperaturze



## 2.12. Różne zachowania plazmy w reaktorze

W reaktorze typu fuzor plazma przy różnych warunkach może przybierać różne kształty i zachowania. Dzięki takiej ocenie wizualnej plazmy jesteśmy w stanie określić czy nasz reaktor działa poprawnie, czy warunki są odpowiednie oraz czy nasz rdzeń nie wymaga wymiary. Główne zachowania plazmy, które można wyróżnić to (posortowane w kolejności malejącego ciśnienia):

Glow discharge mode- początkowa faza, plazma obleka siatkę i wychodzi poza rdzeń, gdzie przy pozostałych trybach jest głównie w środku elektrody.



Central Glow mode - Zjawisko to objawia się intensywną emisją światła z wnętrza katody. Za pomocą tego zjawiska możemy oceniać warunki panujące wewnątrz reaktora z uwagi na konkretne parametry gęstości plazmy oraz temperatury. Dzięki dużej emisji światła podczas tego zjawisko możemy właśnie na jego podstawie określić, czy potrafimy utrzymywać odpowiednie warunki do podtrzymania stabilnej fuzji, fakt, że do utrzymania tego zjawiska wymagane są dość konkretne warunki pozwala skutecznie zweryfikować nasze zdolności. Dodatkowo zjawisko to zachodzić może przy nieco wyższym ciśnieniu.

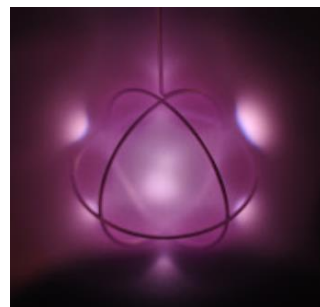


Jet mode - Jest to zjawisko polegające na tworzeniu się intensywnych skoncentrowanych strumieni lub strumienia plazmy wzdłuż określonych kierunków, lecz główna jej część znajduje się wewnątrz głównego rdzenia. Mogą występować problemy z utrzymaniem plazmy w tym stanie, może też to doprowadzić do spadku wydajności lub uszkodzenia reaktora z uwagi na lokalny wzrost temperatury, ciśnienia oraz utratą temperatury wraz z przemieszczaniem strumienia w kierunku ściany reaktora. Zjawisko to ma większą szansę na wystąpienie w obszarze niskiego prądu, ale wysokiego napięcia, przyczyną powstania takiego strumienia mogą być niestabilności magnetyczne które mogą prowadzić do powstania lokalnych prądów i ciśnień co sprzyja powstaniu Jet Mode. Taki stan może być spowodowany nierównomiernym ułożeniem siatki elektrody centralnej. Podsumowując Jet mode jest efektem nie pożądanym.



Mini Jet- Jest to moment przejścia między Jet Mode a Star Mode z uwagi na zmiany ciśnienia czy samych parametrów pracy, zjawisko polega głównie na stabilizowaniu się palmy.

Star mode- Od momentu pojawienia się Star Mode może zachodzić fuzja. Zjawisko to które w niewielkim stopniu wizualnym możemy porównać do Jet Mode. Jet Mode polega na jednym skoncentrowanym strumieniu plazmy natomiast Star Mode tworzy wiele mniejszych strumieni które przechodzą przez wszystkie otwory siatki wewnętrznej co w rezultacie przypomina świecenie gwiazdy, przy czym większość plazmy utrzymywana jest wewnątrz głównego rdzenia. Zjawisko to charakteryzuje wyjątkową stabilnością z uwagi na niskie turbulencje, które sprzyjają zatrzymaniu ciepła w plazmie co zmniejsza straty ciepłne, dodatkowo szansa na zderzenia atomów w tym trybie są większe. Niestety Star Mode wymaga bardzo niskiego ciśnienia oraz dobrania niemalże w punkt samych parametrów. Zjawisko to jest efektem pożądanym, ponieważ są to najlepsze warunki do przeprowadzenia fuzji.



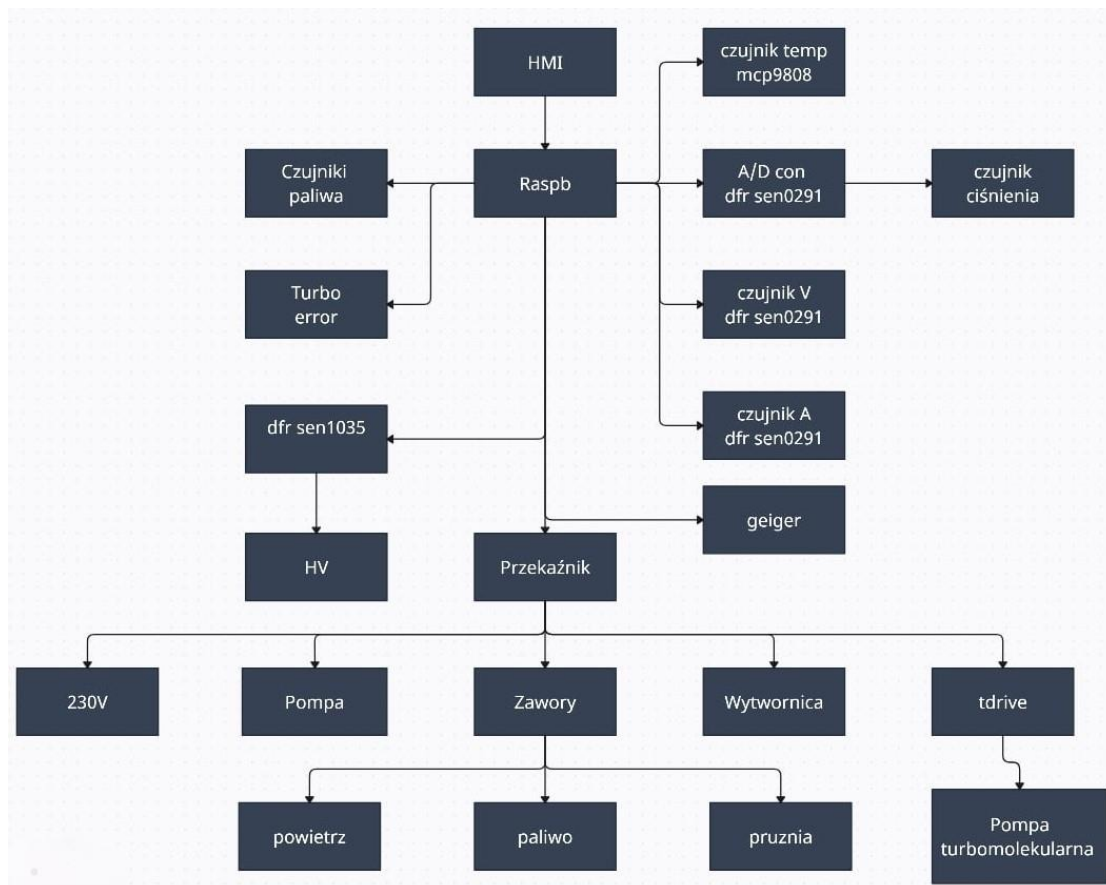
Spray mode - Powodem zajścia tego zjawiska może być zbyt niska temperatura jak i za duże ciśnienie co skutkuje brakiem kontroli nad plazmą. Jest to moment, w którym plazma zaczyna się rozpraszać lub przegrzewać. Jednak najczęstszą przyczyną jest niekontrolowane wtryskiwanie paliwa do komory co może prowadzić do nagłej jonizacji gazu i rozprzestrzenieniu się materiału tworząc Spray. Powodem może być też przegrzanie elektrody centralnej lub niesymetrycznej pracy układu. Zjawisko to jest nie pożądanym, lecz jasno daje nam do zrozumienia, że mamy pewne elementy do poprawy.

Halo Mode - Jest inicjowany w taki sam sposób jak Star Mode i jest podobny pod wieloma względami, ale występuje zwykle przy niższych ciśnieniach, a co za tym idzie, wyższych napięciach katodowych. Powoduje to wypływ elektronów z środka elektrody wewnętrznej tworząc strumień elektronów w wyniku czego rozwija się tryb Halo Mode. Powstały przepływ jonów i elektronów powoduje powstanie studni potencjałów charakteryzującą się jasnym, ale ciemniejszym niż przy Star Mode, centralnym blaskiem i zewnętrznym świejącym obszarem. Częstotliwość zderzeń cząsteczek w tym trybie spada z uwagi na za małe zagęszczenie cząsteczek.

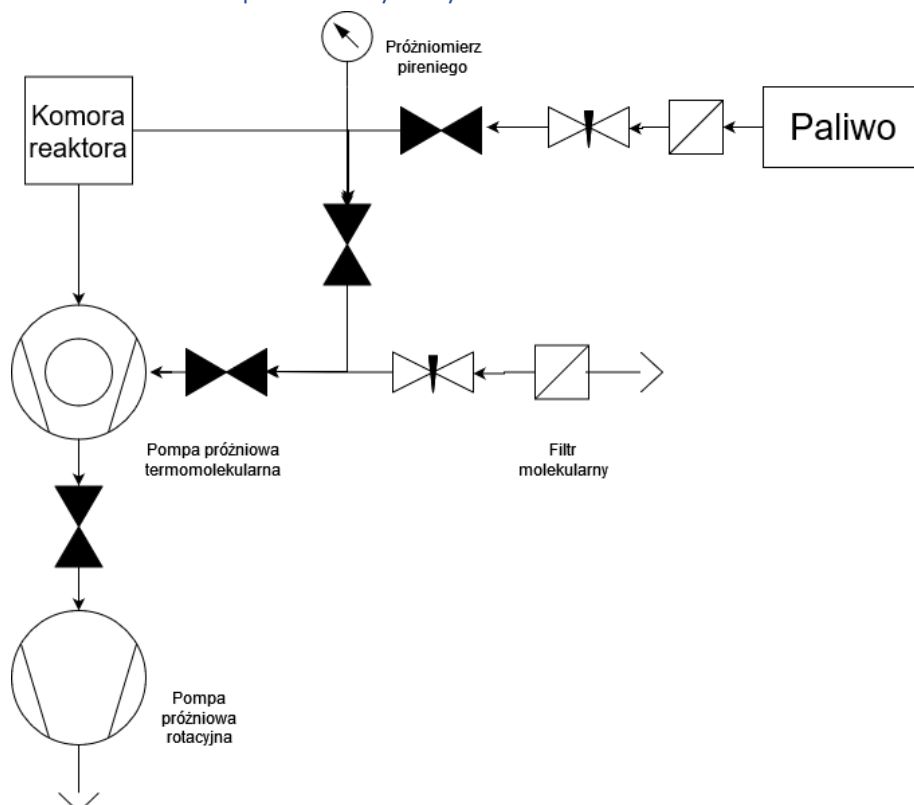


### 3. Opis stanowiska v3

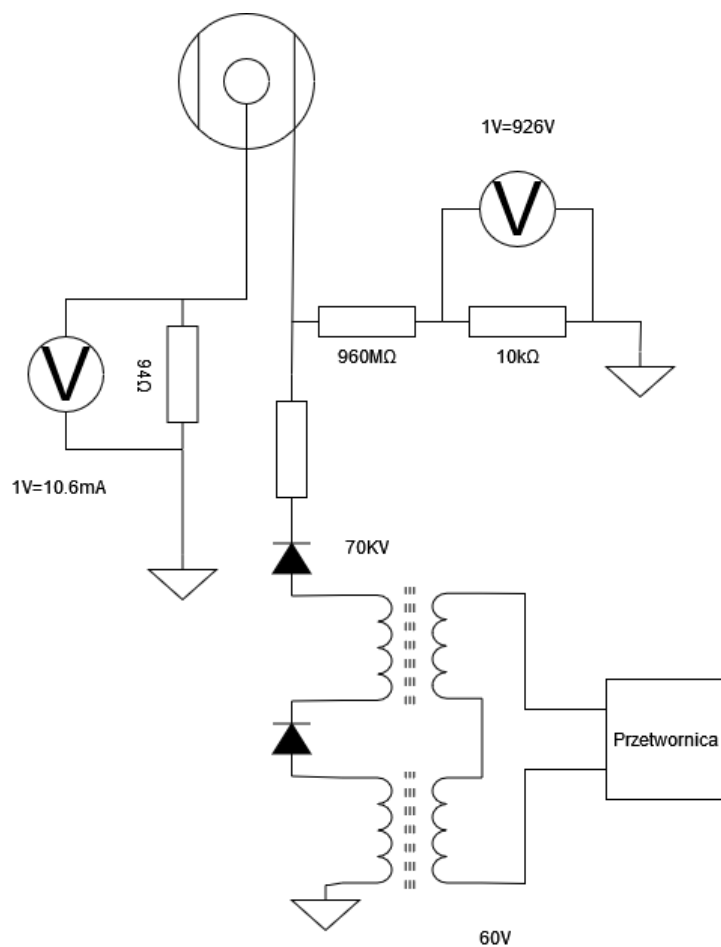
#### 3.1. Schemat blokowy sterowania



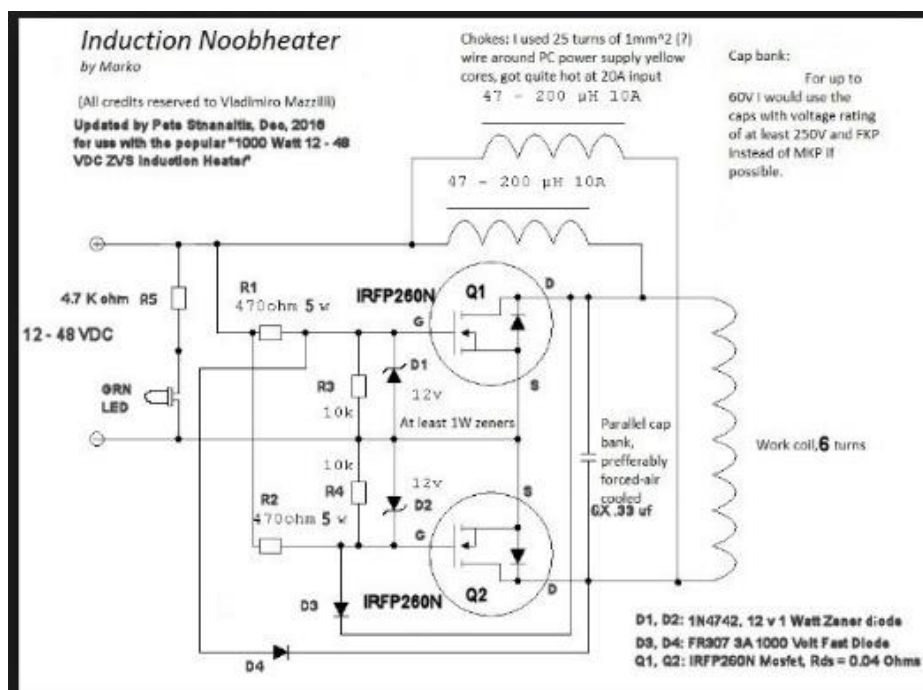
#### 3.2. Schemat pneumatyczny



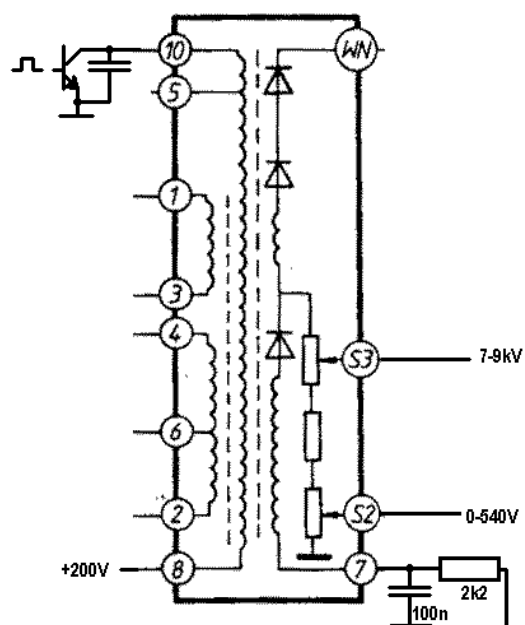
### 3.3. Schemat elektryczny zasilania reaktora



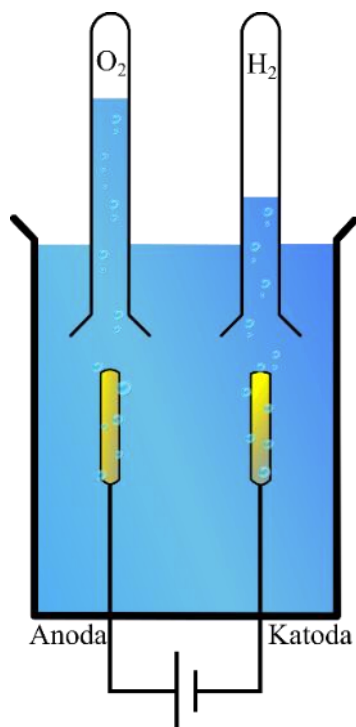
### 3.4. Schemat elektryczny przetwornicy



### 3.5. Schemat Trafo-powielacza

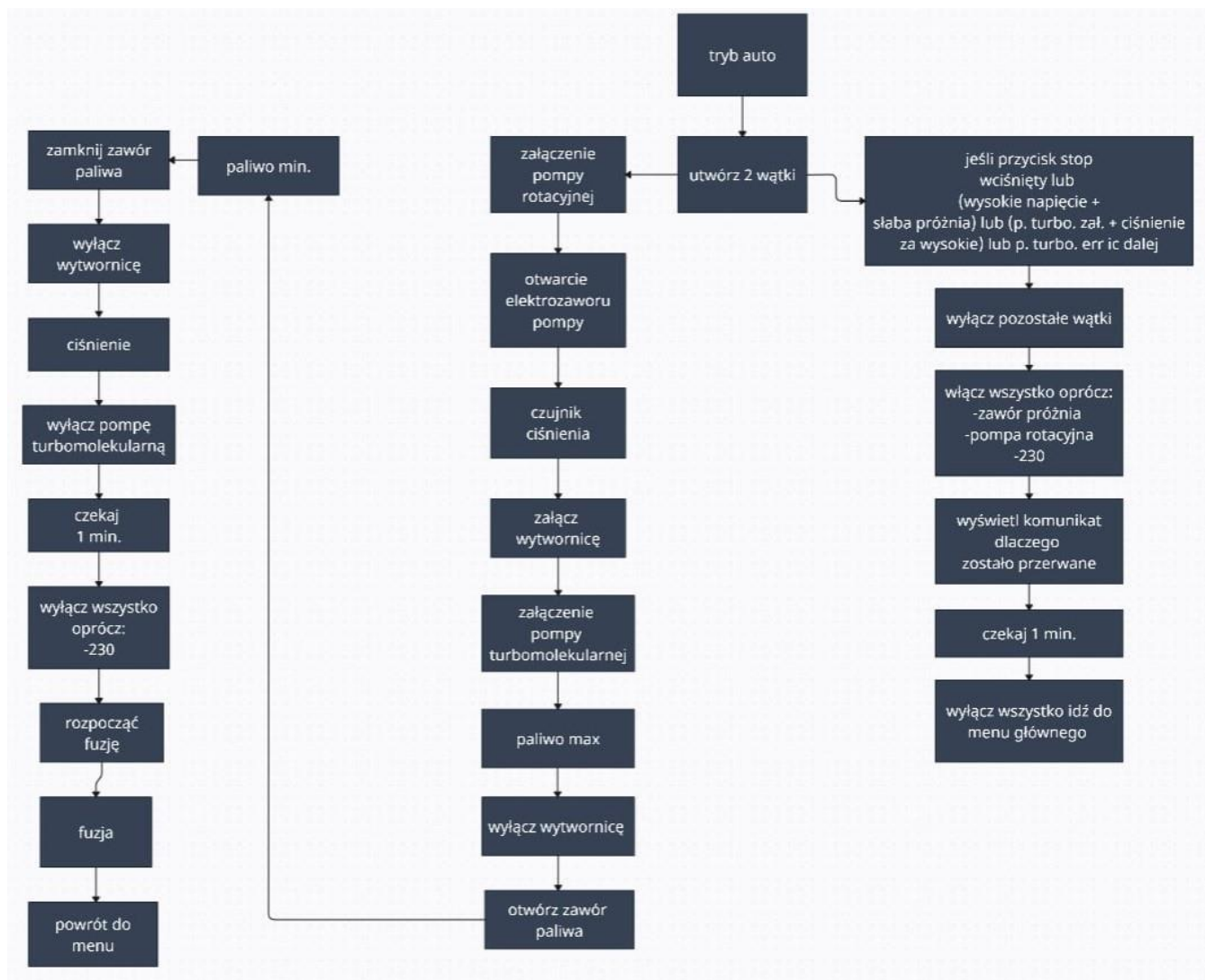
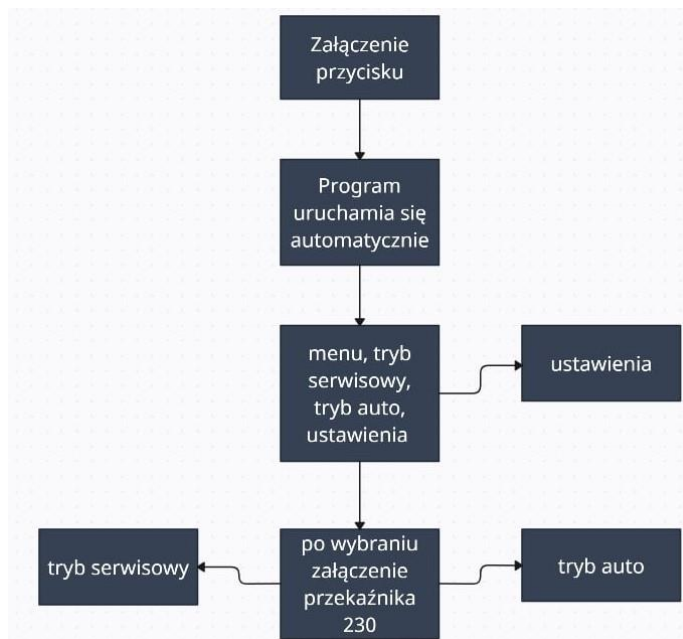


### 3.6. Elektroliza





### 3.5. Schemat blokowy programu sterującego



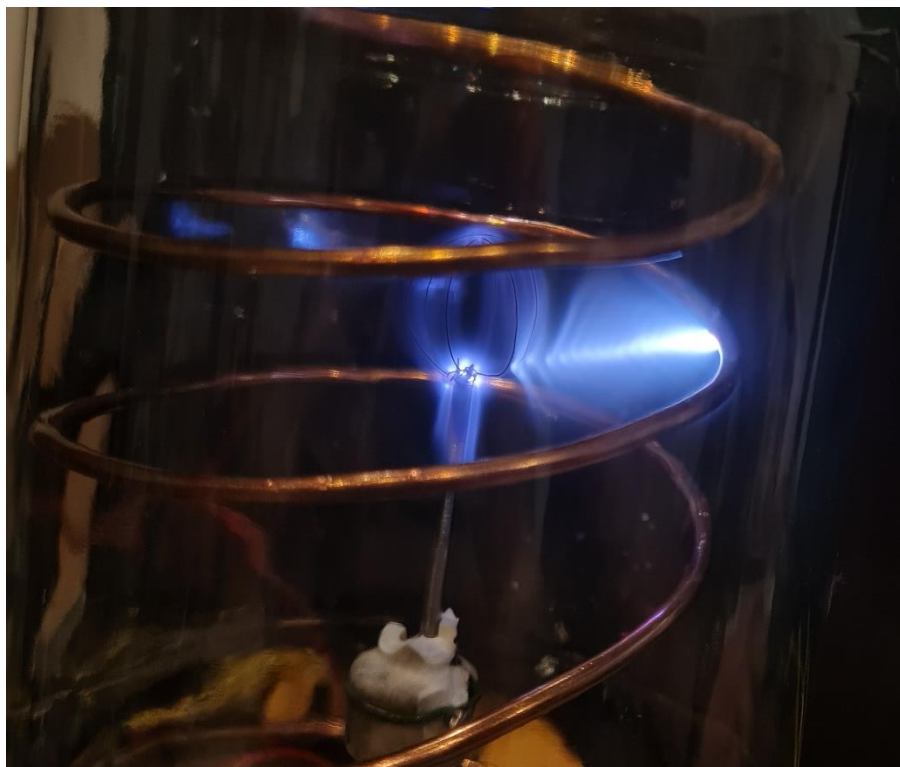




### 3.6. Menu sterowania

### 3.7. Zdjęcia z reaktora v1

Widać, że przy zbyt małej próżni łuk przechodzi pomiędzy elektrodami



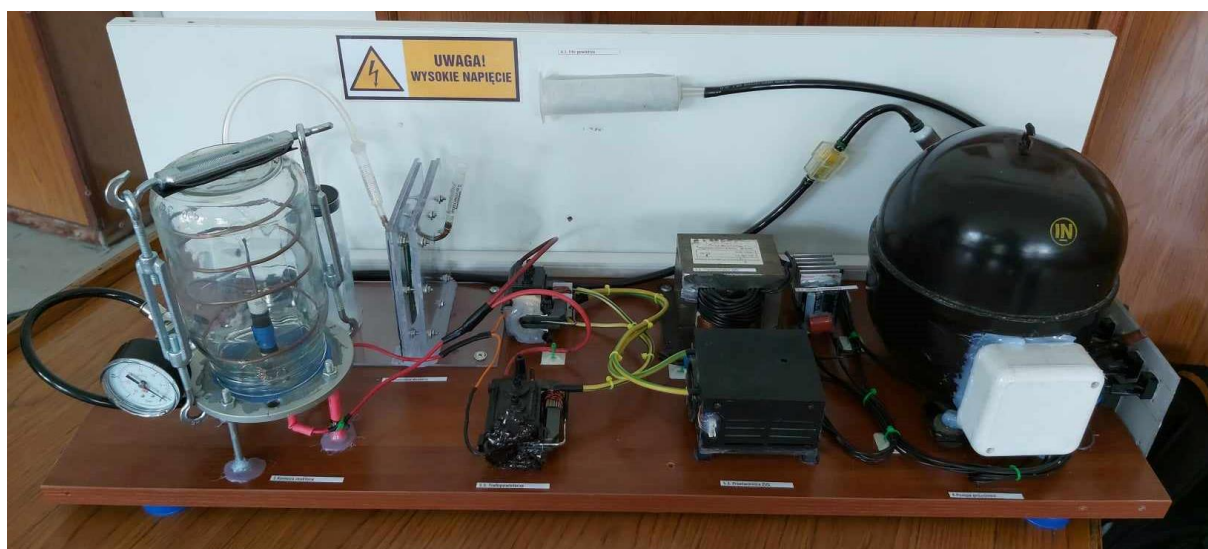
Łuk zaczyna zanikać przy obniżaniu ciśnienia.



Łuk całkowicie zanikł w skutek dalszego obniżania ciśnienia.



Widać jarzące się elektrody co oznacza, że ciśnienie jeszcze należy obniżyć.



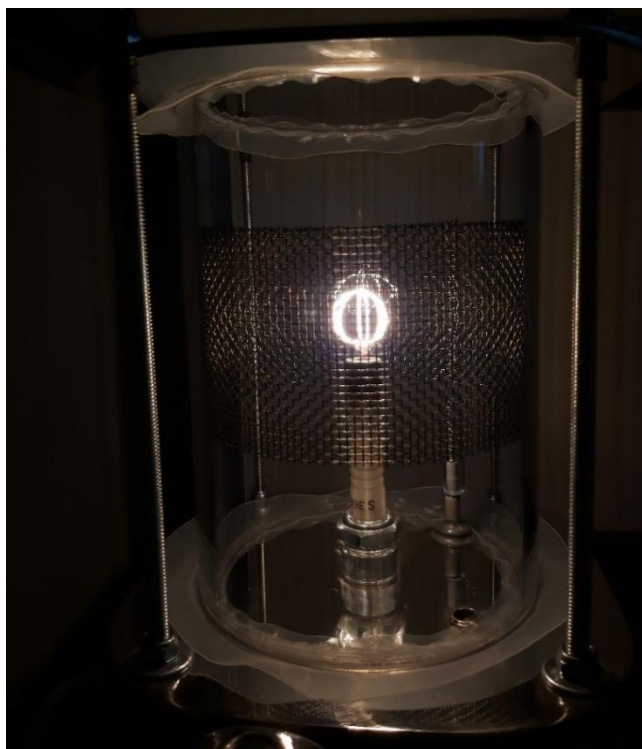
Zdjęcie całego urządzenia

### 3.8. Zdjęcie stanowiska badawczego v2

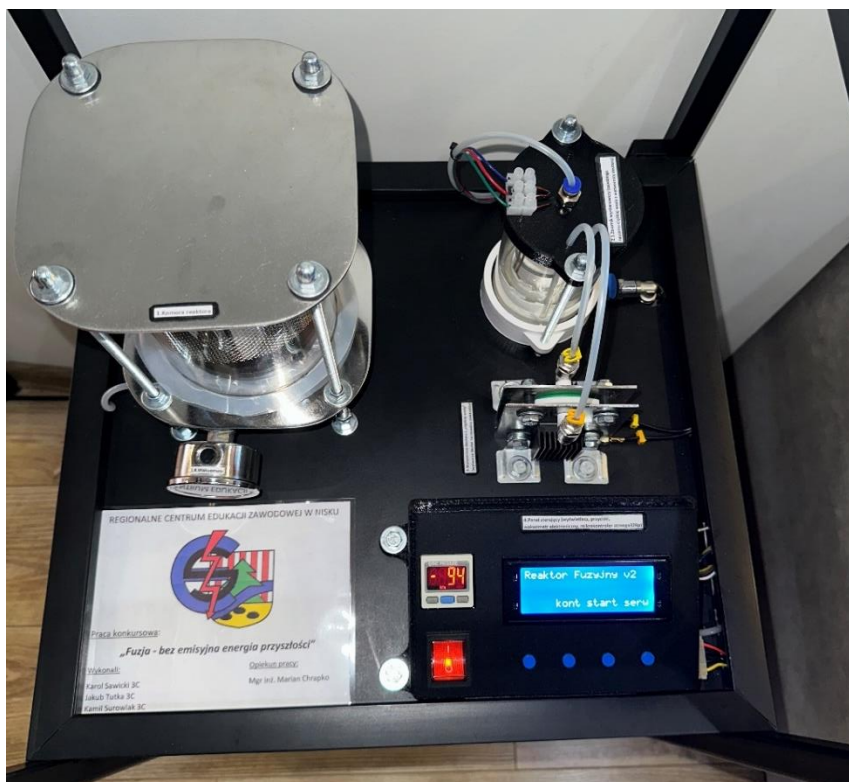


STANOWISKO DO PRZEPROWADZANIA FUZJI





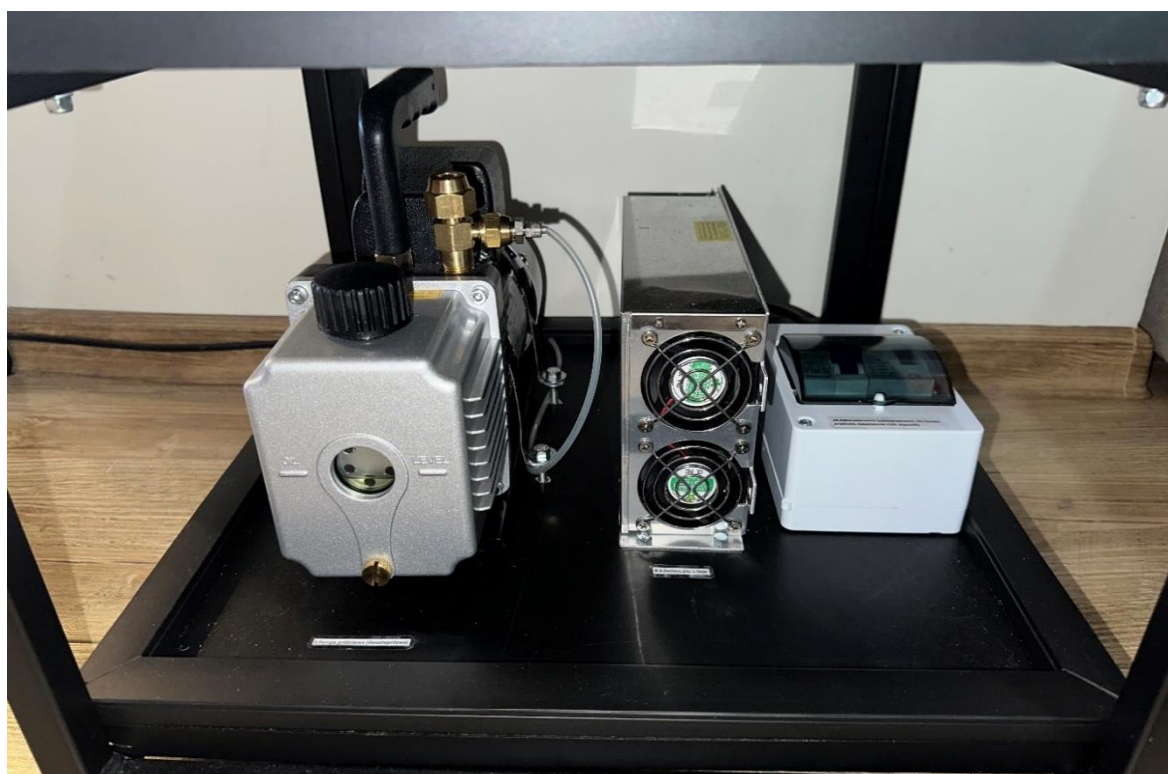
KOMORA REAKTORA



STEROWANIE, WYTWORNICA DEUTERU, KOMORA REAKTORA



MODUŁY ELEKTROZAWORÓW, PRZekaźników, WYSOKIEGO NAPIĘCIA, PRZETWORNICA



POMPA PRÓŻNIOWA, ZASILACZ, ZABEZPIECZENIA





Central glow mode

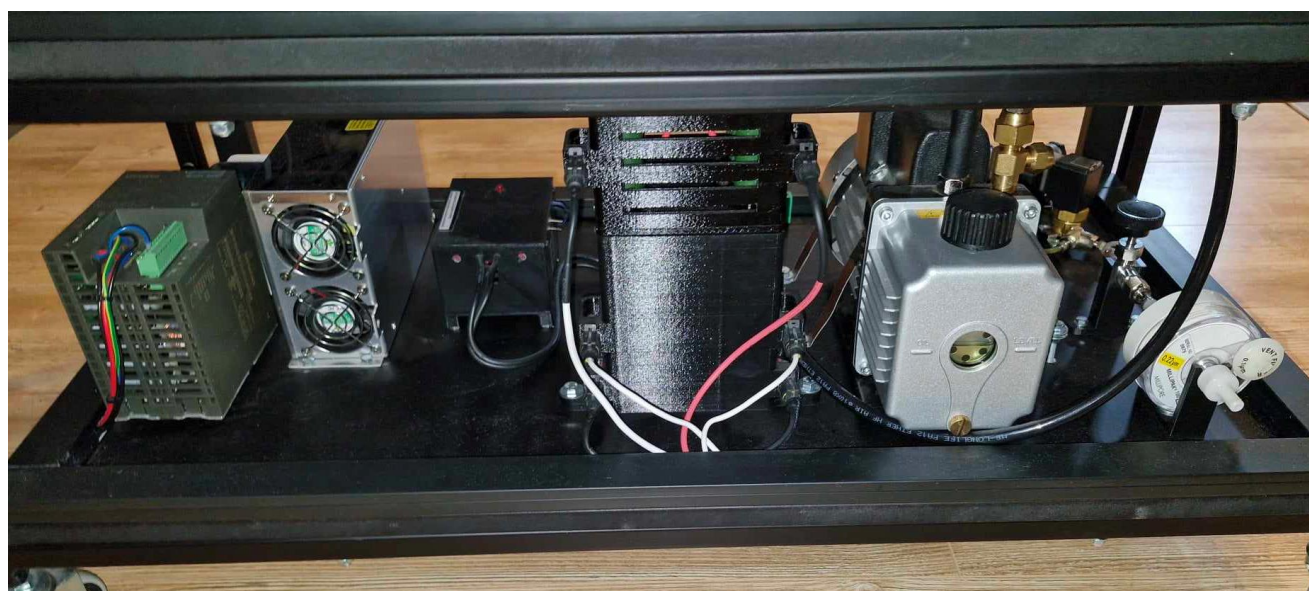


Jet Mode

3.8. Zmiany w rozmiarze i konstrukcji komory reaktora pomiędzy poszczególnymi wersjami.



### 3.9. Zdjęcia stanowiska badawczego v3 (obecnego)



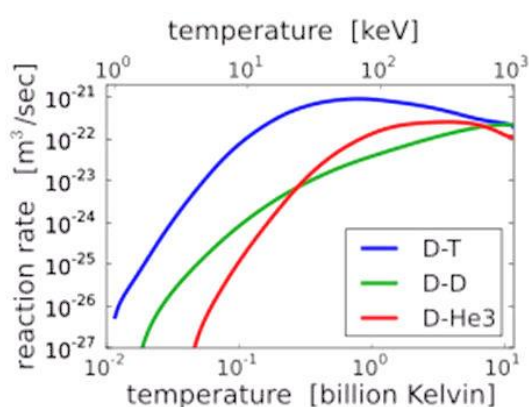


### 3.10. Lista elementów

1. Komora reaktora
  - 1.1. Elektroda ujemna (wykonana z wolframu)
  - 1.2. Elektroda dodatnia obudową (wykonana z siatki kwasoodpornej)
  - 1.3. Podstawa reaktora (ze stali nierdzewnej z zestawem przyłączy i uszczelką)
2. Zbiornik wyrównawczy (zapobiega zassaniu ciężkiej wody z wytwornicy deuteru)
3. Wytwornica deuteru z „ciężkiej wody” (wytwarza deuter na zasadzie elektrolizy)
4. Panel sterujący (wyświetlacz, przycisk, komputer RaspberryPi5)
5. Precyzyjne zawory iglicowe:
  - 5.1 Zawór paliwa
  - 5.2 Zawór powietrza
6. Elektrozwory
  - 6.1. Elektrozwór pompy próżniowej rotacyjnej
  - 6.2. Elektrozwór paliwa
  - 6.3. Elektrozwór powietrza komory
  - 6.4. Elektrozwór przedmuchu pompy turbomolekularnej
7. Przekładniki
  - 7.1. Przekładnik wytwornicy paliwa
  - 7.2. Przekładnik pompy próżniowej turbomolekularnej
  - 7.3. Przekładnik elektrozworu paliwa
  - 7.4. Przekładnik elektrozworu powietrza komory
  - 7.5. Przekładnik elektrozworu przedmuchu pompy turbomolekularnej
  - 7.6. Przekładnik elektrozworu pompy próżniowej rotacyjnej
  - 7.7. Przekładnik zasilaczy
  - 7.8. Przekładnik pompy próżniowej rotacyjnej
8. Filtry
  - 8.1 Filtr mikronowy do przedmuchu pompy próżniowej turbomolekularnej
  - 8.2 Filtr paliwa
9. Zasilanie reaktora
  - 9.1. Przetwornica ZVS (wykonana według schematu i doświadczalnie poprawioną wydajnością)
  - 9.2. Podwójny trafopowielacz (pochodzą ze starych telewizorów kineskopowych)
  - 9.3. Zasilacz 24V 1.5KW
  - 9.4. Rezystory balastowe
10. Pompy:
  - 10.1 Pompa próżniowa turbomolekularna
  - 10.2 Pompa próżniowa rotacyjna
11. Zabezpieczenia (zabezpieczenie różnicowo prądowe, bezpiecznik C10, stycznik)
12. Zasilanie Pompy próżniowej turbomolekularnej
  - 12.1. Zasilacz 24v Pompy próżniowej turbomolekularnej
  - 12.2. Driver Pompy próżniowej turbomolekularnej
13. Chłodzenie wodne (pompa z zbiornikiem, radiator)
14. Układy pomiarowe:
  - 14.1. Miernik napięcia i natężenia zasilania komory
  - 14.2. Próżniomierz pirenego
  - 14.3. Licznik Geigera

### 3.11. Cel urządzenia

Zbudowane urządzenie ma za zadanie stworzenie warunków do przeprowadzenia fuzji jądrowej. Urządzenie umożliwia obserwację i badanie zjawiska fuzji jądrowej. Ze względu na dostępne środki zdecydowaliśmy się zbudować stanowisko fuzora, aby przeprowadzić nukleosyntezę deuteru z deuterem. Wynikiem tej reakcji jest tryt i proton oraz równolegle hel i neutronu, a co ważniejsze energii. Zastosowanie fuzji w energetyce jest świetnym pomysłem z uwagi na praktycznie nie wyczerpalne ilości paliwa jak i sam świetny stosunek otrzymywanej energii do masy paliwa oraz brak emisyjności podczas wytwarzania energii. Jest wysoce prawdopodobne, że dzięki elektrowniom fuzyjnym ceny energii spadną oraz zostanie ustabilizowany sektor energetyczny. Jeśli będziemy w stanie budować elektrownie fuzyjne, sprawi to, że nie będzie trzeba zużywać surowców w takich wielkich ilościach, a to z kolei znacząco pozytywnie wpłynie na środowisko.



1.  $D + T \rightarrow He-4 + n + 17.588 \text{ MeV}$
2.  $D + D \rightarrow He-3 + n + 3.2689 \text{ MeV}$
3.  $D + D \rightarrow T + p + 4.0327 \text{ MeV}$
4.  $He-3 + D \rightarrow He-4 + p + 18.353 \text{ MeV}$
5.  $Li-6 + n \rightarrow T + He-4 + 4.7829 \text{ MeV}$
6.  $Li-7 + n \rightarrow T + He-4 + n - 2.4670 \text{ MeV}$

Fusion Reactions for Thermo-nuclear Weapons

## 4. Przeprowadzenie testu

### Link do filmu z przeprowadzonego testu:

[https://youtu.be/W\\_UJDV1NxBU](https://youtu.be/W_UJDV1NxBU)

### 4.1 Sposób przeprowadzenia testu

Stanowisko jest zarządzane przez sterownik, który za nas przeprowadzi i zbierze dane za nas. W ustawieniach możemy zmienić wiele parametrów testu, który chcemy przeprowadzić, aby dostosować go do tego co chcemy aktualnie badać.

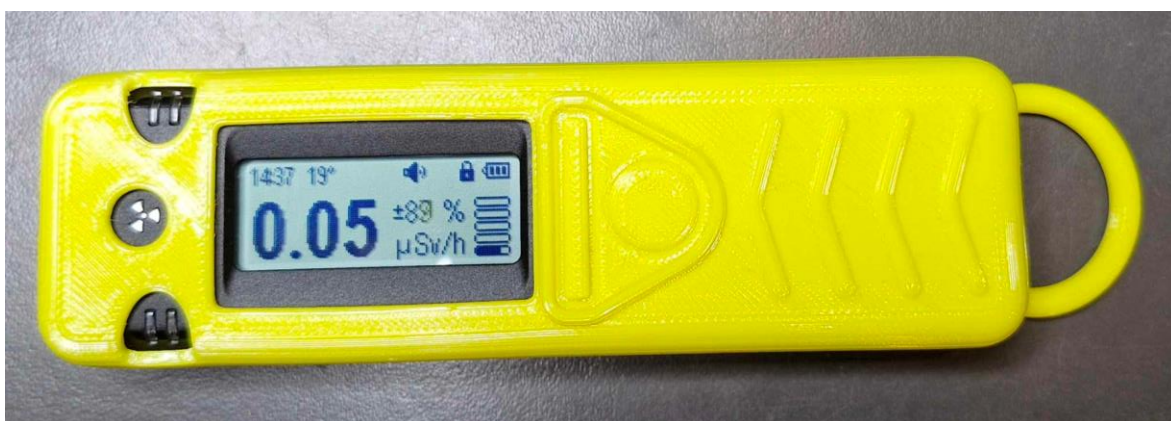
Sterownik przeprowadza test w trzech głównych etapach. Pierwszy z nich to przygotowanie stanowiska do pracy. W etapie tym następuje kilkukrotne odpompowanie powietrza z komory reaktora oraz wypełnienie komory deuterem z wytwornicy. Na koniec tworzymy w komorze próżnię odpowiedniej wartości do przeprowadzenia fuzji. Etap drugi to proces fuzyjny. W etapie tym podajemy wysokie napięcie na elektrody dzięki czemu atomy deuteru nabierają prędkości, aby potem się zderzyć. Etap trzeci to prezentacja wyników testu oraz danych zebranych przez czujniki.

### Instrukcja przeprowadzenia testu:

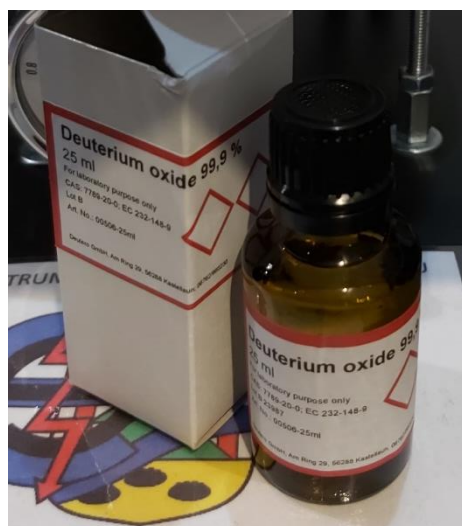
1. Załączyć zasilanie przełącznikiem głównym
2. Wcisnąć przycisk trybu automatycznego
3. Po przygotowaniu komory wycisnąć start w celu uruchomienia fuzji
4. Dokonać obserwacji oraz pomiarów
5. Zobaczyć wyniki testu i pomiarów
6. W razie problemów wcisnąć przycisk stop

## 4.2 Obserwacje

Przeprowadzono wiele testów z użyciem ciężkiej wody jako paliwa. Testy przebiegły pomyślnie zarówno od strony automatyzacji jak i procesów zachodzących w reaktorze. Stanowisko automatycznie przygotowuje komorę do przeprowadzenia fuzji oraz zbiera dane i przedstawia wyniki testów. Zwieszony poziom próżni pozwala na manipulację ciśnieniem i badanie fuzji w zależności od ciśnienia. W trakcie przebiegu procesu fuzji widać mocne światło z komory reaktora – rozgrzanie wolframu do wysokiej temperatury. Jeśli się przyjrzymy widać zielonkawą poświatę na szkle wziernym reaktora co potwierdza wysoką energię elektronów uderzających w szkło. Licznik Geigera zamocowany obok komory potwierdza wzrost promieniowania w trakcie pracy urządzenia. Dzięki późniejszej analizie widma promieniowania możemy stwierdzić, że w komorze reaktora powstał tryt.

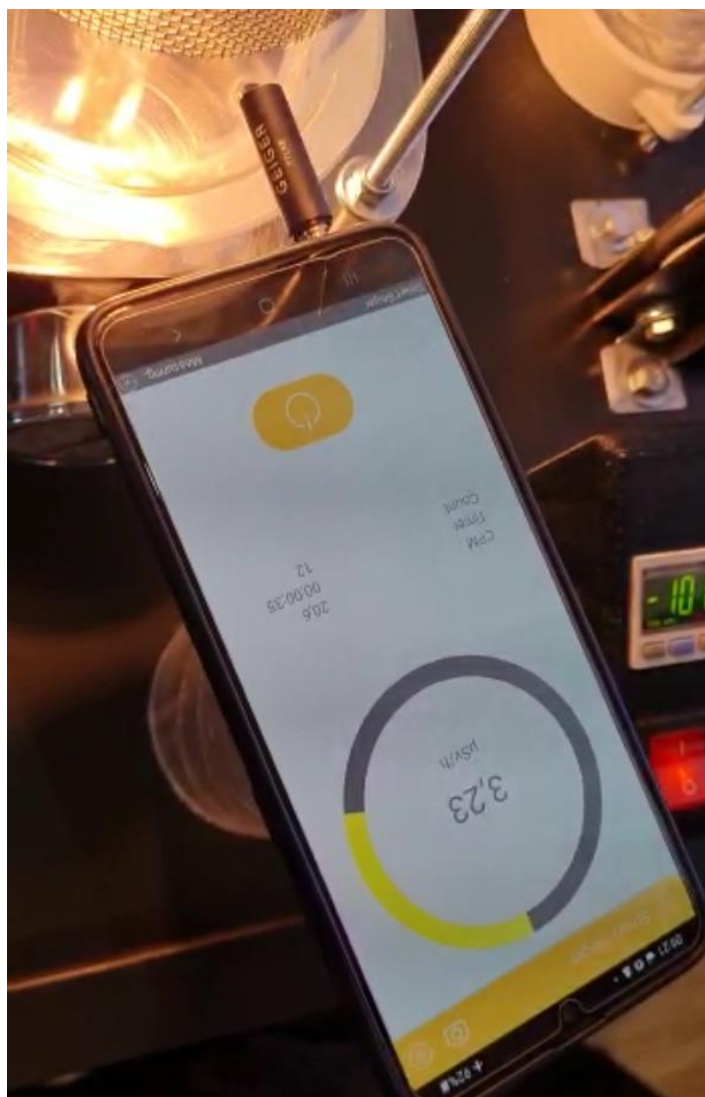


SPEKTROMETR PROMIENIOWANIA GAMMA



TLENEK DEUTERU – PALIWO DO WYTWORNICY





PODWYŻSZONE PROMIENIOWANIE Z REAKTORA

#### 4.3 Wnioski z przeprowadzonego testu

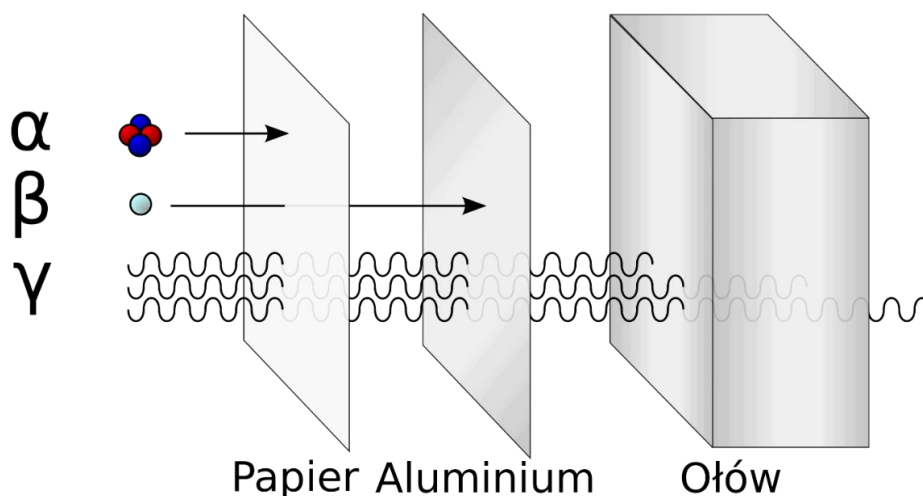
Przeprowadzone testy potwierdziły poprawne działanie reaktora. Główne problemy, czyli za „słaba” próżnia oraz za mała komora reaktora, które występowały w wcześniejszej wersji zostały rozwiązane. Zastosowaliśmy również bardziej zaawansowany sterownik, który pozwala na automatyczne rejestrowanie parametrów zjawiska oraz przetwarzanie i wyświetlanie ich. Stanowisko nie ma problemów z pracą w trybie automatycznym. Widać, że przy komorze reaktora mamy podwyższone promieniowanie. Dzięki analizie widmowej promieniowania potwierdziliśmy powstanie trytu, który jest gazem radioaktywnym. Zielonkawa poświata na szkle wziernym reaktora potwierdza wysoką energię elektronów uderzających w szkło. Badanie wygląda obiecująco, wyniki obserwacji potwierdzają możliwość wytwarzania energii za pomocą reaktora.

Urządzenie wytwarza śladowe ilości promieniowania, dlatego podam kilka informacji celem wyjaśnienia z czym mamy do czynienia. Po pierwsze reaktor wytwarza śladowe ilości promieniowanie tylko podczas pracy, czyli w momencie świecenia elektrody, **nie wytwarza żadnego promieniowania podczas całego procesu przygotowania komory.**

Warto podkreślić, że cały czas jesteśmy narażeni na promieniowanie i nie jesteśmy w stanie tego uniknąć, czy jest to promieniowanie kosmiczne, materii, która nas otacza, jedzenia lub nawet otaczających nas ludzi i zwierząt. Średnie promieniowanie tła w Polsce wynosi  $0,1\mu\text{Sv/h}$  jest to tzw. promieniowanie tła. Przeciętny Polak w ciągu roku otrzymuje dawkę  $2500\mu\text{Sv/rocznie}$ . Maksymalna dopuszczalna dawka promieniowania dla pracownika zawodowo narażonego na promieniowanie w Polsce to  $20\,000\mu\text{Sv/rocznie}$ .

#### **Reaktor wytwarza głównie promieniowanie:**

- $\alpha$  które jest jądrami helu i jest na tyle duże, że zatrzymują się na najbliższej materii, czyli ścianie komory, która ma  $0,5\text{cm}$  grubości
- $\beta$  które jest elektronami one są bardziej przenikliwe, ale dalej nie jest w stanie wydostać się przez półcentymetrową warstwę szkła.
- $\gamma$  które jest falą elektromagnetyczną i jest bardziej przenikliwa od pozostałych, ale nie jest wytwarzane w dużych ilościach. To właśnie promieniowanie gamma mierzymy, ponieważ tylko ono jest w stanie opuścić komorę reaktora.



Przeprowadzono wiele pomiarów mocy promieniowania oraz bezpieczeństwa. Wyniki testów potwierdzają, że stanowisko nie wytwarza niebezpiecznych ilości promieniowania, jest dla nas bezpieczne oraz mieści się w normach. Dla przykładu lot samolotem naraża nas na promieniowanie  $2,5\mu\text{Sv/h}$  co oznacza że jest tylko 20% mniejsze w porównaniu z komorą reaktora a pojedyncza tomografia klatki piersiowej to przyjęcie dawki  $7\,000\mu\text{Sv}$ .

**Według pomiaru nie jesteśmy w stanie przekroczyć dawki bezpiecznej, a dodatkowo już w odległości 30 cm od komory promieniowanie znacznie spada.**

**Promieniowanie jest tak niskie dlatego, że jego większość promieniowania zatrzymywana jest na szkle komory reaktora.**

## 5. Zastosowanie

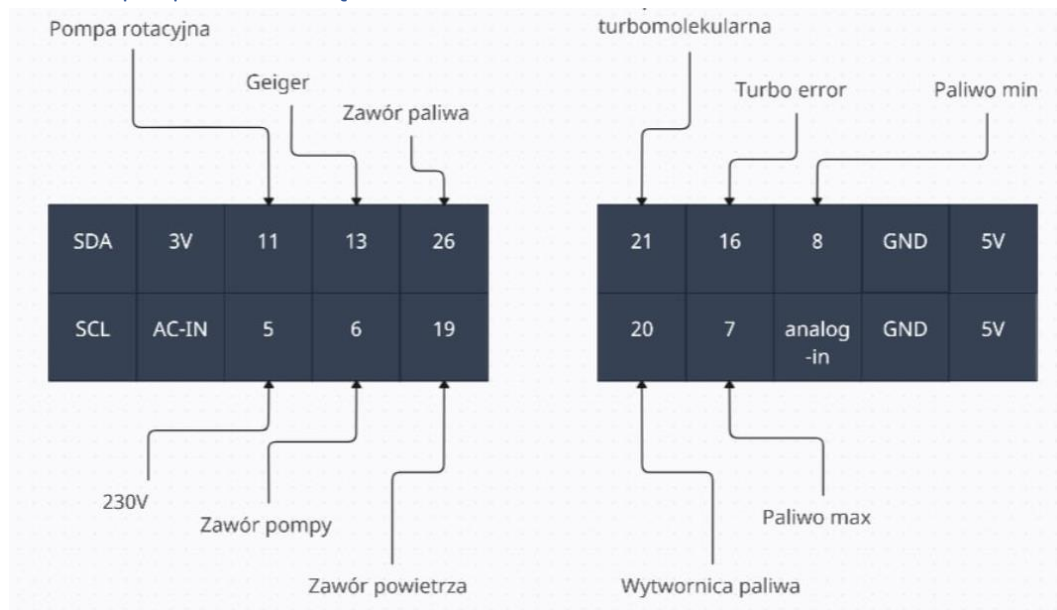
Stanowisko „Fuzja - bezemisyjna energia przyszłości” jest zbudowane w oparciu o konstrukcję fuzora. Stanowisko wyposażone jest w reaktor, wytwornice deuteru wraz z dozownikiem, przetwornice wysokiego napięcia oraz układy pomiarowe. Stanowisko posiada budowę modułową i jest w pełni zautomatyzowane, co pozwala na przeprowadzanie powtarzalnych testów. Daje również możliwość większego skupienia na badaniu zachodzącego zjawiska. W obecnej chwili na rynku nie występują tego typu urządzenia z wyjątkiem nielicznych laboratoriów fizyki jądrowej. Nasze urządzenie jest tanie i daje możliwość badania zjawiska fuzji już na poziomie szkoły średniej, co z pewnością przyspieszy rozwój technologii otrzymywania czystej energii.

## 6. Czynności serwisowe

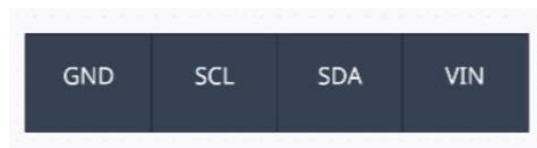
### 6.1. Zalewanie paliwa

1. Wyłączyć reaktor.
2. Odkręcić przewody paliwowe od wytwornicy paliwa.
3. Odkręcić śruby mocujące wytwornice.
4. Odkręcić zasilanie wytwornicy.
5. Zlać zużyte paliwo.
6. Przepłukać wytwornice wodą destylowaną.
7. Rozrobić 7ml paliwa (7ml tlenku deuteru 1,4g wodorotlenku sodu).
8. Przykręcić zasilanie wytwornicy.
9. Przykręcić śruby mocujące wytwornice.
10. Zalać paliwo przez jedno z wyprowadzeń.
11. Podłączyć przewody paliwowe zgodnie z oznaczeniami na nich i na przewodach zasilających.

## 6.2. Opis pinów w złączach



Złącza sterownika



Złącze Modułu pomiaru napięcia i natężenia

## 6.3. Adresy w magistrali I2C

Czujnik temperatury – 18

Miernik napięcia próżniomierza – 44

Sterowanie napięciem reaktora – 58

Pomiar napięcia reaktora –

Pomiar natężenia reaktora –

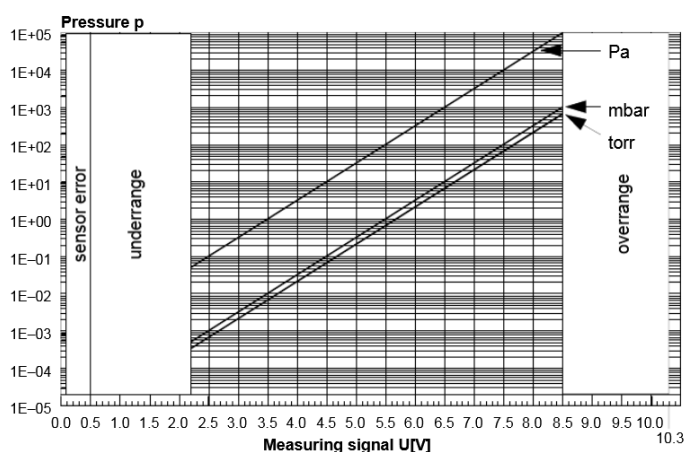
## 6.4. Przeliczniki napięć

Napięcie odczytane z czujnika = napięcie na reaktorze- **1V = 9,6KV**

Napięcie odczytane z czujnika = prąd na reaktorze- **1V = 10,6mA**

## 6.5. Przelicznik napięcia ciśnienia

Conversion curves



Conversion table

Measuring signal U [V]	[mbar]	Pressure p [Torr]	[Pa]
< 0.5		Sensor error	
0.5...2.2		Underrange	
2.2	$5.0 \times 10^{-4}$	$3.8 \times 10^{-4}$	$5.0 \times 10^{-2}$
2.5	$1.0 \times 10^{-3}$	$7.5 \times 10^{-4}$	0.1
3.5	$1.0 \times 10^{-2}$	$7.5 \times 10^{-3}$	1.0
4.5	0.1	$7.5 \times 10^{-2}$	10
5.5	1.0	0.75	100
6.5	10	7.5	1000
7.5	100	75	$1.0 \times 10^4$
8.5	1000	750	$1.0 \times 10^5$
8.5 ... 10.3		Overrange	

## 6.6. Wymiana oleju w pompie próżniowej

1. Wyłączyć reaktor.
2. Odpiąć zasilanie pompy.
3. Odkręcić śruby mocujące pompę.
4. Wyciągnąć pompę.
5. Odkręcić śrubę spustową i zlać olej.
6. Zakręcić śrubę spustową i odkręcić skraplacz oleju w górnej części pompy.
7. Postawić równo pompę i zalać olej do poziomu wskazanego na oknie inspekcyjnym.
8. Przykręcić skraplacz oleju do pompy.
9. Włożyć pompę do reaktora.
10. Przykręcić śruby mocujące pompę.
11. Podłączyć zasilanie pompy.

## Literatura

Do wykonania pracy skorzystano głównie ze źródeł internetowych:

<https://www.gov.pl/web/polski-atom/fuzja-jadrowa>

[https://pl.wikipedia.org/wiki/Reakcja\\_termoj%C4%85drowa](https://pl.wikipedia.org/wiki/Reakcja_termoj%C4%85drowa)

<https://www.ifpilm.pl/fuzja-w-szkole/jak-dziala-fuzja>

<https://www.sciencedirect.com/topics/mathematics/fusion-reaction>

<https://universe-review.ca/F14-nucleus07.htm>

**Praca naukowa:** "Experiments on D-D Fusion Using Inertial Electrostatic Confinement (IEC) Device in the Laboratory Exercises on Plasma Physics at the Comenius University" \*  
Michal Stano, Michal Raëko

Praca doktorska "Badania emisji promieniowania widzialnego i rentgenowskiego oraz oceny temperatury elektronowej w wyładowaniach typu Plasma-Focus"

Dobromił Radosław Załoga

Leaks: The Good, the Bad and the Ugly What leaks are, how to classify and size them, and how to make useful leaks. Steve Hansen Spectroscopic analysis of Linear shaped Inertial Electrostatic

Confinement Fusion (IECF) device

Tomonobu Itagaki, Kohei Okutomo, Jun Hasegawa, Eiki Hotta, Kei Takakura,

Discharge Simulation of IEC with the ion source

Y. Nakajima, Y. Ishikura, H. Osawa, and M. Ohnishi

THE FUNDAMENTALS AND CONSTRUCTION OF INERTIAL ELECTROSTATIC CONFINEMENT (IEC) FUSION DEVICES

T.F.H. Hampsink (6V2), S. Harmsma (6V2), J.P.B. Spekman (6V1)

Towards Advanced Operation Modes of Magnetic and Electrostatic Confined Fusion Machines

Maximilian Claus Constantin Messmer

Wyładowania w gazach pod niskim ciśnieniem      Dawid Maliczewski

Electron Clusters and Nuclear Fusion      M.RAMBAUT

FORMATION AND EXTRACTION OF A DENSE PLASMA JET FROM A HELICON-PLASMA-INJECTED INERTIAL ELECTROSTATIC CONFINEMENT DEVICE

BY BENJAMIN ADAM ULMEN