



Co zobaczyć (i słyszeć) w tokamaku czyli wyjątki z Muzeum Interesujących Impulsów

Nick Balshaw (autor)¹, Ewa Pawelec (wybór i tłumaczenie)²

¹Culham Centre for Fusion Energy

²Uniwersytet Opolski

JET

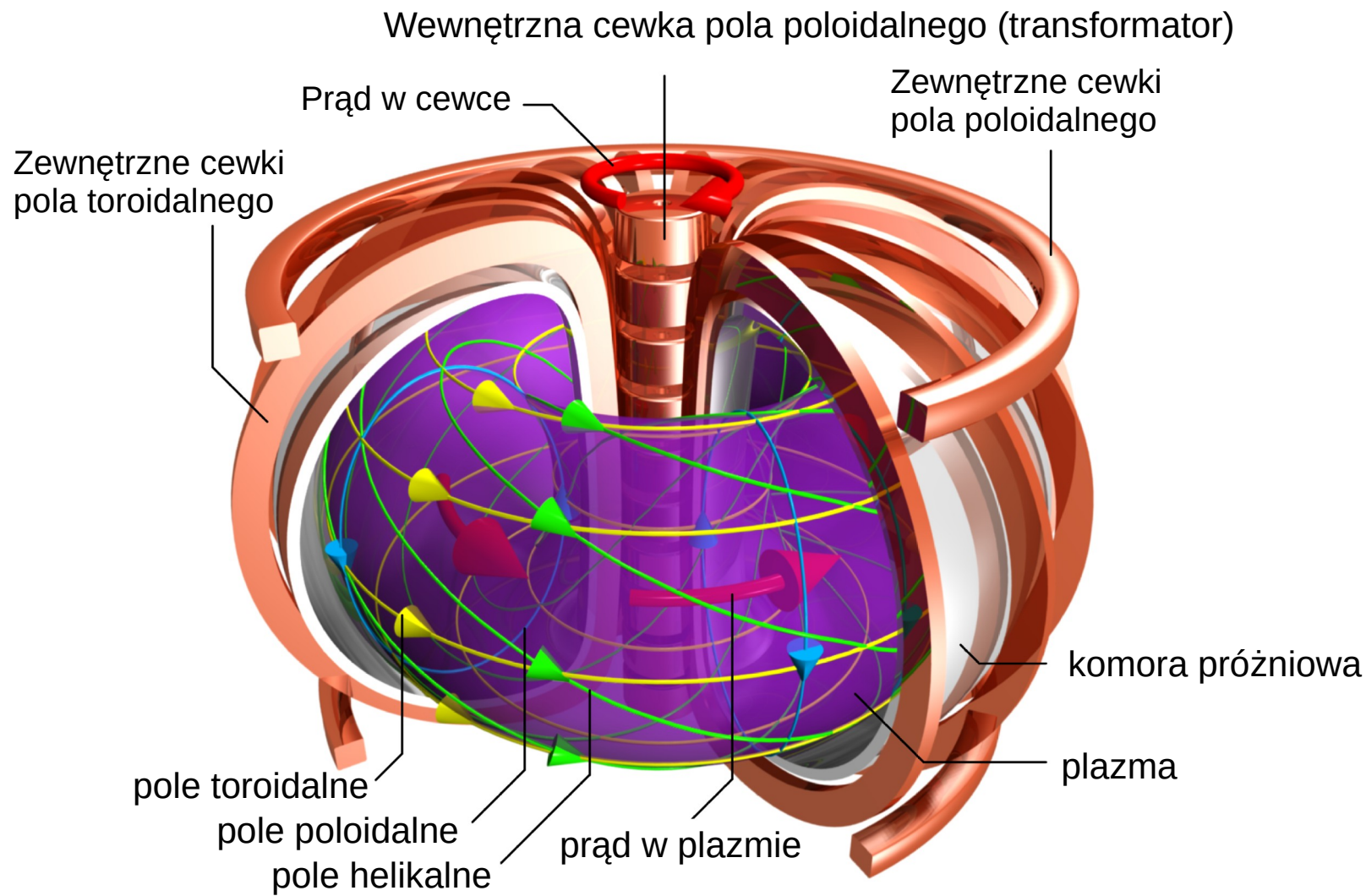


This work has been carried out within the framework of the EUROfusion Consortium and has received funding from the Euratom research and training programme 2014-2018 and 2019-2020 under grant agreement No 633053. The views and opinions expressed herein do not necessarily reflect those of the European Commission.



- Wstęp
- Historia życia jednego impulsu (poprawnego)
 - Przygotowanie
 - Przebicie (breakdown)
 - Faza limitera
 - Formowanie skrzyżowania (X-point) i faza dywertora
 - Grzanie wiązkami neutralnymi (NBI) – mod H, ELMy
 - Zakończenie (poprawne)
- Różne ściany, różne gazy – kolory mają znaczenie
- Interesujące impulsy:
 - ELMy: sterowanie (pastylki, RF “kicks”), wielkie ELMy
 - Problemy: przerwanie sznura plazmowego (disruption), MARFE
 - Duża moc, przemiatanie...
 - Wybryki

Wstęp – tokamak jako taki



Schemat C. Brandt

Tokamak JET w szczególności



- Angielska przeglądarka, do 2007:
 - https://www.euro-fusion.org/fileadmin/user_upload/Archive/wp-content/uploads/2012/01/Focus_on.pdf

Dane techniczne

Promień zewnętrzny	2,96 m
Promień wewnętrzny	1,25 m
Objętość komory	100 m ³
Pole magnetyczne	3,45 T
Moc grzania	38 MW
Prąd omowy	3,2 MA
(koło), 4.8 MA (kształt D)	

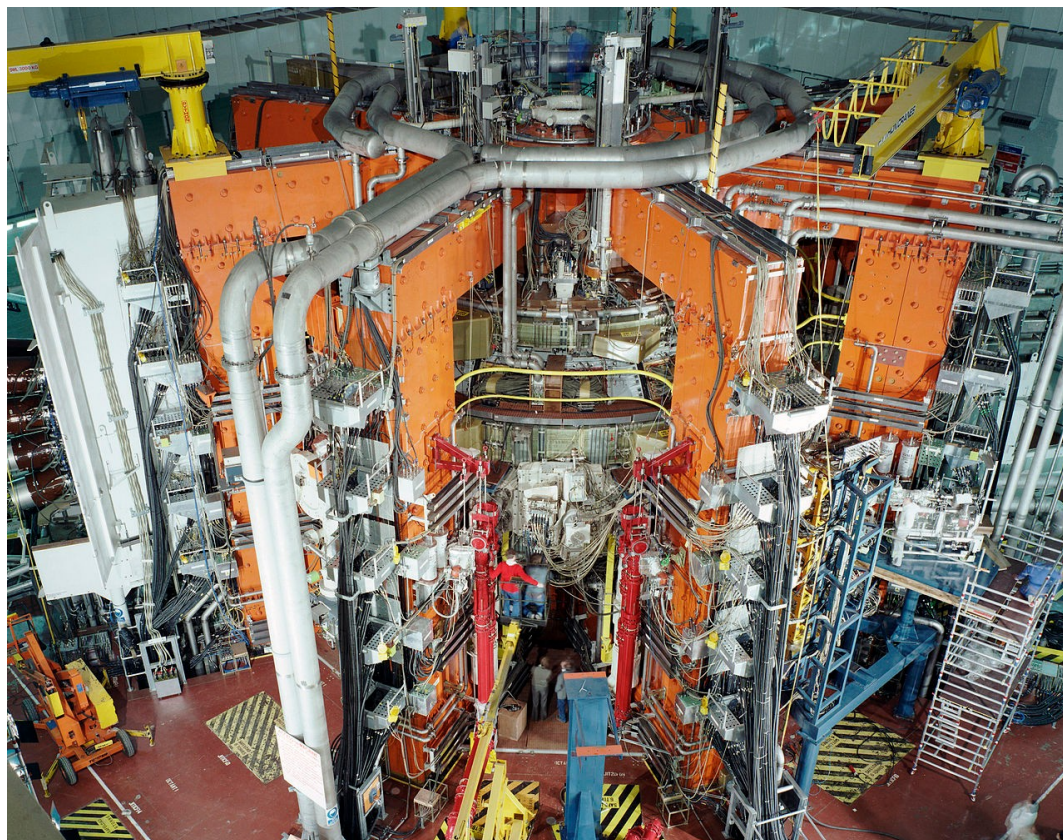
JT-60 SA:

3,4/1 m promienie,
90 m³ objętość, 4 T

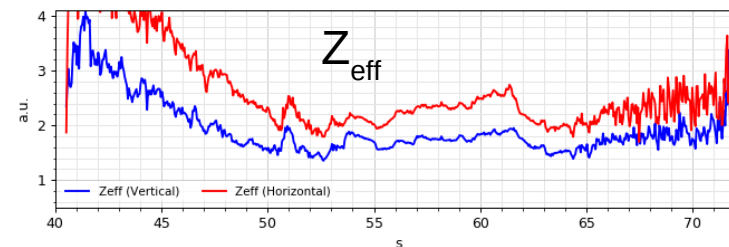
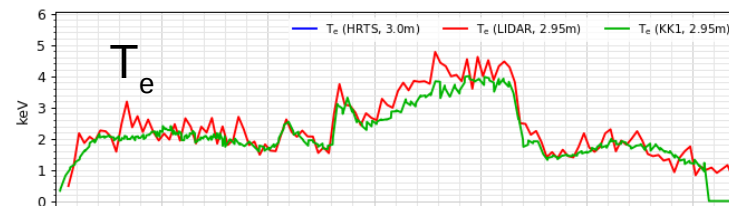
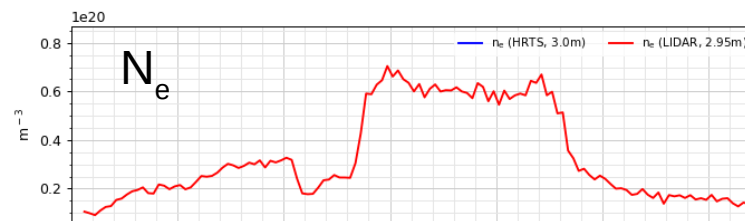
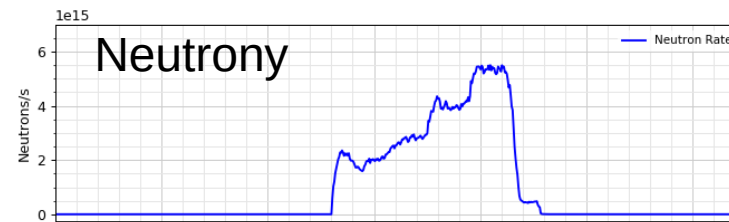
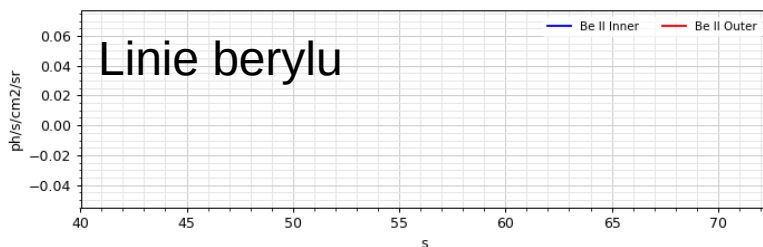
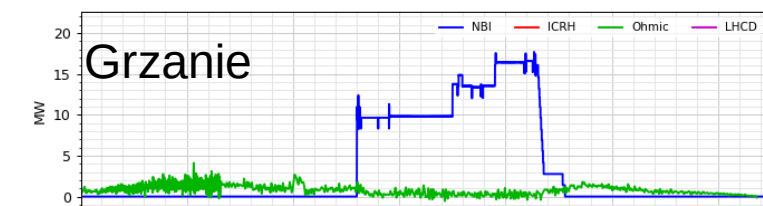
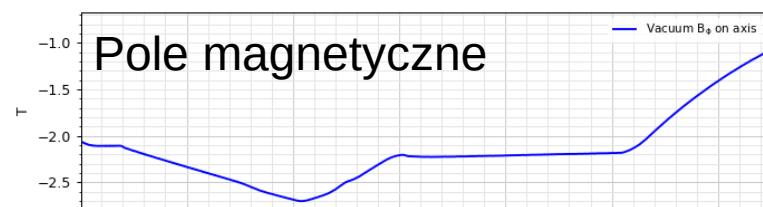
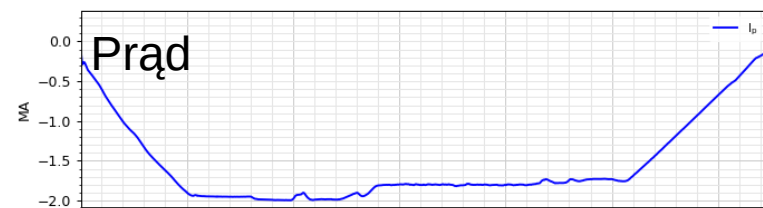
ITER

6,2 m promień zewnętrzny,
840 m³ objętość

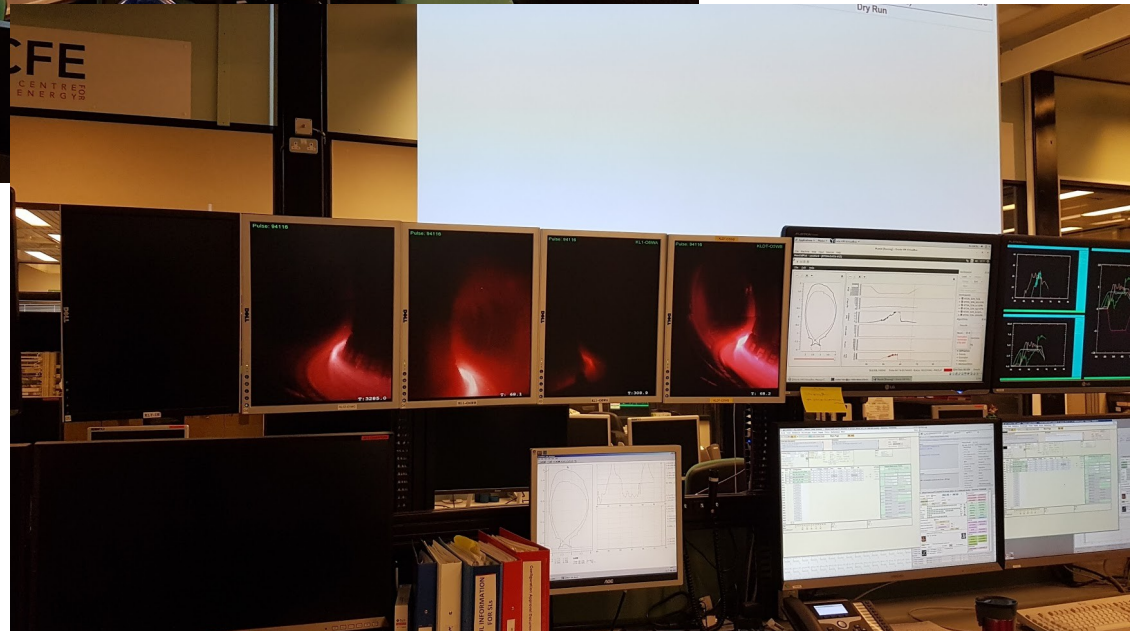
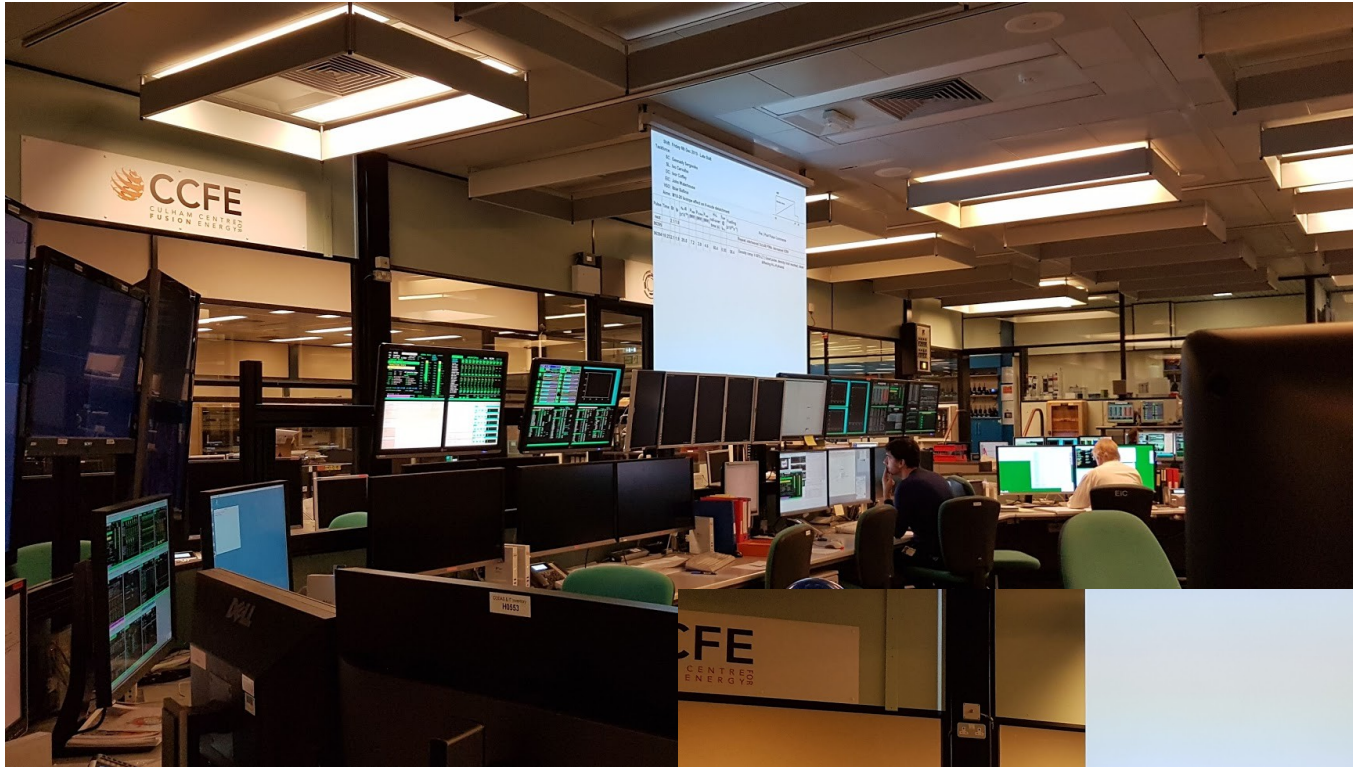
<https://www.iter.org/mach>



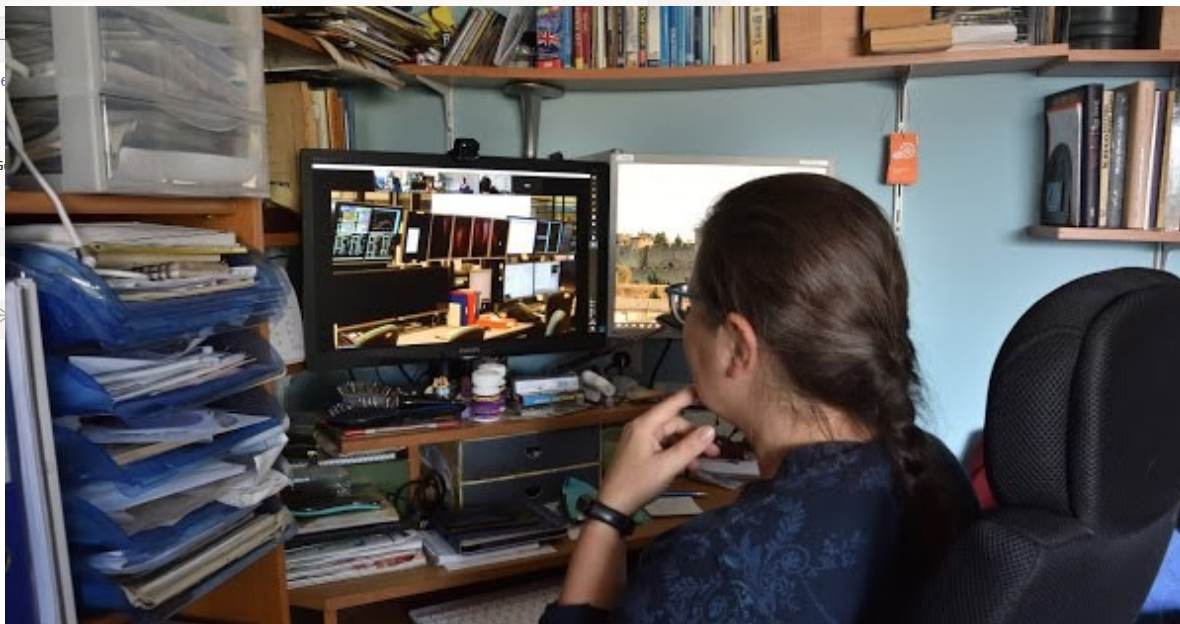
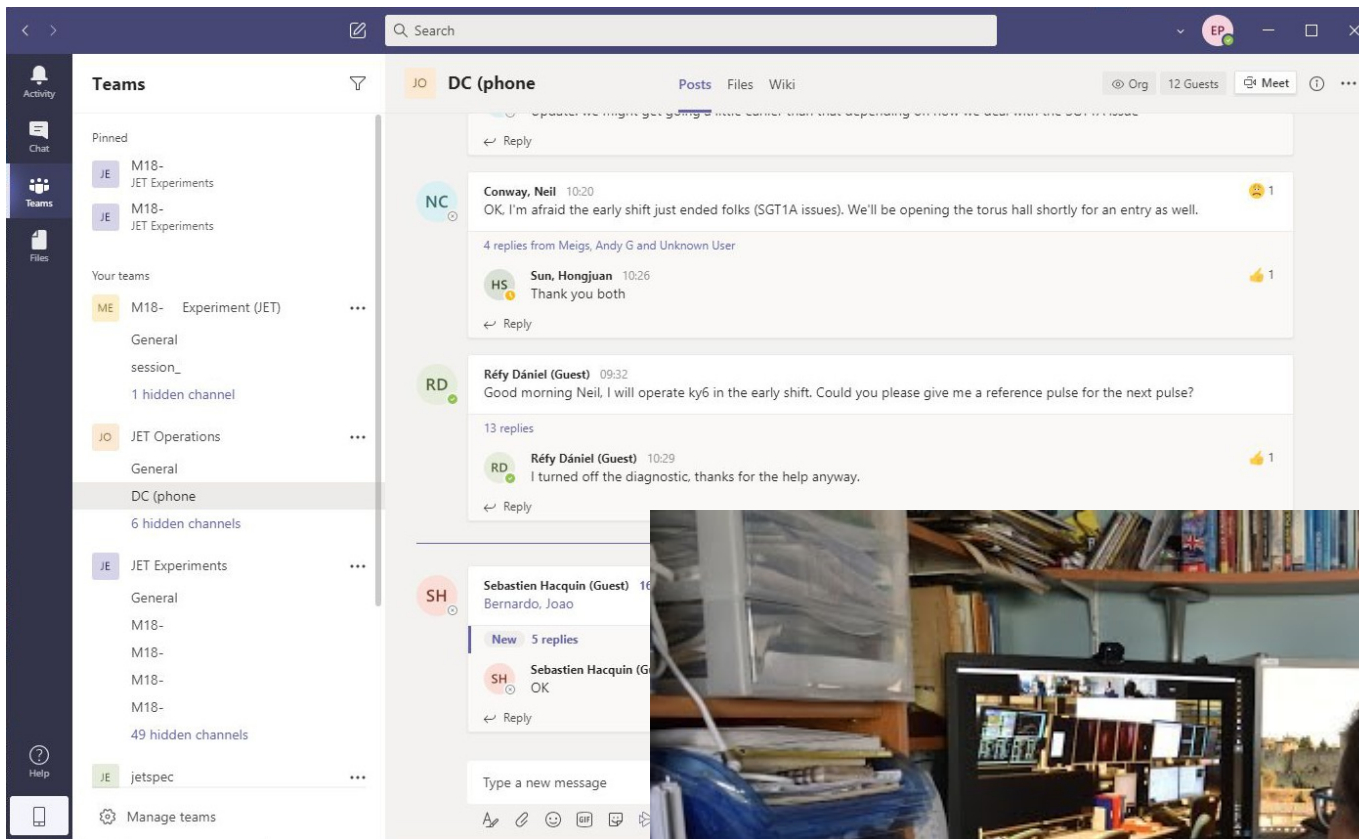
Impuls tokamaka – parametry



Obsługa tokamaka



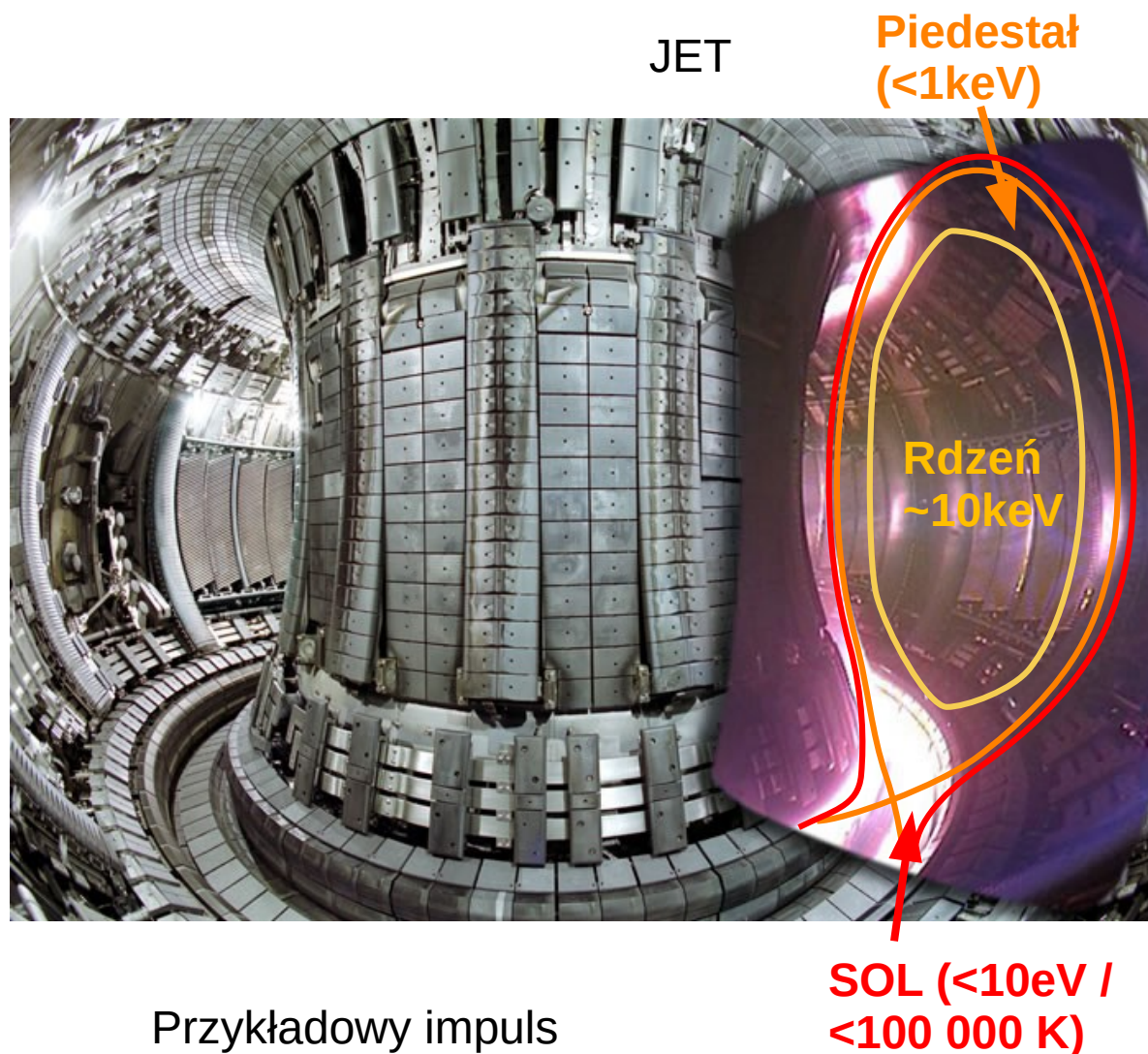
...w czasach zarazy....



Co i jak świeci w tokamaku



- Rdzeń, piedestał
– świecenie w zakresie rentgenowskim
- Promieniowanie widzialne
– styk plazmy z powierzchnią
– bardzo ważne na zasadzie "czy już poszła ścianka"
- Obserwacja
– kamery



Przykładowy impuls

Jak to wygląda – przygotowanie



- Impuls w JET trwa około 30 sekund, ale przedtem potrzebne jest przynajmniej kilka minut przygotowań
- Żeby nie obciążyć nadmiernie sieci krajowej, przez kilka minut prąd z sieci jest stopniowo przetwarzany na energię kinetyczną dwóch wielkich kół zamachowych (775 ton każde, prędkość wirowania do 225 rpm)
- Podczas impulsu większość energii do cewek wytwarzających pole magnetyczne (prąd 51 MA!) dostarczana jest właśnie z kół zamachowych
- Dodatkowe zużycie energii z sieci podczas impulsu wykorzystywane jest głównie do grzania plazmy (RF, wiązki neutralne)



- Wszystkie podstawowe systemy gotowe, rozpędzamy koła
- Koła osiągają założoną prędkość (np. limit – 30 rpm), zaczyna się odliczanie – 2,5 min
- Podczas odliczania ciągle sprawdzane są pozostałe systemy i zabezpieczenia
- Gdy zostanie 30 sekund do impulsu, odliczanie jest zawieszone, główny inżynier pyta, czy wszystko gotowe – jeżeli tak, idzie ostatnie 30 sekund
- Na ‘zero’ zaczyna się impuls, ale plazmy ciągle jeszcze nie ma – ładuje się główna cewka indukcyjna przekazująca prąd do plazmy
- Tuż przed 40 sekundą do torusa wpuszczany jest gaz (masa porównywalna do masy znaczka pocztowego), a główna cewka indukcyjna zostaje odłączona, prąd spada do zera w ~ 1 s
- W gazie indukuje się prąd wzrastający do ~ 1 – 2 MA – impuls się zaczyna

Przykładowy impuls

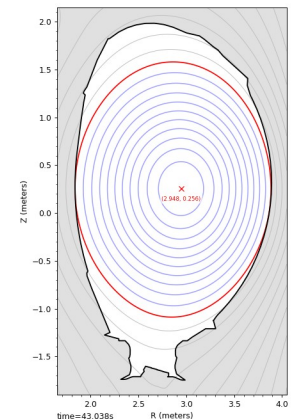
Start plazmy – przebicie (breakdown)

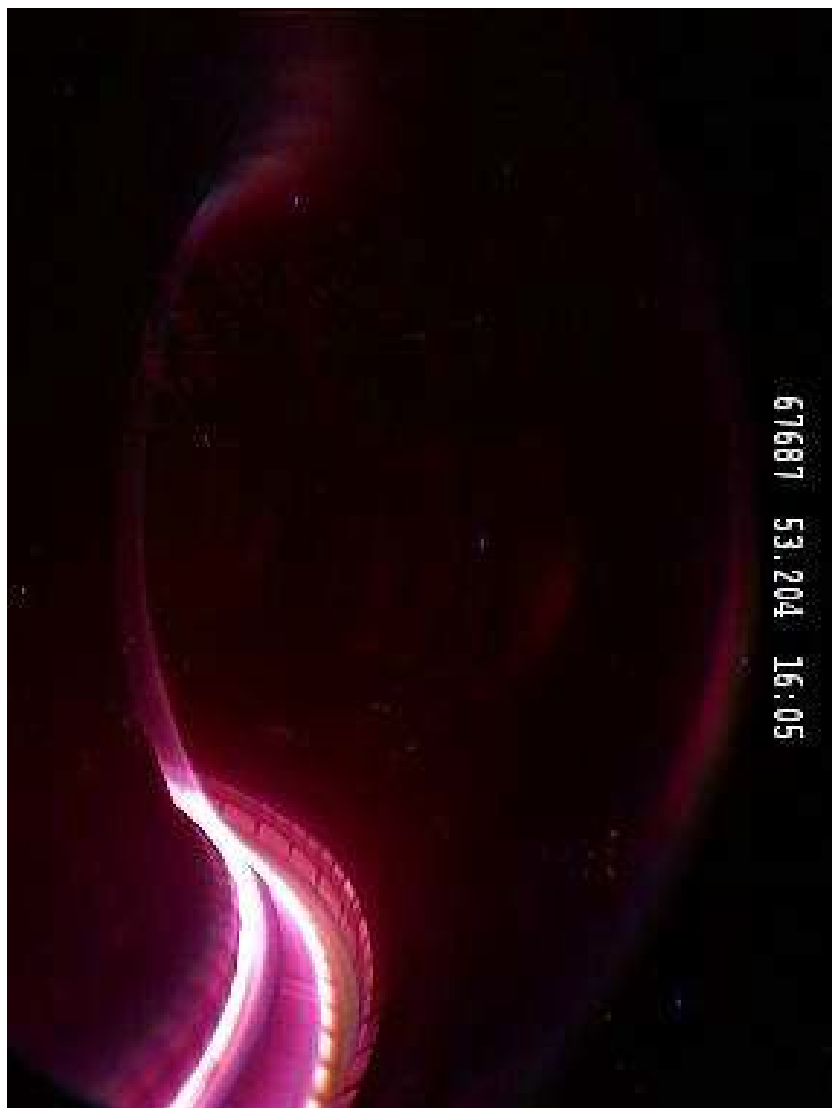


- Po 40 ms widać słaby krąg plazmy na dole komory, ukształtowany za pomocą pola magnetycznego
- Generacja plazmy ułatwiona jest tym, że gaz jest zjonizowany promieniowaniem ścianek JETa, lekko radioaktywnych
- Prąd w cewce głównej jest teraz odwrócony i powoli narasta, przekazując nadal energię do plazmy

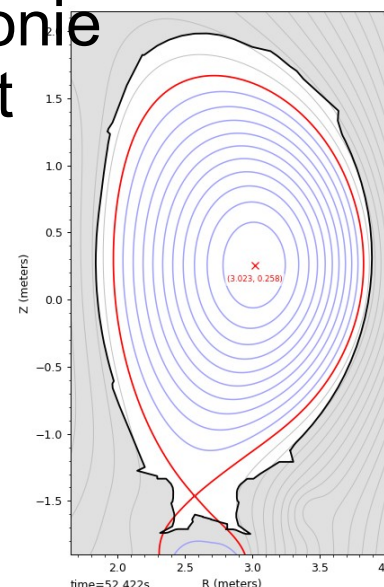


- Plazma szybko rozszerza się, wypełniając komorę i dotykając ograniczników (*limiters*) – wewnętrznego lub zewnętrznego
- Ta faza może trwać nawet cały impuls (badania oddziaływania plazmy z ogranicznikami)





- Pole magnetyczne zmienia się tak, by zamiast krążenia w zamkniętej “rurze” plazma odpływała w dół, w rejon dywertora
- Nazywa się to utworzeniem punktu X, skrzyżowania
- Plazma w rejonie dywertora jest dostatecznie chłodna, by świecić w zakresie widzialnym





- Na tym etapie włączone (dla przykładowego impulsu – stopniowo) jest grzanie dodatkowe, tu wiązkami neutralnymi (NBI)
- Diagnostyka, której już nie ma – wysuwana sonda mierząca parametry plazmy (to jej silnik syczy, nie plazma)



- Mod L, w poprzednich sekundach, jest “spokojny”, ale energia cząstek jest dość niska, po odpowiednim podgrzaniu przechodzimy do modu H
- Mod H charakteryzuje się lepszą wydajnością, ale mniejszą stabilnością na brzegach – ELMs (Edge Localized Modes)



- Prąd plazmy zmniejsza się, plazma “zwija się” znowu w kształt rury i jest “zrzucona” z rozmysłem i bez szkód, na wewnętrzne ograniczniki
- Prezentowane tu zakończenie nazywane jest “soft stop”, czyli zakończeniem gładkim, bezproblemowym – tak powinno być zawsze, ale niekoniecznie tak jest

Przykładowy impuls



- ELMy, sterowanie nimi
- Przemiatanie plazmy
- Kolorki, czyli skład ma znaczenie – D vs He
- Czasem plazma robi coś dziwnego:
 - Złe sterowanie przy początku
 - MARFE (multifaceted asymmetric radiation from the edge)
 - Przerwanie sznura plazmowego (disruption)
 - UFOs
 - Napływ zanieczyszczeń
 - Smutna historia sondy KY3