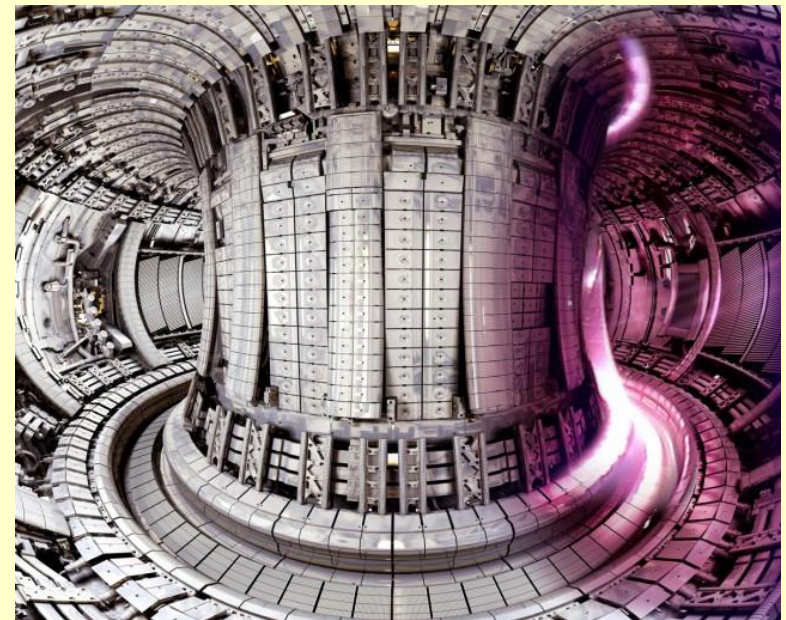
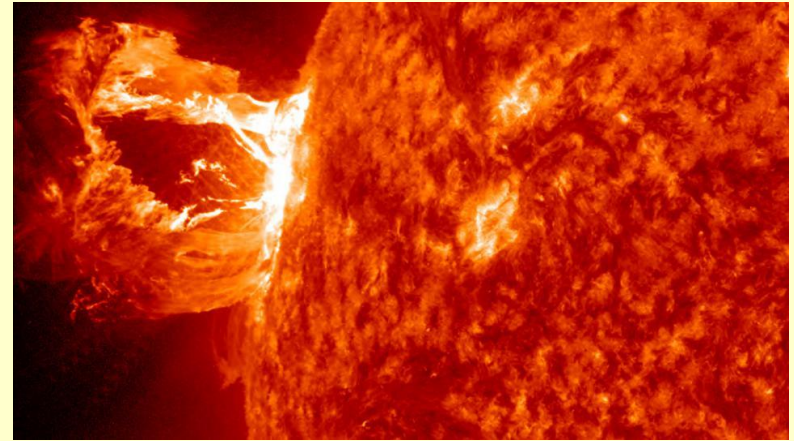


Jaderná fúze – řešení budoucnosti energetiky?

Vladimír Wagner

Ústav jaderné fyziky AV ČR Řež a FJFI ČVUT Praha

- 1) Úvod
- 2) Fúzní reakce v přírodě i laboratoři
 - a) Termojaderná fúze
 - b) Čím se liší fúze ve Slunci a v laboratoři
 - c) Fúzní reakce na Slunci a v laboratoři
 - e) Lawsonovo kritérium
- 3) Jak uskutečnit termojadernou fúzi na Zemi
 - a) Inerciální udržení plazmatu
 - b) Magnetické udržení plazmatu
 - c) Různé typy magnetických nádob
- 4) Fúze pro energetiku
 - a) Fúzní ITER
 - b) DEMO – cesta k fúzní elektrárně
 - c) Termojaderný pohon kosmických lodí
- 5) Závěr



Úvod

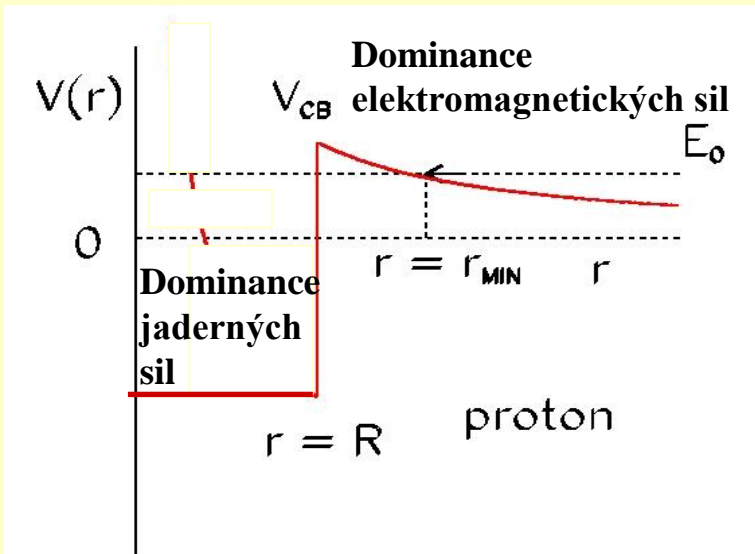
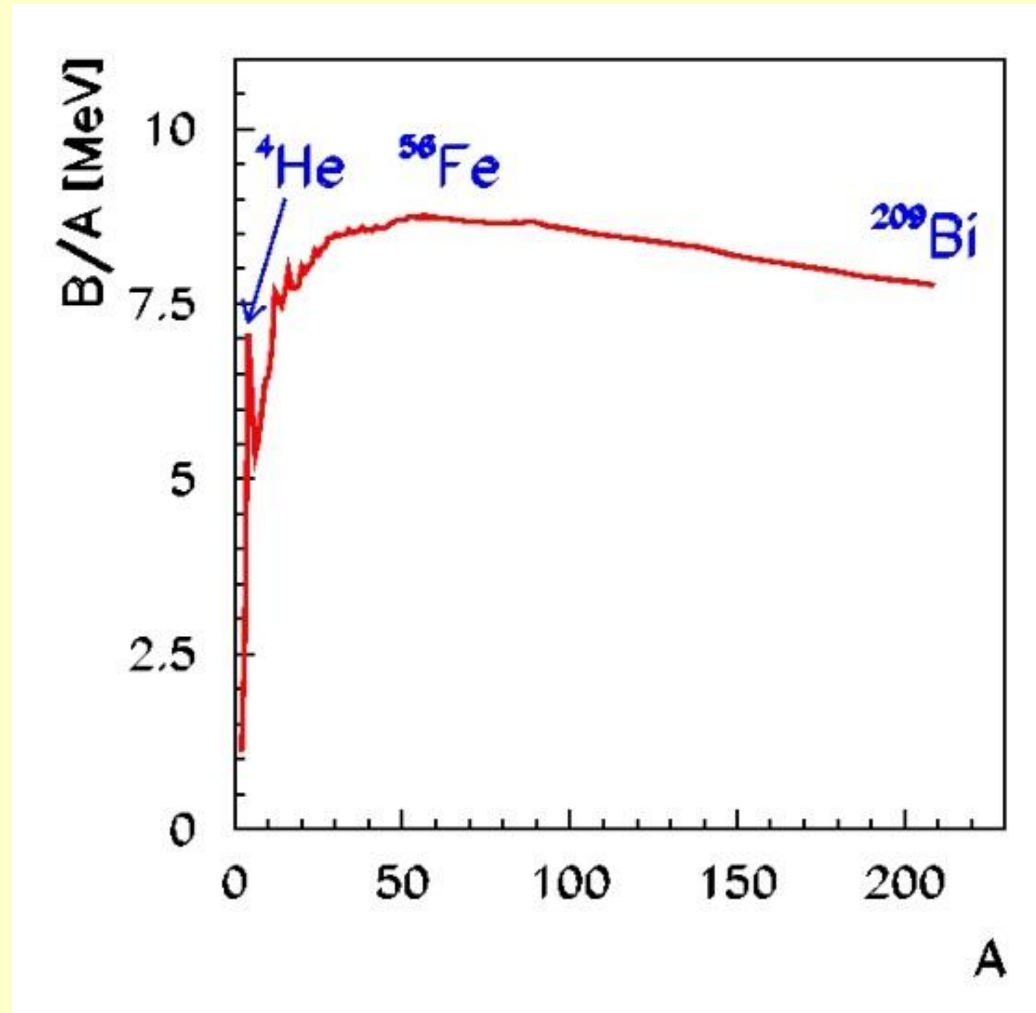
Vše postaveno na závislosti vazebné energie na nukleon: Maximum u železa znamená, že lze získávat energii štěpením těžkých prvků nebo fúzí lehkých prvků

Jádra jsou kladně nabitá – odpuzují se – coulombovská bariéra

Dvě možnosti překonání coulombovské bariéry:

- 1) Klasické – dodat vyšší energii
- 2) Kvantové – tunelování

Nutnost dostatečné kinetické energie



Vazbová energie vztažená na jeden nukleon B/A : Maximum jádro ^{56}Fe ($Z=26$, $B/A=8,79$ MeV).

Pro získání energie: 1) Slučovat lehká jádra 2) Štěpit těžká jádra

$8,79$ MeV/nukleon $\rightarrow 1,4 \cdot 10^{-13}$ J/ $1,66 \cdot 10^{-27}$ kg = $8,7 \cdot 10^{13}$ J/kg (spalování benzínu: $4,7 \cdot 10^7$ J/kg)

$E = mc^2$ - relativně velká vazebná energie \rightarrow viditelná změna hmotnosti (0,9 %)

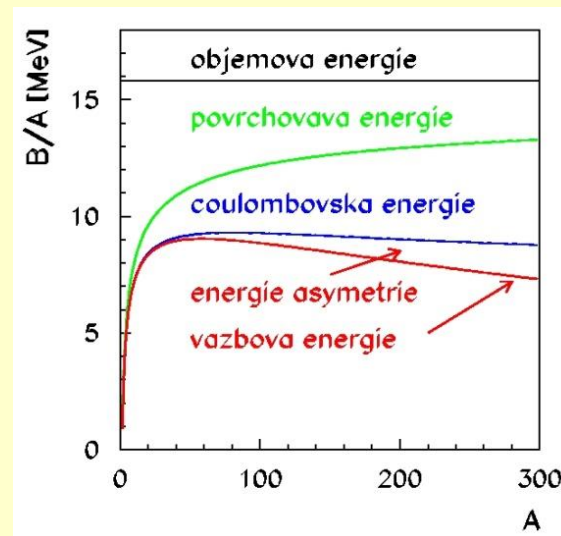
Jaderné reakce – velmi kompaktní zdroj s velkou hustotou produkce energie

Velmi vysoká vazebná energie ^4He oproti okolním jádrům – velká uvolněná energie při fúzi jader končící u helia – fúze je ještě kompaktnější než štěpení

Zajímavé problémy pro praktické odvození a počítání umožňující srovnání jaderné a elektromagnetické interakce:

- 1) Určení coulombovské bariéry
- 2) Kapkový model a Weizsäckerovy formule

Jaderné síly mají krátký dosah a jsou nasycené, elektrické mají nekonečný dosah



$$M(A,Z) = Zm_p + (A-Z)m_n - B(A,Z)/c^2$$

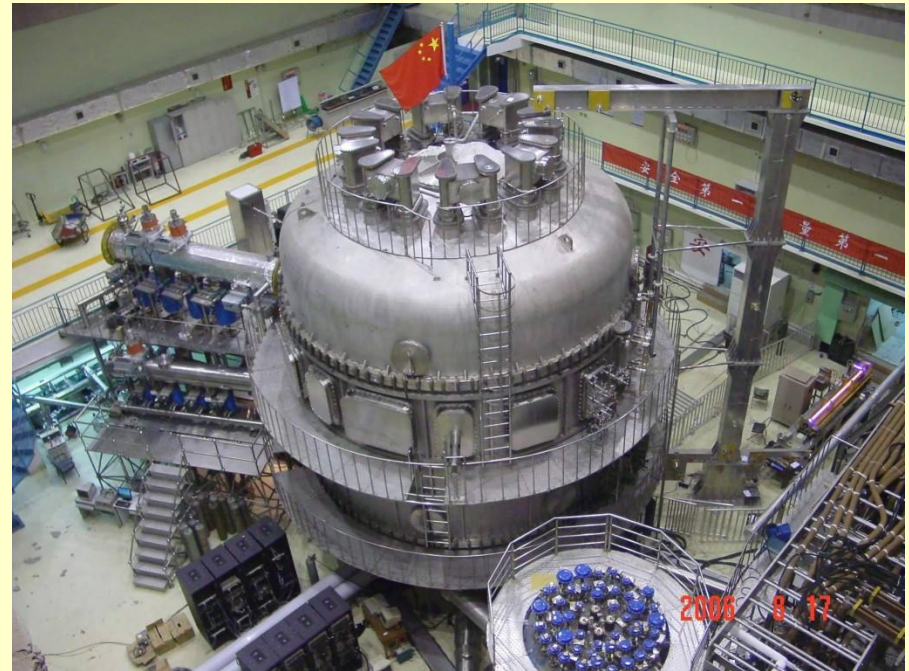
$$M(A,Z) = Zm_p + (A-Z)m_n - a_v A + a_s A^{2/3} + a_c Z^2 A^{-1/3} + a_a (Z-A/2)^2 A^{-1} \pm \delta$$

Jak překonat coulombovskou bariéru – termojaderná fúze

- 1) Urychlíme proud částic (jader) na dostatečnou kinetickou energii – uspořádaný pohyb svazku částic - fúzory, reakce na urychlovači – studené urychlené plazma
Neslouží k produkci energie (velké ztráty), ale užitečné zdroje neutronů
- 2) Využití chaotického tepelného pohybu částic plazmatu – ohřev plazmatu na velmi vysoké teploty ($10^7 - 10^9$ K) – **termojaderná fúze** – uvnitř Slunce, v laboratoři



Fúzor využívá elektrické pole pro urychlení iontů pro překonání coulombovské bariéry



Tokamak využívá magnetickou past pro udržení horkého plazmatu

Termojaderná fúze na Slunci

Obrovský objem plazmatu udržován gravitačním polem – nitro Slunce s poloměrem 175 000 km (objem 0,2 % celku): $M = 3,6 \cdot 10^{30}$ kg, $T = 15$ milionů K, hustota $162\,000$ kg/m³ ($m_p = 1,67 \cdot 10^{-27}$ kg) $\rightarrow 10^{32}$ protonů/m³, $w = 0,1$ mW/kg

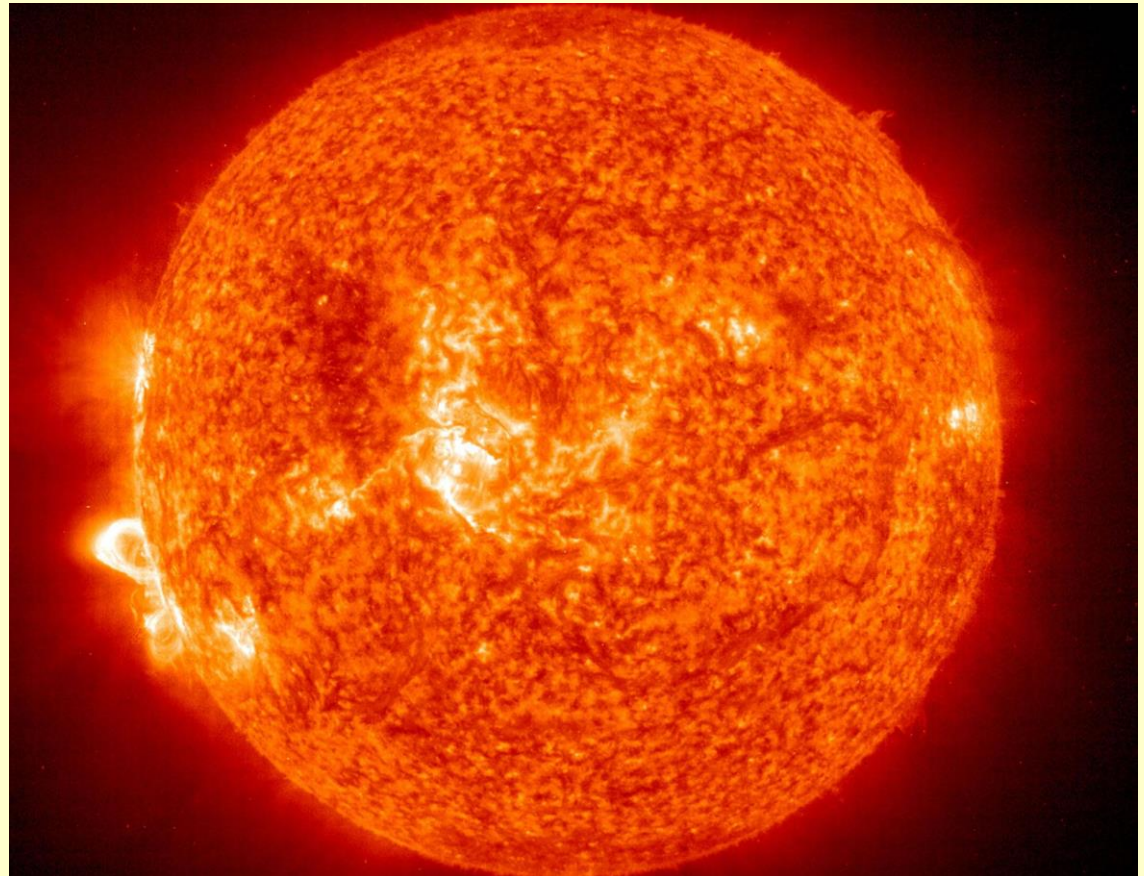
Reakce protonu s protonem za vzniku deuteronu probíhá při přeměně jednoho protonu na neutron – možné pouze **slabou interakcí** – malá pravděpodobnost

Při **p-p cyklu** se uvolňuje celkově 26,7 MeV energie na reakci

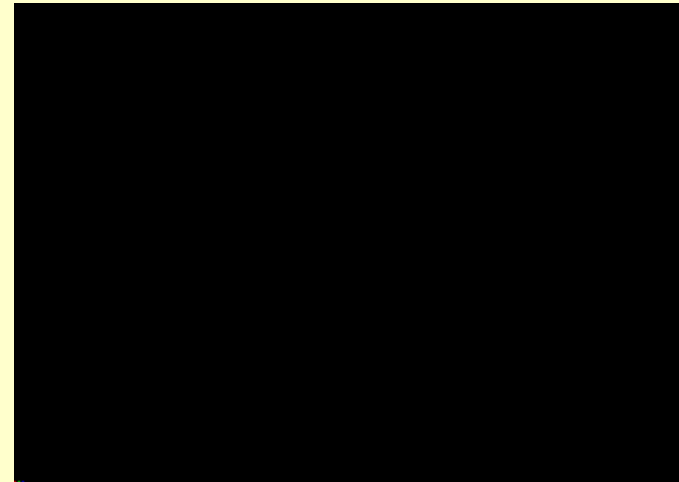
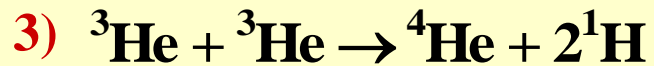
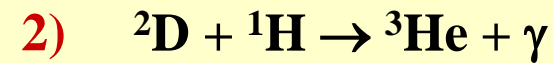
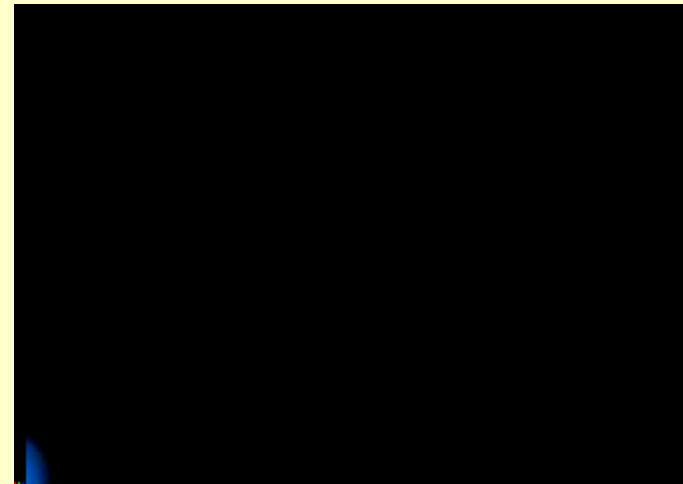
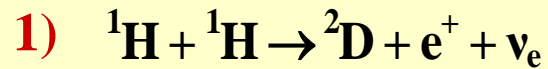
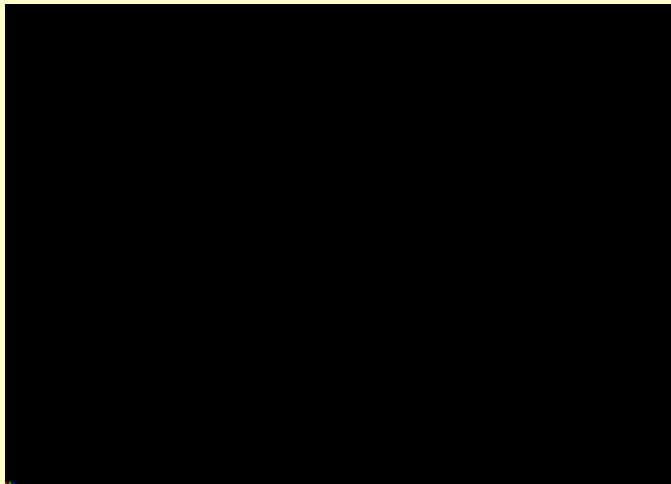
Kromě p-p cyklu se ještě uplatňuje **CNO cyklus** s katalytickou funkcí uhlíku a

Salpeterův cyklus, kdy se 3 helia 4 sloučí v uhlík

V laboratoři nemáme takové objemy a musíme využít reakce, které mají vysoký účinný průřez



Proton-protonový cyklus na Slunci



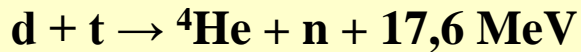
Označení					
	protony		pozitrony		neutrino
	neutrony		elektrony		fotony

Vhodné reakce pro fúzní elektrárny

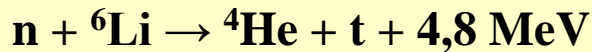
Slučování lehkých prvků: p, d, t, ^3He

Uvolnění velkého množství energie v podobě kinetické energie produktů nebo gama záření

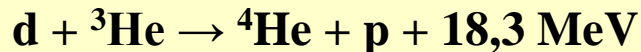
Reakce deuteria s tritiem:



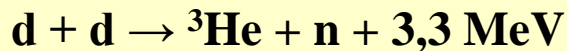
Problém s tritiem, to lze získat z lithia:



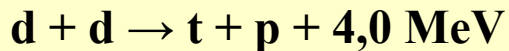
Reakce deuteria s heliem 3:



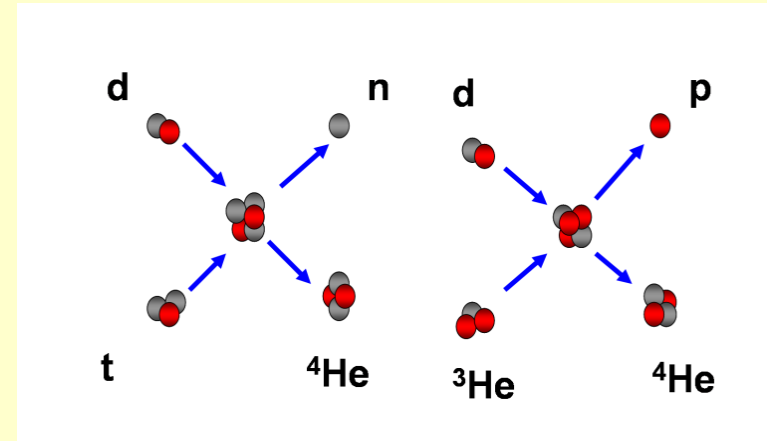
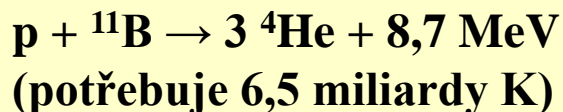
Problém s heliem 3 (na Měsíci?) nebo



Spolu s:



Případně reakce:



Vhodné reakce jsou $\text{d} + \text{t}$ a $\text{d} + {}^3\text{He}$



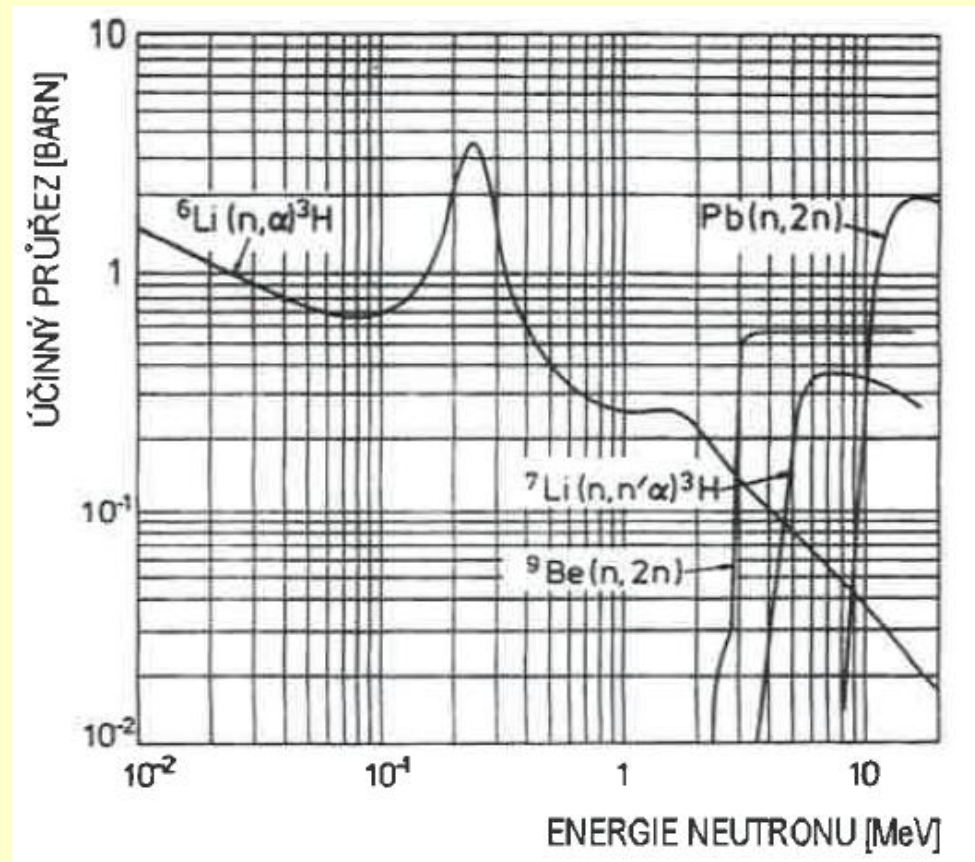
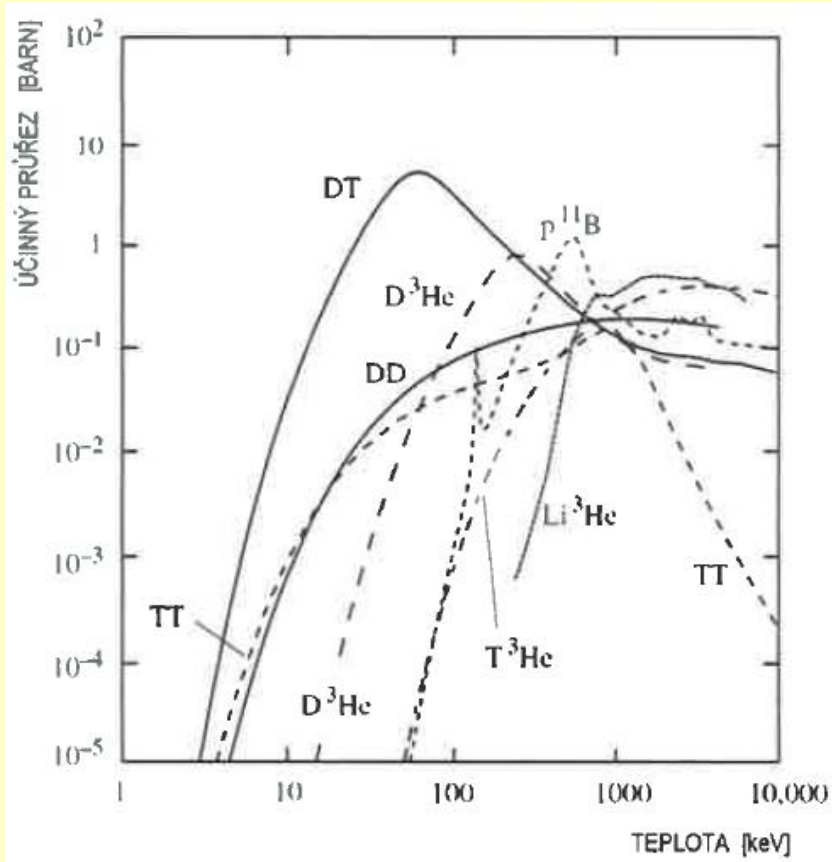
Termojaderný pohon hvězdoletu: Teodor Rotrekl: „Záhady pro zítřek“

Podstatné jsou účinné průřezy jaderných reakcí

Účinné průřezy (pravděpodobnosti) různých reakcí: –

- 1) fúzních - závislost na teplotě (vyjádřené v energetických jednotkách)
- 2) Produkce tritia z lithia – závislost na energii neutronů

Převod teploty v kelvinech na energetické jednotky: $k = 8,617 \cdot 10^{-5} \text{ eV/K}$



Lawsonovo kritérium (John D. Lawson 1955)

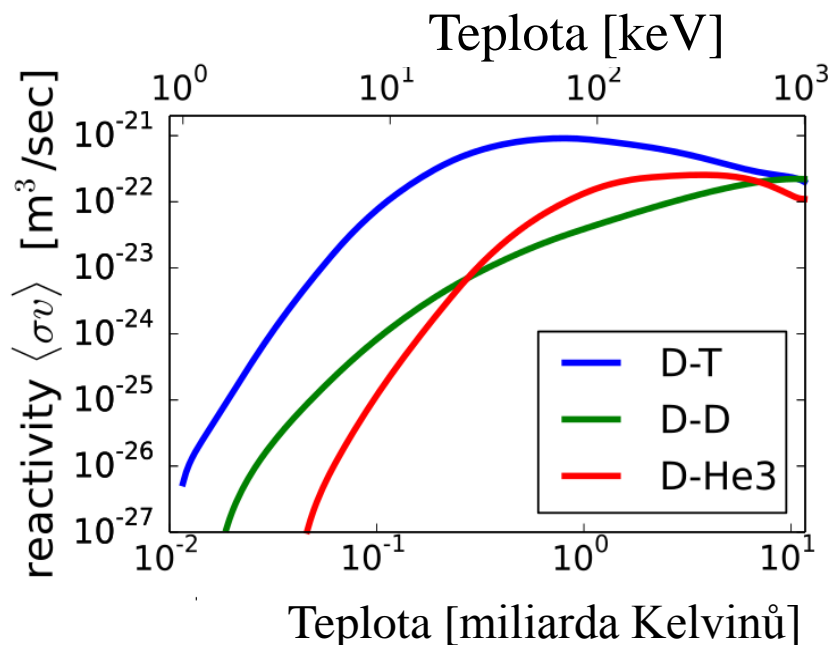
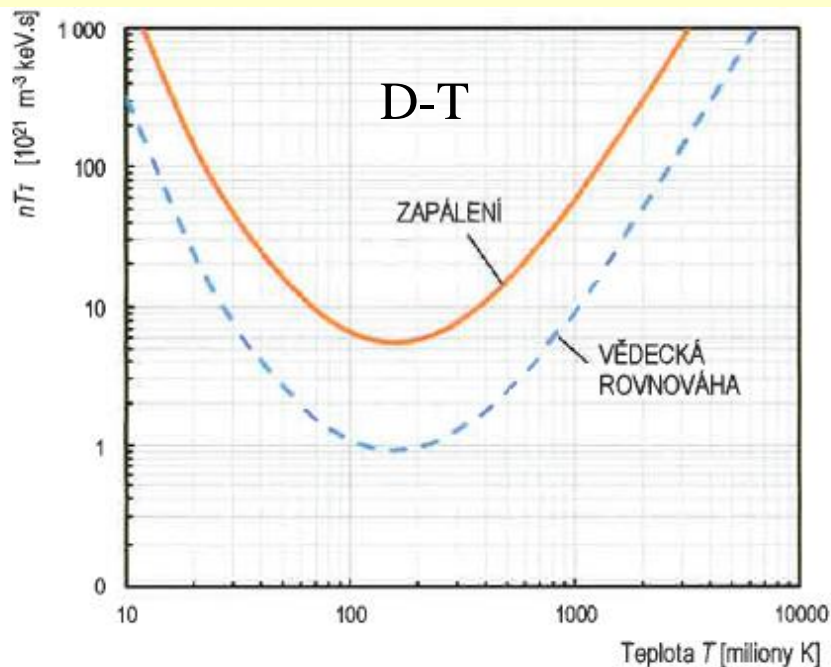
Při dané teplotě je potřeba dostatečný součin hustoty plazmatu a času jeho udržení, aby proběhlo dostatek fúzních reakcí pro získání celkového energetického zisku:

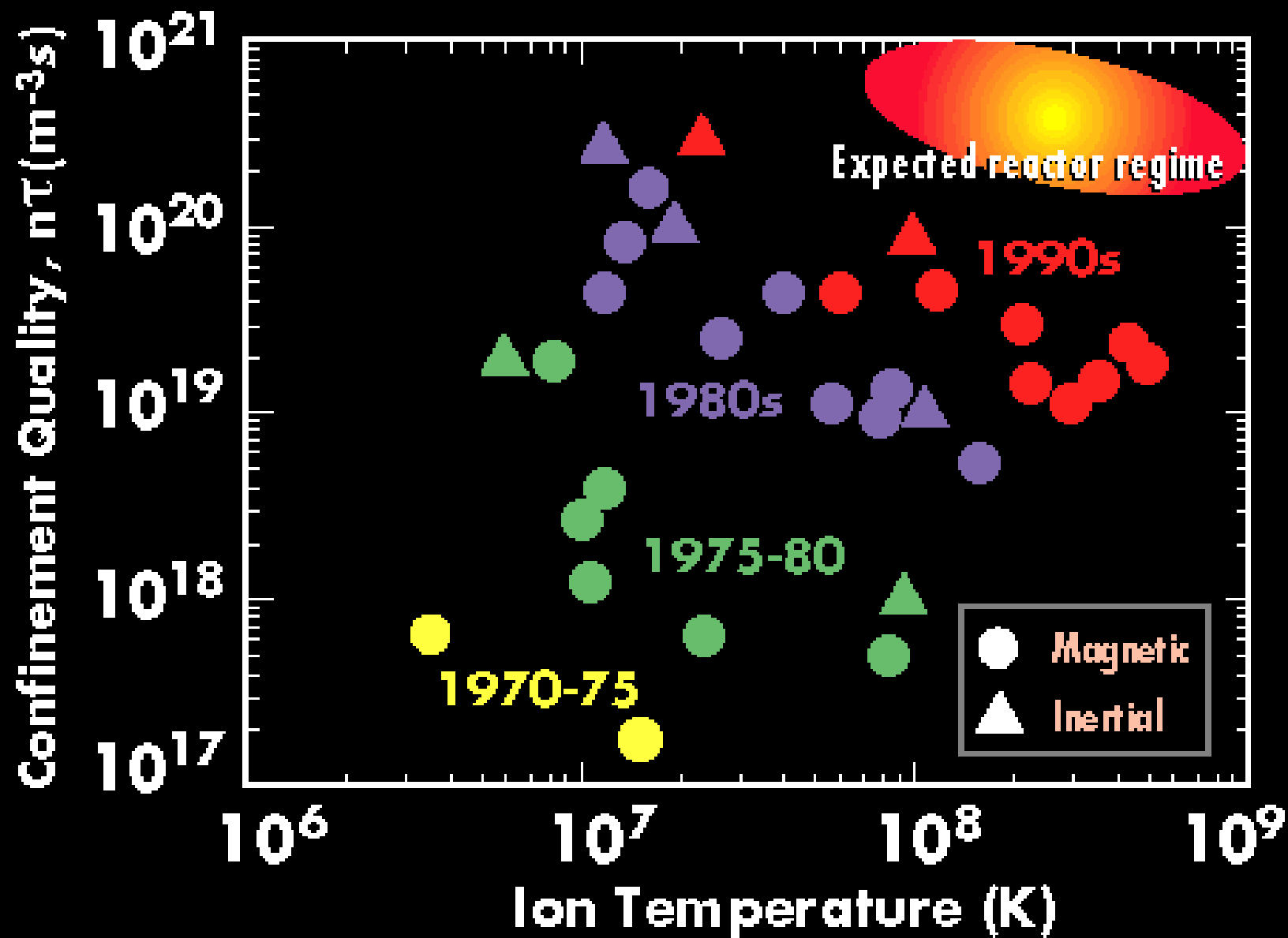
(v okolí optimální, pro D-T je 165 milionů K) $n \cdot T \cdot \tau > f(T)$

Vědecké vyrovnání: rovnováha fúzního výkonu a ohřevu plazmatu

Zapálení: rovnováha fúzního výkonu absorbovaného a ztrátového výkonu plazmatu

Inženýrské vyrovnání: rovnováha hrubého výkonu a vlastní spotřeby fúzní elektrárny

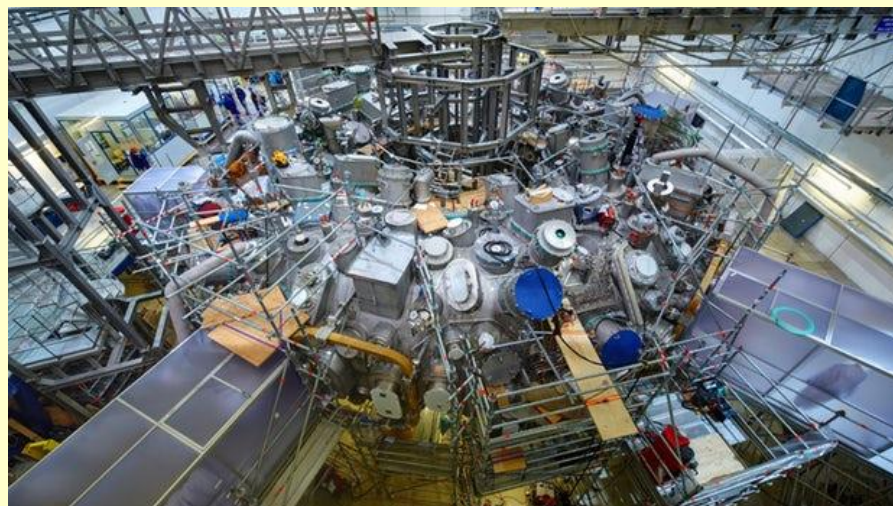
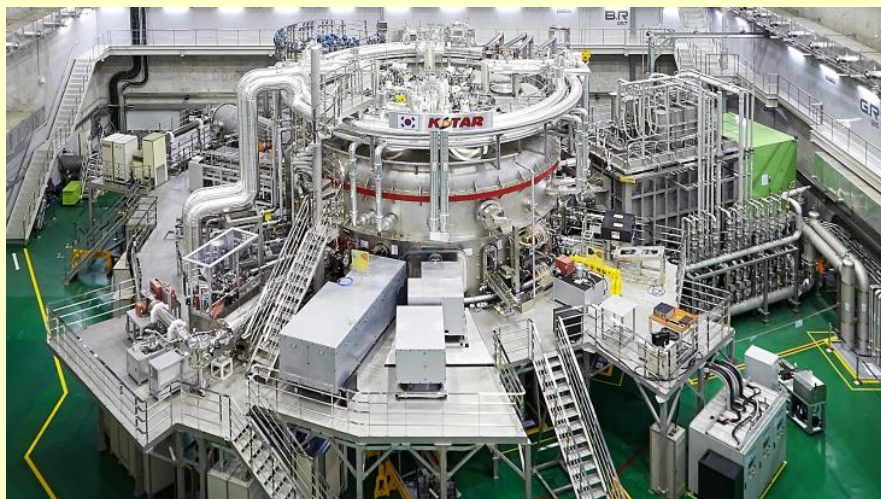




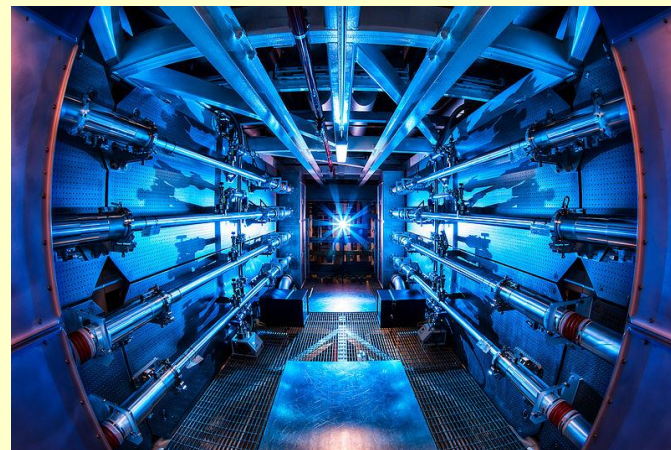
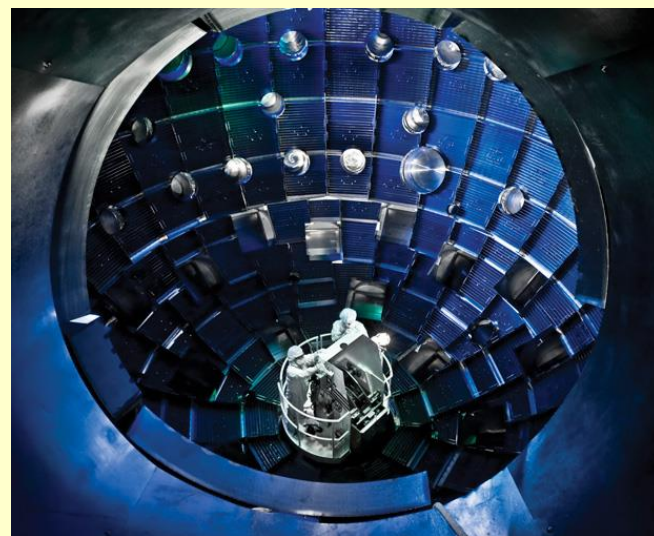
Různé cesty k fúzi – magnetické a inerciální udržení

Magnetické – tokamaky, stellaratory ...

Nižší hustota – dlouhá doba udržení



Inerciální – NIF (USA)
Vysoká hustota – krátký čas



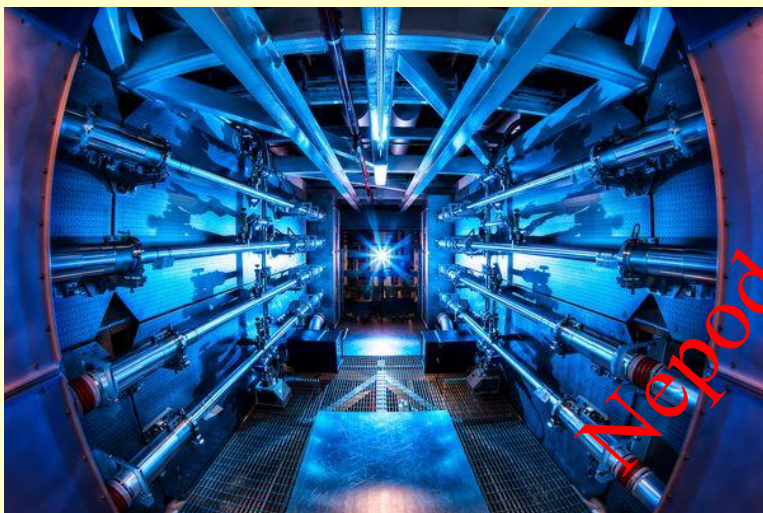
Inerciální udržení plazmatu (mikrovýbuchy)



LLNL - USA



**Stlačení pomocí laserového paprsku – první uskutečnění fúzní reakce NIF (National Ignition Facility)
192 laserových paprsků, 500 TW - červenec 2012 (1,85 MJ)**



Nepodařilo se



Nyní – puls MJ – energie neutronů z fúze kJ, poměr: energie produkovaná/dopadající na kapku přes 0,1

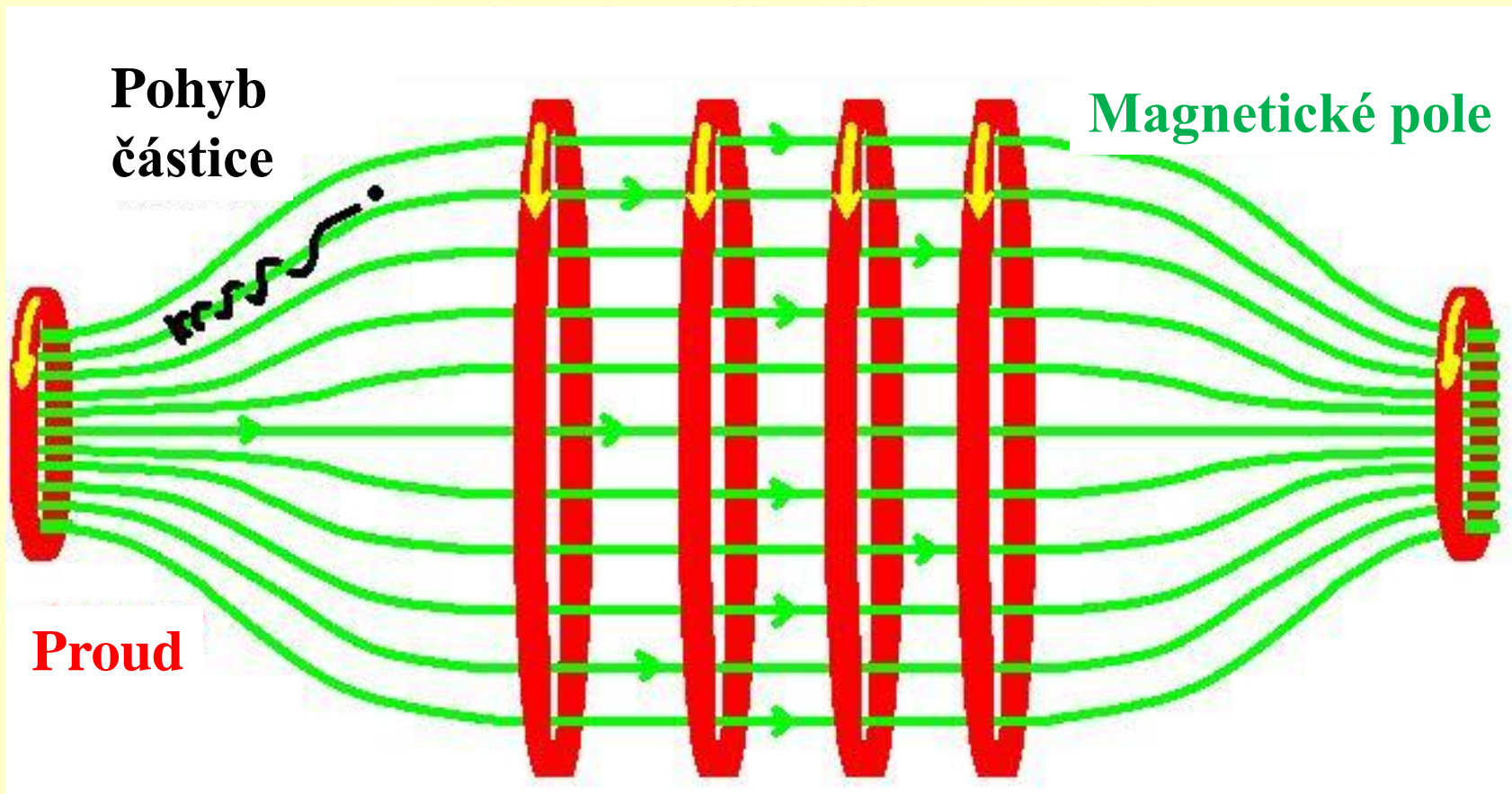
Magnetické udržení – tokamaky a stellarátory

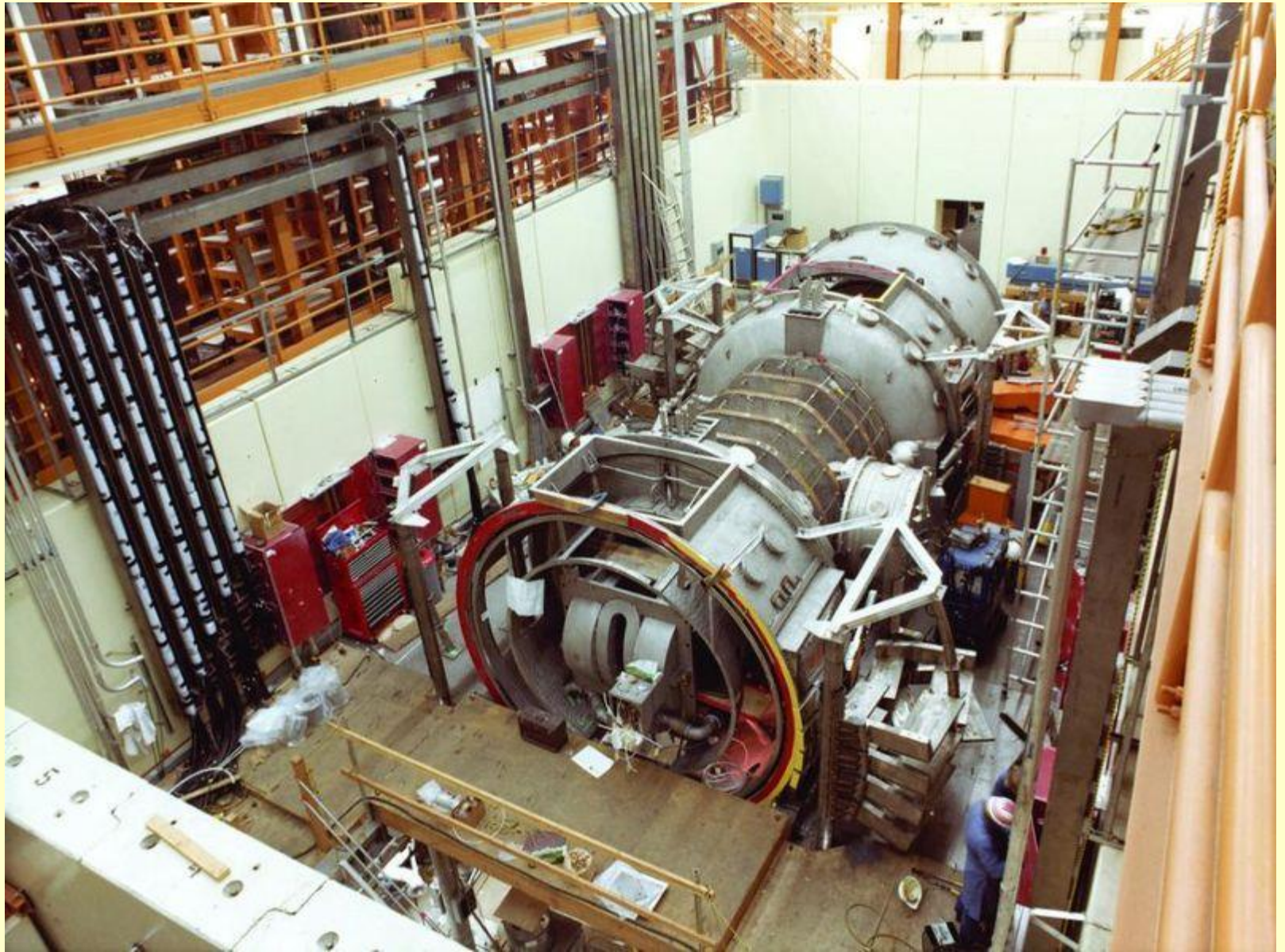
Magnetická past pro udržení plazmatu – plazma je zachyceno v magnetické pasti

Využití pohybu nabitých částic v magnetickém poli

Využití magnetického zrcadla – bohužel velké úniky plazmatu zrcadly

Řešení toroidní systém. Hustota plazmatu 10^{19-20} částic/m³



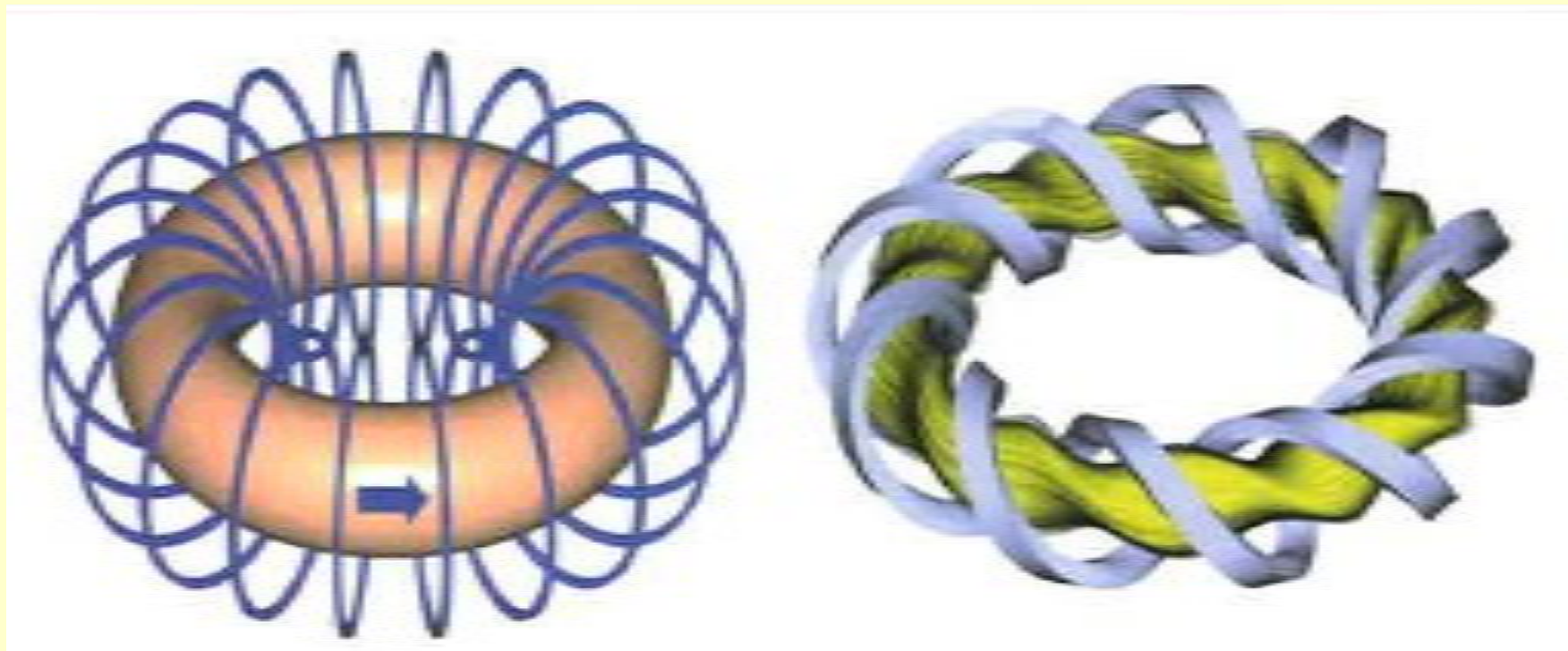


TMX (Tandem Mirror Experiment) v Lawrence Livermore National Laboratory v 1979

Dvě současné pokrokové možnosti magnetického udržení

Tokamak (ruský koncept 50tá léta) – toroidní vakuová komora umístěná na transformátorovém jádru, indukčně buzený elektrický proud vytváření magnetického pole, další magnetické pole vytvářejí magnetické cívky. Ohřev plazmatu pomocí proudu. Induktivní buzení proudu je možné v pouze pulzech – proto se nahrazuje neinduktivním

Stelarátor (Lynn Spitzer 1950) – má velmi komplikované cívky pro vytváření magnetického pole a díky tomu nepotřebuje proud v plazmatu



Tokamak

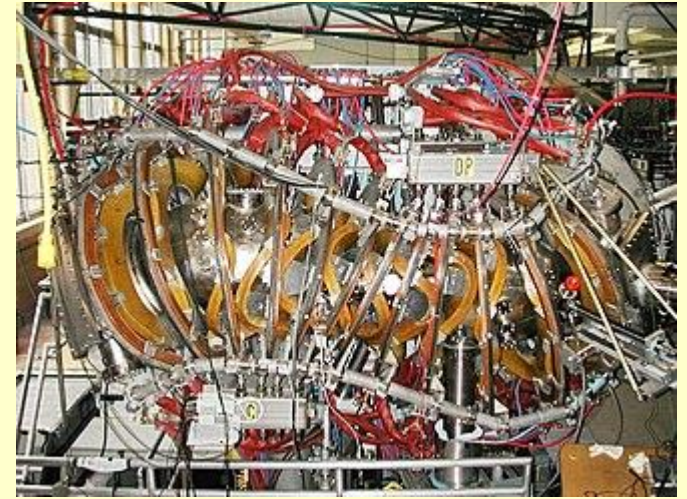
(modré a šedé jsou cívky)

Stelarátor

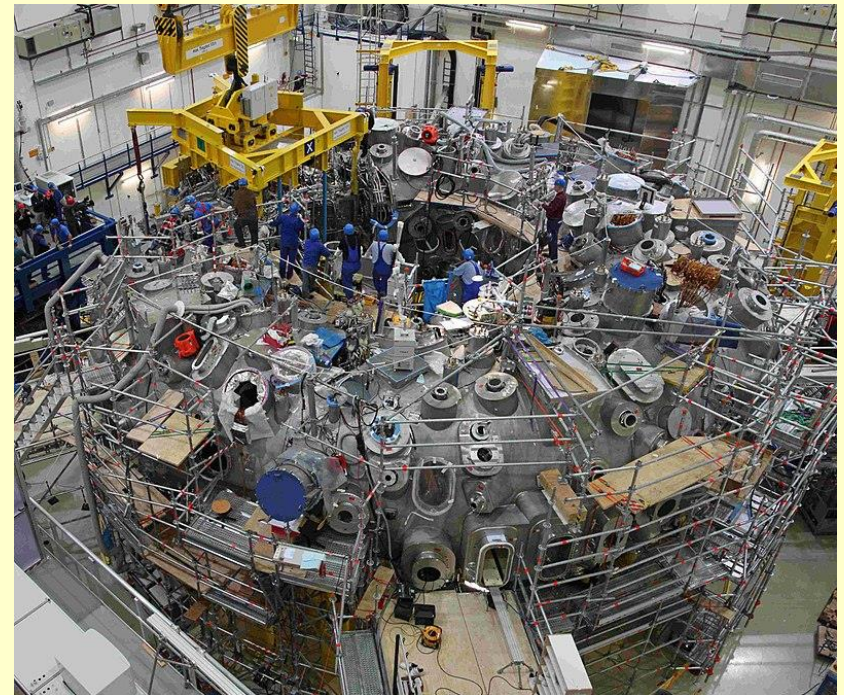
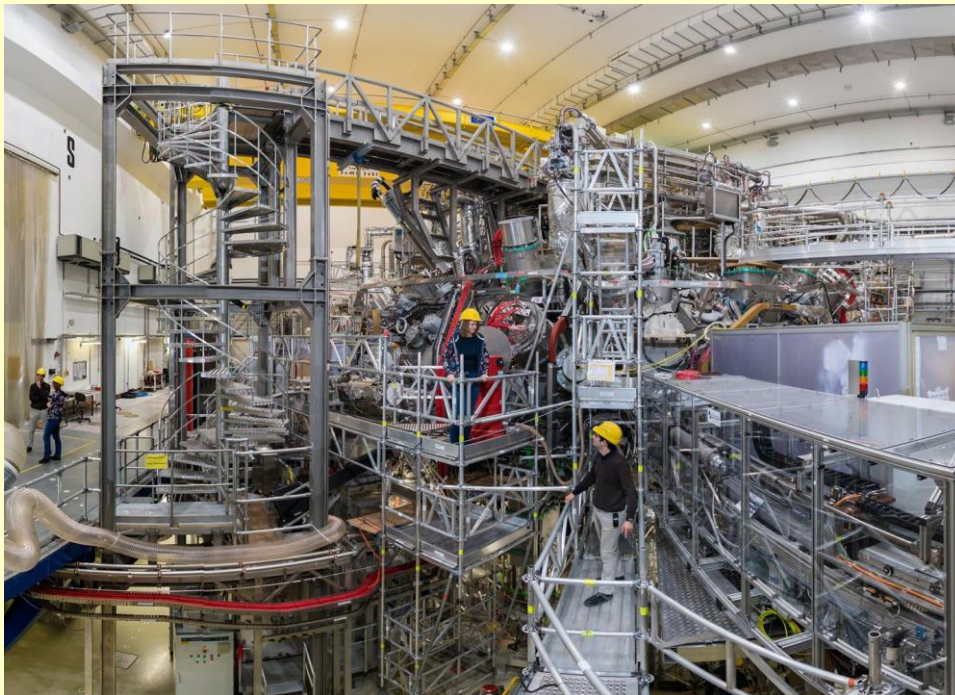
Rozvoj stelarátorů

Velice komplikovaný průběh magnetického pole i magnetů – teprve dokonalé počítačové simulace a příprava projektu magnetů založena na nich umožnila skok v těchto zařízeních. Vrcholem je nedávno spuštěný německý Wendelstein 7-X

Projekt začal v roce 1994, dokončen 2015
Dosaženo 20 milionů K, po 100 s a $2 \cdot 10^{20}$ p/m³



Stelarátor HSX



Rozvoj tokamaků

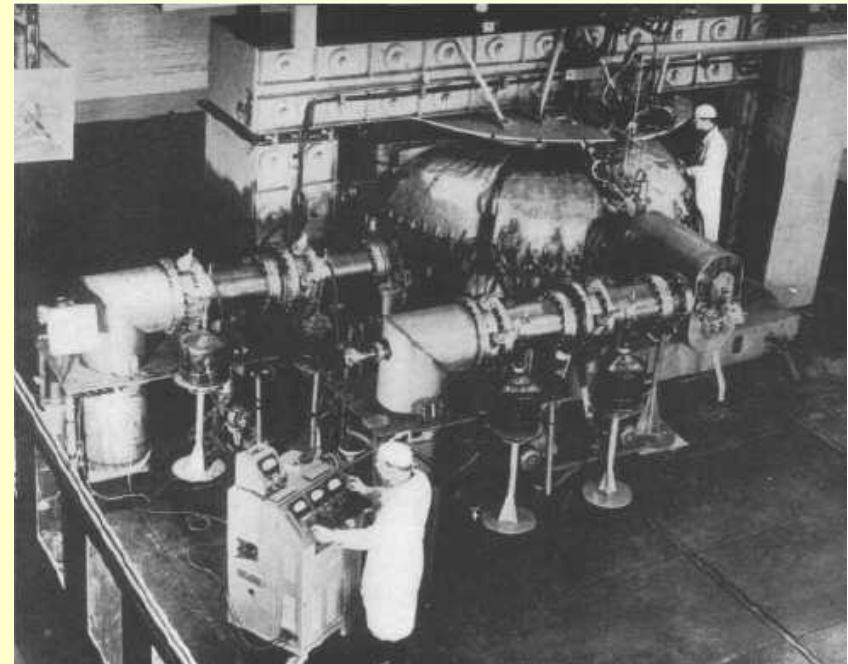
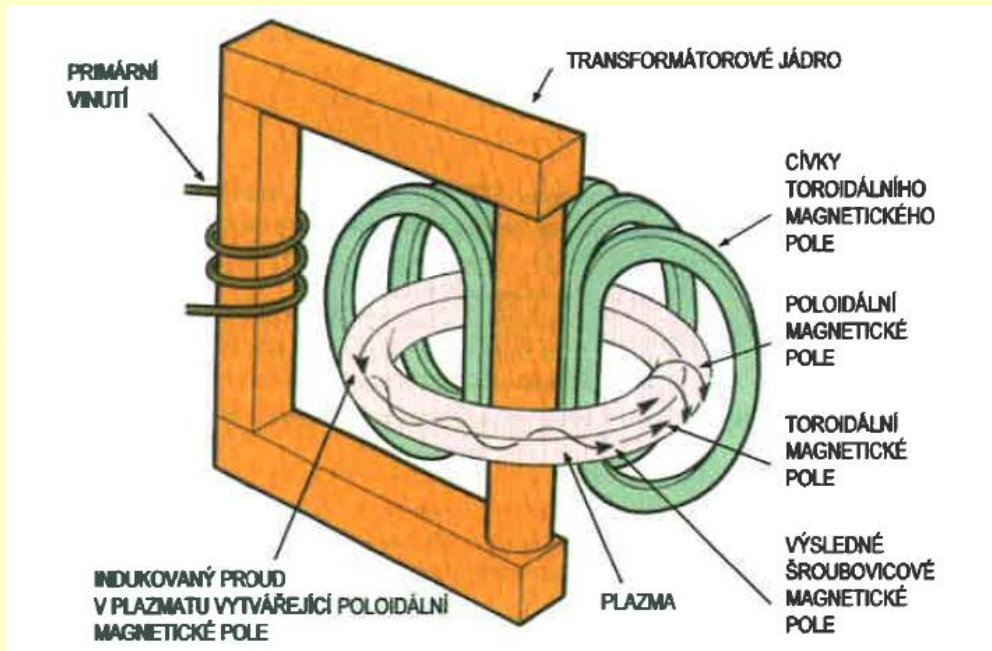
Jeho idea začala v Rusku v 50. letech (Igor Tamm, Andrej Sacharov, Igor Lavrentev), první model T-1 v 1958 (Natan Javlinskij)

Zlomem se stal T-3, který v roce 1968 dosáhl v té době nevídané teploty, tu ověřila britská delegace – nastal rychlý rozvoj a zaměření právě na tokamaky

Nastal rychlý rozvoj tokamaků, stelarátory se do značné míry opustily

Klíčový růst velikosti a metod udržení stability plazmatu i jeho ohřevu a diagnostiky

Postupný přechod k supravodivým magnetům



Tokamak T-3 – průlom v dosažení teplot

Vylepšování – současné plně supravodivé tokamaky

Evropský Tokamak JET je zatím největší,
jeden z mála testoval provoz s tritiem

V devadesátých letech soupeřil s
americkým TFTR.

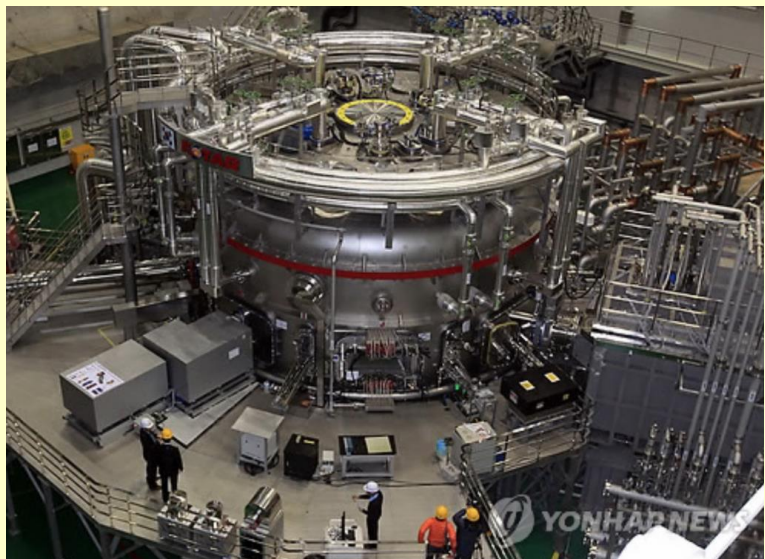
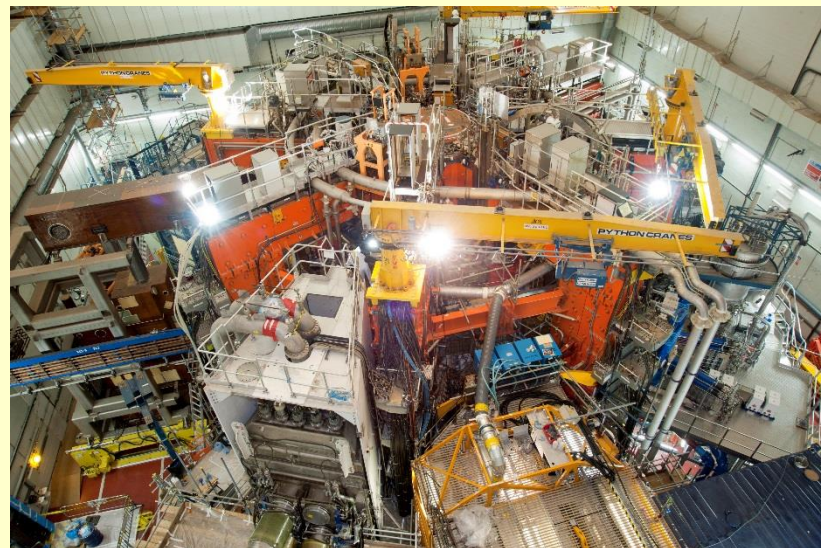
Teploty přes 50 milionů K (jinde i stovky)

Generoval 16 MW fúzní energie na 24
MW ohřevu ($Q = 0,67$)

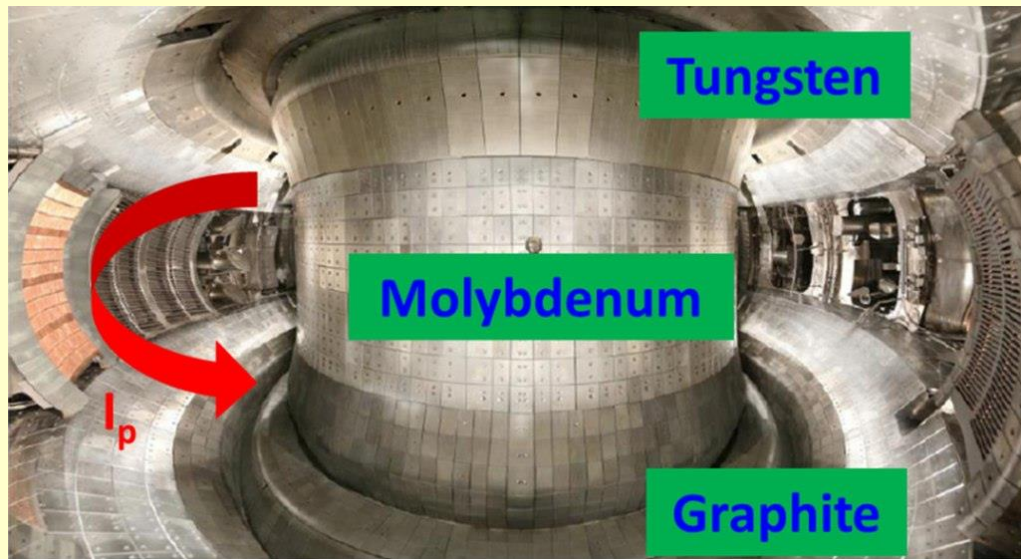
Tore Supra plazma 6,5 min

JT-60 Japonsko maximum $n \cdot T \cdot \tau$

JET – Velká Británie



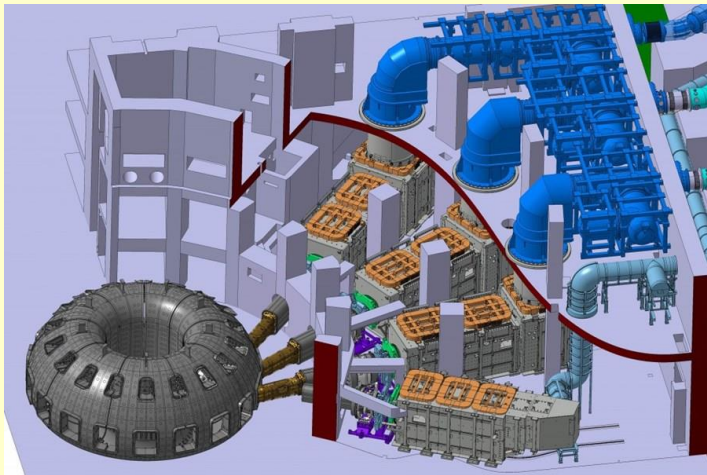
KSTAR – Jižní Korea



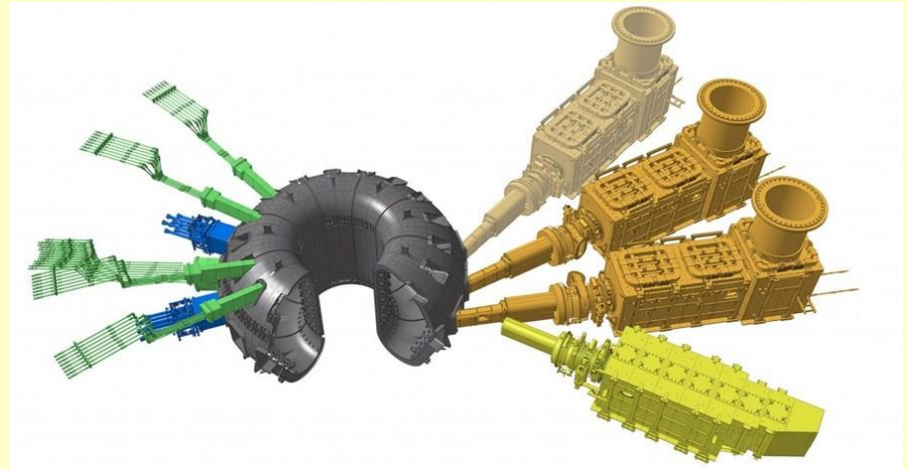
EAST - Čína

Ohřev plazmatu v tokamacích

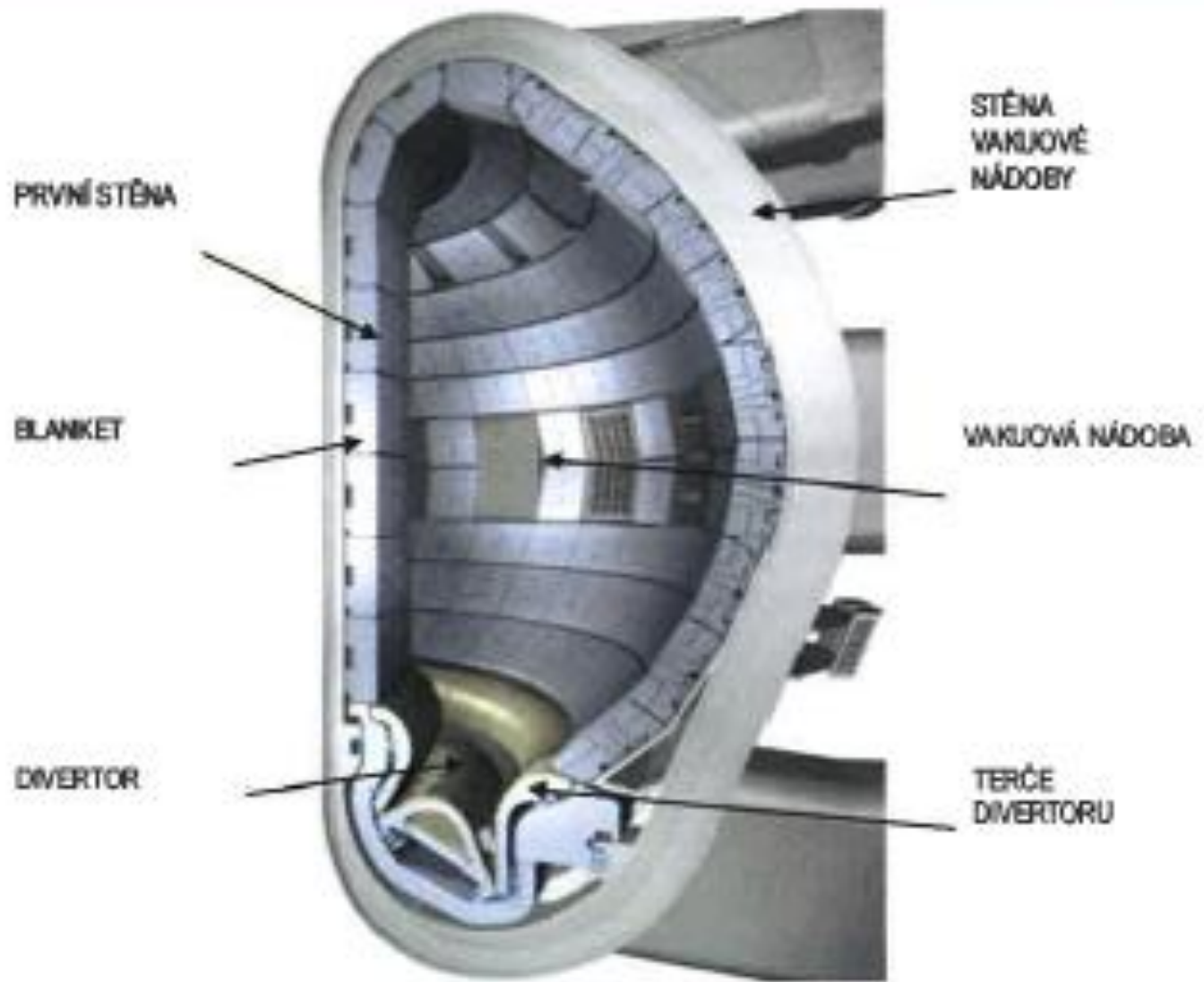
- 1) **Fúzní reakce** (nejen v tokamacích) – pouze nabité ionty, při D-T reakci velká část energie je odnesena neutrony (14,1 ze 17,6 MeV – lze lehce spočítat z kinematiky)
- 2) **Ohmický ohřev** – Joulova energie indukována proudem plazmatu – důležitý na počátku, odpor s teplotou roste, jeho vliv klesá
- 3) **Elektromagnetické vlny** – vyzařované anténou, musí být správná rezonanční frekvence (desítky MHz) – jiná frekvence pro elektrony a ionty
- 4) **Proud neutrálních atomů** – Při dodávání paliva (deuteria) ve formě neutrálních atomů s vyšší kinetickou energií jsou tyto po proniknutí magnetickým polem do plazmatu v něm ionizovány a pak předají energii ve srážkách v plazmatu (optimální energie závisí na velikosti objemu plazmatu (40 keV až 1 MeV). Po urychlení iontů musí nastat jejich neutralizace



ITER bude mít 3 svazky neutrálních částic



Systémy vnějšího ohřevu pro ITER

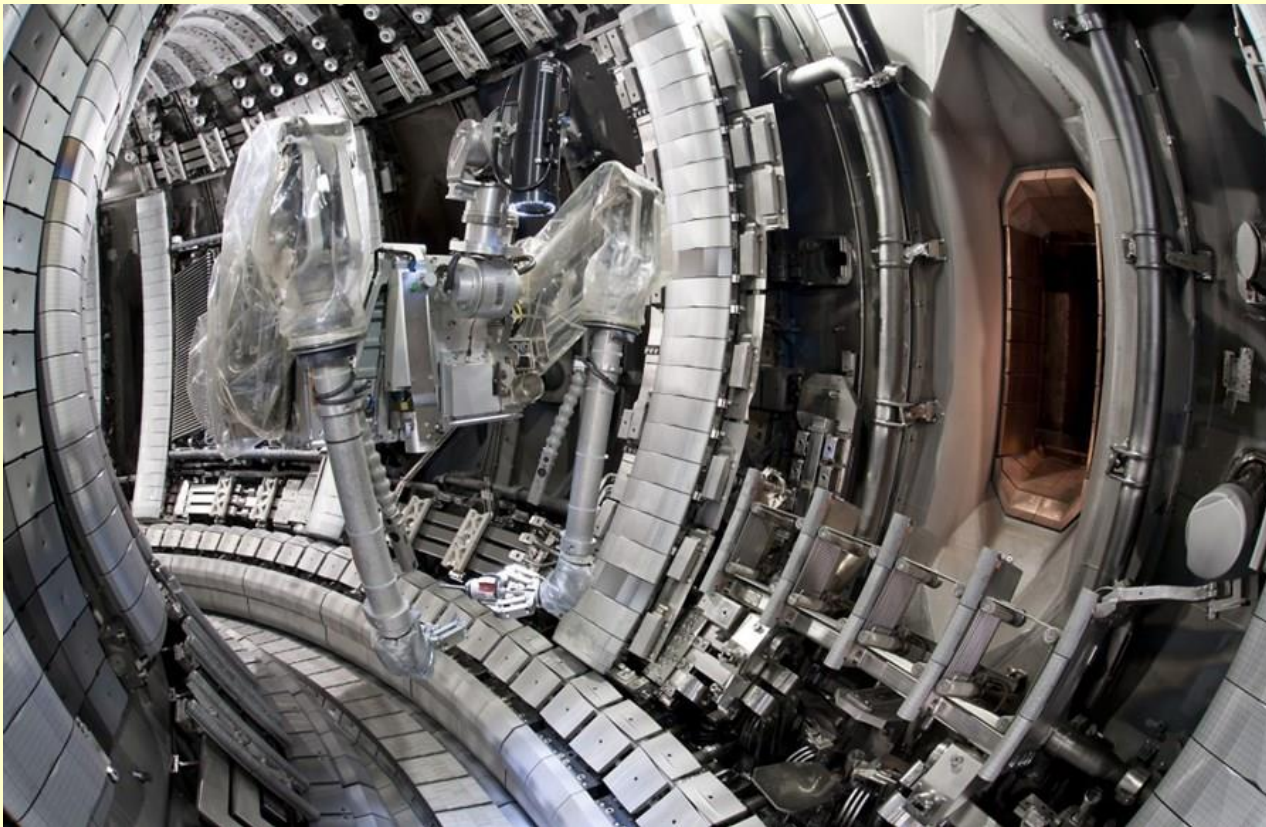


Obr. 21. Jaderné komponenty fúziho reaktoru [1]

Odolné konstrukční materiály

- 1) **Odolné proti velmi vysokým teplotám**
- 2) **Odolné proti intenzivním radiačním polím neutronů**
- 3) **Nízká pravděpodobnost produkce radionuklidů v materiálech konstrukce**

První stěna z beryllia a wolframu



Evropský tokamak JET byl doplněn o první stěnu a divertor napodobující ITER

Zajištění stability plazmatu a jeho diagnostiky

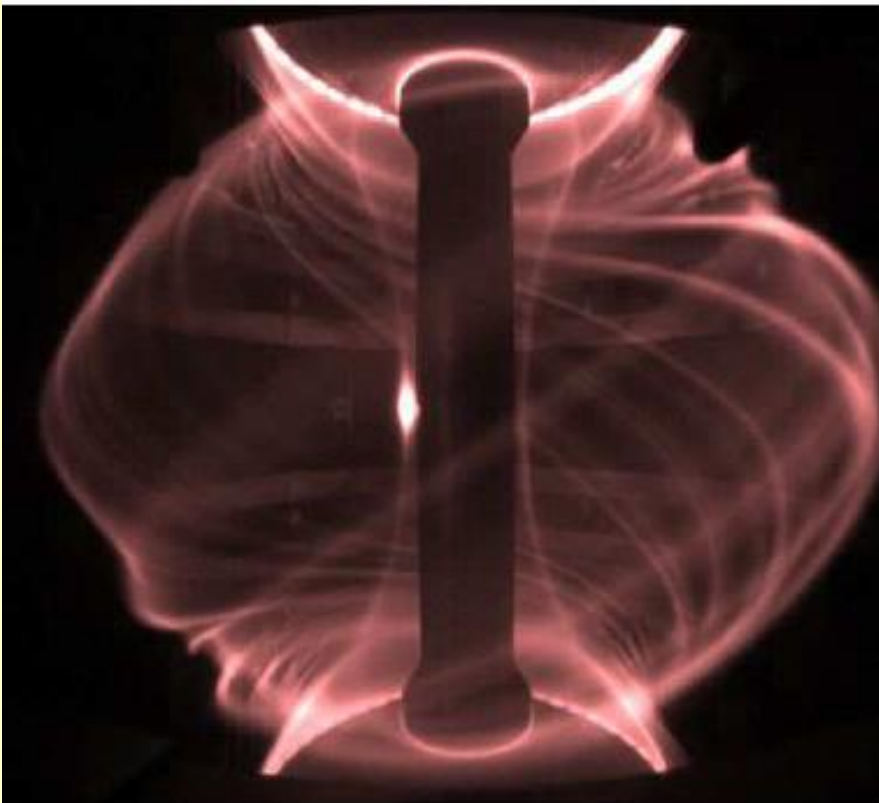
Obrovský problém s udržení plazmatu – k jeho sledování nutná diagnostika

Interakce plazmatu s nádobou – poškozování stěny

Měření přímé pomocí sond

Měření nepřímé pomocí detekce částic a záření

Pro magnetickou diagnostiku různé typy cívek



Je třeba určit:

- 1) Elektrický proud v plazmatu
- 2) Poloha a tvar plazmatu
- 3) Hustota, teplota a tlak plazmatu
- 4) Fúzní výkon
- 5) Vyzařování plazmatu
- 6) Teplota povrchů ve styku s plazmatem
- 7) Nestabilita a magnetohydrodynamická aktivita plazmatu

ITER – největší vědecký projekt

Výkon 500 MW

$Q = 10$

$B = 5,3 \text{ T}$

$I = 15 \text{ MA}$

Prstenec 8 – 9 m

Hmotnost 23 000 t

Teplota 150 milionů K

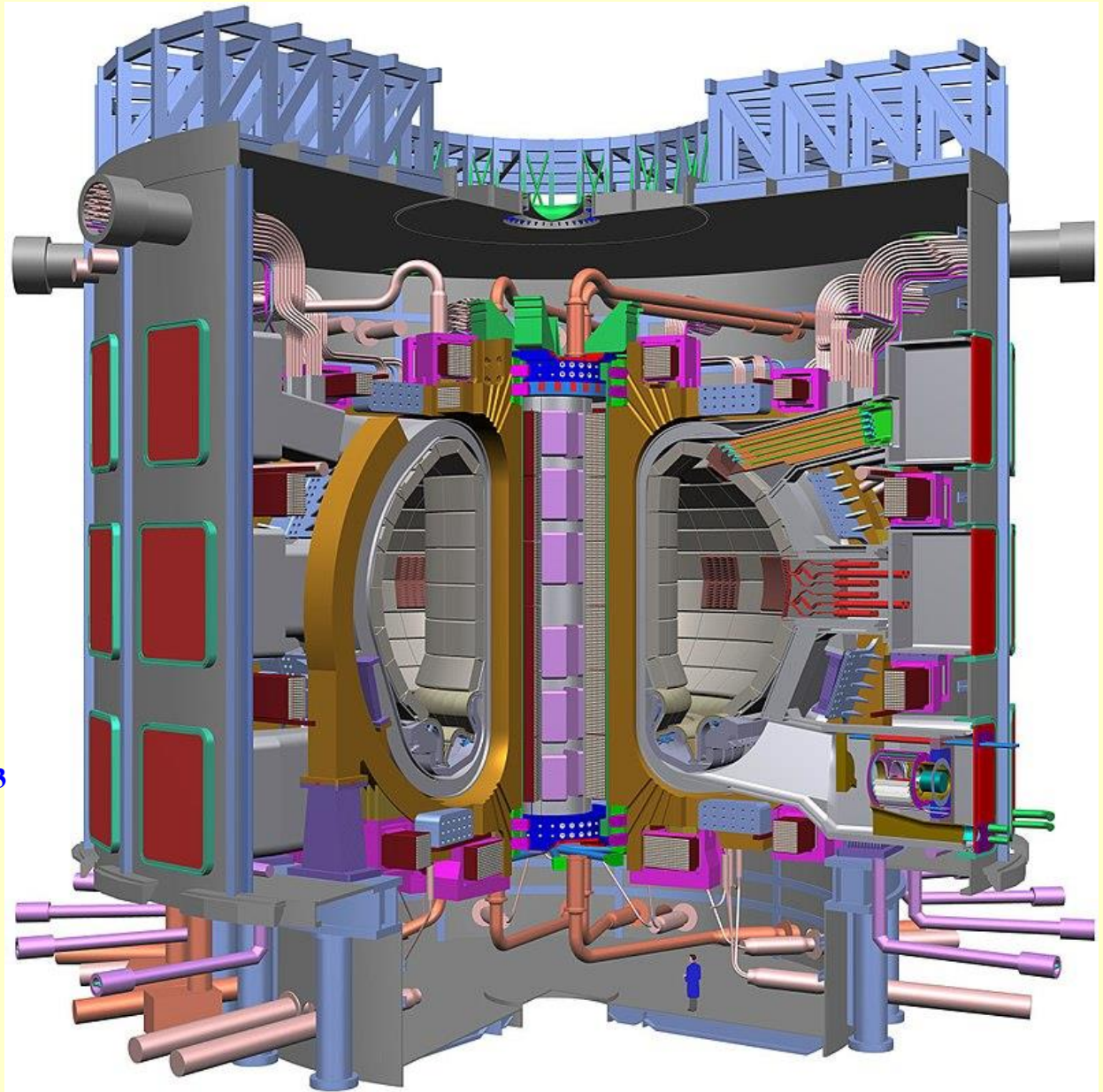
Supravodivé magnety:

Teplota 4 K

Energie 51 GJ

Objem plazmatu 840 m³

Odváděná tepelná
energie: 736 MW



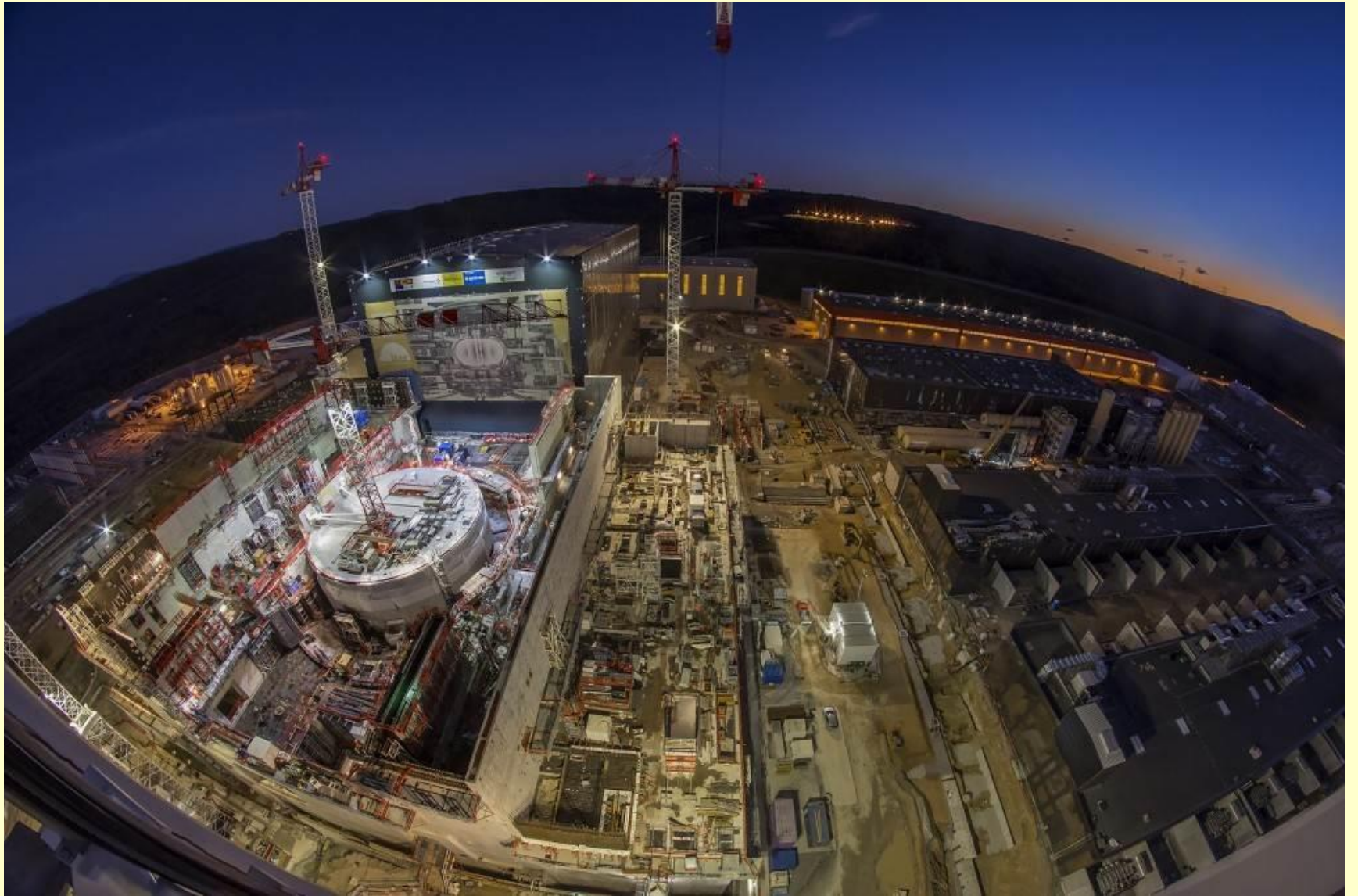
Tokamak ITER – první fúzní reaktor, výkon 500 MW, 10krát vyšší než vklad, demonstruje chování plazmy u elektrárny, fúzní reakce deuteria a tritia, testy s produkcí tritia

V současné době probíhá budování intenzivně a zhruba podle plánu, první plazma se čeká v letech 2025 až 2026

Současný časový plán: Sestavování a instalace zařízení 2018 – 2025, první plazma – 2025, přechod na studium fúzních reakcí d+t -2035













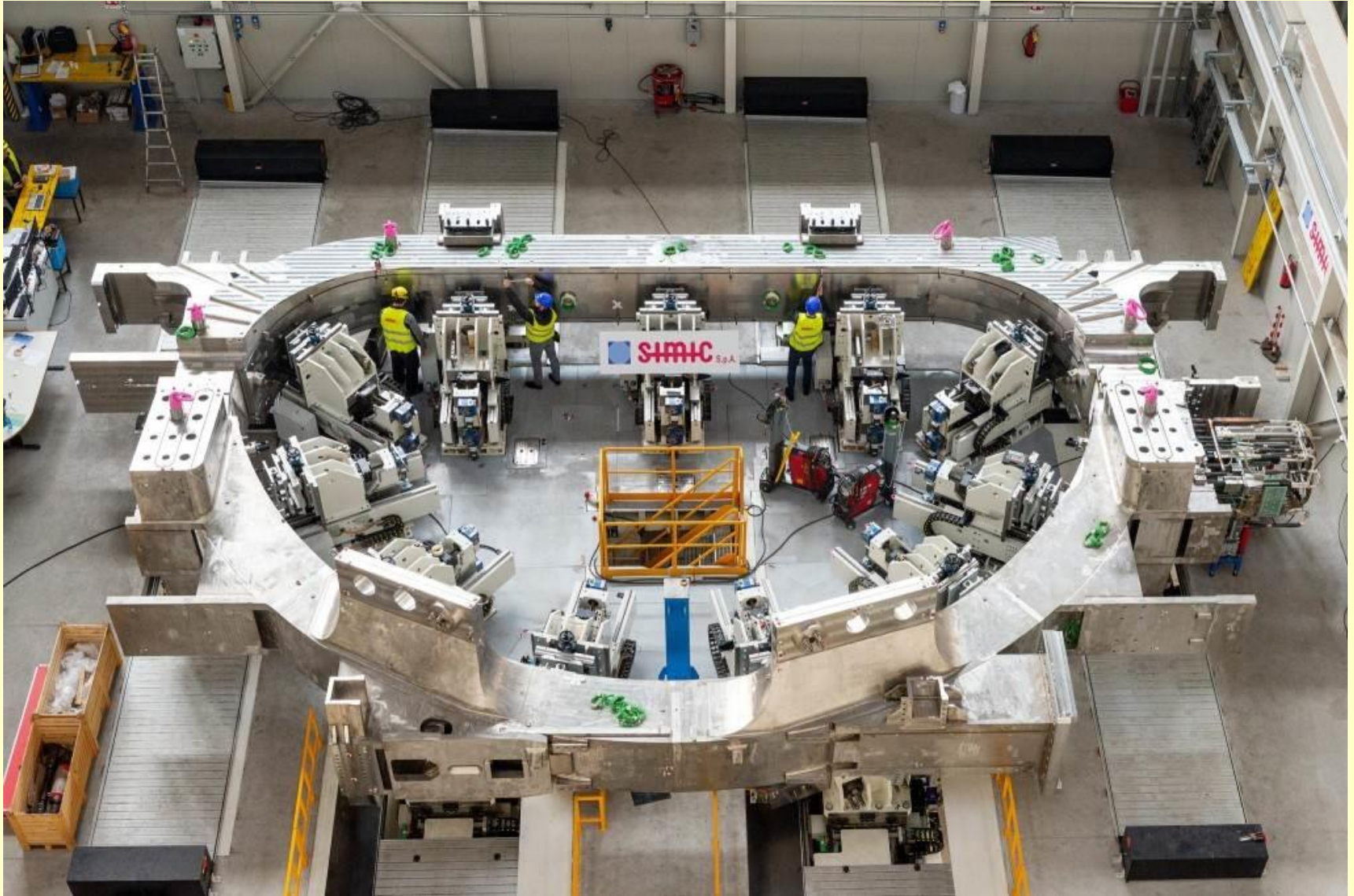


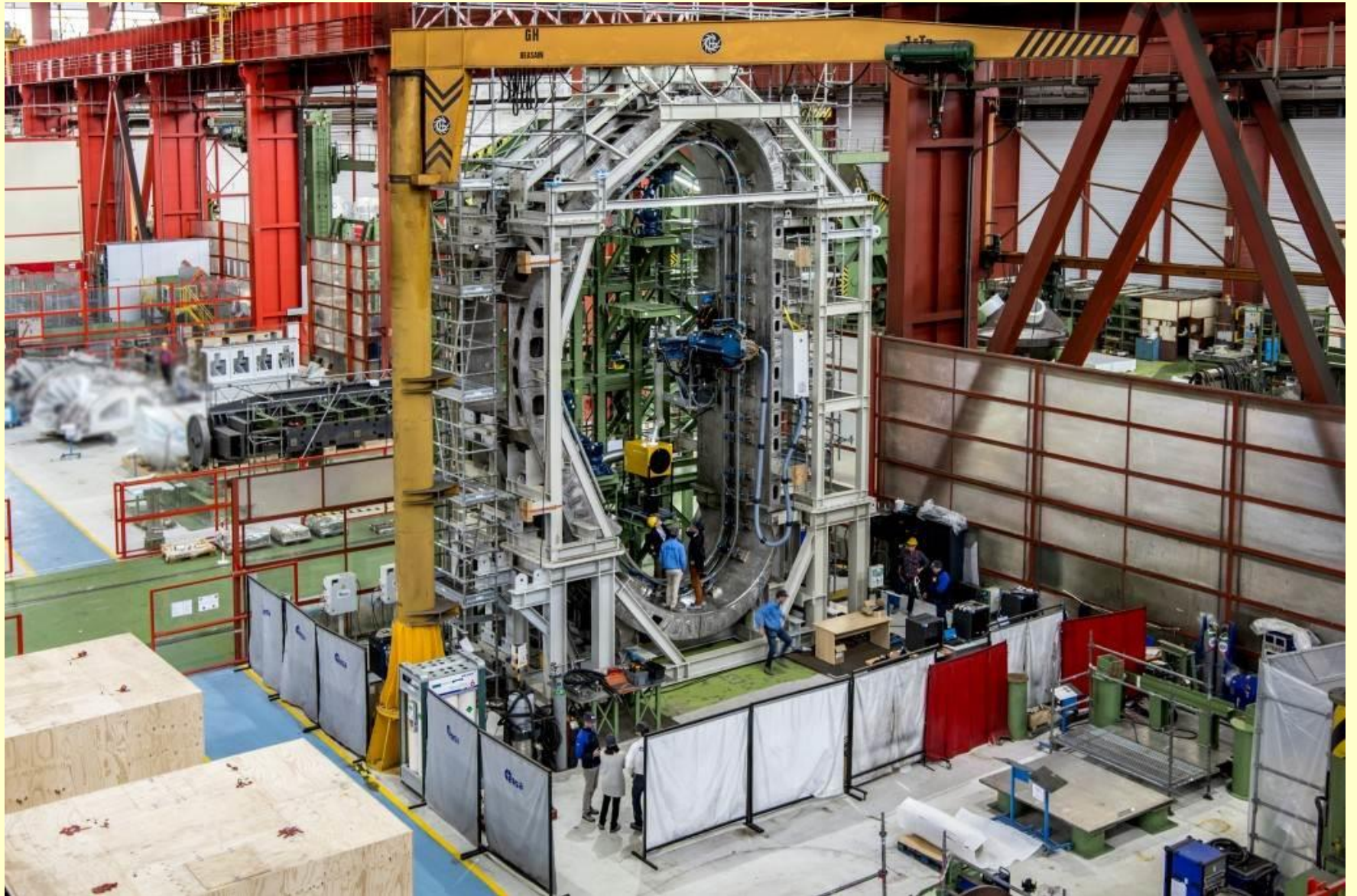


Začátek roku 2019 – dokončeny vlastní rozvody elektřiny



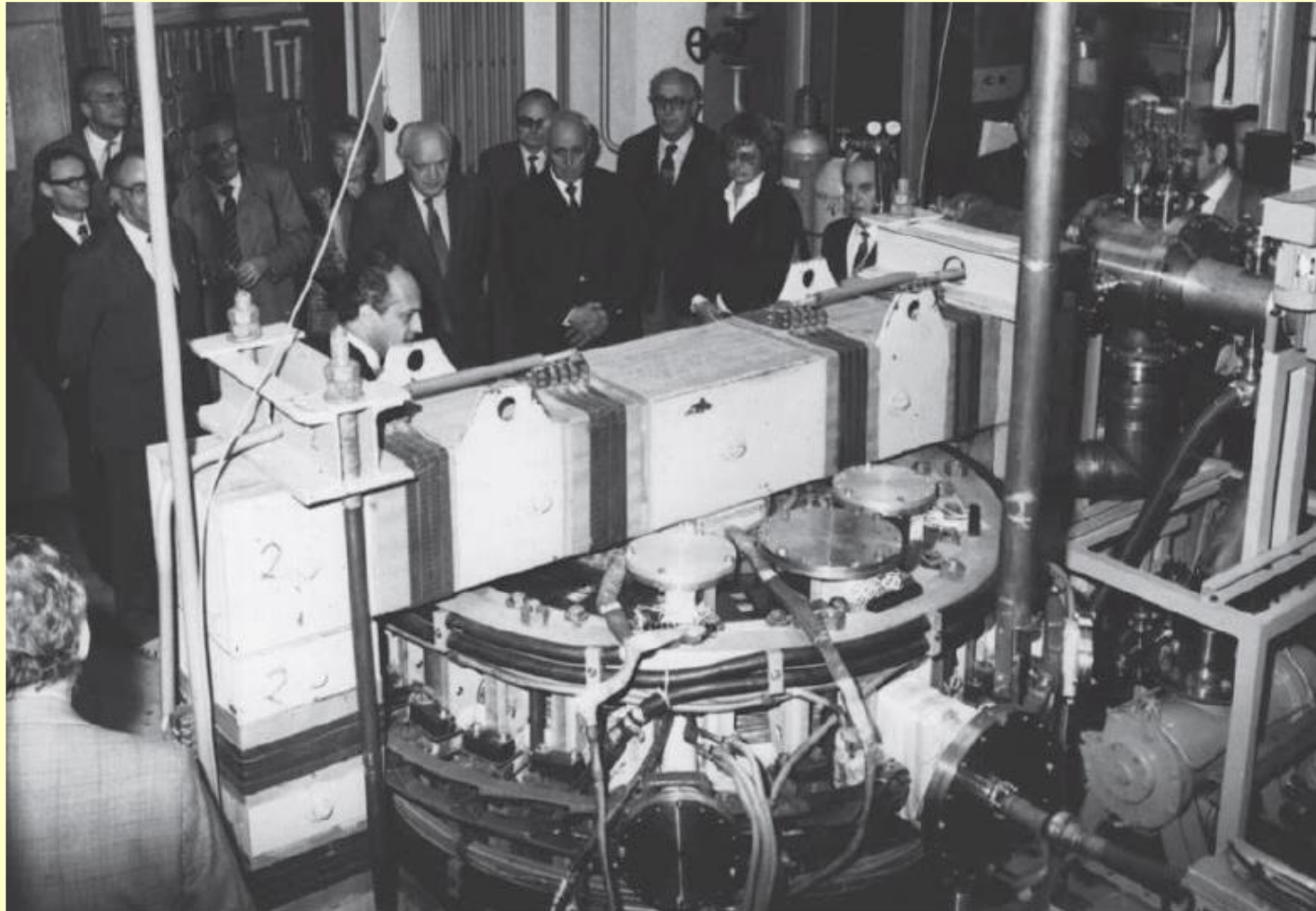






Česká účast na fúzním výzkumu

Dlouhá tradice – velmi brzy dostali naši vědci ze Sovětského svazu tokamak ten velmi dlouho sloužil v Ústavu fyziky plazmatu AV ČR

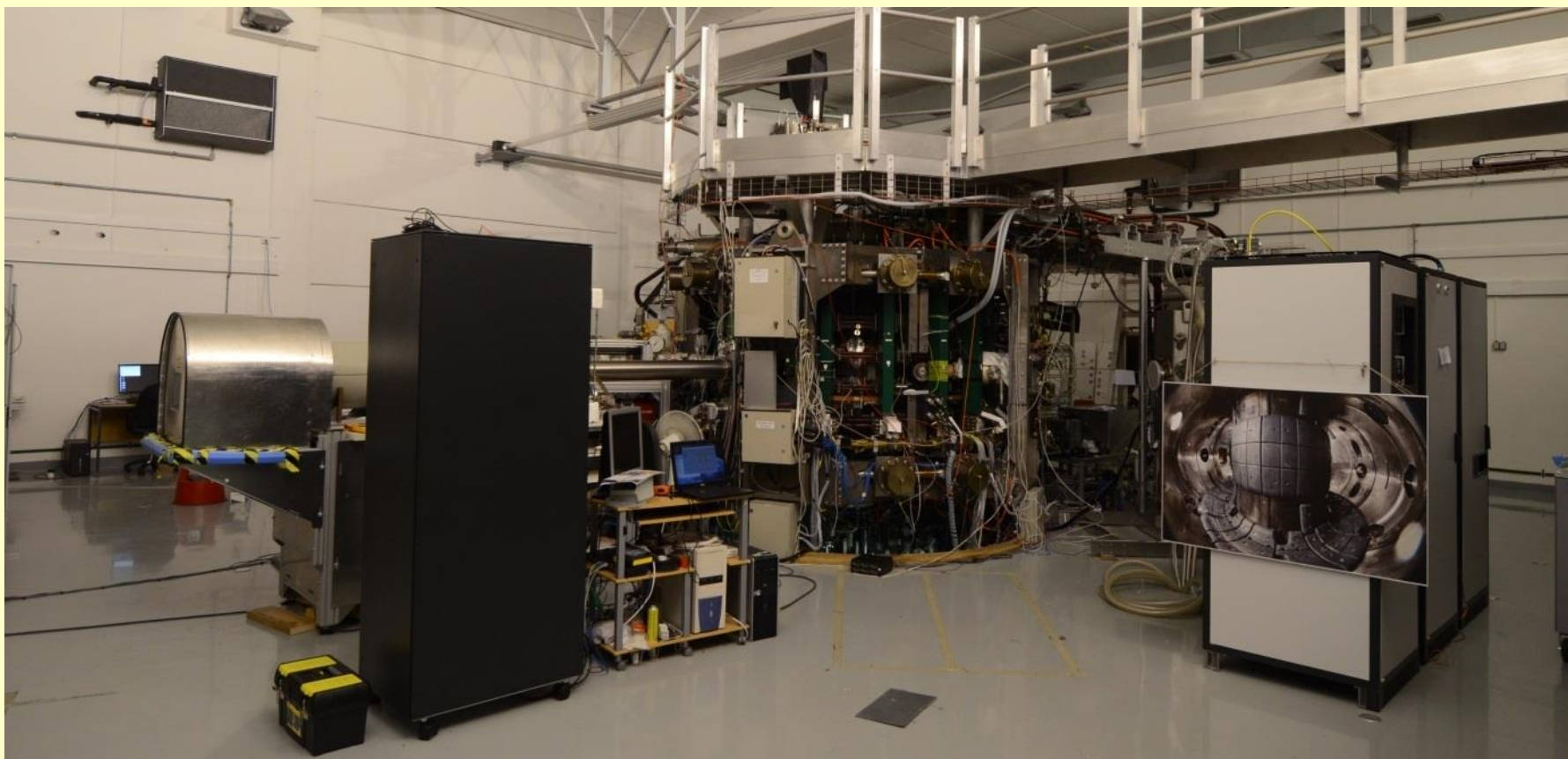
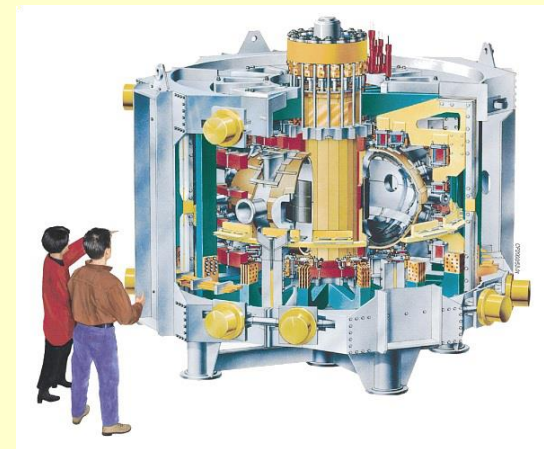
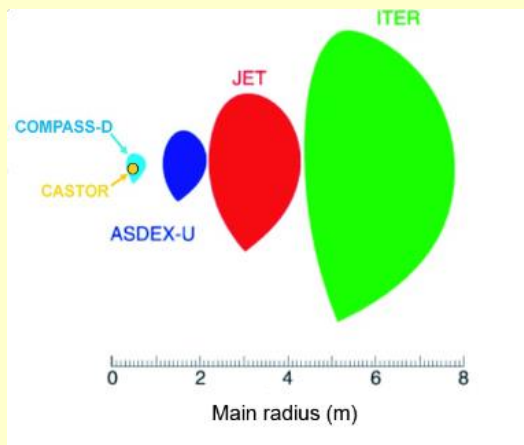


Spouštění tokamaku TM-1-MH po dovezení ze SSSR (nyní je jako tokamak GOLEM na FJFI)

Ústav fyziky plazmatu AV ČR

Tokamak COMPASS – stejný typ jako ITER, jen menší

Studium chování plazmatu – velmi důležité zkušenosti pro ITER

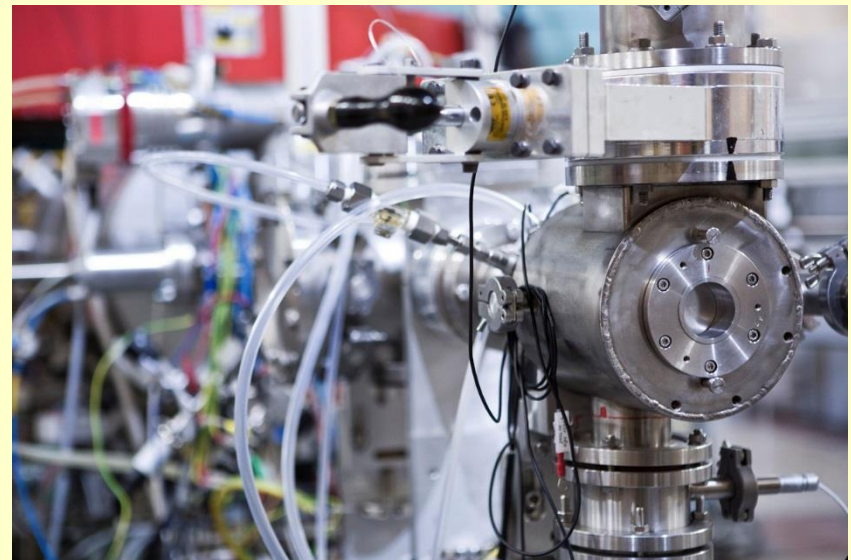
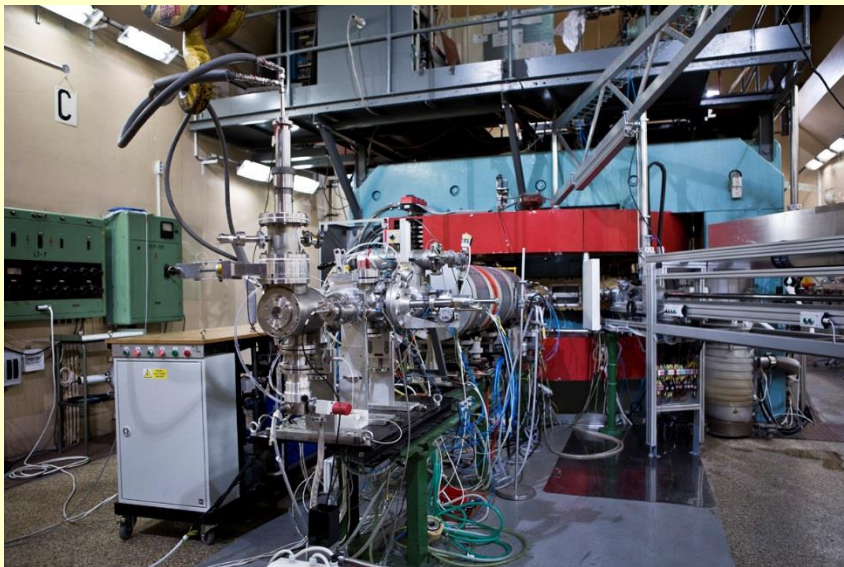
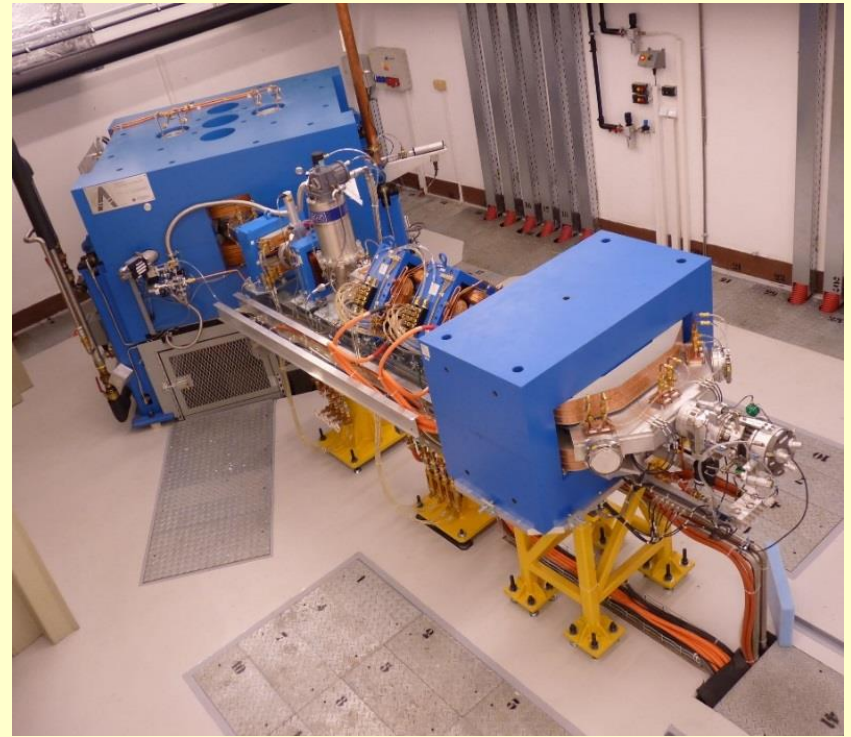


Ústav jaderné fyziky AV ČR

Synergie mezi fúzní a štěpnou energetikou:

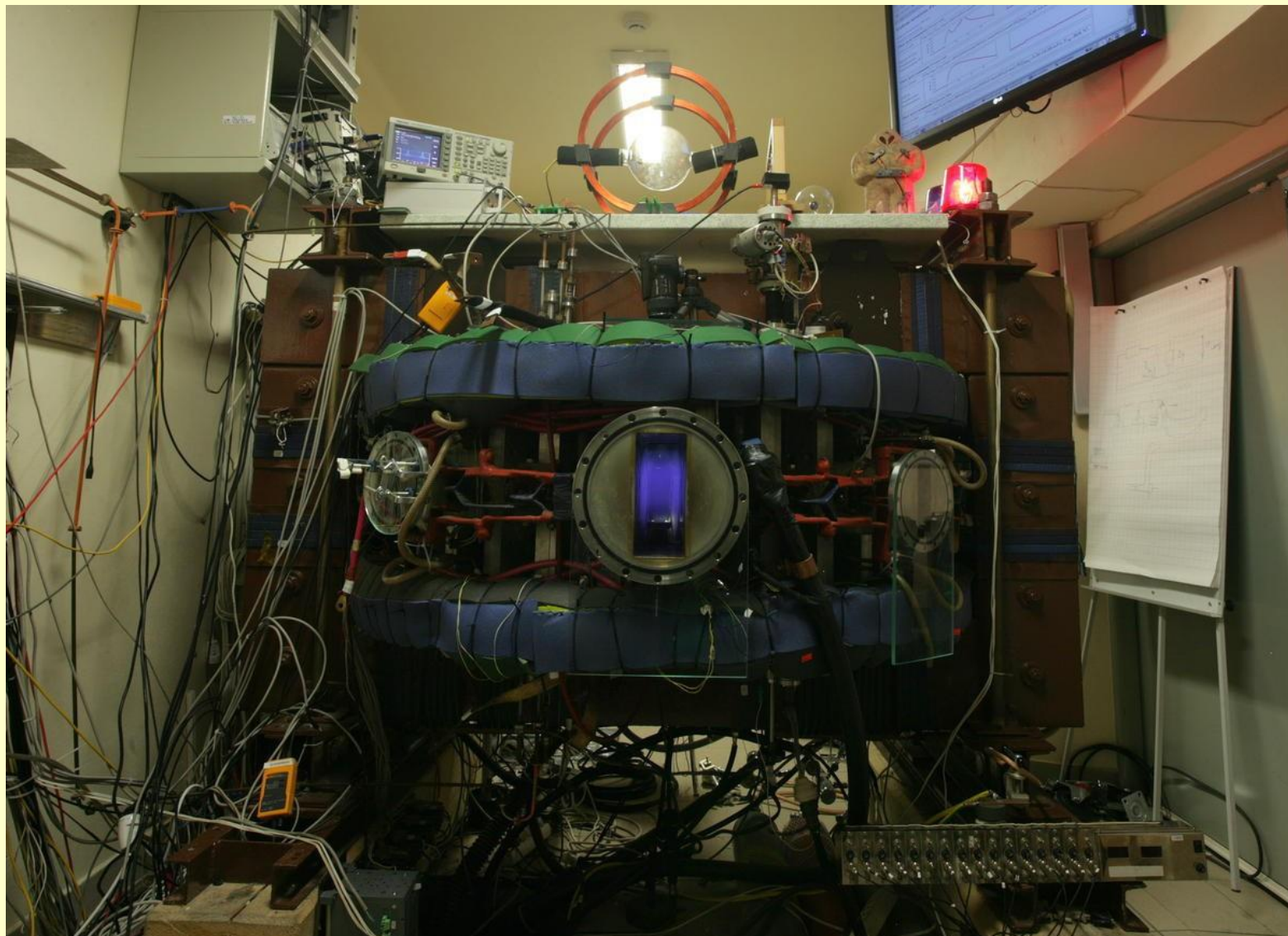
- 1) Intenzivní neutronové toky
- 2) Jaderné reakce (fúze – produkce tritia z lithia, vznik radioaktivních jader)
- 3) Velmi vysoké teploty
- 4) Vysoká radioaktivita během provozu

Neutronové zdroje na bázi cyklotronu – intenzivní toky neutronů pro fúzní studie



Tokamak Golem – FJFI ČVUT Praha

Malý tokamak, pro výuku, dálkově ovládaný – výchova českých i zahraničních odborníků



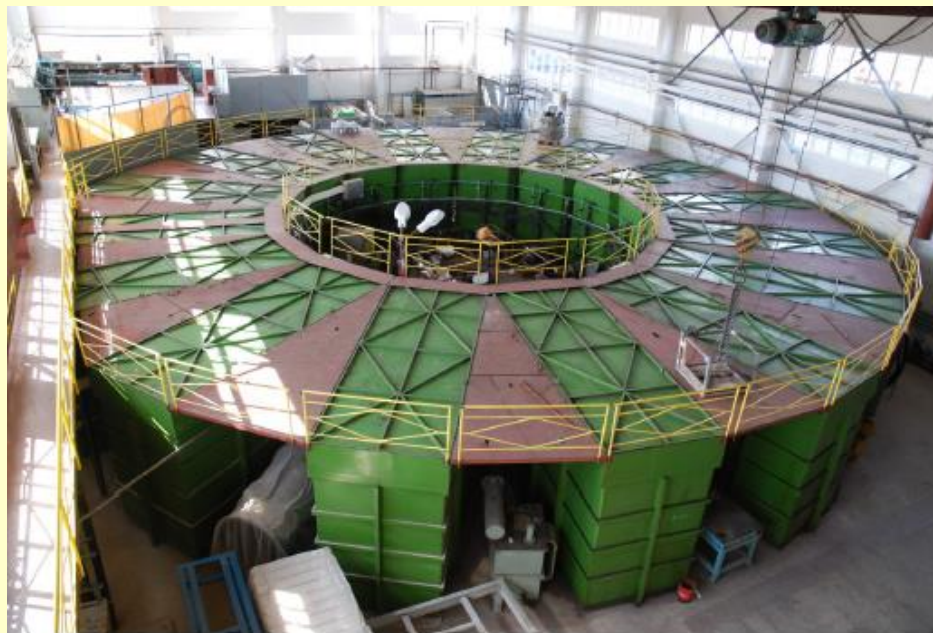
Fakulta elektrotechnická ČVUT Praha

Z – pinč – plazma fokus PFZ-200

Plazmový sloupec s proudem okolo 200 – 250 kA

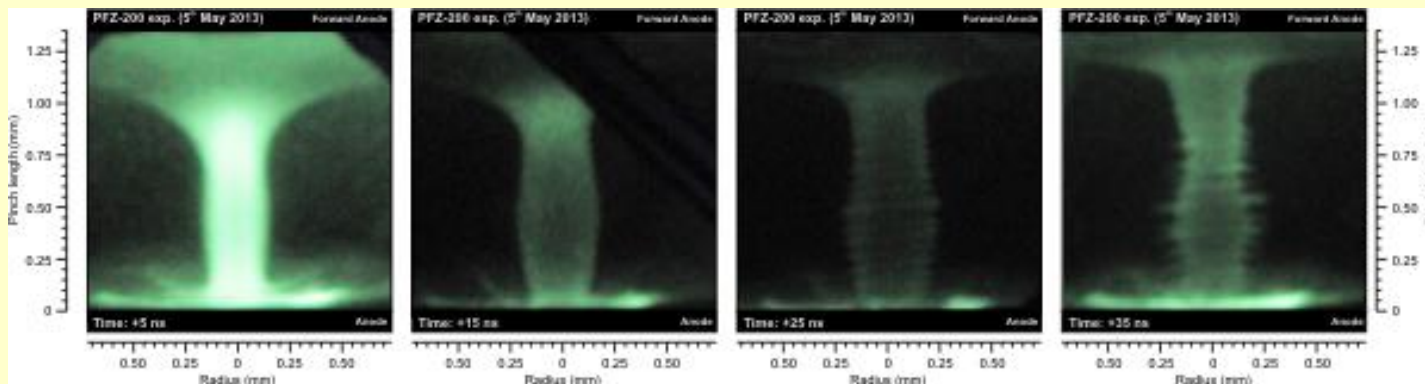
Spolupráce i se zahraničními zařízeními v Polsku a Rusku s daleko vyššími proudy a objemem plazmatu

Laserové laboratoře PALS a ELI beamlines – plazma produkováno lasery



Z- pinč GIT-12 v Tomsku (Rusko)

Plazmový sloupec v zařízení PFZ-200



Laserové systémy PALS a ELI

Laserové laboratoře v Česku:

Laboratoř PALS – laser Asterix

Nově vybudované pracoviště ELI

4 velké lasery, jeden PW

Možnost pro velmi intenzivní studium
vlastností plazmatu, interakce
plazmatu s materiály, urychlování
částic



Termojaderná elektrárna - DEMO

- 1) Nutnost vyřešení produkce paliva tritia z lithia reakcemi neutronů
- 2) Nutnost efektivní ochrany vnitřních stěn před intenzivními toky neutronů a teplotami
- 3) Efektivní odvod tepla a jeho přeměna v elektrickou energii
- 4) Možnost hybridních fúzních a štěpných systémů?



Termojaderné elektrárny

Prototyp DEMO využijí konkrétní firmy pro konstrukci ekonomicky konkurenceschopných termojaderných elektráren

Výhody termojaderných elektráren:

- 1) V principu nevyčerpatelné zdroje paliva
- 2) Pasivně bezpečné, každá porucha vypne
- 3) Malý objem radioaktivity (tritium), které se může dostat do atmosféry
- 4) Vzniká jen omezené množství radioaktivního materiálu, který má relativně krátký poločas rozpadu

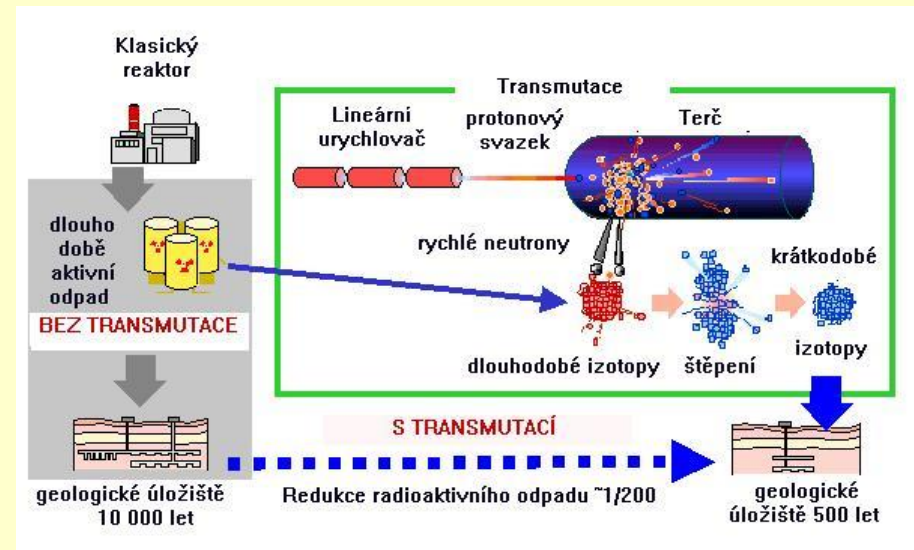
Nevýhody termojaderných elektráren:

- 1) Zatím pouze velké centrální zdroje
- 2) Velmi technologicky náročné
- 3) Hlavní je, že zatím nejsou k dispozici

Kdy budou k dispozici? První generace nejdříve v druhé polovině století, spíše ke konci. Další generace s nutnými vyššími teplotami a hustotami až spíše v příštím století. Změnit to může zásadní technologický zlom například zásadní pokrok v praktickém využití vysokoteplotní supravodivosti

Synergie mezi fúzní a štěpnou energetikou

- 1) Vysoké intenzity neutronových polí
- 2) Nutnost práce ve vysoce radioaktivním prostředí
- 3) Vysoké teploty – odolné materiály, velmi efektivní chlazení
- 4) Podobné metody pro přeměnu tepla na elektřinu
- 5) Řada podobných technologií a materiálů
- 6) Podobné postupy a bezpečnostní pravidla
- 7) Právě firmy pracující na štěpných blocích budou budovat i termojaderné
- 8) Možnost využít fúzní reaktor jako intenzivní zdroj neutronů a v blanketu štěpit transurany z vyhořelého paliva – možné zlepšení ekonomie projektu



Kombinovaný systém fúzního reaktoru a štěpného blanketu by mohl efektivně doplnit pokročilá jaderné systémy při využití vyhořelého paliva a likvidaci jaderného odpadu

Závěr

- 1) Při jaderných reakcích se uvolňuje velké množství energie díky vysoké vazebné energii nukleonů v jádře – fúze lehkých prvků a štěpení těžkých prvků
- 2) Je možná i studená fúze, ovšem pouze s vysokými energetickými ztrátami
- 3) Termojaderná fúze ve hvězdách a v laboratoři je podstatně rozdílná
- 4) Nutnost současného dosažení vysoké teploty, vysoké hustoty a dlouhé doby udržení – Lawsonovo kritérium
- 5) Inerciální a magnetické udržení plazmatu
- 6) V současné době jsou v čele tokamaky
- 7) Jeden z největších vědeckých projektů – ITER
- 8) První prototyp termojaderné elektrárny bude až DEMO
- 9) Termojaderná energetika až v druhé polovině tohoto století
- 10) Velká synergie mezi fúzní a štěpnou energetikou

