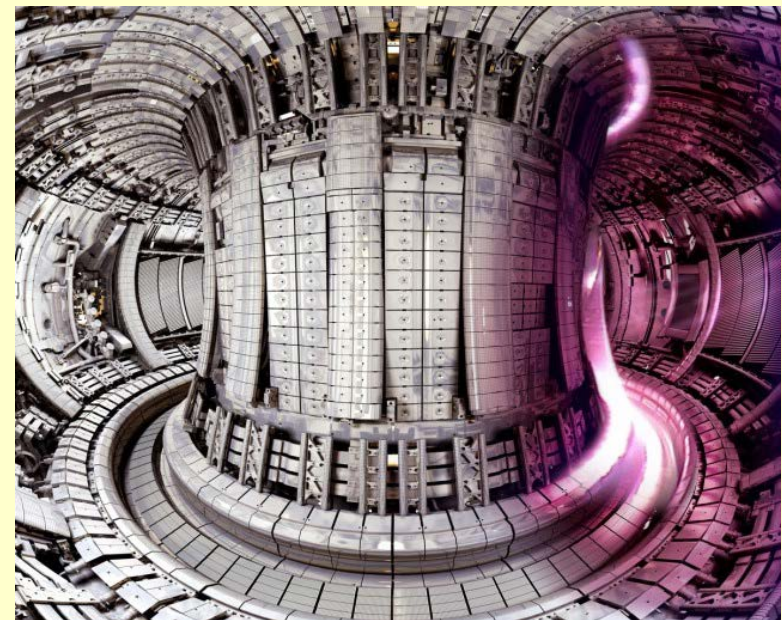
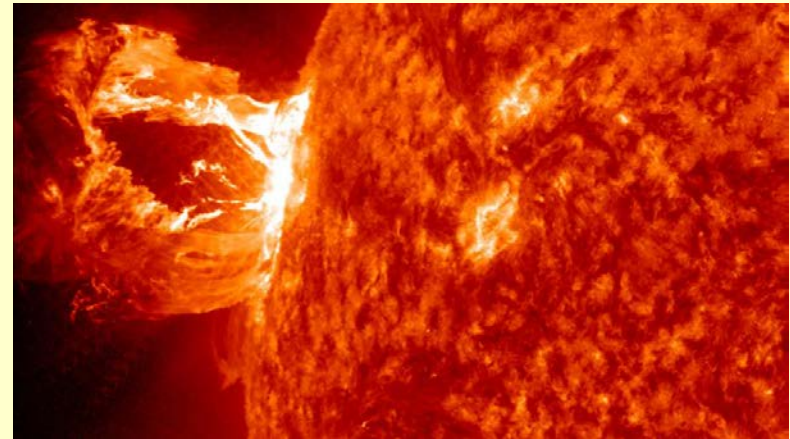


Termojaderná fúze ve hvězdách a na Zemi

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



Úvod

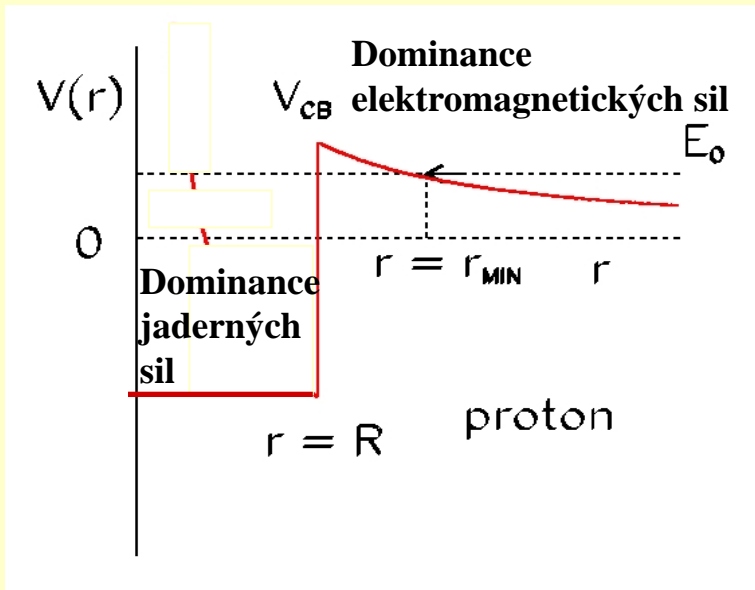
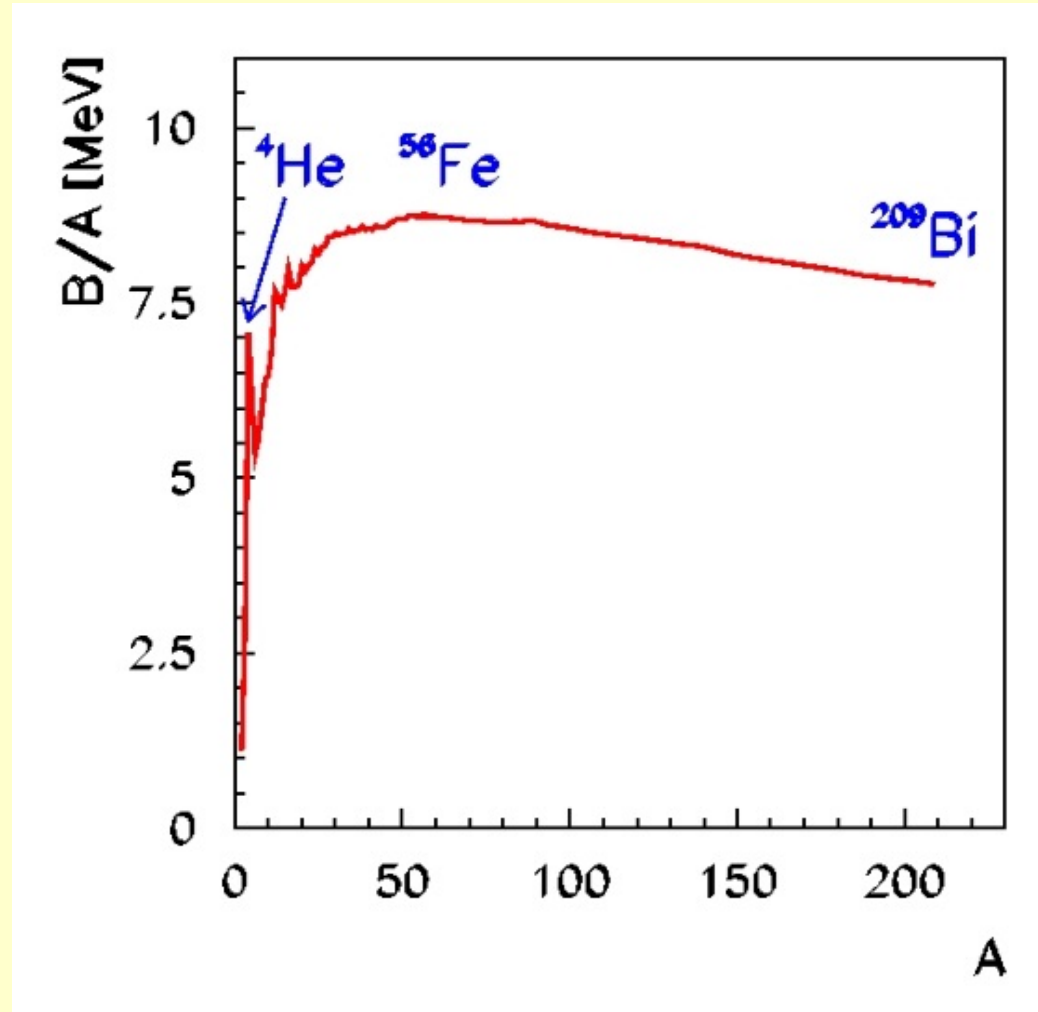
Vše postaveno na závislosti vazebné energie na nukleon: Maximum u železa znamená, že lze získávat energii štěpením těžkých prvků nebo fúzí lehkých prvků

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 %)

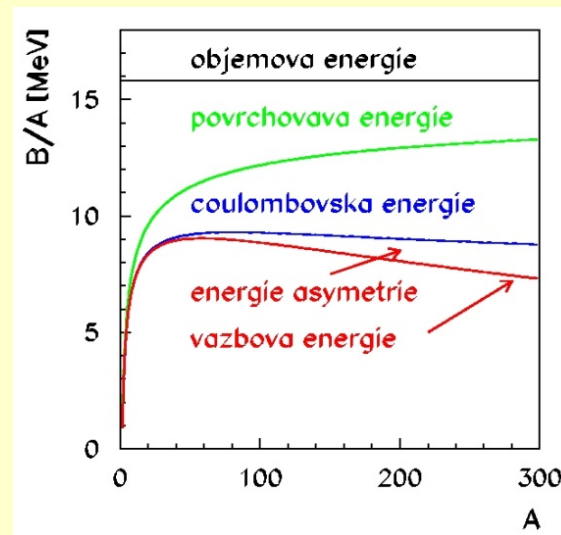
Jaderné reakce – velmi kompaktní zdroj s velkou hustotou produkce energie

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



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

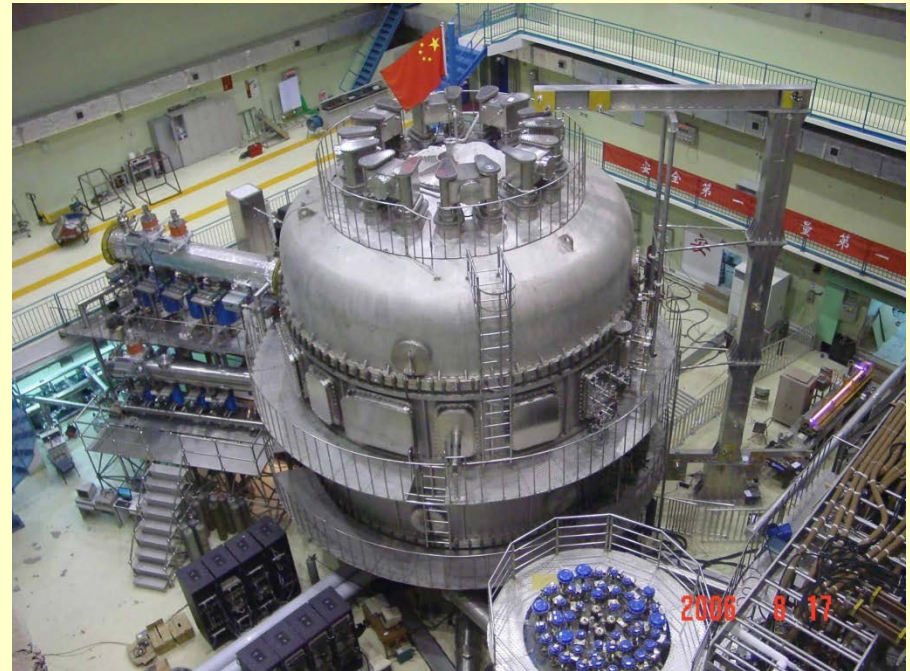
$$M(A,Z) = Zm_p + (A-Z)m_n - a_V A + a_S A^{2/3} + a_C Z^2 A^{-1/3} + a_A (Z-A/2)^2 A^{-1} \pm \delta$$

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): $M = 0,7 \cdot 10^{30}$ 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

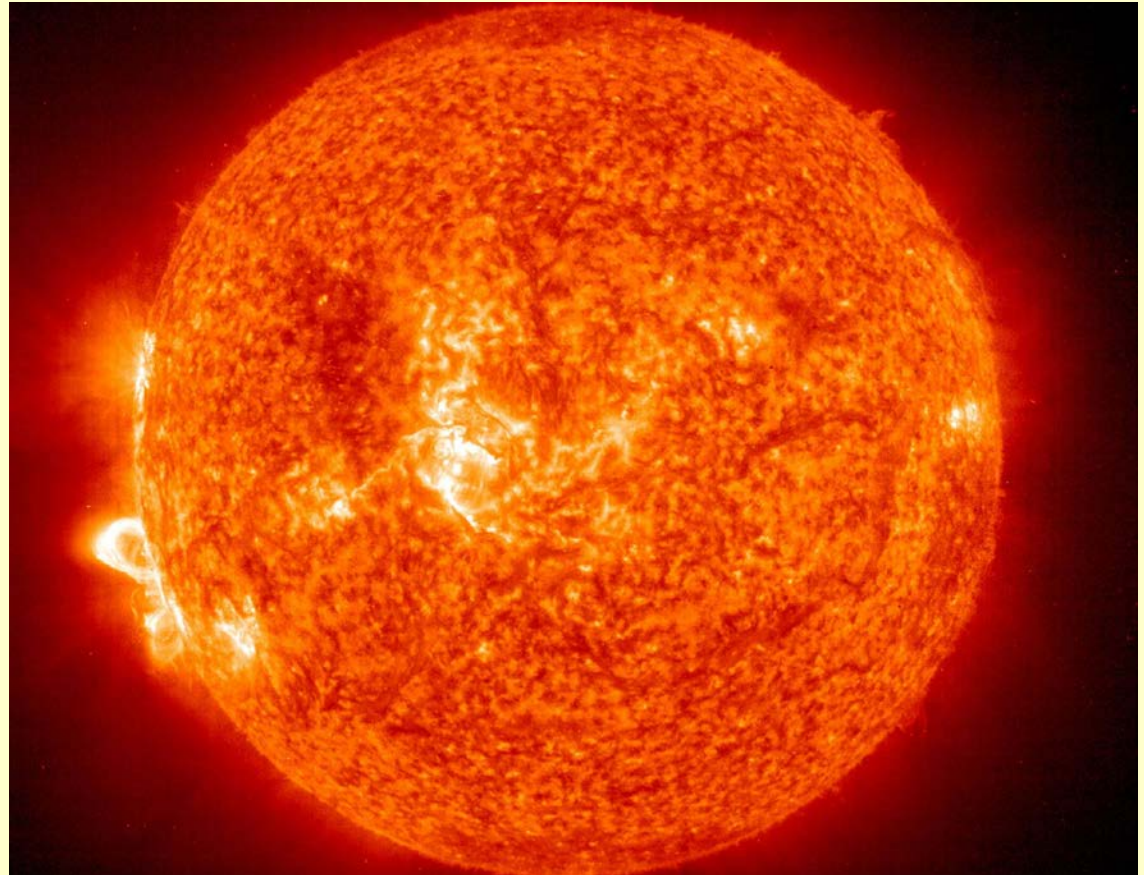
Reakce protonu s protonem za vzniku deuteronu probíhá při přeměně jednoho protonu na neutron – možné pouze **slabou interakcí** – malá pravděpodobnost

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

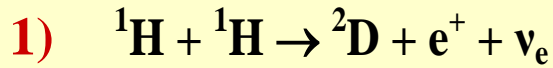
Kromě p-p cyklu se ještě uplatňuje **CNO cyklus** s katalytickou funkcí uhlíku a

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



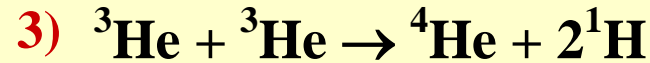
Hmotnost dvou protonů:

1876,56 MeV/c²



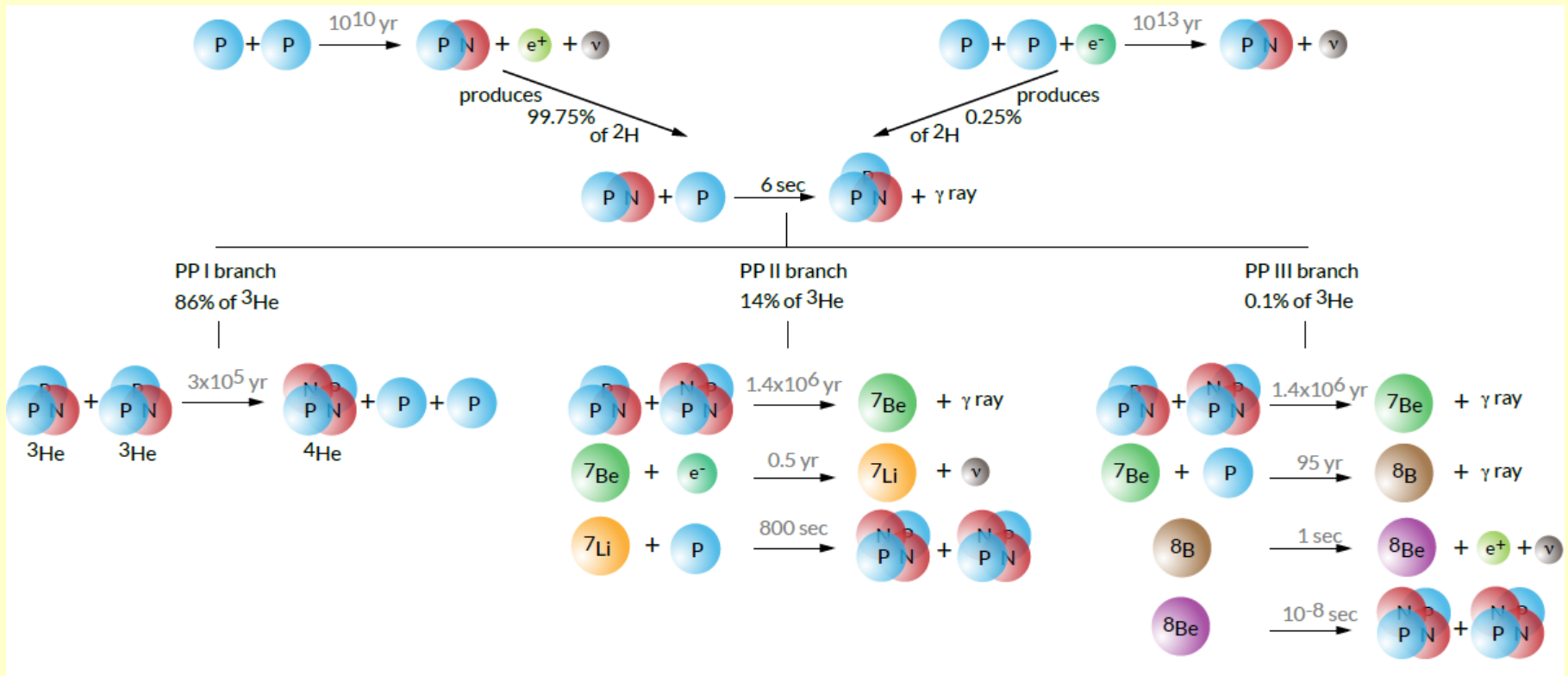
Hmotnost deuteronu:

1875,61 MeV/c²

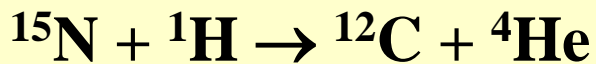
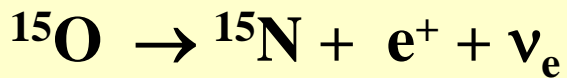
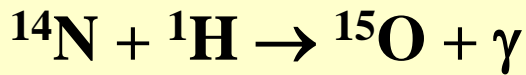
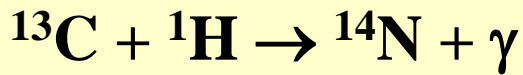
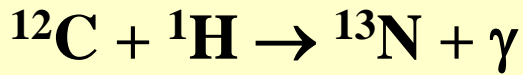


Hmotnost deuteronu a pozitronu: 1876,12 MeV/c²

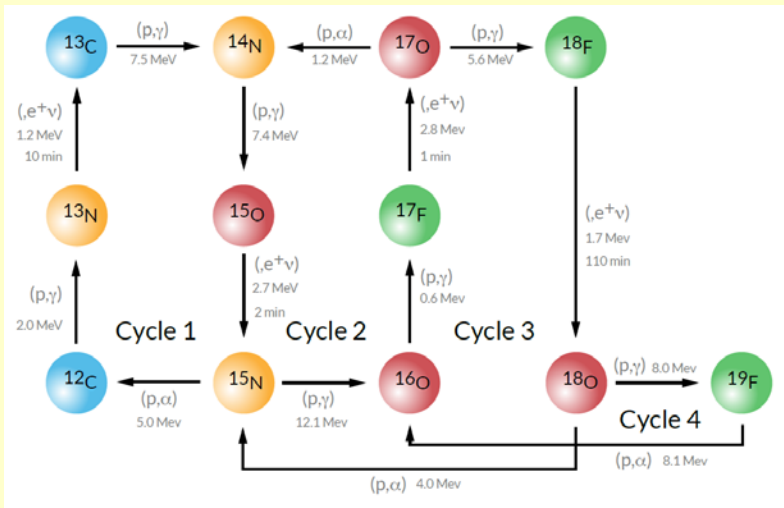
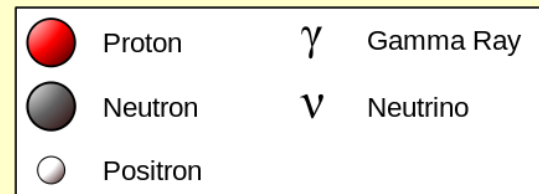
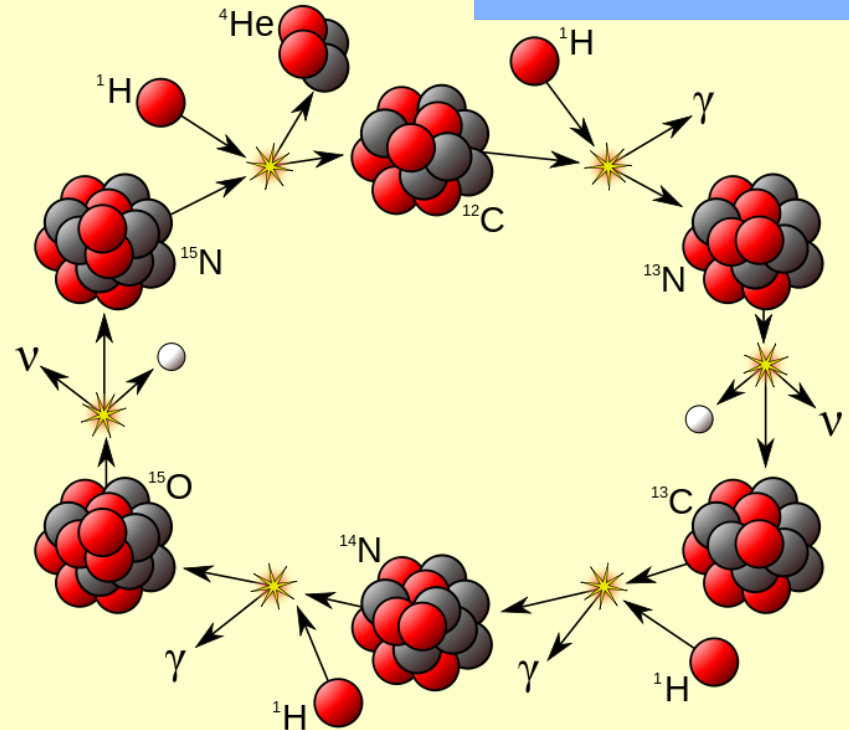
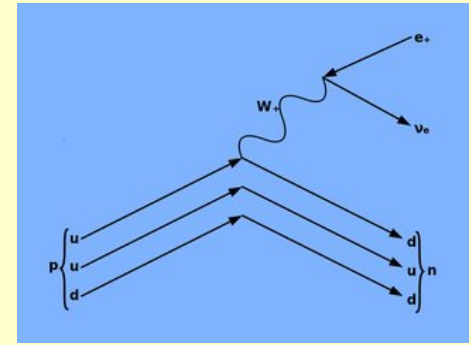
Nutnost přeměny protonu na neutron → přeměna kvarku → slabá interakce



CNO cyklus



Přeměna protonu na neutron
v beta plus rozpadu



Uhlík je katalyzátor

Spalování helia – jak se dostat k těžším prvkům

Hvězdy s hmotností Slunce a více

při ještě vyšších teplotách ($T = 10^8\text{K}$)

Problém – nejsou stabilní jádra s počtem nukleonů 5 a 8

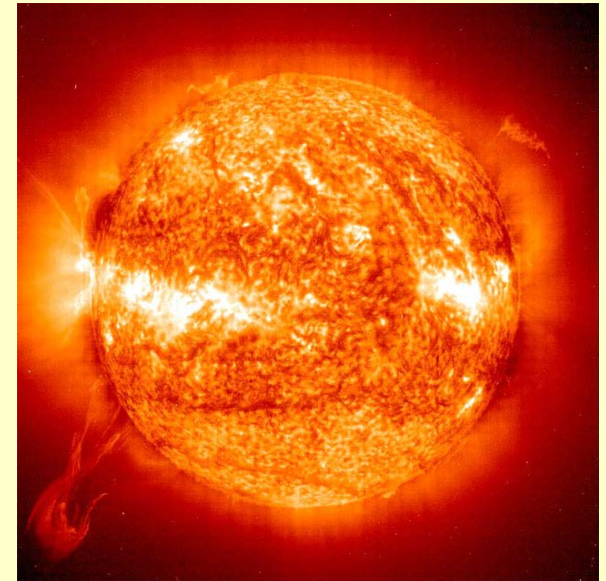
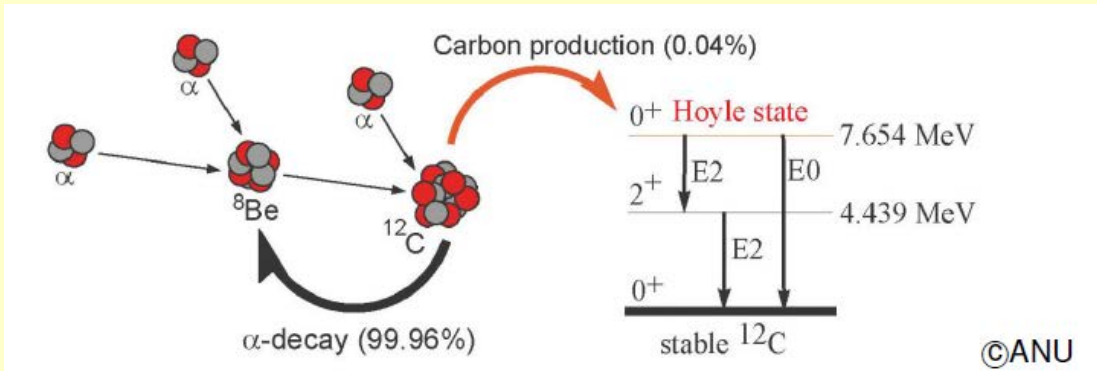
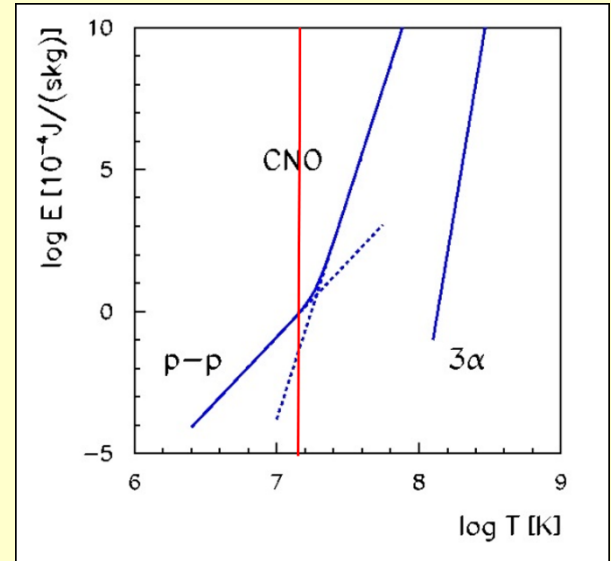
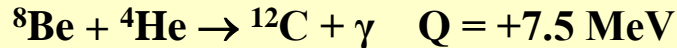
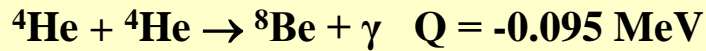
Vznik ${}^8\text{Be}$ s $T_{1/2} = 6,7 \cdot 10^{-17}\text{ s}$

Pro hustotu 10^8 kg/m^3 - 1 ${}^8\text{Be}$ na 10^9 ${}^4\text{He}$

Vznik ${}^{12}\text{C}$ umožněn záchytem dalšího ${}^4\text{He}$ a přechodem do druhého vzbuzeného stavu ${}^{12}\text{C}$ ($0^+ - 7,654\text{ MeV}$) – rezonance – rozpad s pravděpodobností $4 \cdot 10^{-4}$ do základního stavu

Je třeba dodat energii 287 keV → **chvost Maxwellova rozdělení**

3α -proces (Salpeterův):



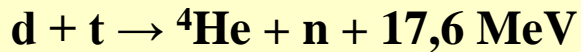
Všechny prvky těžší než bór vznikají pomocí Salpeterova cyklu Slunce – i v něm probíhá spalování helia

Vhodné reakce pro fúzní elektrárny

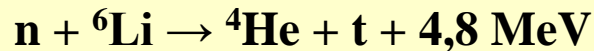
Slučování lehkých prvků: p, d, t, ^3He

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

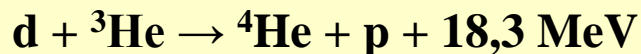
Reakce deuteria s tritiem:



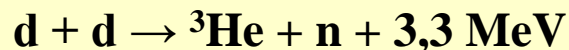
Problém s tritiem, to lze získat z lithia:



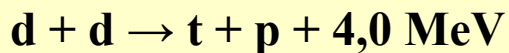
Reakce deuteria s heliem 3:



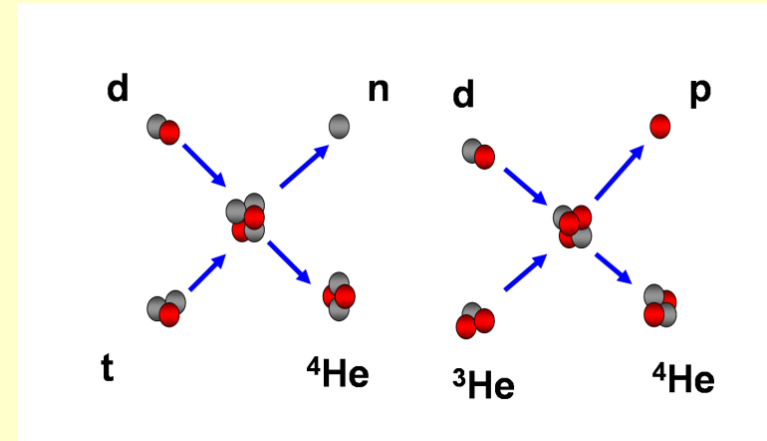
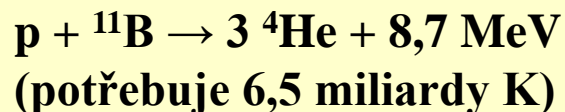
Problém s heliem 3 (na Měsíci?) nebo



Spolu s:



Případně reakce:



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



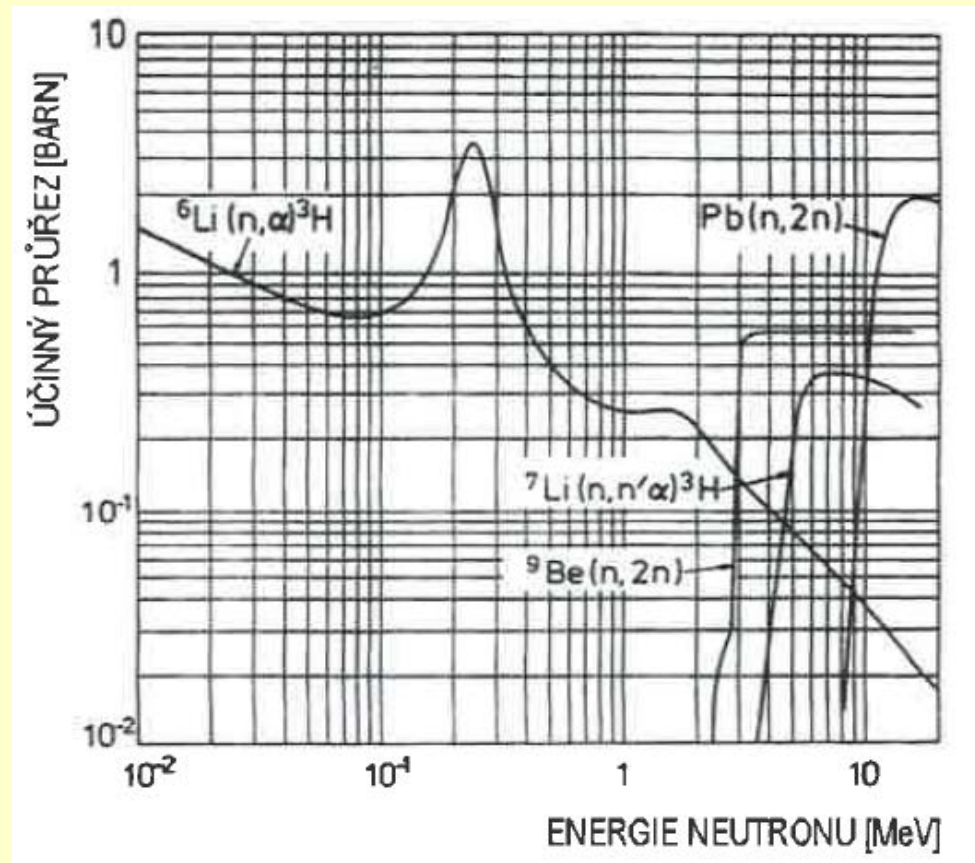
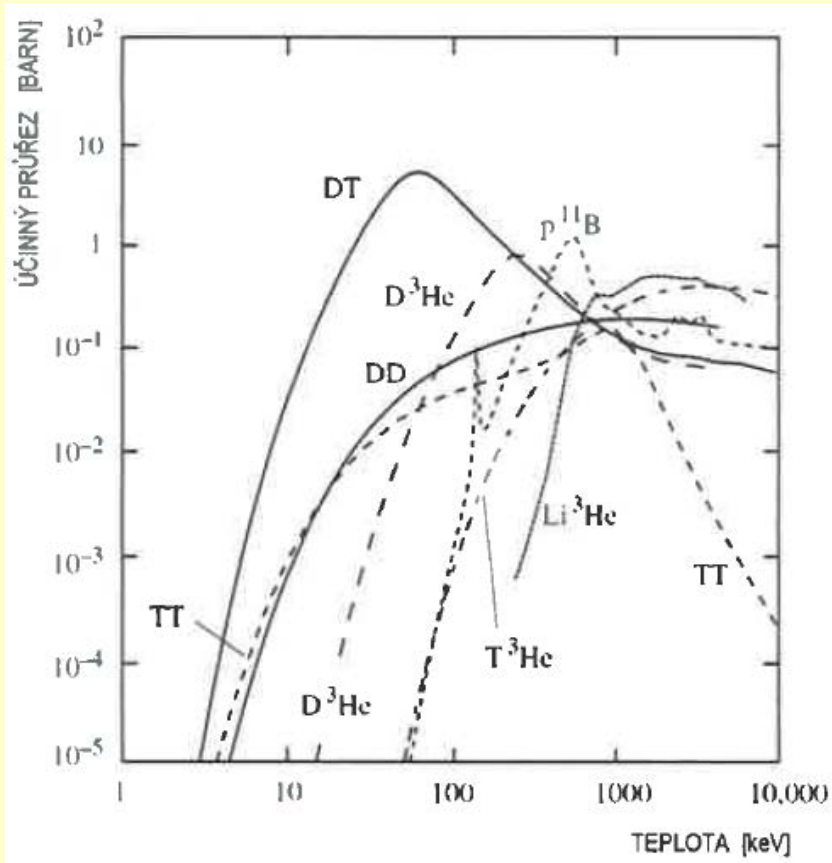
Termojaderný pohon hvězdoletu: Teodor Rotrekl: „Záhady pro zítřek“

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)

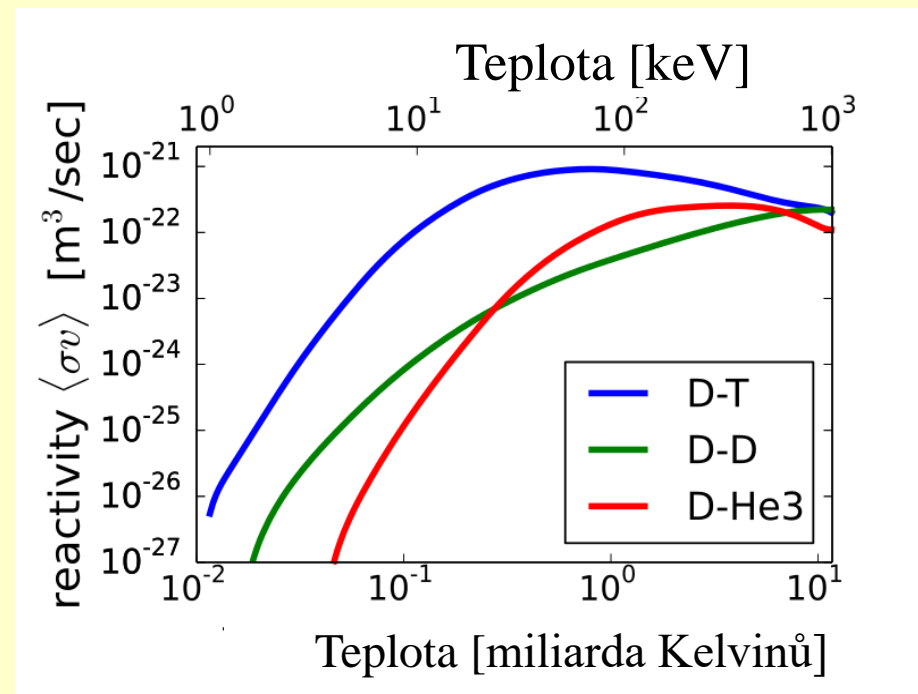
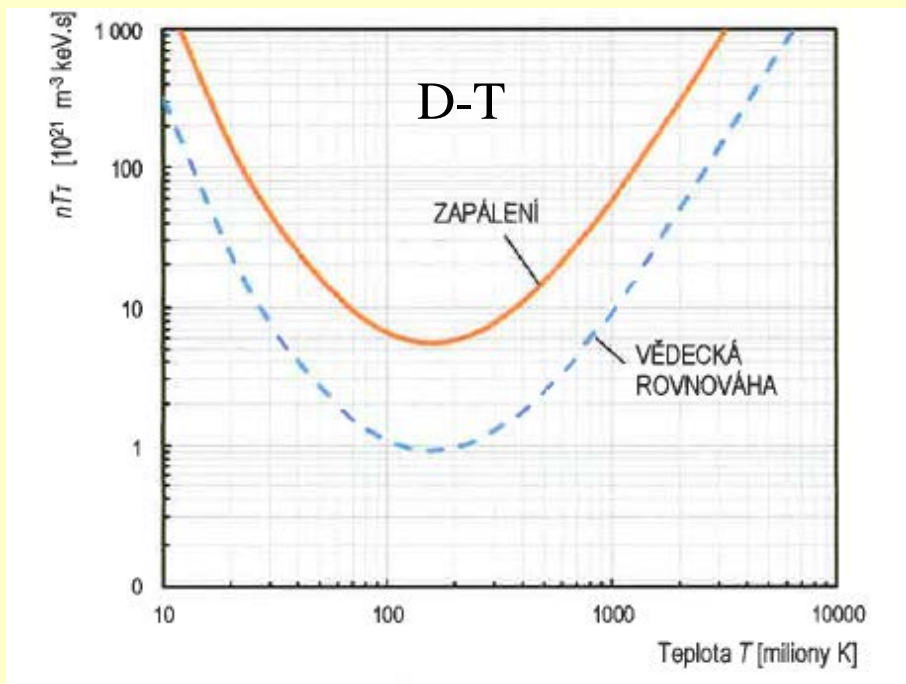
Při dané teplotě je potřeba dostatečný součin hustoty plazmatu a času jeho udržení, aby proběhlo dostatek fúzních reakcí pro získání celkového energetického zisku:

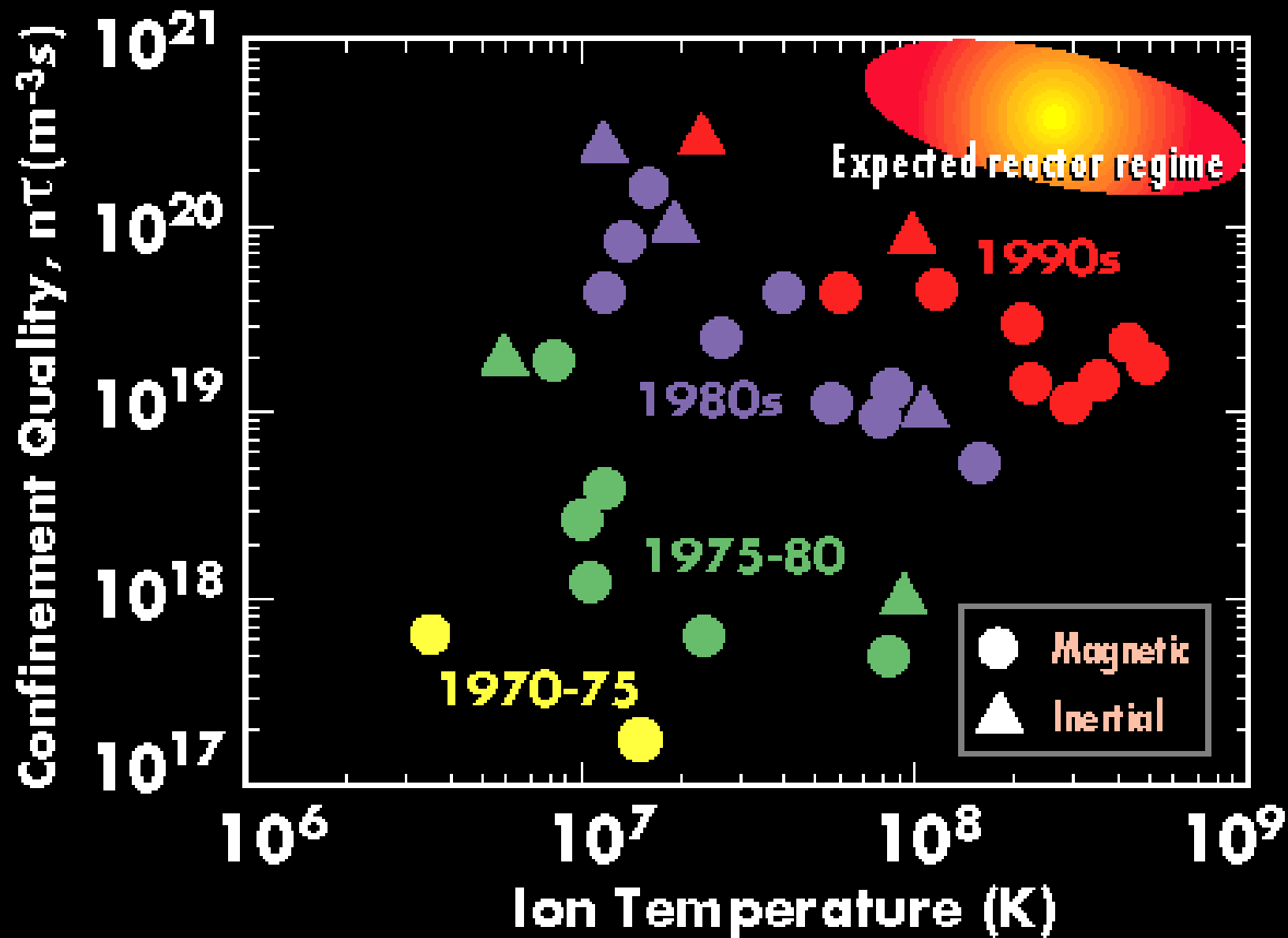
(v okolí optimální, pro D-T je 165 milionů K) $n \cdot T \cdot \tau > f(T)$

Vědecké vyrovnání: rovnováha fúzního výkonu a ohřevu plazmatu

Zapálení: rovnováha fúzního výkonu absorbovaného a ztrátového výkonu plazmatu

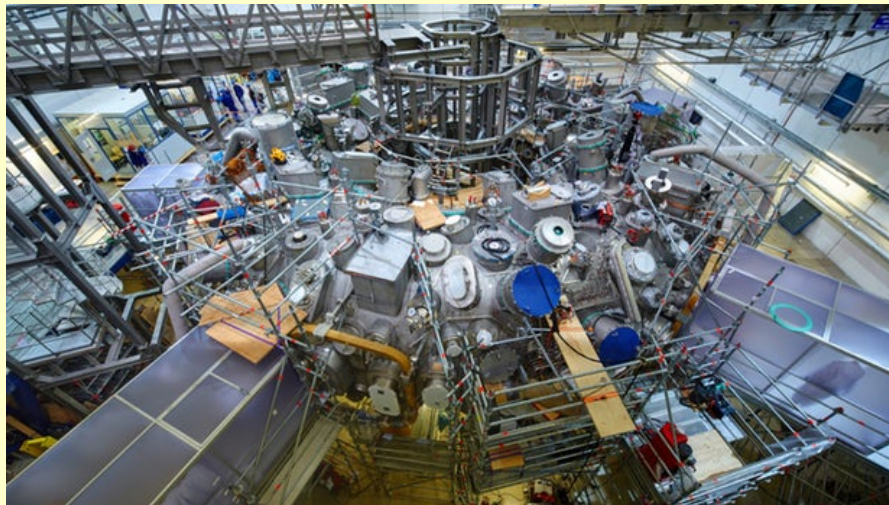
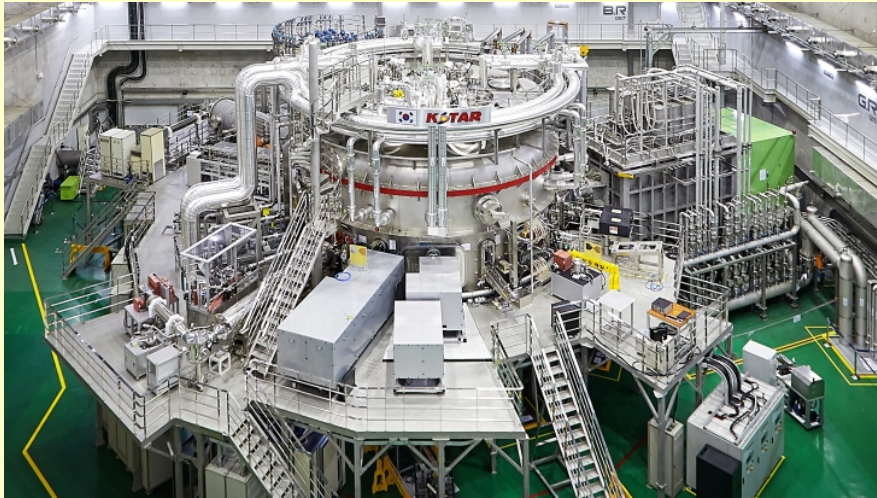
Inženýrské vyrovnání: rovnováha hrubého výkonu a vlastní spotřeby fúzní elektrárny



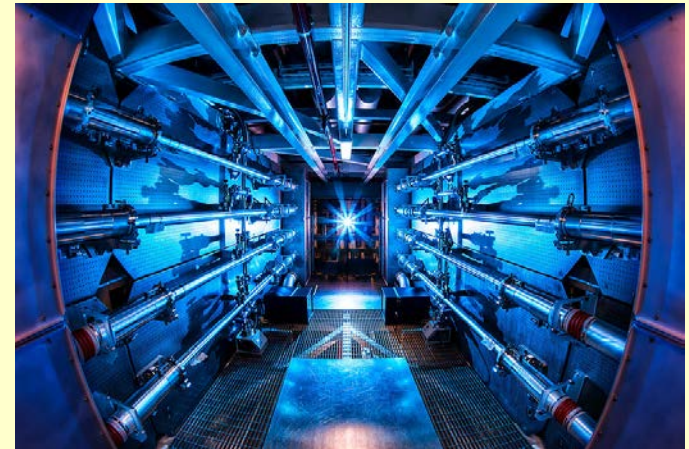
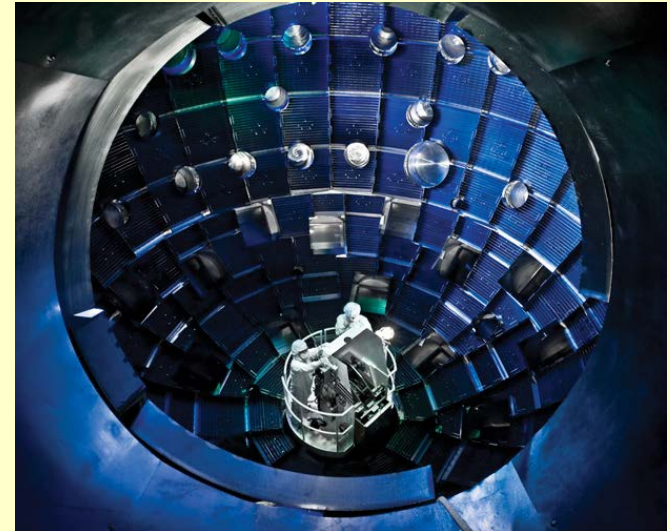


Různé cesty k fúzi – magnetické a inerciální udržení

Magnetické – tokamaky, stellaratory ...
Nižší hustota – dlouhá doba udržení



Inerciální – NIF (USA)
Vysoká hustota – krátký čas



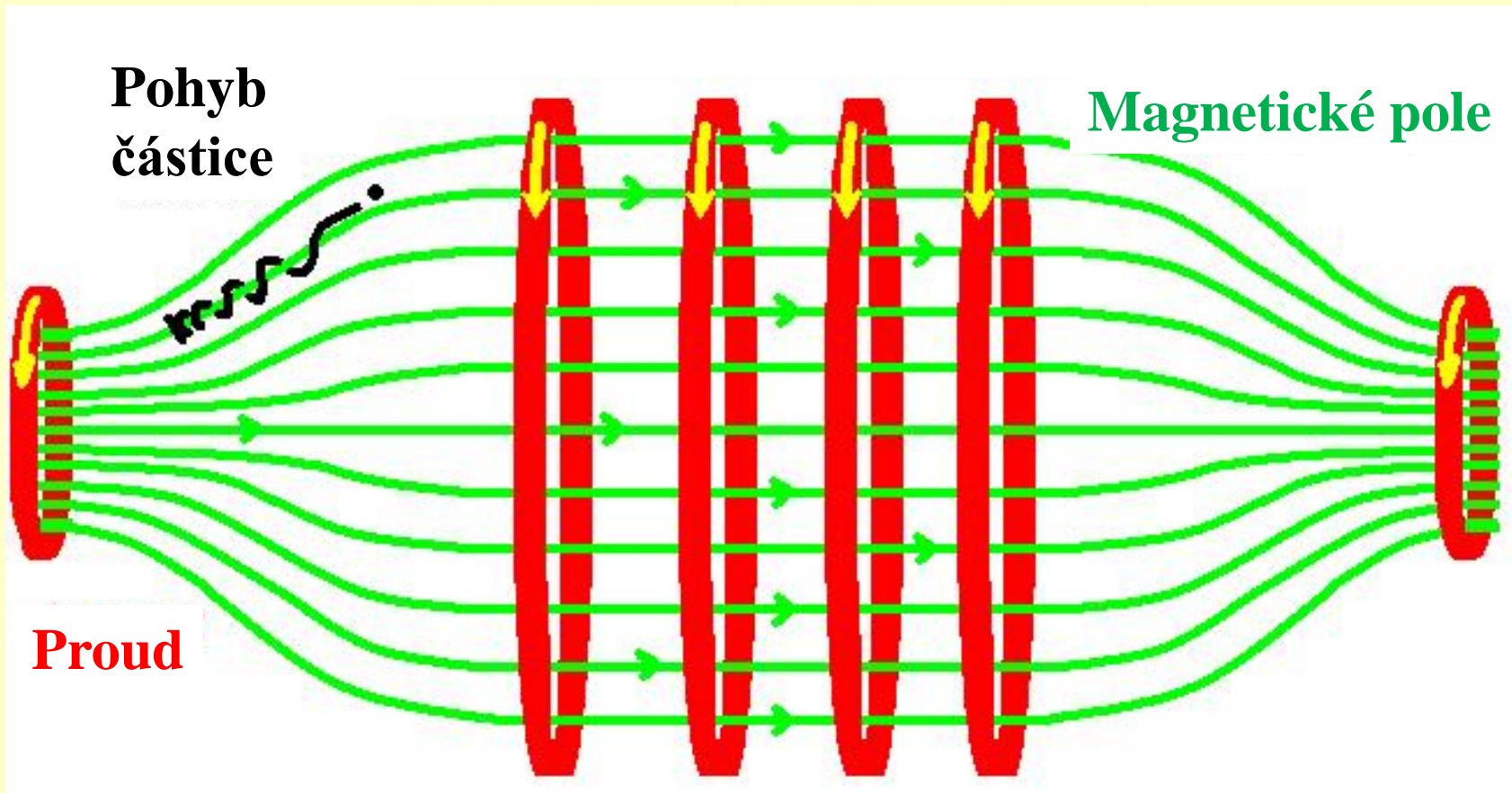
Magnetické udržení – tokamaky a stellarátory

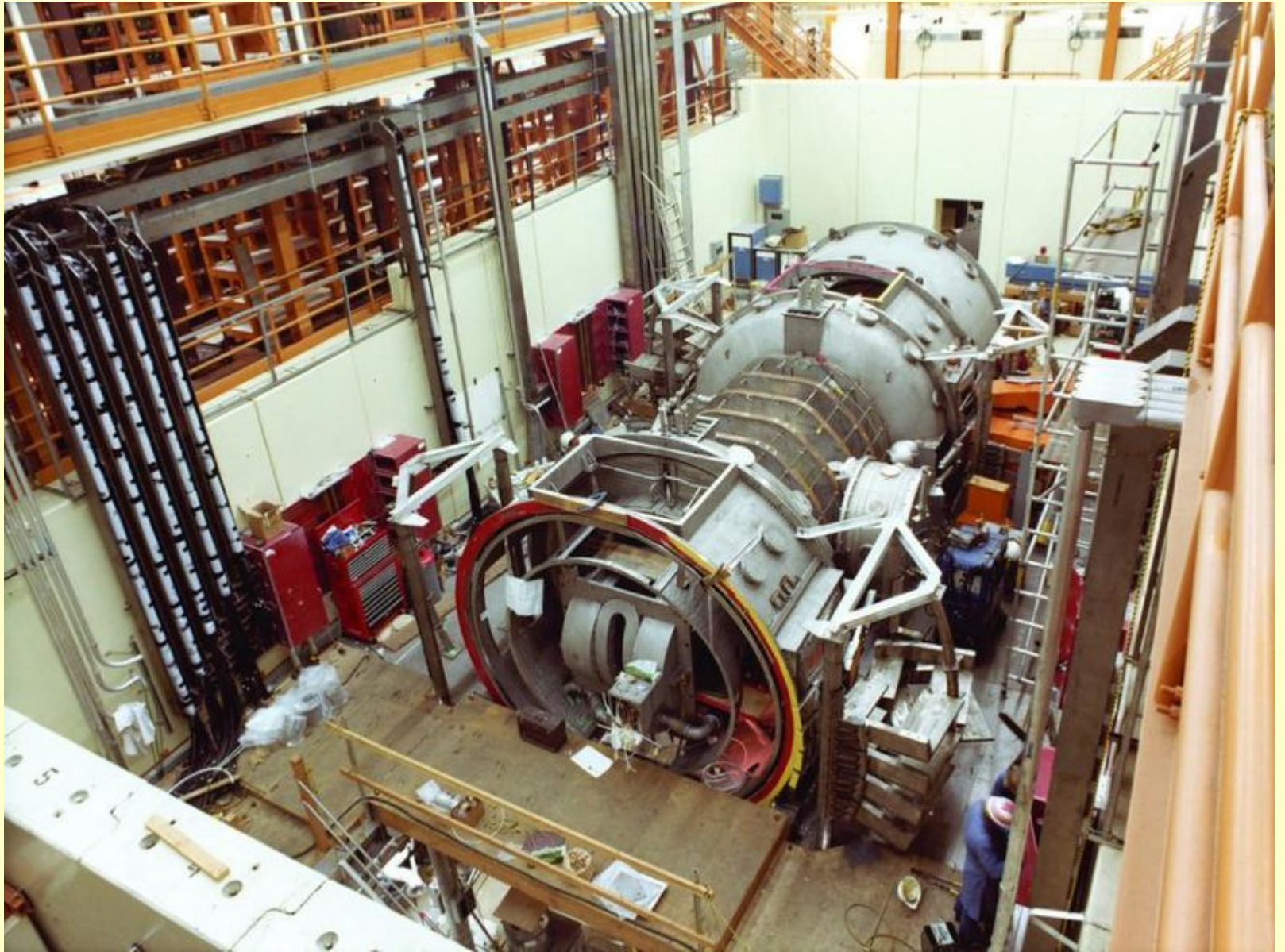
Magnetická past pro udržení plazmatu – plazma je zachyceno v magnetické pasti

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



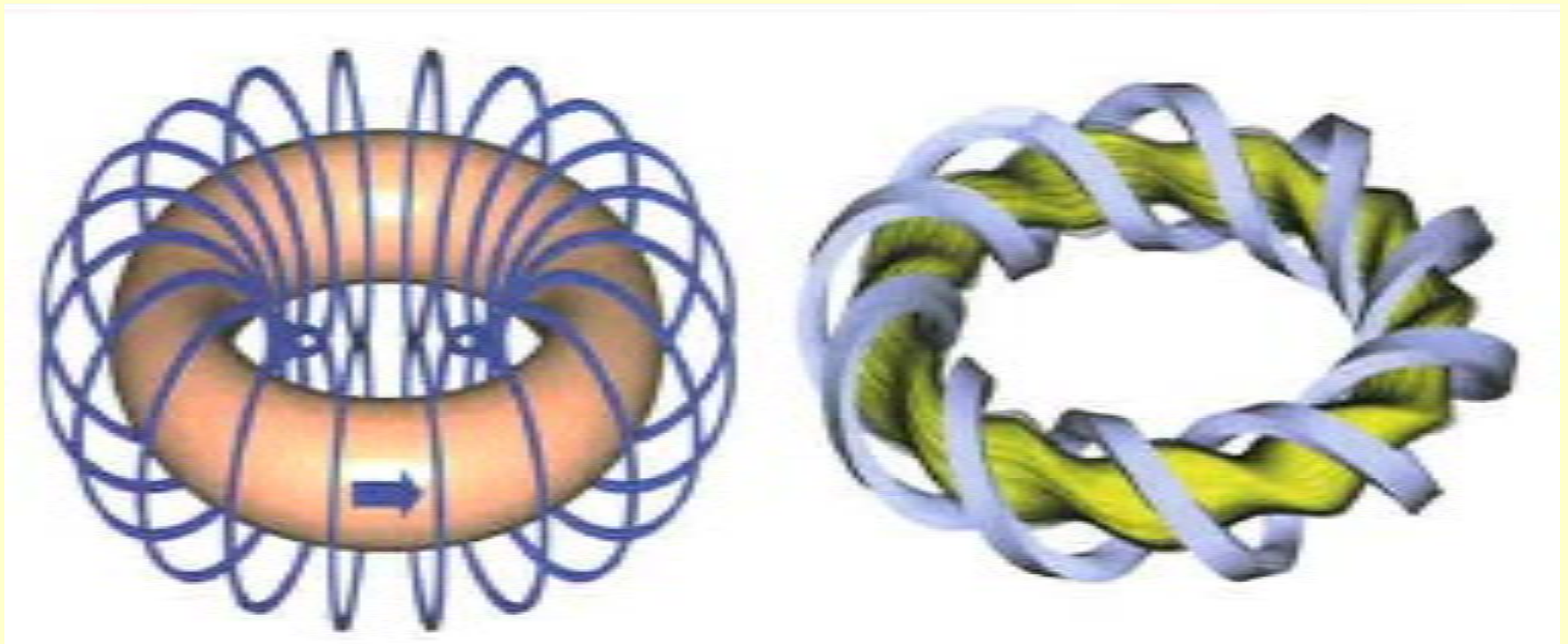


TMX (Tandem Mirror Experiment) v Lawrence Livermore National Laboratory v 1979

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 cívký. Ohřev plazmatu pomocí proudu. Induktivní buzení proudu je možné v pouze pulsech – proto se nahrazuje neinduktivním

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



Tokamak

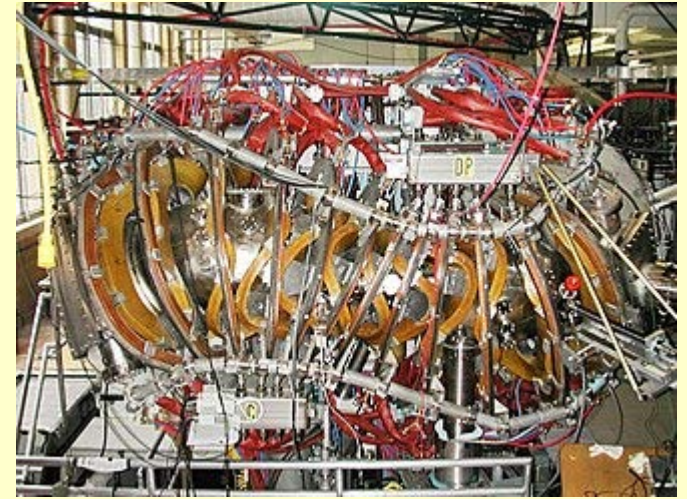
(modré a šedé jsou cívký)

Stelarátor

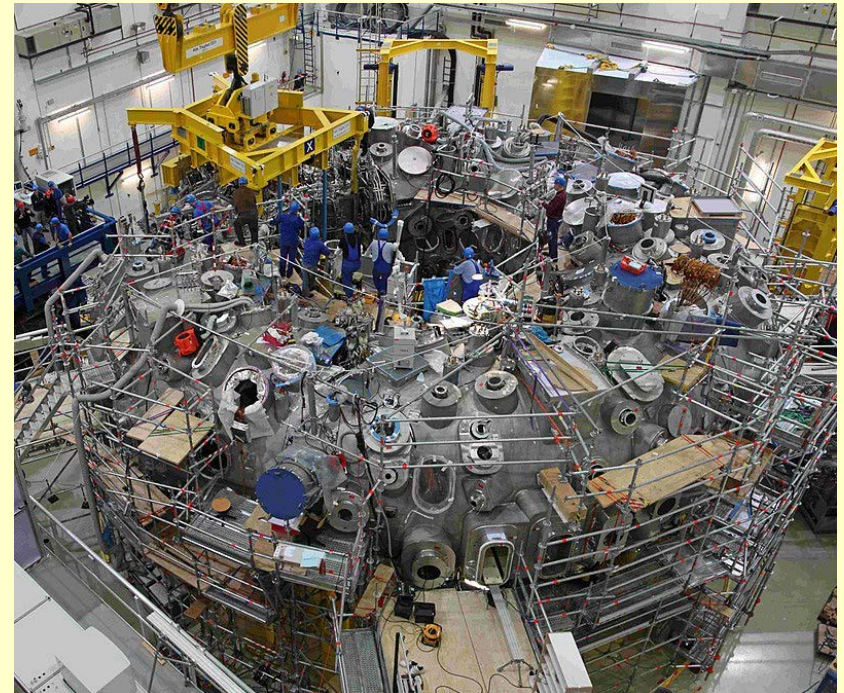
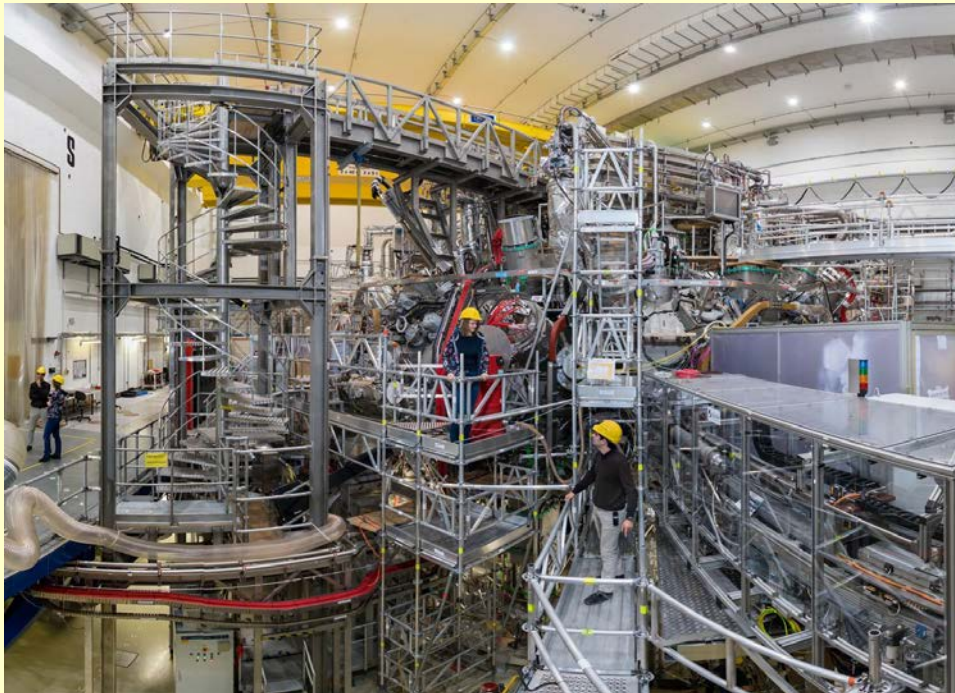
Rozvoj stelarátorů

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

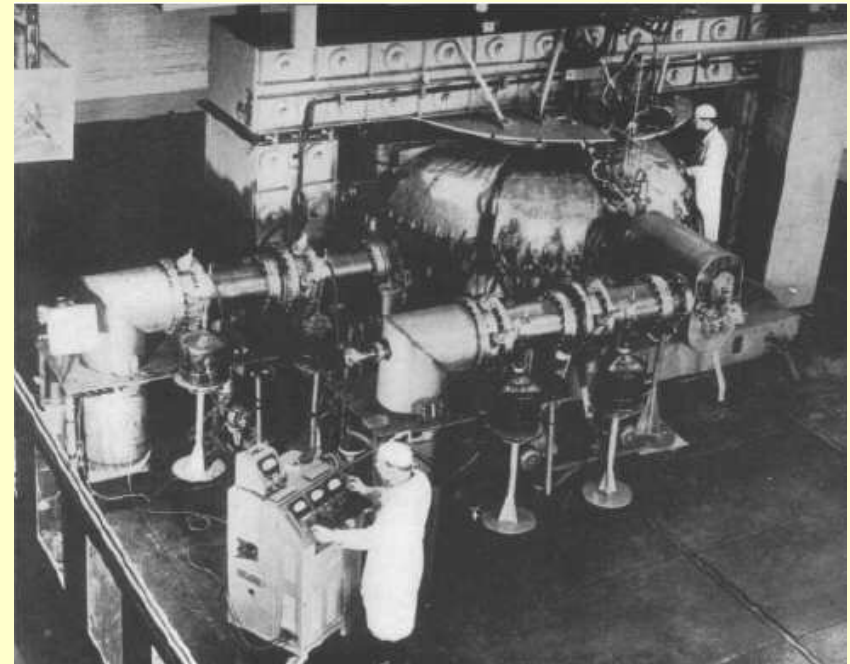
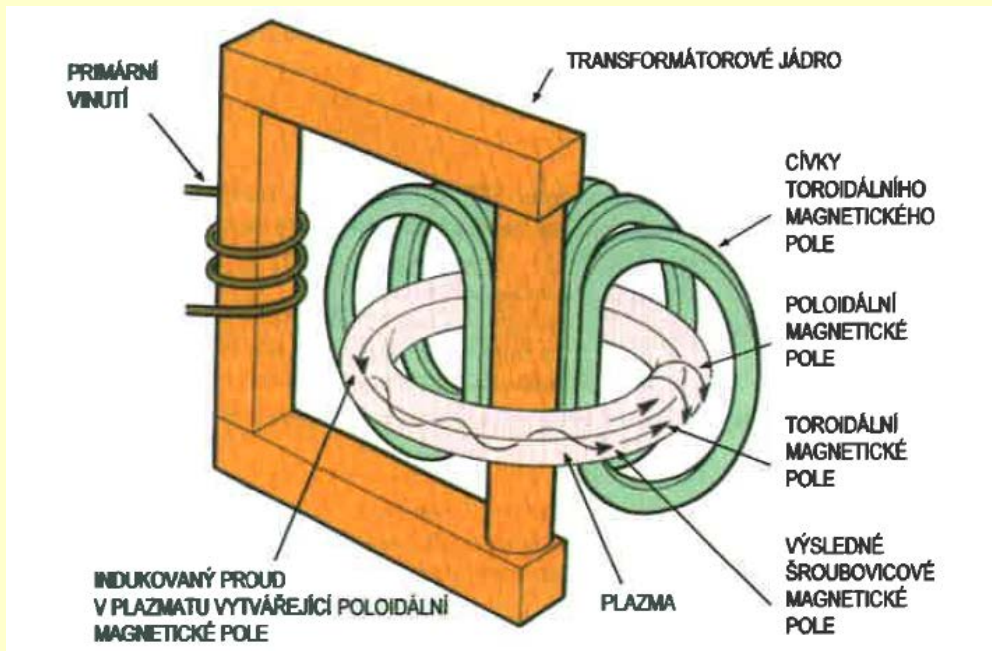
Jeho idea začala v Rusku v 50. letech (Igor Tamm, Andrej Sacharov, Igor Lavrentev), první model T-1 v 1958 (Natan Javlinskij)

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.

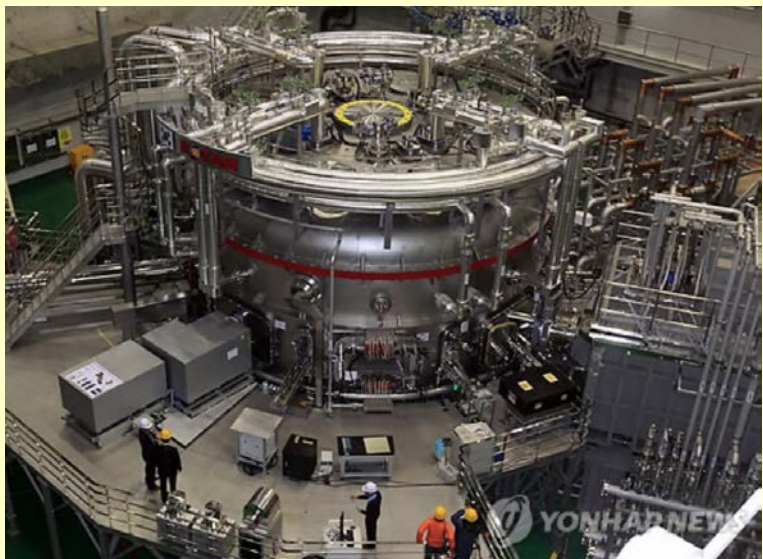
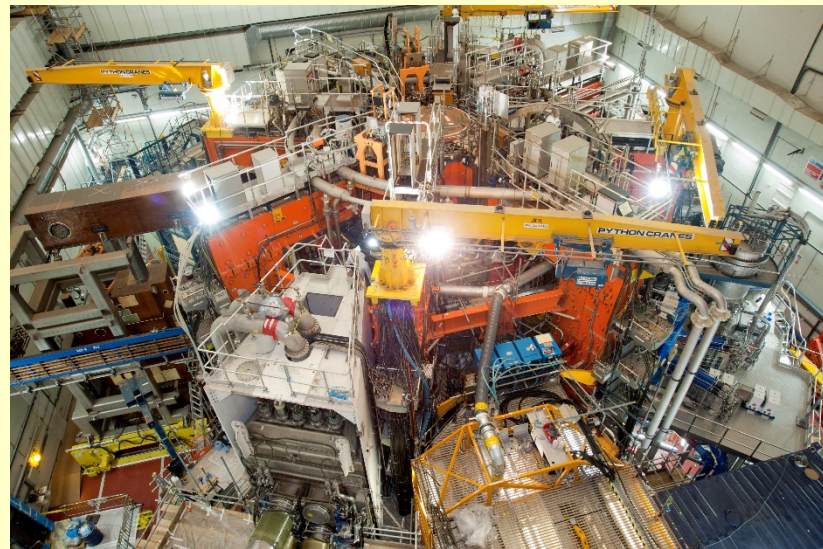
Teploty přes 50 milionů K (jinde i stovky)

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

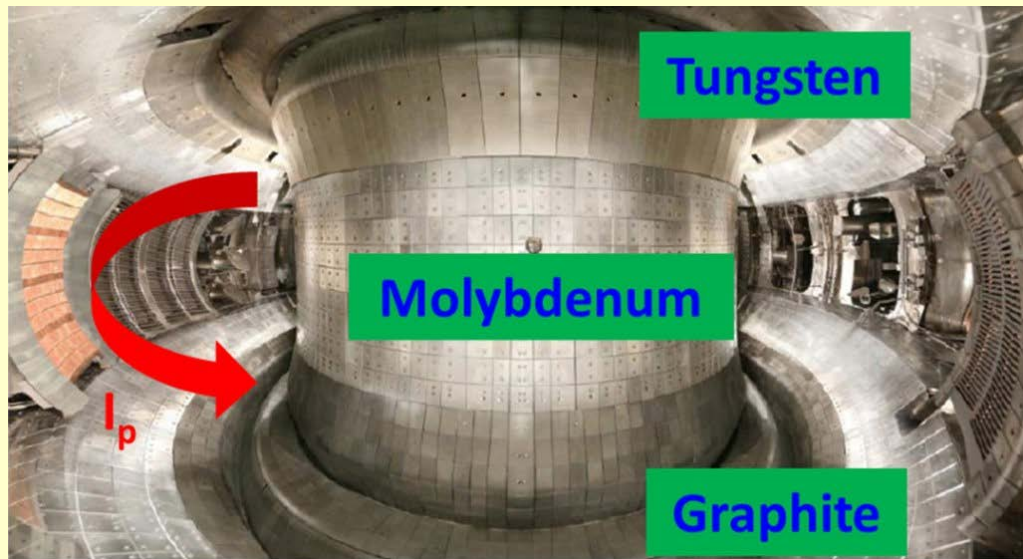
Tore Supra plazma 6,5 min

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

JET – Velká Británie



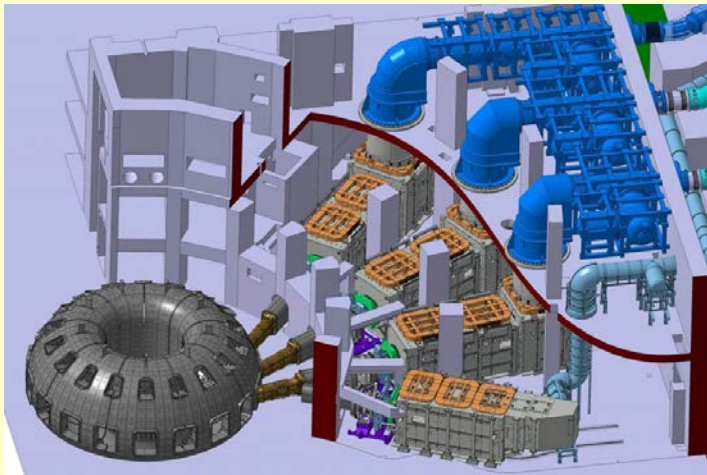
KSTAR – Jižní Korea



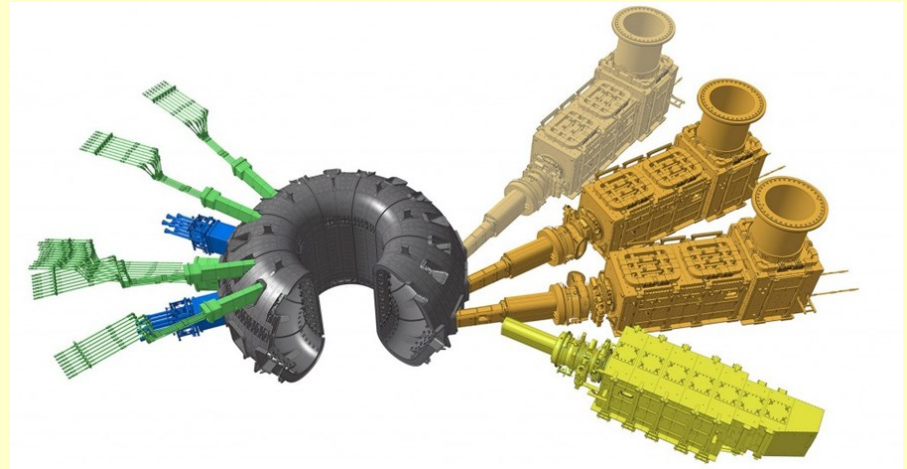
EAST - Čína

Ohřev plazmatu v tokamacích

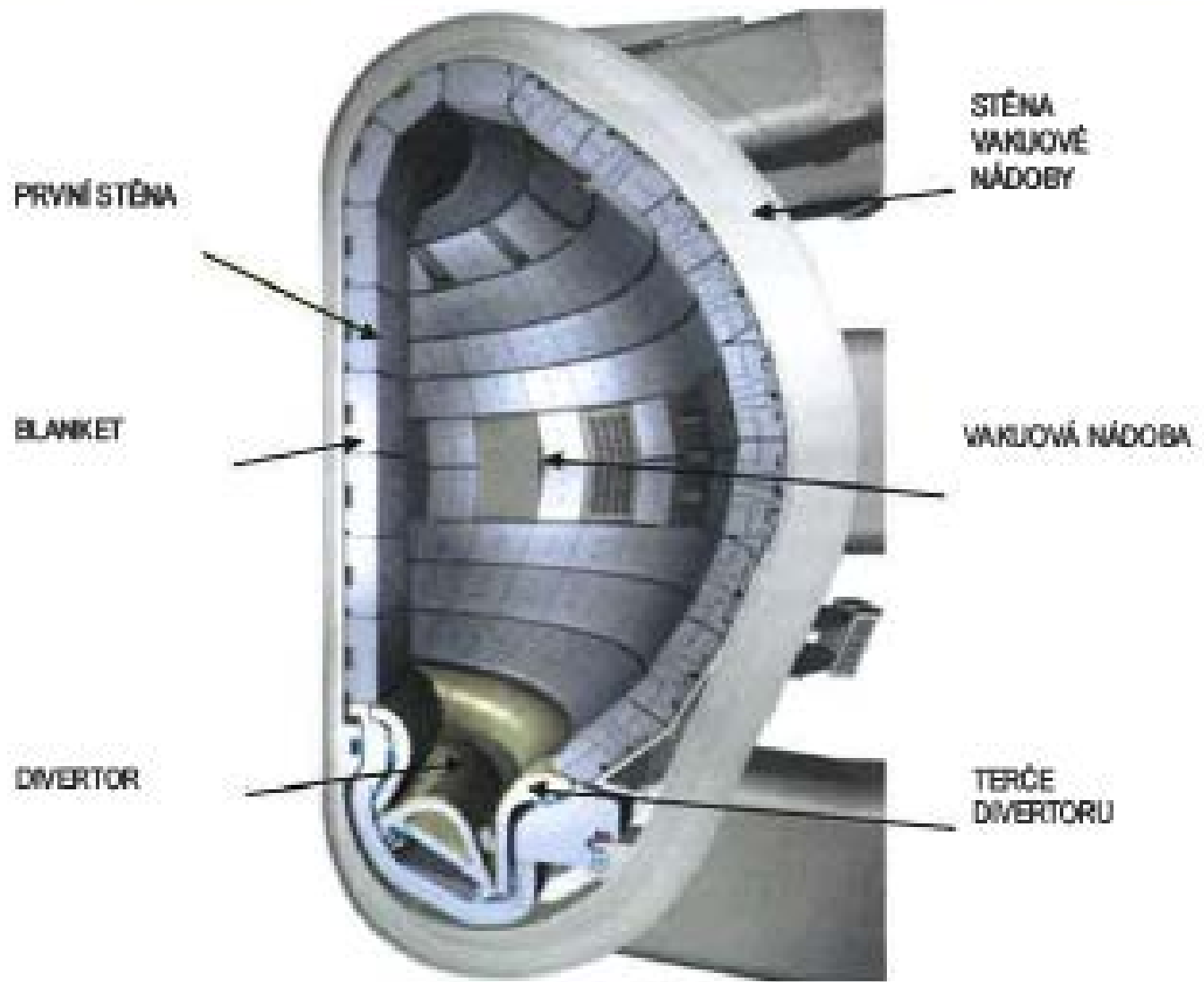
- 1) **Fúzní reakce** (nejen v tokamacích) – pouze nabité ionty, při D-T reakci velká část energie je odnesena neutrony (14,1 ze 17,6 MeV – lze lehce spočítat z kinematiky)
- 2) **Ohmický ohřev** – Joulova energie indukována proudem plazmatu – důležitý na počátku, odpor s teplotou roste, jeho vliv klesá
- 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

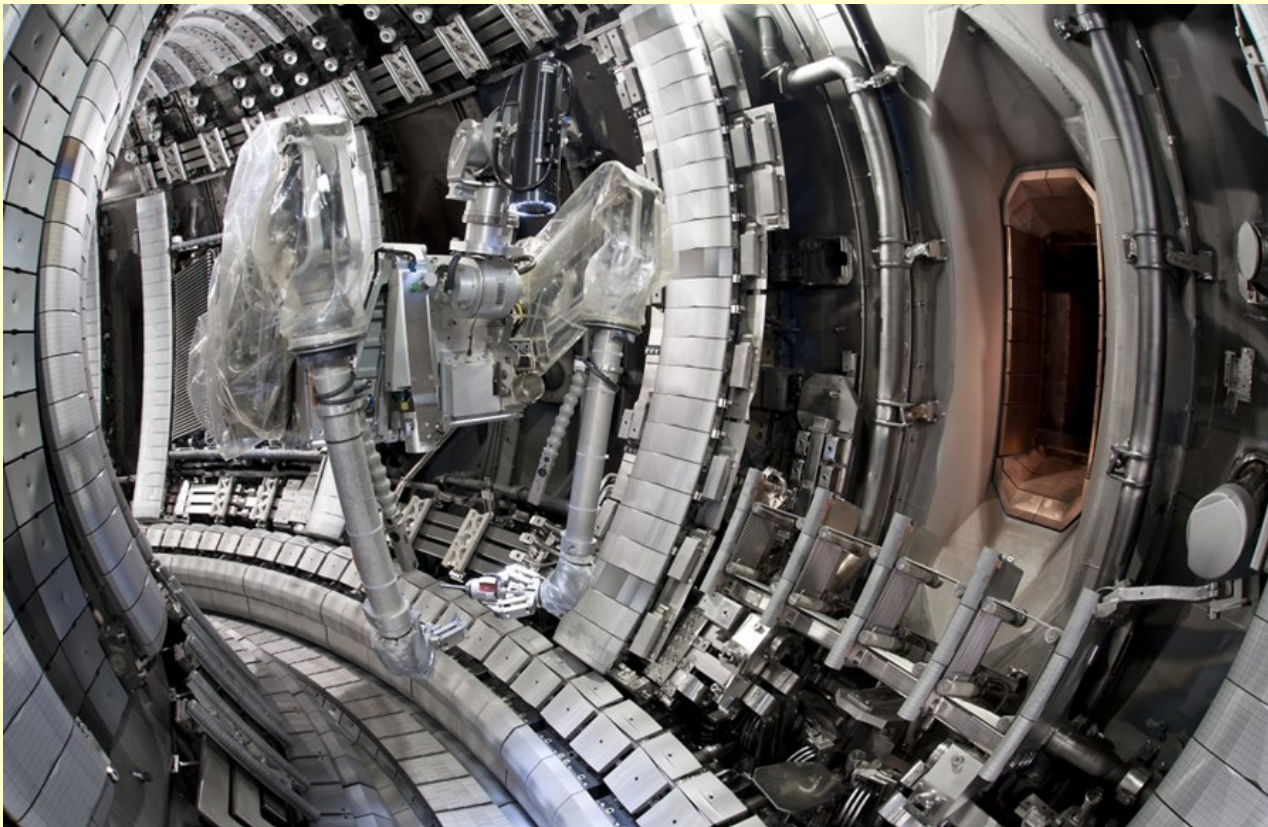


Obr. 21. Jaderné komponenty fúziho reaktoru [1]

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

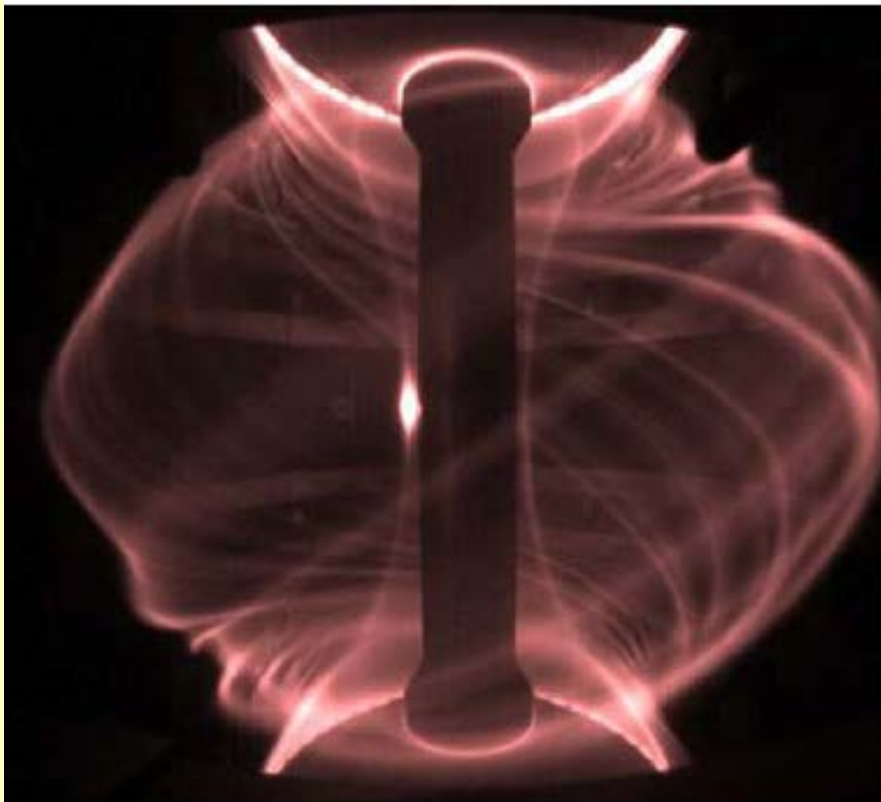
Obrovský problém s udržením plazmatu – k jeho sledování nutná diagnostika

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

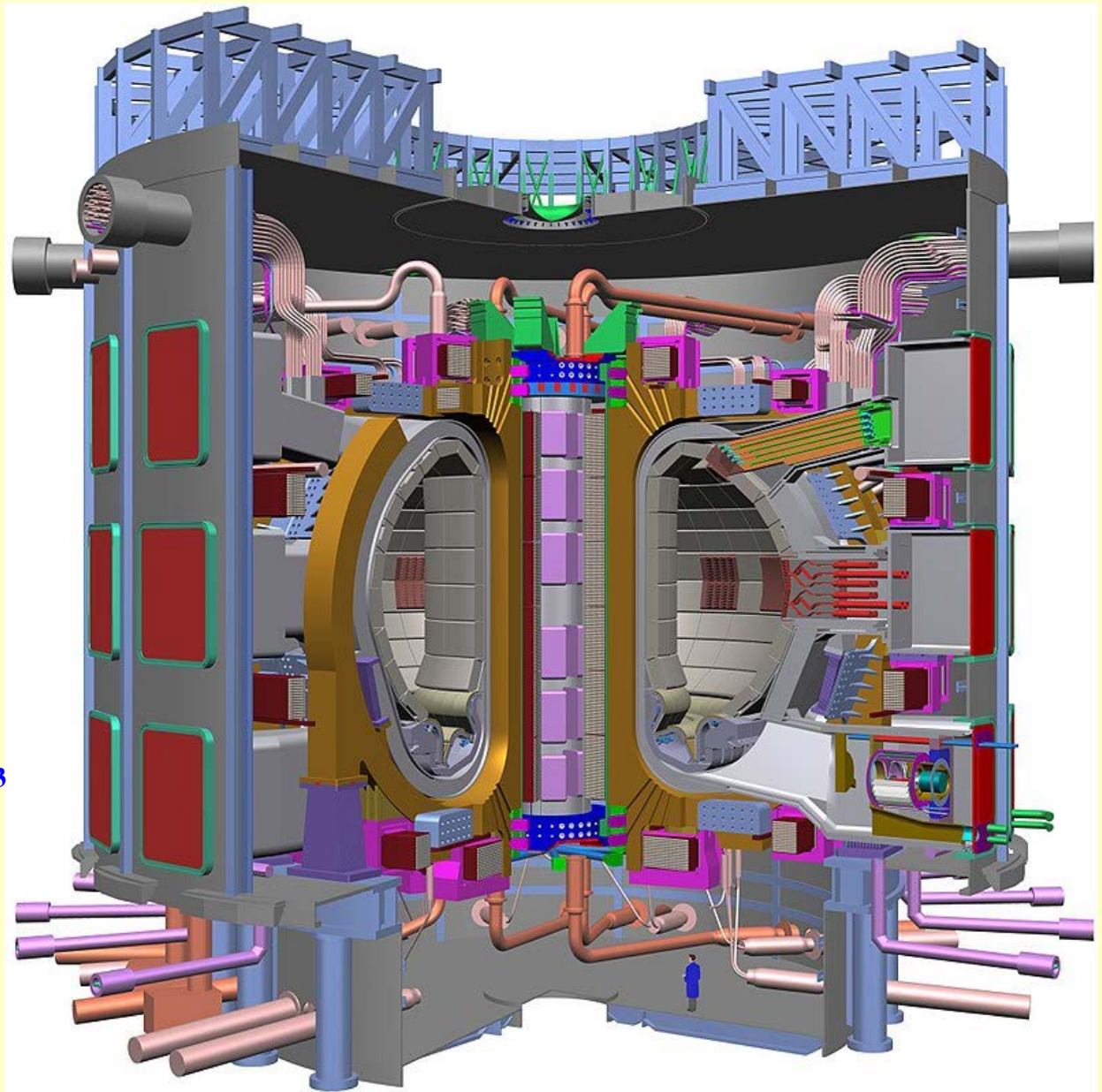
Supravodivé magnety:

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



Letecký snímek z dubna 2022



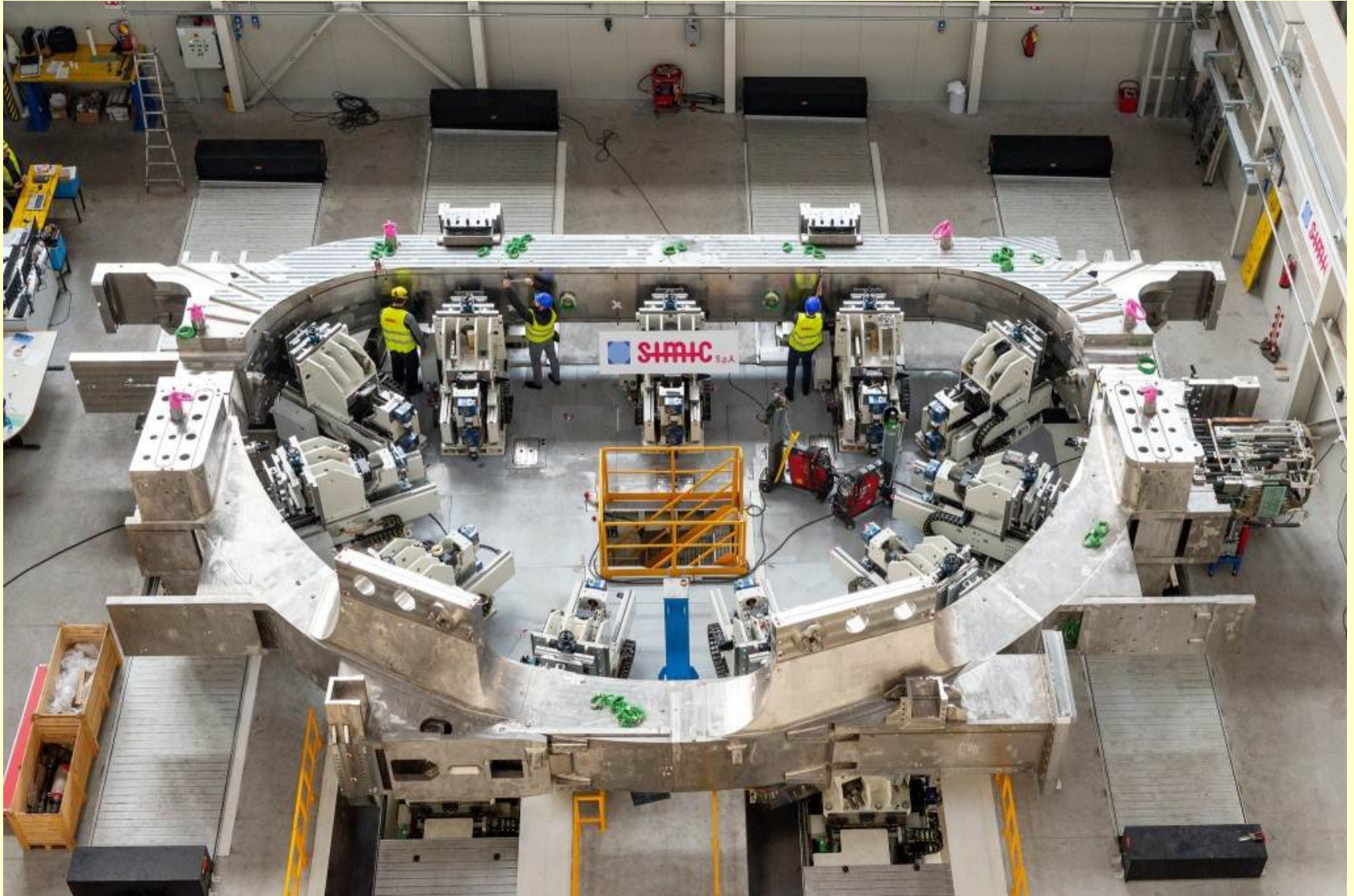


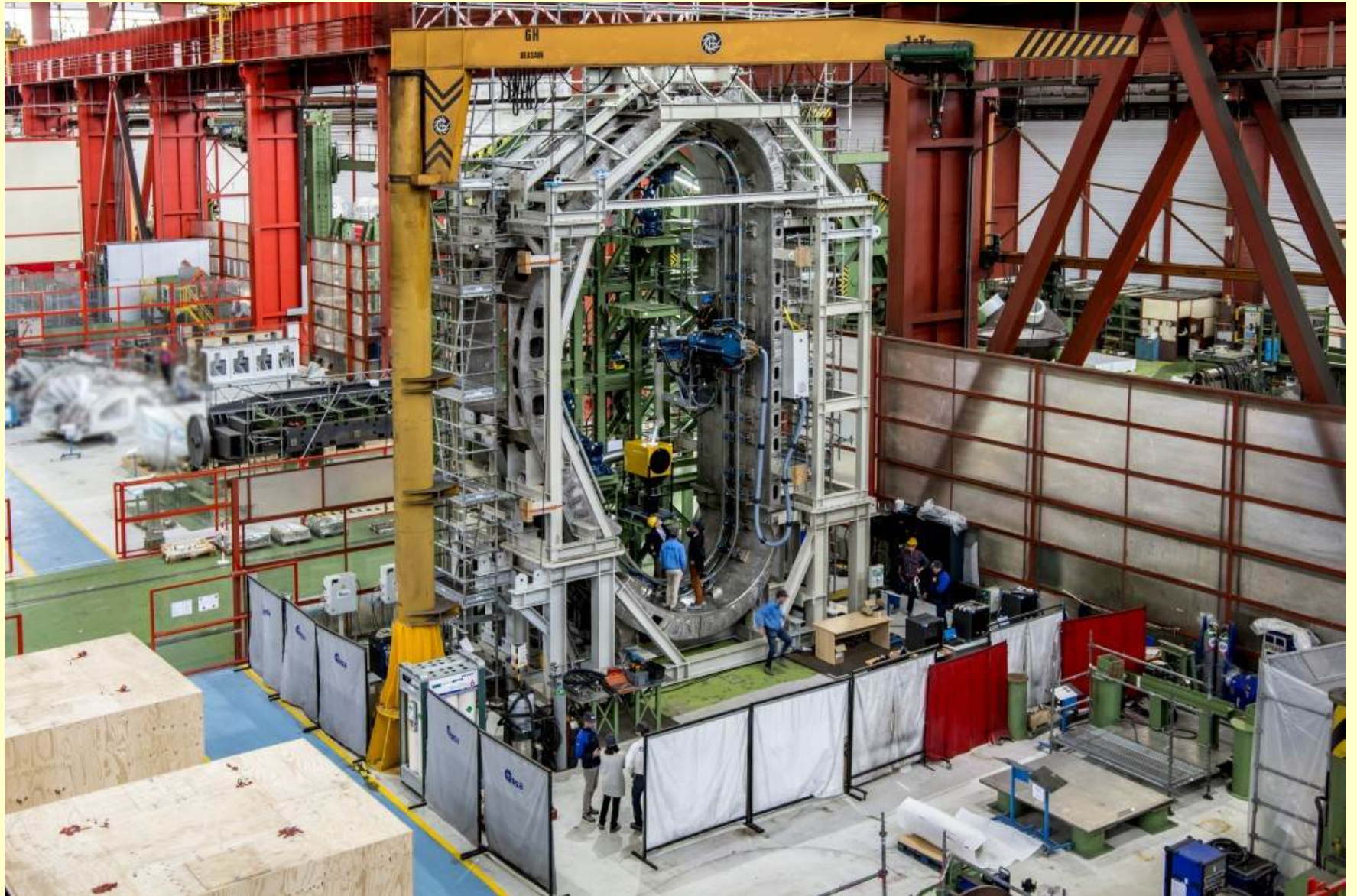


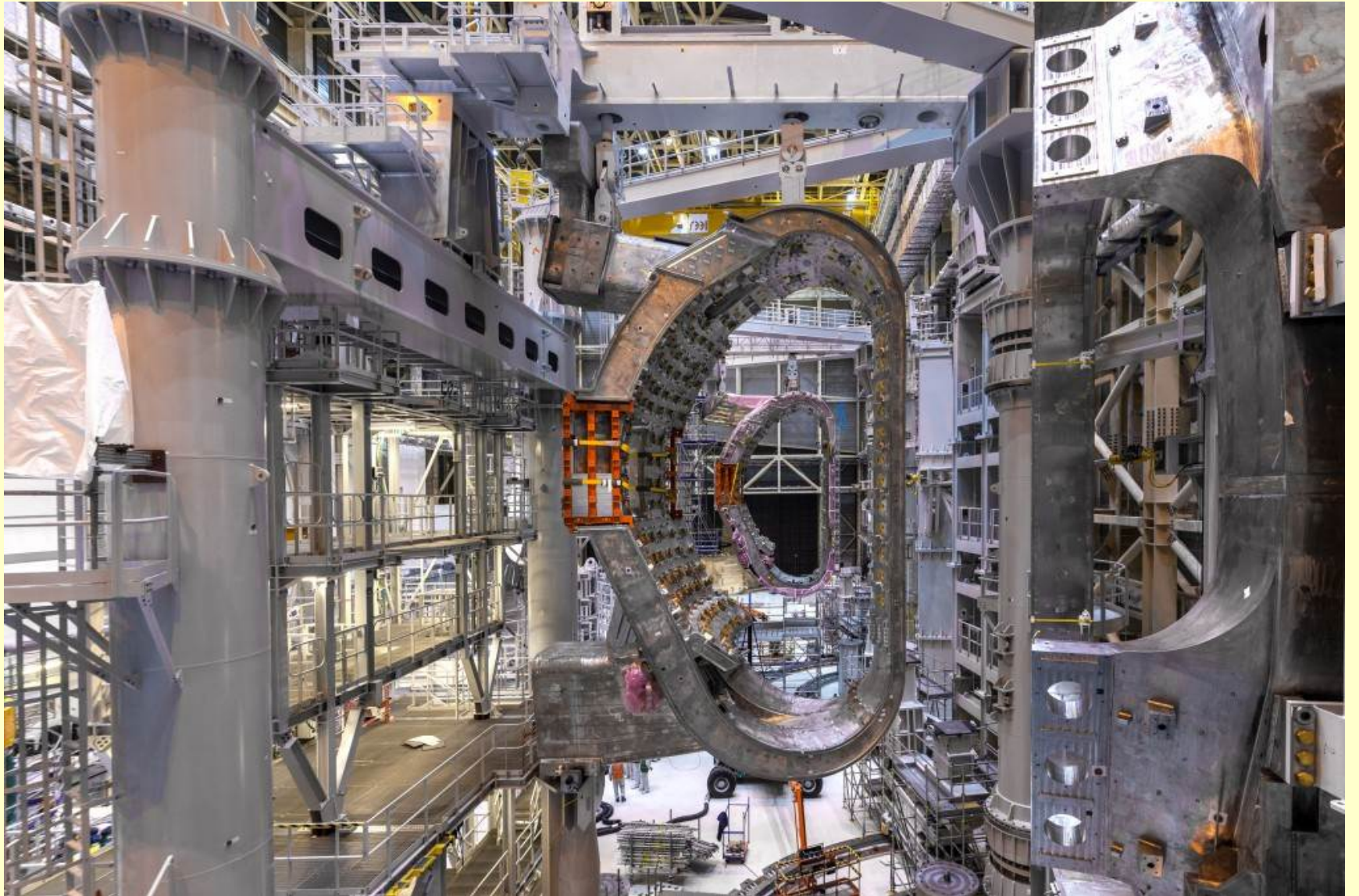
Začátek roku 2019 – dokončeny vlastní rozvody elektřiny

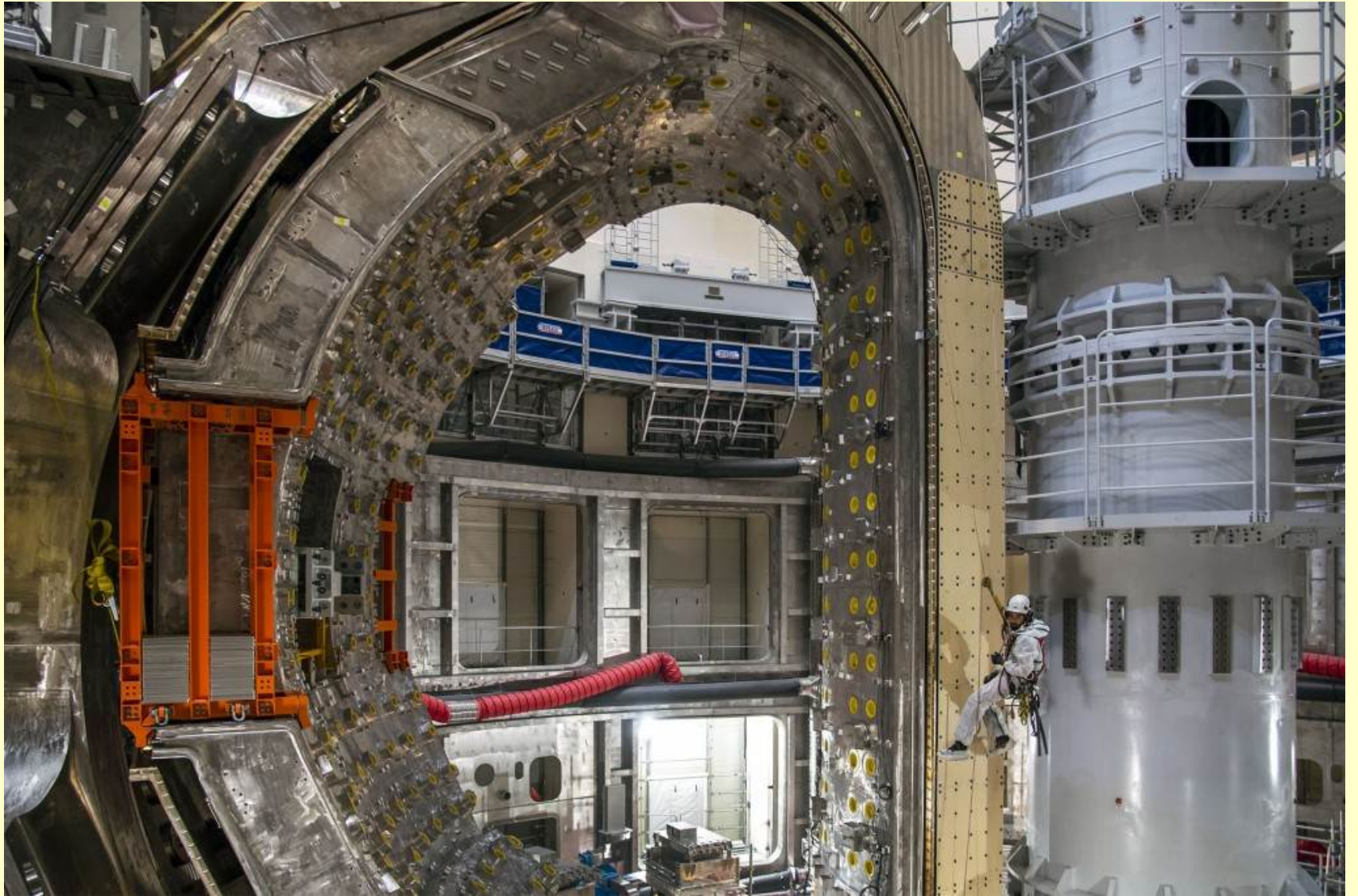


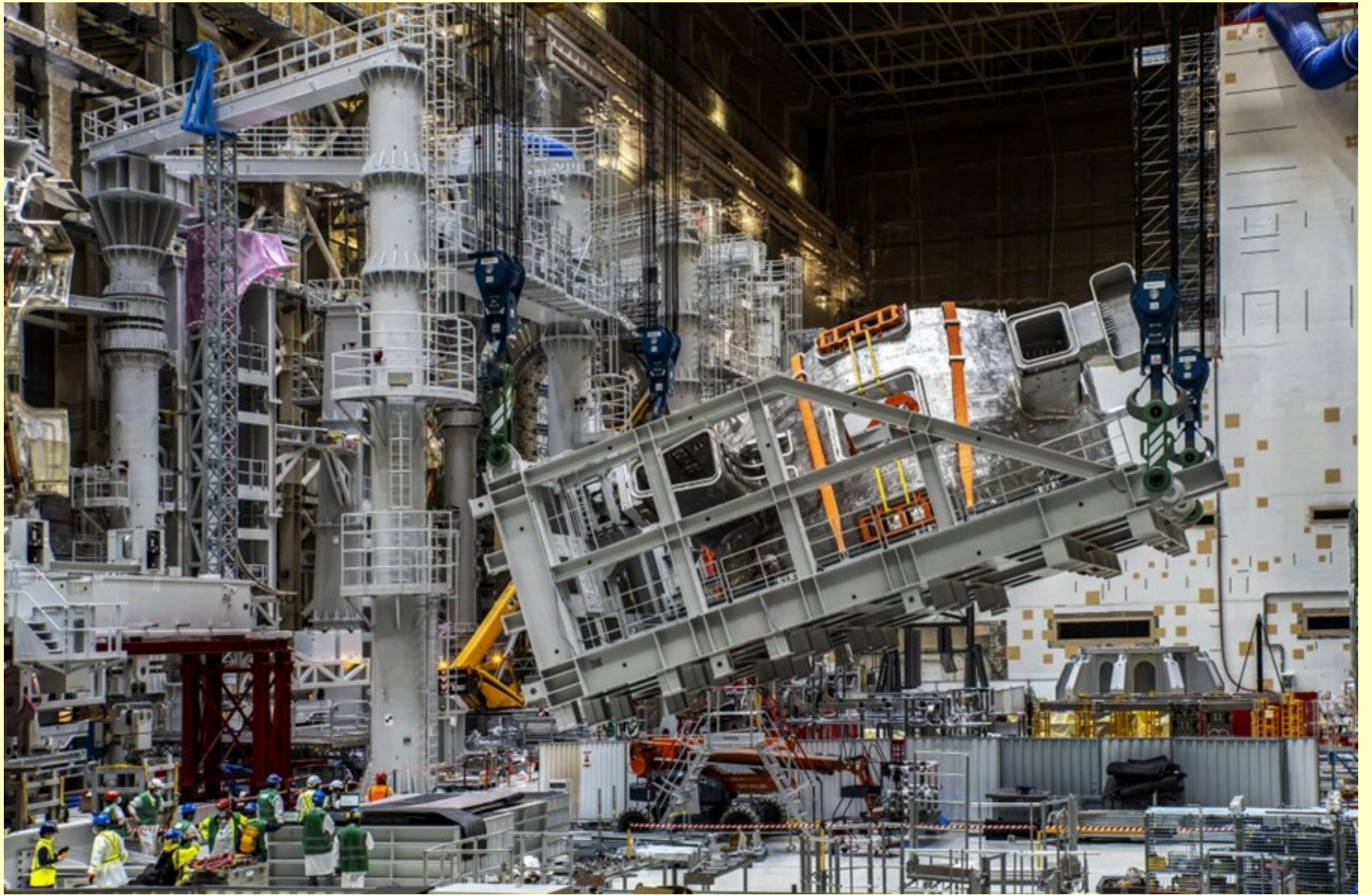












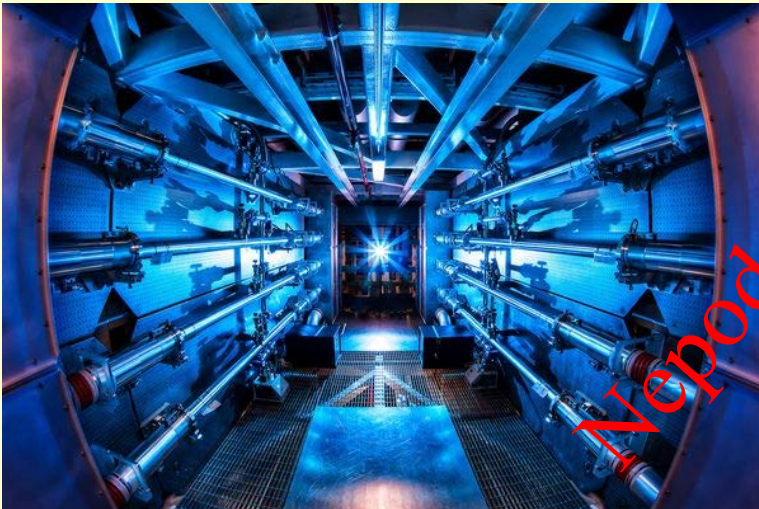
Inerciální udržení plazmatu (mikrovýbuchy)



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

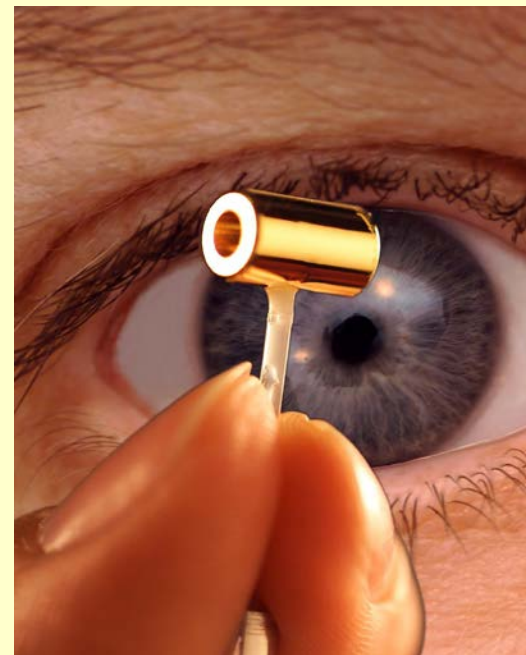
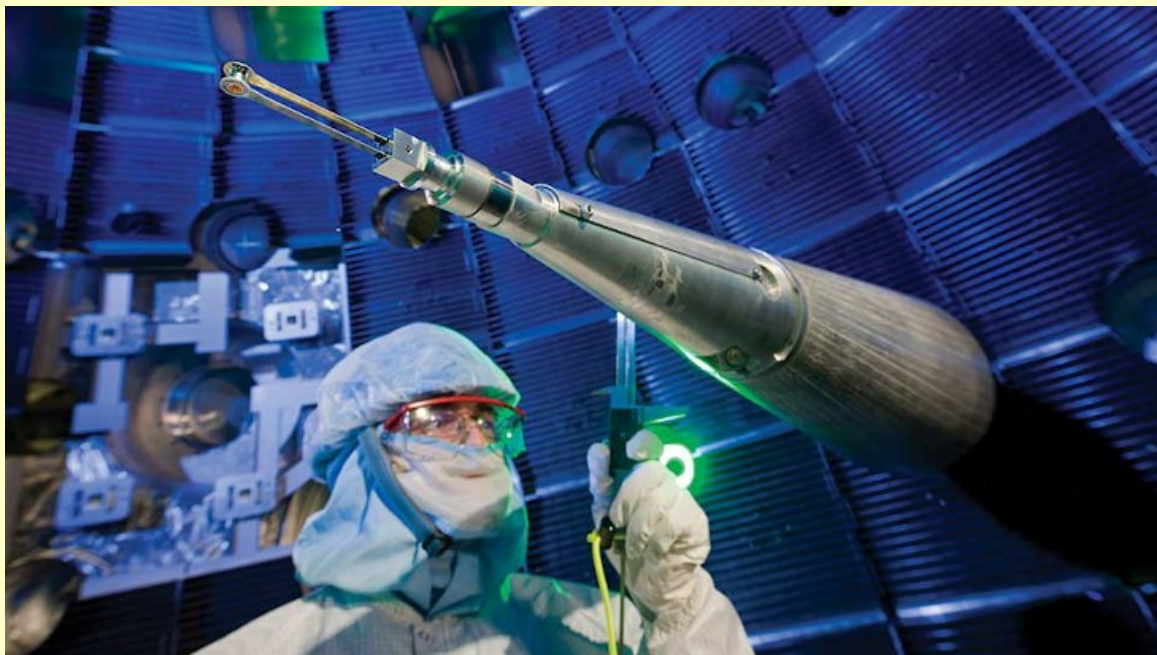
Zlom v inerciální fúzi

Zařízení NIF – testuje možnost inerciálního udržení fúzního plazmatu

8. srpna 2021 – výstřel produkující ve fúzi více energie, než šlo do ohřevu

Samotná energie laserového paprsku však byla 1,9 MJ, tedy vyšší, než bylo 1,3 MJ vyprodukovaných fúzními reakcemi. Ovšem jen pětina této energie se při výstřelu předává kuličce s palivem.

Klíčová otázka: Jde o náhodný úspěch nebo půjde o standard? Jak časté opakování?



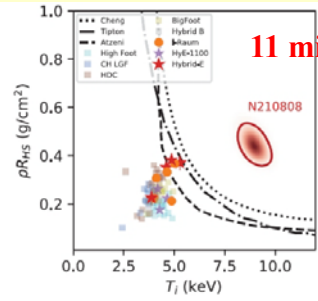
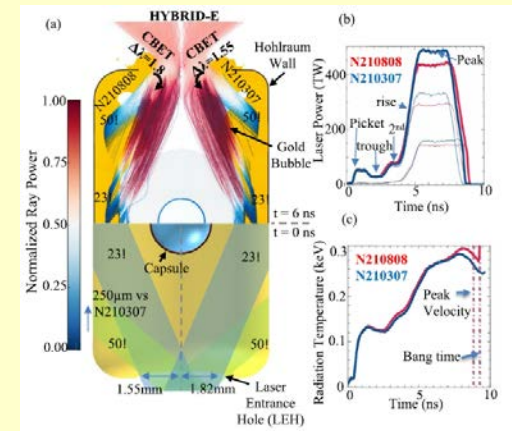
5. prosince 2022 dalšího rekordní výstřel. Ve fúzních reakcích energie 3,15 MJ
 Energie laserového ultrafialového svazku byla 2,05 MJ.

Konverze ultrafialového svazku na rentgenový (zlatý hohlraum) a ztráty energie
 jdoucí mimo 99 %

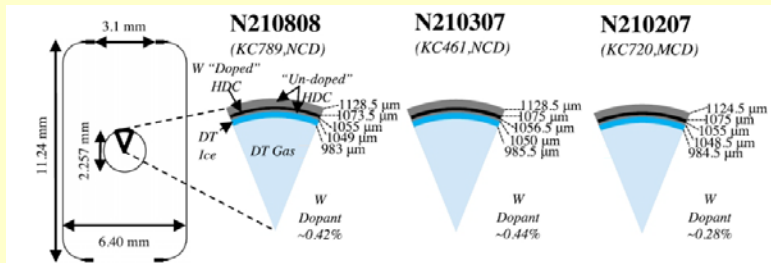
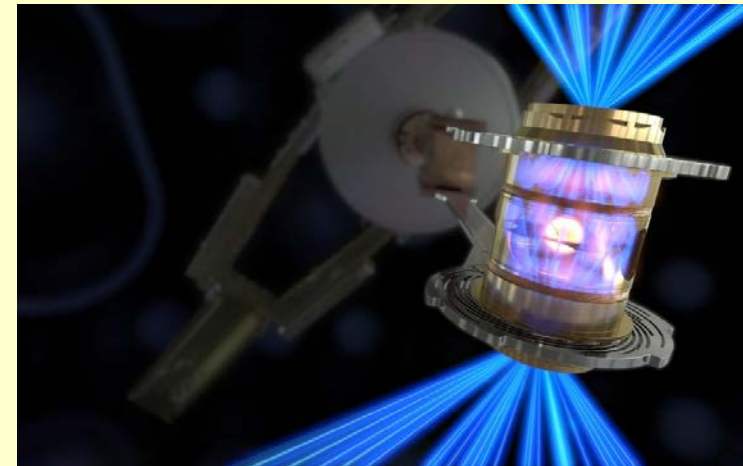
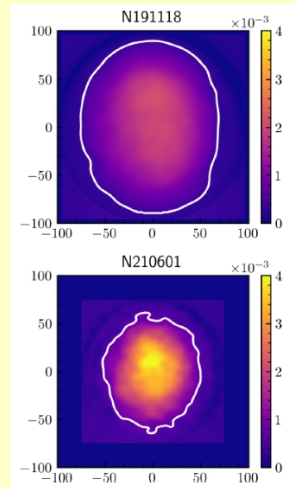
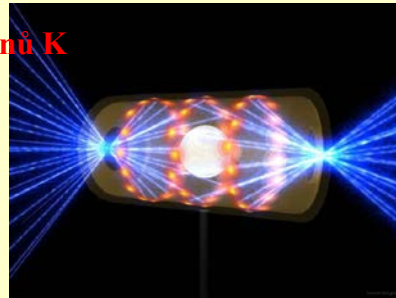
Nahromaděná energie potřebná k realizaci ultrafialového laserového svazku
 rozděleného na 192 s energií 2 MJ (0,5 PW) byla okolo 200 MJ.

Realizovalo se vědecké vyrovnání a zápalné vyrovnání,
 jsme však více než dva řády od inženýrského vyrovnání

Stabilní zlepšování parametrů – bohužel jeden výstřel za dny
 V případě mezihvězdného pohonu desítka výstřelů za sekundu

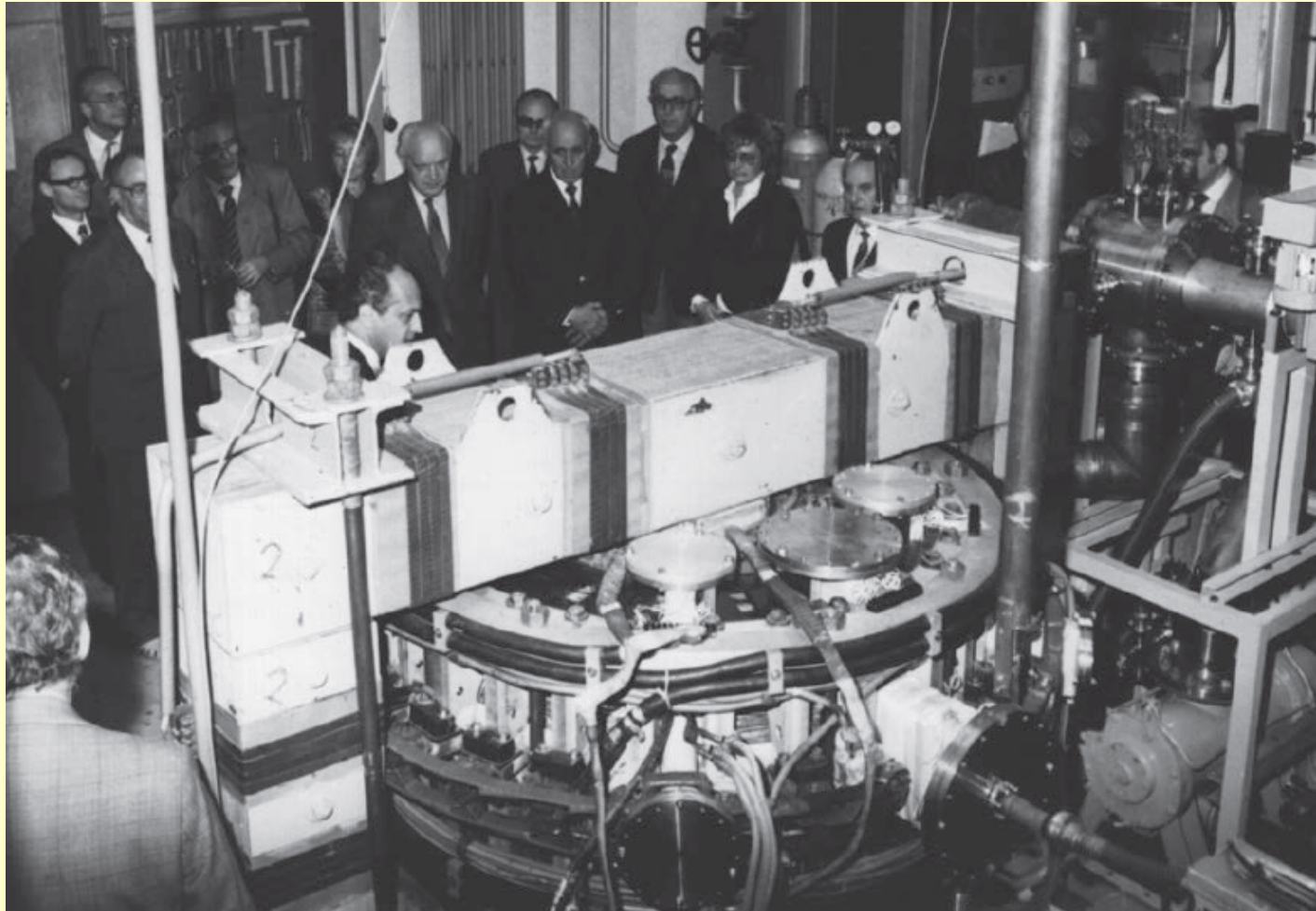


11 milionů K



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

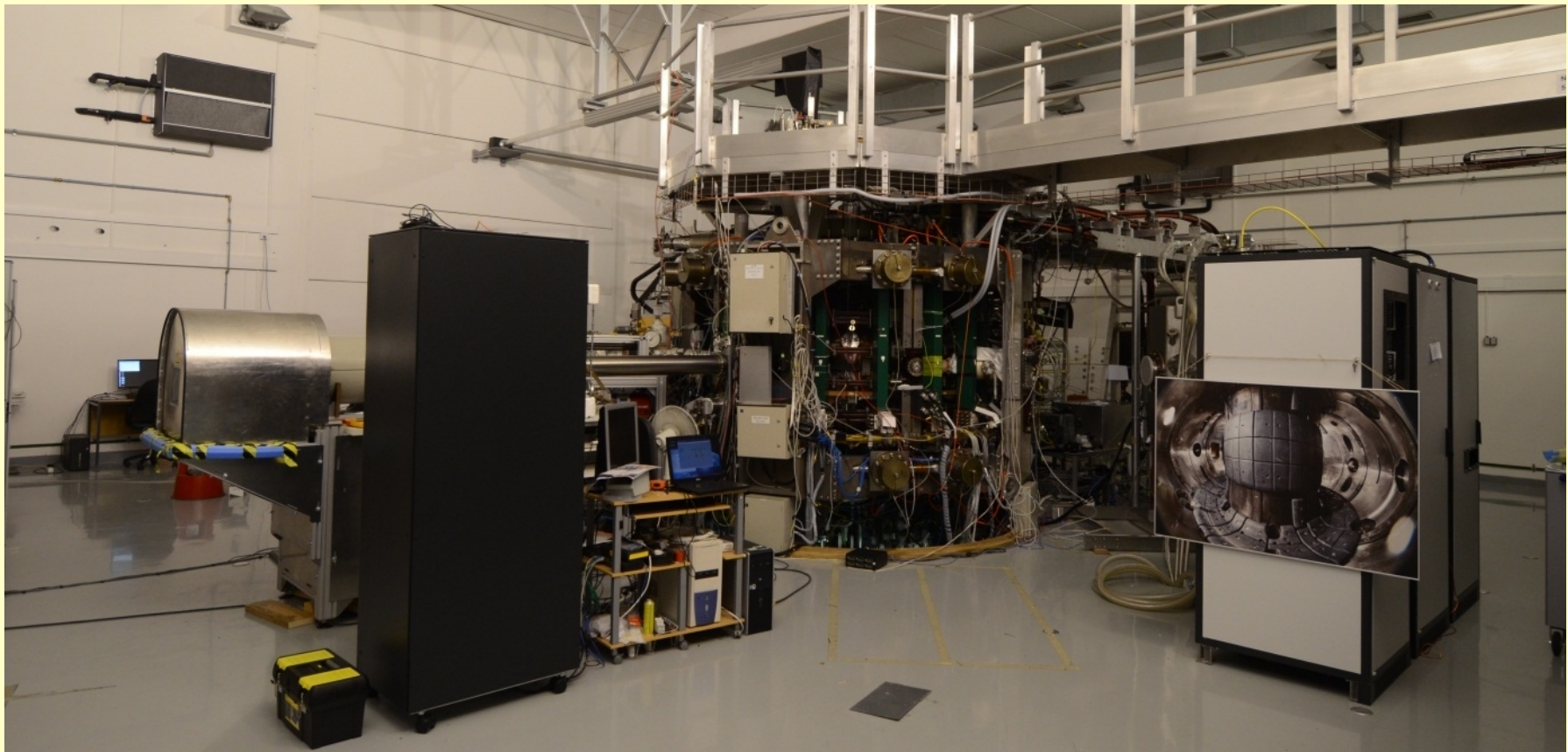
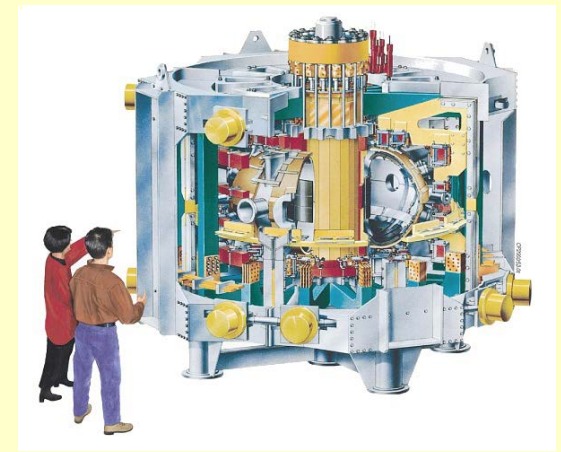
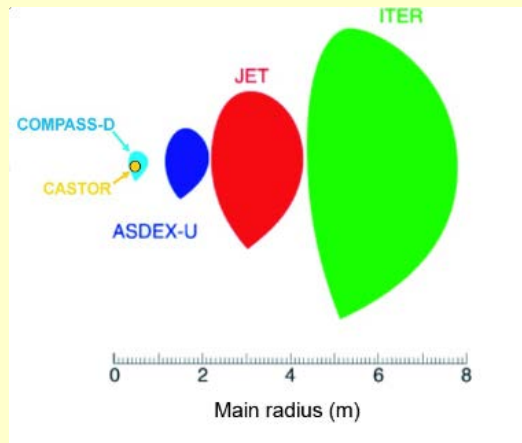


Spouštění tokamaku TM-1-MH po dovezení ze SSSR (nyní je jako tokamak GOLEM na FJFI)

Ústav fyziky plazmatu AV ČR

Tokamak COMPASS – stejný typ jako ITER, jen menší

Studium chování plazmatu – velmi důležité zkušenosti pro ITER

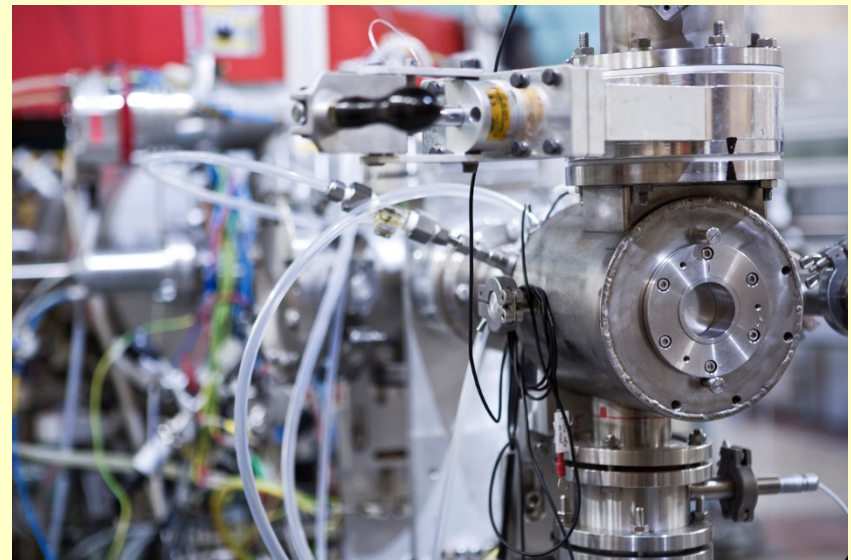
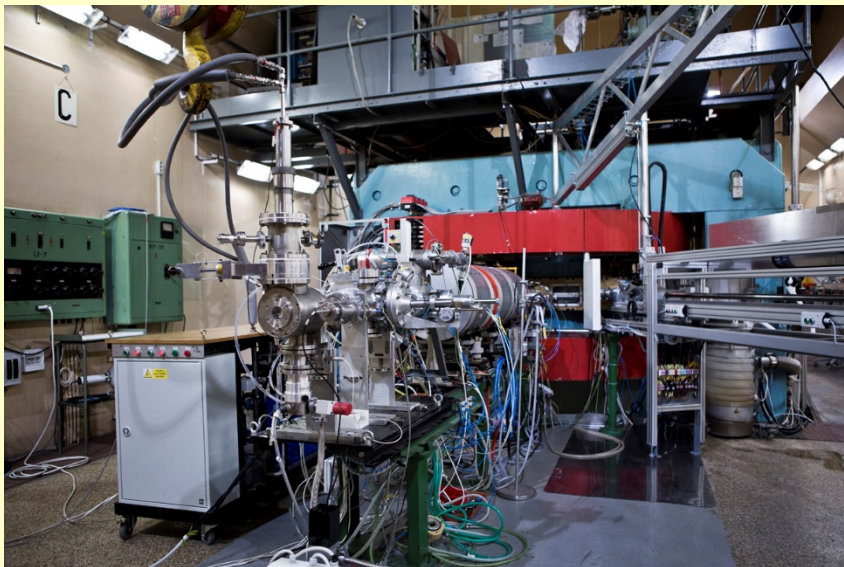
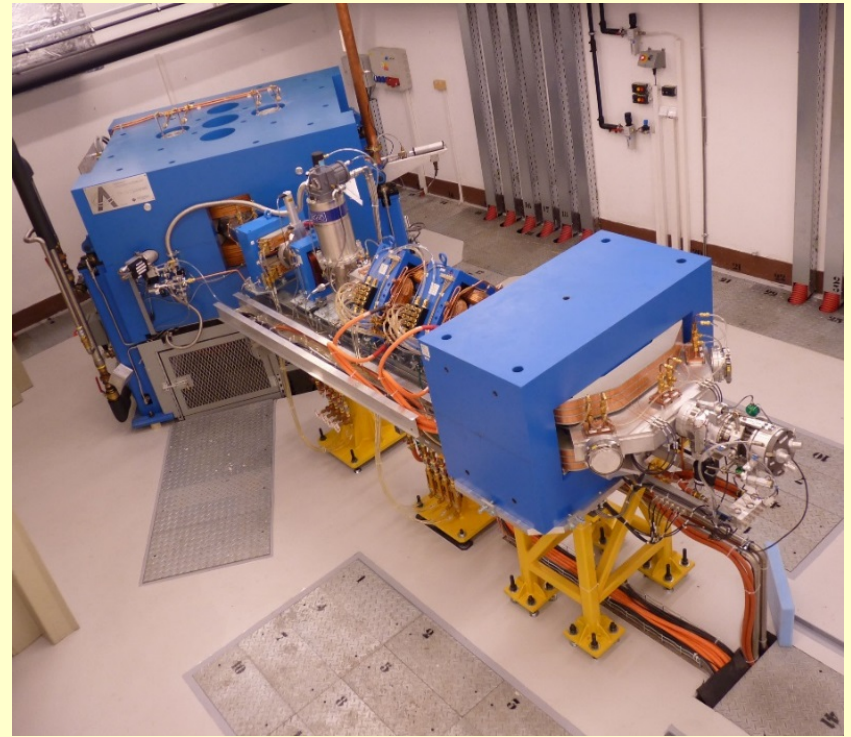


Ústav jaderné fyziky AV ČR

Synergie mezi fúzní a štěpnou energetikou:

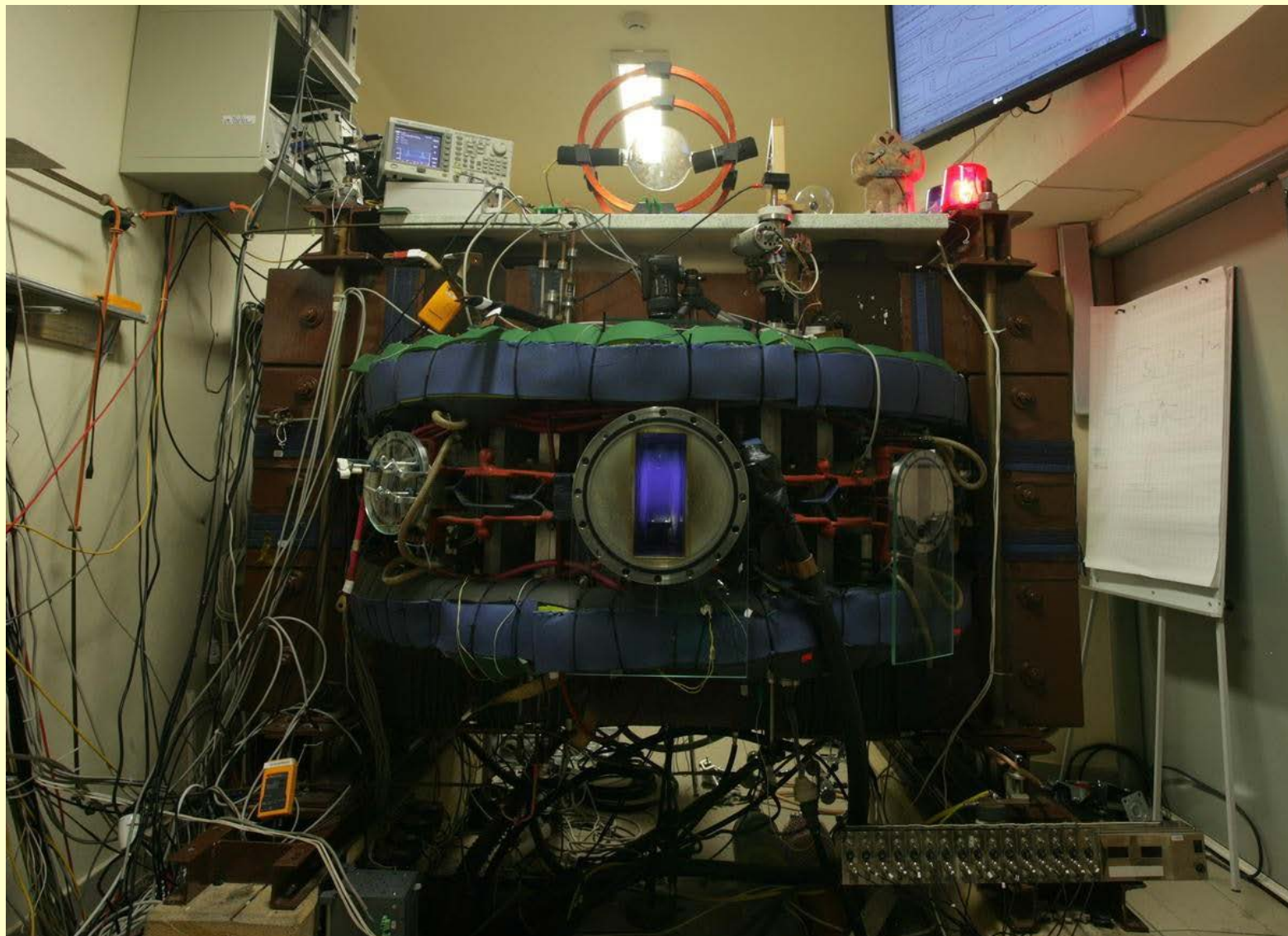
- 1) Intenzivní neutronové toky
- 2) Jaderné reakce (fúze – produkce tritia z lithia, vznik radioaktivních jader)
- 3) Velmi vysoké teploty
- 4) Vysoká radioaktivita během provozu

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

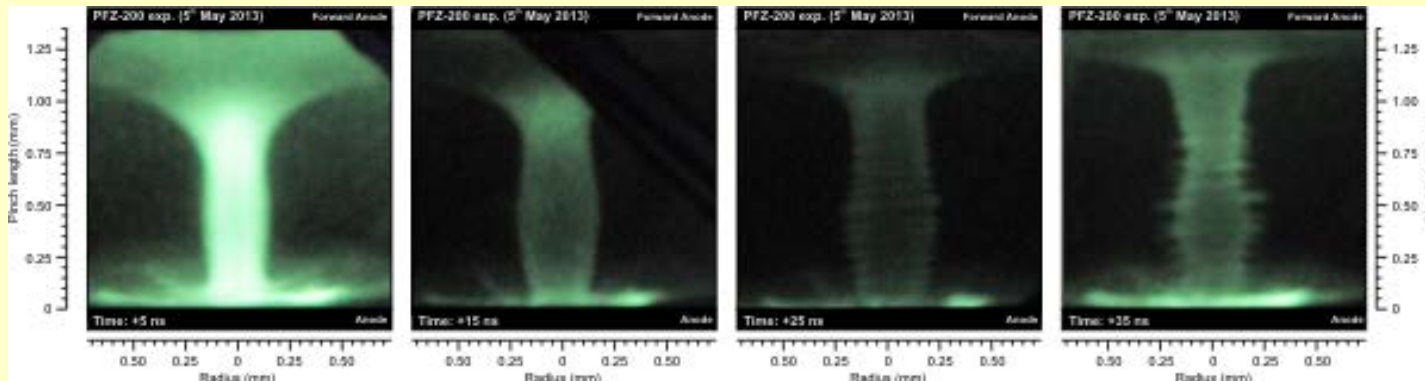
Spolupráce i se zahraničními zařízeními v Polsku a Rusku (nyní už ne) s daleko vyššími proudy a objemem plazmatu

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

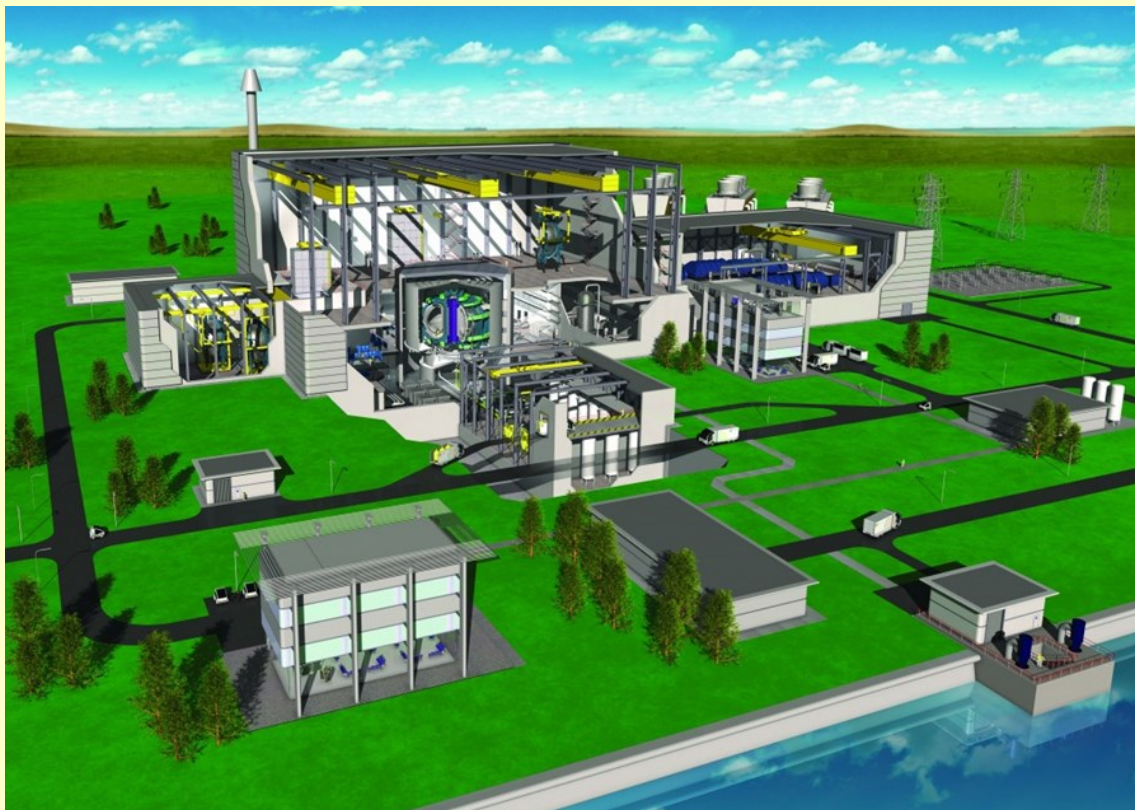
4 velké lasery, jeden PW

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

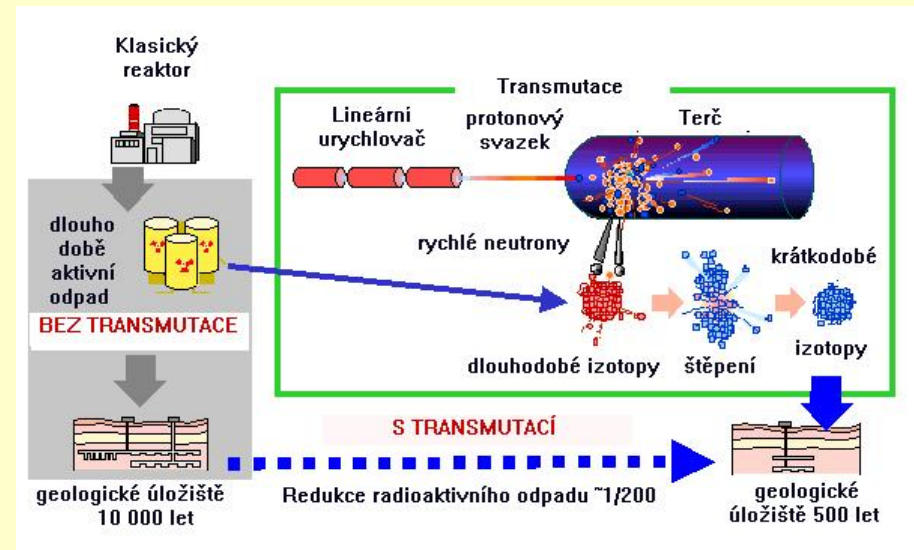
Nevýhody termojaderných elektráren:

- 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

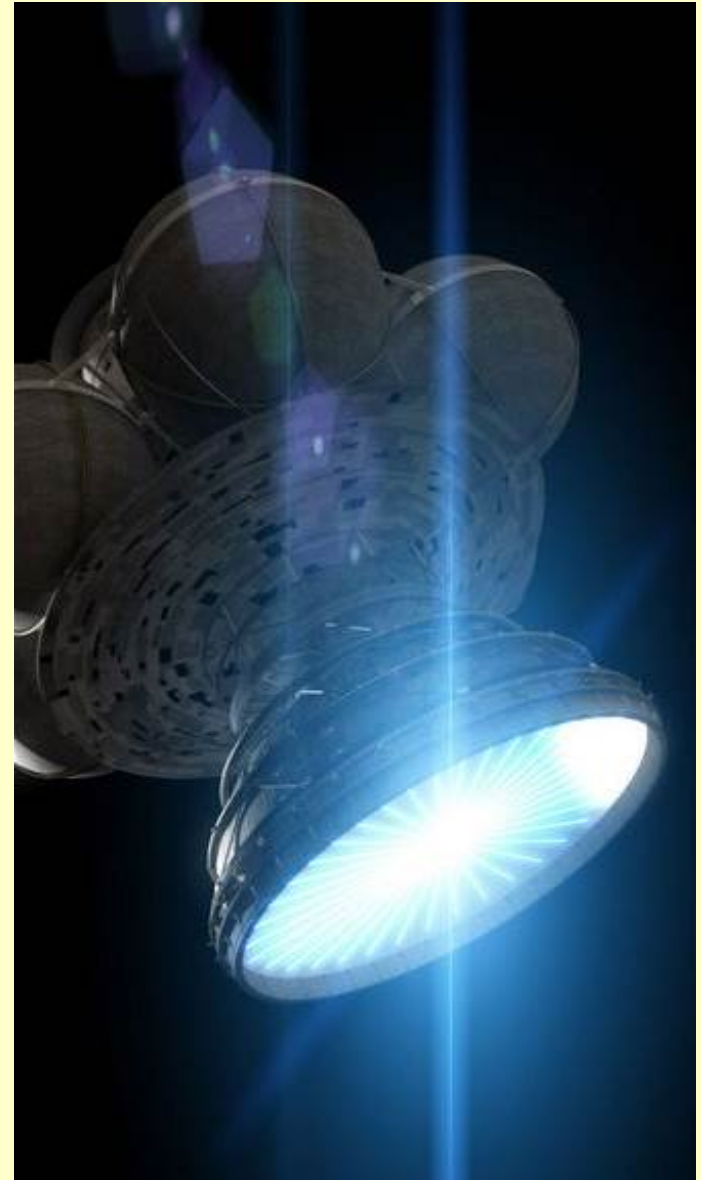
Synergie mezi fúzní a štěpnou energetikou

- 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

Fúzní pohon mezihvězdných lodí využije nejspíše inerciální fúzi



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

