

# **Bude Praha jedním z center výzkumu řízené termonukleární fúze?**

P. Kubeš  
katedra fyziky ČVUT FEL v Praze

# Úvahy

- 1) Úvod
- 2) Historie a současný stav
- 3) Perspektiva
- 4) Výzkum v ČR
- 5) Závěr

# 1. Úvod

Roční **výroba**  $15 \times 10^9$  kW, pro 6 miliard lidí průměr 2.5 kW,  
nerovnoměrnost (0,3-11 kW)

## Zdroje -

80%	fosilní paliva skleníkový jev, turbulence v atmosféře, $\text{CO}_2$ v atmosféře a oceánech)	negativní dopad na biosféru (těžba, doprava, omezené zásoby ~ desítky let
7%	hydroelektrárny	limitovaná kapacita
1%	alternativní zdroje zdroje, ..., nemohou hrát významnější roli, nízká hustota energie	sluneční energie, vítr, příliv, geotermální
12%	jaderná energetika množství, odpad)	zásoby 100-200 let, ekologická rizika (nadkritická

## Prognózy -

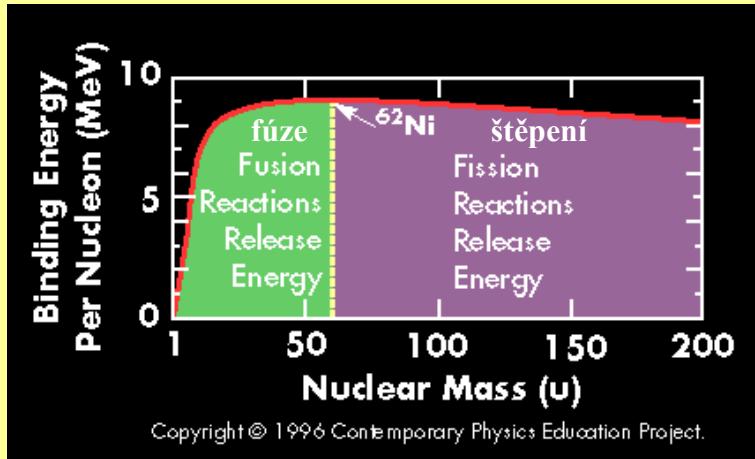
**2050** 10-12 miliard lidí, roční výroba ? 2x počtem lidí, 4x růstem životní úrovně +  
klimatické podmínky **10x**

rozumné hospodaření

Slunce, vítr, voda, Měsíc, ... pouze doplněk

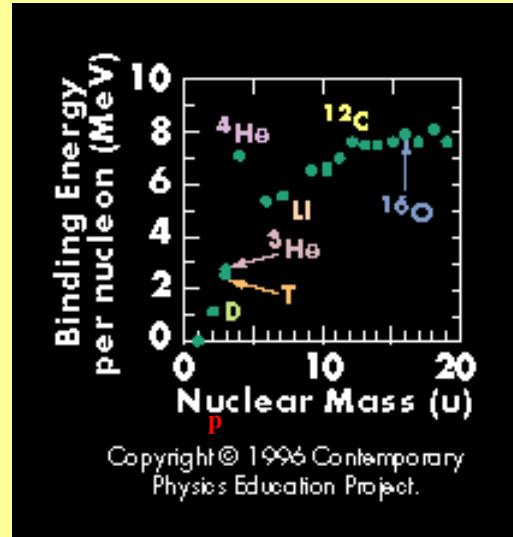
**jaderná energetika je jediná možnost do budoucna**

# Možnosti jaderné energetiky



vazebná energie na jeden nukleon  
v závislosti na hmotnostním čísle

možnosti uvolnění energie z jaderných reakcí: štěpení těžkých prvků na středně těžké  
slučování lehkých prvků na středně těžké  
energetický zisk podle Einsteinovy rovnice  $\Delta E = \Delta mc^2$ .



vazebná energie na jeden nukleon  
pro nejlehčí prvky

**Štěpné reaktory** – využití pouze 10-20 % paliva - dnes stagnace – nové myšlenky (IV generace)

- **štěpení podkritických množství** (externí neutronové zdroje, z-pinčové výboje)
- **štěpení thoria** (3x více než uranu, externí neutronové zdroje)
- **štěpení U238** (rychlé neutrny)
- **využití jaderného odpadu** – štěpení těžkých radioaktivních izotopů s dlouhým poločasem rozpadu MeV protonovými svazky
- **kombinace fusion – fission** - miniaturní vodíkové bomby

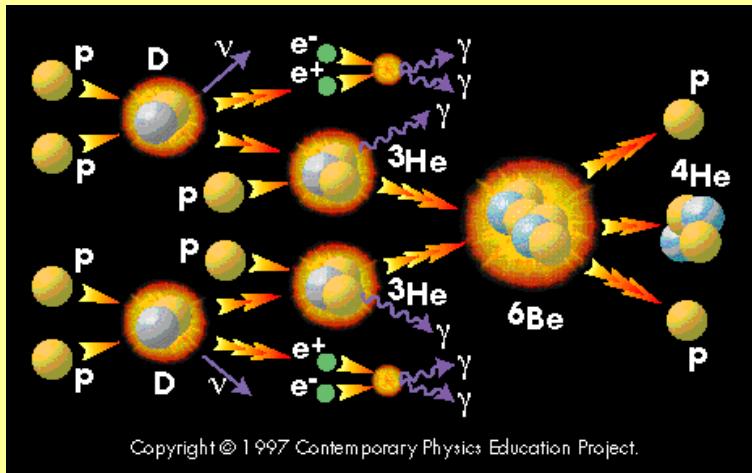
Omezené zásoby (100-200 let), malá účinnost (výroba energie přes tepelnou formu)

**Jediné možné východisko je jaderná fúze:**

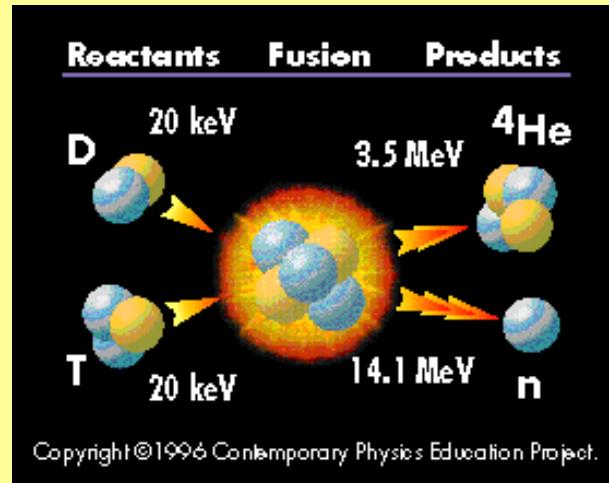
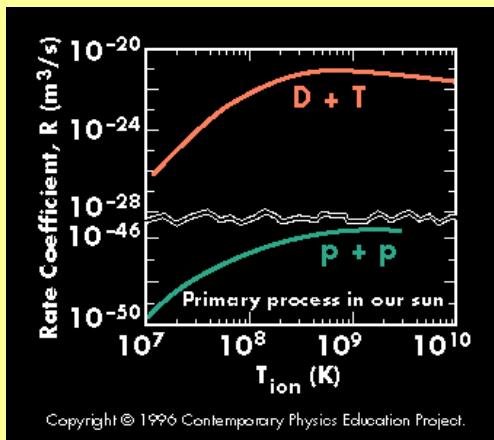
- přeměna deuteria a tritia na helium
- přirozený zdroj energie ve Vesmíru
- nevyčerpatelné zdroje pro miliardy let ( $H/D=6700$ ), ve vodě  $10^{31}$  J
- přímá konverze energie do elektromagnetické formy
- sen

# Termonukleární fúze - princip

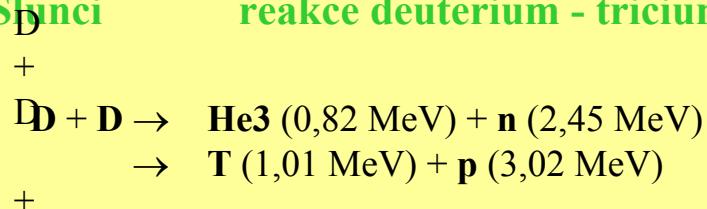
Reakce probíhá při teplotách  $10^8$  K, v jádřech hvězd a ve vodíkové pumě



proton-protonová reakce ve Slunci



reakce deuterium - tricium



reakce deuterium – deuterium

65 % energie v iontech

účinné průřezy jaderných reakcí

## 2. Historie a současný stav

**50tá léta** – nadějné počátky – z-pinč, plazmový fokus, Arcimovič v Kurčatově institutu v Moskvě a Anderson v Los Alamos – **velký neutronový zisk - netermální původ, nestability a rozpad** – nárůst maximálního proudu  $\sim \text{MA}$  po dobu  $\sim \mu\text{s}$

**60tá léta** –

**tokamaky** – transformátor s Joulovým ohřevem – řídké plazma, pomalé nestability, možnost zpětné vazby a omezování – Rusko, Velká Britanie, Japonsko, Německo, (USA až v 70tých letech). Rozpuštění nestabilit.

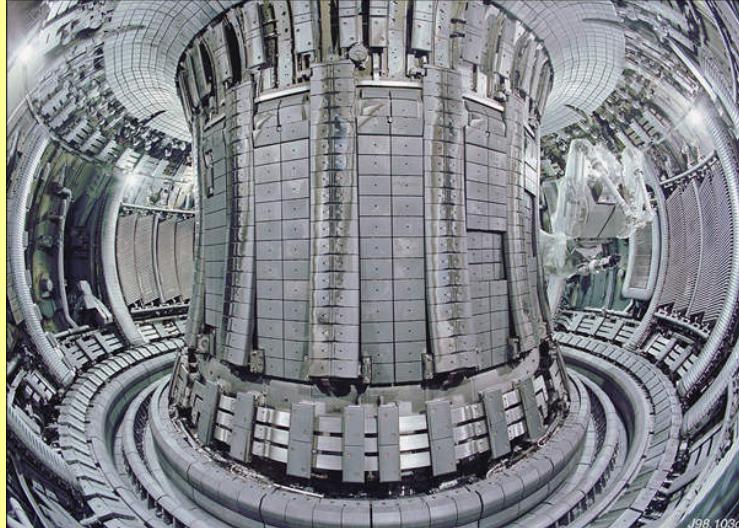
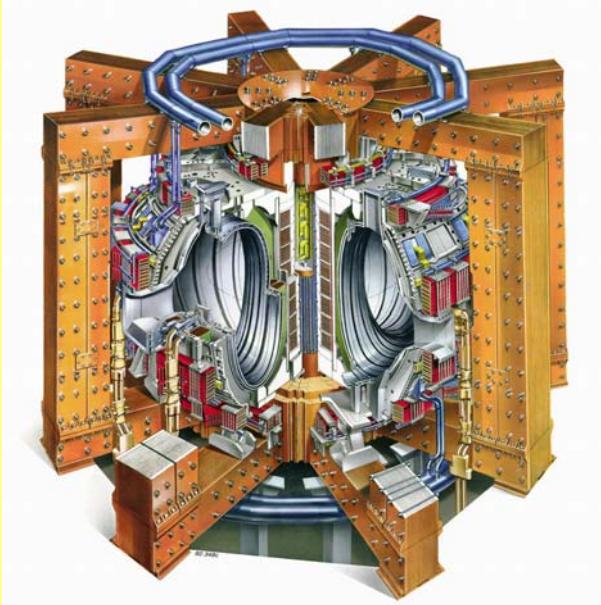
Dodatečný ohřev – elmg. vlny a svazky částic

**laserové systémy** – intenzivní záření je fokusováno do malého terče – velmi husté plazma, inerciální udržení - USA, Japonsko, UK, Francie  
podmínka symetrie svazku, symetrie peletu

**90tá léta** –

**magnetické pinče** – rychlé zahřátí plazmatu sevřením magnetickým polem vlastního proudu  
USA, Rusko

# Tokamak JET (Joint European Torus), Cullham, UK



Plasma major radius

**2.96m**

Plasma minor radius:

**2.10m (verti) 1.25m (horiz)**

Flat-top pulse length

**20s**

Toroidal Field Coil Power

**380MW**

Toroidal magnetic field (on plasma axis) **3.45T**

Plasma current: **3.2MA (Circular plasma) 4.8MA (D-Shape plasma)**

Additional heating power **25MW**

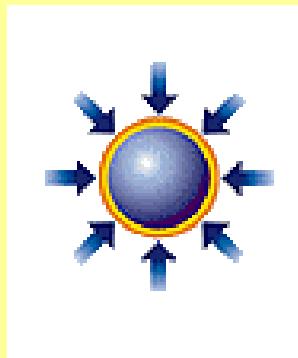
**magnetické udržení** - řídké plazma (sekundy) – tokamaky, stelarátory, helikální systémy

a) ***tokamaky*** JET, TFTR – tritiové experimenty, 6% T ( $Q \sim 0.2-1$ ), beryliové obložení.  
**dnes nejprobádanější směr**, dominantní v EU, Japonsko  
**výhody** – řídké plazma, možnost ovládat nestability zpětnou vazbou  
**problémy** – velké rozměry, supravodivé cívky, neutrony, příměsi, T, svazkování, turbulence,  
parametry plazmatu nejblíže fúznímu limitu, H a L mód  
výroba tritia z lithia ve štěpném reaktoru,  
Zajímavý postoj USA - po roku 2000 zrušení programu, zaměření na menší systémy, v současnosti externí spolupráce s EU,

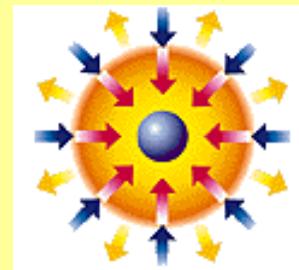
b) ***stelarátory*** Large Helikal System Japonsko  
W 7 Německo

**Udržení plazmatu – inerciální – husté plazma (subnanosekundy) –**

## **Inerciální fúze - princip**

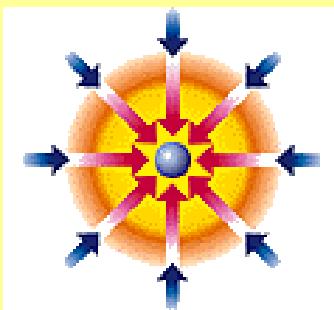


- Laser energy
- Blowoff
- Inward transported thermal energy



**1. Atmosphere formation:** Laser beams rapidly heat the surface of the fusion target forming a surrounding plasma envelope.

**2. Compression:** Fuel is compressed by the rocket-like blowoff of the hot surface material



**3. Ignition:** During the final part of the laser pulse, the fuel core reaches 20 times the density of lead and ignites at  $10^8$  degrees Celsius



**4. Burn:** Thermonuclear burn spreads rapidly through the compressed fuel, yielding many times the input energy

b) fokusace silných **laserových svazků** na kulový terč – pelet –  $1 \text{ mm}^3$ ,

výhody - malé rozměry komory, husté plazma v pevné fázi, krátké impulsy ns, ps, fs,

vysoké výkony TW, PW

problémy – malá účinnost laserů 0,1 %, asymetrie terče a záření, únik energie do turbulence,  
přezechřátí jádra velmi horkými elektronami; USA, Francie, UK, Anglie

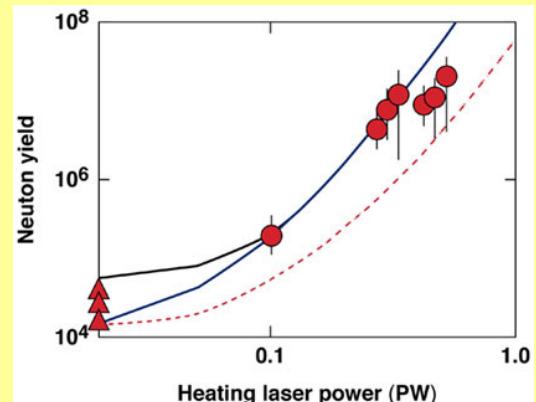
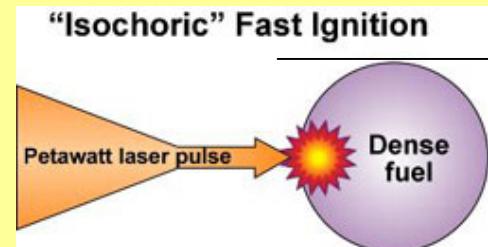
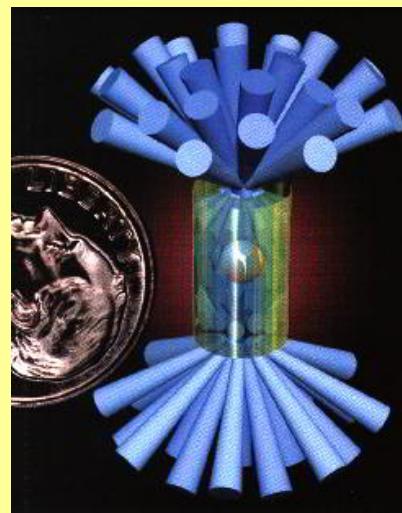
fast ignition

přímý ohřev

OMEGA – Univ. Rochester, 1x hod,  
terawatty, rekonstrukce, 60 svazků



nepřímý ohřev

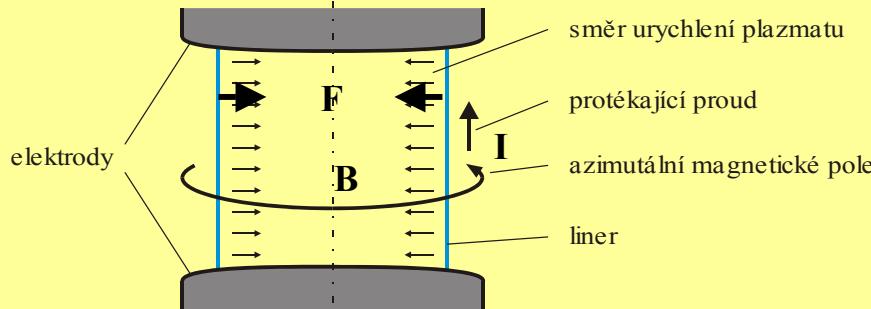


laserové záření viditelné, rtg záření magnetických pinčů,  
lehké nebo těžké ionty

# Udržení plazmatu

*kombinované* – husté plazma magnetických pinčů, desítky ns

*magnetické pinče* kombinace magnetického a setrvačného uvěznění



fáze pinče



horké tečky



rozvoj nestabilit

teplota:

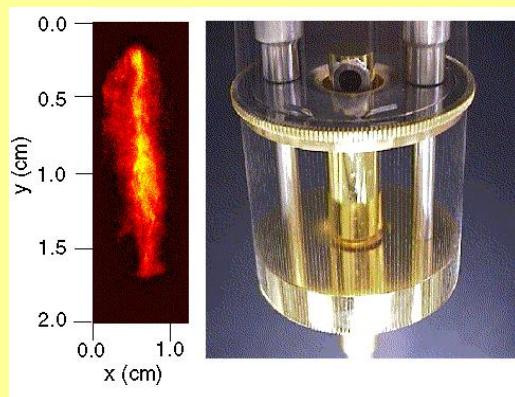
$10^6 \text{ K}$

$10^7 \text{ K}$

$10^5 \text{ K}$

generace neutronů  
z D-D reakce

## dvojný liner



2 možnosti:

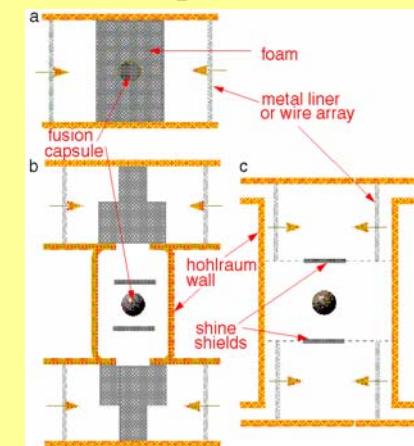
deuterium v zátěži

využití x-záření pro

nepřímý ohřev



## uspořádání



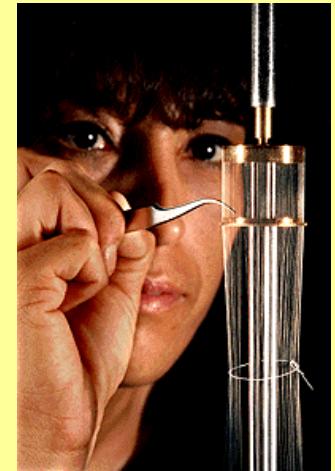
## Z – SNL Albuquerque USA



**32 modulů**



**fotografie vývoje**



**konstrukce lineru**

Nárůst proudu 18 MA za 100 ns  
15% účinnost generace rtg  
výkony 300 TW v rtg

**výhody** – ekonomické, fyzikální (nejlevnější a nejjednodušší zdroj neutronů) – využití samoorganizačních schopností přírody

**problémy** – nestability, destrukce elektrodového systému, spínání silných proudů 10ky MA

S-300, Angara 5 (Moskva), PF 1000 (Varšava), Indie, Čína

### **3. Perspektiva**

#### **Strategie USA na příštích 20 let –**

základní výzkum všech koncepcí:

tokamak ITER; ignition po 2020

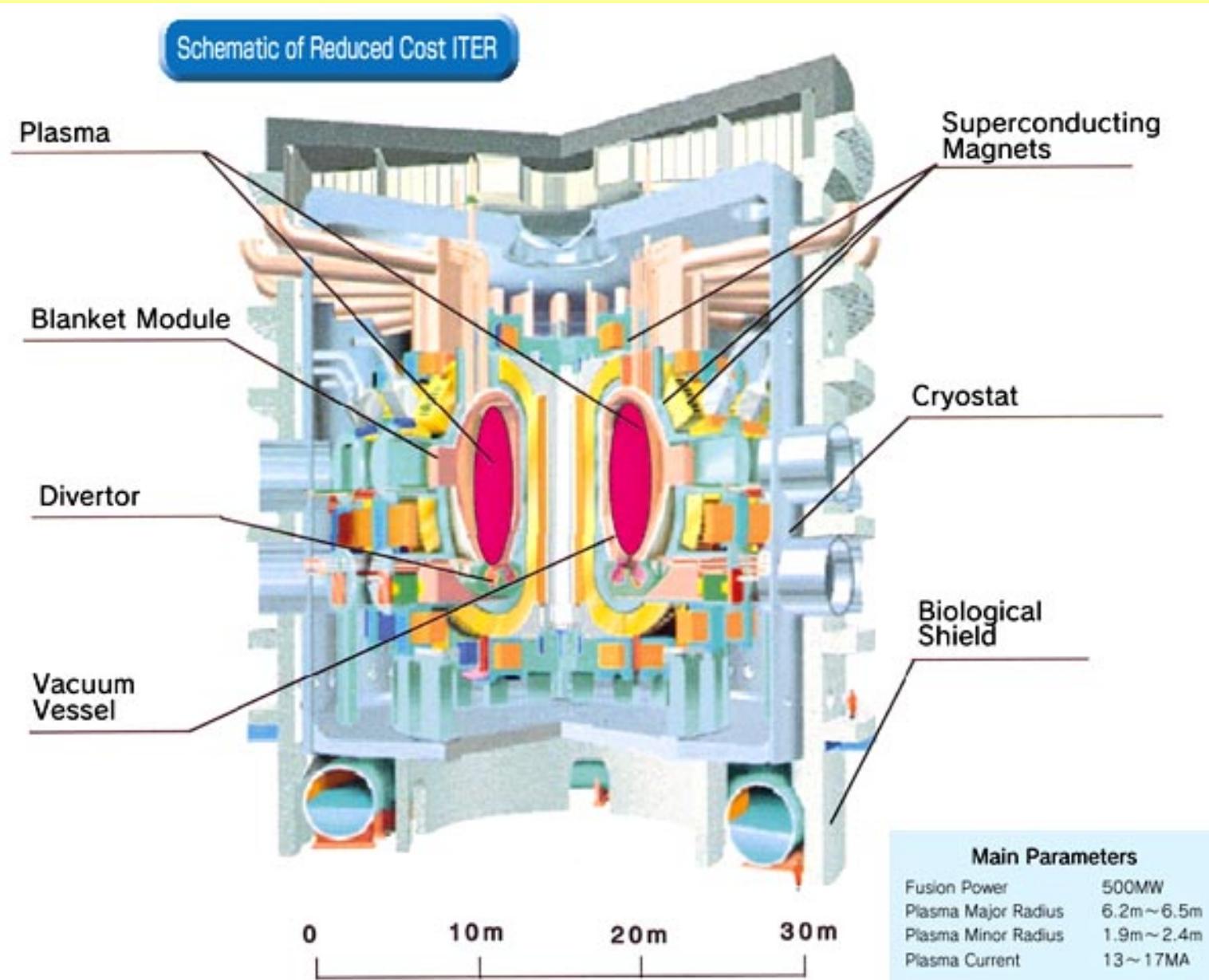
inerciální fúze laserová NIF, LMJ, Omega, Japonsko; ignition 2010

Z-pinče - RZ aparatura, X, Bajkal; ignition 2015

## Tokamaky – *ITER*

- nový projekt 2006, 5 miliard EUR – zahájení stavby v Cadarach - Jižní Francii (EU, Japonsko, Kanada, USA, Rusko, Čína,...),  
nestability, zahřívání stěn, podmínky udržení - H mód, vliv E(r), fúze po roce 2020, zahřívání α částicemi.  
Proud 21 MA, příkon 0.1 GW, ve fúzní reakci 1.5 GW (1.2 GW v neutronech)  
středně velké aparatury – EU 5
- nová zařízení stelarátorů v Německu (W7), Japonsku (LHD), Číně (EAST),  
v USA – menší projekty - sférický tokamak, bootstrapový proud .

# ITER - schema



## Inerciální fúze – NIF

b) (*National Ignition Facility, LLNL*) – zdroj 100 MJ, záření, 192 svazků (0.35 μm) 1.8 MJ, zisk 20 MJ (10 keV, 100g/cm<sup>3</sup>, 10<sup>19</sup> neutronů), zapálení 2010,  
fs lasery, samofokusace



interakční komora

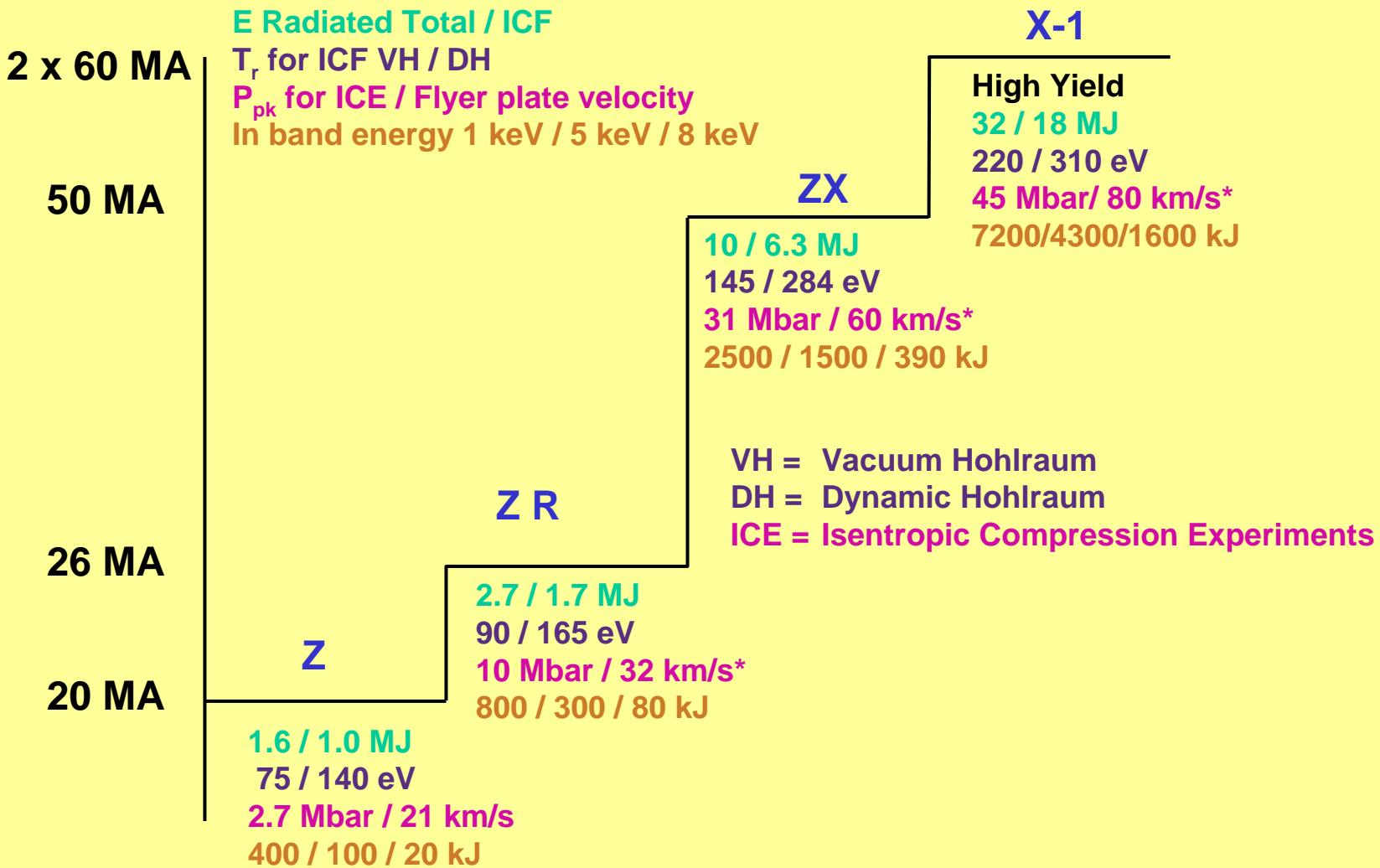


vnitřek komory



řídící centrum

# Pinče - perspektivy



**X-1** porovnání s NIF - cena 10x nižší (1.6 miliardy \$], energie v záření o řád výše, doba pulsu o řád delší (stejný výkon)

**Bajkal** – 60 MA zdroj v Rusku (Trojsk), vývoj spínání silných proudů

## 4. Výzkum v ČR

### Ústav fyziky plazmatu AV ČR

a) **Tokamak Castor** – původní ruská T 1,

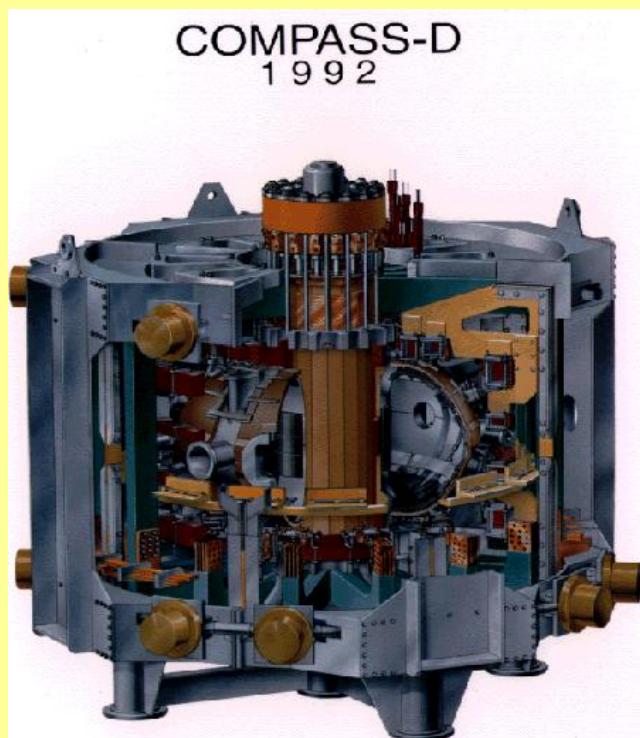
1 10 kA, vf ohřev, mikrovlný gril,

popis vlastností okrajového plazmatu a turbulence.

b) **Tokamak Compas** – původní zařízení v Culhamu (UK), podobné jako ITER (10x menší), 1 MA, 2 T, ohřev iontovými svazky, studium D-D reakce

zahájení 2006 – 150 mil Kč, zahájení demontáže v říjnu, provoz 2009

výhoda malých zařízení, jednodušší provoz, možnost 10-20 výstřelů denně, testování modelů, diagnostiky



#### Technical Specification

##### Vacuum Vessel

Major radius ( $R$ ) 0.557 m

##### Toroidal Field

Maximum toroidal field on axis 2.1 T

Rise time approx 1 s

Flat top duration at max field 1 s

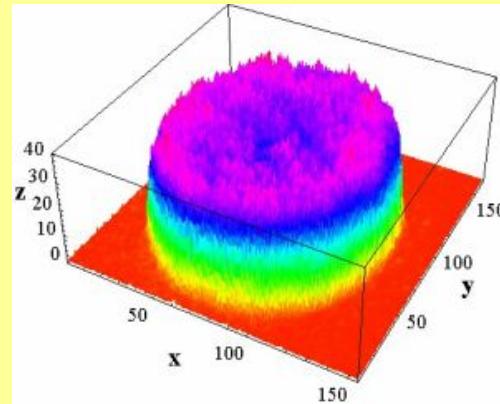
##### Magnetising Field System

Plasma current < 400 kA

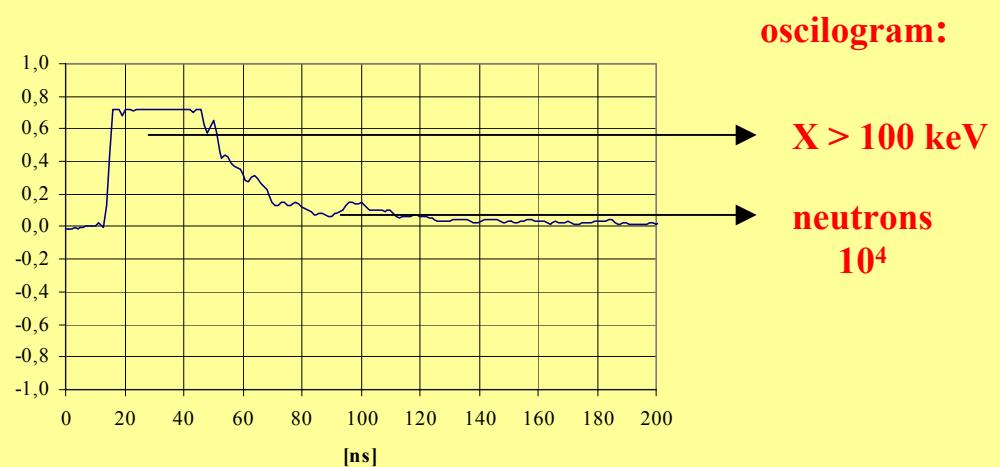
Plasma duration (without current drive)  
(with RF current drive) approx 600 ms  
approx 2 s

## •Ústav fyziky plazmatu a Fyzikální ústav AV ČR

- **PALS** – jodový lasery, Asterix IQO MPI v Garchingu, cena 1 DM,
- výstavba nové haly v Praze v ÚFP, provoz v r. 2000,
- Energie 1 kJ, doba pulsu  $\sim 100$ ky ns, středně velký laser unikátní zařízení EU,homogenní svazek
- exotická možnost fs pulzů s výkonem  $\sim 10^{17}$  W,
- program výzkumu rentgenových laserů,



experiment FEL ČVUT 6.2.2006  
 $(CD_2)_n$  fibre  
 $\Phi 100 \mu m$ , 7 mm length  
shot 29929

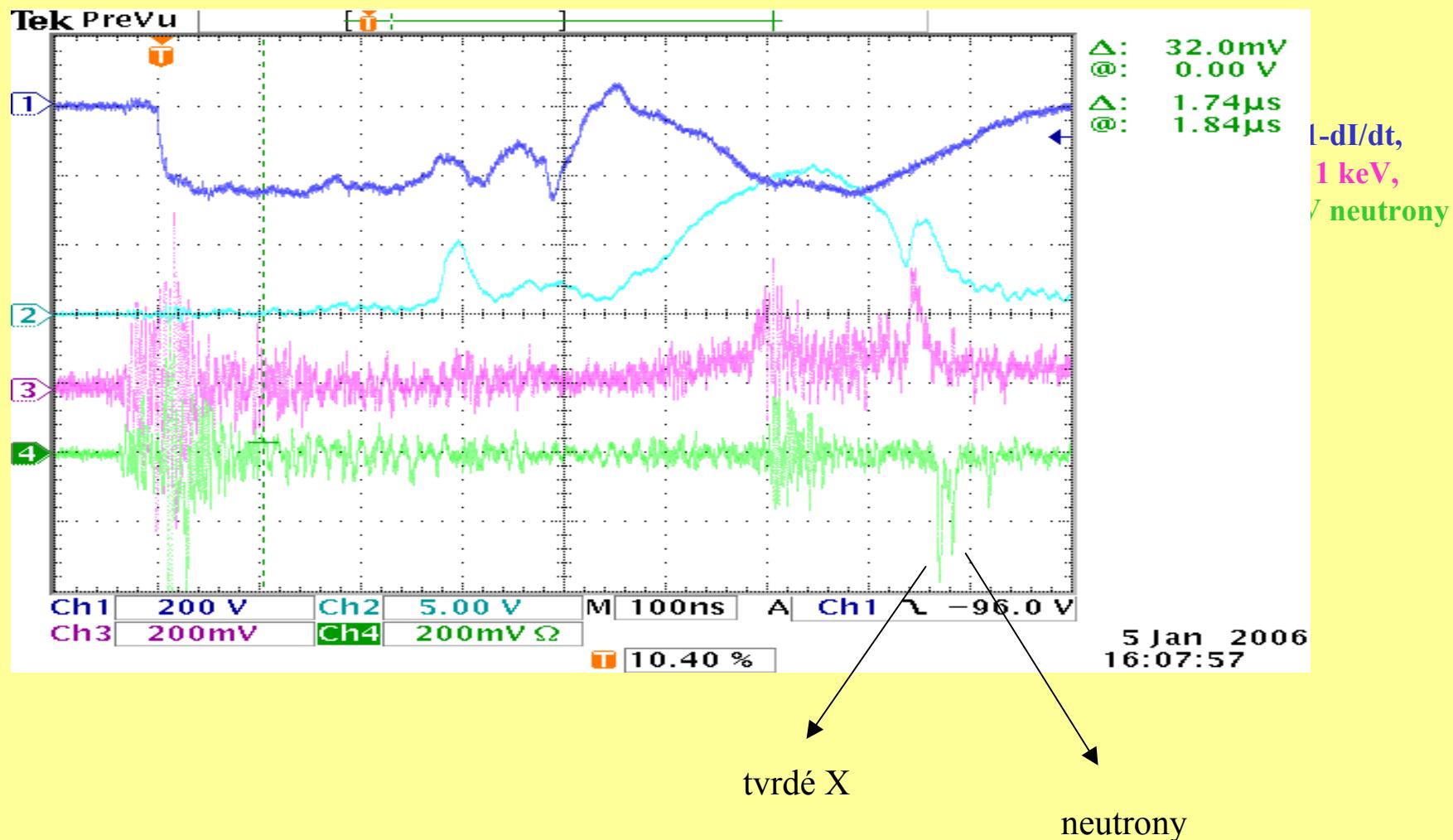


## **Magnetické pinče ÚFP AV ČR, FEL ČVUT katedra fyziky,**

- detekce projevů D-D reakce – tvrdé rentgenové záření, relativistické elektrony a neutrony
- u pinčů lze nejsnáze hledat zdroj záření v korelaci s obrázky ve viditelné nebo rentgenové oblasti (dostatečně pomalé a dostatečně husté)

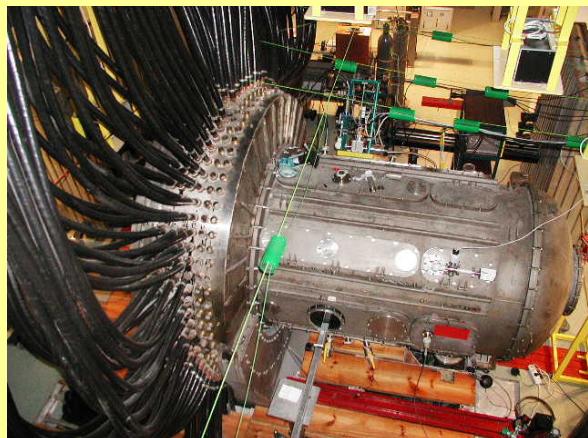
- zařízení *Z-150 FEL ČVUT*
- *PF-1000 Varšava*
- *S-300, PF 3 RRC Kurčatovův Institut Moskva*
-

**Z-150, 100 kA**  
**(CD<sub>2</sub>)<sub>n</sub> fibre Φ 100 μm, 7 mm length**

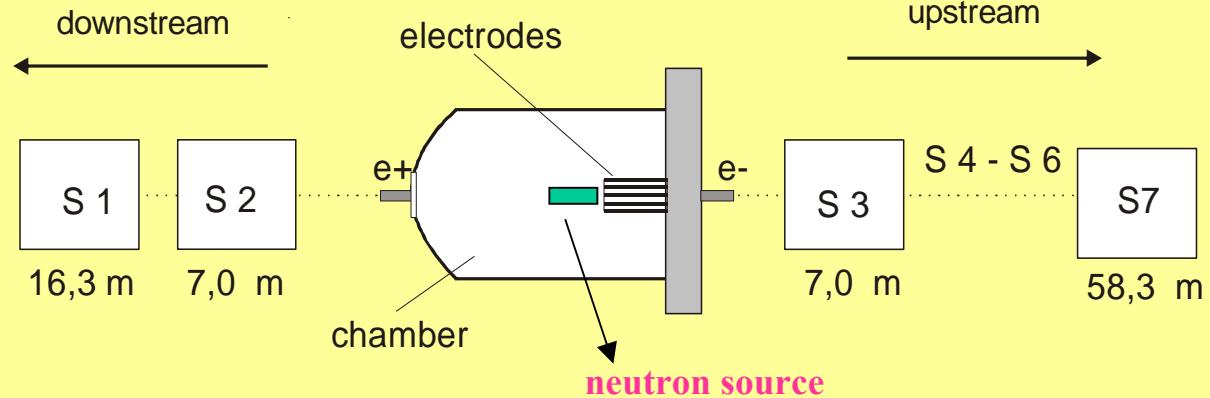
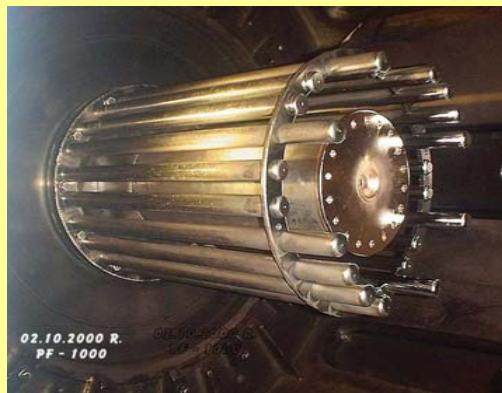
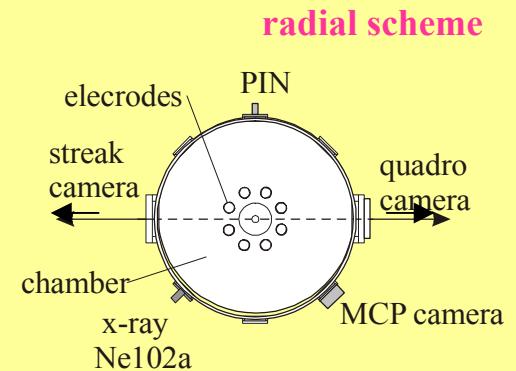


# PF-1000 IPPLM Warsaw - scheme of diagnostics

## radiation, relativistic electrons, neutrons



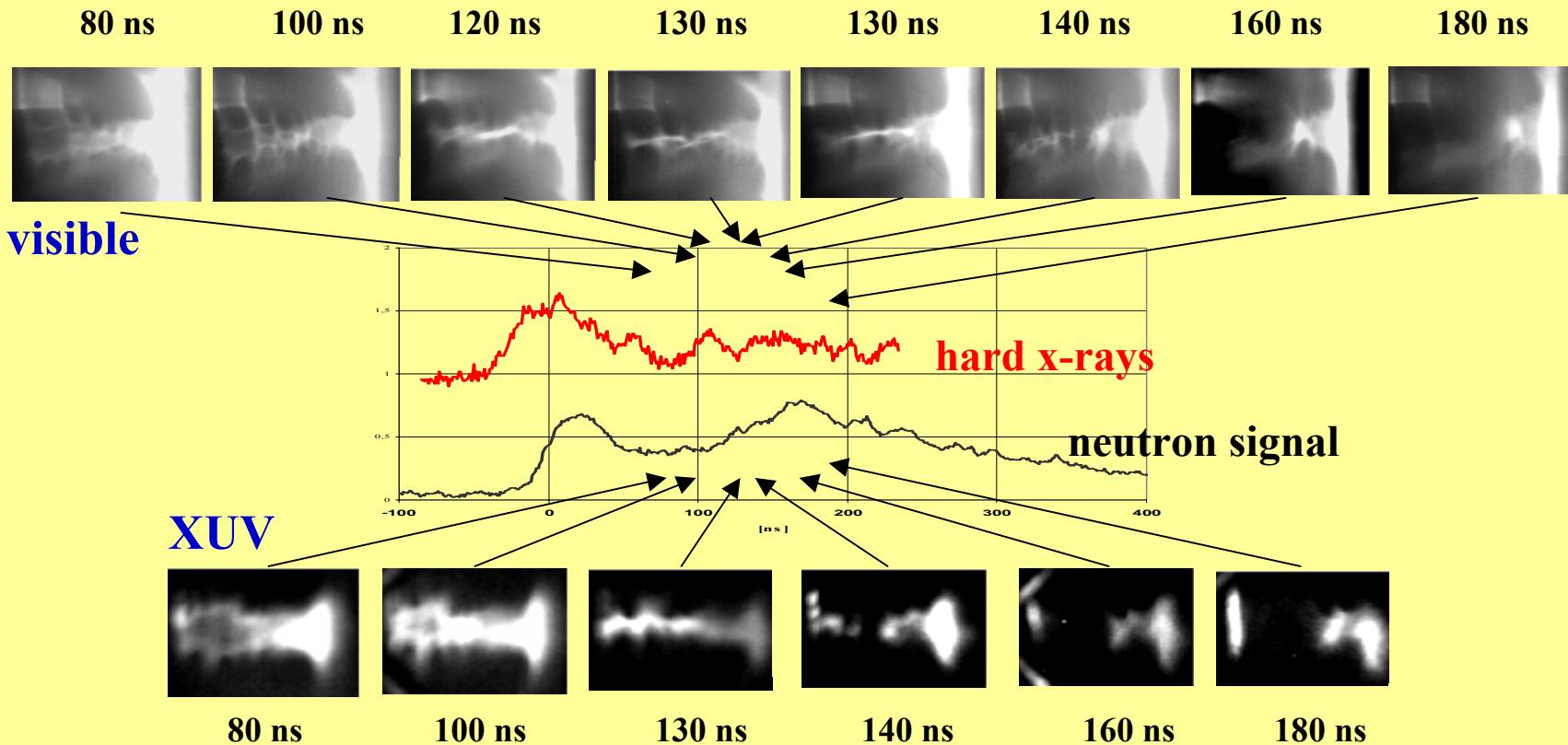
- volume  $\sim 3.8 \text{ m}^3$
- $\varnothing = 1.4 \text{ m}$
- $L = 2.5 \text{ m}$
- energy 300-400 J



**7 hard x-ray and neutron scintillation detectors  
anisotropy in axial direction**

# PF-1000, D current sheath, correlation of neutrons with X-rays [5]

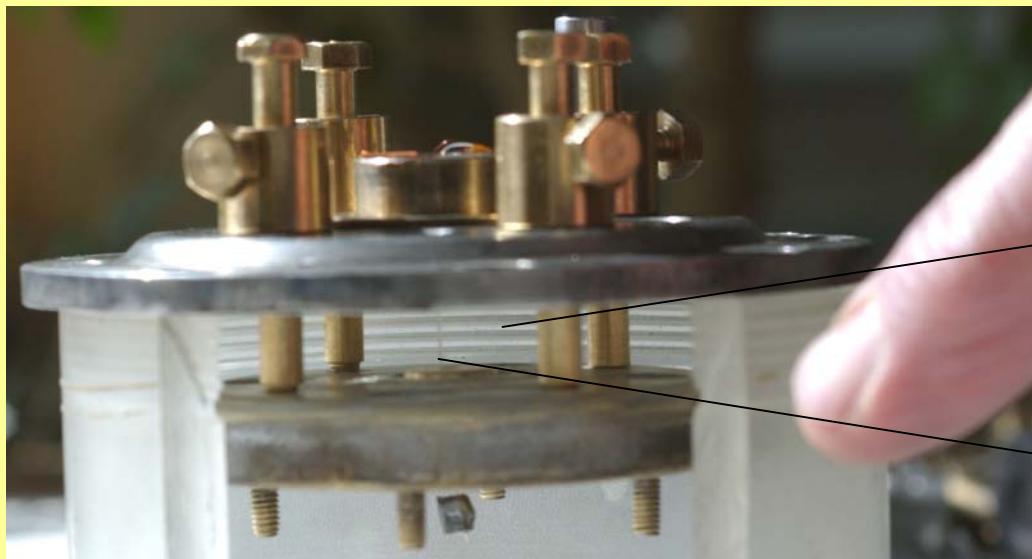
## Correlation neutrons with frames and laser images second neutron pulse



onset of neutron pulse – instabilities, beam-target +  
decrease of neutron pulse – dense structure, isotropic distribution +,-

**Russian Research Center, Kurchatow Institute Moscow**

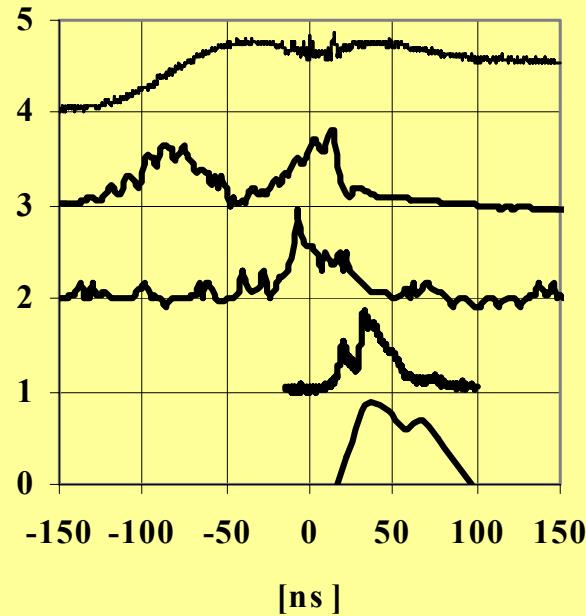
**S-300, 8 moduls , 3 MA, 100 ns**



**Al liner, 50 wires**

**15 mkm CD<sub>2</sub> fiber**

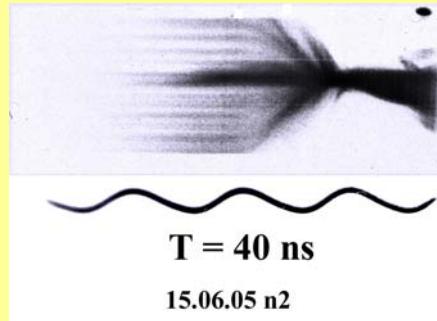
**S-300, W wire array (30 wires,  $\Phi$  5  $\mu\text{m}$ ) + (CD<sub>2</sub>)<sub>n</sub> fiber  $\Phi$  120  $\mu\text{m}$   
neutron yield 10<sup>9</sup>**



oscilloscope signals

- 4 current
- 3 voltage
- 2 XUV 280 eV
- 1 hard X-rays
- 0 neutrons

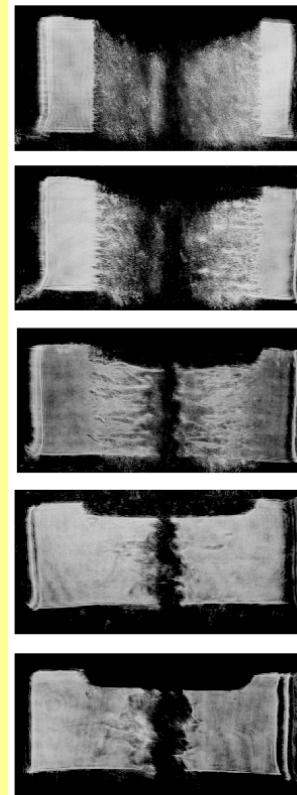
streak camera



laser shadows

neutron production  
start +23 ns  
max +33 ns  
decrease +63 ns

1 cm



-20 ns

-10 ns

0 ns

+10 ns

+20 ns

# Srovnání neutronových zisků D+D

Zařízení	Neutronový zisk	Plán	Zátěž
JET	$10^{17}$		plyn $10^{20} \text{ m}^{-3}$
ITER	$10^{18}$	(2021)	plyn $10^{20} \text{ m}^{-3}$
W-7	$10^{12}$	(2013)	plyn $10^{20} \text{ m}^{-3}$
Z-device (18 MA)	$6 \times 10^{13}$		plyn $10^{26} \text{ m}^{-3}$
ZR-device (27 MA)	$2 \times 10^{15}$	(2006)	plyn $10^{26} \text{ m}^{-3}$
Angara 5 (3 MA)	$10^{12}$		plyn $10^{25} \text{ m}^{-3}$
PF-1000 (1.5 MA)	$2 \times 10^{11}$		plyn $10^{24} \text{ m}^{-3}$
S-300 (1.5 MA)	$2 \times 10^9$		vlákno $(\text{CD}_2)_n$
OMEGA	$5 \times 10^{11}$		kryog. pelet
NIF	$10^{15}-10^{16}$	(2010)	kryog. pelet
Z-150 Praha (100 kA)	$10^3$	(2006)	vlákno $(\text{CD}_2)_n$
PALS	$10^4$	(2006)	vlákno $(\text{CD}_2)_n$

# Může být Praha jedním z centrem pro výzkum řízené termonukleární fúze v příštích letech?

- Jaké problémy je třeba řešit?
- Vlastnosti neutronů – energetické rozložení, doba vzniku,
- Původ neutronů – termální nebo beam-target?
- Mechanismus urychlení rychlých deuteronů a elektronů – oddělený nebo současný proces, stejné nebo různé mechanismy?
- Jaké parametry jsou potřeba k „ignition“ (zapálení)?
- Studium požaduje komplexní výzkum jak na tokamacích tak laserech a pinčích
- Výzkum astrofyzikálních objektů vysoké energetické hustoty – jety quasarů, kolabujících hvězdných soustav (vývoj v milionech let) analogie v délkách a časech s rozdílem 10tek řádů
- Magnetohydrodynamické simulace 3D – nestability, turbulence, generace, transformace a disipace magnetických polí
- Výzkum na středně velkých aparaturách dostatečných pro produkci neutronů a jednoduchých a levných
- Podmínky v Praze jsou tedy pro příštích 10 – 15 let šancí
- Výzkum provádí relativně úzká komunita univerzálních odborníků; tradice, zkušenosti, mládí

## 5. Závěr

- problém energetických zdrojů je jeden ze základních problémů dnešní civilizace
- během příštích 50 let - několikanásobný nárůst, vyčerpání zdrojů, skleníkový efekt
- jaderná energetika je jediným řešením
- štěpení uranu – nová generace
- termonukleární fúze – řešení fyziků (-2020 let), zkušební reaktor (2030), energetika (2040-2050)
- energie je vzácný dar s kterým je třeba uvážlivě nakládat
- velká šance Prahy a České republiky – soustředění středně velkých aparatur Compas, Pals, PF-1000 a možnost pracovat na všech
- fúze bude dar pro vyspělejší civilizaci, je na nás, abychom k tomu aktivně přispěli