

# Inerciální jaderná fúze

## populární přednáška

Vojtěch Horný

Katedra fyzikální elektroniky  
Fakulta jaderná a fyzikálně inženýrská  
České vysoké učení technické  
a  
Ústav fyziky plazmatu  
Akademie věd České republiky

30. května 2014, Opava

# Obsah prezentace

- 1 Motivace pro výzkum v oblasti jaderné fúze
  - Energetické problémy lidstva
  - Struktura výroby elektrické energie
- 2 Úvod do jaderné fyziky
  - Plazma
  - Jaderné reakce
  - Uvažované jaderné reakce pro jadernou fúzi
- 3 Inerciální laserové jaderná fúze
  - Fáze inerciální fúze
  - Problémy inerciální fúze
- 4 Pohled do České republiky

# Energetické problémy lidstva

## Zajímavá data

- Jednotka globální spotřeby energie:  $1 \text{ Q} = 1,05 \times 10^{21} \text{ J}$
- Globální spotřeba energie do roku 1850:  $0.004 \text{ Q/rok}$
- Celková globální spotřeba energie 1850 - 1950:  $4 \text{ Q}$
- Celková globální spotřeba energie 1950 - 2050:  $40 \text{ Q}$
- Zásoba energie v uhlí:  $\approx 100 \text{ Q}$
- Zásoba energie v ropě:  $\approx 11 \text{ Q}$
- Spotřeba elektrické energie v ČR:  $80 \text{ TWh/rok} = 0,00027 \text{ Q/rok}$
- Solární konstanta:  $1\,367 \text{ W/cm}^2$
- Celková příkon ze Slunce na Zemi:  $2\,000 \text{ Q/rok}$

Nestačí tedy důmyslně využívat solární energii?

# Energetické problémy lidstva

## Zajímavá data

- Jednotka globální spotřeby energie:  $1 \text{ Q} = 1,05 \times 10^{21} \text{ J}$
- Globální spotřeba energie do roku 1850:  $0.004 \text{ Q/rok}$
- Celková globální spotřeba energie 1850 - 1950:  $4 \text{ Q}$
- Celková globální spotřeba energie 1950 - 2050:  $40 \text{ Q}$
- Zásoba energie v uhlí:  $\approx 100 \text{ Q}$
- Zásoba energie v ropě:  $\approx 11 \text{ Q}$
- Spotřeba elektrické energie v ČR:  $80 \text{ TWh/rok} = 0,00027 \text{ Q/rok}$
- Solární konstanta:  $1\,367 \text{ W/cm}^2$
- Celková příkon ze Slunce na Zemi:  $2\,000 \text{ Q/rok}$

Nestačí tedy důmyslně využívat solární energii?

## 1 Orbitální překážky

- 30% energie ze Slunce se odrazí od atmosféry
- 50% se sekundárně vyzáří
- 20% dopadá na povrch

## 2 Atmosférické překážky

- je třeba odečíst vliv noci a počasí (mračna, mlha), to činí 90% dopadajícího výkonu
- nestálost a nepředvídatelnost

## 3 Fyzikální překážky

- současná účinnost užívaných fotovoltaických článků je 1% – 40%, nejčastěji užívané články mají  $\eta \approx 15\%$
- teoretická mez účinnosti je kolem 60%
- malá hustota dopadající energie

## 4 Ekologické překážky

- životnost článků 20 – 30 let
- nedostatek některých prvků na Zemi, problematická recyklace
- neekologická výroba fotovoltaických článků,

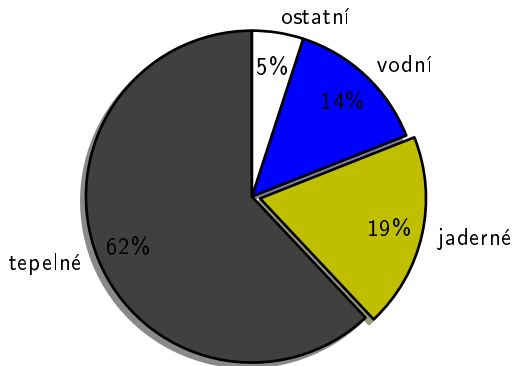
## 5 Praktické překážky

- elektrárna vyrábí málo energie  $\Rightarrow$  nutnost veřejných dotací (domácnost zaplatí 419 Kč/MWh)

# Struktura výroby elektrické energie

v České republice a ve světě

## Výroba elektrické energie ve světě

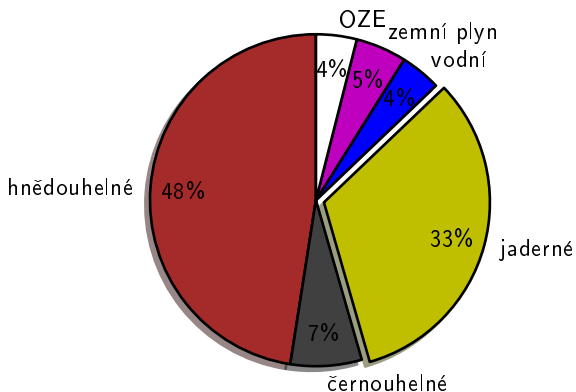


Zdroj: IEA, 2012

# Struktura výroby elektrické energie

v České republice a ve světě

Výroba elektrické energie v České republice (ERU, 2012)



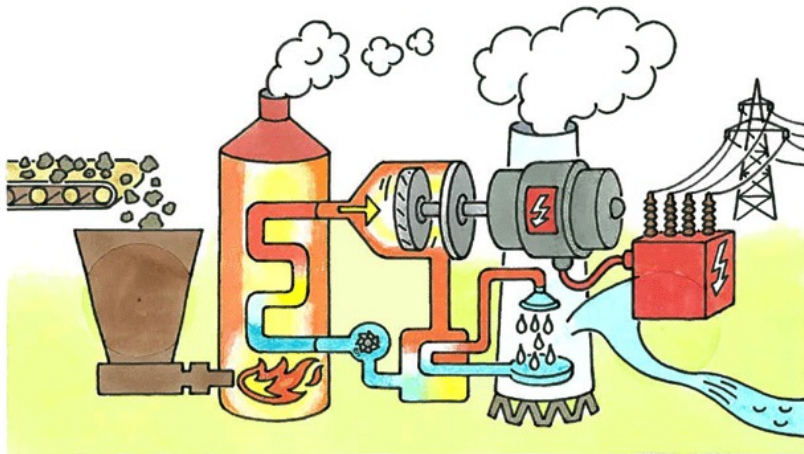
Zdroj: ERU, 2012



# Princip výroby elektrické energie

Výroba elektrické energie v kostce

Proud teplé páry roztáčí turbínu parogenerátoru.



Zdroj obrázku: <http://www.miseplus.cz/info/elektrarny>

# Důležité pojmy

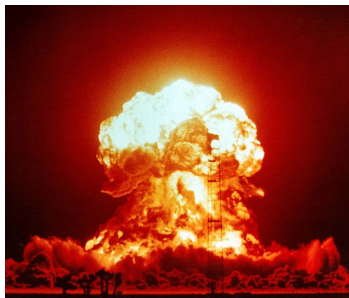
Dva důležité pojmy pro porozumění přednášky

## Plazma



Zdroj obrázku: ohio.edu

## Jaderná reakce



Zdroj obrázku: en.wikipedia.org

# Co je to plazma?

tajemné čtvrté skupenství hmoty

Plazma je

- oblak iontů, elektronů a neutrálních atomů
- podobné plynu, nicméně kvůli přítomnosti nabitých částic se chová odlišně, mnohdy nečekaně
- nejobvyklejší formou hmoty ve vesmíru
- může se vyskytovat v různých formách
- má řadu aplikačních využití



Zdroj obrázku: iter.org

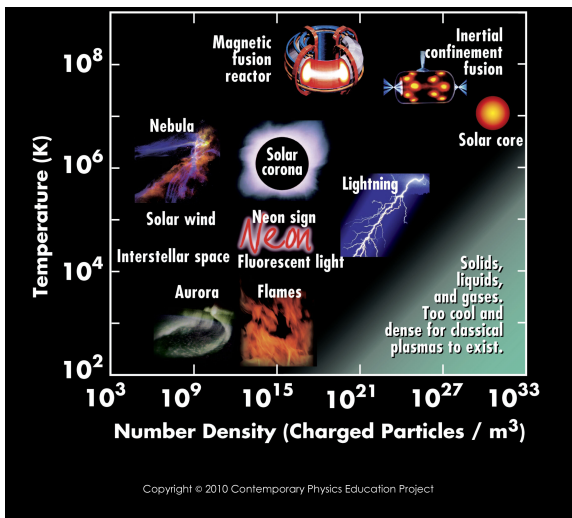
## Formální definice

Plazma je kvazineutrální systém nabitých a případně i neutrálních částic, který vykazuje kolektivní chování

- *kvazineutrální* - celkový náboj v jednotce objemu je nulový
- *kolektivní chování* - částice na sebe nepůsobí binárně srážkami, nýbrž působením makroskopických elektromagnetických polí

# Různé druhy plazmatu

na Zemi i ve vesmíru

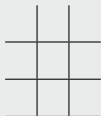


Zdroj obrázku: <http://www.cpepweb.org/>

## Jaderná reakce

- přeměna atomových jader
- samovolně nebo být vyvolaná působením jiného jádra nebo částice
- změna struktury jader a jejich pohybového stavu
- hojně využíváno v průmyslu i v medicíně

## Jednoduché členění jaderných reakcí



# Jaderné reakce

## Jaderná reakce

- přeměna atomových jader
- samovolně nebo být vyvolaná působením jiného jádra nebo částice
- změna struktury jader a jejich pohybového stavu
- hojně využíváno v průmyslu i v medicíně

## Jednoduché členění jaderných reakcí

	štěpení (fission)	slučování, syntéza (fusion)

# Jaderné reakce

## Jaderná reakce

- přeměna atomových jader
- samovolně nebo být vyvolaná působením jiného jádra nebo částice
- změna struktury jader a jejich pohybového stavu
- hojně využíváno v průmyslu i v medicíně

## Jednoduché členění jaderných reakcí

	štěpení (fission)	slučování, syntéza (fusion)
neřízené		
řízené		

# Jaderné reakce

## Jaderná reakce

- přeměna atomových jader
- samovolně nebo být vyvolaná působením jiného jádra nebo částice
- změna struktury jader a jejich pohybového stavu
- hojně využíváno v průmyslu i v medicíně

## Jednoduché členění jaderných reakcí

	<b>štěpení (fission)</b>	<b>slučování, syntéza (fusion)</b>
<b>neřízené</b>	atomová bomba	
<b>řízené</b>		



# Jaderné reakce

## Jaderná reakce

- přeměna atomových jader
- samovolně nebo být vyvolaná působením jiného jádra nebo částice
- změna struktury jader a jejich pohybového stavu
- hojně využíváno v průmyslu i v medicíně

## Jednoduché členění jaderných reakcí

	<b>štěpení (fission)</b>	<b>slučování, syntéza (fusion)</b>
<b>neřízené</b>	atomová bomba	vodíková bomba, hvězdy
<b>řízené</b>		

# Jaderné reakce

## Jaderná reakce

- přeměna atomových jader
- samovolně nebo být vyvolaná působením jiného jádra nebo částice
- změna struktury jader a jejich pohybového stavu
- hojně využíváno v průmyslu i v medicíně

## Jednoduché členění jaderných reakcí

	<b>štěpení (fission)</b>	<b>slučování, syntéza (fusion)</b>
<b>neřízené</b>	atomová bomba	vodíková bomba, hvězdy
<b>řízené</b>	jaderná elektrárna	

# Jaderné reakce

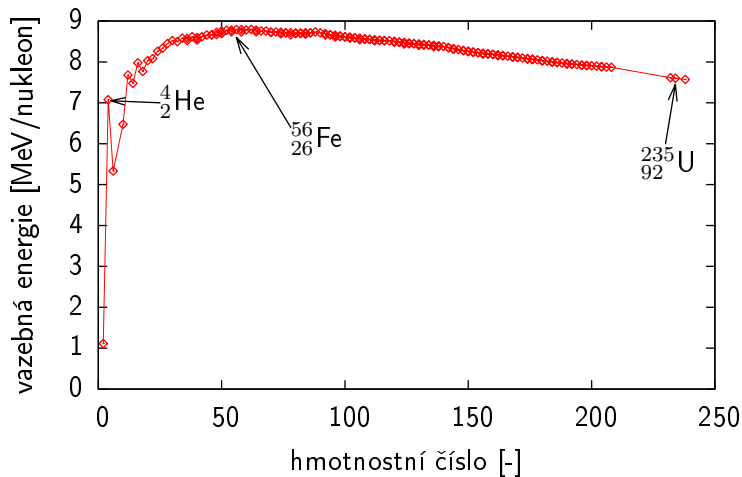
## Jaderná reakce

- přeměna atomových jader
- samovolně nebo být vyvolaná působením jiného jádra nebo částice
- změna struktury jader a jejich pohybového stavu
- hojně využíváno v průmyslu i v medicíně

## Jednoduché členění jaderných reakcí

	štěpení (fission)	slučování, syntéza (fusion)
neřízené	atomová bomba	vodíková bomba, hvězdy
řízené	jaderná elektrárna	<b>fúzní reaktor</b>

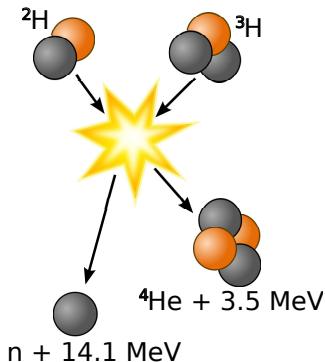
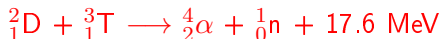
# Vazebná energie na nukleon



Zdroj dat: Maple, ScientificConstants package

# Uvažované jaderné reakce pro jadernou fúzi

První generace



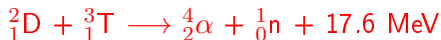
Zdroj obrázku: Wikipedie

Vysoká výhřevnost paliva: 340 GJ/g

1 g DT paliva  $\cong$  4.5 g  ${}^{235}\text{U}$   $\cong$  10 t uhlí

# Uvažované jaderné reakce

## Reakce DT



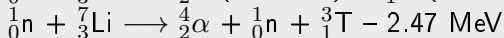
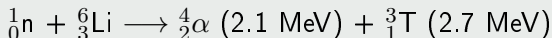
Rozdělení energie mezi produkty dle zákonů zachování

$$\frac{E_\alpha}{E_n} = \frac{m_n}{m_\alpha}, \quad (1)$$

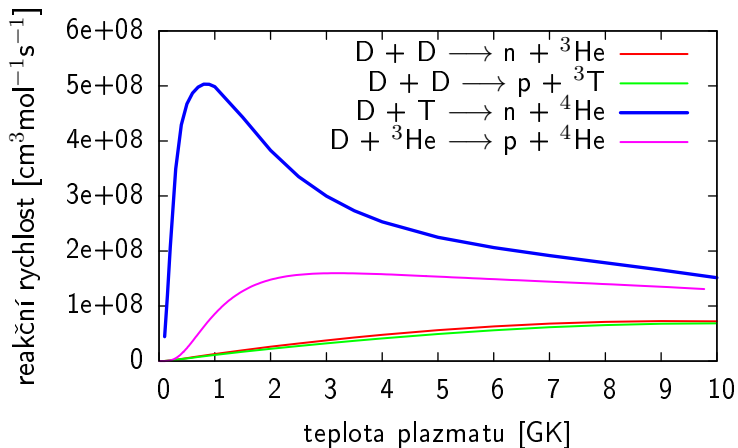
tedy  $m_n = 14.1 \text{ MeV}$  a  $m_\alpha = 3.5 \text{ MeV}$ .

### Tricium

- je mírně radioaktivní,  $\tau_{1/2} = 12.3 \text{ let}$
- nevyskytuje se na Zemi, nutno vyrábět z lithia



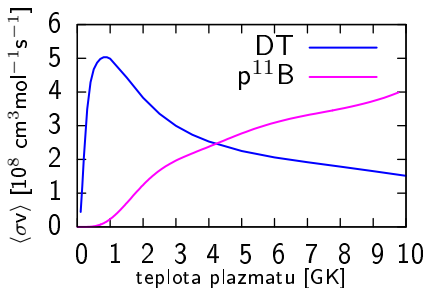
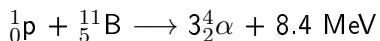
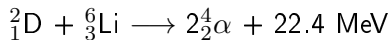
# Reakční rychlosti vybraných fúzních reakcí



Zdroj dat: REACLIB Database, The Joint Institute for Nuclear Astrophysics

# Další uvažované jaderné reakce

## Bezneutronové reakce



### Výhody a nevýhody

#### Výhody

- bez neutronů
- dostupné palivo
- vysoce exotermické

#### Nevýhody

- vysoká teplota zapálení
- utajené účinné průřezy



## Lawsonovo kritérium

Pro dosažení fúze musí být splněna podmínka

$$nT\tau_E > 10^{21} \text{ keV m}^{-3}\text{s} \quad (2)$$

Význam veličin:

- $n$  - částicová hustota v jednotkách  $\text{m}^{-3}$
- $T_{keV}$  - teplota v kiloelektronvoltech
- $\tau_E$  - doba udržení v sekundách

Pro představu:

- 1 eV odpovídá 11 604 K

# Koncepty jaderné fúze

## 1 Beam target fusion

- svazek urychlených iontů ostřeluje terč
- pravděpodobnost fúzní reakce je však až  $10^6$  krát menší než pravděpodobnost elastické srážky
- mizivý fúzní výtěžek, energie transformována v teplo

## 2 Magneticky udržená fúze

- Plasma je udržováno působením silných magnetických polí kontinuálně či po dlouhou dobu
- Různá uspořádání: **tokamak**, stellarátor, pinče

## 3 Inerciálně udržená fúze

- Plasma vzniká na velmi krátkou dobu, drží jej jen vlastní setrvačnost
- Různá uspořádání: Přímý běh, nepřímý běh

# Magnetické udržení plazmatu v tokamaku

- Tokamak je akronym - **тороидальная камера с магнитными катушками**
- Myšlenka z 50. let, Igor Jevgeněvič Tamm a Andrej Sacharov

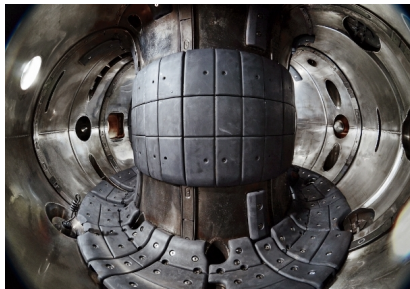
Tokamak je toroidální nádoba, která zabraňuje kontaktu plazmatu se stěnou nádoby. Okolo stěn nádoby jsou navinuty cívky vytvářející magnetické pole, které stlačuje plazma a tím inicializuje fúzní reakce.

Tokamaky v ČR:

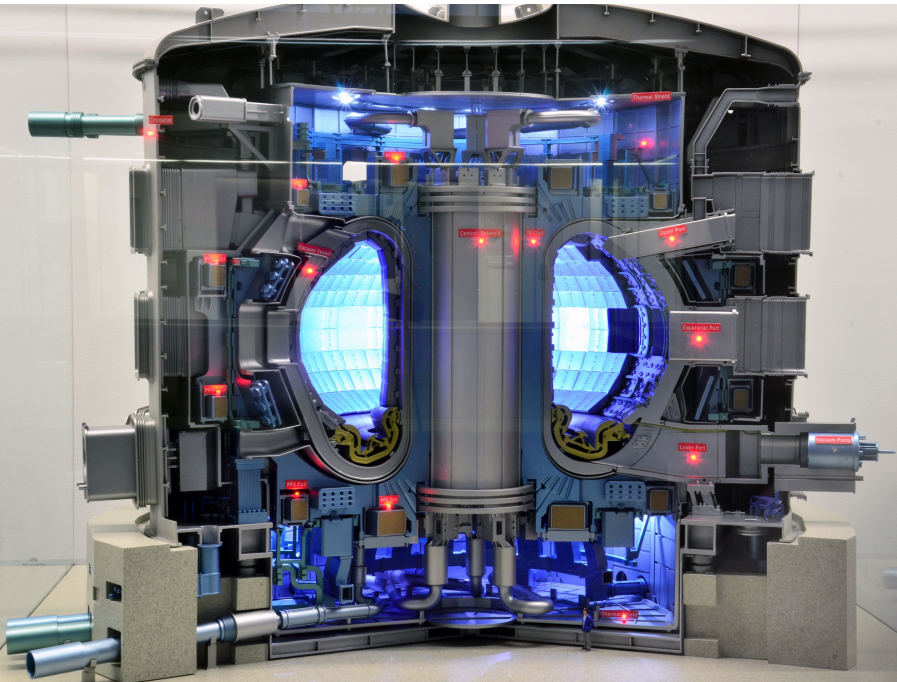
- 1 Tokamak Compass, ÚFP AV ČR
- 2 Tokamak Golem, FJFI ČVUT

Největší světový projekt:

- 1 Tokamak ITER



Tokamak Compass na ÚFP AV ČR, obrázek z [www.atominfo.cz](http://www.atominfo.cz)



# Inerciální udržení

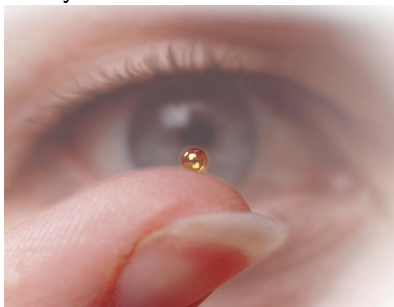
- Myšlenka stejná jako u vodíkové bomby
- Palivo drží vlastní setrvačnost *inertia*, je zahřáto tak rychle, než se stačí rozletět
- V každé mikroexplozi se uvolní řádově stovky megajoulů (ilust. př. - výhřevnost koksu je 30 MJ/kg)
- Pro každou mikroexplozi se používá kulička se směsí D a T,  $m \approx 1$  mg,  $r \approx$  několik mm
- Případná elektrárna by pracovala v pulsním režimu, uvažuje se o frekvenci 10 Hz (dnes umíme frekvenci dvakrát za den)

	MCF	ICF
teplota	10 keV	10 keV
hustota	$10^{14}$ cm <sup>-3</sup>	$10^{25}$ cm <sup>-3</sup>
tlak	10 bar	$10^{12}$ bar

# Přístupy k inerciální fúzi

Terče pro různé režimy

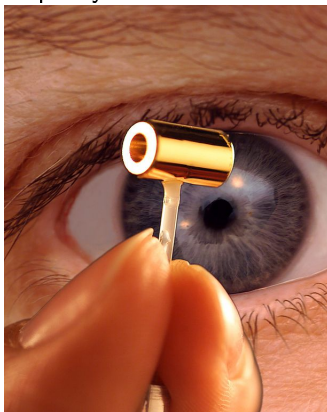
## Přímý režim



Zdroje obrázků: Wikipedie

V přímém režimu energie laserového záření odpařuje povrch terče a podobně jako raketový motor stlačuje peletku až na 1000-násobnou hustotu.

## Nepřímý režim

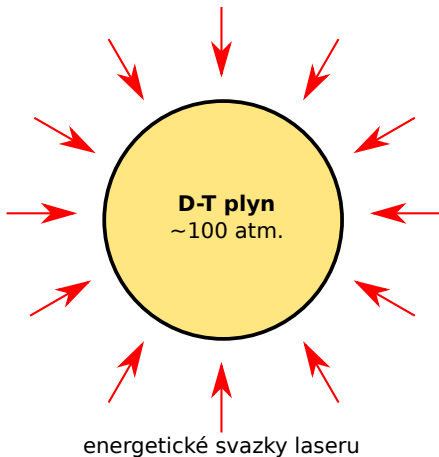


Při nepřímém režimu je energie laserového záření transformována do vysokoenergetického rentgenového záření a toto pak komprimuje směs DT.

# Fáze inerciální fúze - přímý režim

Model sférické imploze

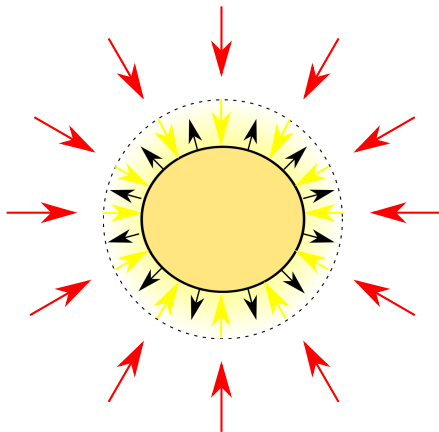
## 1. ablace



# Fáze inerciální fúze - přímý režim

## Model sférické imploze

### 2. sférická imploze a komprese



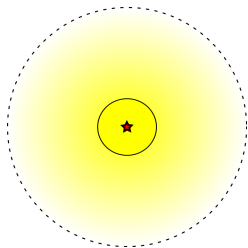
sférická imploze peletky



# Fáze inerciální fúze - přímý režim

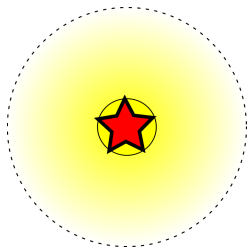
## Model sférické imploze

### 3. zapálení (spark ignition)



jiskrový výboj v centru

### 4. šíření vlny termojaderného hoření v hustém palivu



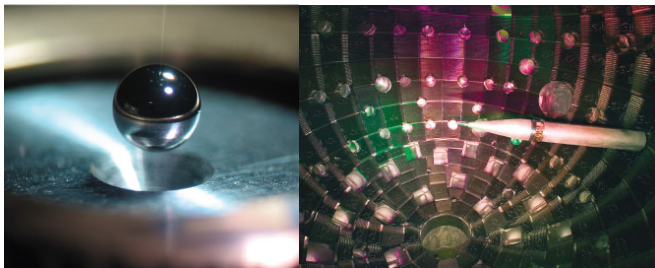
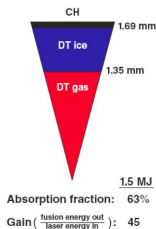
mikroexploze se šíří v objemu



# Peletka pro přímý běh

Vlastnosti peletky:

- velikost špendlíkové hlavičky
- obsahuje přibližně 10 mg paliva, tj. směsi DT v plynné a pevné formě, musí být proto uchovávána kryogenně
- v každé mikroexplozi vyhoří jenom zlomek paliva

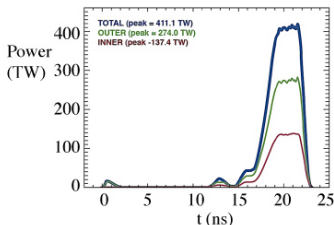
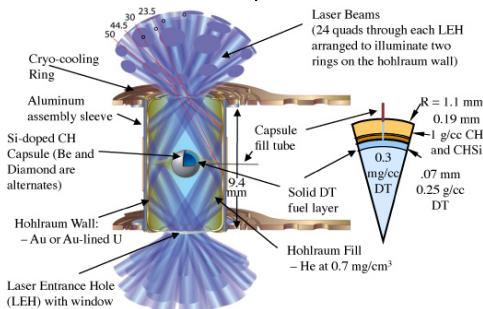


Zdroje obrázků: llnl.gov

# Peletka pro nepřímý běh

Vlastnosti peletky:

- okolo kapsle je obal z těžších materiálů, které konvertují energii laseru do energie rentgenového záření
- materiály a design obalu jsou předmětem výzkumu, jak simulací, tak experimentů



Zdroje obrázků: O L Landen et al 2012 *Plasma Phys. Control. Fusion* 54 124026

# Světová výzkumná centra pro demonstraci inerciální fúze

## 1 National Ignition Facility (NIF), Livermore, USA

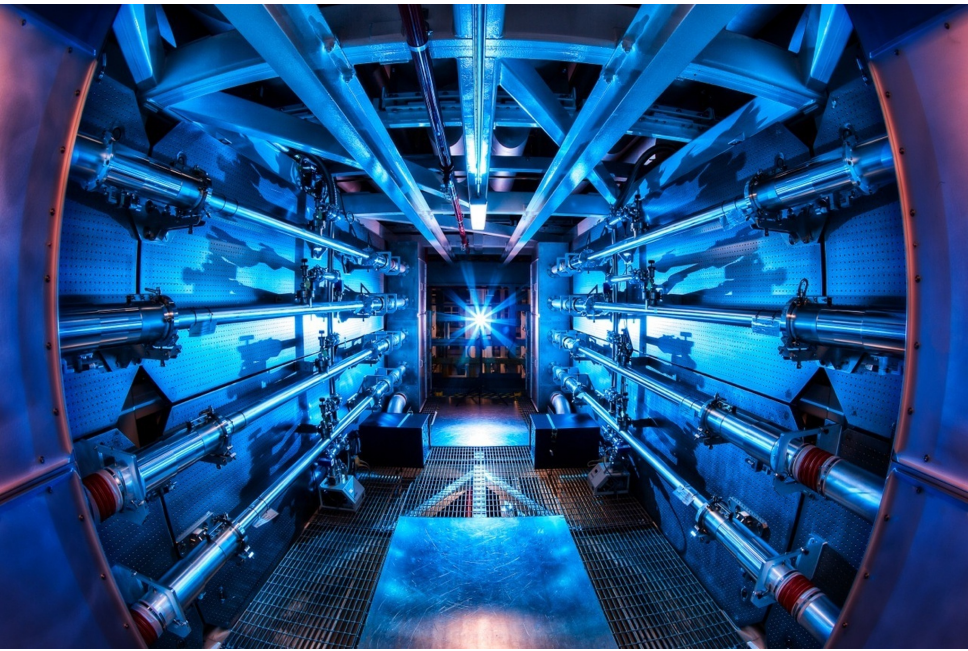
- začátek výstavby roku 1997, první experiment 2009
- 8. října 2013: v jedné mikroexplozi vyrobeno více energie, než bylo energie v laseru
- 192 laserových svazků, celková energie ve svazku 1.8 MJ, délka impulsu 1-20 ns [▶ Hezké video](#)
- druhý impuls: 10 ps, 12 kJ,  $10^{18}$  W/cm<sup>2</sup>
- většina experimentálního času patří zbrojní fyzice

## 2 Laser Mégajoule (LM), Bordeaux, Francie

- první experiment by měl proběhnout letos
- 240 laserových svazků, celková energie ve svazku 1.8 MJ, délka impulsu 1-20 ns [▶ Hezká animace](#)
- také stavěn s ohledem na zbrojní výzkum



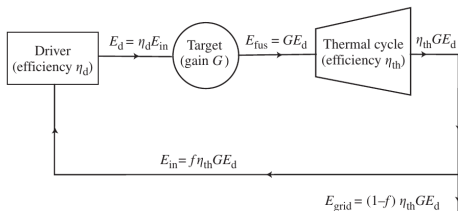






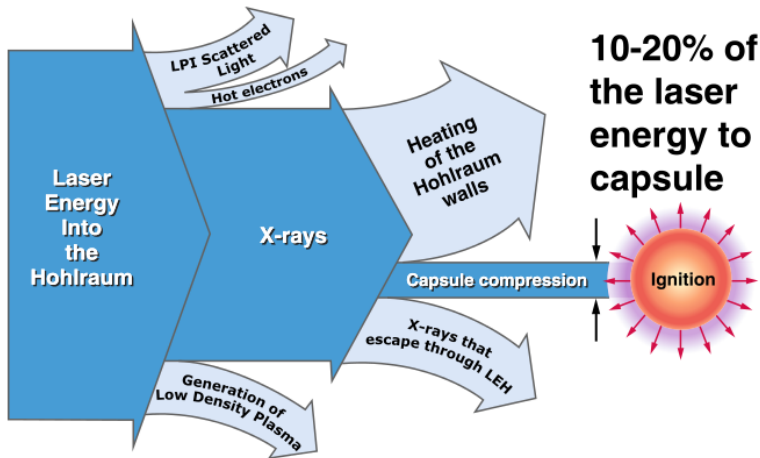
## 1 Technické potíže

- poškození první vrstvy komory - vysokoenergetické neutrony postupují do stěny komory, inicializují další jaderné reakce ve stěně a tímto je degradují
- zaměřování peletky za letu - při opakovací frekvenci mikroexplozí 10 Hz netriviální
- slabá konverze energie do laserového systému, z laserového systému do terče, potřeba zajistit výtěžek exploze nad 350
- slabá opakovací frekvence - dnes umíme dvakrát denně



# Depozice laserové energie v peletce

Ke kompresi peletky je možno využít nanejvýše 20% energie laserového impulsu.



Zdroj obrázku: Technická zpráva LLNL

## 2 Fyzikální omezení

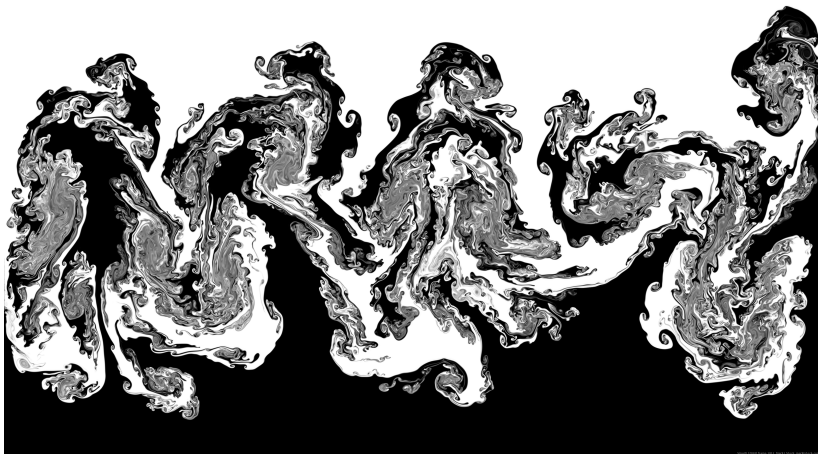
- šoková vlna - palivo se nesmí zahřát příliš brzo, dokud není příliš husté
- porušení symetrie implodujícího paliva - může vést na nerovnoměrné zahřívání, které vyvolává nestability
- synchronizace velkého množství laserových svazků
- Rayleighova-Taylorova nestabilita - výrazně snižuje absorpci energie laseru

## 3 Společensko-politické otázky

- pokračující zbrojní výzkum na největších zařízeních

# Raleighova-Taylorova nestabilita

2D CFD simulace volně dostupným programem Vic2D Marka Stocka. Kód dostupný na <http://markjstock.org/vic2d/> ► Hezká simulace

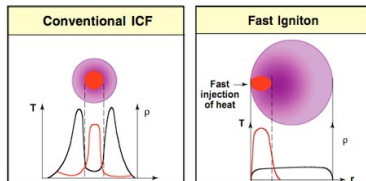


# Fúze rychlým zážehem - schéma Fast Ignition

Dva laserové systémy jsou využity:

1. dlouhý laserový impuls komprimuje terč na maximální hustotu
2. ultrakrátký a ultra-výkonný impuls ( $10^{15}$  W) v době stagnace vytvoří jádro hoření (burning core)

Cílem je rapidní snížení dodané energie, na druhou stranu se zvyšuje složitost.

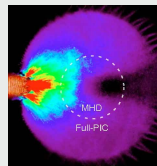


Zdroj obrázku: S Atzeni, *Physics of Inertial Fusion*, 2004, Oxford University Press

## Projekt HiPER - High Power laser Energy Research facility

HiPER je zamýšlený evropský projekt s rozpočtem 16 miliard Kč.

- oproti NIFu a LMJ čistě civilní
- dva lasery s pulsy o energiích 200 kJ a 70 kJ.
- očekávan vyšší výtěžek než u NIFu a LMF
- ▶ Dlouhé video česky



Zdroj obrázku: prace-ri.eu

# Výzkumné skupiny u nás

Česká republika je aktivně zapojena ve výzkumu jaderné fúze.

- 1 Ústav fyziky plazmatu AV ČR, v.v.i.
- 2 Fyzikální ústav AV ČR, v.v.i.
- 3 Laserové centrum ELI Beamlines
- 4 FJFI a FEL ČVUT v Praze
- 5 Další vysoké školy po ČR

Aktivní účast na největších světových výzkumných zařízeních.



# Studium jaderné fúze na FJFI ČVUT

Fakulta jaderná a fyzikálně inženýrská ČVUT v Praze nabízí mj. obory

- 1 Informatická fyzika
- 2 Fyzika a technika termojaderné fúze



Tak jde čas

P&K: Jojin&HedgeHog



- 1 Jaderná fúze představuje nevyčerpatelný čistý zdroj energie bez nebezpečného radioaktivního odpadu.
- 2 Ve schématu inerciálního udržení je DT plasma drženo pouze vlastní setrvačností.
- 3 Palivo je zahříváno mnoha důmyslně uspořádanými laserovými svazky.
- 4 V současné době je možno vyrobit v mikroexplozi více energie, než bylo potřeba k jejímu inicializování.
- 5 Výzkum inerciální fúze je mezinárodně koordinován a jsou do něj aktivně zapojeni i čeští vědci.



# Děkuji za pozornost

- **Vojtěch Horný**
- ÚFP AV ČR
- KFE FJFI ČVUT v Praze
- [horny@pals.cas.cz](mailto:horny@pals.cas.cz)
- [kfe.fjfi.cvut.cz/~horny](http://kfe.fjfi.cvut.cz/~horny)



Další otázky ohledně fúze a studia na FJFI ČVUT vítány i e-mailem.

Prezentace vystavena online na [kfe.fjfi.cvut.cz/~horny](http://kfe.fjfi.cvut.cz/~horny)