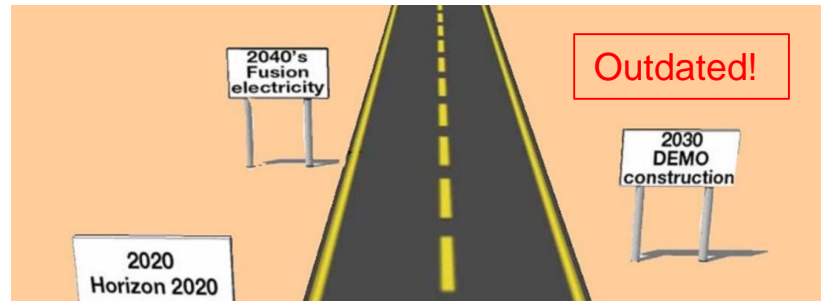


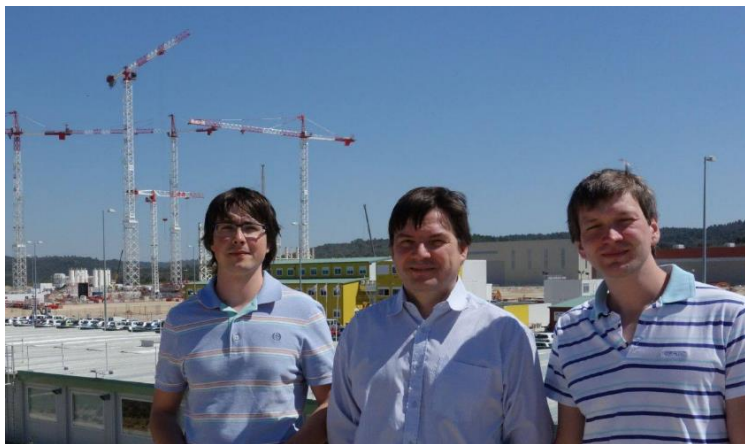
**02SPF:**  
**Plazma, fúze, tokamaky a ti druzí**  
***aneb vše co byste měli jako studenti naší***  
***specializace vědět a o čem se dozvíte ještě***  
***mnohem víc***

O. Ficker et al.

- Energie hvězd – termojaderná fúze
- Co je to plazma?
- Potřebujeme fúzi? Je výzkum moc drahý? Trvá moc dlouho?
- Principy termojaderné fúze, palivo, hvězdy vs. pozemské reaktory
- Magnetické udržení: Tokamak, Stellarátor, Inerciální udržení
- JET, ITER, NIF příchod soukromého kapitálu
- Kde všude najdete absolventy našeho oboru?



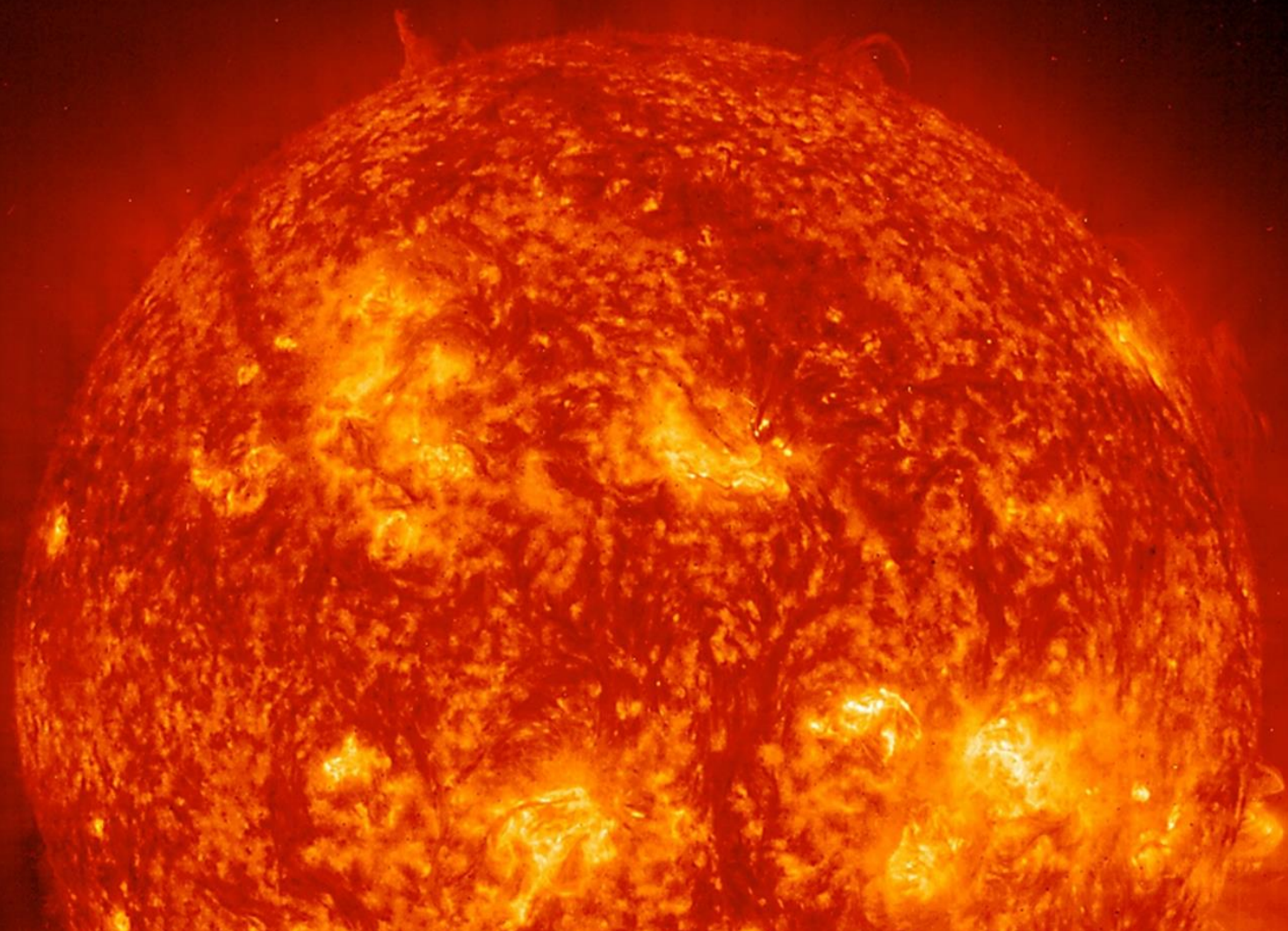
Prof. RNDr. Jan Mlynář, Ph. D.  
1966-2023



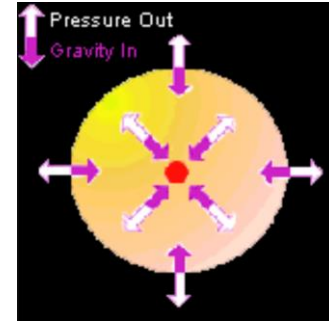
ITER – duben 2015



- **Energie hvězd – termojaderná fúze**
- Co je to plazma?
- Potřebujeme fúzi? Je výzkum moc drahý? Trvá moc dlouho?
- Principy termojaderné fúze, palivo, hvězdy vs. pozemské reaktory
- Magnetické udržení: Tokamak, Stellarátor, Inerciální udržení
- JET, ITER, NIF příchod soukromého kapitálu
- Kde všude najdete absolventy našeho oboru?



**Hmotnost Slunce:  $2 \times 10^{30}$  kg**  
**Solární konstanta:  $1,4 \text{ kW m}^{-2}$**   
**Celkový výkon Slunce:  $4 \times 10^{26}$  W**



**Bohové?**



**Uhlí?**



**Gravitační kontrakce**

**Radioaktivní  
rozpad**

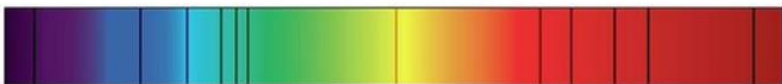


Složení Slunce: hlavně VODÍK a helium

ABSORPTION SPECTRUM OF HYDROGEN



ABSORPTION SPECTRUM OF HELIUM

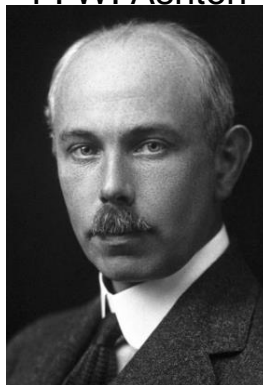


$$4x m_H > m_{He} !!!$$

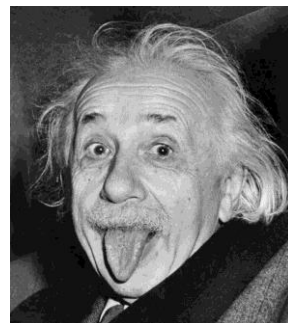
ROZDÍL HMOTNOSTÍ  
JE UVOLNĚNÁ ENERGIE

$$E = \Delta m \cdot c^2$$

F. W. Ashton



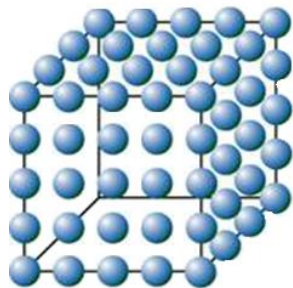
Fúze pohání hvězdy, A. Eddington **1920**



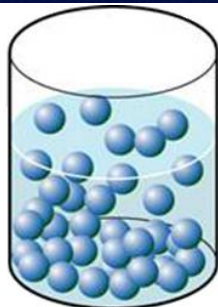
A. Einstein

- Energie hvězd – termojaderná fúze
- **Co je to plazma?**
- Potřebujeme fúzi? Je výzkum moc drahý? Trvá moc dlouho?
- Principy termojaderné fúze, vs. Štěpení, hvězdy vs. pozemské reaktory
- Magnetické udržení: Tokamak, Stellarátor, Inerciální udržení
- JET, ITER, NIF a příchod soukromého kapitálu
- Kde všude najdete absolventy našeho oboru?

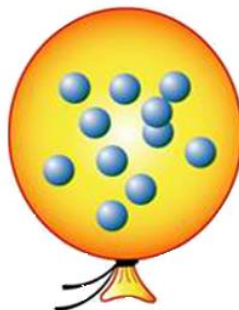




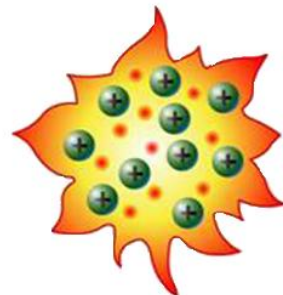
**NÍZKÁ  
TEPLOTA**  
PEVNÁ LÁTKA



**STŘEDNÍ  
TEPLOTA**  
KAPALINA



**VYSOKÁ  
TEPLOTA**  
PLYN

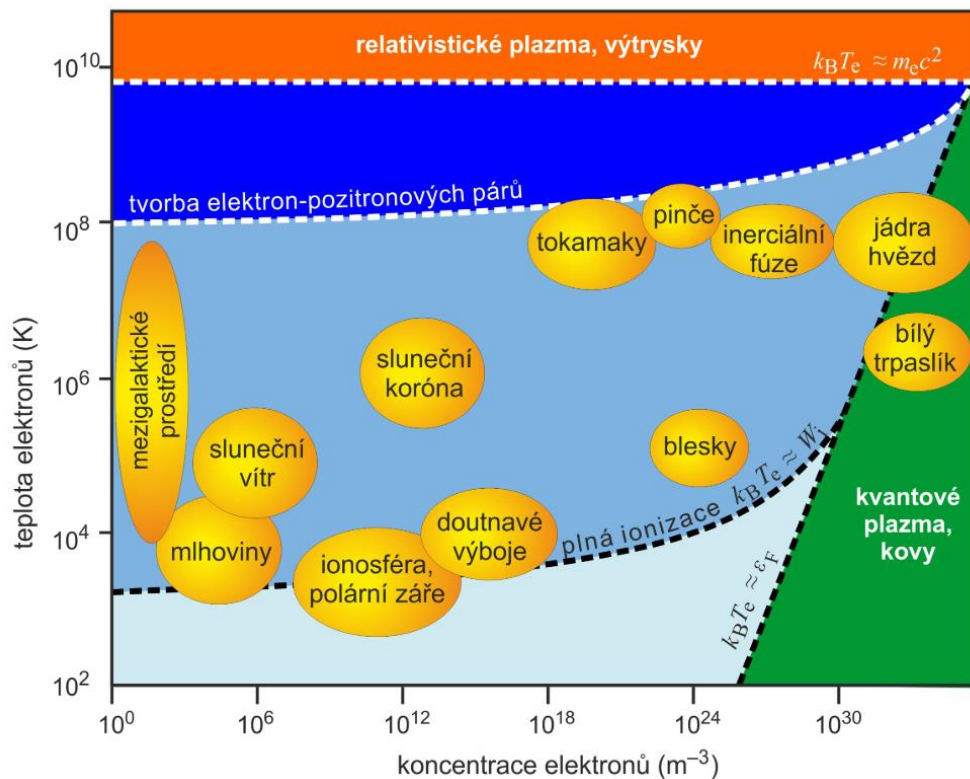


**EXTRÉMNÍ  
TEPLOTA**  
PLAZMA

**Plazma je kvazineutrální ionizovaný plyn složený z iontů, elektronů a neutrálních částic vykazující kolektivní chování, který vzniká odtržením elektronů z elektronového obalu atomů plynu (ionizací).**

Je plazma čtvrté skupenství hmoty? – NE tak docela – pozvolná, ale zásadní změna chování

**96% hmoty ve vesmíru je ve stavu plazmatu!**



- Energie hvězd – termojaderná fúze
- Co je to plazma?
- **Potřebujeme fúzi? Je výzkum moc drahý? Trvá moc dlouho?**
- Principy termojaderné fúze, palivo, hvězdy vs. pozemské reaktory
- Magnetické udržení: Tokamak, Stellarátor, Inerciální udržení
- JET, ITER, NIF příchod soukromého kapitálu
- Kde všude najdete absolventy našeho oboru?

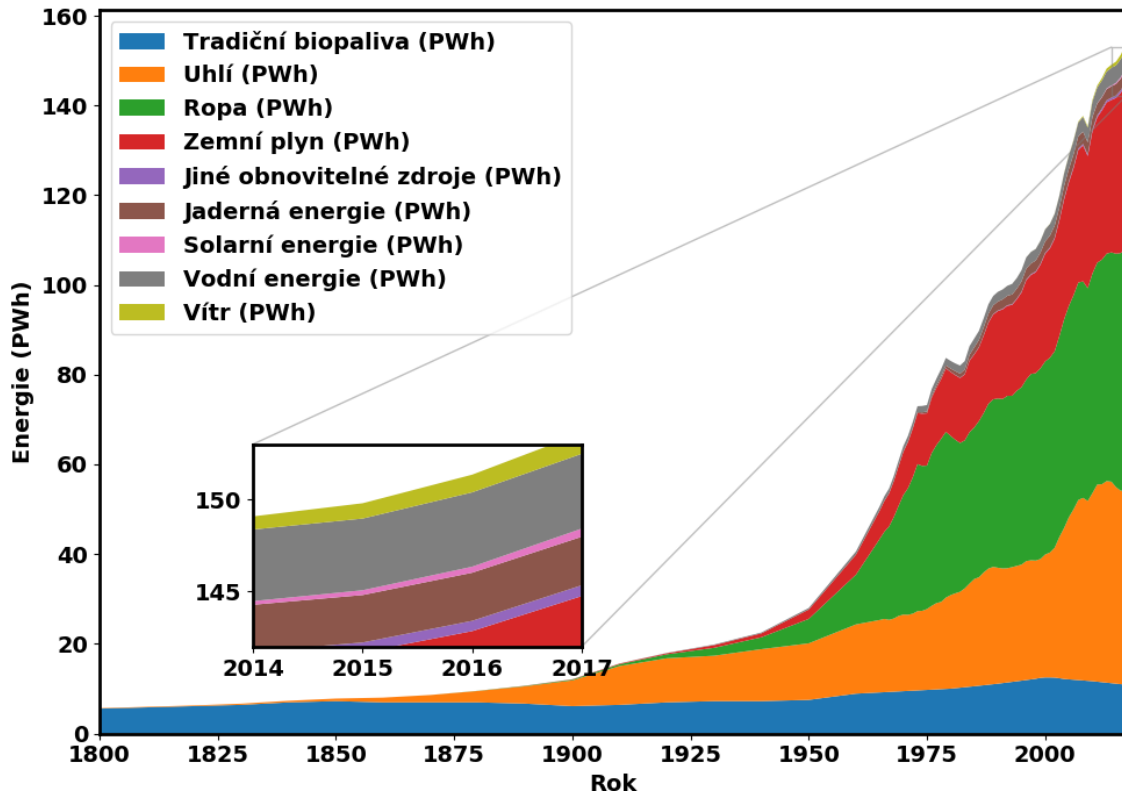
## Primární zdroje energie

- Výroba el. energie
- Teplo
- Přímá spotřeba v průmyslu
- Spotřeba v dopravě
- Atd.

## Fosilní paliva stále naprosto dominují

### Doprava:

- Celková spotřeba: **30 000 TWh – tedy více než veškerá vyrobená el. energie!**
- El. energie v dopravě pokrývá **<1%**
- Kompletní elektrifikace dopravy – **více než 2x** tolik elektráren než máme dnes



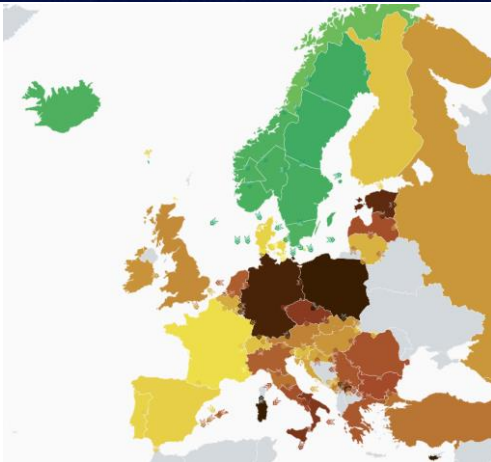
## ENERGY

160,231,481	Energy used today (MWh), of which:	[+]
129,786,794	- from non-renewable sources (MWh)	[+]
30,444,687	- from renewable sources (MWh)	[+]
<b>1,196,333,713,539</b>	Solar energy striking Earth <b>today</b> (MWh)	[+]
39,158,288	Oil pumped today (barrels)	[+]
1,526,548,388,458	Oil left (barrels)	[+]
<b>15,920</b>	Days to the end of oil (~44 years)	[+]
1,099,445,126,649	Natural Gas left (boe)	[+]
<b>57,866</b>	Days to the end of natural gas	[+]
4,321,988,920,701	Coal left (boe)	[+]
<b>149,034</b>	Days to the end of coal	[+]

<https://www.worldometers.info>

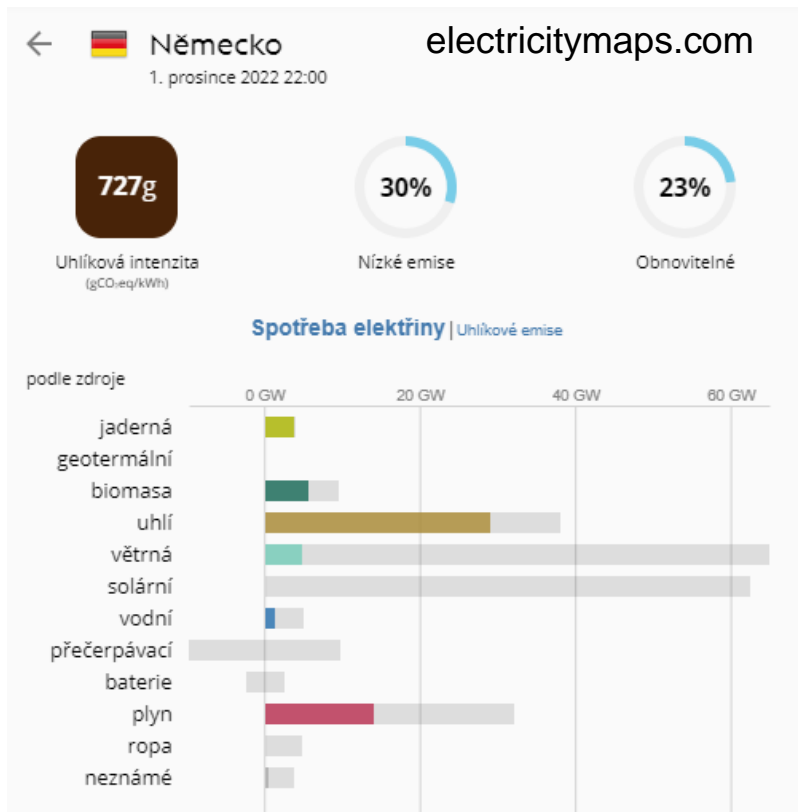
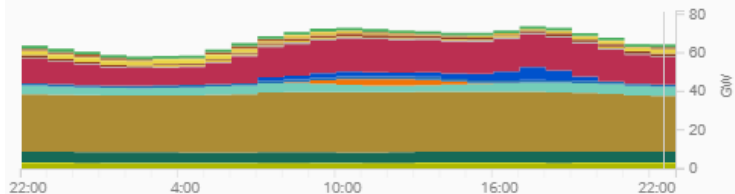
- Ropa při současné spotřebě dojde následující generaci
- Plyn a uhlí později, ale stále v měřítku několika generací
- Mají i jiné využití než spálení
- Restart civilizace bez dostupných zásob fosilních paliv asi nemožný

**Německo:**  
**Instalovaný výkon v obnovitelných zdrojích více než 50%, ale reálně vyrobená energie za rok spíše zhruba 10-20%**



22:00 h, 1/12/2022

Původ elektřiny za posledních 24 hodin  
 ↓ Získejte historická a mezní data i předpověď přes API





Největší vědecký projekt na Zemi  
 Náklady 22-25 mld. €  
 20 let  
 EU + 6 států  
 Mnoho pracovních míst a inovací



Č. zisk 17 mld.€  
 1 rok  
 670,000 tisíc  
 zaměstnanců

MS 2022 Katar = 5-7 ITERů

**RU-UA válka**

- 1 ITER/12 (nejhorších) hodin přímých nákladů a škod
- Celkové škody: Stovky ITERů

Program jaderných zbraní a nosičů jen v USA: 1000 ITERů



\$21.8 mld.  
 1 transakce (-> FB)  
 ~50000 řádků kódu  
 stamiliony uživatelů –  
 Osobní údaje a reklama

\$ 15,105,282,019	Public Healthcare expenditure <a href="#">today</a>	[+]
\$ 10,313,280,149	Public Education expenditure <a href="#">today</a>	[+]
\$ 4,667,971,747	Public Military expenditure <a href="#">today</a>	[+]
\$ 276,111,130,684	Money spent on illegal drugs <a href="#">this year</a>	[+]
\$ 576,984,116	Money spent for obesity related diseases in the USA <a href="#">today</a>	[+]
\$ 187,096,527	Money spent on weight loss programs in the USA <a href="#">today</a>	

1 ITER = cigarety vykouřené za 4-5 dní

## Nechvalně známé vtipy o fúzi:

- Už 50 let se říká, že za 50 let už to bude.
- Fusion is the energy of the future, ... and always will be!

### Výzkum fúze:

První myšlenka: Eddington 1920 – fúze/energie hvězd  
 První reaktory – 50.-60. léta  
 Prokázání fyz. principu výroby energie – JET 1997, ITER  
 Úspěšná aplikace – elektrárna připojená k síti 2060??

### Letectví:

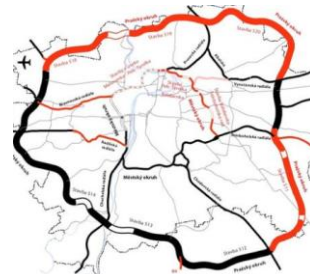
První myšlenka: ?? Počátek Homo S.  
 První let: 1903  
 První pravidelná linka: 1914

### Štěpná jaderná energetika:

První myšlenka: radioaktivita 1896/štěpení 1938  
 První reaktor: 1942  
 První elektrárna: 1956

### Pražský okruh ☺

První plány: 20. léta  
 Stavební uzávěra na části trasy – 50. léta  
 Dokončeno více jak 50%: 2027+  
 Úplné dokončení: ??

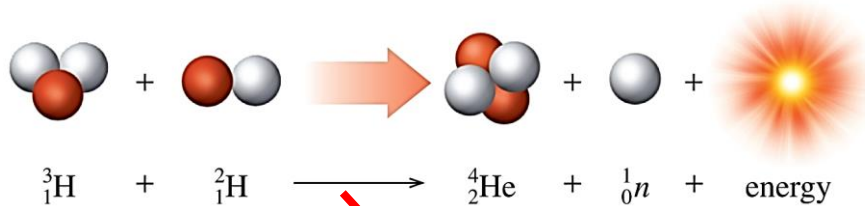




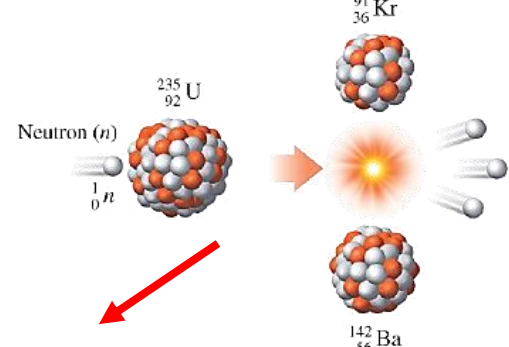
- Bezemisní zdroj energie
- Stabilní produkty
- Nízká indukovaná aktivita konstrukčních materiálů
- Inherentně bezpečný (velmi malé množství paliva, teplotní stabilita reakce)
- Velké zásoby paliva dostupné rovnoměrně po celém světě (!)
- Posun mnoha technologických oborů během vývoje
- Pravděpodobně nebude dostupná v malém měřítku
- Plazma nestabilní – fúzní reakce snadno vyhasne
- Prostředí fúzních reaktorů je extrémní a potřebujeme nové a lepší materiály

- Energie hvězd – termojaderná fúze
- Co je to plazma?
- Potřebujeme fúzi? Je výzkum moc drahý? Trvá moc dlouho?
- **Principy termojaderné fúze, palivo, hvězdy vs. pozemské reaktory**
- Magnetické udržení: Tokamak, Stellarátor, Inerciální udržení
- JET, ITER, NIF příchod soukromého kapitálu
- Kde všude najdete absolventy našeho oboru?

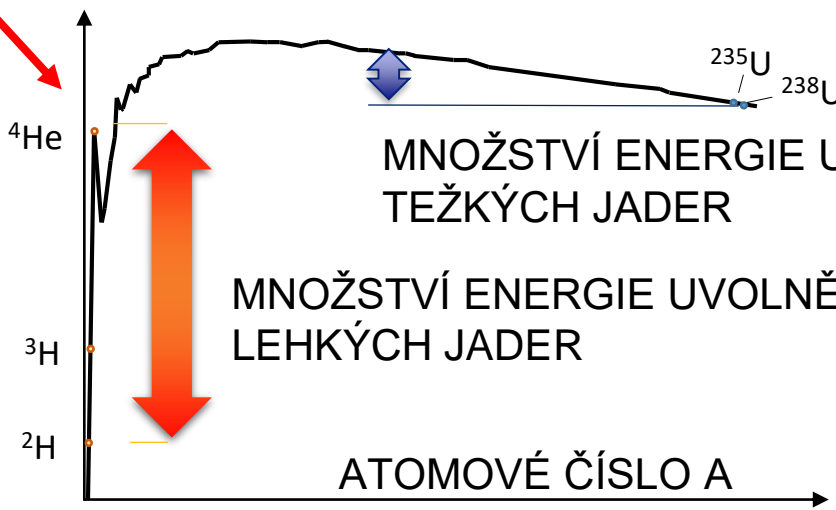
## SLUČOVÁNÍ ATOMOVÝCH JADER



## ŠTĚPENÍ ATOMOVÝCH JADER



**VAZEBNÁ ENERGIE**  
na nukleon



MNOŽSTVÍ ENERGIE UVOLNĚNÉ PŘI ŠTĚPENÍ  
TEŽKÝCH JADER

MNOŽSTVÍ ENERGIE UVOLNĚNÉ PŘI FÚZI  
LEHKÝCH JADER

## Deuterium

- Vodík s jedním neutronem
- 0.015 % v mořské vodě
- Poměrně rozvinuté technologie pro jeho získávání



## Tritium

- Vodík se dvěma neutrony
- Poločas rozpadu v řádu let
- V přírodě se běžně nevyskytuje
- Produkují jej některé typy štěpných reaktorů (CANDU)
- Bude se získávat z lithia přímo v reaktoru (hlavně)
- Li – rozvinutá těžba a recyklace



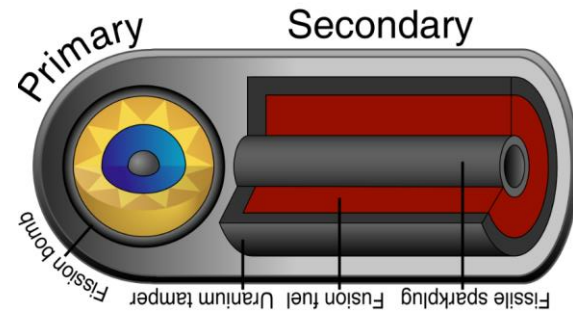
**Zásoby paliva při dnešní spotřebě: asi na 2x delší dobu než bude existovat Země....**

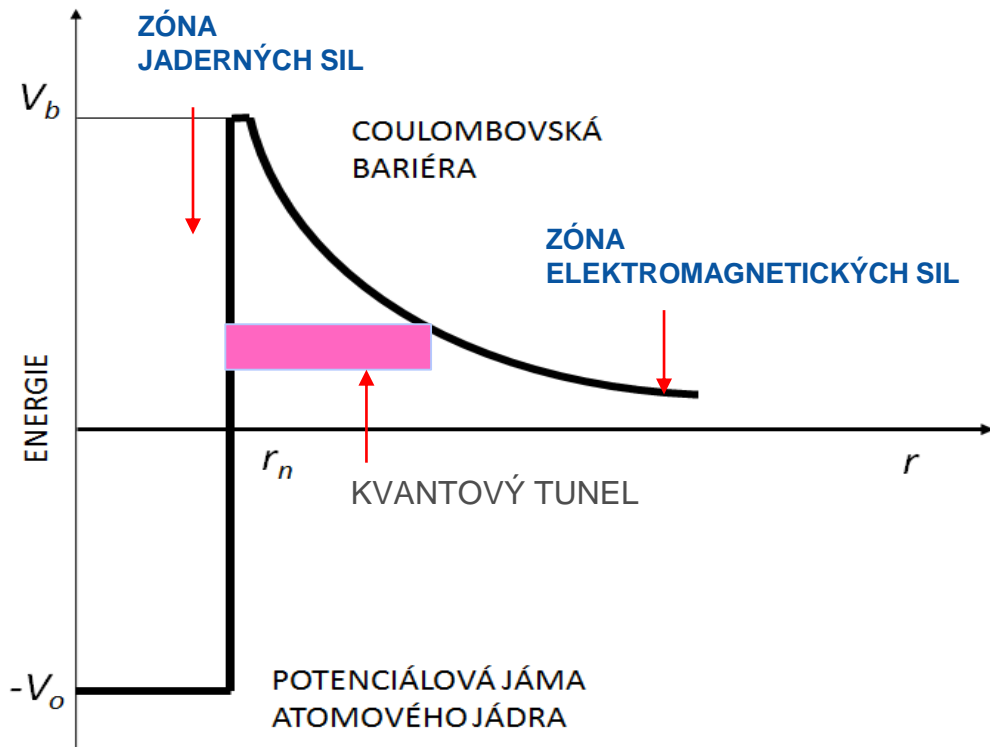
# Produkce energie fúzí na Zemi dosažena: Termojaderná bomba

**K dosažení tlaků a teplot využít štěpný  
jaderný výbuch – jinak nelze**

**Neřízená termojaderná fúze s velkou  
produkcí energie tedy dosažena byla...**

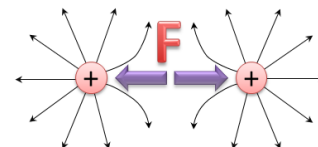
**Většina hlavic USA/Ruska je termojaderná**





$$F_e = \frac{1}{4\pi\epsilon_0\epsilon_r} \frac{|Q_1| \cdot |Q_2|}{r^2}$$

ODPUZOVÁNÍ  
ATOMOVÝCH  
JADER



## Hvězdy:

- Obrovský objem
- Obrovský tlak (velká hustota)
- Gravitační udržení
- Ne až tak velká teplota (10 milionů stupňů)
- Málo účinné fúzní reakce – dlouhověké hvězdy (proton-proton)
- Záření se v nich šíří velmi pomalu
- Fúze je zapálená – sama sobě zdrojem energie
- Existují volně v prostoru



## Reaktory:

- **Malý objem**
- Tlak daný magnetickým polem/setrvačností
- Magnetické/inerciální udržení
- **Vyšší teplota – 150 mil. stupňů**
- **Nejúčinnější možné fúzní reakce (D a T)**
- Většina záření uniká
- Je třeba vnější ohřev
- Plazma musí být uzavřeno v nějaké nádobě



PRO DOSAŽENÍ  
ENERGETICKÉHO ZISKU JE NUTNÉ SPLNIT  
SPECIÁLNÍ POŽADAVKY NA:

HUSTOTU ✓

TEPLITU ✓

DOBU UDRŽENÍ Energie (termoska) - ITER

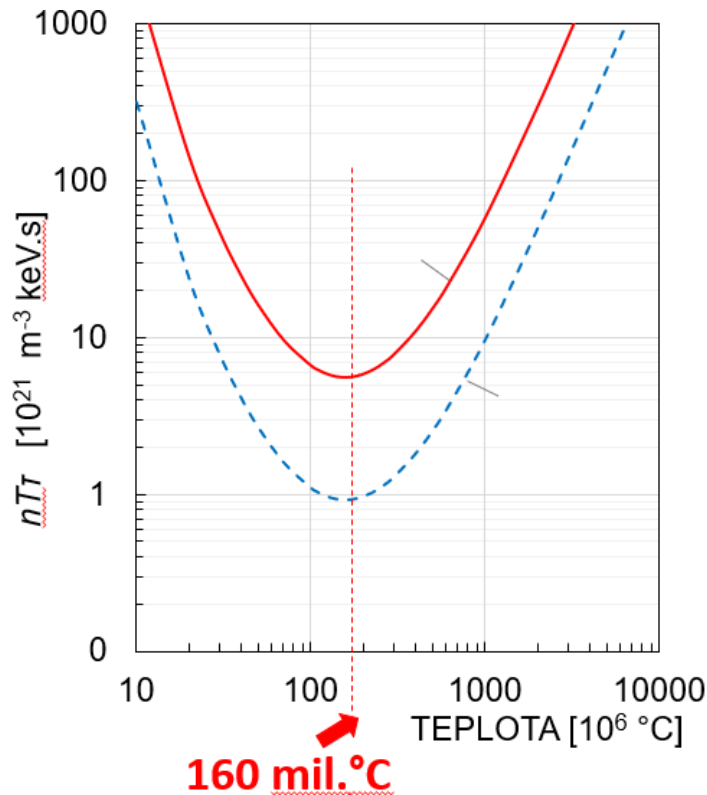
LAWSONOVO KRITÉRIUM

$$n\tau_E \geq f(T)$$

Trojný součin:

$$nT\tau_E \geq g(T)$$

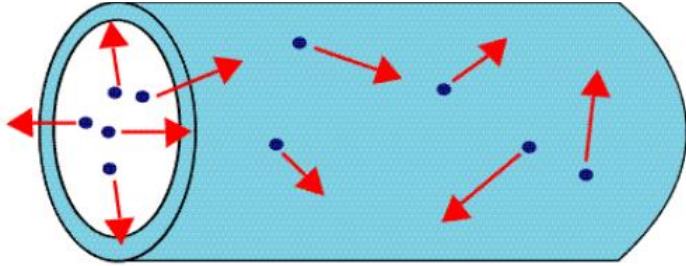
Nejsnažší oblast – minimum v teplotě



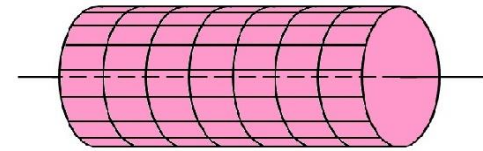
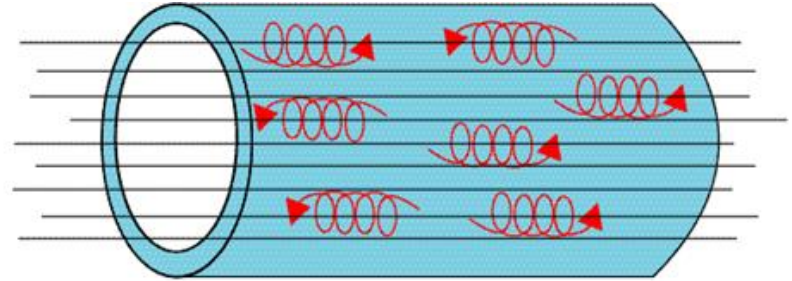


- Energie hvězd – termojaderná fúze
- Co je to plazma?
- Potřebujeme fúzi? Je výzkum moc drahý? Trvá moc dlouho?
- Principy termojaderné fúze, palivo, hvězdy vs. pozemské reaktory
- **Magnetické udržení: Tokamak, Stellarátor, Inerciální udržení**
- JET, ITER, NIF příchod soukromého kapitálu
- Kde všude najdete absolventy našeho oboru?

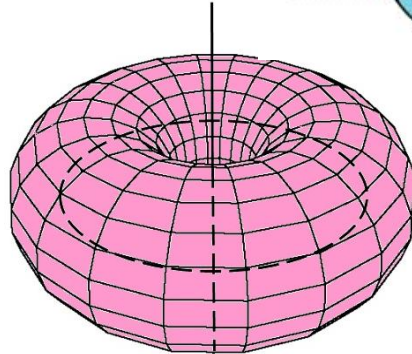
**PLYN nebo PLAZMA**



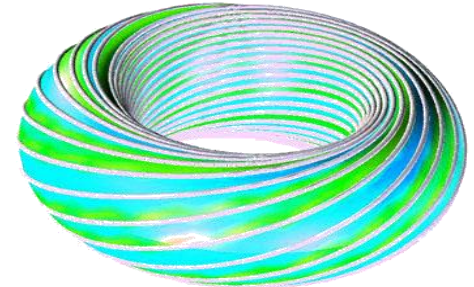
**PLAZMA V MAGNETICKÉM POLI**



**ZTRÁTY PŘES KONCE**

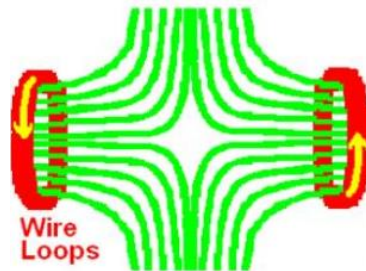
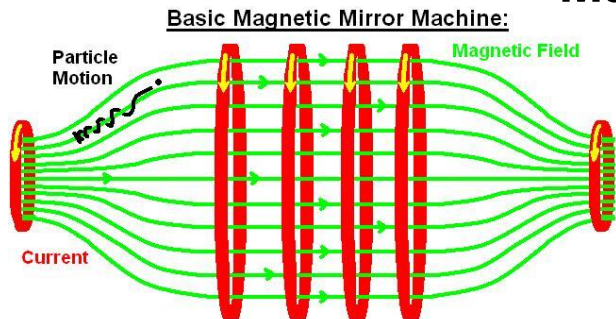


**ZTRÁTY DÍKY  
NEHOMOGENITĚ POLE**

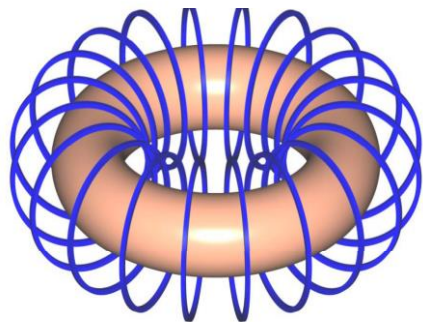


**HELIKÁLNÍ POLE –  
přirozená konfigurace**

## Magnetická zrcadla

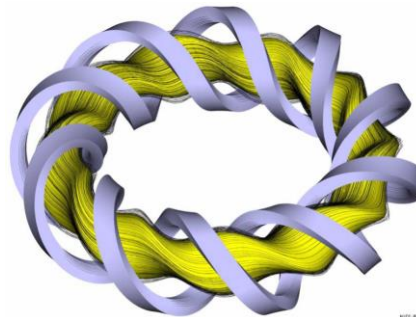


## TOKAMAK

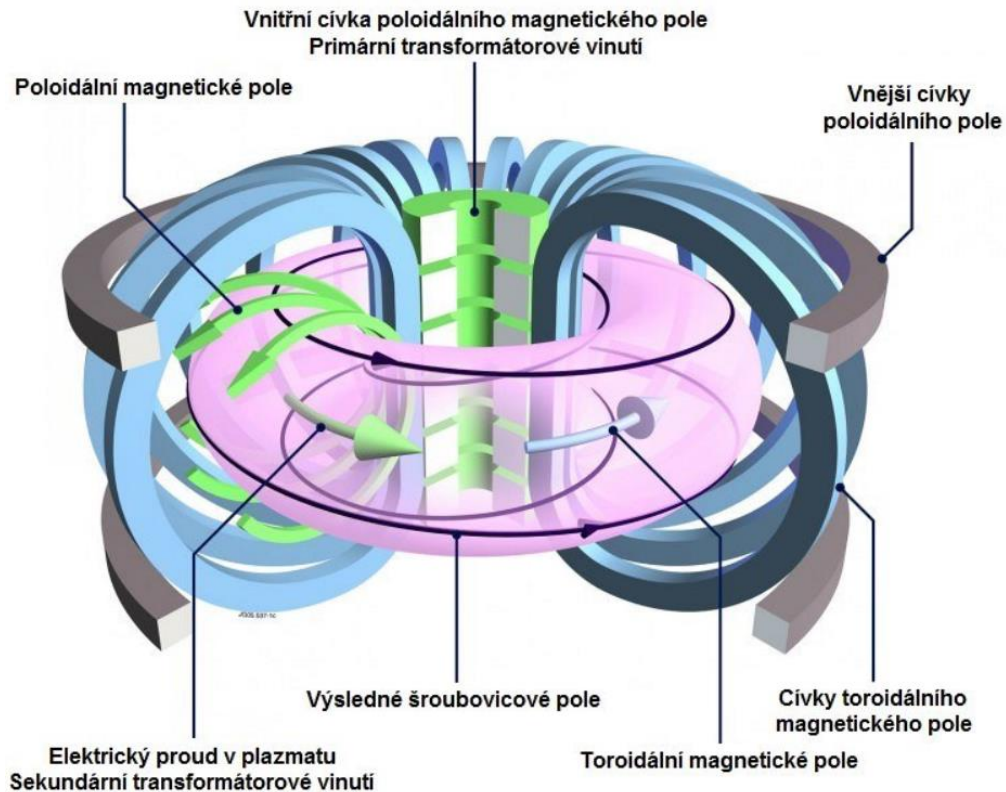


CÍVKY +  
PROUD  
PLAZMATU

## STELARÁTOR

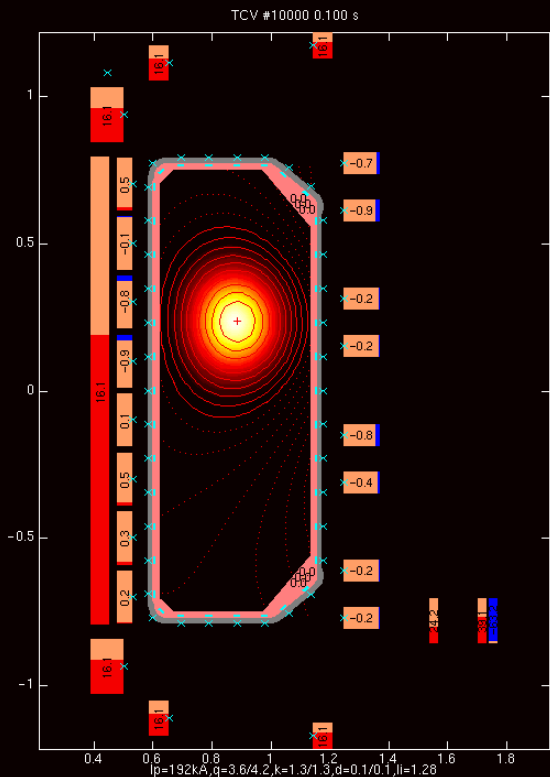


ZKROUCENÉ  
CÍVKY



## Recept na MCF reaktor:

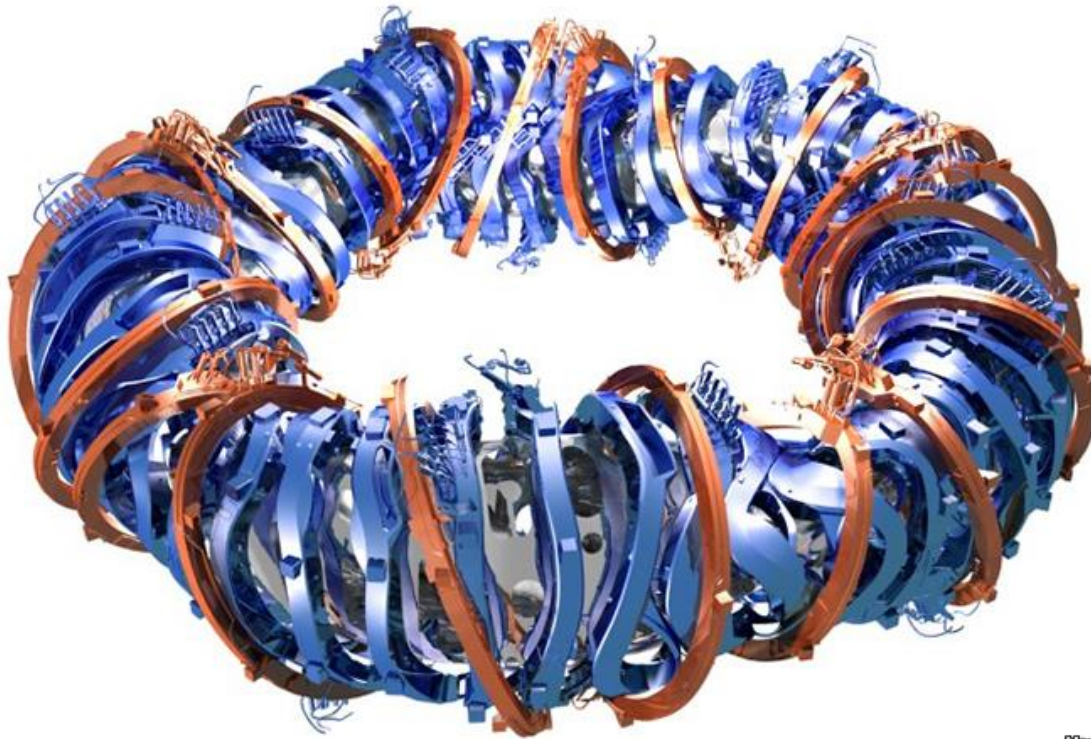
- Magnetická konfigurace
- Vakuum (vakuová nádoba)
- Palivo
- Ohřev



## Cívky

- Udržují částice uvnitř magnetické nádoby
- Generují proud v plazmatu
- Tvarují plazma
- Udržují polohu plazmatu vůči rychlým i pomalým nestabilitám

Rovnováha tlaku plazmatu a magnetických polí



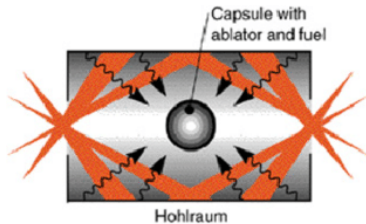
- Pole definované výhradně cívkami
- Proudů v plazmatu nežádoucích
- Složitost
- Experimentální výsledky teprve nyní potvrzují očekávání

News Promotions

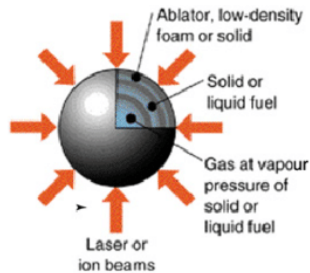
## Inerciální udržení – pouze setrvačnost - mikrovýbuchy

$$n\tau_E \geq f(T)$$

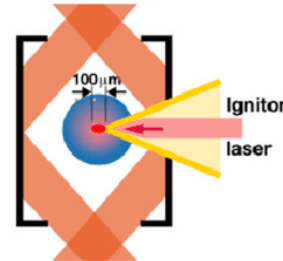
(a) Indirect drive



(b) Direct drive



(c) Fast Ignition  
Compression  
laser beams



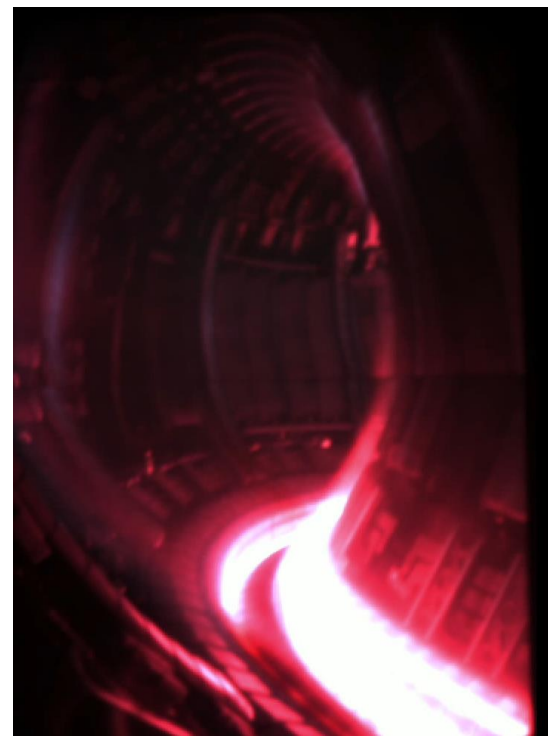
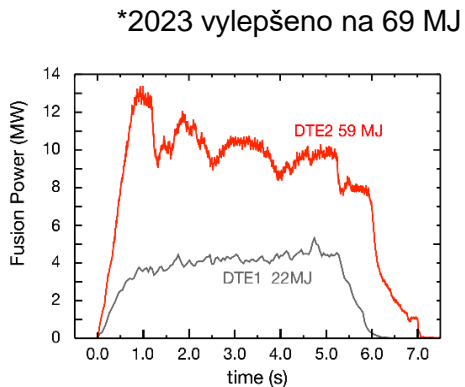
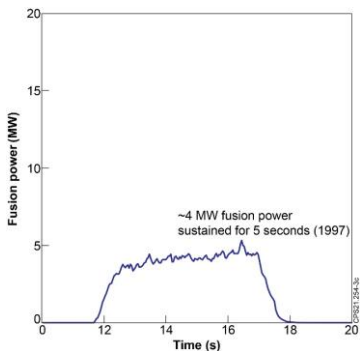
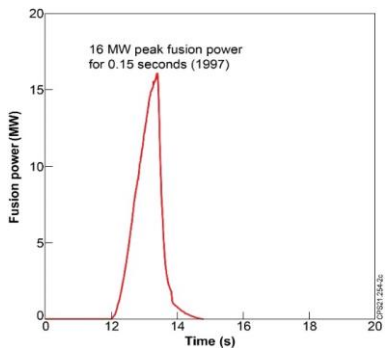
- Velmi mnoho způsobů
- Například komprese pomocí laserů/rentgenového záření
- Komprese pomocí svazků částic
- Trošku jiná definice faktoru zesílení než MCF
- Největší problém – nutnost 10/s, aktuálně 1/týden
- Částečně nebo úplně magnetizované plazma – různé druhy pinčů – na hraně s MCF

- Energie hvězd – termojaderná fúze
- Co je to plazma?
- Potřebujeme fúzi? Je výzkum moc drahý? Trvá moc dlouho?
- Principy termojaderné fúze, palivo, hvězdy vs. pozemské reaktory
- Magnetické udržení: Tokamak, Stellarátor, Inerciální udržení
- **JET, ITER, NIF, příchod soukromého kapitálu**
- Kde všude najdete absolventy našeho oboru?



1997 #42976    1997 #42982    2021 #99971

High power phase duration	~0.15 s	5 s	5 s
Average ion temperature	150 mil. K	50 mil. K	80 mil. K
Released fusion energy	13.8 MJ	21.7 MJ	59 MJ*
Peak fusion power	16.1 MW	5 MW	13 MW
Peak heating power	25.7 MW	24.6 MW	34 MW
Maximum gain $Q$	0.62	0.2	0.37



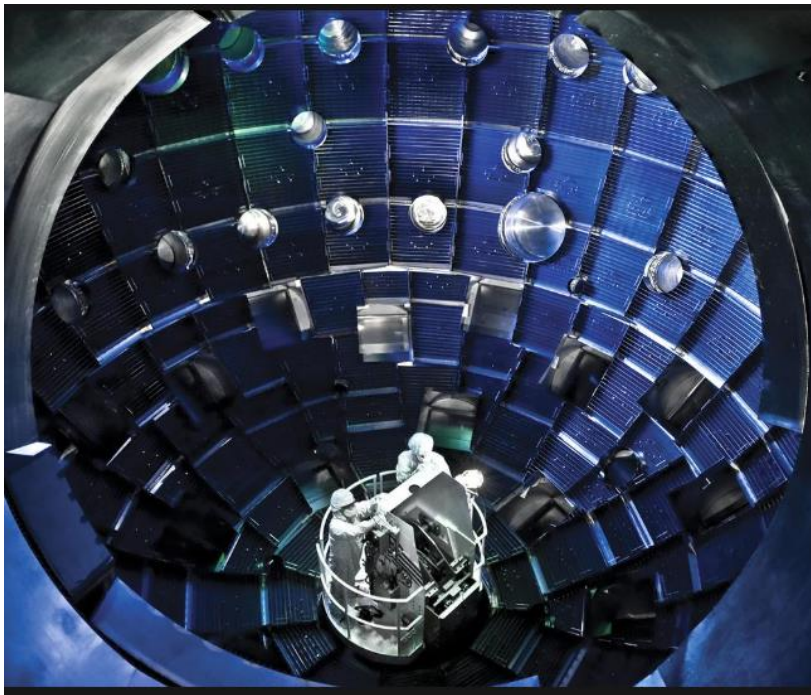
Data based on: (Kim, H.-T., et al., Nucl. Fusion 2020), (Keilhacker, M., et al., Philos. Trans. Royal Soc. A 1999), (Horton, L. D., et al., Nucl. Fusion 1999), DTE2 results press release



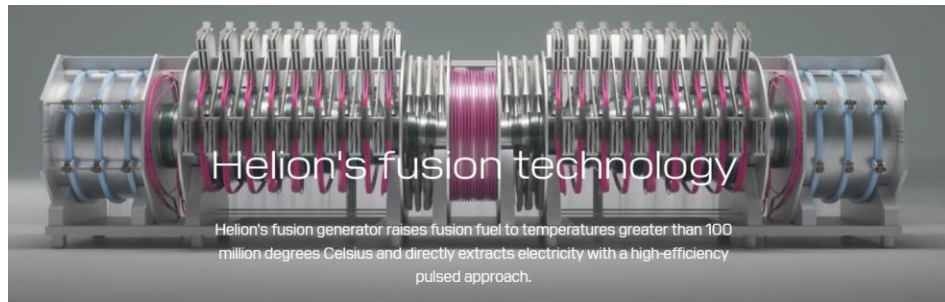
Q=10

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

Rekord ve fúzním zisku fúzní energie/absorbované energie z rentgenového záření ~3-4



- **Posledních 5 let**
- **Velcí investoři (Google, MS, ...)**
- **Staré nápady s novým elánem**
- **Nové nápady více či méně reálné**
- **Skutečné inovace pro aktuální projekty – HTS (CFS, Tokamak Energy)**
- **Možná bude fúzní elektrárna už letos v létě? Helion Energy 😊**



- Energie hvězd – termojaderná fúze
- Co je to plazma?
- Potřebujeme fúzi? Je výzkum moc drahý? Trvá moc dlouho?
- Principy termojaderné fúze, palivo, hvězdy vs. pozemské reaktory
- Magnetické udržení: Tokamak, Stellarátor, Inerciální udržení
- JET, ITER, NIF, příchod soukromého kapitálu
- **Kde všude najdete absolventy našeho oboru?**

- **Ondřej Kudláček – Feedback control pro ITER (IPP Garching, DE)**
- **Michal Kazda – CEO MIFRE Energy (obnovitelné zdroje, jaderná energetika)**
- **Michal Odstrčil – XUV litografie AMSL/Zeiss, DE**
- **Tomáš Odstrčil - tokamak DIII-D, USA**
- **Michal Šmíd – laserové plasma Helmholtz Zentrum Dresden, DE**
- **Martina Žáková – medicínské aplikace v ELI Beamlines**
- **Ondřej Grover – tokamak ASDEX-Upgrade (DE), Bernard Bigot grant**
- **Jaroslav Krbec, Pavel Háček, Martin Imříšek, Tomáš Markovič,... – design COMPASS-U (ÚFP)**
- **Jan Prokůpek – fúzní projekty v CV Řež**
- **Ondřej Ficker – koordinátor experimentů s disrupcemi a RE v Evropě (JET, AUG, TCV)**
- **Další absolventi se uplatnili v oborech jako:**

**Elektronová mikroskopie, Autonomní řízení automobilů, Poradenství v oblasti systémového inženýrství ve Francii, Outdoorový magazín/web, ....**

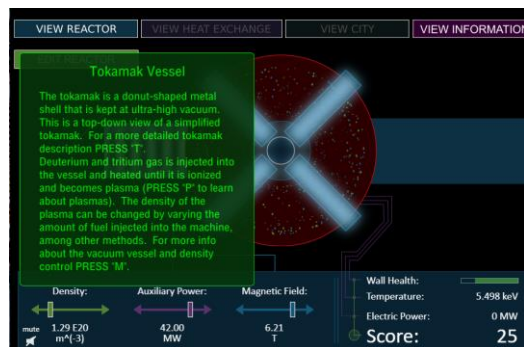
- Energie hvězd
  - Podstatu známe teprve chvíli, ale je velkou inspirací
- Co je to plazma?
  - Systém nabitých částic, kolektivní chování, něco víc než 4. skupenství
- Potřebujeme fúzi? Je výzkum moc drahý? Trvá moc dlouho?
  - ANO, NE!, NE
- Principy termojaderné fúze, palivo, hvězdy vs. pozemské reaktory
  - $E=mc^2$ , paliva je dost, máme to těžší než hvězdy, hustota\*doba udržení
- Magnetické udržení: Tokamak, Stellarátor, Inerciální udržení
  - Magnetické pole spoutá částice: Donut, pomačkaný donut, kapesní termojaderná bomba
- JET, ITER, NIF, příchod soukromého kapitálu
  - JET: rekord v Energii, prostě ITER – WOW!, NIF: rekord v zisku, soukromý kap.: důležitý zlom, ale...
- Kde všude najdete absolventy našeho oboru?
  - Skoro všude a tam najdete práci i vy 😊

## Hry/aplikace:

Operation tokamak – android, iOS



PPPL IPPEX – webový prohlížeč (<https://ippex.pppl.gov/#vt>)



Materiály od organizace FuseNet pro střední školy

5 modulů:

[https://fusenet.eu/education/material?search=&type=for\\_educators](https://fusenet.eu/education/material?search=&type=for_educators)

Budou přeloženy/pro nadané studenty v angličtině