



aneb co se skrývá za projekty  
ELI A HiLASE

Jiří Limpouch  
([jiri.limpouch@fjfi.cvut.cz](mailto:jiri.limpouch@fjfi.cvut.cz))

## Týden vědy na FJFI, 14. 6. 2015 v Praze

Fakulta jaderná a fyzikálně inženýrská ČVUT, Břehová 7, Praha 1  
katedra fyzikální elektroniky, Trojanova 13, Praha 2 a V Holešovičkách 2, Praha 8

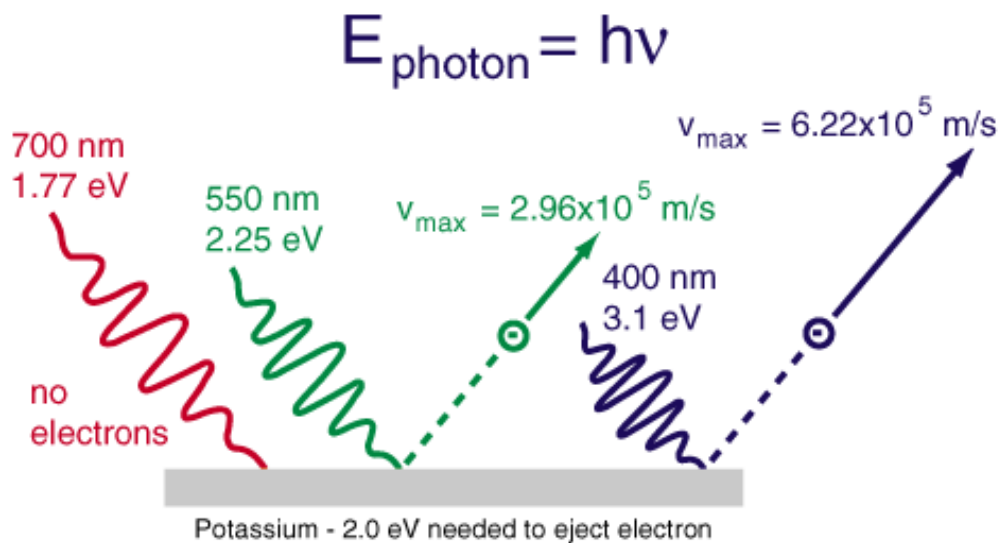
# O čem si budeme povídat ?

- Co je světlo a co je laser?
- Co je elektromagnetická vlna?
- Jak laser funguje? Jak se zesilují krátké laserové impulsy?
- Jaký vypadají malé a velké impulzní lasery v ČR a ve světě?
- Jak bude vypadat laser ELI?
- Co se stane, když laserový svazek dopadne na terč?
- Co je to plazma? K čemu bude laser ELI sloužit?
- Projekt HiLASE – vývoj impulzních laserů s vysokou opakovací frekvencí pro průmyslové aplikace

# Co je světlo a co je laser?

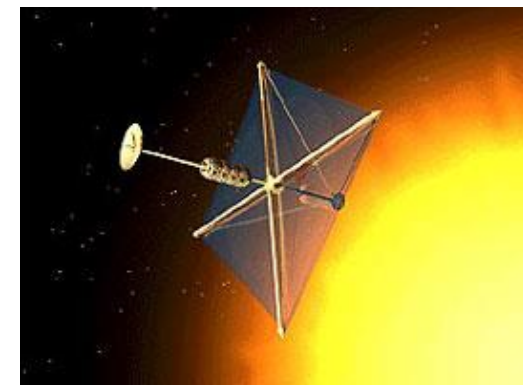
- **Laser** (akronym „**L**ight **A**mplification by **S**timulated **E**mission of **R**adiation“ – česky zesilování světla stimulovanou emisí záření)
- Je to optický zdroj **elektromagnetického záření** (což je světlo v širším slova smyslu) a má následující důležité vlastnosti:
  - Je vyzařováno ve formě **úzkého svazku**
  - Je **monochromatické** (tzn. česky má jednu barvu)
  - Je **koherentní**

- Světlo má dvojí povahu - **dualita**
  - **Částicovou** – fotoelektrický jev (částice světla – **fotony**, mají danou energii **E** a hybnost **p**)

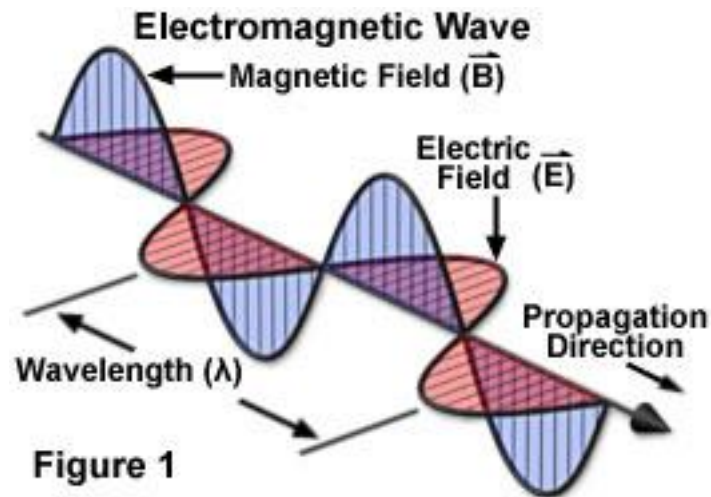
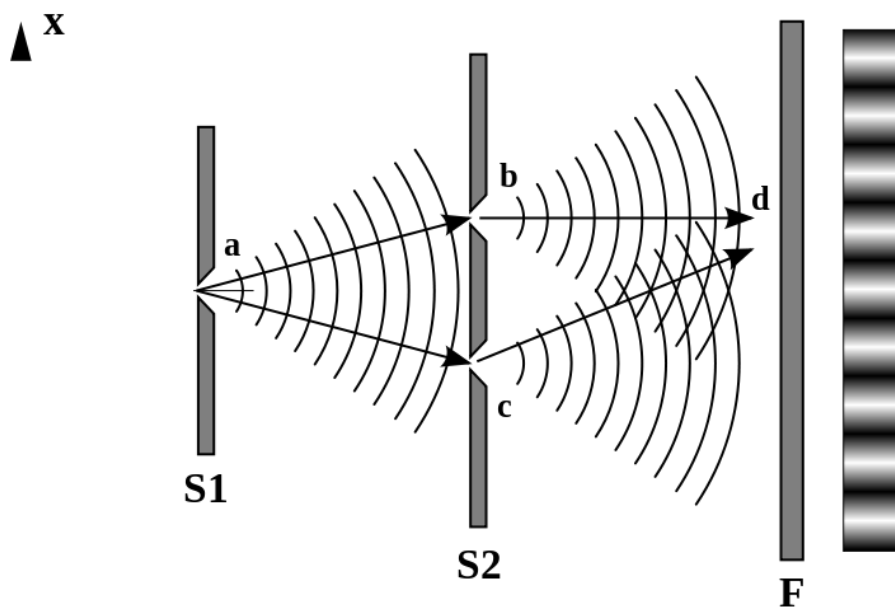


## Photoelectric effect

Záření má hybnost - existuje **tlak záření** (hybnost za sekundu na jednotku plochy)

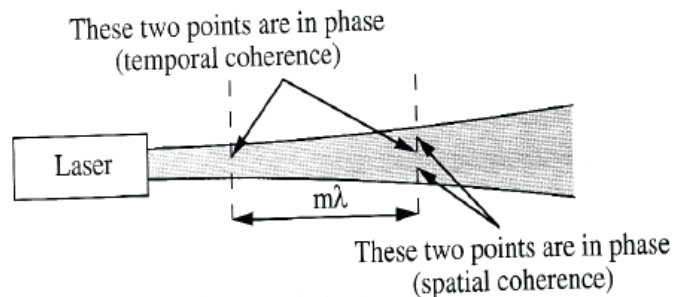
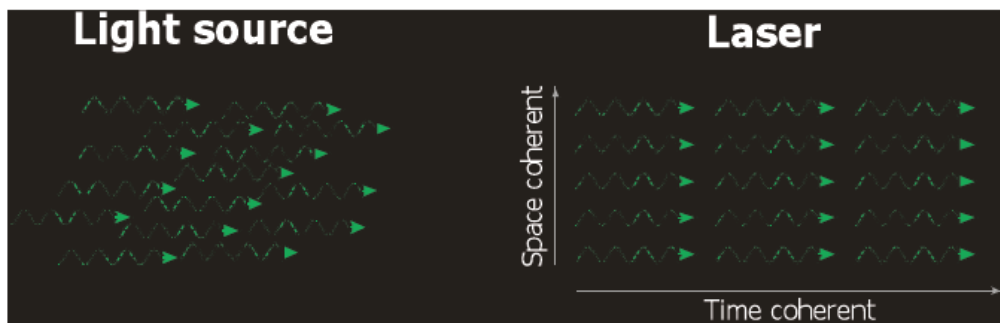
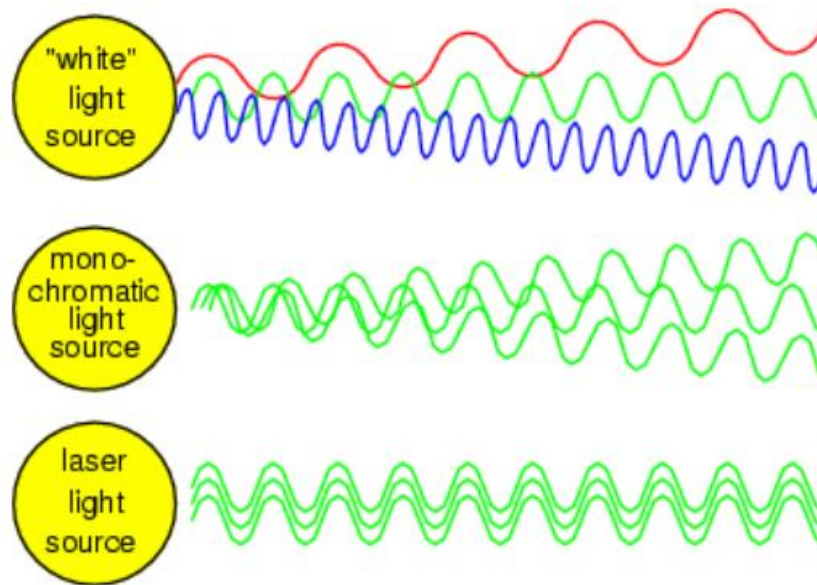


- Světlo má dvojí povahu – **dualita**
  - **Vlnovou** – štěrbinový experiment (elektromagnetické vlny mají vlnovou délku  $\lambda = h/p$  a frekvenci  $\nu = E/h$ )



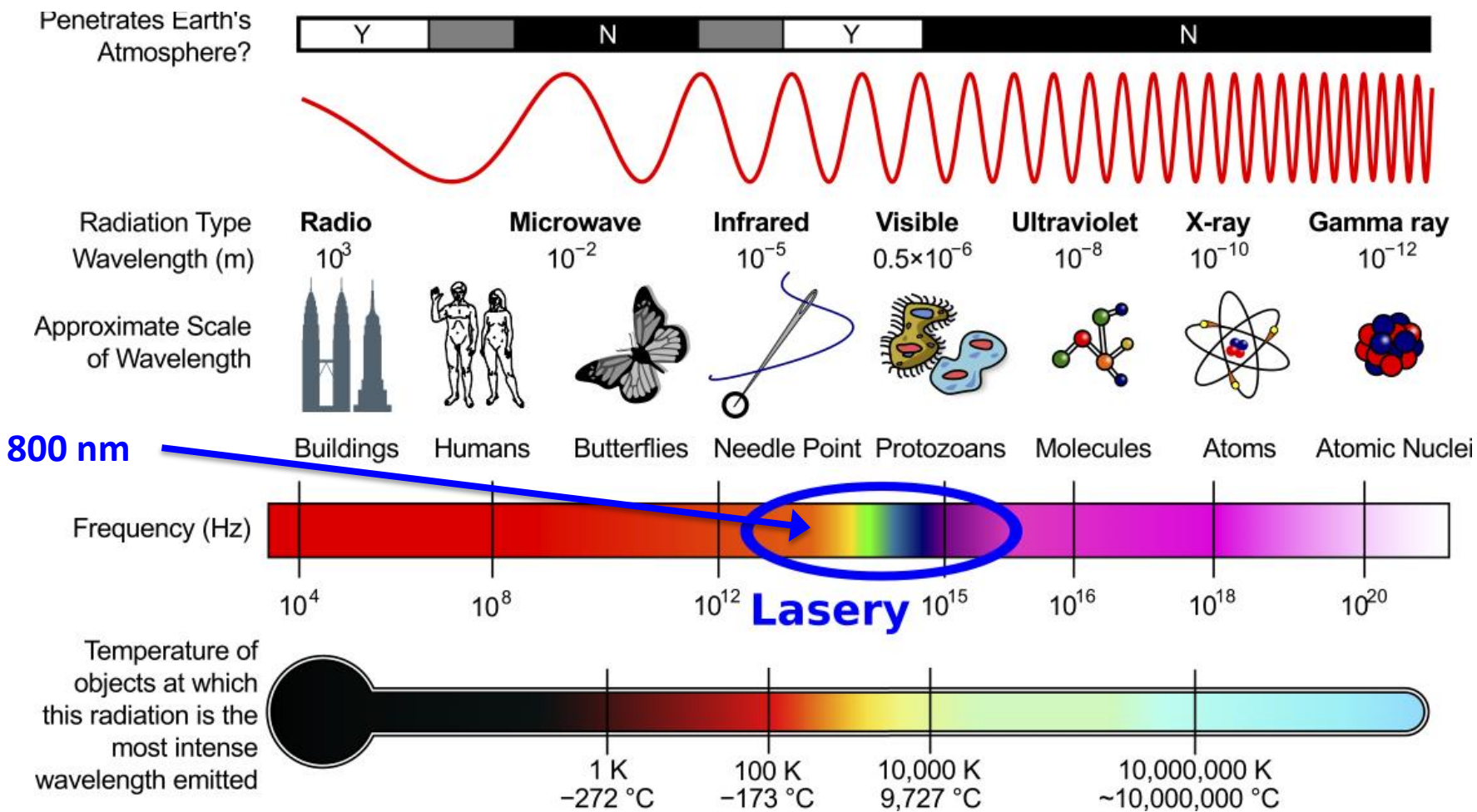
# Další vlastnosti las. záření

- **Monochromaticita**  
všechny vlny mají stejnou vlnovou délku
- **Koherentnost**  
vlny mají stejnou fázi



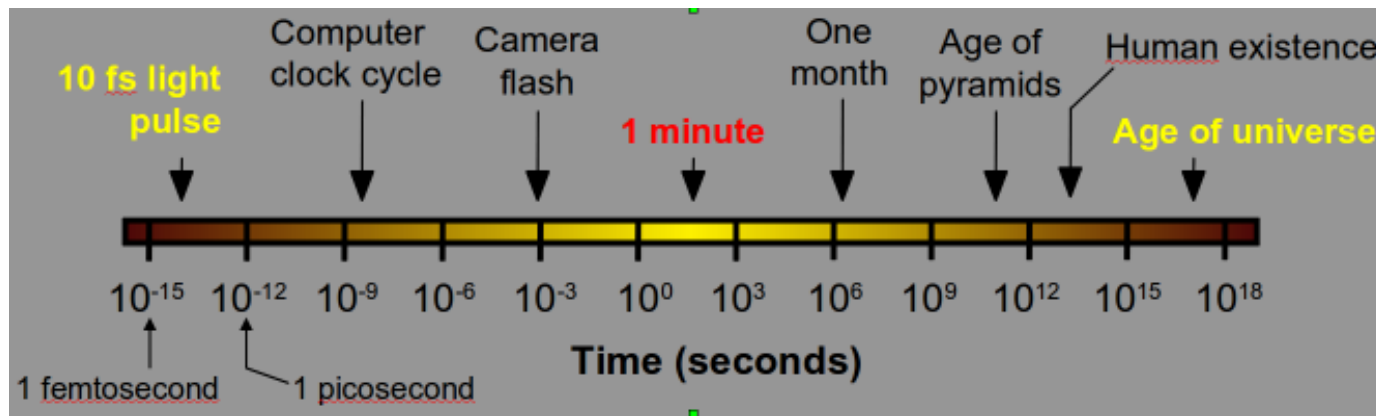


# Vlnová délka – prostorové měřítko



# Délka impulsu – časové měřítko

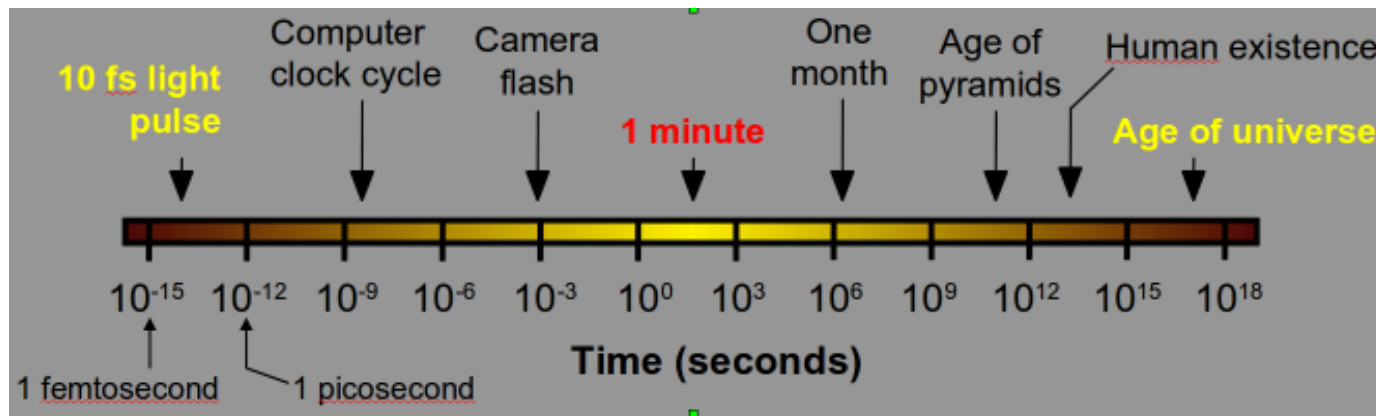
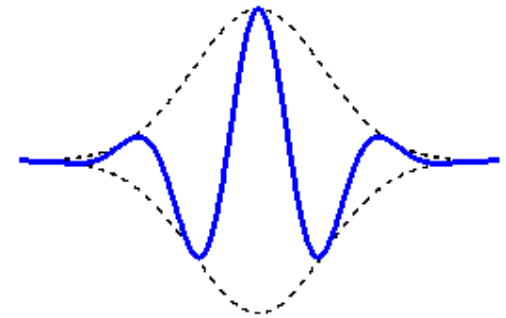
- Optické lasery – periody řádu jednotek fs (2.7 fs pro 800 nm)
- 1 fs je stejná část minuty jako minuta část věku vesmíru
- Impulsní lasery – délka impulsů ns-ps, v posledních 20 letech i desítky fs





# Délka impulsu – časové měřítko

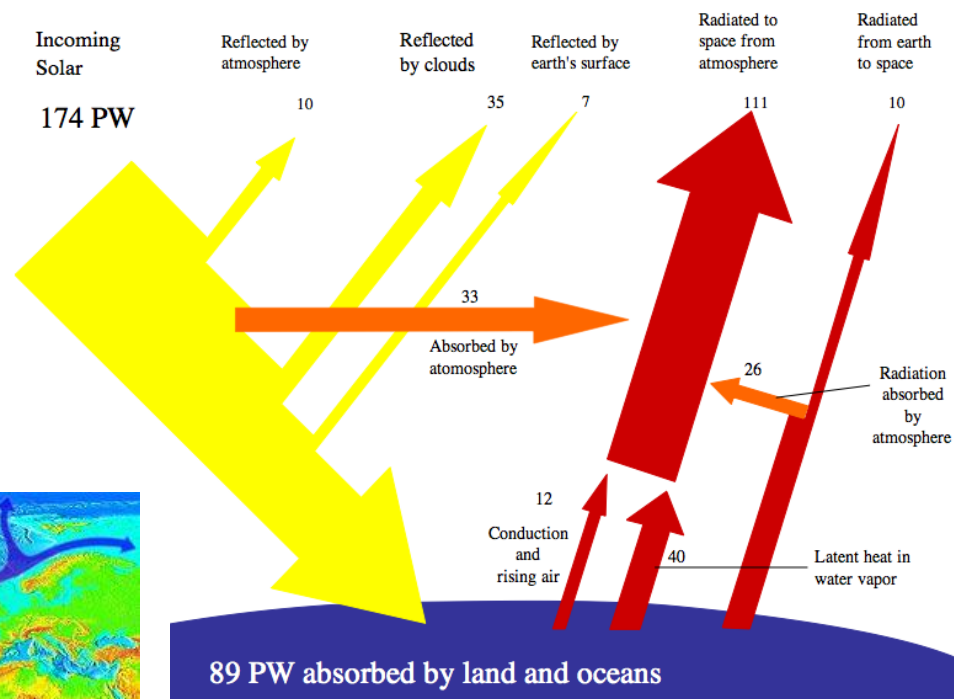
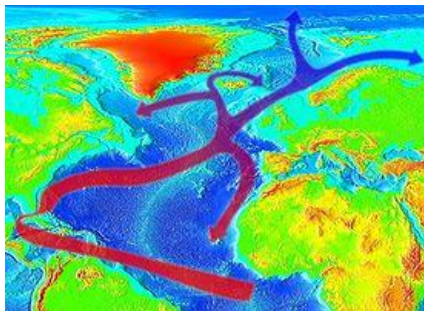
- Dnes nejkratší laserové impulsy 5 fs (2 periody)
- Kratší impulsy lze získat HHG -  $N(h\nu) \rightarrow h(N\nu)$
- 1 ns impuls  $\rightarrow$  30 cm balík fotonů,  
1 fs impuls  $\rightarrow$  0.3  $\mu\text{m}$  balík fotonů



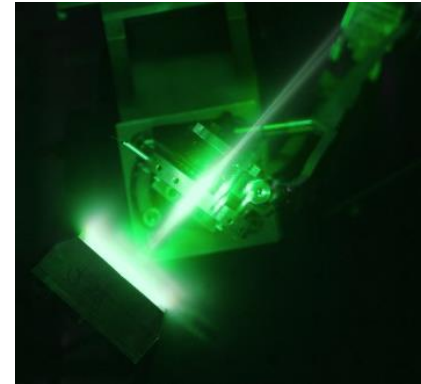
- Energie fotonu jednotky eV (1.55 eV),  $10^{19}$  fotonů na J.
- Největší dosažená energie laserového pulsu – 26 kJ.
- Kinetická energie náboje vystřeleného z pušky M16 – 1.8 kJ.
- Laser NIF se 192 laserovými svazky má cca 1.8 MJ.
- Pro srovnání přibližná nutriční hodnota tyčiny Snickers 1.2 MJ.
- Průměrná energie blesku 1 GJ.



- Krátká doba trvání - vysoký výkon i při nízké energii.
- Např.  $10 \text{ mJ} / 10 \text{ fs} = 1 \text{ TW}$   
(1000 bloků Temelína z laseru na větším stole!)
- Dnes lasery o výkonu 1 PW.
- Tepelný výkon Golfského proudu 1.4 PW.

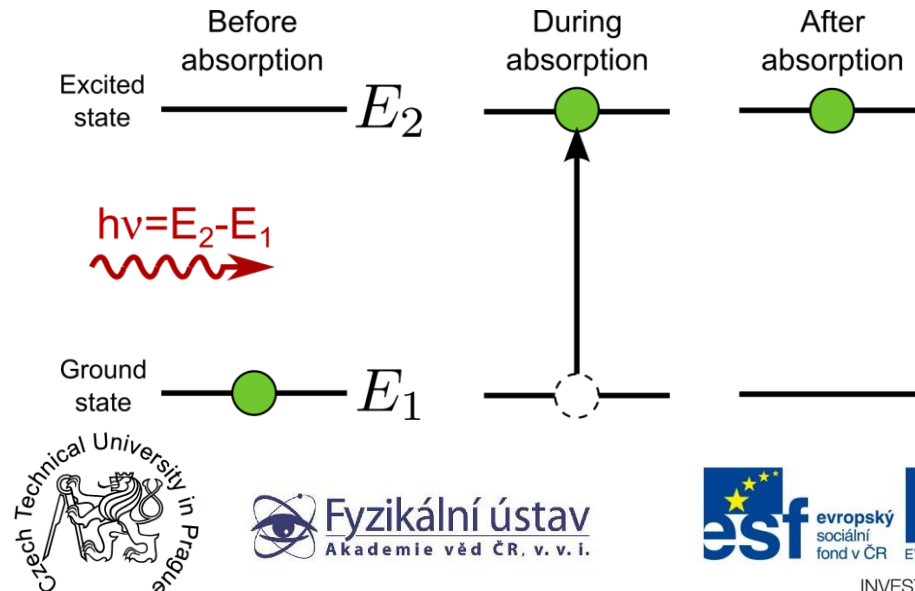


- **V ELI – Beamlines lasery o špičkových výkonech až 10 PW!**
- Fokusace do oblasti několika  $\mu\text{m}^2$  -  $10^{24}$  W/cm<sup>2</sup>.
- Materiál se začíná odpařovat při  $10^{13}$  W/cm<sup>2</sup> (u krátkých fs pulsů, u delších pulsů stačí  $10^9$  W/cm<sup>2</sup>).
- Na zemi je intenzita slunečního světla 0.1 W/cm<sup>2</sup>.
- ELI je veškerý vyzářený výkon slunce (tj. cca  $10^{26}$  W) v ploše 10 x 10 cm!



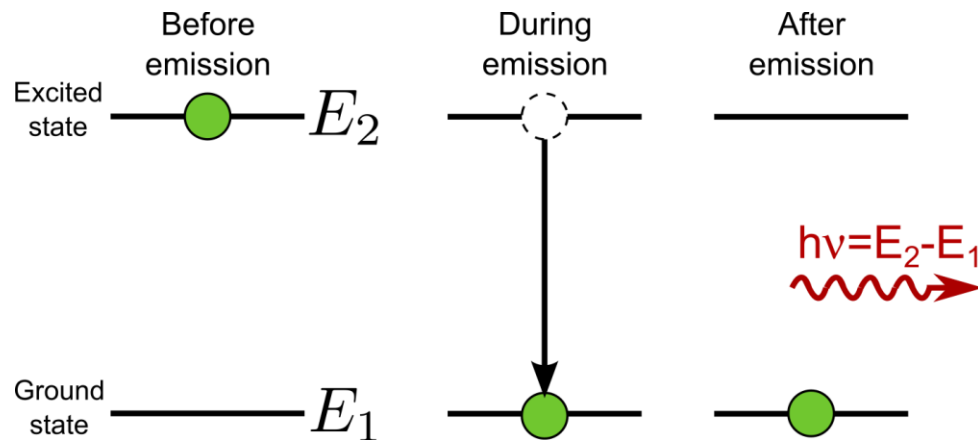
# Generace laserového záření

- Pro generaci laserového záření jsou důležité 3 procesy.
- **Absorpce** – molekula/atom získá energii a přejde do excitovaného stavu.
- Může se jednat o změnu vibrace nebo rotace molekuly, přechod elektronu na jinou hladinu atomu.



# Generace laserového záření

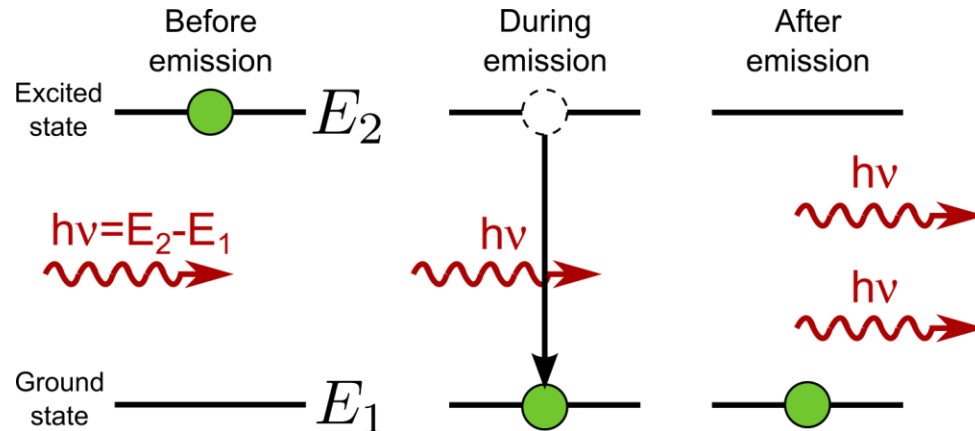
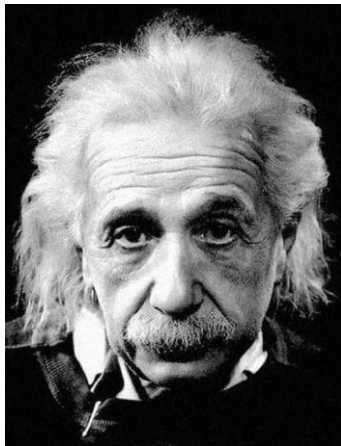
- Excitovaný stav je nestabilní.
- Po určité době přechází samovolně molekula/atom zpět do původního stavu a vyzáří zpět kvantum energie – foton.
- Tento samovolný proces se nazývá **spontánní emise**.





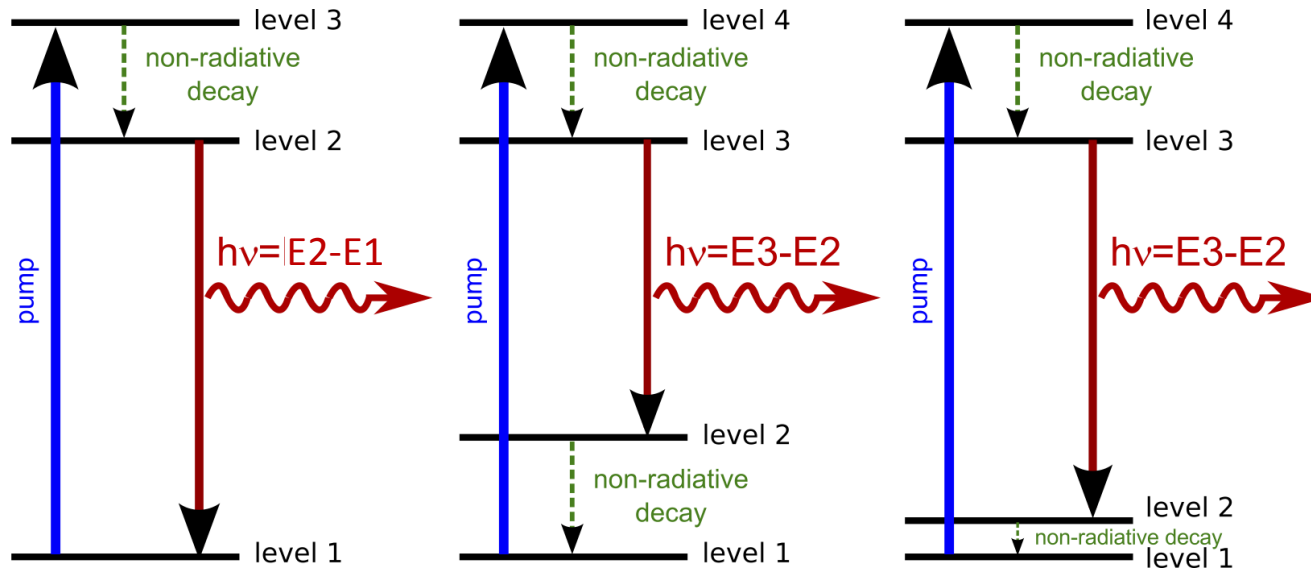
# Generace laserového záření

- Pro nás je důležitý proces tzv. **stimulované emise** (1917).
- Molekula/atom v excitovaném stavu a v těsné blízkosti kolem ní/něj letí foton s energií rovnou energii přechodu.
- **Vyzáření fotonu se stejnou fází a stejnou energií!**

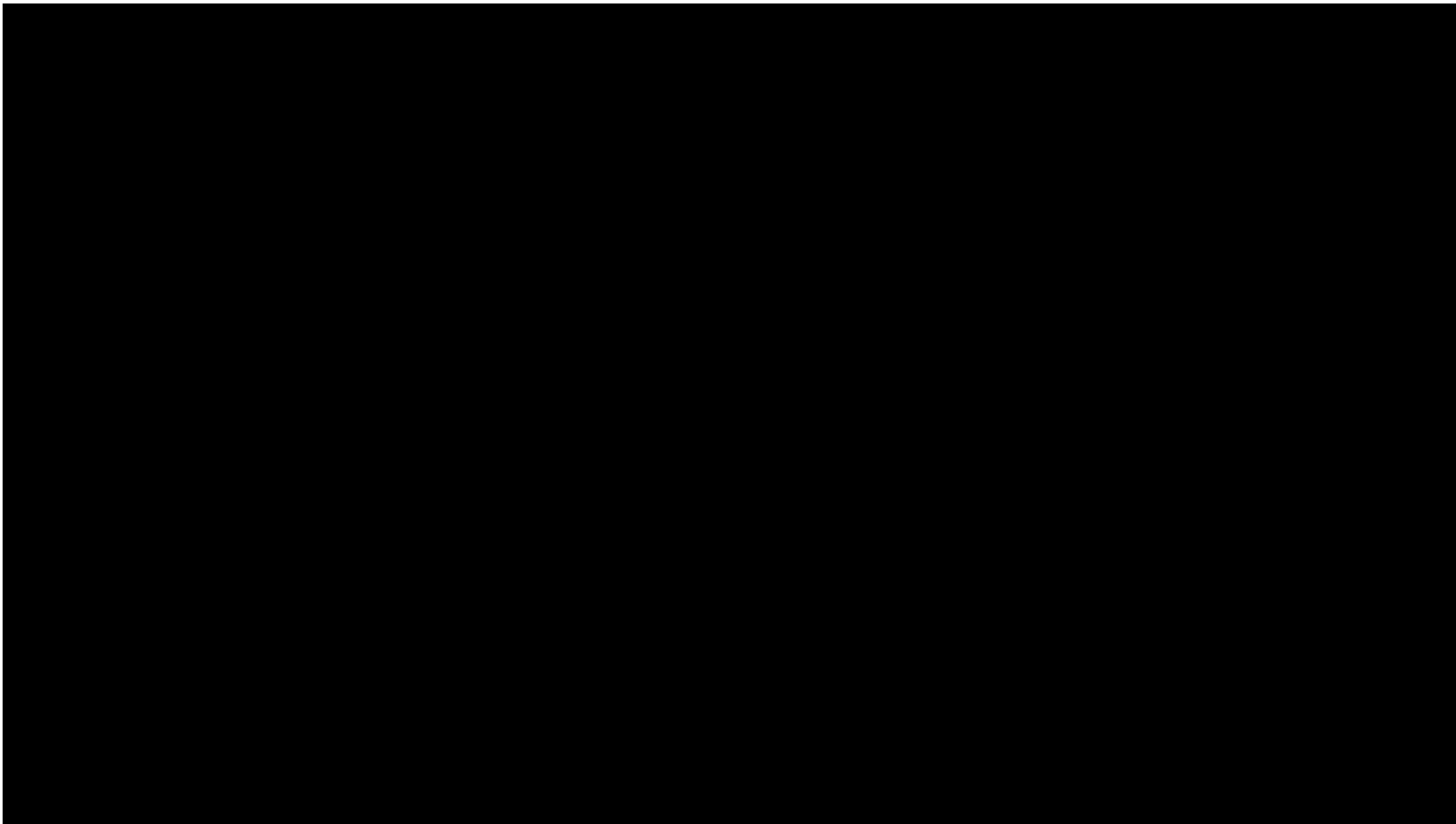


# Inverze populace

- K dosažení **inverze populace hladin** (více elektronů na horní hladině než na spodní) třeba alespoň 3 energetických hladin.



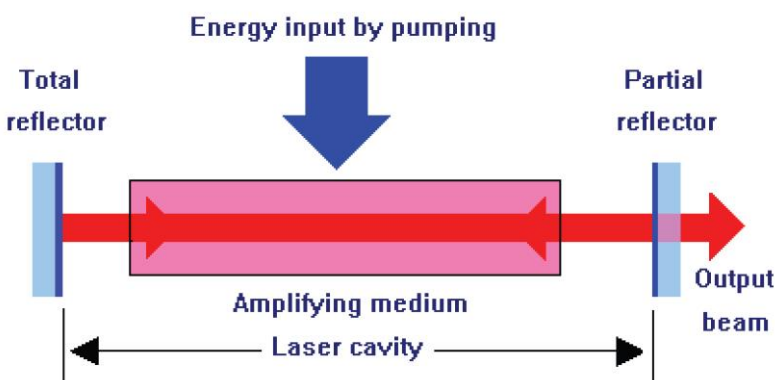
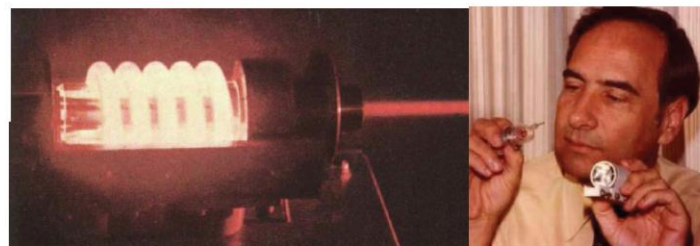
# Jak tedy laser funguje?



# Základní schéma laseru

**L**aser – **L**ight **A**mplification by **S**timulated **E**mission of **R**adiation

Princip laseru – laserový oscilátor  
– obvykle otevřený rezonátor



Čerpání (pumping) – energie dodávaná aktivnímu prostředí (amplifying medium) tak, aby bylo dosaženo inverze mezi spodní a horní laserovou hladinou

V rezonátoru může být mnoho módů podélných (s nepatrně různými frekvencemi uvnitř šířky čáry přechodu) a příčných (s různým

rozložením intenzity v průřezu rezonátoru-základní příčný mód bývá  $TE_{00}$ )

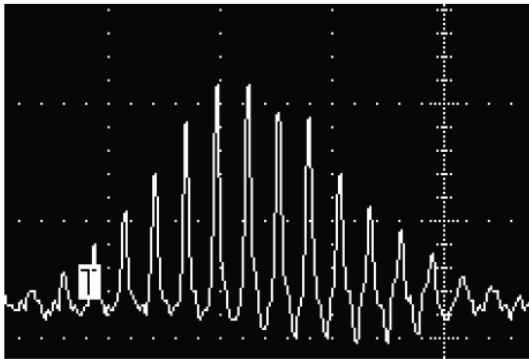
Takový jednoduchý oscilátor generuje buď v kontinuálním režimu nebo dlouhé pulsy ( $\sim$ ms) – režim volné generace (free-running)

Výkonové lasery – oscilátor + zesilovače (jedno a víceprůchodové)

# Generace kratších impulsů

**Q-spínání** (Q-switching - generace gigantických impulsů) – do oscilátoru je vložen prvek (aktivní nebo pasivní), který na počátku nedovoluje laserovému záření průchod rezonátorem (oscilátor zavřen) - čerpání pak zvyšuje inverzi, ve vhodnou chvíli rezonátor je rezonátor otevřen a energie aktivního prostředí se rychle vyzáří  
 Typická délka pulsu  $\sim 10$  ns – závisí na typu aktivního prostředí – puls je obvykle  $\geq$  doba průchodu světla tam a zpátky rezonátorem (round-trip)

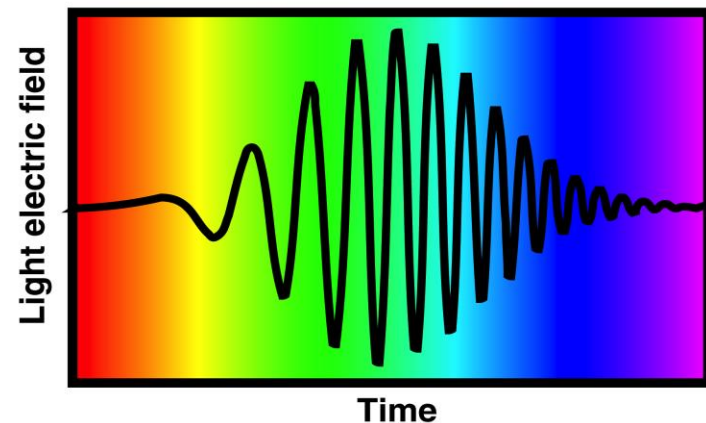
**Synchronizace módů** (mode locking) – v rezonátoru je prvek přes který světlo lépe prochází při zvýšení jeho intenzity (pasivní - například saturovatelný absorbér) nebo otevírá laser periodicky na krátkou dobu s periodou round-tripu (aktivní) – pak rezonátorem prochází krátký puls (nebo 2) jehož část je vyzářena vždy při jeho dopadu na polopropustné zrcadlo – vzniká posloupnost (train) krátkých impulsů – typická délka pulsu 10-100 ps (někdy i kratší  $\rightarrow$  10 fs)



Jednotlivý puls lze získat vyřezáním pomocí nějakého elektro-optického prvku

# Zesilování krátkých impulsů

- Velikost a cena laseru roste s **energií** laserového impulsu
- Velmi krátký impuls – vysoký výkon při relativně malé energii
- **Ale** –  $\exists$  prahová intenzita ( $\text{W}/\text{cm}^2$ ) poškození zesilovače
- U velkých nanosekundových laserů – velký průřez svazku (např. Nd-laser NOVA používal diskové zesilovače o průměru 1 m)
- V 80. letech uměli generovat **nJ fs** impulsy, ale **neuměli je zesílit**
- Je třeba impuls prodloužit, zesílit a potom komprimovat
- Zesilování čirpovaného impulsu  
CPA (chirped pulse amplification)



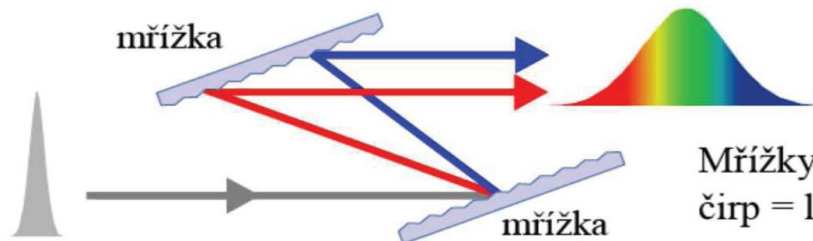


# Zesilování fs impulsů

D. Strickland and G. Mourou - 1985

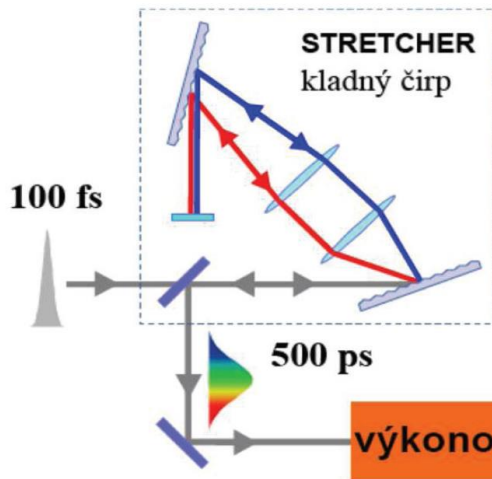
D. Strickland, G. Mourou – 1985

zesilování čirpovaného pulsu



$$\text{Carrier : } \omega = \omega_0 + \beta t$$

Mřížky způsobí zpoždění závislé na frekvenci  
čirp = lineární změna frekvence,  $d\omega/dt = \beta$  (zde  $\beta < 0$ )

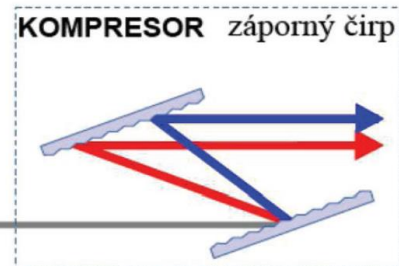


**čirpovaný výkonový laser na Nd:skle**

Minimální délka laserového pulsu:

$$\tau \cong 1/\Delta\nu = 1/(2.5 \text{ THz}) \cong 400 \text{ fs}$$

~400 fs



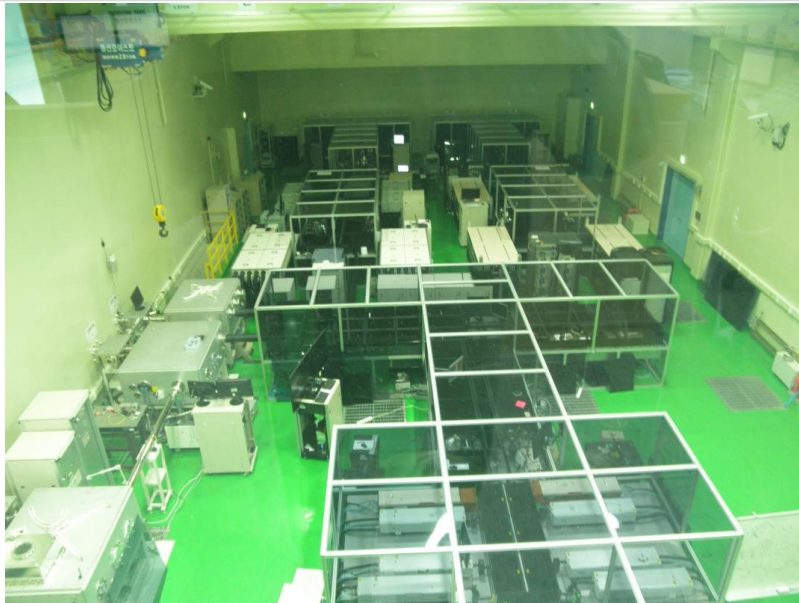
Kratší impulsy – Titan-safírový laser –  $\lambda \cong 800 \text{ nm}$ ,  $\Delta\nu = 100 \text{ THz}$  ( $\Delta\nu/\nu \cong 0.1$ ),  
minimální délka impulsu  $\approx 5 \text{ fs}$  (obvykle u výkonových  $\geq 30 \text{ fs}$ )

Lze též v nelineárních krystalech přelévat energii z jednoho laseru do druhého –  
**OPCPA** (optical parametric chirp pulse amplification) - a tak zkrátit impuls



0.1 TW Ti:Safírový laser na **KFE FJFI ČVUT** v Praze (65 fs, 10 mJ, 10 Hz, 3 krabice 6 x 120 cm), zdroj pro oscilátor, zdroj pro zesilovač s chlazením, řídicí jednotka, kupní cena cca 5 mil. Kč

- Na stůl na obr. by se vešel i laser 10 mJ / 1 kHz nebo 100 mJ / 10 Hz (1 TW)
- Na 2 stoly – 10 TW / 10 Hz nebo 100 TW / 1 Hz
- Při průměru ohniska 10 μm je fokální plocha 10<sup>-6</sup> cm<sup>2</sup> (i 10<sup>-5</sup> cm<sup>2</sup> je dosažitelné)
- Maximální intenzita  $I = P/S = 1 \text{ TW} / 10^{-6} \text{ cm}^2 = 10^{18} \text{ W/cm}^2$  (relativistická intenzita)



Titan-safírový laser v APRI GIST Gwangju, Jižní Korea – 2 svazky, každý 30 J/30 fs, 0.1 Hz, max. intenzita  $5 \times 10^{20}$  W/cm<sup>2</sup> (v budoucnosti bude zvýšena zmenšením ohniska), nanosekundový kontrast  $> 10^{11}$  (s dvojitým plazmovým zrcadlem), max. 200 výstřelů denně kvůli radiační bezpečnosti, ve spolupráci prováděny některé přípravné experimenty pro ELI





# Vývoj intenzity

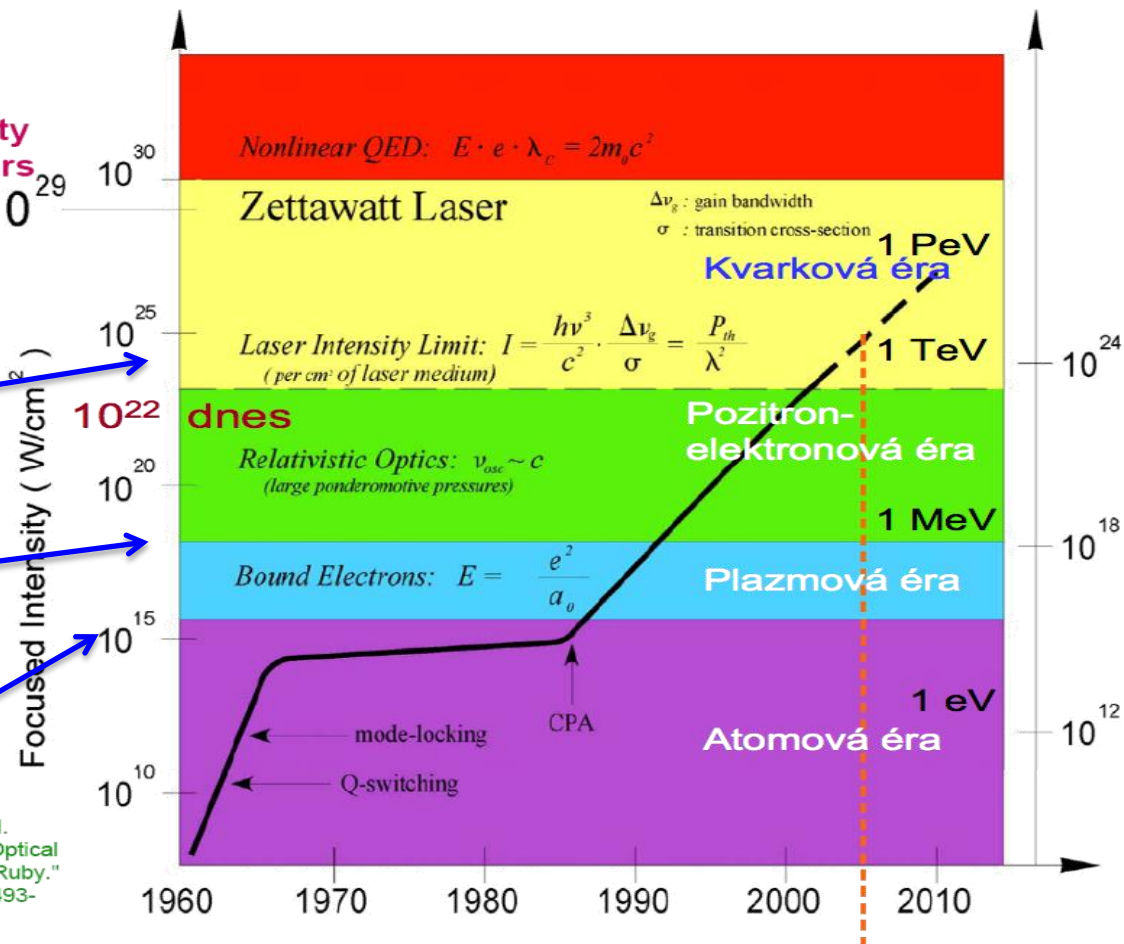
- Schwingerův limit  $\rightarrow 10^{29}$
- Radiační útlum  $\rightarrow 10^{22}$
- Relativita  $\rightarrow 10^{15}$
- Ionizace palem  $\rightarrow 10^{10}$

Laser Intensity vs. years

Maiman, T. H. "Stimulated Optical Radiation in Ruby." *Nature* 187, 493-494, 1960

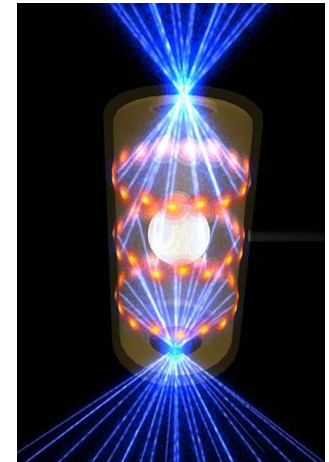
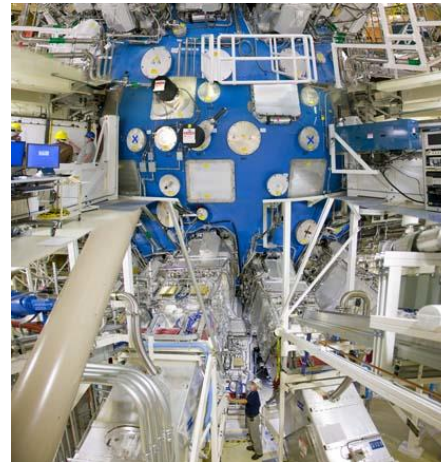
Mourou, G. A., Barty, C. P. J., and Perry, M. D., 1998, *Phys. Today* 51, 22

Bahk, et al., *Opt. Lett.* 2837 (2004)



# Největší laser na světě dnes

- **NIF** – National Ignition Facility
- Vybudován v Livermoru v Kalifornii v USA za 4.2 miliardy \$
- 192 svazků o energii 10 kJ každý na  $3\omega$  Nd laseru v 5 - 20 ns
- Primární určení inerciální fúze, vojenský a dále vědecký výzkum



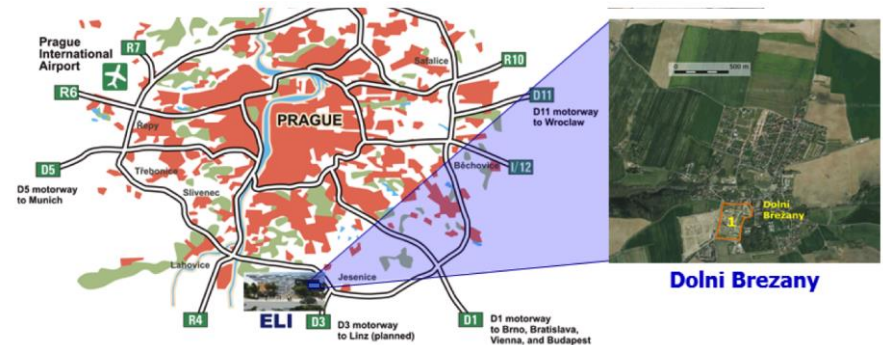
- **PALS** = Prague Asterix Laser System – přivezen z Garchingu
- 600 J/ 250 ps, jódový fotodisociační laser ( $1.3 \mu\text{m}$ ),  $5 \times 10^{16} \text{ W/cm}^2$
- Velká Evropská výzkumná infrastruktura - součást LaserLab Europe
- Synchronizován s 25 TW femtosekundovým laserem (800 mJ/30 fs)





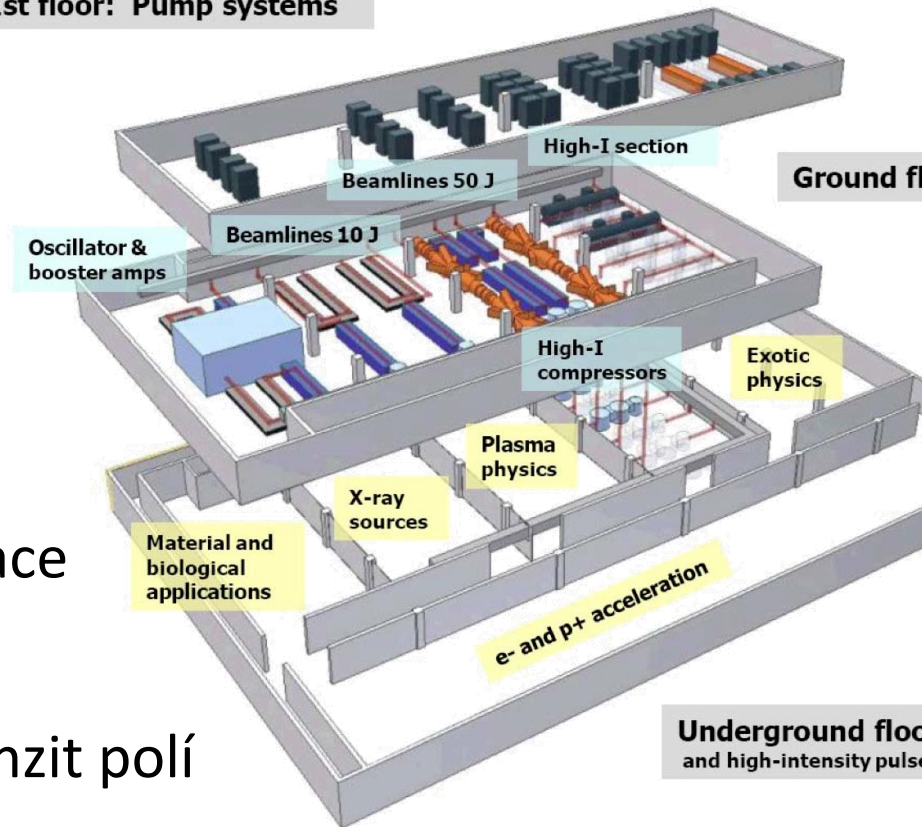
- Evropský projekt – cílem použití extrémně výkonných laserů pro materiálový a fyzikální výzkum - 4 pilíře
  - ELI – Beamlines – zdroje záření a částic – Dolní Břežany (u Prahy), ČR, investice 270 M€ (navrhovatel Dr. Ing. B. Rus, absolvent KFE FJFI ČVUT)
  - ELI – Attosecond Physics – Szeged, Maďarsko
  - ELI – Nuclear Physics – Rumunsko
  - ELI – Extreme Physics – rozhodnutí odloženo (dosud není vyvinuta technologie pro 100 PW laser)

- Projekt ELI v roce 2016



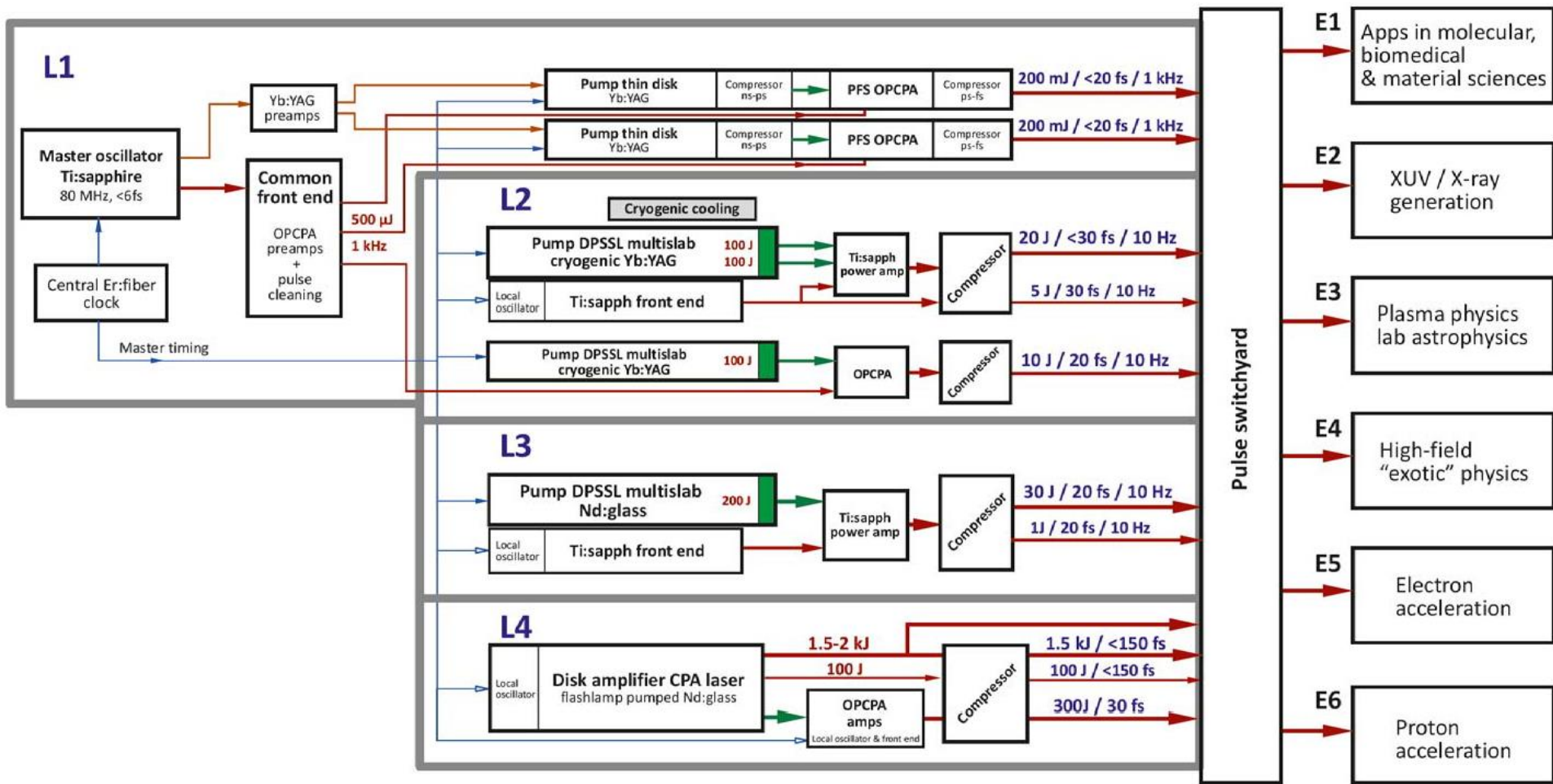
- 6 pilířů
- Lasery
- Rentgenové zdroje
- Urychlování částic
- Biomedicinské aplikace
- Fyzika plazmatu
- Fyzika vysokých intenzit polí

1st floor: Pump systems

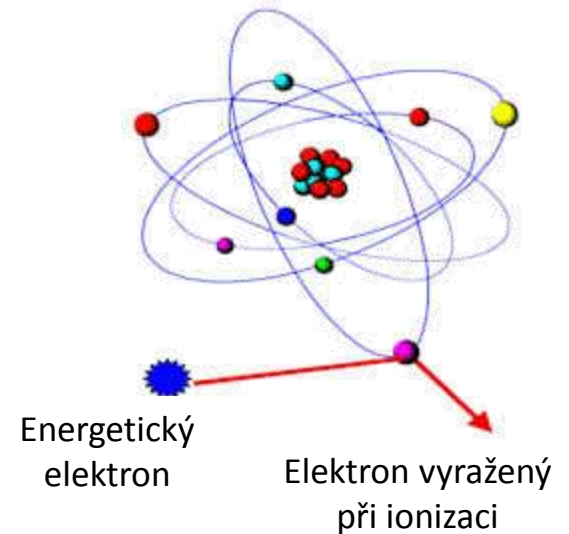
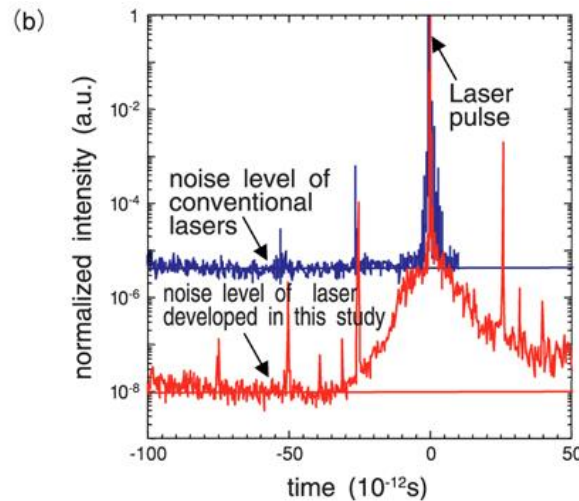
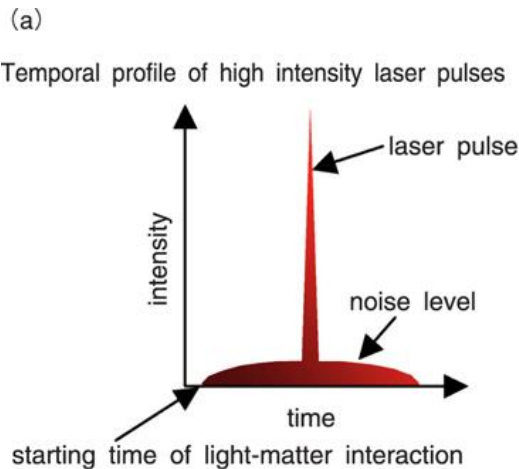




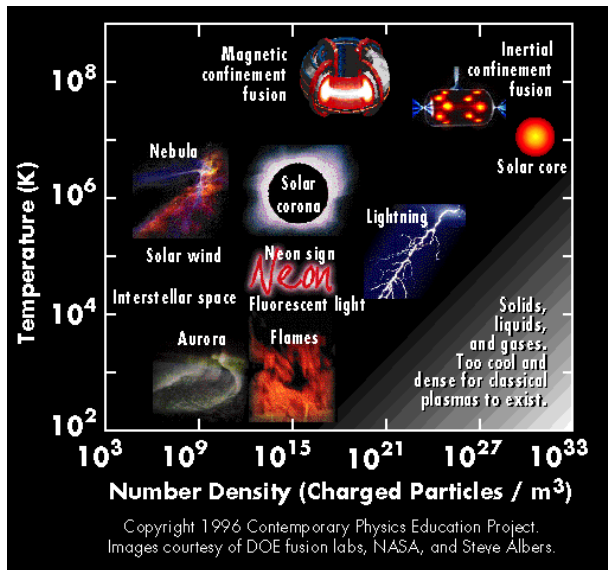
# Uspořádání laserů na ELI



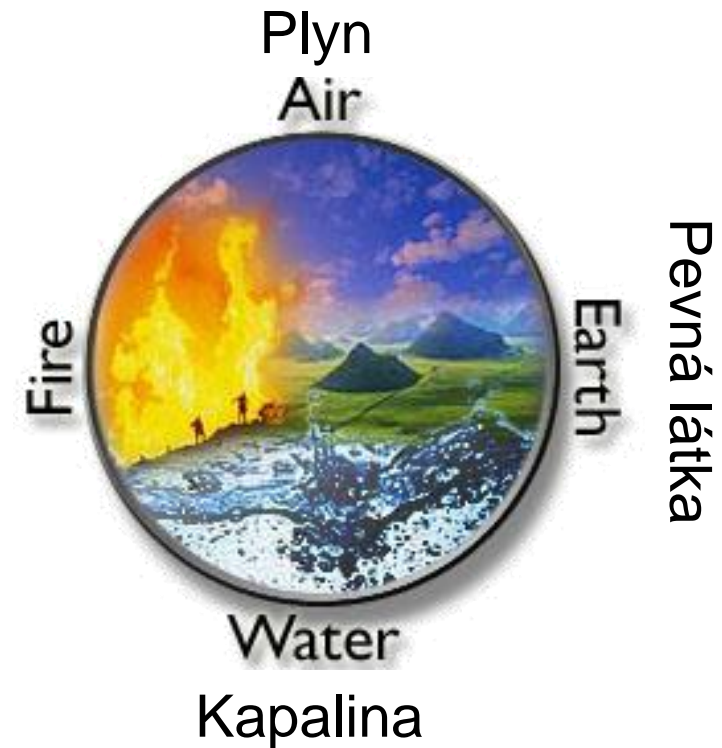
- Před hlavním laserovým pulsem je zpravidla **předpuls**
- Pokud dosahuje intenzity  $> 10^{10}$  W/cm<sup>2</sup>, dochází k **ionizaci**
- Elektrony oscilují v poli laserové vlny a srážejí se s atomy
- Zároveň získávají při oscilacích a srážkách vyšší teplotu



- Ionizací a ohřevem materiálu vzniká **plazma** – 4 skupenství hmoty
- Je to ionizovaná látka, která vykazuje **kolektivní chování a kvazineutralitu**

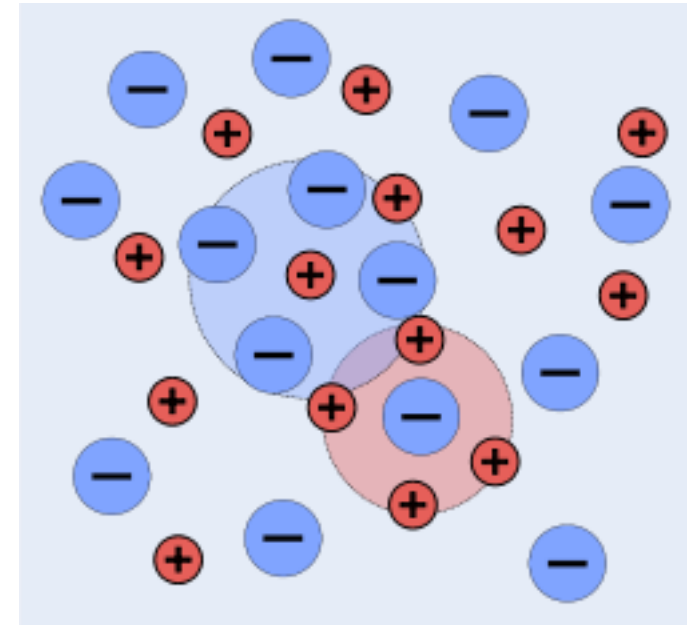
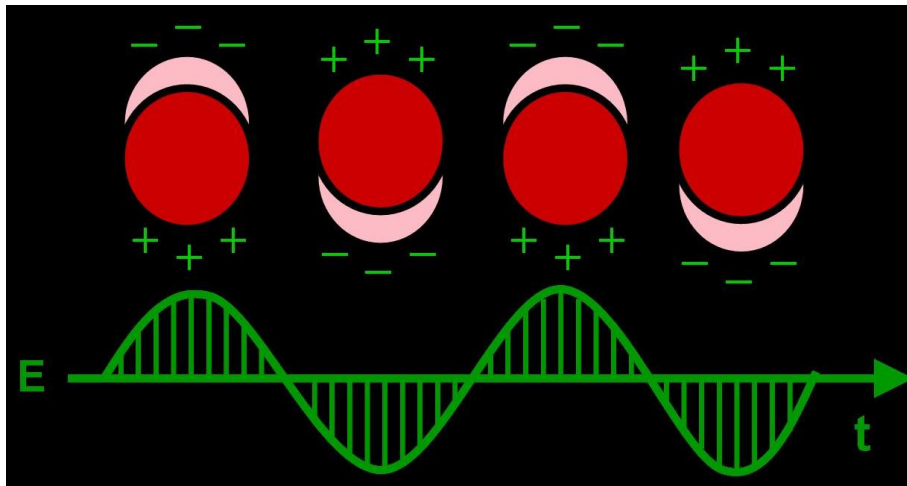


Plazma



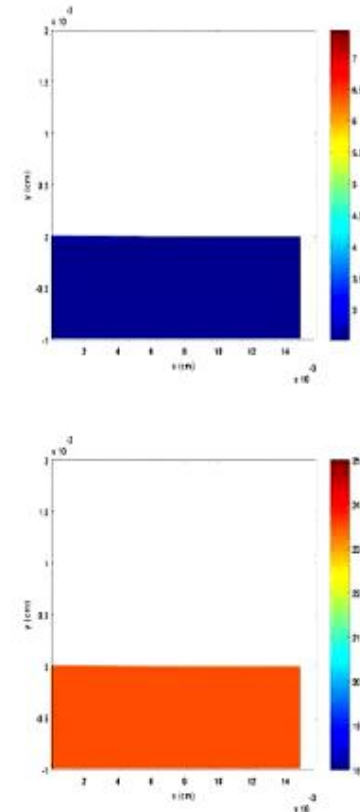
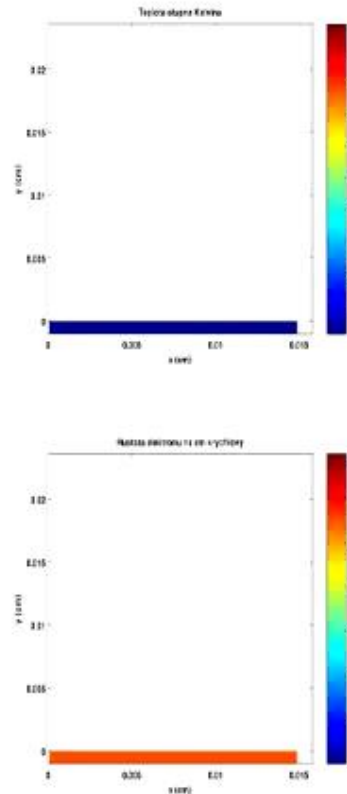


- Kolektivní chování – plazmové oscilace a vlny
- Kvazineutralita – Debeyovo stínění



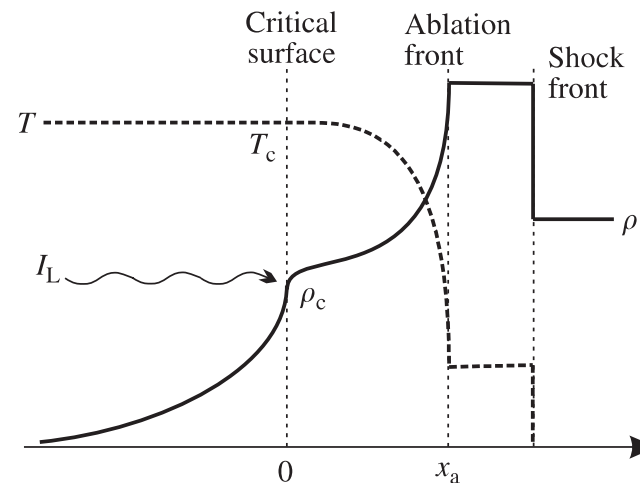
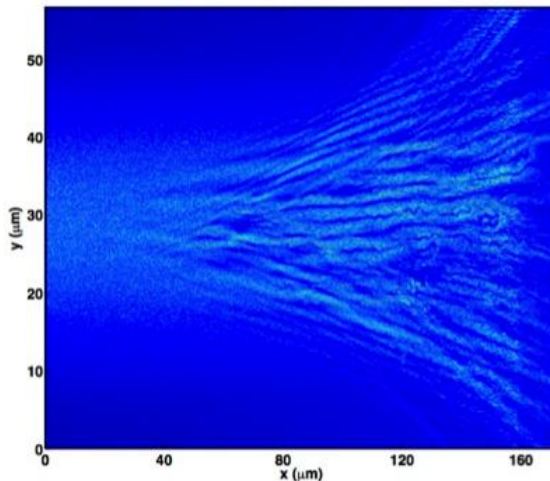
# Simulace vzniku plazmatu

- Pokud se energie laseru pohltí na povrchu terče, lze dosáhnout nejvyšších hustot absorbovaného výkonu na Zemi, s výjimkou nukleárních výbuchů.



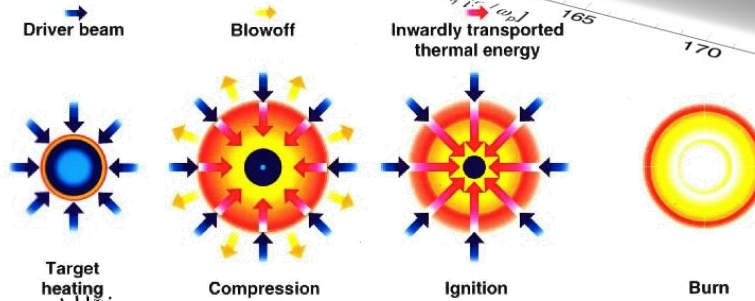
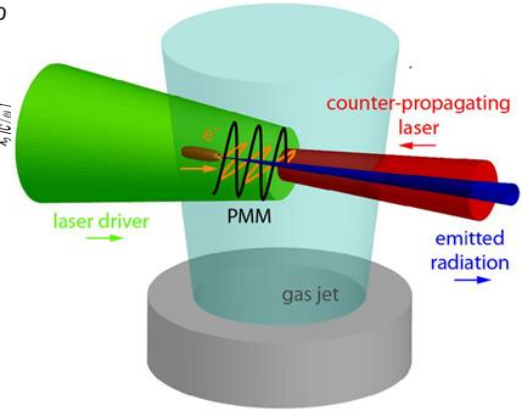
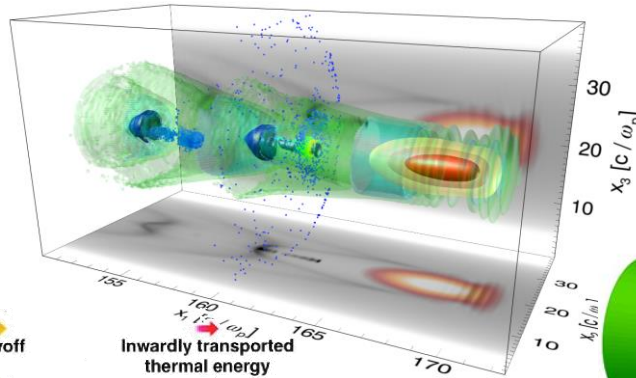
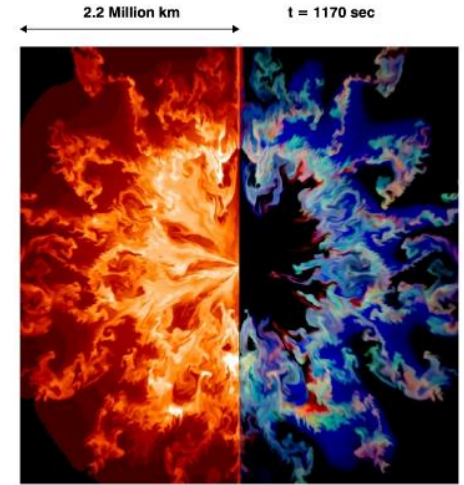
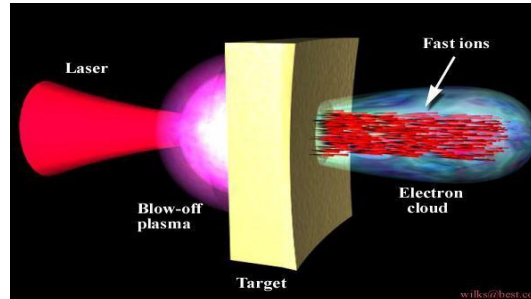
# Kritická hustota

- Plasma podkritické – plyn – laser může proletět
- Plasma nadkritické – na povrchu pevné látky – laser se odrazí a částečně absorbuje, energie se dovnitř šíří jako tepelná vlna, rtg. zářením a rychlými elektrony



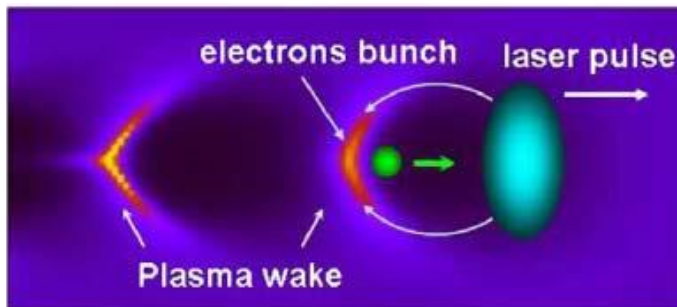
# Hlavní aplikace

- Urychlování elektronů
- Urychlování iontů
- Laboratorní astrofyzika
- Inerciální fúze
- Generování rtg. záření
- Různé snímkování
- Vysoká pole



# Urychlování elektronů

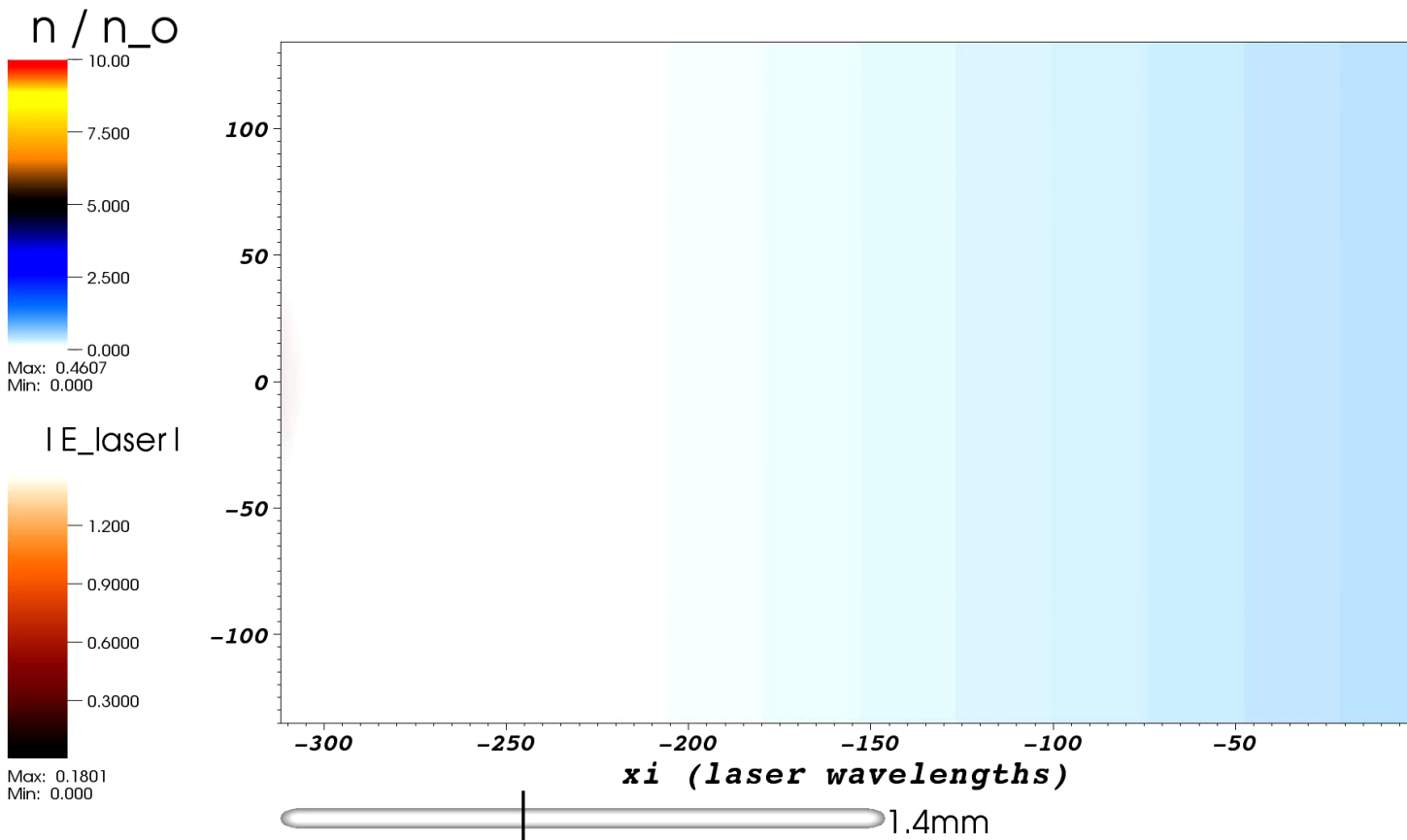
- Laser Wakefield Acceleration
- Laserový pulse letí v plynu
- Vytlačí ze svého objemu elektrony
- Vzniká za ním bublina, která do sebe elektrony vtahuje a urychluje
- Analogie s brázdou za lodí



Centaurus A:  
cosmic  
wakefield  
linac?

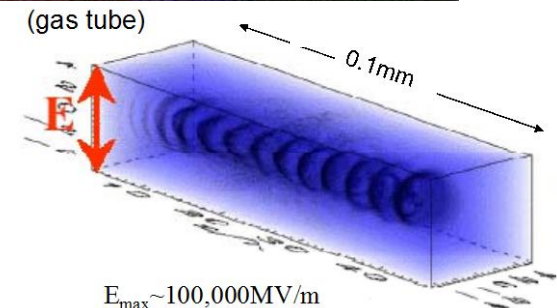
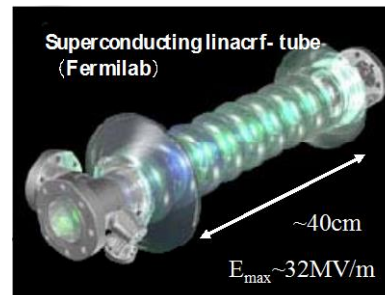
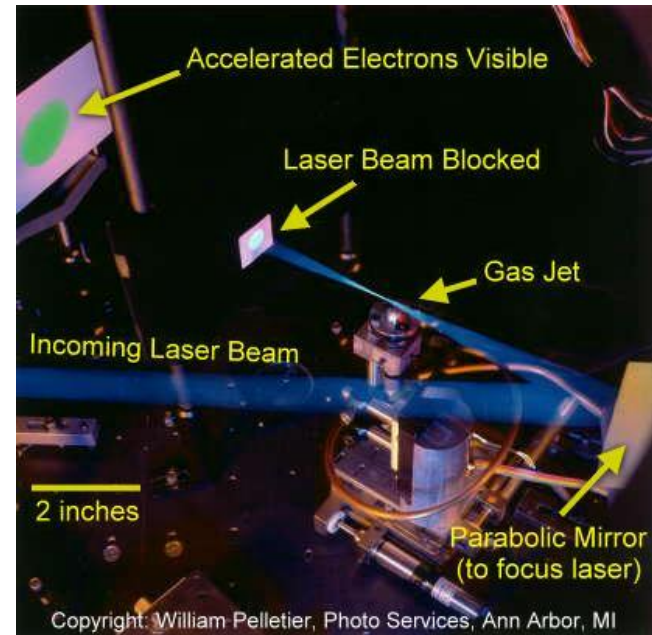


# Urychlování elektronů



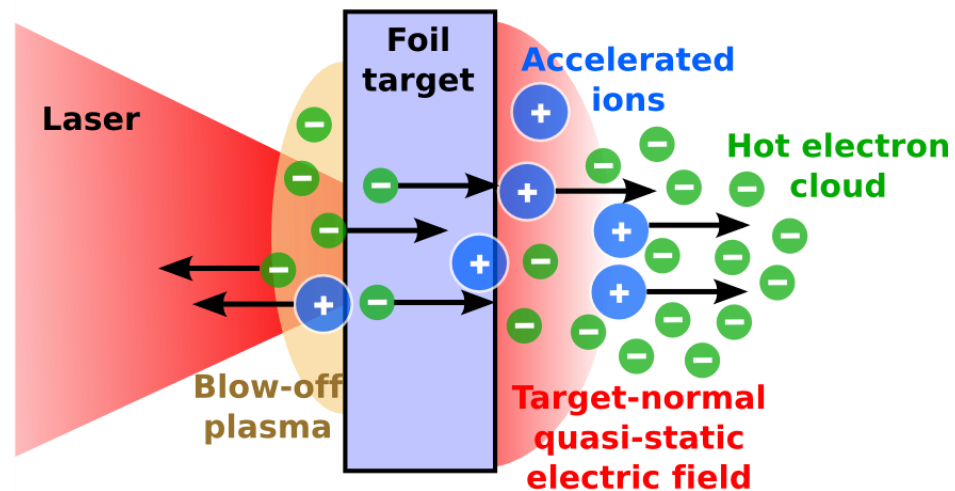
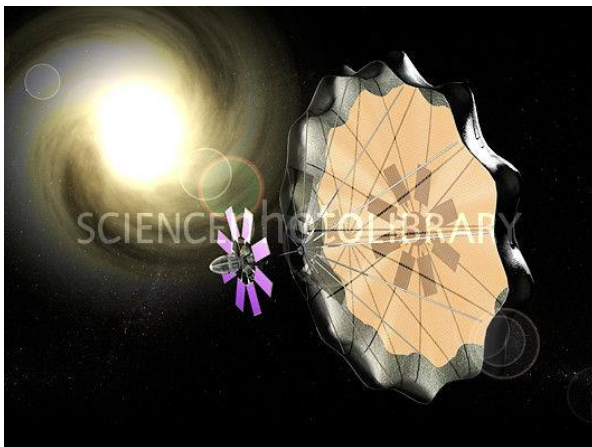
# Urychlování elektronů

- Experimentální uspořádání
- Monoenergetické svazky asi  $10^{10}$  elektronů s energií 1 GeV
- Menší energie než urychlovač, ale kompaktnější a levnější
- Výzkum pokračuje, možná v budoucnu urychlovač nahradí

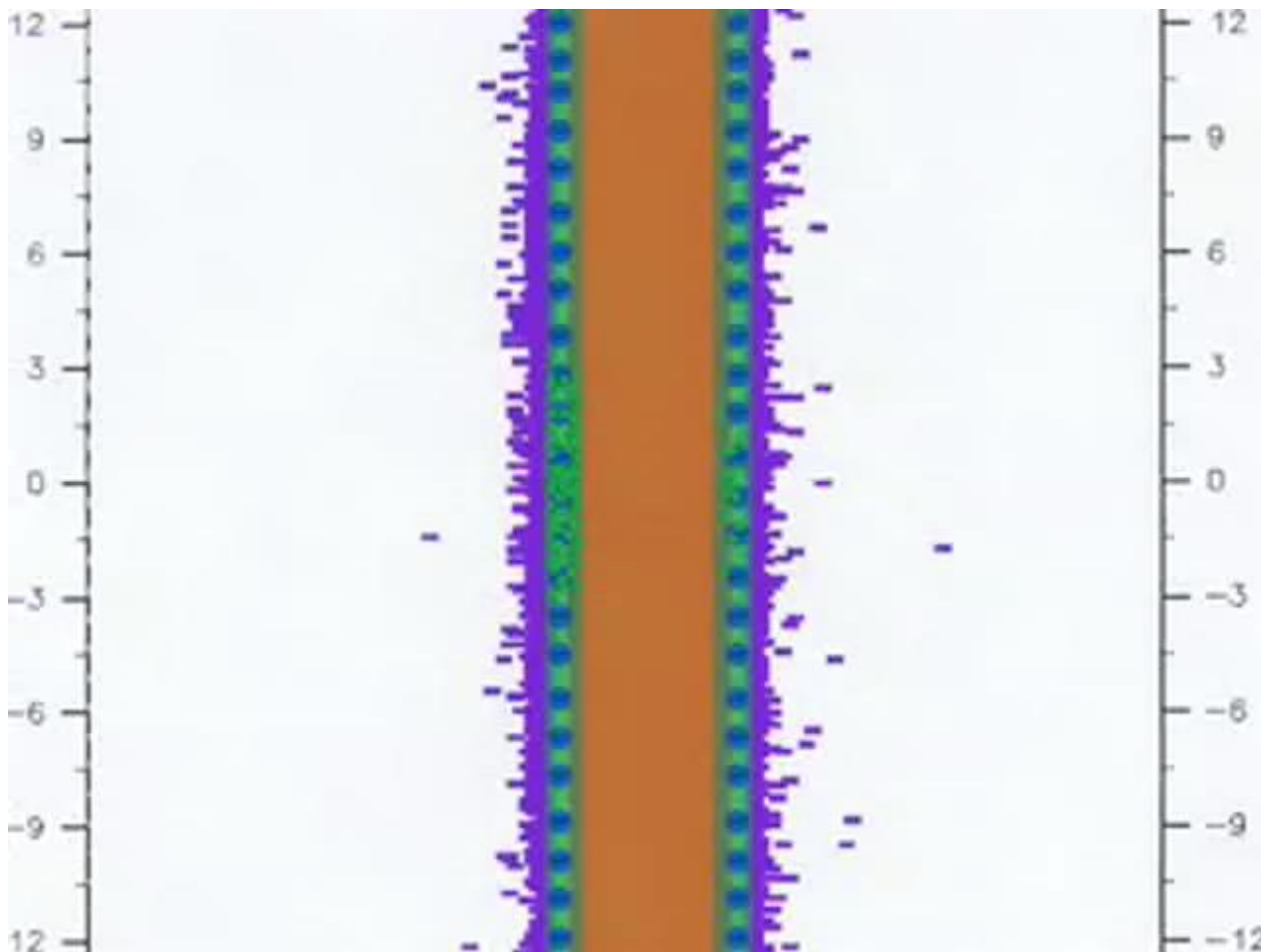


# Urychlování ionů

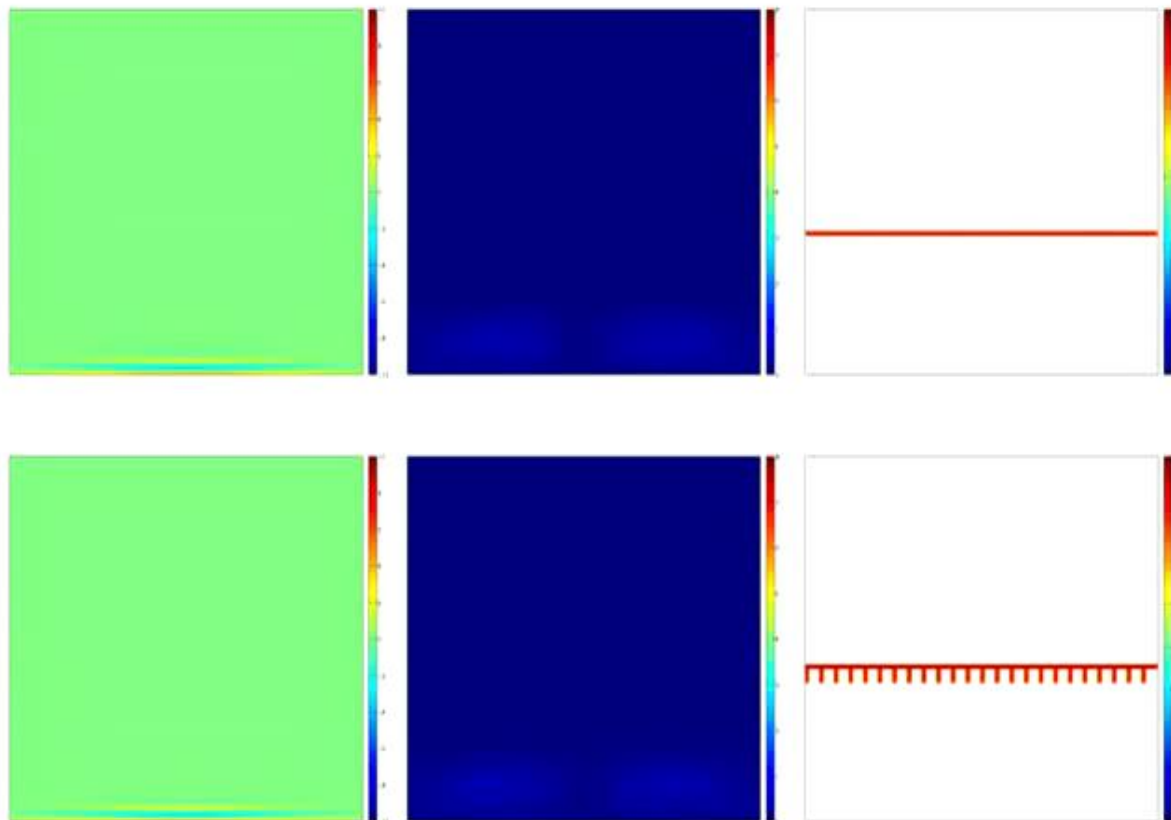
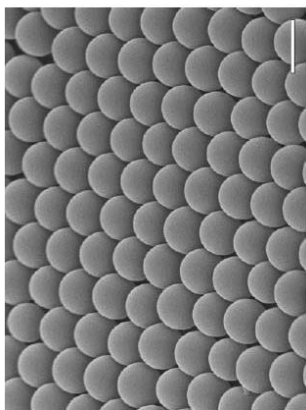
- Urychlování probíhá u terčů z pevné látky
- Zprostředkováno elektrony, ionty mají mnohem větší hmotnost
- Urychlování na přední straně dovnitř (Radičním tlakem) a na obou stranách ven z povrchu (Target Normal Sheath Acceleration)



# Urychlování ionů



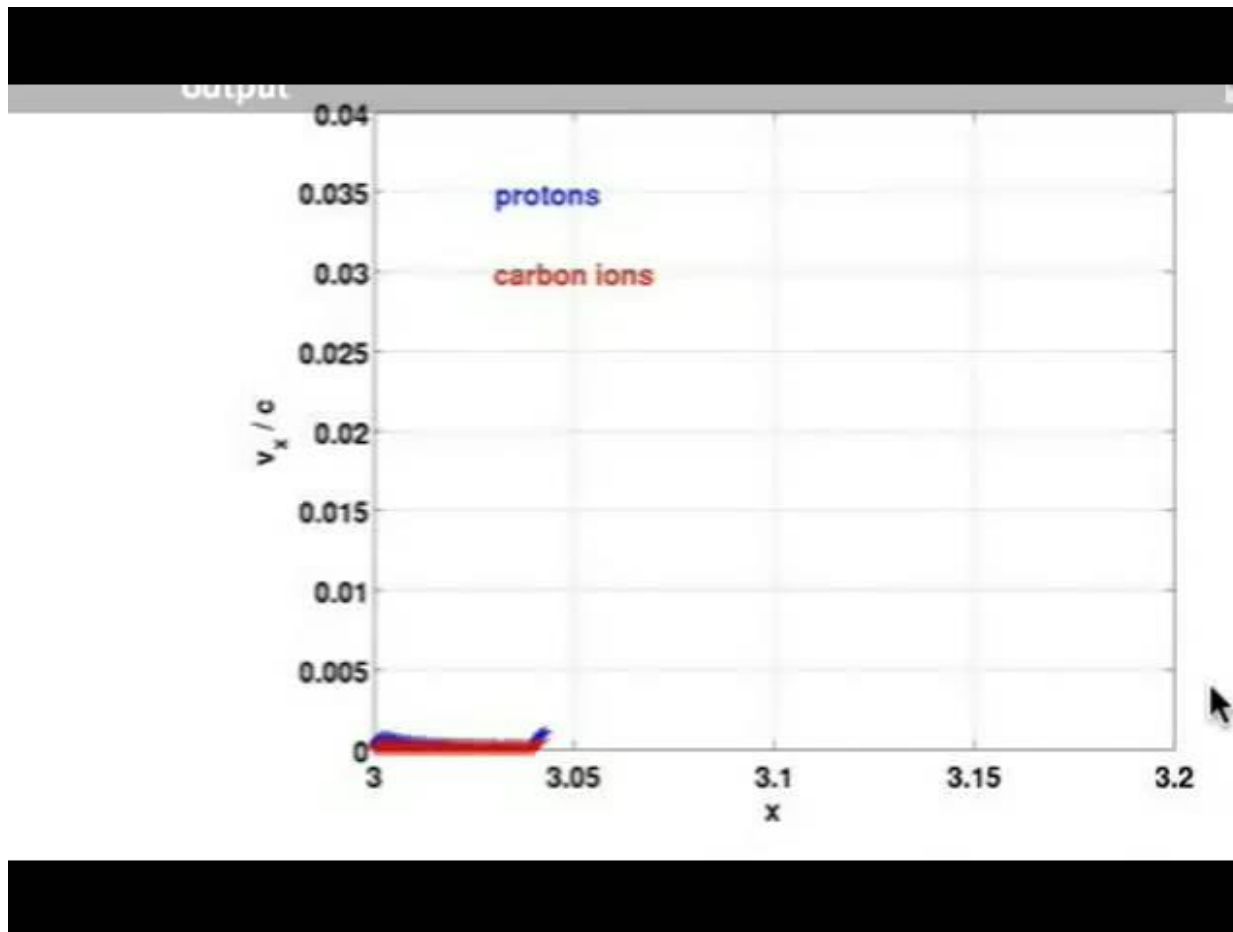
Zvýšení účinnosti  
nanostruktura na povrchu



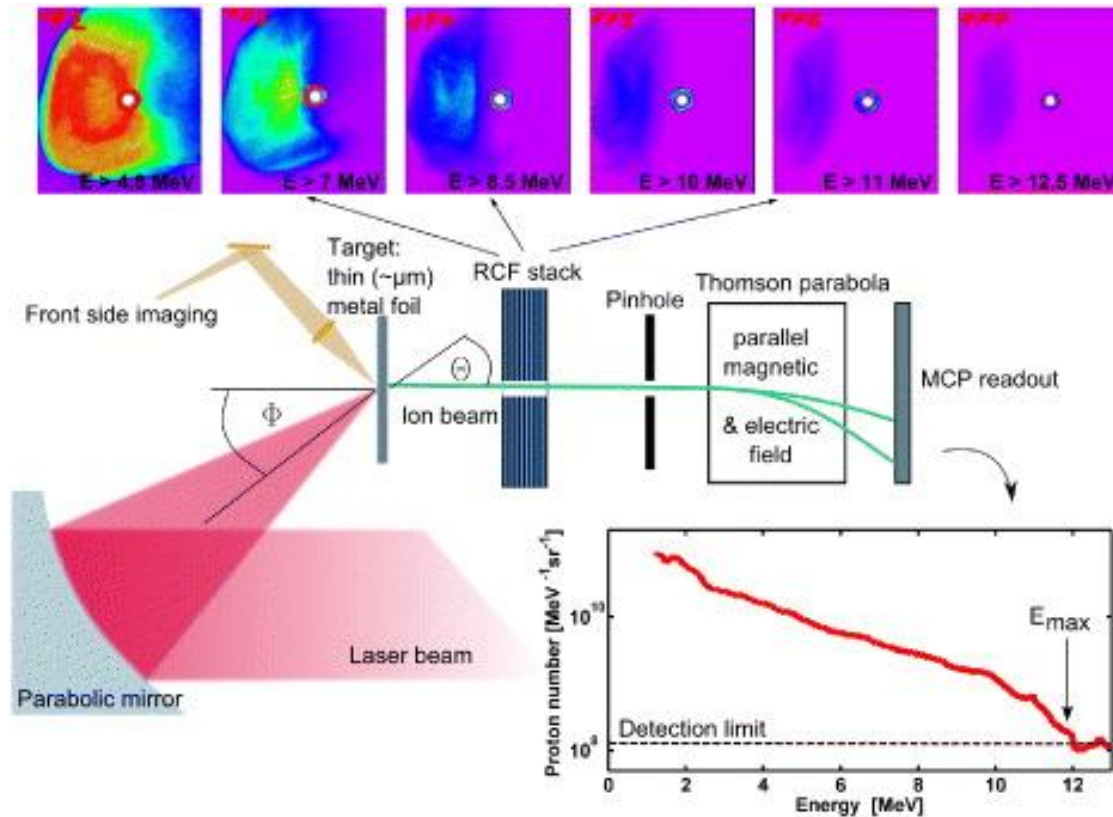


# Urychlování ionů

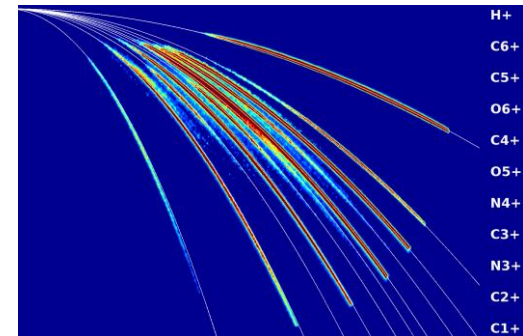
Urychlování tlakem záření



# Urychlování ionů

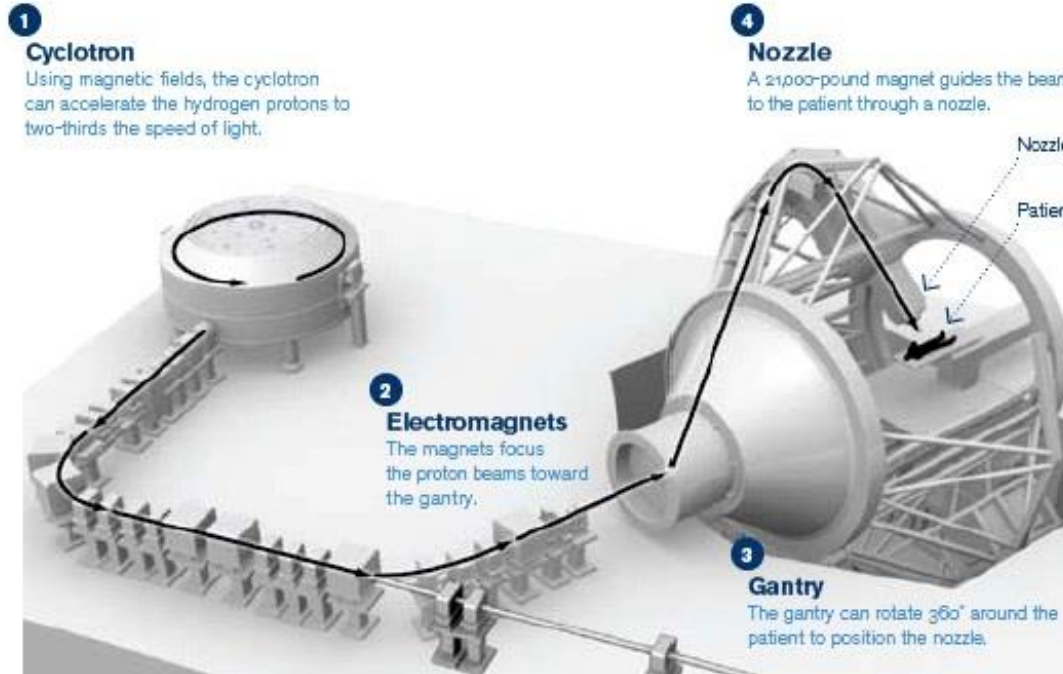
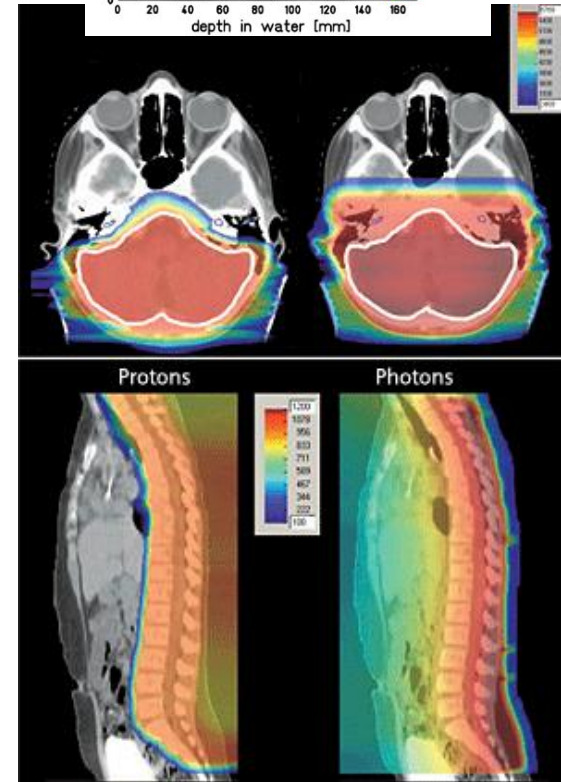
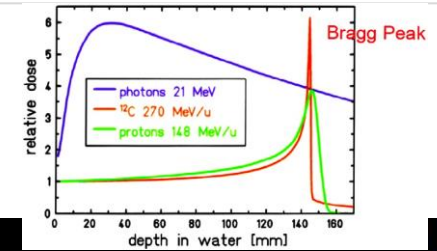


- Urychlují se protony
- Měří se pomocí RCF filmů, Thomsonovy paraboly

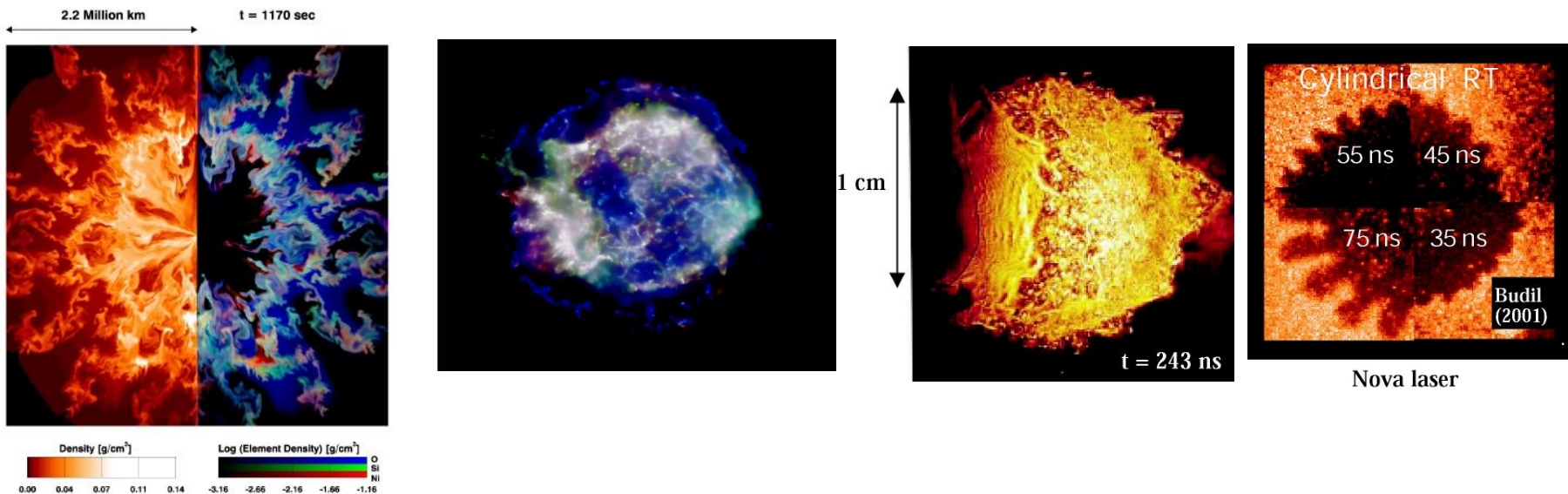


# Protonová terapie

- Menší poškození než pomocí fotonů
- Velmi drahé kvůli klasickým urychlovačům

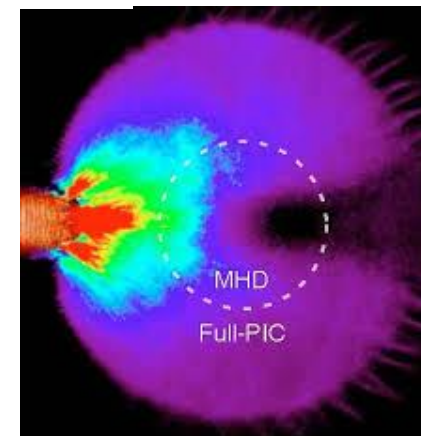
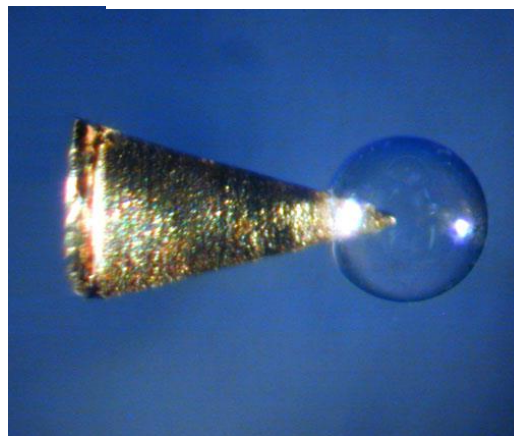
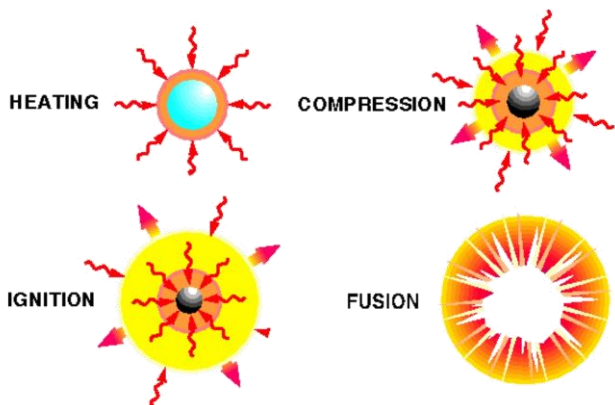
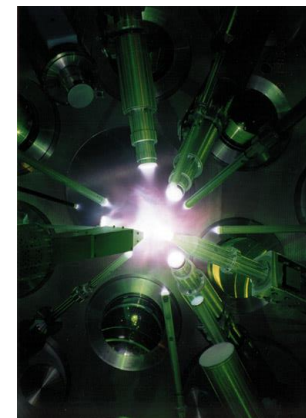
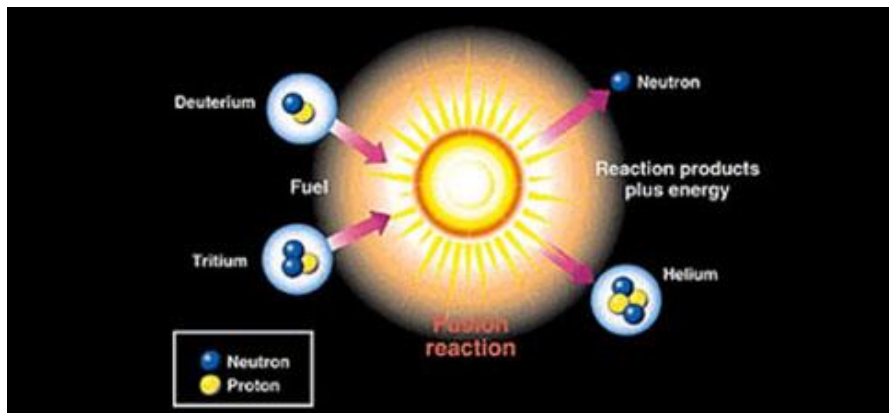


- Modelování dynamiky astrofyzikálních procesů pomocí laserového plazmatu
- Podobné parametry, jen jiná prostorová a časová měřítka



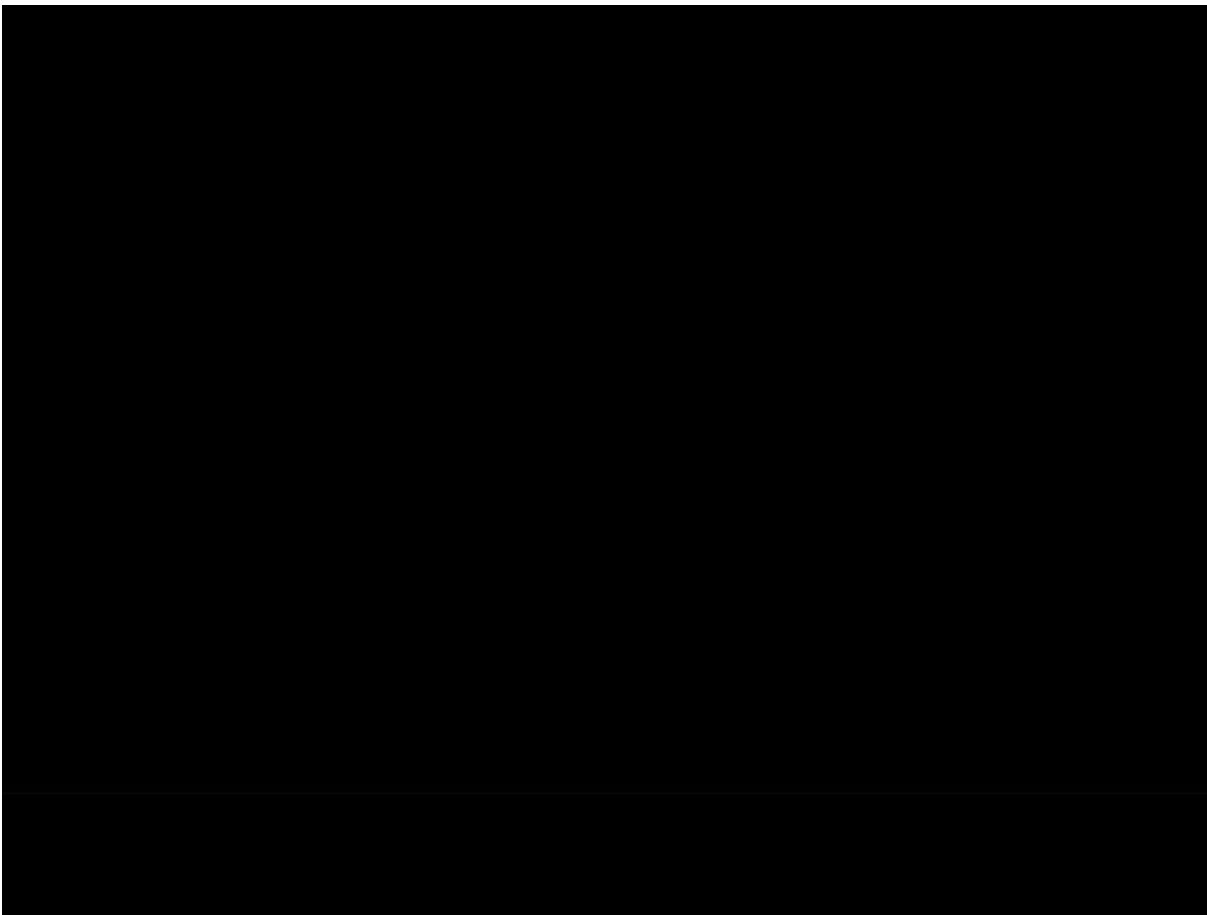


# Inerciální fúze a fast ignition

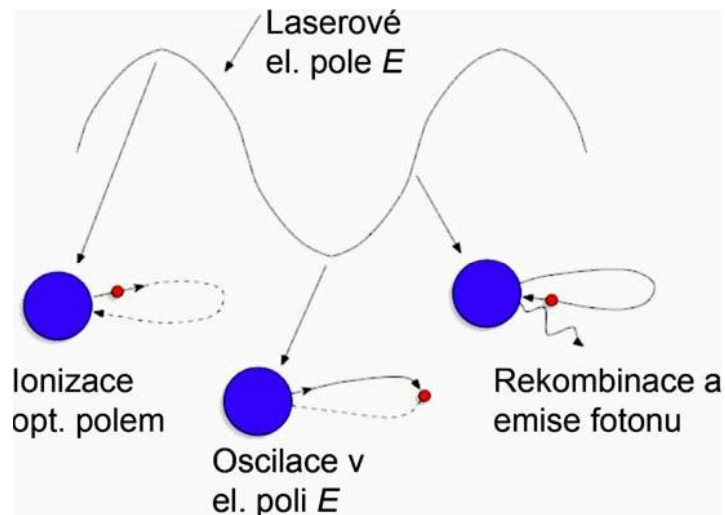
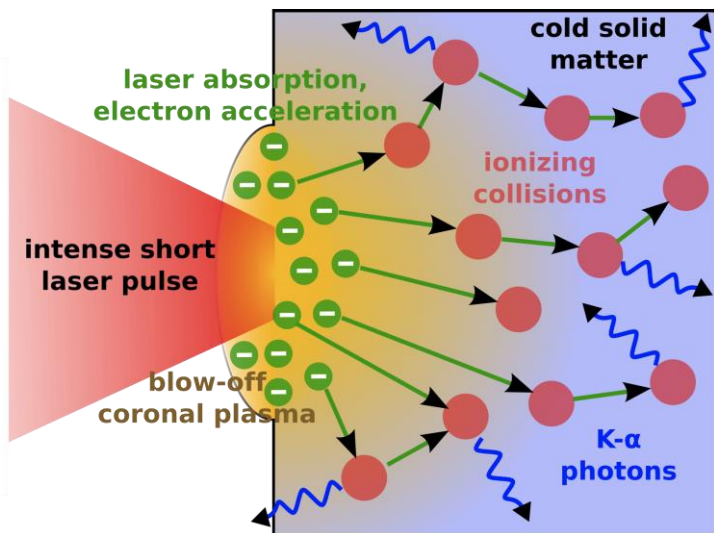
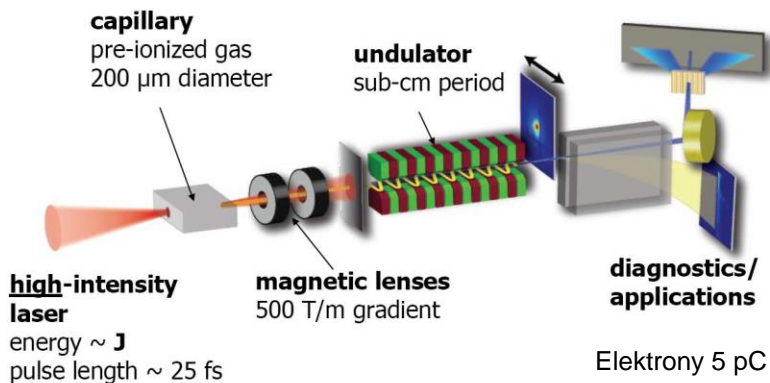




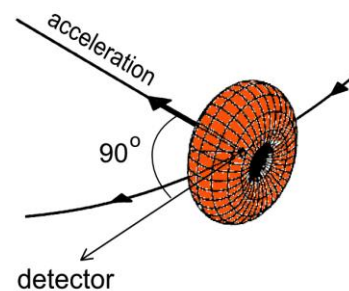
# Inerciální fúze a fast ignition



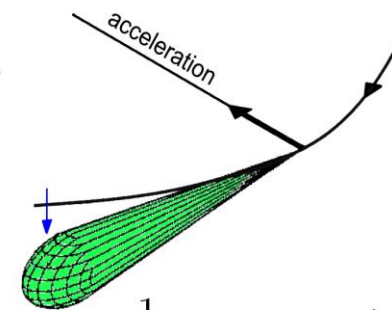
# Zdroje RTG. záření



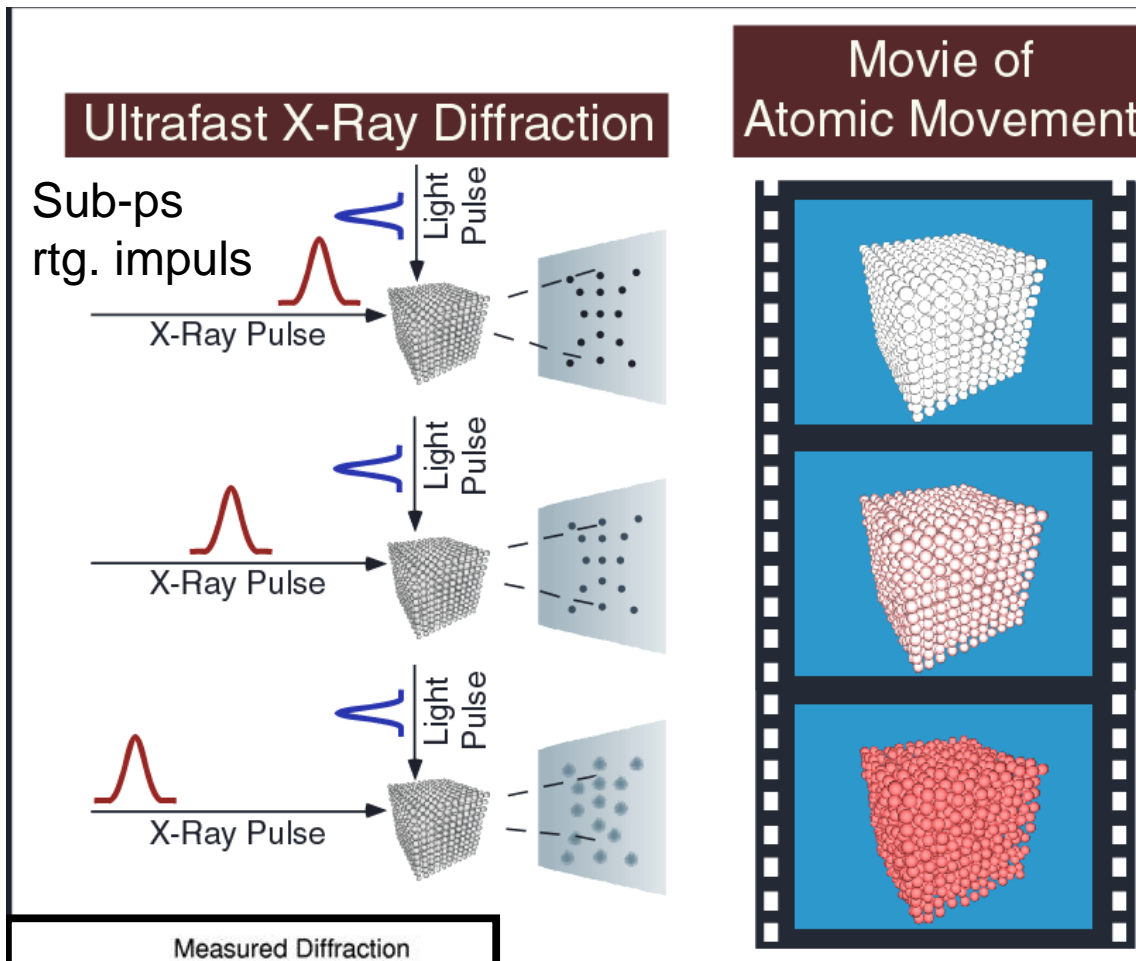
Moving frame of electron



Lab frame

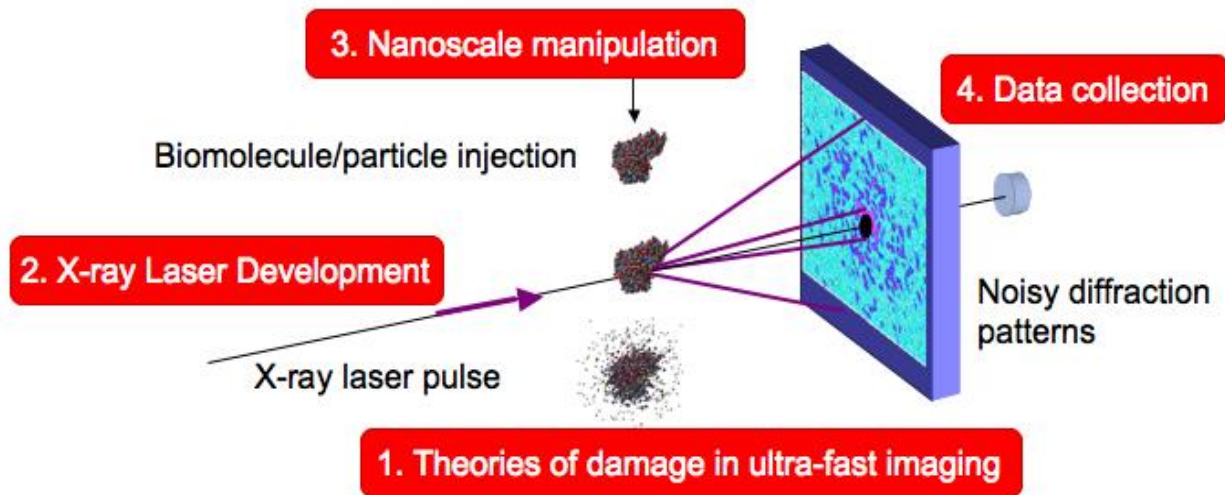


# Snímkování pump-probe

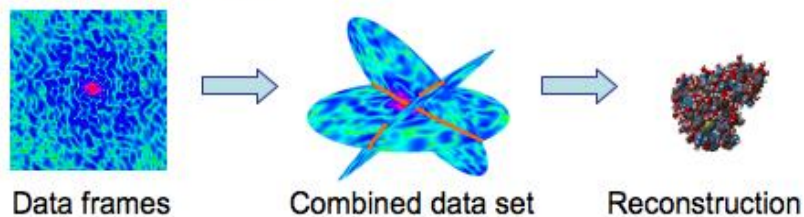


# Snímkování v biomedicině

One pulse, one measurement

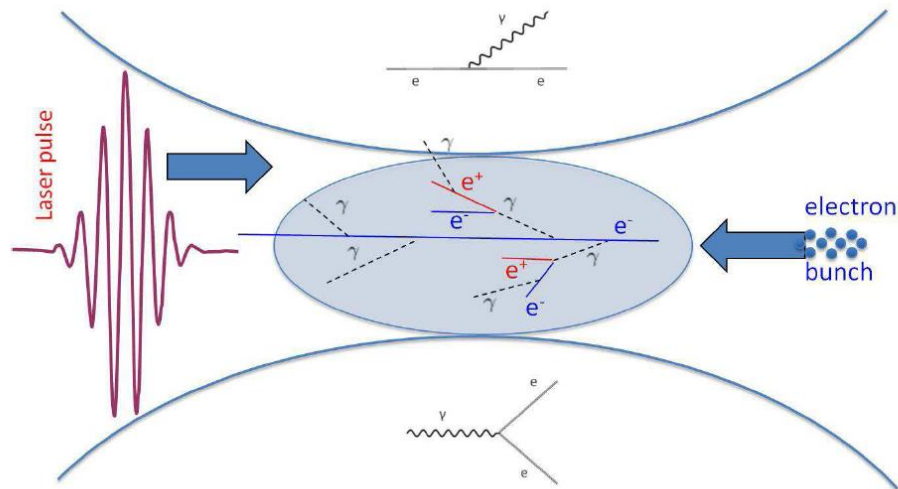


Combine many measurements



5. Data processing, phasing & reconstruction

- Ověření teoretických předpokladů kvantové elektrodynamiky
- Generování elektron-pozitronových párů z vakua
- Potřeba extrémně silné pole v laboratorní soustavě, ne však tolik silné ve velmi rychle se pohybující soustavě

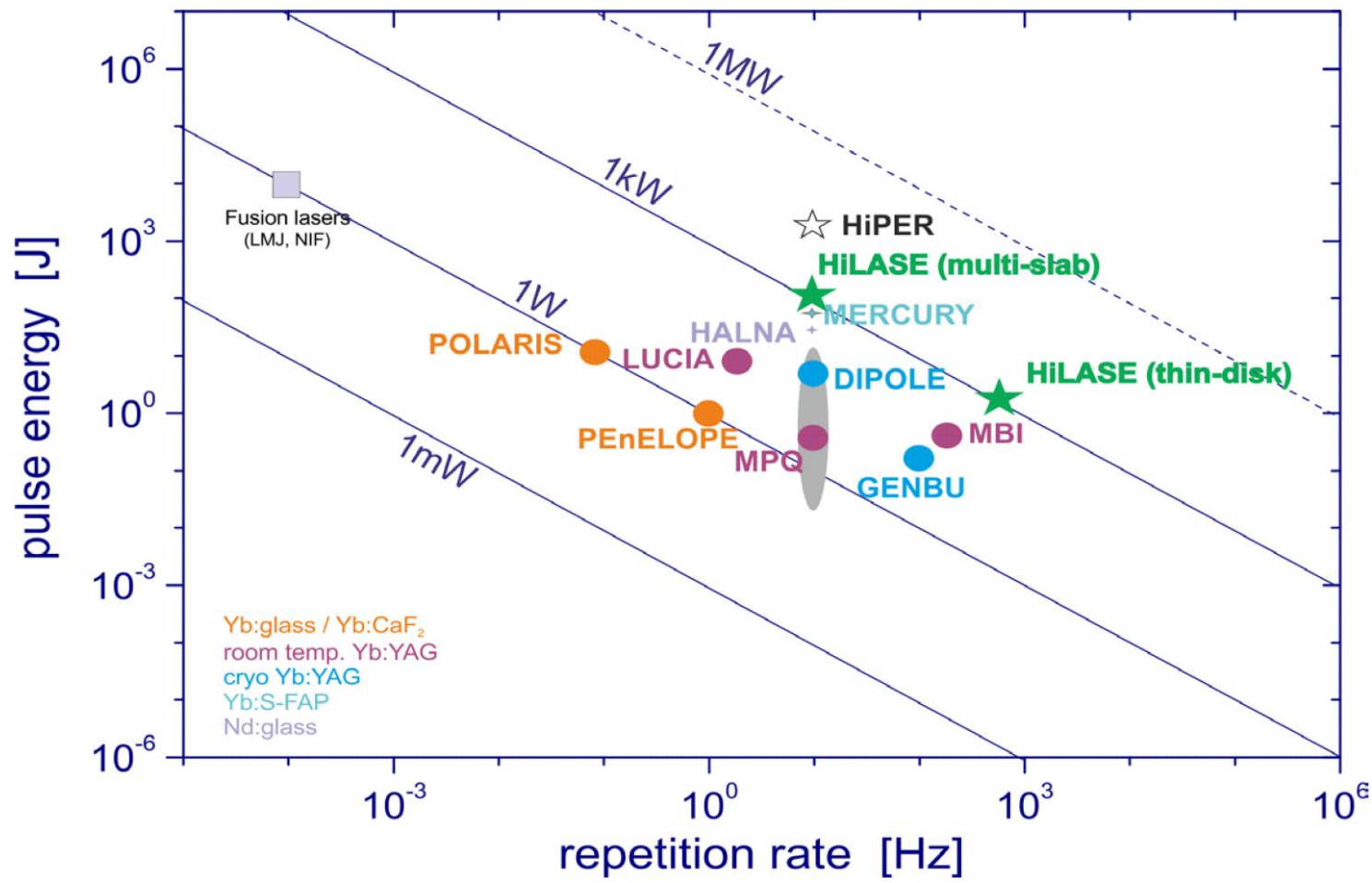




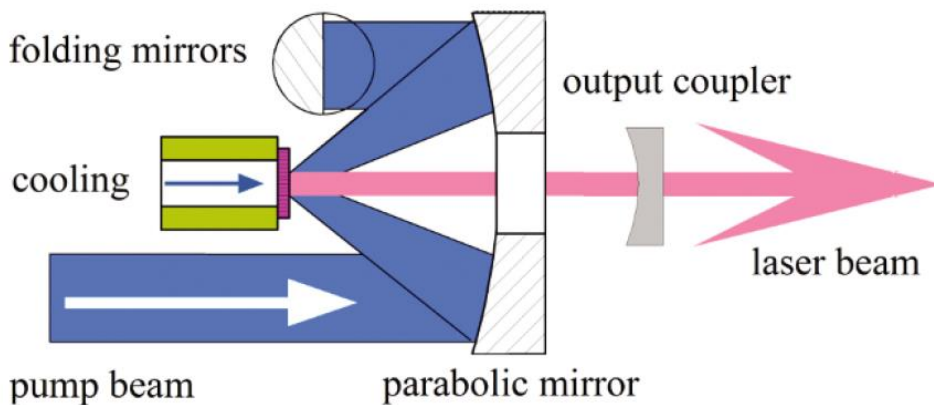
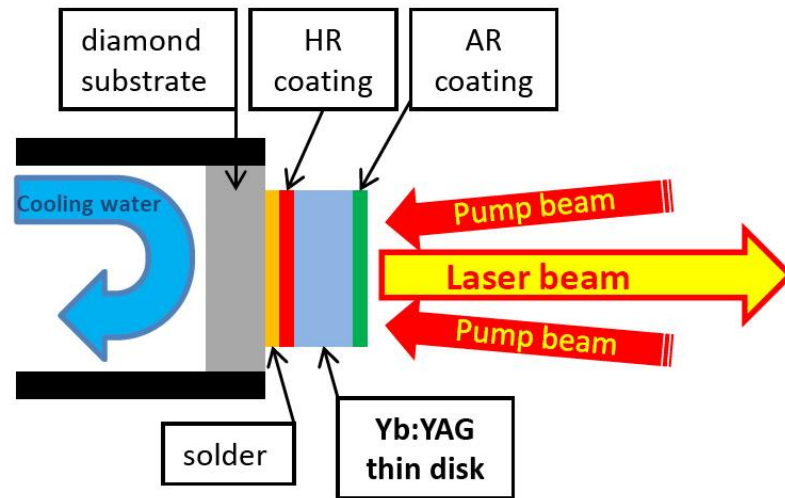
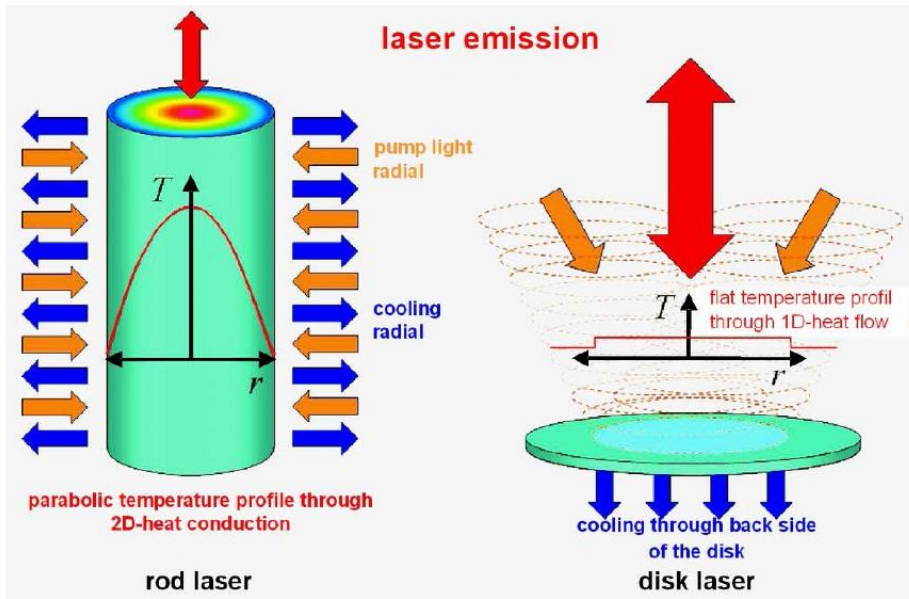
- Jednodušší simulace (1D) někdy možné počítat na běžném PC
- Středně náročné simulace počítáme na výkonných výpočetních serverech (např. 8x CPU se 4mi jádry, 128GB RAM)
- Nejnáročnější simulace na superpočítačích (doba výpočtu několik dní na několika tisíci CPU)



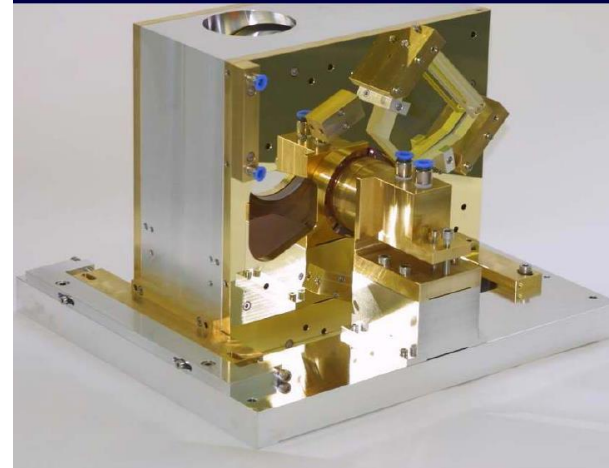
- **HiLASE: Nové lasery pro průmysl a výzkum**
- Regionální výzkumné centrum v OP VaVpl (851 MKč)
- Řešitel: Ing. Tomáš Mocek, PhD., absolvent KFE JFI ČVUT
- **Cílem je vyvinout vysokovýkonné pevnolátkové impulsní lasery s vysokou opakovací frekvencí (OF) a tedy vysokým středním výkonem (diodové čerpání)**
- **Výzkumný program 1:** Vývoj multi-J laserového systému kW třídy čerpaného diodami pro průmyslové a vědecké aplikace
  - Laser na technologii tenkých disků (100 – 300 mJ v několika ps s opakovací frekvencí 1-3 kHz,  $\lambda = 1030$  nm)
  - DPSSL regenerativní zesilovač s velkou aperturou (LARA) – několik J s OF 100 Hz
- **Výzkumný program 2:** Vývoj laserového systému v oblasti 100 J/ 10 Hz rozšiřitelného na úroveň 1 kJ
  - Laser na multislab (mnoho desek z Yb:YAG keramiky) technologii, ns impulsy
- **Výzkumný program 3:** Vývoj klíčových technologií vysoko-repetičních zesilovačů ve spolupráci s průmyslem
  - podpora vybraných průmyslových aplikací a technologií využívajících laserů s vysokým průměrným výkonem, vyvinutých v rámci VP-1 a VP-2.



# Princip tenkodiskového (thin-disc) laseru



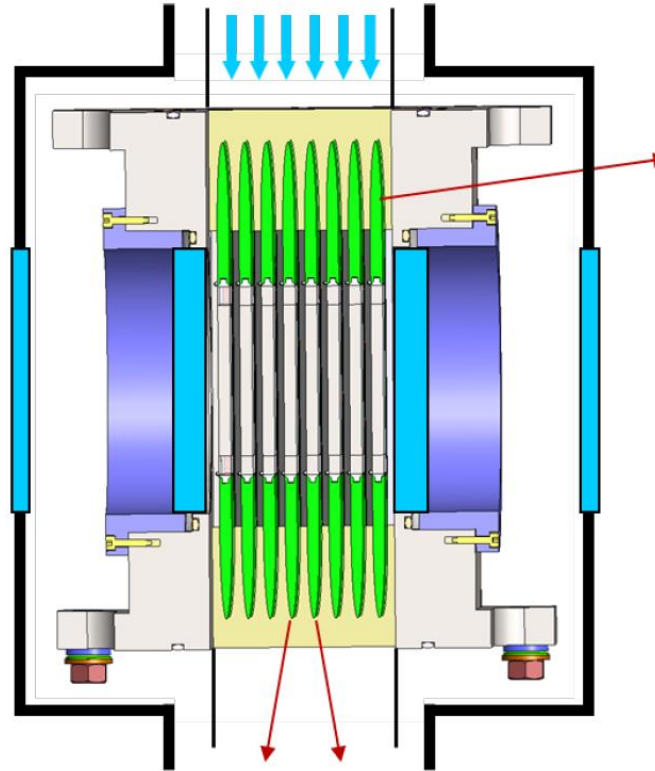
12 kW diode pump power  
 Ø 35 mm; estimated energy: 2-3 J



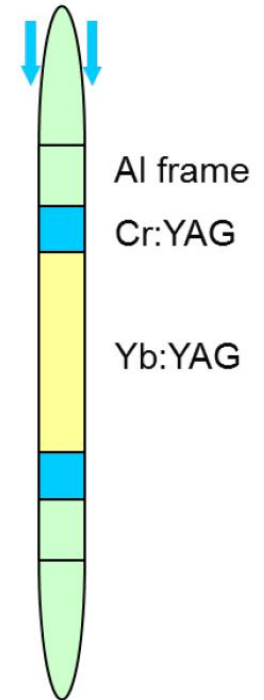


# Princip mnohadeskového (multislab) laseru

- 8 Aluminium fins housing the slabs
- Vacuum insulation of the cooled part
- Cooling with He gas
- Temperature ~ 150 K



Fin detail

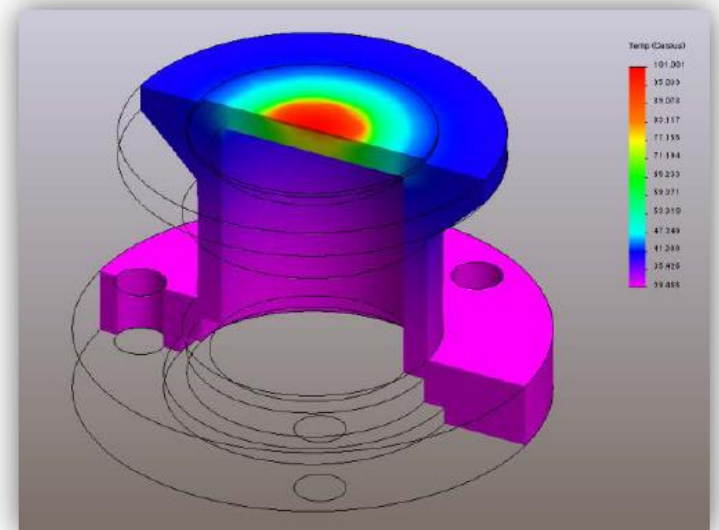


Varied doping density  
• average doping 0.74 at.%

0.34	0.46	0.72	1.34	1.34	0.72	0.46	0.34
------	------	------	------	------	------	------	------



- Měření prahu poškození optických materiálů laserem
- Lasový peening (vytvrzování materiálů rázovou vlnou)
- Kompaktní zdroj měkkého rentgenového záření pro litografii (výroba integrovaných obvodů)
- Přesné řezání, vrtání a svařování speciálních materiálů pro letecký a automobilový průmysl
- Technologie laserového mikroobrábění
- Laserové odstraňování nátěru, laserové čištění povrchů



- V ČR i celé Evropě je katastrofální nedostatek laserových techniků a fyziků
- Výborná možnost uplatnění jak v akademické, tak i komerční sféře (na KFE chodí desítky nabídek zaměstnání)
- KFE je specializována na výchovu laserových techniků a fyziků (má výukové laserové laboratoře, které jinde nemají)
- KFE vychová i specialisty v oblasti počítačového modelování pro fyziky (obor Informatická fyzika)
- **Těšíme se, že k nám přijdete studovat**