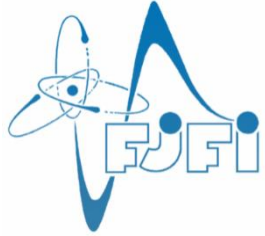


Generace vysocevýkonných laserových impulzů a jejich aplikace



J. Pšikal

FJFI ČVUT v Praze, katedra fyzikální elektroniky

FZÚ AV ČR, projekt ELI-Beamlines



jan.psikal@fjfi.cvut.cz

Obsah přednášky:

1. Elektromagnetické záření, světlo, laser
2. Historie, vývoj výkonných laserů
3. Generace laserového záření
4. Generace ultrakrátkých impulzů
5. Délka impulzu
6. Fyzika laserového plazmatu
7. Časová rentgenová krystalografie

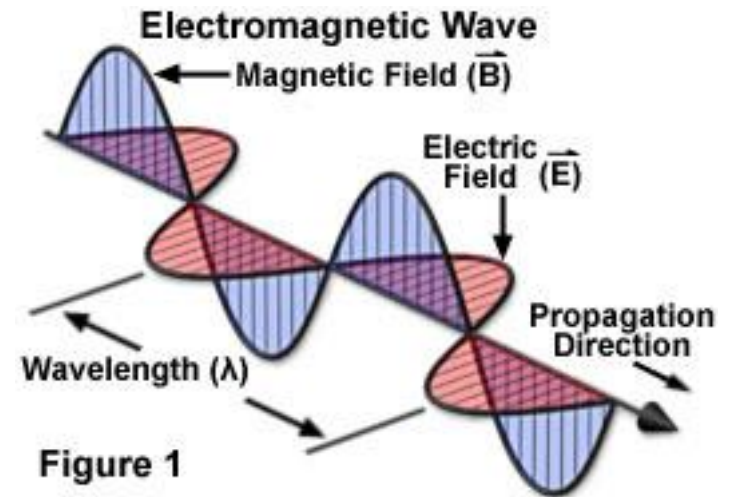
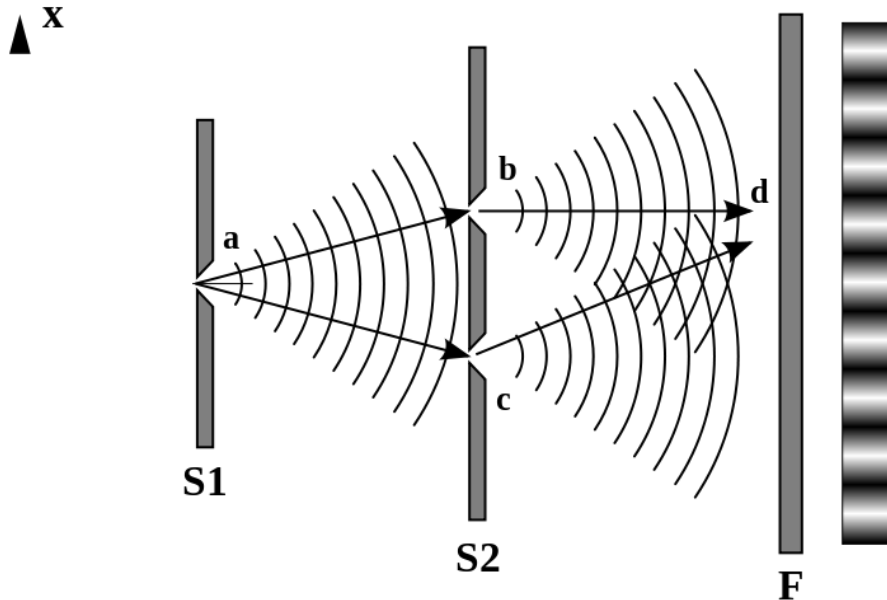
8. Urychlování elektronů
9. Urychlování iontů
10. Koncept rychlého zapálení inerciální fúze
11. Exotická fyzika – generace elektron-pozitronových párů

Co je světlo a co je laser?

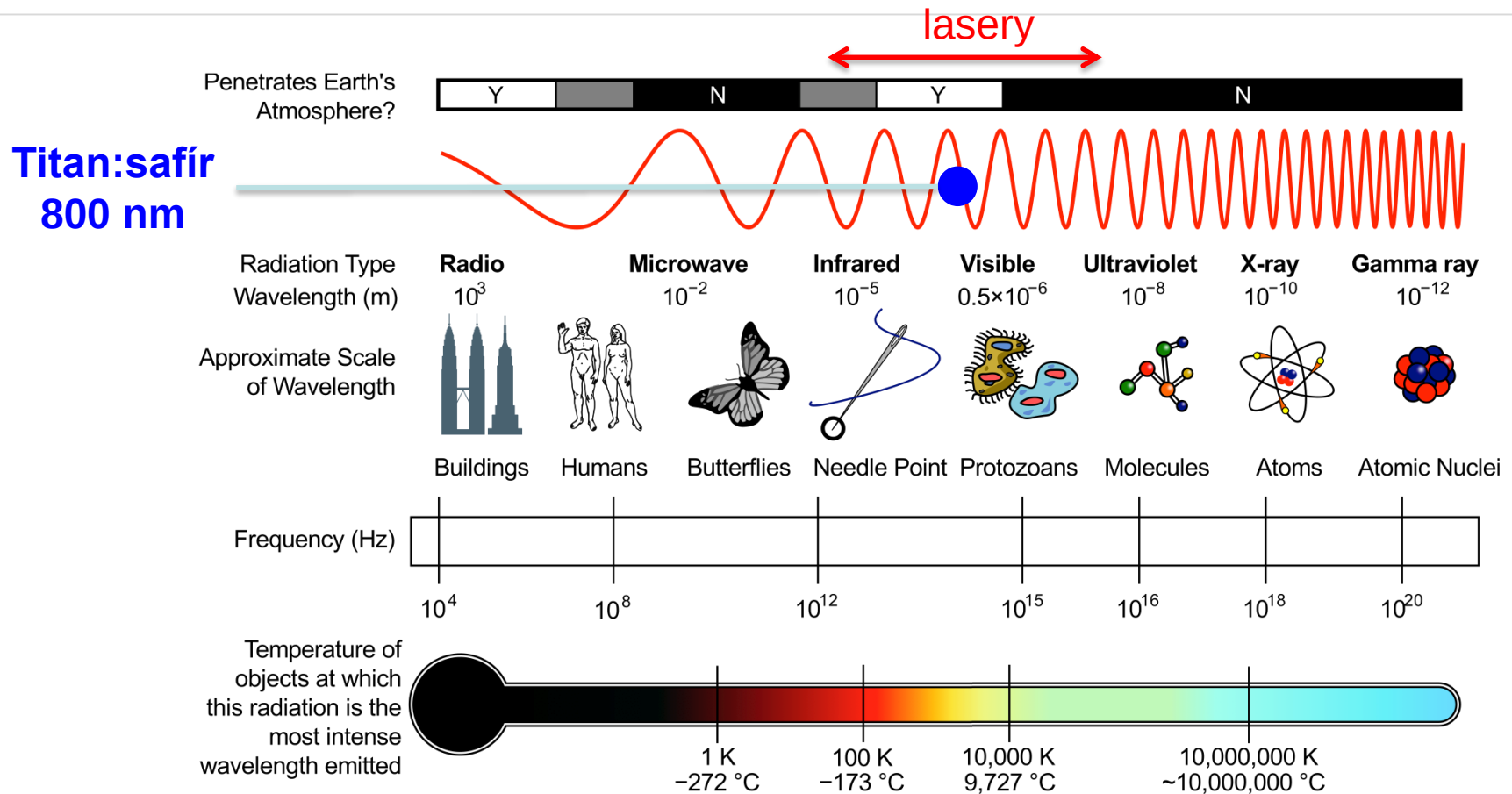
- **Laser** (akronym „**L**ight **A**mplification by **S**timulated **E**mission of **R**adiation“ – česky zesilování světla stimulovanou emisí záření)
- Je to optický zdroj **elektromagnetického záření** (což je světlo v širším slova smyslu) a má následující důležité vlastnosti:
 - Je vyzařováno ve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

Elektromagnetické záření

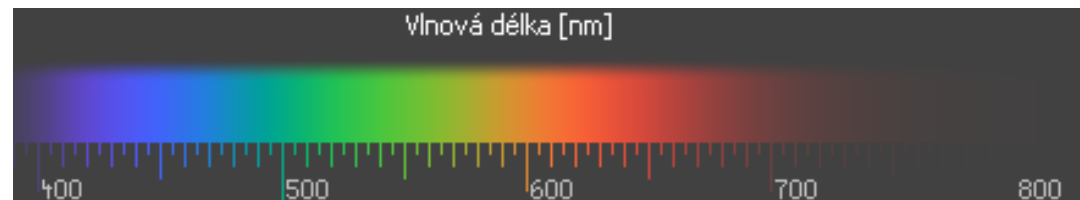
- Světlo má dvojí povahu – **dualita**
 - **Vlnovou** – štěrbínový experiment
(elektromagnetické vlny mají vlnovou délku $\lambda = h/p$ a frekvenci $\nu = E/h$)



Vlnová délka – prostorové měřítko

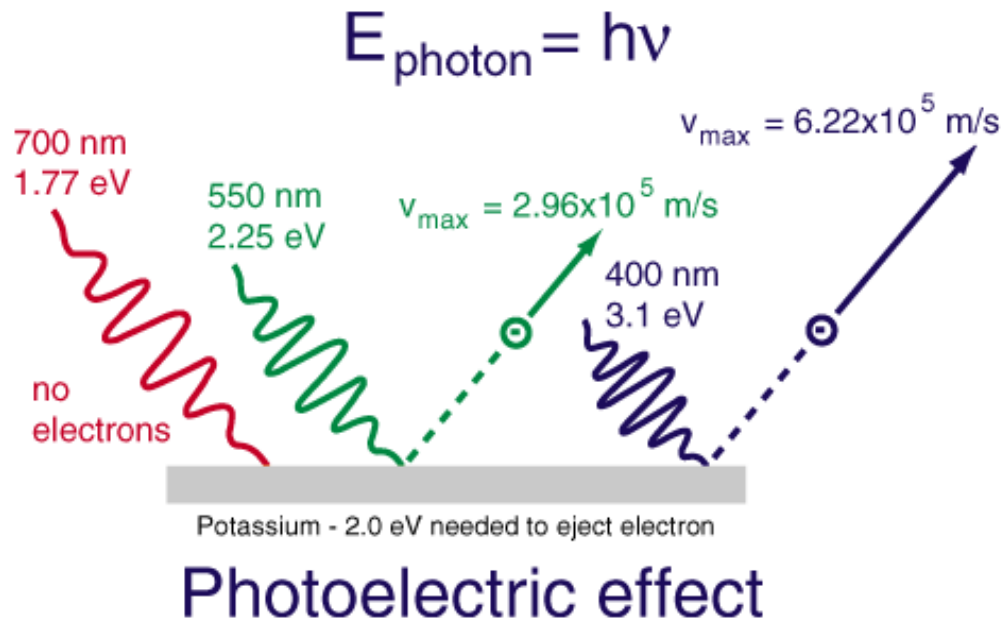


viditelné světlo

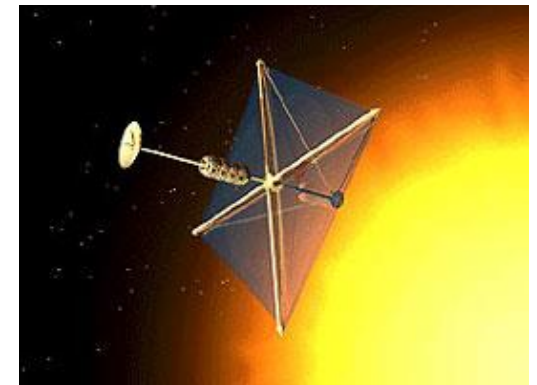


Elektromagnetické záření

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

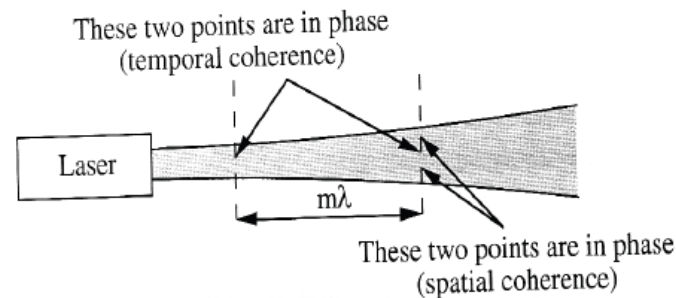
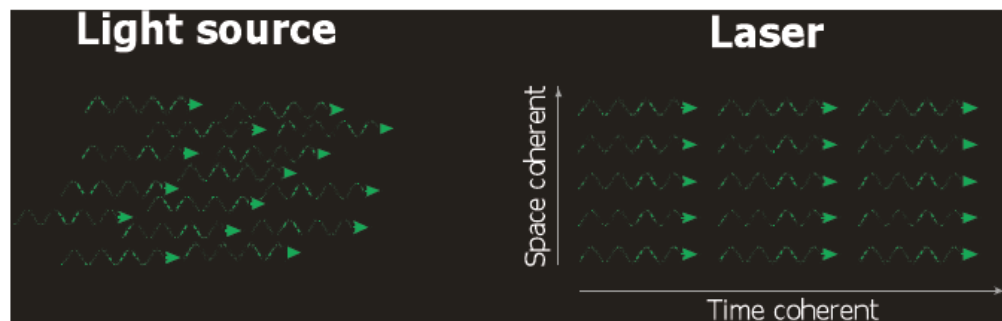
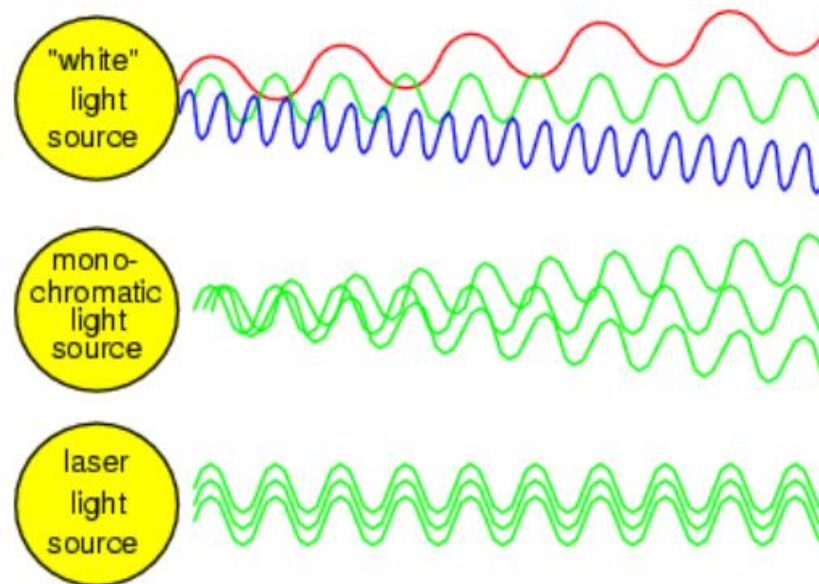


Záření má hybnost -
existuje **tlak záření**
(hybnost za sekundu na
jednotku plochy)



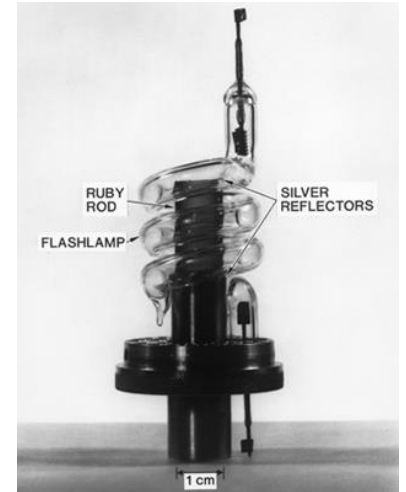
Vlastnosti laserového záření

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



Trocha historie

- Princip laseru fyzikálně – 1917 Albert Einstein.
- Předchůdcem laseru maser, stejný princip, ale generuje mikrovlnné záření.
- 1957 Ch. Townes a A. L. Schawlow v článku ve Physical Review o konstrukci infračerveného a optického maseru (čili laseru).
- 1957 Gordon Gould v doktorské práci koncept laseru – oficiálně považován za vynálezce.
- 1960 první funkční laser Theodore Maiman.



Vývoj výkonných laserů

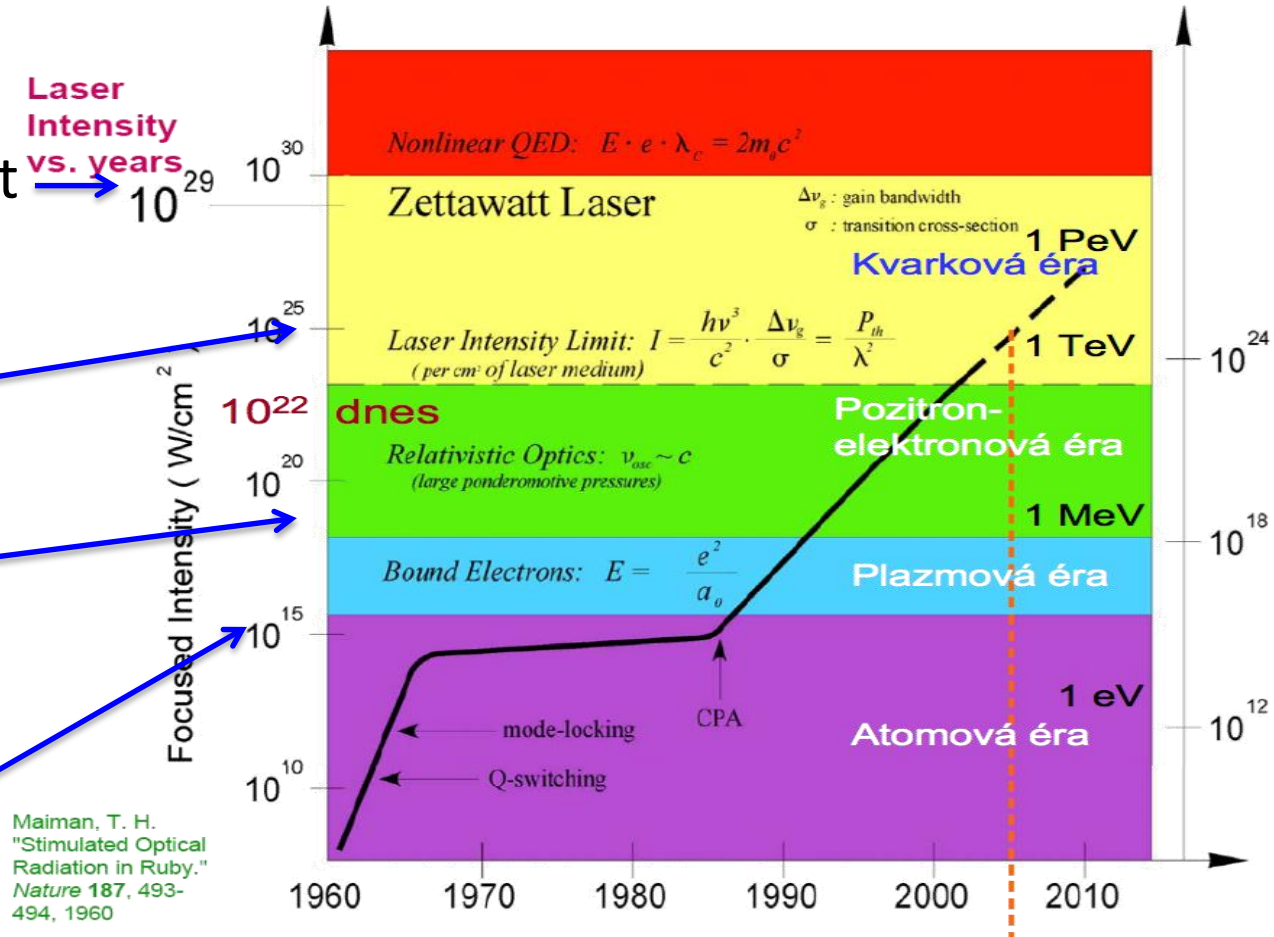
lasery pracují v kontinuálním (nízkointenzitním) nebo pulzním (vysokointenzitním) režimu

- Schwingerův limit

- Radiační útlum

- Relativita

- Ionizace polem

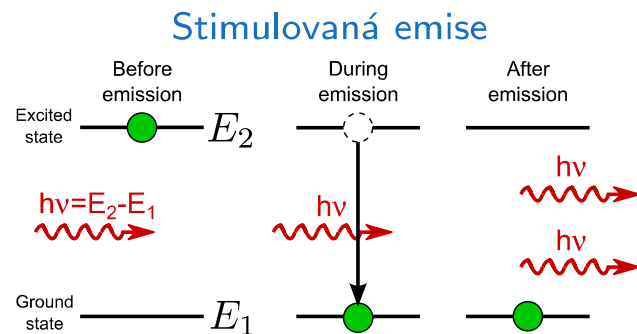
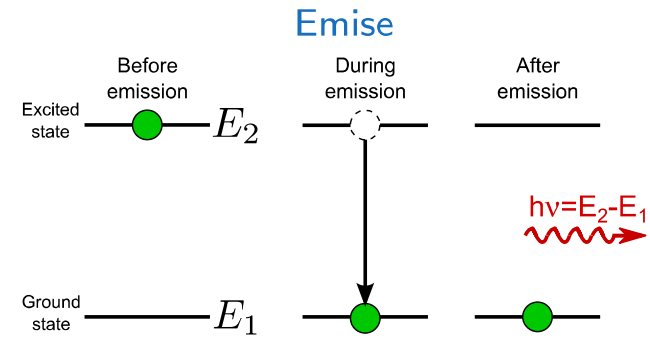
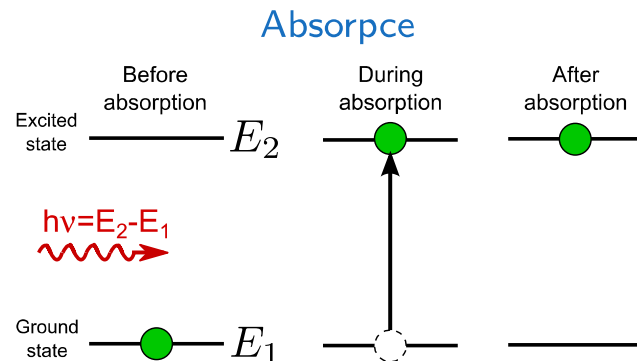


Mourou, G. A., Barty, C. P. J., and Perry, M. D., 1998, *Phys. Today* 51, 22

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

Generace laserového záření

Absorpce, emise, stimulovaná emise



Einsteinovy koeficienty



B_{12} , B_{21} , A_{21}

Platí

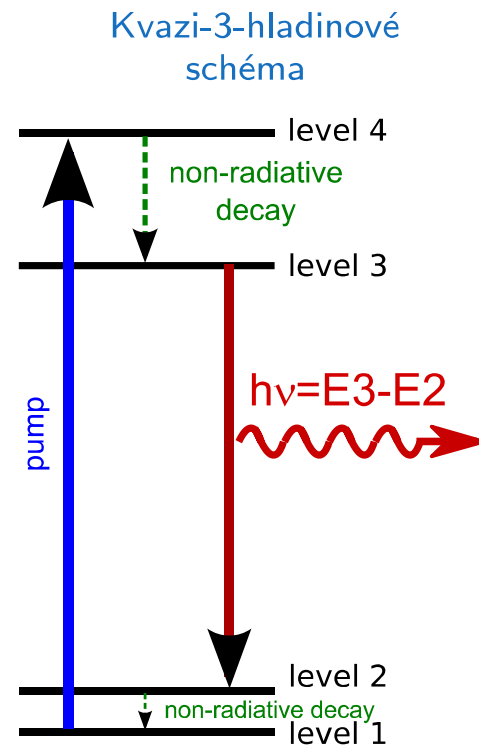
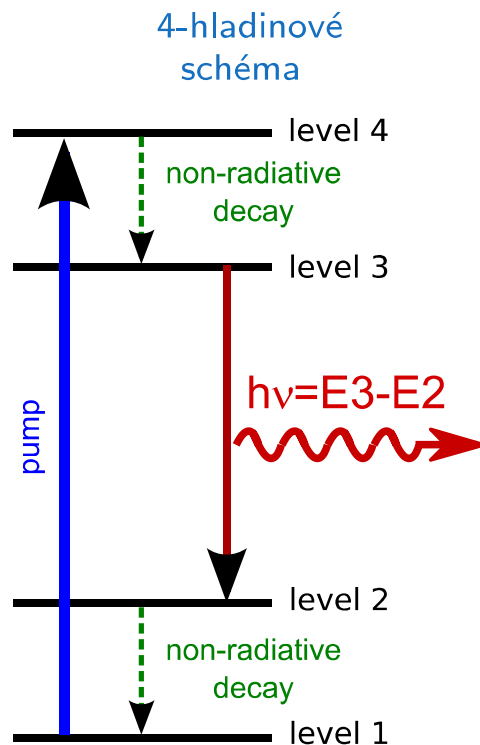
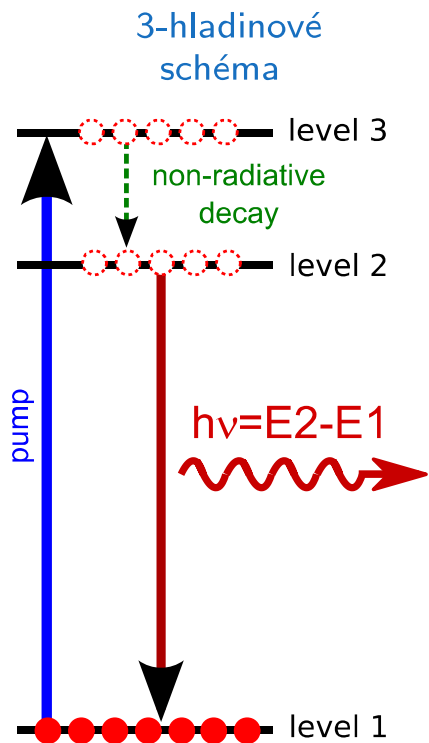
$$B_{12} = B_{21}; \quad \frac{A_{21}}{B_{21}} \sim f^3$$

- ▶ Pro zesilování nutné dosáhnout inverze populace hladin
- ▶ U 2-hladinového systému není možné, protože $B_{12} = B_{21}$; maximálně rovnost

Generace laserového záření

Aktivní prostředí dle laserových hladin

- K dosažení inverze populace hladin (víc elektronů na horní hladině než na spodní) je potřeba **minimálně 3 energetických hladin**



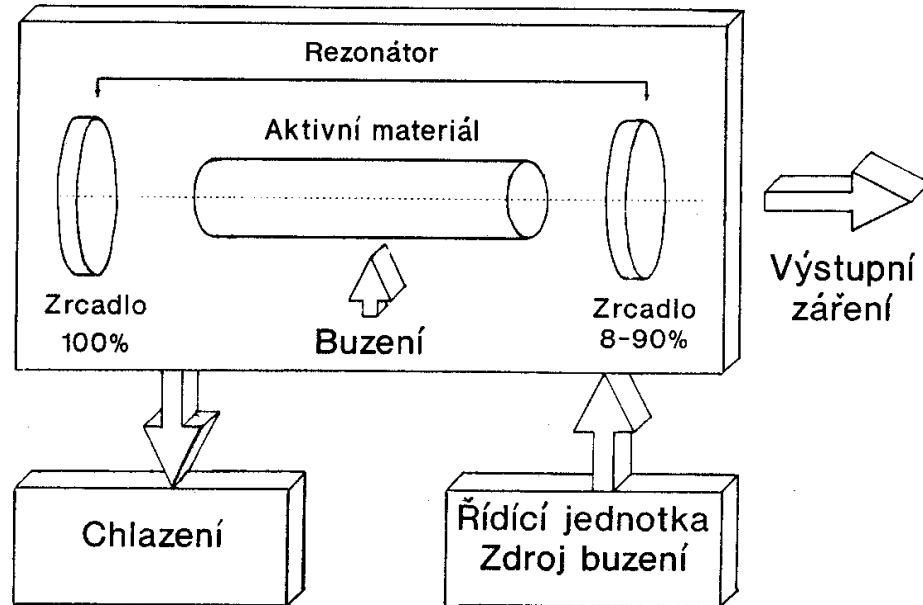
Generace laserového záření

Základní části laseru

- ▶ Aktivní prostředí (pevná látka, kapalina, plyn, polovodič, plasma)
- ▶ Čerpání (nekoherentní, koherentní)
- ▶ Laserový rezonátor = kladná zpětná vazba
- ▶ Chlazení

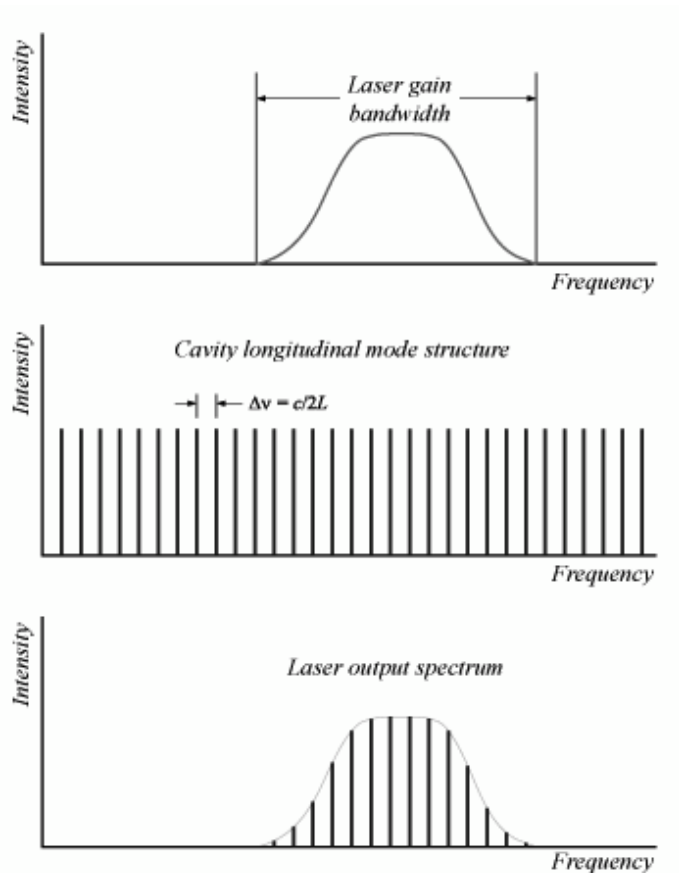


Laserová hlavička

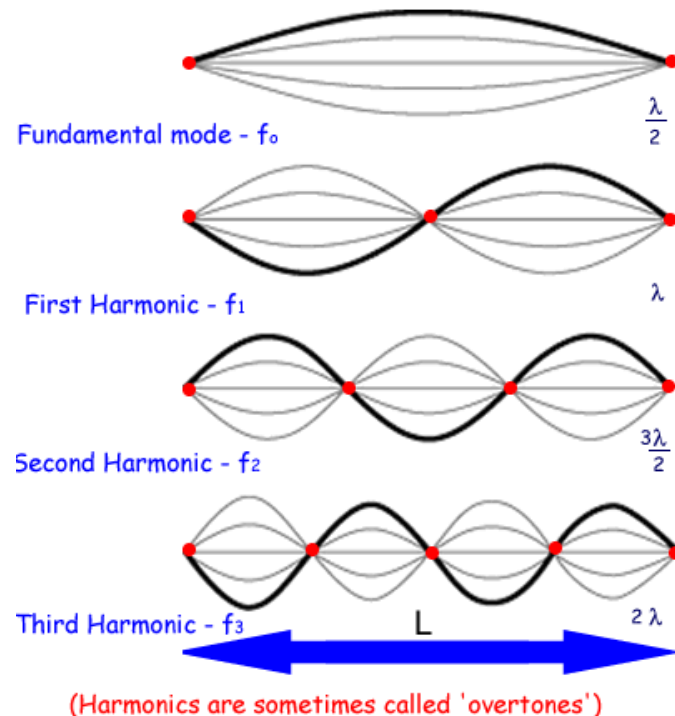


Generace ultrakrátkých impulsů

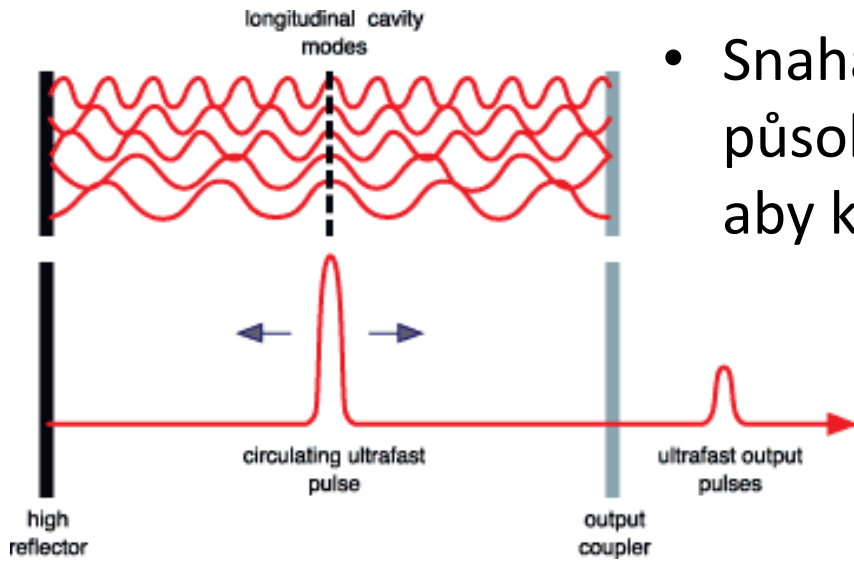
- Aktivní médium není striktně monochromatické – může vyzařovat určité **pásmo vlnových frekvencí**.



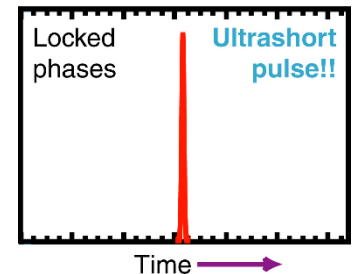
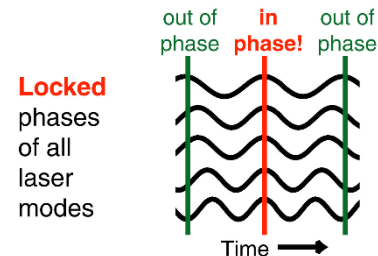
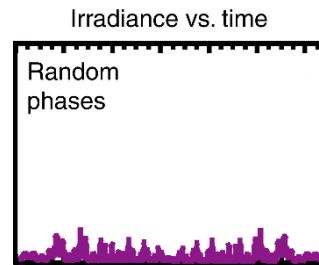
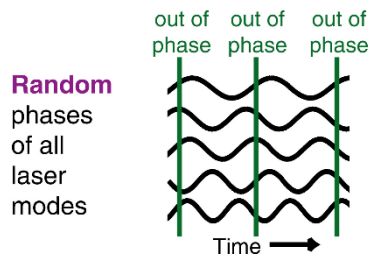
- V rezonátoru - **stojaté vlny**.



Generace fs impulzů (synchronizace módů)



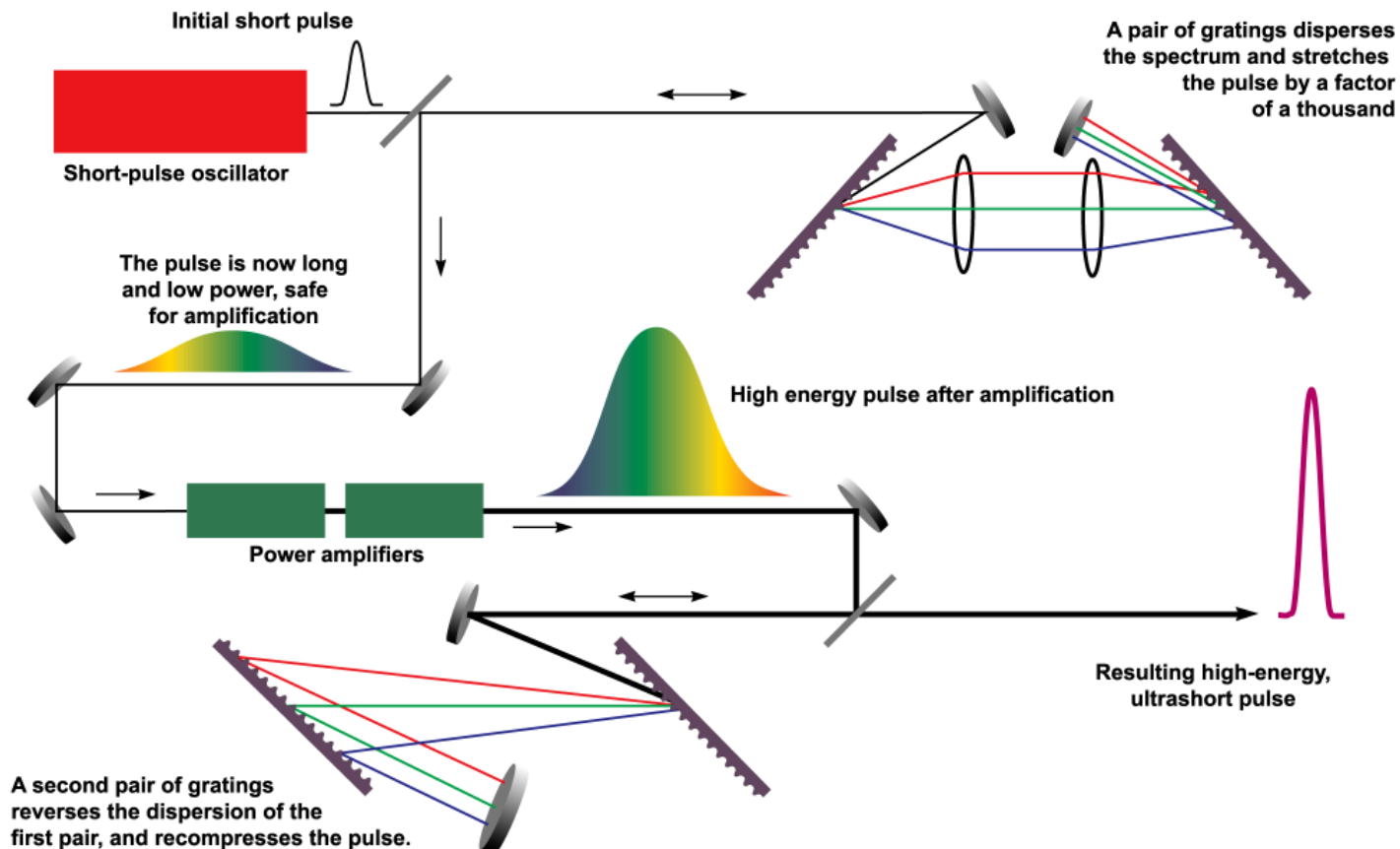
- Snaha sladit v určitém časovém okamžiku působení jednotlivých módů rezonátoru tak, aby každý přispíval svým maximem
 - Nejednotnost – průměrné výkony
 - Synchronizovanost – vysoké špičkové výkony



Zesilování ultrakrátkých impulzů

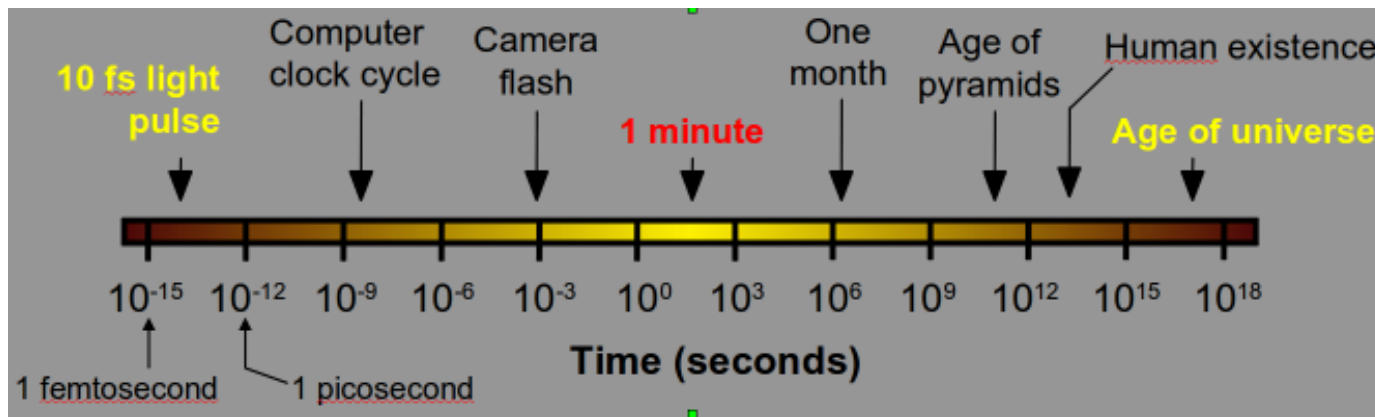
- v rezonátoru generován pouze slabý fs pulz – energie v μJ
- tento pulz je nejprve mnohokrát prodloužen v prostoru (CPA) a pak dále zesilován

CPA = Chirped Pulse Amplification



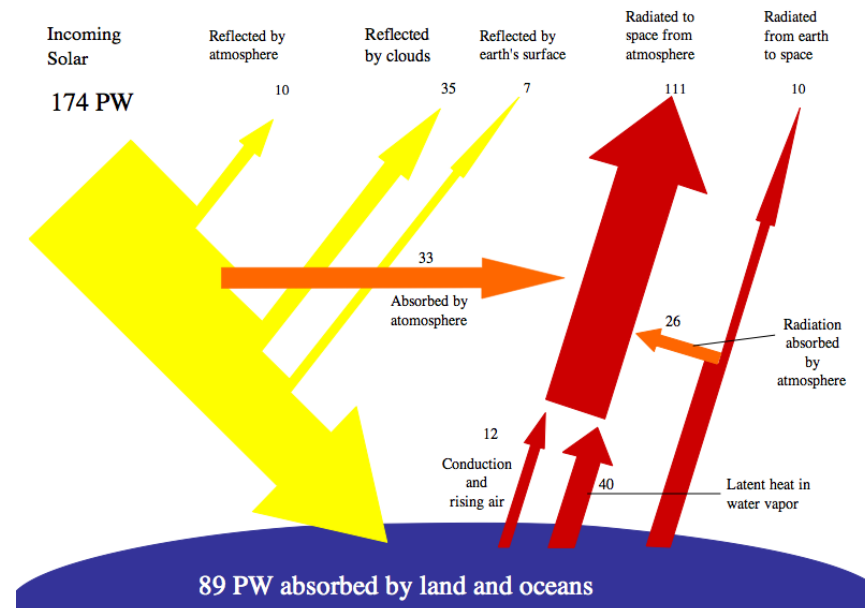
Délka impulzu - časové měřítko

- Lasery ve viditelném spektru – periody řádu jednotek fs (Ti:Sa 2.7 fs)
- 1 fs je stejná část minuty jako minuta část věku vesmíru
- Pulzní lasery – délka impulzů ns-ps, v posledních 20 letech i desítky fs
- Dnes nejkratší laserové impulzy 5 fs (Ti:Sa) = 2 periody
- Kratší impulzy lze složit z vln s vyššími harmonickými frekvencemi ve spektru – HHG attosekundy/zeptosekundy
- 1 ns impulz → 30 cm balík fotonů, 1 fs impulz → 0.3 μm balík fotonů



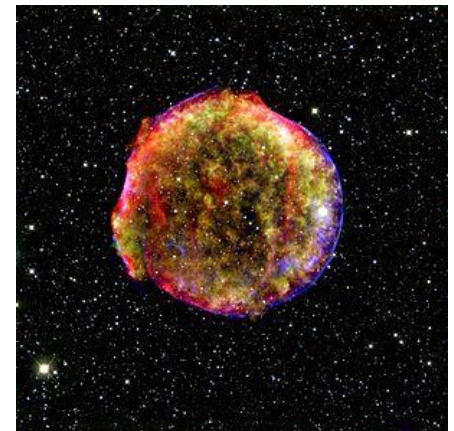
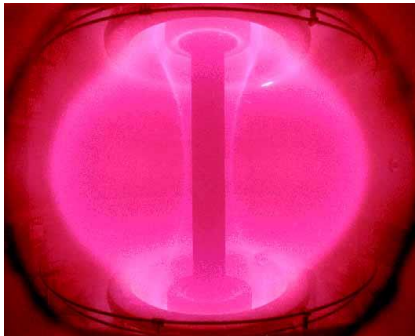
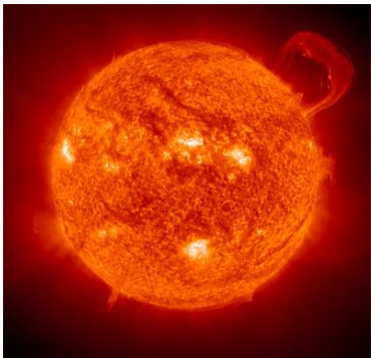
Energie fotonů / impulzu a výkon

- Energie jednoho fotonu řádu jednotek eV (1.55 eV pro Ti:Sa), 10^{19} fotonů na J.
- Díky krátké době trvání lze dosáhnout po krátkou dobu neuvěřitelně vysokých výkonů i při nízké energii v impulzu
 - např. $10 \text{ mJ} / 10 \text{ fs} = 1 \text{ TW}$ (odpovídá asi 1000 bloků Temelína, a to z laseru, který se vejde na větší stůl!)
- Dnes fs lasery o výkonu 1 PW.
- **V ELI – Beamlines se počítá s lasery o špičkových výkonech až 10 PW!**
- Fokuse do oblasti několika μm^2 - 10^{23} W/cm^2 .



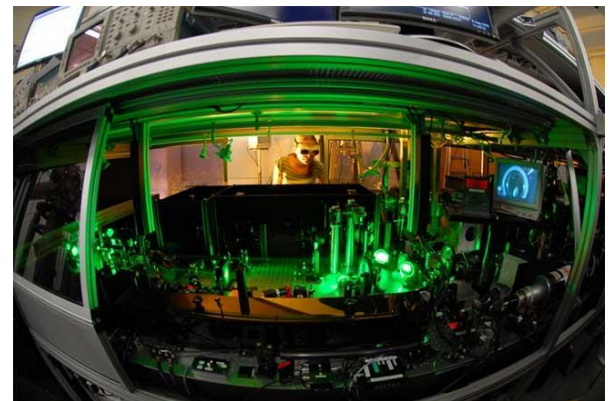
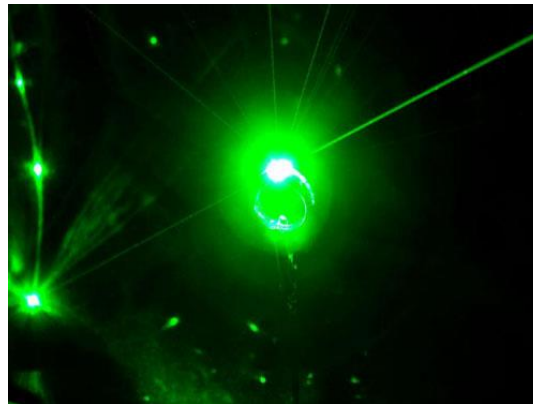
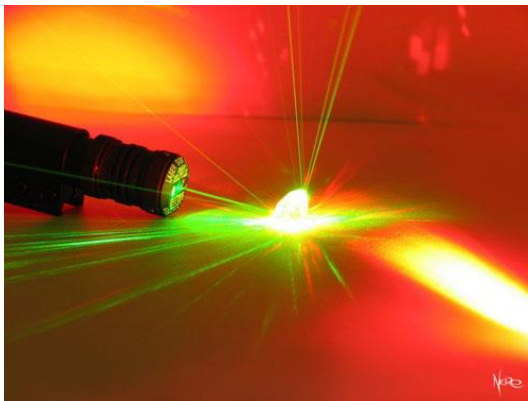
Fyzika plazmatu

- plazma - kvazineutrální systém (plyn) nabitých (a případně i neutrálních) částic, který vykazuje kolektivní chování (např. oscilace elektronů vůči iontům, jejich šíření není dostatečně rychle tlumeno vzájemnými srážkami mezi částicemi)
- fyzika plazmatu se zabývá popisem chování takového systému
- různé formy plazmatu - obrovský rozsah možných hustot (od 1 částice na cm^3 v mezihvězdném plynu po více než 10^{23} částic v ionizovaných pevných terčích) a teplot (od 100 K v mezihvězdném prostoru po 10^9 K v nitrech hvězd)



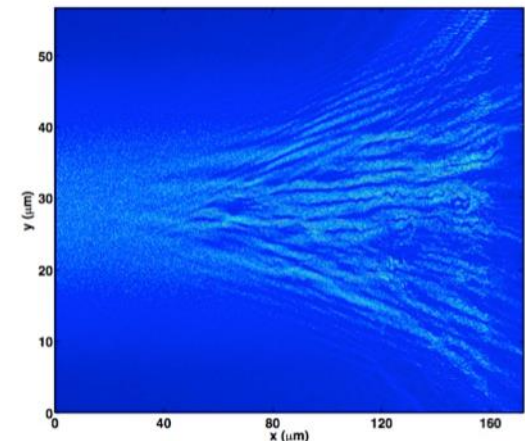
Čím je atraktivní laser pro fyziku plazmatu

- Pro ionizaci plynu nebo povrchu pevné látky stačí $10^{10} - 10^{11} \text{ W / cm}^2$
- Vysoká koncentrace energie – laser lze fokusovat (ideálně) do plochy $\propto \lambda^2$ a dosáhnout vysoké hustoty toku energie.
- Pokud se energie pohltí na délce $\leq \lambda$, lze dosáhnout nejvyšších hustot absorbovaného výkonu na zemi, snad s výjimkou nukleárních výbuchů.
- Pro **ns** impulsy – obvykle intenzity $10^{13} - 10^{16} \text{ W / cm}^2$, pro **fs** impulsy $10^{16} - 10^{22} \text{ W / cm}^2$



Interakce laserového záření s plynem a s pevným terčem

- Pro elektromagnetickou vlnu existuje mezní, tzv. kritická hustota $n_c = \frac{e_0 m \omega^2}{e^2}$
- Do hustšího plazmatu se vlna šířit nemůže (je odstíněna elektronovou vlnou) a na této hustotě se tedy částečně absorbuje a částečně odráží.
- Kritická hustota ($\approx 10^{21} \text{ cm}^{-3}$, $\lambda = 1 \mu\text{m}$) je malá oproti hustotě pevné látky, ale velká oproti hustotě plynu
- Energie se dovnitř nadkriticky hustého plazmatu (pevná látka) šíří elektronovou tepelnou vodivostí, radiačním transportem a pomocí velmi rychlých nabitých částic.
- V podkriticky hustém plazmatu (plyn) laserový impuls proniká, může docházet k jeho (de)fokuzaci, filamentaci.



Aplikace ultrakrátkých laserových impulzů

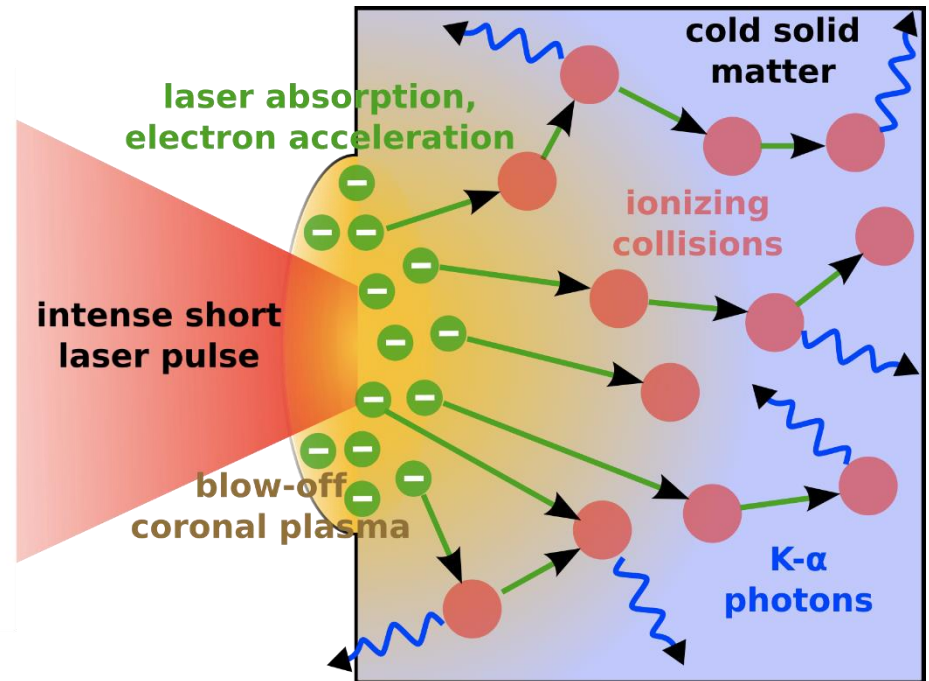
- Měření procesů v chemii a biologii s velmi dobrým časovým rozlišením (možno měřit různé dynamické procesy)
- Technologické aplikace (výroba jemných struktur)
- Medicínské aplikace (úprava rohovky - odstranění vad zraku)

Vysocevýkonné femtosekundové lasery (především výzkum – aplikace jsou vyvíjeny)

- Generace vln o vyšších harmonických frekvencích (násobky základní frekvence) a jejich složením vznik attosekundových impulzů
- Rentgenové lasery (plazma jako aktivní prostředí pro generaci rentgenového záření)
- **Generace ultrakrátkých impulzů tvrdého rentgenového záření**
- **Svazky rychlých iontů**
- **Svazky rychlých elektronů**

Generace K-alfa záření

- Interakce laserového záření s terčem urychluje horké elektrony dovnitř terče.
- V důsledku srážek těchto elektronů s atomy dochází k ionizaci vnitřních slupek elektronového obalu.
- Relaxace takto vzniklých iontů je často doprovázena vyzářením fotonu charakteristického záření K- α .
- K- α záření vznikající při interakci terče s krátkým laserovým pulsem má jedinečné vlastnosti – monochromatické, velmi krátké impulzy, malá velikost zdroje, synchronizace s laserovým impulzem.



Časová rentgenová krystalografie

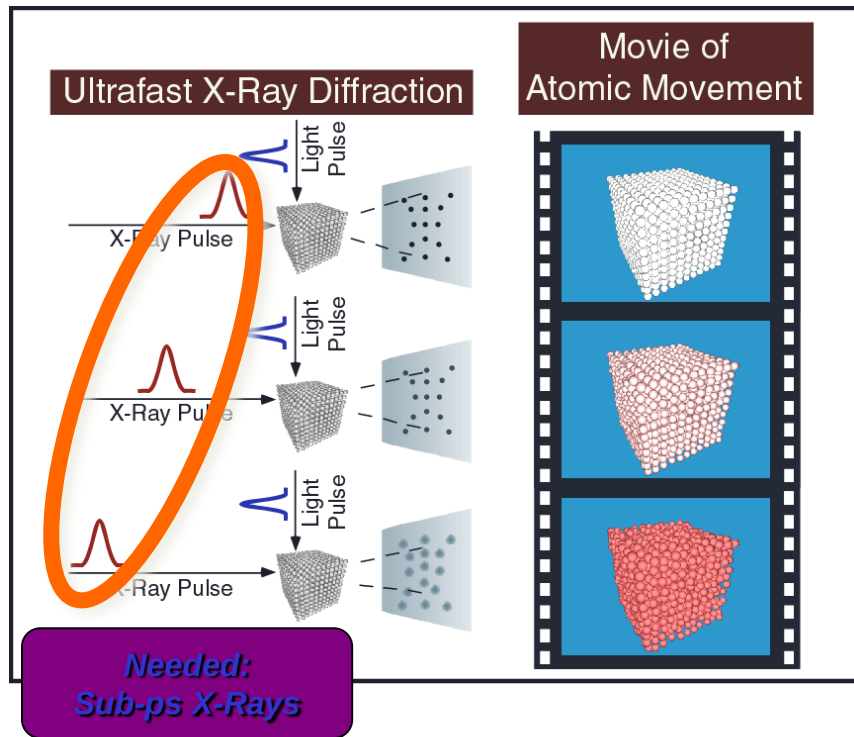
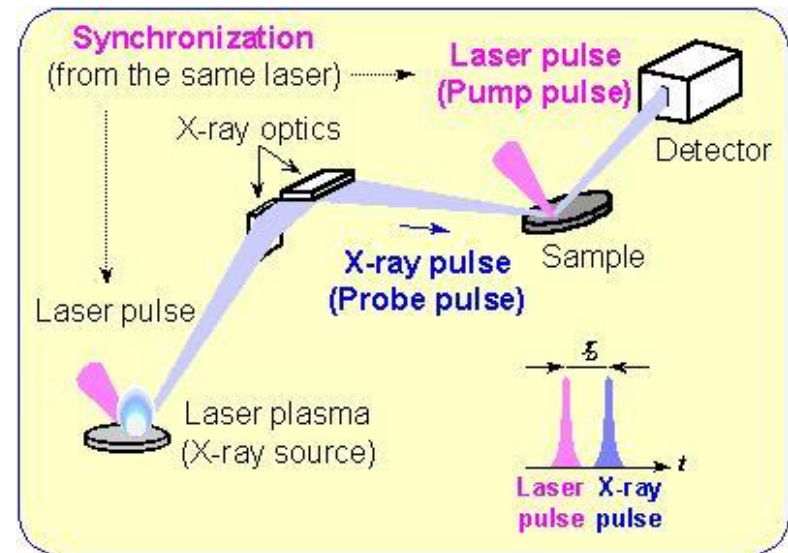


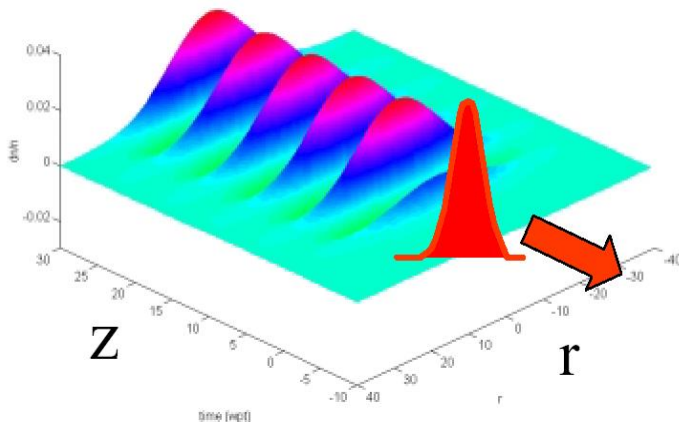
schéma měření – laserový impuls spustí reakci v krystalu (excitace apod.), zároveň jeho druhá (intenzivnější) část generuje rtg impuls k zobrazení změn ve vzorku



K- α záření má ideální vlastnosti – velmi krátký impuls, vysoká intenzita, monochromatické spektrum

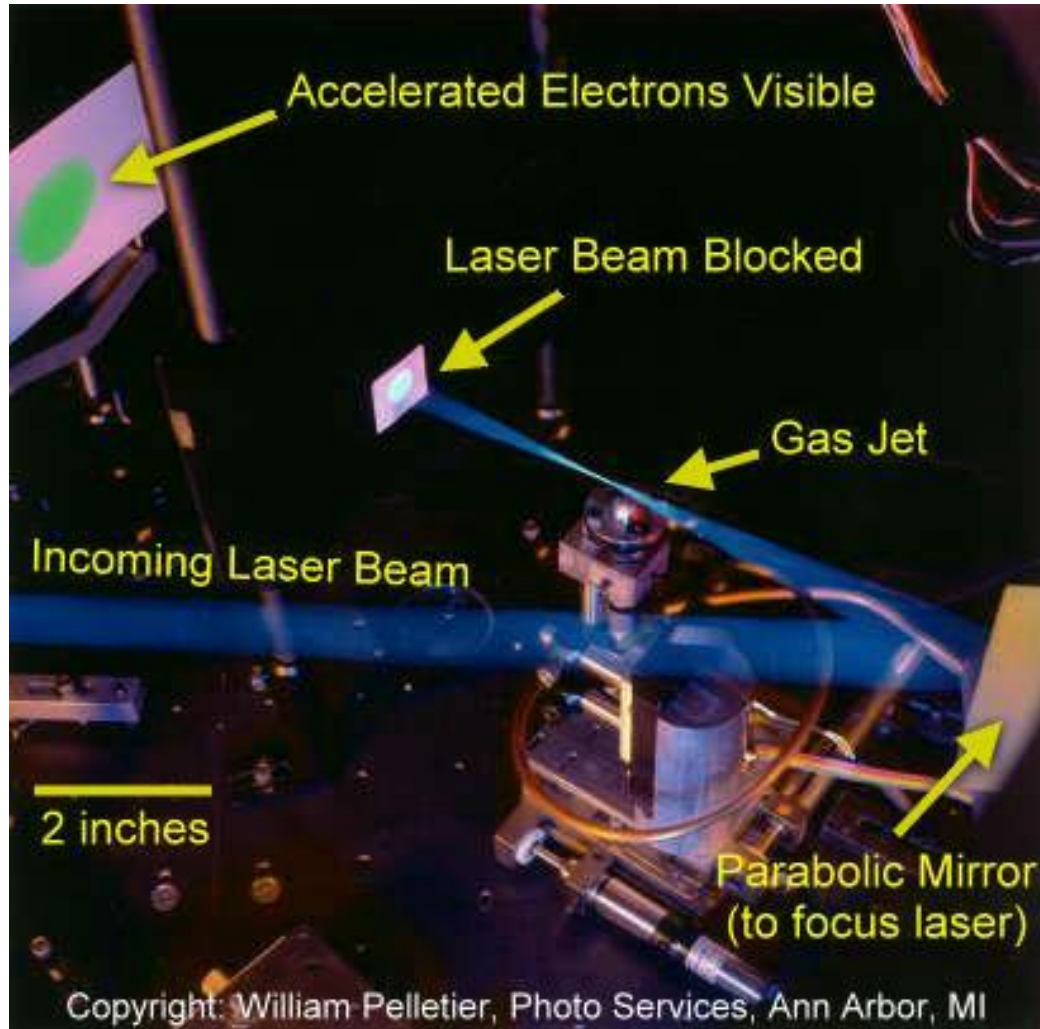
Urychlování elektronů

- Více mechanismů urychlování elektronů při interakci s **pevnými terči** – obvykle nižší energie (až desítky MeV, $1 \text{ eV} = 1.6 \times 10^{-19} \text{ J}$) a vysoké toky – **použití např. v konceptu fast ignition u inerciální jaderné fúze**
- V **plynech** – svazky monochromatických kolimovaných elektronů (energie až GeV)
- Urychlování elektronů zachycených (elektronovými) plazmovými vlnami – elektrická pole dosahují **200 GV/m** – ve srovnání s 20 MV/m v konvenčních urychlovačích – na stejnou energii se urychlí na 1 m místo 10 km



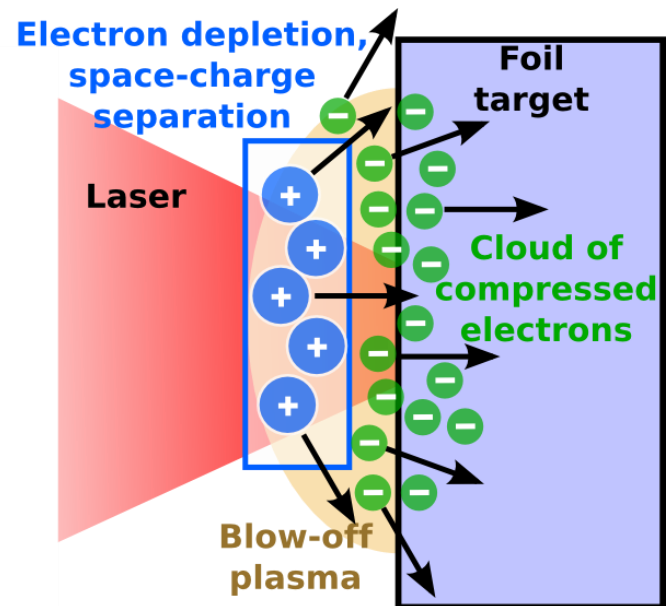
- laserový impulz se šíří v podkriticky hustém plazmatu, elektrony jsou vytlačovány ponderomotorickou silou (tlakem záření)
- elektrony začnou oscilovat vzhledem k iontům, oscilace se šíří a některé elektrony jsou urychleny na vlně podobně jako surfař na hladině oceánu

Urychlování elektronů – schéma typického experimentu



Urychlování iontů

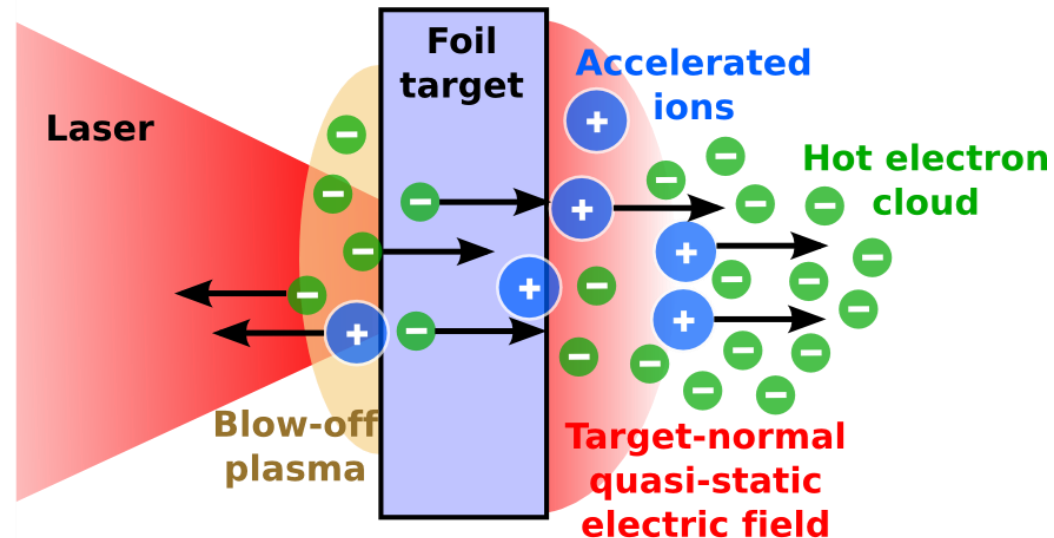
- **Dva základní mechanismy urychlování iontů**
- V plazmatu dochází při interakci s laserovým impulzem ke vzniku silných elektrických polí (TV/m) v důsledku separace elektronů a iontů
- **Urychlování iontů na přední straně terče**
 - Laserový impulz se od dostatečně hustého plazmatu odráží
 - Silný tlak záření tlačí elektrony dovnitř terče
 - Vzniká silné elektrostatické pole, které urychluje ionty ve směru zářením vytlačených elektronů



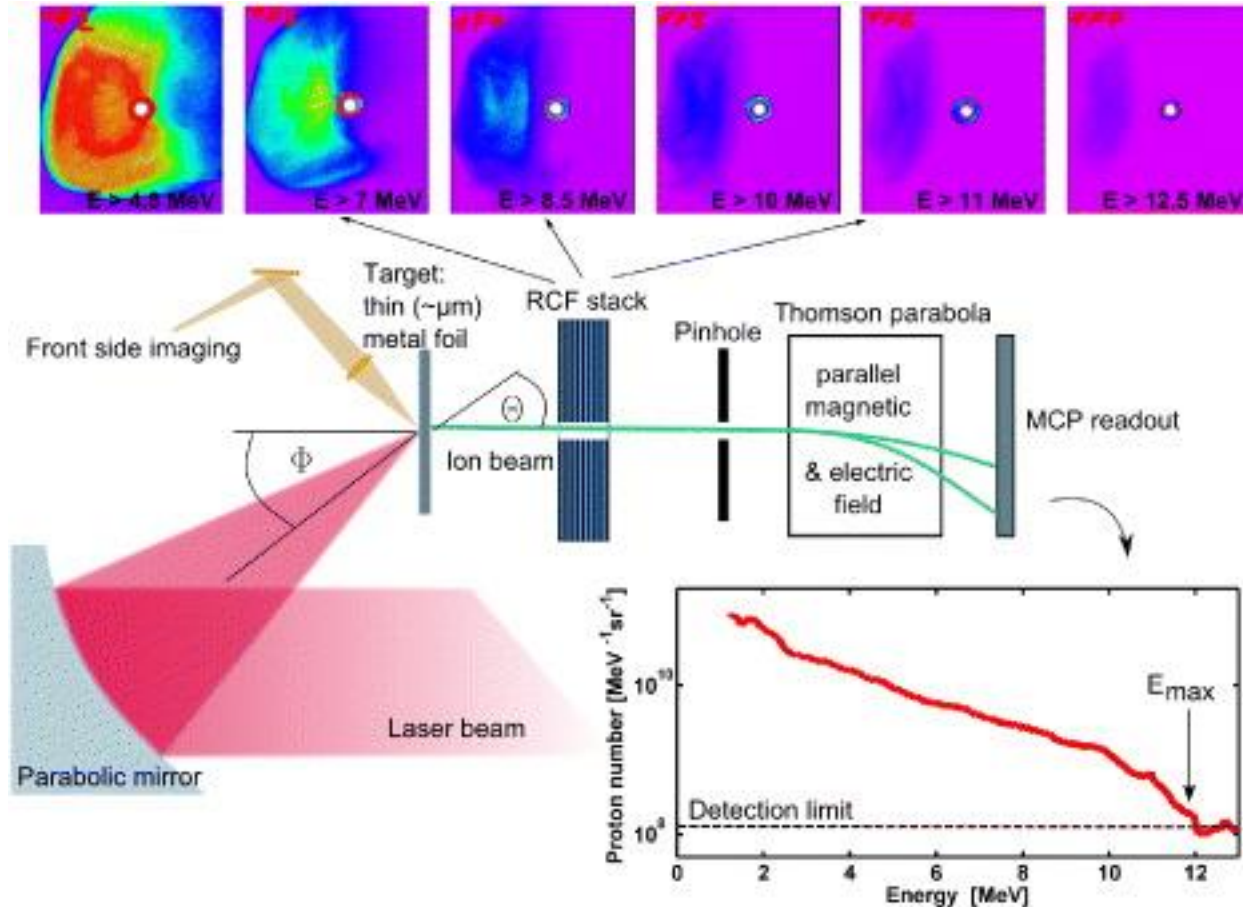
Urychlování iontů

- **Urychlování iontů ze zadní strany terče**

- Dopadající laserový impulz na přední straně urychluje elektrony na rychlosti řádově srovnatelné s rychlostí světla, ty dále pronikají na zadní stranu terče
- Elektrony vylétají za zadní strany terče a vytvářejí zde silné elektrostatické pole
- Silné pole na zadní straně ionizuje terč a urychluje ionty
- Urychlenými ionty jsou obvykle protony pocházející z nečistot na povrchu terče

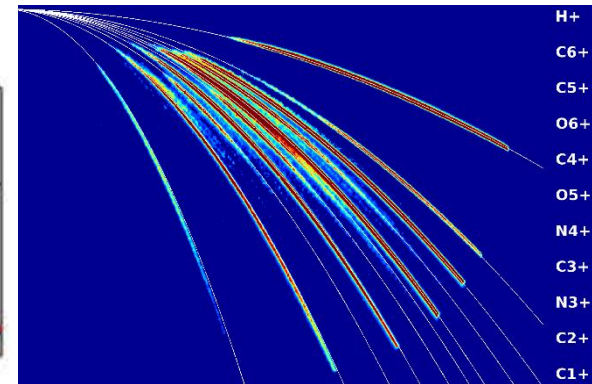


Urychlování iontů

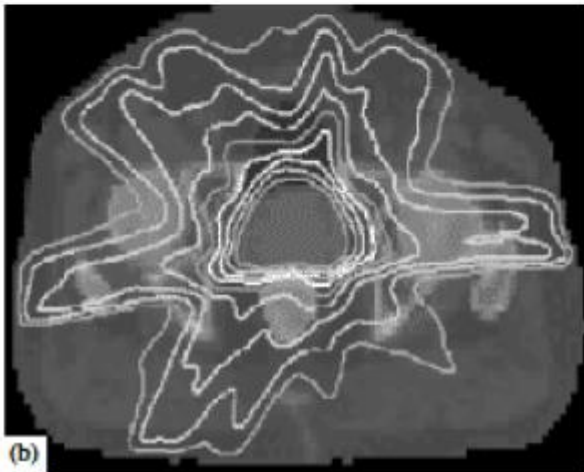
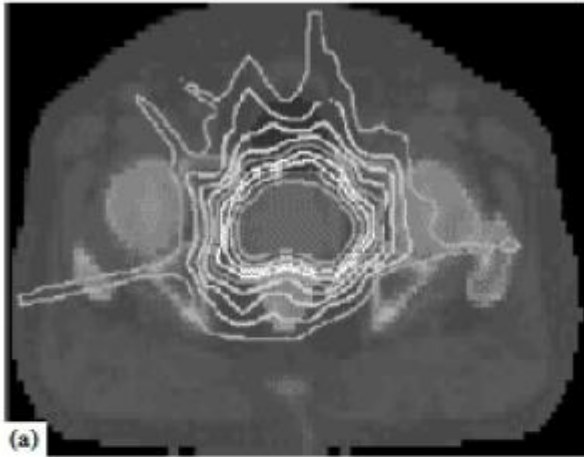


Urychlené protony
měřené sadou
radiochromických
filmů

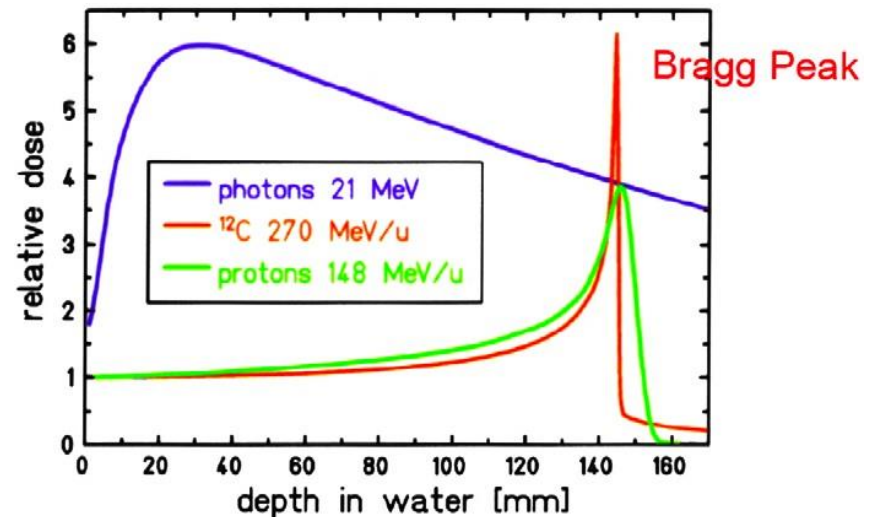
Urychlené ionty
naměřené pomocí
Thomsonovy paraboly



Protonová terapie



- protony při průniku do tkáně deponují nejvíce energie v určité hloubce → minimalizace poškození zdravé tkáně – výhoda oproti dnes používaným rtg zářičům
- standartní urychlovače velmi drahé a objemné



Koncept rychlého zapálení při inerciální jaderné fúzi

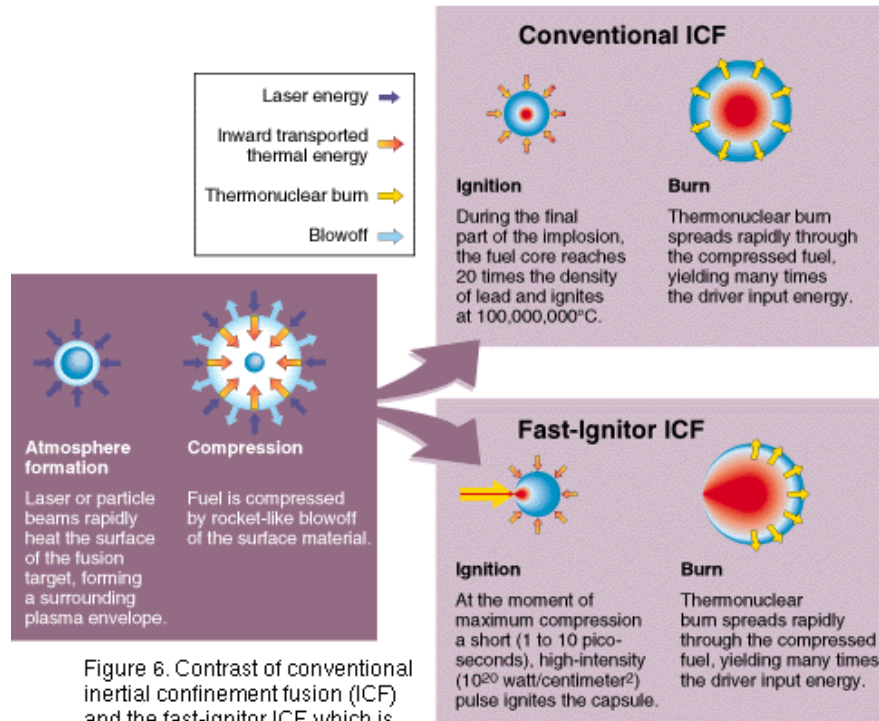
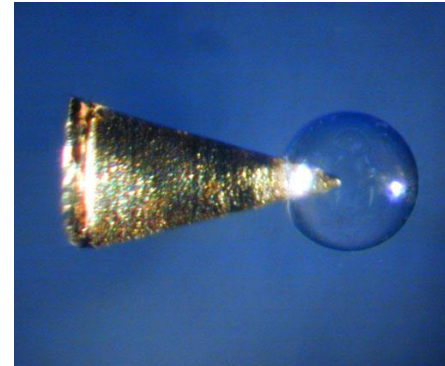


Figure 6. Contrast of conventional inertial confinement fusion (ICF) and the fast-ignitor ICF, which is used on the Petawatt laser.

Terč pro koncept „fast ignition“



Použití rychlých elektronů nebo protonů pro zapálení fúzní reakce

- Dlouhými a vysoce energetickými laserovými pulzy – komprese paliva (deuteria a tricia) na hustoty dostatečné pro inerciální fúzi
- Kratšími a výkonnými pulzy – ohřev paliva prostřednictvím urychlených částic

Exotická fyzika

Ověření teoretických předpokladů kvantové elektrodynamiky

- urychlené elektrony (10 GeV) interagují s intenzivním laserovým impulzem ($>10^{21}\text{W/cm}^2$), elektrony emitují fotony gamma záření, z nich se tvoří elektron-positronové páry (ty mohou dále emitovat fotony gamma záření – kaskádovitý proces)
- v budoucnu: „zhmotnění vakua“ – dva laserové impulzy spolu interagují – tvorba elektronů a pozitronů ve vakuu! ($>10^{25}\text{W/cm}^2$, Schwingerův limit 10^{29}W/cm^2)

