

Ultrakrátké intenzivní laserové impulzy



aneb co se skrývá za projektem ELI

Jan Pšikal (jan.psikal@fjfi.cvut.cz)

Týden vědy na FJFI, 20. 6. 2018 v Praze

Fakulta jaderná a fyzikálně inženýrská ČVUT, katedra fyzikální elektroniky, V Holešovičkách 2,
Praha 8

též i Fyzikální ústav AV ČR, sekce ELI-Beamlines, Za Radnicí 835, Dolní Břežany



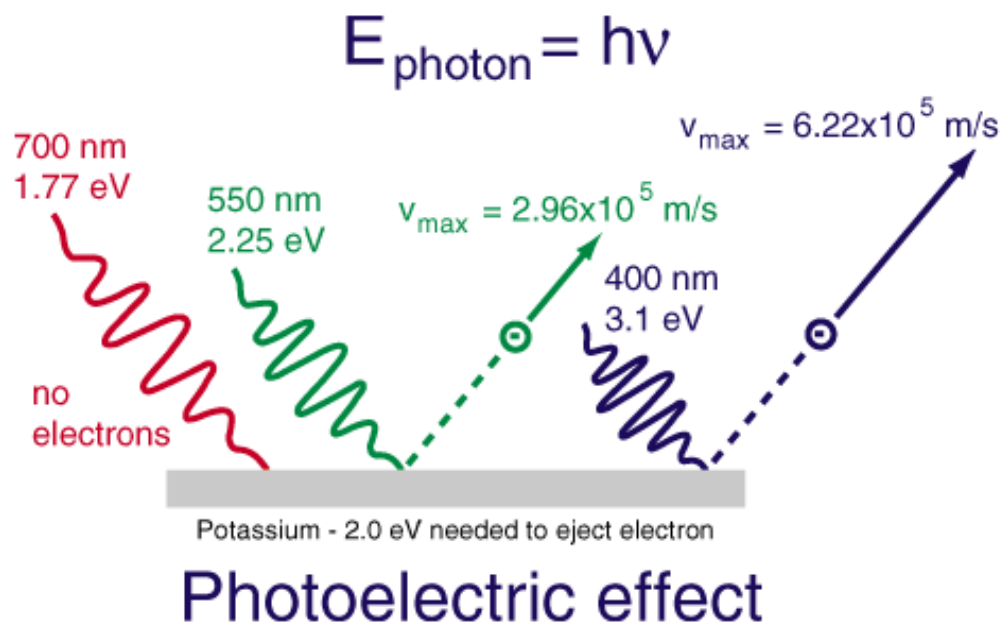
O čem si budeme povídat ?

- Co je světlo a co je laser?
- Co je elektromagnetická vlna?
- Jak laser funguje?
- Jaký je největší laser v ČR a ve světě?
- Jak vypadá / bude vypadat laser ELI?
- Co se stane, když laserový svazek dopadne na terč?
- Co je to plazma?
- K čemu se dá vysocevýkonný laser použít?

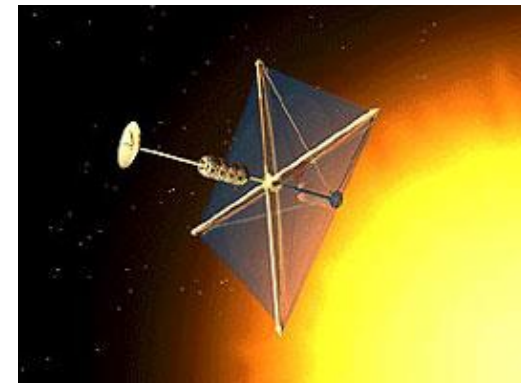
Co je světlo a co je laser?

- **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**

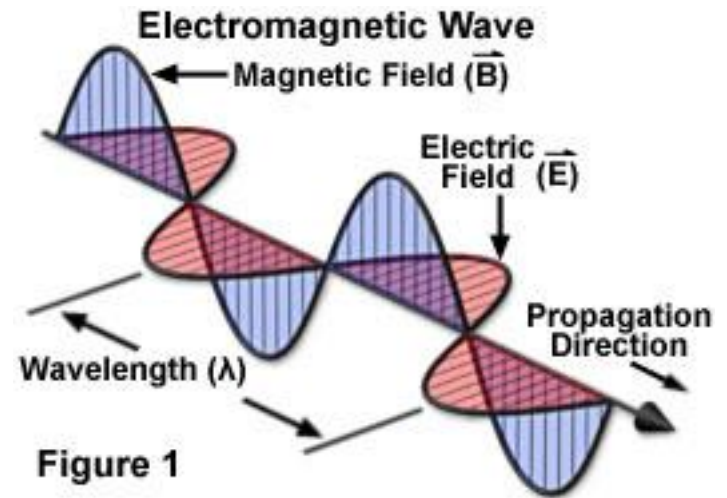
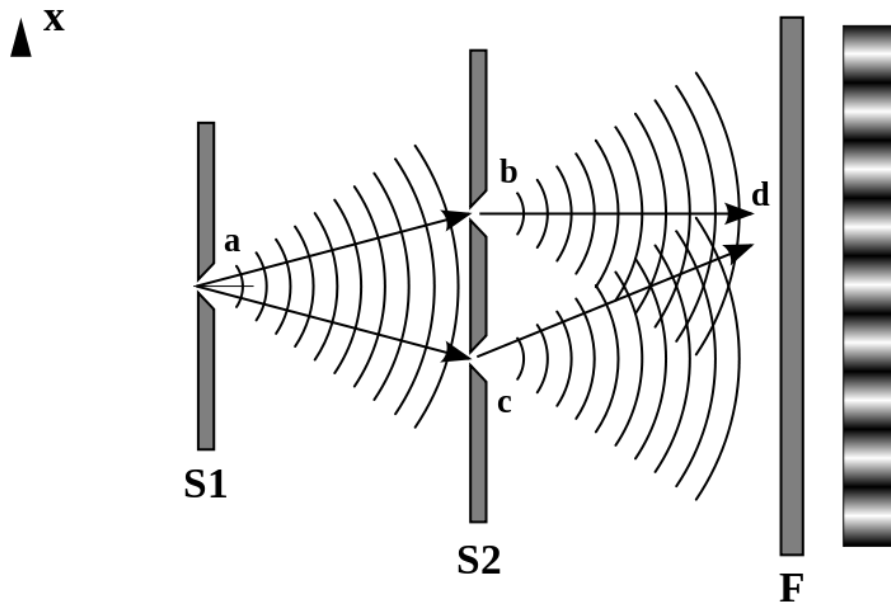
- Světlo má dvojí povahu - **dualita**
 - **Částicovou** – fotoelektrický jev (částice světla – **fotony**, mají danou energii **E** a hybnost **p**)



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

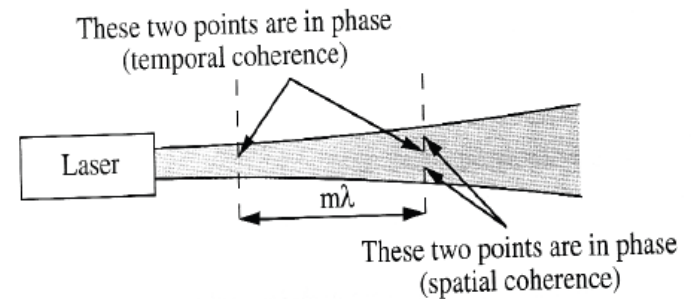
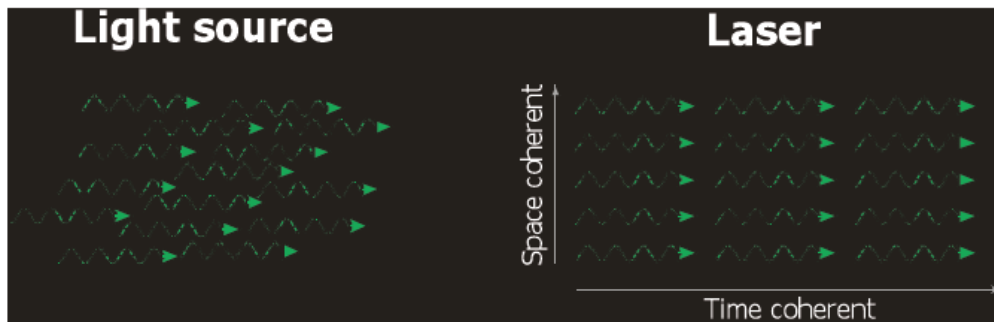
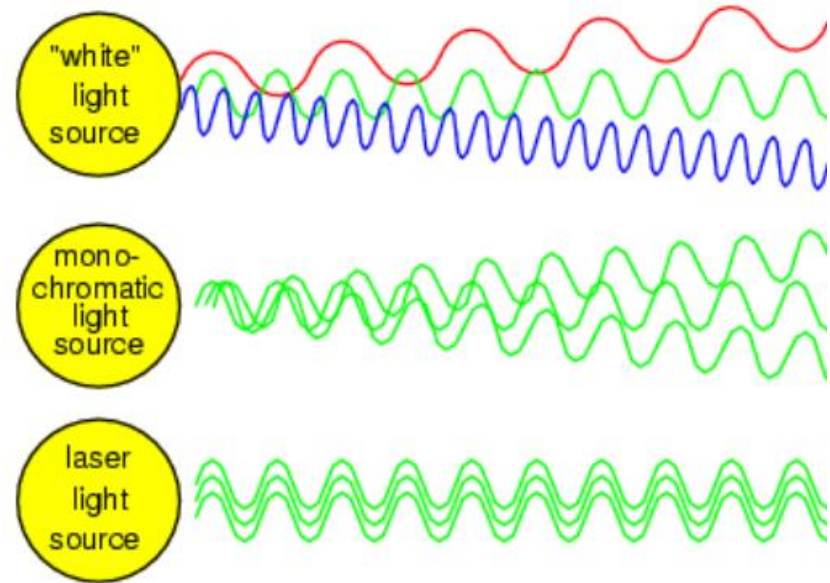


- Světlo má dvojí povahu – **dualita**
 - **Vlnovou** – štěrbínový experiment (elektromagnetické vlny mají vlnovou délku $\lambda = h/p$ a frekvenci $\nu = E/h$)

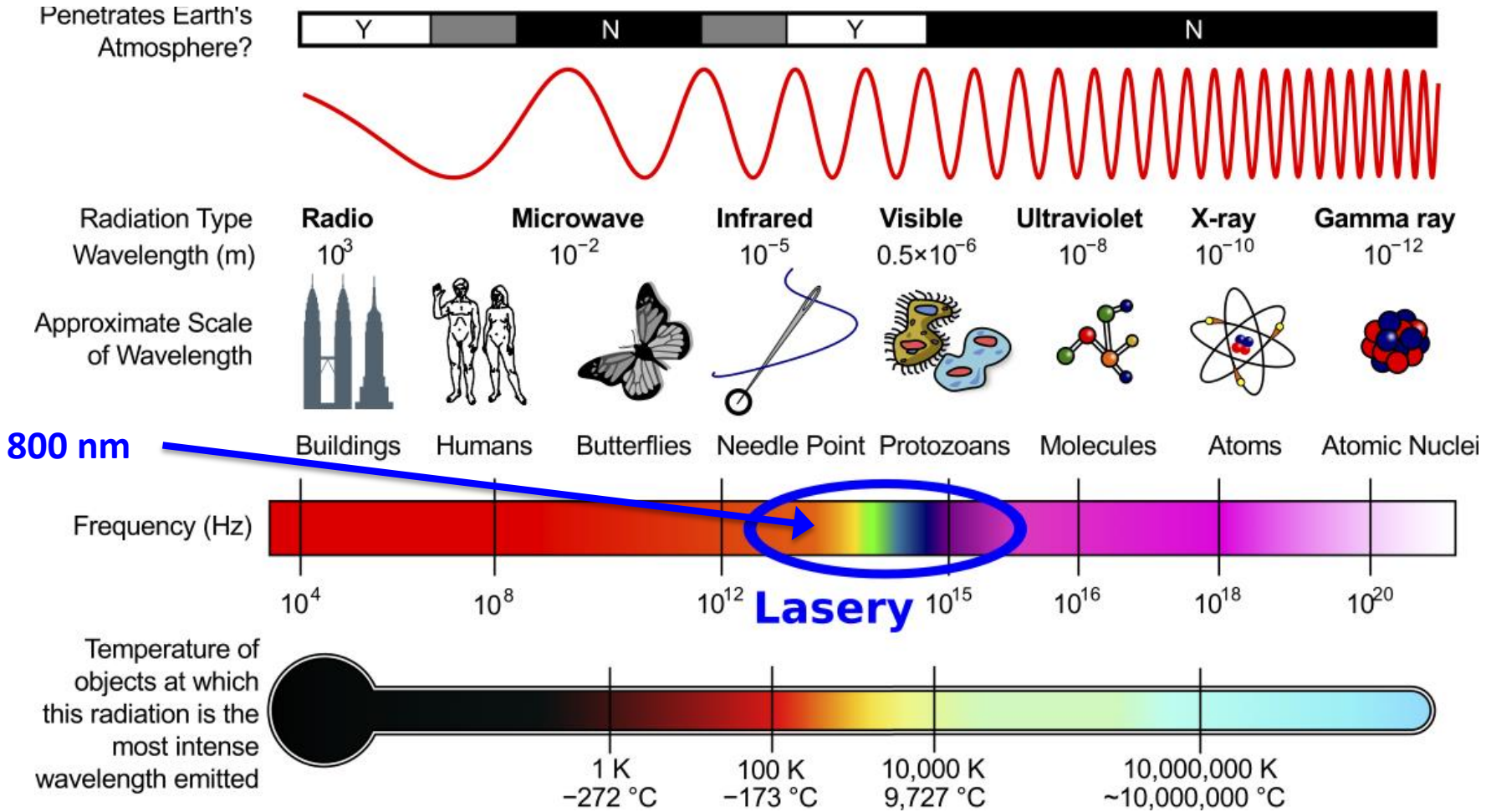


Další vlastnosti las. záření

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



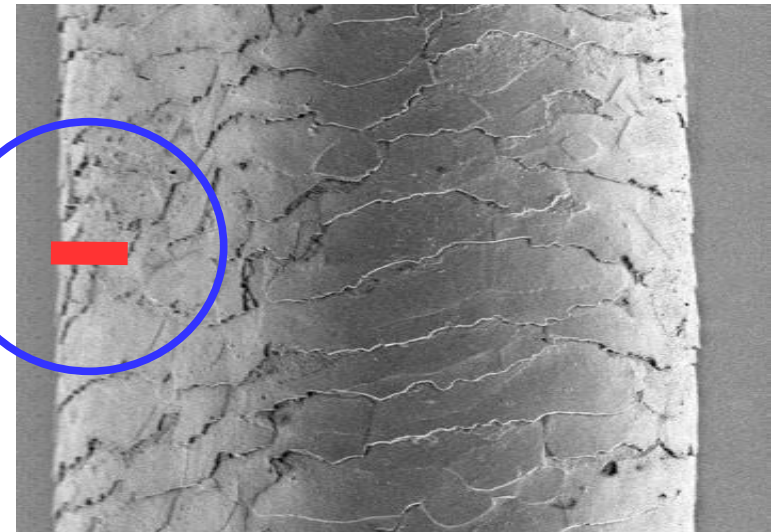
Vlnová délka – prostorové m.



Délka impulsu – časové m.

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

za 10 fs urazí světlo
dráhu 3 μm

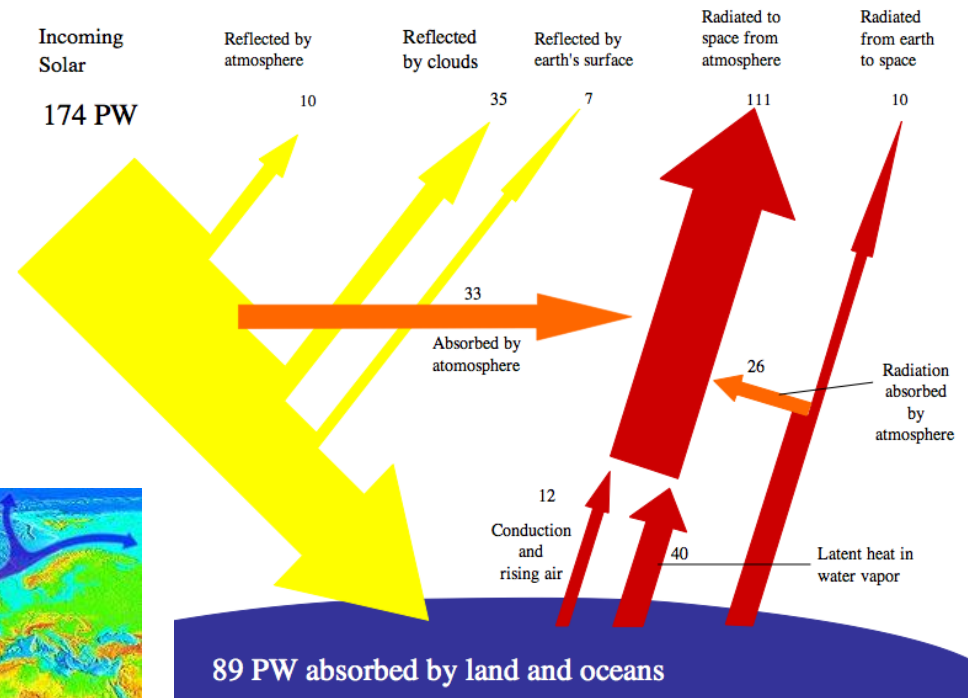
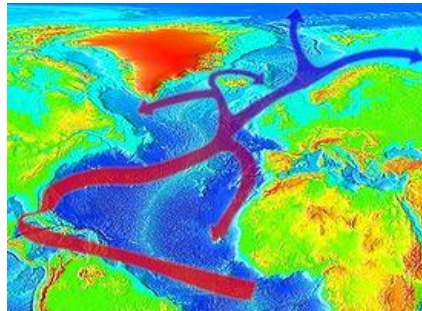


18-180 μm

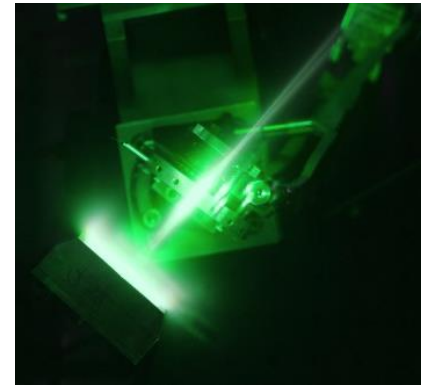
- Energie fotonu jednotky eV (1.55 eV), 10^{19} fotonů na J.
- Největší dosažená energie laserového impulsu – 26 kJ.
- Kinetická energie náboje vystřeleného z pušky M16 – 1.8 kJ.
- Laser NIF se 192 laserovými svazky má cca 1.8 MJ.
- Pro srovnání přibližná nutriční hodnota tyčinky Snickers 1.2 MJ.
- Průměrná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



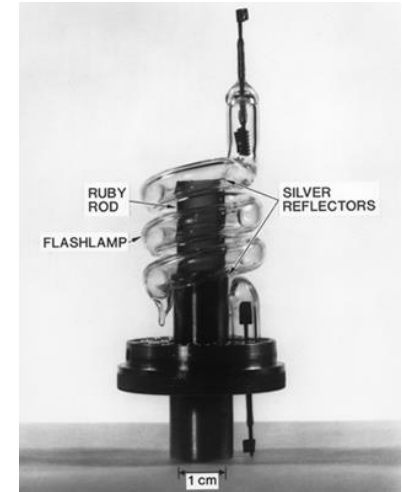
- Krátká doba trvání - vysoký výkon i při nízké energii.
- Např. $10 \text{ mJ} / 10 \text{ fs} = 1 \text{ TW}$
(1000 bloků Temelína z laseru na větším stole!)
- Dnes lasery o výkonu 1 PW.
- Tepelný výkon Golfského proudu 1.4 PW.



- **V ELI – Beamlines lasery o špičkových výkonech až 10 PW!**
- Fokusace do oblasti několika μm^2 - 10^{24} W/cm².
- Materiál se začíná odpařovat při 10^{13} W/cm² (u krátkých fs impulsů, u delších impulsů stačí 10^9 W/cm²).
- Na zemi je intenzita slunečního světla 0.1 W/cm².
- ELI je veškerý vyzářený výkon slunce (tj. cca 10^{26} W) v ploše 10 x 10 cm!



- 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 intenzity

- Schwingerův limit $\rightarrow 10^{29}$

- Radiační útlum

- Relativita

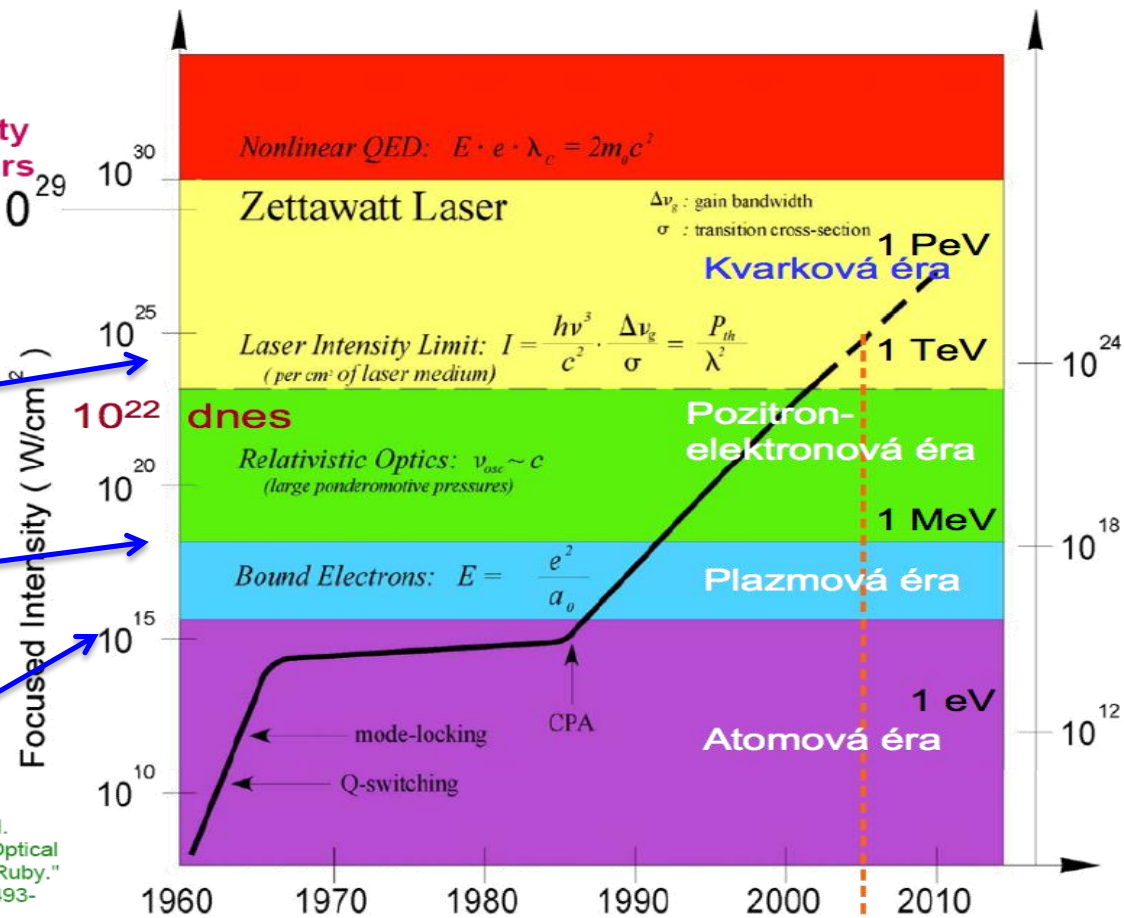
- Ionizace polem

Laser Intensity vs. years

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

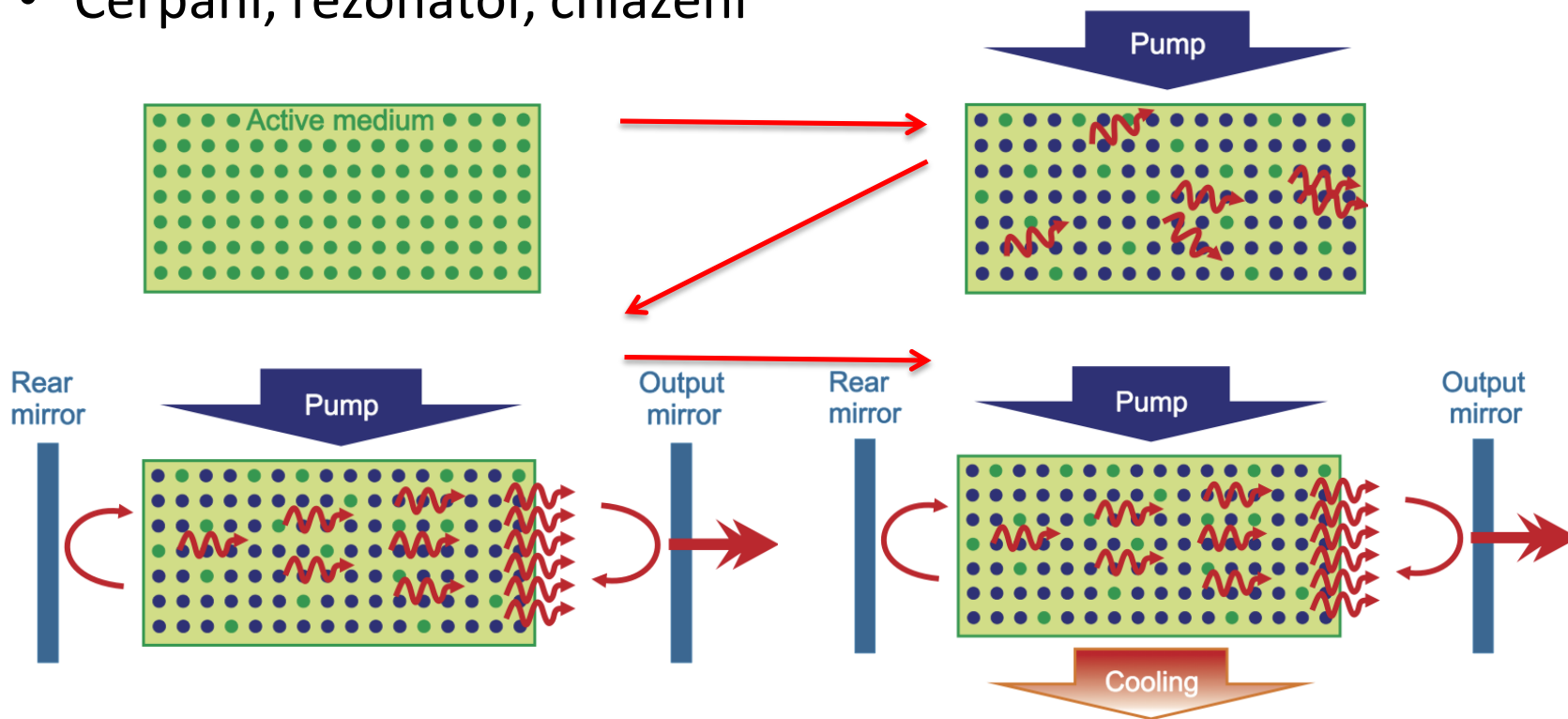
Mourou, G. A., Barty, C. P. J., and Perry, M. D., 1998, *Phys. Today* 51, 22

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

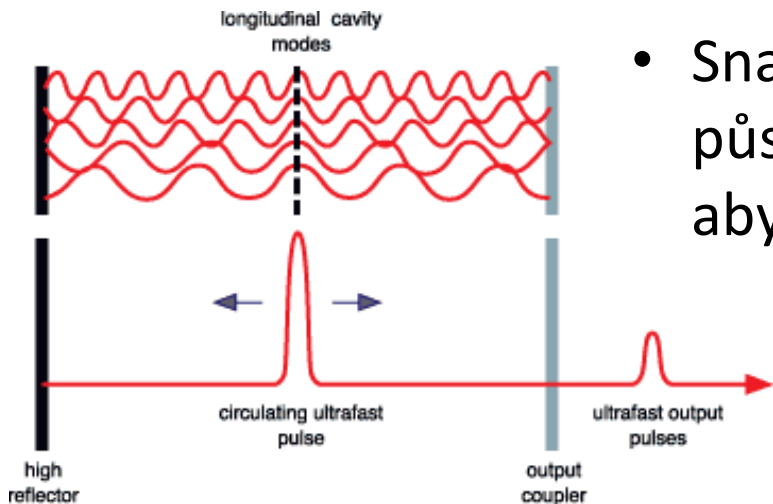


Základní schéma laseru

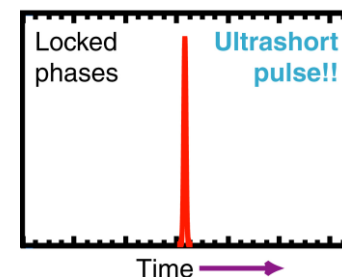
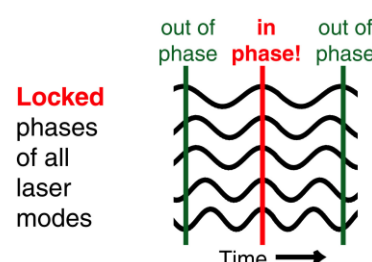
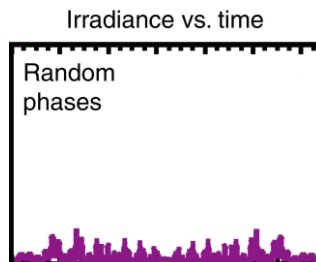
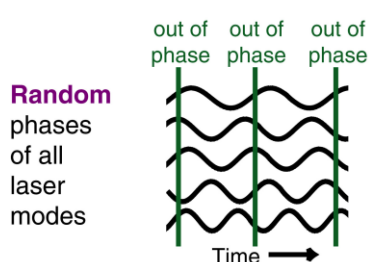
- Aktivní prostředí (pevná látka, kapalina, plyn, polovodič, plazma)
- Čerpání, rezonátor, chlazení



Generace fs impulsů



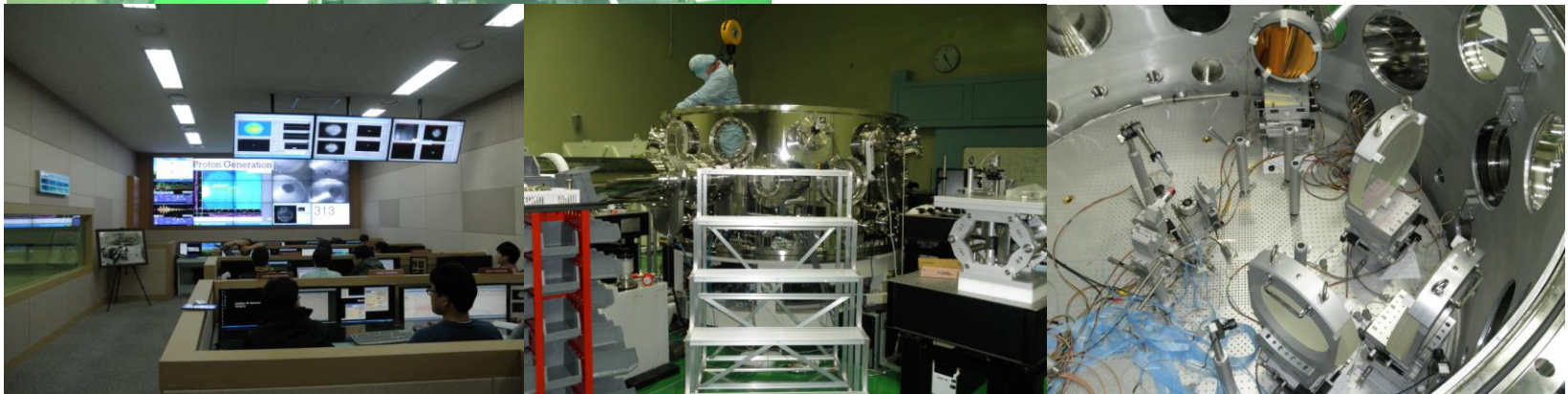
- Snaha sladit v určitém časovém okamžiku působení jednotlivých módů rezonátoru tak, aby každý přispíval svým maximum.
 - Nejednotnost – průměrné výkony
 - Synchronizovanost – vysoké špičkové výkony



Příklad petawattového laseru

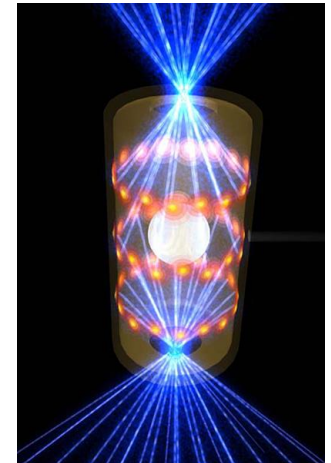
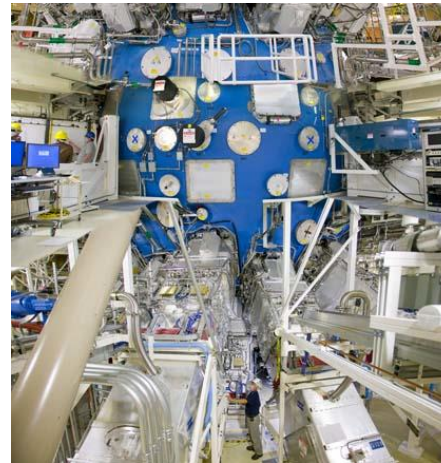


Titan-safírový laser v APRI GIST Gwangju, Jižní Korea – 2 svazky, každý 30 J/30 fs, 0.1 Hz, max. intenzita 5×10^{20} W/cm² (v budoucnosti bude zvýšena zmenšením ohniska), nanosekundový kontrast $> 10^{11}$ (s dvojitým plazmovým zrcadlem), max. 200 výstřelů denně kvůli radiační bezpečnosti, ve spolupráci prováděny některé přípravné experimenty pro ELI

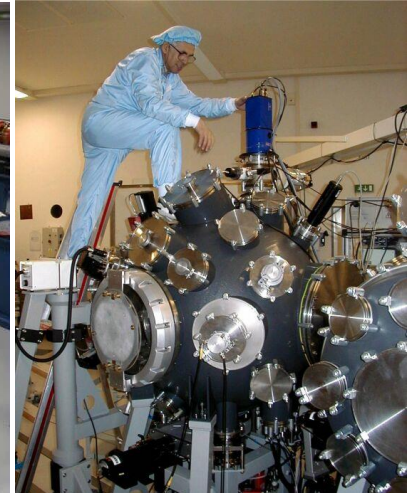


Největší laser na světě dnes

- **NIF** – National Ignition Facility
- Vybudován v Livermoru v Kalifornii v USA za 4.2 miliardy \$
- 192 svazků o energii 10 kJ každý, celkový výkon 0.5 PW
- Primární určení inerciální fúze, dále vojenský a vědecký výzkum



- **PALS** = Prague Asterix Laser System – přivezen z Garchingu
- 1 kJ 400 ps (2.5 TW) jódový fotodisociační ($1.3 \mu\text{m}$), $5 \times 10^{16} \text{ W/cm}^2$



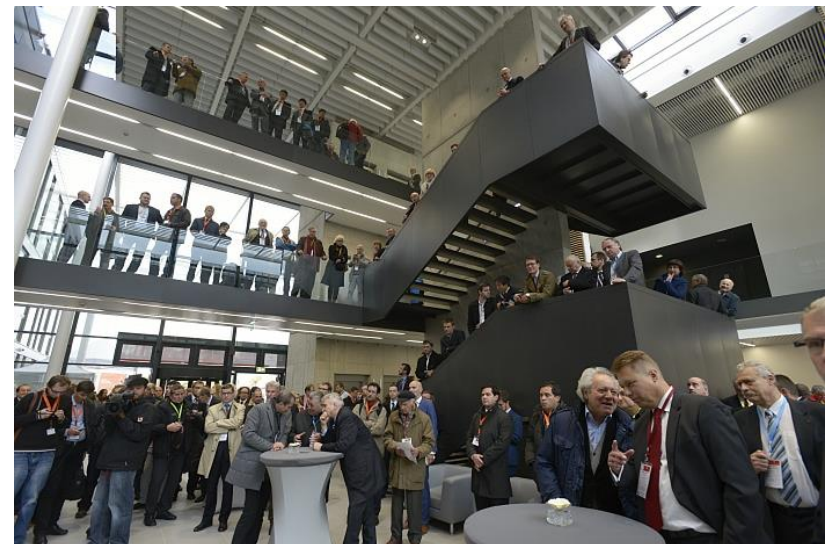


0.1 TW Ti:Safírový laser na **KFE JFI ČVUT** v Praze (65 fs, 10 mJ, 10 Hz, 3 krabice 6 x 120 cm), zdroj pro oscilátor, zdroj pro zesilovač s chlazením, řídicí jednotka, kupní cena cca 5 mil. Kč

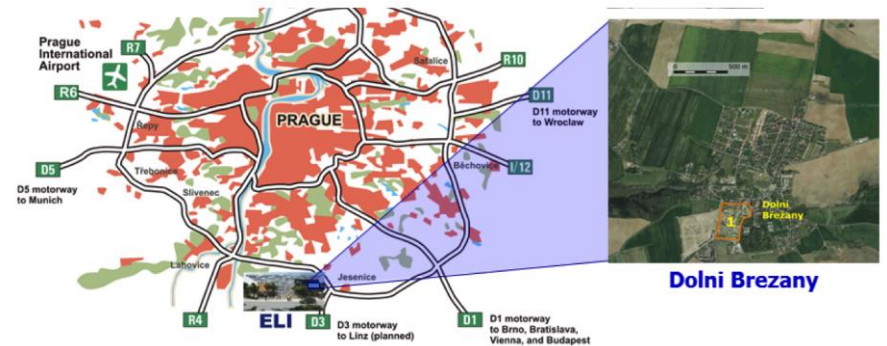
- Na stůl na obr. by se vešel i laser 10 mJ / 1 kHz nebo 100 mJ / 10 Hz (1 TW)
- Na 2 stoly – 10 TW / 10 Hz nebo 100 TW / 1 Hz
- Při průměru ohniska 10 μm je fokální plocha 10⁻⁶ cm² (i 10⁻⁵ cm² je dosažitelné)
- Maximální intenzita $I = P/S = 1 \text{ TW} / 10^{-6} \text{ cm}^2 = 10^{18} \text{ W/cm}^2$ (relativistická intenzita)

- Evropský projekt – cílem použití extrémně výkonných laserů pro materiálový a fyzikální výzkum - 3 pilíře
 - ELI – Beamlines – zdroje záření a částic – Dolní Břežany (u Prahy), ČR, investice 270 M€
 - ELI – Attosecond Physics – Szeged, Maďarsko
 - ELI – Nuclear Physics – Rumunsko
 - v budoucnu možná ELI – Extreme Physics

- 30.6.2015 – slavnostní převzetí budovy v Dolních Břežanech, zahájení stěhování zaměstnanců do administrativní části
- 8.6.2017 – slavnostní převzetí laseru L3
- nyní další instalace technologií a první testovací experimenty

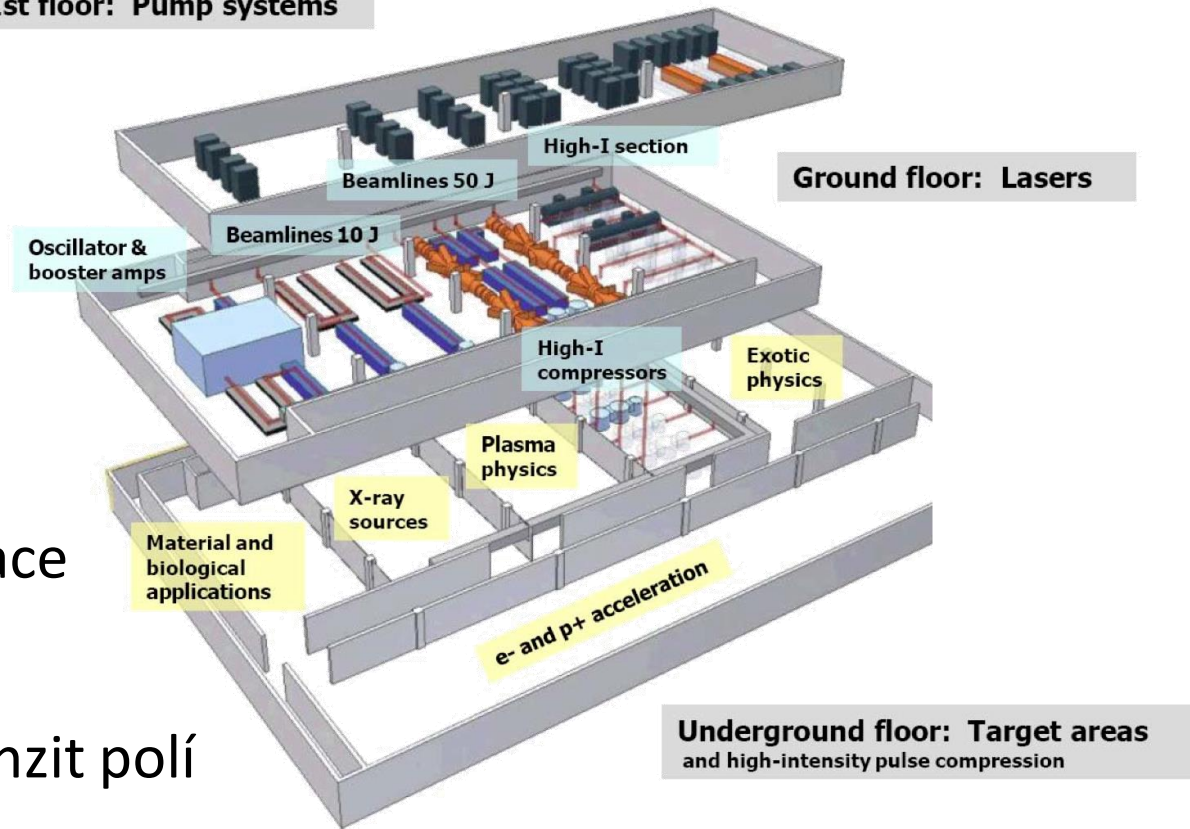


- budova ELI-Beamlines
v roce 2016

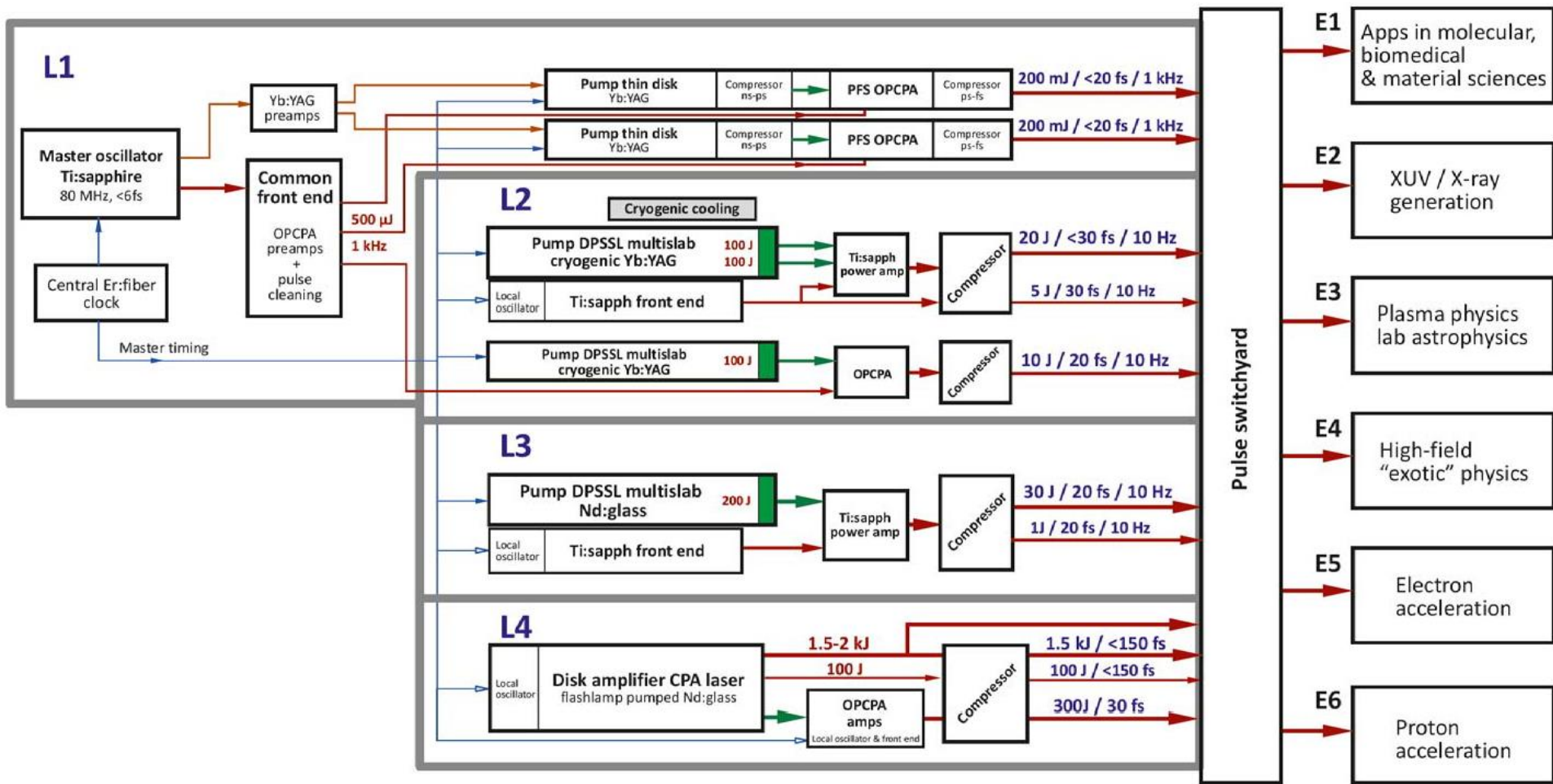


- 6 pilířů
- Lasery
- Rentgenové zdroje
- Urychlování částic
- Biomedicinské aplikace
- Fyzika plazmatu
- Fyzika vysokých intenzit polí

1st floor: Pump systems



Uspořádání laserů na ELI



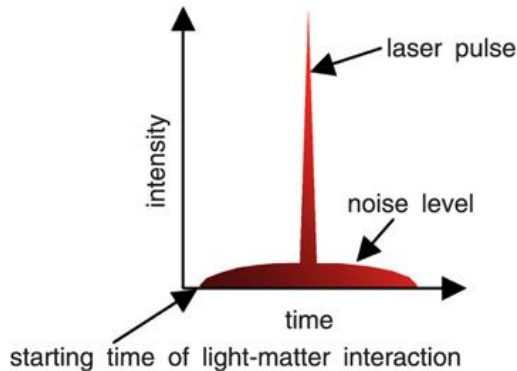
Parametry laserů na ELI

Svazek	L1	L2	L3	L4
Výkon	5 TW (12 nul)	1 PW (15 nul)	1 PW (15 nul)	10 PW (16 nul)
Energie pulzu	100 mJ	15 J	30 J	1.5 kJ & 150 J
Délka pulzu	20 fs	15 fs	30 fs	1 ns a 150 fs
Frekvence	1 kHz (1000 / s)	10 Hz (10 / s)	10 Hz (10 / s)	0.1 Hz (6 / min)
Vyvíjející tým	ELI Tým	ELI Tým + Rutherford Appleton Laboratory	Livermore National Energetics + ELI Tým	National Energetics + Ekspla + ELI Tým
Technologie	Diodové čerpání, OPCPA	Diodové čerpání, OPCPA	Čtvercový svazek 214mm x 214mm, Ti:Safírové zesilovače a diodové i Nd:skleněně čerpané lasery	Výbojkově čerpané Nd:skleněné zesilovače + OPCPA předzesilovač

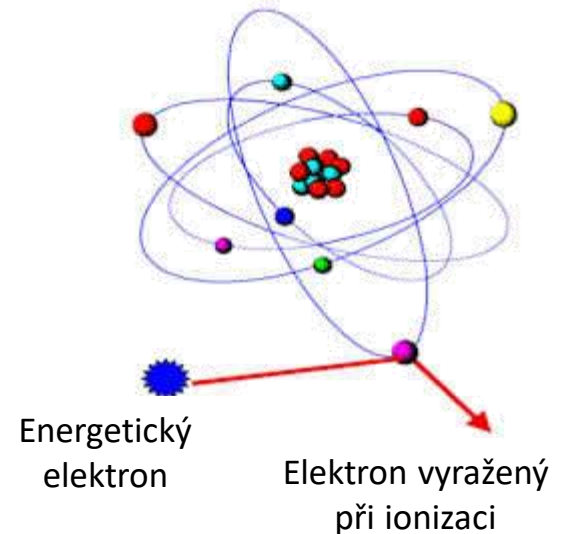
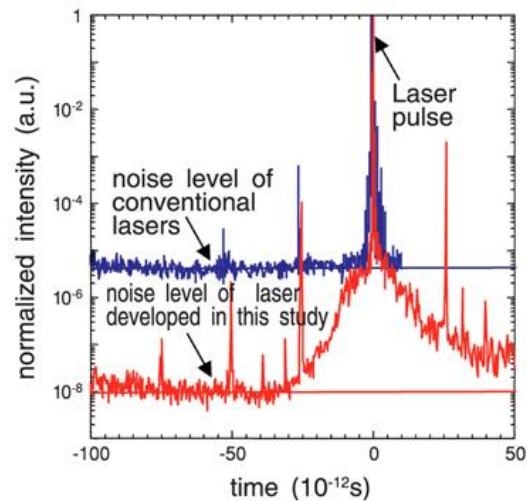
- Před hlavním laserovým impulsem je zpravidla **předpuls**
- Pokud dosahuje intenzity $> 10^{10}$ W/cm², dochází k **ionizaci**
- Elektrony oscilují v poli laserové vlny a srážejí se s atomy
- Zároveň získávají při oscilacích a srážkách vyšší teplotu

(a)

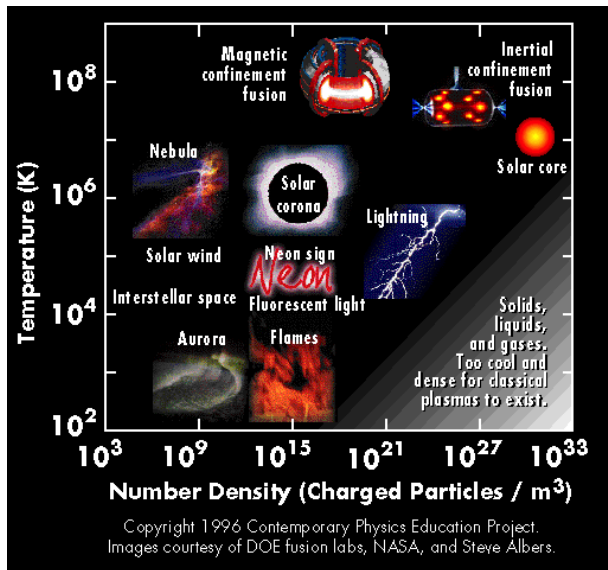
Temporal profile of high intensity laser pulses



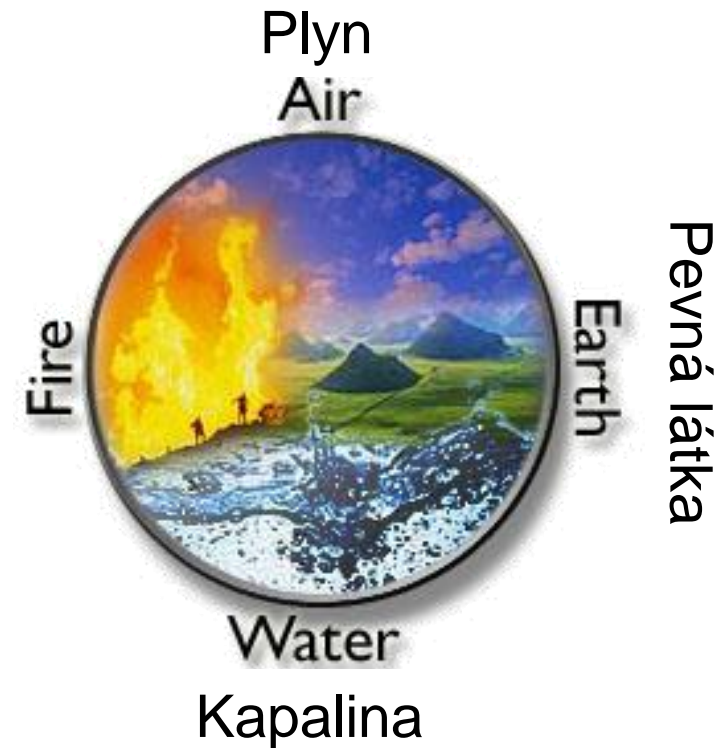
(b)



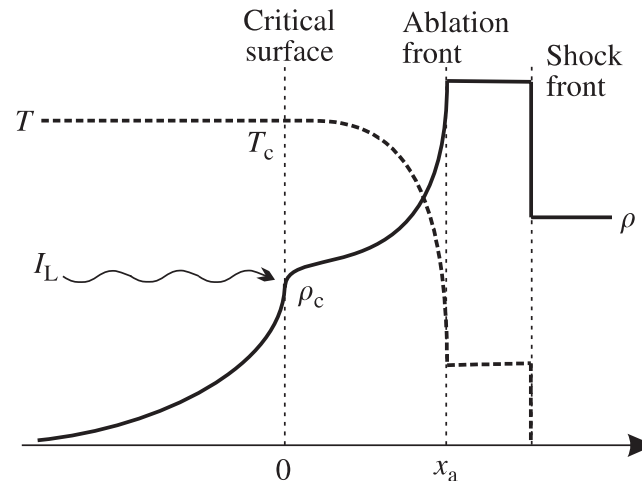
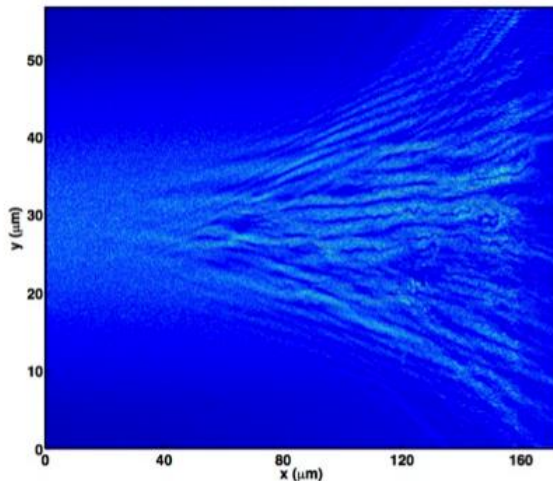
- Ionizací a ohřevem materiálu vzniká **plazma** – 4 skupenství hmoty
- Je to ionizovaná látka, která vykazuje **kolektivní chování a kvazineutralitu**



Plazma

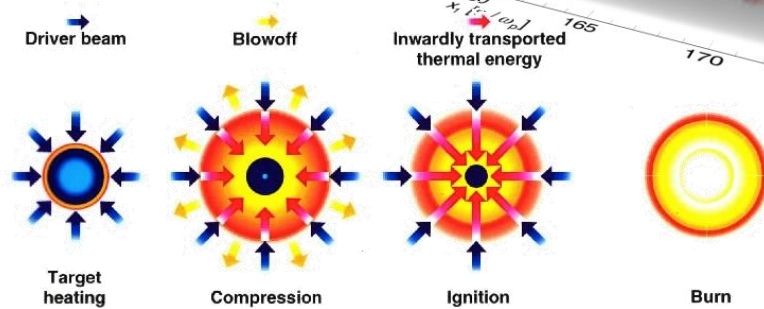
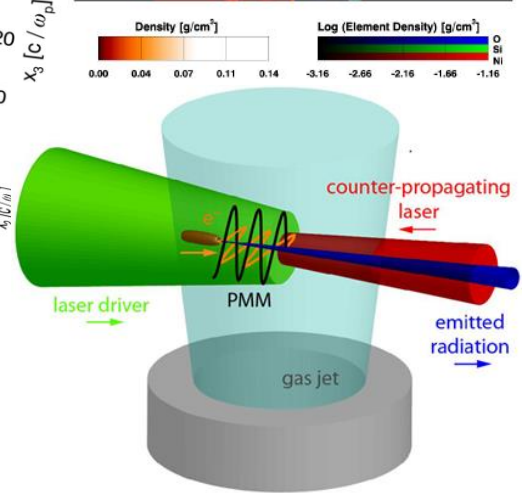
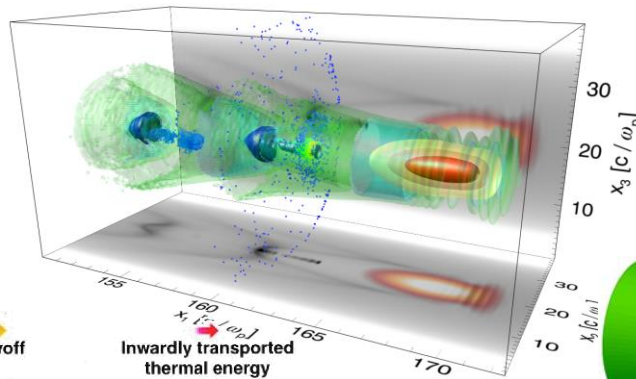
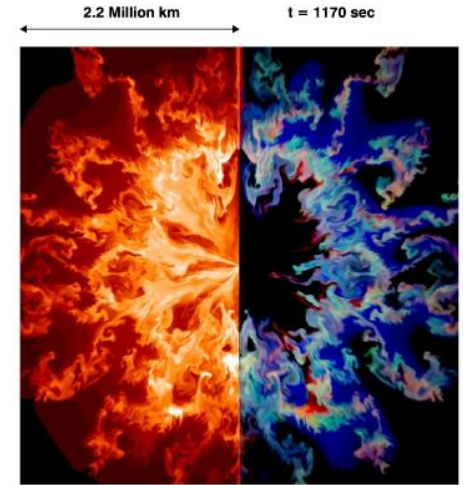
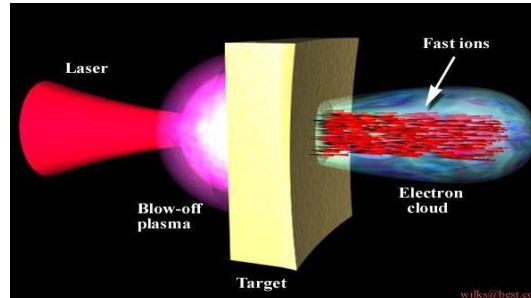


- Plasma podkritické – plyn – laser může proletět
- Plasma nadkritické – na povrchu pevné látky – laser se odrazí a částečně absorbuje, energie se dovnitř šíří jako tepelná vlna, rtg. zářením a rychlými elektrony a ionty



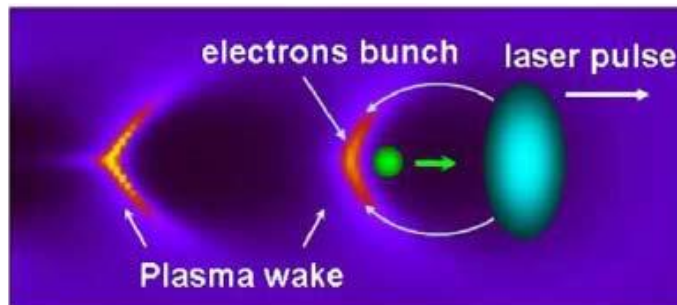
Hlavní aplikace

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



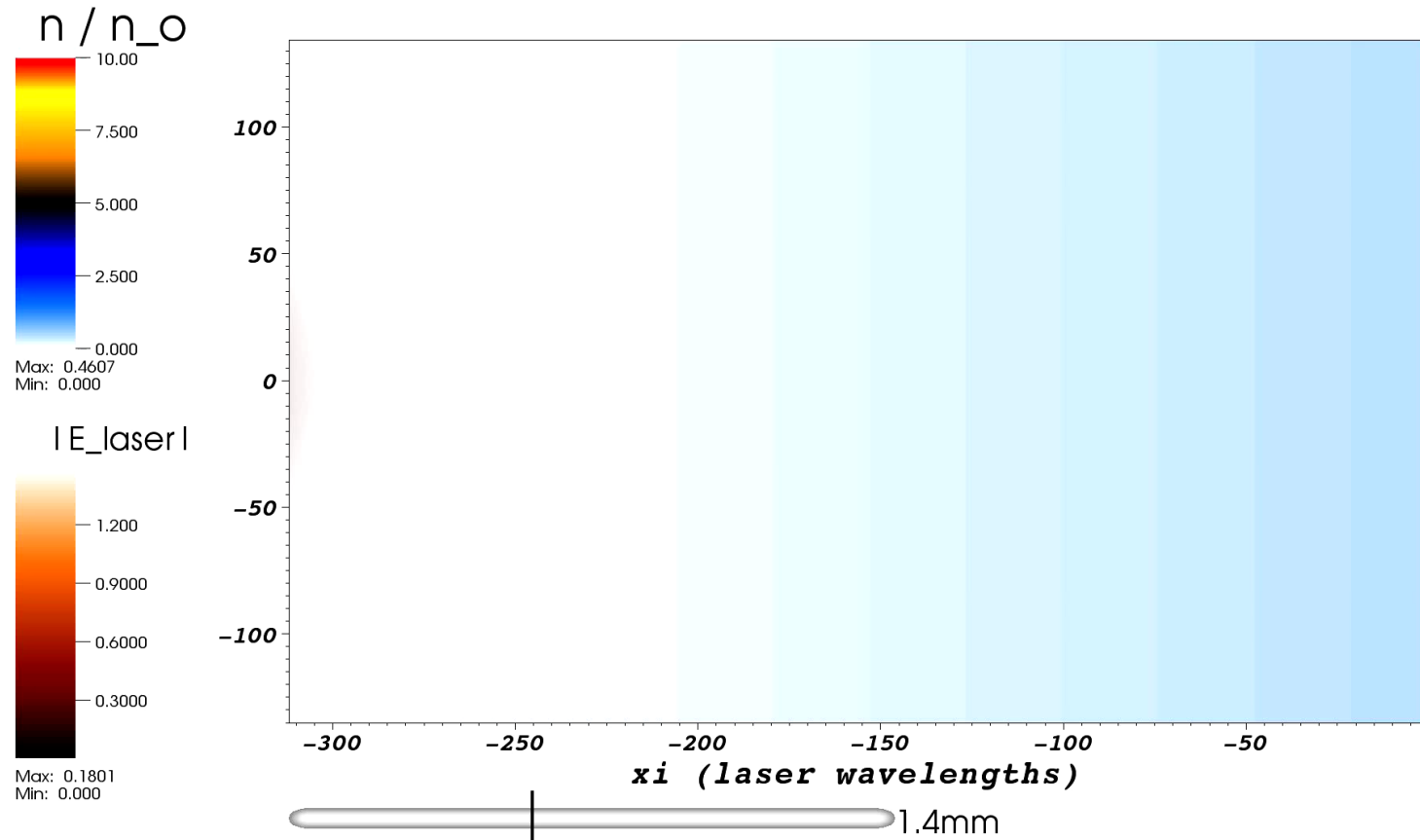
Urychlování elektronů

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



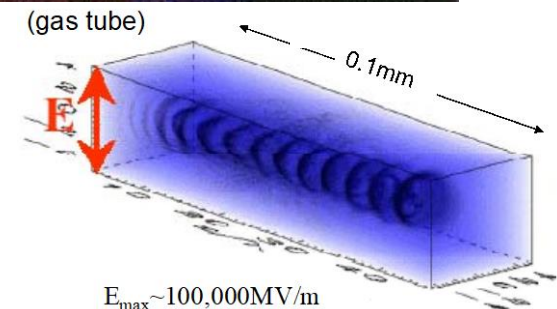
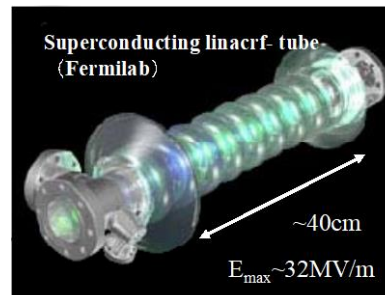
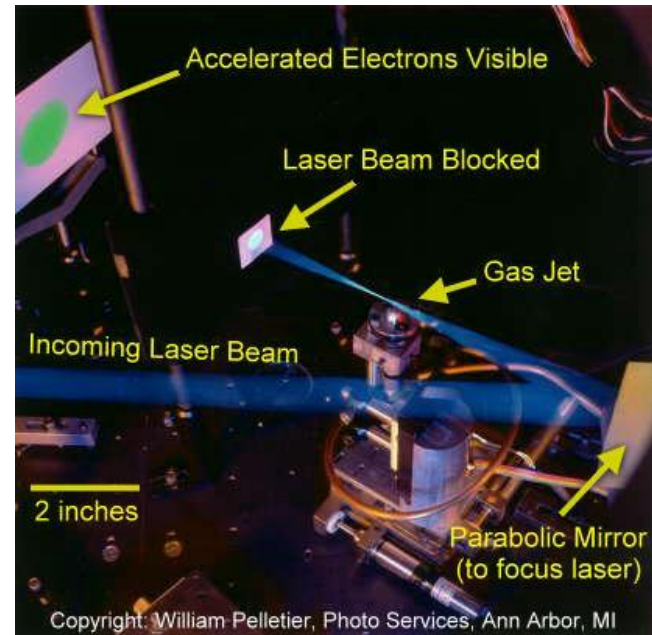
Centaurus A:
cosmic
wakefield
linac?

Urychlování elektronů



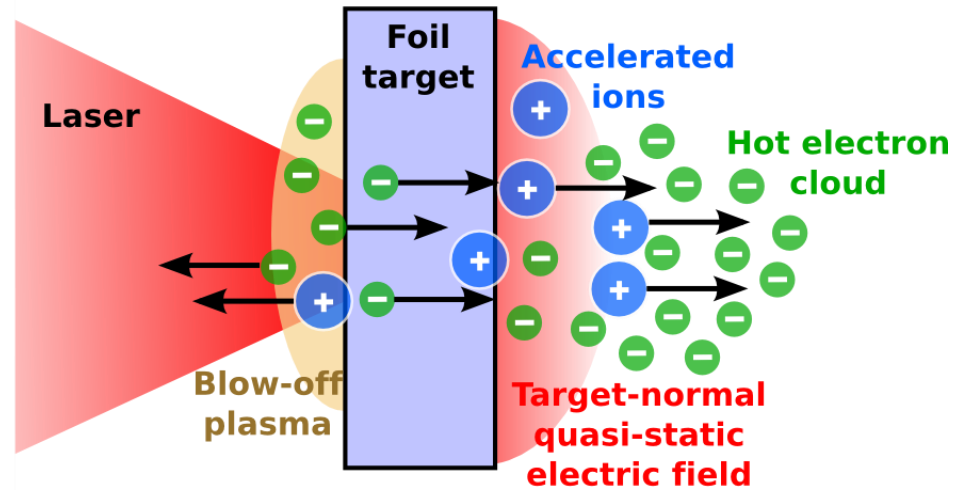
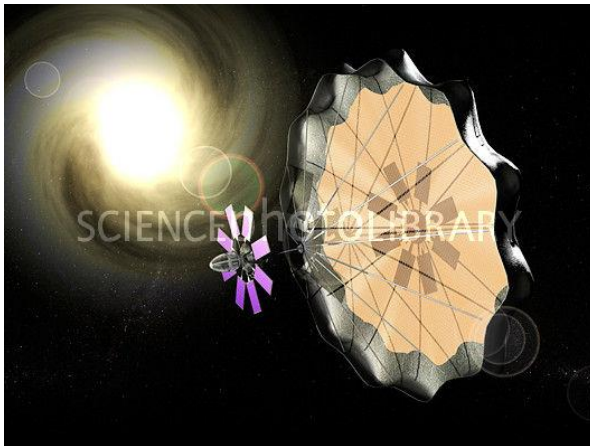
Urychlování elektronů

- 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

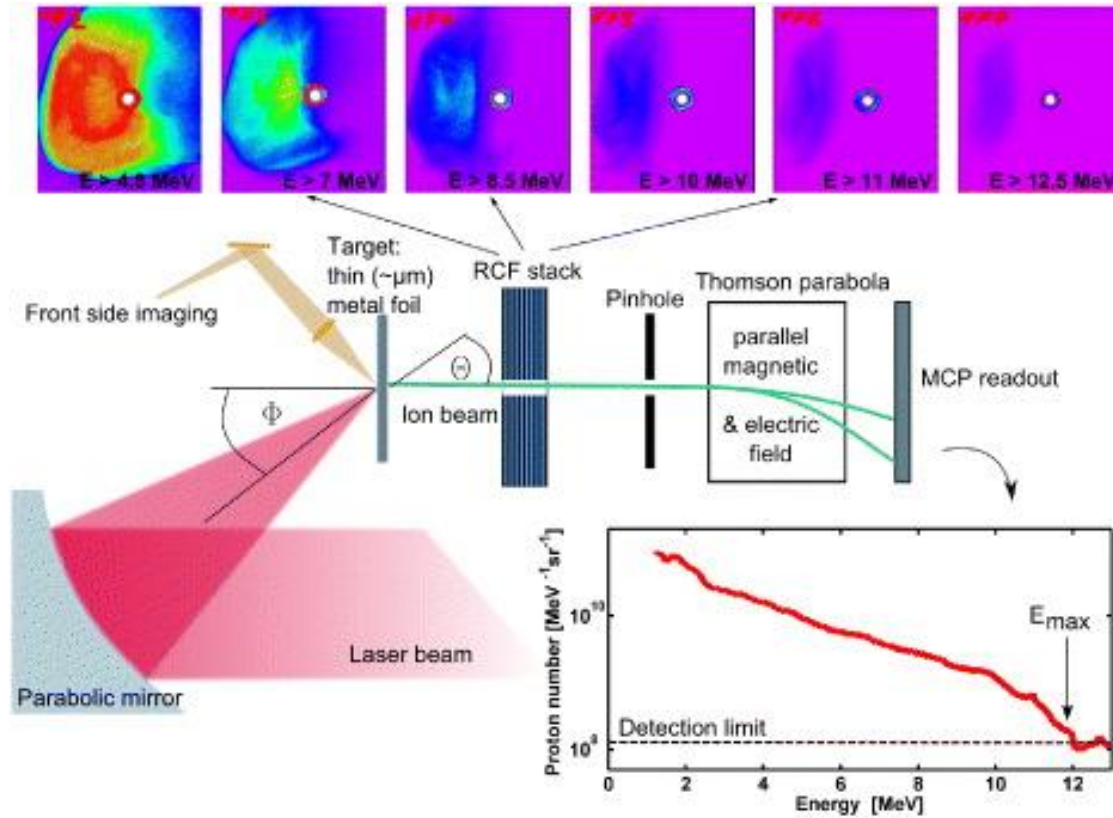


Urychlování iontů

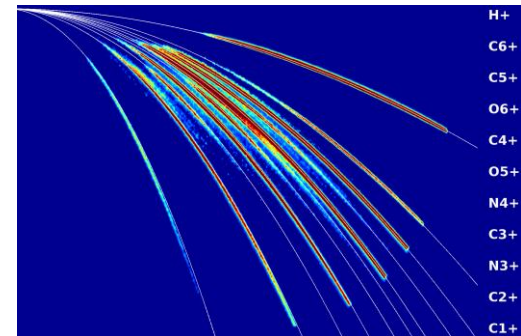
- Urychlování probíhá u terčů z pevné látky
- Zprostředkováno elektrony, ionty mají mnohem větší hmotnost
- Urychlování na přední straně dovnitř (Radiálním tlakem) a na obou stranách ven z povrchu (Target Normal Sheath Acceleration)



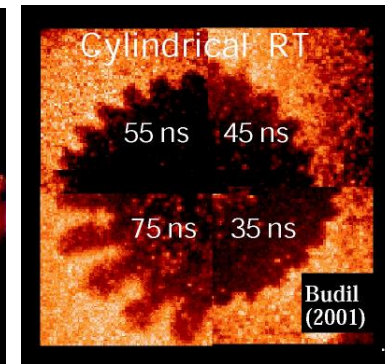
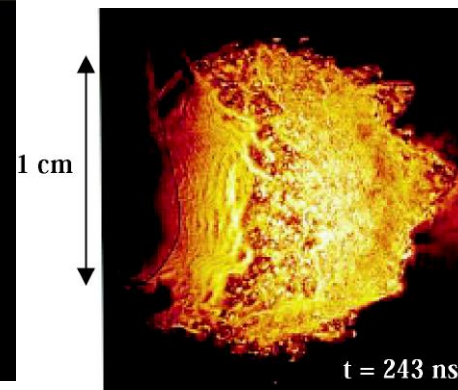
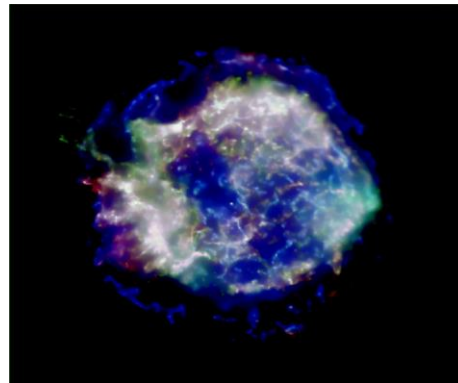
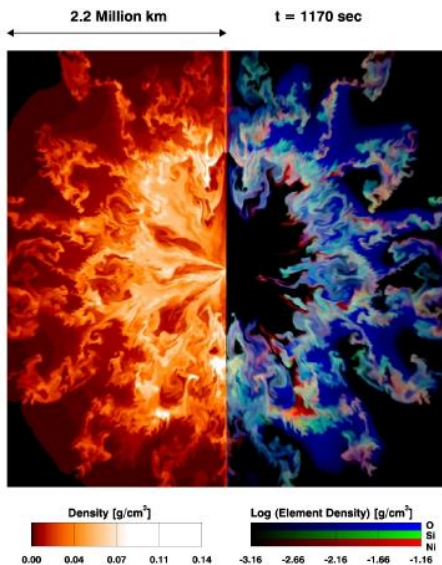
Urychlování iontů



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

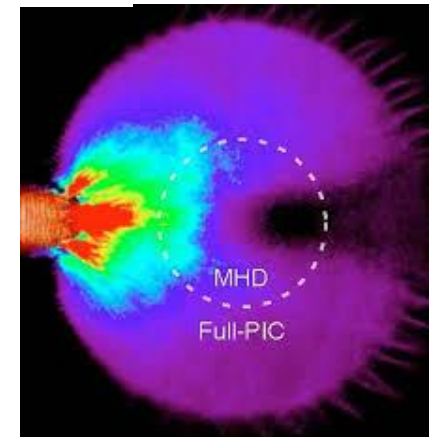
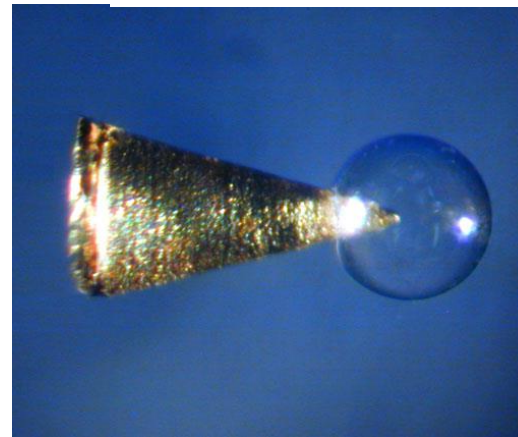
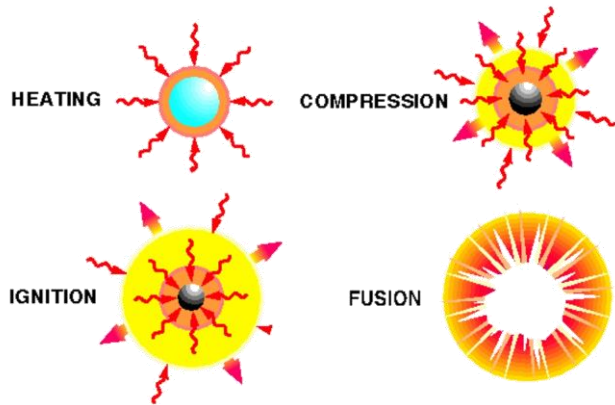
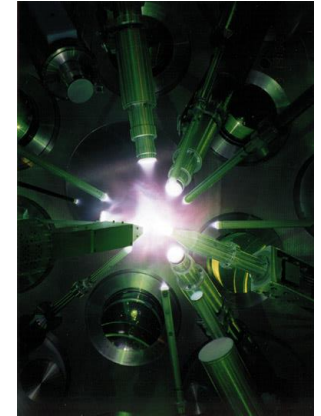
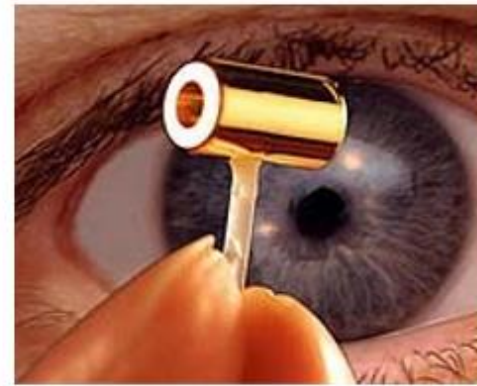
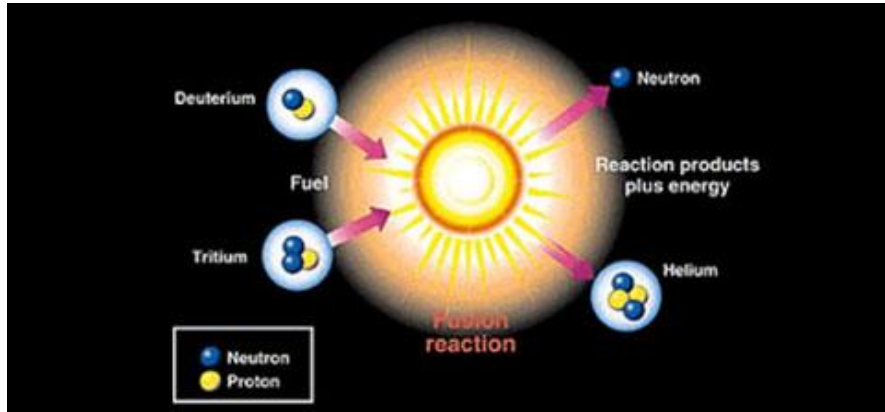


- Modelování dynamiky astrofyzikálních procesů pomocí laserového plazmatu
- Podobné parametry, jen jiná prostorová a časová měřítka

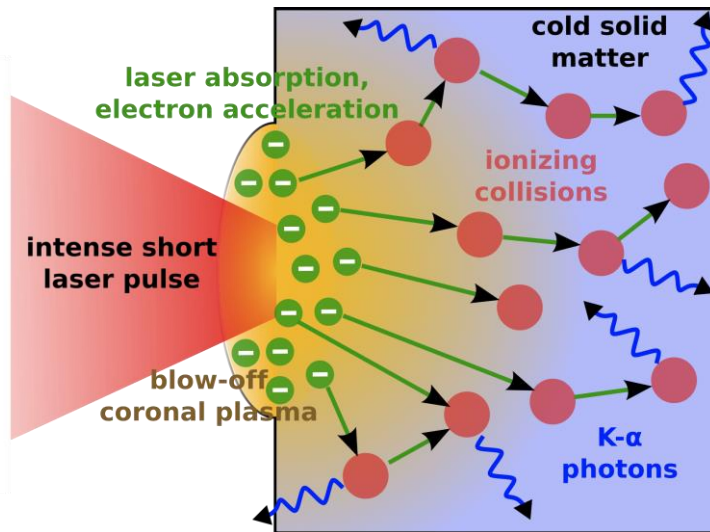
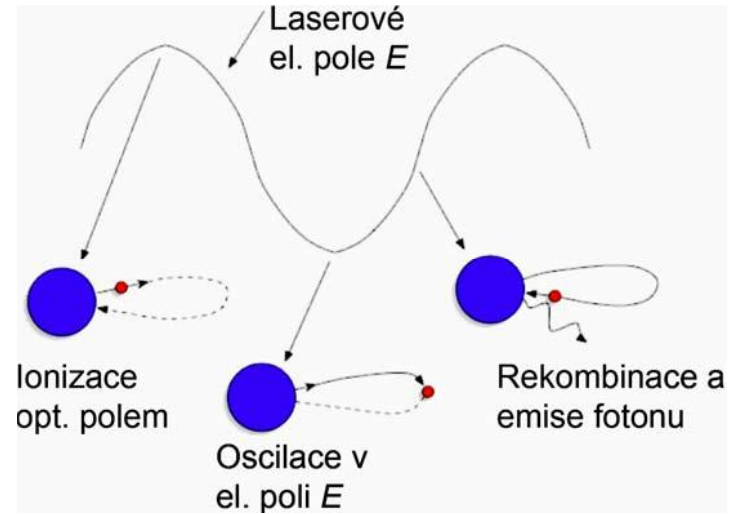
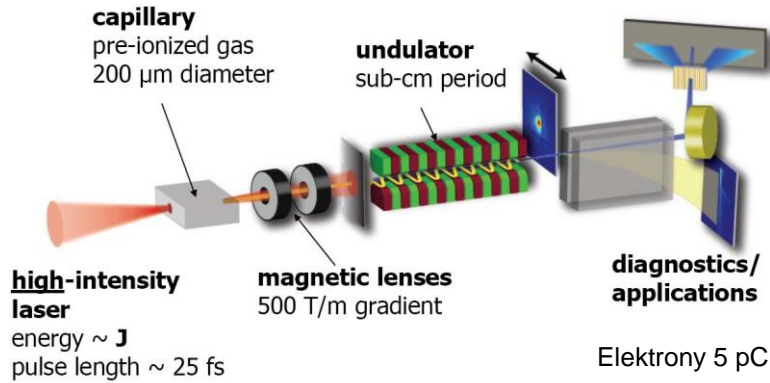


Nova laser

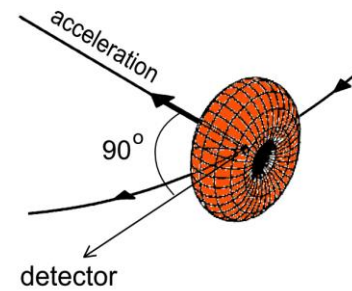
Inerciální fúze a fast ignition



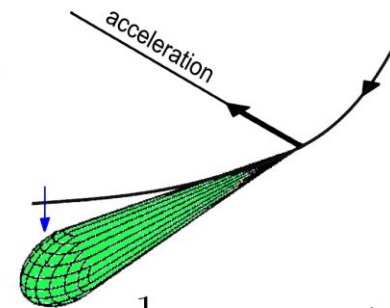
Zdroje RTG. záření



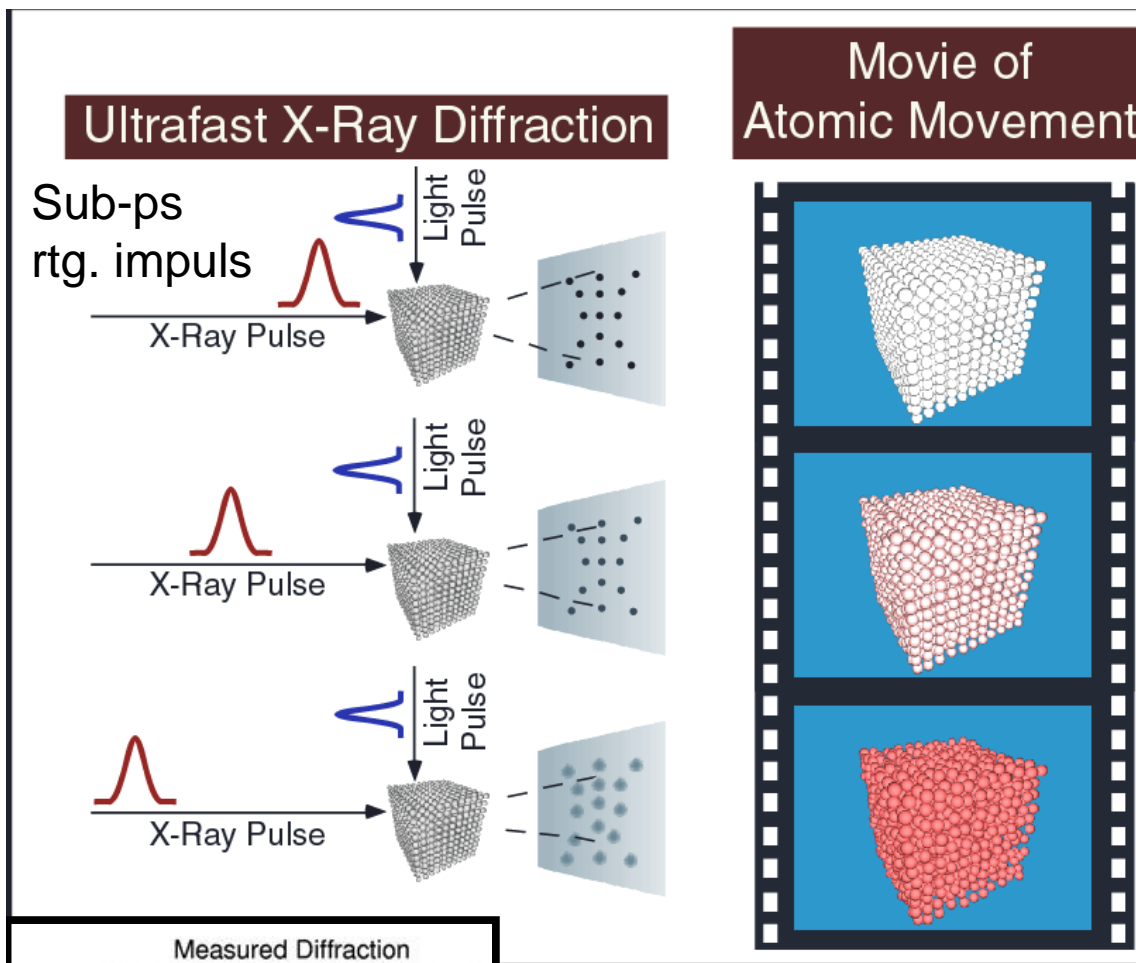
Moving frame of electron



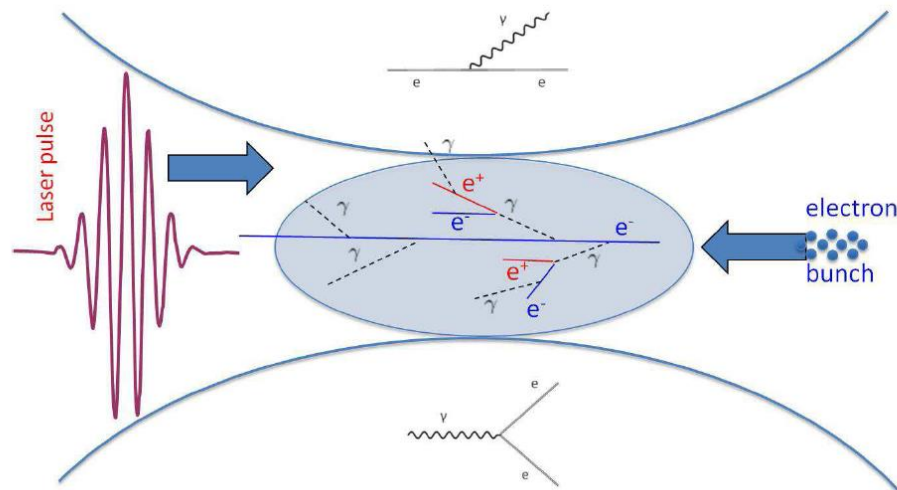
Lab frame



Snímkování pump-probe



- 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



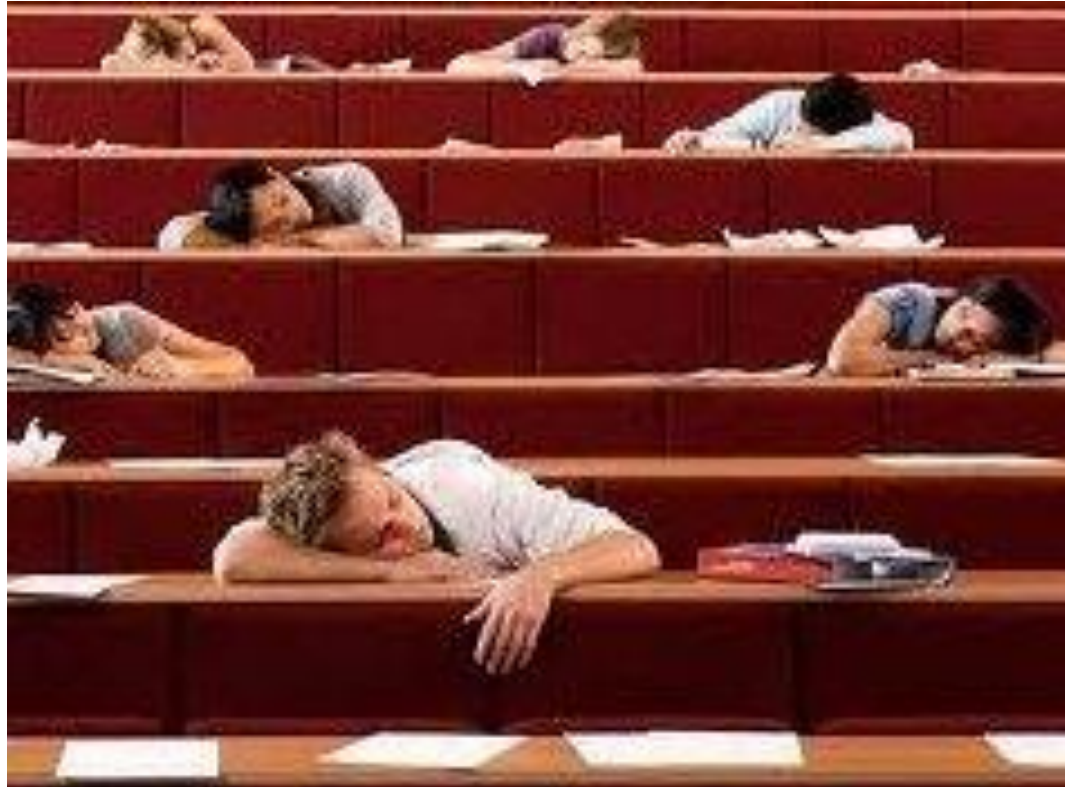
Náročné simulace

- 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)

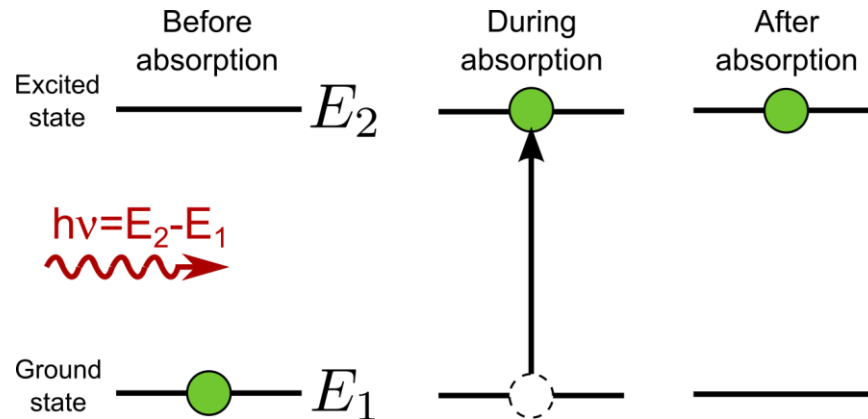


- V ČR i celé Evropě je nedostatek laserových techniků a fyziků
- Možnost uplatnění jak v akademické, tak i komerční sféře
- Katedra fyzikální elektroniky (KFE) je specializována na výchovu laserových techniků a fyziků (má výukové laserové laboratoře, které jinde nemají)
- KFE vychovává i specialisty v oblasti počítačového modelování pro fyziky (obor Informatická fyzika)

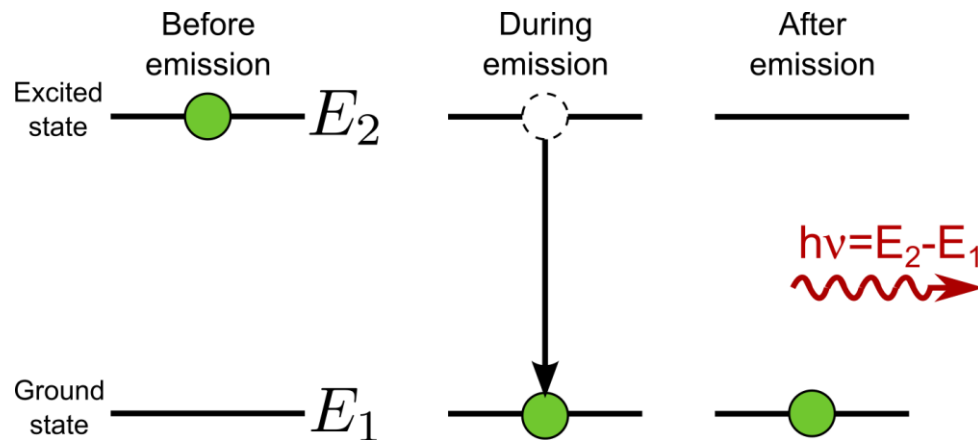
Děkuji za pozornost



- 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.

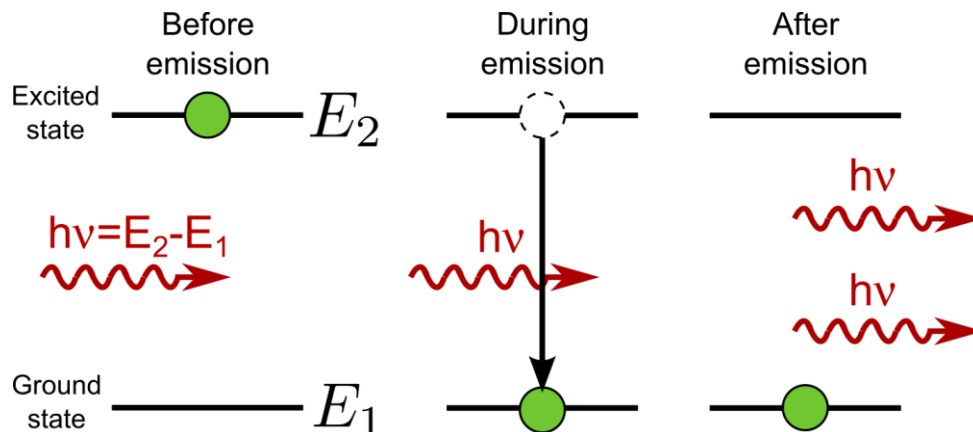
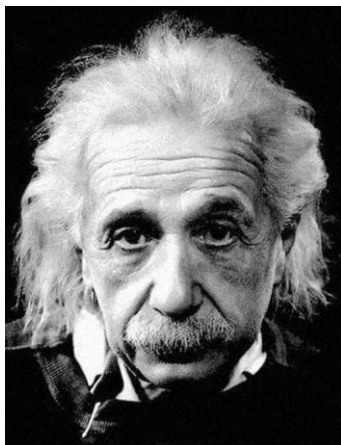


- Excitovaný stav je nestabilní.
- Po určité době přechází samovolně molekula/atom zpět do původního stavu a vyzáří zpět kvantum energie – foton.
- Tento samovolný proces se nazývá **spontánní emise**.



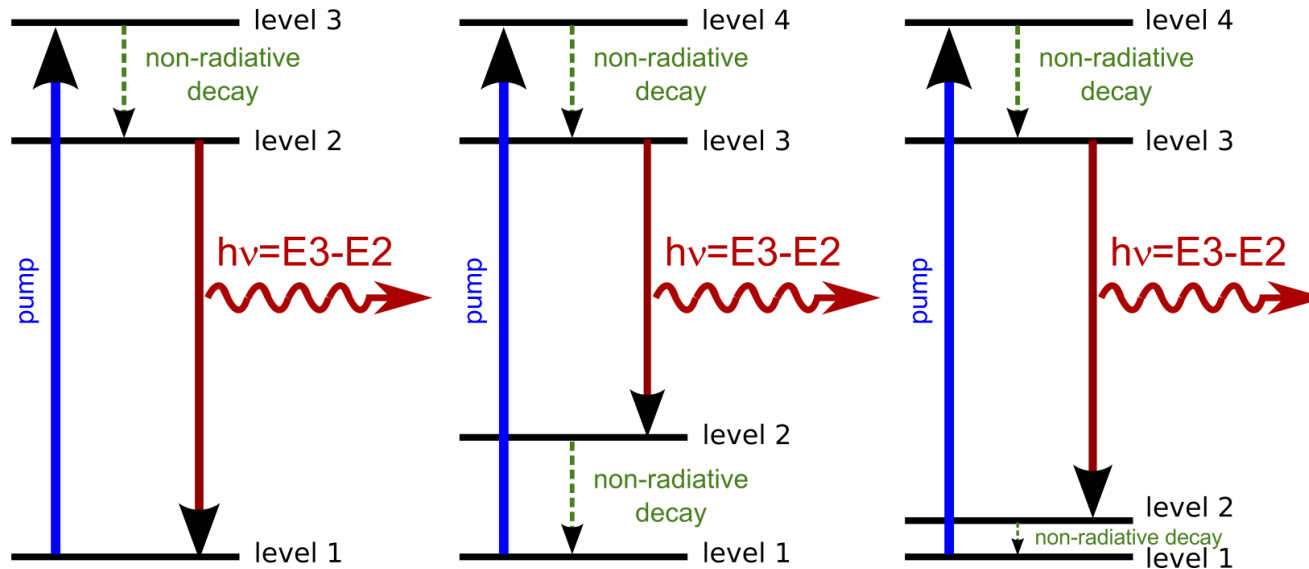
Generace laserového záření

- Pro nás je důležitý proces tzv. **stimulované emise**.
- 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!**



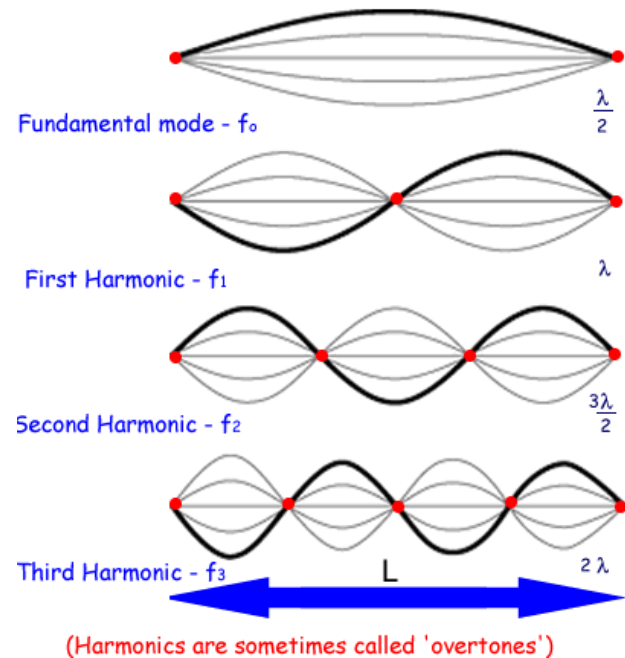
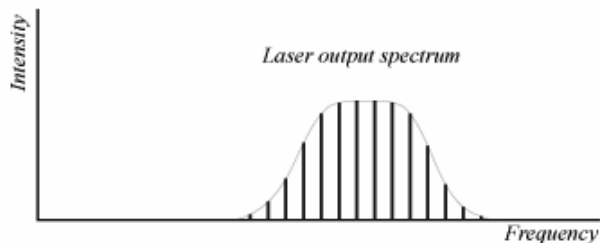
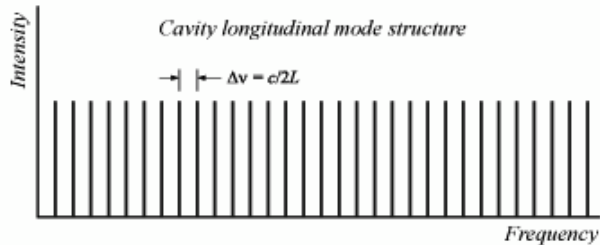
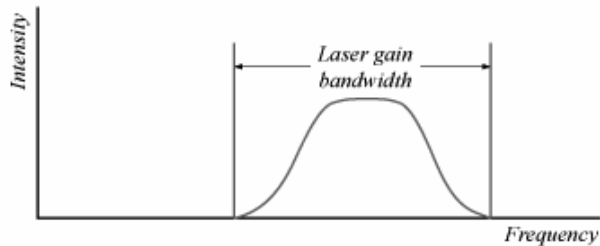
Inverze populace

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



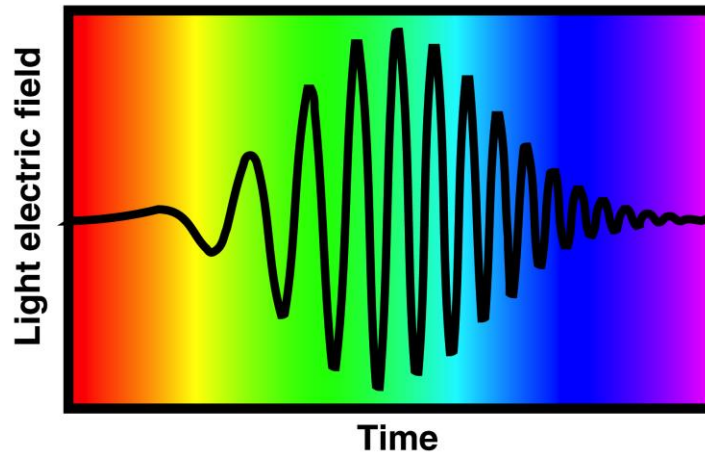
Generace fs impulsů

- Aktivní médium striktně monochromatické – může vyzařovat určité **pásmo frekvencí**.
- V rezonátoru - **stojaté vlny**.

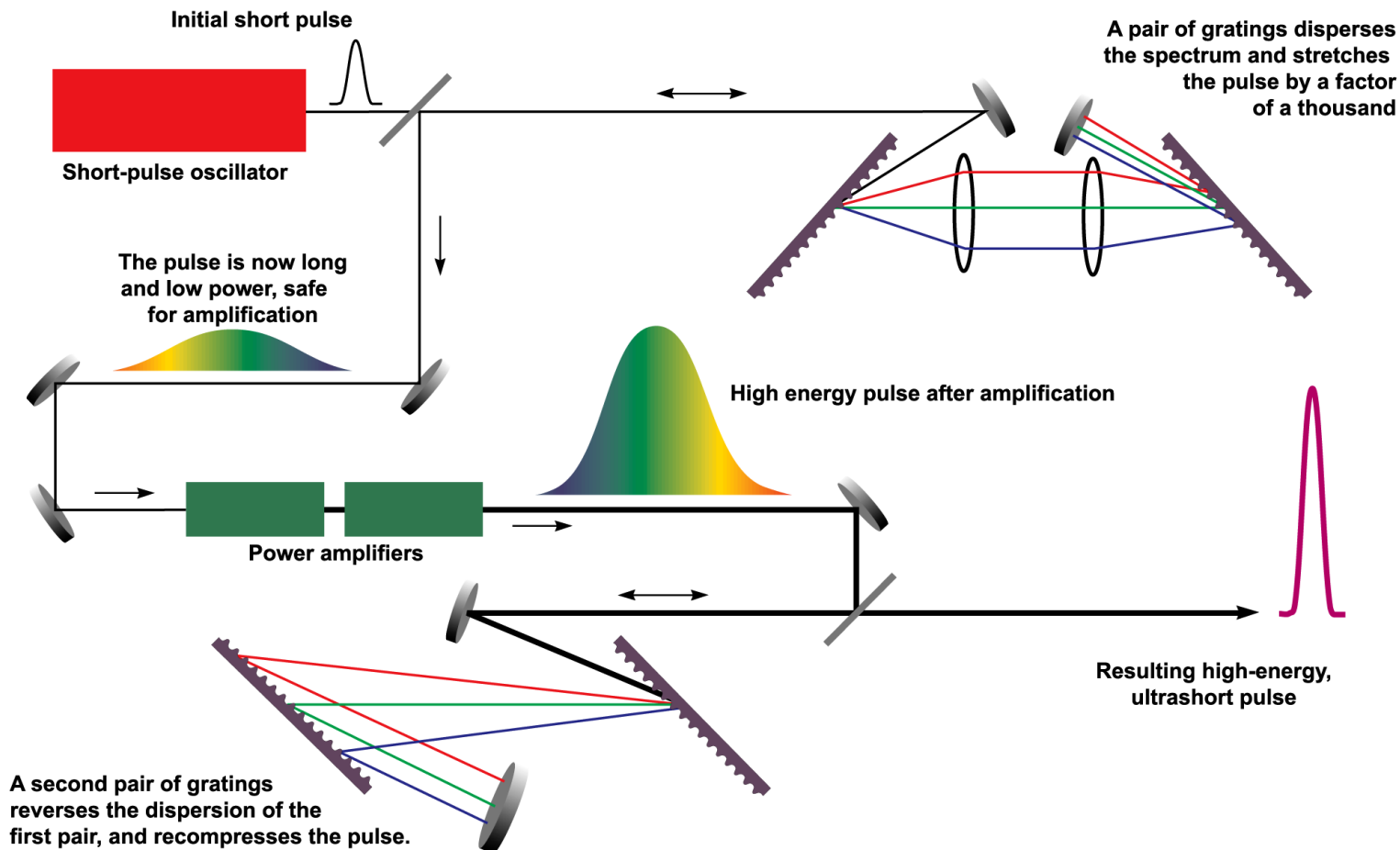


Zesilování fs impulsů

- Problém zesilování velmi krátkých laserových impulsů
- Zesilování přímou cestou je limitováno prahem poškození optických komponent (zesilovacího prostředí)
- Řešení je CPA = Chirped Pulse Amplification – časový chirp



Zesilování fs impulsů



Největší fs lasery ve světě

VULCAN Laser

RAL STFC, UK
(1 PW, 500 J/ 500 fs, 1054 nm)



Texas Petawatt

Uni. of Texas, USA
(1 PW, 185 J/ 130 fs, 1054 nm)



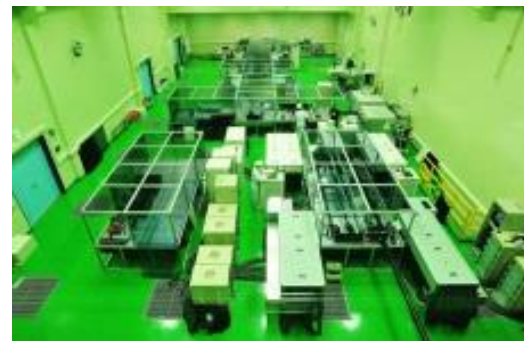
Osaka PW module

Uni. of Osaka, Japan
(1 PW, 500 J/ 500 fs, 1053 nm)

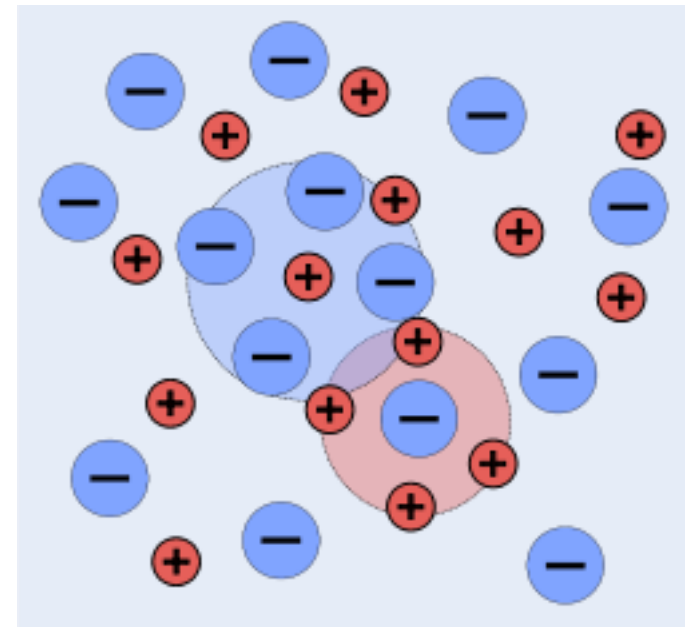
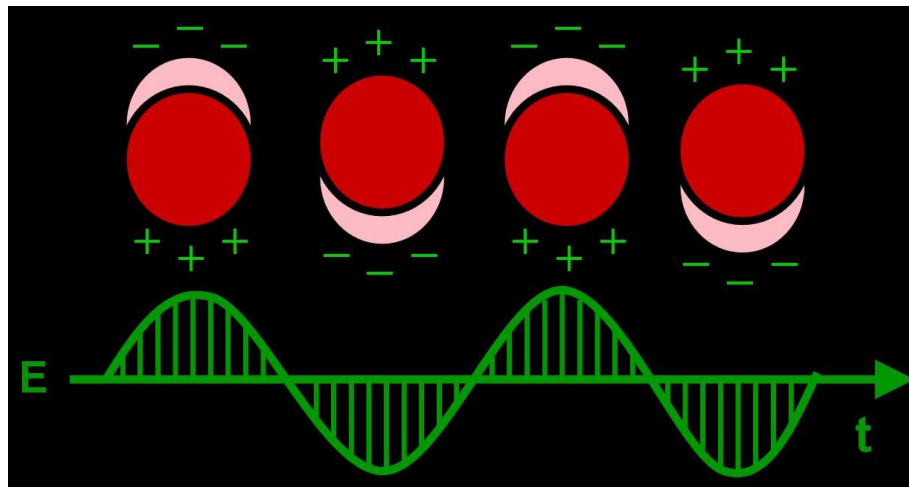


GIST-APRI Petawatt

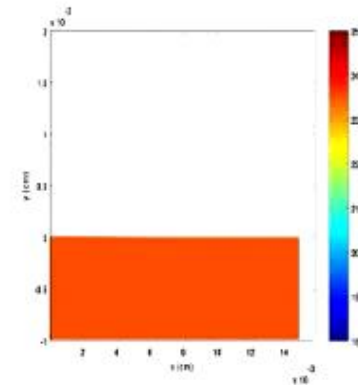
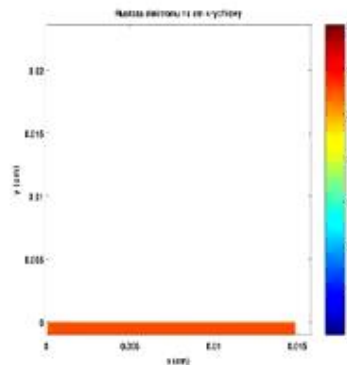
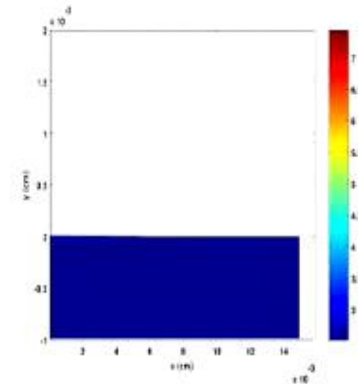
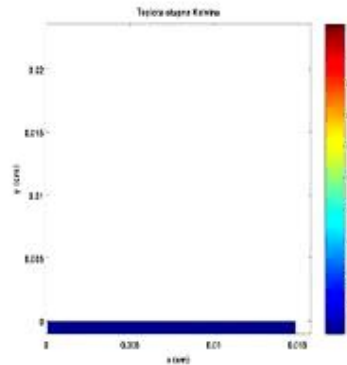
Apri, South Korea
(1 PW, 32 J/ 30 fs, 800 nm)



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



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



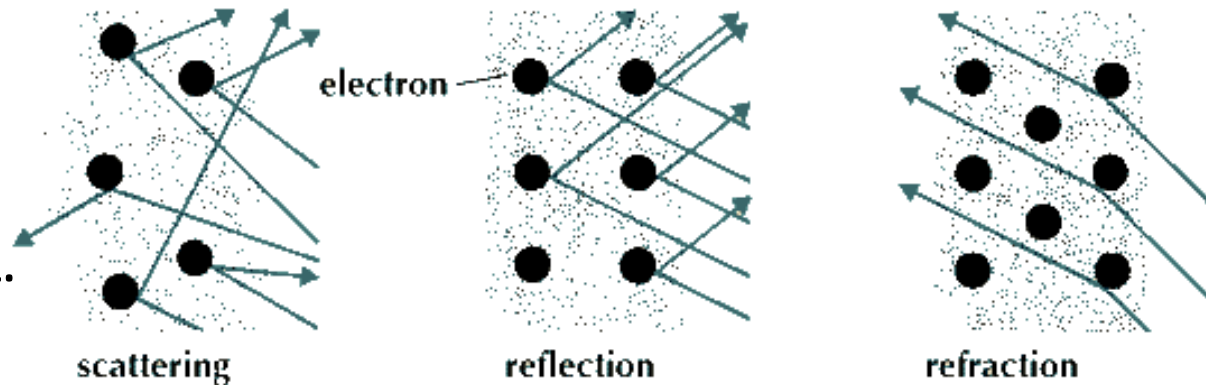
Kritická hustota

- Dopadající záření elektrony rozkmitá.
- Pohybující se nabité částice – elektrony – vyzařují.
- Mnoho v malém objemu (řádově 10^{21} na cm^3 asi 100 krát hustota

HOW ELECTROMAGNETIC RADIATION AND ELECTRONS INTERACT

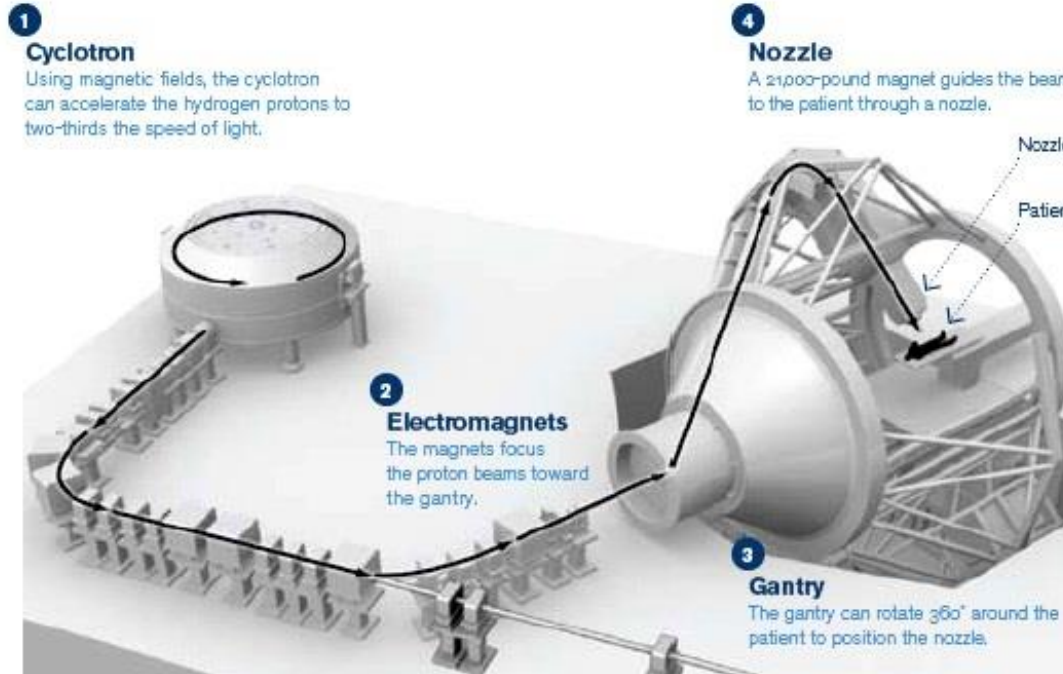
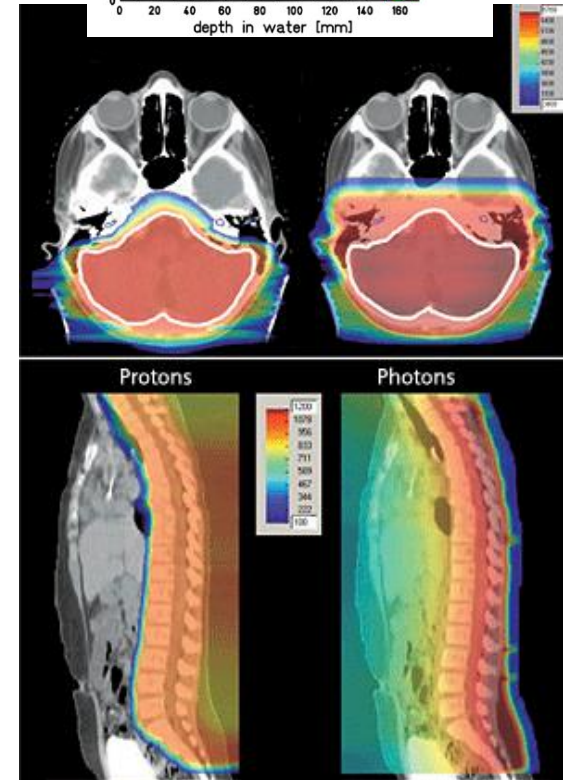
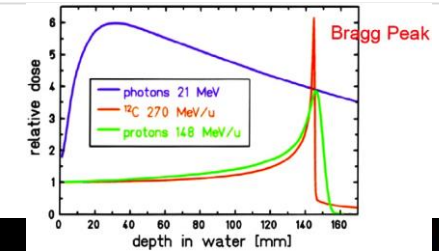
a vyzáří veškerou energii impulsu.

- Této hustotě se říká **kritická** a závisí na λ .



Protonová terapie

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



Protonová terapie

