

Tajemství ELI – nejintenzivnějšího laseru světa

František Batysta

Fakulta jaderná a fyzikálně inženýrská ČVUT
Fyzikální ústav AV ČR

17. leden 2013

- 1 Co je to světlo
- 2 Interakce záření s látkou
- 3 Principy laseru
- 4 Pulsní lasery
- 5 Aplikace laserů
- 6 ELI
- 7 Parametry ELI
- 8 Laserový systém ELI
- 9 Aplikace ELI
- 10 Lasery na ELI

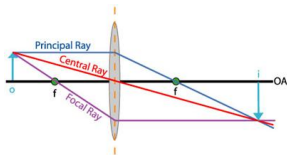
Co je to světlo?

Co je to světlo?

„Skutečnou“ pravdu neznáme!

Co je to světlo?

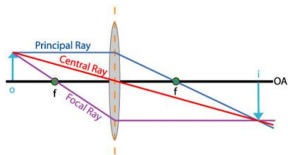
„Skutečnou“ pravdu neznáme!



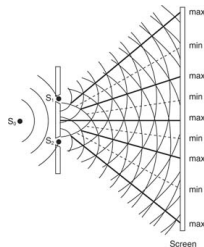
Obrázek: Geometrická optika

Co je to světlo?

„Skutečnou“ pravdu neznáme!



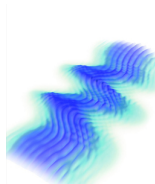
Obrázek: Geometrická optika



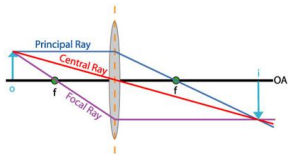
Obrázek: Vlnová optika

Co je to světlo?

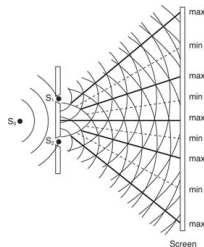
„Skutečnou“ pravdu neznáme!



Obrázek: Kvantová optika



Obrázek: Geometrická optika

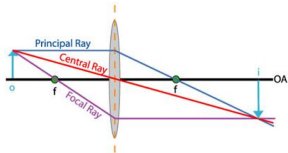
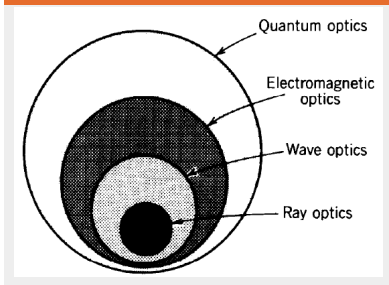


Obrázek: Vlnová optika

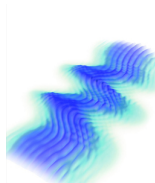
Co je to světlo?

„Skutečnou“ pravdu neznáme!

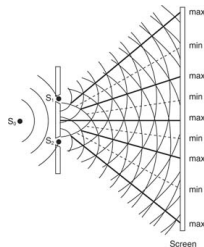
Různé úrovně popisu



Obrázek: Geometrická optika



Obrázek: Kvantová optika



Obrázek: Vlnová optika

Einsteinovy koeficienty

- Spontánní emise

$$\frac{dn_1}{dt} = A_{21} n_2$$

- Stimulovaná emise

$$\frac{dn_1}{dt} = B_{21} n_2 I(\nu)$$

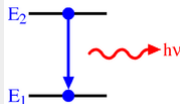
- Absorpce

$$\frac{dn_1}{dt} = -B_{12} n_1 I(\nu)$$

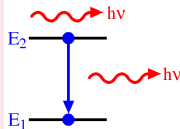
Vztahy mezi Einst. koef.

$$B_{12} = B_{21}, \quad A_{21} = \frac{8\pi h \nu^3}{c^3} B_{21}$$

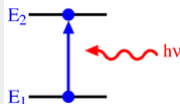
Spontánní emise



Stimulovaná emise



Absorpce



Einsteinovy koeficienty

- Spontánní emise

$$\frac{dn_1}{dt} = A_{21} n_2$$

- Stimulovaná emise

$$\frac{dn_1}{dt} = B_{21} n_2 I(\nu)$$

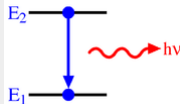
- Absorpce

$$\frac{dn_1}{dt} = -B_{12} n_1 I(\nu)$$

Vztahy mezi Einst. koef.

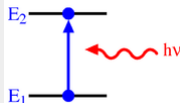
$$B_{12} = B_{21}, \quad A_{21} = \frac{8\pi h \nu^3}{c^3} B_{21}$$

Spontánní emise



em

Absorpce



Einsteinovy koeficienty

- Spontánní emise

$$\frac{dn_1}{dt} = A_{21} n_2$$

- Stimulovaná emise

$$\frac{dn_1}{dt} = B_{21} n_2 I(\nu)$$

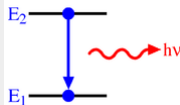
- Absorpce

$$\frac{dn_1}{dt} = -B_{12} n_1 I(\nu)$$

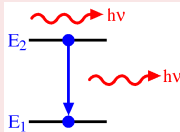
Vztahy mezi Einst. koef.

$$B_{12} = B_{21}, \quad A_{21} = \frac{8\pi h \nu^3}{c^3} B_{21}$$

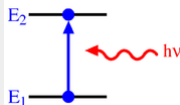
Spontánní emise



Stimulovaná emise



Absorpce



Součásti laseru

Aktivní prostředí

Stimulovaná emise

Pevnolátkové

Kapalné

Plynné

Plazma

Rezonátor

Zpětná vazba

Definuje směr

Tvořen zrcadly

Čerpání

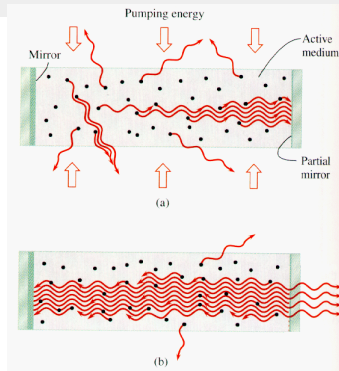
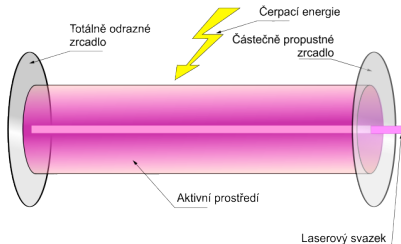
Dodává energii

Optické

Elektrické

Chemické

Termomechanické

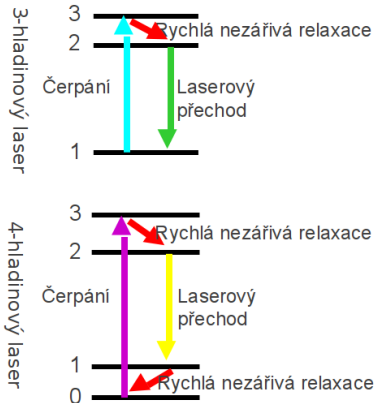
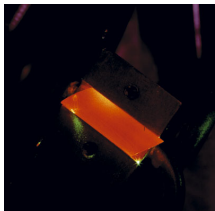


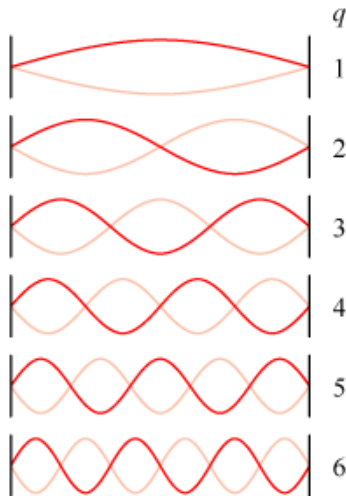
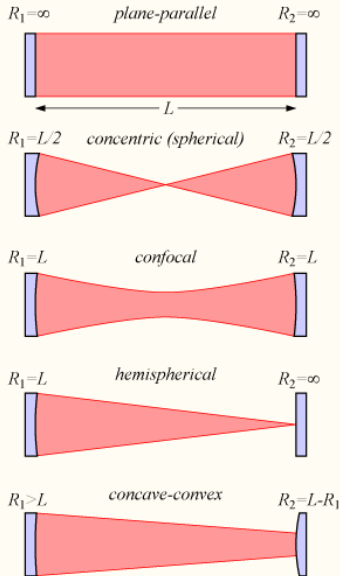
[wikipedia.org]

Dopant aktivního prostředí

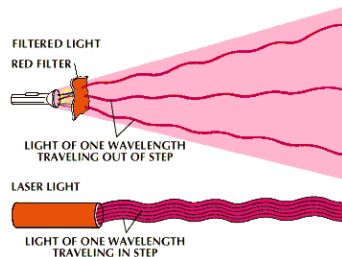
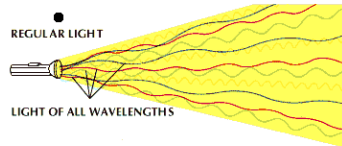
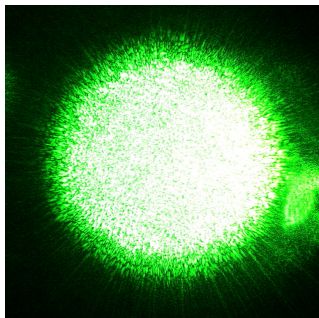
- trojhladinový systém
- čtyřhladinový systém

Čtyř-hladinový systém je výhodnější z hlediska dosažení inverze populace.



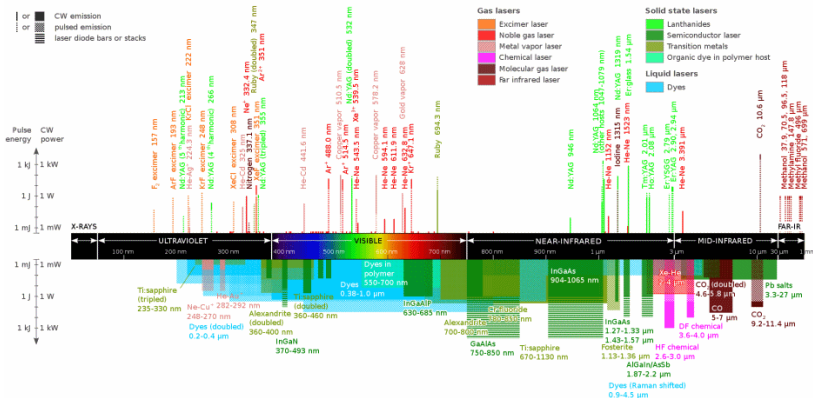


- Generátor koherentního záření
- Spektrum v diskrétních modech
- Jednomodový laser – monochromatický
- Kolimované záření (lze kolimovat)

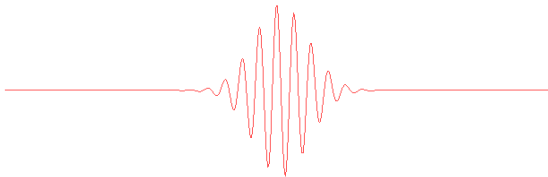


Copyright © 1994, 1995, 1996, 1997 The Learning Company, Inc. All Rights Reserved

- úzkospektrální, širokospektrální, přeladitelné



- Pulsní lasery umožňují zkoumat velmi **rychlé děje** a mají zpravidla velmi vysoký **špičkový výkon**, při interakci s hmotou vykazují zcela **odlišné chování** než kontinuální lasery



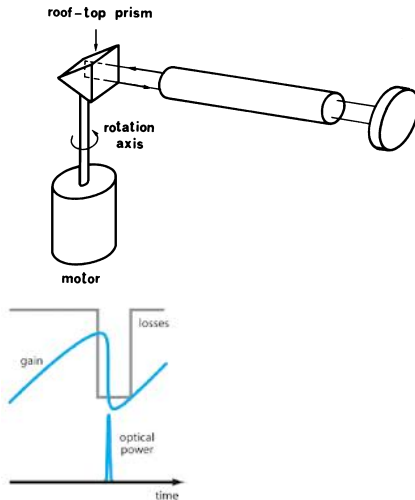
Q-spínání

- Spínání kvality
- 1ns - 100ns

Modelocking

- Synchronizace modů
- 5 fs - 100 ps

- Energie se hromadí v uzavřeném rezonátoru
- Po otevření rezonátoru vznikne **gigantický puls**

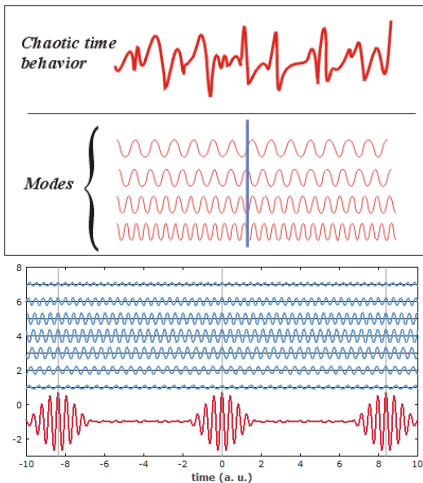


- V daném čase existuje místo v rezonátoru, kde jsou všechny módy **ve fázi**.
- **Interference** módů → ultra-krátký puls
- Čím **více módů** → kratší puls

Šířka pásma pulsů

$$\Delta\tau \cdot \Delta\nu = 0.44$$

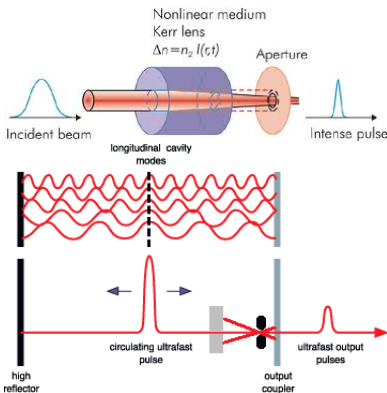
Pro 10 fs puls je potřeba 100 nm šířka pásma



Index lomu závisí na intenzitě

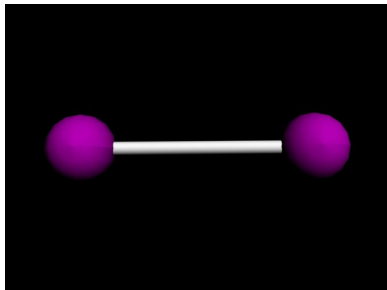
$$n(I) = n_0 + n_2 I$$

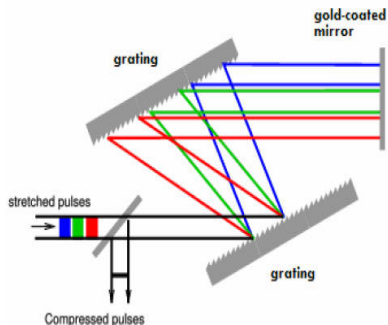
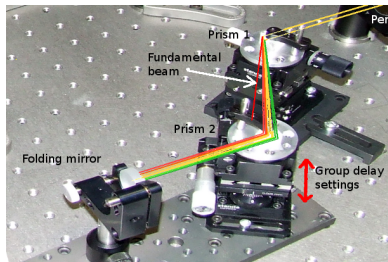
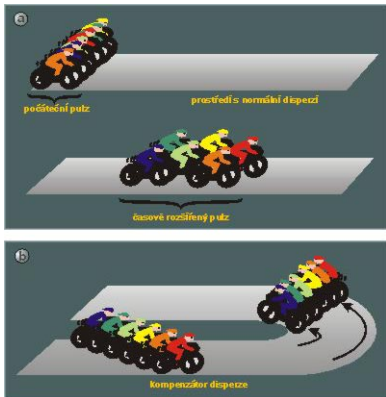
- Při vysokých intenzitách se chová jako **čočka**
- Pouze intenzivní puls se **fokusuje** skrz otvor
- Počáteční impuls vznikne **náhodně**, nebo **mechanicky**

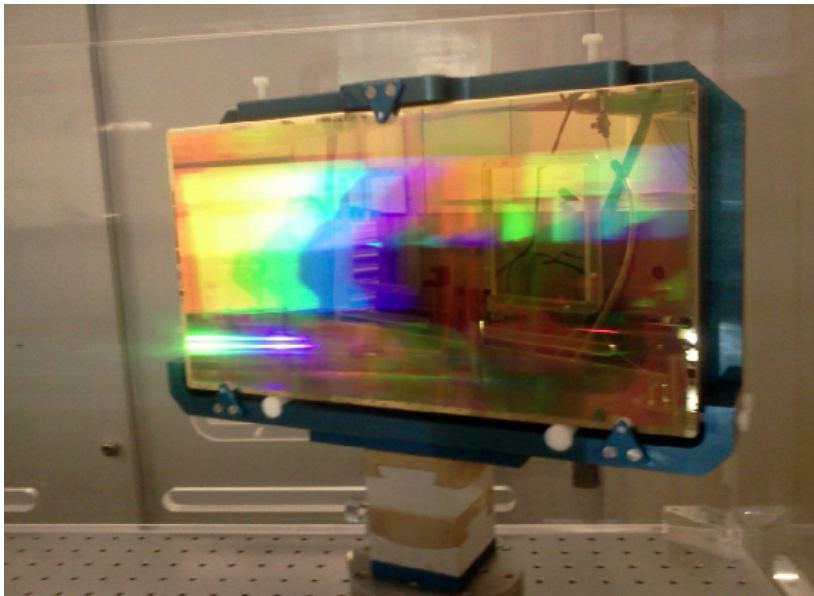


Délka generovaných pulsů ~ jednotky femtosekund

- $1 \text{ fs} = 10^{-15} \text{ s} = 0.000000000000001 \text{ s}$
- Kvantové systémy se simulují s krokem $\sim 1 \text{ fs}$.
- 2.66 fs – doba periody zákmity světla na ELI
- 200 fs – nejrychlejší chemické reakce, jako excitace pigmentu v lidském oku
- 300 fs – Vibrace molekuly jodu I_2

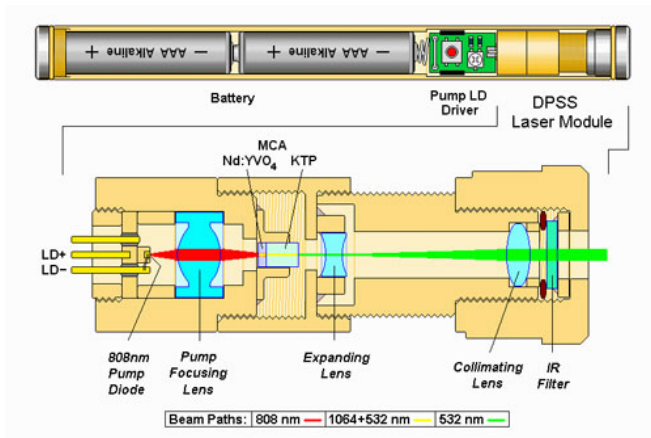


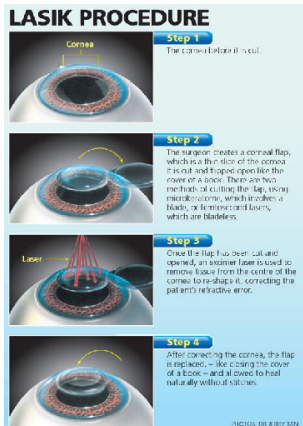




Monochromaticnost, energie / výkon, délka impulsu, opakovací frekvence, koherence, kolimovanost, polarizace

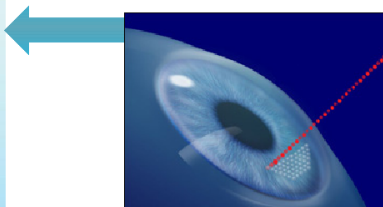
- **Medicína** – oftalmologie, dermatologie, chirurgie, kardiologie, stomatologie...
- **Průmysl** – řezání, sváření, vrtání, kalení, gravírování...
- **Biologie, chemie, spektroskopie, astronomie** – zobrazování, měření spekter...
- **Metrologie, geodézie, meteorologie, ekologie** – měření vzdáleností, znečištění, 3D skenování...
- **Elektronika, výpočetní technika, telekomunikace** – litografie, uchování dat, tisk, opt. vlákna...
- **Holografie** – 3D obrazy, bezpečnostní prvky,...
- **Restaurátorství** – čištění soch, obrazů
- **Zábavní průmysl** – laser show, ukazovátka
- **Základní výzkum** – attosekundová věda, laserová fúze, urychlování částic, fyzika vysokých intenzit...





Oftalmologie

- Korekce refrakčních vad
- Léčba sítnice (natržení, odchlípnutí, diabetická retinopatie, nádor...)
- Léčba sekundární katarakty a zeleného zákalu



em

- Sváření, žezání, vrtání
(automobilový průmysl)
- Značkování, gravírování,
rýhování, dekorace skla,
dřeva, kovu...
- Úprava povrchů (kalení,
naprašování)
- Mikroelektronika
(dolaďování odporů,
kondenzátorů, žíhání, em
nanášení tenkých
vrstev, litografie)

- Sváření, žezání, vrtání
(automobilový průmysl)
- Značkování, gravírování,
rýhování, dekorace skla,
dřeva, kovu...
- Úprava povrchů (kalení,
naprašování)
- Mikroelektronika
(dolaďování odporů,
kondenzátorů, žíhání, em
nanášení tenkých
vrstev, litografie)

- Laserové navádění
- Sestřelování bomb
- Dazzler – laserové osleповání.



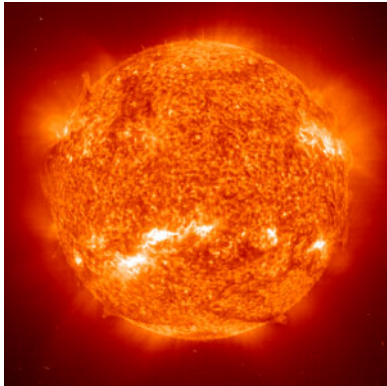


ELI beamlines = několik laserových svazků pracujících zároveň.

- V konečné fázi výkon až $200 \text{ PW} = 2 \cdot 10^{17}$
- Intenzity fokusovaného světla $\sim 5 \cdot 10^{24} \text{ W/cm}^2$

Porovnání

ELI = Slunce vyzařující veškerý svůj výkon ($4 \cdot 10^{26} \text{ W}$) z plochy cca $10 \times 10 \text{ cm}$.

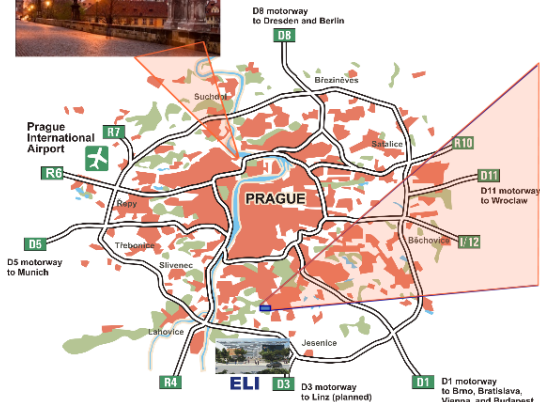
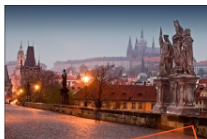


Hlavním cílem ELI Beamlines je:

- **vybudování nejintenzivnějšího laserového zařízení na světě.**
- V něm budou realizovány výzkumné a aplikační projekty zahrnující interakci světla s hmotou na intenzitě, která je asi 10 krát větší než současně dosažitelné hodnoty. ELI bude dodávat ultrakrátké laserové pulsy trvající typicky několik femtosekund (10-15 fs) a produkovat výkon až 10 PW.

Hlavním cílem ELI Beamlines je:

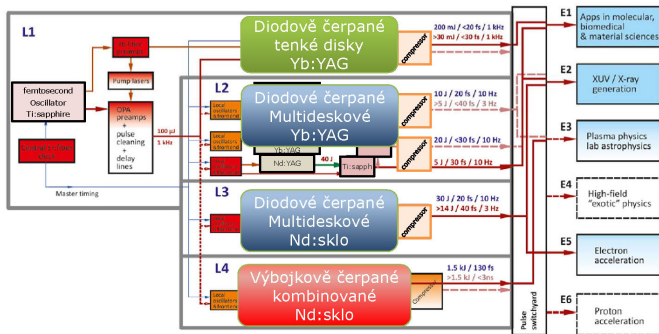
- **vybudování nejintenzivnějšího laserového zařízení na světě.**
- V něm budou realizovány výzkumné a aplikační projekty zahrnující interakci světla s hmotou na intenzitě, která je asi 10 krát větší než současně dosažitelné hodnoty. ELI bude dodávat ultrakrátké laserové pulsy trvající typicky několik femtosekund (10–15 fs) a produkovat výkon až 10 PW.



Dolní Břežany



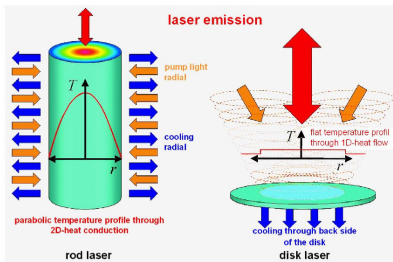
Blokové schéma laseru





Nové technologie – tenké disky

Umožňují kHz opakovací frekvence i vysoké energie



L1 čerpací lasery pro systémy L1 potřebují dosáhnout až 1.5 J/pulse při 1kHz opakovací frekvenci a 2 ps obě trvání pulzu.

Parametry disku

tloušťka: 100 - 900 μm

průměr: 10 - 35 mm

Výhody tenkého disku

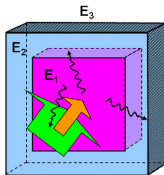
- účinné chlazení (<1 mm tloušťka)
- nedochází k vzniku tepelné čočky
- je možné použít vysokou intenzitu čerpání (10 kW/cm^2)
- výkon lze zvyšovat zvětšením velikosti svazku ($\approx d^2$)
- Nevýhodou je nízký zisk na + průchod

Source: Thomas Metzger, MPQ

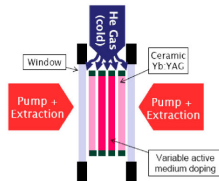
Nové technologie – multideskové kryogenně chlazené zesilovače

Parametry zesilovače

- 2 zesilovače v každém z nich 8 disků (Yb:YAG)
- kryogenní chlazení 160 K
- Yb:YAG/(glass) čerpaná oblast E1
- Cr:YAG 30 mm absorpční oblast E₂ (k potlačení ASE)

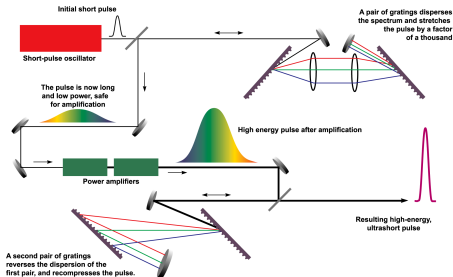


Technologie vyvíjená v Anglii RAL/STFC umožňující generaci až 100 J v pulzu při vysoké opakovací frekvenci 10Hz (délka pulzu 2ns)

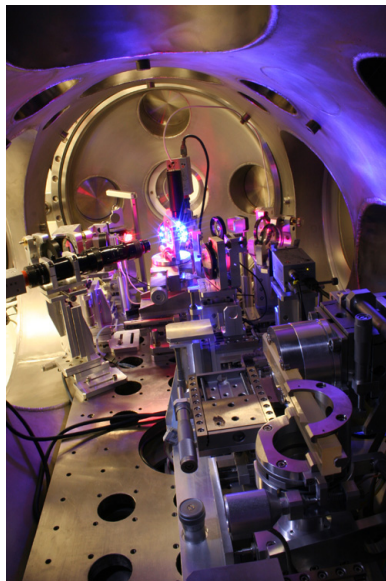
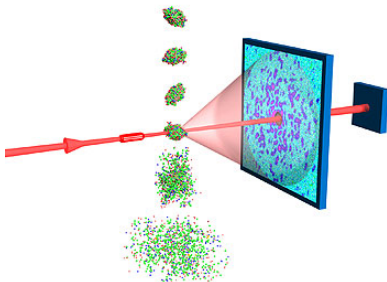


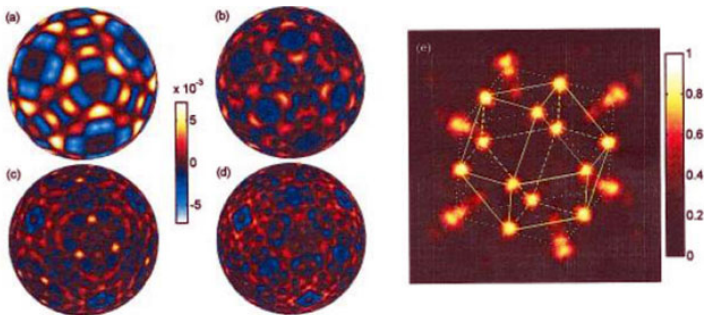
Courtesy K. Ertel and J. Collier (RAL/STFC)

- 1 Generace krátkých pulsů
- 2 Prodloužení pulsů
- 3 Zesílení pulsů
- 4 Zkrácení pulsů



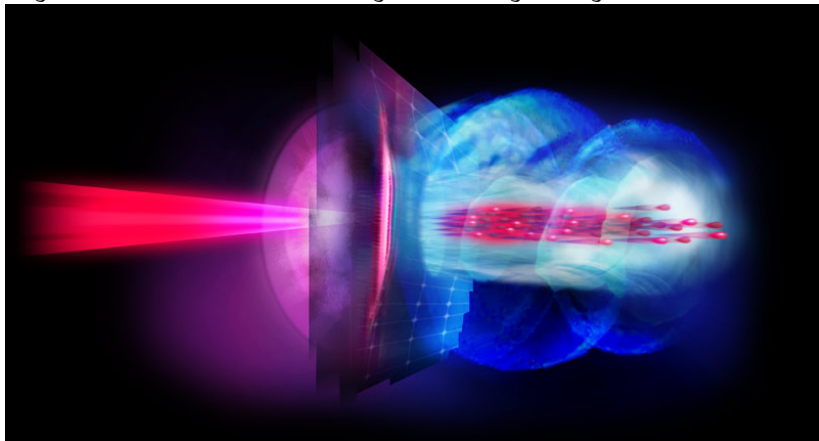
- Koherentní rentgenové zdroje
- Femtosekundové pulsy
- Studium počátečních fází reakcí a ultrarychlých přechodových jevů ve fyzice a v biochemii



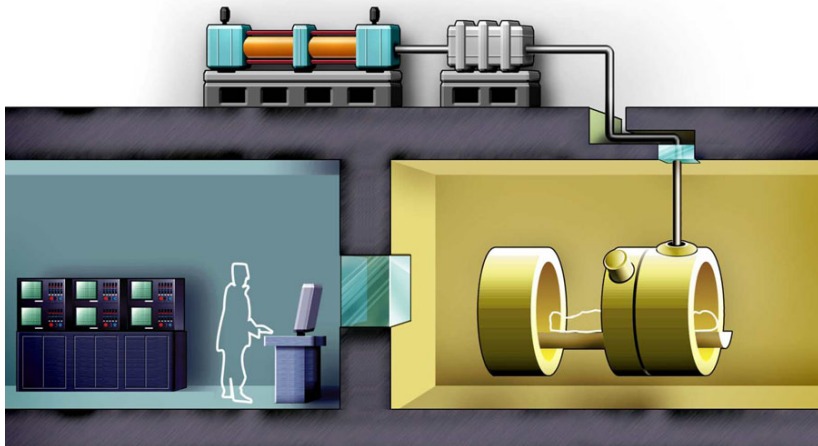


Hologramy krystalu CoO měřené při energiích fotonů $h\nu = 6925$, 13861 , 17444 a 18915 eV. (e) Obrazy atomů získaných z kombinace těchto měření.

Laser je schopen urychlit na vzdálenost 1 mm tak, jako urychlovač na 100 m. Protony, elektrony, ionty.



Kompaktní a levné zdroje pro léčbu rakoviny



Kolegové si hrají...



Kolegové si hrají...

Děkuji za pozornost

