

Lasery a jejich aplikace

Miroslav Čech

Helena Jelínková

Základní fyzikální jednotky SI

Veličina	Jednotka	
	Název	Značka
Délka	metr	m
Hmotnost	kilogram	kg
Čas	sekunda	s
Elektrický proud	ampér	A
Termodynamická teplota	kelvin	K
Látkové množství	mol	mol
Svítivost	kandela	cd

Fyzikální konstanty a jednotky

- Rychlost světla c - 299 792 458 m/s (přesně)
- Planckova konstanta h – $6.62606896 \cdot 10^{-34}$ J.s
- Metr m
 - 1960 - Metr je délka rovnající se 1 650 763,73 násobku vlnové délky záření šířícího se ve vakuu, která přísluší přechodu mezi energetickými hladinami $2p_{10}$ a $5d_5$ atomu kryptonu 86.
 - 1983 - Metr je délka dráhy světla ve vakuu během časového intervalu $1/299\,792\,458$ sekundy.

- Sekunda s

Sekunda je doba trvání 9 192 631 770 period záření, které odpovídá přechodu mezi dvěma hladinami velmi jemné struktury základního stavu atomu cesia 133

Fyzikální konstanty a jednotky

○ Kelvin K

Je definován dvěma body

- 0 K je teplota absolutní nuly, tedy naprosto nejnižší teplota, která je fyzikálně definována (žádný tepelný pohyb částic)
- 273,16 K je teplota trojného bodu vody (bod ve fázovém diagramu – rovnovážný stav mezi třemi skupenstvími).

○ Kandela cd

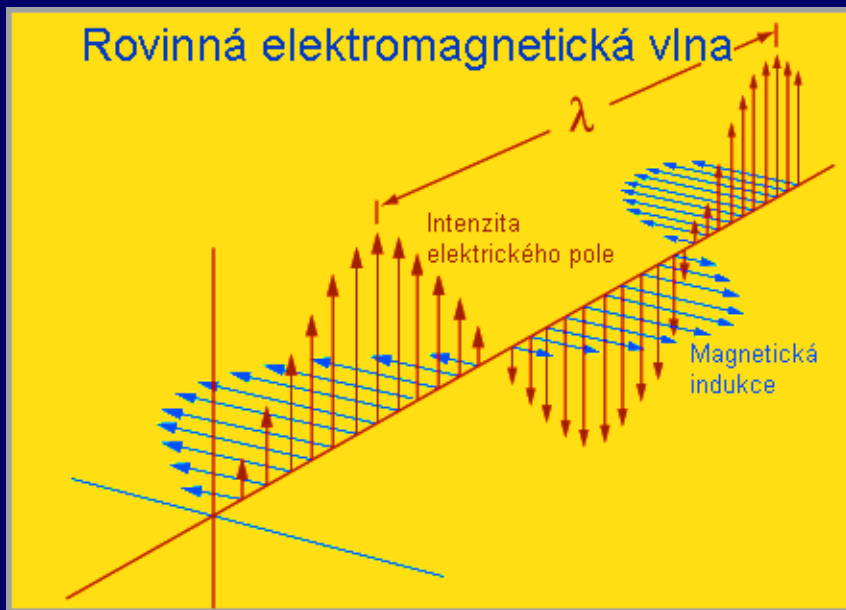
- před rokem 1979 – svítivost referenční svíčky, později záření absolutně černého tělesa za určitých podmínek
- Od roku 1979 je to svítivost světelného zdroje, který v daném směru vyzařuje monochromatické záření o frekvenci 540×10^{12} Hz a jehož zářivost (zářivá intenzita) v tomto směru činí $1/683$ W na jeden steradián.

Světlo

Má duální charakter, někdy se projevuje jako:

- elektromagnetické vlnění – interference, Dopplerův efekt, ...
- částice (foton) – fotoelektrický jev

Elektromagnetické záření



$$\vec{E} = \vec{i}_y E_0 \cos(\omega t - kz + \Phi)$$

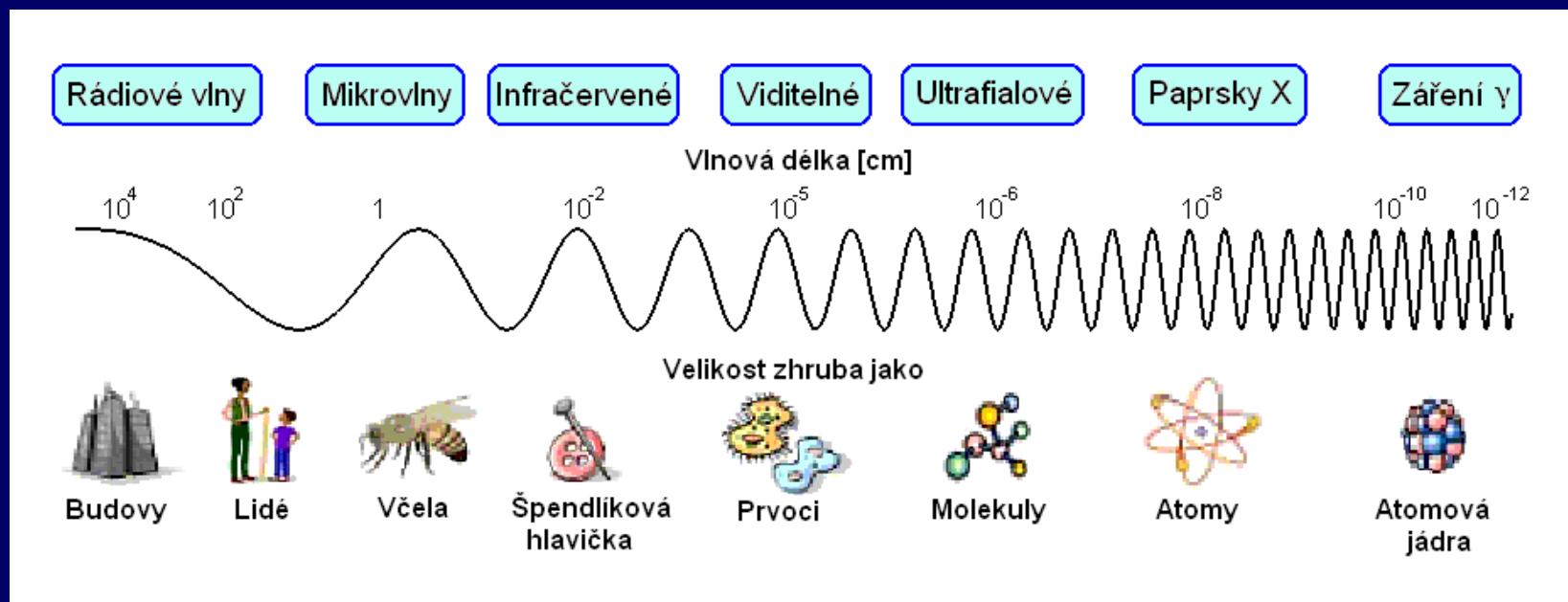
$$\vec{B} = \vec{i}_x B_0 \cos(\omega t - kz + \Phi)$$

$$\lambda = \frac{c}{f}$$

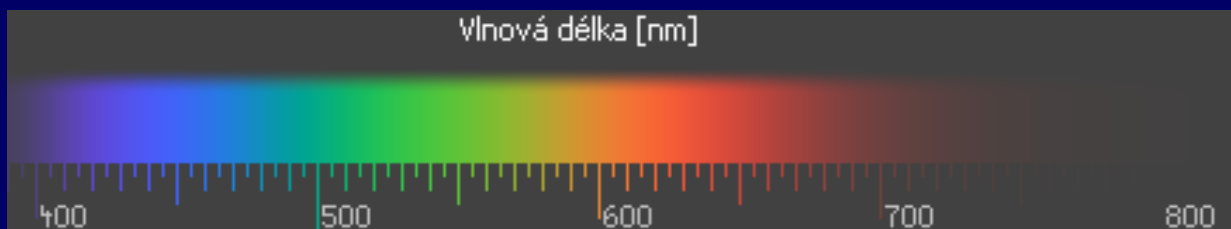
$$E = hf$$

- Polarizace - stáčení konce vektoru intenzity elektrického pole (lineární, kruhová nebo eliptická polarizace, nepolarizovanost)
- Koherence - vzájemný souvislost souběžných paprsků (z lat. cohaerere - souviset)
- Vyzařované spektrum - monochromatické nebo složené vlnění
- Kolimovanost - rozbíhavost optického svazku

Druhy elektromagnetického záření



Viditelné spektrum má velmi malý rozsah vlnových délek (400-700 nm):



LASER

Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation

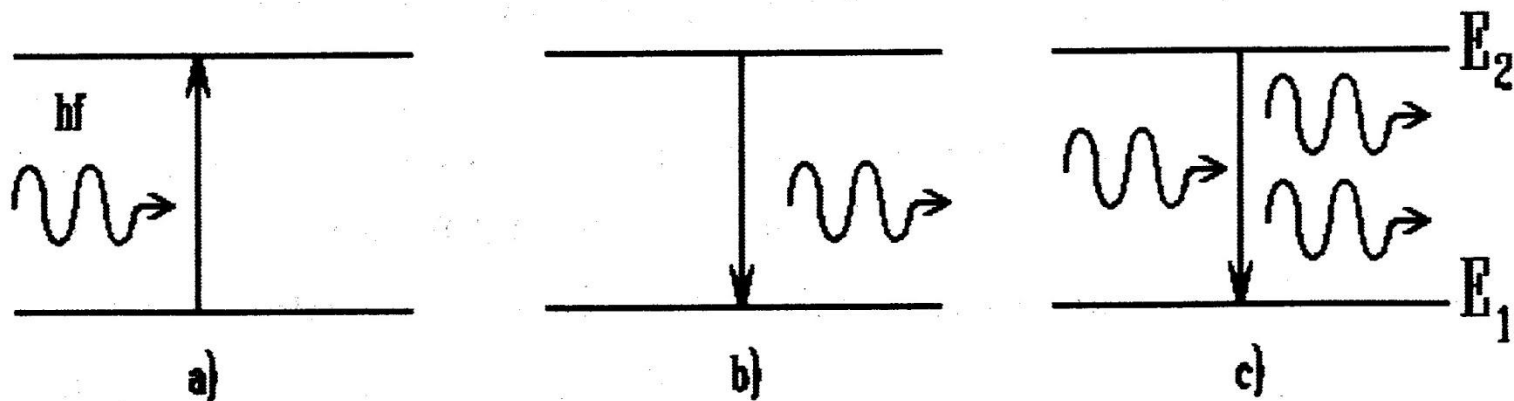
Kvantový generátor světla

Historie LASERu



1900	1917	A. Einstein	myšlenka stimulované emise
	1939	V.A. Fabrikant	myšlenka použití stimulované emise k zesilování EM záření
1917	1951	V.A. Fabrikant M.M. Vydunsky F.A. Butajeva	patent na metodu zesilování EM záření při inverzi hladin
	1952	N.G. Basov A.M. Prochorov	myšlenka MASERu
1939	1954	N.G. Basov A.M. Prochorov C. Townes	realizace MASERu
1951	1960	16.5. T.H. Maiman	konstrukce prvního LASERu (rubínový), Hughes Research Laboratories, USA
1954	1962	R.N. Hall	první polovodičový LASER
1962	1964	N.G. Basov A.M. Prochorov C. Townes	Nobelova cena za fyziku
	2000		

Kvantové přechody



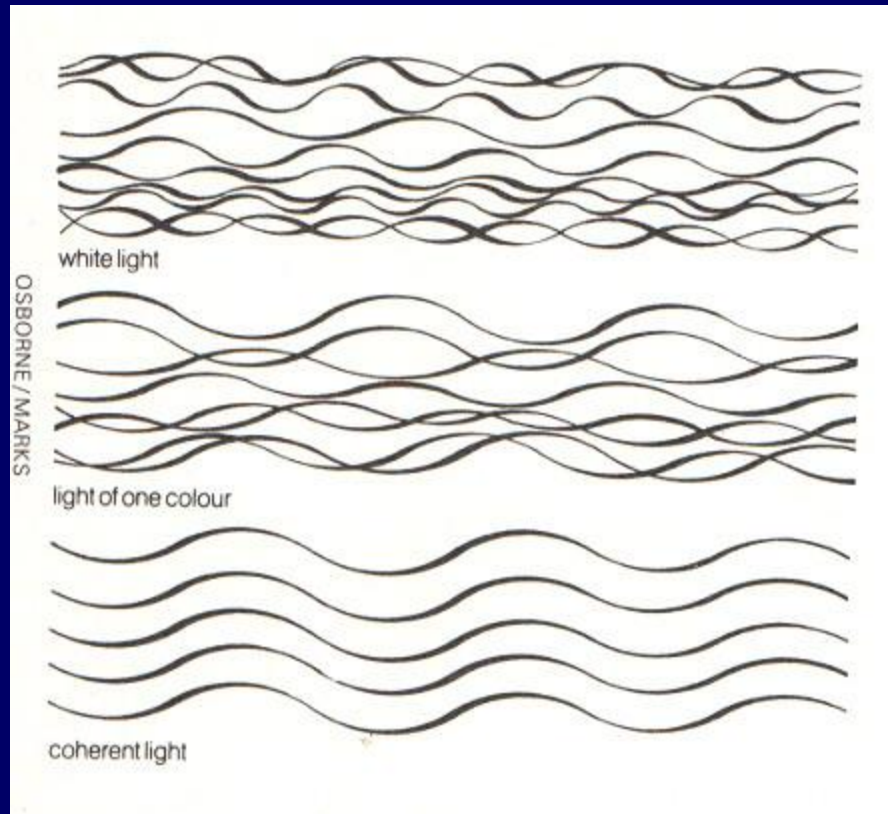
Obr. 4.1: Zářivé kvantové přechody

absorpce a), spontánní emise b), stimulovaná emise c)

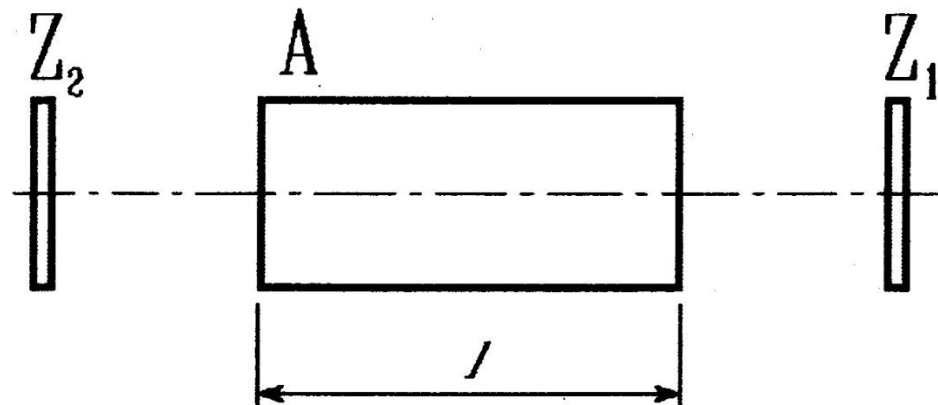
Laser

- ▶ Přístroj, který generuje elektromagnetické záření:
 - ▶ Monochromatické
 - ▶ polarizované
 - ▶ směrované (s malou rozbíhavostí)
 - ▶ koherentní
 - ▶ vysoce energetické
 - ▶ výkonné

Koherence



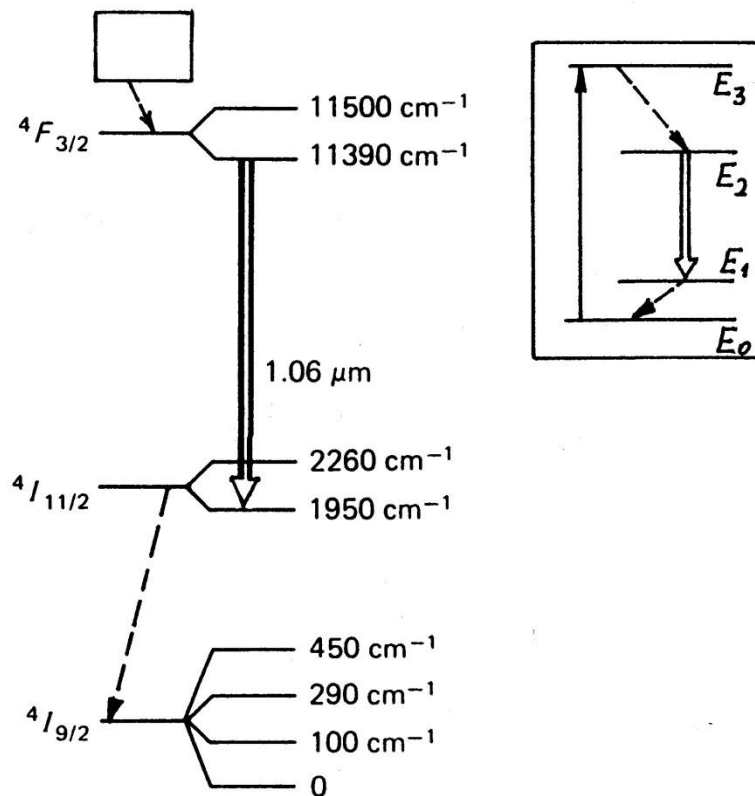
Princip laseru



Obr. 7.1: Laser - generátor

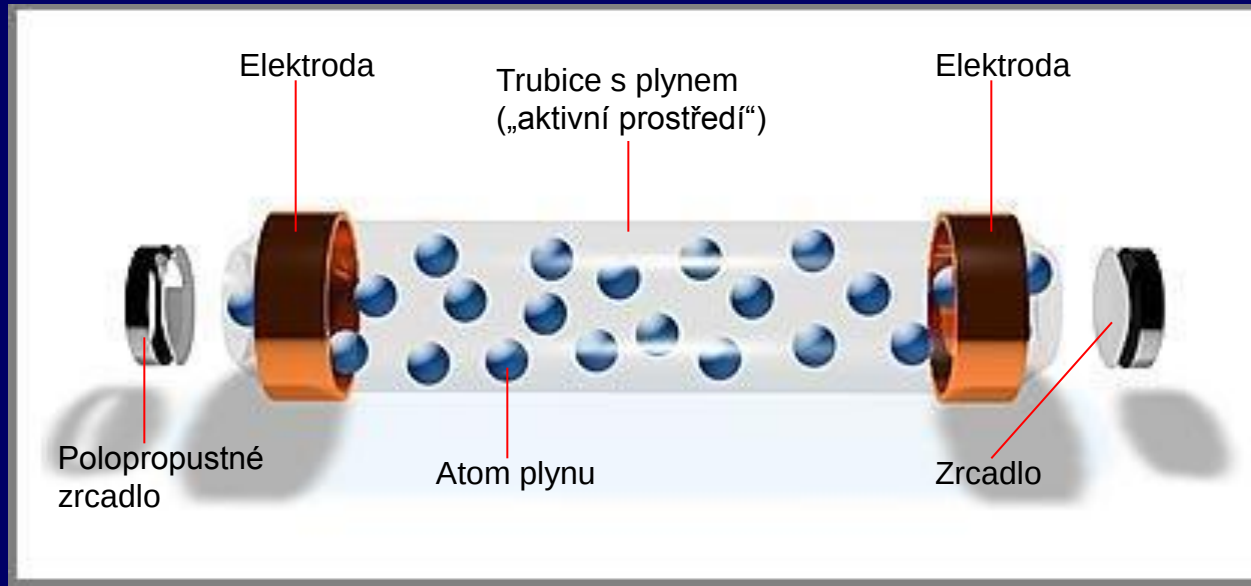
A - aktivní prostředí, Z_1 , Z_2 - zrcadla optického rezonátoru

Hladiny Nd:YAG



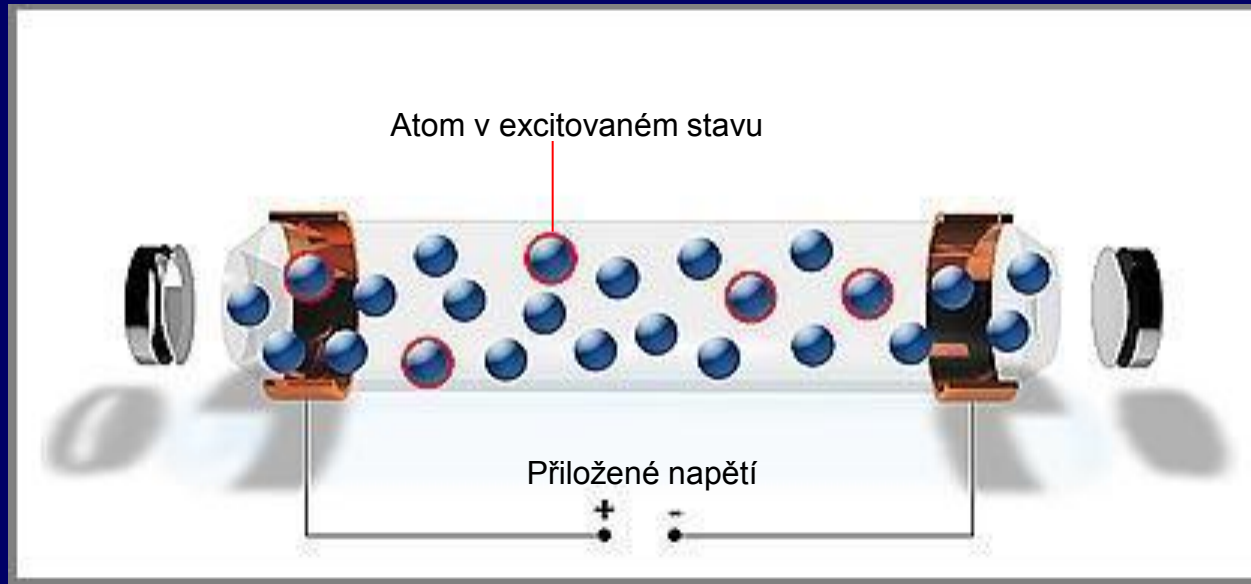
Obr. 9.8: Spektrum energetických hladin iontu *Nd* ve skle

Princip LASERu (atomární plynový laser)



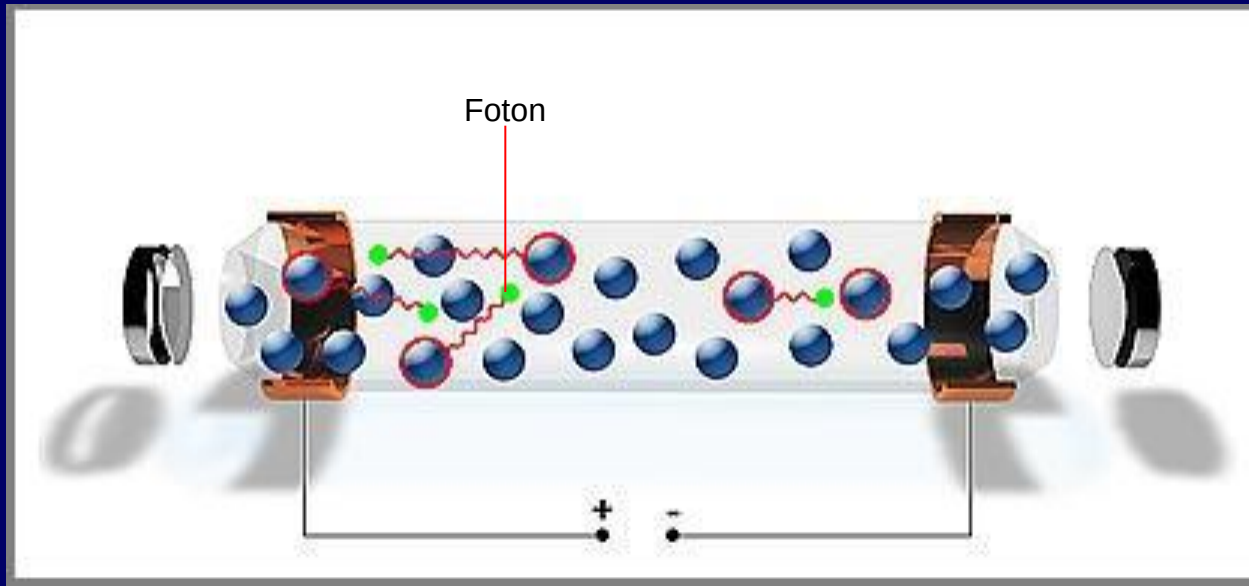
- struktura plynového LASERu se podobá fluorescentní neonové lampě
- skládá se z trubice naplněné plynem (aktivní prostředí), na které jsou přiloženy dvě elektrody
- v ose aktivního prostředí jsou dvě zrcadla, přičemž jedno z nich nemá 100%ní odrazivost

Princip LASERu (atomární plynový laser)



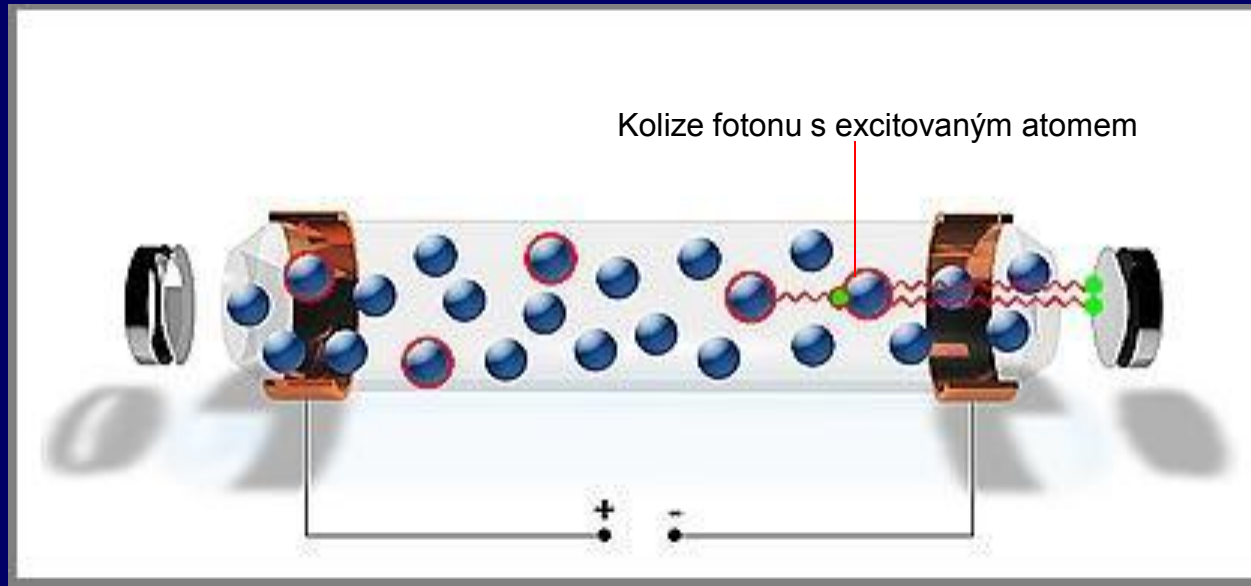
- pokud je na elektrody přivedeno dostatečně velké napětí, atomy plynu v trubici se dostanou do excitovaného stavu, tj. elektrony v jejich obalech budou na vyšších energetických hladinách (tzv. inverze populace)

Princip LASERu (atomární plynový laser)



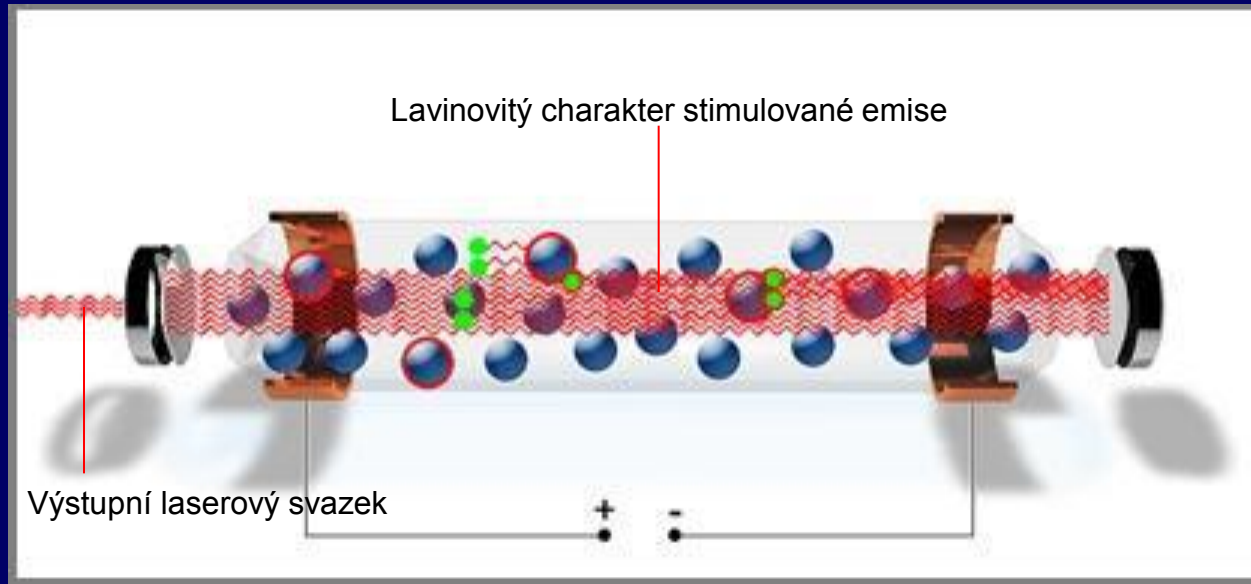
- po určitém čase atomy uvolňují energii ve formě elektromagnetického záření (fotonů) a vracejí do základních, energeticky výhodných stavů

Princip LASERu (atomární plynový laser)



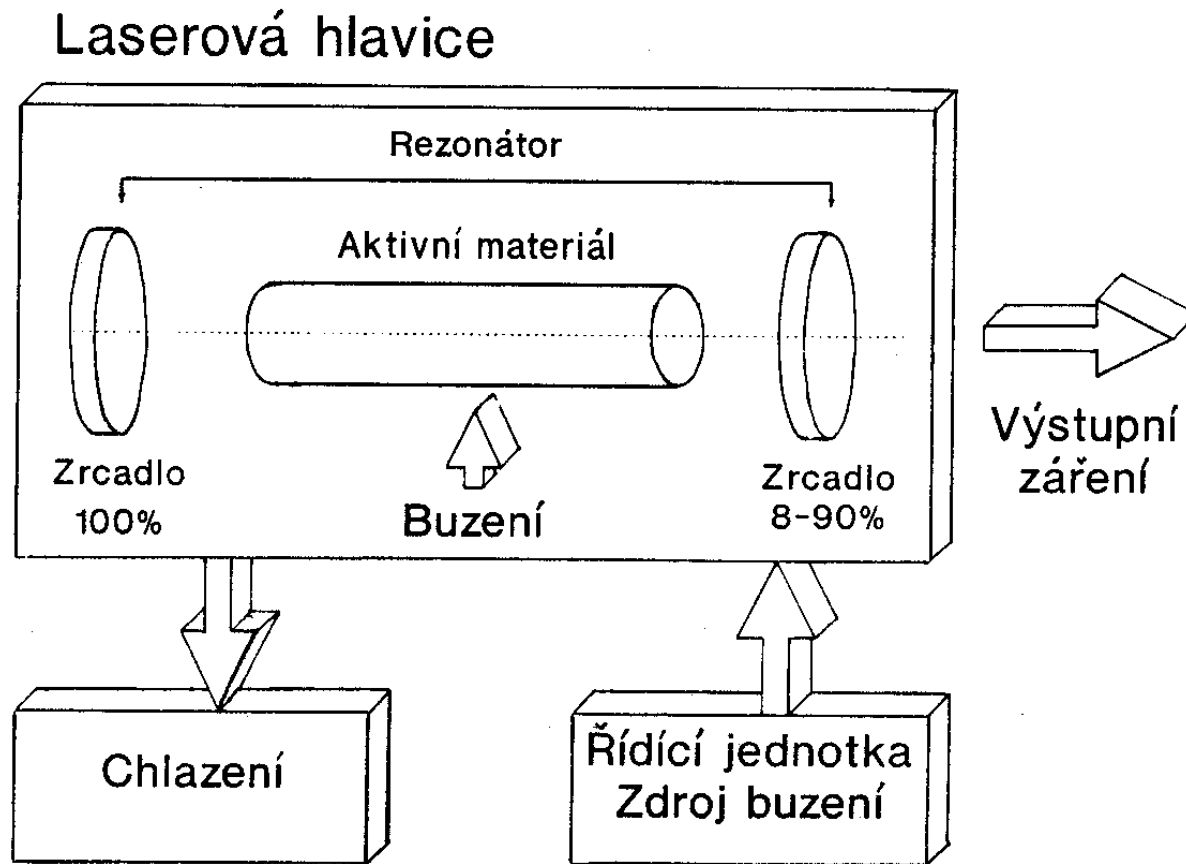
- pokud se takto vzniklý foton srazí s atomem, který je ještě v excitovaném stavu, dojde ke vzniku dalšího fotonu
- nově vzniklý foton má stejné vlastnosti jako foton, který jeho emisi vyvolal (stejná vlnová délka, fáze a směr šíření)
- fotony, které mají správný směr (tj. šíří se ve směru osy aktivního prostředí, se násobí, fotony jiných směrů vylétají z trubice pryč

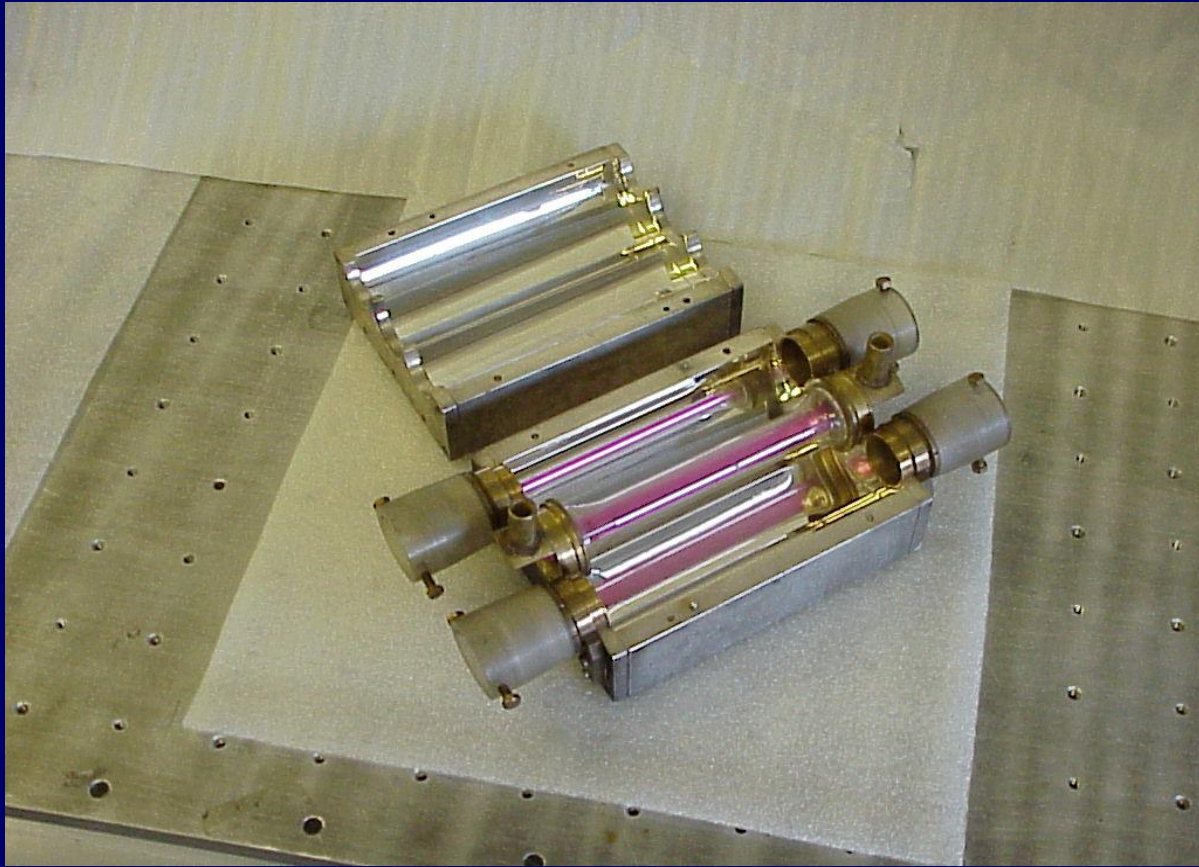
Princip LASERu (atomární plynový laser)



- tento tzv. „proces stimulované emise“ má lavinovitý charakter
- dvě zrcadla odrážejí vzniklé fotony v ose aktivního prostředí, čímž přispívají k nárůstu procesu stimulované emise; polopropustným zrcadlem se pak ven dostává finální laserový svazek

Laserový systém





Klasifikace LASERů

Podle typu aktivního prostředí

Pevnolátkové

Polovodičové

Plynové

Kapalinové

Plazmatické

- relativní stabilita aktivního materiálu (krystaly, skla, keramika), jednoduchost systému
- díky velkému optickému zesílení možnost menší velikosti aktivního prostředí, možnost spektrálního přeladění, velká závislost parametrů generovaného záření na teplotě
- malá divergence, menší deformace optického svazku, stabilita frekvence výstupního svazku, malé výkony
- aktivním prostředím jsou roztoky organických barviv, velký rozsah získaných vlnových délek
- RTG laser (ve fázi výzkumu)

Klasifikace LASERů

Podle vysílaných vlnových délek

Infračervené

Lasery viditelného pásma

Ultrafialové

RTG

Podle časového režimu

Impulsní

Kontinuální

Podle typu buzení

Opticky

Elektrickým výbojem

Elektronovým svazkem

Tepelnými změnami

Chemicky

Rekombinací

Injekcí nosičů náboje

Výstupní parametry laserů

Vlnová délka

Časová struktura

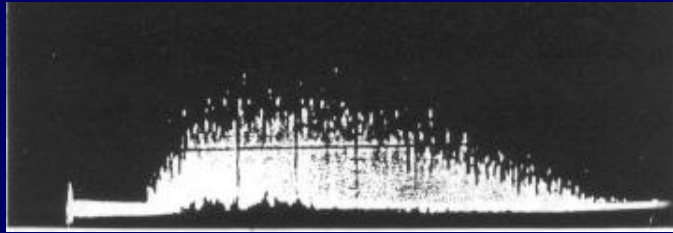
Prostorová struktura

Energie/hustota energie

Prostorová struktura (divergence)

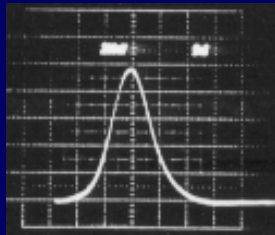
Rozhodující laserové parametry

Časová struktura - impulsní režim



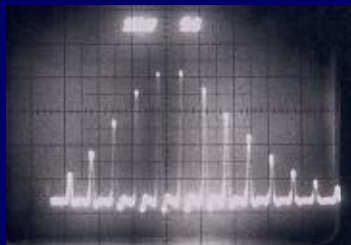
200 μ s/div

Dlouhé impulsy
Volně běžící režim



5 ns/div

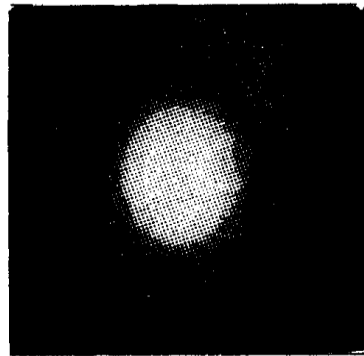
Krátké impulsy
Q-spínání



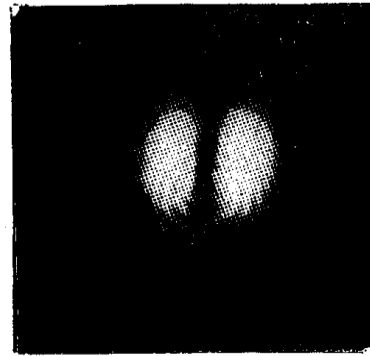
5 ns/div

Velmi krátké impulsy
(desítky ps)
Synchronizace módů

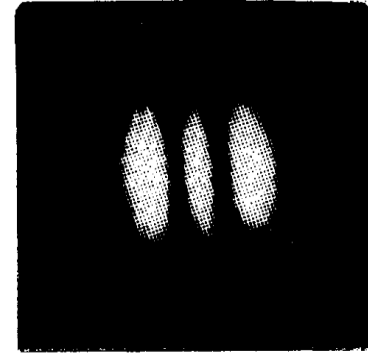
Prostorová struktura svazku (módová)



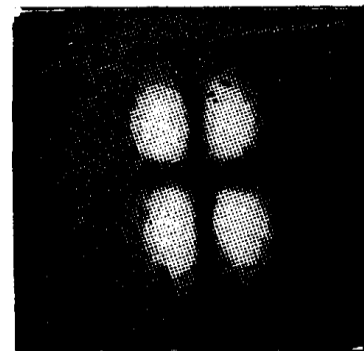
TEM₀₀



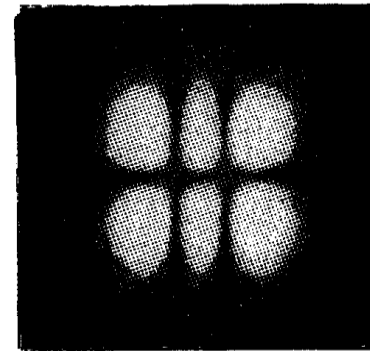
TEM₁₀



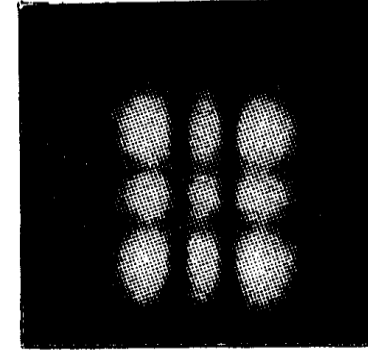
TEM₂₀



TEM₁₁

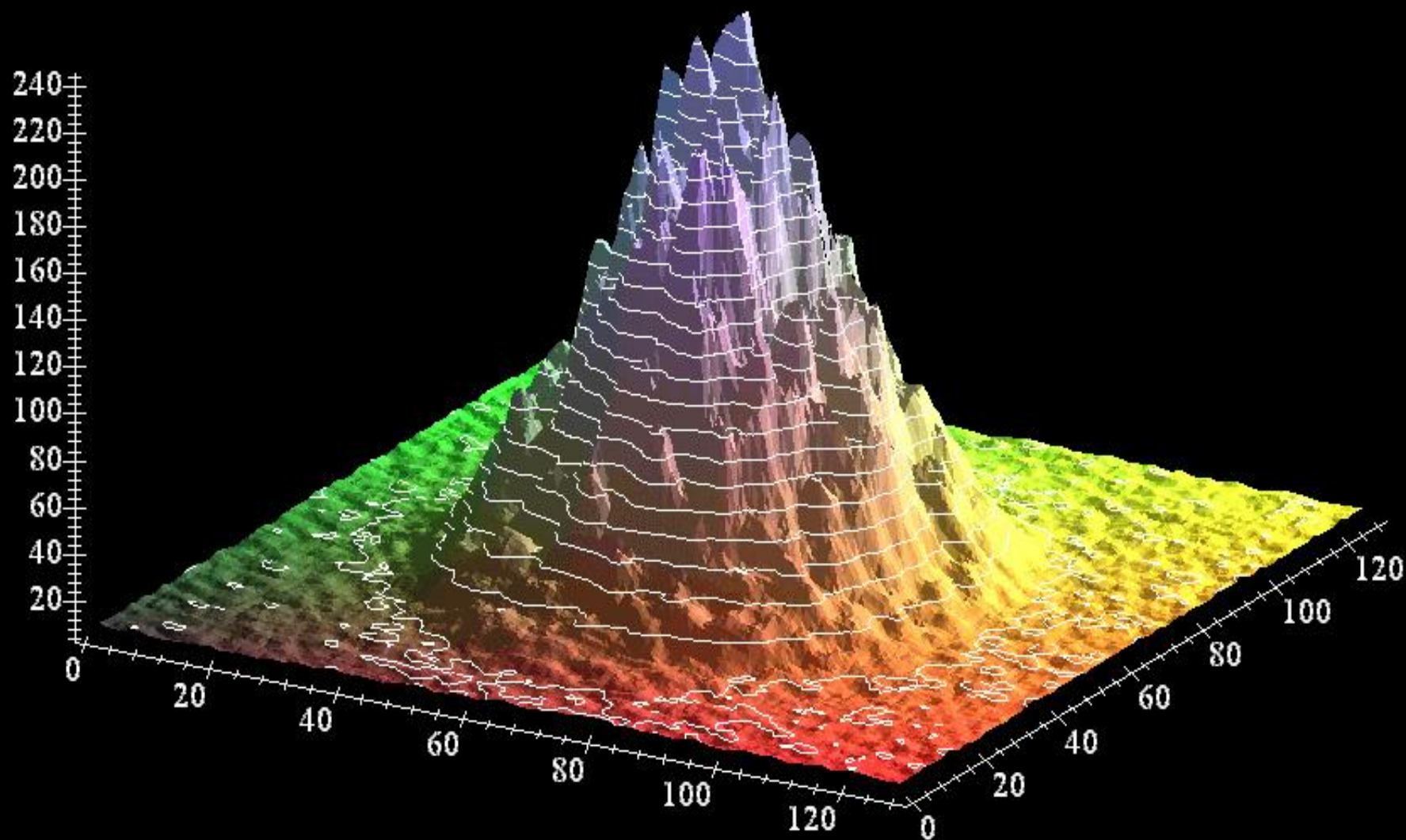


TEM₂₁



TEM₂₂

Naměřená prostorová struktura

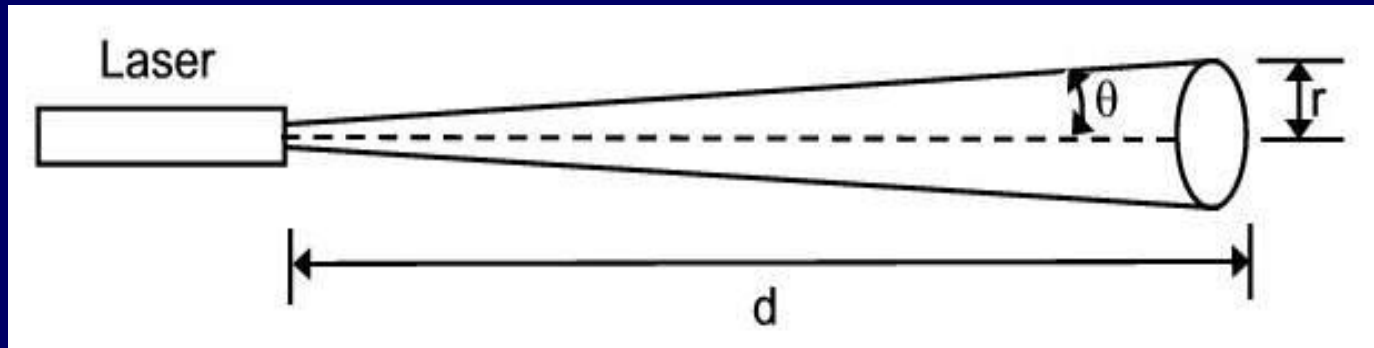


Divergence, stopa svazku

- Rozbíhavost svazku

Jestliže vidíme laserový svazek v zaprášeném vzduchu, vypadá jako tenká rovná linka. Avšak když se podíváme pozorněji, zjistíme, že se velmi pomalu rozšiřuje. Tento jev se nazývá rozbíhavost (divergence). Značka pro rozbíhavost je Θ . Měří se nejčastěji v miliradiánech.

- Poloměr stopy r , kterou vytváří laserový paprsek po dopadu na stěnu ve vzdálenosti d , která je k paprsku kolmá, je možno spočítat podle vztahu:
$$r = d \cdot \tan(\Theta)$$



Porovnání zdrojů EM záření



Spektrum záření	téměř monochromatické	celé spektrum	monochromatické
Kolimovanost	kolimované	rozbíhavé	rozbíhavé
Koherence	koherentní	nekoherentní	nekoherentní
Polarizace	lineární	nepolarizované	kruhová

Vlastnosti laserového záření rozhodující pro aplikace

Monochromaticčnost - vlnová délka

Energie, výkon (kontinuální, pulsní)

Délka impulsu

Opakovací frekvence

Koherence

Kolimovanost - prostorová struktura svazku záření

- **módová struktura**
- **průměr svazku**

Polarizace

Lasery pro průmyslové využití

laserové technologie

- sváření, řezání, vrtání
- značkování, gravírování, rýhování, dekorace skla, dřeva, vytváření identifikačních kódů
- Úprava povrchů materiálů
 - kalení, otavení, naprašování
- Mikroelektronika
 - doladování odporů, kondenzátorů, žíhání, dopování, depozice tenkých vrstev, litografie, spektrální mikroanalýza

Monochromaticnost

Vlnová délka

Energie, výkon

Délka impulsu

Opakovací frekvence

Koherence

Kolimovanost

Polarizace

Některé aplikace LASERů

- Průmyslové aplikace
 - Sváření
 - Řezání
 - Broušení



Lasery v energetice

- **Termonukleární syntéza**

Monochromaticnost

Vlnová délka

Energie, výkon

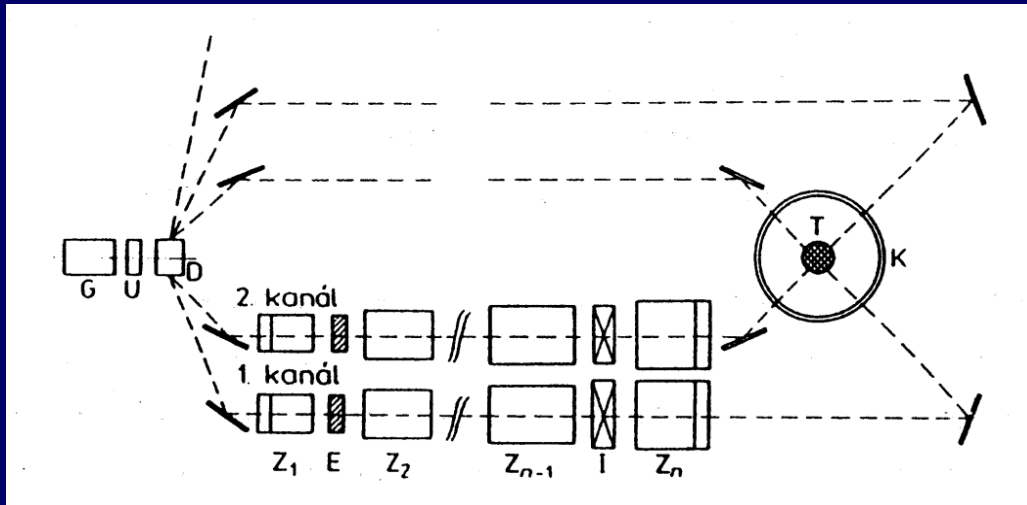
Délka impulsu

Opakovací frekvence

Koherence

Kolimovanost

Polarizace



Lasery v biologii, chemii a spektroskopii

- Zviditelňování buněk pro biologická měření
- Měření koncentrací chemikálií
- Analýza látek

Monochromaticnost

Vlnová délka

Energie, výkon

Délka impulsu

Opakovací frekvence

Koherence

Kolimovanost

Polarizace

Komunikace a výpočetní technika

- Vláknové lasery
- Vedení záření optickými vlákny
- Laserové tiskárny
- Přehrávání kompaktních disků
- Čtení a zápis na optické disky
- Čtení čárových kódů

Monochromaticnost

Vlnová délka

Energie, výkon

Délka impulsu

Opakovací frekvence

Koherence

Kolimovanost

Polarizace

Některé aplikace LASERů

- Elektronika
 - Počítačová technika (CD, DVD, laserový tisk)
 - Laserové doladřování jmenovitých hodnot součástek
 - Opravy poškozených IC laserem
 - Scannery čárkových kódů



Metrologie

- Měření rychlostí, vzdálenosti
- Měření znečištění
- Automatizace
 - Stavebnictví, geodesie
 - Upřesnění tvaru Země
- Dálkové řízení
 - Důlní inženýrství, letectví

Monochromaticnost

Vlnová délka

Energie, výkon

Délka impulsu

Opakovací frekvence

Koherence

Kolimovanost

Polarizace

Holografie

- Záznam dat
- Výkonější paměti
- Třírozměrný záznam obrazu
- Kryptografie

Monochromaticnost

Vlnová délka

Energie, výkon

Délka impulsu

Opakovací frekvence

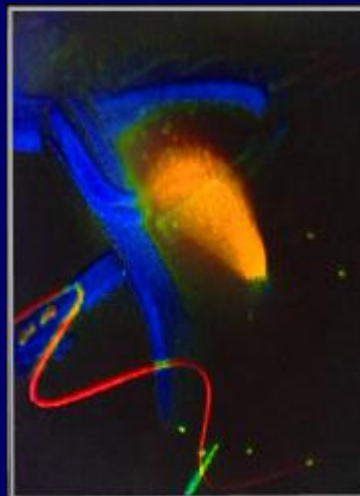
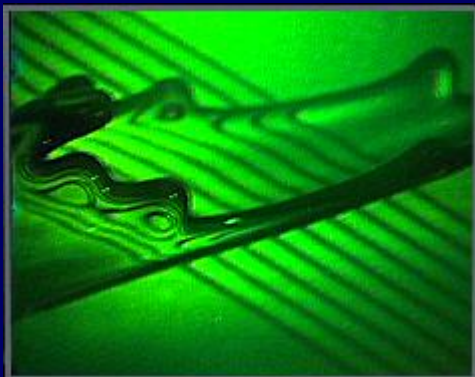
Koherence

Kolimovanost

Polarizace

Některé aplikace LASERů

- Obecné aplikace
 - Holografie
 - Laserová show
 - Laserová ukazovátka



Vojenská technika

- Laserové zaměřovače
- Označování cílů pro bomby a rakety
- Zjišťování vzdálenosti objektů
- Simulace jaderného výbuchu
- Bojové simulace

Monochromaticčnost

Vlnová délka

Energie, výkon

Délka impulsu

Opakovací frekvence

Koherence

Kolimovanost

Polarizace

Některé aplikace LASERů

- Vojenská technika
 - Satelitní navigace, navigace družic
 - Navádění raket, balistických střel a nukleárních zbraní, SDI program
 - Navádění vzdušných sil, zaměřování cílů
 - Zaměřovače střelných zbraní



Astronomie, kosmický výzkum

- Upřesnění tvaru Země
- Pohyb Zemských pólů, ker, kontinentů
- Výzkum planet
- Výskyt nových nalezišť

Monochromaticnost

Vlnová délka

Energie, výkon

Délka impulsu

Opakovací frekvence

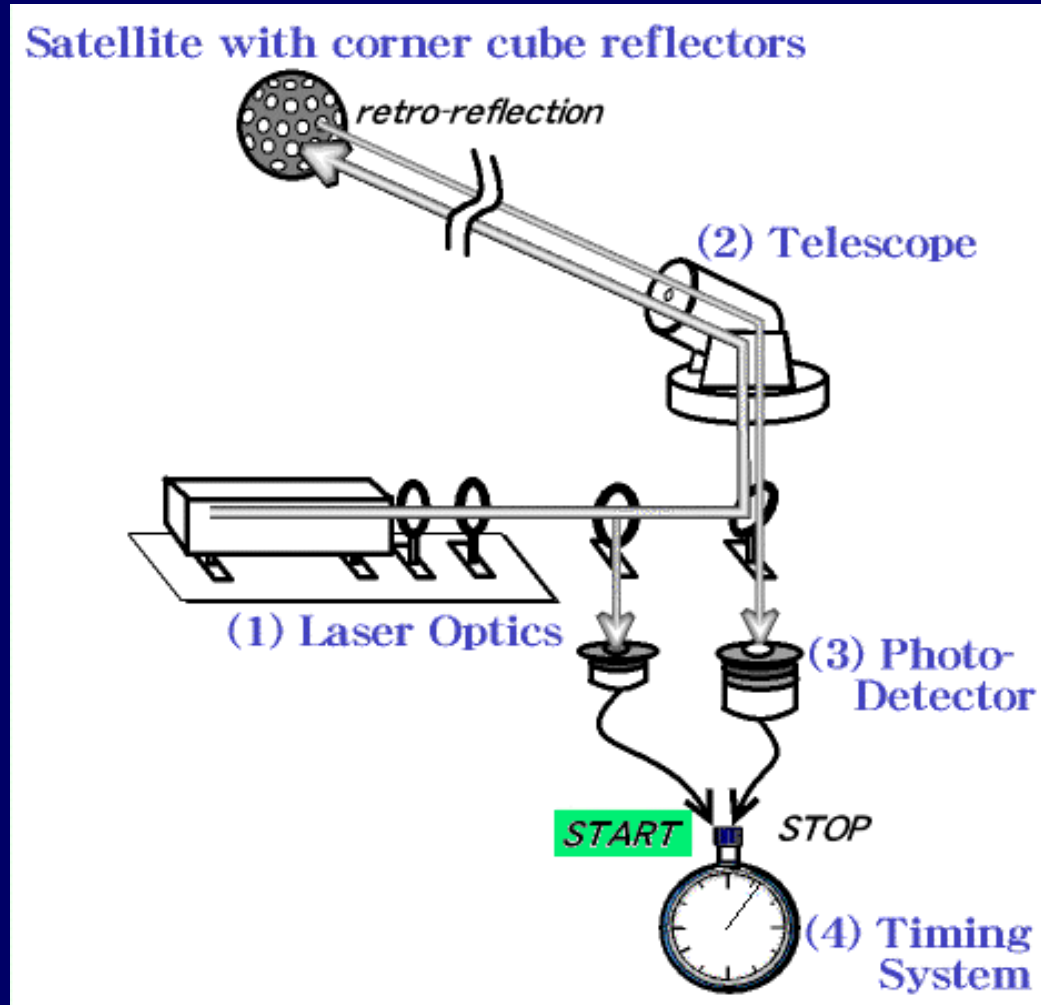
Koherence

Kolimovanost

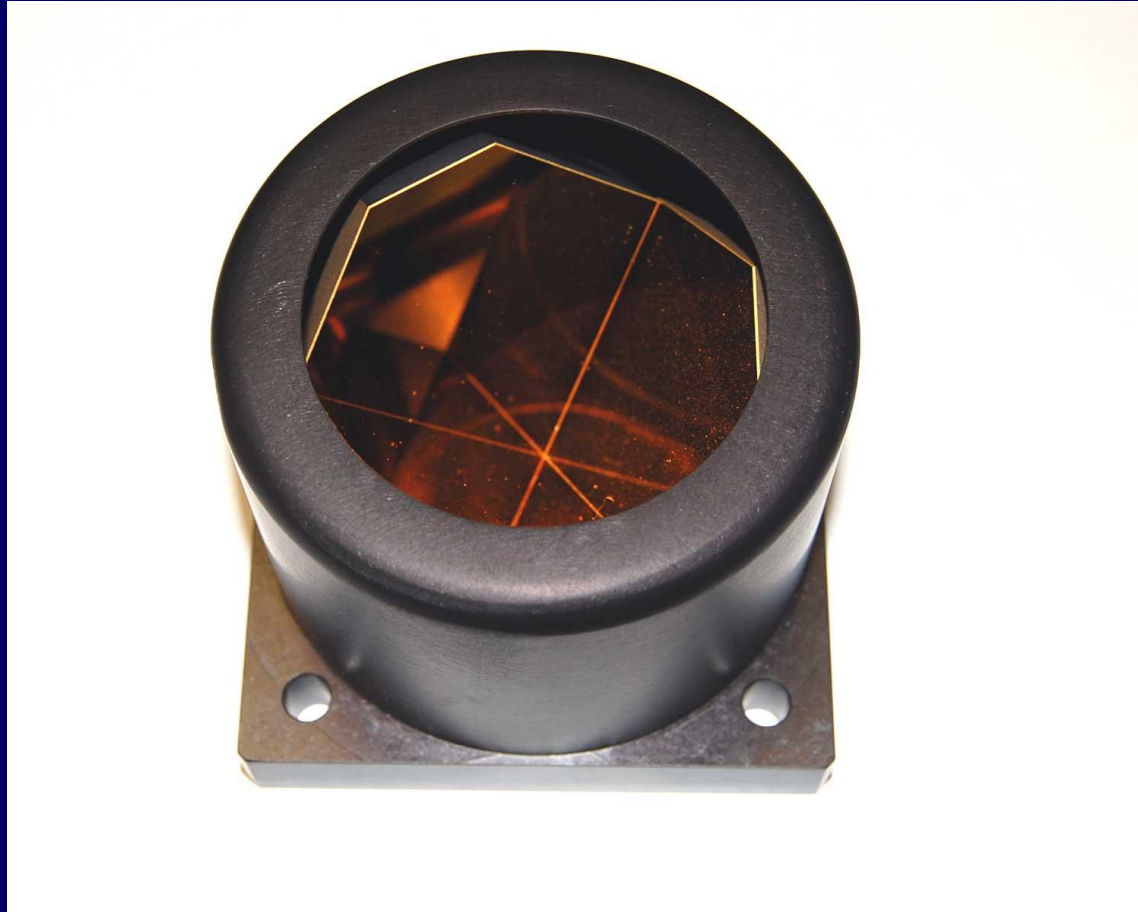
Polarizace

Laserový družicový radar

Zjednodušený princip laserových měření



Koutový odražeč (retroreflector)



Lageos I



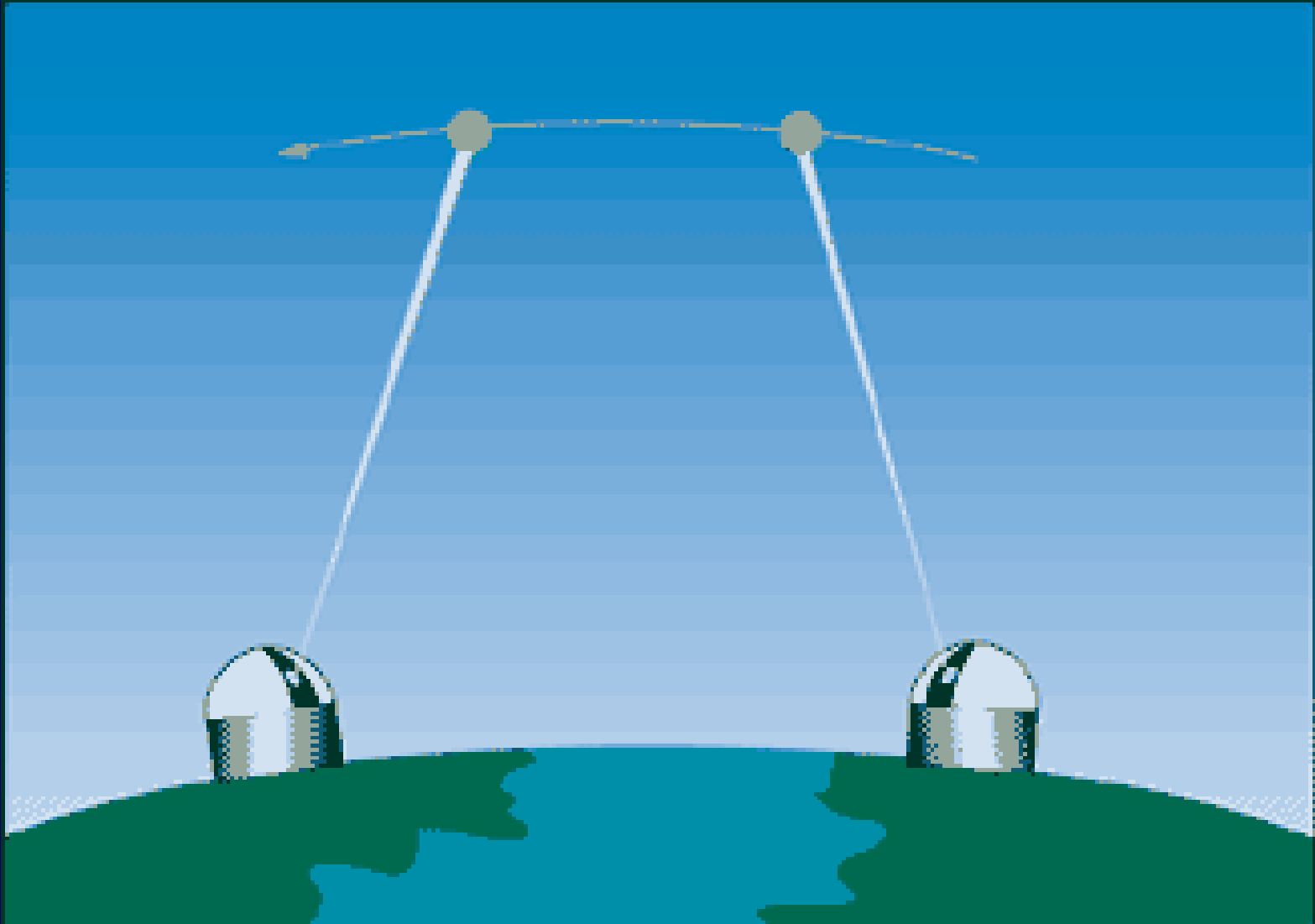
Vzdálenost

Udávaná v jednotkách času

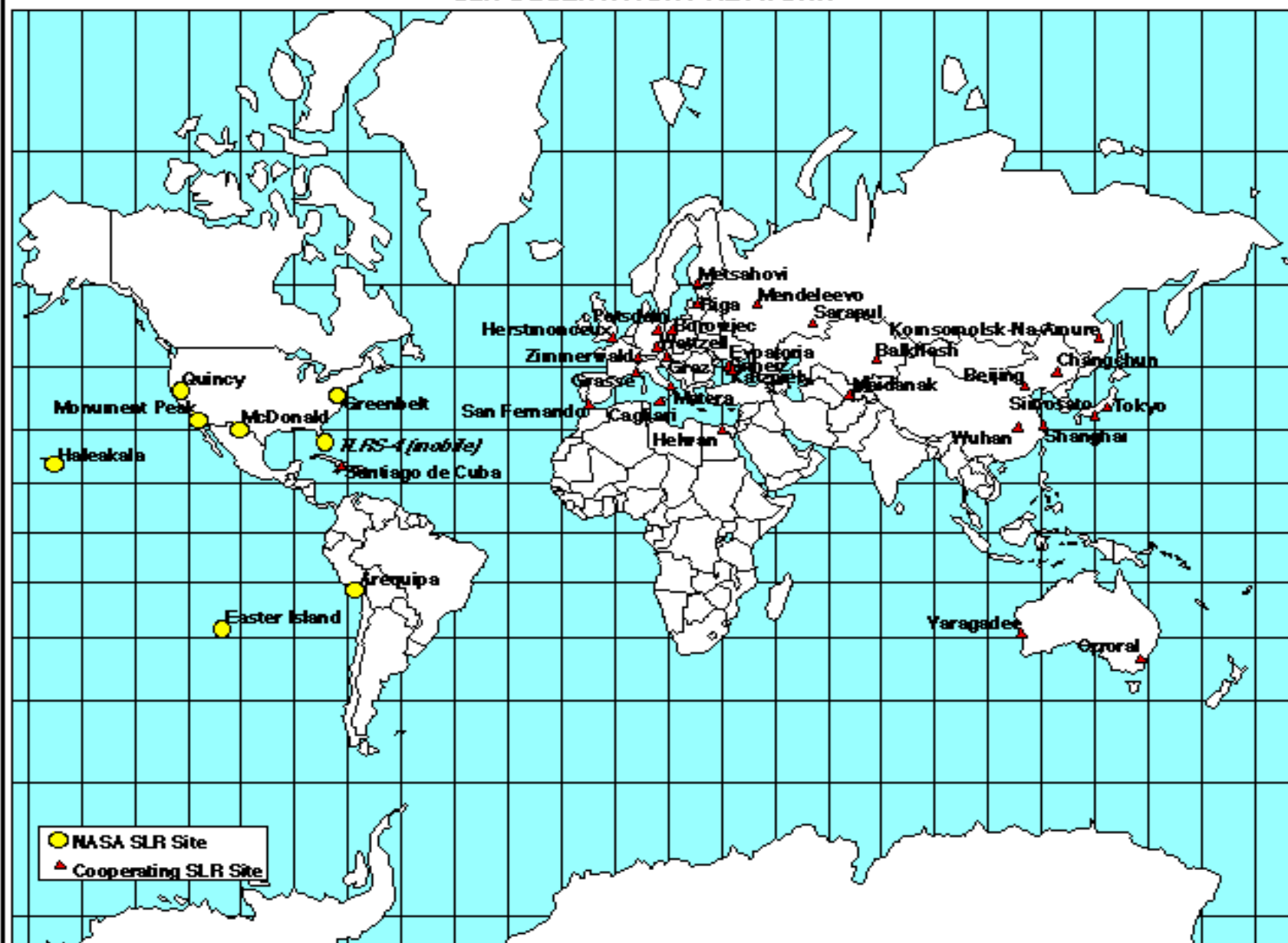
$$1 \text{ ms} \approx 150 \text{ km}$$

$$100 \text{ ps} \approx 1.5 \text{ cm}$$

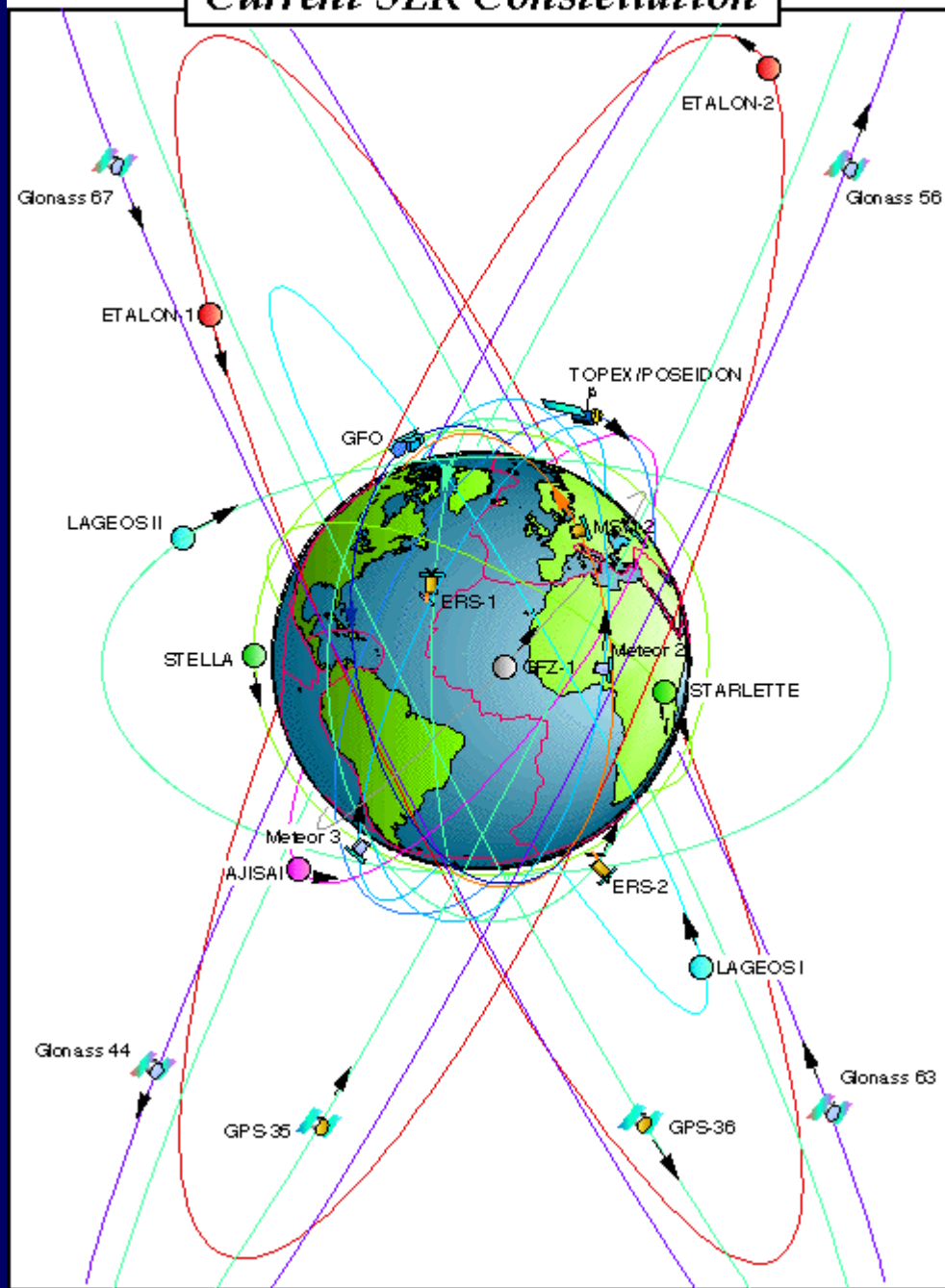
Princip určení dráhy družice



SLR OBSERVATORY NETWORK



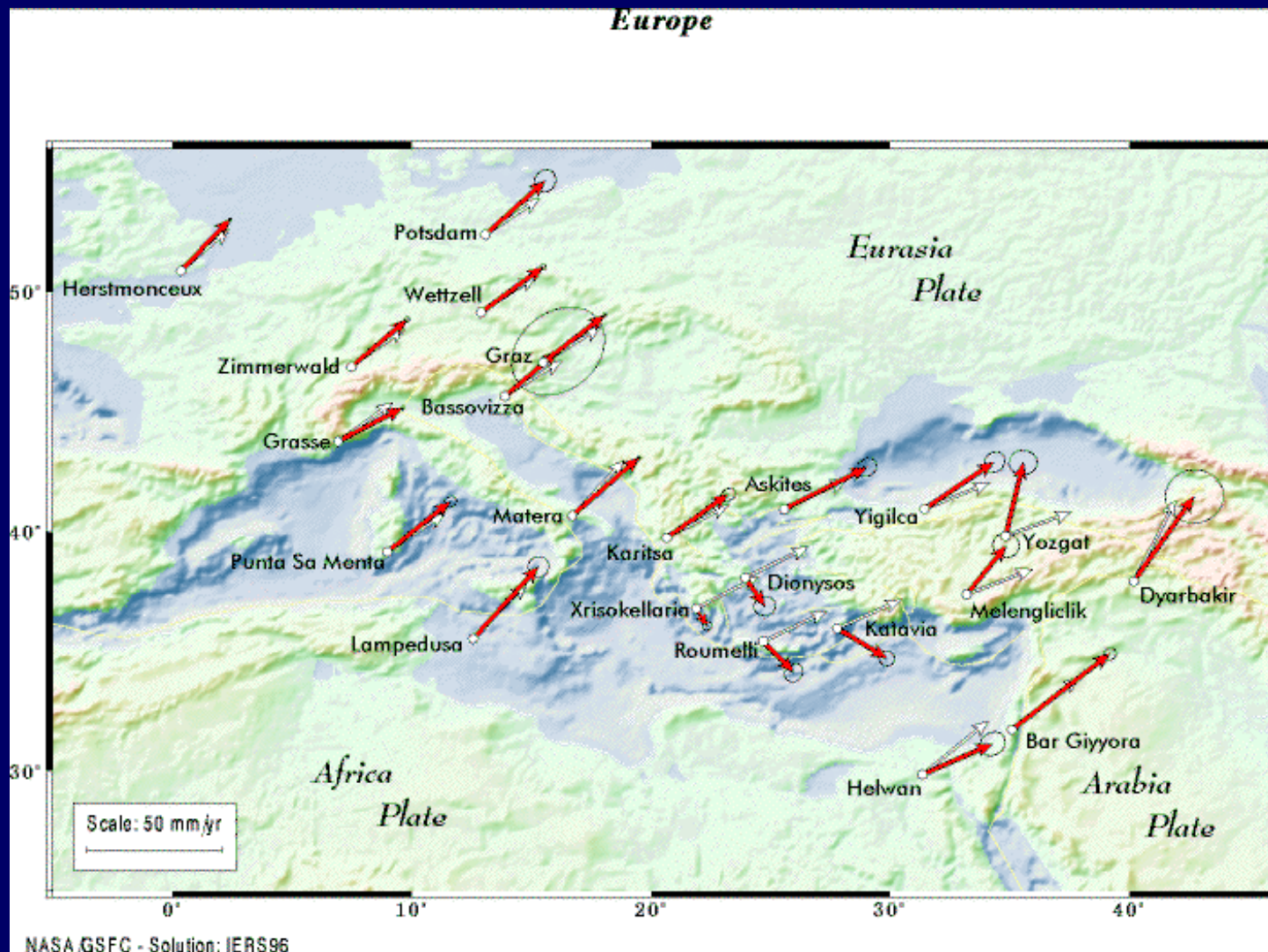
Current SLR Constellation



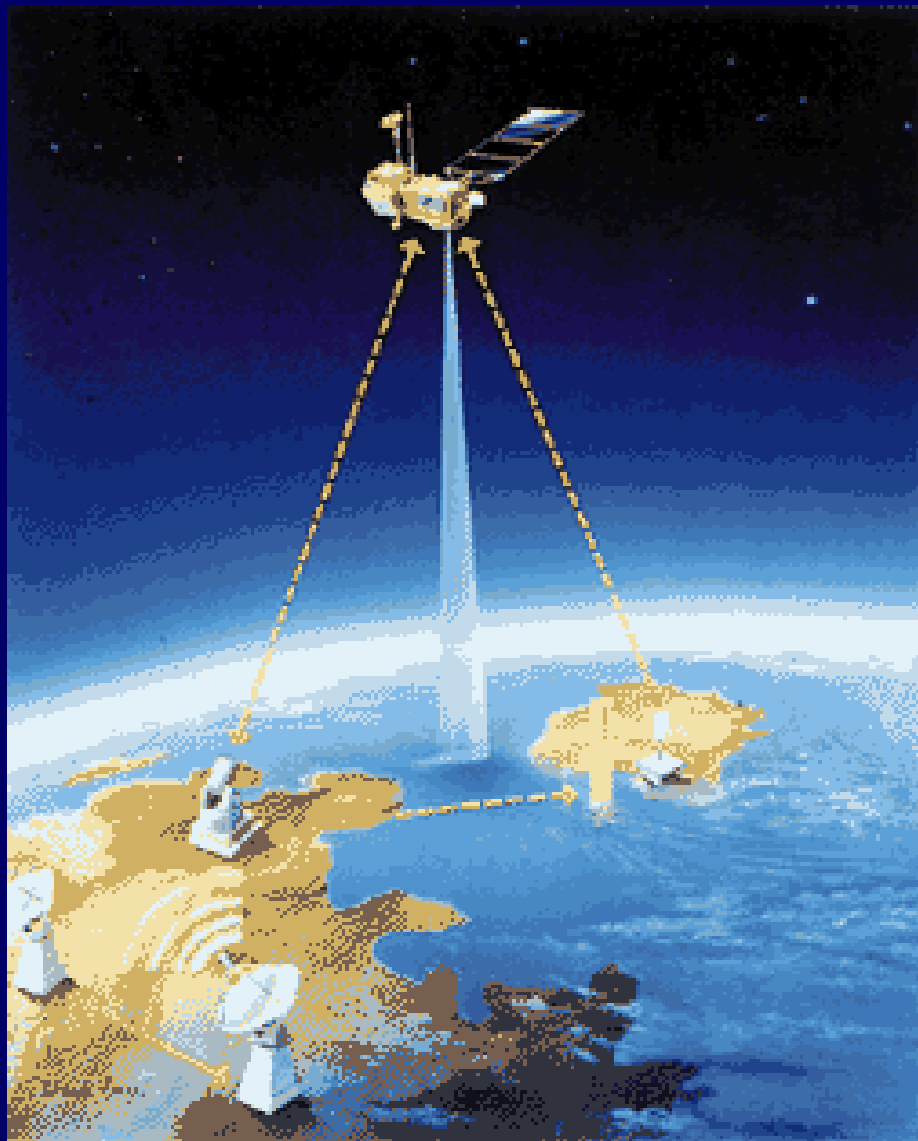
Využití výsledků SLR měření

- Studium dynamiky Země
- určení polohy stanice, pohyby kontinentů
- studium gravitačního pole Země
- studium rotace Země
- Topografie oceánů a kontinentů

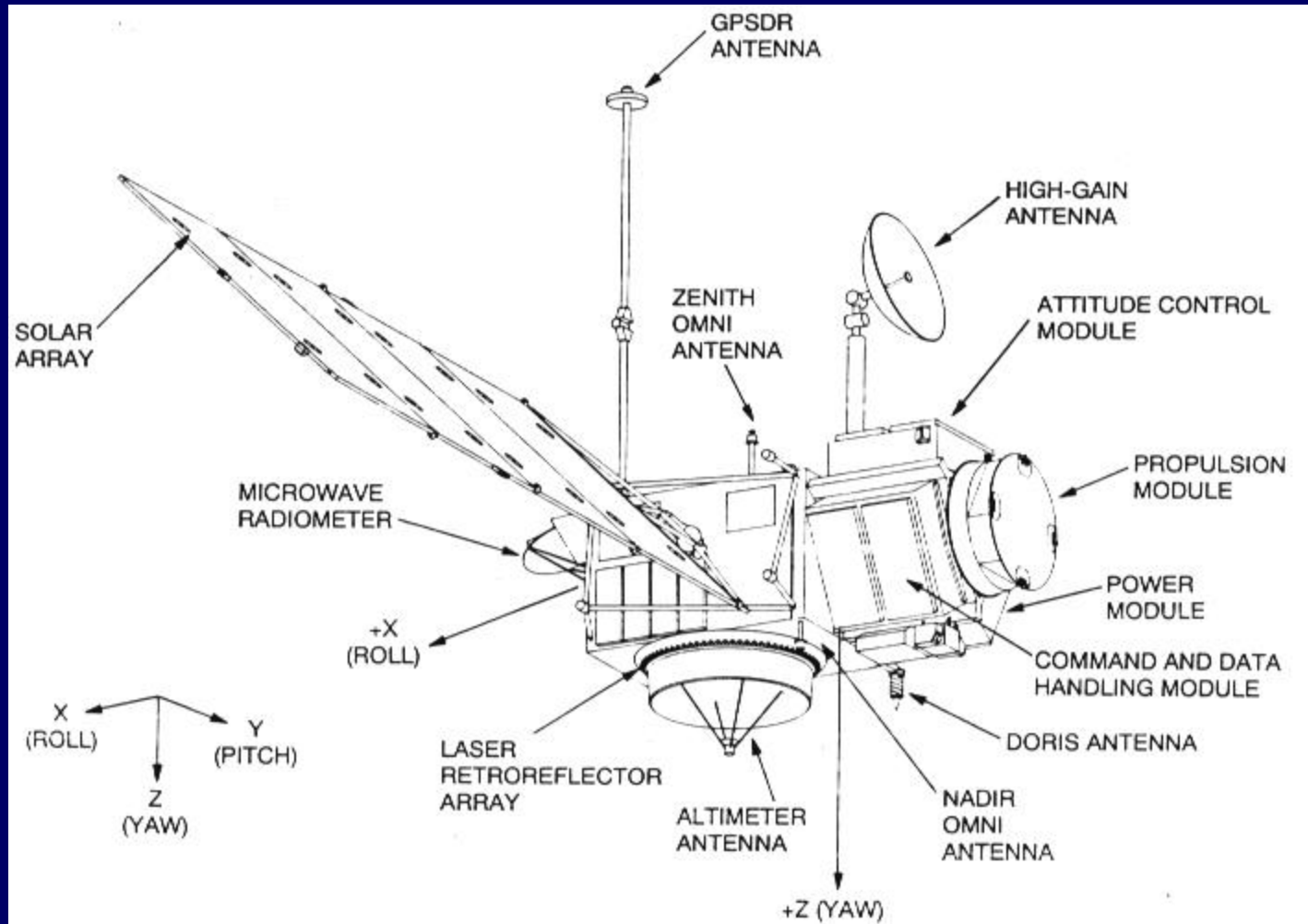
Pohyby zemských ker



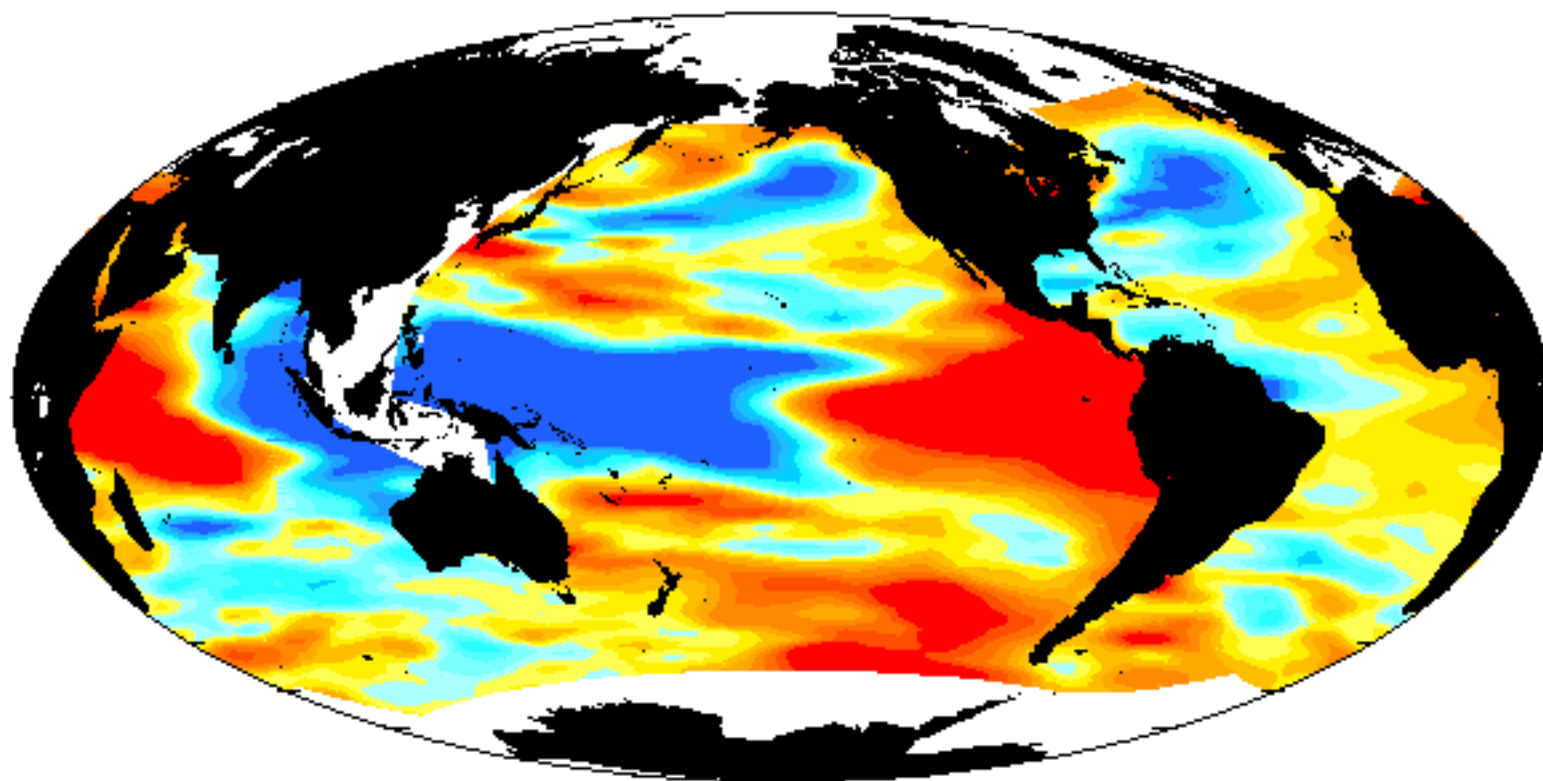
Dálkový průzkum země – Mapování oceánů



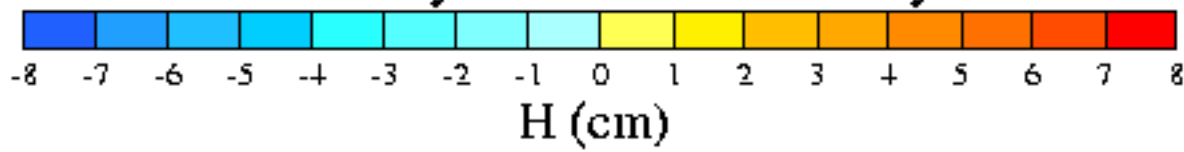
TopeX/Poseidon



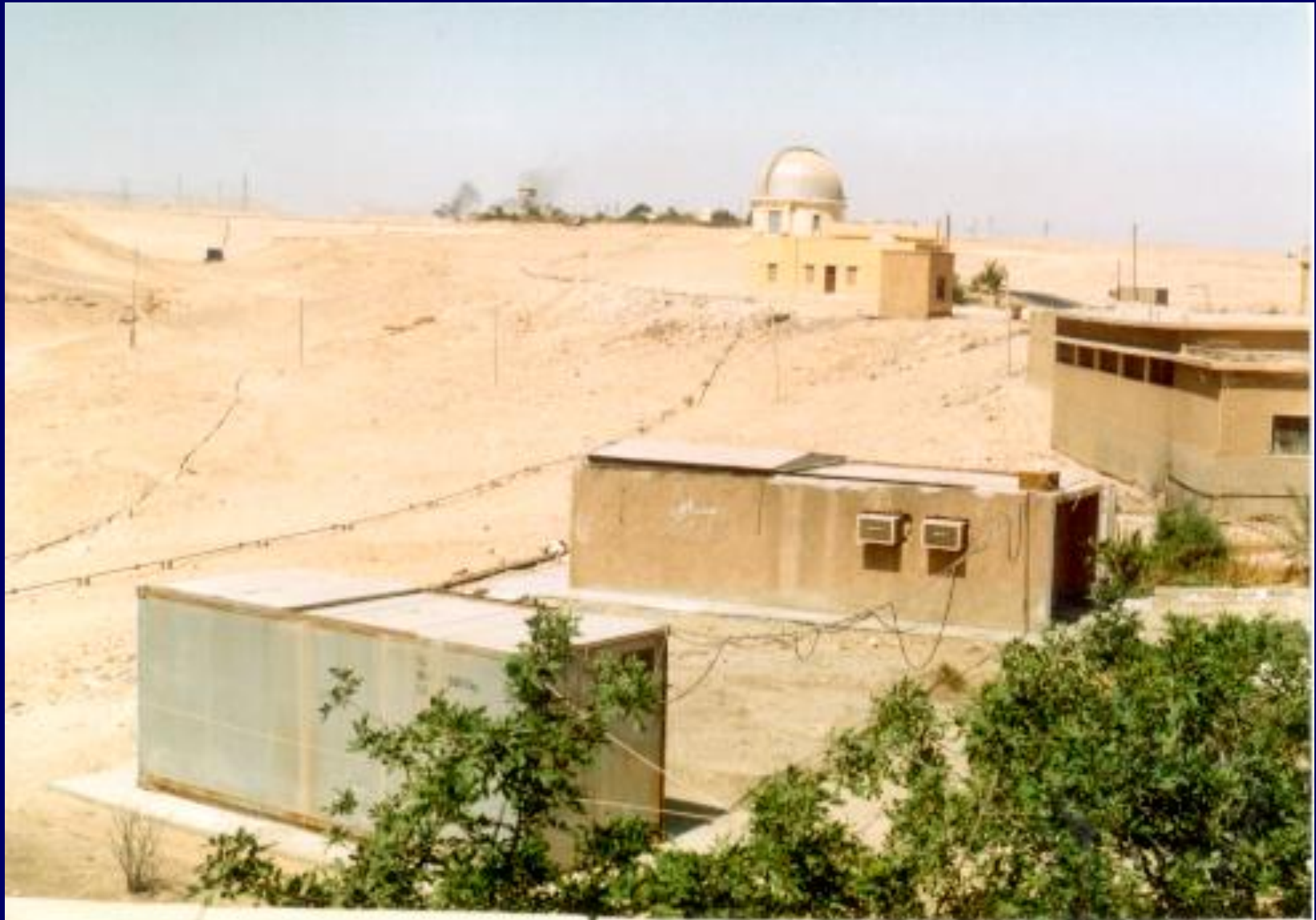
T/P Sea Level Anomaly Winter 97-98



NOAA / Laboratory for Satellite Altimetry



Stanice Helwan, Egypt







Lasery v medicíně - diagnostika, terapie

Oftalmologie
Dermatologie
Chirurgie
Neurochirurgie
Kardiologie
Urologie
Gynekologie
Stomatologie
ORL

Monochromaticnost

Vlnová délka

Energie, výkon

Délka impulsu

Opakovací frekvence

Koherence

Kolimovanost

Polarizace

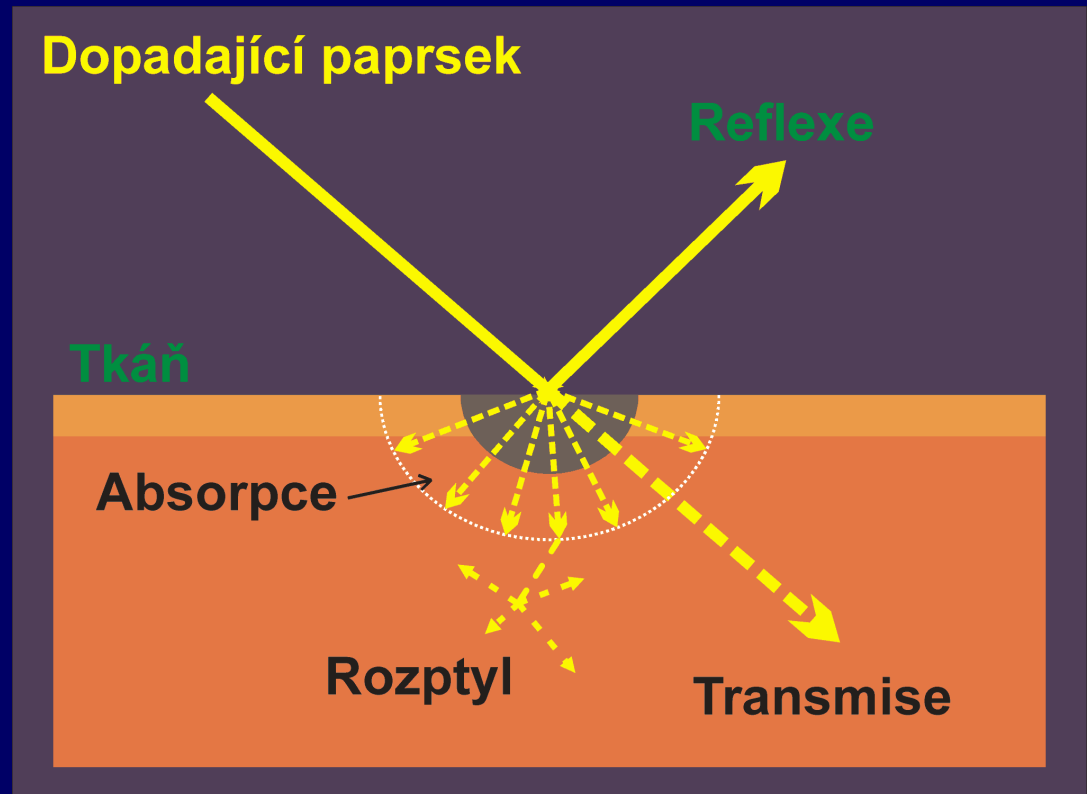
Význam vlastností laserového záření pro medicínu

- ▶ Monochromaticnost - pouze určité buňky nebo struktury tkáně, které absorbují laserové záření jsou modifikovány
- ▶ Směrovost - malý průměr stopy při řezání nebo koagulaci tkáně - nedochází k velkému zasažení okolí
- ▶ Jas - vyšší hodnota jasu než u ostatních zdrojů světla - tkáň je koagulována nebo řezána rychleji

Interakce záření s tkání

Primární efekty

- Reflexe
- Absorpce
- Rozptyl
- Transmise



Absorpce v biologických tkáních

Dána :

- molekulami vody
- makromolekulami

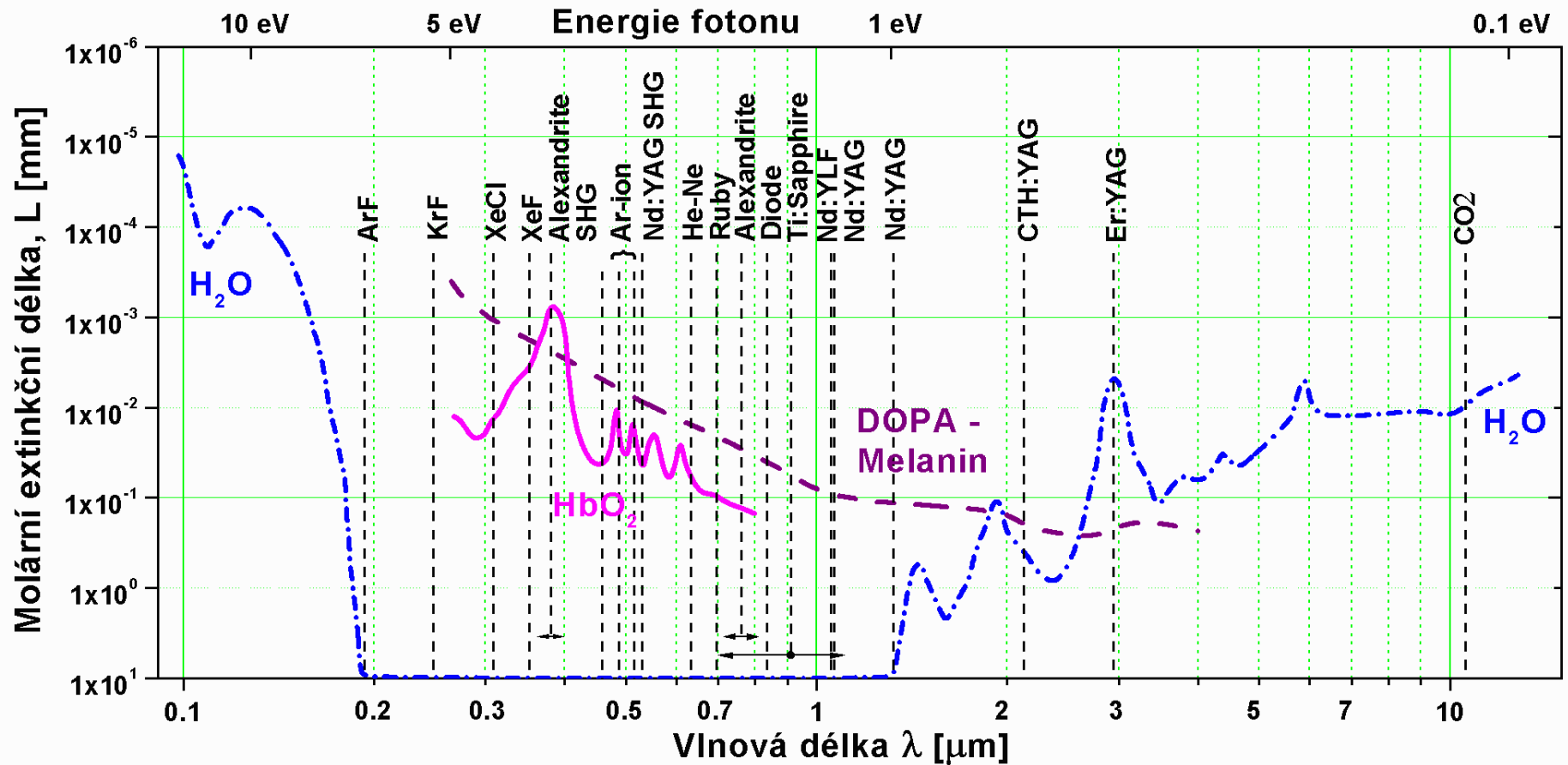
proteiny

pigmenty

melanin

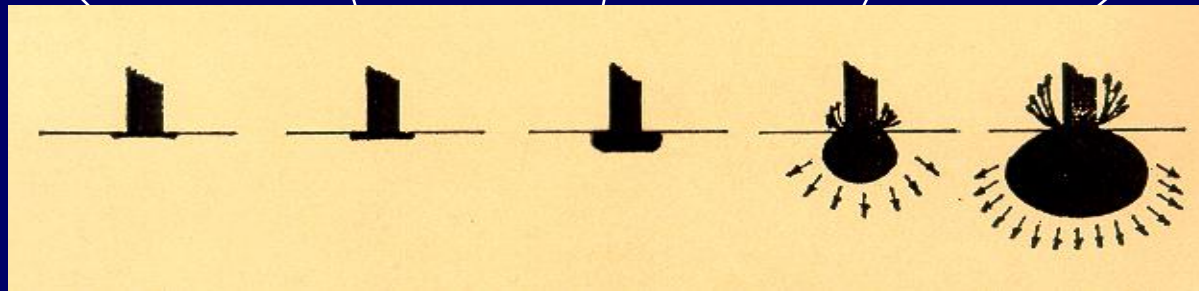
hemoglobin HbO_2

Spektrální závislost absorpce laserového záření ve vodě, hemoglobinu a melaninu



Závislost průniku záření na vlnové délce

Er:YAG	Excimer	CO ₂	Argon	Nd:YAG
2.94 μm	0.248 μm	10.6 μm	0.514 μm	1.064 μm



2 μm

5 μm

20 μm

330 μm

1400 μm

hloubka vniknutí

Fotochemická interakce

- Podstata :* užití barviva (pro PDT)
- Důsledek :* rozložení karcinogenní tkáně
- Typické pulsní délky :* 1s - cw
- Typické hustoty výkonu :* 0.01 - 50 W/cm²
- Speciální aplikace :* fotodynamická terapie
biostimulace

Tepelná interakce

- *Podstata* : dosažení úrovně teploty, která vede k žádoucímu tepelnému efektu
- *Důsledek* : koagulace, ablace, karbonizace, roztavení
- *Typické pulsní délky* : $1\mu\text{s}$ - 1 min
- *Typické hustoty výkonu* : 10^6 W/cm^2
- *Speciální aplikace* : koagulace, vypařování, roztavení, tepelný rozklad, přivaření sítnice, laserem indukovaná termoterapie

Fotoablace

- *Podstata* : přímé rozbití molekulárních vazeb energií fotonů
- *Důsledek* : ablace spojená s akustickými jevy a viditelnou fluorescencí
- *Typické pulsní délky* : 10 ns - 100 ns
- *Typické hustoty výkonu* : $10^7 - 10^{10} \text{ W/cm}^2$
- *Speciální aplikace* : refraktivní rohovková chirurgie

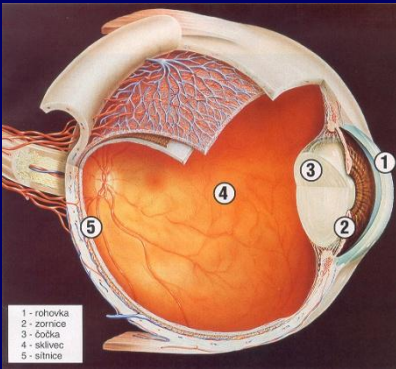
Plasmou indukovaná ablace

- *Podstata* : ablace způsobená vytvořením ionizující plasmy
- *Důsledek* : čistá ablace spojená s akustickými jevy a generací plasmy
- *Typické pulsní délky* : 100 fs - 500 ps
- *Typické hustoty výkonu* : 10^{11} - 10^{13} W/cm²
- *Speciální aplikace* : refraktivní rohovková chirurgie

Fotodisrupce

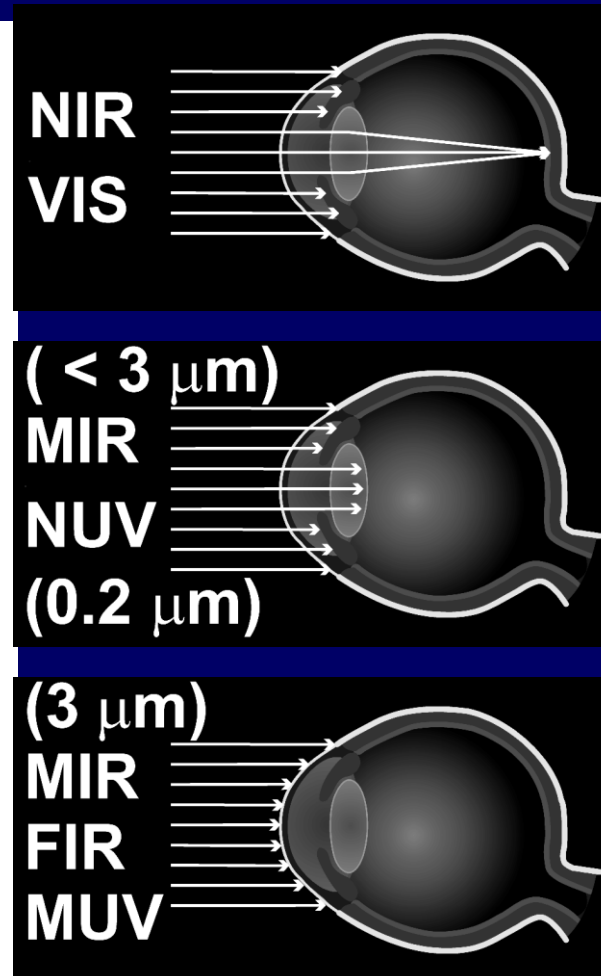
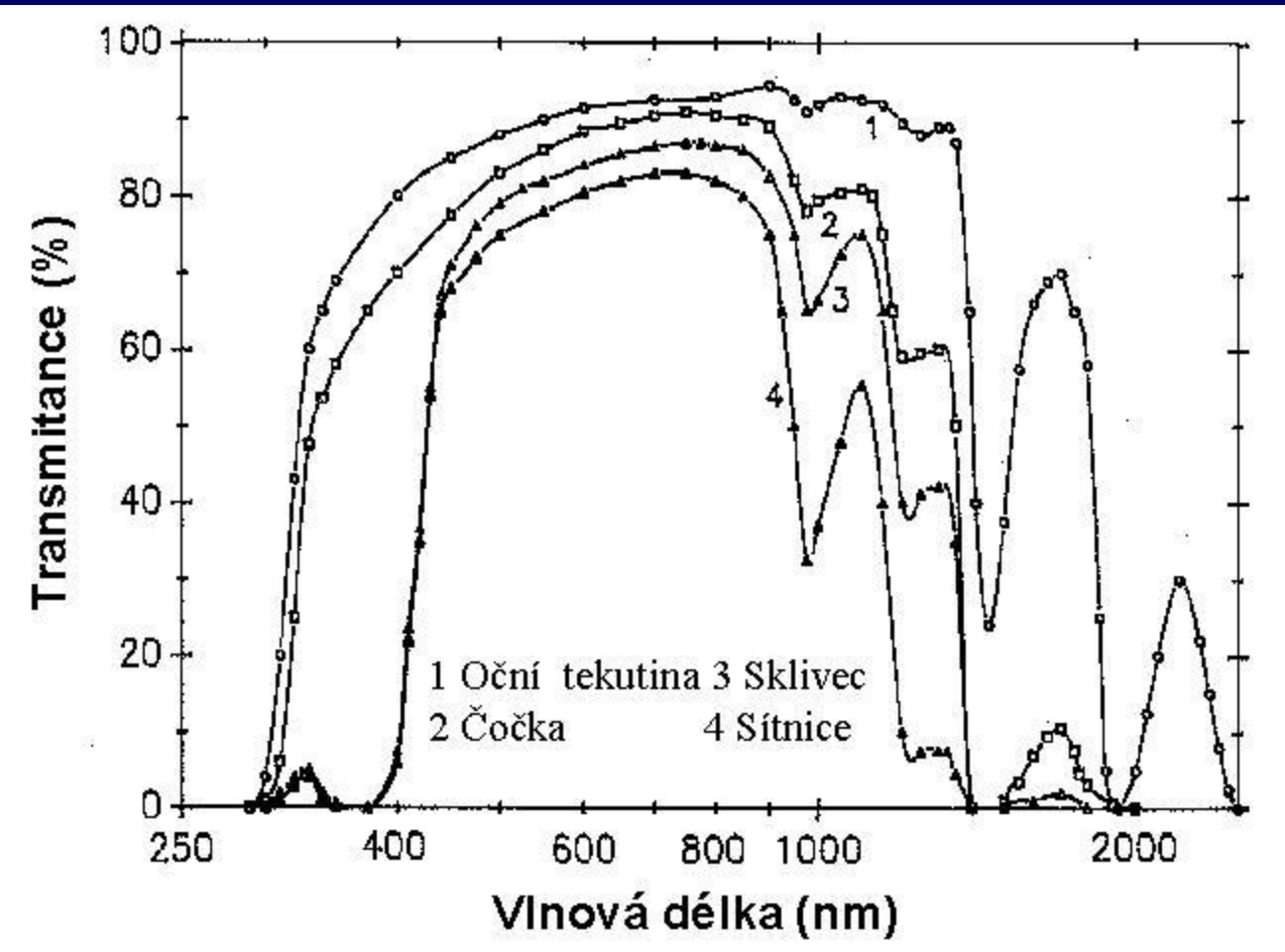
- *Podstata* : fragmentace tkáně mechanickými silami
- *Důsledek* : generace plasmy, rázových vln, kavitace, jet formation
- *Typické pulsní délky* : 100 fs - 100 ns
- *Typické hustoty výkonu* : 10^{11} - 10^{16} W/cm²
- *Speciální aplikace* : fragmentace čočky, litotripsie (fragmentace kamenů)

Lasery v oftalmologii



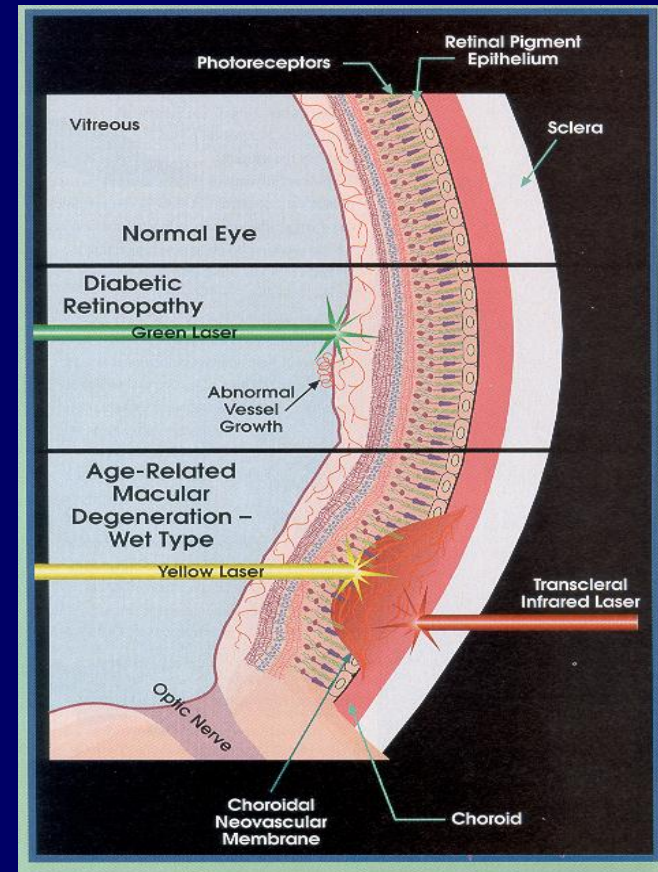
- ▶ koagulace sítnice
- ▶ léčení glaukomu
- ▶ sekundární katarakta
- ▶ Fotorefraktivní keratektomie

Spektrální závislost očních tkání

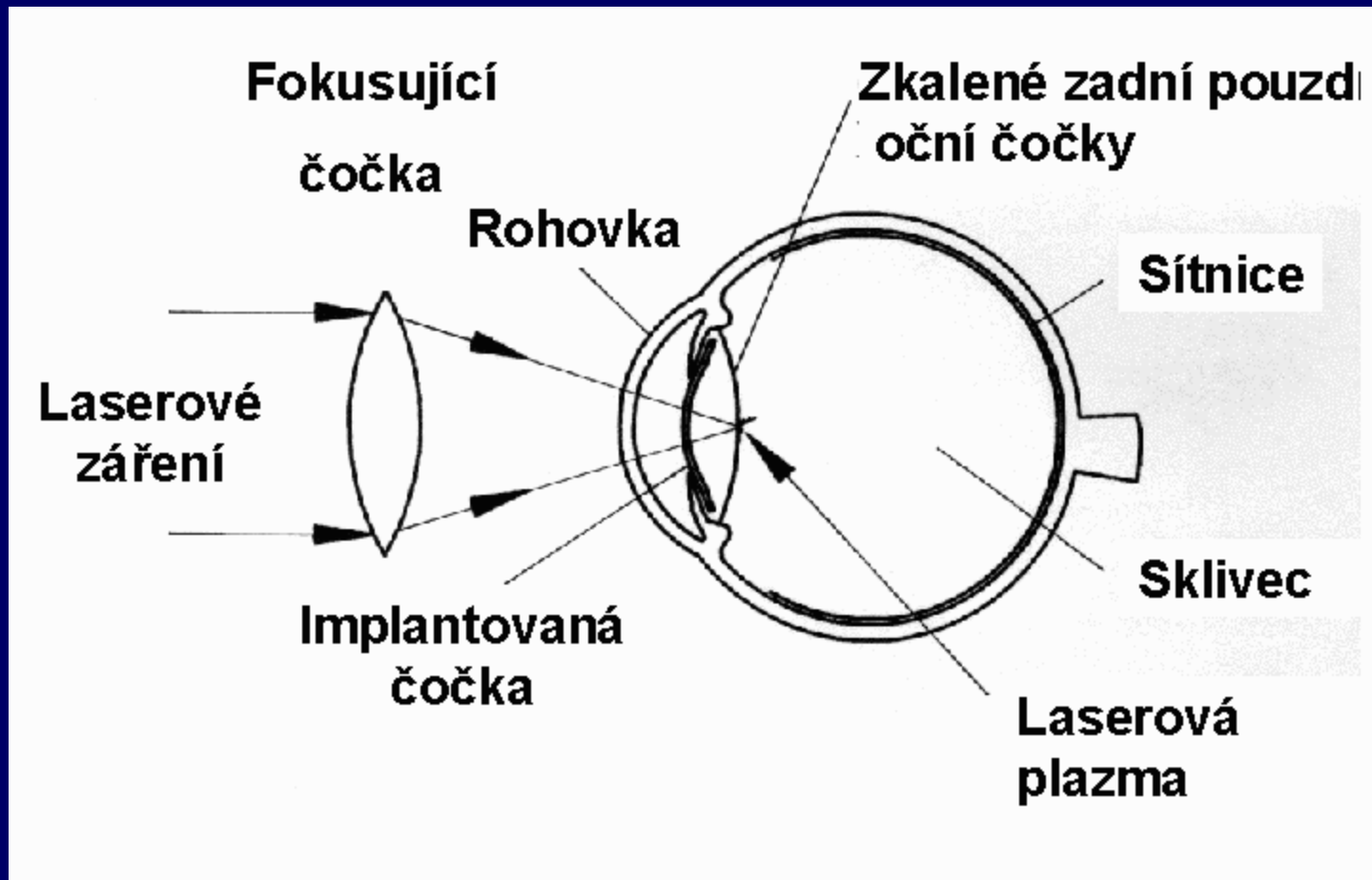


Léčba sítnice

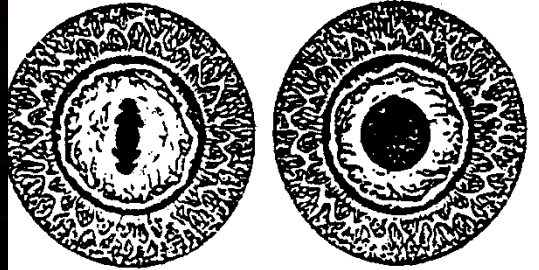
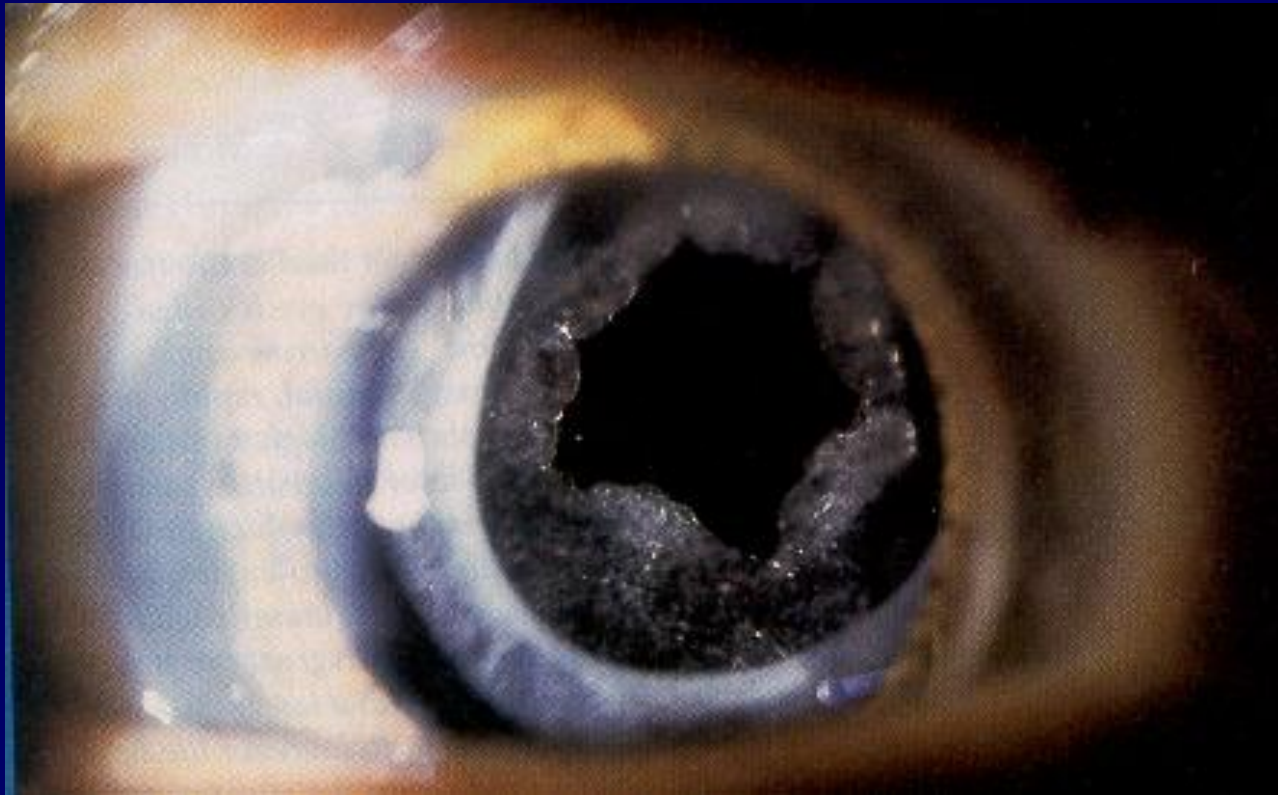
- protržení
 - odchlípnutí
 - diabetická retinopatie
 - stařecká degenerace
 - Nádor
-
- LASERY:
 - ▶ Argonový laser – zelená/modrá 514 nm
 - ▶ Kryptonový laser – žluté záření 568 nm
 - ▶ Nd:YAG laser (SHG) – zelené záření 532 nm



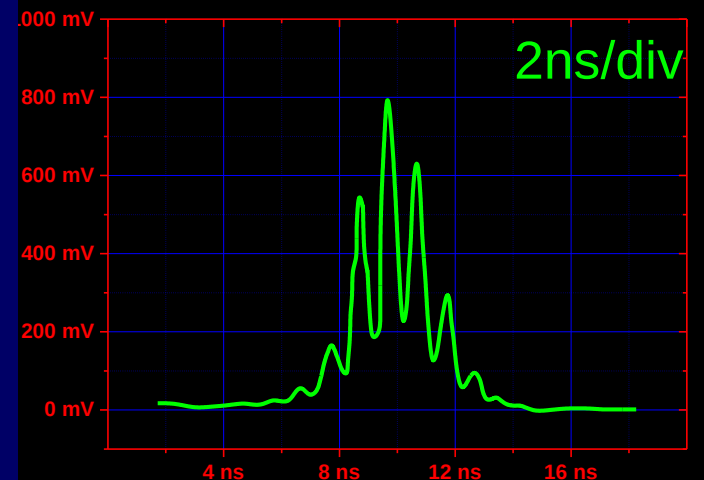
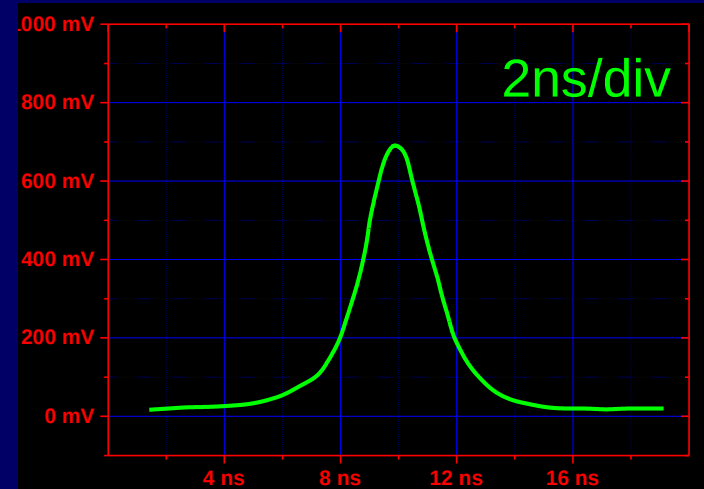
Léčení sekundární katarakty (Posterior capsulotomy)



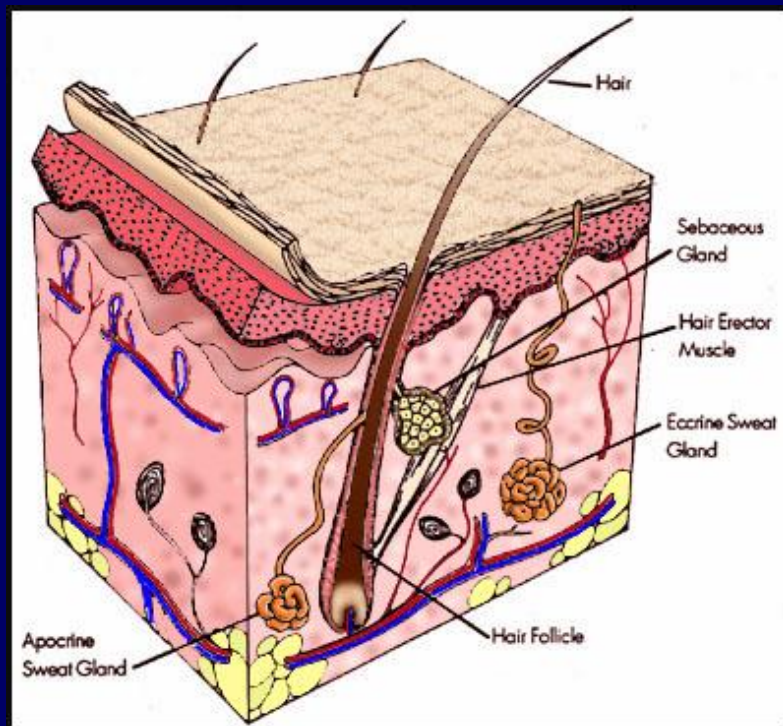
Léčení sekundární katarakty (Posterior capsulotomy)



OFTALAS FJFI



Lasery v dermatologii



Odstranění:

- Pigmentových névů
- Tetováže
- „Ohně“
- Vrásek
- Vlasů

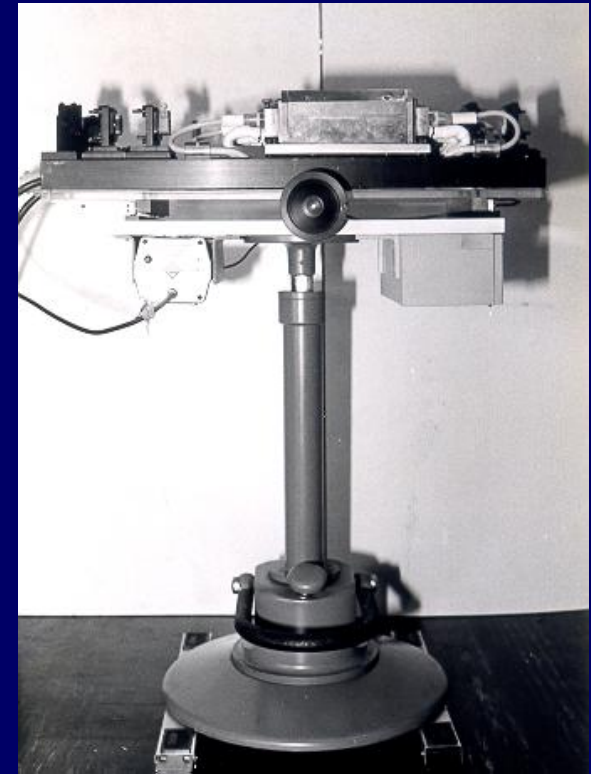
DERMATOLAS FJFI

Parametry systému

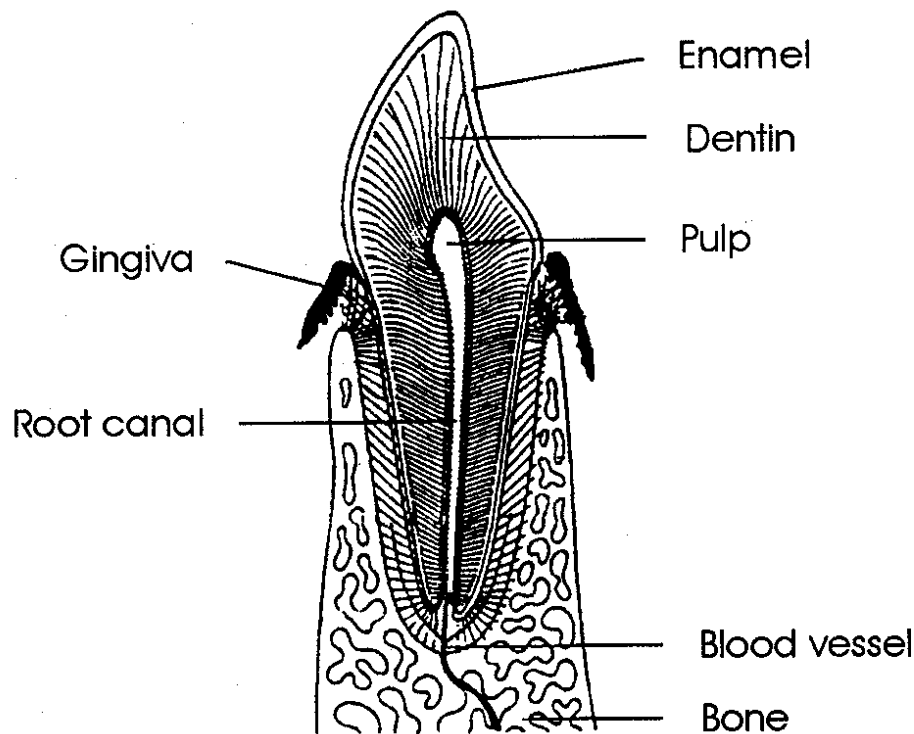


- rubín/0.694 μm
- Q - spínaný
- 25 ns
- 1 J
- 1 Hz

Naváděcí laser
He-Ne



Lasery ve stomatologii



Vrtání skloviny a dentinu
Desinfekce kořenového kanálu
Odstranění zubního kamene
Léčba měkkých tkání

Dental laser

Bezbolestná zubní vrtačka

- Typ laseru
- Vlnová délka
- Režim
- Pulsní délka
- Výstupní energie
- Naváděcí svazek
- Přenos záření
- Er:YAG
- $2.94 \mu\text{m}$
- volně běžící
- $200\text{-}250 \mu\text{sec}$
- 600 mJ
- He-Ne laser
- $0.632 \mu\text{m}$
- artikulační rameno



Lasery v medicíně

Výhody:

- nové operační výkony
- bezkontaktní operace
- koagulace tkáně - zmenšení ztráty krve
- zlepšení sterility operace - menší počet komplikací
- zmenšení doby léčení - příp.ambulantní léčba

Lasery v medicíně

Nevýhody:

- cena laserových medikálních systémů
- nová, vysoká specializace operátora
- údržba