

# Izum laserja – konec kamene dobe v optiki

Martin Čopič

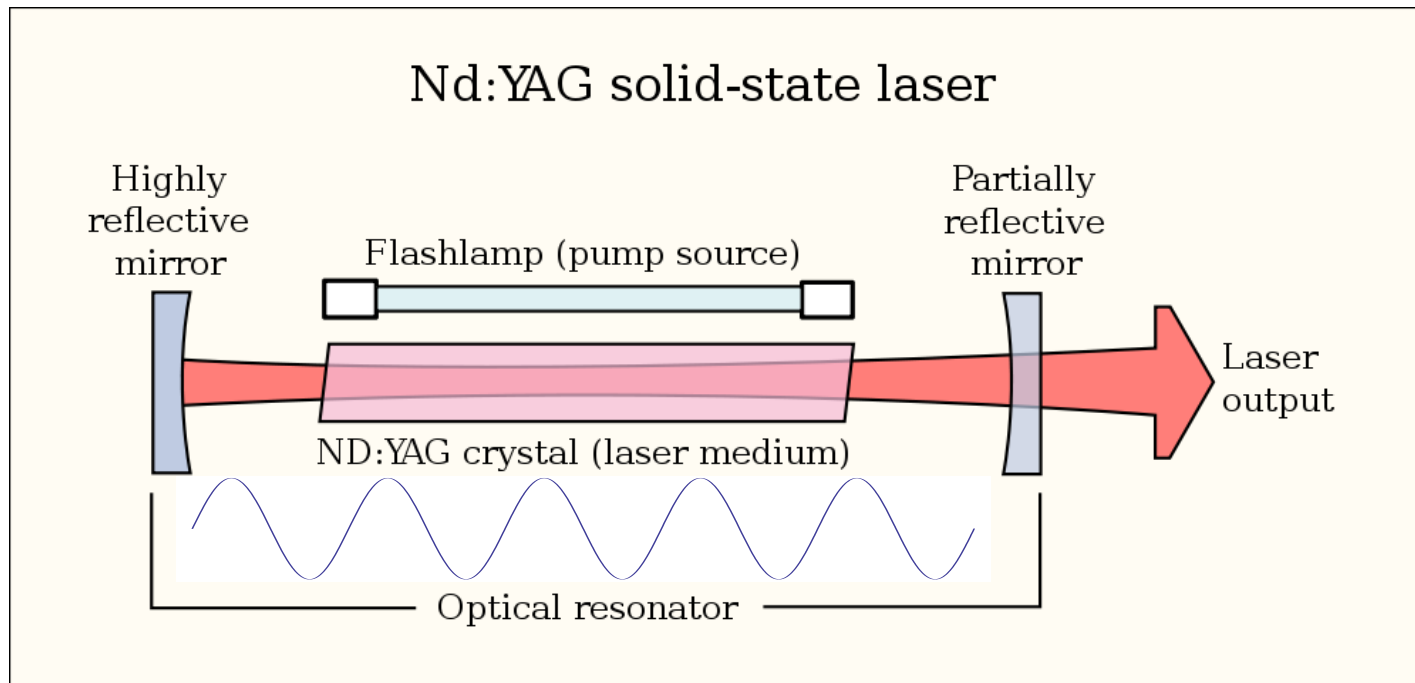
FMF UL

# Pregled

- Osnove fizike laserjev
- Kaotična (običajna) svetloba in primerjava z lasersko
- Posledica koherentnosti – vsestranska uporabnost
- Stabilizacija frekvence laserjev in metrologija
- Fazno uklenjeni sunki, frekvenčni galvnik in laser kot časovni standard

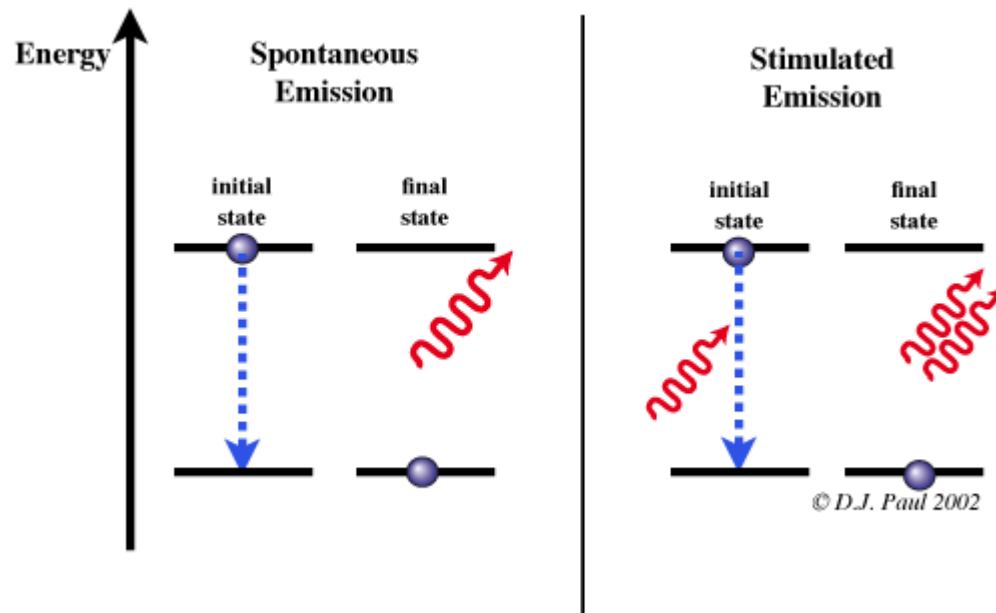
# Laser

- Resonator – stoječi valovi
- Ojačevalnik – običajno stimulirana emisija



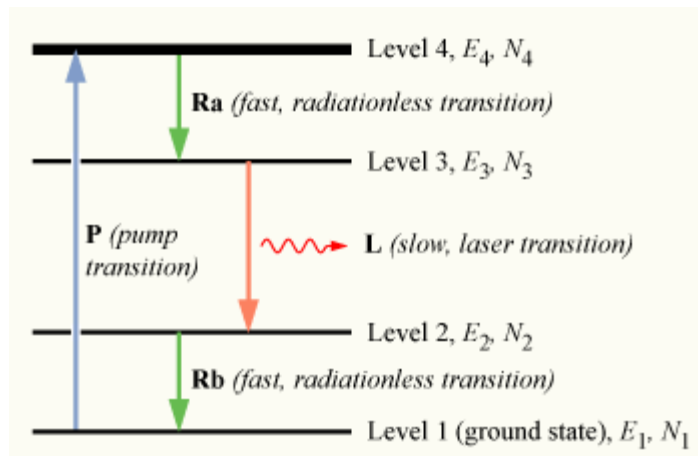
# Ojačevanje s stimuliranim sevanjem

- Stimulirano sevanje



# Ojačevanje s stimuliranim sevanjem

- Obrnjena zasedenost



Če je življenjski čas 3. stanja daljši od življenjskega časa 2. stanja, bo  $N_3 > N_2$  in stimulirano sevanje prevlada nad absorpcijo

# Črpanje

- S svetlobo – danes pogosto s polprevodniškimi laserskimi diodami
- Z električnim tokom v plinu
- Električni tok skozi p-n stik polprevodnikov
- Kemijske reakcije

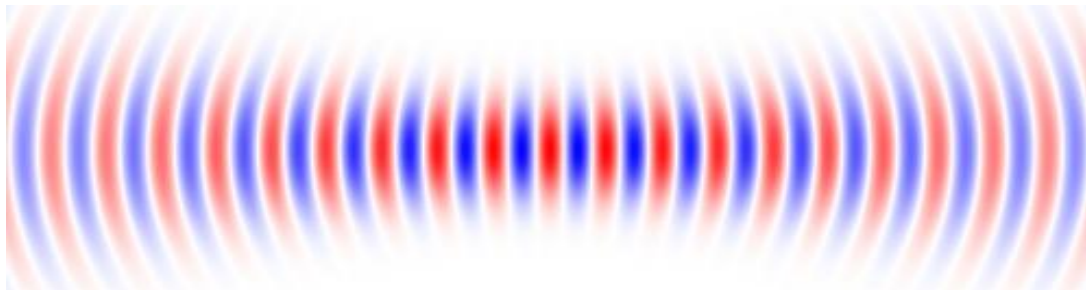
# Drugi načini ojačevanja svetlobe

- Nelinearni optični procesi
- Pospešeni elektroni v periodičnem magnetnem polju – laserji na proste elektrone (FEL)
- **Laser je najmanj kvantno svetilo**

# Lastnosti svetlobe iz laserja

- Frekvenca je določena z dolžino resonatorja
  - Spektralna širina odvisna od stabilnosti L
- Valovna čela se na izhodu prilegajo zrcalu – so gladka
- Izhodno polje ima obliko Gaussovega snopa – se najmanj širi zaradi uklona
- Svetloba laserja je koherentna

$$\omega_n = \frac{n\pi c}{L}$$





# Spektralna širina

- Praktično je omejena s stabilnostjo dolžine resonatorja
- Teoretična meja posledica vpliva spontanega sevanja – kvantni šum

$$\delta\omega_{kv} = \frac{1}{n_f \tau_{res}}$$

Amplituda polja ostaja konstantna, spreminja se faza, čas zaradi kvantnega šuma mnogo sekund

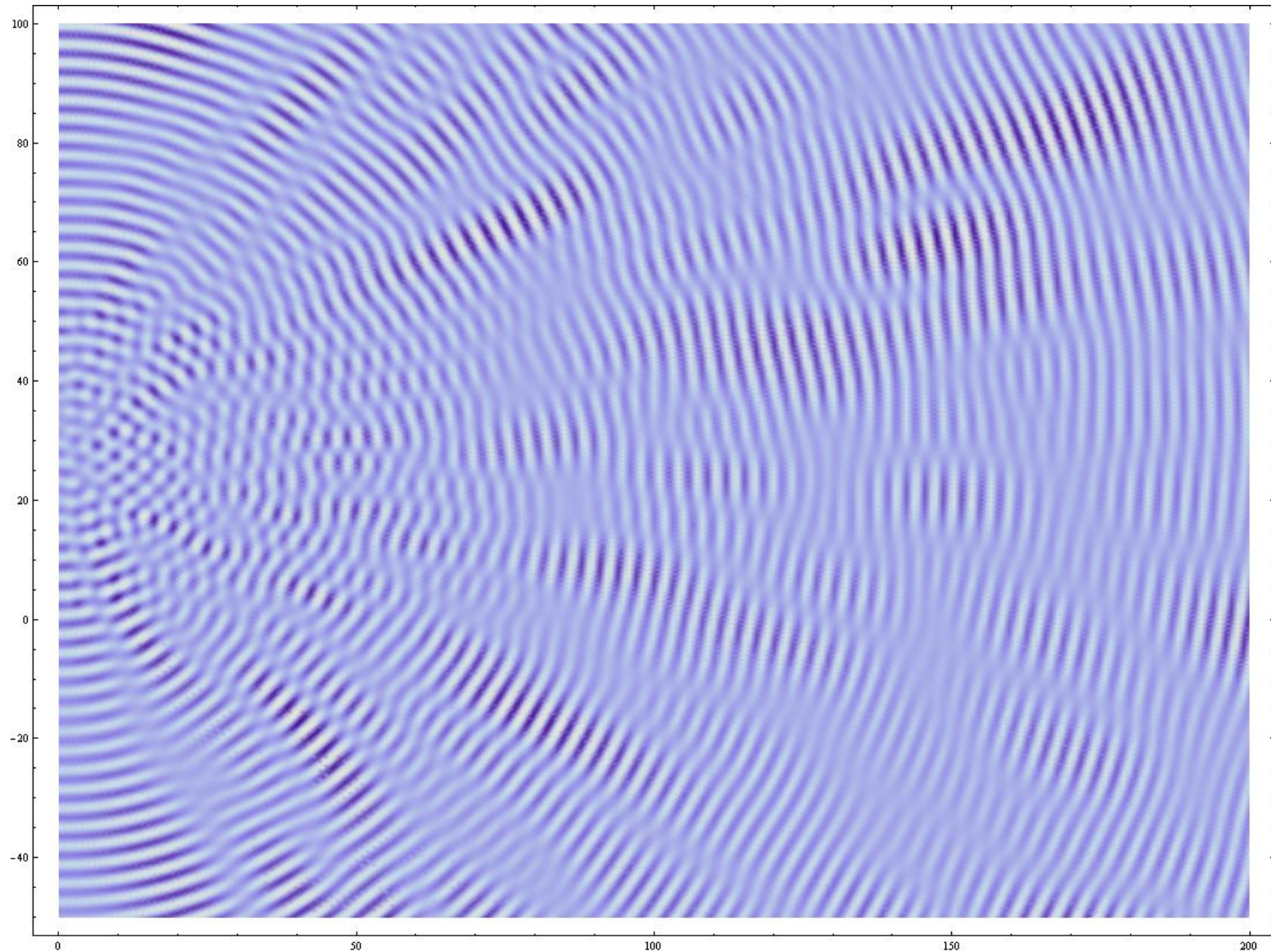
# Laser- piščalka za svetlobo

- Pihala : cev je resonator, v njem stoječi valovi
- Stoječe valove vzbujaemo s pihanjem v ustnik
- Brez resonatorja ustnik oddaja šum s širokim spektrom
- Tlak stoječega valovanja povratno vpliva na ustnik, da gre vsa energija pihanja v stoječe valovanje

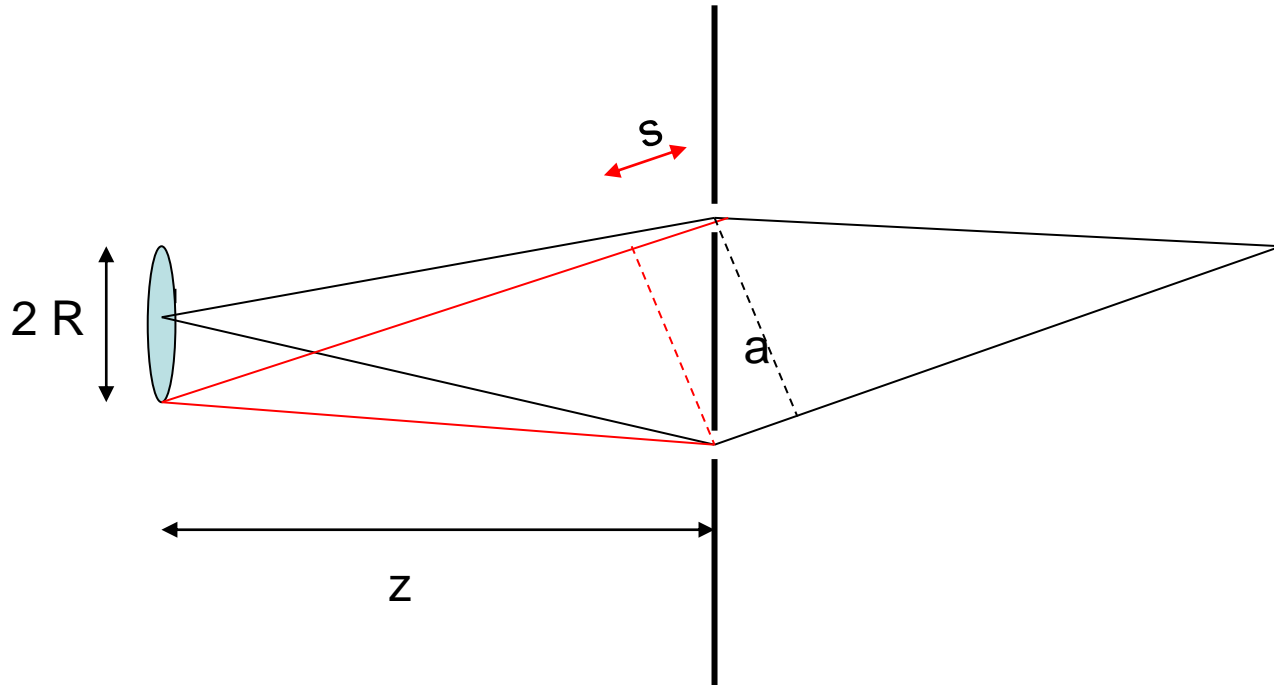
# Kaotična (običajna) svetloba

- Navadne svetilke ali sonce – termični šum
- Svetila razsežna, posemezni deli (atomi, molekule), svetijo neodvisno
  - Valovna čela niso gladka
- Spektralne črte so razširjene
- Svetloba je kvečjemu delno koherentna
- Najmočnejše svetilke dosežejo svetlost  $100\text{W}/\text{cm}^2$  v frekvenčni interval več kot  $10^{12}$  Hz

# Nekoherenten izvor



# Koerenčna razdalja



Interferenca  
izgine, če

$$s > \lambda$$

Koherenčna razdalja

$$a_c = \frac{z\lambda}{R}$$

# Moč iz nekoherentnega svetila v koherentno ploskev

$$P = BS\Delta\Omega = B \pi R^2 \frac{\pi a_c^2}{z^2} = \pi^2 B \lambda^2$$

B je svetlost.

Za nekoherentno svetilo  $P=10^{-5}$  W v  $10^{12}$  Hz

He-Ne laser:  $P= 2$  mW v  $10^7$  Hz

Razmerje spektralne gostote moči je vsaj  $10^7$

Najmočnejši laserji:  $P= 10^{15}$  W v sunkih!

# Uporaba

- Prostorska koherentnost – gladka valovna čela-svetlobo lahko zberemo v  $\lambda^2$  – velike gostote svetlobnega toka
- Signal po optičnih vlaknih
- Branje in pisanje CD in DVD plošč
- Uporaba v kirurgiji
- Obdelava materialov

# Uporaba

- Velika časovna koherenca – enobarvnost – interferometrija
- Holografija
- Spektroskopijska visoke ločljivosti
- Velika gostota svetlobnega toka – nelinearni pojavi

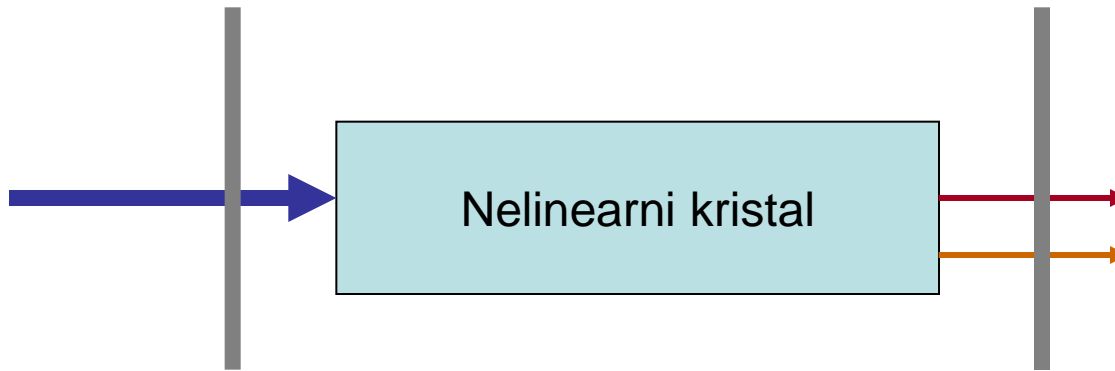
$$P = \varepsilon_0 \chi E + \varepsilon_0 \chi^{(2)} EE + \varepsilon_0 \chi^{(3)} EEE + \dots$$



# Nelinearna optika

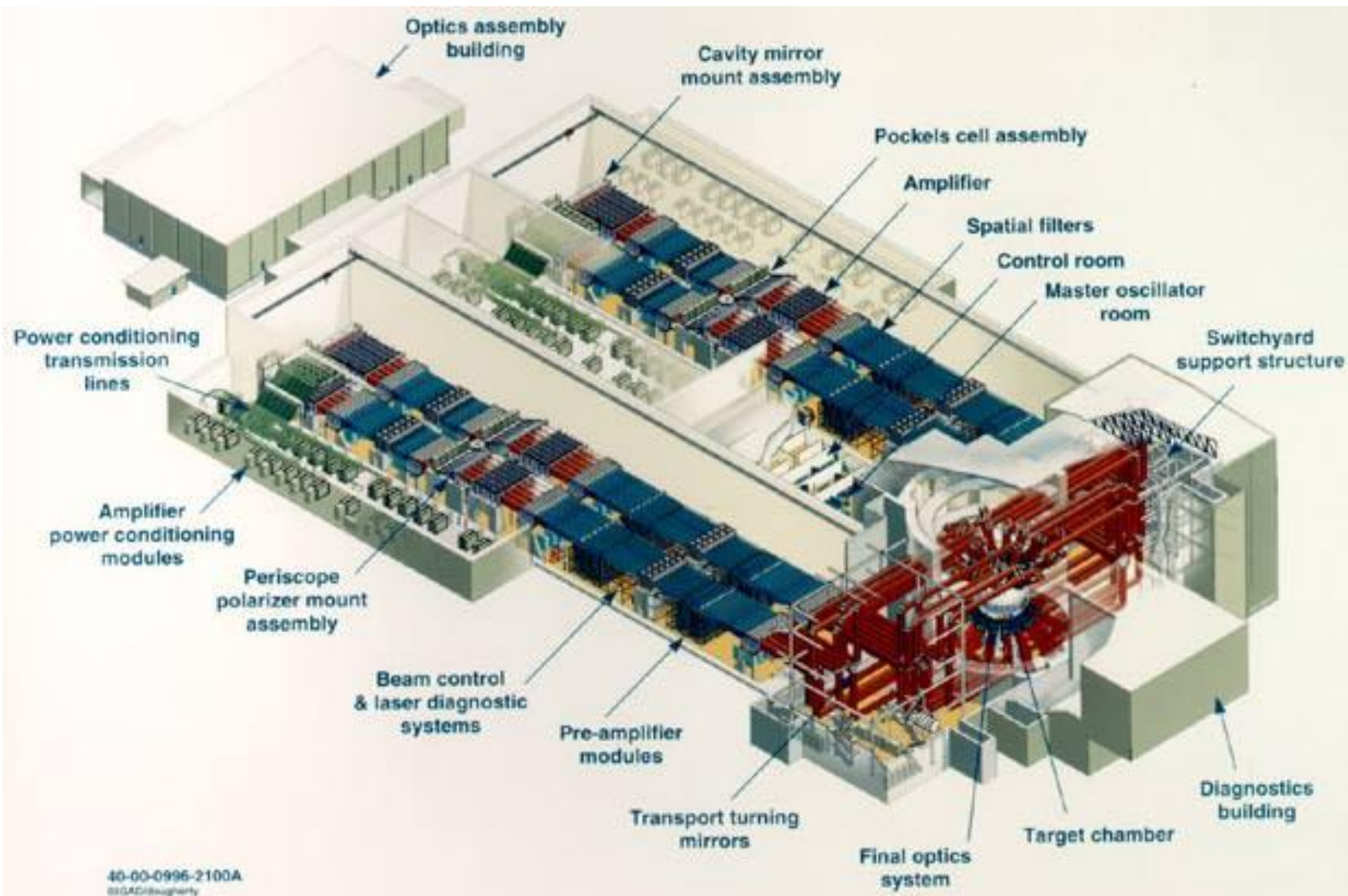
- Če je  $E_1 = A_1 \cos \omega_1 t$  in  $E_2 = A_2 \cos \omega_2 t$ , vsebuje  $(E_1 + E_2)^2$  frekvence  $2\omega_1$ ,  $2\omega_2$ ,  $\omega_1 + \omega_2$  in  $\omega_1 - \omega_2$
- Frekvenčno podvojevanje
- Vsota frekvenc
- Razlika
- Delitev na dve frekvenci, da je vpadna frekvenca  $\omega_0 = \omega_1 + \omega_2$  – parametrični oscilator

# Parametrični oscilator



# National ignition facility

- Laserski sistem za doseganje pogojev za zlivanje jeder devterija in tricija
- Sunki iz 190 vej s skupno energijo 1 MJ v okoli 1 ns – moč  $10^{15}$  W,  $E=10^{14}$  V/m



# Stabilizacija frekvence laserja

- Težava – Dopplerjeva razširitev
- Nasičena absorpcija
- Dvofotonski prehodi
- Dosegljiva stabilnost  $\sim 1$  Hz, relativna stabilnost  $10^{-15}$  !

# Meritev frekvence laserjev do 2000

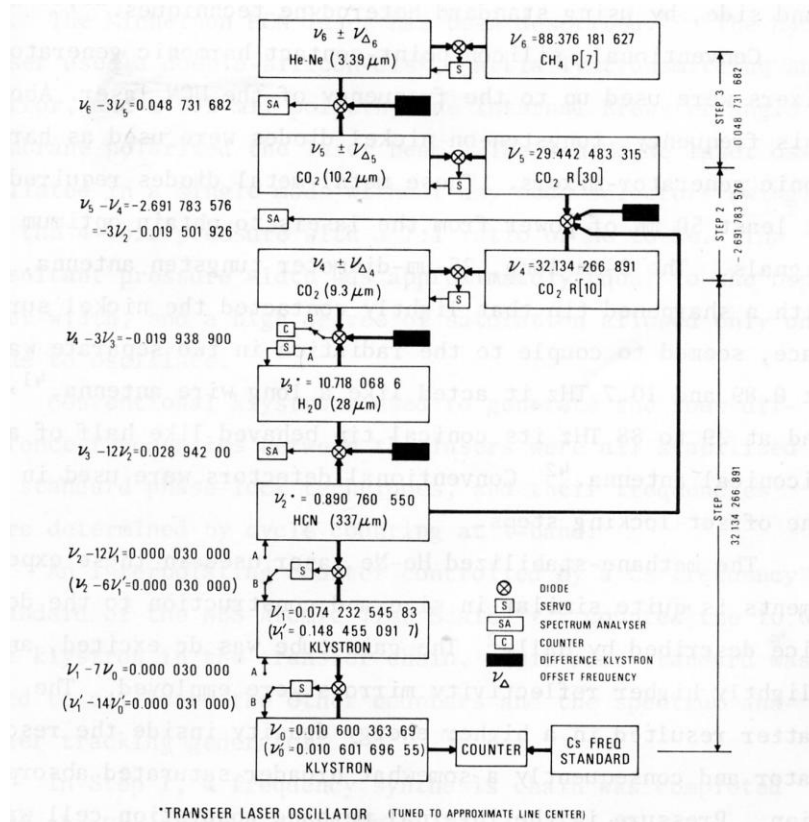


Fig. 4. Stabilized laser frequency synthesis chain. All frequencies are given in THz; those marked with an asterisk were measured with a transfer laser oscillator tuned to approximate line center.

# Definicija metra

- Razdalja, ki jo svetloba prepotuje v  $1/299.792.458$  sekunde
- Sekundarni standard laser He-Ne stabiliziran na  $I_2$
- Natančnost okoli  $10^{12}$

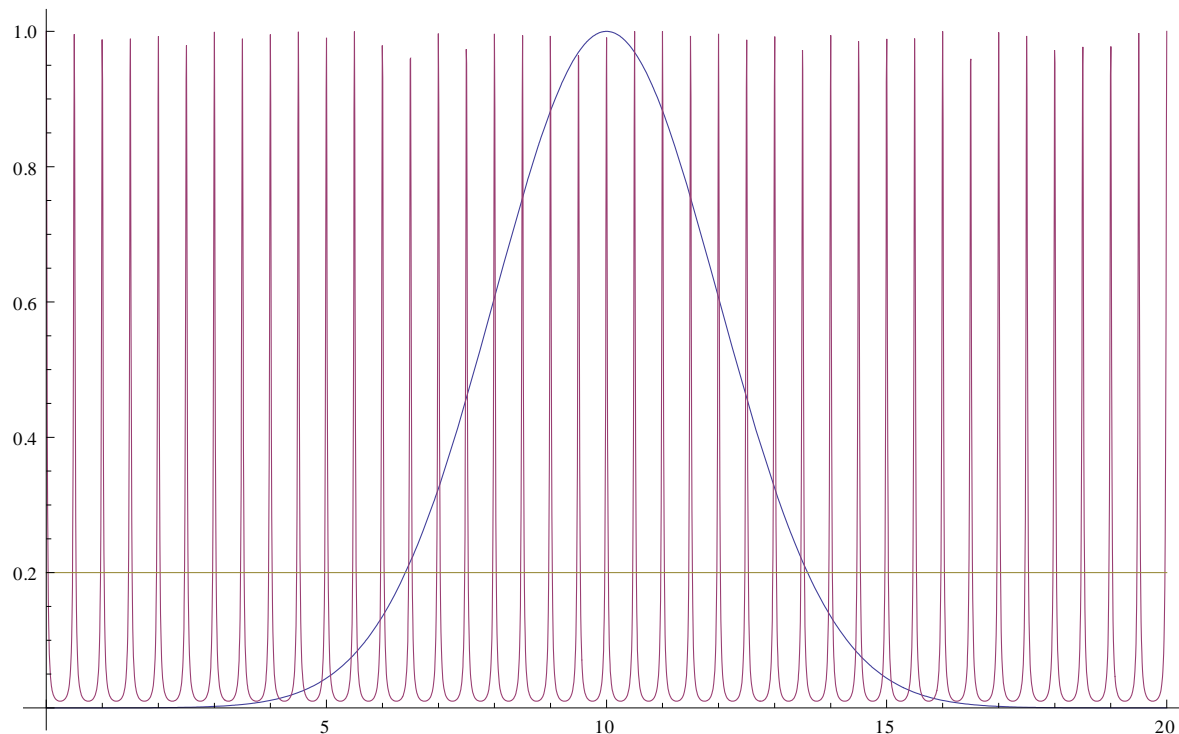
# Interferometer za gravitacijske valove - LIGO

- Michelsonov interferometer z dolžino krakov 4 km
- Relativna natančnost meritve razlike dolžine krakov boljša od  $10^{-20}$ !

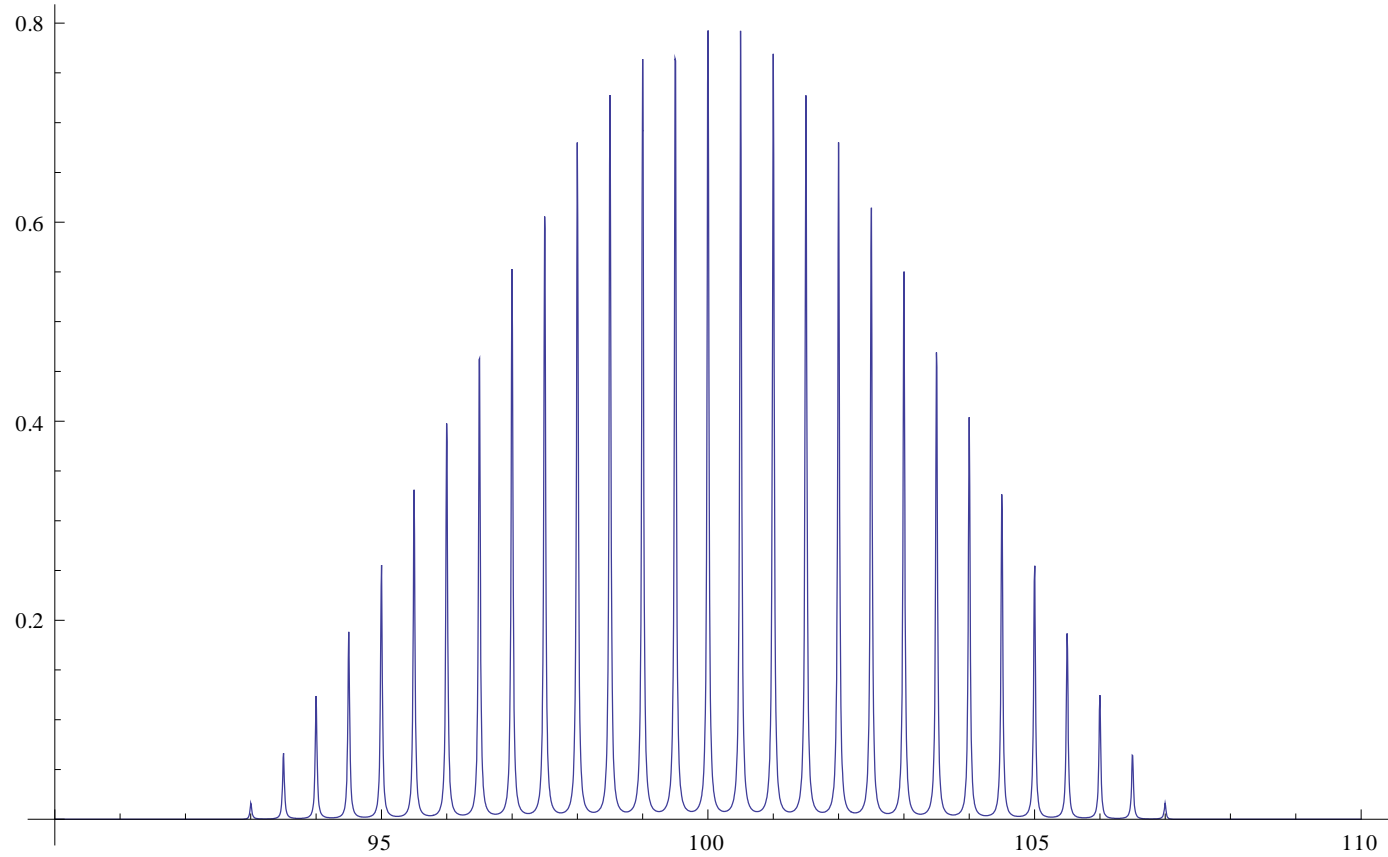


# Fazno uklenjeni sunki

- Spektralna širina ojačenja lahko mnogo večja od razmika med frekvencami resonatorja.



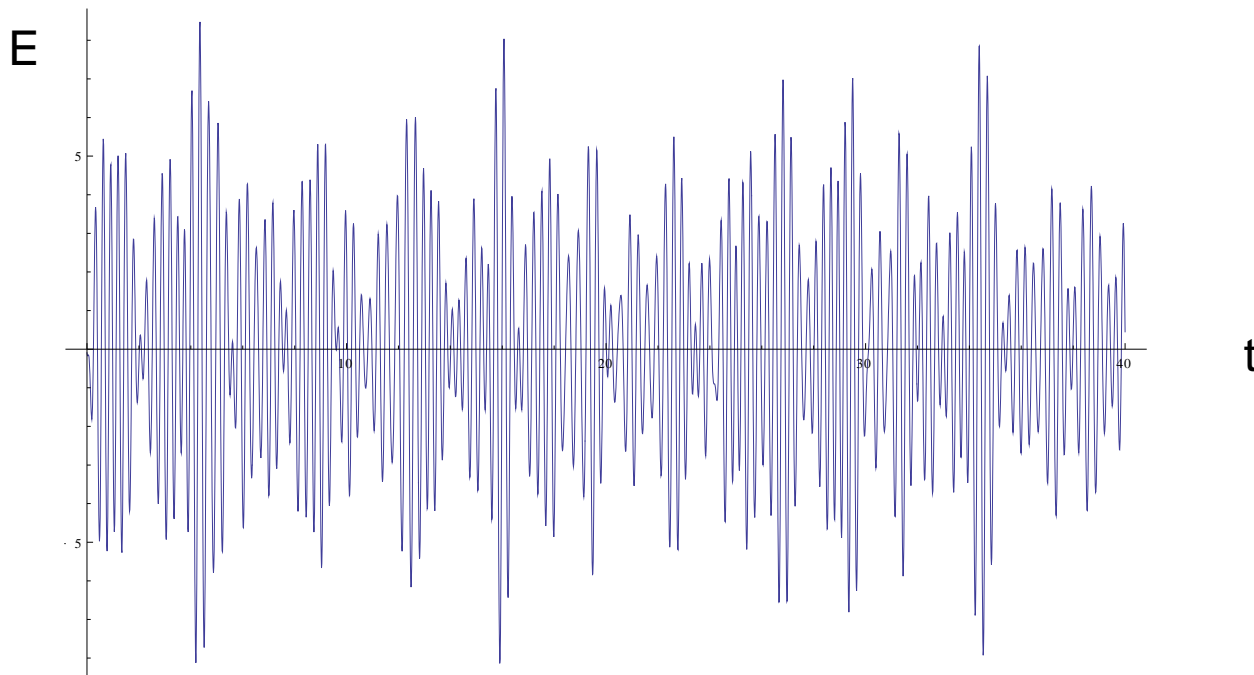
# Spekter laserja



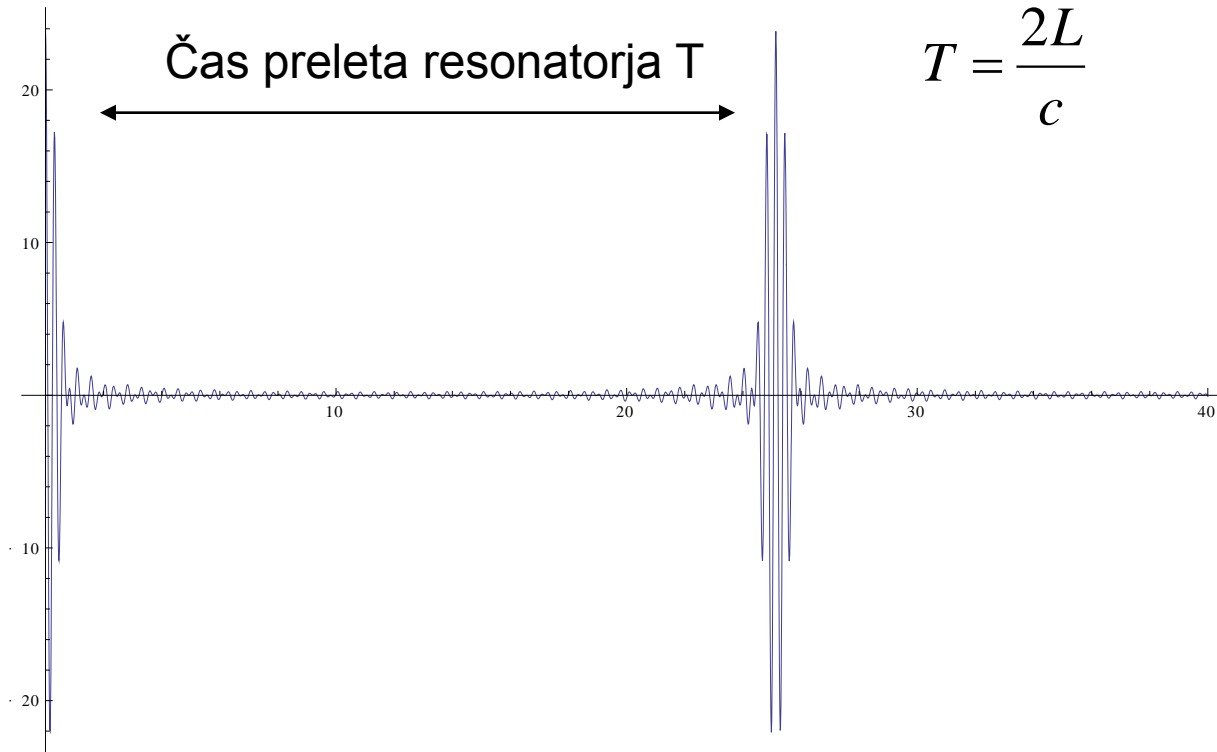
Frekvenca

# Slučajne faze

- Izhodno polje je vsota po resonatorskih stanjih s slučajnimi fazami



# Enake konstantne faze



$$\tau = 1/\delta\omega$$

$\delta\omega$  je širina ojačevanja

# Fazno uklenjeni sunki

- Fazno uklenjeni sunki so posledica interference v času – analogno uklonski mrežici
- Uklenjene faze lahko dobimo z modulacijo izgub s frekvenco, ki ustreza času preleta
- Ti: safir ima veliko širino ojačevanja – dobimo sunke okoli 50 fs

# Krajšanje sunkov

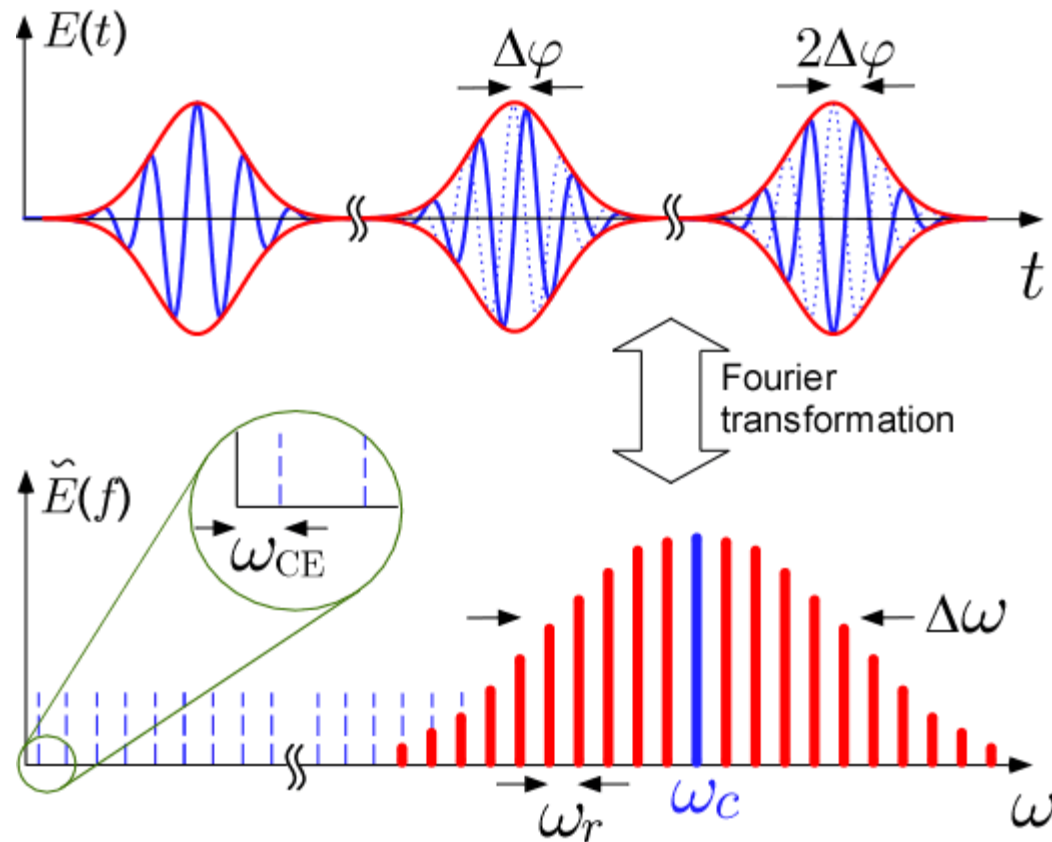
- Spekter je mogoče razširiti v optičnem vlaknu, kjer pride do nelinearne modulacije faze
  - Bela svetloba
- S parom uklonskih mrežic se sunki lahko skrajšajo na nekaj fs – le še nekaj nihajev

# Frekvenčni glavnik

- Femtosekundni sunki iz Ti:safirnega fazno uklenjenega laserja
- Stabilizacija frekvence sunkov na osnovno uro
- Meritev frekvence utripanja ene od lastnih frekvenc z drugim laserjem, ki je frekvenčno stabiliziran na nek atomski prehod, omogoča natančno meritev frekvence atomskega prehoda
- **Fazno uklenjen laser lahko služi kot ura**

# Težava- drsenje faze

Zaradi disperzije in optičnih nelinearnosti je  $\omega_n = n\omega_r + \omega_{CEO}$



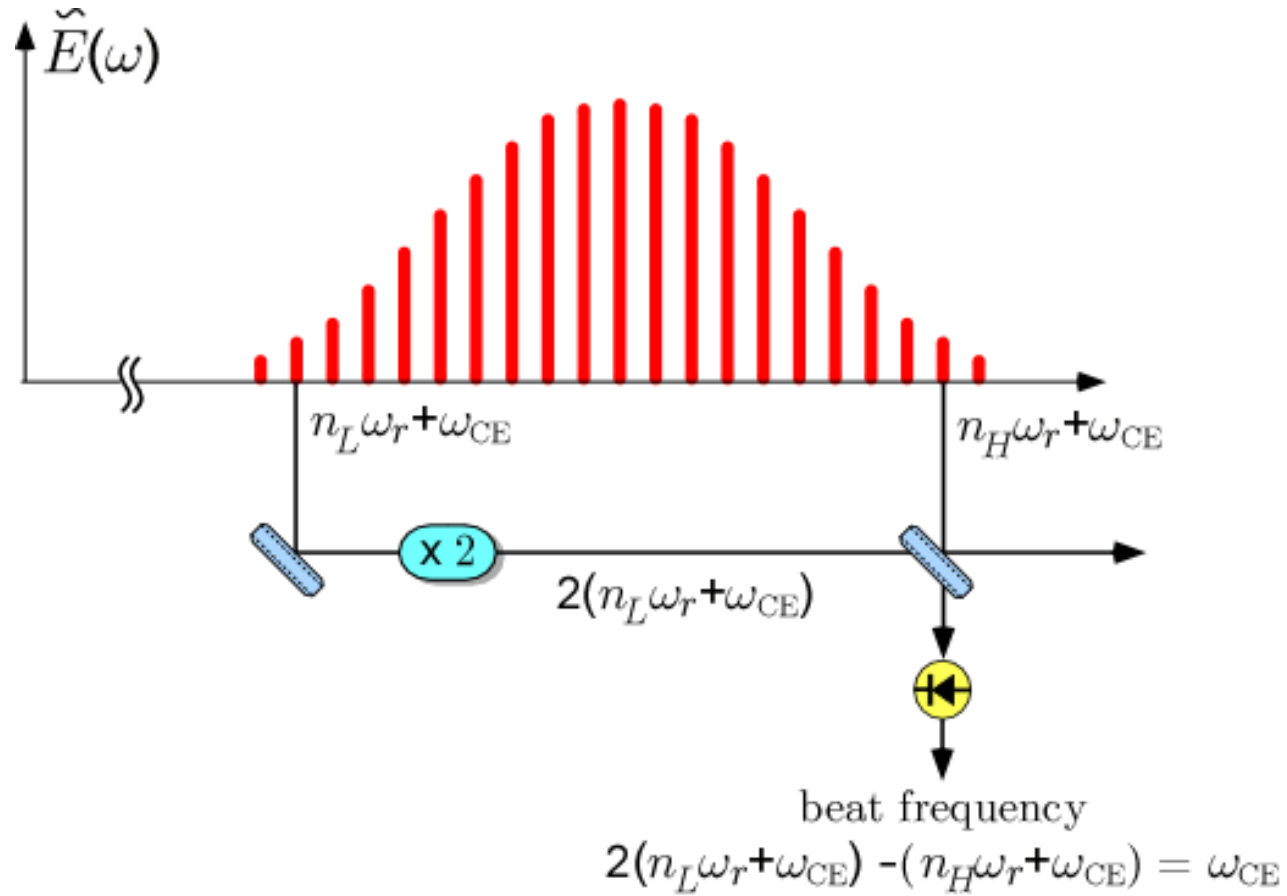


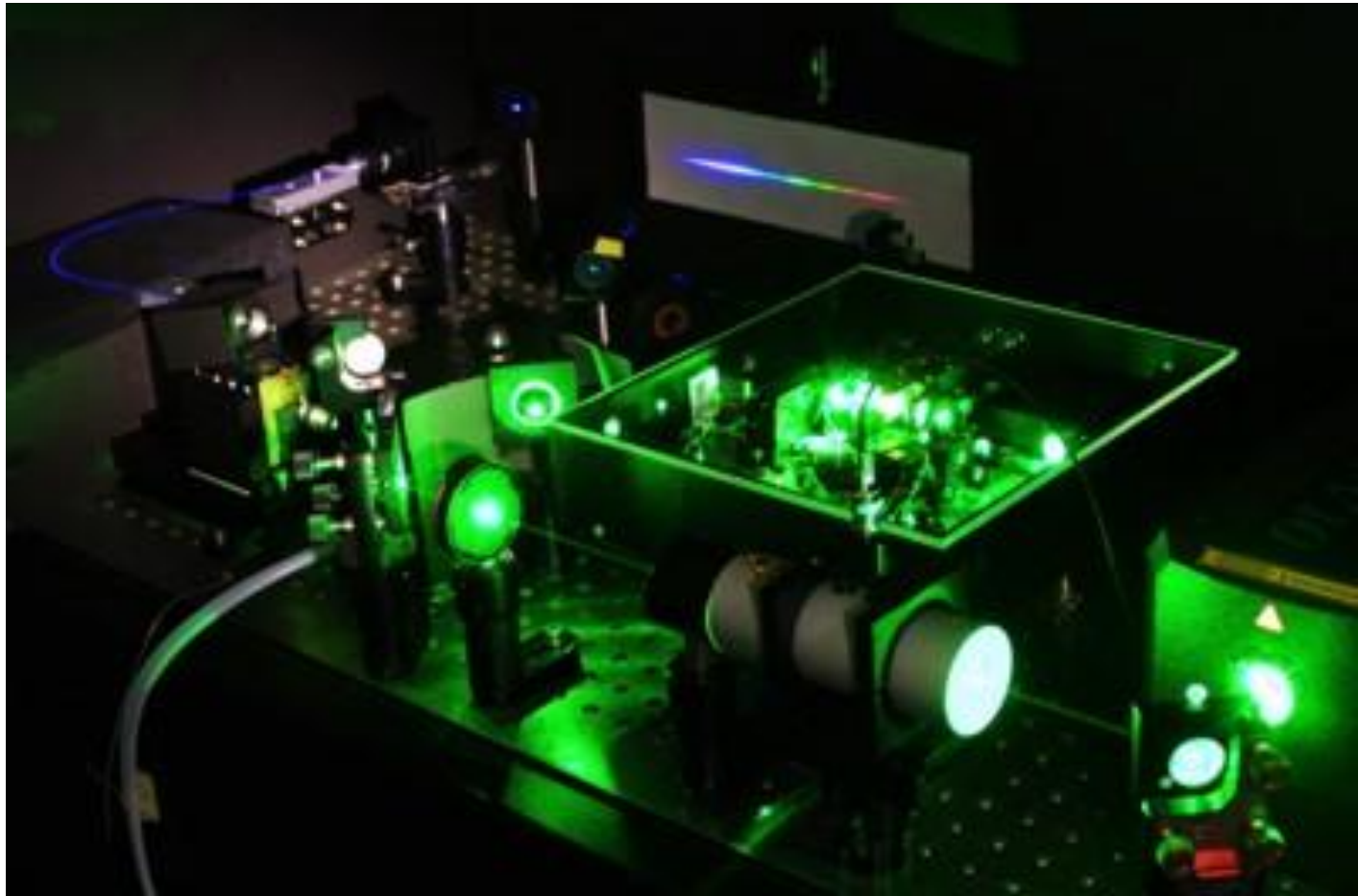
# Drsenje faze

$$\omega_n = n\omega_r + \omega_{CEO}$$

$$\omega_r = \frac{2\pi}{T} = \frac{(\omega_n - \omega_{CEO})}{n}$$

# Frekvenčni glavnik preko oktave





## Laser kot osnovna ura

- Laser, stabiliziran na ozek atomski ali molekularni prehod – dosežena stabilnost  $10^{-15}$
- **Predvidevajo stabilnost do  $10^{-18}$**
- Na primer  $\text{Yb}^+$  oktupolni prehod  $\tau \sim 10$  let
- Z oktavnim glavnikom možno sintetizirati poljubno frekvenco