

Preuzeto iz [7]

Optički frekventni standard na dvofotonskom prijelazu atoma rubidija

Mateo Kruljac; mentor: dr.sc. Damir Aumiler, Institut za fiziku

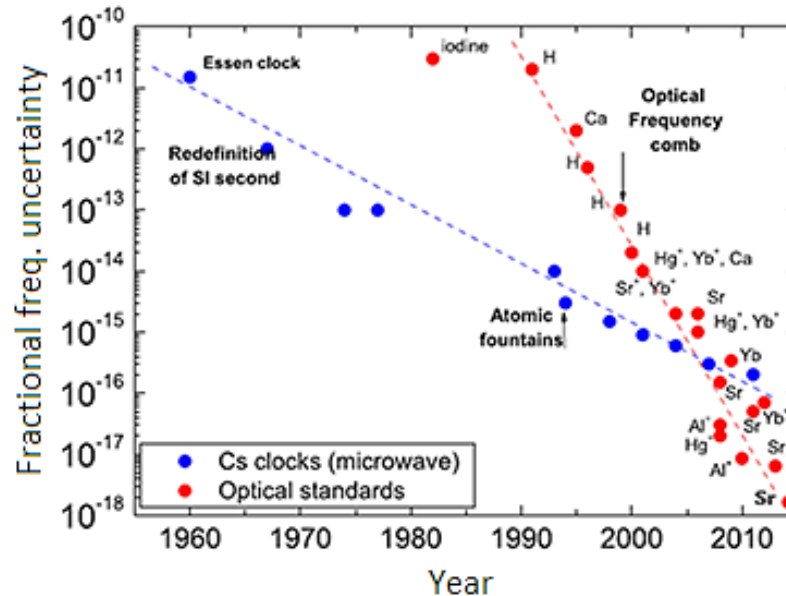
Mjerenje frekvencije

- ▶ velika preciznost
- ▶ standardi za mjerenja
 - vremena (radio frekvencije)
 - duljine (optičke frekvencije)
 - primjene GPS, telekomunikacije, kozmologija, metrologija
- ▶ elektronika mjeri radio frekvencije (~ 10 GHz), ne i optičke (~ 100 THz)
- ▶ napredak 90-ih god. – razvoj **optičkog frekventnog češlja (FC)**
 - Nobelova nagrada 2005. : Glauber, Hall i Hänsch
 - alat prije FC-a: He-Ne laser stabiliziran na prijelazu joda



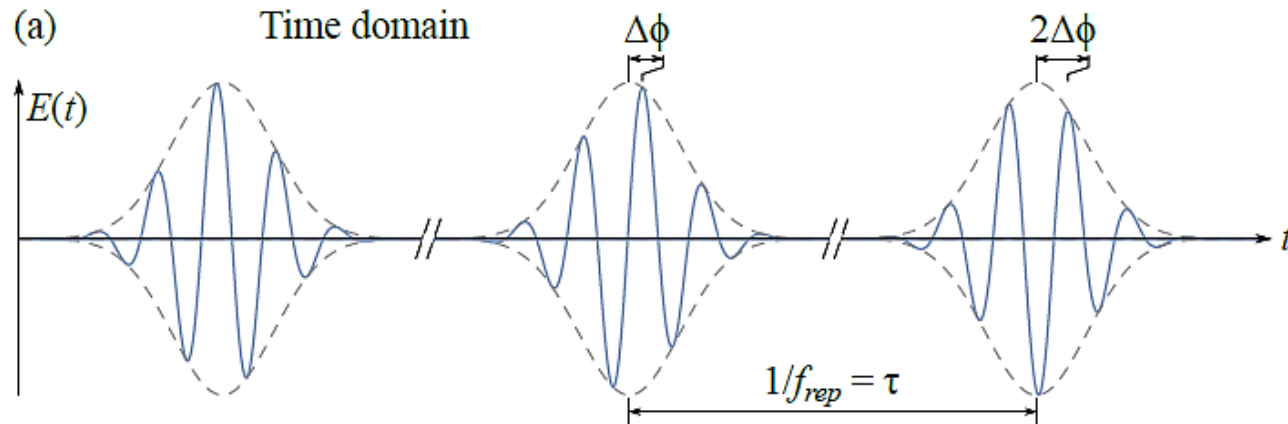
Mjerenje frekvencije

- ▶ velika preciznost
- ▶ standardi za mjerenja
 - vremena (radio frekvencije)
 - duljine (optičke frekvencije)



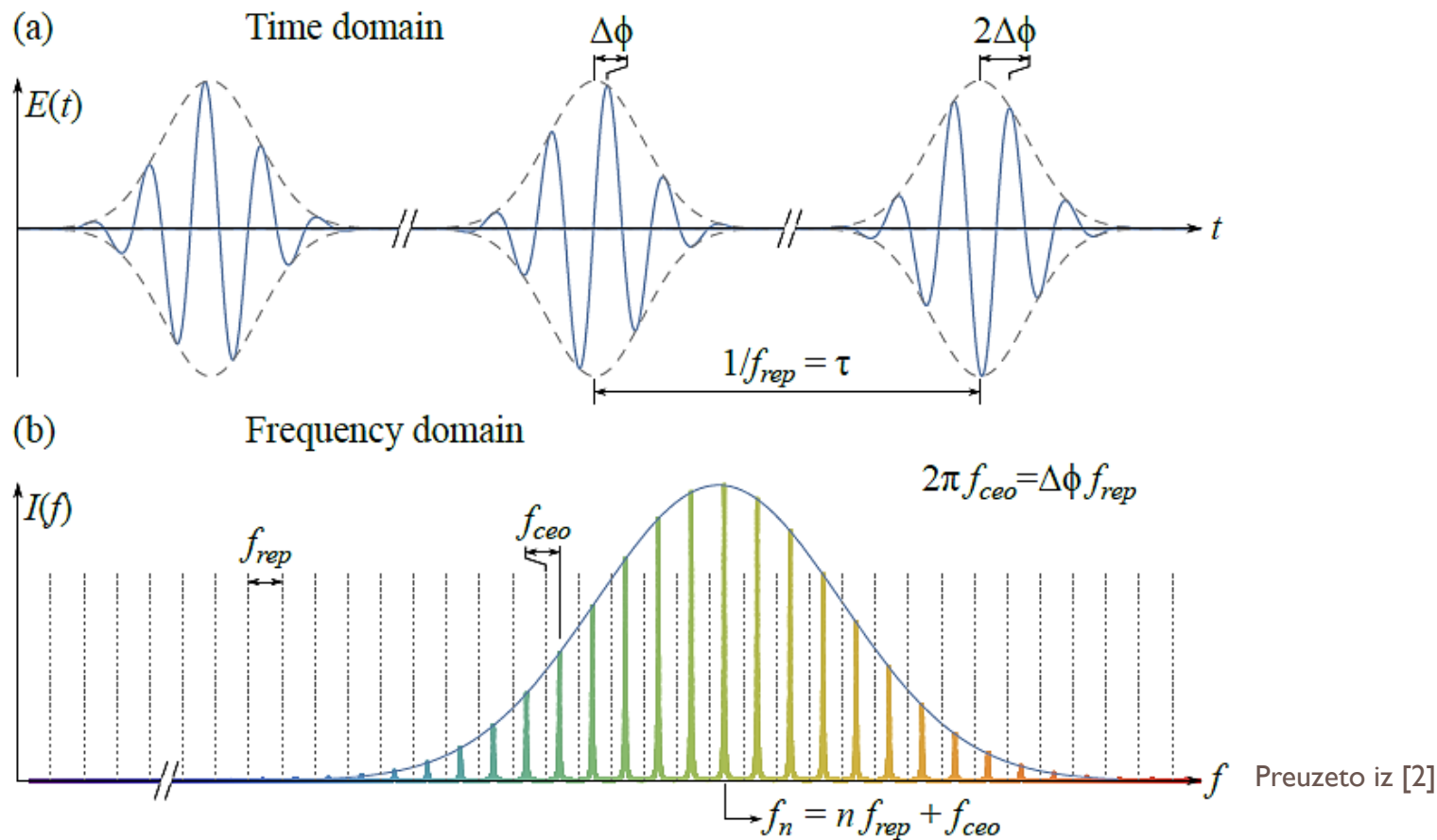
Preuzeto iz [1]

Frekventni češalj

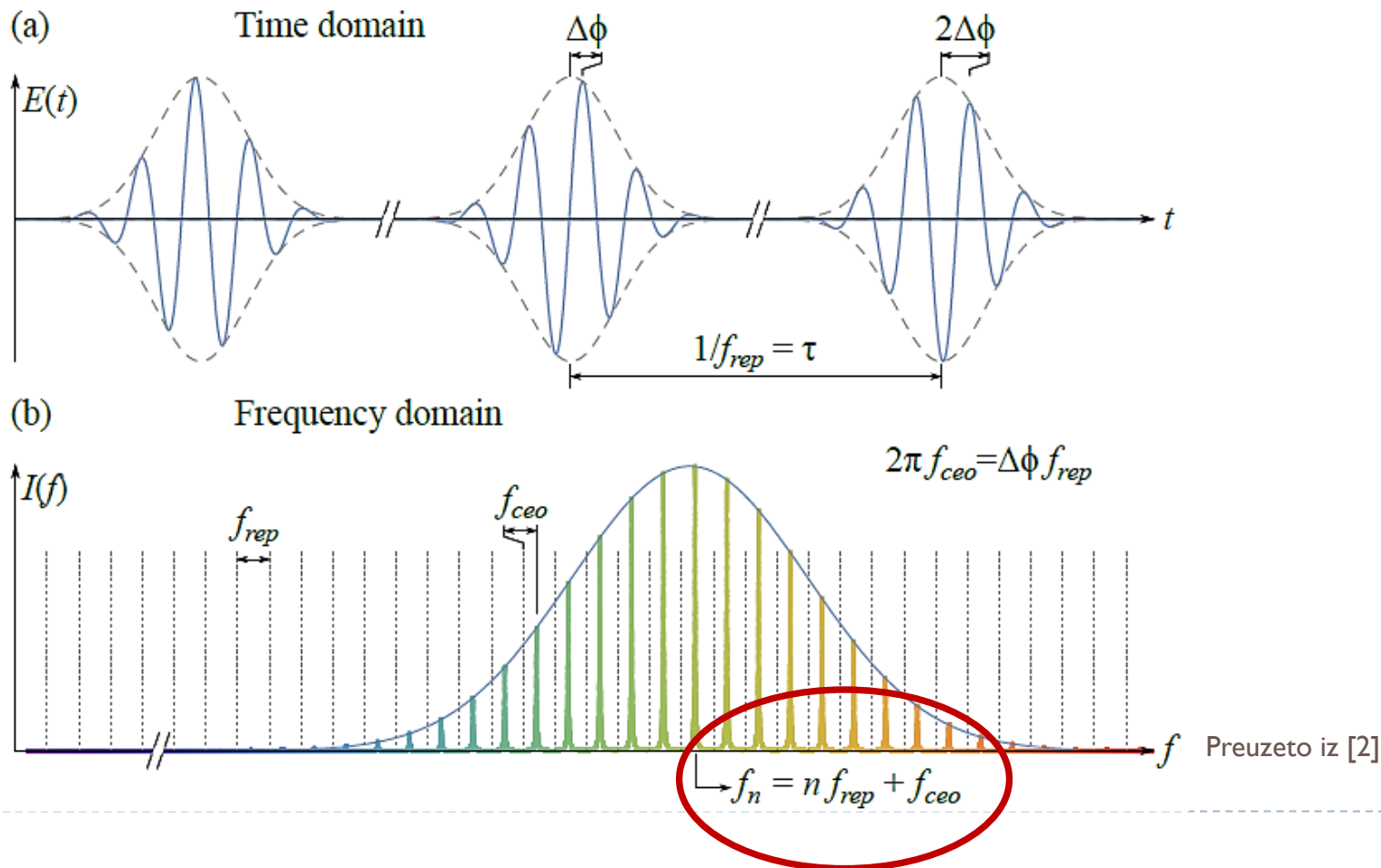


Preuzeto iz [2]

Frekventni češalj



Frekventni češalj



Mjerenje optičkih frekvencija

$$f_n = n f_{rep} + f_0$$

- ▶ n-ti mod f_n - optičke frekvencije
- ▶ f_{rep} i f_0 - radio frekvencije

- ▶ mjerenje i stabilizacija f_{rep} i f_0 :
 - stabilizacija FC-a
 - mjerenje apsolutnih optičkih frekvencija

- ▶ optički frekventni standardi:
 - grupa prihvaćenih atomskih prijelaza određene frekvencije
 - jedan od njih: **dvofotonski prijelaz u atomu rubidija**



Mjerenje optičkih frekvencija

$$f_n = n f_{rep} + f_0$$

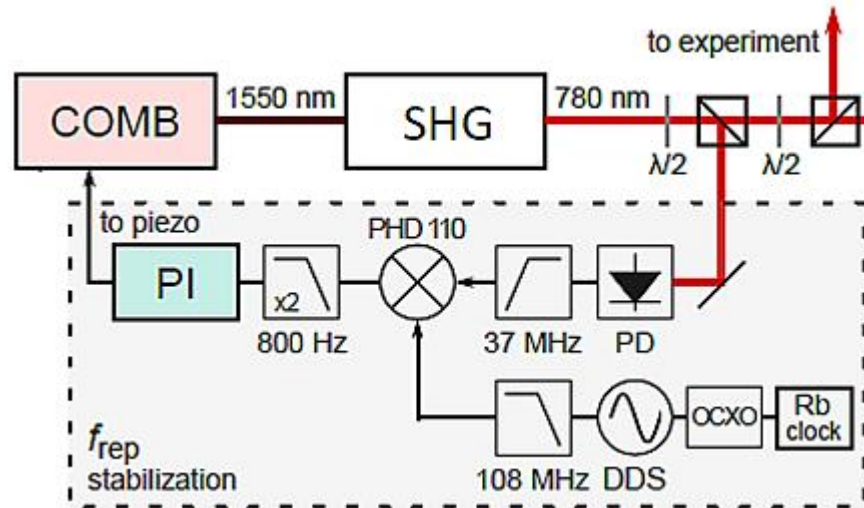
- ▶ n-ti mod f_n - optičke frekvencije
- ▶ f_{rep} i f_0 - radio frekvencije
- ▶ mjerenje i stabilizacija f_{rep} i f_0 :
 - stabilizacija FC-a
 - mjerenje apsolutnih optičkih frekvencija
- ▶ optički frekventni standardi:
 - grupa prihvaćenih atomskih prijelaza određene frekvencije
 - jedan od njih: **dvofotonski prijelaz u atomu rubidija**

1) stabilizacija FC-a

2) dvofotonski spektar

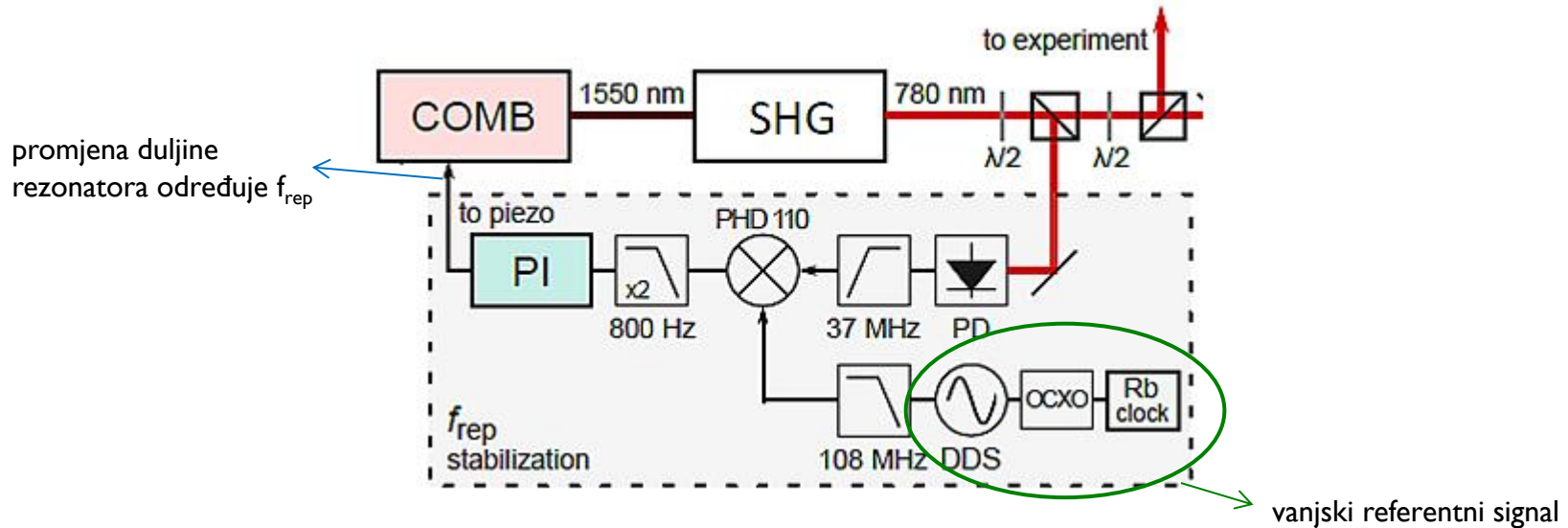


Stabilizacija FC-a : f_{rep}



Preuzeto iz [5]

Stabilizacija FC-a : f_{rep}



Preuzeto iz [5]

Stabilizacija FC-a : f_0

- ▶ uobičajena metoda: f-2f interferometrija
- ▶ prednost: samoreferenciranje
- ▶ tehnički zahtjevnija

- ▶ nova metoda:
 - vezanje n-tog moda FC-a i referentnog lasera
 - stabilizacija frekvencije udara
 - neizravno stabilizirana f_0
 - stabilnost određena referentnim laserom!

$$f_n = n f_{rep} + f_0$$



Stabilizacija FC-a : f_0

- ▶ uobičajena metoda: f-2f interferometrija
- ▶ prednost: samoreferenciranje
- ▶ tehnički zahtjevnija

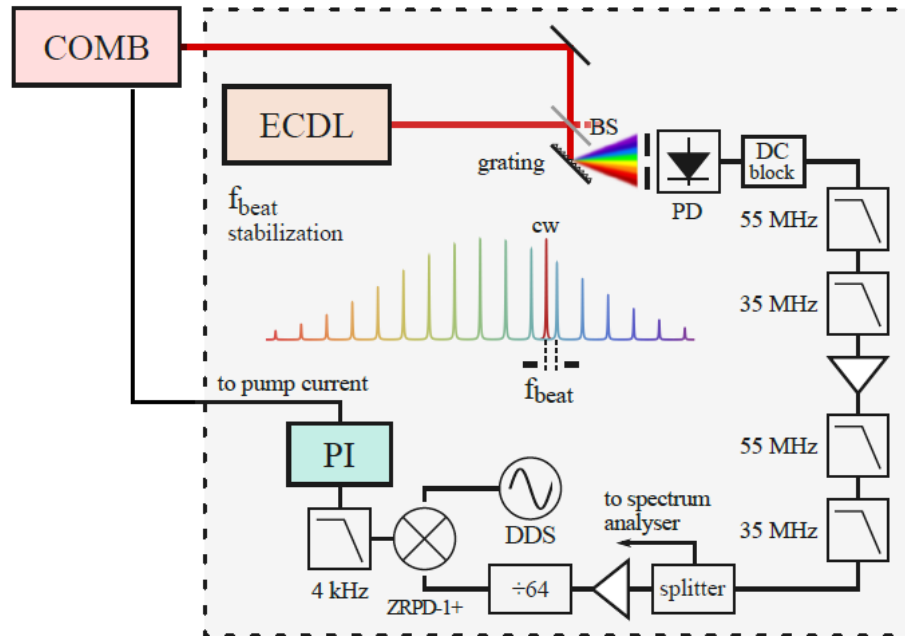
- ▶ nova metoda:
 - vezanje n-tog moda FC-a i referentnog lasera
 - stabilizacija frekvencije udara
 - neizravno stabilizirana f_0
 - stabilnost određena referentnim laserom!

- ▶ referentni laser:
 - kontinuirani, ECDL
 - stabiliziran na rubidijev prijelaz za hlađenje na 780.2 nm

$$f_n = n f_{rep} + f_0$$

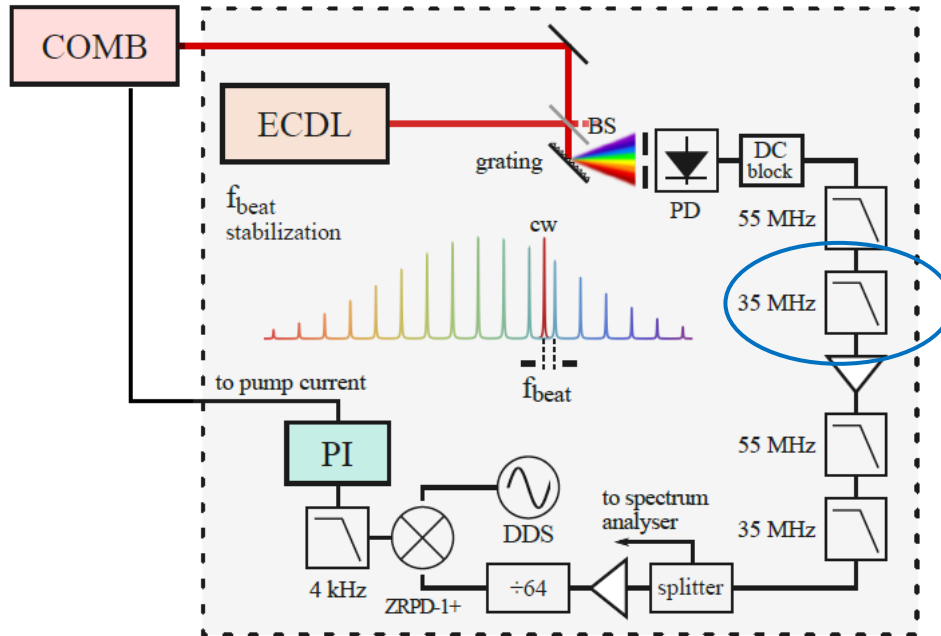


Stabilizacija FC-a : f_{beat}



Preuzeto iz [5]

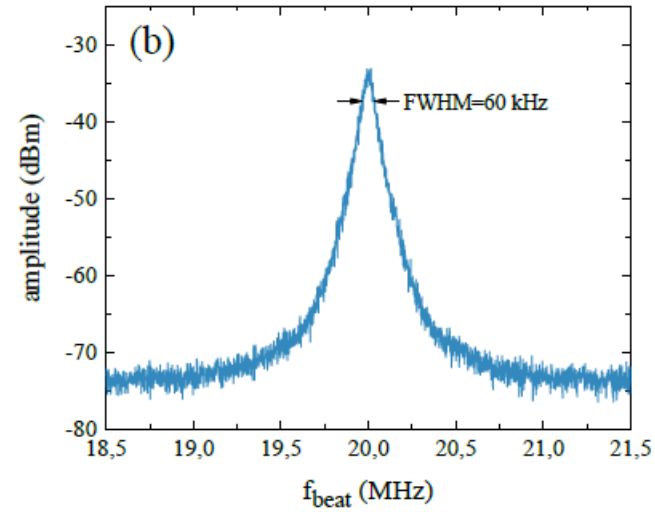
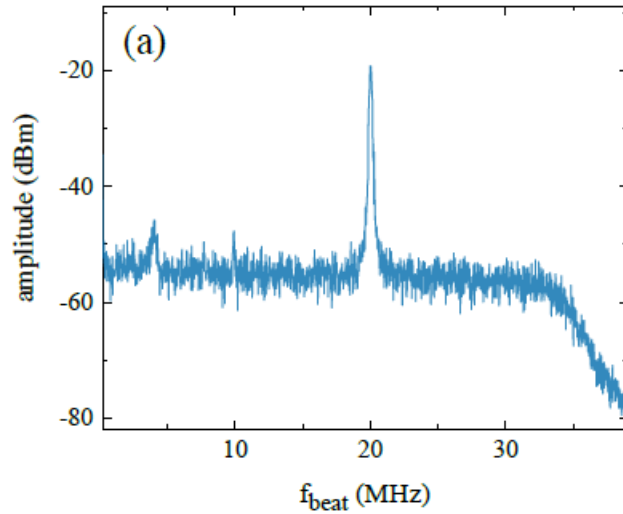
Stabilizacija FC-a : f_{beat}



filter propušta samo jedan mod

Preuzeto iz [5]

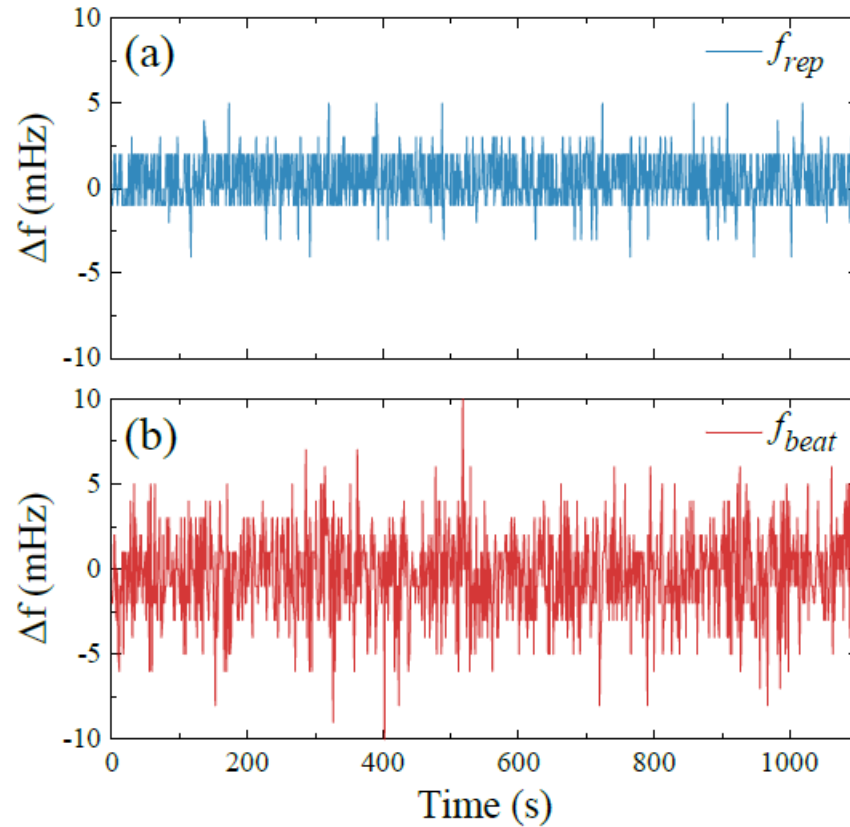
Rezultati – detekcija udara



Preuzeto iz [5]



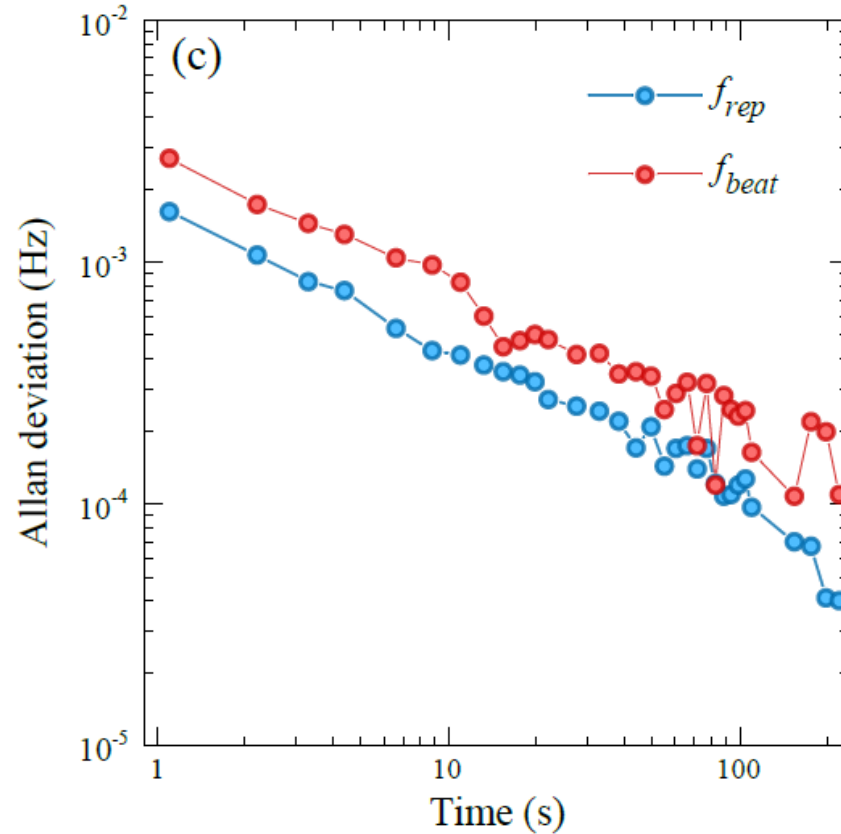
Rezultati – stabilnost frekventnog češlja



Preuzeto iz [5]



Rezultati – stabilnost frekventnog češlja



Preuzeto iz [5]

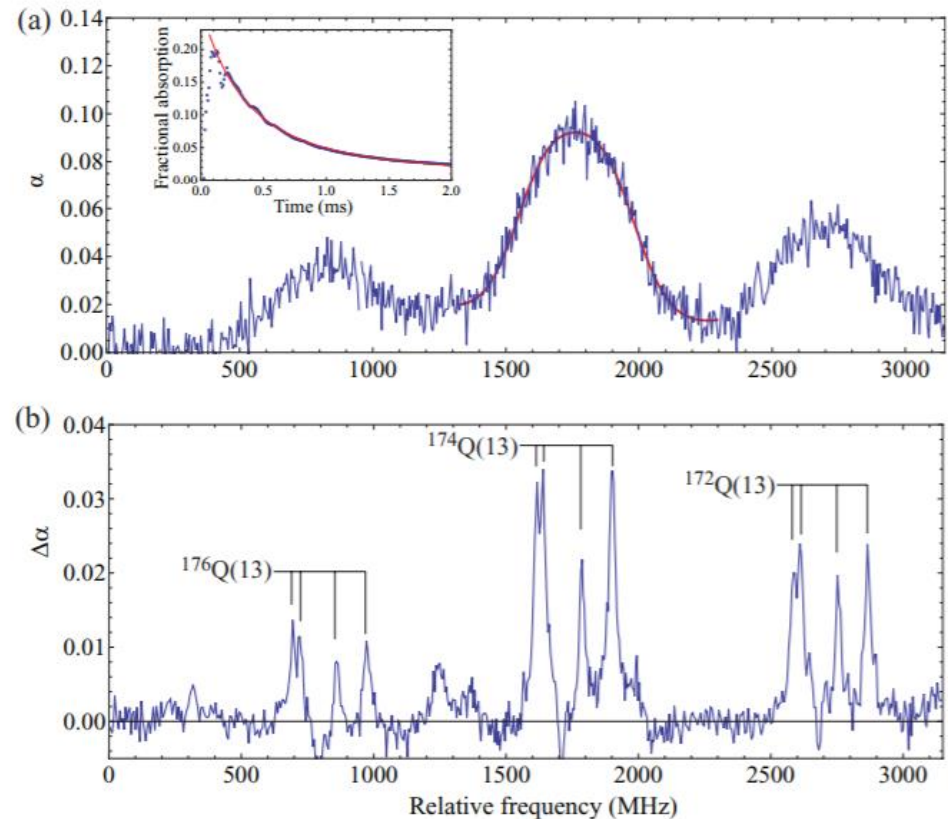
Problem u spektroskopiji: Dopperovo širenje linije

- ▶ Dopplerov efekt – atom koji se kreće vidi pomaknutu frekvenciju fotona

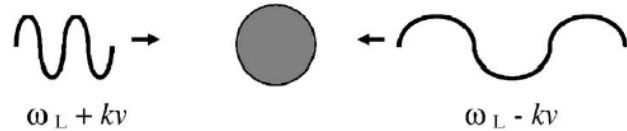
$$\omega'_L = \omega_L - \vec{k} \cdot \vec{v}$$

- ▶ raspodjela brzina atoma – Maxwell-Boltzmann
- ▶ proširene linije
- ▶ teško razlučivi prijelazi
- ▶ Lorentzian → Gaussian

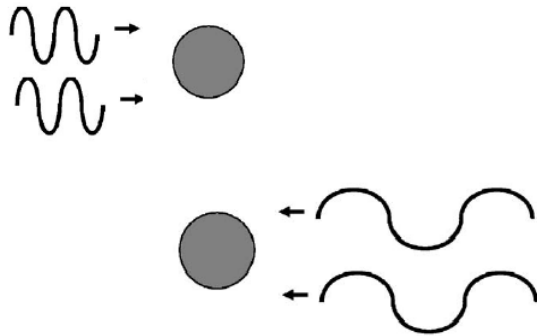
Preuzeto iz [6]



Dvofotonska apsorpcija



- Doppler neprošireni spektar
 - neovisan o brzini
 - svi atomi doprinose



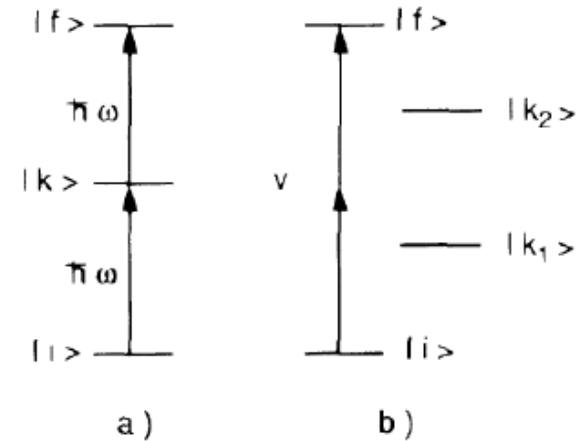
- Doppler proširena pozadina

Preuzeto iz [4]



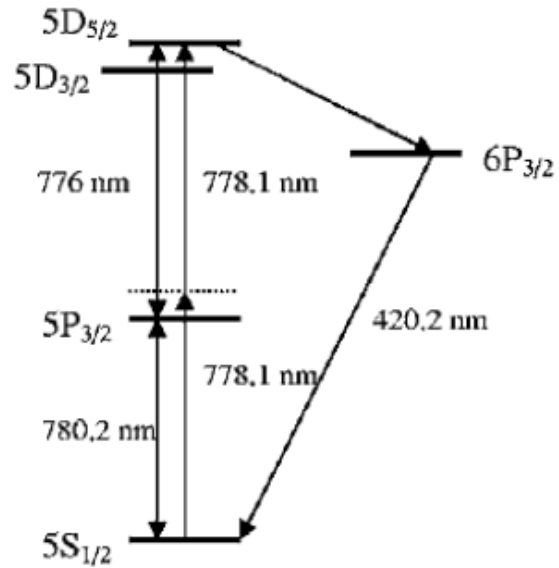
Dvofotonska apsorpcija

- ▶ Prednosti:
 - Doppler neprošireni spektar
 - kompenzacija efekata od vanjskih polja
- ▶ ovisi o I^2 - laseri velike snage / malog promjera zrake
- ▶ apsorpcija preko virtualnog međustanja $|v\rangle$:
 - nije svojstveno stanje
 - zbroj doprinosa realnih stanja $|k\rangle$
- ▶ postojanje realnog međustanja \rightarrow veća vjerojatnost apsorpcije



Preuzeto iz [3]

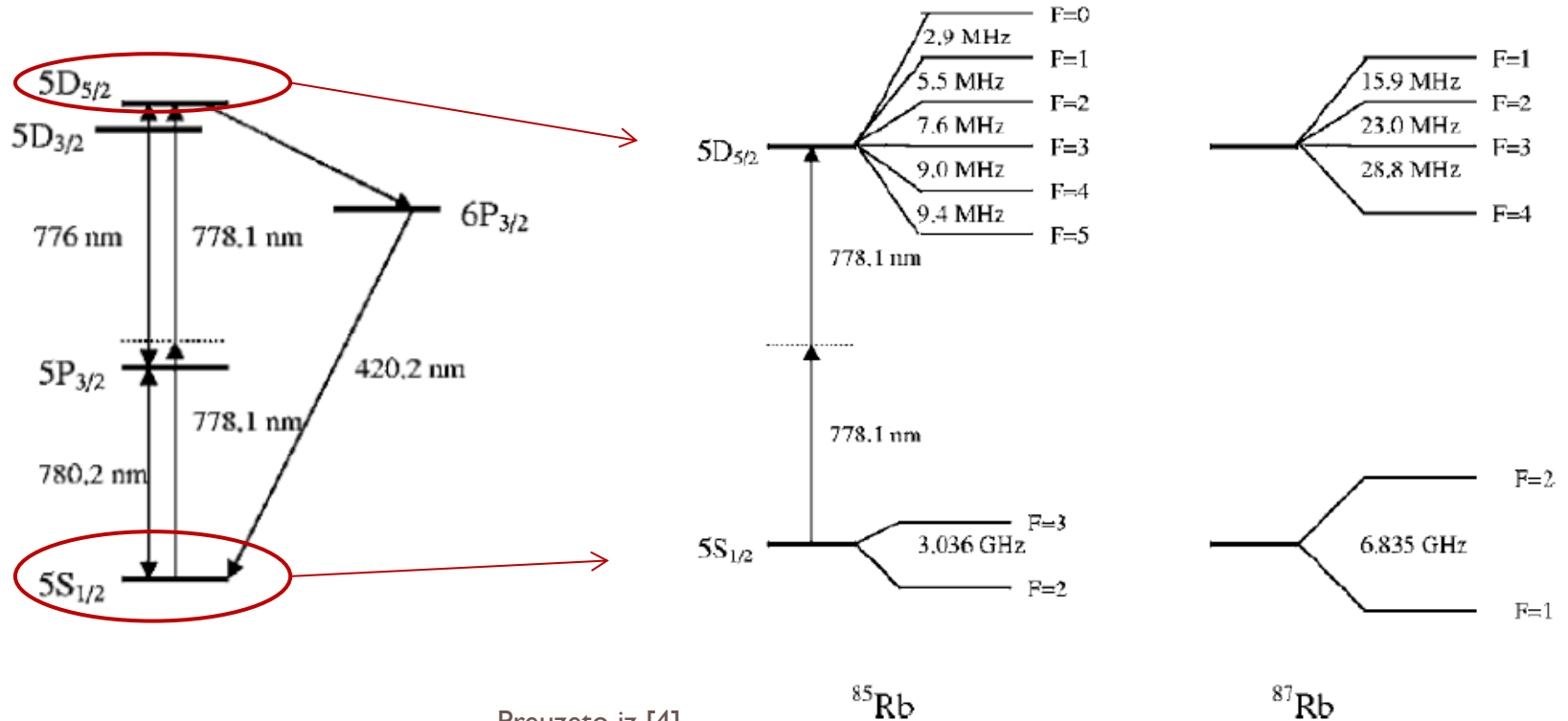
Energijski nivoi atoma rubidija



Preuzeto iz [4]

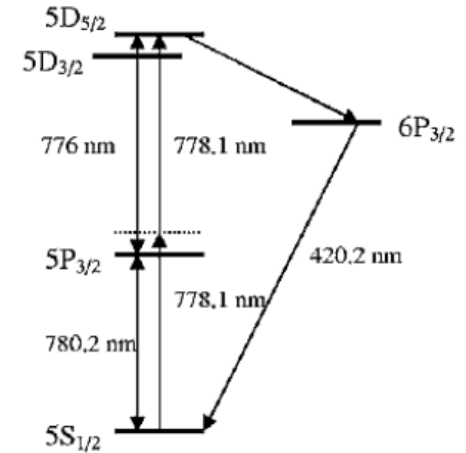


Energijski nivoi atoma rubidija



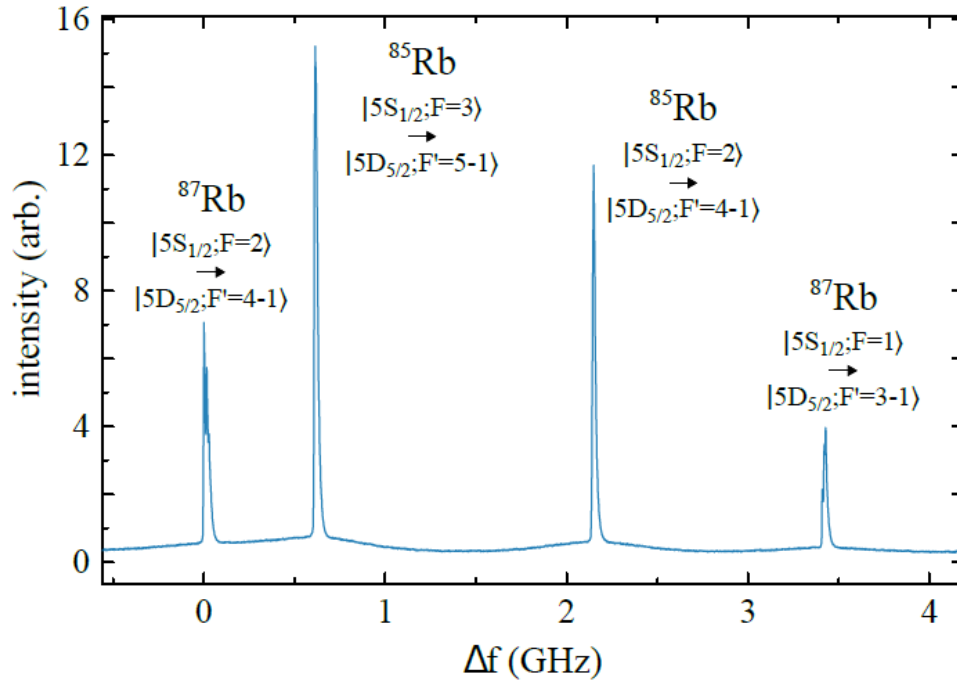
Dvofotonska spektroskopija - postav

- ▶ temperaturna stabilizacija rubidijevih kiveta
- ▶ smanjenje promjera / fokusiranje zrake
- ▶ detekcija preko fluorescencije na 420 nm fotomultiplikatorom
- ▶ ovisnost fluorescencije o frekvenciji lasera skeniranjem preko 4.5 GHz



Preuzeto iz [4]

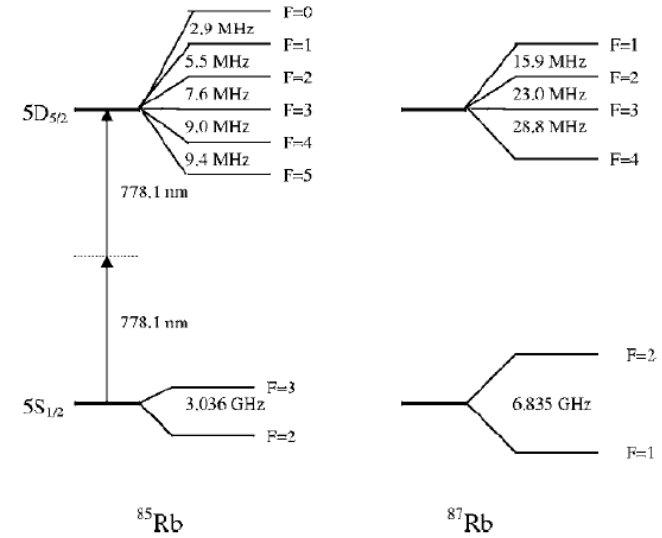
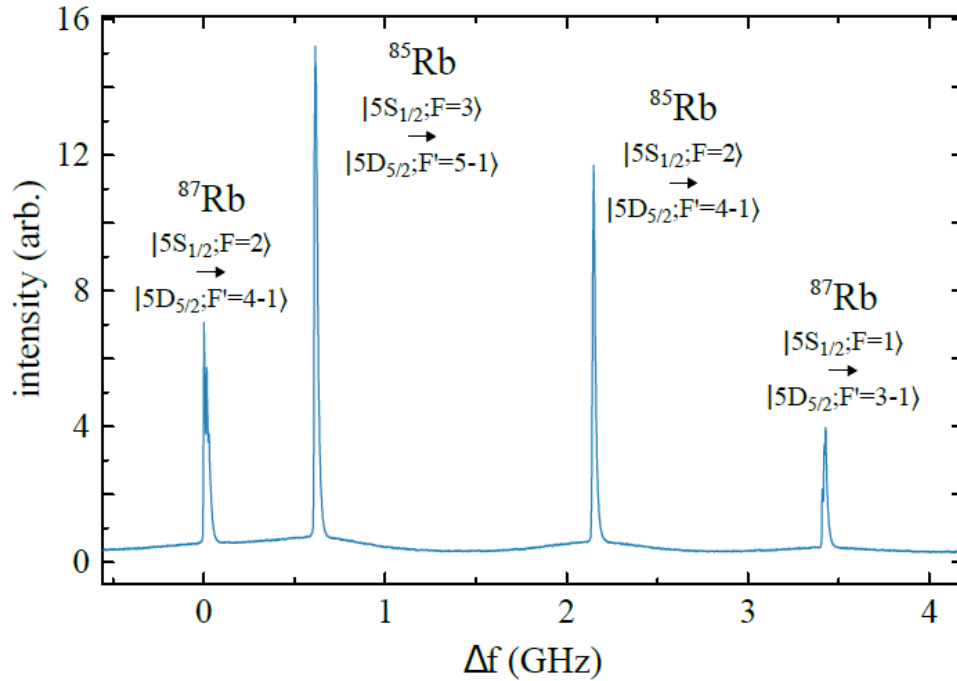
Rezultati – dvofotonska spektroskopija



$f - 385\,284\,566\,370.4$ kHz

Preuzeto iz [5]

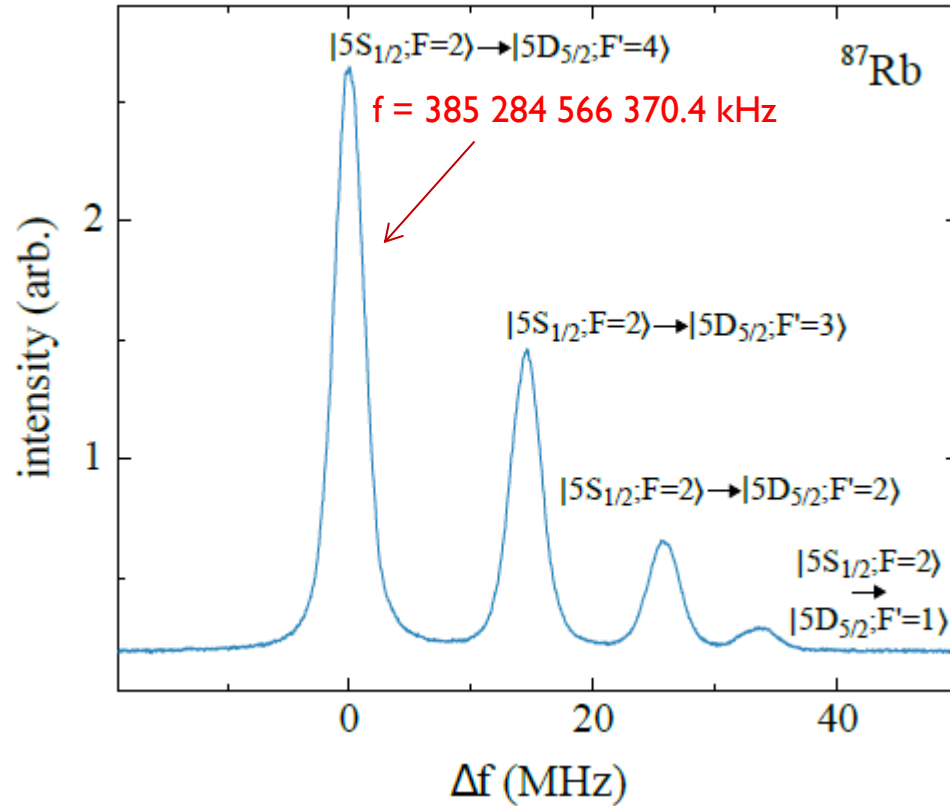
Rezultati – dvofotonska spektroskopija



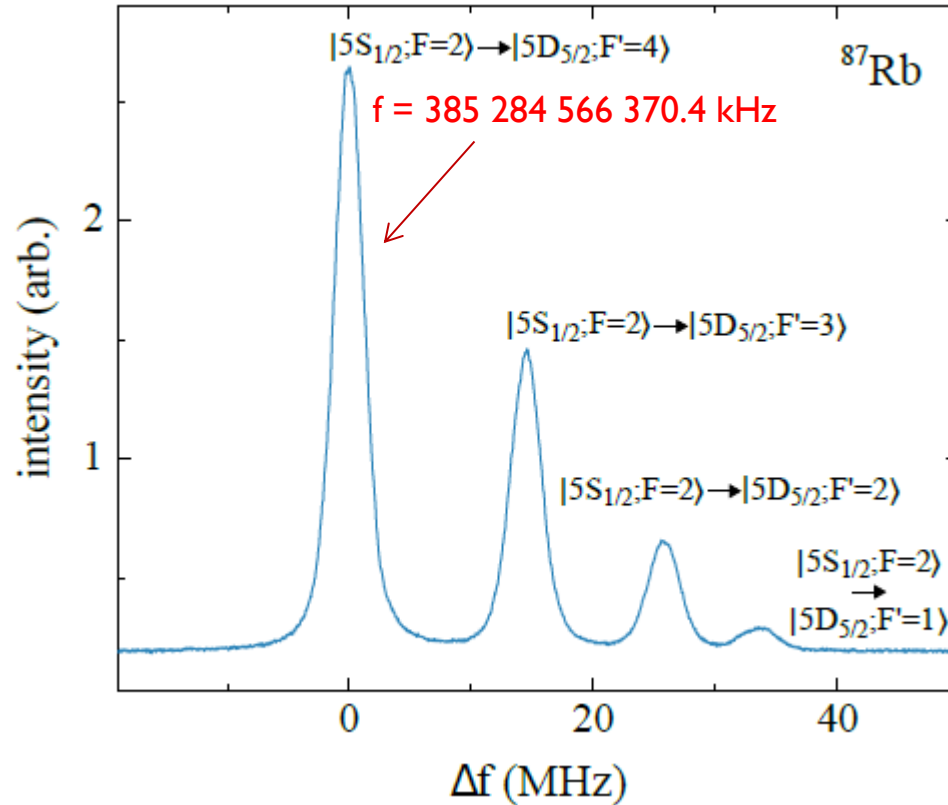
$f - 385\,284\,566\,370.4\text{ kHz}$

Preuzeto iz [5]

Rezultati – dvofotonska spektroskopija

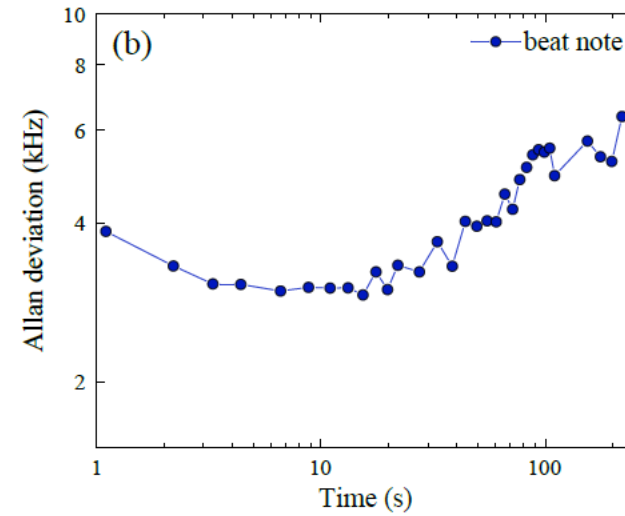
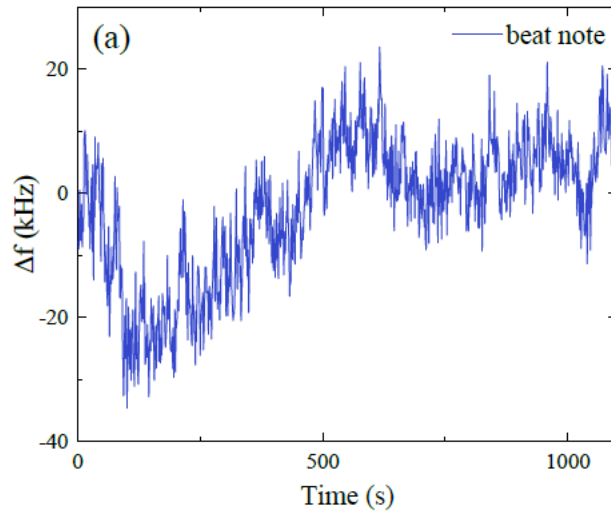


Rezultati – dvofotonska spektroskopija



- ECDL zaključan na taj prijelaz
- udari između FC-a i ECDL-a
- mjera apsolutne stabilnosti FC-a

Rezultati – apsolutna stabilnost FC-a



Preuzeto iz [5]



Zaključak

- FC - visoka apsolutna stabilnost
 - omogućuje precizno mjerenje optičkih frekvencija
- ▶ velika preciznost metode obzirom na jednostavnost
- ▶ relativne neodređenosti f_{rep} i f_{beat} : $10^{-9} - 10^{-10}$
 - stabilnost određena referentnim ECDL-om
- ▶ apsolutna stabilnost FC-a ~ **10 kHz**
 - referenca dvofotonski prijelaz u rubidiju
 - relativna neodređenost FC-a 10^{-11}



Reference

- ▶ [1] <https://www.bipm.org/en/about-us/>
- ▶ [2] D. J. Jones et al.: "Carrier-Envelope Phase Control of Femtosecond Mode-Locked Lasers and Direct Optical Frequency Synthesis"; Science 288, 635-639 (2000)
- ▶ [3] Wolfgang Demtröder: "Laser Spectroscopy. Basic concepts and instrumentation; Second enlarged edition"; Springer 1999.
- ▶ [4] A.J. Olson, E.J. Carlson, S.K. Mayer, 2006: "Two-photon spectroscopy of rubidium using a grating-feedback diode laser"; University of Portland
- ▶ [5] N. Šantić, doktorski rad 2017: "Sintetička Lorentzova sila za neutralne hladne atome"; PMF, Sveučiliste u Zagrebu
- ▶ [6] <http://iopscience.iop.org/1367-2630/11/12/123026>
- ▶ [7] <http://www.npl.co.uk/publications/good-practice-online-modules/optical-radiation-safety/lasers/>



Dodatak: dvofotonska apsorpcija

- ▶ QM: drugi red vremenski ovisnog računa smetnje:
- ▶ oblik spektralne linije – umnožak dva člana:

$$L \propto \frac{\gamma_{if} I_1 I_2}{[\omega_{if} - \omega_1 - \omega_2 + \vec{v} \cdot (\vec{k}_1 + \vec{k}_2)]^2 + (\gamma_{if}/2)^2}$$

$$P_{if} \propto \left| \sum_k \frac{\vec{R}_{ik} \cdot \vec{e}_1 \vec{R}_{kf} \cdot \vec{e}_2}{\omega_{ki} - \omega_1 + \vec{v} \cdot \vec{k}_1} + \frac{\vec{R}_{ik} \cdot \vec{e}_2 \vec{R}_{kf} \cdot \vec{e}_1}{\omega_{ki} - \omega_2 + \vec{v} \cdot \vec{k}_2} \right|^2$$

