

Petr Balling

Nobelova cena 2005 pro Johna L. Halla a Theodora W. Hänsche a pokrok v měření optických kmitočtů

*Pokroky matematiky, fyziky a astronomie*, Vol. 51 (2006), No. 1, 12--22

Persistent URL: <http://dml.cz/dmlcz/141296>

## Terms of use:

© Jednota českých matematiků a fyziků, 2006

Institute of Mathematics of the Academy of Sciences of the Czech Republic provides access to digitized documents strictly for personal use. Each copy of any part of this document must contain these *Terms of use*.



This paper has been digitized, optimized for electronic delivery and stamped with digital signature within the project *DML-CZ: The Czech Digital Mathematics Library* <http://project.dml.cz>

## L i t e r a t u r a

- [1] YOUNG, T.: *Experimental Demonstration of the General Law of the Interference of Light*. Phil. Trans. Roy. Soc. London 94 (1804).
- [2] BORN, M., WOLF, E.: *Principles of Optics*. Pergamon Press, Oxford, 1. vydání 1959.
- [3] PEŘINA, J.: *Teorie koherence*. SNTL, Praha 1975.
- [4] GLAUBER, R. J.: *The Quantum Theory of Optical Coherence*. Phys. Rev. 130 (1963), 2529.
- [5] GLAUBER, R. J.: *Coherent and Incoherent States of the Radiation Field*. Phys. Rev. 131 (1963), 2766.
- [6] GLAUBER, R. J.: *Photon Correlations*. Phys. Rev. Lett. 10 (1963), 84.
- [7] SCHRÖDINGER, E.: *Der stetige Übergang von der Mikro- zur Makromechanik*. Naturwissenschaften 14 (1926), 664.
- [8] HANBURY BROWN, R., TWISS, R. Q.: *Correlation between photons in two coherent beams of light*. Nature 177 (1956), 27.
- [9] PEŘINA, J.: *Coherence of Light*. Van Nostrand, London 1972; Mir, Moskva 1974; D. Reidel, Dordrecht 1985.
- [10] DUŠEK, M.: *Koncepční otázky kvantové teorie*. Univerzita Palackého, Olomouc 2002.
- [11] GRIVET, P., BLOEMBERGEN, N., eds.: *Quantum Electronics*. Proceedings of the Third International Congress, Dunod, Paris 1964.
- [12] MANDEL, L., WOLF, E.: *Optical Coherence and Quantum Optics*. Cambridge Univ. Press, Cambridge 1995.
- [13] KAY, S. M., MAITLAND, A., eds.: *Quantum Optics*. Academic Press, London 1970.

# Nobelova cena 2005 pro Johna L. Halla a Theodora W. Hänsche a pokrok v měření optických kmitočtů

*Petr Balling, Praha*

Polovinu Nobelovy ceny za fyziku za rok 2005 společně získali John L. Hall a Theodor W. Hänsch za „příspěvky k rozvoji přesné laserové spektroskopie včetně metody optického frekvenčního hřebene“. V tomto článku jsou uvedena základní životopisná data uvedených laureátů, příklady jejich významných experimentů, stručně je představena problematika absolutního měření frekvence laserů — tedy porovnávání optických kmitočtů (stovky terahertzů) s radiofrekvenčním signálem cesiových hodin (současného etalonu času a frekvence). V závěru je podrobněji popsána metoda femtosekundového frekvenčního hřebene.

---

RNDr. PETR BALLING (1964), Český metrologický institut — laboratoř primární metrologie, V botanice 4, 150 72 Praha 5, e-mail: [pballing@cmi.cz](mailto:pballing@cmi.cz)

## Úvod

Objevy a nové metody související s přesnou spektroskopií byly v minulosti oceněny několika Nobelovými cenami za fyziku — Albert A. Michelson ji získal v roce 1907 za interferometr a spektroskopické a metrologické výzkumy provedené jeho pomocí<sup>1)</sup>, Chandrasekhara Venkata Raman v roce 1930 za objev po něm nazvaného rozptylu, v roce 1944 Isidor Isaac Rabi za rezonanční měření magnetických vlastností jader, Willis Eugene Lamb za objev jemné struktury spektra vodíku (Lambův posun, 1955), Alfred Kastler roku 1966 za optické metody měření rezonancí atomů, v roce 1964 Charles Hard Townes, Nikolaj Gennadijevič Basov, Aleksandr Michailovič Prochorov za rozvoj kvantové elektrodynamiky, který vedl ke konstrukci laserů a maserů, roku 1981 Nicolaas Bloembergen a Arthur Leonard Schawlow za příspěvek k rozvoji laserové spektroskopie, v roce 1989 Norman F. Ramsey za vynález metody oddělených oscilátorů zpřesňující detekci rezonancí ve vodíkových maserech a cesiových hodinách (Ramseyovy proužky) a spolu s ním Hans G. Dehmelt a Wolfgang Paul za vývoj metody iontových pastí, v roce 1997 Steven Chu, Claude Cohen-Tannoudji a William D. Phillips za metody chlazení a zachycení atomů světlem a v roce 2001 Eric A. Cornell, Wolfgang Ketterle, Carl E. Wieman za dosažení Boseovy-Einsteinovy kondenzace.

Motivací pro další zjemňování spektroskopických metod a zpřesňování měření frekvencí kvantových přechodů je jednak základní výzkum — v současnosti například test neměnnosti konstanty jemné struktury, testy kvantové elektrodynamiky, výzkum symetrie mezi hmotou a antihmotou — a jednak samozřejmě přímé aplikace v oblasti etalonáže času a délky.

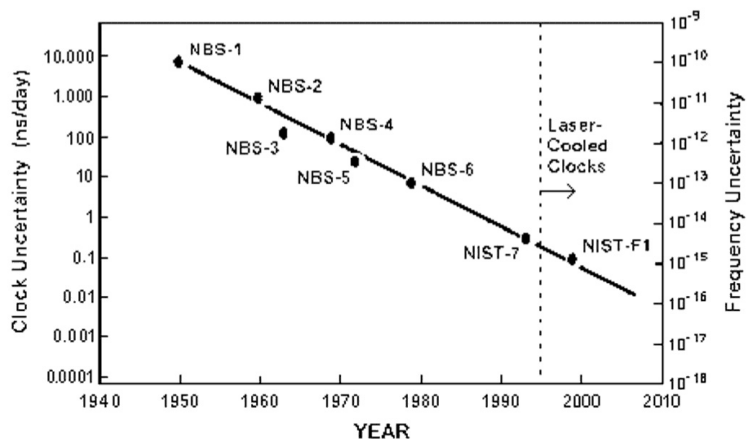
Za posledních 50 let se přesnost etalonů času a frekvence — cesiových hodin — zvýšila o 5 řádů. Původní realizace v 50. letech minulého století dosahovaly relativní nejistoty  $10^{-10}$ , současné cesiové fontány s laserem chlazenými, zachycenými a vystřelenými atomy dosahují relativní nejistoty pod  $10^{-15}$ . Tento podivuhodný pokrok je ilustrován na obrázku 1. Dvoje takovéto hodiny by se po deseti tisíci letech chodu „rozešly“ o pouhé 0,3 milisekundy.

Cesiové hodiny detekují a zpracovávají frekvenci 9,192 631 770 GHz, která odpovídá přechodu mezi dvěma hyperjemnými hladinami základního stavu atomu cesia 133 při teplotě 0 K, a tím realizují současnou SI definici sekundy.

V oblasti optických frekvencí existuje řada kvantových přechodů s vyšší kvalitou (poměrem frekvence spektrální čáry a šířky této čáry), než je uvedený přechod cesia. Optické etalony frekvence, které jsou na nich založené, dosahují již řadu let lepší krátkodobé stability než cesiové hodiny a v posledních letech již i mírně lepší opakovatelnosti. Jejich využití pro měření času (a případnou změnu definice sekundy) však donedávna bránila neexistence spolehlivého „hodinového stroje“, který by dokázal optické frekvence — stovky THz (např.  $5 \cdot 10^{14}$  Hz) — integrovat (fázově koherentně čítat).

---

<sup>1)</sup> Mj. další rozlišení struktury spektrálních čar, porovnání mezinárodního prototypu metru a vlnové délky kadmiové čáry  $\sim 644$  nm s nejistotou  $5 \cdot 10^{-7}$ .



Obr. 1. Zpřesňování cesiových hodin  
(převzato z <http://tf.nist.gov/cesium/fountain.htm>).

J. Hall a T. Hänsch přispěli v této oblasti vývojem nových citlivých spektroskopických metod subdopplerovské detekce optických kvantových přechodů, pokrokem ve frekvenční stabilizaci laserů, podílem na měření optických frekvencí koherentními řetězci v 70. až 90. letech a od roku 1999 podstatným zjednodušením těchto měření pomocí hřebene kmitočtů generovaného femtosekundovým laserem.

## John L. Hall

John L. Hall se narodil roku 1934 v Denveru v Coloradu, studoval fyziku na Carnegie Institute of Technology v Pittsburghu v Pensylvánii, titul bakaláře (BS) získal v roce 1956, magistra (MS) 1958 a doktorát (PhD) roku 1961 na Carnegie-Mellon University tamtéž prací *Electron spin resonance of interstitial hydrogen atoms in CaF<sub>2</sub>*.

Od ukončení studií až do odchodu do důchodu v roce 2004 pracoval v JILA<sup>2)</sup> — společné laboratoři amerického národního metrologického/normalizačního úřadu NBS (dnes NIST) a Coloradské univerzity v Boulderu v Coloradu, kde dlouhá léta vedl skupinu zabývající se spektroskopií, stabilizovanými lasery, atomovými hodinami, základními konstantami a přesným měřením.

John L. Hall publikoval přes 250 prací v prestižních fyzikálních časopisech a má registrováno šest patentů, jeden z nich spolu s Th. W. Hänschem<sup>3)</sup>.

Jedním z velmi úspěšných větších projektů, na kterých se J. Hall podílel (tehdy pod vedením K. M. Evenson), je změření rychlosti světla, stručně popsané v následujících odstavcích.

V roce 1958 změřil K. D. Froome [1] rychlost světla  $c$  současným určením frekvence  $f$  a vlnové délky  $\lambda$  milimetrových vln 72 GHz pomocí rádiového interferometru jako

<sup>2)</sup> Zkratka JILA původně znamenala Joint Institute for Laboratory Astrophysics.

<sup>3)</sup> Jejich seznam je uveden na <http://jilawww.colorado.edu/sro/cv/hall.pdf>

$c = \lambda f$  s relativní nejistotou  $3 \cdot 10^{-7}$  (metr byl tehdy ještě definován vzdáleností rysek na mezinárodním platino-iridiovém prototypu). Evensonův projekt [2] využil stejného principu, ale s tisíckrát kratší vlnovou délkou infračerveného He-Ne laseru  $3,39 \mu\text{m}$  (s frekvencí 88 THz).

J. Hall připravil frekvenčně stabilizovaný laser pomocí saturované absorpce v metanu [3] a třicetimetrový vakuový interferometr<sup>4)</sup> pro porovnání jeho vlnové délky s vlnovou délkou oranžové čáry kryptonové výbojky, jejíž násobek od roku 1960 definoval metr. Pro přechod  $\nu_3$ , P(7), komponentu  $F_2^{(2)}$  metanu  $^{12}\text{CH}_4$  získal hodnotu  $3,392\,231\,376 \mu\text{m}$  s relativní nejistotou  $3,5 \cdot 10^{-9}$ , která byla omezena asymetrií kryptonové čáry<sup>5)</sup>, neboť reprodukovatelnost metanem stabilizovaných laserů zjištěná frekvenčním porovnáním dvou obdobných laserů byla řádově lepší.

Pro změření frekvence laseru sestavil Evensonův tým řetězec frekvenčně stabilizovaných generátorů (obr. 2) postupně násobící radiovou frekvenci klystronu  $\sim 10$  GHz až k  $\sim 8000$ krát vyšší frekvenci infračerveného laseru. Frekvenci prvního klystronu měřili

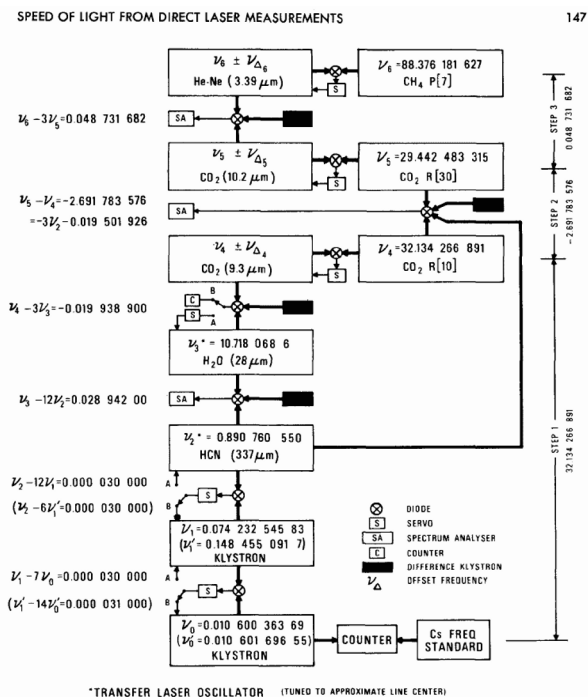


Figure 1. Stabilized Laser Frequency Synthesis Chain. All frequencies are given in THz; those marked with an asterisk were measured with a transfer laser oscillator tuned to approximate line center.

Obr. 2. Frekvenční řetězec pro měření frekvence infračerveného laseru porovnáním s cesiovými hodinami z [2].

<sup>4)</sup> V opuštěném zlatém dole Poor Man's Relief.

<sup>5)</sup> Současná hodnota je  $3,392\,231\,397\,326 \mu\text{m}$  s relativní nejistotou  $1,1 \cdot 10^{-11}$ .

čítačem řízeným cesiovými hodinami. Frekvenci dalšího klystronu  $\sim 150$  GHz (zjednodušeně řečeno) porovnali s čtrnáctou harmonickou prvního, jeho pátou harmonickou s frekvencí HCN maseru 891 GHz ( $337\ \mu\text{m}$ ), jeho dvanáctou harmonickou sečtenou s ofsetem 28 GHz s frekvencí  $\text{H}_2\text{O}$  maseru 10,7 THz ( $28\ \mu\text{m}$ ), jeho třetí harmonickou s odečteným ofsetem 20 GHz porovnali s frekvencí infračerveného  $\text{CO}_2$  laseru  $9,3\ \mu\text{m}$  (32 THz). Ten byl porovnán s laserem stejné vlnové délky frekvenčně stabilizovaným na přechod R(10) molekuly  $\text{CO}_2$ . Pomocí něj byla změřena frekvence dalšího  $\text{CO}_2$  laseru, tentokrát  $10,2\ \mu\text{m}$  (29 THz) stabilizovaného na přechod R(30) molekuly  $\text{CO}_2$  tak, že jejich rozdíl  $\sim 3$  THz překlenuli smíšením třetí harmonické HCN maseru 891 GHz a ofsetu  $\sim 20$  GHz. Třetí harmonická dalšího  $\text{CO}_2$  laseru  $10,2\ \mu\text{m}$  se liší již jen o měřitelných 49 GHz od frekvence cílového laseru  $3,39\ \mu\text{m}$ . Tímto způsobem se podařilo v roce 1972 změřit frekvenci He-Ne laseru  $3,39\ \mu\text{m}$  stabilizovaného komponentu  $\text{F}_2^{(2)}$  přechodu  $\nu_3$ , P(7) metanu  $^{12}\text{CH}_4$  a získat hodnotu  $88,376\ 181\ 627\ \text{THz}^6$ ) s relativní nejistotou  $6 \cdot 10^{-10}$ .

Z uvedených hodnot frekvence a vlnové délky byla určena rychlost světla  $c = 299\ 792\ 456,2\ \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$  s nejistotou  $1,1\ \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$  ( $3,5 \cdot 10^{-9}$  relativně). Na základě tohoto a dalších měření byla v r. 1975 přijata hodnota rychlosti světla  $c = 299\ 792\ 458\ \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$  a v roce 1982 zafixována novou definicí metru (od té doby je rychlost světla rovna této hodnotě bez nejistoty<sup>7</sup>).

Z již uvedeného je zřejmé, že takovéto klasické frekvenční řetězce byly velmi složité a nákladná zařízení. Je třeba si uvědomit, že všechny uvedené lasery a masery musí být jednofrekvenční (v režimu jednoho podélného modu), stabilní obdobně jako cílová nejistota a ty, které jsou použity pro generování vyšších harmonických, musí mít dostatečný výkon, aby použité nelineární jevy dávaly dostatečný signál pro spolehlivý frekvenční závěs.

Později byly podobné frekvenční řetězce prodlouženy až do viditelné oblasti, pro velkou náročnost byly budovány jen v několika málo světových laboratořích. Jejich nevýhodou rovněž je, že řetězec určený například pro měření jódem stabilizovaného laseru 633 nm není možné použít pro měření jiných vlnových délek — například laseru 612 nm, protože jeho frekvence se liší o příliš velký rozdíl 16 THz.

Předchozí zdlouhavý výklad je zde uveden především proto, aby vynikla relativní jednoduchost a přesnost metody femtosekundového hřebene, která je popsána na konci článku.

John L. Hall se dále věnoval vývoji jednofrekvenčních barvivových laserů, laserového chlazení a zachycování částic, generaci stlačených kvantových stavů světla, jódem stabilizovaným pevnolátkovým (SHG Nd:YAG) laserům, vývoji atomových fontán a femtosekundovým frekvenčním hřebenům. Je po něm pojmenována velmi cenná a často používaná Poundova-Dreverova-Hallová metoda detekce spektrálních čar pomocí postranních pásem vytvořených fázovým modulátorem [4]: při ideální fázové modulaci nedochází k modulaci amplitudy, ale k vytvoření postranních frekvenčních pásem (lišících se od nosné frekvence o frekvenci, se kterou je fáze modulována).

<sup>6</sup>) Současná hodnota je  $88,376\ 181\ 600\ 200\ \text{Hz}$  s relativní nejistotou  $1,1 \cdot 10^{-11}$ .

<sup>7</sup>) Metr je vzdálenost, kterou urazí světlo ve vakuu za  $1/299\ 792\ 458\ \text{s}$ .

Pouze pokud ve spektroskopickém experimentu dojde k relativní změně amplitud nebo fází postranních pásem, vytváří jejich interference amplitudovou modulaci výstupního signálu; z ní lze ve směšovači řízeném původním modulačním signálem získat stejnosměrný signál úměrný relativní pozici nosné frekvence a středu detekované spektrální čáry. Tato metoda a její modifikace se používají při závěsu frekvence laserů na stabilní referenční rezonátory s vysokou kvalitou (lze tak dnes dosáhnout zúžení laserové čáry až na úroveň 1 Hz) nebo pro detekci spektrálních čar.

## Theodor W. Hänsch

Theodor W. Hänsch se narodil 30. října 1941 v Heidelbergu v SRN. V Heidelbergu vystudoval gymnázium i univerzitu, doktorát z fyziky získal v roce 1969. Po ukončení studia odjel do Spojených států a v letech 1970–72 pracoval jako asistent Arthura L. Schawlowa (NC 1981), pak 3 roky jako docent a do roku 1986 jako profesor fyziky, vše na Stanfordově univerzitě v Kalifornii.

Poté se vrátil do Německa, kde pracuje jako ředitel Ústavu Maxe Plancka pro kvantovou optiku (MPQ) v Garchingu a působí jako profesor fyziky na mnichovské univerzitě (Ludwig-Maximilians-Universität München).

$$\begin{aligned}
 F_{(1S-2S)} &= 2\,466\,061\,102\,474\,851(25) \text{ Hz} \\
 R_\infty &= 10\,973\,731.568\,525(84) \text{ m}^{-1} \\
 L_{1S} &= 8172,840(22) \text{ MHz} \\
 R_\infty &= \frac{m_e c^4}{(4\pi\epsilon_0)^2 2\hbar^2 c} \\
 \frac{1}{\lambda_{\text{vac}}} &= \frac{R_\infty}{1 + \frac{m_e}{M}} \left( \frac{1}{n_1^2} + \frac{1}{n_2^2} \right); \quad n_2 > n_1
 \end{aligned}$$

Obr. 3. Hodnoty konstant vodíkového atomu podle <http://www.mpg.mpg.de/~haensch/hydrogen/h.html>

Theodor W. Hänsch je autorem nebo spoluautorem více než 400 publikací. Již v roce 1968 provedl první subdopplerovskou detekci spektra molekuly jódu s rozlišením hyperjemných komponent [5], v roce 1971 se poprvé podařila subdopplerovská detekce sodíkových D čar — rozlišení hyperjemné struktury základního stavu [6]. V r. 1972 publikuje první z dlouhé řady významných prací o vodíkovém atomu — rozlišení jemné struktury červené čáry vodíku  $H\alpha$  (Lambův posun) [7], později i přesné určení Lambova posuvu základního stavu 1s jako rozdílů frekvencí přechodů 1s-2s (dvoufotonově) a 2s-4s [8] a řadu zpřesnění určení Rydbergovy konstanty  $R_\infty$ , která vystupuje ve vztazích pro výpočet vlnových délek spektrálních čar vodíku podobných atomů (obr. 3,  $M$  hmotnost jádra). Tato konstanta je nyní nejpřesněji určenou fyzikální konstantou a její hodnota tedy může být využita pro fitování (poměrů) základních fyzikálních konstant (vztahy na obr. 3).

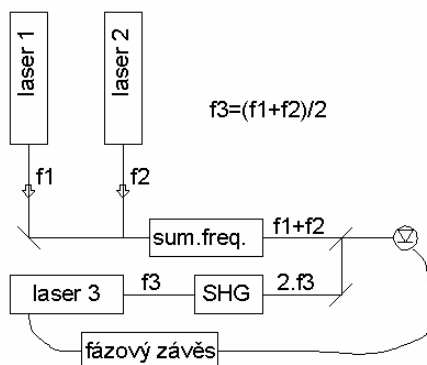
Jedním ze současných předmětů jeho vědeckého zájmu je chlazení a zachycení anti-  
vodíku a test symetrie hmoty a antimoty porovnáváním spektra vodíku a antivodíku.

Theodor W. Hänsch navrhl novou metodu polarizační spektroskopie pro zvýšení  
citlivosti subdopplerovské spektroskopie [9], věnoval se chlazení a zachycování atomů  
včetně Boseovy-Einsteinovy kondenzace a návrhu miniaturních elektronických čipů  
pro její dosažení.

Z opakovaných porovnání kvantových etalonů frekvence lze stanovit mez časové  
nestability fyzikálních konstant — konstanta jemné struktury se nemůže měnit více  
než  $4 \cdot 10^{-15}$  za rok ( $\alpha'/\alpha = (-0,9 \pm 2,9) \times 10^{-15}/\text{rok}$ ) [10]. Tento laboratorní „kos-  
mologický“ experiment je důležitým testem hypotéz vyplývajících z astronomických  
měření [11].

Podrobněji opět popíšeme revoluční přístup k měření optických kmitočtů.

Th. Hänsch ukázal, že absolutní určení frekvence laseru je možné i bez využití řetězce  
mikrovlnných a terahertzových oscilátorů, maserů a infračervených laserů. Pokud  
změříme rozdíl mezi základní frekvencí  $f$  frekvenčně stabilizovaného (kontinuálního)  
laseru a jeho druhou harmonickou  $2f$  (dvojnásobnou frekvencí, kterou lze dnes již  
velmi účinně generovat nelineárními optickými jevy), bude tím určena i frekvence  
laseru (neboť rozdíl mezi první a druhou harmonickou je roven základní frekvenci:  
 $2f - f = f$ ).



Obr. 4. Princip děliče optického frekvenčního rozdílu.

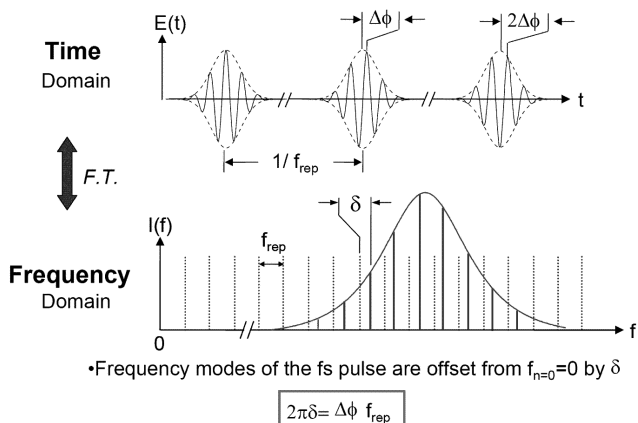
K tomuto účelu vyvinula Hänschova skupina nejprve takzvaný dělič optického  
frekvenčního intervalu (obr. 4). Máme-li dva stabilizované lasery různých (i velmi  
vzdálených) frekvencí  $f_1$  a  $f_2$ , můžeme stabilizovat frekvenci  $f_3$  třetího laseru přesně  
doprostřed mezi jejich frekvence: nejprve je vytvořena součtová frekvence  $f_1 + f_2$   
a druhá harmonická třetího laseru  $2f_3$ . Cílem je, aby tyto produkty měly stejnou  
frekvenci. Jejich interferencí na fotodiodě získáme kvalitní chybový signál umožňující  
fázový závěs  $f_3$  [12]. Pomocí třinácti stupňů takovýchto „děličů“ by bylo možné převést  
frekvenční rozdíl např. 300 THz na měřitelných 37 GHz.

Druhou, ještě překvapivější cestou je využití hřebene kmitočtů femtosekundového  
laseru.



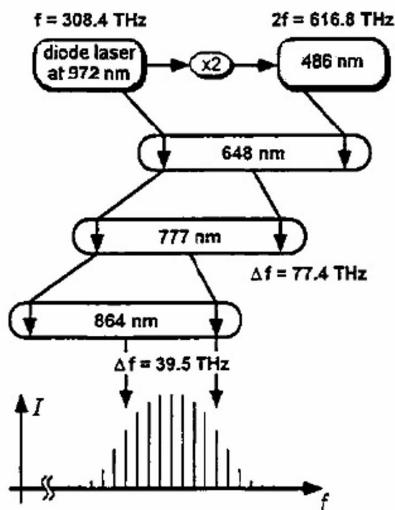
Z Fourierovy transformace („relací neurčitosti čas energie“) vyplývá, že krátký puls nemůže mít úzké spektrum, ale naopak: čím kratší puls je, tím širší spektrum musíme pro jeho generování použít a tím hůře je definována frekvence „nosné“ (např. pro 10 fs na 800 nm je nutné spektrum šířky přibližně 50 nm). Proto se dvě oblasti laserové fyziky — jedna usilující o nejkratší pulsy (nejvyšší časové rozlišení, pulsní lasery) a druhá usilující o co nejužší spektrální čáry (přesné frekvence, kontinuální lasery) naprosto odlišovaly. Díky invenci T. Hänsche se podařilo tyto oblasti spojit a posunout hranice možností obou z nich — jednak generovat a přesněji a snadněji měřit optické frekvence, navíc i vytvářet kratší a reprodukovatelnější pulsy s vyšším špičkovým výkonem.

Jeden krátký puls má tedy široké spojité spektrum. Ovšem pravidelná řada takovýchto opakujících se pulsů (vlak pulsů) má spektrum stejně široké, ale složené z hřebene úzkých čar, jejichž frekvence se od sebe vzájemně liší o opakovací frekvenci vlaku pulsů  $f_{\text{rep}}$ . Tyto frekvence odpovídají podélným modům pulsního laseru a jejich synchronizace je základní podmínkou pro generaci ultrakrátkých pulsů. Příkladem je titansafirový laser ( $\text{Ti:Al}_2\text{O}_3$ ) se spektrem 760–810 nm, pro (lineární) délku rezonátoru 0,75 m je doba oběhu 5 nanosekund, opakovací frekvence 200 MHz a spektrum je složeno ze 100 000 komponent. Absolutní polohy těchto komponent a jejich stabilita ovšem závisí na tom, jak přesně shodné a pravidelné pulsy ve vlaku jsou — tedy na tom, jak stabilní je optická délka laseru (skutečná délka + index lomu + disperze) a čerpací výkon. V časové obálce jednoho velmi krátkého pulsu je jen několik (např. 10) period nosné světelné frekvence a jedno z maxim nemusí přesně „zapadnout“ do maxima obálky (obr. 5) a vzájemná fáze nosné a obálky se v čase (puls od pulsu) mění. Rychlost změny této vzájemné fáze závisí na rozdílu fázové rychlosti nosné a grupové rychlosti pulsu a označíme ji jako ofsetovou frekvenci  $f_{\text{ofs}}$  (*carrier-envelope offset frequency*). Pomocí Fourierovy transformace periodické časové obálky pulsů (vlaku) lze ukázat, že frekvenci každé komponenty hřebene můžeme vyjádřit jako  $f_n = n \cdot f_{\text{rep}} + f_{\text{ofs}}$ , kde  $n$  je (její) přirozené číslo. Opakovací frekvenci lze snadno detekovat a stabilizovat na zvolenou hodnotu regulací délky rezonátoru laseru například piezokrystalem.



Obr. 5. Opakovací a ofsetová (zde  $\delta$ ) frekvence femtosekundového hřebene (převzato z [15]).

Pomocí takového hřebene a tří děličů optického frekvenčního intervalu v MPQ v roce 1998 poprvé absolutně změřili frekvenci laseru 972 nm, jehož čtvrtá harmonická 243 nm byla současně použita pro měření frekvence vodíkového přechodu 1s-2s [13] (obr. 6).



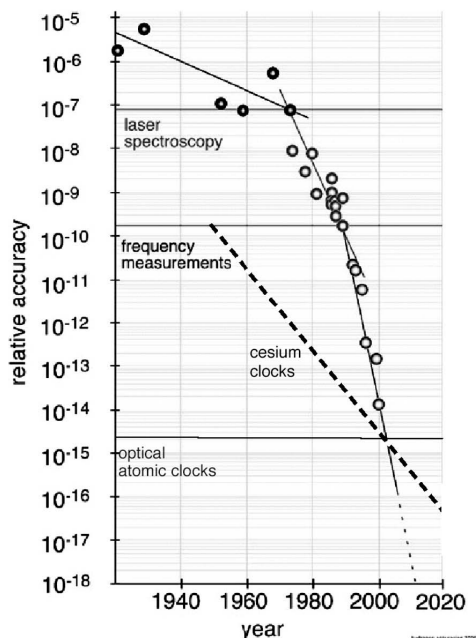
Obr. 6. Schéma prvního absolutního měření optických frekvencí s využitím frekvenčního hřebene fs laseru z [13].

Přímé měření ofsetové frekvence je možné, pokud je spektrum hřebene rozšířeno přes celou „optickou oktávu“ — tak, aby obsahovalo i dvojnásobek frekvence svého infračerveného okraje (u titansafírových hřebenů např. 1050 nm i 525 nm). Takového rozšíření lze dosáhnout i pro pulsy s relativně nízkým špičkovým výkonem samofázovou modulací v mikrostrukturním fotonickém vlákně. Pro detekci ofsetové frekvence pak vygenerujeme druhou harmonickou infračervené komponenty hřebene  $f_n$  a smísíme ji s komponentou o  $\sim$ dvojnásobné frekvenci  $f_{2n}$ . Jejich rozdílová frekvence je přímo rovna ofsetové:  $2f_n - f_{2n} = 2(nf_{\text{rep}} + f_{\text{ofs}}) - (2nf_{\text{rep}} + f_{\text{ofs}}) = f_{\text{ofs}}$ . Stabilizaci takto detekované ofsetové frekvence je možné zajistit regulací disperze uvnitř rezonátoru femtosekundového laseru (u titansafírového laseru zasouváním skleněného klínu a regulací čerpacího výkonu).

Určením opakovací a ofsetové frekvence jsou určeny frekvence všech komponent hřebene a je tak generována hustá stupnice (stovek tisíc nebo milionů) přesných a koherentních optických kmitočtů pokrývající viditelné a blízké infračervené spektrum. Frekvence jakéhokoli laseru pak může být určena změřením jeho frekvenčního rozdílu od nejbližší komponenty hřebene. Lze tak přímo a relativně velmi snadno zprostředkovat porovnávání radiových frekvencí (cesiových hodin) a optických etalonů frekvence.

Tento způsob generace a stabilizace hřebene frekvencí navrhl v roce 1997 T. Hänsch, byl realizován a publikován téměř současně Hänschovou i Halovou skupinou [14, 15]

## Optical Spectroscopy of Hydrogen



Obr. 7. Porovnání zpřesňování optických etalonů a cesiových hodin. Převzato z [16].

a záhy byla provedena řada podrobných testů pro vyloučení případných systematických chyb tohoto způsobu měření frekvencí: porovnání výsledků s klasickými koherentními řetězci (s rel. nejistotou  $\sim 10^{-14}$ ), měření homogenity intervalu hřebene (pomocí děličů optického frekvenčního intervalu  $\sim 10^{-17}$ ), porovnání měření frekvence laseru a jeho vlastní druhé harmonické ( $\sim 10^{-20}$ ), měření jednoho laseru dvěma různými hřebeny (řízenými stejnou radiovou referencí  $\sim 10^{-16}$ ).

Femtosekundové hřebeny lze také „zapojit“ obráceně — tak, že jsou řízeny optickým etalonem frekvence a generují radiofrekvenční signál a pracují tak jako „hodinový stroj“ pro optický oscilátor. V tomto režimu dosahují také nejlepších výsledků — signály dvou různých hřebenů řízených jedním optickým etalonem se shodují v řádu  $10^{-20}$  relativně a díky kvalitě optických etalonů frekvence dosahují stability v řádu  $10^{-14}$  již pro jednosekundové vzorky.

Zpřesňování detekce optických přechodů a měření optických frekvencí je znázorněno na obrázku 7. K předpověděnému protnutí závislosti v roce 2005 skutečně došlo, optický etalon frekvence se zachyceným iontem rtuti realizovaný v JILA/NIST [17] má vlastní nejistotu  $1,2 \cdot 10^{-16}$  relativně<sup>8</sup>).

**Poznámka.** Hyperjemnou optickou spektroskopií a frekvenční stabilizací laserů se v ČR zabývá Český metrologický institut (ČMI) a Ústav přístrojové techniky AV ČR. Optické

<sup>8</sup>) Celková nejistota v SI sekundách je ovšem dána současnou nejistotou cesiové fontány  $\sim 6 \cdot 10^{-16}$  rel.

etalony vyvinuté v ČMI jako etalony jednotky délky dosahují nejistoty až  $5 \cdot 10^{-12}$  rel. a stability  $2 \cdot 10^{-13}$  rel. pro jednosekundové vzorky a  $5 \cdot 10^{-14}$  rel. pro 100 s a byly kromě mnoha mezinárodních porovnání také absolutně změřeny pomocí femtosekundových hřebenů v BIPM (Mezinárodní úřad pro míry a váhy, Sevres u Paříže), BEV (Rakouský spolkový úřad pro míry, váhy a zeměměřičství) a MPQ (Ústav Maxe Plancka pro kvantovou optiku v Garchingu u Mnichova) v letech 2002 až 2005. Femtosekundový generátor hřebene optických kmitočtů je v ČMI v provozu od prosince 2005.

## L i t e r a t u r a

- [1] FROOME, K. D.: *A new determination of the free-space velocity of electromagnetic waves*. Proc. Roy. Soc. London, Ser. A 247 (1958), 109–122.
- [2] EVENSON, K. M., WELLS, J. S., PETERSEN, F. R., DANIELSON, B. L., DAY, G. W., BARGER, R. L., HALL, J. L.: *Speed of light from direct frequency and wavelength measurements of the methane-stabilized laser*. Phys. Rev. Lett. 29 (1972), 1346–1349.
- [3] BARGER, R. L., HALL, J. L.: *Pressure Shift and Broadening of Methane Line at 3.39  $\mu$  Studied by Laser-Saturated Molecular Absorption*. Phys. Rev. Lett. 22 (1969), 4–8.
- [4] DREVER, R. W. P., HALL, J. L. et al.: *Laser phase and frequency stabilization using an optical resonator*. Appl. Phys. B 31 (1983), 97.
- [5] HÄNSCH, T. W., TOSCHEK, P.: *I.E.E.E. J. Quant. Electr.* 4 (1968), 467.
- [6] HÄNSCH, T. W., SHAHIN, I. S., SCHAWLOW, A. L.: Phys. Rev. Letters 27 (1971), 707.
- [7] HÄNSCH, T. W., SHAHIN, I. S., SCHAWLOW, A. L.: Nature 235 (1972), 63.
- [8] WIEMAN, C., HÄNSCH, T. W.: Phys. Rev. A 22 (1980), 1.
- [9] WIEMANN, C., HÄNSCH, T. W.: Phys. Rev. Lett. 36 (1976), 1170.
- [10] FISCHER, M., KOLACHEVSKY, N., ZIMMERMANN, M., HOLZWARTH, R., UDEM, TH., HÄNSCH, T. W., ABGRALL, M., GRÜNERT, J., MAKSIMOVIC, I., BIZE, S., MARION, H., PEREIRA DOS SANTOS, F., LEMONDE, P., SANTARELLI, G., LAURENT, P., CLAIRON, A., SALOMON, C., HAAS, M., JENTSCHURA, U. D., KEITEL, C. H.: *New Limits on the Drift of Fundamental Constants from Laboratory Measurements*. Phys. Rev. Lett. 92 (2004), 230802-1-230802-4.
- [11] WEBB, J. K., MURPHY, M. T., FLAMBAUM, V. V., DZUBA, V. A., BARROW, J. D., CHURCHILL, C. W., PROCHASKA, J. X., WOLFE, A. M.: *Further Evidence for Cosmological Evolution of the Fine Structure Constant*. Phys. Rev. Lett. 87 (2001), 091301.
- [12] TELLE, H., MESCHEDE, D., HANSCH, T.: *Realization of a new concept for visible frequency division: phase locking of harmonic and sum frequencies*. Opt. Lett. 15 (1990), 532.
- [13] UDEM, TH., REICHERT, J., HOLZWARTH, R., KOUROGI, M., HÄNSCH, T. W.: *The Measurement of Large Optical Frequency Differences and the Design of a new Type of Frequency Chain*. Joint Meeting of the EFTF-FCS, Besançon 1999 IEEE Proceedings, 620–625.
- [14] REICHERT, J., NIERING, M., HOLZWARTH, R., WEITZ, M., UDEM, TH., HÄNSCH, T. W.: *Phase Coherent Vacuum-Ultraviolet to Radio Frequency Comparison with a Mode-Locked Laser*. J. PRL 84 3232, 10 April 2000.
- [15] JONES, D. J., DIDDAMS, S. A., RANKA, J. K., STENTZ, A., WINDELER, R. S., HALL, J. L., CUNDIFF, S. T.: *Carrier-envelope phase control of femtosecond mode-locked lasers and direct optical frequency synthesis*. Science vol. 288, 28 (April 2000), 635–639.
- [16] HÄNSCH, T. W.: *Nobelovská přednáška* ([www.nobelprize.org](http://www.nobelprize.org)), nebo HÄNSCH, T. W.: In *Laser spectroscopy: Proceedings of the 16th International Conference on Laser Spectroscopy*, Eds. P. HANNAFORD, A. I. SIDOROV, H.-A. BACHOR, K. G. BALDWIN (World Scientific, Singapore 2004).
- [17] BERQUIST, J.: *Prezentace na zasedání společné pracovní skupiny CCL a CCTF v BIPM, Sevres, září 2005*. Bude publikováno v Nature.