



# CURIOSIDADES DA FÍSICA

José Maria Filardo Bassalo

[www.bassalo.com.br](http://www.bassalo.com.br)

## A Espectroscopia Laser e o Prêmio Nobel de Física (PNF) de 2005 – Parte II: Hall e Hänsch.

O PNF de 2005 foi concedido aos físicos, os norte-americanos Roy Jay Glauber (n.1925) e John Lewis “Jan” Hall (n.1934), e o alemão Theodor Wolfgang Hänsch (n.1942). Glauber, pela formulação da **teoria quântica da coerência óptica**, e Hall e Hänsch pelo desenvolvimento da **espectroscopia laser** de alta resolução. Neste verbete, vamos analisar os trabalhos de Hall e de Hänsch.

Nascido em 21 de agosto de 1934, em Denver, Colorado (USA), Hall completou seu *High School* em uma escola pública de Denver. Ao receber uma Bolsa de Estudos da Westinghouse (*Westinghouse Scholarship*), Hall foi estudar na hoje *Carnegie Mellon University*, onde obteve os graus de Bacharel (1956), de Mestre (1958) e de Doutor (1961) em Física. Sua Tese de Doutorado foi orientada pelo físico norte-americano Robert T. Schumacher e tratou da estrutura superfina dos átomos de hidrogênio (H) intersticial em cristais de fluoreto de cálcio ( $\text{CaF}_2$ ). Em 1962, Hall começou a desenvolver suas pesquisas em **tecnologia de laser** no *National Institute of Standards and Technology* (NIST) (onde se aposentou em 2004). A partir de 1967, continuou essas pesquisas também no *Joint Institute for Laboratory Astrophysics* (JILA), da *Universidade de Colorado*, em Boulder.

Hänsch nasceu no dia 30 de outubro de 1941, em Heidelberg, Alemanha. Em 1952, entrou no *Helmholtz Gymnasium* de sua cidade natal, onde seu professor de Física e Química, Dr. Manpel, permitiu-lhe realizar algumas experiências nos equipamentos do laboratório desse Ginásio. Além disso, Hänsch começou a ler livros de ciência, incluindo divulgação e ficção, na Biblioteca Pública. Depois de concluir o *Abitur* (diploma de licença de Liceu ou Ginásio), em 1961, Hänsch entrou para a *Ruprecht-Karls-Universität Heidelberg*, na qual obteve o *Vordiplom* (diploma de graduação), em 1963, e seu Doutorado, em 1969, trabalhando com o físico alemão Peter E. Toschek (n.1933) no revolucionário dispositivo quanto-óptico, o **laser**, que havia sido inventado, em 1960, primeiro pelo físico norte-americano Theodore Harold Maiman (1927-2007), em 07 de julho, e depois pelos físicos norte-americanos Ali Javan (n.1926) (de origem iraniana), William Ralph Bennett Junior (1930-2008) e Donald Richard Herriot (1928-2007), em 12 de dezembro (vide verbete nesta série). Em sua Tese de Doutorado, sob a orientação de Toschek, Hänsch estudou a espectroscopia de saturação em **lasers** e a transparência induzida eletromagneticamente. Em março de 1970, Hänsch foi para a *Stanford University* (SU) trabalhar no laboratório do físico norte-americano Arthur Leonard Schawlow (1921-1999; PNF, 1981), que se tornara célebre por haver, juntamente com o físico norte-americano Charles Hard Townes (n.1915; PNF, 1964), em 1958, sugerido a invenção do **laser**. Hänsch ficou na SU até abril de 1986, quando então voltou ao seu país natal, Alemanha, para ser Professor de Física Geral e Experimental da *Universidade de Munich*, e dirigir o hoje *Max Planck Institut für Quantenoptik*, que havia sido criado, em 1981, em Garching. É interessante destacar que quando ensinava e

pesquisava na SU, Hansch teve oportunidade de presenciar o nascimento da **microcomputao**, ocorrido no meado da decada de 1970, como frequentador assíduo dos seminários realizados no *Stanford Hombrew Computer Club*, dos quais participavam os magnatas e inventores norte-americanos William (“Bill”) Henry Gates III (n.1955), co-fundador da *Microsoft* (1975) e Steven (“Steve”) Paul Jobs (1955-2011), co-fundador da *Apple Computer* (1976); este, inclusive, chegou a frequentar as aulas de Eletricidade e Magnetismo ministradas Hansch.

A invenção do **laser** e seu desenvolvimento posterior mostraram a existência de **fenmenos ópticos não-lineares**, e que só só poderiam ser resolvidos com um tratamento quântico da ptica. Com efeito, logo em 1961 (*Physical Review Letters* **7**, p. 118), os físicos norte-americanos Peter Alden Franken (1928-1999), A. E. Hill, C. W. Peters e G. Weinrich apresentaram o resultado de uma experiência na qual conseguiram duplicar a frequência de um pulso de **laser de rubi** (xido de alumínio:  $Al_2O_3$ ) que atravessou um cristal de quartzo (dióxido de silício:  $SiO_2$ ). Esta experiência, conhecida como **geração de um segundo harmônico**, foi uma dos primeiros resultados não-lineares da **ptica Quântica**. Ainda em 1961 (*Physical Review Letters* **7**, p. 229), W. Kaiser e C. G. B. Garrett anunciaram que haviam observado a absorção de dois fótons de um pulso de **laser de rubi** que atravessara o  $CaF_2$  dopado com íons de európio ( ${}_{63}Eu^{+2}$ ). Os outros fenmenos que se seguiram foi a da **coerência óptica**, resolvido teoricamente por Glauber (vide verbete anterior), e o da **estabilidade da frequência do laser (espectroscopia laser)**, estudada por Hall e Hansch, como veremos a seguir.

Conforme vimos em verbetes desta série, em 1927 e 1928, o físico inglês Paul Adrien Maurice Dirac (1902-1984; PNF, 1933) formulou, respectivamente, a Teoria Quântica da Radiação (TQR) e a famosa Equação de Dirac para descrever relativisticamente o elétron em sua interação com a matéria. Contudo, quando ele aplicou essa sua equação para descrever os níveis de energia do elétron no átomo de hidrogênio (H), percebeu que havia uma degenerescência entre os níveis de energia  $2s_{1/2}$  e  $2p_{1/2}$ , ou seja, eles apresentavam o mesmo valor. Registre-se que, de um modo geral, os níveis de energia dos elétrons atômicos são representados pela notaqo:  $n, l, m, s$ , onde  $n$ ,  $l$  e  $m$  ( $= \pm s$ ) representam, respectivamente, os números quânticos: **principal** (energia), **momento angular orbital**, **momento angular total**, e  $s$   o **spin**. Os espectroscopistas do nomes especiais ao  $n, l, m, s$ , chamando-o de **onda**; assim:  $s$  representa a “onda s”, e  $p$ , a “onda p”. Além disso, a TQR de Dirac apresentava outras divergências (infinitos), quando se estudava a interação da radiação eletromagnética com a matéria. As dificuldades desses trabalhos de Dirac mencionadas acima comearam a ser contornadas, a partir de 1947. Com efeito, em 1947, a medida da diferena ( $\sim 0.033 \text{ cm}^{-1}$ ) entre aqueles dois níveis do H – o hoje conhecido **deslocamento Lamb** (*Lamb shift*) - foi realizada pelos físicos norte-americanos Willis Eugene Lamb Junior (1913-2008; PNF, 1955) e Robert Curtis Retherford (1912-1981), usando a **espectroscopia de microondas**, usadas em **radar**. Ainda em 1947, comeou o desenvolvimento da *Quantum Electrodynamics* (QED), para contornar os infinitos citados acima (vide verbete nesta série).

Por outro lado, tmbm como vimos em verbetes desta série, a **espectroscopia óptica clássica** teve um grande sucesso na obtenção das raias espectrais do H [séries: Balmer (1885), Paschen (1908), Lyman (1914), Brackett (1922) e Pfund (1924)], bem como na obtenção do espectro energético dos efeitos: o magnético [Zeeman – normal (1896) e

anômalo (1898)] e o elétrico [Stark (1913)]. Contudo, o fato da luz das fontes emissoras [estrelas e lâmpadas de descarga de gases (*krypton*)] não ser coerente, essa espectroscopia apresentava limites de resolução. A invenção do **laser** – luz coerente – permitiu então o desenvolvimento da **espectroscopia de alta resolução** e, para o mesmo, foram importantes os trabalhos de Hall e de Hänsch, isoladamente, ou em conjunto. Vejamos como aconteceu essa **espectroscopia quântica**. Para isso, vamos seguir a ordem cronológica.

Em 1962 (*Physical Review* **126**, p. 580), Bennett Junior foi o primeiro a estudar a saturação de ondas estacionárias em uma **cavidade-laser**. Ainda em 1962 (*Journal of the Optical Society of America* **7**, p. 553), Javan, E. A. Ballik e W. L. Bond foram os primeiros a superpor dois diferentes feixes de **lasers** usando um divisor de feixes e observar um batimento; essa observação foi extraordinária, pois mostrou que a **luz laser** pode se comportar como uma de onda de rádio clássica. Desse modo, uma **luz laser coerente** apresenta fase e amplitude bem definidas, de modo que seria possível contar suas ondulações (*ripples*). Contudo, em frequências altíssimas ( $\sim 500 \cdot 10^{12}$  oscilações segundo, ou:  $\sim 500$  THz) não havia, nessa época, contadores eletrônicos rápidos capazes de construir um contador de tais frequências. Em busca do mesmo, prosseguiram as pesquisas na **espectroscopia de alta-resolução** (EAR). Assim, em 1963, importantes resultados foram encontrados para o desenvolvimento da EAR. Com efeito, os físicos norte-americanos T. S. Jaseva, Javan e Charles Hard Townes (n.1915; PNF, 1964) (um dos descobridores do **laser**) (*Physical Review Letters* **10**, p. 165) estudaram a estabilidade da frequência do **laser He-Ne**. Por sua vez, em artigos independentes, Abraham Szöke e Javan (*Physical Review Letters* **10**, p. 521) e R. A. McFarlane, Bennett Junior e Lamb Junior (*Applied Physics Letters* **2**, p. 189) analisaram a EAR usando o **laser He-Ne** e encontraram um declive (*dip*) na espectroscopia de saturação [esse resultado foi explicado por Lamb Junior, em 1964 (*Physical Review* **A134**, p. 1429), por intermédio de uma teoria semiclássica do **maser óptico**, daí ser conhecido como *Lamb dip*]. O físico norte-americano Robert W. Terhune (*Bulletin of the American Physical Society* **8**, p. 359; *Solid State Design* **4**, p. 38) anunciou que havia realizado o chamado **espalhamento Raman anti-Stokes coerente** no qual dois feixes de **laser**, um com frequência fixa ( $\omega_L$ ) e o outro com frequência variável ( $\omega_S$ ), passaram através de um meio com uma transição eletrônica de frequência ( $\omega$ ) [esse espalhamento foi confirmado, em 1965 (*Physical Review* **A137**, p. 801), por P. D. Maker e Terhune]. Note que se denomina **transição Stokes** quando um átomo excitado decai de um estado intermediário emitindo um fóton de mais baixa energia que a do fóton primário que o excitou. Por outro lado, quando a energia do fóton emitido (secundário) é maior do que a do incidente, tem-se a **transição anti-Stokes**. Registre-se que esses nomes foram dados em homenagem ao físico e matemático inglês Sir Gabriel Stokes (1819-1903), que tratou dessas transições em seus estudos sobre a fluorescência, em 1852 (vide verbete nesta série).

Em 1964 (*Applied Physics Letters* **5**, p. 4), L. E. Hargrove, R. L. Fork e M. A. Pollack e, em 1965 (*Journal of Applied Physics* **36**, p. 388), A. Yariv usaram feixes multi-modais de **laser He-Ne** e conseguiram emitir uma sucessão de pulsos (*train*) em uma **cavidade-laser**. Nesses experimentos, eles mostraram que modos longitudinais de um **laser** são bem definidos e suas fases podem ser acopladas de modo a produzir um pulso curto de luz circulando no interior da cavidade. Em 1966, H. Kogelnik e T. Li (*Applied Optics* **5**, p. 967) explicaram a propagação de um **feixe laser**, com modo transversal de ordem mais alta e

descrita por uma função Hermite-Gaussiana, através de um sistema óptico, e A. J. DeMaria, D. A. Stetser e H. Heyman (*Applied Physics Letters* **8**, p. 22) produziram picos de **laser** com a largura de picosegundos ( $1 \text{ ps} = 10^{-12} \text{ s}$ ). Ainda em 1966, foi pela primeira vez obtida a **ação laser** em soluções líquidas coloridas [conhecida como o primeiro **dye laser** (*laser colorido*)], em trabalhos independentes, realizados por Peter P. Sorokin e Jack R. Lankard (*IBM Journal of Research and Development* **10**, p. 162) e por Fritz P. Schäfer, W. Schmidt e J. Volze (*Applied Physics Letters* **9**, p. 306). Esse resultado foi confirmado, em 1967 [*Institute of Electrical and Electronic Engineers (IEEE): Journal of Quantum Electronics* **3**, p. 101], por O. P. McDuff e S. E. Harris. Em 1968 (*IEEE: Journal of Quantum Electronics* **4**, p. 638), objetivando melhorar o padrão de medida do comprimento de uma **onda laser**, Hall analisou o *Lamb dip invertido* colocando algumas moléculas de gases absorventes no interior de uma **cavidade-laser**. A **biestabilidade óptica**, isto é, mais de um resposta (*output*) para uma mesma entrada (*input*), foi observada em 1968 (*Applied Physics Letters* **13**, p. 373), por P. H. Lee, P. B. Schoefer e W. C. Barker em uma experiência com uma célula de Ne numa **cavidade-laser He-Ne**. Por sua vez, o problema da absorção molecular na saturação de um **laser** foi investigado, em 1968 (*IEEE: Journal of Quantum Electronics* **4**, p. 467), por Hänsch e Toschek e, em 1969 (*Physical Review Letters* **22**, 4), por Hall e R. L. Barger. Ainda, em 1969, E. Jakeman e E. R. Pike (*Journal of Physics A: General Mathematical* **2**, p. 411) desenvolveram um tratamento matemático da **espectroscopia óptica digital**; G. C. Holst, E. Snitzer e R. Wallace (*IEEE: Journal of Quantum Electronics* **5**, p. 342) anunciaram que haviam obtido um efeito amplificador em um **laser He-Ne** operando com o comprimento de onda de  $1,06 \mu\text{m}$  (lembrar que  $\mu = 10^{-6}$ ); e Hänsch, R. Keil, A. Schabert, Christoph Schmelzer e Toschek (*Zeitschrift für Physik* **226**, p. 293) estudaram os efeitos de interferência quântica em sistemas atômicos de três níveis acoplados. Por fim, finalizando a década de 1960, portanto, em 1970, novos resultados para o desenvolvimento da **espectroscopia laser** foram obtidos. Com efeito, J. A. Myer, C. L. Johnson, E. Kierstead, R. D. Sharma e I. Itzkan (*Applied Physics Letters* **16**, p. 3) usaram um **laser de nitrogênio - laser N** - pulsado de ultravioleta para calibrar (*pump*) um **tunable dye laser** (TDL); Milton Birnbaum, P. H. Wendizowski e C. L. Fincher (*Applied Physics Letters* **16**, p. 436) e, independentemente, O. G. Peterson, S. A. Tuccio e B. B. Snavely (*Applied Physics Letters* **17**, p. 245) realizaram experiências com um **continuous-wave dye laser** (CWDL); os físicos russos L. S. Vasilenko, Veniamin P. Chebotayev e A. V. Shishaev (*Soviet Physics – JETP Letters* **12**, p. 113) sugeriram que a absorção de dois fótons, tipo **Doppler-livre** (ver verbete nesta série), poderia ser obtida em um gás; também os físicos russos Nikolai Gennadievich Basov (1922-2001; PNF, 1964) (um dos descobridores do **laser**), V. A. Daniychev, Popov e D. D. Khodkevich (*Soviet Physics – JETP Letters* **12**, p. 329) realizaram uma **ação laser** em moléculas de xenônio ( $\text{Xe}_2$ ) com  $176 \text{ nm}$  ( $1 \text{ nm} = 10^{-9} \text{ m}$ ); o físico francês Christian J. Bordé (n.1943) [*Comptes Rendus de l'Académie des Sciences (Paris)* **271**, p. 371] propôs um método para realizar a **espectroscopia laser**, usando propriedades da **luz laser** para conseguir o **espectro Doppler-livre** de gases externos ao **laser**; e Hänsch e Toschek (*Zeitschrift für Physik* **236**, p. 213) continuaram a estudar os efeitos de interferência quântica em sistemas atômicos de três níveis e acoplados.

Continuemos a analisar o desenvolvimento da **espectroscopia laser**. Vejamos o que aconteceu na década de 1970. Logo no começo dessa década, em 1971, Hänsch e Peter W. Smith (*Physical Review Letters* **26**, p. 740) e Hänsch e os físicos norte-americanos Marc D. Levenson e Arthur Leonard Schawlow (1921-1999; PNF, 1981) (um dos descobridores do

*laser*) (*Physical Review Letters* **27**, p. 707) desenvolveram um método para realizar a **espectroscopia laser**, usando propriedades da **luz laser** para conseguir o **espectro Doppler-livre** de gases sem haver a necessidade de colocá-los no interior da **cavidade-laser**. Ainda em 1971, D. van der Linde, A. Laubereau e W. Kaiser (*Physical Review Letters* **26**, p. 954) desenvolveram técnicas para obter pulsos ópticos bem pequenos, da ordem de ps; por sua vez, Hänsch, Issa S. Shahin e Schawlow (*Physical Review Letters* **27**, p. 707) construíram um **laser-dye de nitrogênio (laser N)** largamente harmonioso (*tunable*) e altamente monocromático que foi usado para obter o **espectro de saturação Doppler-livre**, usando linhas de ressonância atômicas arbitrariamente escolhidas; essa pesquisa foi continuada por Hänsch, em 1972 (*Applied Optics* **11**, p. 895), adicionando um telescópio entre a **cavidade laser-dye** e a rede de difração. Também, em 1972, Z. Bay e J. A. White [*Physical Review* **D5**, p. 796; *Physical Review Letters* **29**, p. 189 (este, com G. G. Luther)] e, independentemente, Hall, Kenneth Melvin Evenson (1932-2002), J. S. Wells, F. R. Petersen, B. L. Danielson, G. W. Day e R. L. Barger (*Physical Review Letters* **29**, p. 1346) apresentaram o resultado da medida da velocidade da luz por meio de **lasers** calibrados com desvios padrões da ordem de 1 m/s; R. Schieder, Herbert Walther e L. Wöste (*Optics Communications* **5**, p. 337) defletiram um feixe atômico por intermédio de um TDL; J. W. Shelton e Y. R. Shen (*Physical Review* **A5**, p. 1867) apresentaram os primeiros resultados sobre a geração harmônica de luz em cristais líquidos (*colestérico*), assim como mostraram que um pulso em uma **fibra óptica** poderia tornar-se uma onda solitária - o famoso **sóliton** (vide verbete nesta série); e Hänsch, Shahin e Schawlow (*Nature* **235**, p. 63) observaram a linha vermelha **Balmer- $\alpha$**  ( $H_{\alpha}$ ) por intermédio do TDL.

Ainda na década de 1970, novos resultados importantes para o desenvolvimento da **espectroscopia laser** foram obtidos. Assim, em 1973, Serge Haroche, Jeffrey A. Paisner e Schawlow (*Physical Review Letters* **30**, p. 948) usaram pulsos de **laser broadband (laser de banda larga)** para produzir batimentos quânticos em fluorescência; e os físicos franceses Bernard Cagnac, Gilbert Grynberg e F. Biraben [*Journal de Physique (Paris)* **34**, p. 845] anunciaram que haviam conseguido um sinal de absorção de dois-fótons que exibia estreita característica **Doppler-livre**. Esse resultado foi confirmado, em 1974, por esses três físicos franceses (*Physical Review Letters* **32**, p. 643) e, independentemente, por Levenson e o físico norte-americano Nicolaas Bloembergen (n.1920; PNF, 1981) (de origem holandesa) (*Physical Review Letters* **32**, p. 645) e por Hänsch, Harvey, G. Meisel e Schawlow (*Optics Communications* **11**, p. 50). Ainda em 1974 (*Optics Communications* **12**, p. 312), E. V. Baklanov e Chebotayev mostraram que se dois feixes de **laser** são dirigidos em sentido contrário, a primeira ordem dos deslocamentos (*shifts*) Doppler se cancelam. No ano seguinte, em 1975, Hänsch e Schawlow (*Optics Communications* **13**, p. 68) e, independentemente, os físicos norte-americanos David J. Wineland e Hans Georg Georg Dehmelt (n.1922; PNF, 1989) (de origem alemã) (*Bulletin of the American Physical Society* **20**, 637) sugeriram o mecanismo de **resfriamento Doppler (RD)** para diminuir a velocidade dos átomos por intermédio de um feixe de **laser** dirigido no sentido contrário ao movimento desses átomos (sobre o RD, ver verbete nesta série); Hänsch, Siu Au Lee, Richard Wallenstein e o físico norte-americano Carl E. Wieman (n.1951; PNF, 2001) (*Physical Review Letters* **34**, p. 307) registram o primeiro espectro **Doppler-livre**; Hänsch, Schawlow e o físico norte-americano William Martin Fairbank Junior (1917-1989) (*Journal of the Optical Society of America* **65**, p. 199) apresentaram o resultado da medida da intensidade da luz espalhada em

átomos de sódio (Na); Hyatt M. Gibbs e T. N. C. Venkatesen (*Journal of the Optical Society of America* **65**, p. 1184) obtiverem a **biestabilidade óptica** em uma **cavidade-laser** de 2,5 cm (com dois espelhos de 90% de reflexão e separados de uma distância de 11 cm) contendo vapor de Na em uma pressão em torno de  $10^{-6}$  Torr; e Hänsch, S. A. Lee e Wallenstein (*Physical Review Letters* **35**, p. 1262) observaram a transição de dois fótons entre os níveis  $2s_{1/2}$  e  $2p_{1/2}$  do H, excitados pelo segundo harmônico (2.430 Å;  $1 \text{ Å} = 10^{-10} \text{ m}$ ) de um **laser-dye** visível.

Até o final da década de 1970, novos resultados foram obtidos para o desenvolvimento da **espectroscopia laser**. Em 1976, Yariv mostrou como transmitir uma imagem tridimensional ao longo de guias de ondas ópticas; Mark E. Kaminsky, R. Thomas Hawkins, Frank V. Kowalski e Schawlow (*Physical Review Letters* **36**, p. 671) e, independentemente, Hänsch, Richard E. Teets, Richard Feinberg e Schawlow (*Physical Review Letters* **37**, p. 683) realizaram experiências sobre o bombeamento de moléculas por intermédio de **laser**; Hänsch e Wieman (*Physical Review Letters* **36**, p. 1170) observaram o **efeito Faraday inverso** (vide verbete nesta série) usando um novo método de **espectroscopia Doppler-livre**; Hall, Bordé e K. Uehara (*Physical Review Letters* **37**, p. 1339) usaram a **espectroscopia laser de alta resolução** e observaram dois picos de 2,163 kHz na estrutura espectral hiperfina ( $\lambda = 3,39 \mu\text{m}$ ) magnética de moléculas de metano ( $\text{CH}_4$ ); Hall, Bordé, C. V. Kunasz e D. G. Hummer (*Physical Review* **A14**, p. 236) analisaram a forma de uma linha de absorção saturada por intermédio de um cálculo perturbativo assumindo um modo gaussiano de um feixe de luz; S. N. Bagaev, Vasilenko, A. K. Dmitriev, M. N. Skovortsov e Chebotayev (*JEPT Letters* **23**, p. 360) desenvolveram um modelo teórico para estudar o limite de baixa potência ótica de um laser em baixa pressão; J. Reintjes, R. C. Eckardt, C. Y. She, N. E. Karangelen, R. C. Elton e R. A. Andrews (*Physical Review Letters* **37**, p. 1540) geraram uma radiação coerente, em um gás de He, como o quinto e o sétimo harmônico de um pulso de **laser** com  $\lambda = 266 \text{ nm}$ ; os físicos russos Y. V. Blaklanov, B. V. Dubetsky e Chebotsev (*Applied Physics* **9**, p. 171) estudaram os processos físicos ópticos não-lineares. Em 1977, Hall, S. A. Lee e Jim C. Bergquist (*Physical Review Letters* **38**, p. 159) estudaram processos físicos ópticos não-lineares; excitações ressonantes com pulsos separados de luz foram investigadas pelos físicos, os franceses Michael M. Salour e Claude N. Cohen-Tannoudji (n.1933; PNF, 1997) (*Physical Review Letters* **38**, p. 757) e os russos E. V. Baklanov e Chebotayev (*Kvantovaya Elektronika* **4**, p. 2189); por sua vez, Hänsch, Teets e Jim N. Eckstein (*Physical Review Letters* **38**, p. 760) investigaram a **espectroscopia laser de alta resolução** das linhas de ressonância atômicas com um trem coerente de múltiplos pulsos de luz.

Em 1978, Hänsch, John E. M. Goldsmith e Erhard W. Weber (*Physical Review Letters* **41**, p. 1525) usaram a **espectroscopia laser de alta resolução** para medir a **constante de Rydberg**, e os físicos russos F. V. Karpushko e G. V. Sinitsyn (*Journal of Applied Spectroscopy USSR* **29**, p. 1323) examinaram a **biestabilidade óptica** do sulfureto de zinco (ZnS). Ainda em 1978 (*Physical Review Letters* **40**, p. 847; *Journal of Applied Physics* **49**, p. 5389) e, em 1979 (*Applied Physics* **18**, p. 257), Hänsch, Eckstein e Allister I. Ferguson demonstraram que: a) um **laser-dye** sincronicamente calibrado poderia produzir um trem de pulso estável de fase coerente e, com isso, usá-lo para estudar a espectroscopia de dois-fótons [no artigo da PRL, eles mediram a frequência da transição da linha  $2s_{1/2}$  e  $2p_{1/2}$  do H por intermédio de um relógio atômico de césio (Cs) (vide verbete nesta série)]; b) podiam

gerar pulsos de luz ultracurtos (picossegundos) funcionando como um medidor de frequência [*frequency comb measuring* (FCM): um conjunto coerente de linhas espectrais cujas frequências são cuidadosamente representadas por uma simples fórmula], destinado a medir finos intervalos atômicos. Ainda em 1979 (*Journal of Applied Physics* **50**, p. 2528), Wineland propôs sincronizar o movimento ciclotrônico de um elétron a uma **onda laser**. Em 1980, Hänsch e Wieman (*Physical Review* **A22**, p. 1) observaram a transição de dois-fótons da linha  $2s_{1/2}$  e  $2p_{1/2}$  do H, excitado pelo segundo harmônico (2.430 Å) de um **laser-dye** visível, confirmando o resultado obtido em 1975 por Hänsch, S. A. Lee e Wallenstein, segundo vimos acima; Hänsch e N. C. Wong (*Metrologia* **16**, p. 101) usaram a **espectroscopia de dois-fótons** com um medidor de frequência de um **laser de FM modo-fechado** (*FM mode-locked*) e mostraram que as fases dos modos se ajustam de modo que a intensidade permanece constante, mas a frequência oscila, periodicamente, de trás para a frente; e B. G. Whitford (*IEEE, Transactions on Instrumentation and Measurement* **29**, p. 168) mediu diferença de frequências usando **lasers CO<sub>2</sub>** (dióxido de carbono).

Agora, vejamos evolução da **espectroscopia laser** na década de 1980. Logo em 1981 (*Applied Physics Letters* **38**, p. 671), Fork, B. I. Greene e C. V. Shank geraram pulsos de **lasers de femtosegundos** (**laser-fsec**) ( $1 \text{ fseg} = 10^{-15} \text{ s}$ ) usando uma técnica [conhecida como CPML (*colliding-pulse-mode-locking*)] na qual dois pulsos indo em direções opostas colidem em um absorvedor saturável estreito causando uma variação transiente em seu índice de refração, provocando uma sincronia e dessincronia em ambos os pulsos. Em 1982, o físico norte-americano Steven Chu (n.1948; PNF, 1997) e S. Wong (*Physical Review Letters* **48**; **49**, p. 738; 1293) descobriram, acidentalmente que pulsos de **laser de ps** se propagam com velocidade de grupo, mesmo quando a velocidade excede a velocidade da luz no vácuo ( $c$ ) ou se torna negativa; o físico germano-norte-americano Hans Georg Dehmelt (n.1922; PNF, 1989) (*IEEE: Transactions on Instrumentation and Measurement* **IM-31**, p. 83) construiu um oscilador mono-iônico como um potencial medidor de frequência de **laser**. Em 1983, Hall, R. W. P. Drever, F. V. Kowalski, J. Hough, G. M. Ford, A. J. Munley e H. Ward (*Applied Physics B-Photophysics and Laser Chemistry* **31**, p. 97) investigaram a estabilização da frequência e da fase de um **laser** usando um ressonador óptico; Fork, C. V. Shank, C. Hirlimann, R. Yen e W. J. Tomlison (*Optics Letters* **8**, p. 1) obtiveram pulsos contínuos de luz branca com a energia de Gw ( $1 \text{ Gigawatt} = 10^9 \text{ w}$ ), que permitem medidas espectroscópicas com a resolução temporal de 80 fseg; e Hall, D. A. Jennings, C. R. Pollock, Petersen, R. E. Drullinger, Evenson, Wells e H. P. Layer (*Optics Letters* **8**, p. 136) mediram diretamente a frequência (473 THz; 633 nm) de um **laser He-Ne** estabilizado. Em 1986 (*Journal of the Optical Society of America* **B3**, p. 125), P. F. Moulton apresentou o **laser de safira-titânio** (Ti) como um substituto do **laser-dye**, pois o mesmo era estável, auto-organizado e com alta taxa de repetição de trens de pulsos ultracurtos.

Trabalhos pioneiros na geração de harmônicos altos foram realizados, em 1987 (*Journal of the Optical Society of America* **B4**, p. 595), por A. McPherson, G. Gibson, H. Jara, U. Johann, T. S. Luk, I. McIntyre, K. Boyer e Charlie H. Rhodes e, em 1988 (*Journal of Physics* **B21**, p. L31), por M. Ferray, Anne L'Huillier, X. F. Li, A. Lompré, G. Mainfray e C. Manus. Ainda em 1988 (*Physical Review* **A37**, p. 1802), Ralph G. DeVoe, C. Fabre, K. Jungmann, J. Hoffnagle e R. G. Brewer realizaram medidas precisas de frequências ópticas incluindo um interferômetro (vide verbete nesta série) com ondas de **laser** moduladas. Em 1989 (*Physical*

*Review Letters* **63**, p. 612), Mark A. Kasevich, Erling Riis, Chu e DeVoe construíram um **chafariz atômico** (*fountain atomic*) com o sódio (Na). Em 1990, Hänsch (*Optics Communications* **80**, p. 71) propôs um sintetizador para pulsos de sub-fseg que poderia superpor frequências de oscilações separadas de **laser cw** (*continuous wave*, que se caracteriza por apresentar amplitude e fase constantes) para formar um pente (*comb*) bem largo; Hänsch, Harald R. Telle e Dieter Meschede (*Optics Letters* **15**, p. 532) sugeriram o primeiro WID (*working interval divider*), que funciona como um simplificador de uma cadeia de frequências e que poderia usar a *diferença de frequências* entre **lasers** e, desse modo, o conjunto de **lasers** teria o mesmo comprimento de onda.

A seguir, tratemos da evolução da **espectroscopia laser** na década de 1990. Logo no começo dessa década, em 1991, S. N. Bagayev, Chebotayev, A. K. Dmitriyev, A. E. Om, Y. V. Nekrasov e B. N. Skvortsov (*Applied Physics B: Photophysics and Laser Chemistry* **52**, p. 63) usaram moléculas superlentas e encontraram efeitos de segunda ordem na **espectroscopia Doppler-livre**; D. E. Spence, P. N. Kean e Wilson Sibbett (*Optics Letters* **16**, p. 42) descreveram um método para produzir pulsos de modos fechados (*mode locking*) de 60 fsec em um **laser de safira-titânio** com **lentes-Kerr**; F. Salin, J. Squier e M. Piche (*Optics Letters* **16**, p. 1674) produziram uma “bala óptica” (*optical bullet*) na forma gaussiana operando com um **laser de safira-titânio** em uma cavidade óptica. Em 1992, Wong (*Optics Letters* **17**, p. 13) melhorou a precisão das medidas de frequências ópticas por intermédio de osciladores paramétricos ópticos de fase-fechada (*phase-locked*); os físicos, os franceses M. Brune, Haroche e J. M. Raimond e os brasileiros Luiz Davidovich (n.1946) e Nicim Zagury (n.1934) (*Physical Review* **A45**, p. 5193) discutiram a manipulação de feixes luminosos de lasers especiais em cavidades ópticas de alta qualidade; e E. S. Polzik, J. Carri e H. J. Kimble (*Applied Physics B-Photophysics and Laser Chemistry* **55**, p. 279) investigaram a espectroscopia atômica com luz espremida (*squeezed light*). Em 1993, Kurt Gibble e Chu (*Physical Review Letters* **70**, p. 1771) descreveram a construção de relógios atômicos de Cs usando a técnica do **resfriamento Sísifo** (vide verbete nesta série); Motonobu Kourogi, K. Nakagawa e M. Ohtsu (*IEEE: Journal of Quantum Electronics* **29**, p. 2693) mostraram como produzir um feixe espaçado de banda larga que atingiriam frequências bem acima de THz; Paul Corkum (*Physical Review Letters* **71**, 1994) propôs um modelo simples de gerar altos harmônicos, focando um **laser** forte sobre um gas fortemente ionizado para acelerar seus elétrons e produzir fótons altamente energéticos; e o físico brasileiro Vanderlei Salvador Bagnato (n.1958), Luís G. Marcassa, C. C. Tsao, Y. Wang e J. Weiner (*Physical Review Letters* **70**, p. 3225) estudaram a espectroscopia de dois-fótons na colisão de átomos ultrafrios. Em 1994, T. Nakajima e Peter Lambropoulos (*Physical Review* **A50**, p. 595) demonstraram que a suspeita de Hänsch sobre a possível existência de grandes efeitos não lineares, tais como o ATI (*above-threshold-ionization*), só poderiam ser observados para pulsos permanentes de no máximo alguns ciclos ópticos; D. Delpy (*Physics World* **7**, p. 34) descreveu a **tomografia laser**; e os físicos, os italianos A. Barsella, Ennio Arimondo, M. Brambila e F. Prati, e o brasileiro Petrus Agripino Alcântara Junior (n.1954) (*Chaos, Solitons and Fractals* **4**, p. 1665) desenvolveram um modelo para um **laser** com absorvedor saturável que leva em conta os seus modos transversais. Em 1995, Andre Clairon, P. Laurent, G. Santarelli, S. Ghezali, S. N. Lea e M. Bahoura (*IEEE: Transactions on Instrumentation and Measurement* **44**, p. 128) construíram o primeiro FFS (*Zacharias Fountain Frequency Standard*) de Cs [é interessante destacar que J. R. Zacharias, em 1954 (*Physical Review* **94**, p. 751), discutiu a possibilidade de aprisionamento de átomos em uma



armadilha magneto-óptica, conhecida desde então como ZAF (*Zacharias atomic fountain*)]; Barsella, Alcântara Junior, L. Guiodoni e Arimondo (*Optics Communications* **117**, p.455) observaram a evolução dos modos transversais em um **laser de CO<sub>2</sub>** com um absorvedor saturável intracavidade de tetróxido de osmônio (OsO<sub>4</sub>); J. Prestage, R. Tjoelker e L. Maleki (*Physical Review Letters* **74**, p. 3511) testaram a variação temporal da **constante de estrutura fina** ( $\alpha$ ) usando relógios atômicos do tipo ZAF; e Timothy A. Birks, P. J. Roberts, Philip St. J. Russell, D. M. Atkin e T. J. Shepherd (*Electronics Letters* **31**, p. 1941) usaram um **laser de safira-titânio** com **lentes-Kerr** e enviaram um trem de pulso através de uma fibra de sílica, com um pequeno carço de fibra sólida envolvido por “buracos cheio de ar”.



Na segunda metade da década de 1990, resultados importantes para a evolução da **espectroscopia laser** foram conseguidos, principalmente nos dois últimos anos. Com efeito, em 1996, Kouroggi, T. Enami e Ohtsu (*IEEE: Photonics Technology Letters* **8**, p. 1698) usaram um pente (*comb*) de frequências para sintetizar as bandas largas de um modulador de microonda em uma cavidade; Jonathan C. Knight, Birks, Russell e Atkin (*Optics Letters* **21**, p. 1547) desenvolveram fibras cristal fotônico (*Photonic-Crystal – PC*), com intervalo de banda (*band-gap*) que apresentavam a possibilidade de controlar os modos espaciais e a dispersão da velocidade de grupo efetiva por intermédio de um mecanismo mecânico de “buracos de ar” (*air holes*) e, com tal mecanismo, conseguiam guiar o **laser** com reflexão interna total; H. Schnatz, B. Lipphardt, J. Helmcke, F. Riehle e G. Zinner (*Physical Review Letters* **76**, p. 18) anunciaram que haviam realizado a primeira medida de frequência coerente da radiação visível; Hänsch, L. Xu, C. Spielmann, A. Poppe, T. Brabec e Ferenc Krausz (*Optics Letters* **21**, p. 2008) investigaram a geração de alta radiação harmônica em um jato de gas; e A. Schenzle (*Contemporary Physics* **37**, p. 303) discutiu o processo de medida em **Óptica Quântica**. É interessante destacar que, ainda em 1996 (*Japanese Journal of Applied Physics* **35**, p. L74), os físicos japoneses Shuji Nakamura (n.1954), M. Senoh, S. Nagahama, N. Iwasa, T. Yamada, T. Matsushita, H. Kiyoku e Y. Sujimoto construíram um **diodo laser de gálio nitrido** (GaN) na região azul-violeta (417 nm). Em 1997, Hänsch, Raoul Zerne, C. Altucci, M. B. Gaarde, L’Huillier, C. Lynga, Claes Göran Wahlström e Marco Bellini (*Physical Review Letters* **79**, p. 1006) voltaram a investigar a geração de alta radiação harmônica (do 15<sup>o</sup> em diante) em um jato de gas; Hänsch, Thomas Udem, A. Huber, B. Gross, Jörg Reichert, M. Prevedelli e Martin Weitz (*Physical Review Letters* **79**, p. 2646) determinaram a frequência ultravioleta linha 1S-2S do H, com a precisão de 3,7 partes em 10<sup>13</sup>. Em 1998, Hänsch, Huber, Udem, Gross, Reichert, Kouroggi, K. Pachucki e Weitz (*Physical Review Letters* **80**, p. 468) retornaram à medição da linha 1S-2S do H; Hänsch, Udem, Reichert e Kouroggi (*Optics Letters* **23**, p. 1387) realizaram uma comparação direta entre FCM e WID; Hänsch, Bellini, Lynga, A. Tozzi, Gaarde, L’Huillier e Wahlström (*Physical Review Letters* **81**, p. 297) descobriram que um feixe harmônico era envolvido por uma auréola (*halo*) divergente de curto comprimento coerente; e V. I. Kopp, B. Fan, H. K. M. Vithana e A. Z. Genack (*Optics Letters* **23**, p. 1709) anunciaram que haviam obtido um **efeito laser** (*lasing*) em um CLC (*Cholesteric Liquid Crystals*) dopado com tinta (*dye-doped*). Em 1999, Hänsch, Udem, Reichert e Ronald Holzwarth (*Optics Letters* **24**, p. 881; *Physical Review Letters* **82**, p. 3568; *Optics Communications* **172**, p. 59) realizaram experiências de interferência de dois pulsos de luz branca, usando **diodos lasers de fase e modos fechados**, e conseguiram medir a frequência com a precisão de algumas partes em 10<sup>17</sup>; Telle, G. Steinmeyer, A. E. Dunlop, J.

Stenger, D. H. Sutter e U. Keller (*Applied Physics* **B69**, p. 327) propuseram um novo tipo de FCM; B. C. Young, F. C. Cruz, Wayne M. Itano e Bergquist (*Physical Review Letters* **82**, p. 3799) construíram **lasers** visíveis com frequência de sub-Hz; Hall, Long Sheng Ma, J. Ye e P. Dubé (*Journal of the Optical Society of America B-Optical Physics* **16**, 2255) investigaram os aspectos teóricos e experimentais da **espectroscopia laser** de frequência de modulação ultrasensível em uma cavidade óptica de grande finura; Hall, Ma, M. Taubman, B. Tiemann, F. L. Hong, O. Pfister e Ye (*IEEE: Transactions on Instrumentation and Measurement* **48**, p. 583) usaram um **laser de neodímio** (Nd), dopado com ítrio (Y) e alumínio (Al) granada (*garnet*) [Nd-YAG/Nd:Y<sub>3</sub>Al<sub>5</sub>O<sub>12</sub>, construído em 1964 (*Applied Physics Letters* **4**, p. 182), por J. E. Geusic, H. M. Marcos e L. G. van Uitert] para medir a linha (532 nm) de iodo (I) usando a diferença de frequência entre o sistema duplo HeNe de 633 nm e a linha de dois fótons do rubídio (Rb) de 782 nm; e Hall, Scott A. Diddams, Ma e Ye (*Optics Letters* **24**, p. 1747) geraram um pente de frequências ópticas de banda-larga com um oscilador paramétrico de fase modulada. É interessante ressaltar que, ainda em 1999 (*Nature* **397**, p. 520), Austin Roorda e D. R. Williams usaram uma **câmara óptica adaptativa** como um densitômetro retinal e, com ela, registraram as primeiras imagens mostrando o arranjo dos cones vermelho, verde e azul do olho humano vivo (vide verbete nesta série).

O último ano do Século 20 (2000) consolidou a tecnologia do **laser-fsec**. Com efeito, nesse ano de 2000, Jinendra K. Ranka, Robert S. Windeler e Andrew J. Stentz (*Optics Letters* **25**, p. 25) também enviaram um trem de pulso através de uma fibra de sílica, com um pequeno caroço de fibra sólida envolvido por “buracos cheio de ar”, usando um **laser de safira-titânio** com **lentes-Kerr**; Hänsch, Reichert, M. Niering, Holzwarth, Weitz e Udem (*Physical Review Letters* **84**, 3232) e Hänsch, Niering, Holzwarth, Reichert, P. Pokasov, Udem, Weitz, P. Lemonde, Santarelli, M. Abgrall, Laurent, C. Salomon e Clairon (*Physical Review Letters* **84**, 5496) realizaram uma medida pioneira de microondas usando um FCM; Hall, Hänsch, Diddams, David J. Jones, Ye, Steven T. Cundiff, Ranka, Windeler, Holzwarth e Udem (*Physical Review Letters* **84**, 5102) e Hall, Jones, Diddams, Ranka, Stentz, Windeler e Cundiff (*Science* **288**, p. 635) encontraram uma relação direta entre frequências ópticas e de microondas com um FCM de 300 THz; Hänsch, Holzwarth, Udem, Knight, W. J. Wadsworth e Russell (*Physical Review Letters* **85**, p. 2264) ao compararem um sintetizador de frequência complexa (350 THz) com o medidor de frequência do H (10 MHz) encontraram um acordo de algumas partes em 10<sup>16</sup>, limitado pelo **efeito Doppler** devido a mudanças de pressão ou expansão térmica do ar; Hall, Diddams, Jones, Ma e Cundiff (*Optics Letters* **25**, p. 186) enviaram através de uma fibra óptica um pulso de **laser** de 104 THz; e Hall (*IEEE: Journal of Selected Topics in Quantum Electronics* **6**, p. 1136) apresentou um resumo sobre 40 anos de revolução tecnológica na medição das frequências ópticas. É interessante destacar que, ainda em 2000 (*Nature* **406**, p. 277), L. J. Wang, A. Kumzmich e A. Dogariu apresentaram o resultado de experiências sobre a propagação de um pulso óptico, nas quais observaram velocidades de grupo negativas.

Na conclusão deste verbete, vamos tratar da evolução da **espectroscopia laser** nos cinco primeiros anos do Século 21. Assim, logo em 2001, Hall, Ye, Diddams, Ma, Cundiff e Jones (*IEEE: Journal of Quantum Electronics* **37**, p. 1482) e J. L. Flowers e B. W. Petley (*Reports on Progress Physics* **64**, p. 1191) analisaram a **espectroscopia laser ultrasensível** com o uso de **lasers** ultraestáveis e ultrarápidos e sua relação com a metrologia; Hall, Ye e Ma

(*Physical Review Letters* **87**, no. 270801) construíram um relógio com moléculas de iodo ( $I_2$ ) usando um pente óptico; e Hall, R. K. Shelton, Ma, H. C. Kapteyn, M. M. Murnane e Ye (*Science* **293**, p. 1286) estudaram pulsos ópticos de fase coerente com **laser-fsec**. Em 2002, Hänsch, Udem e Holzwarth (*Nature* **416**, p. 233) descreveram a relação entre metrologia e frequência óptica; Hall, R. K. Shelton, S. M. Foreman, Ma, Kapteyn, Murnane, M. Notcutt e Ye (*Optics Letters* **27**, p. 312) investigaram a tremulação entre dois feixes sincronizados emitidos por **lasers-subfseg** de modo-fechado (*mode-locked*); Hall, W. Y. Cheng, L. S. Chen, T. H. Yoon e Ye (*Optics Letters* **27**, p. 571) realizaram experiências de transições **sub-Doppler** de  $I_2$  próximas do limite de dissociação (523-498 nm); Stenger, Schnatz, C. Tamm e Telle (*Physical Review Letters* **88**, no. 073601) mediram a relação entre o segundo harmônico de um **laser Nd-YAG** e a frequência fundamental e encontraram o valor esperado 2, com uma incerteza de 7 partes em  $10^{19}$ ; e X. Calmet e Harald Fritzsche (*Physics Letters* **B540**, p.173) previram um deslocamento (*drift*) da frequência de microonda de um relógio de Cs em relação à do H. Em 2002, Hänsch, Udem e Holzwarth (*Nature* **416**, p. 233) apresentaram um resumo sobre as técnicas de FCM. Em 2003, T. M. Fortier, Jones, Ye e Cundiff (*IEEE: Journal of Selected Topics in Quantum Electronics* **9**, p. 1002) realizaram medidas de precisão de fenômenos ópticos não-lineares usando técnicas de rf (*radio frequencies*) bastante sensíveis; K. W. Holman, Jones, A. Marian, Cundiff e Ye (*IEEE: Journal of Selected Topics in Quantum Electronics* **9**, p. 1018) apresentaram um estudo detalhado da dinâmica de um pente de frequências de fsec, usando um **laser de safira-titânio de modo-fechado**; Hall, Hong, J. Ishikawa, K. Sugiyama, A. Onae, H. Matsumoto e Ye (*IEEE: Transactions on Instrumentation and Measurement* **52**, p. 240) compararam medidas de frequências ópticas independentes por intermédio de um **laser Nd-YAG** portátil; S. Bize, Diddams, U. Tanaka, C. E. Tanner, W. H. Oskay, Drullinger, T. E. Parker, T. P. Heavner, S. R. Jefferts, Hollberg, Itano e Bergquist (*Physical Review Letters* **90**, no. 150802) usaram o LFC para medir as transições de um íon frio de mercúrio ( $Hg^-$ ) e compararam com um **relógio de Cs**; Gerard G. Paulus, F. Lindner, Walther, A. Baltuska, E. Gouielmakis, M. Lezius e Krausz (*Physical Review Letters* **91**, no. 253004) demonstraram a ATI; Hänsch, Baltuska, Udem, M. Uiberacker, M. Hentschel, Gouielmakis, Christoph Gohle, Holzwarth, V. S. Yakovlev, A. Scrinzi e Krausz (*Nature* **421**, p. 611) sugeriram que as fontes de **pulsos-fsec** de fase estabilizada seriam a chave para o desenvolvimento da **ciência de attosegundos** (1 attsec =  $10^{-18}$  sec); e M. T. Murphy, J. K. Webb e V. V. Flambaum (*Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* **345**, p. 609), do *Keck Observatory*, ao observarem as linhas espectrais da luz de distantes **quasars** (vide verbete nesta série), concluíram que **constante de estrutura fina** ( $\alpha$ ) no começo do Universo era menor do que o valor de hoje, com uma taxa de variação de  por ano. Em 2004, B. R. Washburn, Diddams, N. R. Newbury, J. W. Nicholson, M. F. Yan e C. G. Jorgensen (*Optics Letters* **29**, p. 250) e L. Matos, Daniel Kleppner, O. Kuzucu, T. T. Schibli, J. Kim, E. P. Ippen e F. X. Kaertner (*Optics Letters* **29**, p. 1683) produziram um OSC (*octave-spanning comb*) diretamente de um oscilador usando, respectivamente, um **laser de érbio** (Er) e um **laser de safira-titânio**; Hänsch, Marcus Zimmermann, Gohle, Holzwarth e Udem (*Optics Letters* **29**, p. 310) mediram a relação entre o segundo harmônico de um **laser Nd-YAG** e a frequência fundamental e encontraram o valor esperado 2, com uma incerteza de 6 partes em  $10^{21}$ ; Ma, B. Zhiyi, A. Bartels, L. Robertsson, M. Zucco, Windeler, G. Wilpers, C. Oates, Hollberg e Diddams (*Science* **303**, p. 1843) continuaram a estudar a relação entre a metrologia e frequência óptica; Jones e Ye (*Optics*

*Letters* **29**, p. 2812) investigaram a amplificação de um **pulso-fsec** coerente de alta taxa de repetição com uma cavidade óptica passiva; Hänsch, Marc Fischer, Nikolai Kolachevsky, Zimmermann, Holzwarth, Udem, M. Abgrall, J. Grunert, I. Maksimovic, Bize, H. Marion, F. Pereira Dos Santos, Lemonde, G. Santarelli, P. Laurent, Clairon, Salomon, M. Haas, U. D. Jentschura e C. H. Keitel (*Physical Review Letters* **92**, no. 230802) realizaram experiências ópticas com o objetivo de obter novos limites para os valores das constantes físicas; Ma, B. Zhiyi, Bartels, Robertsson, Zucco, Windeler, Wilpers, Oates, Hollberg e Diddams (*Science* **303**, p. 310); e Eckhard Peik, B. Lipphardt, H. Schnatz, T. Schneider, Tamm e S. G. Karshenboim (*Physical Review Letters* **93**, no. 170801) mediram as transições de um íon de itérbio (Yb<sup>-</sup>) com um **relógio de Cs** e encontraram taxas de mudanças para os valores de  $\alpha$  [( por ano] e do **momento magnético do Cs** ( $\mu_{Cs}$ ) [( por ano].

Por fim, examinemos o que aconteceu com a **espectroscopia laser**, principalmente relacionada com a redefinição da medida de padrões e de constantes físicas, no ano de 2005. Em 2005, J. J. McFerran, E. N. Ivanov, Bartels, Wilpers, Oates, Diddams e Hollberg (*Electronics Letters* **41**, p. 650) geraram micro-ondas com extrema estabilidade de fase usando **relógios atômicos ópticos**; Hollberg, Oates, Wilpers, C. W. Hoyt, Z. W. Barber, Diddams, Oskay e Bergquist (*Journal of Physics* **B38**, p. S469) e M. Takamoto, Hong, R. Higashi e Hidetoshi Katori (*Nature* **435**, p. 321) mostraram que os **relógios atômicos ópticos** [envolvendo transições atômicas de íons, tais como: Hg<sup>-</sup>, Yb<sup>-</sup>, estrôncio (Sr<sup>-</sup>) e índio (In<sup>-</sup>) ou de átomos neutros: H, cálcio (Ca) ou Sr] são muito mais precisos do que os **relógios atômicos de microondas** (Cs); Hänsch, Gohle, Udem, J. Rauschenberger, Holzwarth, M. Herrmann, H. A. Schüssler e Krausz (*Nature* **436**, p. 234) e Jones, K. D. Moll, M. J. Thorpe e Ye (*Physical Review Letters* **94**, no. 193201) realizaram experiências com um **laser de safira-titânio de modo-fechado** e produziram altos harmônicos de 60 nm e frequência de 112 MHz; Hall, Notcutt, Ma e Ye (*Optics Letters*, **30**, p. 1815) construíram um **laser** com a frequência de 1 Hz com a técnica V-SM (*vertically-symmetric mounting*) aplicada a uma **cavidade óptica**.

Foi também em 2005, que Heavner, Jefferts, E. A. Donley, J. H. Shirley e Parker (*Metrologia* **42**, p. 411), Steiner, E. R. Williams, D. B. Newell e R. Liu (*Metrologia* **42**, p. 431), e Bordé (*Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical Physics and Engineering Sciences* **363**, p. 2177) redefiniram as unidades de medida padrão (metro/kilograma/segundo) do sistema internacional (SI), usando a revolução da Era Quântica, principalmente a descoberta do **efeito Josephson** (1962) e do **efeito von Klitzing** (1980) (vide verbetes nesta série).

Para maiores detalhes sobre a vida e obra de Hall e Hänsch, ver suas *Autobiografias* e *Nobel Lectures*: John L. Hall, **Defining and Measuring Optical Frequencies: the Optical Clock Opportunity – and More**, e Theodor W. Hänsch, **Passion for Precision** (08 de Dezembro de 2005; *Nobel e- Museum*).



ANTERIOR

SEGUINTE