

光的量子相干性与光频率的超精密测量^{*}

——2005 年诺贝尔物理学奖评述

陈 徐 宗[†]

(量子信息与测量教育部重点实验室 北京大学信息科学技术学院 北京 100871)

摘 要 2005 年的诺贝尔物理学奖授予了现代光学领域的科学家,其中诺贝尔奖的一半授予了哈佛大学的 Roy J. Glauber 教授,以表彰他在光的量子相干性理论方面的突出贡献,诺贝尔奖的另外一半授予了美国科罗拉多大学与美国国家标准技术研究院联合实验室(JILA)的 John L. Hall 教授和德国慕尼黑大学教授、马克斯普朗克-量子光学研究所所长 Theodor W. Hänsch 教授,以表彰他们在光的超高精密测量方面的突出贡献.文章介绍了三位诺贝尔奖得主的贡献及其意义.

关键词 光的量子相干性,光的超高精密测量,诺贝尔物理学奖

Quantum coherence of light and precision measurement of optical frequency—an introduction to the 2005 nobel prize in physics

CHEN Xu – Zong[†]

(School of Electronics Engineering and Computer Science, Peking University, Beijing 100871, China)

Abstract The Nobel prize in physics 2005 was awarded to Roy J. Glauber for “his contribution to the quantum theory of optical coherence” and to John L. Hall and Theodor W. Hänsch “for their contributions to the development of laser – based precision spectroscopy, including the optical frequency comb technique”. A brief introduction to their work and the significance of their contributions is presented.

Keywords quantum optics, precision measurement, Nobel prize in physics

2005 年 10 月 4 日,瑞典皇家科学院宣布 2005 年的诺贝尔物理学奖授予了现代光学领域的科学家,其中诺贝尔奖的一半授予了哈佛大学的格劳伯教授(Roy J. Glauber),以表彰他在光的相干性量子理论方面的贡献,诺贝尔奖的另外一半授予了美国科罗拉多大学与美国国家标准技术研究院联合实验室(JILA)的霍尔教授(John L. Hall)和德国慕尼黑大学教授、马克斯普朗克-量子光学研究所所长亨施博士(Theodor W. Hänsch),以表彰他们在发展基于激光的超精密光谱技术(包括光学频率梳状发生器技术)方面的贡献.什么是光的相干性量子理论?什么是激光的超精密光谱技术?三位科学家在该研究中做出了什么贡献?以上研究有何意义?本

文试图就此作一简要的阐述,有关其详细内容可参阅本文的参考文献.

1 光的相干性量子理论

当人类在地球上诞生以来,人类认识世界就从光开始,但光到底是什么?这个问题一直是个谜.对光较深刻的认识应该从麦克斯韦开始,他在 19 世纪 50 年代建立了电磁波理论,他指出,光就是电磁波,因此光具有波动性,这一性质现在被广泛用于光纤

^{*} 国家自然科学基金重大项目(批准号 60490280),国家重点基础研究课题(批准号 2001CB309308,2005CB3724500)的资助项目

[†] Email: xuzongchen@pku.edu.cn

通信等领域.到了1905年,科学巨匠爱因斯坦指出光具有粒子性,提出了光子的概念,并成功地解释了光电效应.现代光通信中的光电探测就利用了该效应.这就是光的奇特表现,既有波动性,又有粒子性.但是爱因斯坦与麦克斯韦的理论并没有完全解释光的全部特性,特别是在1960年激光发明以后,对于激光的本性的认识还很肤浅,许多特性难以用爱因斯坦与麦克斯韦的理论加以解释,如一个白炽灯发出的光与音乐喷泉中用的激光有何区别呢?20世纪60年代,在哈佛大学物理系工作的格劳伯教授利用量子力学建立了光的量子理论^[1],成功地解释了激光(相干光)与白光(非相干光)的区别,这种理论后来发展成了一个研究领域,叫做量子光学.

一束光其本质是电磁波,只是振荡频率远高于通常的电磁波,基于光的电磁场又称光场,光场可以想象由许多光子组成,有波峰与波谷,但由于光子的粒子性,这些由许多光子组成的光场在其描述波峰与波谷特性的振幅与相位上有量子起伏,这样,原来由麦克斯韦理论描述的“干净”的电磁波就变成了“模糊”的电磁波;“相干”就意味着构成光场的光子各自的波长、振幅与相位都比较一致,用量子光学的术语说就是光场的量子起伏较小,激光就是符合这种条件的电磁波,因此有很好的相干性.对于构成白炽灯光的光场而言,由于其中的光子的波长、振幅与相位都不一致,其光场的量子起伏较大,形成一定的“混沌”状态.因此,激光由于其相干性好的特点,可以用于通信、计算机数据存储、精密测量、以及医疗、工业加工、日常生活等诸多方面,而白炽灯光由于其相干性较差,只能用于照明等方面.

基于光的量子理论,使得人们对光的量子“噪声”有了进一步的认识,这种“噪声”是一种起伏,通过对光场的研究得知,任何光场,包括激光场,都有能量的起伏(又称散弹噪声),这种起伏的本质由于光子的数目在真空中有起伏引起的,是一种量子特性,符合海森伯测不准原理.由于这种起伏,使光子组成的光场的各种特征量(振幅、相位等)都会产生起伏,这种起伏会对光场的测量造成一定的限制,又称“量子极限”.20世纪90年代,科学家们致力于部分地克服这一量子噪声,研究出一种“非经典光场”,这种光场的相位噪声或振幅噪声要低于通常由真空引起的噪声,这种光场又称为“压缩态”光场,美国加州理工学院的 Kimble 教授小组^[2],产生了波长为840—970nm的压缩态光场,用此探测铯原子的跃迁,提高了测量精度.

另外,光的量子理论使人们对利用光电探测器探测光场有了新的认识,在此基础上人们发明了单光子计数器,这种计数器在量子保密通信中得到广泛应用,量子保密通信是从事量子光学实验与理论的物理学家在光子的应用方面的新突破.20世纪90年代牛津大学的 Ekert 博士提出利用纠缠态可以实现量子保密通信^[3],基本思想是利用晶体将一个光子劈裂成一对纠缠光子并分别传给发送方与接受方,发送方与接受方各自测量其接受到的光子的偏振特性,但由于量子力学的特性,当发送方测量到接受光子的偏振特性时,接受方接受到的光子一定会以确定的方式“坍塌”到某一偏振态上,利用这一特性,发送方可以将纠缠态光子的偏振信息作为“密码”调制在所要传送的信号中,以明码的方式传给接受方,接受方又用接受到的纠缠态光子的偏振信息作为“密码”解调制所收到的信号,从而实现保密通信.由于量子光学的理论告诉我们,这种密码是不可破译的,因此,有着极高的安全性.首先在实验上演示该原理的是维也纳大学的 Zelinger 小组,他们在1公里长的光纤中成功地进行了纠缠密码的传输^[4].

2 激光频率的精密测量

在20世纪60年代激光发明以后,美国科罗拉多大学与美国国家标准技术研究院联合实验室(JILA)的霍尔教授(John L. Hall)和德国慕尼黑大学教授、马克斯普朗克-量子光学研究所所长亨施教授(Theodor W. Hänsch)就开始了激光频率的精密测量的研究,发展了甲烷分子等稳频激光技术和饱和吸收光谱技术精密测量了光速,利用激光精密测量技术测定了氢原子1S-2S的跃迁波长以及相关原子、分子的结构、跃迁几率等参数,由此大大提高了里德伯常数、超精细结构常数等重要物理常数的精度,近年来又发展了飞秒激光光梳技术,使得在光学波段的任何频率的精密测量成为可能,其精度提高到了14—15位有效数字.以下分别介绍霍尔教授与亨施教授在超高精密测量方面的工作.

光速是描述光子的诸多特性中的一个重要参量,由于真空中光速不变及粒子的速度上限是光速这二个重要的特性,光速一直是人们关注的问题,也是激励一代又一代科学家不断研究的长期课题.对于光速的认识很早就引起了人们的兴趣,但严格的测量从17世纪才开始.对于光速的测量可以分成二

大类:第一类是飞行时间测量法,即测定光脉冲越过被测距离(L)的时间(T),利用关系式 $c=L/T$ 测定光速,其实是测量光在真空中的群速.如1849年斐索(Fizeau)^[5]利用旋转的齿轮作为机械的斩波器产生光脉冲,通过测定光脉冲两次通过齿轮的时间与距离来测定光速就是利用这种方法.直到20世纪50年代,历史上曾有许多研究小组用第一类方法进行了光速的测量,由于此类测量要通过很长的空间距离,其时间基线长度会由于空气折射率等因素引起不确定的变化,使得测量结果存在很大的偶然误差,因此测量精度一直停留在6位有效数字.第二类是测量一个振荡器产生的电磁波在真空中的波长(λ)与频率(f),利用关系式 $c=\lambda f$ 测定光速,其实是测定光的相速,由于平面电磁波在真空中的群速和相速严格相等,测量相速就测得了实际光速.随着20世纪60年代激光的出现,世界上几个研究小组开始了新一轮的测量光速的工作,他们采用红外与可见光波段的激光来测量光速,基本上采用第二类方法.霍尔领导的研究小组就是当时几个测量光速的小组之一.他领导的小组首先研制甲烷(CH_4)氦氖(He-Ne)稳频激光器(1969年),其波长为 $3.39\mu\text{m}$,不确定度达 10^{-11} ^[6],在此基础上,美国国家标准局的爱文生(K. M. Evenson)小组将 $3.39\mu\text{m}$ 的 CH_4 稳定的He-Ne激光器的频率通过光频链的方法和铯束频标的标准频率相比较,测出其频率为 $88.376181627(50)\text{THz}$ ($\delta\nu/\nu = \pm 5.6 \times 10^{-10}$),霍尔领导的研究小组利用一个由激光伺服控制的法布里干涉仪精确测定 $3.39\mu\text{m}$ 的 CH_4 稳定的He-Ne激光的波长值 $\lambda = 3.392231376(12)\mu\text{m}$ ($\delta\lambda/\lambda = \pm 3.5 \times 10^{-9}$),由此得到光速值为 $c = 299792456.2(1.1)\text{m/s}$ ($\delta c/c = \pm 3.6 \times 10^{-9}$)^[7].这一测量值比以前的测量精度提高了100倍左右.经第五次米定义咨询委员会会议(1973年6月13—15日)的讨论,推荐 CH_4 谱线和估计精度为 $\pm 4 \times 10^{-9}$ 的真空波长值为 $3392231.40 \times 10^{-12}\text{m}$ 以及频率值(88376181627 ± 50)kHz,推荐光速值 $c = 299792458\text{m/s}$,其不确定度为($\pm 4 \times 10^9$)是由于实际复现米的不可测性产生的.由此,光速值从原来的测量值变成了定义值,只要精确地测定光的频率 f 就可以利用 $\lambda = c/f$ 测出波长,通过干涉仪精确地得到米的长度.因此光速的精密测量引起了长度计量的重大革命,长度标准米的定义从1875年巴黎计量局的米原器,到1960年的氪灯加干涉仪的方法,1973年变成了精密测量稳频激光器的频率.由

此,测量长度的方法,转变成了测量激光频率的方法,测量激光频率的精度,直接影响到长度测量的精度.20世纪70年代起,研究长度计量的科学家与研究原子光谱的物理学家开始将兴趣移向建立高精度的稳频激光器(又称激光频率标准)与建立激光频率链对激光频率进行高精密度测量.

光学频率的精密测量是电磁频率测量中的一种,由于可见光频率指的是从400—730nm波段的电磁振动频率,它们的范围为 6×10^{14} — $4 \times 10^{14}\text{Hz}$,这波段的频率是目前用作铯原子钟跃迁频率9192631770Hz的50000倍左右,被测频率远远高于一般电子仪器所能测量的频率,因此,光学频率的精密测量一直是困扰人们的难题.从激光出现到2000年的30多年间,科学家们利用不同的方法,一共才建立了14种不同频率波长的稳频激光系统,并建立了庞大的频率链,对其作了高精度的测量,表1为1997年国际米定义咨询委员会(CCDM)推荐的米定义标准频率和波长推荐值.其中,第3波长值(频率稳定于碘分子532nm波长的YAG固体激光器)与第11的波长值(频率稳定于甲烷分子 $3.39\mu\text{m}$ 波长的氦氖激光器)都是有霍尔小组测定的,第1波长值(频率稳定于氢原子1S-2S跃迁249nm波长的激光器)则由亨施小组测定.由于到目前为止,最高精度的频率标准为铯原子频率标准,其准确度为 5×10^{-16} ,基准频率为铯原子基态共振频率9.192631772GHz.为了直接测定激光频率(在 $5 \times 10^{14}\text{Hz}$ 左右),必须将9.2GHz的微波频率提高50000倍才能测量激光频率,这就需要建立一条精密的频率测量链——简称光频链.

光频链是在2000年前少数几个先进实验室建立的直接测量光学频率的设备,它的基本原理是将一个由铯原子频标锁定的100MHz振荡器,通过耿氏振荡器、背向振荡器以及远红外激光器并用光频锁相技术将射频频率锁定红外激光频率,通过光学倍频方式将其频率和光学频段的稳频激光进行比较,由此测定光学频率标准的准确频率值.1972年,美国国家标准局建立了测量甲烷(CH_4)氦氖(He-Ne)稳频激光频率的光频链.一般一条光频链需要十几个不同频率的稳频激光器组成,设备庞大,不便搬运,操作极其复杂,一条光频链只能测量一个激光频率,也既测一些孤立的频率,因此光频链的测量在电子学中称“点”频测量.能否实现光学频率的连续测量,这是科学家们一直期盼发展的光学频率精密测量的技术,这种技术直到2000年才成功,它就是

表1 米定义标准频率和波长推荐值(1997 CCDM)

H S-2S 双光子跃迁	$f = 1\,233\,030\,706\,593,7\text{kHz}$ $\sigma = 8,5 \times 10^{-13}$	$\lambda = 243\,134\,624,626\text{fm}$
$^{127}\text{I}_2$ R(13)43-0 a_3	$f = 582\,490\,603,37\text{MHz}$ $\sigma = 2,5 \times 10^{-10}$	$\lambda = 514\,673\,466,4\text{fm}$
$^{127}\text{I}_2$ R(56)32-0 a_{10}	$f = 563\,260\,233,48\text{MHz}$ $\sigma = 7 \times 10^{-11}$	$\lambda = 532\,245\,036,14\text{fm}$
$^{127}\text{I}_2$ R(12)26-0 a_9	$f = 551\,579\,482,96\text{MHz}$ $\sigma = 2,5 \times 10^{-10}$	$\lambda = 543\,516\,333,1\text{fm}$
$^{127}\text{I}_2$ R(47)9-2 a_7	$f = 489\,880\,354,9\text{MHz}$ $\sigma = 3 \times 10^{-10}$	$\lambda = 611\,970\,770,0\text{fm}$
$^{127}\text{I}_2$ R(127)11-5 a_{13}	$f = 473\,612\,214\,705\text{kHz}$ $\sigma = 2,5 \times 10^{-11}$	$\lambda = 632\,991\,398,22\text{fm}$
$^{127}\text{I}_2$ R(10)8-5 a_9	$f = 468\,218\,332,4\text{MHz}$ $\sigma = 4,5 \times 10^{-10}$	$\lambda = 640\,283\,468,7\text{fm}$
^{40}Ca $^3\text{P}_1 - ^1\text{S}_0$	$f = 455\,986\,240\,494,15\text{kHz}$ $\sigma = 6 \times 10^{-13}$	$\lambda = 657\,459\,439,291\text{fm}$
^{88}Sr $^2\text{D}_{3/2} - ^5\text{S}_{1/2}$	$f = 444\,779\,044,04\text{MHz}$ $\sigma = 1,3 \times 10^{-10}$	$\lambda = 674\,025\,590,95\text{fm}$
^{85}Rb $5\text{D}_{1/2} - 5\text{S}_{1/2}$ $F=5 - F=3$ 双光子跃迁	$f = 385\,285\,142\,378\text{MHz}$ $\sigma = 1,3 \times 10^{-11}$	$\lambda = 778\,105\,421,22\text{fm}$
CH_4 v_3 R(7)支跃迁分量: $F_2^{(2)}$	$f = 88\,376\,181\,600,18\text{kHz}$ $\sigma = 3 \times 10^{-12}$	$\lambda = 3\,392\,231\,397,327\text{fm}$
OsO_4	$f = 29\,096\,274\,952,3\text{kHz}$ $\sigma = 6 \times 10^{-12}$	$\lambda = 10\,303\,465,2543\text{fm}$

秒激光光梳技术. 它是由亨施与霍尔两个小组共同发展起来的.

利用脉冲激光进行激光频率的精密测量的思想最早由前苏联科学院院士契巴塔耶夫^[8]与亨施教授^[9]提出,其基本思想是在时间域内等间距的脉冲激光(脉冲间隔 $\tau = L/v_g$, 其中 L 是激光腔长, v_g 激光脉冲的群速度), 转换到频率域就可以变成等间距的频率梳(频率间隔为 $\Delta = 1/\tau$), 如图1所示, 由于频率梳的间隔 Δ (在脉冲激光中又称重复频率 f_r) 是已知的, 很容易通过已知的激光频率 f_0 (如633波段的氦氖激光频标)来测定未知的激光频率 $f_0 + n\Delta$. 1978年亨施领导的小组就利用皮秒激光器建立了频宽为500GHz激光频率梳, 并由此精密测定了钠原子4d态的精细结构分裂^[9].

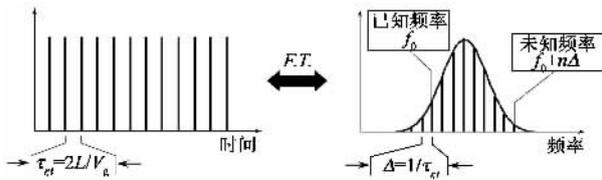


图1 左图为等时间间隔的脉冲串, 右图为对应频率域的“频率梳”

但是, 一般情况下, 初始脉冲的频率不在零频处, 这是由于光脉冲在腔内传播时, 其群速与相速不同, 当光在腔内来回一次后, 由于群速与相速不同而形成的相位差为 $\Delta\Phi$, 来回一圈所用的时间为 τ , 因此, 对应的频率为 $\delta = \frac{\Delta\Phi}{2\pi\tau}$, 这称为初始频率, 文献中习惯称偏置频率(offset frequency), 如图1所示. 由于一般情况下, 激光的腔长 L 存在抖动, 因此, 频域上频率间隔 Δ 与偏置频率 δ 都会产生抖动, 要将

这一系列梳状频率稳定住, 则要稳定偏置频率 δ 和频率间隔 Δ , 这就激光梳装发生器成功与否的关键.

由于皮秒激光的频率带宽极其有限, 很难测量到偏置频率 δ , 因此难以实现对频率的精密控制, 没有实际应用价值. 20世纪90年代飞秒激光的出现, 使得同时控制重复频率 f_r (即频率间隔 Δ) 与初始频率成为可能. 经过多年的努力, 在20世纪90年代末, 亨施小组与霍尔小组合作, 利用锁相技术将飞秒激光的重复频率锁定, 并利用光子光纤将飞秒激光的带宽从原来的700—900nm扩展到500—1200nm^{10,11}. 利用自倍频的方法, 实现了偏置频率 δ 的锁定, 由于重复频率 f_r 和偏置频率 δ 都在射频段(10—100MHz), 只要用铯原子钟就可以直接锁定重复频率和偏置频率, 这样第 n 级的光梳频率 $f_n = \delta + nf_r$ 的精度就可以与铯原子钟的精度一样, 达到 10^{-15} 的不确定度. 如要测量任一未知光学频率 f_x , 只要测出其与其邻近光梳频率 f_n 的差 Δf , 则未知频率为: $f_x = \delta + nf_r + \Delta f$, 也具有 10^{-15} 的精度. 由于飞秒激光光学梳状发生器频率覆盖400—1200nm, 因此, 它可以精确测定激光的任意频率. 另外, 它还具有体积小, 结构简单(见图2), 可搬运等优点, 因此, 任何光学实验室都可以很方便地用它来测定相关频率, 而不需再建立庞大的光频链, 这对激光频率精密测量技术是一场革命. 这场革命首先推动了长度标准的改革, 许多从事长度基准测量的实验室都改用飞秒激光光梳测量激光频率, 由于原来独立的长度基准, 现在都可以利用飞秒激光光梳来比对与直接测量, 其准确度都可以归结到铯原子钟精度, 因此

2002 年原国际米定义咨询委员会改名成长度咨询委员会,并推荐了 14 条可以作为光学频率标准的参考谱线,这些谱线的不确定度基本都是用飞秒激光光梳直接测量的.另外,飞秒激光光梳在原子结构与物理常数的精密测量发挥着极为重要的作用,特别是氢原子的结构参数的测量.

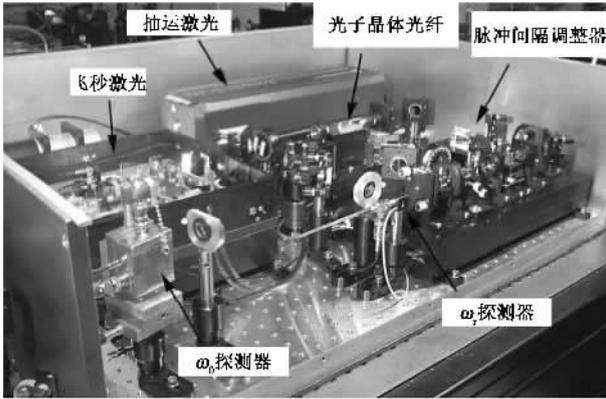


图 2 飞秒激光光学梳状发生器,激光频率测量精度可达 14—15 位有效数字

氢原子结构参数的精密测量是目前所有原子结构参数测量中最为精密的一种,另外,由于氢原子是结构最简单的一种原子,也是唯一能用利用量子理论作精确计算的原子,如氢原子 $1S \rightarrow 2S$ 的跃迁频率在理论上可以表示成:

$$\nu_H(1S_{1/2} - 2S_{1/2}) = \frac{3}{4} R_\infty c$$

$$\left[1 - \frac{m_e}{m_p} + \frac{11}{48} \alpha^2 - \frac{28}{9} \frac{\alpha^3}{\pi} \ln \alpha^{-2} - \frac{14}{9} \left(\frac{\alpha R_p}{\lambda c} \right)^2 + \dots \right],$$
 其中包括了里德伯常数 R_∞ 、光速 c 、电子质量 m_e 、质子质量 m_p 、超精细结构常数 α 等信息,因此精密测量氢原子的基本结构参量有着重要的科学价值.

亨施教授从 1972 年起就从事氢原子的精密测量,首先利用他自己发明的饱和和吸收光谱以及气体放电的方法测定了氢原子 $n=2 \rightarrow n=3$ 的跃迁光谱^[12],从中消除了多普勒本地,分辨出了 H_α 线系的精细分裂与兰姆位移.在 1974 年测出了 H_α 线系的 $2P_{3/2} \rightarrow 3D_{5/2}$ 的分量的真空波长的波数值: $15233.07021(9) \text{cm}^{-1}$ ^[13],以及里德伯常数 R_∞ 值: $109737.3130(6) \text{cm}^{-1}$,以上测量都达到了 9 位有效数字,亨施继续改进测量方法与手段,1987 年利用双光子光谱的方法直接测量到氢原子 $1S - 2S$ 的跃迁波长为 $2466061413.8(1.5) \text{MHz}$,达 10 位有效数字^[14],1992 年又用原子束与 CH_4 光频标的方法,直接测量了氢原子的 $1S - 2S$ 的跃迁、里德伯常数,测量精度提高了 18 倍^[15],1997 年用原子束与高精度

CH_4 光频标加双光子跃迁的方法,将氢原子的 $1S - 2S$ 的跃迁频率、里德伯常数,测量精度提高到了 13 位有效数字^[16].2000 年,建立了飞秒光学梳状发生器,利用法国巴黎天文的原子喷泉钟作为基准,又进一步提高了精度^[17],测得氢原子的 $1S - 2S$ 的跃迁为 $\nu(1S - 2S, 243 \text{nm}) = 2\,466\,061\,413\,187\,103(46) \text{Hz}$,里德伯常数 R_∞ 值为: $R = 109737.31568639(91) \text{cm}^{-1}$ 与兰姆位移 $L(1S)$ 为 $8172.876(29) \text{kHz}$,测量精度提高到了 14 位有效数字,测量的实验方案如图 3 所示.在此基础上,亨施小组还精密测量了超精细常数 a 的值为 $137.0359924(41)$,并测出氢原子 a 值随时间变化范围为: $-2.5 \times 10^{-16} \leq \dot{a}/a \leq +1.2 \times 10^{-16} \text{年}^{-1}$ ^[18],以上成果对我们了解光速是否随时间变化,验证量子电动力学的基本定律等起着重要的作用.

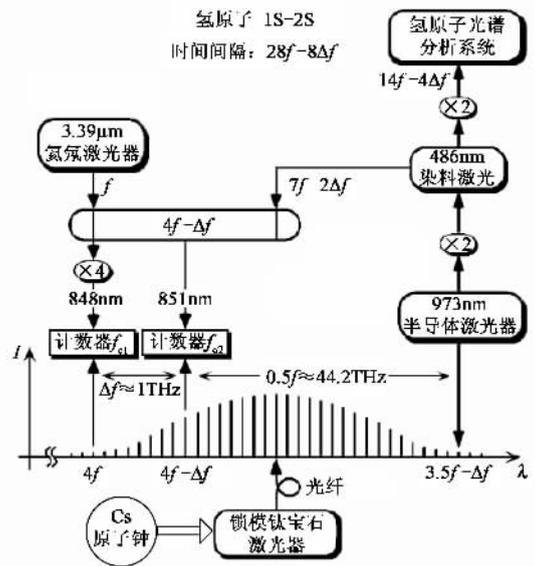


图 3 为用铯原子钟锁定飞秒激光光梳后对氢原子进行测量的示意图

3 2005 年度物理诺贝尔物理学奖的意义

2005 年度诺贝尔物理学奖授予了现代光学两个活跃的研究方向:量子光学和激光精密测量.量子光学研究,不但推动了人们对光子本质的深刻认识,也孕育了新的研究方向,如压缩态、纠缠态、量子计算、量子通信等.这些新的研究方向不但使我们对量子力学等基本物理问题有了进一步的认识,也为信息、材料等应用学科提供了新的研究方法.激光精密测量技术,特别是飞秒激光光梳技术不但为验证基本物理常数、检验广义相对论与狭义相对论、测量

脉冲星、原子与分子精密光谱测量等基础研究提供了新的方法与技术,也将为应用领域如:时间与频率计量、长距离时钟同步、甚长基线干涉测量(VLBI)、高精度全球定位系统、遥远星空跟踪与探测、地球旋转的监测、无线通信网络同步等提供新的技术。

量子光学与激光精密测量研究的成果还将推动相关领域的发展,如天体物理、计量学、计算机科学技术、通信技术等。21世纪初以上两个学科还将发挥更大的作用。

参 考 文 献

[1] Glauber R J. Phys. Rev. ,1963 ,130 2529 ;Phys. Rev. 1963 , 131 2766
 [2] Polzik E S ,Carri J ,Kimble H J. Applied Physics B : Lasers and Optics , Issue :1992 55 :279
 [3] Ekert A K. Phys. Rev. Lett. 67 ,1991 :661
 [4] Jennewein T , Simon C , Weihs G *et al.* Phys. Rev. Lett. , 2000 84 #729
 [5] Fizeau H , Heed C R. Acad. Sci. Paris , 1849 , 29 :90
 [6] Barger R L , Hall J. Phys. Rev. Lett. , 1969 , 22 :4
 [7] Evenson K M , Wells J S , Peterson F R *et al.* Phys. Rev. Lett. , 1972 , 29 :1346
 [8] Baklanov Ye V , Chebotayev V P. App. Phys. A , 1977 , 12 :97
 [9] Eckstein J N , Ferguson A I , Hänsch T W. Phys. Rev. Lett. , 1978 40 :847
 [10] Reichert J , Niering M , Holzwarth R *et al.* Phys. Rev. Lett. 2000 ,84 :3232
 [11] Jones D J , Diddams S A , Ranka J K *et al.* Science , 2000 , 288 : 635

[12] Hänsch T W , Shahin I S , Schawlow A L. Nature , 1972 , 63 :235
 [13] Hänsch T W , Nayfeh M H , Lee S A *et al.* Phys. Rev. Lett. , 1974 , 32 :1336
 [14] Beausoleil R G , McIntyre D H , Foot C J *et al.* Phys. Rev. A , 1987 35 :4878
 [15] Andreea T , König W , Wynands R *et al.* Phys. Rev. Lett. , 1992 69 :1923
 [16] Udem Th , Huber A , Gross B *et al.* Phys. Rev. Lett. , 1997 , 79 2646
 [18] Fischer M , Kolachevsky N , Zimmermann N *et al.* Phys. Rev. Lett. , 2004 92 :230802



作者简介 陈徐宗,1958年 出生,江苏省苏州市人,北京 大学信息科学技术学院副院 长,教授,博士生导师,量 子电子学研究所所长,教 育部量子信息与测量重 点实验室冷原子物理与 量子精密测量实验室主

任。1993年于中科院上海光机所获博士学位,1993—1995年在北京大学电子学系做博士后,1996—1997年在日本工业技术研究院任特别研究员,2000年任教授,2003—2005年德国海德堡大学、法国普鲁旺斯大学等访问教授。陈徐宗长期从事激光冷却、玻色-爱因斯坦凝聚、半导体激光频标、飞秒激光稳频与量子精密测量等研究。在国内外重要期刊上发表论文100多篇。



北京欧普特科技有限公司

光学元件库—欧普特科技

欢迎访问:

www.goldway.com.cn

北京欧普特科技有限公司严格参照国际通常规格及技术指标,备有完整系列的精密光学零部件(备有产品样本供参考)供国内各大专院校、科研机构、实验室随时选用,我公司同时可为您的应用提供技术咨询。我公司可以提供美国及欧洲产的优质红外光学材料,如硒化锌、硫化锌、多光谱硫化锌等。



- 光学透镜:平凸、双凸、平凹、双凹、消色差胶合透镜等。
- 光学棱镜:各种规格直角棱镜及其他常用棱镜。
- 光学反射镜:各种尺寸规格的镀铝、镀银、镀金及介质反射镜,直径5mm—200mm。
- 光学窗口:各种尺寸规格、材料的光学平面窗口,平晶,直径5mm—200mm。
- 各种有色玻璃滤光片:规格为直径5mm—200mm(紫外、可见、红外)及窄带干涉滤片。
- 紫外石英光纤:进口紫外石英光纤,SMA接口光纤探头,紫外石英聚焦探头。

地址:北京市海淀区知春路49号希格玛大厦B座306室

电话:010-88096218/88096217 传真:010-88096216 网址:www.goldway.com.cn

联系人:徐勇小姐 陈锵先生 施楠小姐

Email: xuyong@goldway.com.cn kevinchen@goldway.com.cn shinan@goldway.com.cn