

# 原子钟与拉姆齐

## ——1989年诺贝尔奖金物理学奖获奖作品介绍

邓金泉

(中国科学院武汉物理研究所)

本文简要介绍了1989年诺贝尔奖金物理学奖获得者之一诺曼·拉姆齐(Norman F. Ramsey)的生平及其对原子钟的发展所作出的杰出贡献。

时间标准是人类探测和研究物质运动和变化的标尺。计时因人类的需要而创立,计时方法和计时标准的准确与稳定,亦随人类的进步而不断地改进和提高。从古代的日晷、刻漏,发展到近代的机械摆钟,直到现代的石英钟和原子钟,无不留下了开拓者的光辉足迹。

近三十年来,随着量子物理学、微波波谱学和无线电电子学的深入发展,对微观物质与电磁场的相互作用,对物质的微观量子态和它的跃迁,都进行了深入系统的研究。实验证明,微观量子态的跃迁伴随产生稳定不变的周期性的信号,从而找到一种新的作为时间或频率计量的标准,即以物质微观运动的量子跃迁作为时间频率标准——原子钟。

原子钟,这个当今世界上最准确的钟(铯钟)和最稳定的钟(氢钟),都包含了1989年诺贝尔奖金物理学奖获得者之一诺曼·拉姆齐的杰出贡献。

拉姆齐1915年8月27日出生在美国首都华盛顿。中学毕业后,进入哥伦比亚大学学习物理学,获得学士及硕士学位。在英国剑桥大学工作两年后,于1937年夏回到哥伦比亚大学,在著名分子束专家拉比(I. I. Rabi)教授指导下攻读博士学位。有趣的是拉姆齐受到导师的第一个忠告是“分子束方面没有多少前途”<sup>[1]</sup>,然而出乎预料,仅几个月后拉比教授发明了分子束磁共振方法,导致了許多重大发现,如核四极矩、Lamb位移等,并因此而荣获1944年诺贝尔奖金物理学奖,拉姆齐也因利用分子束研究分子的旋转磁矩于1940年取得博士学位。在

以后的研究工作中,他利用分离振荡场的思想发展了他导师的方法,这一思想立即导致了铯原子钟的发明,并在许多其它领域得到成功的应用<sup>[2]</sup>,使他获得了科学上最高荣誉。

### 一、分离振荡场方法

拉比的原子束磁共振方法是斯特恩和盖拉赫进行的早期原子束实验的推广。实验装置是由原子束和一个短的谐振腔组成。原子线宽取决于原子渡越谐振腔的时间。对于速度一定的原子,谱线宽度与振荡场区的长度成反比,似乎可以用增加腔长的办法来减小线宽,但振荡场区要求保持均匀的静磁场,因而加长振荡场的结果不尽人意。振荡场区加长还遇到新的问题:原子束的强度大减,长的振荡场内会因静磁场均匀性降低而产生其他增宽,所以加大振荡场区长度,谱线反而增宽。

这时的拉姆齐已是哈佛大学的物理教授,他也在对这个问题进行各种探讨。正当他冥思苦想之际,迈克耳孙的测星干涉仪的设计思想使他受到启发<sup>[3]</sup>。迈克耳孙的测星干涉仪是本世纪初杰出的工作之一。他把100英寸天文望远镜加上两面相距6m的反射镜,利用两反射镜的光束互相干涉,把望远镜的角分辨率提高了几十倍。拉姆齐经过计算,可以用类似的办法来改造原子束的振荡场。1949年,拉姆齐建议采用两个在空间上分离的短谐振腔系统,以增加原子与场的相互作用时间<sup>[4]</sup>,使得谱线比同样长的单腔要窄,而又能减小静磁场不均匀性的影响。采用这种双腔结构观测到的共振线

宽比单腔结构观测到的要窄 65%，分离振荡场系统的结构如图 1 所示，其共振线形如图 2 所示。共振线形具有双狭缝衍射图样的形状，图样中的中心频率  $\omega_0/2\pi$  对应两个 Ramsey 腔中原子的平均进动频率，共振的窄中心峰的宽度由两腔间距离  $L$  决定，而总线形的宽度只由一个射频场区域中渡过的时间  $\Delta l/v_a$  决定。

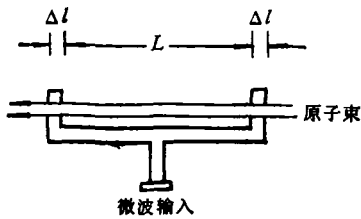


图 1 Ramsey 分离振荡场系统的结构

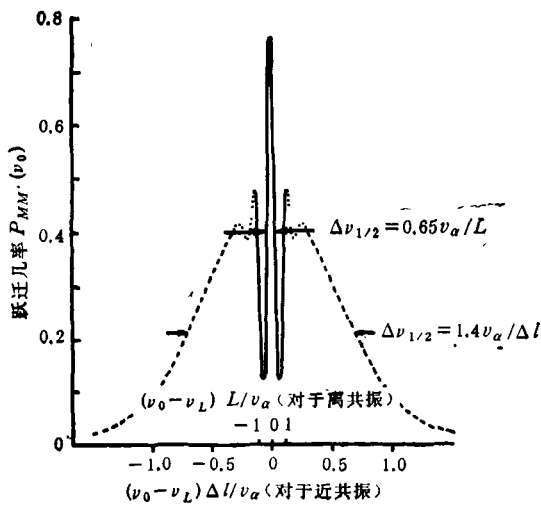


图 2 分离振荡场中原子跃迁几率与频率的关系  
(实线是以近共振计算的,虚线是以离共振计算的;  
点线是两者间的外推)

## 二、铯 钟

拉姆齐的思想立即使铯原子钟获得成功的希望。1949 年,也是拉姆齐提出分离振荡场的同一年,美国国家标准局就已开始利用铯研制原子束频率标准,1952 年成功地观测到  $(F = 4, m_F = 0) \rightarrow (F = 3, m_F = 0)$  的微波跃迁。不久之后,这个装置利用了拉姆齐的分离振荡场技术(间距 50cm),在 9192MHz 观测到拉姆

齐谐振花样的中心峰线宽仅为 325Hz。所以共振线的  $Q$  值( $\sim 10^7$ )是很高的。此外,因为典型的信噪比为  $10^4$ ,共振的中心可以定位到其宽度的很小部分,精度可以比只由  $Q$  值表示的高得多。这样导致了第一台铯束原子钟问世。1967 年 10 月,在印度新德里召开的第十三届国际计量大会,正式把铯原子跃迁振荡 9,192,631,770 次所经历的时间定义为 1“秒”,从而揭开了原子时的新纪元。目前,铯束频标的准确度已高达  $2 \times 10^{-14}$ ,是当今准确度最高、为世界各国公认的一级频率标准。

## 三、氢 钟

拉姆齐对研制原子钟的另一贡献是提出并建造了氢原子激光器。1954 年, Townes 以及苏联学者 Басов 和 Прохоров 各自独立地指出了氢分子受激发射放大机制,并制成了振荡器。氢分子受激辐射振荡器所产生的频率稳定性和频谱纯度,远远超过了一般无线电信号发生器。因此,从一开始,它就用作时间频率标准。一段时间,“分子钟”成了时间频率计量领域的“宠儿”。1960 年,拉姆齐和他的同事研制成功第一台氢原子激光振荡器,由于它具有比氢分子钟更为优越的性能,所以引起科学家们极大的兴趣,后来甚至使以铯跃迁频率来定义秒推迟了几年。经过近 30 年的不断改进,目前氢钟最高的稳定度优于  $1 \times 10^{-15}/h$ 。

在氢分子振荡器中,沿用了束型波谱仪的技术,即分子束在穿过微波谐振腔期间和射频场发生相互作用,并产生受激辐射能量以维持自持振荡。当把这种方法应用于氢原子束时就遇到困难了,这是因为氢原子基态超精细能级跃迁属于磁偶极跃迁,它的跃迁几率比氢分子的电偶极跃迁几率要小四个数量级,因此,在相互作用的时间内,受激辐射能量太小,除非以同样的倍数增加束强,否则就难以产生振荡。其次,氢原子很轻,速率高,通过谐振腔的时间太短,这进一步减小了受激辐射能量,并使共振谱线增宽。所以原子束共振的方法对实现氢原子激光振荡是不适宜的。为了克服上述困难,拉

姆齐和他的同事们采用了贮存泡技术<sup>[4]</sup>。贮存泡的作用是，一方面使处在上能级的原子能长时间地逗留在谐振腔内，与辐射场相互作用，从而缩小了线宽；另一方面，在饱和效应较弱时，谱线峰值频率上的发射功率随相互作用时间 $T$ 的平方而增加，所以贮存泡又有利于增加受激发射能量。当然，这两者是有联系的。贮存泡技术实际上是一种时间域上的分离振荡场方法<sup>[5]</sup>。具有贮存泡的谐振腔如图3所示。

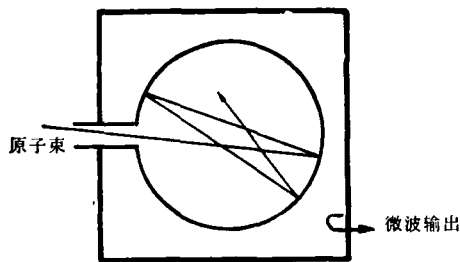


图3 氢激光器中贮存束谐振系统

由于氢原子与壁的碰撞产生微小的相位变化，导致微波激光器频率产生 $\sim 10^{-12}$ 的移动。1968年，拉姆齐再一次利用空间分离振荡场的技术来克服这种频移<sup>[7]</sup>。一个线度为1.5 m的大泡，附加两个与平常激光器一样的腔泡结构，它们经涂壁且相互连通。这两个附加腔起到了分离振荡场的作用，同时，大泡增加了贮存泡的线度，从而减小泡内原子的碰撞率，壁移比通常的

激光器小10倍，使氢激光器朝着新的频率基准迈进了一步。

拉姆齐的实验工作包括从原子、分子束到粒子物理。他专心从事分子、原子、原子核及核子电磁特性的精密测量，在弱作用中宇称不守恒被预言以前，就首先从实验上进行了强作用中宇称是否守恒的研究。到目前为止，他已发表论文及专著356篇，其中不少是开拓性工作。他培养了许多优秀人才，包括他的84位博士生。自1947年起，拉姆齐一直在哈佛大学工作，现在是希金斯讲座教授。他曾担任过美国物理学会主席和美国大学研究联合会主席，主持了费米国家加速器实验室。他曾获得许多著名大学、研究院的荣誉学位和众多的科学奖。现在已是古稀之年的拉姆齐，作为美国科学顾问小组的重要成员，仍然在为科学技术的发展献计献策。

- [1] G. L. Barbara, *Physics Today*, **42**-12(1989), 17
- [2] N. F. Ramsey, *Physics Today*, **33**-7(1980), 25.
- [3] 郭奕玲, 物理通报, No. 1 (1990), 1.
- [4] N. F. Ramsey, *Phys. Rev.*, **76**(1949), 996; **78**(1950), 695.
- [5] H. M. Goldenberg et al., *Phys. Rev. Lett.*, **5**(1960), 361; *Phys. Rev.*, **126**(1962), 603.
- [6] N. F. Ramsey, *Rev. Sci. Instr.*, **28**(1957), 57; Nobel Lecture, Dec. 8, (1989).
- [7] E. Uzgiris and N. F. Ramsey, *Phys. Rev. A*, **1**(1970), 429.

(上接第538页)

成4万亩；87年预计推广5万亩，实际上推广了9万亩；88年预计完成10万亩，实际完成40万亩。光转换膜发光技术、光磁在人参和大豆上的应用技术已经鉴定，另外，在玉米、水稻、大豆、小麦、棉花、黄瓜、甜菜、梨、葡萄等作物上的光助素应用技术即将进行鉴定，对于人参光肥的应用研究也取得了可喜进展。这些进展和成果为扩大发光学在农业上应用的新领域和促进农作物的增产作了必要的技术准备。

总之，我们可以这样讲，农业科学与技术不管沿着什么方向前进，随着农业发展，光物理学在这个进程中会发挥它的不可替代的推动作用。

物理

用。

- [1] K. C. Smith. 著, 沈恂译, 光生物学, 科学出版社, (1984), 55.
- [2] N. P. Voskresenskaya, *Ann. Rev. Plant Physiol.*, **23** (1978), 219.
- [3] R. K. Clayton et al., *The Photosyn. Bacteria*, Plenum Press Corp, (1978), 53.
- [4] Govindjee, *Photosynthesis*. Academic Press, Inc. (London). (1982), 86.
- [5] Н. А. Обушков, *Сельское Хозяйство за рубежом*, **5**(1985), 108.
- [6] 唐树延 植物生理学报, **13**(1987), 221.
- [7] G. A. Crosby et al., *J. Phys. Chem.*, **34** (1963), 743.
- [8] 村田纪夫, 光生物学学会出版セツター, (1979), 63.
- [9] G. M. Krause et al., *Photosynthesis Res.*, **5**(1984), 139.
- [10] M. Havaux et al., *J. Agric. Sci.*, **104**(1985), 22.