

铯原子钟的创建

郭奕玲

铯原子钟是二十世纪中叶物理学的一项惊人成就，其准确度和稳定度之高，使量子频标有可能取代以天体运动为基础的历书时而成为计时的基准。它的发明应归功于三个方面，一是光谱超精细结构(hfs)的研究。二是分子束磁共振实验技术的发展，三是分离振荡场方法的提出。这项成就生动地阐明了基础研究和应用研究之间的依赖关系。

(一) 超精细结构的研究

早在1891年A. A. 迈克尔逊为了寻找理想的单色光源，就曾用他自己发明的干涉仪普查各种光源的单色性，他发现许多谱线实际上都含有复杂的成分。这就是光谱的超精细结构。由于这些成分之间的“距离”非常之小，一般的光谱仪无法分辨。1896年迈克尔逊选中镉红线 $Cd\lambda 6438$ (即波长为 6438 \AA 的镉谱线)作为测量长度的基准，正是因为这条谱线没有显示出超精细结构。

从这以后，超精细结构被光谱学家广泛研究。除了用迈克尔逊干涉仪，还用到了法卜利-白洛标准具和陆末-革尔克板作为分析工具。但即使用灵敏度最高的法卜利-白洛标准具，要精确测定超精细结构的波长数据也有很大困难，因为超精细结构的裂距比精细结构还要小千倍，测出的波长虽然可达七位有效数字，但波长的差值往往只有二三位有效数字。1930年塞曼(Zeeman)、贝克(Back)和古兹密特(Goudsmit)用光度计测量 $Bi\lambda 4722$ 谱线照片所得数据就可以明瞭这一点，数据如表1。

表1 $Bi\lambda 4722hfs$ 值

波长 $\lambda(\text{\AA})$	波数 $\tilde{\nu}(\text{cm}^{-1})$	相对强度
4722.652	21168.640	5.5
4722.618	21168.792	5
4722.574	21168.989	3.5
4722.433	21169.620	2
4722.389	21169.816	5
4722.332	21170.074	10

裂距仅为 $0.03-0.04 \text{ \AA}$ 或 $0.1-0.2 \text{ cm}^{-1}$ 。

然而，就在如此困难的条件下，光谱学家进行了大量的实验工作，普查了各种可能测量的超精细结构，积

累了丰富的资料，经过周密的比较和分析，从浩瀚的数据中理出了头绪，找到了规律。1924年，泡利提出核自旋的假设(比电子自旋的提出还要早一年!)，他认为超精细结构可能是由于电子与核磁偶极矩之间的相互作用引起了能级分裂。1927年，在兹密特与贝克将泡利的理论运用于Bi光谱，成功地解释了Bi谱的超精细结构。

同位素的存在也可以引起光谱结构的复杂化。尤里(Urey)在1932年用光谱方法发现氢的同位素——氘，第一次证实了超精细结构中的同位素效应。这一现象比较容易理解，因为里德伯常数与原子核的质量有关，氘核的质量是氢核的二倍，所以里德伯常数略有不同，谱线因此发生同位素位移。

但是对于重元素，理论计算与实验测量符合得并不好，偏差的出现是因为造成同位素位移的成因不仅是由于核的质量不同，还要考虑到核的体积。1931年，巴特勒特(Bartlett)曾粗略推算出重元素的核有效半径为 10^{-12} cm 。这一推测与其它方法所得基本相符，证明体积效应确实存在。

1935年舒勒(Schüler)和斯密特(Schmidt)还发现超精细结构中有一类与电相互作用有关。他们提出核电四极矩效应，认为核内的电荷分布具有非球对称性。

总之，原子光谱的超精细结构十分复杂，同时存在核磁矩、核电四极矩和同位素等效应。人们根据超精细结构，计算各种原子的核自旋、核磁矩、核电四极矩等重要参数，从中获取有关原子和分子内部电荷分布等信息。从二、三十年代起展开的广泛研究，大大促进了人类对原子核的了解，也为原子钟的诞生准备了基本条件。

(二) 用分子束磁共振方法研究超精细结构

1938年，拉比(I. I. Rabi)创立分子束磁共振方法。实验原理大致如图1。原子束(或分子束)从源飞出，经过选态磁场后，不同能态的原子分道扬镳，低能态原子进入振荡场区，受到微波场的激励。微波的频率可调，当调谐到与原子的跃迁频率一致时，就会发生共振跃迁，使原子跳到高能态。然后原子束再经过第二道选态磁场，高能态的原子被选送到检测器，使检测器接收到增强的信号。以微波频率 ν 为横坐标，信号强度

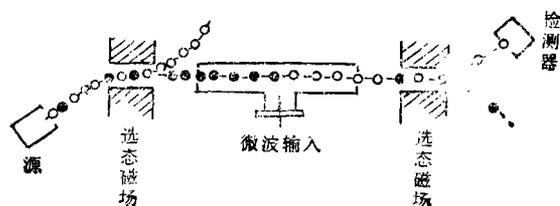


图1 分子束磁共振实验原理

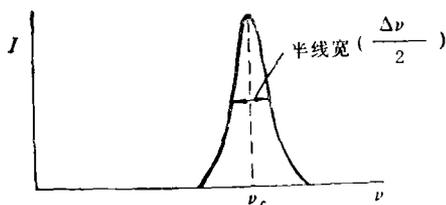


图2 共振曲线

I 为纵坐标,可以得到如图2的共振曲线.

共振曲线的极大值相当于原子的跃迁频率,根据玻尔条件,跃迁频率

$$\nu_0 = \frac{E_2 - E_1}{h},$$

其中 E_2, E_1 分别为高能态和低能态的能量,在这里所谓的高能态和低能态都是相对而言,泛指超精细能级中的任两个状态(如图3).

对于超精细结构的研究,用共振方法比用光谱方法有效得多,因为超精细结构的裂距正好相当于微波波段.从微波的共振频率可以直接求得超精细结构之间的裂距,而微波的频率可以测得非常准确,因此共振方法的测量结果远比光谱方法为好.

1940年,在拉比的支持下,库什(P. Kusch)等人把分子束磁共振方法用于测量碱金属原子的基态超精细结构的 $\Delta F = \pm 1$ 跃迁,其中包括 Li、K、Na、Rb 和 Cs,实验达到很高的精确度.铯 ^{133}Cs 基态超精

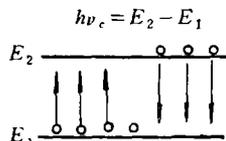


图3 跃迁示意图

表2 库什等人测量碱金属原子基态超精细结构裂距的结果 $\Delta\nu \times 10^{-6}(\text{s}^{-1})$

原子	1940年测	1949年测
^7Li	803.54 ± 0.03	803.512 ± 0.015
^{23}Na	1771.75 ± 0.07	1771.61 ± 0.03
^{39}K	461.75 ± 0.02	461.723 ± 0.010
^{85}Rb	3035.7 ± 0.2	3035.7 ± 0.15
^{133}Cs	9191.4 ± 0.9	9192.76 ± 0.10

精确度又向前推进了一步,得到了结果有如表2.

从表2可以看出,在碱金属原子中,铯的超精细结构裂距最大,达 9.2GHz .测量的精确度也很高,约为 10^{-3} .我们知道,碱金属原子都属于单电子原子,和氢原子有类似的性质,原子光谱的规律性最明显.而铯是碱金属元素中最重的一员(钫 Fr 除外,因为它是放射性元素).原子质量大,则多普勒频移小,谱线宽度也随之减小,因此可以得到更高的精确度.最有利的是,铯在自然界中只有一个同位素,即铯 ^{133}Cs ,所以首选铯作为原子钟的工作物质.图4是铯 ^{133}Cs 基态的超精细结构,铯原子钟就是以铯基态 $6^2S_{1/2}$ 的 ($F = 4, m_F = 0 \rightarrow F = 3, m_F = 0$) 跃迁频率作为基准的.

(三) 分离振荡场方法的提出

早在1940年拉比就预见到 ^{133}Cs 的超精细结构有可能作为计量频率的基准.拉比的学生拉姆齐(Norman F. Ramsey, 1915—)当时正在哥伦比亚大学随拉比做博士论文,用分子束方法研究分子的旋转磁矩.他记得当时在拉比小组中曾讨论过用 ^{133}Cs 的超精细结构测量频率的可能性,并打算首先用之于测量引力红移.拉比曾建议美国国家标准局(NBS)研制原子钟,可是由于技术条件尚未成熟,这一建议只好暂束高阁.

1945年拉比在演讲中又一次公开讨论到原子钟.当时纽约时报曾以醒目标题报道了演讲内容.标题说:“1944年诺贝尔奖获得者拉比教授讲到最新发展.‘宇宙钟摆’也有计划.原子内部的射频将用于最精确的时钟”.

第二次世界大战期间由于雷达广泛运用,微波电子学有了长足的发展,用感应法和吸收法相继发现核磁共振,人们认识到,用原子钟计时的年代已经为期不远了.

但是,常规的分子束磁共振方法遇到了困难.根据拉比的设计,原子(或分子)需经一段振荡场区,在微波振荡场的作用下,发生能级跃迁.在整个振荡场区需要施加一个稳定的均匀磁场.计算表明,原子经过振荡场区的时间越长,跃迁的几率就越大,谱线的宽度也就越窄.为了压缩线宽,提高测量的精度,就必须尽量增大振荡场区的长度 L .从图5可以看到,低能态原

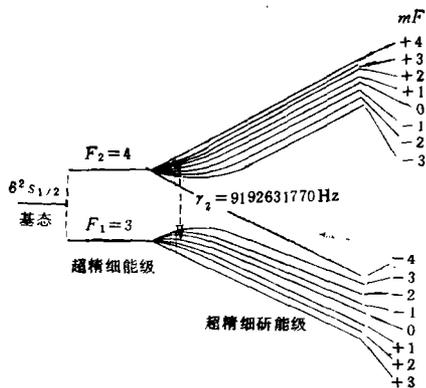


图4 铯 ^{133}Cs 基态的超精细结构

细结构的第一批数据资料就是他们在这个时候发表的(参看表2).

后来由于第二次世界大战爆发,研究工作中断了好几年.1949年,库什和达伯(Taub)在研究碱金属原子自旋回旋比时采用极值法定测定超精细结构的裂距.他们指出,磁场取适当的值有可能得到共振频率的极值,这样得到的共振频率将在一级近似的程度上与磁场强度无关.用这个办法,他们把测量超精细结构的

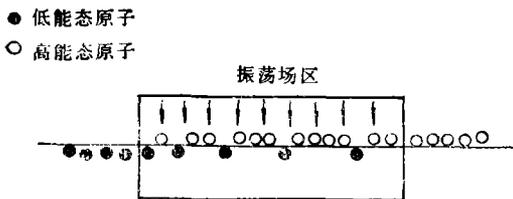


图5 原子在振荡场中行进得越远,跃迁的几率也就越高

子受微波的激励,越是走得远,激发到高能态的原子越多,跃迁的几率也就越高。可是实际上与人们的预计相反,原子束的射程长了,强度必然减弱;而且振荡

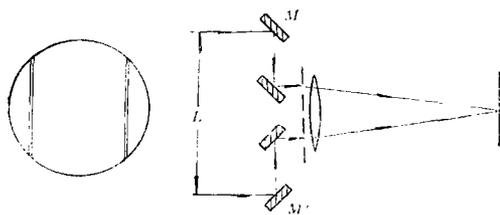


图6

场区越长,越难保证磁场均匀,所以加长振荡场区,可能共振谱线反而变宽。如何提高共振谱线的品质因数就成了原子钟创建中亟待解决的问题。

这时拉姆齐已经离开哥伦比亚大学,转到哈佛大学任教。1948年3月,他在讲授物理光学的课程时,迈克尔逊测星干涉仪的设计思想给了他重要启示。

测星干涉仪是二十世纪二十

年代初期迈克尔逊又一项脍炙人口的成就。用这个方法使天文望远镜第一次测出了星体的角直径,众所周知,望远镜能分辨的最小角度 θ_1 与望远镜的孔径直径 D 成反比,即 $\theta_1 = 1.22\lambda/D$,其中 λ 为光的波长,孔径越大,分辨率越高。1891年,迈克尔逊按照斐索1868年提出的方案,在望远镜的物镜上加一挡板,挡板上留下距离可调的对称的两道狭缝(如图6),用双缝干涉的办法测一级暗纹,使分辨率增大一倍,即

$$\theta_1 = 1.22\lambda/2d,$$

其中 d 为两缝的距离。于是测出木星卫星的角直径为1弧秒。迈克尔逊在他的《光波及其应用》(1903年)一书中,还特别提到这样做的好处。两道狭缝不仅比同等直径的物镜分辨率高一倍,而且物镜其它部分如有缺陷,也不会影响观测效果。1920年迈克尔逊又在望远镜上装一支架,用相距为 L 的两反射镜 M 与 M'

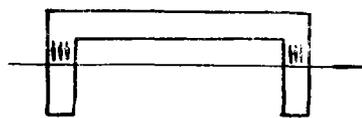


图8 拉姆齐的分离振荡场

图7

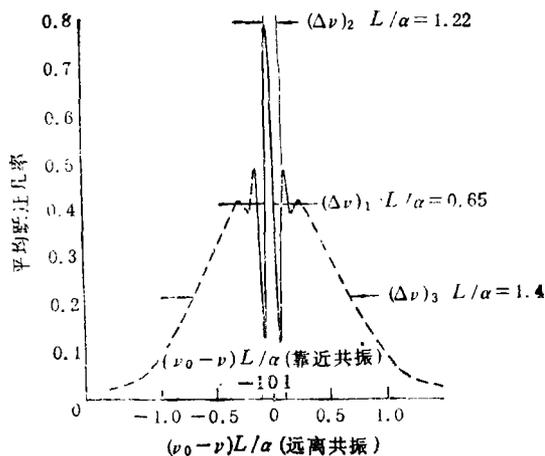


图9 拉姆齐计算所得的分离振荡场共振曲线(其中, L 表示分离振荡场的长度, l 表示单振荡场的长度, α 表示分子的最可几速度)

将来自星体的平行光反射到望远镜(如图7),使分辨率又提高 L/d 倍,成功地测出了猎户座 α 星的角直径,所得结果为0.047弧度秒。

迈克尔逊这一成就后来被人们写进了教科书,拉姆齐当然是熟悉的。

拉姆齐想,可不可以也用类似的办法来改进分子束磁共振实验呢?经过计算,证明是可行的。在作用区的前端和末端各加一狭窄的振荡场,如图8,只要两振荡场同位相,其作用就跟振荡场充满整个作用区一样。磁场的均匀性不会影响谱线的宽度,两振荡场区之间的空间叫漂移区。漂移区内虽然需加弱磁场,但对均匀性的要求并不高,因此可以尽量增大场区的距离,得到的线宽比用同长度的单振荡场得到的还要窄。

1949年8月,拉姆齐以“一种新的分子束共振法”为题在《物理评论》发表了自己的设计方案,附有两张表示计算结果的共振曲线,其中一张如图9,并且指出:“使用分离振荡场的好处有:(1)从理论上讲,共振曲线比同一长度的振荡场尖锐,有可能获得更高的测量精度,(2)共振不会被均匀恒磁场的均匀性加宽,因为决定共振位置的是分子射程中的平均场值,……(3)更适用于波长短于匀场区的辐射……”。

(四)铯原子钟的创建

拉姆齐的分离振荡场方案为提高分子束磁共振法的测量精度开辟了一条新的途径。但是再好的方案也需经实践的检验,才能被公众接受。在美国国家标准局里,有一位专家叫赖昂(Lyon),1952年首先按拉姆齐的分离振荡场方法测量 ^{133}Cs 的超精细结构。共振曲线的宽度虽然减小了,但却出现了明显的不对称性。曲线中心经过长时间后会逐渐偏移。他测到的共振频率为 $9192.6318-9192.6319\text{MHz}$,比拉比方法得到的平均结果 9192.632MHz ,仅提高了一个量级。

原子的超精细能级与光谱超精细结构

王 连 璧

原子是由原子核和核外电子构成的，原子核和核外电子都处在运动状态，具有能量。根据实验(例如光谱实验和弗兰克—赫兹实验等)和量子论研究表明，原子中电子(原子核也一样)的能量不是任意的，只能取一些不连续定值，即是量子化的。这些不连续的能量状态就是原子能级。

根据量子力学，原子中电子的能量首先决定于其主量子数 n ，随着 n 从 1 到 2、3、4、……直到 ∞ (无穷大) 电子能量逐级增加，当 $n = \infty$ 时电子能量为零。其次，原子中电子的能量还决定于其轨道角量子数 l ，对于给定主量子数 n ， l 可以为 0、1、……， $n-1$ 共 n 个值， l 不同时电子能量不同。就是说，主量子数为 n 的能级要分裂成 l 不同的 n 个子能级。例如， $n=2$ 时有两个子能级， l 分别为 0 和 1； $n=3$ 时有三个子能级， l 分别为 0、1、2。

根据狄拉克相对论量子力学，电子具有自旋 $s = \pm \hbar/2$ 。由于电子自旋的存在，轨道角量子数 l 对应的子能级又分裂成两个能级，一个对应于 $l + 1/2$ ，另一个对应于 $l - 1/2$ 。($j = l \pm s$ 称为总角量子数。 l 不同， j 相同的两能级能量相同，即间并。) 主量子数为 n 的能级因 l 和 s 不同而分裂成的几个能级叫做精细能级。精细能级的能量表达式中包含有精细常数 $\alpha = 7.297 \times 10^{-3} \approx 1/137$ 。由于精细能级的存在，原子电子跃迁而辐射的光谱线存在精细结构。

此外，原子核具有角动量、磁矩和电四极矩，与原子电子发生作用而使电子主量子数 n 、角量子数 l 确定的能级进一步发生分裂，即使得原子的精细能级又分裂成几个次能级。这些次能级被称为原子的超精细能级。由于超精细能级的存在，使原子光谱中出现高分辨本领的光谱仪可以分辨的超精细结构。

他所在的国家标准局里，意见很不统一，有人鼓吹石英晶体作频率标准的优越性，有人热衷于氨分子钟，认

液空冷阱 偏转磁铁 电离规 遏止线 检测线 液空冷阱

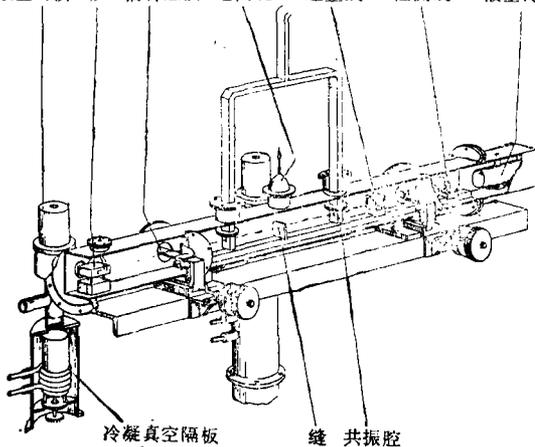


图 10 埃森小组 1953—54 年设计的铯原子钟

为氨分子钟比分子束方法既简单又可靠，赖昂小组得不到有力的支持，经费削减，人员调离，最后只好散摊。

英国国家物理实验室的埃森 (L. Essen) 对铯束钟也有浓厚兴趣，他在 1953 年访问美国时了解到有关情况，回英国后决心把这项试验继续下去。1955 年 5 月他相继用单振荡场和分离振荡场试验成功，得到 ^{133}Cs 超精细结构裂距为 9192.63183 MHz，比美国国家标准局的数据又前进了一位。图 10 就是当年建造

铯原子钟时绘制的图纸。从 1955 年 6 月开始，埃森小组和美国海军天文台协作，联合测定以历书时表示的铯原子超精细能级的零场跃迁频率，历经三年，最后测出这个频率为 9192.631770 (20) MHz，不确定度为 2×10^{-9} 。这一频率后来在 1967 年被第十三届国际计量大会正式用来规定时间的基准。秒的新定义就是这样产生的。

美国麻省理工学院的扎卡赖亚斯 (Zacharias) 从 1954 年起也对铯频标进行了坚持不懈的试验。他几经挫折，终于在 1956 年制成了小型商品铯原子钟。

在这以后，量子频标的工作飞速发展。拉姆齐等人继续对铯钟的各种可能出现的干扰进行研究，致力于消除射频相移和其它频移因素，使铯钟的稳定度和准确度不断提高，大体说来，几乎每五年提高一个量级。世界各国竞相建立自己的铯频标。我国在 1981 年也建立了自己的铯频标基准，精确度达 10^{-13} 。

为了表彰拉姆齐在发展原子钟方面的功绩，1989 年诺贝尔物理奖金的一半授给了他。

量子频标的研究对科学技术发展的促进作用是不言而喻的，它的进展生动地说明了基础研究和应用研究的血肉联系，基础研究为应用研究指明方向、开辟道路和奠定基础；而应用研究则推动和促进了基础研究的发展，也为基础研究提供必要的物质条件，是基础研究能够顺利进行的保证，两者之间的密切配合，必然会产生良性循环。