

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 $l - 1/2$ 。($l = l \pm s$ 称为总角量子数。 l 不同， s 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

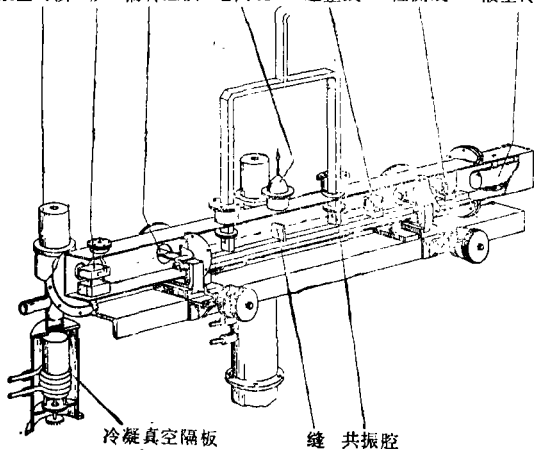


图 10 埃森小组 1953—54 年设计的铯原子钟

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。