

基本物理常数及精密测量

会议文集

中国计量科学研究院编印

一九七三年二月

编者说明

基本物理常数是物理学中的一些普适常数，主要的有真空中的光速(c)、电子电荷(e)、普朗克常数(h)、电子质量(m_e)、精细结构常数(α)及阿伏伽德罗数(N)等。由于近年来激光和交流约瑟夫森效应等新技术的发展，使这些常数的测量准确度大大提高。由于基本物理常数与物理理论、精密实验和计量基准的发展关系非常密切，因此受到国际上许多国家的重视。国际权度局和各国计量机构先后成立了相应的组织机构，并于1970年和1971年接连开了两次有关的国际会议。

此外，“精细结构、超精细结构及 g 因子反常”和“引力波”也是物理学精密测量及基础研究中两个很值得重视的问题。前者与基本物理常数有密切的关系。

1972年11月，中国科学院召开了“基本物理常数及精密测量”座谈会，会上由北京大学物理系、中国科学院物理所、原子能所和中国计量科学研究院的有关同志介绍了基本物理常数及精密测量方面的国外发展情况，本文集是根据座谈会上的讲稿经作者修改后汇编成册，供有关单位参考。

目 录

基本物理常数的概况及其在物理学中的作用.....	王竹溪(1)
光速的精密测量——长度和时间基准的统一.....	赵克功、倪育才、刘忠有(7)
非定态约瑟夫森效应与 e/h	刘福绥(13)
X射线干涉技术测量阿伏伽德罗数及其在计量上的应用.....	沈乃澂、施汉谦(18)
质子回转磁比的测定及其应用.....	中国计量院核磁共振组(23)
精细能级、超精细能级和 g 因子反常.....	丁渝、祝玉灿(27)
引力波.....	中国科学院物理所理论小组(39)

基本物理常数的概况及其在物理学中的作用

北京大学物理系 王竹溪

基本物理常数主要是指原子物理学中遇到的一些常数，最基本的是电子的电荷 e ，电子的静止质量 m_e ，普朗克常数 h ，阿伏伽德罗数（简称阿氏数） N ，真空中光速 c 。光速本来不是原子物理学中的常数，但是它是一个最基本的物理常数，在原子物理学中常常遇到它。

这些常数的发现和测定在物理学的发展中起了很大的作用。各种物理现象以各种不同的方式联系到有关的一些基本物理常数，而关于这些常数的知识直接影响到我们对于有关物理现象本质的认识。例如，十九世纪末发现电子就是通过对电子的荷质比 e/m 测定而获得的。接着，类似的实验应用到离子建立了质谱仪，发现了大量的同位素，最后在1961年引出了国际原子量的新标准。1917年以前用油滴实验直接测量电子电荷使我们确切地知道了电荷有一个最小的不可分的单位 e ，同时也知道了它的大小。对光谱线波长的精密测定使我们能够找到原子的量子规律，这是量子力学理论的重要基础之一，同时也提供了实用上光谱分析方法的基础。在量子规律中起关键作用的是普朗克常数 h ，因此有关量子规律的精确考察依赖于 h 的准确数值。因此，物理规律的探讨，精密实验测量的发展，和工业技术的改进三者之间是互相推动的。精密实验的发展有赖于工业技术水平的提高，反过来又提供了工业技术水平进一步提高的依据。电子工业就是一个突出的例子。电子学的发展需要电子工业提供物质条件，又反过来大大促进了电子工业的发展，并且进而使整个工业走向自动化，在工业上产生了大的变革。由于实验精密度的提高，使国际上在1960年改变了长度基准，在1967年改变了时间基准，以适应技术上越来越高的要求。由于基本物理常数数值的精确度提高，使得在1968年的新国际温标中把高温测量的温标作了重要的改正。这里说的是指用更精确的普朗克常数值和玻耳兹曼常数值于高温测温所用的辐射公式。在摄氏两千度时新的温度数值比旧的数值要大3度多，温度再高些新温度数值比旧的大得更多。

现在着重谈一谈基本物理常数的概况。基本物理常数出现于许多不同的物理现象中，每一种物理现象的规律提供一种确定常数的关系，这些关系的数目远大于待定常数的个数。这是因为基本物理常数只有那么几个，而现象则是多种多样的。于是就发生一个问题，从这些关系得出的常数值是否一致？拿电子电荷为例来说明这个问题。电子电荷可以从油滴实验直接测定。密立根在1917年所得电子电荷数值是

$$(4.770 \pm 0.005) \times 10^{-10} \text{ 静电系单位}$$

误差约千分之一。过了许多年，能够用光栅法直接测量X射线波长了，于是得到了另一测定电子电荷的方法。这个方法的要点是一方面用X射线测得晶格常数，从而定出阿氏数 N ；另一方面从电解法测得法拉第常数，即电解一个单价克原子所需要的电量，这等于阿氏数乘电子电荷。用阿氏数去除法拉第常数就得到电子电荷值。这样得到的数值为⁽¹⁾

$$(4.8021 \pm 0.0006) \times 10^{-10} \text{ 富兰}$$

这与油滴实验结果相差竟达到误差的六倍以上，令人非常惊奇。这两个数值中总有一个是错的。究竟哪一个错了，长期未能确定，主要是没有找出真正的系统误差来源。直到四十年代才发现是由于油滴实验中所用空气粘滞系数错了，重新测出的粘滞系数给出的 e 值与用 X 射线得的一致。但是由于油滴实验的精确度只有千分之一，远远低于 X 射线的测量，所以后来就只用 X 射线值。在后面要讲的最新的数值比刚才说的更精确，是因为用了更精确的其他实验结果。

从这个例子可以清楚地看出，不同的实验会得出不同的基本物理常数值。假如所得的不同值相差太大，就必然会有某种因素被忽略了，这必将推动我们去寻找隐藏在现象后面的还没有被发现的新的问题，从而使我们对现象的认识能够更深入一步。假如所得的不同值相差不大，在误差范围之内，那也出现一个问题，究竟最好的值是什么？对于这个问题的回答只能是，使用最小二乘法来处理数据，把所有各种不同的实验所得的各种数据都包括进来。不过在实行上也还有个麻烦问题，那就是有一些实验数据的可靠性较差，象前面提到过的油滴实验数据，不宜于选入最小二乘法，这也适用于不同数据之间矛盾太大的情形。这个问题之所以麻烦，是因为有些数据的取舍可能很难判断。在1970年8月的国际精密测量和基本常数会议上最后讨论这个问题时意见分歧，得不到确切的看法。

第一个用最小二乘法处理基本常数的是 Birge，他在1929年所得基本常数值是尔后许多年内物理学界所公用的。他所采用的电子电荷值是油滴实验值，一般基本常数的精确度都不过千分之一。以后一个大进展是在1952年^[2]，那是因为出现了许多高精密度的实验，例如关于光速的新测量，质子的回转磁比，质子的磁矩，氢原子的精细结构和超精细结构等等，这主要是由于微波技术的进展。再一个重大改进是在1963年^[3]，那是在1961年采用了新的国际原子量标准之后，同时实验的精密度也有了进一步的提高，这表现在1960年采用了以氪橙黄线的波长作为新的米定义基础和1964年采用铯原子钟作为辅助的时间标准。还需要一提的是1960年修正了国际温标，把水三相点的热力学绝对温度值确定为 273.16 K 和把摄氏温标的零点确定为 273.15 K。这个修正对玻耳兹曼常数值有影响。最新的改进是在1969年^[4]，这主要是出现了用超导约瑟夫森效应测量 e/h 的高精确度数值，这也是在出现了1967年用铯原子钟所定的秒作为新的国际时间单位和采用1968年新的国际温标之后。

在作最小二乘法处理实验数据时还有一件非常重要的事需要注意，这就是测量的相对高精密度所产生的相对标准和相对标准与绝对标准的换算关系。这里一共有四个相对标准：

(1) 重力加速度的波茨坦值，(2) 电测量的实物标准，(3) 原子量标准，(4) X 射线波长标准。在1967年以前还有一个体积标准叫升，等于一公斤纯水在其最大密度温度下（约4℃）所占体积：

$$\text{一升} = 1.000\,028(4) \times 10^{-3} \text{ 米}^3,$$

括号中数字表示最末一位数的误差，以后都这样写，有两位误差数字时表示最末两位数字的误差。长度测量的精确度高于十兆分之一 (10^{-7})，通过重量对体积的相对测量也有同等精确度，但两者之间的关系，象刚才说的结果，只能准到兆分之四，所以有保持两个不同的标准。1967年废除了升这一相对标准，是因为直接测量体积的精密度提高了。现在升这个相对标准是取消了，所以一般不用这个名词，但是这个名词仍然可以使用，不过意义有了改变，改为原来的意义一升严格地等于一立方分米，即严格地等于千分之一立方米。在1948年以前还有一个热量标准叫卡，等于一克纯水由14.5℃升到15.5℃时所吸收的热量，与焦耳的

关系是

$$\text{一卡} = 4.1855(4) \text{焦耳}$$

废除卡的原因是用电加热方法测量可直接用焦耳表达，其精密度远远高于混合量热法，而卡原来是混合量热法的基础。由于卡曾经长期使用过，所以在使用上还允许保留两种卡单位，一个叫热化学卡，其定义为4.184焦耳，另一个叫国际蒸气表卡，其定义为4.1868焦耳。实际上只有在不需要高度精确数据时才使用卡，在精密实验结果中不用卡。

现在谈上面提到的四个相对标准。

(1) 重力加速度的波茨坦值。重力加速度 g 是在从质量的测量换算到力和能量时所必须用的因子。某一地点的 g 值在相对测量上精确度可达亿分之一，甚至十亿分之一，但绝对测量只能到兆分之几。国际上过去用的标准是相对于波茨坦数值的，近年来发现这个数值太大，因此在1968年国际上规定要从波茨坦数值 9.81274 米/秒^2 中减去 $14 \cdot 10^{-5} \text{ 米/秒}^2$ 。成为 9.81260 米/秒^2 。1970年八月的国际精密测量和基本常数会议上国际权度局报告说能直接测定 g 值精确到二亿分之一。假如是这样，就可以不要相对标准了。顺带说一下，早在二十年代国际上就规定了一个标准重力加速度值为 9.80665 米/秒^2 ，这主要是为了确定标准大气压用的，不过到1948年标准大气压的定义中不用这个标准 g 值而改为直接用力的单位牛顿/米² ($= \text{pascal Pa}$ 帕) 表达为 101325 牛顿/米^2 ，所以这个标准 g 值现在实际上已经没有什么用处。

(2) 电测量的实物标准。直接把电的测量用米、公斤、秒标准表达称为绝对单位，这在实际上比较困难，所以在1908年国际上规定了国际欧姆和国际伏特的实物标准。1948年国际权度大会上废除了以实物为基础的国际标准单位，认为直接测得绝对单位值的技术已够进步到不需要借用实物作为国际标准。实际上并不这样简单，还是要用实物标准作为辅助，每过十年用绝对单位值重新测定，而且要每过三年把世界上主要国家的实物标准在国际权度局作一次比较。现在测量电阻的精确度比较高，对锰铜实物电阻的测定值，采用与电容的对比方法，可达十兆分之七，这个误差主要是受了光速值误差的影响，而电容本身用静电单位 (即米) 表达可准到十兆分之二以上。1970年八月的国际精密测量和基本常数会议上认为在两年之内精确度可从十兆分之二提高到百兆分之一，即亿分之一。一欧的锰铜电阻实物标准的保存比较好，因此它的值与绝对单位值的差别比较小，美国标准局所保存的差别小于兆分之一。标准电池用的是硫酸镉电池，稳定性稍差一些，与绝对单位值的差别美国标准局的较小，也到兆分之十左右。近年来有建议改用超导约瑟夫森效应作为相对电压标准，以使能达到更高的精确度，可能达亿分之一到亿分之十。目前的情况是，国际电测量的实物相对标准名义上是废除了，实际上还在用。

(3) 原子量标准。由于质谱仪和原子核反应测量原子量的精确度大大超过了化学方法，同时又由于天然元素包含有各种同位素，其出现的百分比并不是完全固定不变的，所以在1961年国际上采用了新的原子量标准，以碳12同位素的原子量的十二分之一为单位。一个原子的质量等于原子量被阿氏数除。(结果是用克表达的。) 原子量相对测量的精确度很高，可达亿分之几，但阿氏数的精确度目前还只到兆分之七左右。举几个例子来看原子量的精确度⁽⁵⁾ (用星号表示原子量)：

$$M_{\text{H}}^* = 1.007\ 825\ 19(8)$$

$$M_{\text{O}}^* = 1.008\ 665\ 20(10)$$

$$M_{\text{D}}^* = 2.014\ 102\ 22(12)$$

$$M^*(^{16}\text{O}) = 15.994\ 915\ 02(28)$$

$$M_p^* = 1.007\ 276\ 61(8)$$

$$m_e^* = 0.000\ 548\ 5930(34)$$

这里 m_e^* 是以原子量单位表达的电子的质量, 是从其他实验求出来的, 所以精确度较差。

(4) X射线波长标准。X射线波长相对测量比较精确, 可达兆分之一, 但其绝对测量的精确度只到十万分之四。因此产生了X单位(xu)这一X射线波长标准。根据Taylor等人^[4]的计算, xu与 10^{-13} 米的比例 Λ 是

$$\Lambda = 1.002\ 076\ 4(53)$$

不过 Taylor 等人在求得最新的基本物理常数时不用X射线数据, 他们认为这些数据不够精确。近年来新发现了X射线干涉仪技术, 测量精密度已达 10^{-7} , 可把X射线波长与可见波长联系起来, 有可能不用相对的X射线波长标准, 而直接用米来表达波长。这个新技术还有可能通过精确测定阿氏数而提供一个天然的质量基准(可叫做质量自然基准)以代替公斤原器。

现在把几个最新的基本物理常数值作一简单介绍。

真空中光速为

$$\begin{aligned} c &= (2.997\ 925\ 0 \pm 0.000\ 001\ 0) \times 10^8 \text{米/秒} \\ &= 2.997\ 925\ 0(10) \times 10^{+8} \text{米/秒} \end{aligned}$$

后一个写法是把误差表达为最末两位数字上的偏差。这个偏差是标准偏差, 也就是方均根偏差, 等于把各次测量偏差的平方加起来用测量次数除再取平方根。假如各次测量的权重不等, 就还要加上权重因子。这个光速值主要是微波干涉仪测得的, 在1957年国际无线电协会和国际地球物理学会通过作为光速的标准使用值。将来有可能, 在激光技术的进一步发展下, 把时间和长度的标准通过选一个特定的光速值而联系起来, 使光速值成为一个定义。

精细结构常数 α 的倒数是

$$\alpha^{-1} = 137.036\ 02(21)$$

α 是无量纲的, 它与基本物理常数 e , h , c 的关系是

$$\alpha = \frac{e^2}{\hbar c} = \frac{2\pi e^2}{hc},$$

这里 e 是用静电单位表达的。假如把 e 改用 MKSA 单位表达, 则

$$\alpha = \frac{\mu_0 c^2}{4\pi} \cdot \frac{e^2}{\hbar c},$$

其中 $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$ 亨利/米是真空磁导率。这个精细结构常数标志电磁作用大小, 是光谱线由于相对论效应产生分裂的决定性参数, 精细结构常数的名称就是这样来的。它是三个基本物理常数的组合物, 是一个特殊重要的无量纲的组合物, 所以在这里特别提出来谈一谈, 下面不再谈其他的组合物。

电子电荷 e 是

$$\begin{aligned} e &= 1.602\ 191\ 7(70) \times 10^{-19} \text{库仑} \\ &= 4.803\ 250(21) \times 10^{-10} \text{夫兰} \end{aligned}$$

这个数值是从能量单位电子伏转换到焦耳所需要的,

$$1\text{电子伏} = 1.602\ 191\ 7(70) \times 10^{-19} \text{焦耳} (\times 10^{-12} \text{尔格})$$

普朗克常数是

$$h = 6.626\ 196(50) \times 10^{-34} \text{焦耳秒}$$

$$\hbar = h/2\pi = 1.054\ 591\ 9(80) \times 10^{-34} \text{焦耳秒}$$

假如把单位改为“尔格·秒”，需要乘上 10^7 ，由 10^{-34} 变为 10^{-27} 。

阿氏数是

$$N = 6.022\ 169(40) \times 10^{23} (\text{克分子})^{-1}$$

这是一个克分子的分子数，也是一个克原子的原子数。这个数值与原子量的标准有关，原子量的标准改变时它要跟着改变，所以现在用碳12标准的数值与过去用氧标准的数值略有不同，在化学原子量上是减少了兆分之43。阿氏数的倒数是用克为单位表示的一个原子量为1的原子的质量：

$$1/N = \text{原子质量单位} = 1.660\ 531(11) \times 10^{-24} \text{克} (\times 10^{-27} \text{公斤})$$

任何一个原子的质量等于这个数乘上相应的原子量。

电子的静止质量是

$$m_e = 9.109\ 558(54) \times 10^{-31} \text{公斤} (\times 10^{-28} \text{克})$$

用原子量单位表达是

$$Nm_e = m_e^* = 5.485\ 930(34) \times 10^{-4} \text{原子质量单位}$$

质子的静止质量是

$$M_p = 1.672\ 614(11) \times 10^{-27} \text{公斤} (\times 10^{-24} \text{克})$$

$$NM_p = M_p^* = 1.007\ 276\ 61(8) \text{原子质量单位}$$

质子质量与电子质量的比是

$$M_p/m_e = 1836.109(11)$$

中子的静止质量是

$$M_n = 1.674\ 920(11) \times 10^{-27} \text{公斤} (\times 10^{-24} \text{克})$$

$$NM_n = M_n^* = 1.008\ 665\ 20(10) \text{原子质量单位}$$

玻耳兹曼常数是

$$k = 1.380\ 622(59) \times 10^{-23} \text{焦耳/开} (\times 10^{-16} \text{尔格/开})$$

气体常数是

$$NK = R_0 = 8.314\ 34(35) \text{焦耳/开} (\text{克分子})^{-1}$$

这是根据旧的测量按照新的原子量标准换算的，所以误差比较大。玻耳兹曼常数是从 $k = R_0/N$ 求出来的，所以误差比其他基本常数的大得多。没有新的更精密的技术来测量这个常数，因此它的精确度只能停留在旧的水平上。

最后讲一讲最近二十年来基本常数数值的变化和精确度的提高，这里所说的变化不是说基本常数本身的数值有什么改变，而是说我们的测量精密密度提高以后对它的知识的改变。只举精细结构常数这一个量来说明这种变化：

$$1950 \text{年} \quad \alpha^{-1} = 137.0429(14)$$

$$1952 \text{年} \quad 137.0377(15)$$

$$1955 \text{年} \quad 137.0373\ (6)$$

$$1963 \text{年} \quad 137.0388\ (6)$$

$$1969 \text{年} \quad 137.03602(21)$$

从1950年到1970年精确度差不多提高了一个数量级。瞻望前途，科学技术的进步是没有

止境的，人们对于基本常数的知识一定会进一步提高，对自然现象本质的了解一定会更加深入，同时在应用自然规律方面将会日益广泛和扩大。

参 考 文 献

- [1] Birge, Amer J Phys **13**, 63(1945).
- [2] Du Mond and Cohen, Rev Mod Phys **25**, 691(1953).
- [3] Cohen and Dumond, Rev Mod Phys **37**, 537(1965)
- [4] Taylor Parker, Langenberg , Rev Mod Phys, **41**, 375(1969)
- [5] Mattauch, Thiele, Wapstra, Nucl Phys, **67**, 1(1965).

光速的精密测量

——长度和时间基准的统一

中国计量科学研究院激光组 赵克功 倪育才 刘忠有

一、引言

光速 c 是一个最基本的物理常数, 因此, 光速的精密测量问题不但是光学中的一个重要问题, 也是物理学中的一个很重要的问题。

最初测量光速的方法是根据天文方面的观测, 首先是由丹麦天文学家罗麦 (1676) 用观测木星的卫星蚀的方法测量的。后来, 布喇得雷 (1728) 又用观测光行差的方法测量。用天文观测的方法准确度 (只有百分之几) 比较低, 因此后来就发展了用实验室方法来测量光速。

实验室方法最早是斐索 (1849) 的遮断法, 之后是傅科 (1862) 的旋转镜法, 当时测量的准确度都很低, 只有几百千米/秒的量级 (即千分之几的准确度)。1926 年, 迈克尔逊将旋转镜法的测量准确度提高到 4 千米/秒 (即 1.3×10^{-5})。1948 年后, 逐步采用了较先进的技术, 测量准确度也不断提高。通常较精密测量光速的方法有两类。一类称为测距仪法, 它是测量光在一固定距离内的飞行时间, 这个固定距离是由一基线所确定的。这种方法中从光源来的光经克尔盒调制, 用同一个振荡器调制的光电倍增管作为检测器 (调制频率约为 10 兆赫, 基线约为 10 千米), 这种测量的最佳值为

$$c = 299792.6 \pm 0.25 \text{ 千米/秒} (0.83 \text{ ppm})$$

另一类测量方法是微波干涉仪法, 这种方法由英国国家物理研究所 Froome 得到了较好的结果

$$c = 299792.50 \pm 0.10 \text{ 千米/秒} (0.33 \text{ ppm})$$

这两种方法所测的结果基本上是一致的。其他方法测量的准确度要低一些。因此, 目前国际公认的光速值的准确度达 3×10^{-7} 。1969 年的基本物理常数平差后的推荐值 (Taylor 等人) 为^[1]

$$c = 299792.50 \pm 0.10 \text{ 千米/秒} (0.33 \text{ ppm})$$

光速值测量准确度的不断提高, 对于物理学和技术科学的发展将起很大的作用。

最近, 由于对用甲烷饱和吸收稳定的氦氖 3.39 微米红外激光的波长和频率分别进行了十分精确的测量, 致使频率和波长的乘积所得到的光速值的准确度已达 3.5×10^{-9} ^[2], 即比目前的国际公认值的准确度提高了 100 倍, 这为精密测量光速开辟了一条新的途径。

二、光速的测量: 激光波长和频率测量方面的进展

1. 长度基准

1960 年第十一届国际权度大会上决定用 ^{86}Kr 原子的 6057 埃谱线的波长来定义“米”, 实现了长度的自然基准。该谱线的相对宽度是 8×10^{-7} , 干涉距离仅为 800 毫米, 输出功率约 0.1

微瓦,在所推荐的使用条件下,波长准确度为 1×10^{-8} 。这样的准确度虽然已能满足工业生产上的要求,但对许多科学研究上的要求还相差很远。

几乎在 ^{86}Kr 作为长度基准的同时,激光就诞生了。由于它的相干性强,功率高,并且控制后的激光频率(波长)的稳定性和复现性都很高,可以取代 ^{86}Kr 作为未来的长度基准,因此,1962年后国际权度局就号召有条件的各国计量部门和物理部门进行这方面的研究。

气体激光器在理论上的宽度可达 3×10^{-17} 。1962年, Javan 等人测到了约 10^{-14} 的宽度,^[3] 并且预期如果能更好的改善振动、温度变化、量子噪声等因素对激光器的影响,所得之单色性还能提高。这样好的单色性是 ^{86}Kr 灯所无法比拟的。要使激光器取代 ^{86}Kr 而作为长度基准,必须得到高度的稳定性和复现性,并能以优于 1×10^{-8} 的准确度测量其波长。

2. 激光器的频率稳定

激光输出频率基本上决定于腔的谐振频率,而谐振频率的变化是与谐振腔长 L 的变化成比例的。因此如果要得到 10^{-8} 的频率稳定性,则必须使 L 稳定到 10^{-8} 。企图采用恒温或减振等办法来得到这样的稳定性是不可能的,因为我们既不能使谐振腔的温度变化保持在 0.01°C 以内(激光管本身是个发热体),又不能完全消除振动、声音等力学上的影响,而这些因素很可能使腔长产生 10^{-8} 或更大的变化。因此要得到 10^{-8} 或更高的频率稳定性,就必须采用伺服控制系统对激光器进行稳频。

第一个自动伺服控制系统是 Rowley 和 Wilson 在1963年实现的,他们使激光频率稳定在增益曲线的极大值,得到了 2×10^{-8} 的稳定性。^[4]

1964年霜田和 Javan 采用了同位素激光管,将激光频率稳定在 Lamb 下陷的中心,得到了 6×10^{-10} 的稳定性^[5]。

还有一些其他的方法,例如利用塞曼效应,法拉弟效应等,所得到的稳定性大约都在 10^{-9} 左右。

上述这些方法都是利用激光原子谱线的特性,虽然稳定性能达到 10^{-9} 或更高,但复现性仍很低,仅达 1×10^{-7} 。^[6] 复现性低的主要原因是气压变化造成的频率漂移。此外,塞曼效应和斯塔克效应也会产生频率漂移。

利用纯氦激光(1.15微米)或氦的饱和吸收来进行稳频,由于其所需的气压低,因此压力位移小,复现性可以稍高,估计能达到 10^{-9} 左右。

至今,比较好的一种办法是用分子吸收谱线作为波长的绝对标准,其中以用甲烷的吸收线稳定3.39微米氦氖激光器效果最好。当将甲烷吸收室置于谐振腔中时,与产生 Lamb 下陷的原因相似,在甲烷吸收线中心的吸收会减小,因此激光输出会有一突然的增加,出现所谓反 Lamb 下陷。在1968年 Barger 和 Hall 测得其宽度仅为350千赫^[7],因此将激光输出稳定于反 Lamb 下陷的中心,就可能得到很高的稳定性。

甲烷分子吸收谱线的主要优点是吸收线上下能级的自然寿命都很长,谱线的自然宽度很窄,塞曼效应和斯塔克效应都很小,其吸收系数很大,可在低温低压下工作,因此多普勒宽度很窄,并且压力位移所造成的频移是很小的。

由于上述原因,采用甲烷的饱和吸收装置可以得到极高的频率稳定性和复现性。

美、苏、日等国在1968年前后相继开始这项工作,目前最高已达到 5×10^{-15} 的稳定性和 3×10^{-14} 的复现性,并预计还有可能提高^[8]。

在1970年召开的国际权度局米定义谘询委员会第四次会议上正式建议各国研究用甲烷的饱和吸收激光器作为未来的长度基准^[9]。

国内, 将氦氖激光(6328埃)的频率稳定在Lamb下陷中心的长期稳定性已达 4×10^{-9} ⁽¹⁰⁾, 对氖的饱和吸收和甲烷的饱和吸收进行稳频的方法, 正在进行研究。

3. 激光波长的测量

激光波长的精密测量一般采用两种方法: 迈克尔逊型的双光束干涉仪和法卜利——珀罗干涉仪。

过去可见光区域波长测量的精度为 10^{-8} — 10^{-9} 量级, 在红外区域仅为 10^{-8} 量级。这一方面是由于光学部件的物理性能的限制, 另一方面是由于波长标准的准确度仅为 1×10^{-8} , 它限制了测量准确度的进一步提高。在红外区域还有接收方面的困难, 并且与标准波长不在一个波段, 不仅对干涉仪提出了更高的要求, 而且在过渡时也带来了较大的误差。

自1969年以后国际权度局及美、苏、日、各国都进行了3.39微米激光波长的测量和研究, 国际权度局第一次报导的测量准确度是 6×10^{-8} ⁽¹¹⁾, 最近美国的 Barger 和 Hall 在波长测量上取得了较大的成就, 已测出用甲烷饱和吸收稳定的3.39微米氦氖激光的波长为⁽²⁾

$$\lambda = 3.392\ 231\ 376(12)\text{微米}$$

准确度为 3.5×10^{-9} , 已达到目前长度基准⁸⁶Kr 准确度的极限。

4. 激光频率的测量

虽然, 时间基准的准确度已达到 10^{-13} 的量级, 但由于技术上的困难, 光频的直接测量过去一直是无法解决的问题, 而只能由光的波长测量通过光速值进行计算, 因此准确度一直很低。自1967年以后, 由于对接收器件的研究和改进, 光频的直接测量有了飞速的发展。

1967年第一次测量了0.89埃赫* (337微米) 的氰化氢激光的频率。此后, 频率测量的上限迅速地扩大了, 目前已经测量了3.8和10.7埃赫(78和28微米)的水蒸汽激光频率, 28埃赫(10.6微米)的二氧化碳激光频率, 56埃赫(5微米)的一氧化碳激光频率, 88埃赫(3.39微米)和474埃赫(0.63微米)的氦氖激光的频率。

最近 Evenson 等人发表了一系列的文章⁽¹²⁾, 他们采用了频率综合的方法, 建立了速调管和各种激光器的激光频率链(表1), 这就将微波频率测量逐步过渡到光学频率的测量。

频率综合的方法可以解释为: 为了测量一种未知的激光频率 ν_x , 必须找到两种已知频率的激光 ν_1 和 ν_2 , 使它们的多次谐波的叠加与 ν_x 相近, 其差值再用频率为 ν_3 的速调管之谐波来补偿, 即 ν_1 、 ν_2 、 ν_3 应满足下式:

$$\nu_x = n\nu_1 \pm m\nu_2 \pm l\nu_3$$

Evenson 等人实现了88埃赫(3.39微米)的氦氖激光频率的测量⁽¹³⁾。他用钨镍点接触二极管作为混频器, 将二氧化碳激光的R[30]谱线的三次谐波及48京赫的速调管与被测频率综合, 对于用甲烷稳定氦氖激光器, 其测量结果为:

$$\nu = 88.376\ 181\ 627(50)\text{埃赫}$$

准确度高达 6×10^{-10} 。

因此, 由频率和波长乘积所得到的光速值为

$$c = \lambda\nu = 299\ 792\ 456.2(1.1)\text{米/秒}$$

这个数值与公认值 $2.9979250(10) \times 10^8$ 米/秒是符合的, 但准确度提高了100倍。

除了频率链的方法之外, Bay等人⁽¹⁴⁾应用微波频率对激光频率进行调制的方法, 直接测量了6328埃氦氖激光器的频率。

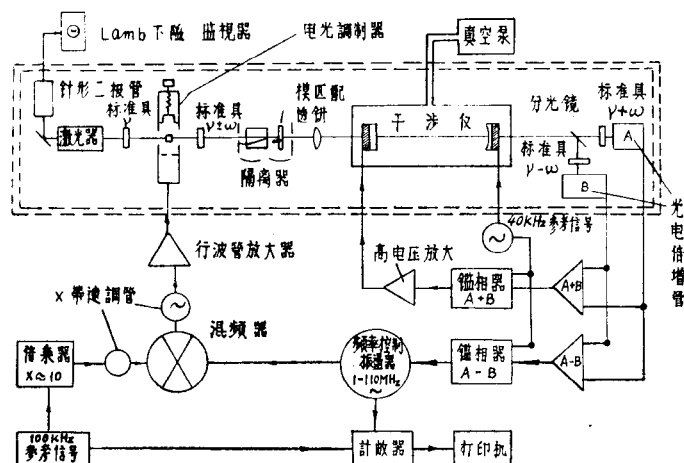
* 1 埃赫 = 10^{12} 赫

He-Ne 0.6328 微米 473.6122	$\times 5+31.746488-0.015513$
He-Ne 3.39 微米 88.376245	$\times 3$
CO ₂ (R(30)) 10.2 微米 29.442509	-0.048718
H ₂ O 28 微米 10.718073	$\times 3-3(0.891)-0.039430$
HCN 337 微米 0.890760	$\times 12$
速调管 0.074230	$+0.028953$

表 1 激光频率链:

以上频率均以埃赫(10^{12} 赫) 计

装置如图所示。



实验所测得的6328埃氦氖激光器的频率为

$$\nu = 473\ 612\ 166 \pm 29 \text{ 兆赫}$$

准确度为 6×10^{-8} 。这是可见光范围内光学频率的第一次绝对测量。这种方法直接使光频和微波频率建立关系，而不用中间过渡的频率链，这是它的简便之处，但目前准确度还未达到频率链的水平。

6328埃的波长测量值为

这种方法的主要原理是用微波频率 ω 对激光频率 ν 进行电光调制，而产生边带频率 $\nu \pm \omega$ 。这两个边带被引入到一个抽空的法卜利-珀罗腔中。腔长 L 和 ω 同时被调整，使两边带以最大强度通过腔。当达到这一点时，两个边带频率的比就是腔中两个级次（分别为 N_+ 和 N_- ）之比。因此，光频可表示为

$$\nu = [(N_+ + N_-) / (N_+ - N_-)] \omega$$

或

$$\nu = (N/n) 2\omega$$

式中

$$N = (N_+ + N_-) / 2$$

为 ν 的级次，而

$$n = N_+ - N_-$$

是两个边带频率之间的拍 2ω 的级次。于是干涉仪建立了光学和微波频率之间的关系。

这样，光学频率可以用微波频率的测量和级次 N 和 n 的测量来确定，当然，还必须考虑它们的衍射和反射相移修正。这种方法只与时间基准和频率测量有关，而不依赖于任何长度单位的确定。具体

$$\lambda = (632.99147 \pm 1) \times 10^{-5} \text{ 毫微米}$$

因此, 可得光速值为

$$c = \lambda \nu = 299\,792\,462(18) \text{ 米/秒}$$

准确度为 6×10^{-8} , 比国际公认值的准确度提高了五倍。因为甲烷稳定激光器的频率稳定性已可达 5×10^{-15} , 而微波领域的频率测量准确度已达 10^{-12} , 因此光频的测量提高到 10^{-11} , 甚至与铯原子钟的准确度相当也是可能的。波长测量的准确度虽然目前受长度基准的限制, 但随着未来长度基准的准确度的提高, 波长测量的准确度也可能进一步提高。因此在不远的将来完全有可能以更高的准确度来测量光速。

可以预期, 光速测量的准确度达到了很高以后, 就可以借助于准确度很高的时间基准来导出长度单位。因为光速在一定条件下可以认为是不变的, 一旦定义了光速值后, 长度就可以用时间及光速来表示。长度测量就变成了光的飞行时间的测量, 而波长测量就变成了光频率的准确测量。这样不仅可以大大提高长度的测量精度, 而且也实现了长度和时间基准的统一。

三、精密测量光速的意义和应用

精密测量光速在物理学上有很大的理论意义。因为一切相对论效应的计算都要用到光速值。光速的精密测量可用于在地球表面上进行检验广义相对论的实验, 还有可能进一步预言广义相对论的某些新效应。

在精密测量方面, 它在追踪卫星和宇宙飞船、测量行星间距离、远距离测量和提高精密仪器制造的精度等方面能有较广泛的应用。此外, 改善测量光速的调谐激光器的控制, 将使污染物微量研究取得新的进展; 同时, 这种测量光速用的超稳定激光器所测定的频率, 将使电讯扩展到完全崭新的频率范围, 扩大现有频段近200倍。红外和可见光频率的测量将可用于重新测量诸如跃迁频率、g 因子、斯塔克系数之类的光谱学常数, 有希望远超过目前所用的光学干涉技术的精度。

精密测量光速在计量学上也有很大的意义, 它可以使长度与时间两大基准在精确的光速值基础上统一起来。由于频率测量远高于波长测量的准确度, 因此就可以借助于高准确度的时间基准来测量长度。由于激光器的频率稳定性在理论上可达 10^{-17} 的量级, 目前, 甲烷稳定激光器已达 10^{-13} 以上, 因此继续提高激光频率的测量精度还存在很大的潜力。

计量学中很多基标准的测量都与光速的准确度有关。如计算电容的准确度最终与 $1/c^2$ 有关, 目前光速的准确度为 3×10^{-7} 这就给计算电容带来 6×10^{-7} 的误差。而目前计算电容的精密密度已高达 1×10^{-8} (英国), 要使它的准确度也达到这个值, 必须使光速数值准确到 5×10^{-9} 。这是计算电容对光速准确度的要求。再加, 1968年的温标改值的原因之一是第二辐射常数

C_2 的改值 (由1948年的1.4380变为1968年的1.4388), 而 $C_2 = \frac{Nhc}{R_0}$, (N为阿伏加德罗数,

h 为普朗克常数, R_0 为气体常数, c 为光速), 也与光速 c 的数值有关。

光速 c 在基本物理常数的相互联系中也是一个很关键的常数, 很多常数的联系公式中都含有 c, c 的准确测定必然会对许多其他常数产生重要的影响。

从光速的精密测量对于物理学和计量学的重大作用, 也可以看到物理学与计量学存在着十分密切的相互促进的辩证关系。

参 考 文 献

- (1) B. N. Taylor, W. H. Parker and D. N. Langenberg, Rev. Mod. Phys. 41, 375(1969)
- (2) K. M. Evenson 等人, Phys. Rev. Letters, 29, 1346 (1972)

- (3) A. Javan, E. A. Ballik and W. L. Bond, J. Opt. Soc. Amer. 52, 96(1962)
- (4) W. R. C. Rowley and D. C. Wilson, Nature, 206, 745(1963)
- (5) K. Shimoda and A. Javan, J. Appl. Phys. 36, 718(1965)
- (6) K. D. Mielenz 等人, Appl. Opt. 7, 289—292(1968)
- (7) R. L. Barger and J. L. Hall, Phys. Rev. Letters, 22, 4(1969)
- (8) С. Н. Багаев, Е. В. Бакланов, В. П. Чаботаев, письма в ЖЭТФ Том. 16, Вып. 6, 344(1972)
- (9) Procès-Verbaux des Séances du Comité International des Poids et Mesures, 59, session-1970, p. 113—124
- (10) 中国计量科学研究院激光组, 《物理》第2卷 1, (1973)第35—40页
- (11) Procès-Verbaux des Planches du CIPM 59^e session 1970
- (12) K. M. Evenson, J. S. Wells, and L. M. Matarrese, Appl. Phys. Letters 16, 251(1970)
- (13) K. M. Evenson, G. W. Day, J. S. Wells, and L. O. Mullen, Appl. Phys. Letters, 20, 133 (1972)
- (14) Z. Bay, G. G. Luther, and J. A. White, Phys. Rev. Letters 29, 189(1972)

非定态约瑟夫森效应与 e/h

北京大学物理系 刘福绥

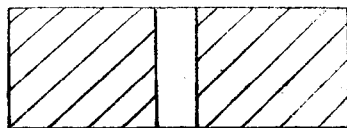
首先介绍一下约瑟夫森效应，接着讲一下用非定态约瑟夫森效应做电压标准的问题，最后讲一下利用此效应得到的 e/h 与量子电动力学的基本物理常数的关系。

§ 1. 约瑟夫森效应

为了理解约瑟夫森效应，先讲一下超导电性的微观图象。

我们知道金属中有晶格结构和自由电子，有些材料在低温下（目前已知应比 -250°C 低），它的一部份自由电子能够以同晶格的相互作用为媒介，形成束缚电子对，处于相同的量子态，而且是基态上。电子对在晶格中运动与单电子运动相比有新的性质，譬如电阻 $R=0$ 。历史上（1911年）发现此现象时，称之为超导电性，有此性质的物体叫超导体。现已发现一千多种合金、金属化合物、金属元素有超导电性。在1933年还发现超导体有抗磁性，即超导体内部无磁场（ $B_{\text{内}}=0$ ），而 $R=0$ 的理想导体有完全冻结磁通量的情况，所以超导体和理想体不是一回事。约瑟夫森效应也是超导体的性质。超导体还有其它一些性质，这些性质都是导束缚电子对运动的属性。

现在介绍一下约瑟夫森效应，以隧道结为例。约瑟夫森一九六二年从理论上预言效应时就是分析的这种结。隧道结如图一，中间是厚约10埃的绝缘层，两边是超导体。按过去单粒子隧道的看法，通过绝缘层有电流时，必定有电压，但在超导体约瑟夫森隧道结情况下，当电流小于一定的临界值时（约为毫安的数量级），电压保持为零，这个现象叫做定态或直流约瑟夫森效应。原因是绝缘层很薄，不能完全阻挡电子对通过，而电子对在运动时无损耗，所以出现零电压的超流。



图一 约瑟夫森隧道结

结和电磁场有相互作用时出现的一些现象叫做非定态或交流约瑟夫森效应。结上通过大的电流时，结上即出现电压，这时可观察到有电磁波辐射出来。每微伏电压相当的频率为 484 MHz。加上20微伏的电压即可有X波段的微波放出来。一九六四年底观察到这个现象。现已得到一些应用，例如做为混频器及微波源。为什么加上电压会有电磁波发射出来而且电压与频率的关系是每微伏相当484 MHz呢？这是因为在绝缘层双方加上电压，电子对从化学势高的一方向化学势低的一方通过绝缘层时，其过程无能量损耗，这就多出 $2eV$ 的能量（注意：是电子对的能量），这部份能量可以按照能量守恒转化为微波放出，如图二，(a)，从

$$2eV = h\nu$$

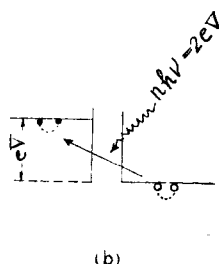
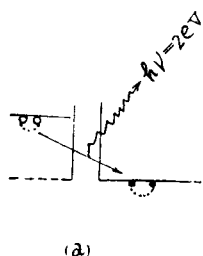
可得

$$\nu \cong \frac{484\text{MHz}}{\mu\text{V}} V。$$

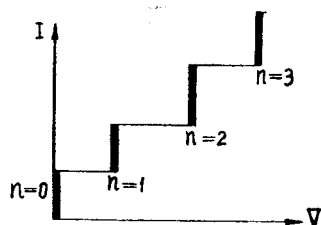
如果用微波从外部照射到约瑟夫森结上，如图二，(b)，并且用偏流源，则在结的 $I \sim V$

特性曲线上出现一系列的等电压阶梯, 如图三。现第 n 个阶梯的电压

$$V_n = n \frac{h\nu}{2e}$$



图二 非定态约瑟夫森效应



图三 微波辐照约瑟夫森结的 $I-V$ 特性曲线

利用约瑟夫森结和外部微波相互作用的这一性质测量 $2e/h$ 的问题转化为测量 V_n (第 n 个阶梯的电压) 及 ν (微波频率)^[1]。在 V_n 处有等电压的阶梯, 就是设在 V_n 处有直流的超流分量。这可理解为化学势低的一方的电子对吸收 n 个电磁波量子到化学势高的一方, 如图二 (b), 过程无能量损耗, 按能量守恒

$$2eV = nh\nu。$$

表出现在

$$V_n = n \frac{h\nu}{2e}$$

处有等电压的阶梯。对应于出现阶梯的其它过程不在此详述了。

从上面分析可知, 只要两块超导体之间有弱的耦合即可有约瑟夫森效应。两超导体之间的耦合不一定靠薄的绝缘层实现, 现已发现许多种有约瑟夫森效应的结^[2], 如图四。现仍在不断从理论上、实验上研究新的性能更好的结。

§ 2. 实验测定 e/h 。

§ 2.1 低温实验装置: 见图五, 结放在波导中, 短路活塞调节使结处在波腹处, 这样进入结中的微波功率最大, 波导浸在液氮内, 以便使结处于 -269°C 或更低的温度。液氮放在保温的杜瓦瓶中。约瑟夫森效应对磁场敏感, 所以要用磁屏蔽隔离地磁场及外部干扰, 精确测量须把地磁场屏蔽到小于千分之几高斯。

§ 2.2 e/h 测量情况: 目前已有美国、英国、加拿大、澳大利亚、日本、西德、法国、苏联、瑞典、意大利等十个国家正在做此实验^[3], 目的是测基本常数及做为电压标准。至今报导的最好结果是美国国家标准局和宾夕法尼亚大学一个小组共同做的, 用 $\text{pb-pbo}_x\text{-pb}$ 隧道结, 测得 $2e/h = 483.593718 \pm 0.000060 \text{ MHz}/\mu\text{V NBS69}$ ^[4]。从 $2e/h = n\nu/V$ 公式可知为达到上述的精确度要求频率 ν 稳定性至少在 10^{-8} , 并且要有相应的测频装置, 现有的稳频、测频仪器水平不难达到上述要求。实验的主要困难是对电位计灵敏度要求高, 用 10GHz 微波辐照时, 第500个阶梯的电压也只有约 10mV , 这时要求电位计的灵敏度为 10^{-9}V 。如果结输出的电压达不到 10mV , 则电位计的灵敏度还应提高, 才能达到上面的 $2e/h$ 测量水平。

§ 2.3 可靠性: 到此一定有人会提出这样的问题: 用约瑟夫森效应测 $2e/h$, 其数值是否和具体实验条件有关呢? 从 § 1 的物理分析可知对这个问题的回答是否定的, 考虑涨落对理