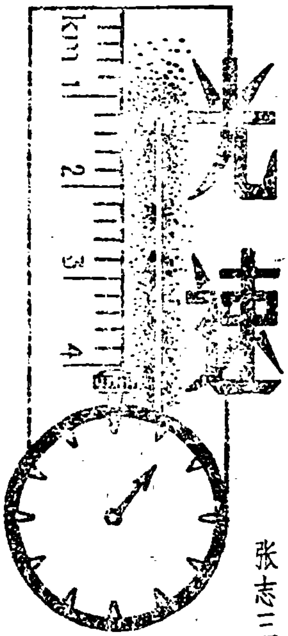
·中学园地·



张志三

光的传播速度在物理学中起着十分重要的作用，因为原子世界中的一切事件都同光速有关。因此，有关光速的知识对于我们近代文明显得特别重要。过去几百年来，已有很多人利用直接或间接的方法，在真空中或在各种透明介质中对光的传播速度作了测量。在测量光速中，需要区分两种不同性质的光速，一种是相速或称波速，一种是群速或称信号速。现对它们分别作一简述。

设想一列沿着 x-轴方向传播的简单谐波。这个简波可表示如下：

$$y(x,t) = a\cos(Kx - \omega t + \alpha) \qquad (1)$$

其中 a 为振幅；ω 为圆频率，$\omega = 2\pi\nu$，ν 为频率；α 为初相，取决于 x 的原点的选择；t 为时间；K 为波数，$K = 2\pi/\lambda_m$，λ_m 为光在介质中的波长。这个谐波的相为 $\varphi(x,t) = (Kx - \omega t + \alpha)$。介质中的相速 v 是指谐波的某一固定相的移动速度，它等于：

$$v = (\partial x/\partial t)_\varphi = \omega/K = \nu\lambda_m \qquad (2)$$

这就是说，若知道 ν 与 λ_m 的值，便可求得相速的值.关系式(2)是以光的干涉法来测量光速，λ_m 应是真空中的光的波长。但是，我们经常遇到的情况并不总是简单谐波的传播，而是若干谐波叠加在一起的波群的传播。现以两列谐波的叠加为例来说明它们的组合传播情况。以下式表示两列沿 x-轴方向传播的谐波：

$$y_1 = a_{01}\cos(K_1 x - \omega_1 t)$$
$$y_2 = a_{01}\cos(K_2 x - \omega_2 t) \qquad (3)$$

为了简便，令它们的振幅相同，都等于 a_{01}，并且初相角为零。这两个波的合成波可以表示为：

$$y = a_0\cos(\bar{K}x - \bar{\omega}t) \qquad (4)$$

其中，

$$a_0 = 2a_{01}\cos\left[\frac{1}{2}(K_1 - K_2)x - \frac{1}{2}(\omega_1 - \omega_2)t\right];$$

$$\bar{K} = \frac{1}{2}(K_1 + K_2);\quad \bar{\omega} = \frac{1}{2}(\omega_1 + \omega_2).$$

也就是说，这个合成波是一个频率为 $\bar{\omega}$ 的波，沿着 x-轴方向运行；其相速度为 $V = \bar{\omega}/\bar{K}$。除了这个波以外，(4) 式中还包含着另一种运动需要考虑。这就是由余弦函数调制的振幅。振幅的调制引起了周期性变化的包迹的传播·包迹运行的速度取决于包迹的相 $\left[\frac{1}{2}(k_1 - k_2)x - \frac{1}{2}(\omega_1 - \omega_2)t\right]$。如果以 u 表示包迹的速度，则有 $u = \frac{\omega_1 - \omega_2}{k_1 - k_2} = \frac{\Delta\omega}{\Delta k}$

当 $\Delta\omega$ 很小时，上式可以完成色散关系式的微分：

$$u = d\omega/dk \qquad (5)$$

u 称为群速。它表示调制的速度，也是信号的速度。对于任何数目的波的叠加而言，只要它们的频率范围很窄，其群速均可由(5)式来表示。由于 $\omega = kv$，于是

$$u = v + k\,dv/dk = v - \lambda\,dv/d\lambda \qquad (6)$$

在真空中，$u = v = c$。在光速测量中，应用闪光或者一系列振幅极大值作为信号，便是依据群速的概念。

光速的测量已有几百年的历史了·第一个认为光是以有限速度传播的人应是伽利略 (Galelio)。1638 年，他试图对光速作了测量。他应用了装有快门的灯笼作为信号，观察信号者与之相距数百米。这个距离太小了，因而未能得到结果，但其方法的原理是正确的。1675 年，罗默(Roemer)借助于观测木星卫星的星蚀现象，对光速作了估算，头一次得出了光速的数值，为 214000 千米/秒。估算的误差很大，这是由于当时对于地球轨道的直径知道得不够准确而造成的。斐索 (Fizeau) 于 1849 年克服了光在地球上短距离传播中测量光速的困难。他的装置为一齿轮及一个距离为 8633 米的反射镜。一个光脉冲离开齿轮缺口射向镜面，再由镜面反射回来；调节齿轮的旋转速度使反射回来的光脉冲或是通过齿轮缺口而被观测到，或是为轮齿所挡住。由于齿轮的旋转速度为已知数从而可以推算出光的传播速度。斐索得出的光速的值为 315310 千米/秒。差不多同时，1862 年傅科 (Faucault) 利用转镜方法作了光速测量。并在测量方法上不断改进，他终于取得了较为可靠的光速的值：$c = 298000$ 千米/秒。1958 年，费罗姆 (Froome) 利用微波干涉技术对光速作了精确测量，同时测定微波的波长及频率；并应用了空腔共振折射计直接测量微波干涉仪附近的空气折射率。他把所得出的真空中微波波长及微波频率乘在一起，便得出了真空中的相速。再经过微波衍射效应的修正便导出了真空中的光速。费罗姆测得的光速的值 $c = 299792.5 \pm 0.1$ 千米/秒。这个结果的精确度比以前提高了。卡罗勒斯 (Karolus) 与赫尔姆博格 (Helmborger) 于 1964 年利用调制光束对光速作了测量，其目的是试图进一步提高光速的精度。他们的调制器是应用光束通过超声驻波时产生衍射效应而制成的。水晶晶体振荡器在四氯化碳(或庚烷)中产生驻波。平行单色光束通过这类液体时产生夫琅和费衍射图。经聚焦后照射在一狭缝上。由于驻波场的存

在，通过狭缝的光束受到水晶振荡器的振荡频率的调制而成为受调制的光束．当这个光束经过光束分裂镜时便分成两束光了．其中之一为参考光束，借助于改变光程，其相可以变化．另一束则为"测量光束"．当测量光束与参考光束同相地到达探测器时，则探测器输出信号为极大值；而当反相地到达时，则出现极小值．由于实验中的参数都是已知的精确值，因而光束调制方法导出的光速的值是很精确的：

$$c = 299792.55 \pm 0.2 \text{ 千米/秒}.$$

其误差来自光程的测量．

1972 年，埃文森（Evenson）等人进行的光速测量使得过去所有的光速测量都黯然失色了．埃文森等在测量 He-Ne 激光的频率时，把激光器稳定在甲烷 ν_3 吸收带的 $p(7)$ 谱线上（$3.39\mu m$，88THz）．经由稳频激光振荡器一系列的频率的比较，埃文森等把甲烷吸收频率同作为秒的定义的铯钟的频率作了比较，因而确定了甲烷的频率：

$$\nu(CH_4) = 88376181627 \pm 50\text{kHz} \tag{7}$$

这个测量的相对的标准偏差小于 6×10^{-10}．另一方面，这个跃迁的波长已有很多人作了测量，测量结果都很一致．根据这些出色的工作，1973 年的米定义咨询委员推荐了下列的波长数值：

$$\lambda(CH_4) = 3392231.40 \times 10^{-12} \text{ 米} \tag{8}$$

不准确度为 4×10^{-9}．把(7)同(8)乘在一起给出的光速为 $c = \nu\lambda = 299792458.33$ 米/秒．在此基础上，同年 CCDM 经过论证推荐的光速的值为

$$c = 299792458 \pm 1.2 \text{ 米/秒} \tag{9}$$

这个结果的精确度并不受测量方法的限制，而是受到氪灯固有的不准确度的影响．这一情况就意味着波长标准不应再用氪灯了．因此，在1983 年 10 月第17届国际计量大会为了适应这种情况，把 $c = 299792458$ 米/秒作为光速的定义，其中不再包含任何误差了．同时通过了米的新定义．米的新定义是在真空中在 1/299792458 秒的时间内光传播的路程的长度．这就是说，米的定义由秒及光速来表示了．原来两个独立的单位，长度单位与时间单位统一在一起了．

光速为不变量，这已由对双星运动的观测得到了证实．这一情况表明光速同光源的运动速度无关．细致的计算证明，地球的轨道运动对光速的影响在 2.5×10^{-13} 以下．光速同波长也没有关系．在可见光区域内，波长的变化对光速的影响在 10^{-24} 以下．在当前科学技术条件下，这样微小的偏差是测量不出来的．

光速为极限速度．为了证明这一论断，得先谈谈洛伦兹变换．设一坐标系为 $oxyz$，地球在其中运动．这个坐标系的原点可以是太阳系的质量中心，坐标系的各轴指向定位的星球；并设地球上的坐标系为 $o'x'y'z'$．如果一个观察者没有随地球一道运动，并位于原点 o．o 点的光源发出的光在时间 t 之后形成以 o 为中心的球，其半径 $r = ct$．球的方程为

$$x^2 + y^2 + z^2 = c^2t^2 \tag{10}$$

如果观察者随地球一道运动，并位于原点 o'．运动沿着 z-轴方向进行，其速度为 u（u 远远小于 c）．根据迈克尔孙-莫雷的实验，观察者 o' 会得到同样结论：波面为一球，其中心为 o'，因为他测量的光速在各个方向是相同的．在从坐标系 $oxyz$（地球在其中运动）变换到地球上的坐标系 $o'x'y'z'$ 中，伽利略变换给出的变换为 $x' = x$，$y' = y$，$z' = z - ut$，$t' = t$．伽利略变换用了绝对时间．但是迈克尔孙-莫雷的实验否定了绝对时间的概念．因而需要引入时间 t'，t' 不等于 t．这个时间的引入，在 $oxyz$ 系过渡到 $o'x'y'z'$ 系时，必须使(10)式为不变式，即

$$x^2 + y^2 + z^2 - c^2t^2 \equiv x'^2 + y'^2 + z'^2 - c^2t'^2 = 0 \tag{11}$$

容易求得给出这个结果的坐标变换．很明显：$x = x'$，$y = y'$，因之(11)式变为

$$z^2 - c^2t^2 - z'^2 + c^2t'^2 = 0 \tag{12}$$

o 与 o' 在作相对运动，相对速度为 u．如果对于 o 来说，o' 的坐标 z 为 ut，则对于 o' 来说，o 的坐标 z' 就应是 $-ut'$．要想满足这个条件，只需令 $z = k'(z' + ut')$ 与 $z' = k(z - ut)$ 即可．从这两个方程可得出 $t' = k\left[t - \frac{z}{u}\left(1 - \frac{1}{kk'}\right)\right]$．把 z，z' 与 t' 的表示式代入(12)中，并在所得到的恒等式里令 t^2，zt 与 z^2 的系数分别等于零，则有 $k' = k = \frac{1}{\sqrt{1-\beta^2}}$，其中 $\beta = u/c$．因之，使(10)式成为不变式的坐标变换为

$$\left.\begin{aligned} x &= x' & x' &= x \\ y &= y' & y' &= y \\ z &= \frac{z' + ut'}{\sqrt{1-\beta^2}} & z' &= \frac{z - ut}{\sqrt{1-\beta^2}} \\ t &= \frac{t' + \frac{uz'}{c^2}}{\sqrt{1-\beta^2}} & t' &= \frac{t - \frac{uz}{c^2}}{\sqrt{1-\beta^2}} \end{aligned}\right\} \tag{13}$$

方程(13)即为洛伦兹变换．

现在来研究在坐标系 $oxyz$ 中运动的一个物体的速度 w，在 $o'x'y'z'$ 中速度为 w' 平行于 $o'z'$ 轴．因此，$w' = dz'/dt'$．应用（13）中的两个方程，得出 $z/t = (z' + ut')/(t' + uz'/c^2)$．从这个式子得到

$$\frac{dz}{dt} = \frac{\frac{dz'}{dt'} + u}{1 + \frac{u}{c^2}\frac{dz'}{dt'}} \quad \text{或者} \quad w = \frac{u + w'}{1 + \frac{uw'}{c^2}} \tag{14}$$

方程(14)为狭义相对论中的同一方向的速度分量的变换．要注意到 w 总是小于或等于 c 的．当 $w' = c$ 时，则有 $w = c$．由此看来，光速为物体的极限速度．