

# 迈克尔逊——科学界的艺术家

王永杰 赵占龙

迈克尔逊干涉仪实验是高等院校普遍开设的一个近代物理实验,实验采用的迈克尔逊干涉仪是迈克尔逊为了研究“以太”漂移而设计和制造的精密光学仪器,主要用来测量光波波长、光源相干长度等各种微小量。而迈克尔逊-莫雷实验的结果意味着经典物理时空观的终结和全新的现代物理时空观的建立,今天人们重新认识该实验,对理解其优美的设计思想和精湛的实验技巧具有重要意义。

## 一、名人点拨

迈克尔逊 1852 年 12 月 19 日生于普鲁士,2 岁时随父母移民美国。迈克尔逊小学时就对科学和实验工作感兴趣,后来参加美国海军军官学校的州内选拔,以第一名的成绩进入安纳波利斯学校。1873 年毕业后,迈克尔逊到海上进行了几次巡航,随后被任命为海军军官学校物理科学教师。

1878 年,迈克尔逊在教授物理课时,想到改进在地面上测量光速的傅科法。1878 年 7 月通过改进旋镜装置完善他的实验,并取得良好效果,深受美国航海年历局局长纽科姆的赏识。纽科姆不仅调他来年历局继续测量光速,还送他去欧洲深造。跟随亥姆霍兹、考纽等人学习,使他的才能进一步提高。

## 二、迈克尔逊-莫雷实验的设计思想

“以太”源于古希腊语,意为青天或上层大气,在宇宙学中表示占据天体间的物质。笛卡尔在 1644 年发表的《哲学原理》中就引用了以太概念;惠更斯把光振动看成以太中的弹性脉冲;麦克斯韦把电磁波的传播过程称为电磁以太。后来,光的微粒说占了上风,以太理论受到压制。1800 年以后,由于波动说成功解释了干涉、衍射和偏振等现象,以太学说重新兴盛起来。许多物理学家试图通过实验验证以太的存在并确定以太的性质,希望能测出地球相对以太的运动速度,因此众多科学家投入观测以太风或以太漂移的实验热潮中。但是在迈克尔逊以前,还没有一个实验能直接证明存在以太。

1879 年 3 月,迈克尔逊正在美国华盛顿市与美国航海局局长纽科姆合作测定光速,碰巧看到了麦克斯韦写给美国航海局托德的一封信,信

的路径返回,所以地球相对于以太的速度对双程时间的影响取决于地球速度与光速之比的平方,但这是一个极小的量,难以测出来。”迈克尔逊对此问题产生了极大兴趣,决心实现麦克斯韦提出的二级效应,即与  $(v/c)^2$  有关的效应,测定以太的漂移速度。为了检测以太的漂移速度,他改进原来的干涉仪,发明了灵敏度达到  $(v/c)^2$  量级的迈克尔逊干涉仪。

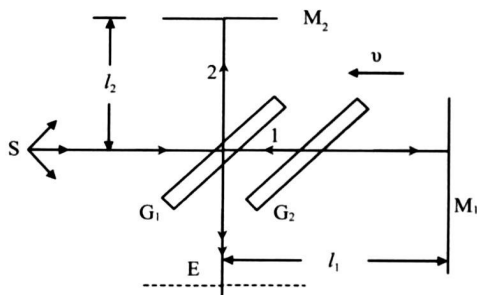


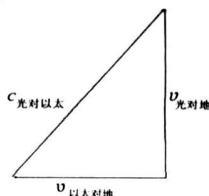
图 1 迈克尔逊干涉仪原理图

图 1 是迈克尔逊干涉仪的原理图。从光源 S 发出的光束,被分光板  $G_1$  后表面的半反半透膜分成两束光强近似相等的光束:透射光 1 和反射光 2。由于  $G_1$  与平面镜  $M_1$ 、 $M_2$  均成  $45^\circ$  角,所以反射光 2 在几乎垂直射到平面镜  $M_2$  后,经反射又沿原路返回,透过  $G_1$  而到达 E 处,而透射光 1 在透过补偿镜  $G_2$  后,几乎垂直射到平面镜  $M_1$  上,经反射又沿原路返回,在分光板后表面反射,在 E 处与光束 2 相遇而产生干涉。

如图 1,设随地球一起运动的仪器以速率  $v$  在以太中向右运动,即以太相对于仪器以速率  $v$  向左运动, $v$  向左、与水平臂  $l_1$  平行、与竖直臂  $l_2$  垂直。根据伽利略速度变换  $v_{\text{光对地}} = v_{\text{光对以太}} + v_{\text{对以太地}}$ 。对于光束 1,当光沿  $G_1M_1$  传播时,  $v_{\text{光对地}} = c - v$ ;当光沿  $M_1G_1$  传播时,  $v_{\text{光对地}} = c + v$ ;则光束 1 在干涉仪水平臂  $l_1$  中往返的时间为

$$T_1 = \frac{l_1}{(c-v)} + \frac{l_1}{(c+v)} = \frac{2l_1c}{(c^2 - v^2)}$$

对于光束 2,由于  $v$  与沿垂直臂  $l_2$  方向传播的光垂直,根据图 2 的速度矢量三角形,  $v_{\text{光对地}} =$



$$\sqrt{c^2 - v^2}; \text{ 则光束 2 在干涉仪垂}$$

图 2 速度矢量三角形

直臂  $l_2$  中往返的时间为

$$T_2 = 2l_2 / \sqrt{c^2 - v^2} = (2l_2/c) [1 / \sqrt{1 - (v/c)^2}],$$

则两束光的时间差为

$$\Delta T = T_1 - T_2 = \frac{2l_1 c}{c^2 - v^2} - \frac{2l_2}{c} \left[ \frac{1}{\sqrt{1 - (v/c)^2}} \right].$$

利用幂级数展开,并略去高次项,前式变为

$$\Delta T \approx \frac{2l_1}{c} \left[ 1 + \left( \frac{v}{c} \right)^2 \right] - \frac{2l_2}{c} \left[ 1 + \frac{1}{2} \left( \frac{v}{c} \right)^2 \right].$$

若将仪器转  $90^\circ$ , 则光束 1 和 2 位置互换, 由同样的分析可得时间差

$$\begin{aligned} \Delta T' &= T_1' - T_2' = \frac{2l_1}{c} \left[ \frac{1}{\sqrt{1 - (v/c)^2}} \right] - \frac{2l_2 c}{c^2 - v^2} \\ &\approx \frac{2l_1}{c} \left[ 1 + \frac{1}{2} \left( \frac{v}{c} \right)^2 \right] - \frac{2l_2}{c} \left[ 1 + \left( \frac{v}{c} \right)^2 \right], \end{aligned}$$

这个时间差的改变将使干涉条纹移动  $\delta$  个条纹, 由  $\Delta T$  和  $\Delta T'$  的公式可得

$$\delta = c(\Delta T - \Delta T') / \lambda = [(l_1 + l_2) / \lambda] (v/c)^2,$$

若  $l_1 = l_2 = l$ , 则  $\delta = (2l / \lambda) (v/c)^2$ 。根据已知数据: 地球的轨道速度  $v = 30 \text{ km/s}$ 、 $\lambda = 6 \times 10^{-7} \text{ m}$ 、 $l = 1.2 \text{ m}$ , 得  $\delta = 0.04$  个条纹。

这是假定以太存在, 理论预言应该观测到的条纹移动值。实验任务就是转动仪器, 观测移动的干涉条纹数目, 比较实验观测值与理论计算值。迈克尔逊用这台仪器检测地球相对于以太的运动。第一次以太漂移实验是在柏林做的, 后来又在波茨坦天文物理学观察台进行了同样的实验。两次实验中都没有发现以太的漂移运动, 这个零结果令人失望。

1885 年, 迈克尔逊开始与莫雷合作。他们的第一项努力就是核实 1859 年报道的斐索实验, 原来的实验者在比较流水中光逆行和顺行的表观速度时认为已证实菲涅耳的曳引系数。这个“以太-曳引”实验做得很好, 确认了菲涅耳、麦克斯韦、斯托克斯和瑞利等人关于天体光行差和无所不在的非物质光以太的假设。1887 年, 迈克尔逊和莫雷在俄亥俄州克利夫兰的凯斯应用科学学院完成的实验似乎表明, 地球完全地或几乎完全地拖拽着以太, 这个结果令物理学界十分紧张。后来迈克尔逊与莫雷又重新设计了 1881 年的以太漂移实验, 将光程长度增大 10 倍, 同时将装有干涉仪的石板漂浮在水银面上, 以减小转动摩擦。1887 年 7 月迈克尔逊和莫雷用 5 天的时间探测地球沿其轨道与静止以太之间的相对运动, 所得结果仍为零。

零结果说明“以太”并不存在, 这引发了爱因斯坦的思考——既然以太不存在, 所以光速才不会发生变化, 而光速不变是狭义相对论的一条基本原理。因此迈克尔逊-莫雷实验为爱因斯坦创建狭义相对论铺平了道路, 具有重大的历史意义。

爱因斯坦对迈克尔逊-莫雷实验给予高度评价, 认为迈克尔逊-莫雷实验是“物理学所有实验中最美丽的一个实验”, 爱因斯坦还曾盛赞迈克尔逊是“科学史上的艺术家”。

### 三、永垂史册

迈克尔逊曾经用干涉仪完成了 3 个著名实验: 否定以太存在的迈克尔逊-莫雷实验、研究光谱的精细结构和利用光波波长标定国际标准米尺的长度。利用光学精密仪器做出的精确测量和光谱研究成就, 使迈克尔逊荣获 1907 年诺贝尔物理学奖。

(河北省保定市华北电力大学数理系 071003)

本文由华北电力大学青年教师科研基金资助。

## 科苑快讯

神奇材料 graphene 在室温下出现量子霍尔效应

graphene 是一种由单层碳原子构成的材料, 由于具有很多奇异特性, 而且其中的电子在很多方面如同无质量的狄拉克费米子, 因此近来备受关注。最近又传出关于它的惊人发现, graphene 在室温下出现量子霍尔效应。

英国曼彻斯特大学的诺沃塞洛夫 (K. S. Novoselov) 与同事是在 45T 的磁场中取得这一实验成果的, 而以前 graphene 在接近甚至低于液氮温度时才出现量子霍尔效应。这一发现对度量衡具有重要意义, 因为量子霍尔效应可以为普朗克常数除以电子电量平方 ( $e^2$ ) 的值提供一个标准参考点。

(高凌云译自 2007 年第 4 期《欧洲核子研究中心快报》)

