

迈克尔孙和迈克尔孙-莫雷实验

郭奕玲 沈慧君

迈克尔孙(A. A. Michelson, 1852—1931)是美国著名实验物理学家,以光速的测定和迈克尔孙-莫雷实验著称。1880年,他发明了以自己名字命名的干涉仪,用之于比较不同方向的光速,取得了出乎意料的结果。后来他又用干涉仪方法对国际米原器进行校准,第一次实现了非实物的长度基准。由于他用光学精密仪器所作的精确测量和光谱研究,荣获1907年度诺贝尔物理学奖。

1. 迈克尔孙干涉仪的由来

迈克尔孙干涉仪的发明起源于以太的研究。

在经典物理学家看来,地球在以太的汪洋大海中遨游,如果以太不随地球运动,它们之间必有相对运动。用光学方法应该能测得出来。麦克斯韦分析了这个问题。他在1879年为《大英百科全书》撰写的“以太”条目中写过这样的内容:“如果可以在地面上从光由一站到另一站所经时间测得光速,那么我们就可以比较相反方向所测速度,来确定以太相对于地球的速度。然而,实际上地面上测光速的各种方法都取决于两站之间的往返行程所增加的时间,以太的相对速度等于地球轨道速度,由此增加的时间仅占整个传播时间的亿分之一,所以的确难以观察”。

我们可以作一推导:设光速为 c ,地球相对于以太的速度(即地球运动速度)为 v ,两站之间的距离为 l ,则麦克斯韦所说的“增加的时间”占“整个传播时间”的比值为:

$$\begin{aligned}\frac{\Delta t}{t} &= \left[\left(\frac{l}{c+v} + \frac{l}{c-v} \right) - \frac{2l}{c} \right] / \frac{2l}{c} \\ &= \frac{v^2}{c^2 - v^2} \approx \frac{v^2}{c^2} \left[1 - \frac{v^2}{c^2} \right]\end{aligned}$$

今已知 $c = 3 \times 10^8$ 千米/秒, $v = 30$ 千米/秒,故

$$\frac{\Delta t}{t} \approx \frac{v^2}{c^2} \approx 10^{-8}.$$

“亿分之一”!这是测量史上从未达到过的精度!麦克斯韦认为难以实现,于是转而寻求一次效应,即与 $\left(\frac{v}{c}\right)$ 成正比的效应。他发现罗默观测天体运动的方法可行,于是在1879年3月19日写信给美国航海历书局的托德(D. P. Todd),询问地球围绕太阳运行于

不同部位时,观测到的木星卫星蚀有没有足够的精度来确定地球的绝对运动。信中又一次提到:“地面上测量光速的方法,光沿同样的路径返回,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 $(v/c)^2$,这个量太小,难以测出”。

这封信被迈克尔孙读到了。这时他正在托德所在的美国航海历书局工作,协助这里的局长纽康姆进行光速实验。麦克斯韦的信件激励他设计出了一种方法,用相互垂直的两束光产生干涉来比较光速的差异,实验的精度可达亿分之一,有可能检测到以太漂移速度。迈克尔孙擅长光学测量,正好这时他有机会到光学技术最发达的德国学习。1880年,他在柏林大学的赫姆霍兹实验室开始筹划用干涉方法进行以太漂移速度的实验。当时利用干涉原理进行光学测量的方法已经应用到许多实验之中,并且作为成套仪器已有商品供应。例如,贾民(Jamin)发明的一种干涉折射计就在德国一家仪器工厂正式生产。迈克尔孙吸收了这些仪器的长处,并且创造性地用之于以太漂移速度的测量。他的构思很巧妙,如图1,光源 S 发出的光,经半透射的 45° 镀银面 M ,分成互相垂直的两束光。透过 M 的一部分组成光束1,经反射镜 M_1 反射,返回 M 后再反射到望远镜 T 中;被 M 反射的一部分组成光束2,经反射镜 M_2

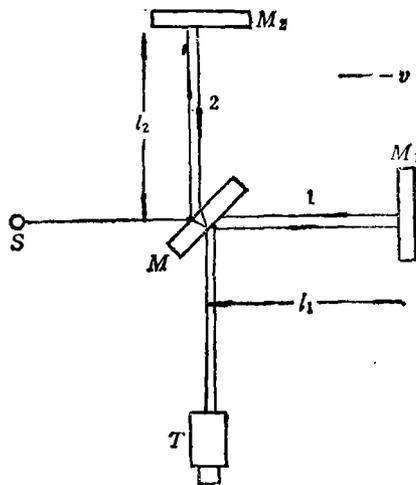


图1 迈克尔孙干涉仪原理图

说法是一个深邃真理,而且“在某个时候你决不能只解决一个困难,你总是必须同时解决许多个困难。”这一

说法也是一个深邃的真理,也许我应以这段话结束我的讲演。

反射后,也返回 M ,再穿过 M 到达望远镜 T . 两束光在望远镜中发生干涉. 设以太的漂移速度为 v , v 与 l_1 臂平行,与 l_2 臂垂直,则光束 1 从 M 经 M_1 回到 M 的过程所需时间为:

$$t_1 = \frac{l_1}{c-v} + \frac{l_1}{c+v} = \frac{2l_1}{c} \left(\frac{1}{1-v^2/c^2} \right)$$

设光束 2 从 M 经 M_2 再回到 M 所需时间为 t_2 , 由于以太正以速度 v 垂直于光路 l_2 漂移,根据速度合成法则可以推得合速度应为 $\sqrt{c^2-v^2}$.

所以

$$t_2 = 2l_2 / \sqrt{c^2-v^2}$$

两束光到达望远镜的时间差为

$$\begin{aligned} \Delta t &= t_1 - t_2 \\ &= \frac{2l_1/c}{1-(v^2/c^2)} - \frac{2l_2/c}{\sqrt{1-(v^2/c^2)}} \\ &\approx \frac{2l_1}{c} \left(1 + \frac{v^2}{c^2} \right) - \frac{2l_2}{c} \left(1 + \frac{1}{2} \frac{v^2}{c^2} \right) \end{aligned}$$

如将整个仪器转 90° , 时间差变为:

$$\Delta t' \approx \frac{2l_2}{c} \left(1 + \frac{1}{2} \frac{v^2}{c^2} \right) - \frac{2l_1}{c} \left(1 + \frac{v^2}{c^2} \right)$$

时间差的改变将导致干涉条纹移动 δ 个条纹. 由上面的式子可以求得:

$$\delta = \frac{l_1 + l_2}{\lambda c^2} v^2.$$

如果

$$l_1 = l_2 = l$$

则

$$\delta = \frac{2(v/c)^2}{\lambda/l}$$

迈克尔孙根据已知数据: 地球的轨道速度 v 为 30 千米/秒, $v/c = 10^{-4}$, $\lambda = 6 \times 10^{-7}$ 米, $l = 1.2$ 米, 估算出 $\delta = 0.04$ 条纹. 干涉条纹移动 0.04 个, 这在实验技术上是可能观测到的.

2. 第一次试验

当时迈克尔孙的研究条件很差. 他以有限的经费购买到了光学元件, 支架只好利用现成的产品, 外形如图 2. 所有光学元件都是用蜡封在支架上, 调节非常费事. 特别是支架怕震. 一有震动, 干涉条纹的移动会大大超过预期值.

开始, 迈克尔孙在柏林大学做实验, 因震动干扰太大, 无法进行观测, 乃改到波茨坦天文台的地下室. 实验在 1881 年 4 月完成. 可是, 出乎迈克尔孙的意料, 他看到的条纹移动远比预期值小, 而且所得结果与地球运动没有固定的位相关系. 于是, 迈克尔孙大胆地作出结论: “结果只能解释为干涉条纹没有位移. 可见, 静止以太的假设是不对的”.

迈克尔孙在论文中接着写道: “这个结论与迄今普遍接受的光行差现象的解释直接抵触.” 最后他引了一段斯托克斯 1846 年在《哲学杂志》的文章, 显然迈克尔孙是认为他的实验否定了菲涅耳的部分曳引假说,

证明了斯托克斯的完全曳引假说.

实验结果发表后, 立即引起了物理学界的非议. 巴黎的包特 (M. A. Potier) 来函指出迈克尔孙论文中公式推导有错误, 差了一个因子 $\frac{1}{2}$. 著名理论家洛仑兹还指出这个因子不能忽略. 有人认为仪器粗糙, 结果不可信赖. 迈克尔孙自己也觉得实验不很成功, 以后不想再干了.

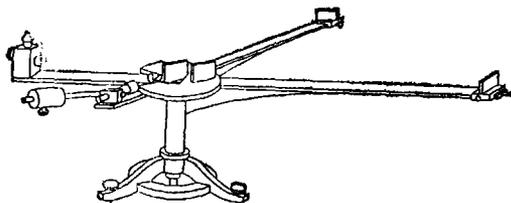


图 2 第一台迈克尔孙干涉仪

3. 进一步探测

1884 年, 开尔文访问美国, 在讲学中会见了迈克尔孙, 对迈克尔孙的干涉实验表示赞赏, 并且鼓励他和当时在场的化学家莫雷 (E. W. Morley, 1838—1923) 合作, 继续做以太漂移实验. 迈克尔孙和莫雷接受了开尔文的建议.

1886 年, 他们将光学仪器安装在大石板上, 石板浮在水银槽上, 可以自由地旋转方向. 光路经多次反射, 延长为 11 米 (如图 3, 图 4, 图 5). 这和 1881 年的装置相比, 稳定性大为改善, 精确度也有很大提高. 他们满怀信心, 认为这一次一定有把握测出以太漂移速度.

然而, 1887 年 7 月, 他们在美国克利夫兰 (Cleveland) 州的阿德尔伯特 (Adelbert) 学院的主楼底层正式开始实验, 一共用了四天时间, 得到的结果仍然是零. 他们在论文中这样描述实验所得结果:

“观测结果用曲线表示如图 6. 上面是中午观测的曲线, 下面是傍晚观测的曲线. 虚线代表理论位移的八分之一. 从图形可以肯定: 即使由于地球与光以太之间的相对运动会使条纹产生任何位移, 这位移不可能大于条纹间距的 0.01”.

但根据理论推算, 条纹位移最大应为 0.4 个条纹. 这个结果使他们非常失望, 以至原来打算在不同季节继续试验的想法也打消了.

实验结果发表后, 科学界大为震惊. 开尔文在 1900 年说这是 19 世纪笼罩在热光动力理论上空的两朵乌云中的一朵.

迈克尔孙本人对干涉实验的零结果还是有思想准备的. 他在实验之前 (1887 年 3 月 6 日) 给瑞利的信中就说: “我想这里的结果也将是零”. 他在信中画了一张图 (如图 7), 解释说, 如果地球凹凸不平, 有可能带着以太一起运动. 他写道: “如果地球表面沿箭

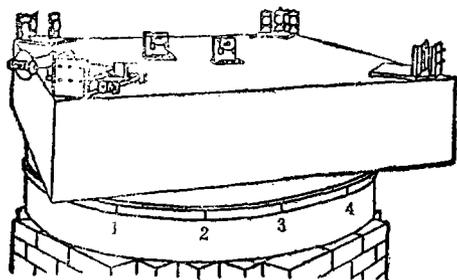


图 3 光学元件安装在大石板上

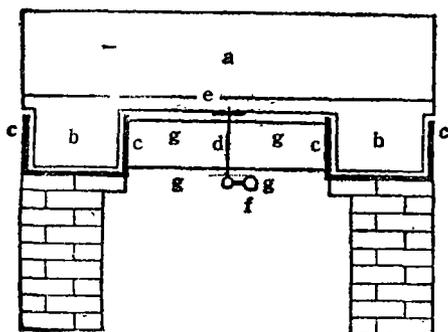


图 4 大石板可沿水银槽转动

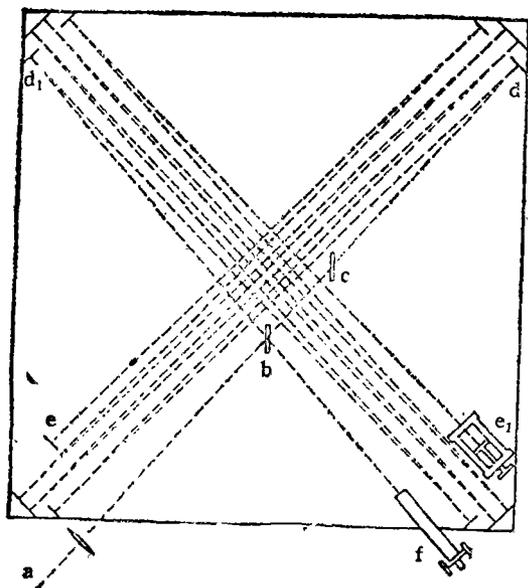


图 5 光束经过多次反射

头的方向运动,难道 00 处(见图 7)的以太不会被它带着走吗?他认为,只有在很高的地方,而不是在地下室,才有可能比较菲涅耳和斯托克斯两种假设哪一个正确。

1897 年,迈克尔孙在芝加哥大学实验大厅第三次

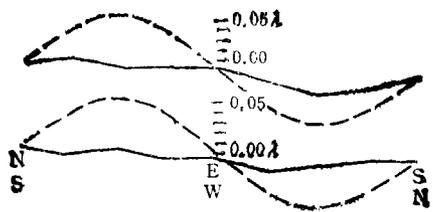


图 6 迈克尔孙和莫雷得到的实验曲线



图 7 迈克尔孙信中的一张图

做干涉仪实验。他设计了一台巨大的干涉仪,高 15 米,长 61 米,吊在实验大厅的天花板上。为了防止空气干扰,整个光路用铁管密封,抽去空气(气压低到百分之一大气压)。得到的又是零结果。迈克尔孙这时仍然倾向于斯托克斯,觉得应该采纳拉莫(J. Larmor)的建议:可能离开地面数千公里,地球还会曳引着以太一起运动。

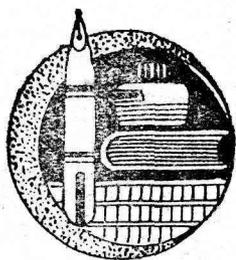
4. 严谨的作风

1902 年,莫雷和密勒(D. C. Miller, 1866—1941)在开尔文的敦促下,为了检验洛仑兹-斐兹杰惹的收缩假设,用 4 米多长的木制底座做干涉仪实验,光路增大为原来的三倍。由于木材受湿度和温度的影响太大,很难做出精确结果,乃于 1904 年另做了一套钢制底座,干涉仪光路达 64 米,做工精细,调节方便,灵敏度有所提高。然而,实验结果比 1887 年迈克尔孙和莫雷所得更接近于零。

密勒在 1921—1926 年间又进行了多次实验。其中,1921 年他把实验装置安在高 1750 米的威尔逊山上进行,所用方法和以前一样,实验发现有 10 公里/秒左右的正效应,似乎是地球相对于以太的漂移运动速度。为了证实这一点,他采取了多种措施,包括撤换铁磁材料,用水泥座代替钢架,用铜、铝代替钢铁;将光源隔开,以防温度变化;并采用不同的光源;甚至故意用电炉加热以试验温度影响,等等。据他声称,这些因素都进行了严格的考查。

密勒是继迈克尔孙和莫雷之后第三位著名的以太漂移实验者,他在声学方面成就卓著,很有名气。1925 年,密勒突然以美国物理学会主席的身份,在美国物理学会年会上宣布他从以太漂移实验终于发现了太阳系是以大约 200 公里/秒的绝对速度奔向天龙星(Draco)座头,并测出地球相对以太的速度不大于 10 公里/秒。

这件事引起了学术界的震动,于是又掀起了做以太漂移实验的热潮。迈克尔孙自己也带领两名助手设计了一台特殊的干涉仪,从 1926 年起,先后做了三次大规模的迈克尔孙-莫雷实验。其中第二次作于 1927



1839年2月11日，吉布斯(J. W. Gibbs)出生于美国东北康内提克特纽黑文市一个知识分子的家庭。父亲是一位教授，获得过艺术博士学位，对语言学很有研究；外祖父也是教授，对物理和化学都非常精

通。

1848年，吉布斯考入私立学校，一年后转入城中最好的果布金斯学校就读。1854年入耶鲁专科学校学习，1858年春毕业，同年秋天进入耶鲁大学深造。正当他在耶鲁大学专心致志地攻读时，却发生了一件十分不幸的事情：1861年，他的父亲去世了。由于吉布斯是家中长子，因此，他不得不一边继续完成自己的学业，一边照料两个年幼的妹妹。

吉布斯的博士论文是个技术性很强的题目：《论带齿圆筒传动装置的齿轮形状》，1863年通过了答辩，因而获得了哲学博士学位。而后即被聘请为耶鲁专科学校的教师。1866年8月，三年聘期届满，吉布斯便带着自己的两个妹妹到欧洲去继续受教育。他先后到过巴黎和柏林，主要学习数学、物理及力学。从欧洲回国后不久，吉布斯便被聘请为耶鲁大学数学物理学教授。尽管在1871—1872学年里，吉布斯只有两个学生，但他仍兢兢业业，尽心尽责地教导他们，使其中的一位成了耶鲁大学教授，另一位则成为美国国家科学院的成员。

1872年，吉布斯开始从事热力学的研究，并且很快就向康内提克特科学院提出了自己的第一篇论文《气体和液体热力学的图解方法》。虽然在吉布斯以前也有人用过图解法，但都是用来对成熟的结论作插图，且主要是 p - V 图。而吉布斯却令人信服地说明了利

吉布斯小传

廖耀发 秦伯念

用熵作为一个坐标来作图(如 T - S 图)具有更大的优越性。第二年，他又将这种思想推广到了三维图，即从压力、温度、体积、内能及熵这五个参量中任选三个为坐标来作图(吉布斯当时选用体积-内能-熵图)，并提出了应用所谓物体的热力学面来研究物体热力学性质的方法。应该说明的是，在吉布斯以前还有一个人提到过三维图，那就是汤姆逊。但汤姆逊只限于用体积-压强-温度图(即 V - p - T 图)，且使用起来也不太方便。

吉布斯的工作很快便受到了著名物理学家麦克斯韦的好评。麦克斯韦在1875年出版的《热的理论》一书中写道：“我们非常感谢美国教授吉布斯，他提出了一种利用‘面’来研究物质性质的十分方便的方法。”在1877年出版的《不列颠百科全书》条目中，麦克斯韦指出：“热力学图的应用已经很充分地由吉布斯指出来了。”

1875—1878年，吉布斯完成了专著《论非均匀物质的平衡》。这是一本在物理和化学界中都享有崇高威望的经典著作。在这本专著中，吉布斯广泛地应用了变分原理(这种方法对以后的理论物理的发展也有很大的影响)。更令人惊奇的是，他仅仅利用了少数几个附加条件，通过纯粹的演绎(由一般原理向物理及化学现象演绎)便使整个非均匀物质的热力学体系建立了起来。吉布斯以深刻的洞察力和高度的逻辑思维能力引进了许多至今还仍然富有生命力的概念，推导出了许多至今还被广泛采用的公式。吉布斯第一个将热力学推广到非均匀系中，使经典热力学达到了比较完善的地步，推进到了现代的水平。所以，举世公认，吉布斯是非均匀系统热力学的创始人。

年秋，主要的改进是令光从转盘轴的上方投射到干涉仪的光路，并随干涉仪一起转动。观察者也从转盘轴的上方经测微目镜进行观测，这样就避免了光源和观察者的可能干扰。第三次，迈克尔孙也把庞大的干涉仪系统安装在威尔逊山上。但是，“做了数百次观察，全都和以前的研究一样得到的是负结果”。

迈克尔孙当然希望能亲自观测到以太漂移的正效应，但是他抱着严肃的科学态度从事实验，不牵强附会，1929年郑重宣布没有发现绝对速度。这件事对肯定狭义相对论的正确性是很有意义的。

密勒的工作，直到1955年，由桑克兰(R. S. Shankland)等人作了仔细分析，判断正效应是由于温度梯度的影响。他们写道：“现已查明，密勒发现的周期

性条纹微小位移，部分是由于这个艰难的实验中读数的统计涨落，其余的系统效应则起因于当地的温度条件”。

迈克尔孙-莫雷实验有重大历史意义，它是一系列以太漂移实验中最有影响的一个，这些实验动摇了19世纪占统治地位的以太假说，激励当时一些著名的物理学家致力于发展运动物体的电动力学理论，从而为爱因斯坦创立狭义相对论铺平了道路。

应该指出，从迈克尔孙-莫雷实验并不能直接得出狭义相对论。因为，测不出以太对地球的漂移速度，还不足以否定以太本身，零结果还可以在保留以太概念的前提下加一些新的假设来解释。但是这个实验却以其确凿的证据，揭示了以太学说中不可克服的矛盾。