

[物理故事]

第二朵乌云——以太导致的疑难

文_赵 峥

赵峥，1967年毕业于中国科技大学物理系，1981年于北京师范大学天文系获硕士学位，1987年于布鲁塞尔自由大学获博士学位。曾任北京师范大学研究生院副院长、物理系主任、中国引力与相对论天体物理学学会理事长、中国物理学会理事。现为北京师范大学物理系教授，理论物理博士生导师、教育学博士生导师。



图1 雨中打伞的人

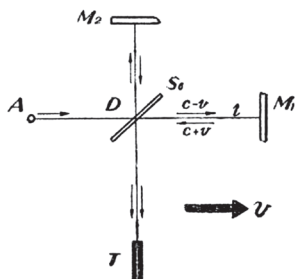


图2 迈克耳孙干涉仪光路示意图

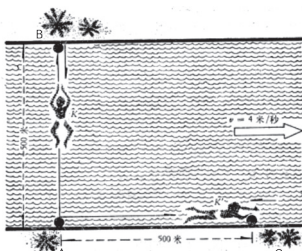


图3 河中游泳的人

光既然是波，就应该有一个载体，正如水波的载体是水，声波的载体是空气或其他介质一样。当时的学术界认为，光的载体是古希腊哲学家亚里士多德提出的以太。亚里士多德提出地心说，认为地球是宇宙的中心。太阳、月亮和行星等天体都镶在一个个透明的天球上，例如月亮镶在月亮天上，太阳镶在太阳天上，金星镶在金星天上……所有天球都围绕着地球转。离地球最近的天球是月亮天，月亮就镶在月亮天上。亚里士多德认为，宇宙分为两个世界，月亮天以下的“月下世界”和月亮天以上的“月上世界”。他认为月下世界的万物都是由土、水、火、气4种元素组成的，这些物质是不高级的、变化的，可以腐朽、灭亡的。月上世界则是高级的、不变的、永恒的，充满轻而透明的以太。

19世纪的科学家虽然不相信地心说，但继承了亚里士多德的以太观念，认为宇宙中充满了以太。这些以太不仅轻而透明，而且弹性极好，遥远恒星的光，正是作为以太的波动传到我们的眼睛来的。

既然光是以太的弹性振动，那么以太相对于地球运动吗？由于地球不是宇宙的中心，以太不可能相对地球静止，如果以太相对于地球静止，地球参考系岂不成了宇宙中最优越的参考系？因此，“以太相对于地球静止”的想法是与哥白尼学说相违背的。当时的科学家已经认识到，不仅地球不是宇宙的中心，太阳也不是宇宙的中心，恒星都是遥远的太阳，因此以太也不可能相对太阳静止。那么以太相对于什么东西静止呢？大家想到了牛顿所说的“绝对空间”。比较自然的想法是，以太相对于绝对空间静止。如果以太相对于绝对空间静止，那么在绝对空间中运动的地球，就应该在以太中穿行，也就是说，地球应该相对以太运动。天文学上观察到的光行差现象，也支持地球相对于以太有运动的观点。

我们现在来解释什么是光行差现象。先让我们打一个比方：在不刮风的下雨天，雨滴会穿过空气垂直下落。这时一个静止的人为了避免雨淋，应该垂直打伞。但如果他奔跑，则应该斜着打伞，把伞指向运动的方向，这样他才不会被雨淋到（图1）。

同样,如果一个人不在刮风的雨天接雨水,他的桶应该垂直放置。如果他奔跑,为了让雨滴落入桶中,他应该把桶斜放,斜的方向指向桶运动的方向。遥远恒星射来的光,穿过以太飞来,就像在空气中下落的雨滴一样。空气好比是以太,光好比是雨滴,地球上的望远镜就好比接水的水桶。如果地球相对于以太静止,望远镜对准远处的恒星,不用调整方向,就可以直接收到恒星射来的光。但天文学家发现,情况不是这样。要想一直观测某颗恒星,必须一年四季不断调整望远镜的指向,这就是光行差现象。

天文学家认为,这是由于地球绕日运动,从而在以太中穿行造成的。由于地球运动,望远镜不能直接指向所观察的恒星,而必须有一个指向地球运动方向的倾角,恒星射来的光才能恰好穿过望远镜筒,抵达观察者的眼睛。

光行差现象支持地球相对于以太运动的观点。一些物理学家很想知道地球相对于以太的速度究竟是多少。由于以太相对于绝对空间静止,知道了地球相对于以太的速度,也就知道了地球相对于绝对空间的速度,因此这是十分有意义的事情。

为了测量地球相对于以太的速度(即通常所说的以太漂移速度),美国物理学家迈克耳孙设计了更为精确的实验。

迈克耳孙年轻时曾到德国留学,当时欧洲的科学技术比美国领先。迈克耳孙在德国接触到当时世界上最好的光学仪器和光学技术,研制创造了以他的名字命名的干涉仪——迈克耳孙干涉仪,一直到今天都在科学研究中广泛使用。

回到美国后,迈克耳孙想用自己从德国学来的先进光学知识和光学技术,以及自己设计的干涉仪来测量以太相对于地球的漂移速度。

他把干涉仪安装在平滑的大石板上,让石板漂浮在水银上,以求仪器装

置平稳而且易于移动、转动。

迈克耳孙设计的思路是这样的(图2)。图中A是光源,D为半透明半反射的玻璃片, M_1 和 M_2 为2个反射镜。 DM_1 与 DM_2 两臂等长,均为 l_0 ,T为观测镜筒的位置。光源A射出的光在D处分2束,一束穿过半透玻片D到达反射镜 M_1 ,反射回来后,又在D处被反射到达观测镜筒T。另一束被半透玻片D反射,到达 M_2 ,被 M_2 反射回来再穿过D到达观测镜筒T。图中 c 是真空中光速, v 为以太漂移速度,也即以太相对于地球的运动速度。图中画出了以太相对于地球漂移的方向。

为了让读者更直观地理解迈克耳孙实验,我们来打一个比方。图3是一个人在河中游泳的示意图。河水以速度 v 向右运动,河宽AB为 l_0 。一个人从A出发,向下游以速度 u (相对于河水)游 l_0 距离,到达C点,再以同样的速度 u 游回A点。再让同一个人以速度 u 游向对岸B点,然后返回。但要注意,由于河水一直向下游流动,横渡者游泳的方向不能与河岸垂直,而必须向上游方向偏一个角度,否则他就会被河水冲下去,不可能垂直到达B点。这样,他横渡时的渡河速度 u' 将小于他相对于水的游泳速度 u 。

现在我们来比较一下他完成来回横渡的时间,与他从A游到C再返回的时间,看它们是否一样。注意到 v 是水向下游流的速度,显然人以速度 u (相对于水)从A游到C再返回的时间是: $t_1 = \frac{l_0}{u+v} + \frac{l_0}{u-v}$,而横渡1个来回的时间是 $t_2 = \frac{2l_0}{u'} = \frac{2l_0}{\sqrt{u^2 - v^2}}$ 。显然, $t_1 \neq t_2$,顺着水流方向来回游动的时间 t_1 ,略大于横渡一个来回所用的时间 t_2 。二者的时间差为:

$$\Delta t = t_1 - t_2 = \frac{l_0}{u+v} + \frac{l_0}{u-v} - \frac{2l_0}{\sqrt{u^2 - v^2}}$$

游泳的人就像干涉仪中的光,水就

像以太。迈克耳孙把干涉仪的 DM_1 臂指向以太漂移方向,也即地球在以太中穿行的反方向。这时 DM_2 臂与以太漂移方向垂直。光在以太中的运动速度为 c 。那么,沿臂 DM_1 运动再反射回到D的光所需的时间,相应于游泳者向下游游动再返回的时间。沿 DM_2 运动再反射回D的光所需的时间,相应于游泳者渡河再返回的时间。所以,这2束光的时间差为:

$$\Delta t = \frac{l_0}{c+v} + \frac{l_0}{c-v} - \frac{2l_0}{\sqrt{c^2 - v^2}} \approx \frac{l_0}{c} \left(\frac{v^2}{c^2} \right)$$

显然,沿着光路 DM_1 运动的光(即沿以太漂移方向往返的光),比沿光路 DM_2 运动的光(即与以太漂移方向垂直往返的光),所需的时间要长一点。由于2束光有时间差,所以观测者会看到干涉条纹。

这时,迈克耳孙把仪器装置水平转 90° ,使原来与以太漂移方向平行的光路 DM_1 变得与以太漂移方向垂直;而原来与以太漂移方向垂直的光路 DM_2 ,变得与以太漂移方向平行。所以,仪器装置转动 90° 后,沿光路 DM_2 运动的光往返1次所用的时间反而比沿光路 DM_1 运动的光所用的时间长。因此,转动前后,2束光分别完成1个往返的时间差了 $2\Delta t$,使得这2束光的光程差改变了 $2c\Delta t \approx 2l_0 \left(\frac{v^2}{c^2} \right)$ 。这将导致观测者从T看到的干涉条纹发生移动。

迈克耳孙等人把这一实验做得十分精细。从观测精度来看,只要以太相对于地球的运动速度 v 不等于零,他们就应该观测到比较明显的干涉条纹移动,但他们始终没有观测到这一移动。这就是说,这一精确的光学实验,没有观测到以太相对于地球的漂移运动。此结果与光行差实验矛盾,而光行差现象是被大量天文观测确认的,以太应该相对于地球有漂移。这是怎么回事呢?这就是开尔文所说的第二朵乌云。■

本文节选自上海教育出版社出版的《爱因斯坦与相对论——写在广义相对论创建100周年之际》,有删改。