

# 日食观测与广义相对论的验证

李 良



根据广义相对论，强引力场附近是弯曲的，此时，光不是沿着人们通常说的以“直线”传播，而是沿着“曲线”

传播。比起太阳系各大行星来，太阳可谓大质量天体，存在强引力场，因此，经过太阳边缘的星光会出现弯曲。1919年，英国天文学家爱丁顿率领两支日食远征队在西非的普林西比进行测量，证实了星光经过太阳附近确实发生了偏转，且偏转数值与爱因斯坦的预言非常吻合。当人们用电报通告爱因斯坦时，这位科学大师回答道：“我一点也不惊讶，因为如果测到的不是这样，对上帝来说就太遗憾了。”

杨振宁先生近年曾撰文指出，“广义相对论已在20世纪、而且还将在21世纪产生深远和广泛的影响：它已导致几何学的重要发展。它导出统一场论思想，而统一场论已成为基础物理学中迄今尚未完全解决的主要目标之一。它还导出现代宇宙论这门学科，这门学科肯定将成为二十一世纪重要的科学领域之一。”

## 爱因斯坦预言：星光线经太阳边缘会有 1.74 角秒的偏折

科学大师爱因斯坦在20世纪初，先后发表了狭义相对论和广义相对论。广义相对论谈到，在一个大质量物体的周围，其时间和空间都要发生弯曲。1916年3月，爱因斯坦发表了一篇总结性论文——《广义相对论的基础》，在这篇文章里，爱因斯坦假定引力不是一个力，而是在时空连续体(space-time continuum)中一个弯曲的场，而这个弯曲是由于质量存在造成的。这篇论文曾被认为是20世纪理论物理研究的最高水平。该文章还指出，在太阳系，牛顿引力理论可以看作相对论引力理论的一级近似；通过测量水星轨道近日点的进动、引力场中光线的弯曲、星系光谱线的引力红移等实验可以验证广义相对论。

爱因斯坦认为光没有静止质量，但它有能量，

而在狭义相对论中质量与能量是可能相互转换的，因此光线既然没有能量，也就存在动态质量，有质量存在就应该受到引力的影响，因此，当光线经过太阳这样大质量天体时，应该受到太阳引力的作用而改变方向，换句话说，光线被太阳引力拉弯曲了。虽说理论上认为进入太阳引力场的恒星光线会发生弯曲的现象，但由于光线这种偏转角度很小，一般人在地球上不容易观测到。验证这一理论预言的困难主要在于太阳光太强了，正常情况下人们根本无法测量与太阳接近于一条直线上的其他恒星的光线。科学家因此想到，利用不多见的日全食机会，测量通过日轮附近恒星光线的行进情况，有可能验证广义相对论。

科学史的专家告诉人们，光线弯曲并不是广义相对论独有的预言。早在1801年索尔德纳(Johann von Soldner, 1766—1833, 曾担任慕尼黑天文台台长)，根据牛顿力学把光微粒当做有质量的粒子，预言了光线经过太阳边缘时会发生0.875"（角秒）的偏折。1911年在布拉格大学当教授的爱因斯坦根据其相对论算出日全食时太阳边缘的星光偏折角是0.87"，他提出，测量日全食时通过太阳表面附近引力场的某一星球的一束星光，再与平时这些恒星的位置相比较，就可以测出偏转的程度。1912年，回到苏黎士的爱因斯坦发现空间是弯曲的。应当指出的是，需要观测来检验的不只是光线有没有弯曲，更重要的是光线弯曲的量到底是多大，并以此来判别哪种理论与观测数据符合得更好。这里非常关键的一个因素就是观测精度。即使观测结果否定了牛顿理论的预言，也不等于就支持了广义相对论的预言。只有观测值在容许的误差范围内与爱因斯坦的预言符合，才能说观测结果支持广义相对论。

最早开展验证爱因斯坦光线弯曲角度预言的是德国天文学家弗劳因德利希。1914年8月，在俄罗斯克里米亚半岛可以观察到日全食，弗劳因德利希计划在日全食时，通过照相术观察恒星发出的光线在太阳近旁掠过时，稍有弯曲的角度究竟有多大。不巧的是，弗劳因德利希率领的观测队刚刚到俄国，第一次世界大战就爆发了。他们被抓了起来，直到

交换战俘时才被遣送回德国。正好是在这一段时间里，已在柏林普鲁士科学院任职的爱因斯坦，修正了他当初计算的错误，把太阳边缘星光偏转角修正为 $1.74''$ 。

### 利用日食期间天体照相观测来检验

根据预报，在南美洲巴西北部的索布拉尔(Sobral)等地可以观测1919年5月29日的日全食。英国天文学家爱丁顿对检验广义相对论关于光线弯曲的预言十分感兴趣。爱丁顿和当时的科学家罗素(B. Russell)、怀特黑德(Whitehead, Alfred North 1861—1947)一样，是意识到爱因斯坦相对论的重要性的第一批科学家。在第一次世界大战期间，英国人并不太清楚德国的科学进展，爱丁顿在1919年写了“重力的相对理论报导”，第一次向英语世界较通俗地介绍了爱因斯坦的广义相对论理论。为了在1919年5月29日发生日全食时进行检验光线弯曲的观测，当时担任任剑桥大学天文台台长的爱丁顿组织并率领两个日全食观测远征队。爱丁顿后来认为，这是他在参与天文学研究中最激动人心的事件。

事实上，即使是在日全食时，在紧贴太阳边缘处是不可能看到恒星的，光线弯曲的效应不可能用眼睛直观地在望远镜内或照相底片上看到，光线偏折的量需要经过一系列的观测、测量、归算后得出。要检验光线通过大质量物体附近发生弯曲的程度，最好的机会莫过于在发生日全食时对太阳所在的附近天区进行照相观测。

天文学家要在日全食时拍摄若干张太阳附近恒星照相底片，然后等半年之后对同一天区再拍摄若干底片。通过对相隔最好半年的两组底片进行测算，才能确定星光被偏折的程度。也就是说，为了检验爱因斯坦的广义相对论理论，爱丁顿等人必须拍摄到日全食期间出现在太阳附近的恒星场照片，6个月后当太阳不处在那个天区时，他们须再次拍摄那个星场。如果理论正确无误，日全食照片上的恒星将会相对于非日全食照片上的恒星出现位移，而且按照爱因斯坦的观点，这种位移应当随离开太阳中心的距离变化。以1973年的一次观测为例，被拍摄到的恒星大多集中在离开太阳中心5到9个太阳半径的距离处，所以太阳边缘处的星光偏折必定是根据归算出来的曲线而外推获得的量。靠近太阳最近的一二颗恒星往往非常强烈地影响最后的结果。

### 爱丁顿等人的杰出贡献

1919年5月，爱丁顿率领的英国这两支日食观测远征队一支到达巴西索布拉尔，另一支到达非洲几内亚海湾的普林西比岛(Principe)。爱丁顿参加了后一队，但他的运气比较差，日全食发生(全食过程约5分钟)时普林西比的气象条件不是很好。索布拉尔的5月份通常是雨季的最后一个月，迎接英国人的是午后几场阵雨，每一场阵雨都招来一阵暴风。英国观测队向当地官方借了一栋房子安顿下来。房子前是一个赛马场，有一个带顶的看台，很适合观测者开箱、存储和准备工作。日食那天早晨的云比平时更多。实际上，初亏时云的比例估计为90%。幸运的是，正当全食临近时，天空逐渐晴朗！太阳周围的天空一直非常晴朗，食甚时约有一分钟天空蒙上了一层薄云。观测队用天体照相机拍了19张底片，曝光时间为5秒和10秒，并用4英寸(约10厘米)镜头照相机拍了8张照片。

在后期处理观测结果时，为了减少测量误差，英国天文学家想出了一种方案，即一种将日食底片与比较底片相互比较的灵巧方案。他们在7月份拍摄星场时将照相底片翻过来装在照相机上，即不是用感光乳胶而是用玻璃朝向天空。然后将这张底片跟日食底片叠在一起放在测量仪上。它的作用有如一个标尺，将未发生偏转的星像作为发生偏转星像的参考。

每张底片测量7颗星，共测量了7张照片。虽然日冕非常明亮，隐没了所有临近太阳边缘上的恒星，但是天文学家们可以根据位移距离变化的趋势，外推出假想位于太阳边缘上的恒星位移。1919年11月，这两支日食观测队的结果被归算出来：索布拉尔观测队的结果是 $1.98'' \pm 0.12''$ ；普林西比队的结果是 $1.61'' \pm 0.30''$ 。最后，他们得出的数值为1.98角秒，与爱因斯坦的预言1.75角秒相差不多。

那是在1919年11月6日，英国皇家学会和英国皇家天文学会在伦敦共同举办一场学术会议，会场就设在由牛顿创立的皇家学会。牛顿肖像高悬在会议厅中，英国皇家天文学会爱丁顿爵士发表了一份以日食观测验证广义相对论的研究报告，他宣布恒星光线按照爱因斯坦所预言的方式的确发生了偏折。这种科学事件在平常是不会受到公众注意的，但这次媒体却史无前例地争相报道。这次新闻由电报传到了全世界，隔天早晨就上了众多报纸的社论。

一夜之间，爱因斯坦从一个默默无闻的大学教授变成活生生的传奇人物，后人评论说，此举使爱因斯坦成名犹如闪电！那时，“全英国都在谈论您的理论，”1919年12月爱丁顿在给爱因斯坦的信中这样写到，信中洋溢着隐藏不住的兴奋和得意。正是这位英国人，靠着坚忍毅力，在第一次世界大战期间筹募基金，组织了日食远征队，终于使爱因斯坦的相对论扬名天下。

### 逢日食继续检验

一些科学家后来指出，1919年11月英国人的上述宣布是草率的，因为这两支观测队归算出来的最后结果受到怀疑。天文学家们明白，在检验光线弯曲这样一个复杂的观测中，导致最后结果产生误差的因素很多。其中影响很大的一个因素是温度的变化，温度变化导致大气扰动的模型发生变化、望远镜聚焦系统发生变化、照相底片的尺寸因热胀冷缩而发生变化，这些变化导致最后测算结果的系统误差大大增加。

爱丁顿等人当时也认识到了温度变化对仪器精度的影响，他们在报告中说，小于 $10^{\circ}\text{F}$ （华氏温度，1摄氏度等于1.8华氏度）的温差是可以忽略的。但是索布拉尔夜晚温度为 $75^{\circ}\text{F}$ ，白天温度为 $97^{\circ}\text{F}$ ，昼夜温差达 $22^{\circ}\text{F}$ 。后来研究人员考虑了温度变化带来的影响，重新测算了索布拉尔的底片，最大的光线偏折量可达 $2.16''\pm 0.14''$ 。

底片的成像质量也影响最后结果。1919年7月在索布拉尔一共拍摄了26张比较底片，其中19张由格林尼治皇家天文台的天体照相机拍摄，这架专门用于天体照相观测的仪器所拍摄的底片质量却较差，另一架口径4英寸的望远镜拍摄了7张成像质量较好的底片。按照前19张底片归算出来的光线偏折值是 $0.93''$ ，按照后7张底片归算出来的光线偏折值却远远大于爱因斯坦的预言值。当年最后公布的值 $1.98''$ 是所有26张底片的平均值。研究人员验算后发现，如果去掉其中成像不好的一二颗恒星，会大大改变最后结果。

此后在1922年、1929年、1936年、1947年和1952年发生日食时，各国天文学家都组织了检验光线弯曲的观测，公布的结果有的与广义相对论的预言符合较好，有的则严重不符合。但不管怎样，到20世纪60年代初，绝大部分的天文学家尽管确信，太阳对经过其附近的星光有偏折，并认为爱因斯坦

预言的偏折量比牛顿力学所预言的更接近于观测，但是爱因斯坦的理论可能需要修正。

这个时期有一种新的引力理论——布兰斯-迪克理论（Brans-Dicke Theory）也预言星光会被太阳偏折，偏折量比广义相对论预言的量小8%。为了判别广义相对论和布兰斯-迪克理论哪个更符合观测结果，对观测精度就提出了更高的要求。

20世纪60年代发展起来的射电天文学，使人们在平时就可以验证这一理论，利用射电天文望远镜对被太阳遮掩的射电源进行观测，就可以得到测量数据，而且精确度有较大的提高。

1973年6月30日的日全食是20世纪全食时间第二长的日全食，并且发生日全食时太阳位于恒星最密集的银河星空背景下，十分有利于对光线偏折进行检验。美国人在毛里塔尼亚的欣盖提沙漠绿洲建造了专门用于观测的绝热小屋，并为提高观测精度作了精心的准备，譬如把暗房和洗底片液保持在 $20^{\circ}\text{C}$ 、对整个仪器的温度变化进行监控等等。在拍摄了日食照片后，观测队封存了小屋，用水泥封住了望远镜上的止动销，到11月初再回去拍摄了比较底片。用精心设计的计算程序对所有的观测量进行分析之后，得到太阳边缘处星光的偏折是 $1.66''\pm 0.18''$ 。虽说这一结果再次证实广义相对论的预言比牛顿力学的预言更符合观测，但是有学者指出还没有精确到能区分此前已经提出的布兰斯-迪克理论和爱因斯坦理论。

### 测星光偏转 射电天文显威力

20世纪60年代初，射电天文学家意识到天体的微波辐射也应当为太阳所偏转，偏转的方式应与恒星的相同。于是，他们开始建造基线很长的干涉仪，从而能以极高的角精度测量射电源的方向。图1说明太阳通过射电源时，射电源视位置将如何漂移，这种方向的变化是射电波弯曲的明显标志。图中位于 $S_1$ 的太阳掩食射电源，但是微波束绕过太阳弯向地球，于是，该射电源出现在 $A_1$ 的方向，即它实际方向的东面。同理，当太阳运动到 $S_2$ 时，射电源出现在偏西的方向上。为了排除日冕对微波的折射的干扰效应，射电天文学家同时在两个频率上测量射电源的位置，这样可以区分折射效应和相对论效应。

1969年和1973年之间，射电天文学家对3C273和3C279两个类星体进行了9次不同的偏转测量。

结果都证实了爱因斯坦相对论的预言。3C273 和 3C279 这两个射电源在天球上的位置靠得很近，并在非常接近太阳的地方通过。用测量两个射电源的间隔的变化取代测量一个源方向的变化，天文学家能够消除某些仪器和地球大气涨落产生的严重影响。

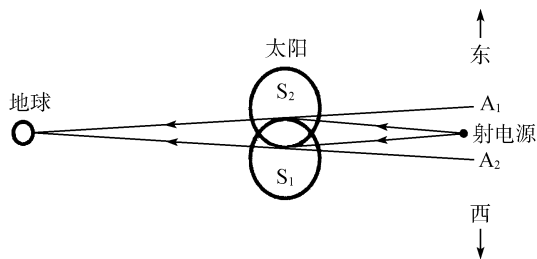


图 1

1974 年和 1975 年，美国天文学家福马伦特和什拉梅克利用基线长达 35 千米的美国国家射电天文台新干涉仪，以前所未有的精度对爱因斯坦的预

言进行了检验。该仪器具有很高的灵敏度，他们利用这一优点，测量了三个比以前人们偏爱的 3C273 和 3C279 暗九倍的射电源的位置，而且这三个射电源在天球上正好排成一条直线。所有这三个射电源的微波波束通过地球大气时，外面两个源被用来计算中央源的相位涨落。天文学家每 7 分钟测量一次这些源的位置，一个月测量 13 天，每天 10 小时。观测到中央源离太阳最近时只有 1.2 度。图 1 比较了偏转测量值与爱因斯坦理论预言值。福马伦特和什拉梅克最后得到太阳边缘上微波偏转结果为  $1.761 \pm 0.016$  角秒。这是广义相对论预言值的  $1.007 \pm 0.009$  倍。也就是说，他们以误差小于 1% 的精度证实了爱因斯坦理论。

迄今为止，射电天文方法仍然保持着精度记录，而观测日全食的光学技术如果不作很大技术改进的话，是不可能超越上述观测精度的。

(北京天文馆 100044)