

# 引力改变了时空

## ——从欧几里得空间到准黎曼空间

苏 景 顺

(张家口市河北建筑工程学院基础部 河北 075000)

爱因斯坦在 1905 年所建立的狭义相对论建立了高速运动下的时空变换,这种变换是局限在惯性系之间的,这正是“狭义”的涵义。作为狭义相对论的推广,爱因斯坦从 1907 年开始努力尝试将相对性理论推广到非惯性系。他在研究了引力场与加速系关系的基础上,于 1916 年在德国《物理学杂志》上以“广义相对论基础”为题正式发表了广义相对论。

广义相对论的诞生进一步更新了我们对空间、宇宙的认识观念。从平直均匀的欧几里得 3 维空间,到闵可夫斯基的 4 维空间,再到弯曲的黎曼空间,独立于时间与物质的“绝对空间”概念被彻底地打破了。爱因斯坦对引力场的研究不仅建立了广义相对论,而且提出了现代宇宙学中诸多令人耳目一新的新观念。从 1923 年之后,爱因斯坦几乎花费了后半生的全部精力试图建立包括引力场、电磁场在内的统一场论。虽然这种努力并未取得最终的成功,但他所作出的努力及其重要预言已对 20 世纪物理学产生了深刻的影响。

下面,让我们回顾一下广义相对论的基本原理,从中感受它所带给我们的新思想、新观念。

1. 等效原理——简单却未被人们发现的基本原理

在经典物理学中,牛顿的万有引力定律与第二定律是我们所熟知的,但是,有谁认真思考过这两个定律的联系呢?

这两个定律的表达式是:

$$f = G Mm/r^2 \text{ (万有引力定律)}$$

$$F = ma \text{ (牛顿第二定律)}$$

在这两个定律的表达式中,有一个相同的字母  $m$ ,我们称之为物体的质量。如果不加认真区别,人们往往默认它们是相同的。但是,从这两个定律本身的意义讲,这两种质量概念是有区别的。

引力定律中的质量是物体所受引力大小的量度,称为引力质量;牛顿第二定律中的质量是物体惯

性大小的量度,称为惯性质量。

如果使物体产生加速度的力正是引力,按照牛顿第二定律,相应的加速度则是引力加速度  $g$

$$g = F/m$$

如果从场的角度理解引力的作用,则在引力场中给定的  $r$  处有确定的引力场强  $g$

$$g = f/m$$

由于在引力场中给定的  $r$  处有确定的引力场强,物体有确定的引力加速度,我们自然可以令引力加速度等于该点的引力场强,从而得出惯性质量等于引力质量的结论。

如果惯性质量与引力质量相等,那么,引力场中的引力将与非惯性系中的惯性力等效。据此,爱因斯坦提出了“等效原理”：“一个相对于惯性系作加速运动的非惯性系与引力场是等效的。”

等效原理说明,物体置身于加速系中与置身于引力场中是等效的。如果将我们置身于一个封闭的宇宙飞船中,假设飞船早已远离地球,在太空中也早已远离任何星球,当飞船以加速度  $a = g$  飞行,我们的感觉与处在地球的引力场中是完全相同的。

等效原理曾被爱因斯坦认为是他“一生中最快的思想”。因为它使爱因斯坦找到了将狭义相对性理论推广到非惯性系的突破口。爱因斯坦正是首先证明“每个物体的惯性质量与其引力质量在数值上是相等的”这样一个广为人们熟知,却从未引起人们重视的基本事实,从而提出一个极易被人们接受,却从未被人们发现的“等效原理”来建立广义相对论的。一个非惯性系与一个引力场等效,研究引力场的时空效应即是研究非惯性系的时空效应。

2. 弯曲的时空——引力对时空的作用

无论是经典力学的时空观,还是狭义相对论的时空观,都认为空间是独立于物质或场而独立存在的。而且认为时间、空间是均匀的,空间是各向同性的。物理学中的这种空间概念与数学中欧几里得几

何学的描述相一致。然而,广义相对论的诞生使我们看到,由于物质的引力作用,欧几里得几何学所描述的平直、均匀的时空观已经动摇了。

在欧几里得几何学中,所谓的“直线”概念也就是光在真空中传播的路线。“两点间直线距离最短”是欧几里得几何学中的一条基本定理,“光线沿最短路径运动”是几何光学中的一条基本定理。然而,如果我们将等效原理用于研究光的运动,将会得出与欧氏几何学描述不相同的空间观念。

按照爱因斯坦的光子理论,光子的运动质量为  $m = h/c^2$ 。既然运动的光子有质量,那么,当它经过大质量星体附近的强引力场时同样会受到引力作用。按照等效原理,这种引力效应如同置身于以加速度  $a$  运动的非惯性系中一样。如果我们在加速运动的升降机中观测水平传播的光线,光线自然是弯曲的,由此得出光线经过强引力场也将产生弯曲的结论。

如果光线在强引力场中发生弯曲,引力场中光线的曲率就不再是零,而要视引力场强而定。在引力场中通常充满了电磁辐射,电磁辐射具有不为零的曲率,因此,空间已不再是平直、均匀的,而是弯曲的。是物质的引力使空间发生了弯曲,而弯曲的时空又决定了空间物质的运动。正如物理学家所描述的:“物质告诉空间如何成为曲线,空间告诉物质如何运动。”

曲率为零的均匀宇宙空间,是通常的欧几里得空间。曲率为正的弯曲空间是黎曼空间。一个有限而无界的闭合宇宙,正如一个球面有限而无界。当我们乘宇宙飞船从某处沿着直线飞行,最终将重返原处。这时平行线已经相交,平面已经变成曲面,原有的欧几里得空间将被黎曼空间所代替。

微分几何学中的度规是表述相对论思想的准确语言。爱因斯坦基于时空度规依赖自然界物理过程的思想,提出将狭义相对论推广到非惯性系或引力场的关键是将闵可夫斯基度规:

$$ds^2 = c^2 dt^2 - (dx^2 + dy^2 + dz^2)$$

变换为新的度规:

$$ds^2 = \sum_{\mu} g_{\mu} dx^{\mu} dx \quad (g_{\mu}: \text{度规张量})$$

即:将平直的张量运算变换成弯曲的张量运算,即可描述广义相对论的时空思想。十分有趣的是,这种数学语言已在此前半个世纪由德国数学家黎曼(G. F. B. Riemann)创立的微分几何学完成了。上述度规

正是黎曼度规。 $n$  维空间的黎曼几何学与  $n$  维空间的欧几里得几何学的关系,正如曲面几何与平面几何的关系, $ds$  的积分决定着引力场中质点与光线的路径,空间的曲率取决于空间的物质分布。

1915年11月25日,爱因斯坦发表“引力的场方程”的论文,提出引力场方程的完整形式:

$$R_{\mu} - \frac{1}{2} g_{\mu} R = - \frac{8G}{c^4} T_{\mu}$$

广义相对论的引力场方程描述了物质能量、动量分布与引力场时空曲率的对应关系。方程中的  $T_{\mu}$ 、 $R_{\mu}$ 、 $g_{\mu}$  分别称为物质的能量——动量密度张量、时空曲率张量、引力场张量。至此,空间已不再是独立于时间与物质或场的“平直空间”,而是受到物质或场影响的“弯曲时空”。

光线经过强引力场发生弯曲是广义相对论的重要预言之一。爱因斯坦曾计算出光线从太阳附近掠过的最大偏折是 1.75 角秒。发生在 1919 年 3 月 29 日的日食期间,以英国天文学家爱丁顿(A. Eddington)为领队的一支科学观测队为验证爱因斯坦的预言专程从英国来到遥远西非的普林西比岛,正如所期地观测到了太阳背后星球发出光线经过太阳附近发生弯曲的现象,并成功拍摄下了太阳背后星球的照片。观测结果在实验误差范围内与理论预期值取得了很好的一致。这一预言得到验证成为广义相对论创立以来取得的最辉煌胜利。

### 3. 引力红移——黑洞的理论依据

引力改变了光线的曲率,导致空间的弯曲。按照相对性原理,空间效应与时间效应是互为因果关系的。在发生空间弯曲效应的同时,自然也发生了时间膨胀效应。这就是说,我们观察到引力场空间弯曲的同时,也将观察到引力场的时钟变慢。

大质量恒星的强引力场可以对光子的运动产生作用。如果将原子发射光波的频率作为时钟使用,时钟变慢效应将反映在光波频率的降低。这就是说,如果我们观测发自大质量恒星的光波,所接受到的光波频率要比它实际发出的光波频率低。在可见光的范围中,红光的频率是最低的,因此,物理学将由于引力作用使观测者接受到的光波频率变低的现象称之为“引力红移”。

大质量星体发出光谱的引力红移是广义相对论的又一重要预言。1925年,美国天文学家亚当斯(W. S. Adams)观测了天狼星伴星所发出的谱线的相对频移是  $6.6 \times 10^{-5}$ ,该值与爱因斯坦理论值  $5.9 \times$

10<sup>-5</sup> 基本一致,从而证明了爱因斯坦的预言。

将光波的引力红移现象与大质量恒星的引力坍缩现象相结合,将会引出现代“黑洞”概念。对于质量是几个以上太阳质量的恒星,当恒星中分子的无规则运动、逃逸辐射的压力、甚至电子、中子等粒子之间的排斥力所产生的膨胀趋势无法抵御自身强大的引力而发生坍缩时,强大的引力场将使恒星发出的所有辐射产生越来越严重的红移现象。如果这种现象愈演愈烈,最终极端的红移将使观测者接受不到发自恒星的任何频率辐射。这样的恒星在观测者看来仿佛就像天空中的一个“黑洞”。这正是现代黑洞概念的来源。

爱因斯坦在他的广义相对论中用一组严谨而又复杂的数学方程描述了物质在整个宇宙中的分布以及空间的曲率性质。在宇宙尺度上,从空间曲率的计算最终所决定的宇宙是有限但无界的。此后经进一步证明,爱因斯坦广义相对论的方程组预言了一个膨胀宇宙的存在。由此形成了现代宇宙学中的爱因斯坦膨胀宇宙学说。

宇宙膨胀学说自然涉及到宇宙的起源问题。按照大多数物理学家所接受的观点,认为宇宙起源于最初的大爆炸。广义相对论认为,虽然大爆炸之后的宇宙一直在膨胀着,但最终将转化为收缩并坍缩成一个“黑洞”。在经历了极度的收缩之后,接下来的将是再一次的大爆炸。即爱因斯坦的广义相对论预言了如此周期循环的“震荡”宇宙。

#### 4. 场能的引力作用——行星轨道旋转之谜的破译

牛顿经典力学理论描述行星的运动是成功的。然而,这种成功是不完全的。因为天文学的观测发现,应用牛顿力学计算的结果与实际观测结果存在微小差异。例如,天文学家勒未里埃(U. J. J. Leverrier)早在1859年就发现,水星在绕太阳运转的过程中运行轨道在缓慢地旋转,大约在100年内旋转45°。这种反常现象用牛顿的力学理论是不能解释的,成为长期困扰天文学家的一个难解之谜。

对于行星运行轨道缓慢旋转的这种奇特现象最终作出科学解释的是爱因斯坦的引力场理论。爱因斯坦的引力场理论认为:在强大的引力场空间弥漫着巨大的场能量,按照质能等价原理,这种场能量可以折合成太阳的有效质量,这种有效质量所产生的引力作用与通常的物质质量是等效的。它同样可以对环绕太阳运转的行星产生影响。由于场能量空间

分布的不均匀性,当行星运动靠近太阳附近时这种影响较为显著,远离太阳时则几乎可以忽略。例如,距太阳较近的水星,其运行则会受到这种场能作用较明显的影响,这种影响导致水星运行的椭圆轨道非常缓慢地绕太阳旋转。即发生所谓的“水星近日点移动现象”。应用广义相对论计算近日点的移动速率与实际观测结果取得了很好的一致。行星轨道旋转之谜的破译成为广义相对论取得的又一重大胜利。

#### 5. 人类智慧的象征——伟大的爱因斯坦

纵观科学发展史我们可以看到,任何真正有价值科学理论的诞生都不是一帆风顺的。哥白尼的日心说如此,达尔文的进化论如此,爱因斯坦的相对论也是如此。其实,这是很合乎逻辑的。任何伟大的思想与理论之所以伟大就在于它的创新性。一种超越传统观念的创新理论在问世之初就能够立刻被人们所理解接受,恐怕这种理论也就没有多少创新性了。

1905年爱因斯坦创立相对论时虽然引起了轰动,但他的理论仅仅得到了普朗克、爱丁顿等少数科学家的支持,在科学界并没有得到普遍的认同。许多人,甚至包括勒纳德(P. Lenard)、斯塔克(J. Stark)这样的诺贝尔物理学奖获得者也曾经激烈地反对相对论。这其中自然有学术以外的原因。在当时的历史背景下,爱因斯坦作为犹太人自然成为纳粹势力仇视、攻击的对象,在德国甚至还发生了“100名科学家证明爱因斯坦是错误的”签名闹剧,由此可以想象相对论诞生初期曾经受到了怎样的“礼遇”。

但更多的人在当时不能接受相对论是由于对相对论的不理解。经典物理学在人们思想中所形成的牢固观念使人们一时还难以接受如此革命性的理论。据说,英国的爱丁顿曾用“英国只有两个人理解相对论”形容当时人们对相对论的理解程度。这一传说是否真实姑且不论,但当时科学界对相对论未能作出肯定评价却是事实。爱因斯坦获得诺贝尔物理学奖是由于他的光量子理论,而不是掀起物理学革命的相对论。在1922年12月10日诺贝尔奖物理学奖颁奖会上,诺贝尔奖评审委员会委员长阿累尼乌斯(S. Arrhenius,瑞典化学家,1903年诺贝尔化学奖获得者)在颁奖致辞中谈到爱因斯坦获奖原因时曾明确指出:“是由于爱因斯坦对光电效应建立的新理论。”而对于相对论却采用了一种委婉的措辞评价:“这是一个涉及认识论的问题。”由此可见,即使

# 奇妙的光学陷阱

周素云 刘义保

(华东地质学院物理教研室 江西抚州 344000)

科技的迅猛发展给地球上的人类生活带来令人眩目的变化,古人的梦想例如“千里眼,千里耳”在今天已经实现。现在的人类梦想在将来也许有一天会实现。科幻小说伽莫夫的《物理世界奇遇记》里描述的一段:汤普金斯先生来到一座神奇的城市,由于这城市的光速异乎寻常的小,当他骑自行车高速行驶时,发现周围的一切都变扁了。自从爱因斯坦的狭义相对论成立以来,上面的描述被认为是正确的。但它的前提是光速非常小,自行车速都能超过,这看起来有点玄乎。据最近报道,英国皇家科学院的科学家用光学陷阱里的冷原子来捕获光子,使光速减慢为 17m/s,是真空中光速  $3 \times 10^8$  m/s 的 2 亿分之一,简直不可思议。

## 一、光学陷阱捕获光子

光学陷阱一般是由蒸汽室和激光束构成,蒸汽室用真空泵抽成真空,然后蒸发某种原子金属,使原子云进入蒸汽室,用多束激光从不同方向照射原子云,光子与原子发生碰撞,使原子速度减慢,原子云的热运动剧烈程度降低,随之温度就降低可达毫开氏温度,原子云的密度也增加到比一般原子云密度高出几个数量级。这种冷原子可用于测定原子的共振频率,制造出更准确的原子钟。还可用来捕获光子(实质上是减慢光速),如图 1。

用一对低能量的激光照射极冷钠原子(温度在玻色——爱因斯坦凝结点之下),向钠原子气体样品

发射一列长为 1 千米的探测激光。样品长为 2mm,光波一进入样品,速度马上减为前所未有的 30m/s,是真空中光速的千万分之一,这个速度是如此之小,以致这列光波完全消失在样品里,直到它从样品另一头爬出,才恢复原来的长度,原来的光速,探测光波好象是一列火车进入隧道消失了,过了一段时间又突然出现了。但是光波从原子云爬出后能量稍有减少,因为冷原子会吸收一点能量。用光电倍增管可记录进入原子云的探测波的形状。如果继续降低温度,当开氏温度接近零时,原子云处于凝结状态,探测光波的最低光速达到 17m/s,但波进入原子云后,原子云是否仍然处于凝结状态不得而知。如果进一步提高设备的频率稳定性和降低激光强度,还可能获得更低的光速,甚至达到每秒几厘米,可与玻色——爱因斯坦凝固点的声速相比。

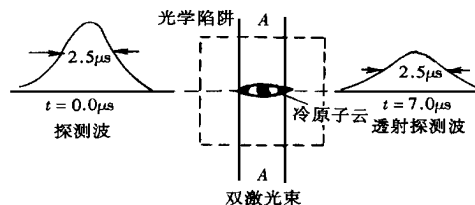


图 1

一般来说,光速进入水或玻璃中,光速会减为原来的  $2/3$  及  $1/2$ ,但进入非透明媒介时,会被媒介几

诺贝尔奖评审委员会在当时对相对论也持一种十分谨慎的态度。

然而,真理最终经得了实践的检验。经历了近一个世纪,相对性理论已在宇宙学、高能物理学、以及量子场理论中得到了广泛的应用。相对论的正确性已得到了充分的证明。

爱因斯坦的一生是伟大的一生。他寻求自然和谐统一的思想境界与热爱和平、崇尚善美的人格魅力赢得了世人的尊敬,他在探索自然真谛中所展现出的非凡创造性充分证明了他的科学才能。在他一

生中所作的每一项探索几乎都是创新性的,是他的创新与开拓使 20 世纪物理学显得格外辉煌。在 20 世纪即将结束的 1999 年,英国著名的科学刊物《物理世界》从入选的 100 名著名物理学家中评选出有史以来 10 位最伟大的物理学家,爱因斯坦荣登榜首。同年美国《时代》周刊的评选结果也将爱因斯坦评为 20 世纪最伟大的人。

爱因斯坦的英名与伟业将永远地载入史册,他是我们人类智慧的象征。