

第 9 章

相对性的世界

宇宙的伟大建筑师现在显得像是一位纯数学家。

詹姆斯·H·金斯

自然界的普遍规律应该由对于所有的坐标系都成立的方程来表达。

阿尔伯特·爱因斯坦

当美国物理学家在 1881 年决定检验地球通过静止的以太的运动时,对于物理学的彻底大检修就不详地开始了。阿尔伯特·A·麦克斯韦根据一个非常简单的原理设计了一项实验。

稍加计算就能证明,在一条河中向下划一段距离再返回比在静止的水中用的时间更长(我们在第 1 章讨论直觉时已碰到这个概念)。譬如说,如果一个人在静止的水中以每秒 4 英里的速度划行,那么在没有水流存在的情况下,他划行 12 英里再返回需用 6 小时。然而,如果水流的速度是每小时两英里,那么他下行时的速度将是每小时 $4+2$ 英里,上行时的速度将是每小时 $4-2$ 英里。以这种速度他整个行程所用的

时间将是 $2+6$,即8小时。这里涉及的原理是,如果一恒定的速度,如水流的速度,阻碍运动比促进运动用了更多的时间,结果将是时间的损失。

迈克尔逊和一位后来的合作者埃德华·W·莫雷(Edward W. Morley, 1838—1923),以下面的方式运用了上述原理。从地球上的A点(图35),发送一束光到地球上的B点;从A到B的方向是地球绕太阳运动的方向。预计的是光线以通常的速度经过以太传播到B,然后再被反射回A。不过,由于地球的运动,当光线向着B点的镜子传播时,镜子又运动到了一个新位置。因而,地球的运动使光线到达镜子延迟。光线是在C点被反射向A。而当光线向B点运动时,地球带着A点运动到D,并且光线返回时,地球又带着D点运动到E点。因此,地球的运动促进了光线从C到E的运动。然而,从C到E的距离比从A到C短。这样,光线返回时受地球的促进比射出时受地球的延搁的时间短。地球的运动和前面的例子中水流的速度起了同样的效果。因此,根据上面所述的原理,光线从A到C再到E所用的时间将比地球在以太中静止时它传播两倍AB距离所用的时间多。尽管他们运用了一种叫做干涉仪的精巧灵敏的探测装置,迈克尔逊和莫雷也没能探测到时间的增加。很显然,地球经过以太的运动没有发生。

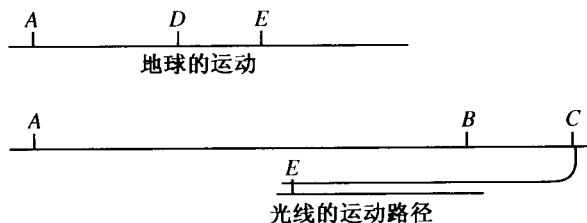


图 35

物理学家们面对着一个不可回避的两难境地。负载光所需要的以太必须是地球在其中运动的固定的媒介,然而这种假设和实验结果不一致。理论与这样一个根本性的实验不一致是不能忽略的。到这时物理学家相信他们的科学中的某些假设需要彻底检修了。

另一个相关的困难面临着 19 世纪的数学物理学家。为理解这点让我们说几句题外话。牛顿相信绝对空间和绝对时间的存在,在其《自然哲学的数学原理》(*Mathematical Principles of Natural Philosophy*)中是这样来定义的:“绝对空间,按照其本性而不管外在的一切,是保持不变不动的。绝对的、真实的时间,自发地、按照其本性、均匀一致地流动下去,而不管外在的一切。”他认为离开了物体和人类经验,这些概念也有其客观实在性,并且他相信对于一个超人的观测者即上帝来说,它们是可知的。此外,对于这个宇宙的数学和科学规律的完美的表述是那些上帝根据其绝对的量度能够得到的规律。只有知道了地球相对于固定不动的观测者上帝的运动,人类才能将上帝的规律转化为真实的形式。我们可以看出,牛顿的科学思想就其根本上说是建立在包括上帝、绝对空间、绝对时间和绝对规律这样一些形而上学假设之上的。牛顿的同时代人和后继者中,尤其是欧拉和康德,相信这些概念的存在。

当然,牛顿认识到人类不具备关于绝对空间和时间的知识,因而他假定存在惯性的观测者,即那些牛顿第一运动定律对其成立的观测者。我们可以回想一下,这条定律是这样说的,如果没有力施加在一物体上,静止的物体将保持静止,或者运动的物体将沿直线以恒定速度运动。给定了一惯性观测者,就可以找到其他的,或相对静止,或以恒定的速度沿直线相对运动。所有这些观测者都在惯性参考系中运动。让我们利用一个简单的实

例来考虑一下这个概念。假设在以恒定速度运动的船上的一个旅客以恒定的速度运动,并度量他运动的距离。再假定岸上的一个人度量了旅客从起始点到终止点的距离。当然,相对于岸上来说距离更大。如果将船的运动考虑在内,这个差别就可以解释了。很明显,有两个参考系,一个参考系是岸上人的,另一个参考系是船上旅客的。

考虑这样两个以均匀速度平移运动的参考系,再假定一物体相对于这两个参考系运动。相对于第一个参考系,物体有特定的轨迹,并以特定的速度沿轨迹运动;相对于第二个参考系,轨迹和运动都不同。从数学上考虑,用正交坐标系来表示所需要的参考系。在图 36 中,我们假定参考系 K 固定不动,参考系 K' 以恒定的速度相对于 K 向右运动。假定处于两个参考系中的观测者有相同的时钟。

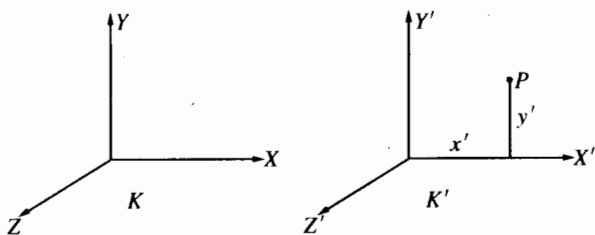


图 36

现在空间中有一点 P , 其坐标在 K' 中是 x' 和 y' , 在 K 中是 x 和 y 。因为右边的参考系以速度 v 运动。 x' 和 x 的关系由 $x = x' + vt$ 给出。这个方程将 P 相对于 K' 的横坐标变换为 P 相对于 K 的横坐标。而且 $y = y'$ 。此外,如果两个观测者以同样的方式来度量时间间隔,那么

$$t = t'$$

在牛顿物理学中所有的力学定律在这样的变换下保持不变。也就是说,以坐标 x, y, t 表示的定律若用 x', y', t' 表示还是具有同样的形式,只要第二个参考系相对于第一个的速度是恒定的。

这两个参考系叫作伽利略参考系或惯性参考系。其中一个相对于另一个作匀速运动。两个之间没有加速运动或者旋转。用牛顿的术语来表达,伽利略参考系保持静止或者在绝对空间中以均匀的平移速度运动而没有加速或旋转。究竟哪一个在绝对空间中静止是不能确定的,但我们既然知道了变换规律,这无关紧要。此外,在一个参考系中成立的微分方程在另一个参考系中也成立。再重复一下,经典的力学定律在两个参考系中是一样的。

接下来我们来考虑麦克斯韦方程组。在 19 世纪结束时,人们相信同样的偏微分方程在伽利略参考系中成立。如此一来似乎在电磁学中和在牛顿力学中情形相同。然而,这一信念导致了矛盾。若定律在参考系 K 中成立,为得出在 K' 中成立的定律,我们对于 K 运用变换定律。对于电磁学方程,我们必须修改变换定律,加上两个参考系相对速度的项。理由很简单,速度不是不变的,麦克斯韦方程组包含光速 c 。譬如说,一个光信号向右以速度 c 传播,而另一个以速度 c 向左传播。向右运动的观测者在追赶光,对于他来说信号的速度是 $c-v$ 。另一方面,这个观测者在逃离第二个信号,他相对于这个信号的速度是 $c+v$ 。对于运动的观测者来说,这两个光信号不以相同的速度传播,所以麦克斯韦方程组对于他来说不具有相同的形式。就麦克斯韦方程组来说,只有一个优选的参考系:相对于以太静止的参考系。

如此一来,将麦克斯韦方程组从一个参考系变换到另一个相对于它作匀速运动的参考系,表明麦克斯韦方程组与牛顿力

学定律的行为不同。在后者中,一个简单的变换就从一个参考系转到另一个参考系,而对于麦克斯韦方程组却不是这样的。

杰出的数学物理学家亨德里克·安图·洛伦兹(Hendrick Antoon Lorentz, 1853—1928)想出了一种可行的解决方法。假如保持麦克斯韦方程组的不变性,而修改从一个参考系到另一个的变换定律,会怎样呢?为简单起见,我们假设只有空间的一维和时间变化了。对于从一个正交坐标系到另一个相对于它以匀速运动的坐标系,洛伦兹得出了如下的方程:

$$x' = \frac{x - vt}{\sqrt{1 - v^2/c^2}}, y' = y, z' = z, t' = \frac{t - vx/c^2}{\sqrt{1 - v^2/c^2}}$$

这些方程假定第二个参考系与第一个沿着相同的方向运动,即沿 x 方向。我们注意到,在洛伦兹方程中,距离与时间是关联在一起的。此外, x 和 x' 之间、 t 和 t' 之间的关系不像伽利略变换中那样简单。尤其是, t 和 t' 并不是同时的,即两者不相等。我们再留意一下, c 是光的速度,每秒 186 000 英里,而人通常遇到的速度相对来说是如此之小以致洛伦兹方程实际上还可还原为伽利略变换。

1905 年阿尔伯特·爱因斯坦(Alber Einstein, 1879—1955)登场了。爱因斯坦更倾向于物理而不是数学。尽管数学他懂许多,随后又不断地学了很多,数学对于他来说却不过是工具。物理学更重要。他对电磁理论的成果和赫兹的成果尤其敬佩。虽然在 20 世纪他关于相对论的成果是革命性的(下一章我们将看到,关于量子力学也是如此),他是召唤数学只是作为物理思想之辅助的 19 世纪伟大思想家中的最后一个。尽管如此,他的相对性理论是完全建立在数学基础之上的。

研究完洛伦兹的成果和迈克尔逊-莫雷实验以后(不过关于

这两者他了解多少是有疑问的),爱因斯坦致力于消除经典力学和电磁理论之间的明显的不一致,并解决我们已提到的一些其他问题(见第8章)。他的1905年论文中其中一篇的题目是《论运动物体的电动力学》(On the Electrodynamics of Moving Bodies),这篇论文中包括现在为人所知的狭义相对论。从根本上说,可以说,狭义相对论的某种特定形式是产生于电磁理论。

爱因斯坦直面难局,作了几个假设。既然除了惯性系没有方法来确定绝对空间和时间,他设定,在力学中也一样,从一个惯性系到另一个的变换不是牛顿式的而是洛伦兹式的。这一决定不是任意的或独断的。洛伦兹曾经致力于求得麦克斯韦方程组在正交变换中的不变性。爱因斯坦相信他能够扩展牛顿定律的范围,即使仅对于惯性参考系成立也好。光速对于所有观测者来说都是一样的(而不管光源的运动),这一事实也影响了他,而这也成了其狭义相对论中的一个设定。此外,既然电磁场对于电子施加作用力,而力是一个力学概念,有充分理由相信洛伦兹方程应该适用于力学。至于以太概念他是抛弃了。究竟光是如何传播的曾经是且仍然是有待于解决的。歌德曾经写道,在理论和实践生活中最伟大的艺术是将一个难题变成一个设定。这就是爱因斯坦在1905年所作的。

让我们来考虑一下从爱因斯坦的狭义相对论中的设定所得出的一些推论。第一个就是,有两个观测者,一个相对于另一个以匀速沿直线运动,两者对于事件的同时性意见将不一致。让我们来考虑一个有点平凡的实例。

假设在快速运动的长火车当中的旅客同时看见两道闪光,一道发自最前面车厢的一点,另一道发自最后面的车厢。一个观测者站在铁轨旁边,也处在最前和最后车厢的中央,他也看到了两道闪光,但不是同时的。从最后车厢发出的闪光先到达观

测者。要考虑的问题是：这两道闪光是同时发出的吗？

两个观测者都会同意说它们不是同时的。因为地上的观测者正处在两道闪光中央，它们传播了同样的距离，因而到达他花费了同样的时间。因为观测者先看见从后面发出的光，这道光必是先发出的。车上的旅客会这样推断：从后面发出的光的速度在他看来是光速减去火车的速度。而从前面发出的光相对于旅客的速度是光速加上火车的速度。因为这两道光都经过火车长度的一半的距离到达他，从后面的光线必然是先发出的以使两道光线同时到达。在这种情况下中似乎没有任何困难。

这两个观测者在两道光线的发射顺序上也是一致的，因为他们都假定地上的人相对于以太静止而火车上的旅客相对于以太在运动。然而，假设采取不同常规的观点，即认为火车相对于以太静止，而是地球向着火车后部运动。根据这种观点火车上的旅客会正确地得出结论说，因为他同时看见了闪光，它们是同时发出的。地上的观测者毫无疑问会选择坚持他先前的观点，即他和地球相对于以太静止，后面车厢的闪光是先发出的。现在关于两道闪光的同时性意见不一致了，起因是对于谁相对于以太静止意见不一致。那么究竟是谁呢？

不幸的是，火车上的旅客相信火车相对于以太静止，和地上的观测者相信地球在以太中静止同样有道理。因为迈克尔逊-莫雷实验表明，我们不能检测出经过以太的运动。因此，两个相对运动的观测者关于两个事件的同时性必然意见不一。

如果两个观测者关于两个事件的同时性意见不一，对于距离的度量也必然意见不一。假设火星上的观测者和地球上的观测者愿意度量地球到太阳的距离。因为距离在不断变化，他们必须同意在给定的瞬间来度量。然而，为使两个观测者同意一个给定的瞬间，两者必须在事件的同时性上取得一致，譬如说标

志那个瞬间的钟表响声。因为相对运动的观测者关于这些事件的同时性不会取得一致，他们“在给定的瞬间”对于地球到太阳的距离会得出不同的度量结果。

即使物体所经过的路径的性质也取决于观测者。我们再来考虑一个简单的例子。从匀速运动的火车上掉下的石头在火车上的旅客看来是沿直线下落，但在地上的观测者看来似乎是沿着抛物线路径。换句话说，轨迹随观测者而变。

两个相对运动的观测者不但对于距离的量度而且对于时间间隔也会意见不一。否则的话，他们将对于标志间隔结束和开始的事件之同时性取得一致；而这他们做不到。

爱因斯坦作了进一步的推论。如果一个观测者静止，而另一个观测者相对于他以恒定的速度 v 沿固定方向运动——譬如说，运动的观测者在火车上——运动物体上的长度在静止的观测者看来要短些，反之亦然。至于时间，静止的观测者发现相对于地球运动的观测者进展得更慢。运动者的雪茄在静止的观测者看来持续的时间是他自己雪茄的两倍。换一种说法，参考系 S' 中的一个钟表静止于其中，从另一个参考系 S 看来， S' 中的钟表每秒钟慢 $(1-1/\beta)$ ，其中 $\beta = \sqrt{1-v^2/c^2}$ 。反过来也成立。一般说来，两个参考系之间的关系符合洛伦兹变换。此外，除了考虑任何单一的观测者外，时间和空间的度量不能分开，正如对所有的观测者来说不能分开水平距离和垂直距离的量度。

应该强调的是，当我们讨论不同的观测者度量长度的差别时，我们所谈的不是距离的效果或者视觉错觉。当我们谈论对于时间间隔的不同意见时，也不是在谈论心理或者情感效应。

现在来考虑一个数量例子。一个地上的观测者会发现，相对于地球以每秒钟 161 000 英里的速度运动的火箭船的大小是船上的人所量大小的一半。而这样一个火箭上的时钟在地球上

的观测者衡量来比火箭上的观测者衡量来要慢一半。对于地球上的物体和事件的大小和时间,火箭上的观测者也会得出同样的结论。更进一步,在其自身的时空世界中,两者都是对的。

这个长度和时间之局域性的信条,是相对性理论的惊世骇俗的新断言之一。观念的陌生性不应使我们看不见这样的事实:比起牛顿绝对时空的观念来,它们更符合实验和我们上面检视过的关于同时性的推理。的确,如果不是这样,科学家们不会坚持片刻,不管是相对性还是绝对性。相对于另一个观测者以速度 v 运动的观测者所见到的长度和时间关系可以从洛伦兹变换中推导出来。

狭义相对论的设定的另一个结果涉及速度的叠加。假设一个人在静止的水中以每小时 4 英里的速度划行,而水流的速度是每小时 2 英里。总速度是每小时 6 英里吗? 根据狭义相对论却不是这样的。总速度 V 用一般项来表示就是

$$V = \frac{u + v}{1 + uv/c^2}$$

其中 u 和 v 是两个速度,这个公式的一个有趣特征是,当 $u = c$ 时, $V = c$ 。

也许狭义相对论隐含的最奇特的推论是任何物体的质量随其速度而增加。爱因斯坦在其 1905 年的第四篇文章中讨论了这个论题。如果用 m 来表示相对于观测者静止时物体的质量,其数学表达式是

$$M = \frac{m}{\sqrt{1 - v^2/c^2}} \quad (1)$$

其中 M 是运动物体的质量而 v 是其速度。怎么会是这样呢? 当物体的速度增加时,它的分子当然不会增加。这种结果是出

人意外的。可以证明,作为一种很好的近似,质量的增加非常接近静止质量的动能除以 c^2 。粗略地讲,质量的增加等于能量。可以这样说,运动的质量之活动似乎是其质量增加了,其实从物理上讲增加的是一份能量。

上述质量与能量的关系似乎令人难以置信。但这几乎是我们的日常经验的组成部分。我们先来考虑质量向能量的转化。我们都曾用过手电筒。这时我们将电池中的质量转化为光,而光具有能量。光能使玩具辐射计的叶片旋转。很明显,光具有质量,撞击了辐射计。在供暖系统中我们燃烧燃料,我们燃烧汽油推动汽车。这时我们也是将质量转化为能量,正如我们燃烧木头产生热,而热是一种能量形式。实际上光是地球上多数能为我们所用的能量之源。它由植物转化为化学能。在绿色植物的光合作用中,光的能量被捕获,利用来将水、二氧化碳和矿物质转化为氧气和富含能量的有机化合物。

爱因斯坦曾经提示,在放射性粒子如高速运动的 β 粒子(电子)中可发现质量的增加,这已经在实验上得到验证。另一种相关的情况是,如果加热粒子,给其提供了能量,质量会增加。

幸运或不幸的是,还有一个相反的过程。一点物质会通过发出相应量的能量而损失质量。在一种相对无害的情形中,可以减慢粒子的运动,发出能量。不幸的一面是,基本离子的裂变和聚变会放出辐射,这里就有了原子弹的基本概念。

理解质能等价的一个关键是考虑质量是如何表现自己的。质量的一种基本性质是惯性,即对速度改变的抵抗。为增加速度,必须施加能量;速度越高,改变速度所需能量就越多。根据公式(1),通过增加速度,物体获得了更多的惯性或质量。我们可以用代数来表示:

$$M = m + \frac{1}{2}m\left(\frac{v^2}{c^2}\right) \quad (2)$$

右边的第二项是动能除以 c^2 。这样,质量的增加是动能。无论我们说质量随速度而增加,能量有质量或就是质量,或者说能量作用使质量增加,这都是无关紧要的。无论能量的增加是不是动能,同样的事实成立。获得改变的是富含能量的物质之惯性。

不过,爱因斯坦走得更远。恰好情况是这样,当质量处于静止时,其能量在数量上等于 mc^2 ,其中 m 是物体的静止质量。于是爱因斯坦将公式(1)作为以速度 v 运动的物质的质量。事实上,他作了推广,论证了 $E = mc^2$,其中 E 代表质量 m (不只是静止质量)中所有能量(用我们的符号来表达就是 $E = Mc^2$)。他还证明,对于辐射能量 E 必须分配惯性,其等价质量是 E/c^2 。这些结论不是从狭义相对论中推导出的,但是与其一致。如爱因斯坦在其《相对论的含义》(*The Meaning of Relativity*)一书中所说:“因而质量和能量从本质上说是一样的;他们只是对同一个东西的不同表达。物体的质量不是恒定的,它随能量的改变而变。”

在日常经验中,我们在质量和能量之间作了人为的区分。它们是用不同的单位来度量的,即克与尔格。 E 所具有的质量在数量上等于 E/c^2 ,其中 c 是光速。然而,现在看来更加肯定的是:质量和能量是度量同一个东西的两种方式。如果有人反对说,不应该混淆,它们是有区别的两种性质,那么我们应该理解,它们不是感官可感的性质而是数学术语,表达了更可直接把握的性质(即质量和速度)之组合。

尽管爱因斯坦继续思考力学、电磁学和其他的课题,在其后来的研究中他受了赫曼·闵科夫斯基(Hermann Minkowski, 1864—1909)的强烈影响。后者是他在联邦技术学院(苏黎世理

工学院)的名教授。闵科夫斯基在1908年说过:

我愿意展现在你们面前的时空观是从实验物理学的土壤中生发出的,其力量就在于那里。这种时空观是激进的。从今以后,空间自身和时间自身定会消失成影子,只有两者的一种结合才能维护一种独立的实在。

闵科夫斯基同意:事实是这样,我们怀有这样一种时间观:它独立于任何空间观念,持续流动。尽管如此,当我们观测自然界中的事件时,我们同时经验(experience)到时间和空间。此外,时间本身总是用空间手段来度量的,例如用钟表指针经过的距离或单摆经过空间的摆动。而且,我们度量空间的方法必然涉及时间。即使度量距离的最简单的方法中,即用一根测杆,在度量期间时间在流逝。因而,对于时间的自然的看法应该是将空间和时间结合起来;世界是四维时空的连续统。

对于两个事件的时空间距的空间和时间部分,不同的观测者会得出不同的测量结果。这是事实,但如果我们考虑的是三维空间自身,这并不出人意外。在地球上不同地区的两个人看到的是同一个三维空间,但其中一人将其所经验的空間分成垂直和水平方向,这与另一人的水平和垂直方向不同。尽管如此,我们还是将空间看成三维的整体,而不是水平和垂直范围的人为组合。同理,不同的观测者也会将时空分解成不同的时间和空间部分。这种分解对于作出这种分解的人来说,与正在走下一段楼梯的人对于水平和垂直方向的区分同样真实和必要。作为人类,我们作出区分,而大自然将空间和时间一起呈现。实际上我们在日常生活中有时也混同时间和空间。我们说一颗星星多少光年远,就是说这颗星星与光在这些年里所经过的距离一样远。火车时刻表也是地方和时间的组合。

爱因斯坦继续运用闵科夫斯基的观点,即宇宙应该被看成是四维时空世界,但爱因斯坦狭义相对论的这些令人吃惊的革新并没有解决前一章所列举的所有问题。对于引力如何将物体拉向地球,并维持行星在其轨道上,以及为什么在一给定地点质量和重量的比率总是恒定的,还没有给出解释。

爱因斯坦接下来试图将狭义相对论推广到这样的相对运动的参考系,其中一个相对于另一个作加速运动。1907年,爱因斯坦在考虑重力问题时意识到,引力质量和惯性质量不可区分,于是对于更一般理论的钥匙出现了。是什么促使科学家作出这样的区分?根据牛顿运动定律,当一定质量的物体需要改变方向或速度时, $F = ma$ 中的质量是惯性质量。譬如说,当击打桌上的台球使其运动时,这里涉及的质量是惯性质量。然而握住一个台球让其下落,它的下落却是因为地球的质量吸引台球的质量。在这一现象中,涉及的是引力质量(重量)。这两种质量是一样的吗?这个问题并没有烦扰牛顿,但是随着关于质量的全新问题出现,却使爱因斯坦不安。他断定引力质量和惯性质量是同一的,引力质量不过是全新的时空中的惯性质量。

为跟得上他的思路,我们首先考虑电梯中的一位乘客,而电梯因缆绳断掉而自由降落。乘客可以忽略引力,因为这种力没有对他作用。事实上,乘客对于电梯的地板没有压力,没有重量。在降落的电梯中,如果乘客掉了一块手帕或手表,它们下落,但是因为电梯也下落,因而它们就停留在开始下落的地方。在电梯内部,只有惯性质量能作用于物体。然而对于外部的观察者来说,有引力作用在电梯及其中的物体上。

更一般地说,在一个受均匀重力作用的参考系中所作的所有观测,与在一个均匀加速的参考系中完全一样,加速度和引力是等效的。这就是爱因斯坦的等效原理。换种说法就是,一个

在引力场中自由降落的观测者,与一个不受重力作用但以自由落体的加速度运动的观测者,有相同的经验。

受闵科夫斯基时空观的影响,加上他自己关于惯性质量和引力质量的思想,以及希望推广狭义相对论以适应一个参考系相对于另一个加速运动的情况,爱因斯坦采取了弯曲时空的观点。真实引力场的非均匀性不允许在大的范围内以单一的加速参考系来代替它。因而,他运用了黎曼和克利福德的思想(不过他可能并不知道后者):时空中物质的存在可以被整合到几何结构中去。

对于爱因斯坦的四维弯曲空间我们不能形成物理图像,但下面的类比可以给我们一点直感。考虑地球的形状。尽管为了许多目的将其看作球面就足够了,但它不是。有多山地区,有山谷,有深渊。在这样一个充满了其他东西的表面上,什么是短程线即最短路径?当然这随表面形状的不同而不同,在不同地区也不同。

爱因斯坦将等效原理整合到其广义相对论中。在这个数学时空中,任何物质都会使其周围的时空弯曲,结果所有自由运动的物体都遵循那个区域的相同的弯曲路径,即短程线。用古典力学的术语来说,物体加速是因为某种力如引力作用其上。然而在广义相对论中,加速度是由时空的性质造成的。从而对于所有惯性质量的效果是一样的,等效原理自然就满足了。

这样,爱因斯坦广义相对论的主要思想是,时空的几何结构将物质的存在考虑在内,从而就排除了引力(严格地说,时空中所有的物质包括运动物体都必须考虑在内,然而如果运动物体的质量很小,它对时空结构的参与很小,就可以忽略了。这也适用于行星)。行星和从太阳到达地球的光遵循的路径是由四维时空的结构强加的。这些物体和光,如果自由运动的话——即

不受任何力的作用——遵循的路径是时空的短程线，即最短路径，正如在牛顿力学中，光遵循最短路径，和其他不受（曾经归因于引力的）力的作用的物体一样。在局部上，广义相对性的时空是狭义相对性的时空；而在整体上，狭义相对性的结论被纳入广义相对论中。

以时空的几何学来解释先前当作引力现象的现象，也解决了另一个未曾解决的难题，即为什么在地球上或地球附近所有物体其重量与质量的比值都是常数。从物理意义上说，这一恒定比值是所有质量落向地球时的加速度，根据牛顿定律，这是由地球施加在质量上的引力造成的。因而，重量与质量的恒定比值意味着所有的物体在落向地球时都遵循同样的空间和时间行为。然而，根据爱因斯坦对于引力现象的重新表述，先前当作引力的东西成了地球附近的时空形状所造成的效果。根据修正的第一运动定律，所有自由降落的质量必须遵循时空的短程线。换句话说，所有的质量在地球附近应该显示出同样的空间和时间行为，确实如此。这样，通过剔除重量概念，对于先前归因于重量的效果提出一个更满意的解释，相对性理论解决了重量与质量的比值是常数这个难题。

爱因斯坦还面临着另一个难题。我们每个人都是时空中的一个观测者，每个人都会在自己的坐标系中表述时空定律。因而，为保证定律对于所有的观测者都是相同的，爱因斯坦希望这样来表述它们，使得当从一个观测者的坐标系变换到另一个坐标系时定律保持不变。这里爱因斯坦面对的是一个数学难题。他与其同事格尔奥格·皮克讨论他的困难，后者让他考虑由黎曼、埃尔文·布鲁诺·克里斯托佛、齐奥其欧·里齐-库巴斯托洛以及后者的著名学生图利奥·利维-齐维塔发展起来的张量分析(tensor analysis)。接着，爱因斯坦找到了苏黎世的另一个

同事,微分几何学家马赛尔·格劳曼(1878—1936),向他学习了张量分析。他和爱因斯坦在 1913 到 1914 年间合写了三篇文章。在几年时间内,爱因斯坦能够运用黎曼几何学和张量分析来表述广义相对性理论,并表明了如何将定律从一个坐标系变换到另一个。爱因斯坦承认他受惠于张量分析的创立者。在 1915 年他写了 4 篇文章论述相对论,关键性的一篇是 1915 年 11 月 25 日写的。这篇文章表明,通过张量分析,自然定律在所有数学上可接受的坐标系中都有同样的形式。

广义相对论在当时来说尤其奇特、激进,是什么促使数学物理学家接受它呢?

爱因斯坦基于其激进的理论,作了三项预言。行星的近日点是在其椭圆轨道中离太阳最近的点。根据牛顿力学,最内的一颗行星水星每年会改变其位置,偏离所观察到的位置的量大约是每百年 5 600 弧度秒(1 弧度秒等于 $1/3\,600$ 度)。其中大部分,大约每百年 5 000 弧度秒,是由于我们是从运动的地球上观察造成的。勒伟烈于 1856 年证明,部分的不一致,大约每百年 531 弧度秒,是由其他行星的引力造成的。剩下的不一致没有得到成功的解释,直到爱因斯坦用其广义相对论解释了它。这些数据是近似的,因为自 1915 年的预言以来又有了许多新的观测。此外,任何计算都是复杂的,因为一个运动的行星增加了时空的弯曲。

爱因斯坦还预言恒星发来的光经过太阳时会发生偏移。至于光的弯曲(曾假定光有质量),曾被认为是引力场(在这种情况下是太阳的引力)的作用。科学家曾预计擦过太阳的光线的偏移是 0.87 弧度秒。而爱因斯坦的预言是 1.75 弧度秒。这个数据由 1919 年日食期间所作的观察所证实。通过将 5 个月之前所拍的恒星照片(当恒星处于远离太阳的夜空中时)与日食期间

所拍照片的比较,阿瑟·斯丹利·爱丁顿能够证明星光的偏移量与爱因斯坦的预言一致(见图 37)。爱丁顿的成果是相对论发表不久作出的,因而对于爱因斯坦思想之接受作出了最大的贡献。

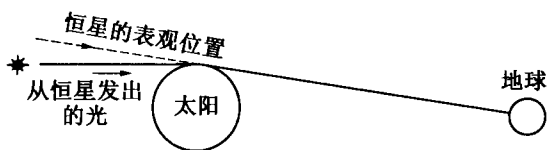


图 37

爱因斯坦还预言了第三个现象。一般地说,原子尤其是加热气体中的原子,发射出几种或多种频率的光。爱因斯坦的预言是,原子发出的光在太阳场的不同部分,会比同样的原子在地球上发出的光振动快或者慢。振动频率的变化会由地球上所接收到的光的颜色变化在物理上表现出来。太阳附近的原子对于我们地球上的观测者来说会显得更红些,即光的波长红移。这种红移也观察到了。

鉴于这些实验证据,看来爱因斯坦的广义相对论已充分证实了。爱因斯坦的理论包含了牛顿理论,作为一级近似,这是一个证实。然而,还有表面看来无足轻重的一点。我们所描述的实验所起作用甚小,甚至在其狭义和广义相对论受到检验之前爱因斯坦就确信他是正确的。

如今,狭义和广义相对论不仅仅是我们的科学知识中不可或缺的重要组成部分;对于所涉及的现象,它们提供了我们关于物理世界所能拥有的最好的知识。我们应该接受它们吗?具体说来,我们应该接受这种观点:事件的同时性、空间和时间间隔取决于由谁来观测这些量?在过去人们会对于这些问题不予理会,因为两个观测者之间任何明显可观的差异取决于一个相对

于另一个作高速运动。现在我们既然已送人登月并将宇宙飞船发向土星和海王星,而且太空旅行必将扩展,我们不再是与低速打交道了。

尽管对于相对论有令人吃惊的戏剧性的证实,许多人还是觉得其四维非欧几何宇宙完全不合口味。没人能够构造出四维非欧几何世界的形象,但是坚持将现在科学和数学所运用的概念形象化的人还处于其理智发展的中世纪。几乎自关于数的研究开始,数学家就已进行独立于感官经验的代数推理。今天,他们有意地构造仅存于人类头脑中的几何学,从来就没打算将其形象化。当然,也没有完全抛弃与感官经验的接触。要使逻辑结构对科学有用,几何学和代数思考对于物理世界所作出的预言必须与观测和实验一致。然而,坚持推理链(甚至是几何学推理)中的每一步都应该对于感官有意义,那就等于剥夺了数学和物理学两千年的发展。

我们应该回想一下,人们对于地球是球形的这样的事实是如何反应的,后来对于地球绕日运动这个事实又是如何反应的。我们的知觉当然不与这些事实一致。这样,对于时间、同时性、空间和质量的相对性概念就更容易接受了。相对论告诫我们,不应将只是在某个参考系中成立的表面现象当作任何意义上的绝对真理。像在其他物理领域中一样,在这里数学定律告诉我们什么是真理、什么是客观实在。大自然不怎么关心我们的感官印象。她继续自己的进程而不管我们是否在场。

相对论所提出的空间和时间的合一以及物质对于时空的影响,这些思想对于 20 世纪早期的哲学家来说是怪异的,但现在却成为越来越广泛地接受的自然哲学的组成部分。大自然作为一个有机的整体向我们呈现其自身,空间、时间和物质浑然一体。在过去人类曾经分解大自然,选取某些他们认为最重要的

性质,将其看作完全独立的实体,而忘了这只是从整体中抽象出的侧面。现在获知必须结合这些假设分离的概念以得到对于知识的一贯、满意的综合,人们却感到意外。

亚里士多德首先明确表述了这样的哲学信条:空间、时间和物质是经验的有区别的组成部分。随后科学家们采纳了这种观点,并为牛顿所运用。我们追随牛顿,已如此习惯于将空间和时间看作物理世界中与物质分离的基础性的独特组成部分,而不再将这种观点看成是人为的、只是诸多可能的观点中的一种。当然,当代的哲学家,其中包括已过世的阿尔弗雷德·诺斯·怀特海,并不认为对于大自然的这种分析是无用的。相反,结果证明它相当有价值甚至是不可或缺的。不过我们应该意识到,它是人为的。我们不应错将我们的分析当作自然本身,正如我们不该将通过解剖人体观察到的器官当作活的身体本身。

现在可以理解科学是在何等程度上被数学化成几何学的形式。自欧几里得的时代以来,物理空间的定律不过是欧氏几何的定理。然后,黑帕库斯、托勒密、哥白尼和开普勒以几何学概括了天体的运动。伽利略利用望远镜扩展了几何学的应用,用于无限的空间和许多百万的天体。当罗巴切夫斯基、波尔约和黎曼向我们展现如何构造不同的几何学世界后,爱因斯坦抓住了这一思想,以将我们的物理世界纳入到四维的数学世界中。从而引力、时间、物质,和空间一起,成了不过是几何结构的组成部分。这样,“根据几何学性质能最好地理解实在”这一古典时期的希腊信念,以及“物质和运动可以根据空间的几何结构来解释”这一文艺复兴时期的笛卡儿信条,获得了全面的肯定。