

黑洞(1)

约翰—皮尔·卢米涅 著

伊犁人民出版社

黑洞(1)

作者:约翰——皮尔·卢米涅

出版社:伊犁人民出版社

书号:ISBN 7 - 5425 - 4047 - 7

版权所有:北京烨子工作室

类别:通俗读物

出版时间:2004 - 6 - 1

字数:23 万

内容提要:古希腊哲学家在许多领域的天才思想至今仍未被超越,但他们对弓力却所知甚少。亚里士多德(Aristotle)相信每个物体都有其宇宙中的“自然位置”。最底层是陆地及其所有的直接附着物,在这上面是水,然后是空气,最后是最轻的元素火。一个因受力而离开其自然位置的物体总是要返回它自己的层次,因此,被抛射到空气中的箭或石块总是会落回地面。亚里士多德还进一步断言,物体的运动都沿直线进行,由弓射出的箭将沿直线向上运动,当弓所提供的力停止作用时,箭就又沿直线落回地面。在20个世纪里几乎没有人对古希腊哲学家的理论表示过怀疑,尽管日常生活提供了反面的证据:箭的运动轨迹并不是一条直线,而是一条曲线即抛物线。只有一个人,即6世纪时生活在亚历山大城的约翰·菲罗帕纳斯(John Philoponus),敢于提出惯性原理,向亚里士多德的思想挑战。

黑 洞

作者：约翰·皮尔·卢米涅

第一篇：引力与光

理论研究就像钓鱼：你不知道水中有什么，只有投竿，才可能有所收获。
——瓦尔(Novalis)

第一章 首批硕果

最幸运的人

一只小鸟的重量足以移动地球。

——列奥那多·达芬奇(Leonardo da Vinci)

古希腊哲学家在许多领域的天才思想至今仍未被超越，但他们对弓力却所知甚少。亚里士多德(Aristotle)相信每个物体都有其宇宙中的“自然位置”。最底层是陆地及其所有的直接附着物，在这上面是水，然后是空气，最后是最轻的元素火。一个因受力而离开其自然位置的物体总是要返回它自己的层次，因此，被抛射到空气中的箭或石块总是会落回地面。亚里士多德还进一步断言，物体的运动都沿直线进行，由弓射出的箭将沿直线向上运动，当弓所提供的力停止作用时，箭就又沿直线落回地面。在20个世纪里几乎没有人对古希腊哲学家的理论表示过怀疑，尽管日常生活提供了反面的证据：箭的运动轨迹并不是一条直线，而是一条曲线即抛物线。只有一个人，即6世纪时生活在亚历山大城的约翰·菲罗帕纳斯(John Philoponus)，敢于提出惯性原理，向亚里士多德的思想挑战。

伽利略(Galileo)是对引力进行严格的科学考察的第一人。他做了一系列实验，包括让各种不同的物体从比萨斜塔上落下以及让不同大小的球沿

斜面滚下。1638年,他发现了引力的最基本的性质:在其作用下的所有物体都得到同样的加速,与物体的质量或化学成分无关。

伽利略的工作以其对物理现象的仔细观察和深刻的科学推理而著称。他的结果显然与亚里士多德对世界的认识相反。在研究一个物理现象时,我们必须分离出所有那些使我们的日常经验复杂化的外部因素。为了从对在空气中下落的物体的观察而推导出支配真空中物体自由下落的普遍规律,伽利略必须首先理解摩擦力和空气阻力,因为正是这些与物体的大小和质量有关的“寄生”效应掩盖了引力的真正作用(如果像某些历史学家所认为的那样,伽利略事实上并没有从比萨斜塔上抛出物体,那么他由一连串的抽象推理而得出自己理论的能力应当受到更高的赞誉)。

直觉的天才有分析的天才为后继。按照广泛流传的说法,1666年的一个满月之夜,当一只苹果从树上落下时,伊萨克·牛顿(Isaac Newton)正坐在那棵树下沉思。他突然意识到,由于同一种吸引的力量即地球引力,月亮和苹果都会朝地球下落。他计算出,两个物体之间的引力随它们距离的平方反比例减小,距离加倍,则引力减小4倍。月亮与地心的距离(384000公里)是苹果与地心距离(6400公里)的60倍,故月亮下落的加速度比苹果小 $60 \times 60 = 3600$ 倍。然后他运用伽利略的自由落体定律,即下落距离正比于加速度,也正比于时间的平方,于是得出苹果在1秒钟内下落的距离与月亮在1分钟内下落的距离相等。月亮的真实运动是已知的,牛顿所估计的距离与之相符。他所发现的正是万有引力定律。

牛顿的工作(当然远不止是他的引力理论)是人类智慧最辉煌的业绩,对当时和后世的思想都有巨大的影响。一个世纪后,法国的“黑洞之父”皮尔·西蒙·拉普拉斯(Pierre-Simon Laplace)认识到了牛顿的著作《自然哲学的数学原理》那种“胜过人类其他精神成果的卓越预示”。数学家约瑟夫·拉格朗日(Joseph Lagrange)则更进一步说道:“由于只有一个宇宙需要去解释,没有人再能重复牛顿所做的工作,他真是最幸运的人。”建立一个科学理论不一定会导致个人的快乐,但是的确没有任何其他科学工作具有牛顿理论那样根本的重要性,直至我们的时空观念被阿尔伯特·爱因斯坦(Albert Einstein)所彻底改变。

行星的爱好

牛顿理论最令人瞩目的应用是在天体力学中。牛顿运用了他的万有引力定律(“万有”意味着一切物体都受引力支配)去解释开普勒(Kepler)描述“行星对太阳的爱好”的经验规律。有了这个惊人精确的理论工具,科学家们兴奋地揭示出一个新的太阳系。

新力学的第一个成功是爱德蒙·哈雷(Edmund Halley)预言了一颗彗星(后来即以他的名字命名)将于1759年回归,这颗彗星果然在1758年的圣诞节重现。

牛顿理论还表明,开普勒对行星运动的描述只是近似的。如果一颗行星只被太阳吸引,其轨道将是一个完美的椭圆,但实际上每颗行星都受到其他行星引力的扰动(尤其是被木星扰动,它比其他行星都大得多),由此导致的轨道偏差虽然很小,却可以计算也可以观测。埃班·勒维叶(Urbain Le Verrier)和约翰·亚当斯(John Adams)正是运用“扰动理论”于1846年预言了海王星的存在及其精确位置。这颗新行星果然在他们计算的位置上被发现,标志着牛顿引力理论的高峰。

不可见世界的两位先知

天空中存在着黑暗的天体,像恒星那样大,或许也像恒星那样多。一个具有与地球同样的密度而直径为太阳250倍的明亮星球,它发射的光将被它自身的引力拉住而不能被我们接收。正是由于这个道理,宇宙中最明亮的天体很可能却是看不见的。

——皮尔·西蒙·拉普拉斯(1796)

18世纪末,约翰·米切尔(John Michell)牧师和皮尔·西蒙·拉普拉斯把光速有限的认识与牛顿的逃逸速度概念结合起来,从而发现了引力的最富魅力的结果:黑洞。

逃逸速度的概念是人们很熟悉的。一个人无论用多大力向空中扔出石块,石块终将落回地面,这使人感到引力似乎不可抗拒。然而,我们还是要问,引力能够对物质束缚到什么程度?如果不是由地球上而是由火星的一颗小卫星上如说火星抛出石块,情形就完全不同。火卫一的引力是如此之小,一个人的臂力就足以把石块抛到绕它运转的轨道上,甚至可以把石块抛到围绕火星的轨道上,而火卫一距离火星约有四百公里。

让我们仍回到地球上。地球的引力可以由一个很深而开口处很宽的

势附来表示。抛射物体只有速度足够高才能逃离地球。为了把一颗卫星送入轨道,火箭发射器必须到达一定的高度,然后转到与地面平行的方向,再加速到至少每秒 8 公里的速度,这个速度所对应的离心力(朝向外空)才能与引力(朝向他心)相平衡。

有一种叫做一飞车走壁的危险表演,摩托车手驾车在陡峭的斜壁上奔驰。随着车速增大,车子也沿着斜壁升高。一颗轨道上的卫星很像这里的飞车,它也在引力势队的壁上运转。

如果摩托车手进一步把车速增大到另一个临界值以上,他就会飞出斜壁。同样,如果火箭的速度足够大,它也能摆脱地球的吸引。这个临界速度对一块石头或一枚火箭来说都是一样的,它就叫逃逸速度。就地球而言,它是 11.2 公里/秒,对其他任何一个行星、恒星或别的天体,也很容易算出其大小。这个速度只取决于那个提供引力的星球的性质,而与被抛射的物体无关。星球的质量越大,逃逸速度也越大;质量一定时,逃逸速度则随星球半径的减小而增大。

这就是说,一个星球的密度越大也就是越致密,它的引力干脆就越深,要逃脱它的束缚显然就越困难。火卫一的逃逸速度只有 5 米/秒,月亮的是 24 公里/秒,而太阳的是 620 公里/秒。对于更致密的星球,例如白矮星(见第 5 章),这个速度高达每秒数千公里。

关于黑洞的思想正是来自于把简单的逃逸速度概念推向极端。自 16 年奥拉斯·雷默(Olas Roemer)对木星卫星的运动进行观测以来,已经知道光的速度大约是 3

0 公里/秒。于是就很容易想象出这样一种星球的存在,其质量是如此之六,以至于从其表面逃逸的速度大于光速。

约翰·米切尔在一篇于 1783 年的英国皇家学会会议上宣读并随后发表在《哲学学报》(Philosophical Transactions)的论文中写道:“如果一个星球的密度与太阳相同而半径为太阳的 500 倍,那么一个从很高处朝该星球下落的物体到达星球表面时的速度将超过光速。所以,假定光也像其他物体一样被与惯性力成正比的力所吸导,所有从这个星球发射的光将被星球自身的引力拉回来。”此后不久,数学家、天文学家、天体力学王于皮尔·西蒙·拉普拉斯于 1796 年在他的《宇宙体系论》(ExPosition dusystemedu

mond...中也作了类似的陈述。

除了超前一个多世纪料想到光能被引力捕获外,拉普拉斯和米切尔还猜想到巨大的暗天体可能像恒星一样众多。在 20 世纪末,这科学巨变的时期,暗物质的存在正是宇宙学中最重要课题之一。宇宙总质量的相当大一部分很可能是看不见的。

对这些不可见星球(直到 1783 年才命名为“黑洞”)的详细研究需要一种比牛顿理论更精确的引力理论。爱因斯坦的广义相对论预言了黑洞的存在,其“大小”恰与米切尔和拉普拉斯猜想的一样。

但是,严格说来,这两个理论在不可见星球的大小上的一致只是表面上的。按照牛顿理论,即使逃逸速度远大于 3

0 公里/秒,光仍然可以从星球表面射出到一定高度,然后再返回(正如我们总能把一只球从地面往上抛出)。而在广义相对论里来讲逃逸速度就是不正确的了,因为光根本不可能离开黑洞表面。黑洞的表面就像一只由光线织成的网,光线贴着表面环绕运行,但决不能逃出来、在第 11 章里还将看到,如果黑洞在自转,则捕获光的那个面与黑洞自身的表面是不相同的借助于逃逸速度来描述黑洞。虽然有有索要的历史价值和启发作用,却是过于简单了。

直至广义相对论建立为止,米切尔和拉普拉斯的思想被人们完全遗忘了。这一方面是因为没有什么迹象表明宇宙中存在如此致密的物质(当然,不可见性本身是一个好理由);另一方面,他们的思想是建立在牛顿关于光本性的微粒说基础上的,即光微粒也像通常物质一样服从引力定律。而在整个 19 世纪,光的波动说占据了统治地位。按照这种理论,光是一种振动在媒质中的传播,光波是不受引力影响的,米切尔和拉普拉斯的思想因而失效。

力场

行星的运动之所以能被计算出来,是因为我们知道物体之间的相互吸引力与它们的质量成正比,与距离的平方成反比。然而这里有许多更深刻的问题尚未回答,比如引力的本质,它如何由物质产生,又如何作用到被真空隔离的物体上。

牛顿的引力不像马拉车的力或农夫用铁锹翻地的力那样,通过直接接

触来传递。一个物体产生的引力能作用到远处的另一物体。这种不需要媒质而瞬时作用的力的概念,是雷纳·笛卡儿(Ren6Descartes)于1644年在其《哲学原理》(Principes delaphilosophie)中所阐述的,并难以被机械宇宙观所接受。牛顿本人是一个忠实的机械论者,他把自己的定律看作只是一种能计算物体运动的数学工具,而不是一种物理真实。他曾说过,想象引力能瞬时地和超距地作用是荒谬的,是没有一个真正的哲学家能接受的。拉普拉斯曾试图通过考虑引力以有限速度传播来修改牛顿理论,他的推理在原则上是正确的(自爱因斯坦以后,我们知道引力是以光速传播),但在实际上是错误的:他算出引力的传播速度必定是光速的700万倍。

19世纪,同样的超距作用问题重新出现在研究电的学者面前。与引力相似,两个物体间的电力也与它们电荷的乘积成正比(力是与两物体质量的乘积成正比),与它们距离的平方成反比。但是,尽管物理学家最后还是接受了(没有更好的办法)引力的超距作用,他们却拒不接受电力也是如此。

于是,迈克尔·法拉第(Michael Farada力和詹姆斯·克拉克·麦克斯韦(JamesClerk Maxwell)提出了场的概念。场能够作为物体间相互作用的媒介,并以有限速度传播。不是两个电荷在真空中通过瞬时力相互吸引或排斥,而是每一个电荷都在其周围产生一个“电场”,其强度随距离增大而减小。每个电荷所受的力都归结为两个场的相互作用。那末,引力也能以同样方式来描述:一个物体产生的引力场作用于所有其他物体。

这决不只是一种描述词语的简单改变。场的根本优越性在于,它把瞬时超距作用代之以需要时间来传播并随空间距离增大而减弱的作用。场论,这经典物理的光辉顶峰,看似毁坏了牛顿物理的根基,实则开辟了通向电磁学,然后是相对论的道路。

麦克斯韦的光

在19世纪末,物质间的作用力被分为三类:引力、电力和磁力。

电的特征是存在正、负两种电荷,同种电荷相互排斥而异种电荷相互吸引,作用强度随距离变化的关系则与磁力一样。磁力是磁体的特性,磁体吸引铁,并指向地球两极的方向。每个磁体都有两个极,即北极和南极,同种磁极排斥而异种磁极吸引。

在吸导内排斥的行为上,电和磁看来很相似。古希腊人已经觉察到与

毛皮摩擦过的流油能吸引碎草片(英文中电一词就是来自希腊文中琉璃一词),天然磁矿石能吸引铁屑。公元前6世纪,希腊大几何学家泰勒斯(Thales)认为,电和磁是同一种现象,这些奇特的物质含有吮吸周围物体的“精灵”。

24个世纪以后,丹麦物理学家克里斯琴·奥斯特(Christianoersted)在上一堂电流实验课时,一根磁针碰巧正放在他的装置近旁。他注意到,每当接通电流时,磁针就发生偏转。这个发现之后几个星期,安德烈·安培(Andre-martinandampere)和弗兰克·阿拉果(Francois Arago...)提出了一个理论,即变化的电力产生感应磁力,反之亦然。随后的实验工作充分地证实了电和磁现象之间的密切关系。

然而,电理论只是在1898年发现了电子后才得到真正验证。这种作为原子基本成分之一的基本粒子,带有不可再分的电荷,因而作为电荷的基本单位。通常的原子是电中性的,因为原子核外电子的负电荷被束缚在核中的正电荷所抵消。电荷可以静止,也可以运动,例如金属导体中的自由电子可以到处运动。正是电行在电场作用下的运动形成了电流。

类似地,天然磁石的磁性是由其分子之间的微型电流所导致的。在大得多的尺度上,地球的磁场也是由其转动着的镍...次核中电导物质的大规模运动产生的。电与磁的真正统一是在1865年,麦克斯韦把它们的所有性质概括在麦克斯韦方程中,建立起了电磁场理论。

一个静止电行具有不随时间变化的径向电场。当电荷运动时,其周围电场会自己调节到新的位置,场的变动以一个有限速度即光速传播。电荷的任何移动都使场发生这种变动,特别有意义的是,如果电行作用周期性运动,则场的变动取波的形式,恰如一根棒子在水里上下搅动时会造成环形水波。麦克斯韦预言,电行的周期性运动将产生以光速在真空中传播的电磁波。

一个正常峰谷形式的波,两个相邻波峰之间的距离叫做波长,每秒时间内波峰的个数叫频率。人眼能看见的光只是电磁波谱中很小的一部分,即一个很窄的波段。显然,波长越大,频率越小,两者成反比关系。

观测和理论天文学都建立在电磁辐射的性质的基础上。携带着能量和动量(频率越高,携带得越多)的电磁波对与之遭遇的物质施加一个力。例

如,照射到这页书上的光在加热着和推着书纸,太阳发出的电磁风能把彗星的尾巴吹得背离它,恒星核心的辐射压能阻止恒星因自身引力而收缩。

电磁理论的影响像万有引力定律一样巨大,它在理论上和实践上都给整个人类文明带来了意义深远的结果。麦克斯韦死后 8 年即 1887 年,亨利希·赫兹(Heinrich Herzi)在实验室成功地造出了电磁波。20 世纪初,古列莫·马可尼(GugllelmoMarconi)第一次实现了跨越大西洋的无线电联系,电讯时代从此开始。

第二章 相对论

波动说的疑难

麦克斯韦的理论统一了电和磁,看似简化了物理学,实则使问题更为复杂,因为它使伽利略和牛顿的宇宙图像孩起祸端、通过对电磁场的仔细的理论 and 实验研究,立即提出了两个简单的问题,这两个问题最终导致了 20 世纪的两大理论物理成果;量子力学和相对论。

第一个问题是,辐射的本质究竟是什么?麦克斯韦的理论把电磁辐射纯粹作为波来处理,但是辐射可转移能量和动量的能力强烈地显示出其粒子性。到 19 世纪末,已有一系列实验提供了辐射的不连续性的证据。

在两个世纪之交,马克斯·普朗克(Max Planck)提出了一个假设,即电磁波(尤其是光)只能以一种能量包,即所谓量子的形式被发射或吸收。然而直到 1905 年,爱因斯坦才首先把光量子看作真实的存在,现在称为光子。为解释光电效应,也就是金属板被足够高频率的光照射时发出电子的现象,爱因斯坦假定辐射足由其能量与频率成正比的真实粒子组成,这些粒子把能量传给金属中的电子,从而使电子射出。爱因斯坦复活了牛顿的光的微粒论,这个理论曾被拉普拉斯用来推测巨大的暗星球对光的捕获。力学与电磁学之间的明显对立直至对年后,即量子力学指出所有物质和辐射都具有波粒二象性时,才得以消除。

第二个问题是,电磁波在什么媒质中传播?正是这个问题导致了对时空结构的探索,从而产生了相对论。

运动与静止

相对论,这一在 20 世纪物理学里居于中心地位的辉煌成就,其思想并非由爱因斯坦首创。相对性原理作为物理定律的基础已有 3 个世纪之久,这通常归功于伽利略,而实际上给出正确表述的是笛卡儿。

在对自然界的研究中运用相对性原理,意味着可以合理地期望对物理现象的表述不依赖于观测者的位置和运动。如果各个观测者得到的物理定律具有同样形式,他们所取的参考系就是等价的。

伽利略已经注意到这样两个人所作的观测的等价性:一个在一条停靠港口即相对于陆地静止的船里,另一个在一条沿直线匀速驶离港口的船里,每人都从舱里 1 米高处释放一只球,则两球都竖直下落,经历的时间都是 0.45 秒。

伽利略知道,由于地球是圆的,驶离港口的船在作圆周运动。受圆形为完美的古老思想影响,他因此断定圆周运动是物体的自然状态,与静止不可区分。笛卡儿也认识到,均匀运动,即无限直线上的匀速运动,与静止不可区分。现代人都有这样的体验,坐在停着的火车里看旁边一列开动的火车,会觉得自己的车在朝相反方向开动。

这些现象都很简单,然而包含着深刻意义,因为它们表明静止与匀速运动之间并无差别。静止是一种惯性状态,与之等价的匀速运动也就是惯性态。

惯性原理可以表述如下:一个自由物体,即不受任何力的物体,以恒定速度运动。

地球本身几乎是一个理想的惯性参考系,因为对于通常实验室里时间不长的实验来说,地球绕太阳的转动可以近似看作以 30 公里/秒的恒定速度沿直线运动。考虑到地球的自转,可以通过选定指向遥远恒星的方向来建立地球惯性系。

射手与火车

惯性原理给予匀速运动的参考系以优越地位,这些参考系中的自然规律表现为“静止”的形式。伽利略相对论,以及后来爱因斯坦的狭义相对论,都建立在所有惯性系(包括静止参考系和匀速运动参考系)是等价的这个基础上。

但是,仅仅确定惯性系的这种性质是不够的。有了一个惯性系中对某

—自然现象的描述,物理学家还必须能在任何别的惯性系中也作出描述,他们需要的是从一个惯性系转换到另一个的具体方式。正是在这个关键点上区分了伽利略相对论和狭义相对论。

爱因斯坦喜爱的表述这些抽象概念的方式是拿一列以 $v = 108$ 公里/小时(对米/秒)的恒定速度奔驰的火车作例子。现在有两个惯性系,静止的铁轨和相对于铁轨作匀速运动的火车。设想有一个坐在车厢顶上的人朝火车前进方向射出一颗子弹,子弹相对于人的速度是 $v' = 2800$ 米/秒。

运用伽利略变换公式从火车惯性系转换到铁轨惯性系,铁轨上的观测者测得的子弹速度是 $v' + v = 830$ 米/秒。如果这个人再朝相反方向打一枪,则从铁轨上测量的子弹速度是 $v' - v = 770$ 米/秒。与人们的常识一致,伽利略变换公式可以归结为简单的速度矢量合成。

以太

以太,这个经典力学的不幸产儿……

——马克斯·普朗克

如果所有恒速运动的参考系都与静止参考系等价,设想一个固定在欧几里德几何的绝对空间里的参考系是很有吸引力的。对伽利略来说,这个绝对空间缚在太阳上,因为太阳是宇宙的中心。牛顿则认为,绝对空间是以太,是亚里士多德的(气、水、火、土以外的)第五要素,是一种弥漫于物体之间所有空隙的完全刚性的物质。

电磁理论的建立似乎支持了关于以太的思想。很难想象一个波能够没有媒质而传播:声波要有空气,水波要有水。光作为电场和磁场的一种振荡,也就必然需要一种振动的媒质使之得以传播,于是可以把以太定义为电磁波传播的媒质。

再来看火车上的射手。这回他用一支光枪,射出速度为 30 公里/秒的光弹。按照伽利略变换公式,铁轨上的观测者测得的光速应分别是 $C + v$ 和 $C - v$ 公里/秒(朝火车前进方向发射时)和 $C - v = 29999997$ 公里/秒(朝相反方向发射时)。迈克尔逊(Michelson)和莫雷(Morley)力的实验,以地球来代替火车,以太来代替铁轨,证明了以上的推算是错误的。

判决性实验

这些著名的实验是阿尔伯特·迈克尔逊(Albert Michelson)和爱德华

· 莫雷(Edward Money)在 1881 到 1894 年之间做的。他们本来的意图是确定地球相对于以太的绝对速度,为此制作了一台非常灵敏的干涉仪,用来测量沿地球运动方向和垂直方向上的两束光之间的差异。他们预期能由此将地球的绝对运动测定到每秒几千公里的精确度。

迈克尔逊莫雷实验的原理可以用两条船的竞赛来比喻。两船的速度都是 C ,河水以恒定速度 C 流动(图 1)。A 船沿与水流平行的路线行驶一个来回,B 船则由河的此岸驶到彼岸,然后返回。每条船行驶的距离都是河宽的二倍。按照毕达哥拉斯定理,B 船将获胜。

在迈克尔逊莫雷实验里, c 是光速, v 是以太相对于地球的速度,但是比赛结果却不同:两条“光子船”总是准确地同时到达。要弄懂这个结果,要么得设想地球是完全静止在以太中,要么以太根本就不存在。

事后看来,如果我们严格遵照电磁理论,迈克尔逊和莫雷的结果并不奇怪。麦克斯韦理论是与伽利略的相对性原理明显矛盾的,因为其中的光速是不变的,完全与参考系无关。无论光弹沿什么方向,铁轨上的观测者测得的光弹速度既不是 3

0.03 公里/秒也不是 299999.97 公里/秒,而精确地是 3

0 公里/秒。光速在任何方向上、在任何参考系里都是完全一样的。

伽利略相对论曾被认为是对惯性系中自然定律普适性的表述,而支配电磁现象的麦克斯韦方程公然与之对抗。伽利略—牛顿的时空概念与电磁理论是不相容的,其中一个必须被抛弃。

狭义相对论

当爱因斯坦在 1905 年意识到这个矛盾时,他立即认定电磁理论是正确的,并作为一条基本原理提出:真空中的光速是绝对不变的,是信号传播的最高速度。与这条原理不相容的伽利略相对论不得不让位于一个新的相对论,后来被称为狭义相对论(广义相对论的建立是在十年以后)。

伽利略相对论中从一个惯性系到另一个惯性系的变换公式也就必须代之以狭义相对论的公式(在广义相对论里惯性系的实质将被改变),这就是罗伦兹(Lorentz)变换。这种变换使麦克斯韦方程保持不变,光速也成为绝对常量。

对火车射手实验,伽利略的速度和公式 $v = v + v'$ 被换成一个稍微复杂

一些、保证光速不变的公式。如果 $C = C' \sqrt{1 - v^2/c^2}$, 由新的公式将得出 C 仍等于 C 。这个结果似乎与读者的常识相违背, 难道铁轨上的观测者不正是如伽利略变换得出的那样, 测量到 830 米/秒和 770 米/秒吗? 然而, 实际上这里并无矛盾, 因为只有对极高速度(远高于地球上常见的物体运动速度)的情况, 罗伦兹变换才与伽利略变换有显著的差别。即使是对地球绕日公转运动(速度高达对公里/秒), 罗伦兹变换公式带来的修正也只有万分之一。

理论的诞生

在本世纪的开端, 相当多的物理学家都意识到了迈克尔逊-莫雷实验给物理学带来的危机, 强调这一点无损于爱因斯坦的功绩。有些学者, 例如亨德里克·罗伦兹(Hendrik Lorentz)和亨利·彭加勒(Henri Poincaré), 对这场危机的洞察尤为深刻。罗伦兹首先提出(1904年)时间和长度都随参考系速度的变化而变化。1905年, 彭加勒在他的论文“论电子的动力学”中引入了一个数学式, 后来由赫曼·明可夫斯基(Hermann Minkowski)于1908年发展完善, 其中把时间作为第四个维度。新的相对论的确已如躁动在母腹中的婴儿。

彭加勒的论文发表后一个月, 爱因斯坦的“论运动物体的电动力学”在德国的《物理学杂志》(Annalen der Physik)上发表。当时在伯尔尼专利局供职的爱因斯坦看来并不知道他的前辈们的工作。狭义相对论之终于诞生, 是因为爱因斯坦并不满足于只推导公式, 他构造出了一个由光编织成的新时空。

光使时空联姻

我向你们阐述的时间和空间的观念是建立在实验物理基础上的, 是实质性的, 是牢固可靠的。从现在起, 绝对的空间和绝对的时间都不复存在, 只有二者的某种结合才有意义。

——曼·明可夫斯基(1908)

在伽利略和牛顿的宇宙里, 时间和空间是相互完拳种方的。空间有三个维度, 就是说, 需要三个坐标来确定空间中的一个点。空间是由欧几里德几何来量度的(几何一词的原义是“大地测量”)。两点之间的最短路线是连接它们的直线, 两条平行线只在无穷远处相交, 三角形的内角和是 180 等等。这些定律在学校里被讲授着, 因为它们在日常生活中高度精确地成立,

两点之间的空间距离总是与测量者无关。

时间只由一个数来量度。与空间维度不同的是,它总是只朝一个方向流驶,从“过去”流向“未来”。由观察上和情理上都可确认,一个事件的原因总是在其结果之前,这种不可逆转的次序称为因果律。

时间与空间一样,对所有观测者都是相同的。既然速度没有上限,所有的钟,无论它们之间的空间距离有多远,都能被即时地调为同步,并继续保持指示出一致的时间。因此,伽利略-牛顿时空的因果结构就归结为,一个在空间同时地延展的现在时间,把过去和将来分离开来。

把时间和空间作为独立实体的观念遭到与牛顿同时代的数学家和哲学家威尔赫姆·莱布尼兹(Wilhelm Leibniz)的强烈反对。他以哲学论据坚持时间和空间只能是联系于物质而存在。两个世纪后,爱因斯坦的相对论证实了莱布尼兹的观点,时间间隔和空间距离都不再是固定的量,它们依赖于观测者与被观测物体之间的相对速度。伽利略-牛顿的绝对时空结构让位于一种新的四维结构,即明可夫斯基时空。

时空中的一个点是一个事件,由三个空间坐标和一个时间坐标来确定。两个事件间的间隔是不变量(即不依赖于参考系),但现在是由时间间隔和空间间隔的结合,每一个都不再单独守恒。

本书将频繁使用的一种能清晰地表述时空结构的方式是光锥。想象空间中的一个点和一条由该点发射的光线,在一个没有任何物质的空间,光波的波前是一个以发射点为中心的圆球,这个球以光速随时间膨胀(图阿)。仍略去空间的一维,光波就能由该图表示。随时间膨胀的光球在图中成为一个圆锥,其顶点是光所发出的位置和时刻(即一个事件),光锥描述光线发出后的经历。

图5是另一幅时空图,显示几个事件的光锥。对某一给定事件E,光锥由两片组成,一片属于过去,一片属于将来。所有由E发出的光线和过去发射并经过E点的光线都进入E的将来锥。

狭义相对论的基本出发点是任何粒子都不可能运动得比光更快,光速是一个绝对恒星。这就是说,1秒钟内任何粒子走过的距离不可能大于3

0公里,而光则精确地走过这个距离。在时空图上是这样来显示的,所有粒子的世界线(用以称呼时空轨迹的名词)都位于光锥内部,而作为极限

的光子(光的粒子)世界线则严格地座落在光锥面上,因为光锥正是由光线来规定的。

在明可夫斯基时空里,光速是信号传递的极限速度,这使得其因果结构与牛顿时空的大不相同。对某一事件 E 光锥把所有的时空事件分成两种:能够被来自 E 的电磁信号所影响的事件(光锥内部)和不可能被影响的事件(光锥外部,或称“外界”)。狭义相对论禁止任何一条世界线从光锥内穿到外界,也禁止反向穿越(这并不排除完全处于外界区的世界线。有人假设了一种在外界区以超光速运动的粒子,称为“快于”,但是关于这种粒子的理论有许多棘手的问题,在实验室里也从来没有探测到其存在)。

总之,光线的轨迹使我们能够构造出一个时空连续体的框架。狭义相对论中没有引力,所有的光锥都是相互平行的,因此,明可夫斯基的时空连续体是刚性的,或者说是平直的。伽利略和牛顿的时空分离的观念被统一的时空观念代替了。

时间游戏

爱因斯坦相对论给因果律加进了时间弹性,一个观测者随身携带的钟测量的时间称为原时,与相对观测者运动的钟所测量的时间是不同的。尽管这种差别只是在速度接近于光速时才变得显著,这个新的时间律还是带来了令人惊讶的后果。

著名的双生子佯谬已被谈得很多了。年龄为 20 岁的双生子,其中一个去作探索宇宙的旅行,他以 297000 公里/秒的恒定速度(光速的 99%)飞到一个 20 光年之遥的行星上,并立即返回。他携带的钟表明自己出门在外 6 年,但留在地球上的那一个却说已过去了 40 年。他们二人所经历的时间确实是不同的,生物钟也像原子钟一样会受影响。两兄弟的年龄也可以用他们心跳的次数来测量,宇航员回来时确实只有 26 岁,而他的同胞兄弟已是 60 岁。

这个惊人的结果由法国物理学家泡尔·郎之万(Paul Langevin)于 1911 年作了解释:在所有连结两个事件(在双生子故事中是飞船从地球出发和回到地球)的世界线中,没有加速度的那一条所耗的时间最长(图 6)。宇航员在其航程中必须加速和减速,这两种情况的效果并不相抵消,他的原时因而总是比他的兄弟短得多(年龄的差别并不仅仅取决于旅行者的加速度,而且

还有赖于航行的总持续时间,这里单讲加速度只是为将宇航员时间与地球时间作比较)。虽然看似荒唐,双生子的幻想故事并不意味着爱因斯坦相对论的任何内在矛盾,而是表明了时间弹性的必然后果。

虽然相对论不允许我们运动得比光速更快,但它并非阻碍了而是促进了对深层空间的探索。将上面的双生子故事(其中假定瞬时加速)变一下,现在假定飞船有一个恒定的加速度(相对于它的瞬时惯性参考系),其大小等于地球表面上的引力加速度,这对宇航员来说要舒服得多。飞船的速度将迅速增大到接近于光速,而不能达到光速,飞船上的时间将过得比地球上没得多。按照它自己的钟,飞船将用 2.5 年时间飞到最邻近的恒星(比邻星),它与地球相距 4 光年;经过大约 45 年,飞船就飞出了 40 光年;经过 10 年就到了银河系中心,而地球上将是过了 15000 年;在 25 年里(短于宇航员的年龄),飞船将能在整个可观测的宇宙中遨游一周,行程是 300 亿光年!但这时的飞船最好不要再返回地球,因为太阳早已将行星都烧成灰烬,自己也早已熄火。

可是,这个异想天开的航行是实现不了的,因为需要有巨大的能量来维持飞船的加速。最好的方法似乎是把飞船自身的物质转化为前进的能量,但即使转换效率为百分之百,飞船在到达银河系中心时所剩的质量已只有出发时的十亿分之一,一座大山缩成了一只老鼠。

相对论炸弹

我要是早知道,就会去做个造钟表的工匠。

——阿尔伯特·爱因斯坦

狭义相对论是得到最好验证的物理理论之一。弹性时间的奇异现象已由实验证实,不过不是在人体上(那太痛苦了),而是用基本粒子,把它们加速到接近光速所需的能量不难提供。高精度原子钟也被放到了飞船里,返回地面时它所显示的时间的确比地球上的钟要短(如果有人愿意在一架以 1000 公里/小时的速度飞行的飞机里坐上 60 年,与地面上的人相比他只能赚到千分之一秒的时间)。当然,惯性系之间的变换公式、四维时空结构以及时间弹性等,都是比较抽象的概念。狭义相对论之所以著名,是由于它所揭示的质量与能量的等价性,即 $E = mc^2$ 这个简单公式。

1905 年,还猜不出狭义相对论有什么实际应用,但它在哲学上的冲击