

科学与人文精神丛书

相对论 天体和宇宙

王永久 著

0412.1

W38a1



A1023670

◆湖南师范大学出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

相对论 天体和宇宙/王永久著. —长沙: 湖南师范大学出版社, 2000.5

(科学与人文精神)

I. 相 ... II. 王 ... III. 相对论—宇宙学
IV. P159.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2000) 第 63185 号

相对论 天体和宇宙

王永久 著

责任编辑: 李巧玲

湖南师范大学出版社出版发行

(长沙市岳麓山)

湖南省新华书店经销 湖南航天长宇印刷有限责任公司印刷

850×1168 32 开 8.5 印张 213 千字

2000 年 7 月第 1 版 2000 年 7 月第 1 次印刷

印数: 1—3200 册

ISBN7—81031—934—5/G·427

定价: 14.00 元

前 言

如果有人对你说，“你头脑中的一些概念是不科学的”，你大概不会相信，我们就从这一问题谈起。

人们头脑中的一些概念来源于直觉的经验，它们未必都是科学的。人们头脑中的概念从科学性来讲，可以分为两大类：第一类是科学的，第二类是经验的，但不是科学的。这两大类概念，人们都认为是当然正确的。正因为如此，很少有人注意自己头脑中的概念还有不科学的。比如标准尺的长度，运动时和静止时应该是一样的；标准钟的快慢，运动时和静止时也应该是一样的。这些概念在人们的头脑中是根深蒂固的。如果有人问：“这是为什么？”或者说是：“这根据什么？”回答只能是“肯定是一样的”，再也找不到任何科学根据。这些概念就属于经验的概念，或者说“公理式”的概念，人们找不到科学根据就确认了它们的正确性。

狭义相对论问世以来，上述“绝对空间”和“绝对时间”的概念代之以“动尺缩短”和“动钟延缓”的相对概念，即运动的标准尺会沿运动方向缩短，运动的标准钟会变慢。

至今，狭义相对论的各个推论（如运动物体的质量随速度的增大而增大等）都已列入了教科书，成为高能加速器、原子反应堆、宇宙航行等各种现代科技领域中必须依据的科学概念，再没有人怀疑它们的正确性。但是，相信是一回事，理解又是一回事。许多人还只听说过这些结论，而不知道这些结论是怎样得到

的。甚至许多人学习过狭义相对论，也能够运用其中的公式计算和处理一些技术问题和理论问题，但是他们并没有从物理思想上理解这些概念，于是在深入讨论一些问题时就又遇到了障碍。例如“孪生子佯谬”问题：一对 20 岁的孪生子甲和乙，甲乘宇宙飞船到一颗遥远的星球去旅行，乙留在地球上，当甲返回并在地球上与乙相遇时，乙发现甲仍然那么年轻，而自己已经白发苍苍（因为“动钟延缓”，这是自然的）；但是甲的结论却恰恰相反，他观察的结果是飞船没有动，乙和地球一起反向飞去，乙的生理过程（动钟）延缓，乙仍然那么年轻，而自己却白发苍苍了。两人面对面看着，谁年轻谁老居然有这样离奇的结论，岂不荒谬！要解决这一问题，只知道动尺缩短和动钟延缓的公式是不行的，需要对时间空间概念的深入理解（详见第二章 § 10）。

在牛顿力学中，运动和静止都是相对的，但空间概念是绝对的，时间概念也是绝对的，空间、时间和物质的运动各自孤立地存在着，它们之间没有联系。狭义相对论揭示了空间、时间和物质运动的联系，这是人类时空观念的一次飞跃。

各种相对论效应，如“动尺缩短”和“动钟延缓”等等，在高速运动情况下才能明显地表现出来。所谓高速，指的是物体运动速度可以跟光速相比拟。日常生活所及物体的运动速度都属于低速范围。虽然子弹离开枪口的速度有每秒几百米，但真空中光的速度为 3×10^5 千米/秒，相比之下，子弹的速度太低了。这就是在日常生活中人们察觉不到“自己头脑中的经验概念是不科学的”原因。也正因为高速运动的领域距离人们的现实生活比较远，所以在狭义相对论诞生几十年之后，仍有许多人无法理解和接受它的一些结论。近年来，由于微观世界（物体做高速运动的领域）的理论研究和实验技术的迅速发展，了解狭义相对论主要结论的人越来越多，但是能够从物理思想上理解它的人仍然局限于几个狭小的研究领域。

科学在不断发展，人类的认识水平在不断提高，人们发现，狭义相对论虽然揭示了空间、时间和物质运动之间的联系，却没有揭示空间时间内禀（基本）属性和物质之间的联系，也就是说，狭义相对论没有揭示引力场对空间时间性质的影响。例如，在高山上的一个实验室 A ，在山谷中有一个实验室 B ，把两个完全相同的标准钟 C_A 和 C_B 分别放在两个实验室中，它们相对静止。按照牛顿力学和狭义相对论，虽然两个钟放在引力场中的不同位置（引力场强度不同），但由于相对静止，没有“动钟延缓”效应，所以它们的快慢应该始终是相同的。如果分别在两个实验室中测量圆的周长和半径的比，那么结果应该是一样的，都等于 2π ；测量三角形内角和也应该是一样的，都等于 π （即 180° ）。倘若有人问，为什么高山上的标准钟 C_A 和山谷里的标准钟 C_B 快慢一样（即不受引力场影响）？根据什么？回答也只能是“应该一样”，“肯定一样”，“这是毫无疑问的”，再也找不到任何科学根据。我们说“引力场对标准钟的快慢没有影响”这一概念是经验的，但不是科学的。与此类似，“引力场对空间的几何性质（圆的周长与直径之比、三角形内角和等等）没有影响”，这些概念也是经验的而不是科学的。在第四章 §5 中我们将看到，高山上的标准钟 C_A 要比山谷里的标准钟 C_B 走得快些，高山上的实验室中测得的三角形内角和与山谷中测得的结果是不相等的，二者都不等于 180° 。这就是说，引力场的存在，改变了空间时间的基本属性。这些内容属于广义相对论研究的范畴。

广义相对论是在牛顿引力理论（万有引力定律）和狭义相对论基础上发展起来的，它是研究空间、时间和引力的理论。广义相对论断言，我们生活的真实空间是弯曲的，而不是平直的。确切些说，在没有引力场存在的条件下，空间是平直的，欧几里得几何学是真实的；有引力场存在时，空间是弯曲的，黎曼几何学（弯曲空间几何学）是真实的。由于地球的引力场太弱，即使地

球附近的空间也只有极其微小的弯曲，所以人们头脑中固有的经验的平直空间和时间概念不至于产生明显的谬误。太阳的引力场比地球的引力场强得多，所以太阳附近空间的弯曲效应就比地球附近的弯曲效应要明显得多（见第五章）。

广义相对论第一次解释了牛顿力学和狭义相对论都无法解释的天文观测结果——水星轨道的反常进动。它还预言，光在引力场中传播时其波长要发生变化，在地球上观测太阳的光谱，应有一个微小的红移（每条谱线都向长波方向移动），其相对移动数值约为 2.12×10^{-6} 。光线在引力场中应是弯曲的，经过太阳附近的光线应有 $1.75''$ 的引力偏转……这些预言均为实验所证实。在广义相对论的基础上，已经形成了一些新学科，如广义相对论天体力学、黑洞物理学和现代宇宙学等。广义相对论预言了中子星和黑洞等致密天体的存在，并且第一次给出了宇宙演化的动力学方程，使宇宙学第一次成为一门名副其实的科学——一门定量的科学。

广义相对论如此重要，但至今熟悉它的人仍然很少，其原因有二。第一，它研究的是恒星和宇宙世界的现象，距离人们的现实生活比狭义相对论更加遥远；第二，它有一套专门化的数学工具（黎曼几何和张量分析等）。现在，人们除了有极灵敏的射电望远镜（可以观测到距我们百亿光年的宇宙天体），还有不断发展的宇航技术，人们已经开始离开地球（摆脱大气层的干扰），到人造空间装置上去观测宇宙天体，因此，广义相对论的实验观测距我们已不再那么遥远。就数学工具而言，一旦把专门化的部分抽掉或“翻译”成通俗的语言（像本书所做的这样），剩下的物理内容对于不同程度的读者（从大学生到研究生）就都是同样简单和同样新鲜的了。

广义相对论把空时几何和引力场统为一体，以其简洁的逻辑和优美的结构令学者们叹服和陶醉。我们希望广大读者都能涉入

这块和谐、优美的科学领地。

读者读完这本小书，不但能够理解狭义相对论和广义相对论中几条极其简单的原理，而且也能够运用其简单的（相对论所特有的）逻辑思维，得出一系列非常新颖的结论，至少能够澄清、理解和相信原来认为十分离奇的（但确实是科学的）一些概念。这是作者的愿望。

相对论这一理论研究领域在一些人看来，它是那么枯燥；可是对另一些人——勤于思考、勇于探索大自然奥秘的人来说，它是那样丰富多彩、充满内在美，那样富有吸引力，让人为之献身。任何一个相对论爱好者，当他在这一领域内完成一件小小的工作、有一点小小的发现时，他都会感到莫大的快慰。这种精神享受是任何物质享受都无法替代的。

青年朋友们，21 世纪的科学正向你们招手，愿你们勤于思考，勇于攀登，沿着科学家的足迹，步入科学殿堂，去享受人类最高层次的美——科学的内在美。

作 者

1999 年 7 月

于中国科学院高能
物理所专家公寓

目 录

第一章 牛顿力学中的相对性原理	(1)
§ 1 空间	(1)
§ 2 角度和长度	(3)
§ 3 时间	(6)
§ 4 空时坐标	(7)
§ 5 速度合成法则	(10)
§ 6 牛顿力学中的相对性原理	(13)
第二章 狭义相对论	(19)
§ 1 经典物理学的困难	(19)
§ 2 狭义相对论的两条原理	(22)
§ 3 动钟延缓和动尺缩短	(26)
§ 4 相对运动的钟的同步	(29)
§ 5 洛伦兹变换	(32)
§ 6 洛伦兹变换的另一种推导方法	(35)
§ 7 时空概念的相对性	(36)
§ 8 速度和加速度的变换	(41)
§ 9 光速和因果律	(46)
§ 10 孪生子佯谬	(52)
§ 11 孪生子佯谬的另一种讨论方法	(57)
§ 12 质量不是恒量	(60)
§ 13 质量和能量的关系	(63)
§ 14 狭义相对论的实验检验	(65)
第三章 天体	(74)

§ 1	太阳家族·····	(74)
§ 2	金星凌日·····	(76)
§ 3	日食和太阳·····	(80)
§ 4	月球·····	(87)
§ 5	水星·····	(93)
§ 6	金星·····	(98)
§ 7	火星·····	(103)
§ 8	木星·····	(110)
§ 9	土星·····	(112)
§ 10	天王星·····	(116)
§ 11	海王星·····	(121)
§ 12	冥王星·····	(124)
§ 13	小行星·····	(125)
§ 14	彗星·····	(126)
§ 15	流星和陨星·····	(132)
§ 16	恒星·····	(137)
§ 17	星系·····	(139)
第四章 广义相对论·····		(142)
§ 1	平直时空引力理论·····	(144)
§ 2	同一物体的两个质量·····	(151)
§ 3	虚构的力和引力等效·····	(154)
§ 4	非惯性系和惯性系平权·····	(158)
§ 5	人类生活在弯曲空间中·····	(159)
§ 6	四维空间的度规·····	(165)
§ 7	坐标钟和标准钟·····	(168)
§ 8	引力场方程·····	(172)
第五章 弯曲空间的实验验证·····		(176)
§ 1	引力场会改变光波的波长·····	(176)

§ 2	水星近日点的进动	(187)
§ 3	引力场中光线的弯曲	(189)
§ 4	雷达回波的延迟	(194)
§ 5	双星引力辐射	(194)
第六章	白矮星、中子星和黑洞	(196)
§ 1	白矮星	(197)
§ 2	中子星	(199)
§ 3	黑洞	(203)
§ 4	黑洞的性质	(211)
§ 5	黑洞的辐射	(215)
§ 6	黑洞中的空时内禀奇点	(218)
§ 7	黑洞的观测	(220)
第七章	宇宙学	(225)
§ 1	宇宙学的内容特点	(225)
§ 2	宇宙是均匀的和各向同性的	(226)
§ 3	爱因斯坦以前	(229)
§ 4	现在的宇宙在膨胀	(231)
§ 5	宇宙的年龄	(236)
§ 6	大爆炸宇宙学	(238)
§ 7	大爆炸宇宙学的实验检验	(240)
§ 8	宇宙的极早期从何时开始	(242)
§ 9	宇宙是闭合的还是开放的	(243)
§ 10	宇宙的暴胀	(244)
§ 11	其它宇宙模型	(248)
§ 12	宇宙的创生	(248)
§ 13	宇宙演化的图像	(256)
§ 14	结束语	(257)

第一章 牛顿力学中的相对性原理

在物理学和天文学中，人们要定量地研究许多概念，如路程、速度、力、质量、亮度……它们中的任何一个都必须是能够度量的，否则将不具有物理意义。空间和时间是最基本的概念，它们也都是可以度量的。

§1 空间

人们通常所说的空间的量，不外乎线的长度、平面和曲面的面积、形体的体积等等。所有这些空间量（由它们构成了空间概念）都可以用标准尺来度量。有 1 米长的标准尺，就有 $\frac{1}{10}$ 米、 $\frac{1}{100}$ 米……原则上就有任意短的（无穷小的）标准尺。这样，用标准尺不但可以度量线段的长，也可以度量任意一段曲线的长（只要用上求极限的概念就行了）。类似的，用标准尺还可以度量任意一块曲面的面积和任意一个形体的体积。

用标准尺还可以度量任意一个角度的大小，如图 1-1 所示。要度量角 α 的大小，可以以角的顶点 O 为圆心，以任意长 r 为半径作弧，与角的两边相交，然后用标准尺度量半径 r 和弧长 l ，便可得到角 α 的大小：

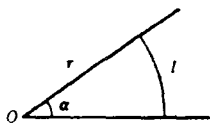


图 1-1

$$\alpha = \frac{l}{r} \text{ (弧度)}$$

任何空间量都可以用标准尺来度量，空间的一切性质都由度量结果反映出来。

我们在一个圆所在的面上，用标准尺度量这个圆的周长，记为 C ，度量它的半径，记为 r ，如果度量结果 C 和 r 满足关系式

$$\frac{C}{r} = 2\pi$$

我们就说，这个圆所在的面是平面，或者说圆所在的面是二维的欧几里得空间（即平直空间），如图 1-2 (a) 所示。在平直空间（欧几里得空间）里，用标准尺度量所得到的各个空间量之间的关系满足欧几里得几何学。这种平直空间的几何学是人们最熟悉的几何学。除了上面所说的“圆的周长和半径之比等于 2π ”以外，还有“三角形内角和等于 π （即 180° ）”，“直角三角形两直角边的平方和等于斜边的平方”等等，都是平直空间的性质。

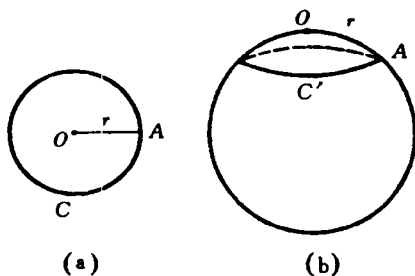


图 1-2

弯曲空间的情况就大不相同了。如图 1-2(b) 所示，我们在一个球面上作一个圆，圆心为 O 。在这个圆所在的面（球面）上，用标准尺度量半径，得到 r ，度量周长，得到 C' ，则显然有

$$\frac{C'}{r} < 2\pi$$

不符合欧几里得几何学。我们说这后一个圆所在的面不是平直的，而是弯曲的，或者说，这个圆所在面是一个弯曲的二维空间（非欧几里得空间）。在弯曲空间里，空间量之间的关系不遵守欧几里得几何学。

由上面的讨论可以看出，标准尺对于揭示空间的性质是至关重要的。它可以度量任何空间量的大小。通过度量所得到的空间量之间的关系，可以揭示空间的内禀（基本）属性——是平直的还是弯曲的。如果度量的结果符合欧几里得几何学，则空间是平直的；如果度量结果不符合欧几里得几何学，则空间是弯曲的。

§2 角度和长度

上节已强调指出，空间是用标准尺度量的。我们知道，角度也是空间量，它可以用量角器来度量。那么，量角器能不能代替标准尺来度量空间呢？我们说不行，度量空间非标准尺不可。量角器只能度量角度的大小，如果用它代替标准尺来度量空间，就会出现错误。我们引用爱仑坡所写的一段有趣的故事来说明这一点。

“在纽约霍乱流行的极可怕的那一年，有一位亲戚请我到他的幽静的别墅去呆两周。……有一天，天气很热，太阳快要落山了，我手里拿着一本书，坐在一个打开的窗子前面。往窗外看去，可以看见河那边远处的小山。我的心早已不在书上，飞到那充满凄凉和绝望的城市里去了。我抬起头，偶然看了一眼窗外那个小山的裸露的山坡，突然看到一个奇怪的东西：一个丑恶的怪物很快从山顶上爬下来，消失在山脚下的森林里。在刚一看见这个怪物的时候，我还很怀疑我的理智，或者至少怀疑我的眼睛是否正常。只是过了几分钟以后，我才确信这不是我的幻觉，这个怪物我看得很清楚，在它从山上往下走的全部时间里，我仔细地观察了它。可是如果我把它描写出来，读者们也许不会轻易相信。

我曾经用一些大树的直径与这个怪物比较过，以便确定它的

大小,我深信它比任何一艘战舰都大。我说战舰,是因为这个怪物很像一艘船:看了一艘装有74门炮的战舰就可以十分清楚地得到关于这个怪物的轮廓的概念。怪物的嘴巴长在一根吸管的尽头,吸管有二十多米长,粗细差不多同普通的大象身体一样。在吸管的根上有一丛丛很密的茸毛,从毛里突出两根发亮的长牙,向下面和旁边弯曲着,像野猪一样,只是它的体积硕大无比。在吸管两旁,还生着两只笔直的大角,有十多米长,看来好像是透明的,在日光下闪闪发光。这个怪物的躯干好像一个顶端朝上的楔,上面长着两对翅膀——每个翅膀大约有一百米长,一对叠在另一对上。翅上密集地镶着一些金属片,每一片的直径大约有五六米。这个怪物的主要特点还是它那几乎遮住整个胸部的下垂的头,它的耀眼的白色,在黑色的胸部衬托下,显得特别清楚,好像画出来的一样。

当我正怀着畏惧的心情注视着这个怪物,特别是注视它的胸部的那个可怕的外形时,它突然张开了口,大吼了一声……我的神经再也支持不住了,当怪物消失在山脚下的森林里的时侯,我也昏倒在地上了……在我苏醒过来以后,第一件事就是把所看到的情形讲给我的朋友听。他听完了我的话,先是哈哈大笑,然后神色变得十分严肃,似乎一点也不怀疑那是我精神恍惚的结果。

正在这时,我又看到了那个怪物,就马上高叫着指给我的朋友看。他看了一会儿,可是肯定没有看到什么,虽然在怪物下山的时候我详细地对他说明了它的位置。我用双手遮住脸。在把手拿开以后,怪物已经不见了。

主人开始问我那怪物的外形。在我详尽地告诉了他一切以后,他透了一口气,好像从某种难以忍受的重压下解放了出来似的。他走到书柜旁边,拿了一本生物教科书……他打开书对我说:‘如果你对怪物不描写得那么详细,我也无论如何没办法给你解释明白这是什么东西。现在先让我从这本书里给你读一段关于昆虫纲鳞翅目天蛾科里的一种天蛾的描述……’读到这里,他合上书,靠在窗上,姿势和我在看到怪物的时候坐的姿势一样。

‘啊!原来就是它!’他叫道,‘它正沿着山坡往上爬,它的

样子，我得承认，的确很怪。可是它并没有那么大，也不在那么远的地方，像你想象的。它正沿着缠在我们这窗子上的一条蜘蛛丝往上爬呢。’……”

这个故事告诉我们，用眼睛（即量角器）来量度空间量的大小是会发生错误的。要纠正这种错误，除了用量角器度量的结果以外，还要知道另外的量才行，而这些另外的量又需要用标准尺来度量。在上面的例子中，要知道“怪物”的大小，除了用眼睛度量的角度（视角）以外，还要知道“怪物”与观察者之间的距离，而这一距离还要用标准尺度量。

再看下面的问题：

在一列沿着直线轨道匀速行驶的列车上，透过车窗看远处的大地，看到大地在平动还是转动？

读者都会有这个经验，看到大地在转动。

按照相对运动的概念，如果列车前进的速度是 v ，则大地相对于车上的观察者应该以同样大小的速度 v 后退。大地应该平动，怎么会转动呢？这个错误仍然是用眼睛（量角器）代替标准尺来度量空间的长度所造成的。

如图1-3所示，观察者位于车上的 O 点。在某一时刻，在大地上任取一点 P ，使 OP 连线与列车前进方向垂直，设 $OP = r$ 。

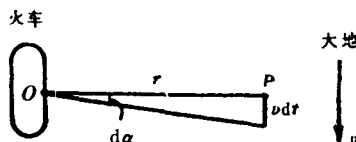


图 1-3

由所取的某一时刻算起，经过无限短的时间间隔 dt ^①， P 点

^① 在数学里，把一个量 f 的无限小的变化 Δf （就是 $f_2 - f_1$ ）记为 df ，以后我们经常采用这个记号。

后退的距离为 vdt . 这一位移在车上的观察者看来〔由观察者用量角器（眼睛）度量的结果〕是

$$d\alpha = \frac{vdt}{r}$$

观察者看到的“位移”实际上是角位移 $d\alpha$, 他看到的 P 点后退的“速度”实际上是角速度:

$$\omega = \frac{d\alpha}{dt} = \frac{v}{r}$$

显然, P 点离 O 点越远 (r 越大), 观察者看到 P 点的“速度” ω 就越小, 当 $r \rightarrow \infty$ 时, 这个看到的“速度” $\omega \rightarrow 0$, 即观察者看到无限远点是不动的, 所以观察者看到的整体图像是: 大地在绕着无限远点转动.

这个例子表明, 要确定 P 点相对于观察者 O 的速度 v , 只用量角器量得“速度” ω 是不够的, 还要用标准尺量得距离 r 才行.

我们的结论是: 只有标准尺才能度量空间, 量角器不能代替标准尺.

§ 3 时间

空间和时间都是最基本的物理概念, 许多其它概念 (如速度、加速度等) 都以它们为基础.

通常, 时间概念不外乎两个事件的时间间隔、一个事件比另一个事件发生得早些或晚些、两个事件同时发生等等. 所有的时间概念都可以用标准钟度量. 原则上讲, 任何一个真实的物体运动或变化都可以作为标准钟. 通常, 取一些周期运动或变化作为标准钟, 如机械钟、原子钟、生物钟等等.

设事件 A 发生的时刻标准钟的读数为 t_A , 事件 B 发生的时刻标准钟读数为 t_B , 则事件 A 和事件 B 的时间间隔为 $|t_B - t_A|$. 如果 $t_B - t_A > 0$, 我们就说事件 A 比事件 B 发生得早些, 或者