

前言

当一个人追逐一道光线时，在他眼中的世界会是什么样子的呢？

你知道光线会拐弯吗？

你知道你周围每天看到的空间实际上是弯曲的吗？

你知道你每天夜晚看到的浩瀚的星空实际上是在远离你而去吗？

这并非不可思议的奇谈怪论，这却恰是我们生活的世界的真实面貌，这就是爱因斯坦告诉我们的世界本源——相对论的世界。

曾经有人说：“全世界只有十二个人懂相对论”，还有人说：“不对，全世界只有两个半人懂相对论”。但是，我要告诉你，相对论没有那么神秘，相对论描述的东西你也能懂。所以我们编写了这本书，希望能用最浅显的语言，将神秘物理殿堂深处的相对论带给你面前。作为一本科普读物，我们在全书没有使用一个物理学和数学符号，我们尽量用图解和文字描述的方式，让你也能懂得相对论告诉我们的这个世界的真实面貌。

我们的读者不需要太多的物理学和数学知识，但是我们对读者还是有一点点小小的要求：请抛弃原先你对这个世界所形成的固有的理解，清理好你的大脑，然后多一点耐心，让相对论带你进入一个你从未到达过的世界！

在结构上，我们首先讲述了相对论的历史，然后分别讲述相对论的两个部分——狭义相对论和广义相对论，任何理论都不可能不受到挑战，所以在后面我们收录了反相对论者对相对论的质疑，在最后，我们收录了爱因斯坦关于相对论的论文原文作为参考。

第一章：爱因斯坦的灵感

——相对论小史 /1

第一节：经典物理大厦的倒塌/7

第二节：狭义相对论的灵感

——苦思十载一朝顿悟/22

第三节：广义相对论的灵感——

一生中最快乐的一个念头/36

第二章：倒转你的大脑

——狭义相对论 /45

第一节：从相对说起/47

第二节：空间是相对的/58

第三节：光速不变/67

第四节：时间的相对性/77

第五节：狭义相对论/86

第六节：质量的相对性/104

第三章：有生命的宇宙

——广义相对论 / 115

第一节：从半空坠落的人

——牛顿与爱因斯坦 / 117

第二节：时空告诉物质如何运动

——引力是不存在的 / 130

第三节：会拐弯的光

——相对论的辉煌 / 138

第四节：黑洞 / 154

第五节：广义相对论与宇宙学 / 172

第六节：物理学的统一 / 183

第七节：相对论的意义 / 186

第四章：挑战相对论 /191

第一节：相对论是一个世纪笑话
吗？ /193

第二节：双生子真的会有不一样
的年纪吗？ /197

第三节：光速是不可超越的吗？ /203

附录一：爱因斯坦关于相对
论的论文 /211

附录二：相对论词典 /237

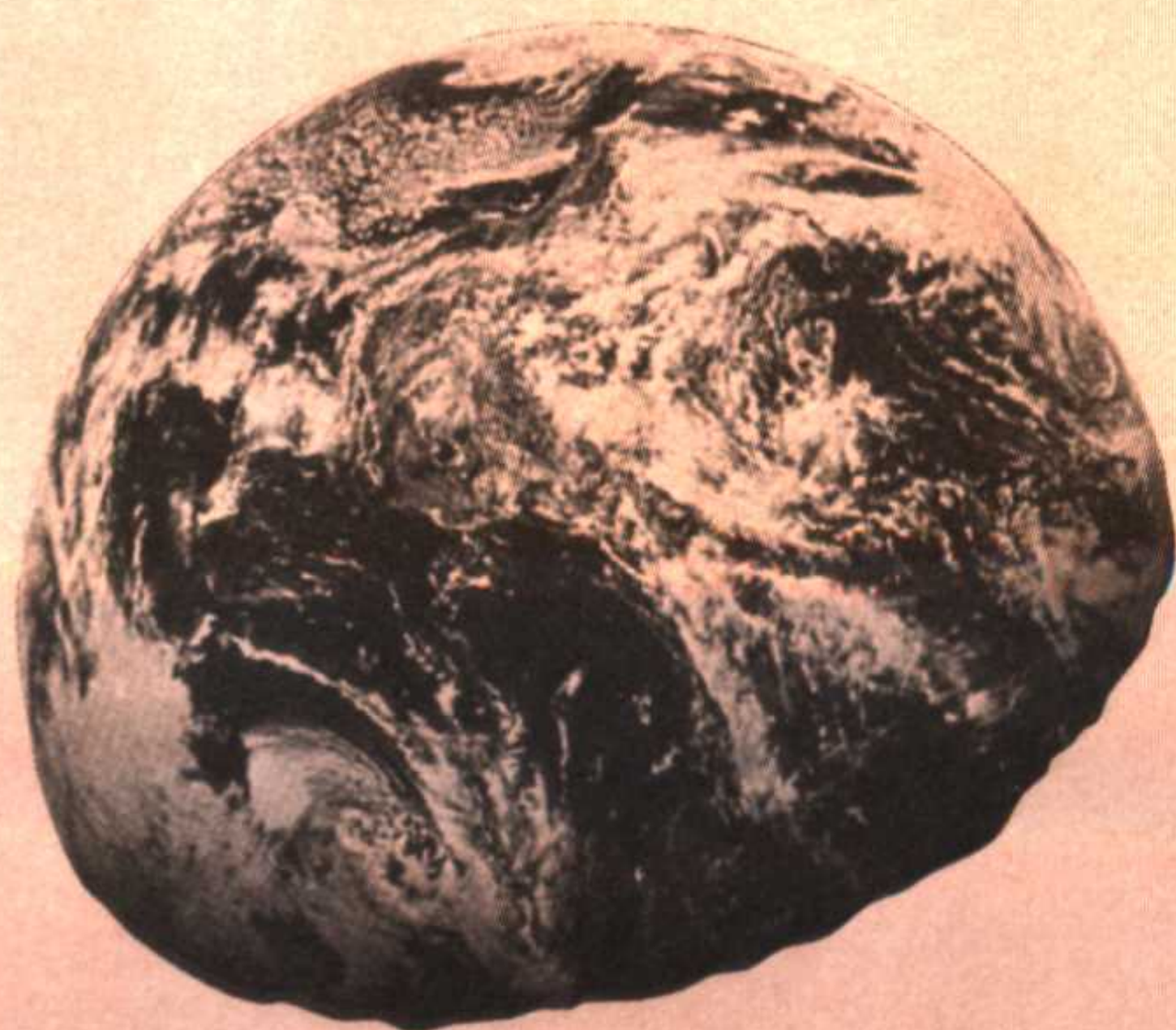
中文参考书目 /245

第一章

爱

因斯坦的灵感

——相对论小史



爱因斯坦的灵感 相对论小史



——八七九年三月十四日，特别的一天，特别的城市。

这一天的特别，来自于一个名叫阿尔伯特·爱因斯坦的婴儿的诞生。这个婴儿，不仅继承了父母的数学天赋和音乐天赋，而且将这两种天赋恰到好处地结合在一起，使之合成为非凡的思维能力和想像力。而正是爱因斯坦这些非凡的能力，使他改写了科学史，甚至是人类历史。

爱因斯坦的超常能力，从他诞生起，就在他的独特的头骨结构上有所显现。他的后脑大得出奇，而且头骨呈棱角形。难怪老祖母见到小婴儿时，担心他细弱的身躯难以支撑那个硕大的头颅。也正是由于脑部的特殊结构和为人类社会所做的巨大的贡献，爱因斯坦的大脑在他去世后被他的医生哈维私自保存了下



来，目前存放在爱因斯坦生前工作的地方——普林斯顿大学，供人瞻仰和研究。

人们都不会忘记一幅著名的漫画：爱因斯坦的脸被画成一把小提琴，琴弦上既有音符，还有那个著名的物理学公式： $E=MC^2$ 。音乐是爱因斯坦一生中的最大的爱好，音乐以它那温柔而深邃的怀抱接纳了爱因斯坦，在音乐的洗礼下，在音乐安详而宁静的环境中，也给了他日后作为一代物理学大师的超凡想像力。

爱因斯坦不仅仅属于科学，科学也并不是与艺术毫不相干。对于伟大的科学发现来说，抽象的逻辑思维倒总是验证非凡想像力的工具。所以，爱因斯坦始终没有成为数学公式的奴隶，“我相信直觉和灵感。……有时我感到是在正确的道路上，可是不能说明自己的信心。当一九一九年日蚀证明了我的推测时，我一点也不惊奇。要是这件事没有发生，我倒会非常惊讶。想像力比知识更重要，因为知识是有限



的，而想像力概括着世界上的一切，推动着进步，并且是知识进化的源泉。严格地说，想像力是科学研究中的实在因素。”

科学和艺术的互补性与统一性，使音乐成为爱因斯坦的“第二职业”。不管旅行到哪里，他总是身不离提琴，甚至参加柏林科学院的会议，也要随身带着琴盒，以便会后拜访普朗克、玻尔时，能在一起拉拉弹弹。在紧张思索光量子假说或广义相对论的日子里，爱因斯坦一旦遇到困难，思索陷入困顿时，他就会不由自主地放下笔，拿起琴弓。那优美、和谐、充满想像力的旋律，会在无形中开启他对物理学的思路，引导他在数学王国作自由、创造性的遐想。音乐其实是一种催化剂，在享受音乐的过程中，爱因斯坦往往会神游其外，让音乐从指尖传向小提琴，这个过程最终成为一个无意识的过程，而他的大脑则溜向他神往的科学殿堂，在音乐声中，他的思维变得深邃而敏锐，这种感觉爱因斯坦不只一次向他的友人提到，在美妙

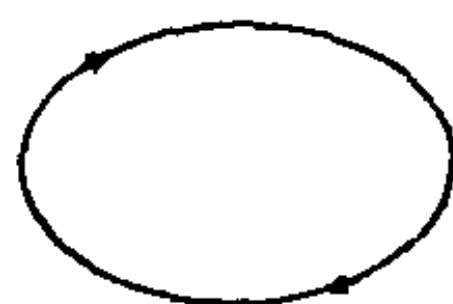
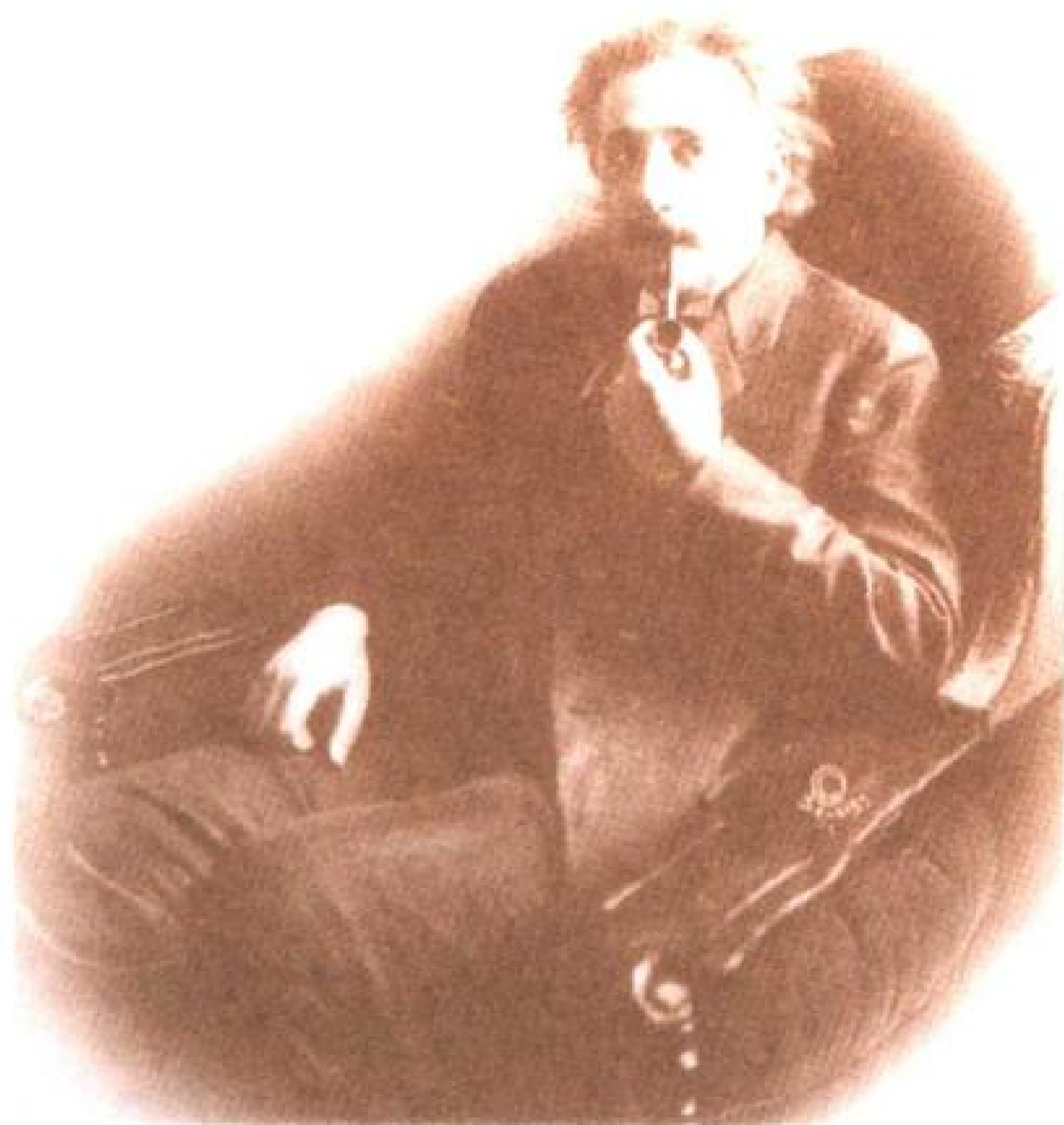


图 说 相 对 论

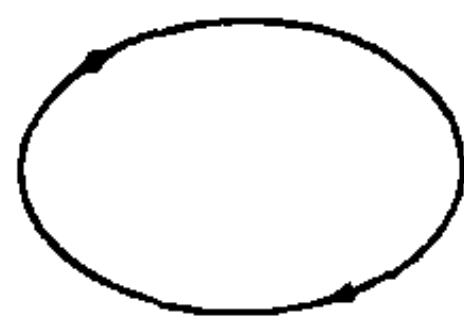
而和谐的音乐中，往往催化出爱因斯坦的科学创见和思维火花。在音乐的自由流淌中，爱因斯坦使得深奥的理论物理学有了美妙的旋律。

6



阿尔伯特·爱因斯坦 (1879 - 1955)

Relativism



第一节：经典物理大厦的倒塌

爱 因斯坦生长在物理学急剧变革的时期，
通过以他为代表的一代物理学家的努

力，物理学的发展进入了一个新的历史时期。由伽利



伽利略·伽利雷 (1564 - 1642)



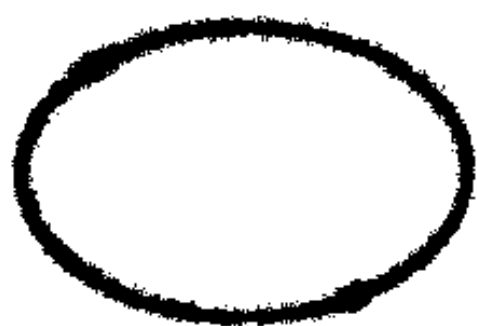
詹姆斯·克拉克·麦克斯韦 (1831 - 1879)



略和牛顿建立的古典物理学理论体系，经历了将近二百年的发展，到十九世纪中叶，由于能量守恒和转化定律的发现，热力学和统计物理学的建立，特别是由于法拉第和麦克斯韦在电磁学上的发现，取得了辉煌的成就。

8

这些成就在两百年中不断得到完善和发展，无数物理学家为它们倾注了毕生的心血，而物理学为人类社会带来一个又一个革命性的影响。人类由传统工业时代慢慢过渡到电子时代。电池甚至电灯出现在人类的视野中，无数科学发明在物理学家们天才的智慧下出现，物理学推动了整个人类文明的发展，而且这种发展使得人类文明在几年内的发展超过了以往需要几个世纪才能达到的发展速度。物理学本身也不断得到完善，人类摒弃了传统宗教给人类思想带来的枷锁，从这个意义上说，物理学的发展给人类带来的不仅是科学和科技的发展，更重要的是它带来了人类思想和思维方式的革命。人类的认知水平从蒙昧进化到进



步，物理学起着不可代替的作用。这些成就，使得当时不少物理学家认为，他们倾注了大量心血的物理学理论已经趋于完善，特别是物理学领域中原则性的理论问题都已经解决了，留给后人的，只是在细节方面的补充和发展。

可是，事实却往往背离人们美好的幻想。历史的进程恰恰相反，人们认为十分完美的物理学却开始受到一个又一个不可解释现象的挑战。首先是一系列古典物理学无法解释的新现象被发现：以太漂移实验、元素的放射性、电子运动、黑体辐射、光电效应等等。这些不可反驳的事实的出现，使得停留在古典物理学思维内的老一代物理学家充满了困惑和无奈。他们试图使用他们古典物理学领域内的方法来解释和修补这些现象，他们提出了一个又一个理论来试图采用在旧理论框架内部进行修补的办法来解决矛盾，可是这些修补往往都是无效甚至是牵强可笑的。古典物理学碰到了前所未有的困难。



到底是古典物理学家能力不够呢？还是古典物理学有着它无法克服的重大缺陷。在这些新现象发生时，所有的人都陷入了沉思。对古典物理学家来说，捍卫和巩固用他们几代人一生的心血换来的经典理论似乎是无可争议甚至是无奈的选择。但是，历史和事实是无情的，现在我们已经知道，我们已经将他们的理论称为古典物理学，也就是说，用无数古典物理学家的毕生心血和精力而构建的古典物理学大厦是一幢外表精美庄严，但是地基不够坚实的楼阁！

推倒这幢楼阁的人就是年轻的爱因斯坦。他抛弃了旧传统的束缚，仔细分析了这些新的现象，在天才的火花闪现下，爱因斯坦对空间和时间这些古典物理学中看来似乎无需讨论的基石般的概念做了彻底的改变和全新的诠释。他对时间和空间的基本概念做了大胆的革新，并在这些革新的基础上做了本质的变革，创立了一套划时代的理论，这就是——相对论。

然后他对这些理论做了实验上的验证，在洛伦兹



等人研究工作的基础上，使得物理学理论取得了根本性的突破，开辟了物理学的新纪元。

爱因斯坦的变革首先从挑战光学的旧古典物理学理论开始。十九世纪，光学的机械理论居于统治地位。这种理论认为，光是一种称之为“光以太”或简称“以太”的弹性介质的波动。

11

也就是说，光是一种波动，就像水波一样，水波本身是不存在的，只有我们看到水在波动的时候，我们才能讨论水波的存在。也就是说，光波也需要通过一种像水一样的东西来波动，我们看到的光波，实际上是一种东西在波动。这种东西古典物理学家称为“以太”。“以太”像水一样波动，从而产生光波和光波运动。

古典物理学家认为，以太就像空气一样，充满我们周围的空间，可我们看不到它们，就像静止的水一样，我们只能看到清澈的水底的石块和泥沙。那么，以太只有在波动时候，我们才能看到光。



按照这个理论，以太应该是无处不在的，可奇怪的是，从来没有任何一个实验证据可以证明以太是确实存在的。而且以太学说还可以证明，以太能穿透一切物体，而又不影响物体的运动。

但是，事实上，光学研究的新成果愈来愈难以符合机械以太假说。于是，物理学家断言，可以把光看作是以太的一种特殊“状态”。就是我们前面说的，以太波动的状态产生了光，这种状态被称做是电磁力场，而光是电磁力场的一种表现形式。注意，这里古典物理学家并没有否定以太的存在，而是换了一种说法，用电磁力场来描述了而已。

法拉第用实验证明了电磁力场的存在，并且把它抽象地引进自然科学领域，而后又被麦克斯韦用抽象得出奇的数学公式进行概括。

光以太学说与牛顿力学所引出的“绝对空间”理论紧密相连。牛顿认为：

“绝对空间由于它的本性以及它同外界事物无



关，它永远是同一的和不动的。”

既然以太这种东西无处不在，又绝对静止，不受任何东西的干扰，于是，牛顿认为可以把以太看作是绝对参考体系，它决定了世界上一切运动的永恒的绝对状态。也就是说，我们可以随时确定任何东西的位置，只要标出它在绝对静止的以太中的位置就可以了。

13

既然存在绝对的位置和状态，牛顿进而认为，也必然存在着“绝对时间”。

他说：“绝对的、真正的数学时间自身在流逝着，它的本性是均匀的。它的流逝同任何外界事物无关。”

这种观点认为，时间在均匀地流逝，并且想像在宇宙中有一种“标准钟”，人们可以从放在任意地方的这种时钟上读出“绝对时间”。任何时间都是绝对的和某个标准时间相比较的。

后来，牛顿又谈到了“绝对运动”，既然“绝对空



间”也就是“绝对位置”是存在的，而“绝对时间”也是存在的，那么由“绝对空间”和“绝对时间”联想，也必然存在着“绝对运动”。他给“绝对运动”下的定义，亦即“物体从一绝对地点转移到另一绝对地点”。于是我们又可以想像了，“移动”在牛顿的思维中就变得非常简单。

绝对时间和绝对空间是牛顿力学的根基。然而，



艾萨克·牛顿 (1642 - 1727)



0406701

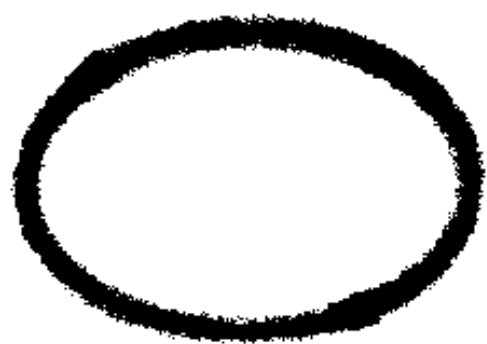
牛顿的绝对时间和绝对空间有明显的毛病：既然绝对时间和绝对空间同任何外界事物没有关系，那么怎样才能知道它们存在呢？换句话说，这个没有边界和没有过去未来的绝对时空是怎么存在的呢？因为按照牛顿的观点，它们是无需测量的，甚至根本是无法测量的。这个问题，牛顿没有办法回答。他只能说，绝对时间和绝对空间是上帝的创造。

15

古典物理学历史使命就是和宗教自然观进行抗争，从哥白尼试图证明地球是围绕太阳转的时候开



尼古拉·哥白尼 (1473 - 1543)



始，物理学从来都是扮演和神学相敌对的角色，可是到了古典物理学发展到牛顿时代，达到颠峰时，牛顿却不得不搬出上帝来解释他不能解释的问题，这不能不说是一个绝妙的讽刺或者说是一个巨大的悲哀。

后来，著名的哲学家康德又把绝对时间和绝对空间进一步推广到哲学领域，他把绝对时间和绝对空间说成是先验的。所谓先验的意思就是先于经验，人一生下来就有的。这样，牛顿和康德把绝对时间和绝对空间捧上了先验也就是上帝创造的王国，不许人对它们有怀疑。

不过，怀疑绝对时间和绝对空间的人还是有的。莱布尼兹就批判过绝对时间和绝对空间，但是没有把它们批倒。到十九世纪，马赫又对牛顿的时空概念作了有力的批判，但还是没有批倒。这是因为要改变时间和空间的概念，客观条件还没有成熟。

当然，如果抛开先验的绝对时间和绝对空间是否存在这个问题不谈，建立在绝对时间和绝对空间基础



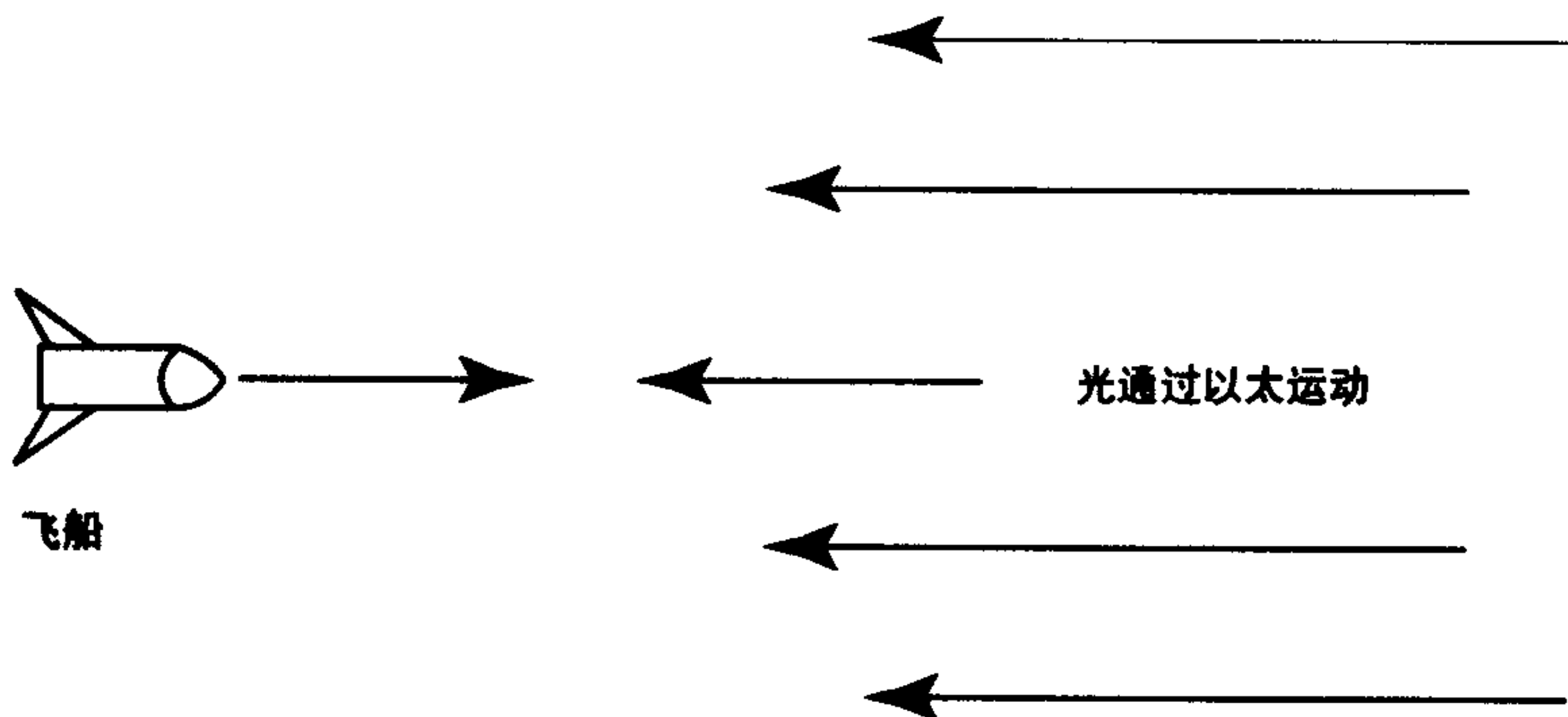
上的牛顿力学，二百多年来，在解决宏观低速现象的问题中，的确取得了无比辉煌的成功。因为牛顿力学毕竟是古典物理学的根基，人们利用牛顿力学的确能解决绝大部分的问题。正是因为牛顿力学的存在，人们可以计算推动机车所需要的能量，人们能够计算星星和太阳的位置，人们能够在航海时准确知道自己所处在的位置和航向，应该说，古典物理学的辉煌是历史上不曾有的，但是，这些并不能成为古典物理学家们抱残守缺，不思进取的理由。

直到二十世纪初，在物理学中，牛顿巨大的身影仍然君临一切，绝对时间和绝对空间的概念，在物理学家的心里依旧是神圣不可侵犯的。要等到物理学的研究对象，从宏观领域进入原子和电子的微观领域，从低速领域进入光速和近光速的高速领域，以牛顿力学和麦克斯韦电磁场理论为基础的经典物理学，才暴露出严重问题。

此外，实验物理学也使人们对牛顿关于时空和运



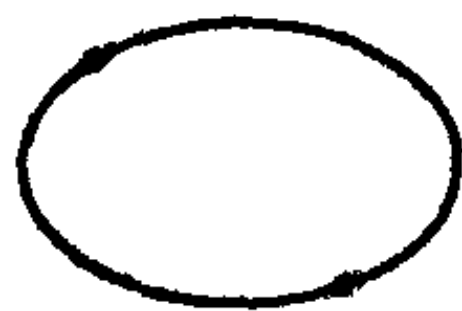
动的教条产生极大的怀疑。地球以每秒三十公里的速度在其轨道上绕着太阳转动。我们的太阳系以每秒二十公里的速度在宇宙中飞驰。最后是我们的银河系，它与其他遥远的星系相比，以相当高的速度不停地在运动。那么，要是以太是静止存在于“绝对空间”之中，并且天体穿过它运行，这种运动的结果对于以太来说必然是显著的，而且使用精密的光学仪器也一定能够验证“以太风”。就像我们在水中划船，以太是水，船是地球，那么我们盯着湖面的话，就会产生水留过船帮的错觉。“以太风”就是这种错觉，如果真的





有一种叫做“以太”的绝对静止的东西悄无声息地存在于我们周围的话，那么当地球运动的时候，它穿过以太，让我们看起来就像“以太”在我们身边流过一样，就像我们穿过空气而感受到风一样，我们应该能够感觉到“以太风”的存在。

于是，实验物理学家开始向“以太论”发起挑战了。一八八七年，美国物理学家麦克斯韦做了这个方面的第一个实验。他出生于波兰，一八八一年曾在柏林和波斯坦做过亥姆霍兹的奖学金研究生。他的实验由于实验装置不够齐全，结果说服力不够强。六年以后，麦克斯韦在美国使用亲自设计的高精度镜式干涉仪，同莫勒合作重复了他以前的实验。这台新式测试仪如此的精确，以致于仪器本身受“以太风”的影响都能清晰地显示出来。但是这次实验以及以后的多次反复实验，都没有看到所谓的“以太风”现象。这就是著名的“麦克斯韦实验”，它证明光速完全是恒定的，与光源和观察者的运动无关。



阿尔伯特·阿伯拉罕·迈克尔逊 (1852 - 1931)

“迈克尔逊实验”是物理学史上最著名的实验之一，也是相对论的基本实验。它的成功不仅仅在于它证明了所谓“以太”是无稽之谈外，更重要的成就是它十分精确地进行并达到了前人无法想像到的精度，它的精度相当于测量出一座大山移动一根头发宽度的距离，这一实验精巧无比，充满智慧和灵气，连爱因斯坦都十分钦佩迈克尔逊的实验技巧。



麦克斯韦的实验得到的结果，彻底否定了以太的存在。一开始，人们还想使虚构的以太假说与光速恒定的事实一致起来，从而来“拯救”以太。例如在一八九五年，荷兰物理学家洛伦兹试图假定，快速运动物体在运动方向上会产生所谓的机械收缩(“洛伦兹收缩”)，为的是用这种方法在机械世界观范畴内把麦克斯韦实验结果跟以太和绝对空间捏合起来。这种设想尽管十分巧妙，毕竟是人为假想，不仅明显带有目的性假说的性质，而且从长远看来不会使理论物理学家满意。

麦克斯韦的实验结果使理论物理学家陷入难以自拔的思维困境，又像是一个无法解开的死结，它使古典物理学陷入窘境。



第二节：狭义相对论的灵感

——苦思十载一朝顿悟

22

自

一八九五年起，十六岁的爱因斯坦便开始认真思考一个问题：“假如我以光速跟随一道光束飞行，我会看到哪些奇异景象？比方说，这道光束若是由一座时钟反射出来，我应该看到一座静止的钟，也就是说在我眼中，那座钟的时间是静止的；可是在别人看来，同样的钟却滴答滴答这不是矛盾呢？”

爱因斯坦心中这个“臆想实验”，已经埋下发明狭义相对论的种子。在自传中，爱因斯坦这样记述着他的相对论的出发点：“这样，人们搞清楚了物理学中某一事件与空间坐标的时间值的意义。”

对某一空间点，也就是三维空间坐标加上时间值



也就是时间一维的分析成为相对论研究的直接起点。
爱因斯坦很早就注意到，讨论空间任何东西的运动不可能只讨论它的位置，在讨论位置的同时不可避免地要讨论到时间，也就是说，时间的存在成为讨论的一个必须的前提，所以，爱因斯坦一开始就研究了同时性的概念。

23

他的研究成果归纳如下：倘若有一种速度无限大的传递信号，那么它在科学上是十分重要的，据此可以建立起相距遥远地方的两个事件的绝对同时性。如果真有这样快的信号，那么绝对同时的事件是可能存在的，但是问题的关键就在这里，并不存在一个叫做“速度无限大信号”的东西。我们已经知道，那个精巧的迈克尔逊实验已经证明了光速是有限，而且是恒定的。由于作为最大信号速度的光速是有限的，并且对所有的观察者而言又都是一样的，因而“绝对同时”没有什么物理意义，也丧失了理论依据。

所有涉及到时间的判断，往往是关于同时事件的



判断。因而，同时概念的相对性导致时间概念的相对性，这是逻辑的必然。例如，在相距很远的地方发生了两件事情，你很难说他们是“同时发生”的，这句话是一句没有意义的话，因为当你说：“他们同时发生”实际上就是承认了有无限大速度信号的存在，换个角度说，当你身边的事情发生时，除非有一个无限大速度的信号告诉你很远地方的另一件事也发生了，你才能说它们：“同时发生”，但是没有“无限大速度信号”这种东西存在，所以“绝对同时”这种东西不存在了。类推下去，那么也不会有绝对的、对所有参考系全都适用的相同时间。从而，每一参考系都有它自身的时间，即它的“参考系时间”。对每个人，每件事情，都没有绝对的时间来判断它的发生。这是一个天翻地覆的思想。正如爱因斯坦后来发现的那样，整个问题的关键在于虚空的空间中光速是恒定的。

假使承认这一恒定性(这点已被迈克尔逊实验所证实)，时间相对性就是不可避免的。



爱因斯坦的时间学说是崭新的，在他以前还没有一位物理学家或哲学家这样深刻而彻底地研究过同时性，并且得出这样深刻而彻底的结论。著名物理学家马赫要求，把物理学中无法由经验验证的荒唐的因素全部加以取缔。马赫的这一要求，导致爱因斯坦取缔牛顿“绝对时间”概念的想法。

25

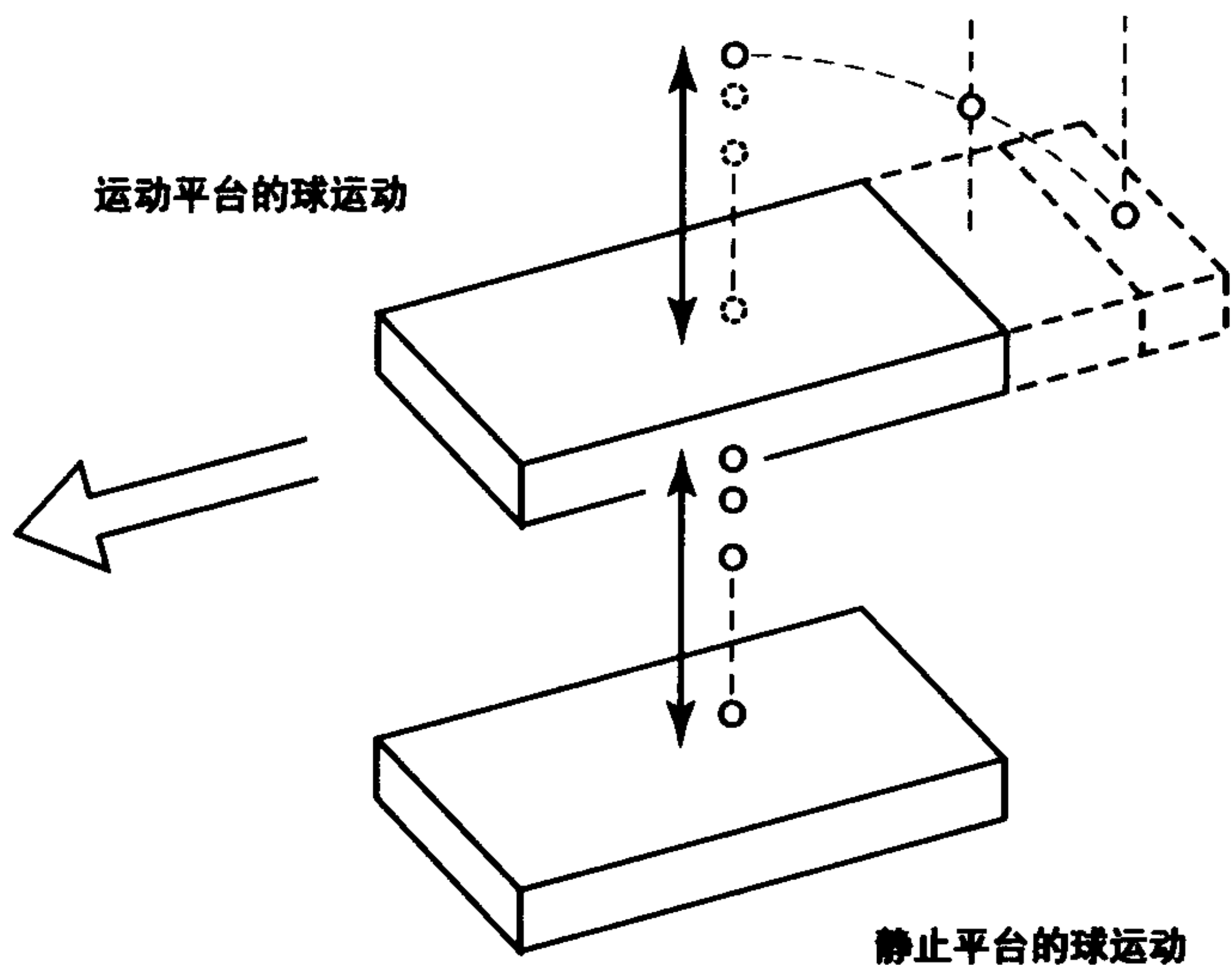
由于时间和运动是彼此密切相连的，时间是“运动在量值方面的表现”，或者说运动是“时间和空间在量值方面的表现”，也就是说，运动是由时间和空间来描述的，我们讨论一个物体的运动，总是说它在多长多长时间内移动了多少多少距离。所以当时间概念被相对化时，“绝对运动”概念也失去了立足之地。一个物体或一参考系的运动，只有在与另一物体或参考系相比较而存在，并在其对比中数值也是适宜的。不存在什么“绝对运动”。

爱因斯坦的“狭义相对论”认为，在相互作直线一非加速运动的所有参考系中，自然规律是同样有效。



它的意思是：你站在两个相互做直线运动的参考系中的时候，你看到的物理现象应该是一样的。举个例子来说：匀速开动的火车和车站就是两个相互做直线—非加速运动的参考系，我们无论站在站台上还是站在车厢里，我们看到的物理现象是一致的，比如我们向上抛一个球，无论站在车厢里还是站在站台上，这个球都最终会落到我们的手里，我们并不能区分是在车厢里还是在站台上。而至于具体的相对的时间和空间值，在两个参考系，时间和空间值可以用“洛仑兹变换”这一特别的等式进行换算。在下面这个图形例子中，运动中的车子上的人看乒乓球的运动，和车子下的人看乒乓球的运动是一样的。但是，在车下的人看车上的乒乓球的运动却是一个折曲线，这个折曲线的具体的时间和空间值就要用“洛仑兹变换”来换算。但是这种换算不影响我们的结论，就是两个参考系内，物理规律是相同的。

一九零五年，爱因斯坦提出了相对论，他把此前



所谓的作为光波载体的“以太”，从物理学世界中清除出去了。爱因斯坦认为，光以太原本只是物理学界的一个“幽灵”，他把独立的物理实体——电磁场请出来，坐在以太的位置上，这也是崭新的、勇敢的行



动。尽管法国物理学家彭加勒在他之前就曾提过应该抛弃以太假说，但是他没能把这种动议变成新的自然观的基底。

“无以太物理学”乃是爱因斯坦思想的成果。

爱因斯坦在光的学说中引起的革命性进展——物理学中不存在以太的观点，显然触动了老的古典物理学家的神经。即使是当时著名的物理学家也长时间接受不了。就连洛仑兹，这位在狭义相对论酝酿阶段起过重要作用的科学家，直到一九二八年，还表示对光学现象没有以太作载体不完全理解。但是，历史和真理发现的车轮是无法阻挡的，“以太”被抛入谬误一类是迟早的事情。

在化学尚未开发以前，人们认为物质燃烧这种自然界最普遍的现象是由于一种叫做“燃素”的东西搀杂在物质中，它们在燃烧的时候从物质里跑出来燃烧，所以又叫“火气”。而我们现在初中学生都知道，燃烧是物质剧烈氧化的一种过程，是两种化学元素相互作



用的结果，根本就不存在所谓“燃素”这种东西。那么，在爱因斯坦抛弃“以太”后，“以太”最终落到“燃素”的下场，成为科学的史迹。它又像其他的科学假说那样，在特定的时期内为研究工作服务，一旦完成使命，即被送进科学谬误博物馆里去了。

抛弃光以太假说是一桩天才的破坏之作。在爱因斯坦取得的成就中，首先的建设工作是引进一个定律，即用 C 表示恒定的真空光速，把它纳入各种自然常数之列，运用到物理学的基本规律中去。

29

爱因斯坦首次发现，光速在力学和光学中同等重要。我们知道，在牛顿力学中，我们只要给物体一个力，它就能产生加速度，就是说只要我们推一个物体，这个物体的速度就会增加，这是常识，也是牛顿力学的结论。但是，爱因斯坦却发现，光速是一个奇怪的速度，如果按照牛顿力学，你只要不停地推一个东西，它的速度就会无限增加，但是，在爱因斯坦那儿，光速仿佛是一切过程不可达到的最高临界速度，



无论怎样把力施加上去，把能量传送上去，怎么也不可能达到或超越光速，无论给初速度附加多少速度，也是徒劳。这就是光速恒定。

既然存在光速恒定这一事实，那么很多和我们平常常识相违背的现象的出现就成为必然了。这就引出了相对论的两个著名的“佯谬”，引起人们的广泛重视，也是多少年来激烈争论的焦点所在。

所谓“佯谬”，就是纯粹从逻辑上对一个理论做结论推导，推导出一个明显不合逻辑或者常识的结论或者两个相互矛盾的结论，“佯谬”是物理学史上最有意思的“大脑体操”，“佯谬”的存在使得物理学讨论变得更有趣，而且更像哲学。

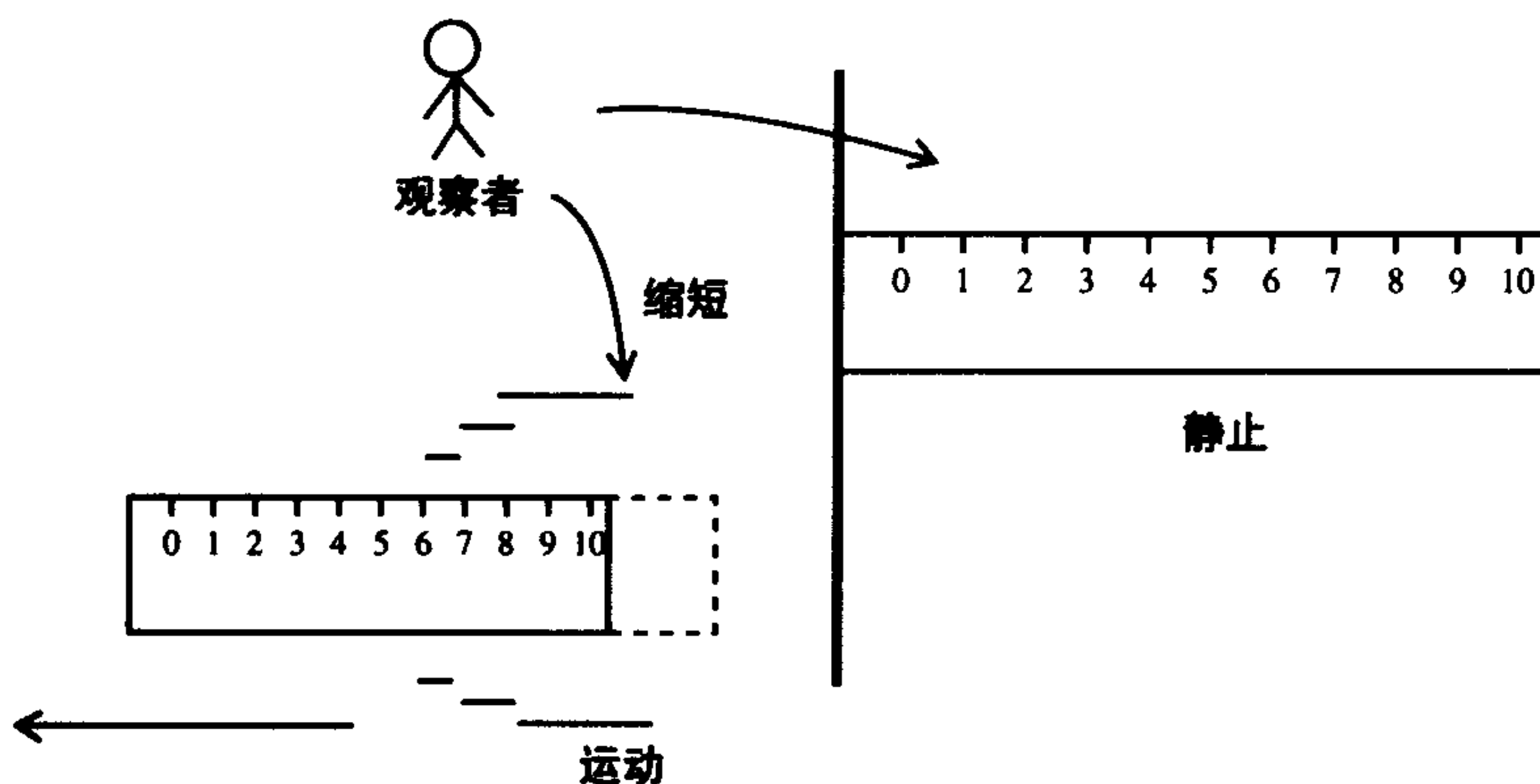
“佯谬”的存在使很多人非常困惑，也使很多人乐此不疲，那些陷于因袭的形而上学机械观中不能自拔的那些物理学家、哲学家，都曾经坚决反对过或者无情地嘲讽过相对论的这些“荒诞无稽”的结论。即使那些想沿着爱因斯坦所开辟的崭新道路前进的人们当



中，也有一部分在相对论上难于跟上爱因斯坦的脚步。

其中一个“佯谬”便是快速运动着的一把尺子，它跟静止状态相比，在运动方向上长度缩短了。

31



这是一个和常识违背的结论，它说的是如果我们看一列快速运动的火车，它运动中的长度要比它在静



止时候短。这个问题是从麦克斯韦实验结果提出来的，后来形成了洛伦兹的机械收缩假说。爱因斯坦认为，这种收缩可以用两个参考系之间存在着的相对速度来解释，只要两个参考系间存在相对速度，那么从一个参考系看另外一个参考系中的物体，它在运动方向上的长度必然是缩短的。

另一个“佯谬”是在快速运动的参考系中的钟，与静止参考系中的钟相比，它走得慢了。也就是说我们看一个在运动中的火车，车上载的时钟要比火车静止时候慢。这就是所谓“时间膨胀”，也叫做时间延伸或时间失真。根据这一佯谬会得出诸如这样的结果：一个乘高速宇宙飞船长时期在太空遨游的人，当他返回地球地面时，与一直留在地球上的他的孪生兄弟相比，他应该年轻得多。这是因为宇宙飞行员的生物钟以及他的一切生理过程，比留在地球上的人要慢得多。这就是著名的“双生子佯谬”。当然，要想使生物钟佯谬和孪生兄弟佯谬产生的效应显现出来的话，宇



宙飞船的速度一定要十分接近光速；可是这一条件与现实宇宙飞行的条件相距甚远。当然，我们无法从实验上验证这个结论，因为我们的技术水平还无法达到使这个效应显现的程度。但是，“佯谬”本身就不是为实际实验而存在的，它更倾向于从理论的内部来发现一些结论，并且通过这些结论来解决问题。

33

只要相对时间膨胀得不到实验证明，激烈的争论就不可能中断。不过在三十年代末，从激发氢原子的实验中，无可置疑地证实了时间的相对膨胀。后来，在宇宙线的研究过程中再次明确地得到了证实。这就是说，人们在实际实验中，的确发现了快速运动的参考系中的时钟变慢了，特别是由于宇宙线粒子的速度特别大，这一效应的数值也较大。

这两个“佯谬”的最终实验证明，是相对论的第一个辉煌成就。

一九零五年，爱因斯坦的狭义相对论宣判了机械自然观的死刑，这是自然科学史上的一次大变革，也



是辩证法在物理学基础中的胜利。它把牛顿经典运动定律中所说的那种关于时间和运动的形而上学的机械观点提高到辩证法的高度。牛顿定律是速度远远小于光速的有限定律。牛顿的形而上学观点方法，尽管是当时所公认的定律，但是由于物理学的发展，碰到了无法逾越的鸿沟。爱因斯坦运用辩证思维的冲击力量摧毁这些障碍，并为物理学的进一步发展开辟了道路。在爱因斯坦以前，虽然有其他一些科学家确实已经采用形式数学的方法解决了运动物体的电动力学问题，然而爱因斯坦的功绩仍是不可低估的。

一九一一年，劳厄撰写了第一篇关于相对论的专著。他在《物理学历史》一文中指出，自古至今的物理学问题，还没有比得上空间与时间概念对人们产生这样巨大的震动。爱因斯坦推翻了人们脑海中原本存在的时间和空间概念，这个变化是革命性的。关于相对论的讨论从爱因斯坦提出相对论后就没有再中断过，后来出版了千百本各种书刊，有反对相对论的，也有



赞同相对论的。但是，无论如何，爱因斯坦已经打破了人们脑海中固有的思维坚冰。

一九零五年，爱因斯坦在《物理学年鉴》上发表了长达三十页的论文《论动体的电动力学》。这篇文章宣告了相对论的创生。一九零五年，也还在这一杂志上，他以题为《物体的惯性同它所包含的能量有关吗？》一文又作了重要补充。这两篇论文都收集在一九一三年相对论重要的历史文献《相对论原理》一书中，与读者再次见了面。



第三节：广义相对论的灵感—— 一生中最快乐的一个念头

36

我们知道，爱因斯坦最初提出的惯性系相对论适用于相对做匀速直线运动的参考

系之间，我们称之为狭义相对论。

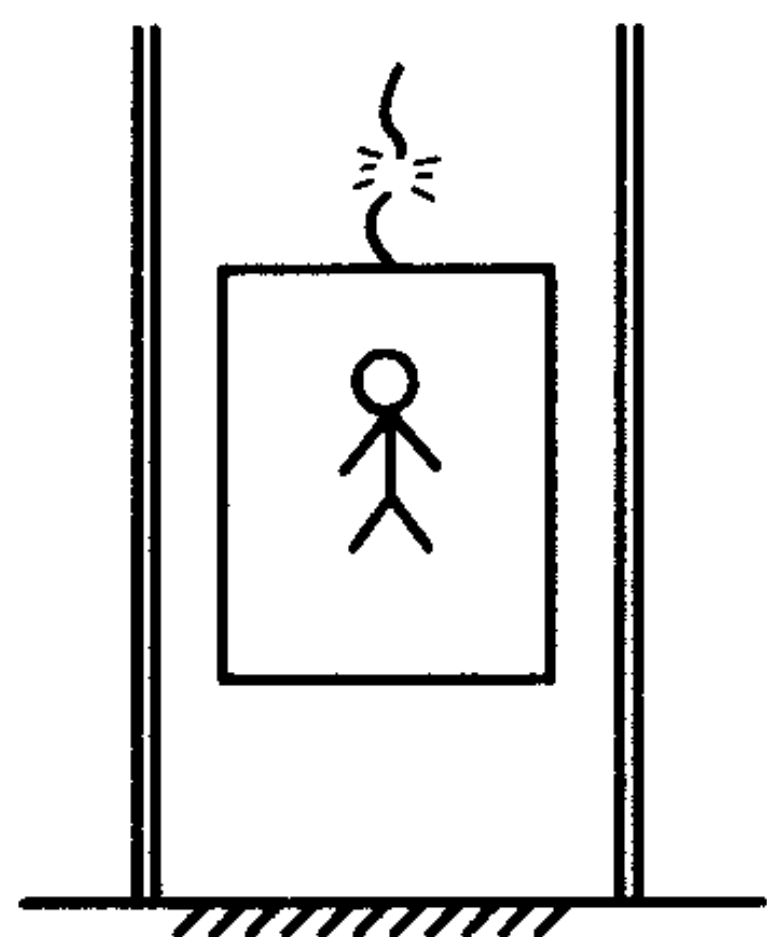
而事实上，在真实物理世界中，惯性座标系只是个理想状况。也就是说，这个世界上实际不存在完全不受任何影响的惯性系，任何参考系都多少受到某种力场的影响。比如说，只要存在物体，物体间就必然存在引力，也就是说重力场无所不在，而物体受重力作用就会做加速度运动。爱因斯坦原先的构想，是企图通过直接推广和发展狭义相对论的理论，使之能适用和涵盖各种非惯性座标系。然而不久之后，他就得到一个令人沮丧的结论：在狭义相对论的架构下，绝



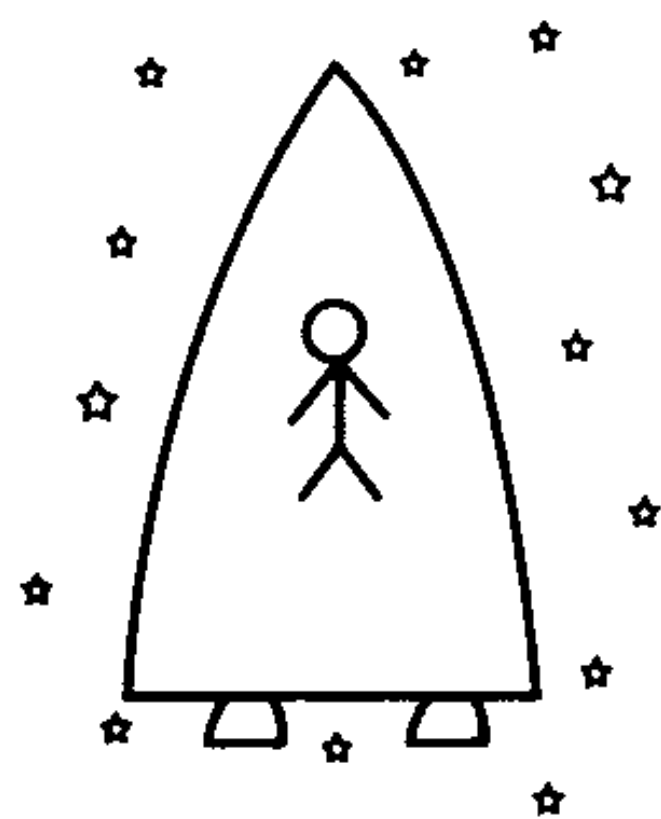
对不可能有完善的重力理论。

爱因斯坦只好另辟溪径，试图突破狭义相对论的框架，寻找一个更强而有力的架构。皇天不负苦心人，一九〇七年某一天，他坐在瑞士专利局的办公室里面，脑海中突然冒出一个灵感：“一个在半空中坠落的人，完全感觉不到自己的重量，应该觉得自己好像置身于惯性坐标系！”

37



电梯中坠落的人



宇宙空间中静止火箭中的人

我们在上图可以看到，一个在电梯中坠落的人，和一个在宇宙空间中不受任何引力的人所感觉到的是完全一样。也就是说，在半空受到重力坠落的人，他



做任何事情，他的感觉和在一个不受任何力场影响的
环境中做同样的事情，感觉是一样的。这个不受任何
力场影响，就是所谓的惯性坐标系。对他来说，两者
没有任何区别！

爱因斯坦后来宣称，这是他一生中最快乐的一个
念头，它成了广义相对论的敲门砖。从这个念头出
发，爱因斯坦将相对论引入了更美妙的境界，从而将
相对论的理论发挥到一个更高的水平。

我们应该还记得爱因斯坦最初的那个臆想实验，
耐人寻味的是，爱因斯坦在广义相对论前的臆想实验
和那个以光速飞行的臆想实验有异曲同工之妙：（前
一个臆想实验是以光速飞行时，抵消了光速，因而看
到一座静止的时钟；而后一个是在重力场中坠落，抵
消了重力加速度，因而感觉不到任何重力。）

根据这个看似平淡无奇的想法，同年爱因斯坦写
出第一篇有关广义相对论的论文，提出广义相对论的
两个公设：



一、等效原理：加速度造成的“重量感”与真正的重力效应一模一样(实验证据为惯性质量和重力质量的等价性)。

二、广义相对性原理(广义协变性)：物理定律在任何坐标系中都具有相同形式。

同样是从两个公设出发，爱因斯坦钻研广义相对论却经历了一段曲折得多的路程。其中最主要的困难，在于当时物理学界所熟知的数学工具似乎都搔不到痒处。我们知道，到了后来，物理学和数学已经密不可分，常常是物理学家提出一个理论，然后必然需要依靠数学工具来将它描述出来。

一九一二年，爱因斯坦终于认识到传统的几何学已经不能满足描述广义相对论的需要，它不适用于重力场，于是开始在同同学格罗斯曼的帮助下学习“黎曼几何”与“张量分析”。掌握这些新利器之后，广义相对论的研究工作总算拨云见日，终于逐步建立起广义相对论的完备体系：以四维时空的弯曲几何结构来



表现重力场。牛顿的重力理论自此功成身退，成了爱因斯坦理论中的一个特例。

一九一四年秋，爱因斯坦为《普鲁士科学院会议报告》写了一篇长篇论文。这篇论文的主要目的是进一步系统地、详尽地讨论与格罗斯曼合作的第一篇论文中所用的方法和所取得的成果。对张量分析和微分几何的简述几乎占论文篇幅的二分之一。

爱因斯坦清楚地认识到有必要用自己的方式解释这些技术；这些技术对于爱因斯坦和其他大多数物理学家来说都是新鲜的。这篇论文中还含有物理学中的几个新特点。

首先，爱因斯坦反对牛顿的转动绝对性。例如，牛顿常用转动的装满了水的水桶来说明问题。而相反，爱因斯坦却强调说：“我们无法区别‘离心场’和‘引力场’，我们可以把离心场当作引力。”，因为按照广义相对论，离心场和引力场对参考系中的物体运动的影响是完全一样的，根本没办法区分。另外，论



文还有一个胜人一筹之处，爱因斯坦第一次得出了点粒子运动的测地线方程，并且证明它有正确的牛顿极限。这一理论第一次将张量理论实际应用于物理方程之中。

在这篇论文中，根据爱因斯坦广义相对论的张量理论，还得出了包括红移和光弯曲等结论的早期成果（依然是旧值，是正确值的一半）。

41

这篇论文的最后一个成果是他对时空性质的重要评论，这是爱因斯坦第一次提到时空性质问题，即“根据我们的理论，空间的独立性是不存在的。”这篇论文是二十世纪理论物理学研究的峰巅。

一九零五年的狭义相对论仅仅适用于不存在引力的所有物理过程，研究的是直线、匀速相对运动的参考系。广义相对论的方程与参考系的运动状态无关，也就是同样适用于作加速运动和旋转运动的参考系。在某种程度上，它是一九零五年狭义相对论的“推广”；此外，就像爱因斯坦所恰当比喻的那样，广义



相对论这个新理论就像是相对论大厦中的第二层楼。

爱因斯坦一直把广义相对论看作自己毕生最重要的科学成就。他对自己的学生、波兰物理学家说过：

“要是我没有发现狭义相对论，也会有别人发现的，问题已经成熟了；但是我认为，广义相对论的情况不是这样。”

42

爱因斯坦说这种话，是在广义相对论发表之后二十多年。

当然，一个重大的科学理论，是科学发展到一定阶段后的必然产物，说它完全依赖于某个个人，这是叫人难以相信的。然而，这种看法也说明了一个事实——广义相对论中包含着深刻的思想。没有大胆的革新精神和百折不挠的毅力，没有敏锐的物理直觉能力和高超的数学运算技能，是不可能建立广义相对论的。

从一九零五年到一九一五年，爱因斯坦酝酿了整整十年时间——那是最富于创造力的成熟的十年——



才建立起广义相对论。

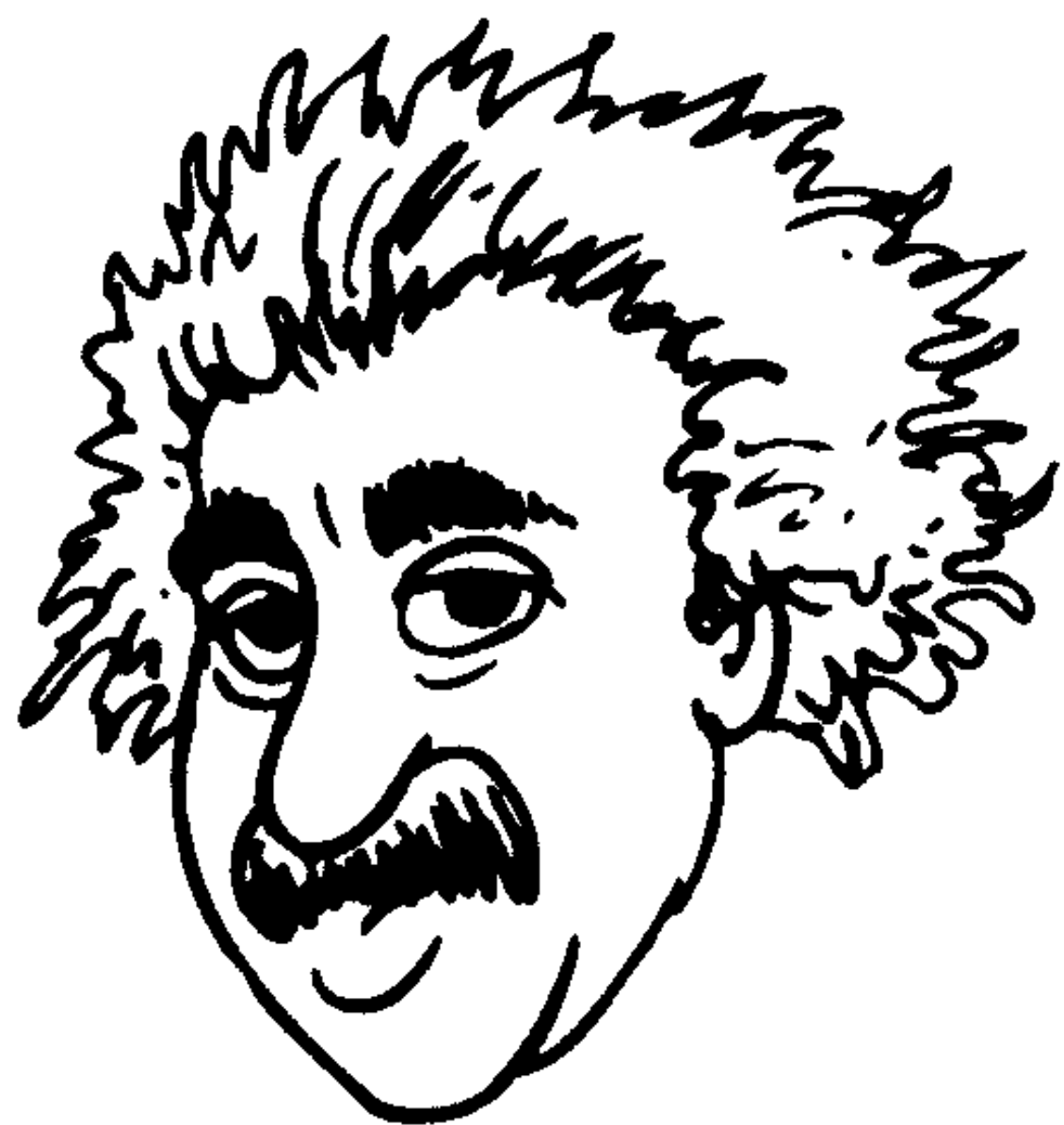
广义相对论的提出需要太多的才能，几乎超出一个常人毕生所能掌握的知识无数倍。人类不得不在大多数人平庸的事实面前赞美那些伟大的天才。他们的才能实在是让人高山仰止。拥有这样的天才，是人类的福份。

43

难怪一八九七年发现电子的英国物理学家汤姆逊说：“广义相对论是人类思想史上最伟大的成就之一。”

难怪创立相对论量子力学的英国物理学家狄拉克说：“广义相对论也许是人类曾经作出过的最伟大的科学发现。”狄拉克是物理学界最不爱说话，更不爱说恭维话的大师。所以，爱因斯坦在一九一七年大病之后，坦然地向朋友们说：

“我死不死无关紧要。广义相对论已经问世了，这才是真正重要的。”





第二章

倒

转你的大脑

——狭义相对论

倒转你的大脑——狭义相对论



第一节：从相对说起

既然是相对论，我们无可避免地要从“相对”谈起，粗看这个词好像没有什么特

47

别的说法，但是仔细想想，你就会发现这个词没有你想像的那样简单。

最简单地说，让你指出什么是“左”和“右”，你很快就会发现你根本没法马上回答这个看似简单的问题。

我们都知道，在北京，天安门城楼前面是天安门广场，假如有人问你：天安门是位于天安门广场的哪一边——左边还是右边？你很难马上回答好这个问题。

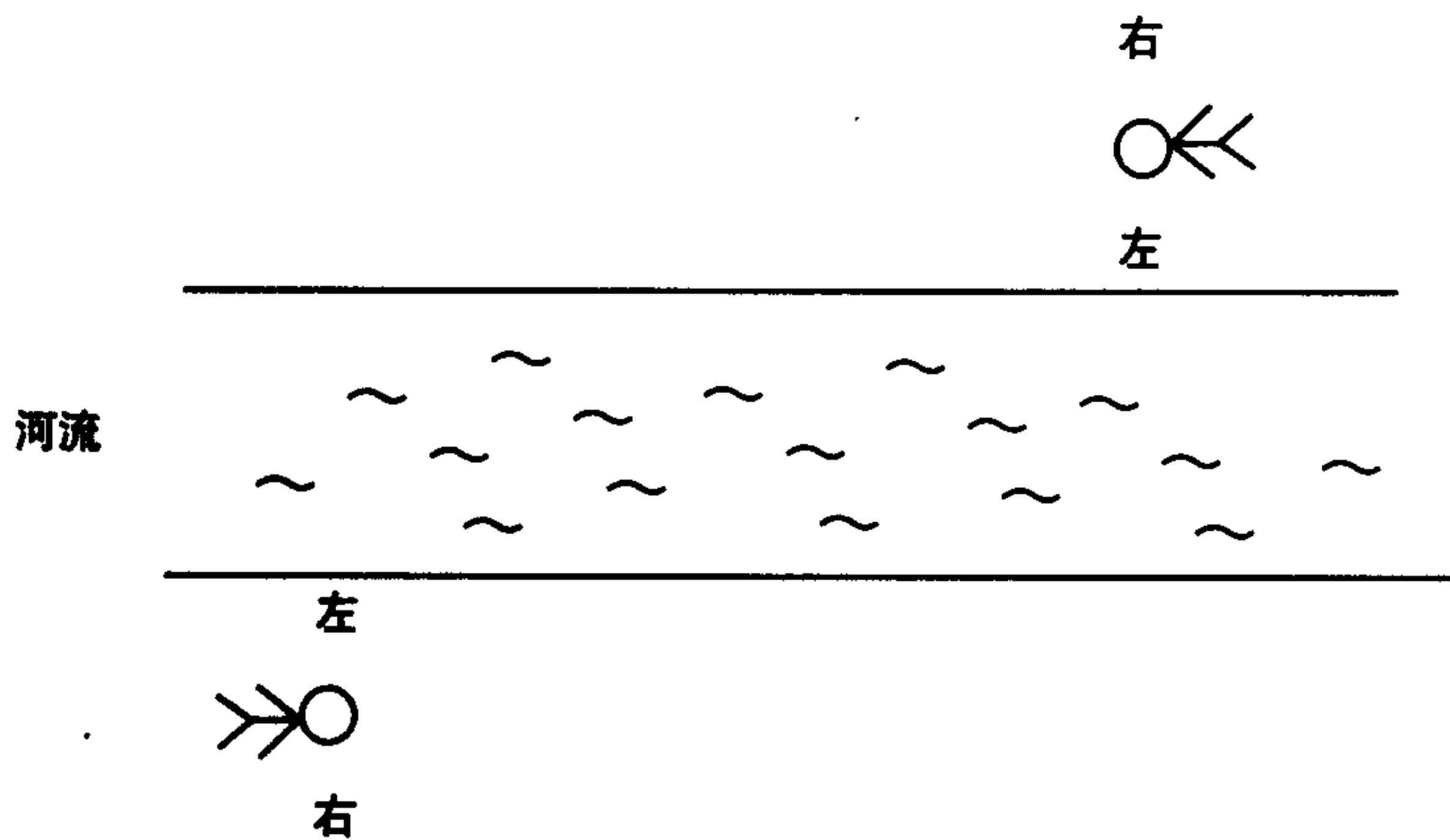
如果你面朝东方，那么，天安门是在左边；但是，如果你面朝西方，天安门是在右边；而如果你面

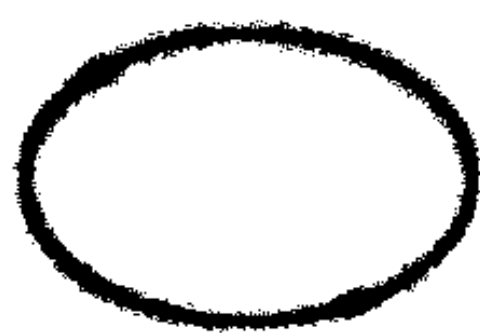


朝南方或者北方，则天安门既不在左边也不在右边。
也就是说，在回答这个问题之前，你必须明确一个相对的方向。

48

同样来说，我们请你说出哪里是一条河流的右岸，你马上陷入困境。因为你必须说出是顺着水流方向来说的右岸还是逆着水流方向来说的右岸，“左”和“右”是由河流水流的方向来决定的。因此，“左”和“右”是一个相对的概念。而且只有在一个特定的方向





作为根据的情况下，这一对概念才有意义。

好了，推广一下，请问哪里是“上方”，哪里是“下方”，你又无法回答了，因为你必须清楚你站在哪里，然后才能说一个地点在你的上方还是在下方。你从一楼走到三楼，那么二楼就有时候在你的上方，有时候在你的下方，方向决定于你当时所在的位置。

49

我们甚至问你：现在是白天还是黑夜，你又无法回答了。因为对于这个问题的回答只能以地点或者位置而言。当北京是白天时，而纽约却是黑夜，这是毫无异议的。仅仅说白天或者黑夜都是不能让人满意的，因为白天和黑夜也是相对的概念，不指出具体的地点，你是不能回答这个问题的。

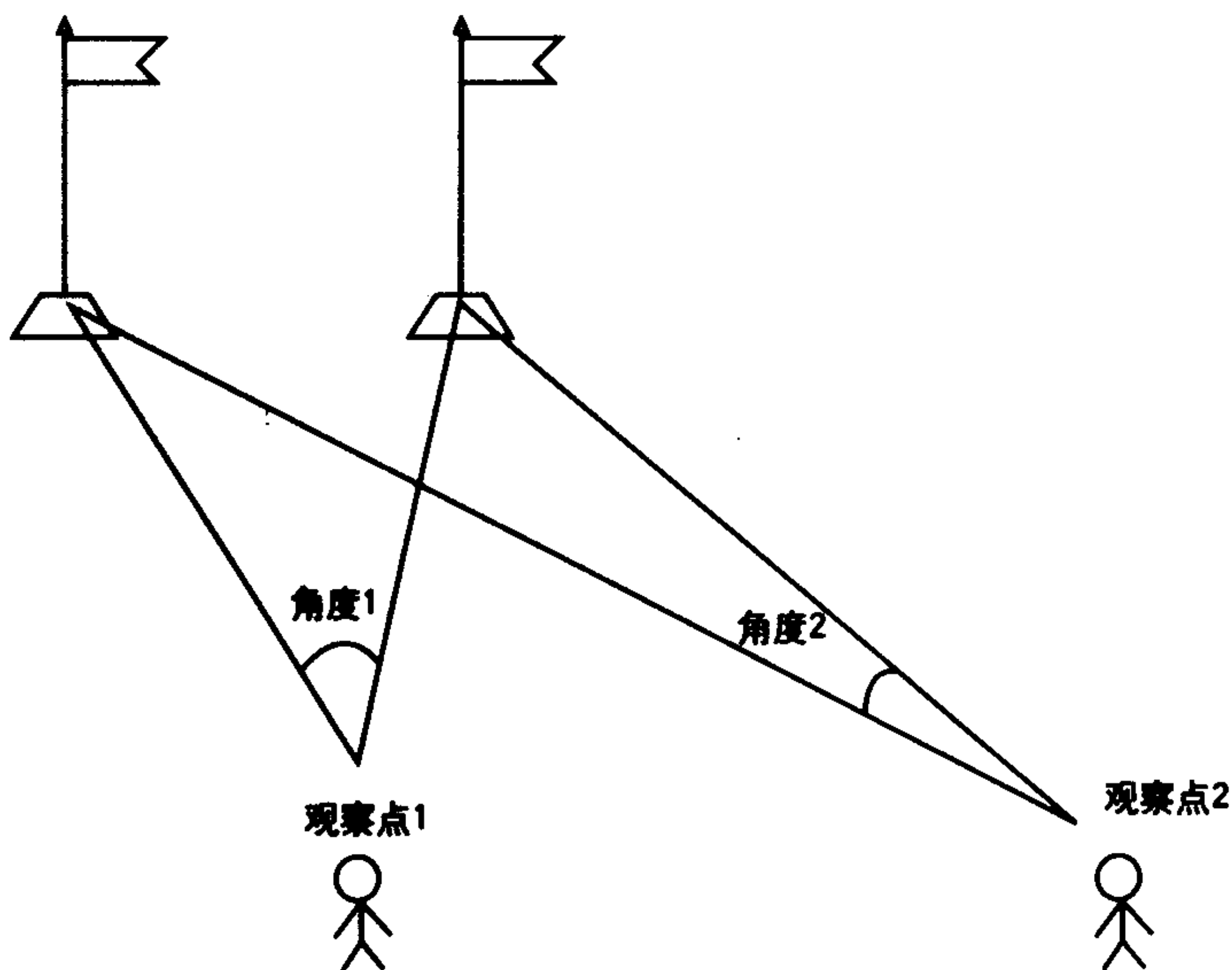
当我们观察某一物体时，如果稍微改变观察点，角度也就随之产生相应的改变。例如你从天安门前面走过，天安门对你的角度就在不停变化。

由于这种情况，角度法常被用于天文学。地球在运动，那么某颗星星的在天空中的位置(在天文学中



用角度来衡量这个位置的变化，结果是一样的)就会不停变化。我们举个例子，远处有两根旗杆，你沿平行于两个旗杆的方向运动，就会看到两个旗杆在你看来它们之间的距离是变化的，通过这种变化，你能算出两个旗杆间真实的距离。

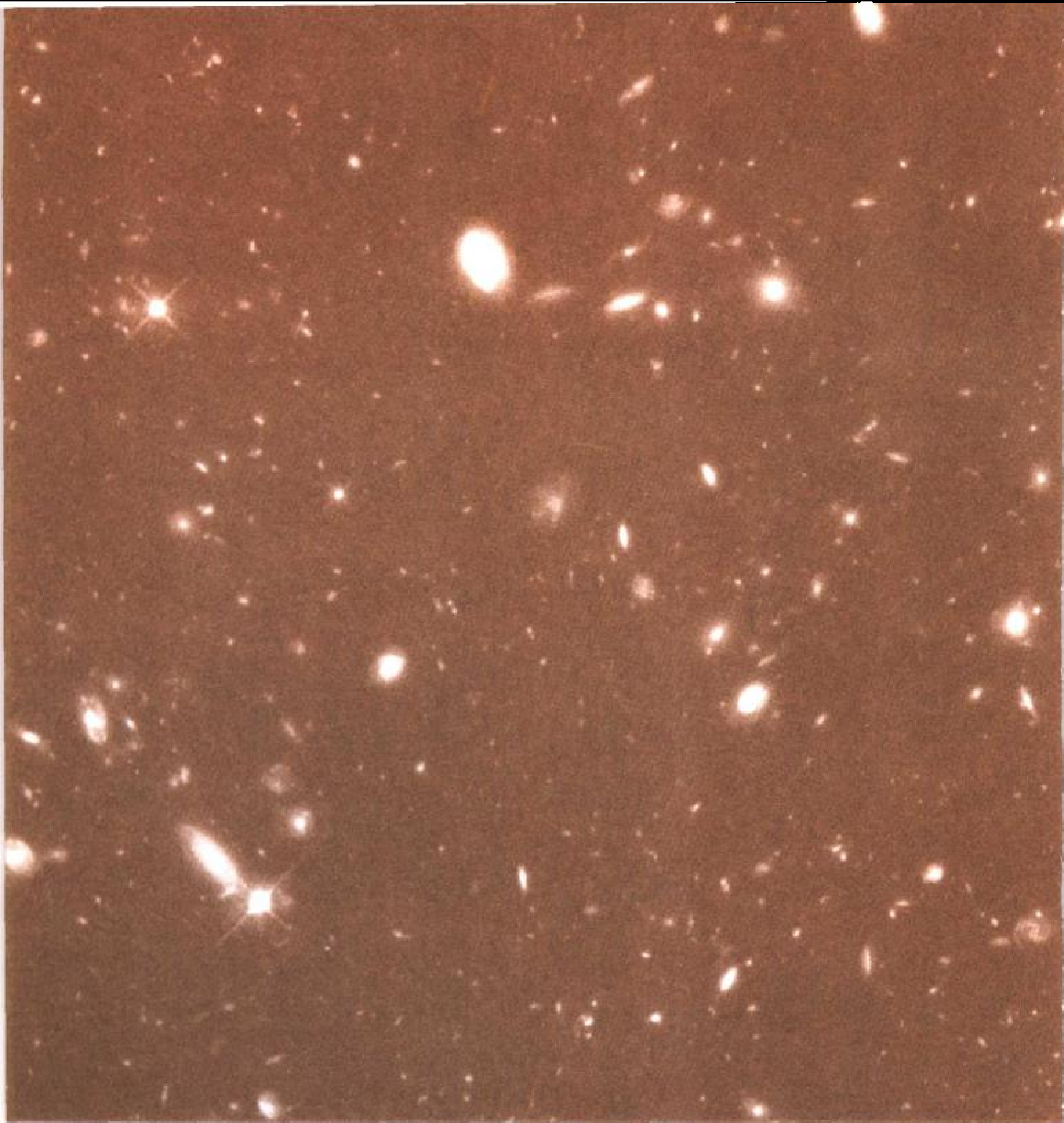
50





角度法观星也是这个原理，星图表明星球之间的角距，即从地球上观察其它星球之间的距离时的角度。无论我们处于地球上的任何位置和任何不同的观察点，我们观察到其他星球之间总是处于同样的距离，这是由于我们与这些星球之间有着极大的、甚至是难以想像的距离。这和我们举的旗杆间距离的例子是不同的，旗杆与你的距离近，你只要稍微走一点点路，就能看到两个旗杆对你的角度变化很大，但是星星离我们很远，同如此巨大的距离相比，我们地球上从一点到另一点移动的距离就显得微不足道了，因而我们就很容易忽视它。

如果在这种情况下，我们认为这些不同的角距是绝对的就大错特错了，这些角距也是相对的。如果我们将观察点所处的范围扩大到像地球绕太阳旋转的轨道这样大的空间，那么从不同的观察点所观察到的结果，其变化就相当可观了。也就是说，如果我们从地球移动到太阳，可能就能稍微明显地看到星星之间的



角度变化。这一变化还不是非常显著的。那么我们不
妨说得更远一些，如果我们把观察点移到另一个星球
上，比如说，移到天狼星上，情景就会彻底改变。这



时所观察的角度都将和原来的观察角度绝然不同了。而且我们还会发现，那些远离我们的星球之间的距离，有些比我们从地球上观测到的它们之间的距离近了，而有些星球之间的距离则更远了。

我们举上面这些例子是为了说明，相对是一个多么重要的概念，很多东西并非由你的眼睛看到就能确定的。一个东西真实情况是什么样子的，我们怎么回答“左”和“右”，“上”和“下”，星星离我们近和远这些问题，都必须先明确我们所在的位置，所处的环境，所看的角度，甚至我们所处的时间。

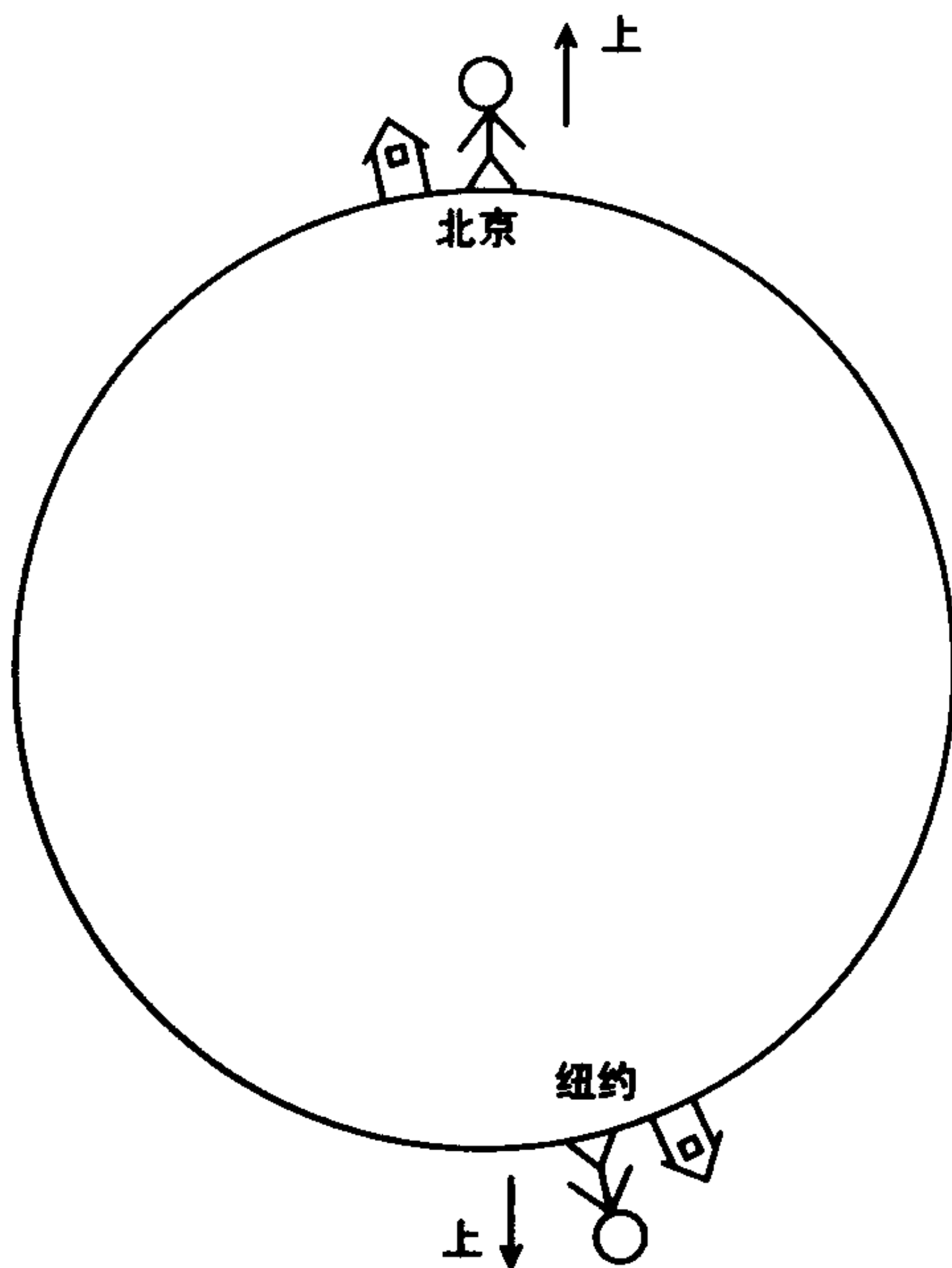
好了，我们再说得深入一点。

我们常说“上”和“下”。那么，这两个概念是绝对的还是相对的呢？不同的时代，人们对这一问题会给出不同的回答。当人类还处在不知道我们的地球是圆的，而把它设想为一个扁平的锅饼似的东西的时代，垂直方向被认为是一个绝对的概念。那时人们设想，在地球表面的任何一点上，垂直方向总是相同的，因



而也就把“上”和“下”说成是绝对的是很自然的事了。

后来，当人们发现地球是圆的，于是“垂直是绝对的”这一概念也就自行淘汰了。



的确，由于地球是圆的，垂直线的方向实质上是由这条垂直线通过的地球表面某一点的位置而定。处



于地球的不同点，垂直方向也将不同。自然，“上”和“下”这两个概念因此而失去任何绝对意义。

我们再深入一点，任何一句话都有意义吗？即使我们以严格的语法规则将几个词组合起来，这种组合的结果也可能是毫无意义的。

例如我们随便说一句话：“牛是吃草的”，这话是对的，因为这是常识，那么我们再说一句：“牛是吃肉的”，那么我们就要想一想，如果我们根本没见过牛，那么这话我们可能就无法判断真假，那么我们再说：“牛是充实的。”这一句话在语法规则上是没有错误的，但是这话描述的结果是毫无意义的，甚至根本是荒谬的。

现在你明白了，不是所有的荒谬都是显而易见的，情况往往是这样：一种初看起来很有道理的说法，经过仔细研究之后，就会发现是错误的甚至是毫无意义的。

在历史上，这种类似“牛是充实的”的话实在比比



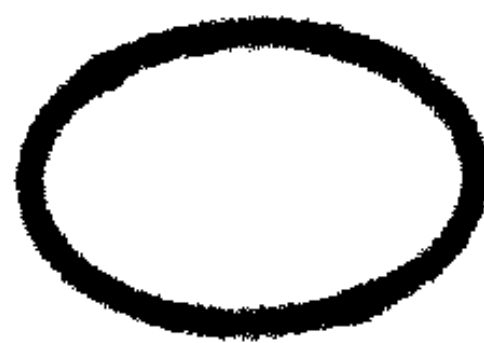
皆是，但是并不是所有的情况都能展示它有意义和真实的一面。

我们由历史得知，人类并不是很容易就认识到“上”和“下”的相对性。如果人们对日常生活中经历的相对现象没有明确的认识，就很容易将某些纯粹主观的感觉，认为是普遍真理或一般规律(关于“左”和“右”的关系就是这样)。

让我们再回顾一下历史。反对地球是圆的这一事实的某些谬论是从中世纪流传下来的。那时有人提出这样的质疑：如果说地球是圆的，人们怎么能倒着身体走路呢？

这种说法显然是错误的，因为他忽略了垂直方向的相对性，而垂直方向的相对性是基于地球是圆的这一客观真理。

如果我们认识不到垂直方向的相对性，而把它看作是绝对的，那么，在北京的人就会认为在纽约的人都是倒着身体走路的；同样，在纽约的人也会认为在



北京的人是倒着身体走路的。这样说是毫不矛盾的；因为垂直方向实际上并不是绝对的概念，而是相对的概念。只有我们涉及到地球表面上距离相当远的两点时，如北京和纽约两地，我们才会感到垂直方向的相对性的真正意义。另一方面，如果我们把相隔很近的两点(比如北京的两幢房子)加以考虑的话，我们就有理由说，所有同这两幢房子分别垂直的线是相互平行的。在这种情况下，垂直就是“绝对”的了。

上述情况表明，在我们地球上，只有当涉及到整个地球表面积这么大的区域时，使用绝对垂直这一概念，才会导致荒谬和矛盾。

上述情况的讨论结果又表明，我们在日常生活中使用的很多概念都是相对的。这些例子也表明，只有我们规定出具体的观察条件，这些概念才有意义。



第二节：空间是相对的

正

如我们在上一节介绍的那样，人们在言谈中，总是喜欢运用绝对的概念，但实

际上这种概念是没有意义的。同样的道理，宇宙空间的位置，这一概念是相对的，当我们谈论一个物体在宇宙空间的位置时，我们的言下之意总是指该物体与另外一些物体的相对位置。如果没有其它物体，这种说法是没有什么意义的。

例如，当我们说：“有两颗星球在天空中重合”，这个说法同样包含着相对意义。我们只有具体说明这个现象是从地球上观察到的，这种说法才有意义。

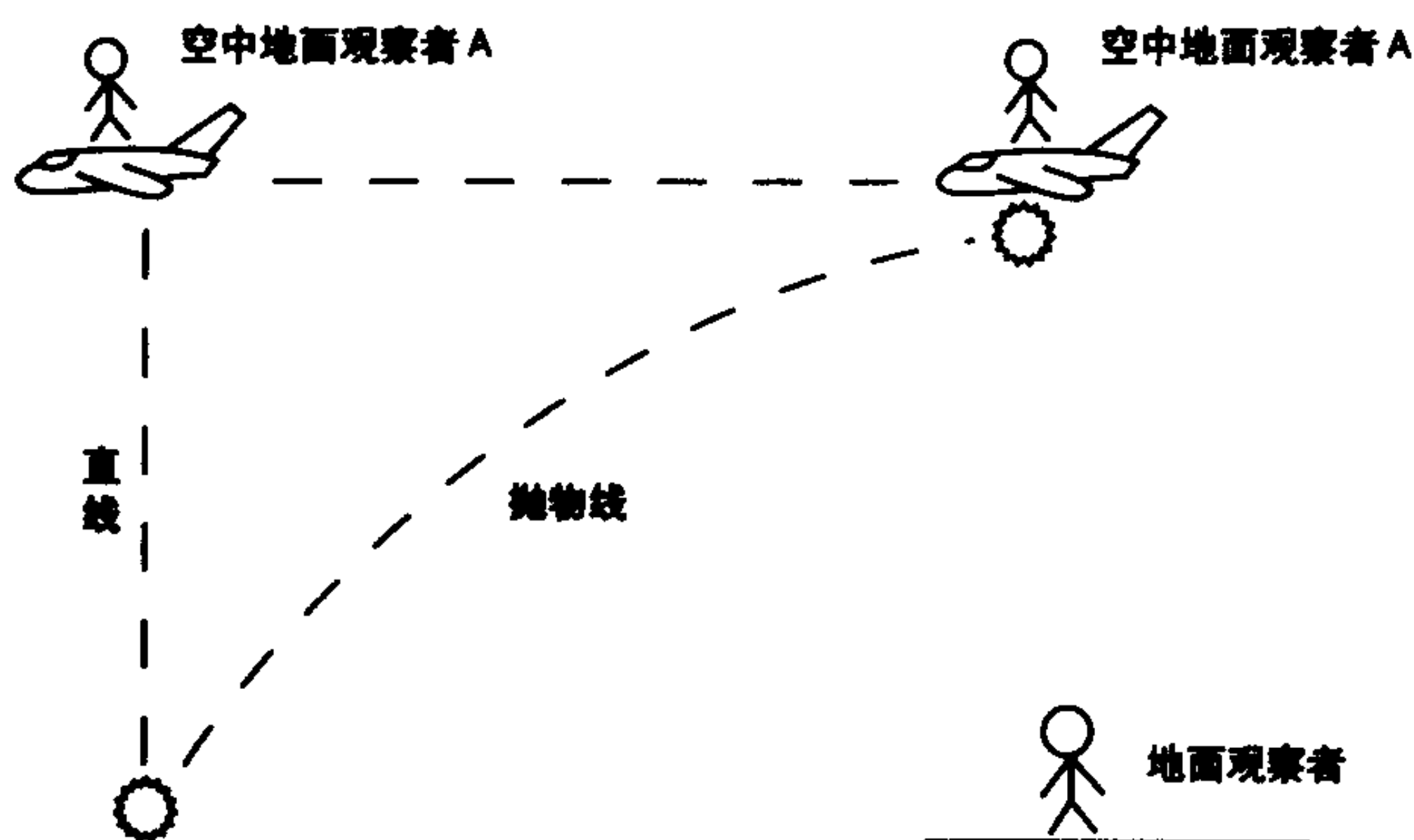
随之而来的问题是：物体在空间的移动。这一概念同样也是相对的。如果我们说，某一物体移动了，我们是特指它与其他物体的相对位置改变了。如果我



们从不同的两个位置来观察同一物体的运动，我们会发现这一物体有着不同的运动方式。

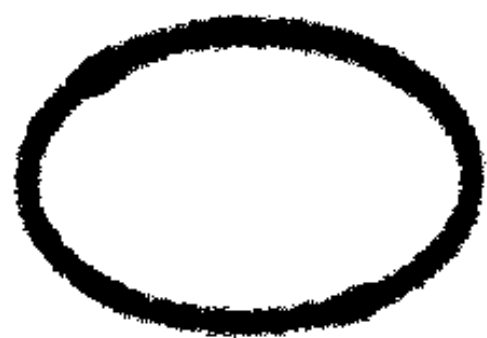
例如，一个人从正在飞行的飞机上抛下来一块石头，对这个人来说，石头是沿着直线落向地面的，但对站在地球上的观察者来说，则是一条抛物线。

59



那么，这块石头究竟是怎么运动的呢？这样的问题其实没有多少实际意义。

一个物体沿着抛物线运动的几何形状同样也是相



对的。这个道理和古诗中描写从不同角度观看庐山一样：“横看成岭侧成峰，远近高低各不同”。

外力能够影响物体的运动。对于这种外力进行深入的观察和研究，我们就会对这一现象有一个全新的认识。

60

假设在我们面前，有一个不受任何外力作用的物体。由于我们的观察点不同，这一物体就会以完全不同的方式运动。例如我们和这个物体在一起，那么这个物体对我们是静止的，可是如果我们从一列运动的火车上来看，这个物体又是运动的。

十分明显，当物体处于静止状态，对于观察者来说，自然是最适宜的。但是根据我们的相对概念，我们必须选择一个观察角度才能说明一个物体是静止的还是运动的。所以如果我们想说明什么是“静止”我们就陷入了一个困境之中。好在我们可以从另外一个角度给“静止”下个定义，注意，我们给“静止”下定义的时候我们是“选择”了一种方法来下定义，下这个定义



的目的是为了说明问题比较方便，这里你必须调整你的脑筋，也就是说：你要抛弃你现在脑海中根据物体是否运动而判断物体是否静止的方法，因为我们根本没有办法根据物体是否运动来给静止下一个定义！我们给静止下的定义和运动无关，我们不考虑一个物体相对于其他物体的运动情况，给静止状态下一个定义：一个不受任何外力作用的物体处于“静止”状态。

在我们的定义中，“静止”已经是一个完全新的概念了。

好了，我们确定了“静止”后，就可以谈论运动了，运动和静止都是相对来说的。要说明一个物体的运动情况，必须选定另一物体作参照，我们现在应该已经十分明白根据“相对”的原理，我们必须选择一个观察点，或者观察角度，或者观察位置，才能谈论一个物体的运动情况，这种用作参照来说明其他物体运动情况和位置的物体，通常叫做参照物体，也叫参照系。



比如我们谈一列运动的火车，我们如果站在地上谈，那么大地就是我们选择的观察位置，我们看到火车在运动，是因为我们选择了大地作为参照系的原因。如果我们站在火车上，选择火车作为参照系，那么我们就说火车没有运动，注意，我们小心地不使用“静止”这个词，因为这个词已经被我们用别的方法来定义了。

现在我们越来越接近我们要谈论的主题了：经典物理学和相对论对时间、空间、位置、运动所持有的不同意见和它们之间的区别。我们已经知道，运动和静止都是相对而言的。但是，经典物理学认为存在着“绝对静止状态”。为了得到这样的状态，设想使一个物体尽可能远离那些可能作用于它的其他物体，作为参照系来观察和研究运动的特性。我们把这样的一个参照系叫做“惯性系”。如果在另一参照系里观察到的物体运动与我们在惯性系里观察到的物体运动方式不同，那么，我们就有理由说，那个参照系本身是运动

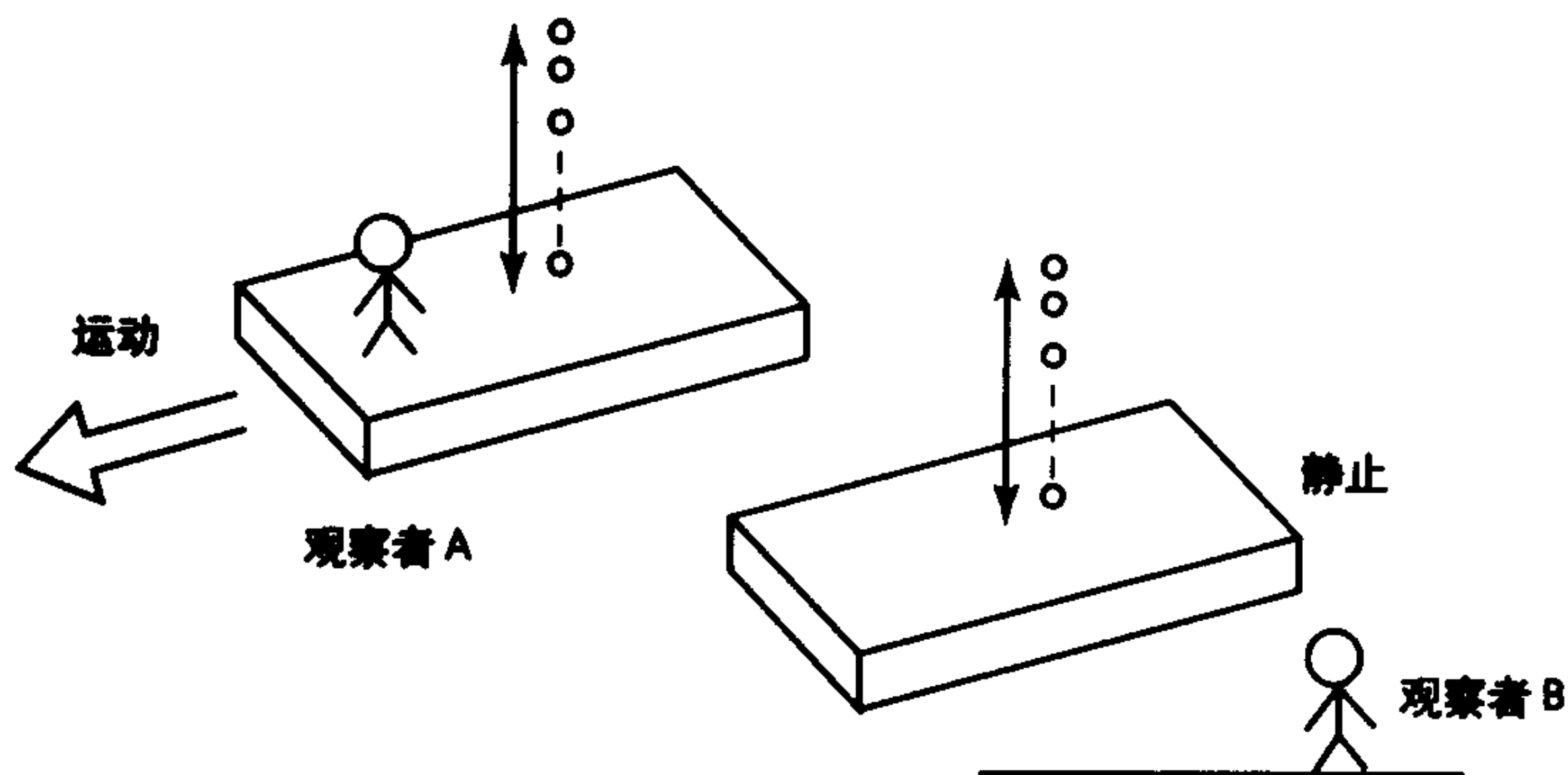


的。

假如当一个参照系由于外力的作用而运动，在这个参照系里物体的运动规律会发生改变吗？

要回答这个问题，现在让我们坐上一列作匀速直线运动的火车。如果你向空中抛一个球，你的手仍在原处不动，这个球仍然会落到你的手上，并不会因为火车的运动而斜落到别处。这种情况与在静止火车上观察到的情况是相同的。

63





当然，根据常识，当火车的速度有增减时，情况就不一样了。如果作匀速直线运动的物体改变方向，我们也会马上感觉到。火车突然向右转弯，车上的人会向左倾，如果突然向左转弯呢？车上的人就会向右倾。这段话涉及到了非匀速直线运动的情况，它是广义相对论讨论的事情，我们暂时搁置这个话题。

总之，我们可以作下面的结论：一个做匀速直线运动的参照系，同一个惯性系(处于静止状态的参照系)相比较，我们很难发现在他们中的物体运动情形有什么不同。但是，一旦运动着的参照系的运动有所改变(加速、减速或者改变方向)，这种变化立即就会对其中的物体产生作用。

前面我们由实践证实了一个做匀速直线运动的参照系，对其中的物体并不会产生任何影响。这一令人惊异的事实，迫使我们必须修正我们对静止状态这一概念的解释。这就是静止状态与匀速直线运动状态并无不同。因此可以认为：相对于一个惯性系而作匀速



直线运动的物体是处于静止状态的。这就告诉我们，绝对静止状态是不存在的。

但另一方面，却存在着无数各种不同的“静止状态”。这就是无数相互相对作匀速直线运动的、处于“静止状态”的参照系，只是其运动速度不同罢了。

所以，静止状态是相对的，而不是绝对的。既然静止状态是相对的，那么每当我们观察某一物体时，必须指出，该物体是相对于哪一物体做匀速直线运动。因而我们不能把运动作为一个绝对的概念。

至此，我们已经非常明白运动和静止与相对性的概念了，爱因斯坦就是想通了这些道理后，提出了狭义相对论的基本原理，这就是狭义相对论描述的自然界的一条重要规律：在两个处于相对匀速直线运动的参照系里，物体的运动规律是相同的。这一规律就是狭义相对论的相对性原理。

运动的相对性原理表明：一个不受外力作用的物体，可以处于静止状态，或者处于匀速直线运动状



态。物理学家把这种现象叫做惯性定律。

但是在我们的日常生活中，这一定律往往被掩藏在某些现象背后，只是我们不能直接而明显地认识它。根据惯性定律，一个处于匀速直线运动状态的物体，甚至在没有外力作用的情况下，它应永远保持其运动状态。但是我们的观察表明，如果一个物体不受外力的作用，它应该永远处于静止的状态。解释这个谜的关键在于这样一个事实：通常我们看到的物体，都受着某种外力的作用，这就是摩擦力。摩擦力破坏了观察惯性定律所需要的条件，这个条件就是必须没有任何作用于物体的外力。

爱因斯坦狭义相对论的运动相对性原理发现是人类最伟大的发现之一。没有这一原理的发现，物理学根本不可能发展到今天的情况。

根据运动的相对性原理，如果并不指出某一物体是相对于某一参照系，而只是说，该物体以一定速度作匀速直线运动，那么这就是一个没有意义的概念。



第三节：光速不变

根

据上节的相对性原理，任何东西的运动状态描述都是相对的，于是我们发现，

67

速度也是一个相对的概念。如果从不同的参照系来观察同一物体的运动速度，就会得出不同的结果。然而速度的每一种变化，无论是由加速、减速或者方向改变而引起的变化，从意义上却都是绝对的，而并不因我们观察时所处的不同参照系而有所不同。

我们已经讨论了运动的相对性以及可能有无数个惯性系的存在，在这些惯性系里，物体运动的规律都是相同的。但是，还有另外一种运动，乍看起来同我们建立的原理是矛盾的。这就是光的传播。

光的传播速度是每秒30万公里，这一巨大的速度对于我们来说是难以想像的。这是因为我们通常熟悉

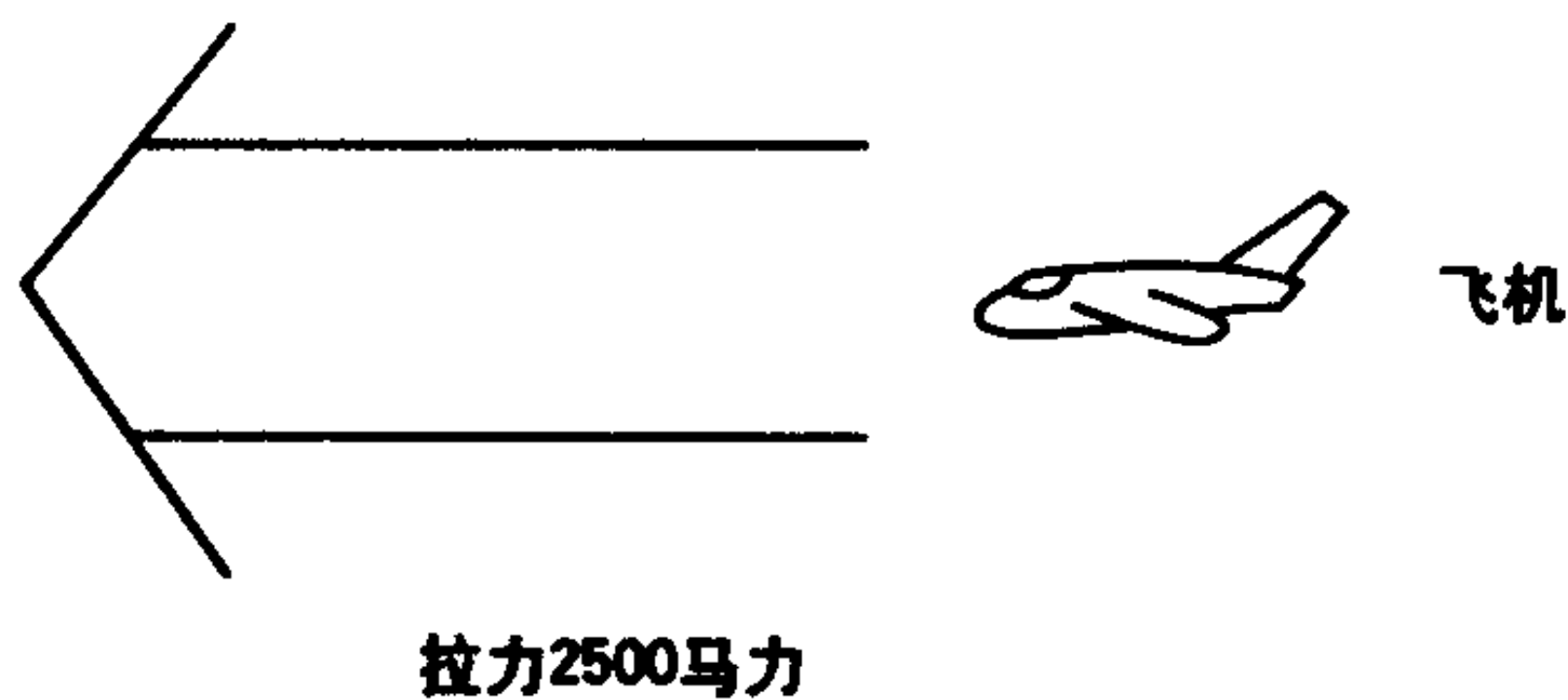
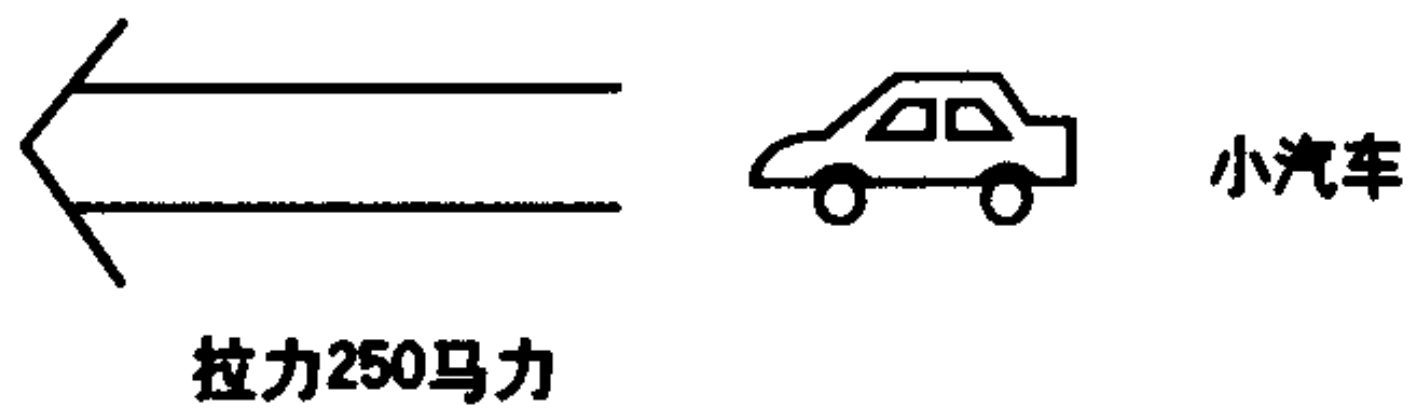
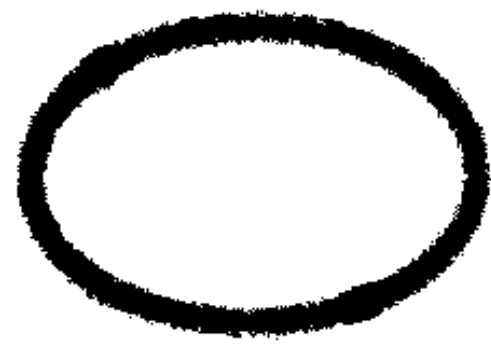


的速度要比光速小得多，他们之间的差异非常悬殊。例如，在我们知道的与之有关的物体运动中，地球绕太阳旋转的速度是很大的，但尽管如此，地球旋转的速度也只不过是每秒30公里而已。

光传播的巨大速度，其本身也不是什么奇特的现象，但令人惊奇的是光速的永恒不变性。

我们能够人为地加大或者减低一个物体的运动速度，甚至可以增减枪弹的射速。我们只需要在子弹前方，放置一个沙箱，子弹穿破沙箱后，其速度就会减低。同样，我们如果想驱动不同大小和重量的汽车，为使他们达到相同的加速度，必须采用不同功率的发动机，越大的汽车需要用的发动机也就越强劲。

但是，我们遇到一个困难，光似乎并不遵守这个规定。光传播时，让我们在一束光线通过的途中，放置一个玻璃盘子。因为光通过玻璃的速度，要比在真空中传播的速度小。按常理说，这样一来，这束光传播的速度就会降低，但是，光线通过玻璃以后，它又



恢复每秒30万公里的速度。

子弹的速度主要由于枪内的构造和弹药的特性来决定。而对于光来说，不管是什么光源，光的速度总是相同的、不变的。

由此我们知道，光在真空中的传播有其非常重要的特性，即光速不可能加大或者减小。



光在真空中的传播特性，同运动的相对性原理之间似乎产生了矛盾。

设想有一列以每秒24万公里飞驰的火车，我们乘上这列火车的第一节车厢，在最后一节车厢里同时打开一盏电灯。这时测量电灯光从车厢一端向另一端传播所需要的时间，我们很容易推断出一种“奇特”的现象。

相对于每秒24万公里的火车来说，光仅以每秒30万-24万=6万公里的速度传播。这似乎是光必须追赶第一节车厢。如果，位置相反，我们在火车的第一节车厢安置一盏电灯，并测量出光到达尾节车厢所需的时间，这时的速度就是24万+30万=54万公里。

于是在一列运动的火车上看起来，光传播的方向不同，其速度也不相同。而在一列静止的火车上，光传播的方向不同，速度却是相同的。

子弹运动的情况完全不同。假如在运动的火车上打枪，不管子弹运动的方向同火车运动的方向相同还



是相反，相对于火车子弹的速度总是不变的。

事实是这样的：子弹的速度是由枪的射速决定的，而光的速度却并不会因为灯泡的运动情况而改变。

由此我们似乎可以得出这样的结论：光的传播速度同运动的相对性原理相矛盾。相对于运动的或静止的车厢，子弹的射速都是相同的。而在一系列以每秒24万公里的速度飞驰的火车上，光传播的方向同火车运动方向相同时，光的速度是在静止火车上的1/5。而当光传播的方向同火车运动方向相反时，光的速度是在静止火车上的1.8 倍。

71

这同我们在上一节所介绍的相对性原理是完全矛盾的！

面对这一矛盾怎么办呢？在提出这一情况的看法和意见之前，先让我们考虑下面的这样一个情况：光的传播同运动的相对性之间的矛盾完全是来自人们的主观臆造。必须承认，这一主观臆造在某种情况下，



还是很有说服力的。但是，如果我们仅仅相信主观推断，就会成为那些试图从脑袋里生成自然规律的古代哲学家。按照这样的方法去解释世界，有朝一日，客观世界将成为一个面目全非的东西。

实验是一切物理理论的最高鉴定者。因而我们不应把自己束缚在空泛的议论与想像之中，因而必须投入到实验的实践中去。实验将会表明，在这种情况下，光实际是如何传播的。

我们的实验将因为这样的事实变得比较方便：我们自己生活的地球就是一个运动的物体。地球绕着太阳转，它的运动不是直线的，因而相对于任何惯性系，它不可能处于恒久的静止状态。

与一个参照系相对而言，地球在二月是静止不动的。但到了七月，地球又肯定是处于运动之中了。这是因为地球绕太阳旋转的方向改变了。实际上，我们在地球上研究光的传播，是在一个以每秒30公里的速度运动着的物体上进行的，这一条件对我们的研究起



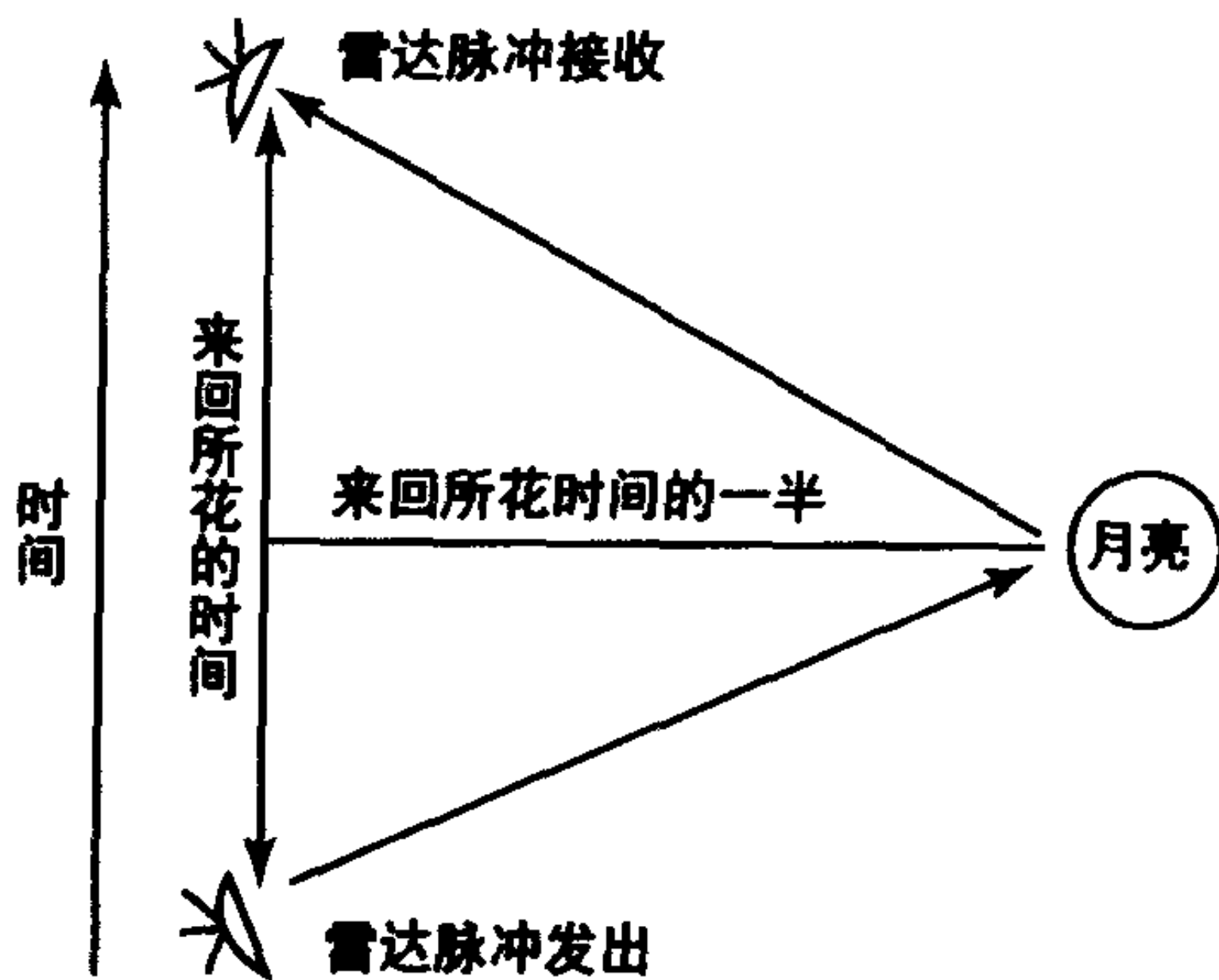
着不可忽视的影响。

前面我们讨论过光在一列运动中的火车上传播的情形。那么我们的地球是否和这一运动中的火车一样呢？我们曾设想，那列火车作匀速直线运动，而地球却是沿着圆形轨道运动的。尽管如此，我们还是可以把地球看作是做匀速直线运动。从观察的观点考虑，这其中存在误差，但这一误差是极其微小的，甚至小得很难观测出来。

73

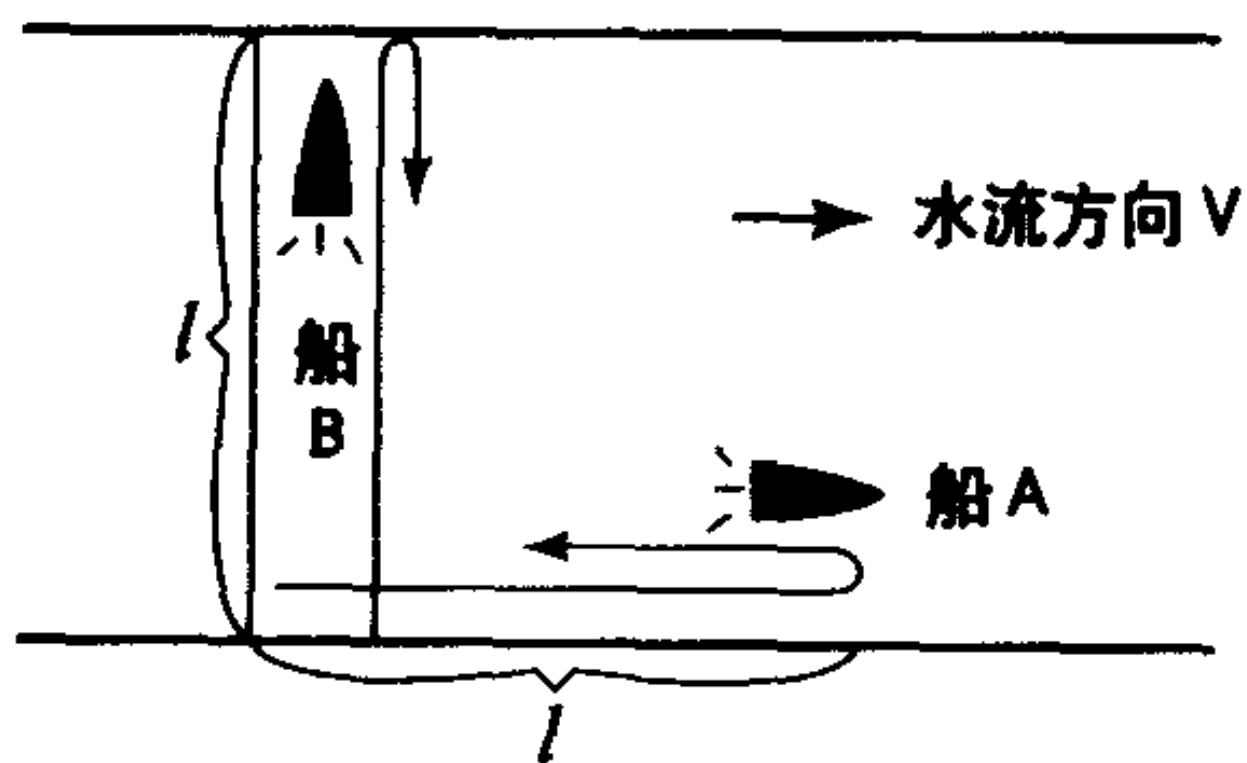
既然我们把地球比作火车，我们自然会想到：光在地球上的传播情形应该和光在火车上的传播情形相同，即光沿不同的方向传播，其速度不同。

一八八一年，美国实验物理学家A·迈克尔逊作了关于上述问题的实验。A·迈克尔逊以高度的准确性测量了光沿着不同方向传播的速度数值。为了探测预想中的微小差别，A·迈克尔逊使用了非常精确的实验设备，他的实验精确性很高，他测量出来的速度差别比预想中的差别要小得多。



迈克尔逊实验的原理可以用两条船的竞赛来比喻，两船的速度是 C ，河水以恒定速度 V 流动。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。每条船行驶的距离是河宽的二倍。按照平面几何，B 船将获胜。

迈克尔逊实验里， 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。要弄清这个结果，要么得设想地球是完全静止在以太中，要么以太跟本就不存在。





A·迈克尔逊的实验，以后在不同的条件下又做过多次。他的实验得到了出乎预料的结果。在一个运动着的参照系里，光的传播情形同我们在前面推想的恰恰相反。A·迈克尔逊发现，在地球上，光向任何方向传播，其速度都是相同的、不变的。在这一意义上，光的传播使我们联想到子弹的飞行。前面我们曾经设想，在一列运动中的火车上，子弹运动同火车的运动无关。同车厢相对而言，子弹向任何方向运动，其前进速度是相同的。

75

于是，A·迈克尔逊的实验证明：同我们的推想恰恰相反，光的传播同运动的相对性原理并不矛盾，而是完全符合运动的相对性原理。

我们已经摆脱了光传播的规律同相对性原理之间令人不快的矛盾。当然，这种矛盾是由于我们错误的推想而造成的，而不是真正存在着矛盾。为什么会犯这样的错误呢？

从一八八一年到一九零五年，几乎经历了四分之



一世纪，物理学家们为了这个问题绞尽脑汁。但是他们对这一问题的一切解释，都不可避免地导致理论与实践之间的新的矛盾。在相继出现的各种解释中，一切无视A·迈克尔逊实验所取得的意想不到的结果、而坚持相反观点的，都将归于失败。

76

现在，不妨让我们总结一下。

A·迈克尔逊的实验，进一步证实运动的相对性原理不仅适用于一般物体的运动，而且也是用于光的传播，因而也适用于一切自然现象。

我们已经注意到，速度的相对性直接源于运动的相对性这一理论。相对于运动中的不同参照系的物体，其运动速度不同。但是，每秒30万公里的光速，在任何参照系里都是相同的，因此光速是绝对的，而不是相对的。



第四节：时间的相对性

乍看起来，似乎我们在讨论一个纯粹逻辑上的矛盾。光沿任何方向传播而速度不变，充分证实了相对论的正确性，而同时，光速本身则是相对的。

77

让我们回顾一下中世纪人们是如何对待地球是圆的这一事实。因为中世纪的人们认为，如果地球是圆的，一切物体都会从地球表面“滚落”下去。对于他们来说，地球是圆的这一概念是同地心引力相矛盾的。但是我们完全知道，这里根本不存任何矛盾。道理很简单，因为“上”和“下”这两个概念是相对的，而不是绝对的。

光的传播同样如此。

要在运动的相对性和绝对性之间寻找逻辑上的矛



盾是徒然的，也是毫无意义的。当我们提出另外一些假定，矛盾就出现了。这就像中世纪的人们认为“上”和“下”是绝对的概念，而拒绝承认地球是圆的一样。他们这种荒诞的概念源于实践经验的缺乏。那时，人们很少有长途旅行的可能。他们只能了解地球表面很小区域的一些情况。显然，同样的情况也出现在我们面前：由于我们的实践经验不足，只是我们把一些相对的现象，误认为是绝对的。

这些现象是什么呢？

为了发现我们的错误，今后我们只能接受有实验证实而确定的那些正确的假想。

设想有一列长540万公里的火车，以每秒24万公里的速度作匀速直线运动。

假定在某一规定时刻，打开火车中部的一盏灯。再设想，当灯光达到火车首尾的两个车厢时，车厢的门都立即自动打开。这时火车上的人将看到什么现象呢？

在回答这个问题时，我们只承认有实验而得到的数据。

在火车中间的人将看到下列现象：

根据麦克斯韦的实验，由于相对火车而言，光向任何方向传播的速度是相同的，即每秒30万公里。那么光在9秒后同时到达首尾两个车厢。首尾车厢的门也同时打开。

79

相对月台而言，光也以每秒30万公里的速度传播。但是，尾节车厢是迎着灯光运行的。所以灯光是在 $270\text{万}/(30\text{万}+24\text{万})=5$ 秒后与尾车厢相遇。而对首节车厢来说，灯光是在追着它传播的。所以灯光需在45秒之后才能到达首节车厢。

对于月台的人来说，首尾两节车厢的门似乎是在不同的时刻打开的，即尾节车厢的门先打开，而首节车厢的门则是在40秒之后才打开。

可是，对于在火车上的人来说，首尾两节车厢的门的打开是完全相同的，而对月台上的人来说，首尾



两门的打开却相隔40秒。这显然是不对的!

人们对这一现象的感觉和理解过程中产生了困难。以常识为依据来否定这一新的现象,当然是很自然的事。而麦克斯韦的实验获得的出乎意料的结果,为物理学家们提供了新的事实,并促使他们不顾“常识”的干扰,去进一步观测和探讨诸如两个事物的同时性这类明显而平凡的概念。

以前人们认为,从任何角度来看,两个同时发生的现象必然是同时的。然而实验证明这是错误的。因为这个结论只是用于相对静止的参照系。

假定有人问我们,两个现象是否真正同时发生,而不涉及任何处于某种状态的参照系。遗憾的是,这样的问题就像并不涉及任何观察点而问两颗行星是否真正处于一条直线上一样毫无意义。事实是这样的:同时性不仅决定于两个现象,而且决定于观察这两个现象时所出的参照系。就像两颗星球是否处于同一直线上,不仅决定于它们的方位,而且决定于观察它们



的点。

在相对论创立之前，绝对的时空观在物理学中占着统治地位。在时间方面，绝对的时空观认为：时间的量度与参照系的运动无关，也就是存在着与参照系无关的绝对时间。在空间方面，认为空间的量度同参照系的运动无关，也就是存在着同参照系无关的绝对空间。

81

但是，我们发现，时间和空间一样也是相对的，而不是绝对的。

所以，“在同一时间”这一概念，正与“在同一地点”一样，都是没有意义的概念。这就是说，必须对一个特定的参照系来论述时间说着空间。如上所述，对于在火车上的人来说，同时发生的两个事件，对于月台上的人来说，就不是同时的，除非我们讲的时间是相对于某一个参照系，否则，关于一个事件发生的时间的说法，就是没有意义的。

时间是相对的这一发现，从根本上改变了人们关



于自然界的观念。这一发现是人类理智战胜千百年习惯传统观念的伟大胜利，只有像地球是圆的这样的伟大发现才能与之相比。它是人类思想上罕见的革命性的变化。

时间的相对性这一发现，是二十世纪最伟大的物理学家爱因斯坦为人类科学做出的伟大贡献。一九零五年，德国的《物理学杂志》相继发表了这位年轻作者的五篇论文。这些论文，给整个物理学带来了翻天覆地的革命，并导致了现代物理学的建立。这时，爱因斯坦还只是一个26岁的青年。爱因斯坦的伟大发现，使他进入人类思想巨人的行列，成为像哥白尼、牛顿一样的人类科学史上的伟大的开路先锋。

时间的相对性理论与其一系列有关推论，通常被称为狭义相对论。

第二次世界大战前，飞机的速度远远落后于声速。今天，超音速飞机早已出现。无线电波以光的速度传播。那么，我们能否创造出“超光速”电讯设施来



传递信息呢？这是根本不可能的。

假如能够以无限大的速度传递信息，那么我们就能够建立这样的一种理论：任何两个事件的同时性是绝对的。

如果关于第一事件的无限快的信息与关于第二个事件的信息同时到达，我们可以说，这两个事件发生在同一时刻。这样，两个事件的同时性这一概念，就获得了绝对的特点，而不管与这一结论有关的参照系的运动情况如何。

83

但是，实验证明事件的绝对性是不可能的。由此，我们得出结论：信息的传递不可能是瞬时的。从空间一点传到另一点的信息传递速度，不可能大于某一极值，该极值即为速度的极限。

这一速度极限等于光速。

存在于宇宙的这一最高速的发现，是人类才智的最大胜利之一，也是人类实验能力的最大胜利之一。

相对论表明，最高速度的存在决定于物质的内在



本质。假定说，科学技术的发展，可以使我们得到比光速更大的速度，那就会产生像下面的说法一样荒唐可笑：在地球表面两万公里以外的地方并不存在任何点，但是，如果有人竟希望有朝一日，当地球上地形发生变迁的时候，在更遥远处发现地球上的新点，这显然是十分荒唐可笑的。

84

正由于光速是最大速度，因而才使光速在自然界中发挥如此特别的作用。光速或者可以超过其它一切现象的传播速度，或者至少同其他现象的速度相同。

假如太阳一分为二，形成两个星球，那么地球的运动自然也会发生变化。

十九世纪的物理学家们由于不了解自然界里存在一个最高速度，他们自然会设想：一旦太阳分裂成两个，地球的运动立刻会发生变化。但实际是，光从分裂后的太阳传到地球上尚需8分钟之久。这就是说，在太阳分裂8分钟之后，地球的运转才会开始发生变化。在这一时刻之前，地球人继续按原来的方式运



行。在太阳发生分裂后8分钟内，与太阳有关或发生在太阳上的任何现象，将不会对地球本身或者地球的运行产生任何影响。

信息传递的最高速度，当然不会排除建立两个现象的同时性的可能性。我们必须做到的，就是注意观察信息的时间滞差。这就是通常的做法。

建立同时性的方法，同这一观念的相对性是一致的。的确，为了减小时间的差别，我们必须将以光速传递的信息发生在两个地点之间的距离进行分割。



第五节：狭义相对论

假

定我们现在再次坐上爱因斯坦火车，在无限长的轨道上奔驰。在这条轨道上有

86

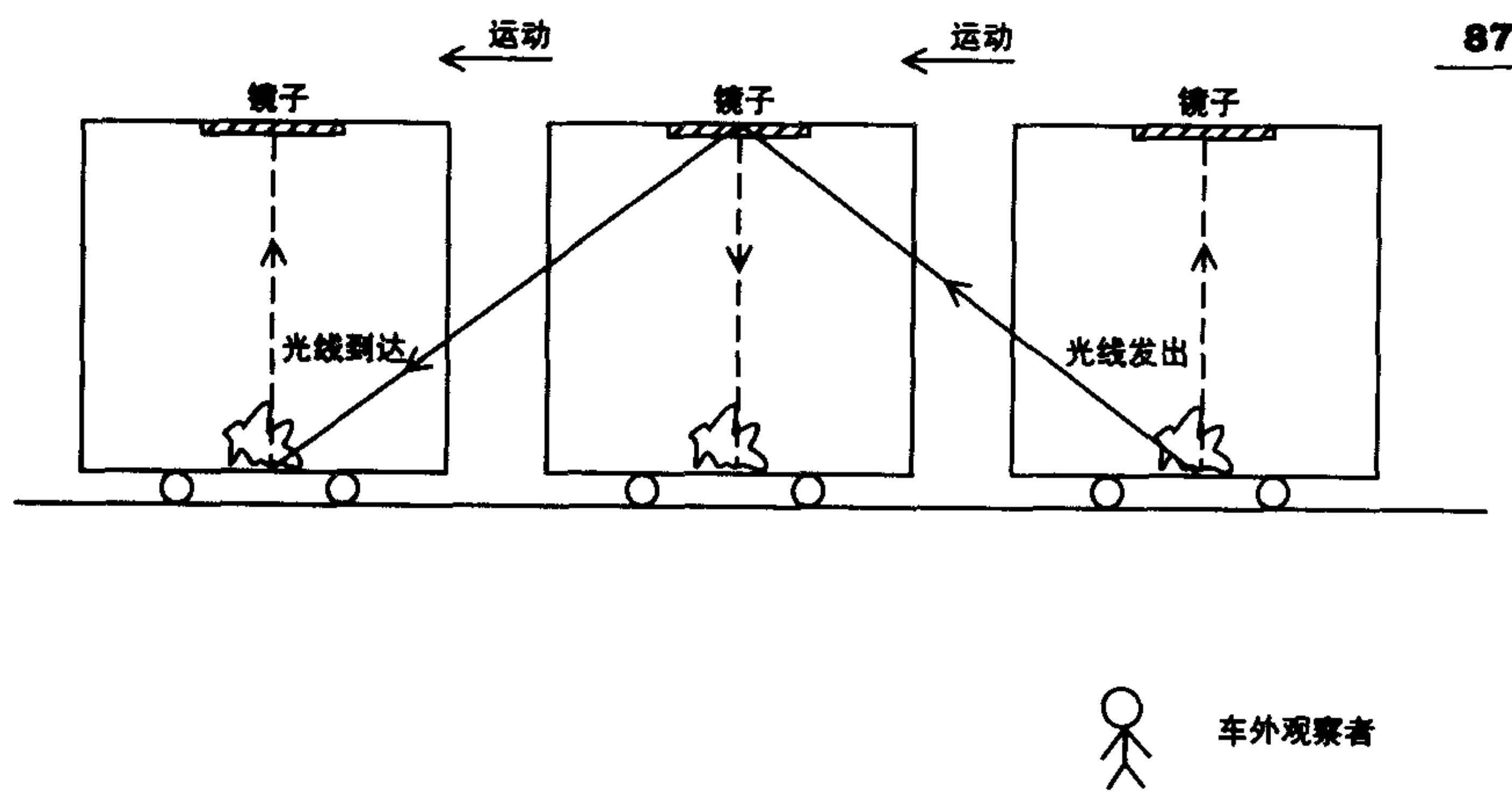
两个车站，它们之间的距离是864,000,000 公里。这列火车以每秒240,000 公里的速度前进，需要1小时跑完这段路。两个车站各有一只钟表。一位旅客在第一个车站上车时，按车站的钟对自己的表。当到达第二个车站时，他却吃惊地发现，他的手表慢了。

这是怎么回事呢？

为了弄清这个问题，让我们假定，这位旅客在车上点起一只火把，放置在车厢地板上。火把发出的光束很快到达车厢顶壁。在车厢顶壁与火把垂直处，有一面镜子，镜子又将光束反射回到火把上。这时旅客看到光束往返的路线是垂直的。但是，月台上的人看



到的情景却很不相同。月台上的观察者看到，在光束从火把到达镜子的过程中，由于火车的运动，光线的传播路线是向后倾斜的。在这一过程中，光束经过的路线是一个等腰三角形的两腰长的和。



通过这一事实使我们发现，月台上的人看到光束在这一过程中传播的距离是一个等腰三角形的两腰之和。而火车上的人看到光束传播的距离则仅仅等于这



个三角形高的二倍。显然，前者的长度大于后者。另一方面，我们知道，光速是一种绝对速度。对于火车上的人和月台上的人来说，光速当然都是相同的。于是我们就得出结论：从月台来看，光从射出到返回所经过的时间要比从火车上看经过的时间长。

88

从上面的事实我们很容易计算出这样的结果：从车站上经过了10秒钟，而火车上看仅仅经过了6秒钟。这就是说，根据车站的钟表，如果火车运行一小时到达另一车站，那么按照乘车人的手表，火车仅仅运行了36分钟。换句话说，乘车人的手表要比车站上的钟表每小时慢24分钟。

显而易见，这列火车的速度越快，时间滞差就越大。如果将火车的速度提高到接近光速，那么车站上一小时的时间，在火车上就能减小到极小。

由此我们得出结论：一切运行中的钟表比静止的钟表要慢。

这是否与我们提出问题所依据的相对论相矛盾

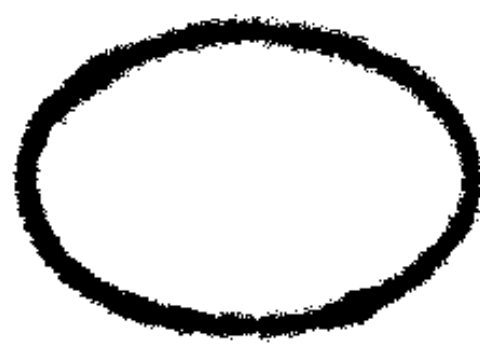


呢？这是否意味着最快的钟表就是处于绝对静止状态的呢？

不是。情况并不如此。因为火车上的钟表和车站上的钟表的快慢，是在完全不同的条件下进行比较的。实际上，这里有三个钟表，而不是两个。这位旅客是根据两个不同车站上的两个不同的钟表来校对他的手表的。相反，如果在这列火车的前后车厢都有一只钟表，当火车飞驰之际，旅客将车站钟表同前后车厢的两只钟表对照时，他就会发现车站钟表所表示的时间，总是落在后面。假定这列火车相对于车站作匀速直线运动，那么，就可以认为火车是静止的，而车站是运动的。自然界的规律对于他们来说都是相同的。

89

当一个观察者相对于它的手表处于静止状态时，他就会发现下列事实：相对于他处于运动状态的钟表，总是比他自己的表快；而且这些运动中的钟表运动的速度越快，它们所表示的时间就越快。



这一现象和下面的实例是一个道理：两个站在两根不同电线杆旁边的观察者，都从各自所处的位置来断定他们各自观察电线杆的角度要比对方的观察角度大。

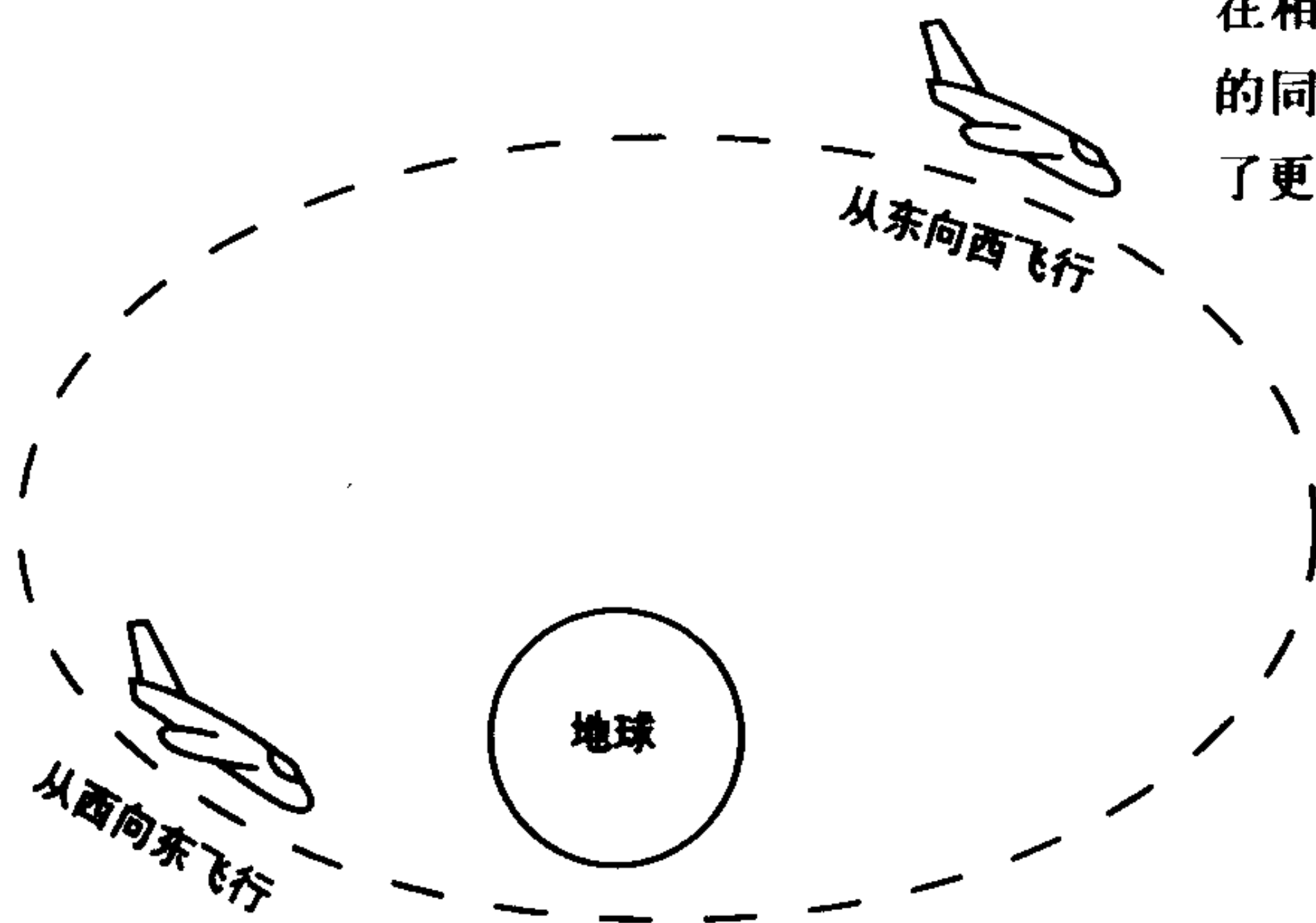
现在让我们假定，这辆爱因斯坦火车沿着一条圆形轨道，而不是直线轨道运行。火车经过一段时间的运行，就会回到它出发的地方。就像我们在前面讨论过的那样，这时乘车的人就会发现他的手表慢了。而且火车运行得越快，它的手表慢的就越多，如果不断增大火车的速度，直至火车运行速度增大到某一数值时，就可能出现这种情况：乘车人仅仅经过了一天的旅程(根据他自己的手表所表示的时间)回到他出发的车站，对于车站上的人实际上确实数年已经过去了。

在这一圆形轨道上旅行的过程中，只有两只钟表——火车上的钟表和出发车站上的钟表。

上面讨论的问题是否与相对论相矛盾呢？我们可否认为旅行者是处于静止状态，而出发时的车站则是

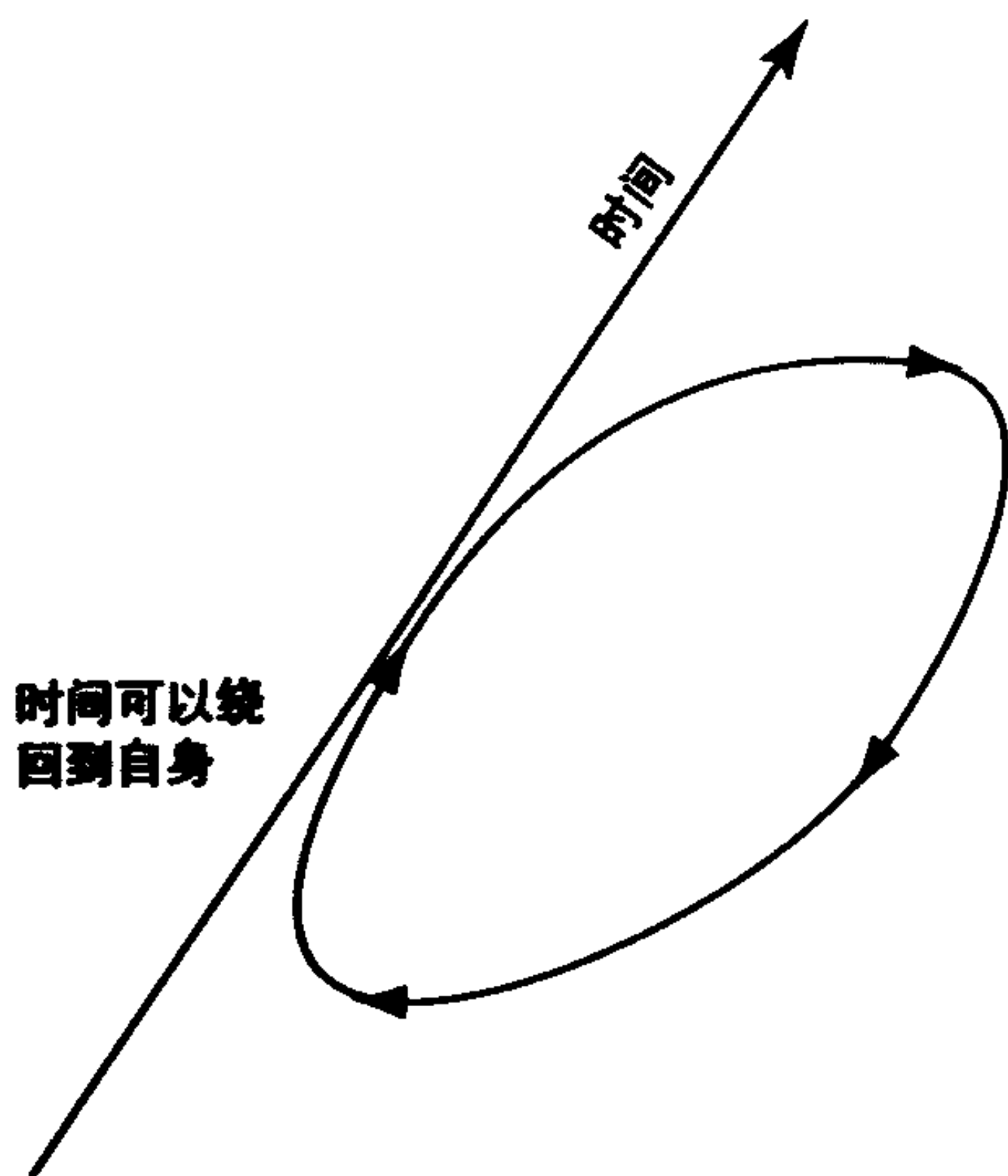


在向西飞行的
飞机上的钟表比它
在相反方向上飞行
的同样的钟表记录
了更多的时间。

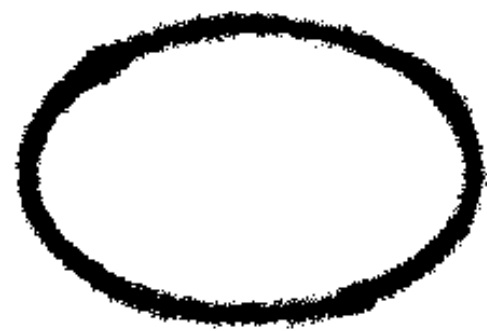


在向东飞行的飞机上的旅
客渡过的时间比在向西飞行的
飞机上的旅客少。

以爱因斯坦火车的速度沿圆形轨道运行呢？如果是这
样的话，我们就会得出这样的结论：车站上的人仅仅
经过了一天的时间，而火车上的旅行者则度过了数
年。这一结论是错误的。下面我们谈谈为什么是错误
的。



我们已经讨论过，只有当一个物体不受任何外力的作用时，才能认为这一物体是处于静止状态。正如我们已经知道的，两个静止的物体，可以是相互处于匀速直线运动中。这也就是说，两个相互处于匀速直线运动的物体是静止的物体。但是在圆形轨道飞驰的爱因斯坦火车上的钟表，却承受着离心力的作用，所以我们不能认为这只钟表是处于静止状态的。



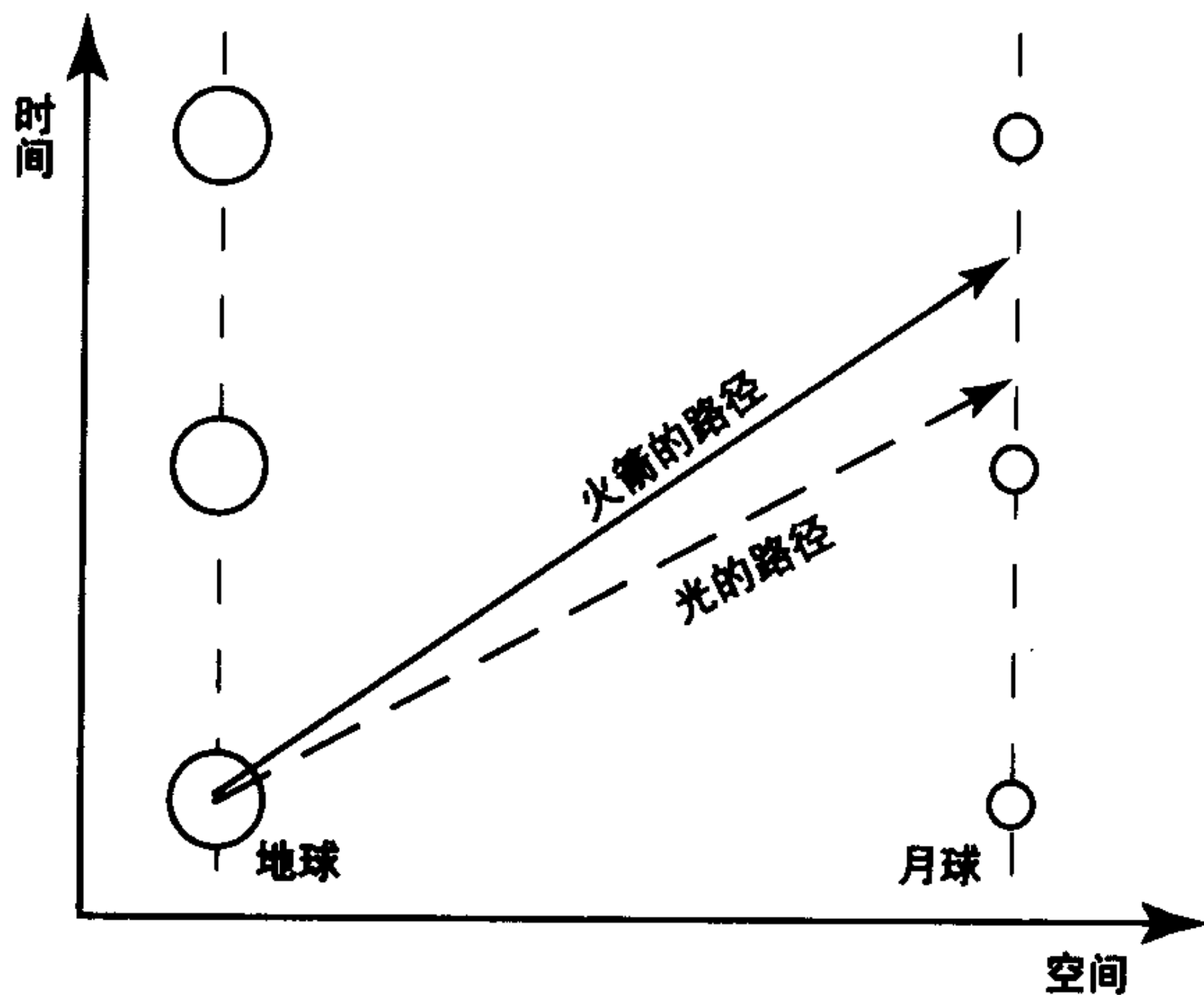
假如两个人在分别时，他们的表所指的时间是一致的，然后两人又相会了。处于静止不动或以匀速直线运动的人所携带的表就会快，因为这只表没有经受任何外力的作用。

设想我们乘上一列以接近光速飞驰的火车。在这列火车上，可以使我们进入将来，但不可能回到过去。为什么不能回到过去，也就是说，为什么不可能看到过去的事件重演呢？

93

狭义相对论告诉我们，物体运动的速度，只能接近光速，而不能超过光速。实际上人们还未发现过比光速更快的运动。例如，我们可以得到高速运动的电子，它们的速度可以接近光速，但从未发现超光速的电子。进入将来只不过从表面看是矛盾的，实际上这是相对论阐述的客观规律。

宇宙空间有很多离我们远达40光年的星球。我们已经知道，不可能有比光速更快的速度。因此可以得出这样的结论：我们要到达这样的一个星球上去，不



可能少于40年的时间。但是这样的一个推论是错误的，因为在做出这样一个推论时，没有考虑到运动中时间的收缩。

假定我们乘一艘飞船，以每秒24万公里的速度飞向距地球40光年的一个星球，需要50年才能到达。但是当我们乘上以如此高速飞行的飞船，时间将以10比6的比率收缩，于是我们就只需要30年，而不是50年

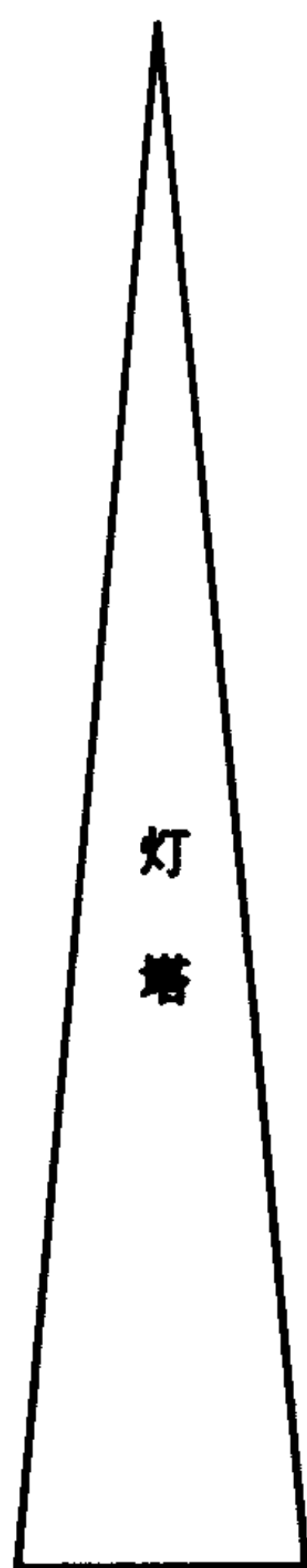


到达这个星球。我们可以尽量提高宇宙飞船的速度，以至将速度提高到接近光速，以便减少我们到达这一星球的飞行时间。从理论上讲，将飞行的速度提高到足够的程度，我们能够在一分钟之内到达这一星球，而且再返回地球。但是就在这同时，地球上已经过去了80年。

95

这样一来，从表面上看我们发现了一条延长人类寿命的途径，尽管一个人的年龄是以他自己实际经历的时间而定。所谓延长寿命，只不过是另外一些人的角度来看的。然而遗憾的是，如果我们对这一问题进行更深入的探讨，就会发现，所谓延长人类寿命这种前景只不过是虚妄的幻象而已。

首先，超越地球引力而进入任何可见宇宙领域后，人体不能适应那种长期加速度状态。要将速度提高到接近光速，需要相当长的时间。其次，人类无法承担星际旅行所需要消耗的能量。实际上，即使是宇宙飞船达到比光速还要小几万倍的第二宇宙速度所需



10:09 塔顶时间

10:03 塔底时间

要的能量已是非常巨大，而我们设想中的宇宙飞行所需要的巨大能量就可想而知了。

我们已经发现，时间并不是一个绝对概念。时间是相对的，而且必须根据观察

时间的参照系来确定某一具体时间。

现在我们来讨论空间。在讨论迈克尔逊实验之前，我们就已经发现空间是相对的，然而，我们仍然认为体积是物体的属性。物体的这一属性是不以观察



它的参照系而转移的。但是，相对论又使我们放弃这一信念。就像由于我们接触的速度总比光速小得多，因而产生了认为时间是绝对的这一偏见一样。

我们设想，那列爱因斯坦火车现在要通过一个24万公里长的车站月台。火车从月台一端到达另一端，按车站钟表需要10秒。但是按火车上乘客的手表，火车通过月台则只需6秒。所以乘客完全有理由得出这样的结论：月台不是24万公里长，而是24万乘以0.6，即14.4万公里长。

97

这里我们看到，从相对于月台处于静止的参照系来看，月台较长；而从相对于月台处于运动状态的参照系来看，则月台较短。由此可知，一切运动中的物体，沿运动方向而收缩。

但是这种收缩根本没有证明运动是绝对的：一旦我们从相对于一个物体处于静止的参照系来观察该物体时，这一物体就有其真实的体积。同样，火车上的乘客会发现月台收缩了。



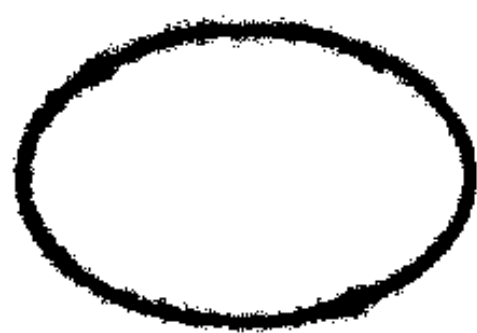
而在月台上的人则会认为这列爱因斯坦火车变短了。这种现象也并不是一种光幻觉。用任何测长仪器来测量，都会得到同样的结果。

同这一发现有关，现在必须纠正我们前面做出的关于爱因斯坦火车上前后两门打开时间的结论。当我们以月台上观察者的角度，来测算前后两门打开的时间时，我们假定运动中火车的长度与静止火车的长度是相同的。但实际上对于月台上的人来说，火车要短些。同样，根据车站钟表，打开前后门所经过的时间间隔，实际上等于24秒。而不是40秒。当然，这一纠正，对我们前面已经作过的那个结论，并没有实质性影响。

从长度的收缩，我们顺便谈一下标尺的收缩。

我们要问，飞船飞行的时候，飞船上的标尺和地球上的标尺是一样长吗？

我们已在前面讨论过，空间的量度与观察这一量度的参照系有关。所以，在飞船上的尺和地球上的尺



是不会一样的。通过火车相对于月台的长度问题的讨论，我们得知：沿运动方向固定在高速运动飞船上的尺，如果由地球上的人来观测，就比飞船上的人观测的长度短。至于长度收缩多少，是与飞船飞行的速度，也就是两个参照系之间的相对速度有关。

相反，固定在地球上的尺的长度，若由飞船上观察者来观测的话，则沿运动方向的长度不是伸长，也是缩短。

99

由此，我们得出结论：当一个物体对于某参照系是静止的时候，就这个参照系来看，物体长度最大。沿垂直于运动方向的长度则不发生变化。

这种长度收缩的现象是真实的吗？这是不容怀疑的。不但运动的物体沿运动的方向产生收缩，而且收缩遵循着一定规律。这些都已从实际现象中得到证实。我们平时看不到这种收缩现象，是由于在低速缓慢的运动中，这种现象是不显著的。例如，即使物体运动速度达到每秒3万公里，长度的收缩也不过是千



分之五。

但是当物体运动速度接近光速时，情况就不同了，这时候长度的收缩非常显著。静止的时候，一米长的尺，沿相对运动方向的长度就会收缩成几厘米。如果物体速度变得就等于光速，那么长度就会缩减成零。然而，这是不可能的。这一点也说明了光速是速度的最高限。一般物体的速度，无论如何也不会达到光速的。

100

如果在以每小时50公里的速度运行的火车上，一位乘客以每小时5公里的速度朝着车头方向行走。那么相对路轨而言，这位乘客的速度是多少？显然，他前进的速度是每小时55公里。这一回答是根据速度相加定理得出来的。而且我们认为，这一回答毫无疑问是正确的。

确实是这样的：火车一小时运行50公里，火车上的人又在这小时内行走了5公里。于是人一共走了55公里。但是，因为有一个最高速度的存在，所以使



速度相加定理不能普遍适用。比如说，爱因斯坦火车上的乘客以每秒10万公里的速度行进，那么相对路轨而言，它的速度就是每秒34万公里，但是由于这一速度超过了光速，所以这样的速度是根本不可能的。

于是我们通常运用的速度相加定理，不是在任何情况下都是精确无误的。它仅仅适用于比光速小得多的低速度。

101

在关于相对性原理的讨论中，经常要提出与各种传统观念相反的论点。速度相加定理，就是我们根据这种表面看来是合理的论点推导出的。根据这一定理，我们将火车在一小时内运行的距离，同乘车人在车上沿火车运行方向一小时内运行的距离相加。但是相对论告诉我们，这两个距离是不能相加的。

另外，要求得相对于车站乘车人的前进速度，必须按车站钟表计算出乘车人一小时前前进的距离。而要求得乘客在车上的速度，必须使用固定在这列火车上的钟表。我们已经知道，这两处的钟表所表示的时间



是大不相同的。

由此我们得出这样的结论：接近光速的高速度的相加方式，同我们所习惯的速度的相加方式是很不相同的，我们可以通过实验来观察这一速度相加现象。例如，可以通过观察光在流水上传播的速度，同光在静止中传播的速度与水流速度的和并不相同，而是小于后两者的和。这一发现也要归功于相对论。

102

假如两个速度相加，其中一个速度恰好是每秒30万公里，那么速度相加就会有一种非常特殊的情况出现。我们知道，光速具有永恒不变的特性，因而不必考虑观察这一速度的参照系的运动情况。假如我们将任何一个速度，同每秒30万公里的光速相加，仍会得到每秒30万公里的速度。

根据速度相加并不能普遍适用这一现象，我们可以作一简单的比较，来进一步说明这一现象。

我们知道，任何一个三角形三个内角的和等于两个直角(180度)。现在设想，在地球表面画一个三角



形，这个三角形三个内角的和就会大于两个直角。这是由于地球是圆的，因而这个三角形不是在一个平面上。仅当三角形的面积近于地球表面这样大的面积时，上面提到的两个三角形的不同才能被发现。

只有当我们讨论普通速度时，才能运用速度相加的一般原理。这就像测量地球表面的小块面积时，才能运用平面几何学的原理是同样的道理。



第六节：质量的相对性

104

在一般情况下，物体的质量不因静止或运动而有所变化。一个人在地上站着，质量是60公斤，当他乘上运动的火车，质量还是60公斤。这在低速世界当然是事实的。可是当这个人乘上高速运动的飞船的时候，它的质量却不是60公斤了，而是比60公斤要多。飞船的速度和光速越接近，人的质量变化就越显著。如果飞船速度达到光速，人的质量将变成无限大。当然这是不可能达到的。这也说明，一般物体的速度不可能达到光速。

现在我们进一步来讨论这一问题。

设想我们要使某一惯性物体以某一确定的速度运动，这就必须将一定的力作用于该物体。如果没有外力，比如摩擦力，来阻滞物体的运动，我们将能按需



要来加速物体运动的速度。我们发现，用一定大小的力加速不同物体的运动，使其达到所需要的运动速度，就必须用不同的时间。

为了排除摩擦力，我们设想，在宇宙空间有两个同样大的球体，一个用铅做成，另一个用木做成。现在用同样的力作用于这两个球体，直到将它们的运动速度增加达到每小时10公里。

105

显然，将一定的力作用于铅球的时间，比作用于木球的时间要长些。铅球的质量比木球的质量大。在恒力作用下，速度的加大是与力的作用时间成正比的。所以质量与加快一个惯性物体运动速度所需时间有关。这就是说，质量同时兼有一定的比例，其比例系数由所加的力而定。

质量是一切物体的重要的属性。我们习惯于永恒不变的物体质量，即物体的质量不因物体运动速度的不同而不同。这同我们下面的结论是一致的：在一种恒力的持续作用下，速度的增加与力作用于物体的时



间长短成正比。

这一结论是基于速度相加定理之上的。但是我们在前面已经证实，速度相加定理不能在一切情况下都适用。

比如说，我们用两秒的时间，对一个物体施加一定的力之后，将获得多大的速度呢？我们通常使用普通的速度相加规则求物体的末速度，即把第一秒末的速度与物体在第二秒获得的速度相加，以求得第二秒末的速度。

我们可以这样继续不断地加下去，一直到使物体运动的速度接近光速。在这种情况下，速度相加这一陈旧的定理就不再适用了。根据相对论的观点，速度相加定理在这种情况下就无能为力了。如果继续运用这一陈旧定理，我们得到的速度就要比预想的速度小。这就是说，在高速运动中，速度的加大不再同对物体加力的时间长短成正比。换句话说，虽然以同样的时间将一定的力作用于物体，但是物体运动速度的



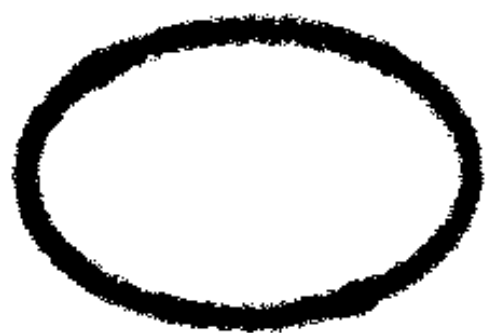
加大率，要比在低速运动中小。

出现这种情况是很自然的，因为宇宙间存在一个最高速度。如果将恒力作用于一个物体，当这个物体的运动速度在逐渐接近光速的过程中，它的加速度就会越来越小。因为物体运动的速度永远也不能超过速度的最高极限，即光速。

107

只要物体运动速度与物体外加力的时间是成正比例的增加，我们就可以认为，质量与物体运动速度是无关的。但是，一旦物体运动速度接近光速，时间与速度的增加就失去了比例，于是质量就变得与速度息息相关了。由于时间可以无限加长，而速度却不能超越最高极限。由此我们发现，质量随速度的增加而增加，而且当物体运动速度达到光速时，质量就成为无限大。

计算结果表明：运动物体的质量随其长度的缩减而增加。这样，一列爱因斯坦火车在以每秒24万公里的速度运行时，其质量要比它在静止时大 $10/6$ 倍。



很显然，与光速相比，我们日常接触的一般速度就显得微不足道了。所以在低速世界里，我们可以不考虑质量在运动中的变化，也不必考虑物体运动速度与其体积之间的关系。同样，也不必考虑两个事件发生之间的时间间隔同事件观察者的运动速度之间的关系。

108

质量与速度之间的关系，是根据相对论的理论推导而出。要观察和检验它们之间的关系，我们可以进行对电子的快速运动情况的观察实验。

利用现代实验设备，使电子以接近光速的速度运动已是相当普通的事。在加速器中，能将电子运动速度加大到仅仅比光速低每秒30公里。

实验结果表明，现代物理学完全能够将处于高速运动中电子的质量同静止电子的质量加以比较。实验也充分表明，质量与物体运动速度息息相关。这也是相对论阐明的客观规律。

物体质量的增值与作用于物体的力有密切的关

系，而且有一定的比例关系。一切作用于物体的力，以及任何物体能量的增值，都会使物体质量增加。这就是当物体被加热时，其质量就比未加热时大的原因。这也就是当弹簧被压缩时，其质量就增加的原因。但是质量变化同能量变化之间的比例系数是微乎其微的。例如：要使一个物体的质量增加一克，就必须对该物体施加2500万千瓦小时的能量。

109

这就是在一般物体情况下，物体质量的变化是非常微小的原因，即使是运用最精密的仪器，也无法测量出来。如果将一吨水从零度加热到沸点，其质量大约会增大一百万分之五克。

在现代物理学中，我们也观察到质量的变化起着非常显著作用的现象。

例如，当原子核相互碰撞后产生新的原子核的现象。又如，当一个锂原子与一个氢原子相互碰撞，产生两个氦原子。在这一过程中，氦原子的重量比原物质的质量减少四百分之一。



前面已经提到，将一个物体的质量增加一克，必须对该物体施加2500万千瓦小时的能量。因此，将一克锂和氢转变成氮需要的能量就比上面这个数字小400倍，即62500千瓦小时。

相对论揭示了我们周围世界大量令人惊异的现象，而且精确而令人信服的大量实验，使我们必须承认相对论的正确性。相对论揭示的大量现象，如果是粗略地观察，往往会被忽视或者不易理解。

相对论对人类通过实践经验积累起来的基本观念，带来了极其深远和根本的变化。

那么，这是不是说，由于相对论的出现，以前长期发展起来的物理学理论，就像一只旧鞋一样而被抛弃呢？

如果是这样的话，那么，就没有必要从事科学研究了。新的理论必将不断出现，而且不断改变旧的理论 and 旧的观念。

设想，如果一位乘上一般火车的旅客，一上车就



开始矫正他的时间，因为根据相对论的理论，他的手表将比车站的时钟慢。这时，大家都会把他的做法当成笑柄。

发动机设计家们是根据经典物理学的原理设计发动机，而且他们将继续这样做下去。因为，如果他们根据相对论来改进发动机的设计，那么这种改进的效果，就像把一个微生物放到发动机的飞轮上一样，丝毫改变不了发动机的性能。但是，研究高速运动的电子物理学家，却必须时刻记住运动速度同质量变化的关系。

111

相对论决不排斥和否定经典物理学建立起来的观念和理论，而是大大扩展了经典物理学的领域。另一方面，相对论也规定了经典物理学理论和它建立起来的观念适用的范围，从而避免了导致错误的危险。相对论诞生以前，物理学家所发现的自然规律根本没有、也不可能被废弃，相对论只是明确地规定和限制了这些规律适用的范围。



相对论物理学对经典物理学的校正，同高级大地测量学对基础大地测量学的校正大体相同。前者认为地球是圆的，而后者则忽视了这一点。高级大地测量学是从垂直的相对性出发。相对论物理学注意物体体积以及两个事件时间间隔的相对性，而经典物理学不研究相对性这一概念。

同高级大地测量学是在基础大地测量学的基础上发展起来的一样，相对论物理学是在经典物理学的基础上建立和发展起来的。

如果我们假定地球半径是无限的，那么我们就能够从运用球面几何学的基本原理，转而运用平面几何学的基本原理来测量地球表面的面积。这样，地球就不再是一个球体，而是一片无限大的平面，那么垂直也成为绝对的了，三角形三个内角的和也恰恰等于两个直角。

如果我们假定光速是无限的，也就是说，光的传播速度是瞬时的，那么在相对论物理学中，也就会出



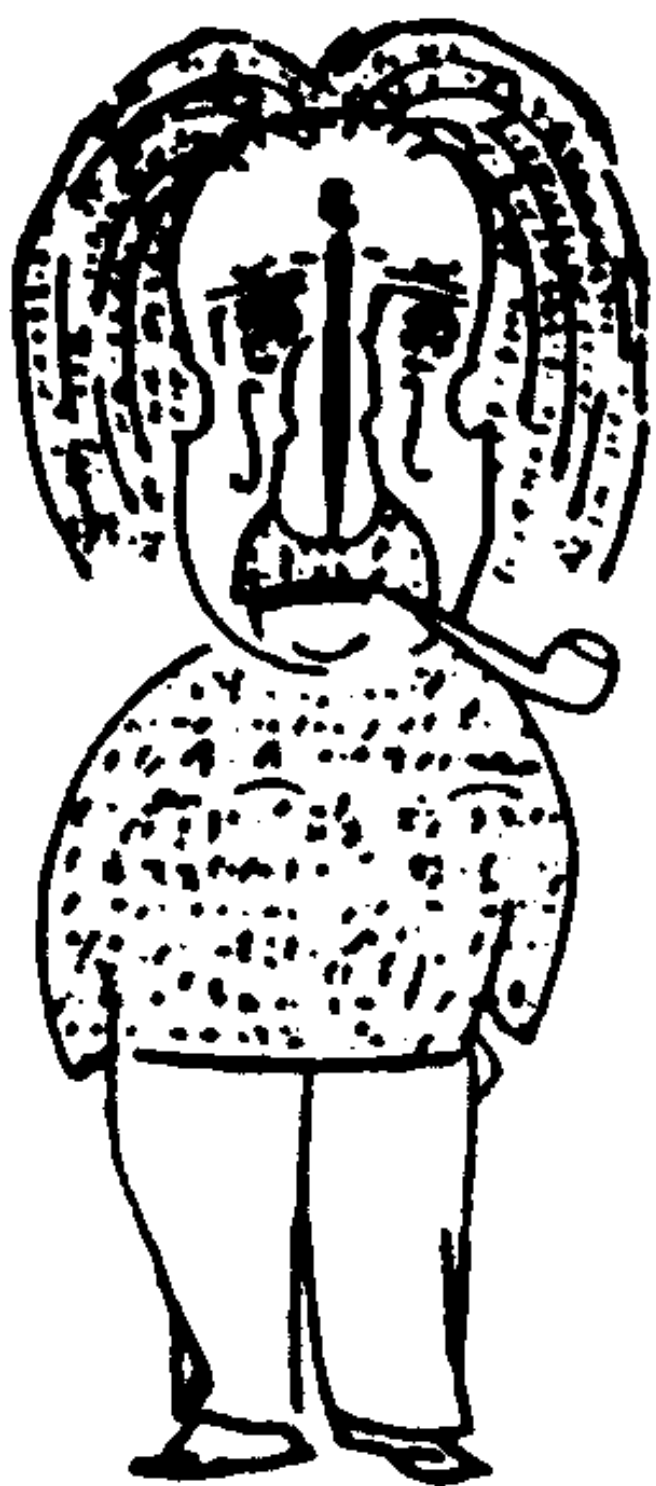
现同样的变化。

的确，如果光的传播是瞬时的，那么同时性这一概念就成为绝对的了，事件发生的间隔和物体的体积也就成为绝对的，而不必考虑它的参照系。

于是，如果认为光速是无限的，那么，我们就应该保留经典物理学建立起来的全部观念。

113

然而，企图将光速的极限性同旧的时空观混为一谈，就会使我们自己处于一种荒唐滑稽的境地。这就如同一个人明明知道地球是圆的，但他还是固执地坚持只有在他的家乡垂直才是绝对的，从而不敢走出家乡一步，因为他害怕掉入浩瀚无涯的宇宙空间。



第三章

有

生命的宇宙

——广义相对论



有生命的宇宙——广义相对论

第一节：从半空坠落的人 ——牛顿与爱因斯坦

1 905年爱因斯坦提出狭义相对论的时候，他
就很清楚地知道他这个理论是不完全的。

117

他本人对狭义相对论最不满意的的地方有两处，一个是引力，一个是相对性原理本身。

在狭义相对论以前的引力理论是牛顿的万有引力定律：

牛顿万有引力定律：任何两个物体之间都存在相互吸引的力，它的方向沿两个物体的连线；它的大小和它们质量的乘积成正比，和它们之间距离的平方成反比。比例常数对任何物体来说都是一个常数。

这条定律并没有考虑力的传播时间，或者说它假设了引力的传播速度是无穷大的，所以即使两个物体



分在宇宙的两端，只要其中一个动一动，另一个感受到的引力就会有变化。根据这个性质，我们可以利用引力的变化来设计(只是理论上)一种信号，它的传播速度是无限大的，这就和狭义相对论的基本原理相矛盾，因为在狭义相对论中规定，没有任何信号的速度能够超过光速。

118

其实这种矛盾在牛顿三定律中就有所体现了。

牛顿第一定律：不受外力作用的物体保持静止或匀速直线运动。

牛顿第二定律：受外力作用的物体运动的加速度与力的大小成正比，与自身的质量成反比。

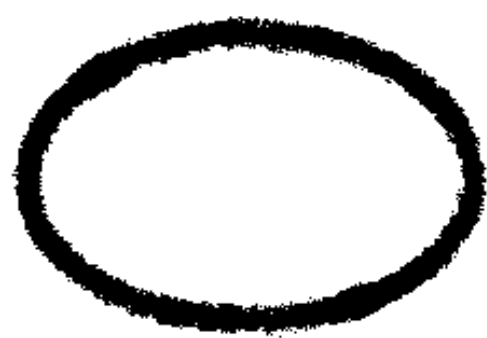
牛顿第三定律：作用力必有反作用力，它们大小相等，方向相反。

其中第一定律就是伽利略的相对性原理，它后来被狭义相对性原理所取代。第三定律是空间对称性的一种反映，它在任何理论中都应该成立。问题就出在第二定律，根据这个定律，我们可以把一个物体持续



地加速，它的速度可以一直加到无穷大，这就和光速最快相矛盾了。不过这个矛盾并不尖锐，在爱因斯坦最初提出狭义相对论时就解决了这个问题。解决的办法是，让物体的质量随着速度的增加而变大，当物体的速度接近光速时，质量会变成无穷大。这样一来，即使力不断的作用，加速度却越来越小，最后物体的速度刚好不会超过光速。但在引力的问题里，我们没有这种简单的办法来消除矛盾，只好从其他途径来解决这个问题。

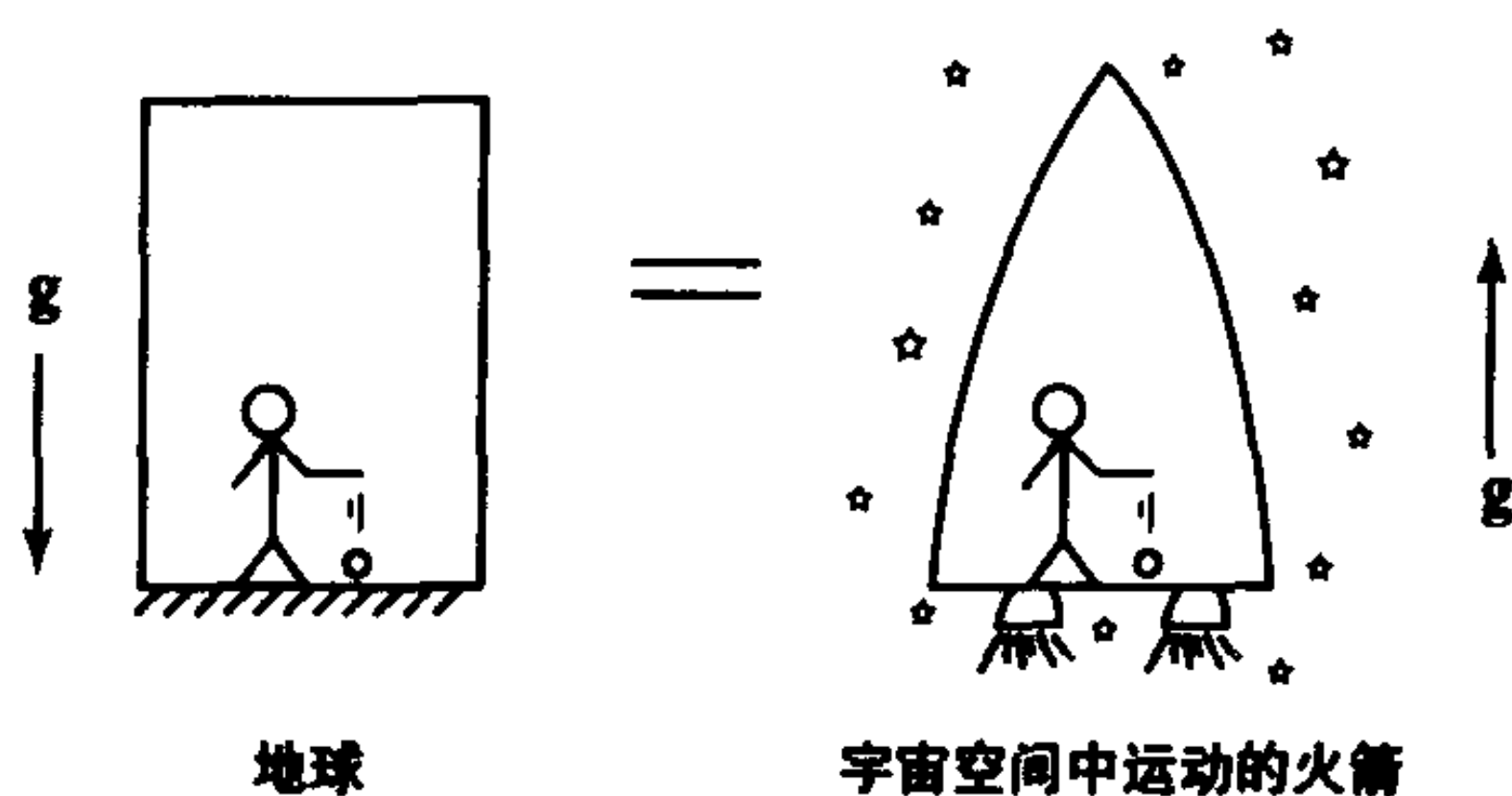
这个解决的办法可以看成是把引力问题转化到已经解决了的牛顿三定律的情况，也就是说，把引力放在狭义相对论下的牛顿三个定律的新描述里面。让我们再次看一看牛顿第二定律和牛顿万有引力定律。它们都提到了物体的质量，但是质量是什么呢？事实上物体的质量在这两个定律之前是没有定义的！后来的质量是根据这两个定律来定义的。比如说，根据万有引力定律，我们可以把物体的质量定义为当它距离一



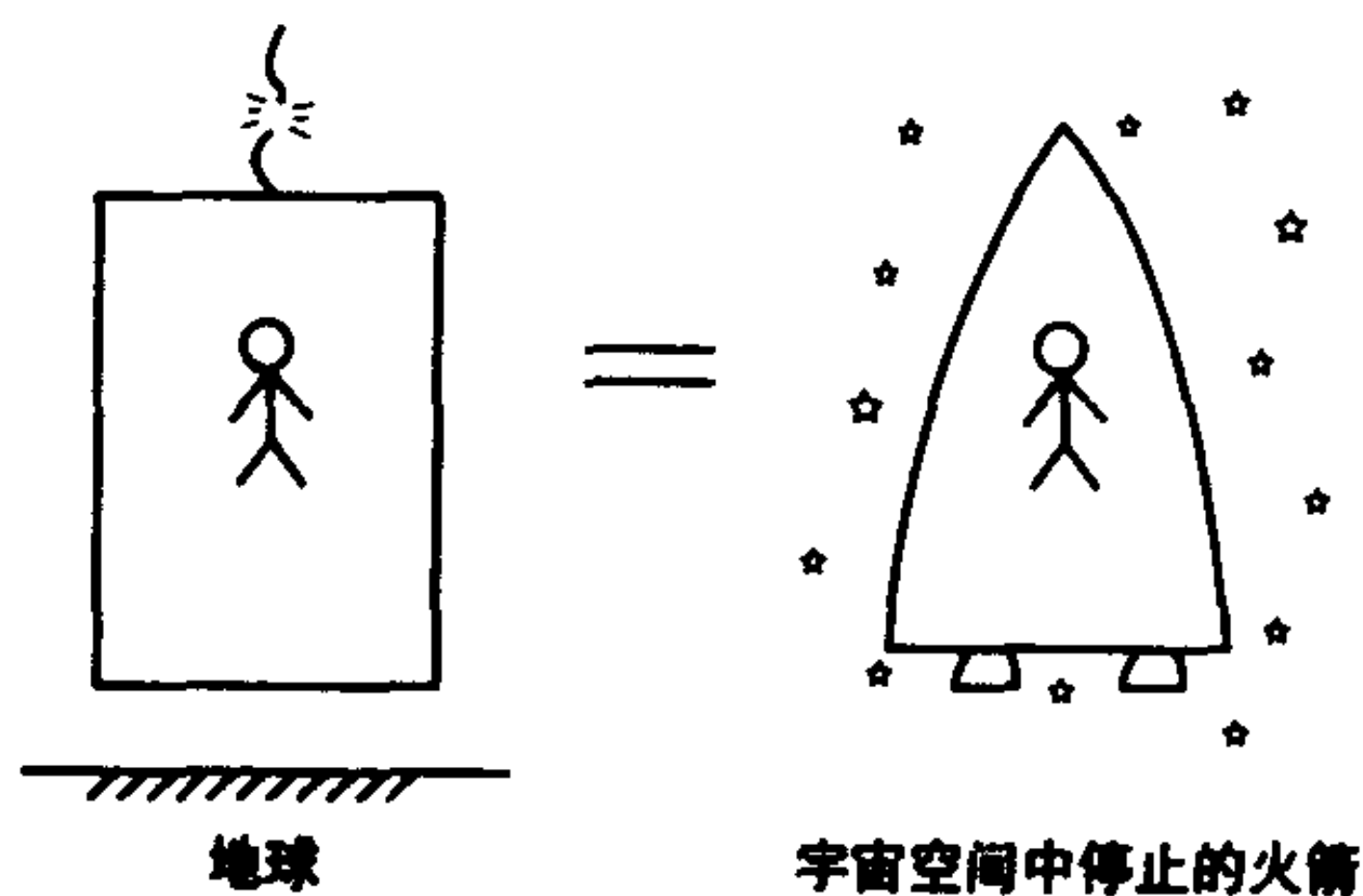
个标准物体(比如说一立方分米的水)一个单位长度(比如说一米)时,它所受到的力;或者,根据牛顿第二定律,把物体的质量定义为为了得到一个单位大小的加速度需要作用在物体上的力的大小。一个自然的问题是,这两种定义方式是否等价?或者简单地说,万有引力定律中的质量和牛顿第二定律中的质量是否一致?我们把前一种质量叫做引力质量,后一种叫做惯性质量。

检验两种质量是否相等的实验人们做过很多,精度也越来越高,而且结论都是相等。这个奇怪的巧合在牛顿力学中是无法解释的。爱因斯坦在小时候就思考过这个问题,他提出了一个很有创意的假想实验来探讨这个问题。

这个实验是这样的,我们假设一个人从半空坠落。或者人道一点,我们假想有一个升降机在运动。那么这个升降机的运动就可以用下面两个方面来描述:第一,升降机在没有引力的空间内沿直线运动,



(A) 引力与加速



(B) 自由下落与失重

它的加速度恒定，跟重力加速度一样，我们把它叫做一号升降机；第二，另外还有一个升降机静止在一个均匀引力场中，引力场的大小跟地球表面的引力大小一样，我们管它叫二号。注意，在二号升降机内的人所处的状态和我们的习惯是一致的，问题出在一号升



升降机上，一号升降机的描述方法看起来有些特别，但是实际上两个升降机对外面的人来看，感觉上是一样的，只不过一号升降机采用了一个和我们习惯不太符合的描述方法。好了，一号升降机就是我们所说的惯性质量，而二号升降机就是引力质量。

如果引力质量和惯性质量是相同的，那么在这两个升降机中的任何力学实验都会得到相同的结果。这个假想实验的另一个版本是，一号升降机在一个没有引力的空间里静止或者匀速直线运动；二号升降机则在一个均匀的引力场中自由下落。如果引力质量和惯性质量是相同的，那么这样两个升降机中任何力学的对比实验也将得到相同的结果。这个假想的实验说明，如果引力质量和惯性质量相等，那么，引力场和加速度场是无法通过力学实验区分的。爱因斯坦把这种等效性推广到一切物理定律，而不仅仅是力学定律，就得到了下面这个著名的广义相对论等效原理：

等效原理：一切物理定律在匀强引力场和加速的



参考系中的作用效果是一样的。

其实等效原理分为三个级别：弱等效原理、强等效原理和甚强等效原理。

前面说的引力质量和惯性质量相等就是弱等效原理，它仅能够保证通过力学实验无法区分引力场和加速度场。而爱因斯坦提出的则是甚强等效原理，它表明任何物理实验都不能区分这两种场。强等效原理则介于它们之间，它说除了跟引力有关的一切物理实验都不能区分引力场和加速度场。

123

广义相对论中用的是甚强等效原理。如果同样的理论框架用不同强度的等效原理就会得到不同的引力理论。因为这时候引力和惯性并不完全一致，所以说明还有别的场在引力作用里起作用。在后面的部分还会提到这些理论。

那么惯性质量和引力质量是否能够相等，就成了这个等效原理能否存在的关键证据，在后面的实验检验中我们就可以知道，大自然偏向了爱因斯坦，这是



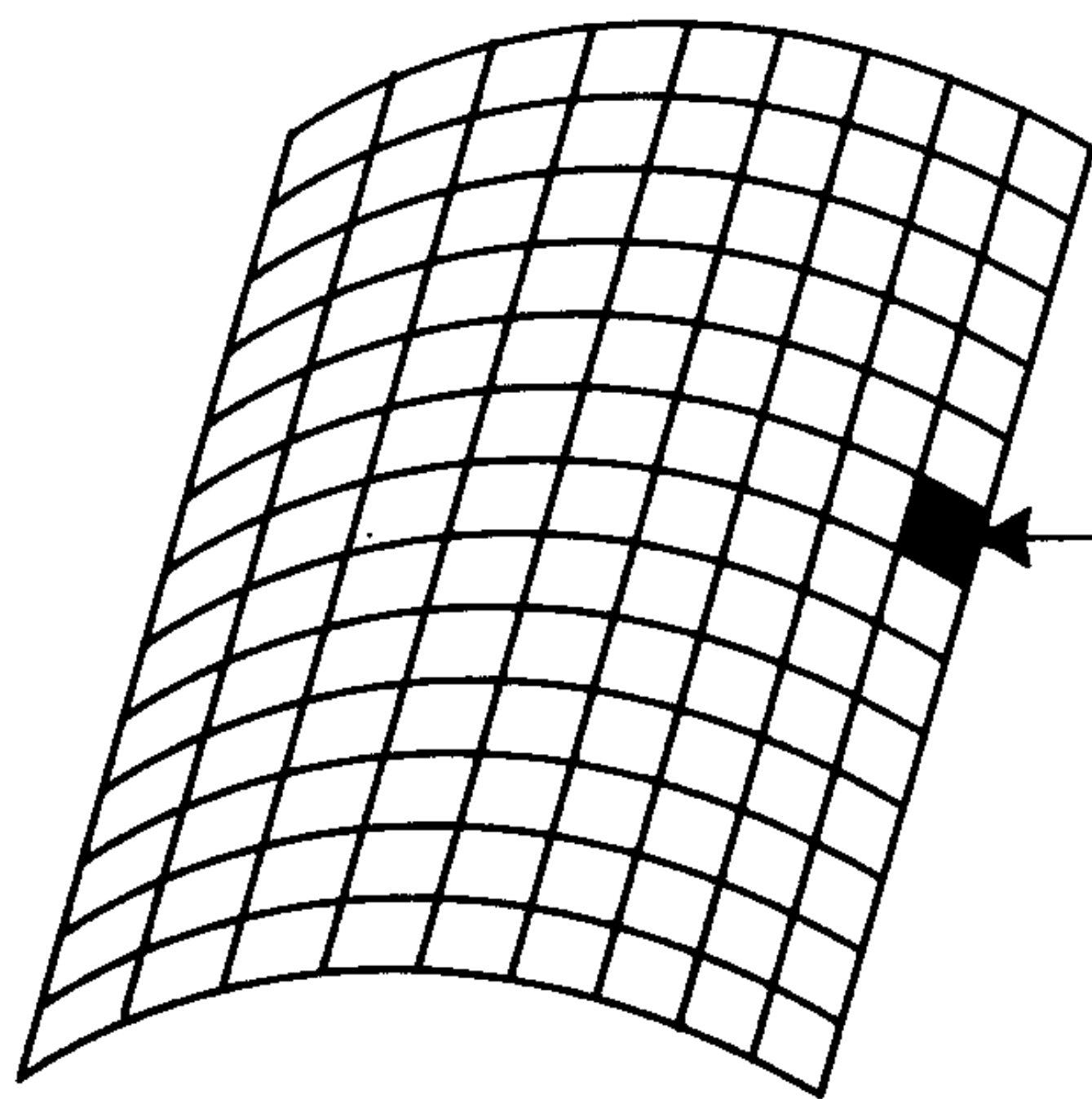
后话。在这里，我们还是再多说一点这个原理本身。

现实中的引力场都不是均匀的，所以为了应用上面的原理，我们需要一些数学上的技巧。

124

对于一个不均匀的引力场，我们考虑它的一个小块，这个块充分的小，以至于我们可以把它里面的引力场近似的看成匀强的，这样我们就可以在这里面应用等效原理，把引力场的问题变成加速度场的问题，然后应用狭义相对论中已经有的方法化解引力和狭义相对论的矛盾。我们把整个引力场都切成这样的小块，每一块上都近似是匀强的，这样整个问题就都解决了。这个过程看起来很麻烦，其实在数学上却很简单，这就是黎曼几何。

黎曼当年为了研究在弯曲空间里面如何定义长度、角度和面积等等度量性质，引入了黎曼几何的思想。它的基本原理就是，把弯曲的空间分成小块，每一个小的局部空间是近似平坦的，然后就可以用平直空间里的几何方法来研究弯曲空间里的问题了。这刚



弯曲的空间可以近似地分成许多平坦的小块，这就是黎曼几何的基础。

125

好和广义相对论的等效原理不谋而合。

爱因斯坦1907年就提出了等效原理，不过他当时并不懂黎曼几何，所以又学了8年数学，到了1915年才完成用黎曼几何的语言写出来的广义相对论。

前面说过，爱因斯坦对狭义相对论还有一个不满意的地方是相对性原理本身。这个原理是这样的：

狭义相对性原理：物理定律在一切惯性系中所取的形式是一样的。

首先来解释一下什么叫惯性系。简单地说就是静



止或者作匀速直线运动的观察者所使用的坐标系。不过这个定义只是在经典力学下才有意义。因为经典力学承认时间和空间是绝对的，所以可以谈论相对于绝对空间静止，或者相对于绝对空间匀速运动。但是在狭义相对论中，没有绝对空间了，上面所说的静止和匀速直线运动就都失去了意义。为了给出狭义相对论中惯性系的定义，必须脱离它所依赖的时空，从它内部的自身性质来定义。比如，我们可以把惯性系定义为这样一类观察者的坐标系，如果这其中的一个物体不受力或者所受的外力合力为零，那么它在这个参考系中静止或者做匀速直线运动。这和伽利略的相对性原理也是一致的。

这个定义看起来似乎解决了问题，但是却带来了更大的问题。因为按照这个定义的话，宇宙中就不会有真正的惯性系了，因为引力是广泛存在的，任何物体都不会不受外力！从这里就可以看出来，引力是处处和狭义相对论作对的，所以能够完全解决这些问题

的理论也必将是一个关于引力的理论。我们不能屏蔽掉引力，就只好容忍它，试图考虑一种理论，它在无论什么参考系中的形式都是一样的。事实上，这样的理论也更优美，因为我们以前在谈论狭义相对论时，总会有这样的疑问，为什么自然界这么偏向惯性系呢？如果说任何参考系都应该是一样的，那就不会有类似的疑问了。所以爱因斯坦再次大胆给出了广义相对论的另一个著名原理——广义相对性原理：

127

广义相对性原理：任何物理定律在任何参考系中都取相同的形式。

这条原理看起来的确是足够的优美了，但是应用起来却极其的不方便，因为我们知道，我们现有的物理理论都是非常依赖于坐标系的，如果要所有的定律都不依赖于坐标系，那么就要对所有的物理定律进行改造，这项工作看起来非常的困难。好在数学家的先进工具又一次帮了忙，这就是微分几何中的张量分析方法。



因为数学家们是比物理学家们更追求理论的优美性的一群人。他们同样不喜欢各种依赖于具体的坐标系的理论。比如说，他们想知道一个曲面的弯曲程度时，不希望得到的答案是：在以什么什么为x轴、以什么什么为y轴、以什么什么为z轴的三维直角坐标系中，曲面M在A点沿某某方向的曲率是多少多少。数学家们感兴趣的是不随坐标系的改变而改变的各种性质，所以他们发明了张量分析。这个名词听起来挺吓人的，实际上并不复杂。

首先我们得知道，为什么物理定律在不同的参考系下会有不同。学过非惯性系中的牛顿力学的人一定还记得相对加速度，牵连加速度，科氏加速度这些名词。之所以有这些东西，是因为坐标变换后，物理量一般不会保持原来的值，而是要变化，变化的方式跟坐标变换的方式有关，所以原来相等的关系可能就会不等了。沿着这个思路下去，如果我们把物理定律表达成这样一些东西构成的方程，它们在坐标变化下按



相同的方式变化，那么它们在变换前所满足的方程在变换以后依然满足，这样无论我们用什么坐标系，物理定律的形式就都不会变化了。这样在坐标变换下按一定规律变化的量就叫做张量，用张量写出来的方程就是和坐标无关的。

黎曼几何刚好可以用张量方程的形式给出，这使得等效原理和广义相对性原理的数学形式最终走到了一起，它们共同构成了广义相对论的数学基础。这两个原理则是广义相对论的两个基本原理。广义相对论的一切结论都从这两个原理中得到。不过现在更多的人倾向于这样一种观点，广义相对性原理并非基本的物理学原理，而是一种对理论的数学要求，甚至可以说，广义相对性原理是等效原理的一种数学形式(因为在黎曼几何中采取张量形式是很自然的结果)。所以，广义相对论中的最基本原理应该是等效原理。



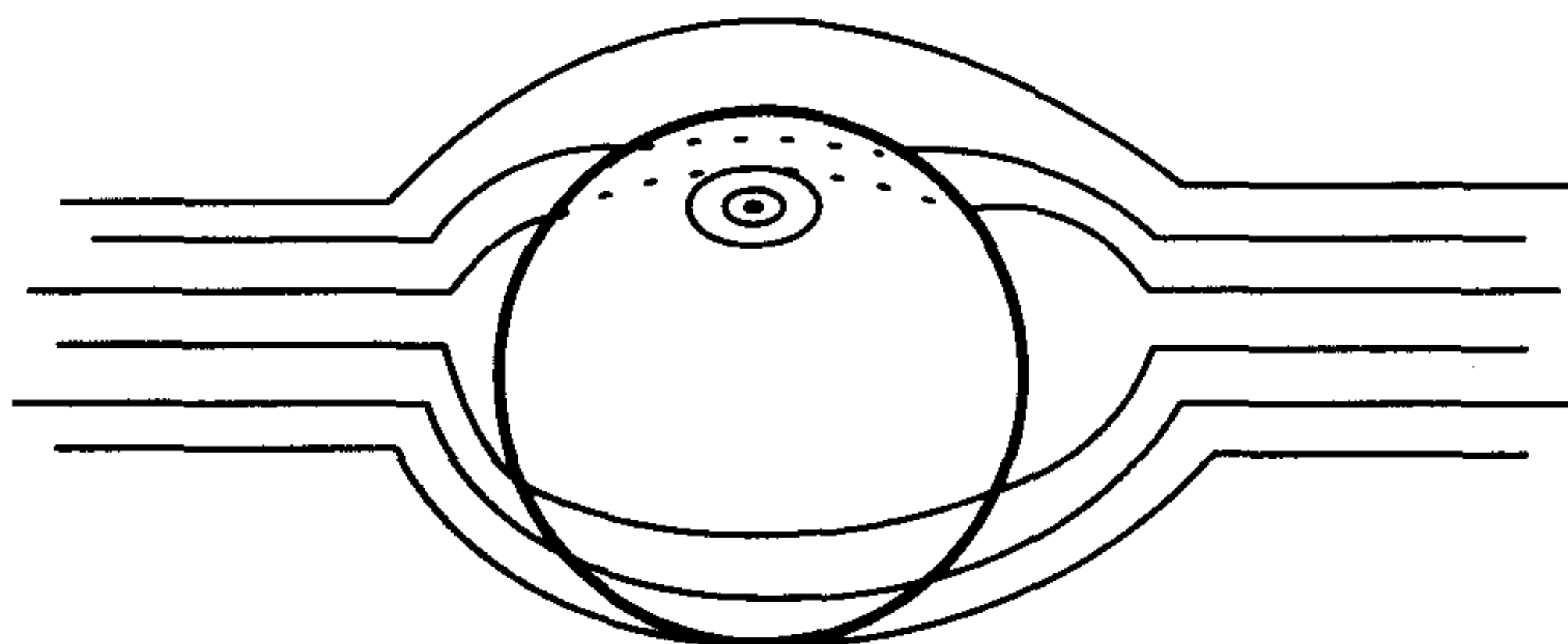
第二节：时空告诉物质如何运动 ——引力是不存在的

130

前

面我们解释了广义相对论的两条基本原理——等效原理和广义相对性原理，和它们对应的数学形式——黎曼几何和张量分析。这两个数学分支其实都是微分几何中的东西，广义相对论实际上是一个几何理论。前面所说的黎曼几何中空间的弯曲和引力场强度的类比并不是简单的巧合，而是活生生的事实，后来，广义相对论中跟引力有关的东西都能用几何的语言重新表述，引力消失了，代之以弯曲的时空。

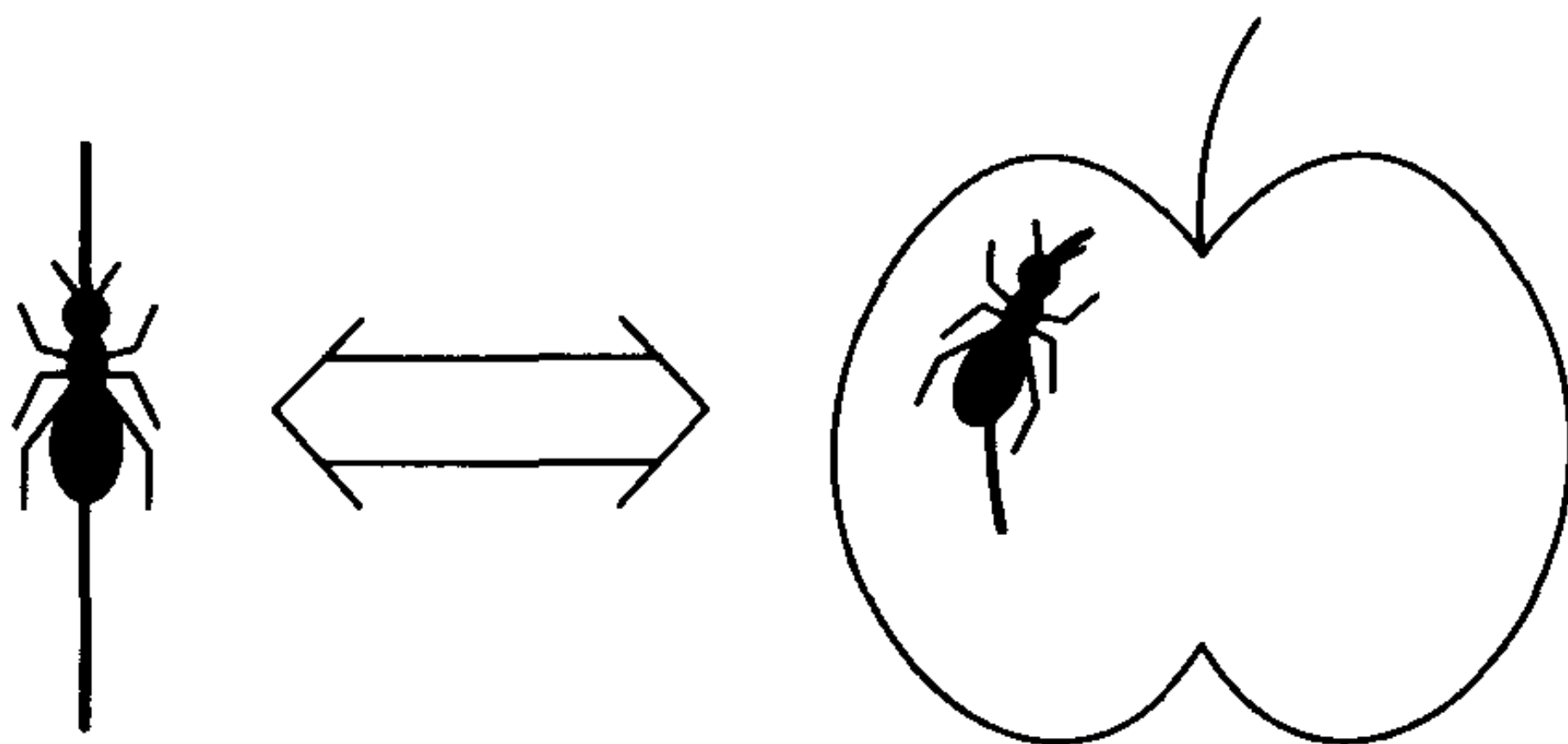
为什么力会被几何所取代呢？我们可以假想在一个苹果上爬行的蚂蚁，假设它的六条腿力量相当，步长也一样，那么它会爬出什么路线来呢？如果在平面



空间在引力场附近弯曲

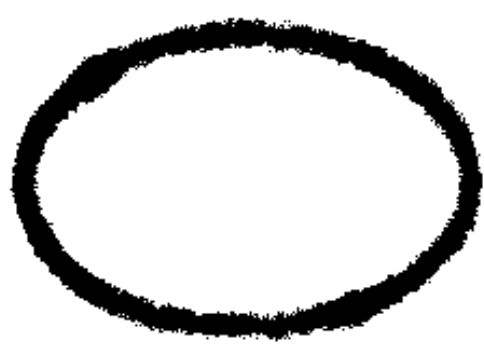
上，它显然走的是直线，但是在曲面上，只能是曲线了。但是它并没有受到外力的作用，路线变弯曲的原因是因为它所在的空间本身就是弯曲的。引力问题与这个例子一模一样。其实这世界上并没有一种叫做引力的力，我们在引力场中之所以走出来的不是直线，是因为有引力场的时空是弯曲的，所以我们走的路线也不得不变得弯曲。

为了知道物体在引力场中到底如何运动，我们再回想一下牛顿第一定律：没有外力作用的物体静止或作匀速直线运动。在弯曲时空中(或者说有引力存在的情况)，这条定律需要修改。它是如此简单的一条

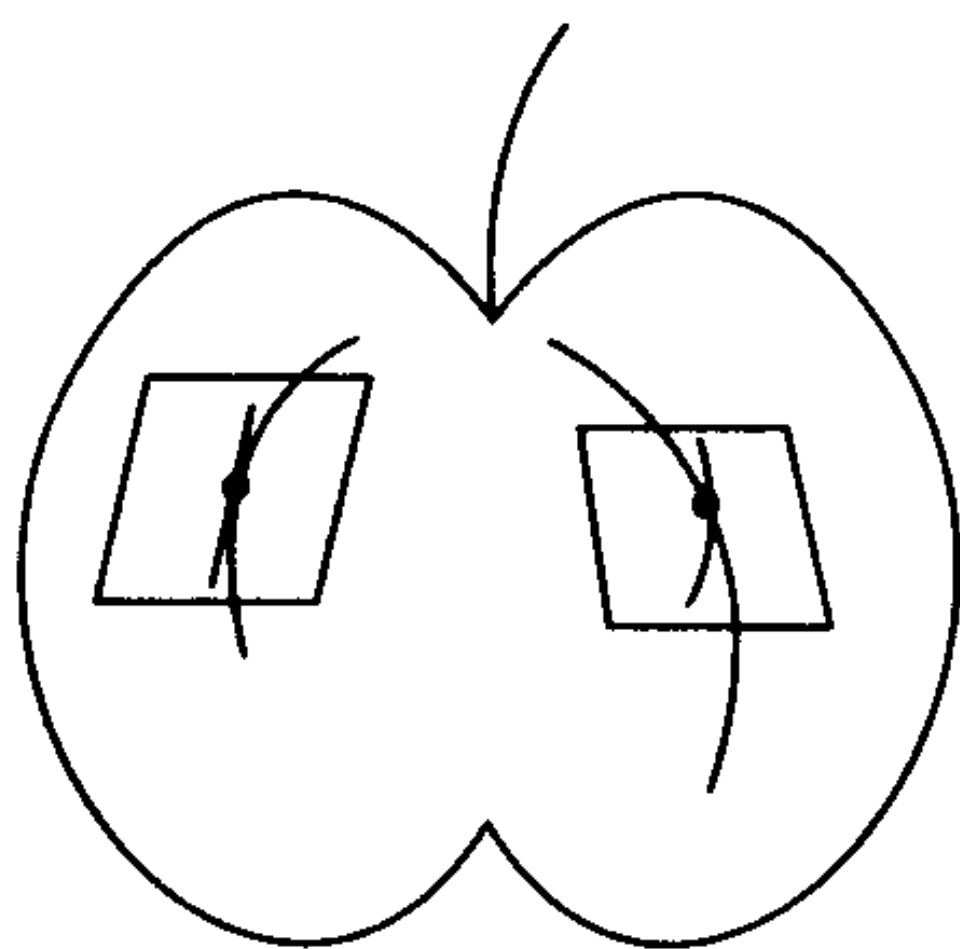


定律以至于我们可以修改的余地很小。只有“直线”这个在弯曲时空里并不存在的东西可以让我们修改。我们应当把直线的定义加以扩充，使得在弯曲时空里，物体仍沿着这样的轨道运动。不过，这里的难题是，直线作为欧几里得几何中的一个基本对象，是没有定义的。所以我们只能通过直线的基本性质来研究如何得到弯曲空间里的直线概念。

首先，回到刚才蚂蚁的例子，我们说它“六条腿力量相当，步长也一样”，这实际上是说蚂蚁走每一步前后的方向是不变的。如果我们在这个路线上某点做出苹果的一个切平面，然后把蚂蚁的路线投影到这个平面上，会发现这个投影是一条直线。把这种方向



不变的性质看成是直线的一种基本性质，我们可以借此扩充直线的定义得到弯曲空间中的直线。不过，一个难办的问题是，当我们考虑弯曲空间时总是在它内部来考虑的，我们没办法做出它的切平面，更没办法把行进路线投影到这个不存在的平面上，因为这些操作都要在这个空间的外面才能进行。不过，数学家们有办法。他们先在弯曲空间的每一点，定义一个叫做切空间的平直空间，它的作用和切平面是一样的。然后在所有这些切空间上附加一种叫做联络的结构，它的作用和往切平面上投影是一样的。这样一来，上面这种定义的各种要素就都齐备了，定义出来的东西就叫做测地线。不过，这个定义有点缺点，它不依赖于弯曲空间的度量性质——也就是它上面的黎曼几何。一个弯曲空间即使没有黎曼几何的结构也一样可以附加上一个联络得到测地线。因为所附加的联络可以是任意的，所以得到的测地线也不是惟一确定的。这显然不是我们所需要的东西。



(说明：测地线在切平面上的投影是直线，
非测地线在切平面上的投影是曲线)

另一方面，直线有一个更为简单的性质，那就是两点之间直线最短。这个性质显然依赖于度量性质，所以肯定跟黎曼几何关系密切。在弯曲的黎曼空间里求曲线的长度是很容易做到的，所以这个性质作为直线的定义更为简捷和有效。

数学的美妙之处在于它的神奇和出乎意料。我们从直线的两个不同的性质得到两种看起来不同的东西，如果告诉你它们实际是一样的你会作何感想呢？事实上，在黎曼几何中，如果我们要求在利用联络对

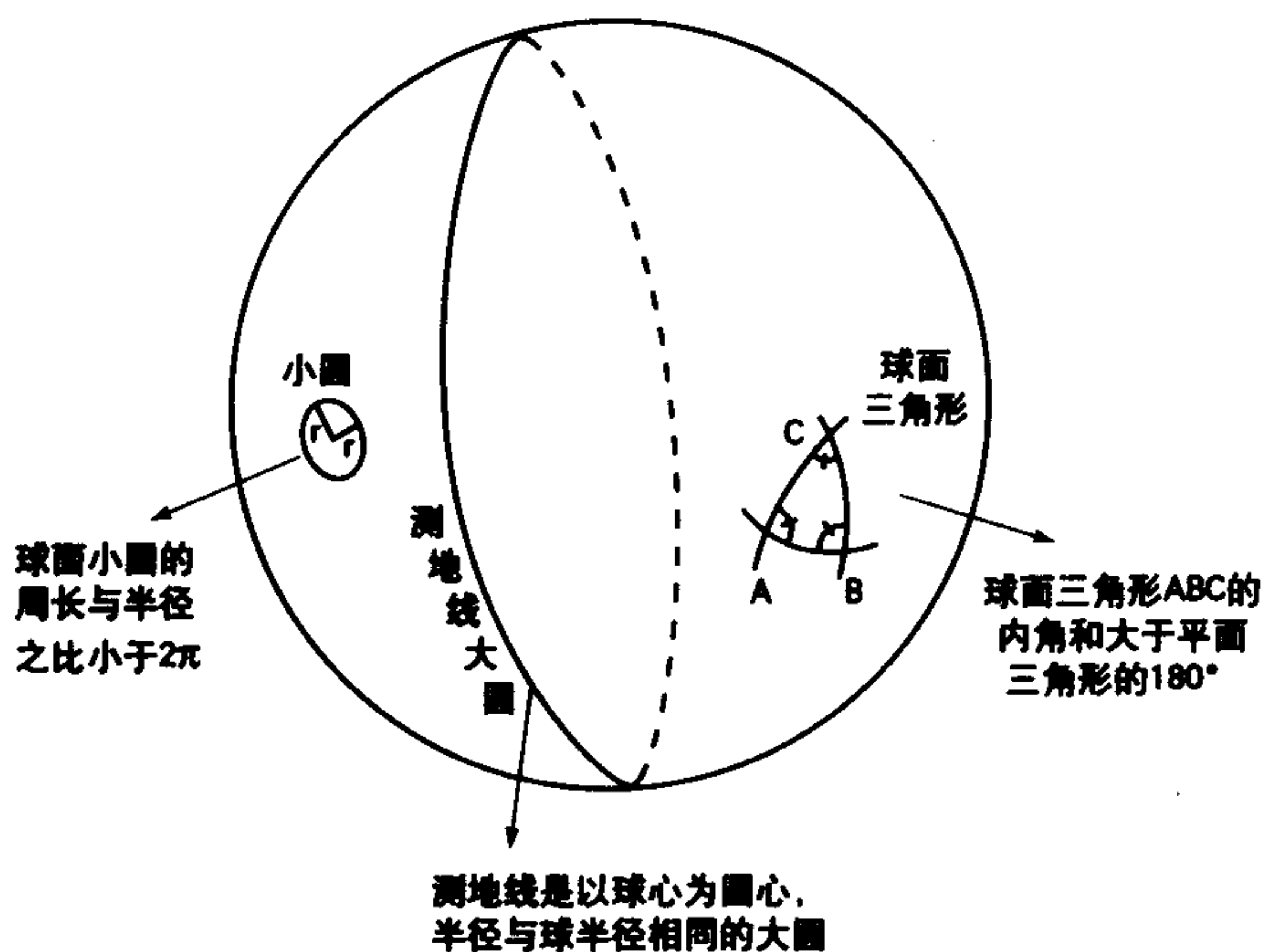


切空间里的元素进行平移时保持长度不变，那么这样的联络是惟一的，所以相应的测地线也是惟一的，这个测地线就是上面根据两点之间直线最短所定义的线。测地线这个名字也正是从后一种定义中得来的，是测量大地的线的意思。这种神奇的一致可以追溯到经典力学中牛顿定律和能量最低原理的一致，方向不变性就是牛顿定律，测地线最短就是能量最低原理。

135

在地球上，一根测地线是在所谓一个大圆上两点之间的最短程。

上面说明了时空是如何控制物质的运动的，问题最后归结为解弯曲时空中的测地线所满足的方程。下面一个问题是，时空为什么会弯曲呢？因为时空弯曲的意思就是引力场不为零，所以这个问题实际上是问引力从哪里来。从牛顿引力理论我们知道，引力是从物质中来的，所以在广义相对论中也应当如此：时空的弯曲应当由物质来决定。所以引力场方程应当是关于时空曲率的一个方程，它其中包含了描述物质分布



的项。想像中这样的方程应该有很多，但是实际上，在附加了几条很合理的要求之后，这样的方程几乎被完全确定了。这就是著名的引力场方程。它是一组二阶的非线性偏微分方程，共有十个未知数、十个方程，形式非常的复杂，如果不做任何简化性假设的话，展开后的每个方程都差不多有一千项。自从爱因斯坦提出广义相对论以后，几十年间相对论学者们的重要工作就是解这个方程。

有了上面的测地线方程和引力场方程，引力几何化就完成了，它可以概括为下面的两句话：

物质告诉时空如何弯曲

时空告诉物质如何运动

简单解释一下的话，就是：物质的存在导致周围时空弯曲，而时空弯曲后导致经过这个时空的物质沿着这个时空给出的路线运动。

137

需要强调的是，引力几何化并不是一个基本原理，因为引力理论的数学和物理基础都由两个基本原理给出了，引力几何化是给出了另一个看问题的角度。事实上如果我们不承认时空的弯曲，仍然把引力想像成平直时空中的一种相互作用力，并不会对各种物理问题的结果有什么影响。只不过几何化这种想法非常的漂亮，所以我们都相信这是真实的描述。



第三节：会拐弯的光—— 相对论的辉煌

138

下面我们即将进入一个激动人心的章节，大自然印证了爱因斯坦的广义相对论，从而将物理学带进了一个从未有过的辉煌境界。

广义相对论在数学上的优美足以征服所有的数学家。但是，对物理学而言，优美不代表正确，任何一个理论都需要由实验来检验其真伪。在1915年，广义相对论提出之后三个月左右，就有人解出了它的第一个精确解，这就是著名的史瓦西解。它描述的是一个球对称天体周围的引力场，它可以很好地描述我们太阳系中行星运动的情况。在标准的广义相对论教材中，都是基于这个解给出广义相对论的三大实验验证的结果，那就是水星近日点进动、光线在引力场中的



偏折和引力红移。不过，当年爱因斯坦在没有这个精确解的时候，只是根据等效原理也非常好地计算出了这三个效应的具体数值，由此可见等效原理在广义相对论中的地位。下面就来解释一下这三个现象。

水星近日点进动可以说是广义相对论最不可思议的一个证据。先来解释一下什么叫近日点进动。根据开普勒三定律(或者万有引力定律)行星绕太阳运动的轨道应该是椭圆，太阳位于椭圆的一个焦点上，行星离太阳最近的那个点就叫做近日点。按理说这个点应该是固定不动的，但是实际的情况并非如此，因为其他的行星的引力会对轨道有一定影响，虽然很微小，但是是可以观测到的。对于水星来说，这种影响是最为明显的，水星每次到达近日点都会比前一次多转一点点，这就是水星近日点的进动。但是经典的万有引力定律给出的计算却和观测到的结果不符，两者相差 $43''$ /百年，就是说每一百年水星近日点的进动会比理论预言多走43弧秒(一弧秒是三千六百分之一度，一



度是一圈的三百六十分之一)。虽然这个差别非常小,但是却难倒了无数的天文学家。他们提出种种理论来解释这个差别,比如说假设在水星和太阳之间还存在一颗行星,叫做祝融星,它对水星的引力给出了这一点小小的剩余进动。还有人猜想,是水星和太阳之间的太阳物质影响了水星的轨道。另一个比较有影响力的说法是如果太阳不是完美的球形,而是稍稍有一点扁,那么也可以解释这个剩余进动。不过这些想法并没有得到公认,假想的行星从来没有被观测到,宇航探测的结果发现太阳物质少得不足以提供这样大的影响,对太阳大小的测量也表明太阳并没有预期的那么扁。这个悬案一直到广义相对论的问世才得到完满的解释。爱因斯坦利用等效原理对水星的轨道进行相对论修正,刚好得出这 $43''$ /百年的剩余进动。

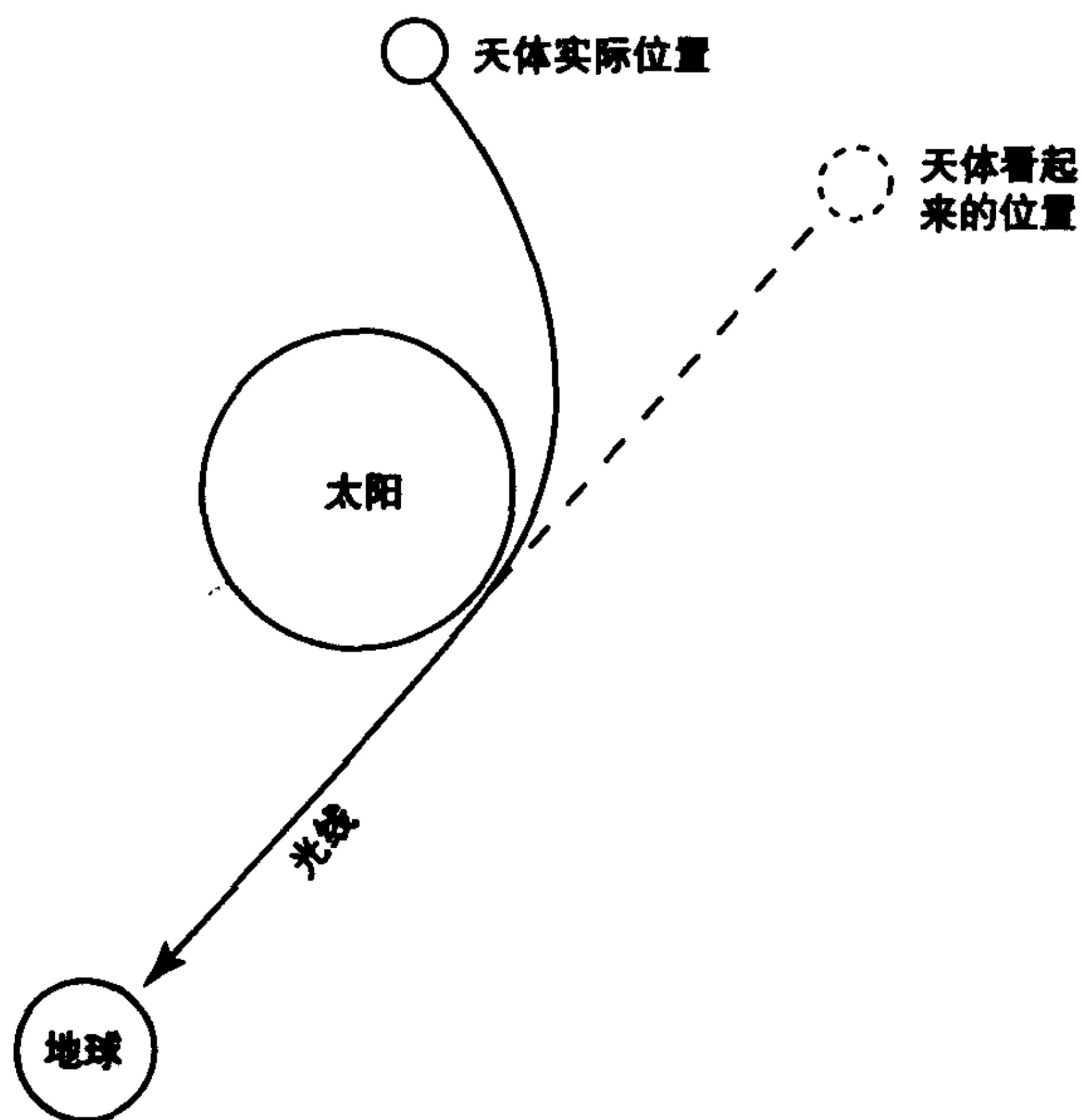
下面来定性地解释一下为什么相对论的要求会对轨道有这样的影响,这从狭义相对论的一些基本事实就可以明白。行星之所以能不断地绕太阳运动,是两



方面力量综合作用的结果，一方面是万有引力，它把行星往太阳这边拉；另一方面，是离心力，它使得行星的运动有远离太阳的趋势。两方面综合的结果，就是行星一会儿贴近太阳，一会儿远离太阳，双方都没法完全压倒对方，总是拉锯战。在经典力学的情况，这种拉锯战的结果正是行星的椭圆轨道。在相对论中，行星运动也是这两方面力量在拉锯，但是万有引力的作用被增强了。增强的原因在于，物体以某个速度运动的时候，它的质量会增加。所以作用在物体上的万有引力会变大，因此行星要比经典力学中的计算结果更靠近太阳一些，这样飞一圈的总效果就是近日点向前移动了一点。

141

虽然爱因斯坦计算的结果跟实际观察的结果符合得相当好，还是遭到了很多批评。比如主张太阳不圆的人就提出，现在实验观测到太阳的确是有一点点扁，虽然剩余进动还不能由这么一点点的扁完全地解释，但是它已经足以产生一定的效果，这样一来，广



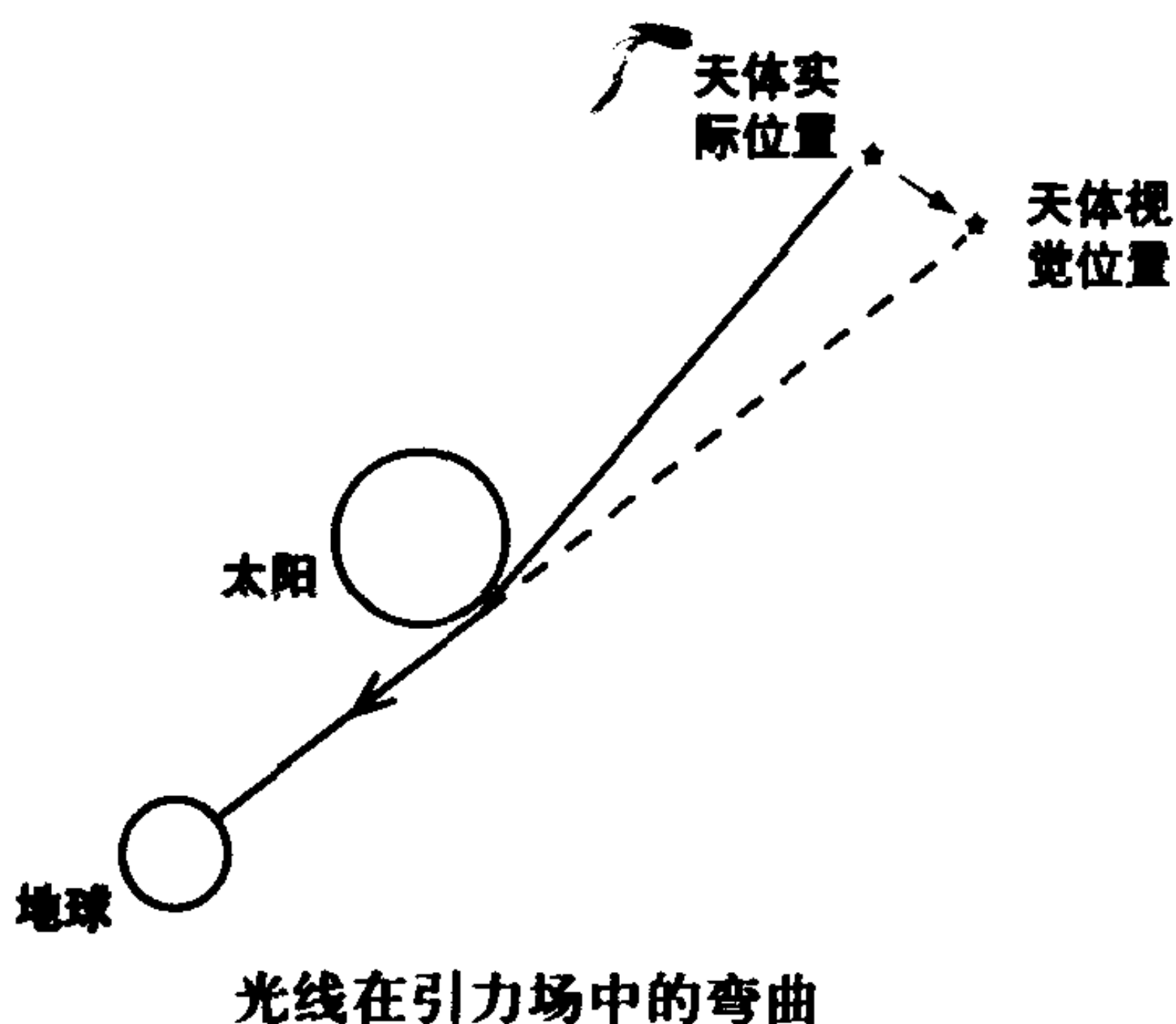
义相对论计算出的精确结果就不再是精确的，而是有很大的偏差。为了反驳这种批评，人们又计算了其他行星的剩余进动，以及大行星的卫星的剩余进动情况。计算结果还是跟广义相对论符合得相当好的，所以我们基本可以认为广义相对论在解释剩余进动这个效应上是成功的。



第二个证据是光线偏折。这是一个相对简单的效应。在狭义相对论中已经知道，光子虽然静止质量是零，但是它有动质量。有质量的物体在引力场中的运动一定会受到引力场的影响。本来是直线的光线路径就会变得弯曲，引力场越强的地方弯曲得越厉害。在太阳系里，太阳表面应该是引力场最强的地方了，所以贴近太阳表面经过的光线应该弯曲得最厉害。

143

根据等效原理可以给出这个偏折角度的具体数值是 $1.75''$ 。很多广义相对论的书中都写到按照牛顿理论结合光子的动质量计算的结果是上述结果的一半，





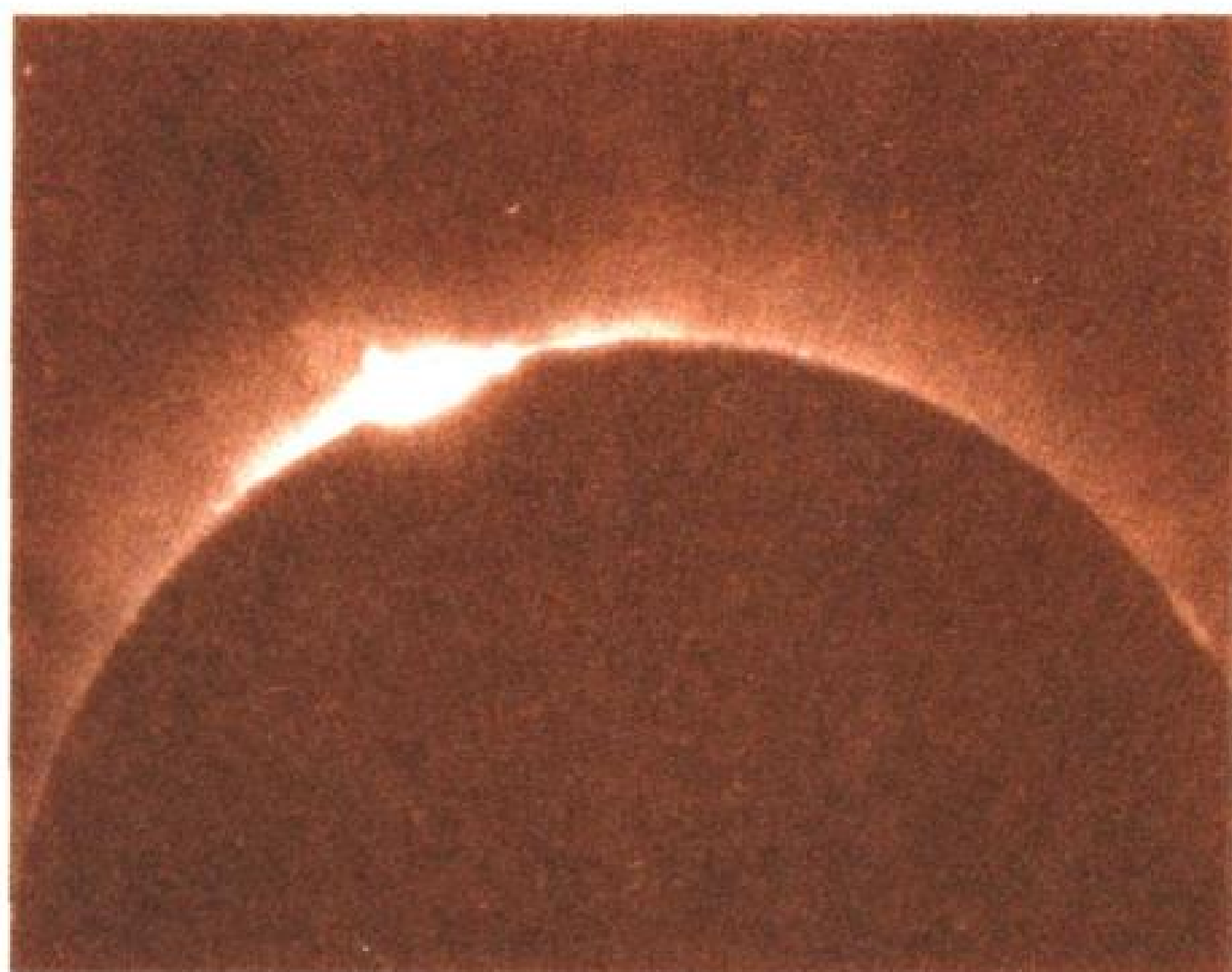
其实这并不对。因为这个计算中只考虑了光子的动质量这样一个狭义相对论效应，正确的计算应该把狭义相对论中的长度收缩和时钟变慢效应都考虑进来，最后的结果和广义相对论的结果其实是一样的。

在这个效应被计算出来不久，物理学家们就得到一次难得的验证机会，这就是1919年的日全食。之所以在日全食的时候观测这种效应，是因为平时没有日食时的太阳光过于强烈，我们根本分辨不出我们接收到的光线是太阳发出来的还是太阳后面的天体发出来的，所以也就没法知道光线经过太阳究竟会偏折多少。

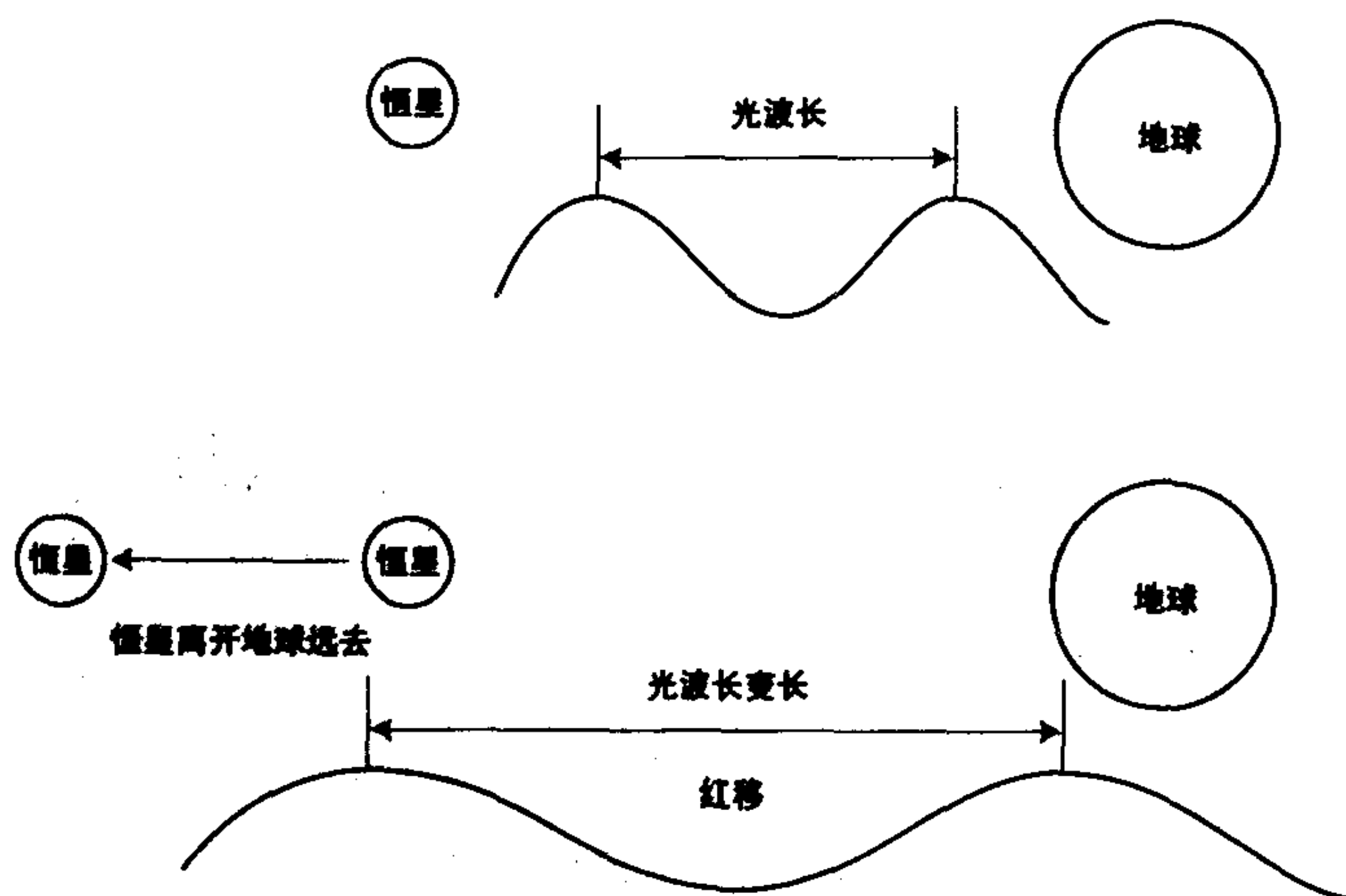
在日食的时候，太阳光完全被挡住，我们对太阳拍照的话，得到的光线就完全是太阳背后的行星发出的光线。我们只需把这个照片跟没有太阳时同一天区的照片相对比，就能发现太阳对光线的影响。那次观测的结果在当时被认为跟广义相对论符合得相当好，不过后人仔细检查实验数据，发现其实误差还是很大



的，这主要是因为当时的实验手段不够先进。后来每次日食都有组织地进行此类观测，所有的结果综合起来分析已经能够把误差降低到1%以下了。



第三个证据叫做引力红移。红移这个概念来自光学，是指因为某种原因光的频率降低。因为可见光里红光的频率最低，所以叫做红移，就是向红端移动的意思。通俗点说，就是本来从太阳发出的光是黄色的，但是我们这里看起来它微微发红。

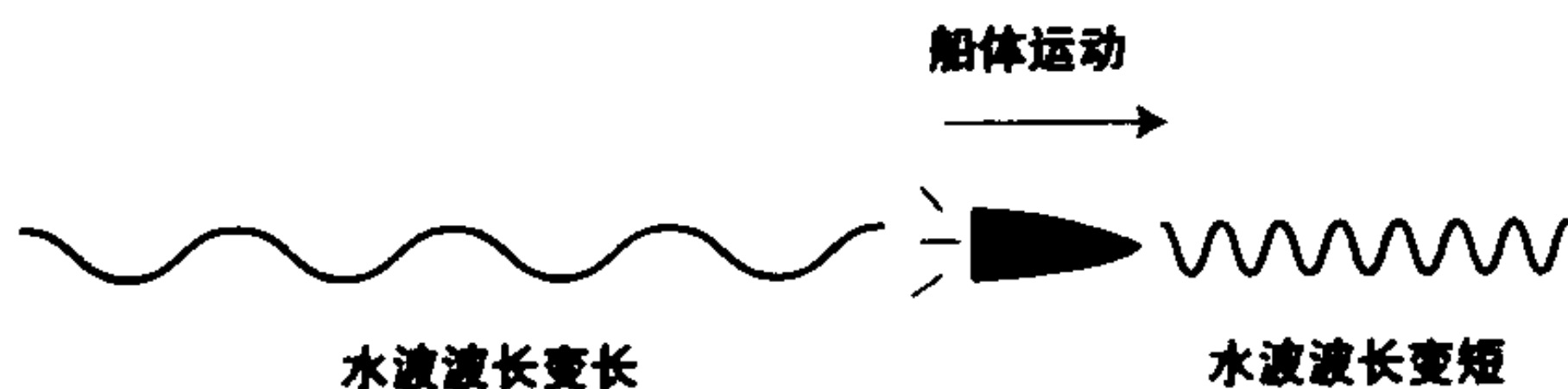


根据狭义相对论，光子是有质量的，当它从太阳表面发射出来时，因为要克服引力的吸引，所以能量应该降低，根据量子力学，光子的能量跟频率的大小是一回事，所以这个过程中光的频率降低了，也就是说，发生了红移。这个效应看起来似乎很容易验证，只要测量一下来自太阳的光就可以了。因为太阳光应该是黄色的，如果发生了红移，就应该偏桔红一些（其实不会有这么大的红移，不然靠肉眼就能分辨

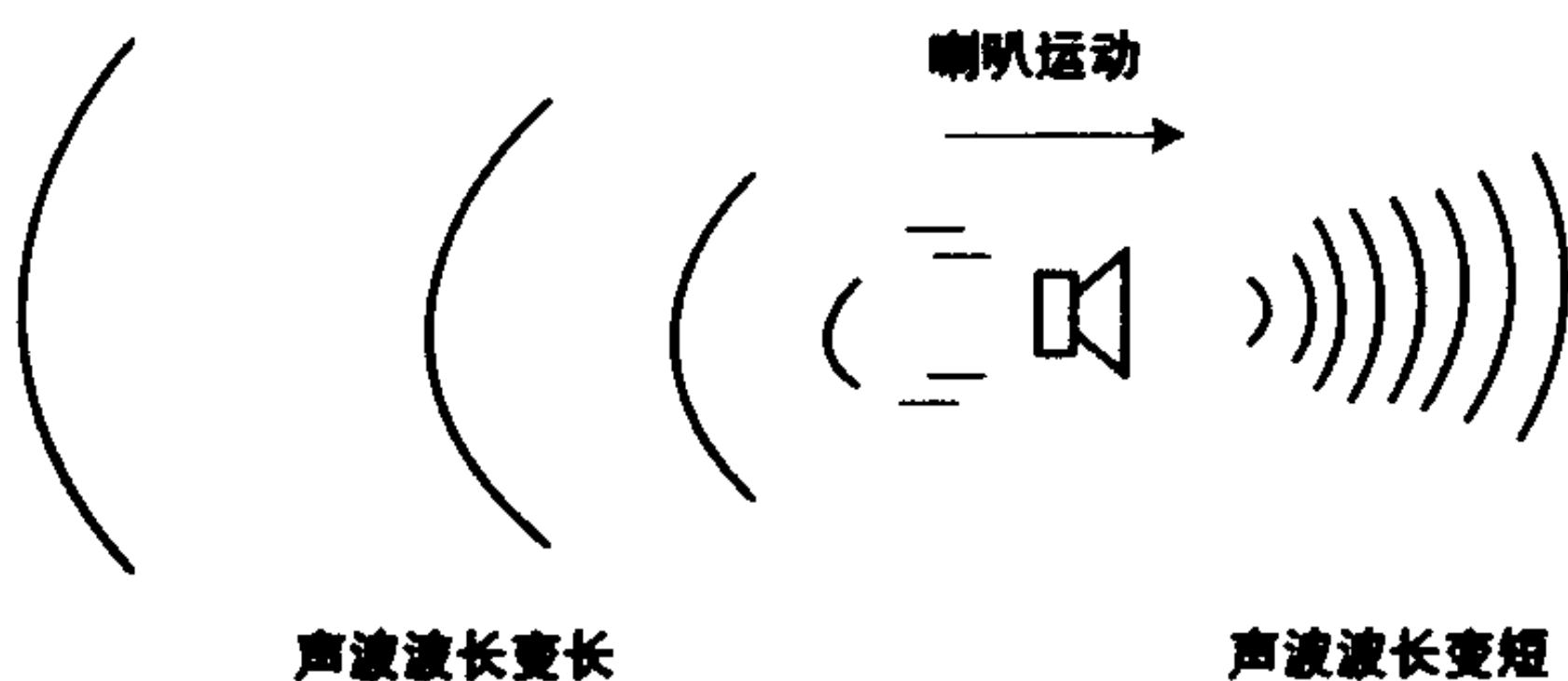
了)。但是实际上并不能这样。因为来自太阳的光并不是老老实实在地由一个光源发出来的，而是一些高速运动的原子发出的，它们的运动会带来另一个红移，叫做多普勒红移。

这个红移远大于引力带来的红移，而且这个红移的大小是随机的。我们测到的红移的大小只能推出这个原子的运动速度，而不能得到引力红移。为了验证引力红移，科学家们采用了另一个办法。他们在地球上测量从高处射向地面的光，这是把产生红移的过程反过来了，所以能量不再是降低而是升高，光子的频率也就应该升高(这实际上是紫移)。实验物理学家们利用量子力学中的穆斯堡尔效应精确地测定了这个紫移的大小(这个数值非常的小，频率的改变和频率的比值只有 0.0000000000000001)，它和广义相对论符合得相当好。这个实验可以说是广义相对论，甚至是整个物理学中最精确的实验之一。

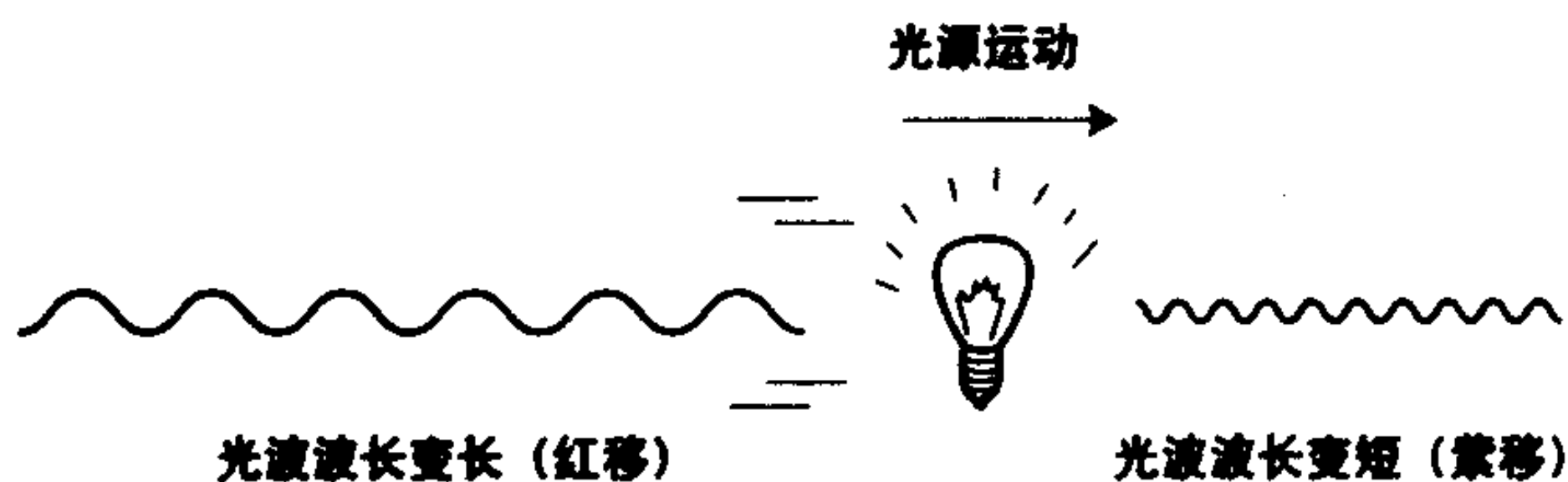
这三个实验之后，广义相对论被普遍接受，并且



(水波的多普勒效应)



(声音的多普勒效应)



(光的多普勒效应)

成为现代物理学的基本理论之一。

不过需要说明的是，对引力理论的检验远比上面这三个实验丰富。自从爱因斯坦提出广义相对论以



后，又有很多类似的引力理论出现。他们和广义相对论的差别在于等效原理的强度不同，或者理论框架有些变化，但是这些理论都能够解释一些现象。如果只是说广义相对论跟某某实验的结果符合是不负责任的，正确的做法应该用各种实验组成一个大筛子，把所有的引力理论放进去筛选，最后筛出来的结果才是正确的理论。

149

组成筛子的实验有很多，有对光速不变的检验，有对等效原理的检验，有对牛顿近似的检验等等等等。总的来说，广义相对论在筛选过程中的表现还是不错的，支持的证据多，反对的证据少。但是这样的层层筛选仍不能完全排除一些其他的理论。所以我们对广义相对论的态度应该停留于可接受，而不应该认为它就是绝对的真理了。

关于实验检验还有一个有趣的例子，那就是引力波。这是引力场方程的一类解，它描述引力作用像波一样传播的过程。如果把时空想像成一块布，引力波



就是物质运动在布上揉搓出来的皱纹。如果把时空想像成水面，引力波就是搅动水池时水面上的水波。当年爱因斯坦刚提出广义相对论不久，他自己就从理论上发现了这种解的存在。不过直到今天，人们也没有实际观测到引力波，因为它们实在是太微弱了。举个例子，一个1000吨的钢柱(比如说核潜艇)，让它以最快的速度来转圈，大约每秒转10圈(如果更快它就会断裂了)，产生的引力波的功率究竟有多大呢？结果是0.00000000000000000000000001 瓦。为了让大家都知道这个功率有多么得小，我再列举一个数字。蚂蚁沿着墙向上爬行的功率是0.000001 瓦。而蚂蚁爬墙的功率又是家用汽车的0.0000000001！这个例子说明任何人造物体产生的引力波都不可能被人们探测出来，想找引力波必须到天空中去。一般的天体也不行，比如地球绕太阳转动所释放的引力波的能量甚至都不能点亮一只灯泡。必须找有着激烈的运动过程的天体才行，比如超新星爆发。1987年，我们的近邻星系仙女



座大星云中有一颗超新星爆发，它产生的引力波足够的强，我们应该可以探测到。不过很可惜的是，当天全世界所有七个引力波探测器都在检修，没有一个在



工作。绝好的机会与我们失之交臂了。超新星爆发这种罕见的现象是等不来的，科学家们只能另想办法。

在上世纪五六十年代的时候，天文学家们发现了一对脉冲双星。脉冲星是大质量恒星演化后期的一种产物，他们体积非常小，只有几公里到几十公里，但是却和1~3个太阳的质量差不多，所以附近的引力场极强，是理想的引力波发生器。双星是指两个互相绕转的恒星，如果这两个星都是带有强引力场的脉冲星，那么就会发出很强的引力波。不过遗憾的是，这种引力波还没有强到能被我们探测到的地步。不过我们有别的办法知道这些引力波的存在。因为引力波是携带能量的，所以脉冲双星系统辐射引力波的同时会损失能量。因为转动对称性的关系，他们绕转的速度不会减慢，所以只能是互相绕转的半径变小了。脉冲星的一大特征是他们会发出很短的脉冲电信号，周期大约是几秒钟。互相绕转的结果会使两颗星的信号混合在一起。如果半径变小了，那么周期也会相应地变



小，混合的结果就会不同。我们探测出这些混合的信号就可以发现它们互相绕转的周期的改变。而这个改变我们是能够通过广义相对论计算出来的，两相对比就可以知道引力波理论是否正确。实验的结果是令人满意的，这个观测一直继续到现在，观测结果和理论预言的误差已经小于1%。另外，这几十年来还有其他的脉冲双星被发现，类似的观测也都得到了比较好的结果。



第四节：黑洞

黑

洞是广义相对论中最有意思的一类解了。它对应着天空中的某种天体，这种

天体的物质分布过于集中，以至于连光线都无法从中逃脱。它一般是由大质量恒星因为自身引力太大塌缩而成的。在广义相对论以前，就有人预言过黑洞的存在，不过那时候并没有相对论的概念，只是觉得宇宙中有可能有一些巨大天体，他们发出的光线无法传到我们眼睛里，所以我们看不到他们。当时还计算了这种天体的半径。后来有了广义相对论和它的第一个精确解——史瓦西解，人们才真正了解了这种神秘的天体。

黑洞的特征是有一个视界，也可以说是它的表面，凡是这个表面以内的光线，都无法发射出来，因



为物质的运动速度一定小于光速，所以物质粒子就更出不来了，这个性质正是黑洞这个名字的由来。这个视界在史瓦西解的情况是一个球面，半径刚好和以前人们根据牛顿引力计算的结果一样。不过，这其实是一个巧合。那个按照牛顿理论的计算跟广义相对论相比错了两处，结果两个错误刚好抵消掉，最后得到了正确的结果。

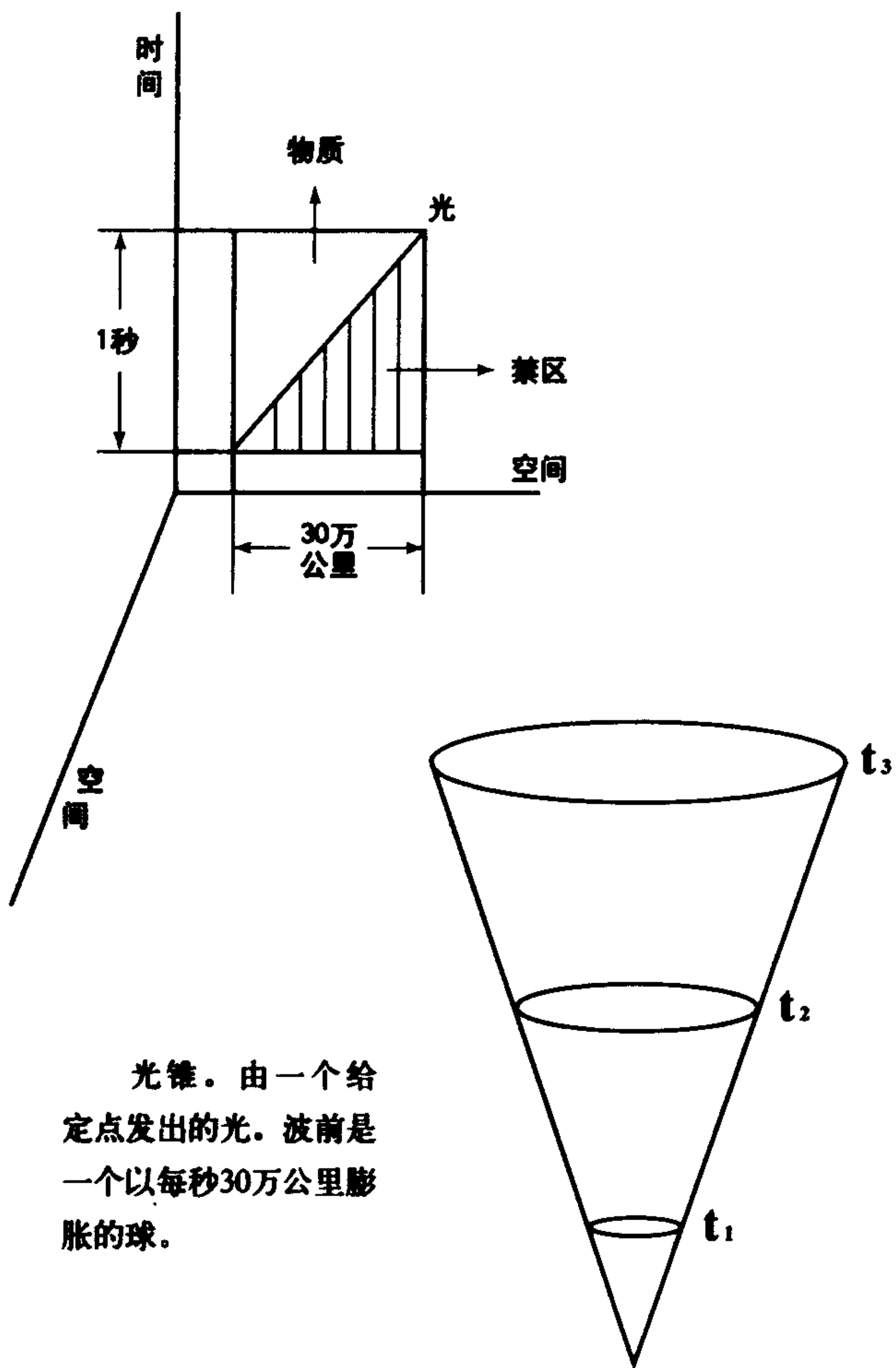
155

黑洞的视界具有很多很奇异的性质，但是想要正确地理解它们并不容易。

我们应该还记得在讨论狭义相对论的时候，我们说过：没有参考系的讨论是毫无意义的，所以这里首先要说明的是，广义相对论中的各种结果是非常依赖于观察者的运动状态的。以不同方式运动的观察者观察到的现象可能是相互矛盾的。史瓦西视界上的各种奇异性质都是静止在无穷远处的观察者观察到的现象，如果换一个观察者，比如说朝向黑洞自由下落的观察者，就看不到这些奇异性了。我们把这种依赖于



156



光锥。由一个给
定点发出的光。波前是
一个以每秒30万公里膨
胀的球。

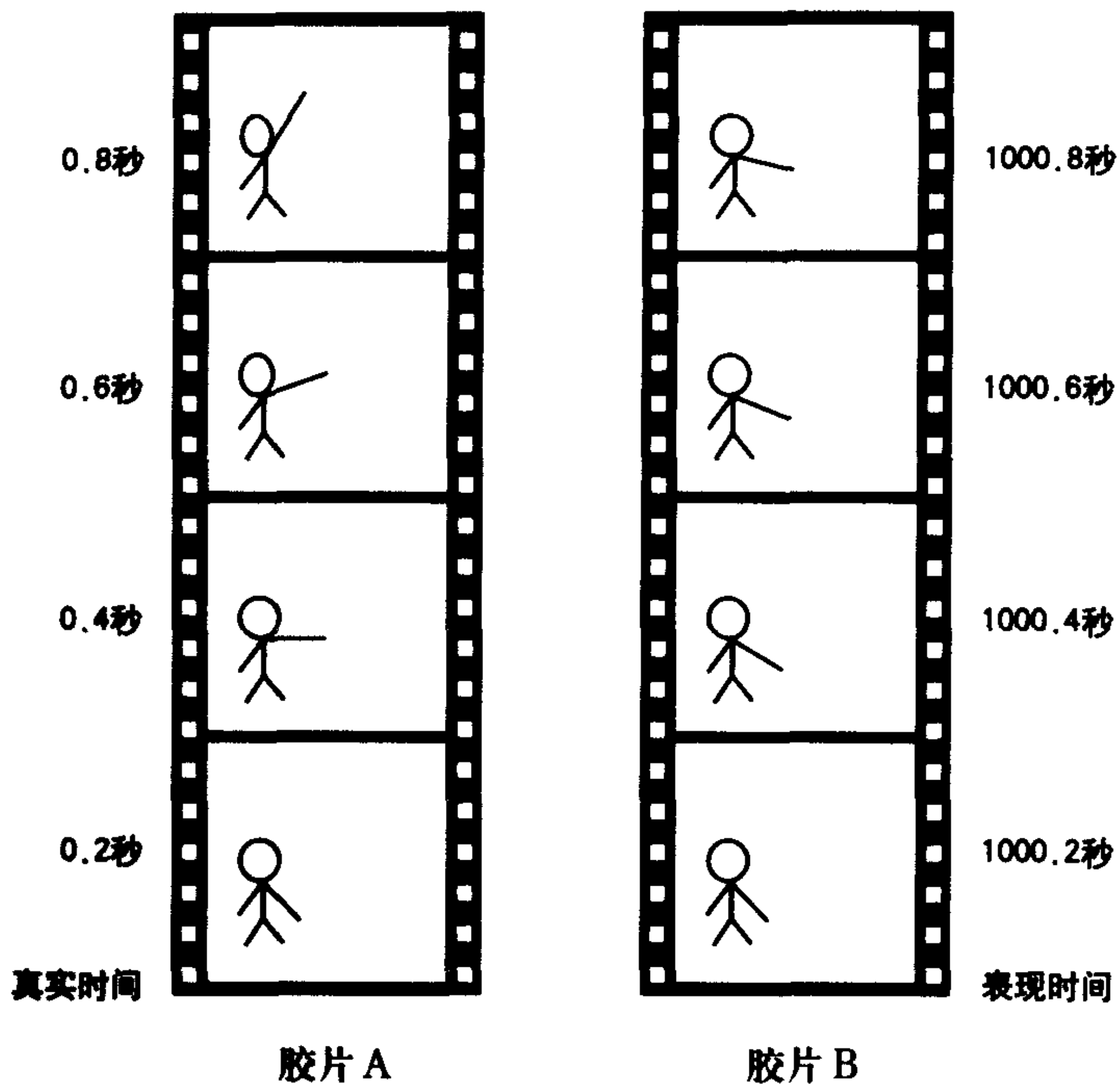


观察者的奇异性叫做坐标奇异性，就是说这些奇异现象是因为坐标选得不好才有的，如果换一个坐标系，奇异性可能就会消失。

下面来具体地看看这些奇异性。首先回忆一下引力红移现象，从引力场强的地方发射出来的光子到了引力场弱的地方频率会降低。这个现象可以从另一个角度看，如果我们认为光子是不变的，变化的是不同地方时间流逝的速度，那么上述现象说明，引力场强的地方时间流逝的速度要比引力场弱的地方慢。

157

我们可以利用这个现象来延长我们的寿命，比如到一个引力场很强的地方去(比如黑洞附近)飞行一段时间，然后出来，就会发现你会比没去黑洞附近飞行的人年轻了好多。不过这种“延长寿命”的办法只是相对的，你自己的感觉还是一样的，只是别人比你老了。黑洞视界的奇异性在于，在视界面上，时间流逝的速度无限缓慢。它带来的直接后果是，如果从视界面上发出一束光，当它到观察者的眼中的时候会无限



宇航员的敬礼

左边影片显示的是飞船原时(即在飞船上看到的情况), 右边影片则是从很远处看宇航员的动作。从很远处看时, 宇航员的动作非常缓慢, 当飞船越过视界后, 胶片 B 上的宇航员将定格在最后一个动作上, 从此他在视界内的任何动作与外界再无关系。



地红移，换句话说，频率降到了0，这时显然就是没有光了。

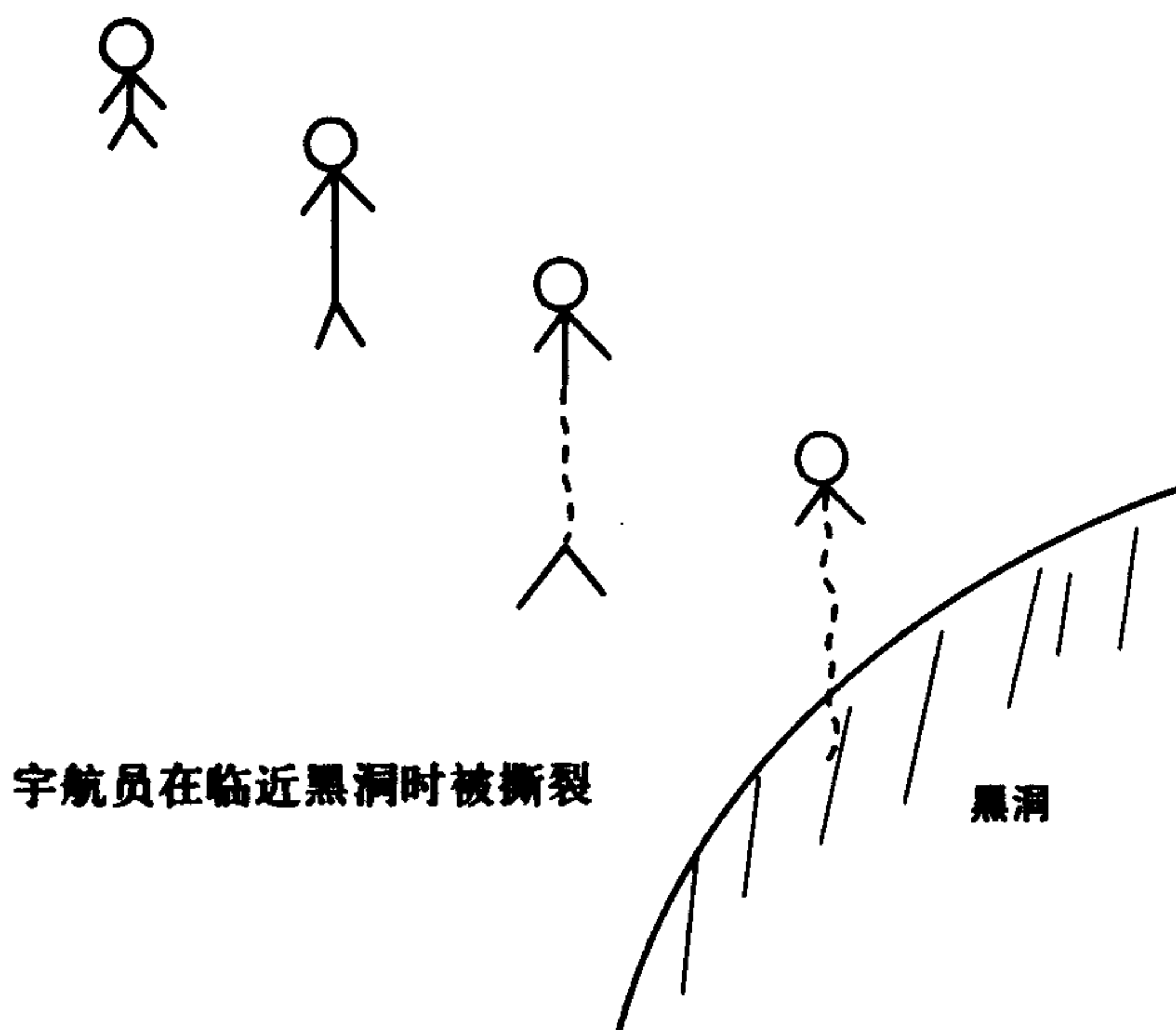
这从另一个角度说明了为什么视界以及视界以内的光无法发射到外面来。对于一般的黑洞，物质粒子无法逃逸的区域的边界和光无法逃逸的区域的边界并不重合，前者叫做视界，而后者叫做无限红移面。史瓦西黑洞的两个面刚好是重合的。另一个由无限缓慢的时间带来的效应是，外面的观察者将永远也看不到一个物体落入黑洞。只需要想像一下一个物体落入黑洞的过程，当它越来越接近黑洞，处在无限远处的我们会看到它的时间流逝速度越来越慢，所以走得也就越来越慢，到最后永远地停在视界处，不再向前前进，或者说前进的速度基本上是0。这个事实暗示我们，对于无限远观察者来说，视界是他们所能看到的世界的边界，视界以内的东西对于他们来说是无意义的。

上面所说的奇异性质是无穷远处的观察者所看到



的，对于其他运动状态的观察者未必会有这些现象。
比如说前面提到过的朝向黑洞自由下落的观察者，他什么都感觉不到，就像在惯性系中一样，不过随着他越来越接近黑洞，他会感觉到黑洞的潮汐力。所谓潮汐力是指引力场不均匀时，作用在一个物体上不同位置的引力不同，结果导致物体发生形变的力。地球上的潮汐就是因为太阳和月亮的引力对地球表面海水的

160





作用处处不同引起的，这也是潮汐力名字的由来。黑洞附近的引力场极端不均匀，所以潮汐力也相当大，对于跟普通恒星质量差不多的黑洞，在离视界很远的地方潮汐力就强到足以摧毁任何人类飞船的地步，所以自由下落的观察者还没到视界处就被潮汐力撕裂了。如果这个观察者探测的是一个星系中心的巨型黑洞，视界附近的潮汐力就没有这么强了，他们会毫无感觉地进入这个死亡陷阱，然后无论怎样努力都无法逃脱。不过如果这些探险者足够警惕，就不会发生这种状况。

161

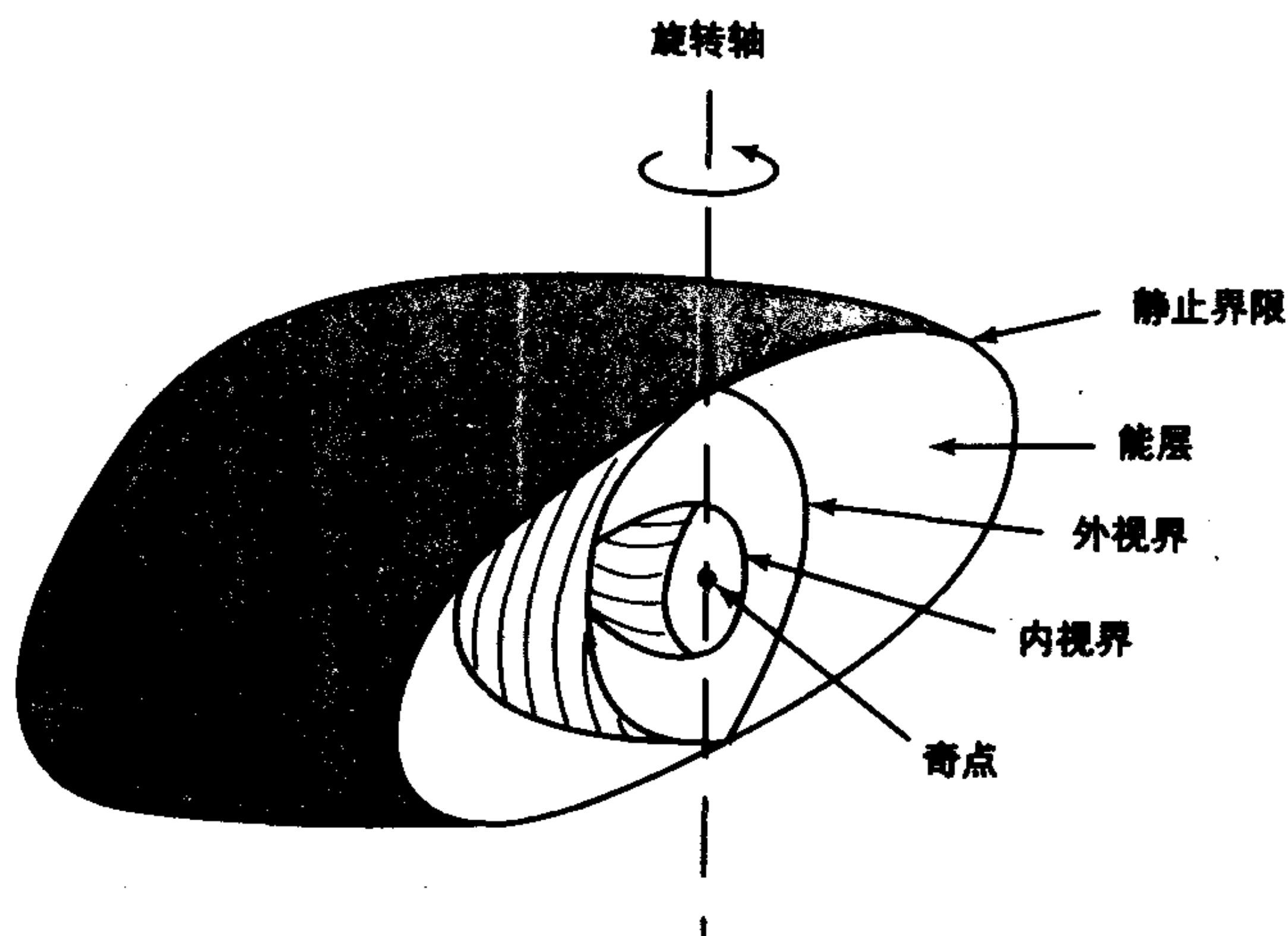
当他们在接近黑洞视界的过程中，如果从舷窗向外看，会看到奇异的现象：首先看到脚下一个黑影不断地逼近，然后越来越大，到后来甚至弯过来包住了他们，他们的上空还能看到外面的星星，但是范围越来越小。这种奇异的景象是因为黑洞附近的光线被严重地偏折导致的，这时候虽然探险者们感到自己身处深渊，其实他们还没落入黑洞。一旦他们上方最后一



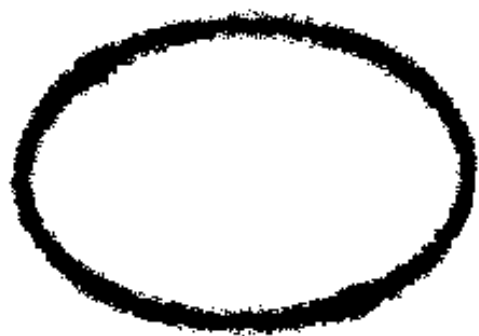
点星光也被黑影所吞没，他们才是真的落入了死亡的陷阱。

如果这是一个史瓦西黑洞，那么这个倒霉的探险家会在很短的时间内落到黑洞中心去，那里有一个奇点，体积无限小，密度无限大，而且它的奇异性是不能通过坐标变换来消除的。无论这个探险家如何挣

162



转动黑洞的截面，显示了黑洞内部复杂的结构：多重视界。



扎，他都不可避免地会撞上这个奇点。

上面说的是最简单的史瓦西黑洞的一些情况，这种黑洞的基本特征是静态球对称且不带电。更一般的黑洞还有一些其他的性质。关于黑洞的分类，有一个著名的无毛定理，它说自然界中的稳态黑洞，只能带有三个基本属性：质量、电荷和角动量。

163

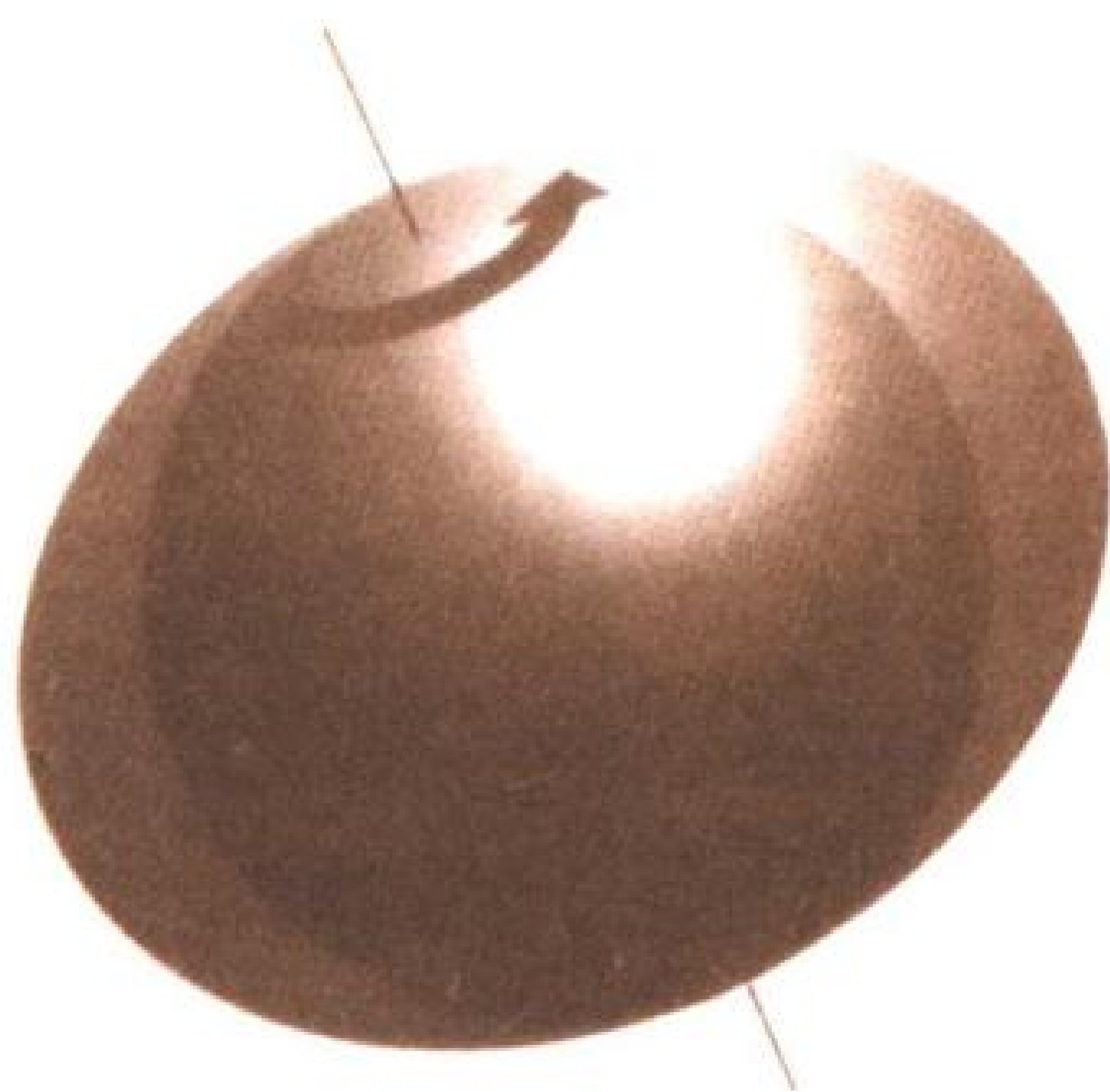
这个定理的证明非常的复杂，人们仔细研究了恒星的引力塌缩过程，证明了恒星上的“毛刺”都以引力波的形式发射出去了，恒星的磁场慢慢地被包到视界内部，最后剩下的就只有上面三个属性。

这个定理把自然界中可能存在的黑洞完全限定下来了，只能有四种：史瓦西黑洞(不带电、不转动)、雷斯纳-诺德斯特龙黑洞(带电、不转动)、克尔黑洞(不带电、转动)、克尔-纽曼黑洞(带电、转动)。如果考虑量子效应，带电黑洞会发射出跟它们所带电荷相同的带电粒子，同时它们也吸收一些跟它们所带电荷相反的带电粒子。这个过程进行得非常快，以至于



我们基本可以认为黑洞很难带上电荷，因为自身的电荷不是被外来的电荷中和掉，就是自己放出去。所以大部分黑洞是不带电的，有一些黑洞因为周围有带电物质构成的吸积盘，它们有可能带电，因为不断的有外来物质的补充。

我们下面介绍一下旋转黑洞，也就是克尔黑洞。它的最重要性质是，我们可以从中提取能量。



这听起来有些不可思议，因为史瓦西黑洞的种种行为让我们以为黑洞都是一毛不拔的吝啬鬼。这里的奥秘在于，克尔黑洞的无限红移面和视界并不重合，它们之间的部分叫做能层，意思就是能够从中提取能量的一层。克尔黑洞的能量组成有两部分：质量对应的引力能和转动对应的转动能。我们所能提取的是转动能的部分。具体方法是，派飞船飞入能层，然后以某个特定方式朝黑洞转动方向的反方向扔下一个重物，然后快速离去。这个过程会使黑洞转动的角动量降低，减少的部分转移到飞船上，另外，转动能也降低，这部分能量也转移到了飞船上，这就从黑洞中提取了能量。不过，在这个过程中，黑洞也不吃亏，它虽然失去了转动能，但是得到了一大块物质。黑洞并不在乎转动能，它在乎的是视界的面积。黑洞进行的任何活动都保持视界面积只增加不减少，上述过程能够使视界面积增加，所以能够进行。从这个事实看来，黑洞并不是什么都要的贪婪鬼，更像是一个精明



的商人。类似的，带电的两个黑洞也可以提取能量，他们同样追求面积最大。从这个性质可以看出，史瓦西黑洞似乎是黑洞演化的终态，是死亡了的黑洞，我们无法再从史瓦西黑洞中提取能量。而另外三种黑洞则是演化中的黑洞，可以说是处在激发态的黑洞，可以从中提取能量。

166

克尔黑洞的内部比史瓦西黑洞的内部丰富多彩得多。首先，它的内部也有一个无限红移面和一个视界。内视界和外视界之间的部分类似于史瓦西黑洞的内部，就是说只能朝里面走，无论怎么挣扎都会在有限的时间内到达内视界。对于史瓦西黑洞，它也有内视界，不过它的内视界和中心奇点是重合的，所以到达内视界也就意味着死亡。但克尔黑洞的内视界并不是一个点了，而是一个球面，它的内部不再是只能朝里走的区域，所以穿过内视界以后，还能继续存活。史瓦西黑洞有中心奇点，当它旋转起来变成克尔黑洞时，这个奇点变成一个环，如果潮汐力不大，我们可



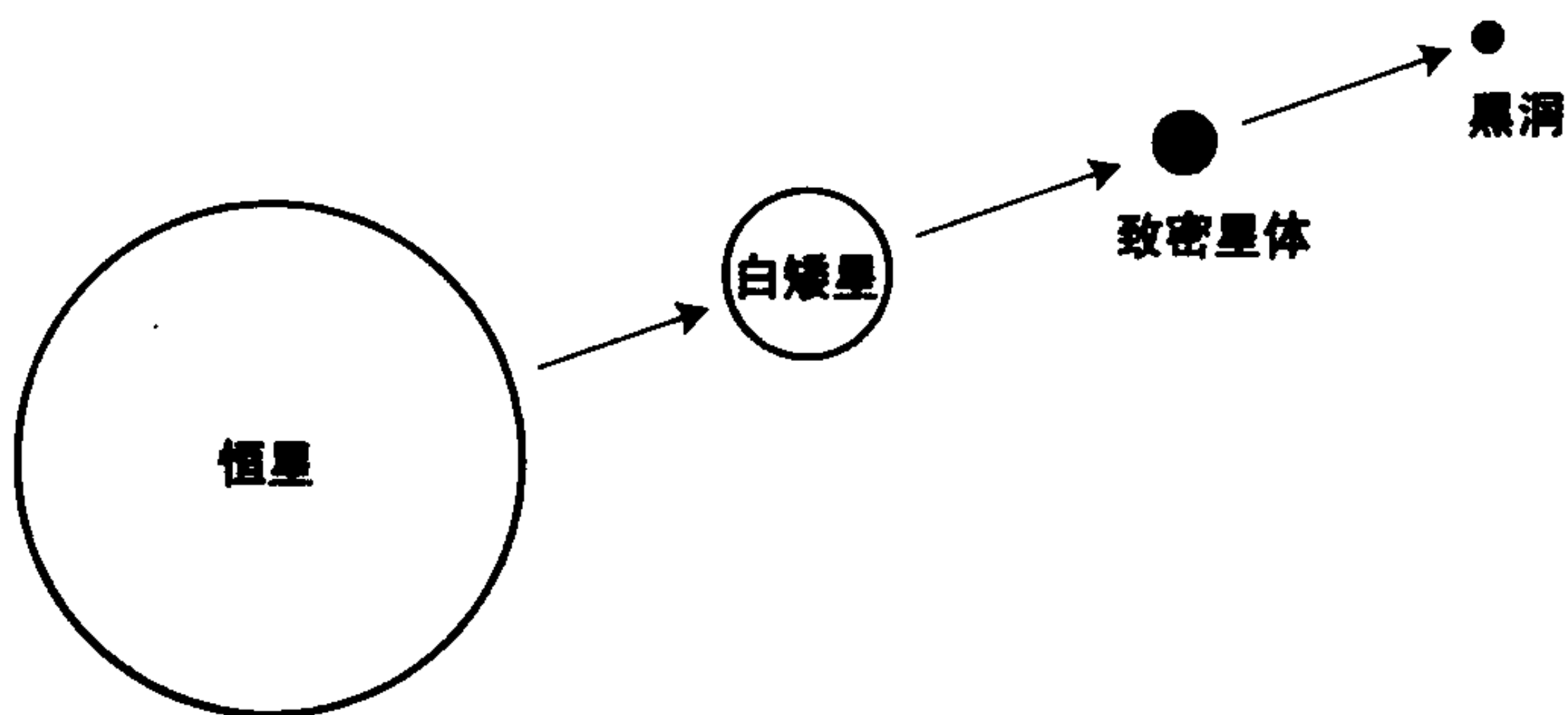
以从它中间穿过去。

不过需要提醒大家的是，黑洞内部的奇异区有很多非常古怪的性质，以至于一些严肃的物理学家认为现阶段研究黑洞内部的情况是不妥当的，因为得到的结论很可能不是真实的。好在奇点或者奇环总有视界包裹着，他的古怪性质不会影响到黑洞外面的我们的世界。这一点被称为宇宙监督猜想，就是猜测宇宙中存在着一个监督大人，他总保证奇点被包裹在黑洞中。

167

关于奇点，还有一些重要的定理，这些定理根据广义相对论和几条很合理的要求得出了惊人的结论：宇宙的过去和未来一定存在奇点。因为奇点是广义相对论没法处理的，所以这些定理实际上使用广义相对论证明了它自身的无能。从这一点上我们也可以看出，广义相对论本身决不是一个终极的理论，它有力所不及的地方，需要更好的理论来代替它。

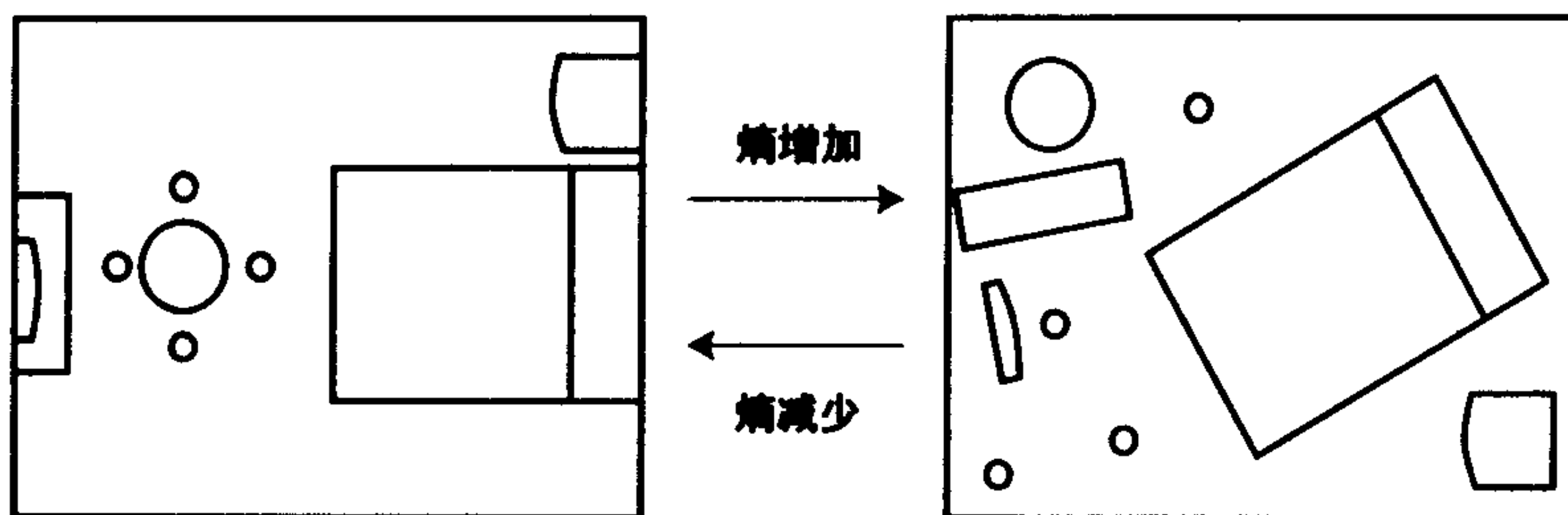
上面提到的黑洞总保持视界面积不减少，是黑洞



恒星在自身引力影响下向内塌陷，最后形成黑洞

的一个非常重要的性质。从这个性质，很容易推出一个结论：黑洞一旦形成，就不可能被破坏。

这可以看成是宇宙监督的一个结果，因为黑洞如果可以破坏，奇点就露出来了。面积不减的另一个极其重要的产物就是黑洞热力学。它是研究黑洞的热性质的一门学问。黑洞的面积只能增加不能减少，这跟热力学中的熵很相似。熵是描述系统混乱程度的一个



整齐的房间

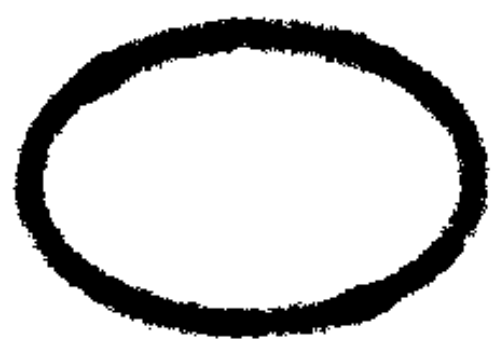
混乱的房间

量。熵越大，表示系统越混乱。如果一个系统跟外界没有物质和能量的交流，那么它的熵只能保持不变或者增加，不可能减少。打个比方，把房间弄得乱七八糟要比把它收拾得整整齐齐容易得多。这还是房间中的东西比较少的情況，如果一个房间里有10000000000000000000000000000个东西，弄乱以后就完全不可能收拾回来了。上面这个数字正是宏观物体中所



包含的原子或者分子的数目的量级，他们总在不停地跑来跑去，所以这样的系统只能越变越乱。这就是为什么熵只能增加不能减少的原因。黑洞的各种属性都可以和热力学系统中的各种属性一一对应起来，其中的一个属性最引人注目，那就是温度。因为根据热力学，有温度的物体一定会发射出热辐射，如果黑洞有温度，那么它一定会辐射出粒子，即使它是已经不能再提取能量了的史瓦西黑洞。这似乎跟广义相对论是直接矛盾的，因为不可能有东西从视界中逃出来。后来，霍金把量子力学引入广义相对论，证明了黑洞的确有热辐射，不过这是一种量子效应，所以在经典的广义相对论中不会有这种效应。后来，黑洞热力学的内容更为丰富，计算黑洞的温度和熵已经变得十分简单，而且对各种动态的黑洞也有了相应的办法。最近几年，计算黑洞熵还成为了验证弦理论的正确性的一个例子。

关于黑洞，还有很多很丰富的内容，比如恒星如



何演化成黑洞、黑洞的吸积盘、黑洞的光学效应、黑洞碰撞、星系级黑洞、天文观测中黑洞的认证等等，但是限于篇幅只能在这里打住了。



第五节：广义相对论与宇宙学

172

广义相对论虽然在解释一些实验现象上得到了巨大的成功，但是在现实生活中，它并没有什么应用。因为广义相对论对牛顿理论的修正太小了。从上面的几个实验证据上就可以看出来，对于现实生活中的问题，那些小修正完全可以忽略不计，或者会被别的更大的误差所掩盖。目前为止，跟人类生活相关的广义相对论的应用恐怕只有GPS(全球定位系统)一个，因为GPS对精度的要求是极高的，所以广义相对论带来的误差就不可忽略了。这些误差主要来源于引力红移效应，GPS的卫星在地球引力场中飞行，会因为狭义相对论的时间膨胀效应和广义相对论的引力红移效应变慢，所以就需要对卫星上的时钟随时进行调整。除此以外，广义相对论就基本



上和人们的生活没有关系了。在科学上，广义相对论最主要的应用就是天文和宇宙学了，因为一些大范围的时空结构问题和剧烈的引力活动必须要用广义相对论来处理。

宇宙学是一门研究宇宙的起源、演化、结构等等问题的学科。在广义相对论以前，因为牛顿理论的局限性，没有可能进行正确的宇宙学研究。在爱因斯坦提出广义相对论之后不久，他本人就从引力场方程中解出一个宇宙学解。为了让大家明白这个解的样子，我先来解释一下宇宙学中最重要宇宙学原理。

173

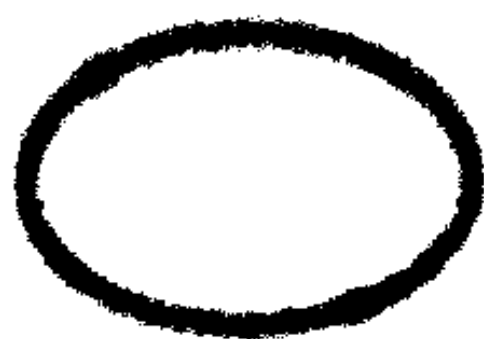
宇宙学原理：宇宙在空间上是均匀且各向同性的。

所谓均匀是指宇宙在每一点处的物质密度都是相同的。这看起来似乎有悖常理，只要看看我们周围：太阳系里中间一个大太阳，周围九大行星围绕，还有别的一些小行星、流星、彗星，显然物质密度不均匀；再看银河系，行星和行星之间距离以光年计，密



度也不均匀。事实上，宇宙学原理所说的均匀性，是在非常大的尺度上取了平均的结果，一般这个尺度是一亿到十亿光年，这样大的尺度中包含很多的星系团，取平均之后，宇宙是非常均匀的。宇宙学原理对宇宙的另一个要求叫各向同性，这个词说起来有些绕嘴，其实就是朝每个方向看过去，宇宙都是一样的意思。

宇宙学原理得到的一个推论是，宇宙在每一个地方看起来都是一样的。这个性质看起来很简单，但想充分地理解却并不容易。比如说，平面就是这样性质的空间，球面也是，但是球的内部就不是，因为贴近边界的地方和靠近中心的地方显然是不同的。从这个例子我们立刻可以发现一个事实，满足这样性质的宇宙一定没有边界的，不然边界点处就和别的地方不一样了。很多人把宇宙想像成一个物质团，其实并不正确，因为物质团就是有边界的了，把宇宙想像成一个球的表面似乎更合适一些，不过这个球不是普通



的三维空间里的球，而是更高维的一个球(球这个类比只是强调它的均匀各向同性，其实宇宙未必是这个样子)。

从上面的几个例子中我们可以看出，宇宙学原理对宇宙的形狀提出了非常强的要求，它必须有高度的对称性。在数学上，我们可以得出一个惊人的结论：单从上面的这种对称性出发，不考虑引力的动力学，宇宙的时空结构就可以写成一个非常简单的形式，它由一个随时间变化的函数和一个只取0和 ± 1 的常数确定。这个函数表征宇宙的“半径”，不过前面已经说了，宇宙未必是球面，所以称为半径并不妥当，比较合适的叫法是宇宙的尺度因子，意思是表征宇宙大小的一个量。另外那个常数叫做曲率常数，是表示宇宙的形狀的，当它取1时，表示宇宙是一个球面；当它取0时，表示宇宙是平面；第三种情况最为诡异，它表示宇宙是马鞍形的，不过一个均匀各向同性的马鞍面是很难想像的，我们也没法解释得更清楚了。需要



强调的是，上面我们用球面、平面、马鞍面来表示宇宙的形状只是给大家一个比较容易理解的例子，其实时空是四维的而不是二维的，所以宇宙并不是什么面，而是一个四维的物体。宇宙之所以会有三种形状，是跟它内部的物质的平均密度有关的。如果宇宙的平均密度很高，说明物质很多，引力很强，宇宙在演化中会因为自身引力不会变得太大，这就是球面。如果平均密度很低，宇宙自身的引力就太小，它在演化中就会越变越大，直至无穷。平面的情况介于这两者之间，宇宙的密度刚好在一个临界值上，这样宇宙既不收缩，也不膨胀得太厉害。

宇宙学原理的一个好处就是利用对称性就把宇宙的几何情况确定了下来，这个过程中并没有涉及到具体的引力理论。因为引力理论不止一个，所以我们可以把上面得到的宇宙的几何结构带入各个引力理论中求解，借此也可以检验引力理论的正确性。另外，宇宙学原理只是一个假设，在天文观测上并没有非常强



的证据。我们应用它也并不认为它就是绝对正确的了，只是从这个原理可以简单地通过对称性确定宇宙的几何结构，这样研究起来会比较简单。在未来的某一天发现宇宙并不是均匀各向同性的也是有可能的，那时候我们就要修改我们的宇宙学模型了。

下面回到广义相对论的第一个宇宙学模型——爱因斯坦的静态宇宙模型。这个模型就是把前面提到的宇宙尺度因子和曲率常数带入到广义相对论的引力场方程中。因为引力场方程是关于时空曲率和宇宙中物质分布的一个方程，光有几何部分还不够，还需要有物质分布和性质的一些信息。根据宇宙学原理，物质分布应该是均匀各向同性的，但是物质性质却不知道。所以需要附加一个表征物质性质的方程，这个方程叫做物态方程。不同的物态方程会给出不同的宇宙学解。这是很好理解的，想像一下一个由气体构成的宇宙和由液体构成的宇宙显然会很不一样。爱因斯坦采用的物态方程是类似于稀薄气体的物态方程。因为



宇宙中的物质分布是很分散的，星系和星系之间基本上没有碰撞，所以这种模型对描述现阶段的宇宙是很合理。但是他解出来的结果却很让人困惑，因为它发现宇宙的尺度因子是随时间变化的，而不是一个常数，这说明宇宙是膨胀的或者是收缩的。这在当时看起来很不可思议，因为宇宙似乎应该是不变的。爱因斯坦为了得到一个静态的宇宙学解，不得不在它的引力场方程中加了一项，这一项非常非常小，在普通的引力过程中完全可以忽略，但是在考虑宇宙学的时候就不得不考虑它了。这一项使得宇宙的尺度可以是一个常数，既不膨胀，也不收缩。

不过遗憾的是，爱因斯坦的这个解是错的。不久之后，就有一个年轻人证明这个解其实是不稳定的，就是说如果物质密度跟均匀性要求稍微有一点点小偏离，宇宙就会变得收缩或者膨胀，而不再是静止的。在宇宙中，这种小偏离简直是一定会发生的，所以爱因斯坦的模型实际上不能用。



埃德温·哈勃 (1889 - 1953)

另外，在天文观测上，天文学家哈勃发现宇宙其实是在膨胀的，这就彻底推翻了静态宇宙学解。哈勃的发现是通过测量遥远星系的距离和速度的关系得到



的。他发现离我们越远的星系，就越快地离我们而去。而且距离和这个退行的速度之比对所有星系是一个常数，这就是哈勃常数，是研究宇宙学模型的一个重要数据。速度和距离的比是常数说明宇宙是均匀膨胀的。我们可以从站方队的过程明白这一点。假设现在有一个紧密的方队要把人和人之间的间隔变大，在最中间的人会看到，离他最近的人只需走一步，跟他隔着一个的人就得走两步，越远的人走的步数就越多。如果我们要求列队过程在某一时刻同时完成，那么离得近的人的速度就慢，离得远的人的速度就要很快。而且对不同的人来说速度和距离的比值是一个常数。这就是哈勃定律的意义。需要说明的是，哈勃常数只是对不同的星系是常数，但它本身是随时间变化的，所以在宇宙学中经常称它为哈勃参量。

知道了哈勃定律以后人们意识到爱因斯坦以前解出来的膨胀的宇宙模型其实是正确的。这时候一个很突出的问题就是，既然宇宙现在是膨胀的，是不是说



明以前的宇宙比现在的宇宙小得多，甚至更大胆的想像，宇宙是不是由一次爆炸中创生出来的呢？这样的想法到了充分的发展，逐渐形成了宇宙学的标准模型——热大爆炸宇宙学。这个模型认为宇宙是在150~200亿年以前的一次大爆炸中创生出来的，之后逐渐地产生出各种基本粒子、原子、分子、物质团块、星云、星系等等现在我们看到的世间万物。这个爆炸不同于我们生活中的爆炸，这个大爆炸是创造时间、空间的一个过程，在它之前连时空本身都是不存在的，之后时空开始膨胀，成为我们的宇宙(回忆一下前面举的球面上的宇宙的例子)。之所以称为热大爆炸，是因为整个爆炸过程中，直到今天，我们都可以求出宇宙的平均温度来，并且这个温度在模型中非常重要。前面讨论黑洞热力学时说过，有温度的物体就会发出热辐射，宇宙也不例外。宇宙的热辐射是遍布全天的，就像一个背景。不过现在宇宙的温度太低了，只有3K左右(K是绝对温度，3K相当于零下270度)，



相应的热辐射主要是以微波的形式，所以这种辐射叫做微波背景辐射。六十年代两个电气工程师研究如何消除天线接收信号时的噪声，发现有一个遍布全天的恒定的背景噪声无论如何都消不掉，它相当于一个3K的热辐射。这就是宇宙的微波背景辐射。在这个发现以后，热大爆炸宇宙学被普遍接受。不过，这个学说还有一些难于解释的问题，近几年它又有了一系列大的发展，比如暴涨理论，还有一些观测上的发现，比如发现背景辐射其实不是那么的均匀和各向同性。不过限于篇幅，这里无法介绍太多，只能就此打住了。

第六节：物理学的统一

广义相对论提出以后不长时间，就有人对它做了推广，得到既能描述引力现象，又能描述电磁现象的一个几何理论。之所以会出现这样的理论，是因为在当时人们只知道电磁力和引力，所以如果把它们统一成为一个理论，那么物理学的统一似乎就完成了。这样的推广有两个最为引人注目的理论，一个是魏尔的规范不变几何学，一个是卡鲁扎的五维广义相对论。可惜的是，这两个理论都有一些难以克服的问题，所以不得被人们抛弃。不过他们对后来的统一场论有很深刻的影响。前者提出了极其重要的规范不变的思想，后来被杨振宁和米尔斯所发展，应用在粒子物理的研究中，建立了规范场理论，成为现代粒子物理学的基础。而后者在广



义相对论中又增加了一个空间维数，为了和我们看到的世界相符，这个多出来的空间维数必须卷曲成一个圆圈，这个步骤叫做紧致化，它在后来出现的各种高维统一场论中至关重要。后来在发现了微观世界的两种新的相互作用以后，卡鲁扎的理论被推广到更高的维数上，最终形成超引力理论。爱因斯坦本人也致力于统一场论的研究，甚至直到他去世前一年还发表了一篇相当重要的论文。不过，在他在世的时候，人们还没有认识到微观世界中的两种基本相互作用，所以他不可能真正地完成统一物理学中的所有相互作用的任务。真正的统一场论必须要等到四种基本的相互作用都研究得差不多的时候才有可能。在上个世纪末，描述微观世界的标准模型建立起来，统一四种相互作用成为可能。事实上，电磁力和微观的强相互作用、弱相互作用已经在某种程度上完成了统一，所以问题的关键就是如何把广义相对论变成一个量子理论。对于量子引力的尝试有很多，其中最具有市场的理论有两



个：一个是超弦理论，另一个叫做圈量子引力。这两个理论跟广义相对论相比更加复杂和深刻。其中超弦理论更为突出，它用到的数学几乎涵盖了现代数学的所有前沿内容。而且它还反过来从物理角度得到了很多数学家没有发现的数学结果。这些已经远远超出广义相对论的范围了，所以我们就不再介绍了。



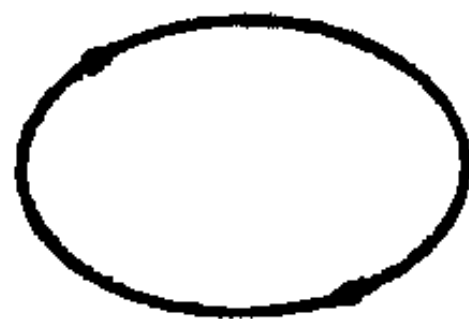
第七节：相对论的意义

狭

义相对论和广义相对论建立以来，已经过去了很长时间，它经受住了实践和历

史的考验，是人们普遍承认的真理。相对论对于现代物理学的发展和现代人类思想的发展都有巨大的影响。

相对论从逻辑思想上统一了经典物理学，使经典物理学成为一个完美的科学体系。狭义相对论在狭义相对性原理的基础上统一了牛顿力学和麦克斯韦电动力学两个体系，指出它们都服从狭义相对性原理，都是对洛伦兹变换协变的，牛顿力学只不过是物体在低速运动下很好的近似规律。广义相对论又在广义协变的基础上，通过等效原理，建立了局域惯性场与普遍参照系数之间的关系，得到了所有物理规律的广义协



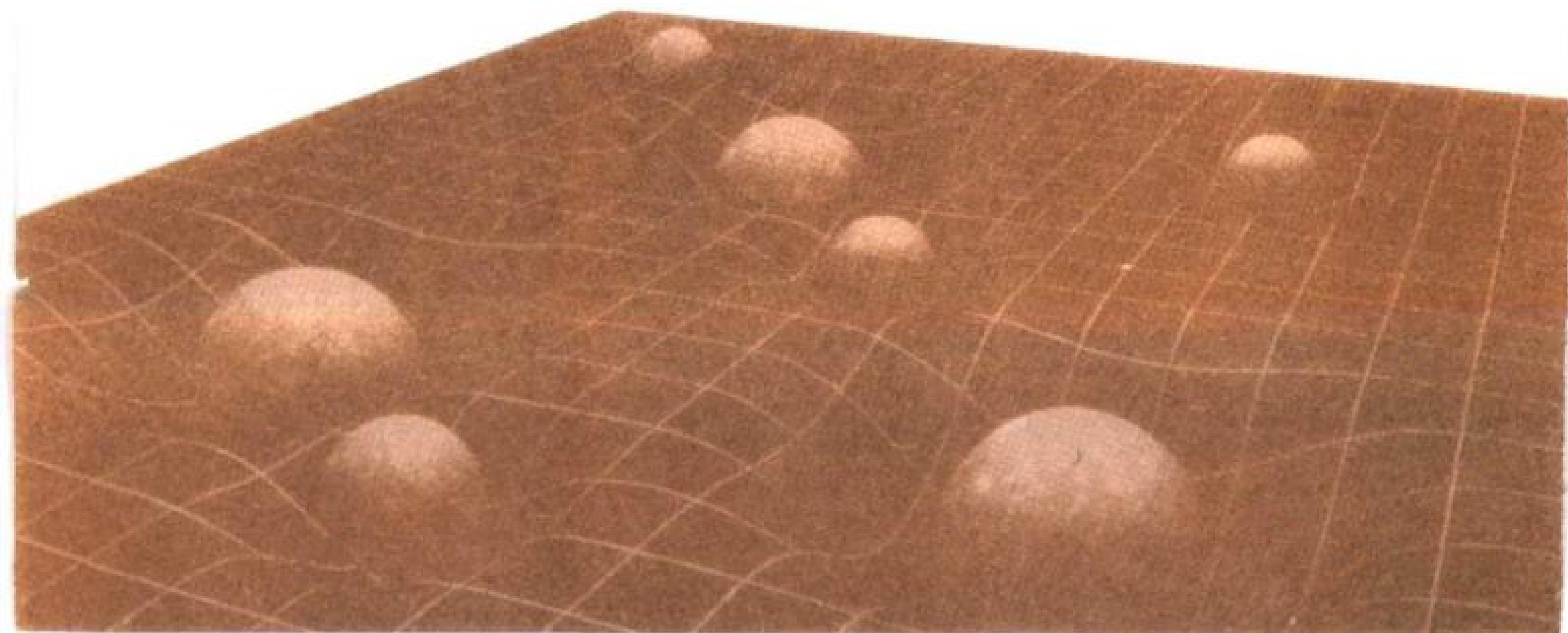
变形式，并建立了广义协变的引力理论，而牛顿引力理论只是它的一级近似。这就从根本上解决了以前物理学只限于惯性系数的问题，从逻辑上得到了合理的

牛顿理论按照超距作用的力来描述引力。它在太阳系中很成功，但在强引力场下失效。

187

量子力学描述原子水平以及更低水平的现象。

广义相对论将引力描述成因为时空中的质量和能量而引起的时空弯曲。物体试图以直线方式运动，但是它们的路径因为时空的弯曲而被弯折。





安排。相对论严格地考察了时间、空间、物质和运动这些物理学的基本概念，给出了科学而系统的时空观和物质观，从而使物理学在逻辑上成为完美的科学体系。

狭义相对论给出了物体在高速运动下的运动规律，并提示了质量与能量相当，给出了质能关系式。这两项成果对低速运动的宏观物体并不明显，但在研究微观粒子时却显示了极端的重要性。因为微观粒子的运动速度一般都比较快，有的接近甚至达到光速，所以粒子的物理学离不开相对论。质能关系式不仅为量子理论的建立和发展创造了必要的条件，而且为原子核物理学的发展和应用提供了根据。

广义相对论建立了完善的引力理论，而引力理论主要涉及的是天体。到现在，相对论宇宙学进一步发展，而引力波物理、致密天体物理和黑洞物理这些属于相对论天体物理学的分支学科都有一定的进展，吸引了许多科学家进行研究。

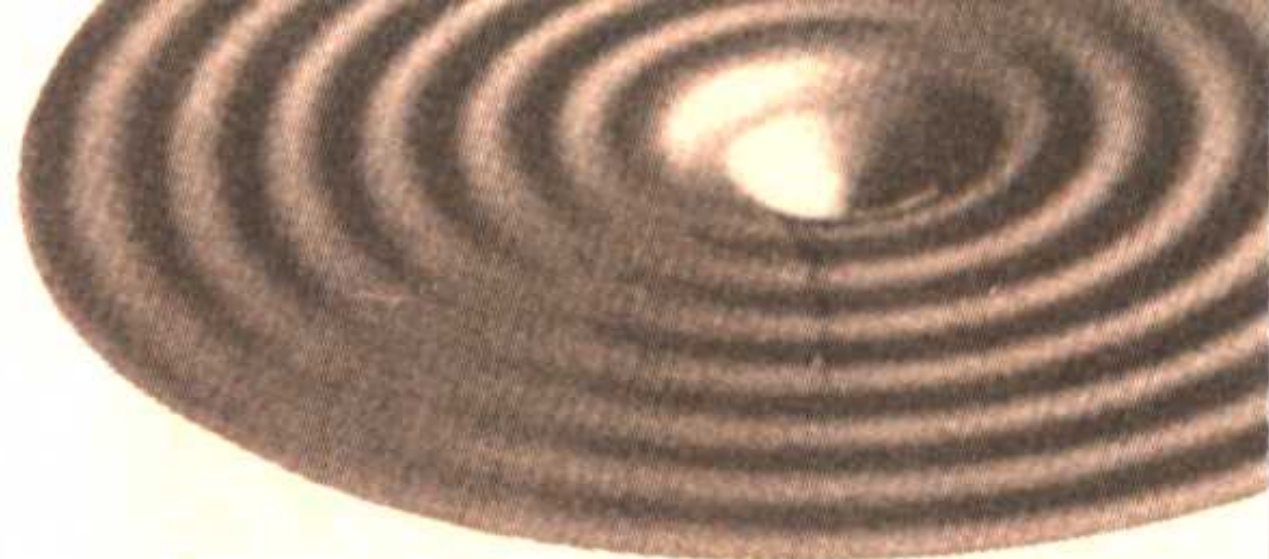


一位法国物理学家曾经这样评价爱因斯坦：“在我们这一时代的物理学家中，爱因斯坦将位于最前列。他现在是、将来也还是人类宇宙中最有光辉的巨星之一”，“按照我的看法，他也许比牛顿更伟大，因为他对于科学的贡献，更加深入地进入了人类思想基本要领的结构中。”

189







第四章

挑

战相对论

挑 战 相 对 论



尽

管相对论建立了辉煌的历史，但是百年以来，依然有无数物理学家和有钻研精神的爱好者对相对论进行了各种各样的验证和挑战，我们姑且不论企图论证相对论是错误的人的动机，这些人客观上为推动相对论的进一步完善提供了非常好的动力。我们这里遴选了部分观点，看看他们是怎么评价相对论的。

193

第一节：相对论是一个世纪笑话吗？

“实

验验证”是相对论获得认可的关键，原子弹的“理论依据”是相对论已是有口皆碑，如何看待这些“验证”是所有相对论反对者所面对



的问题。

而事实是：相对论有些结论并未得到验证，例如双生子佯谬并未得到解决，通常所讲的几项验证也只是在一个坐标系内发生，并不能证明坐标系与坐标系之间的对等性，也就是说所“证明”的并非所需要证明的。

194

(1)狭义相对论的基本前提——光速不变论尚不能认为已经得到确证。

(2)狭义相对论的某些推论虽然能够得到一些实验支持，但这些验证均属间接证明的性质。例如横向多普勒效应， μ 介子寿命延长等现象被解释为时间膨胀效应，但这些现象也可能是由于其他物理原因所引起的。

(3)狭义相对论最核心的论点时间相互膨胀(变慢)，空间相互收缩等断言迄今尚未得到最初步的证明。飞行原子钟实验事实上只是相对于地轴坐标系的效应，并非相对地面观察者的效应，更谈不上是两个



坐标系同时发生的效应。从四度冲量的概念来看，所有的动量、质量、能量都是一种相对的概念。因此，从光子的坐标系来看，世界上的一切物质的质量都应该是无穷大，一切能量也都是无穷大。但在相对论的理论体系中对有关问题避而不谈。因此所谓一切坐标系具有对等性这个基本论点既无完整的理论阐释，也无全面的实验证明。

逻辑推理是由前提通向结论的桥梁。相对论的推理手段是数学演算，很多人心目中相对论的问题就是数学问题。由于相对论的数学不好懂，而难懂的学问常被看成是高深的学问，于是相对论就成为一门神秘莫测的学问，非凡夫俗子所能问津，由于怯于坦率承认自己的不足和跻身士林之企求，相对论者之间，相对论者与反对者之间也仅敢在一些枝节问题上进行争论，结果总是不了了之。

数与形是人类长期生活经验所形成的概念，在此基础上发展成近代各个数学分支。由于数学具有抽象



性和共性的特点，在自然科学、社会科学和工程技术等各个方面均得应用，然而应该提出的是，在应用数学解决某一项具体问题时，必须遵从该问题的具体条件，举例来说：三元加五元等于八元，但三元加五角则等于三元五角，这是小学生都懂得的不同名数不能相加的道理。可见，用抽象的数学解决具体问题时，不是不受限制的。相对论的数学运算，依靠的是一些无法验证的假定(例如四度冲量、四度空间最小作用量、四度空间在引力场中产生扭曲等)和随心所欲的判定(例如对应原理、等效原理等)，我们不怀疑数学的重要学术价值，但也不能信奉数学万能的观点，要防止“数学拜物教”的倾向。相对论虽然对一般人来讲不好懂，但它的一些不正确的观点完全可以从爱因斯坦所写的科普书籍中找到。



第二节：双生子真的会有不一样的年纪吗？

时

间膨胀(变慢)效应是狭义相对论的基本组成部分之一，讲的是在两个相对作等

197

速运动的坐标系内，存在着时间相互膨胀的现象。狭义相对论问世以来，为了验证这个理论的正确性，很多的物理学家从不同的角度进行过各种实验，虽然实验方法不相同，但按其性质大致可分为以下几类：

(1)多普勒频率移动效应：就是类似于引力红移的概念，这些效应已经被实验证实，并且这种效应被认为是时间膨胀的结果。

(2)原子钟飞行实验：原子钟环绕地球飞行时，向东飞行的原子钟发现地面上的原子钟走得慢一些，而向西飞行的原子钟则比地面上的钟要快一些。实验者认为，这是因为向东飞行的原子钟的实际运动速



度，大于向西飞行的原子钟的运动速度。实验结果被宣称为狭义相对论时间膨胀理论的证明。

(3)运动介子寿命延长现象： π 介子和 μ 介子(这是种极其微小的粒子，但是他们的运动可以被实验来探测)以接近光速运动时，寿命显著大于“静止”介子的寿命。这种实验结果也被看作为时间膨胀效应的证明。

反相对论者认为以上三类实验只能看成时间效应的间接证明，并非时间效应的直接证明。因为：

(1)横向多普勒效应的产生虽然有可能是因为时间膨胀所引起的，但也有可能是其他物理原因所引起的，和相对论的符合也许只是一种巧合，作为相对论的实验依据是不充分的。

(2)飞行原子钟也存在着同样的问题，因为时钟变慢不等于时间变慢。时钟变慢可能是时间变慢引起的，也可能是其他物理原因引起的，如果飞船上放置的不是原子钟，而是伽利略式的摆钟，由于高空重力



加速度小于地面的重力加速度，摆钟的周期也将加大，这种现象是否也可以说成是时间变慢的效应。

(3)关于介子寿命延长一类的实验，同样存在着不少疑问。首先要问进入铅版的介子是立即转变为静止介子，还是需要一个减速的过程？速度较高的粒子其减速时间和速度较低粒子的减速时间是否相同？还要进一步问一下，介子蜕变为其它粒子时是达到静止状态以后才发生的还是减速到一定能阈后但尚未达到静止状态以前就发生？换句话说“静止”介子是否存在就是一个值得探讨的问题。也许运动的介子其寿命本来可以是很长的，由于和其他物质相互作用，使其速度减小，当达到某一能量时产生蜕变。所以这类实验也不能充分证明相对论的时间变慢效应。

199

(4)如果说上述各项实验的确证实了时间变慢效应，也只是证明了某一特定的坐标系内存在这种效应，而相对论的时间膨胀效应是在两个坐标系内相互发生的。迄今为止尚无一个实验能作为这种相互效应



的证明。这也就是所谓双生子佯谬的问题。

相对论者认为这个问题已经从理论上得到解决，其理由是：飞船离开地球时有加速度，回到地球有减速度。在这两段期间飞船是非惯性系。由于加速和减速，飞船上的双生子乙将变得比地球上的甲年轻。

200

反相对论者认为这个解释和相对论的基本出发点是矛盾的。相对论认为一切运动都是相对的，则两个坐标系既可以相对作等速运动，也可以相对作非等速运动。等速运动是相对的，加速运动也是相对的。从地球坐标系来看，飞船是非惯性系，但从飞船坐标系来看，则地球是非惯性系。如果说加速度能使飞船上的双生子乙变得年轻，加速度也能使地球上的双生子甲变得年轻。但这是不可思议的事，因此双生子佯谬并没有真正在理论上得到解释。

飞行原子钟实验结果发表后，有人认为可以作为上述理论的验证。反相对论者不同意这种看法。因为飞船上的原子钟和地面上的原子钟的差异所能肯定的



不是一种时间相互膨胀的效应，而是肯定了时间不存在相互膨胀的性质。此外，从地面上的观测者来看，向东飞行的飞船和向西飞行的飞船并没有什么两样，因为两者相对于地面上的运动速度是相同的。所谓向东飞行飞船的速度大于向西飞行飞船的速度不是相对观测者而言的，而是相对地轴坐标系而言的。因此飞行原子钟所能肯定的并不是相对论所讲的发生于两个观测者之间的相互效应，而是肯定了这种效应只能发生在某一特定的(脱离观测者的)坐标系中，是一种绝对效应。正如前面已经指出的，飞行原子钟变慢的效应并不等于时间变慢，这是再次强调的问题。

我们还可以设想，如果实验结果是飞行原子钟与地面原子钟走得一样快，相对论又会说这是因为向东和向西飞行的原子钟与观测者的相对速度一样。也就是说不论任何情况发生，均可以说相对论得到验证，岂能令人置信。

总之，双生子佯谬并没有解决，横向多普勒效应

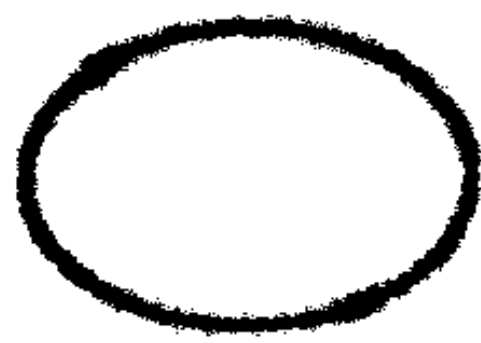


图 说 相 对 论

和飞行原子钟变慢的现象并不等于时间变慢。探索这些物理现象的真正原因是十分必要的工作。



第三节：光速是不可超越的吗？



类长期活动的实践经验告诉我们，世界的本源是物质的，物质又都是运动和变化的。所有变化都是物质之间相互作用的结果，物理现象也是如此。因此，对任何物理现象的解释都必须归结到物质之间相互作用的机理上来，任何其他解释都是错误的，或者说只是临时性的解决办法，这就是“物质作用论”的观点。

203

相对论是用“时空作用论”的方法来解释包括“光速”在内的各种物理现象的。这显然与“物质作用论”的思想不相符。所以反相对论者认为，从思想方法上讲，相对论就是错误的。人们只要继续坚持“物质作用论”观点，必然会对相对论的正确性产生怀疑。这是反相对论者对相对论持否定态度的理由之一，同时



也是最重要的理由。同时，反相对论者认为，相对论对许多问题的解释过于复杂、牵强，其理论体系内部矛盾重重。除了上面谈到的、在基本的思想方法上存在问题外，相对论理论体系内部具体矛盾也十分突出。

反相对论者认为，相对论并没有得到实验的充分验证，不仅各种“相对论效应”都可作其他解释，相对论还与许多实验事实相抵触。例如“超光速现象”、星体周围的光线“负弯曲”以及海格立斯双星的进动等都与相对论的预言相矛盾。相对论抛弃“物质作用论”的思想，用“时空作用论”的思想方法解释物理学问题，破坏了时空的本来面目，扰乱了人们的正常思维，妨碍了人们对物理现象真实物质作用本质的追求，使物理学逐渐走向了“神秘”。

他们提出了一些论据来证明他们的观点：

(1) 相对论面临着超光速现象的严峻挑战：近几年，不断有超光速现象被发现的报道，这些现象正在



向“光速不可超越”的观点发出挑战。

继1932年贝尔实验室第二次发现“光子在穿越势垒时不需要任何时间”之后，科学家一直在探讨超光速运动的可能性。到1995年，美国普林斯顿大学著名科学家奥尤金·威格内等人就断言：在某些条件下，穿越势垒的粒子是超光速的。

205

1991年，意大利国家电磁波研究院做过一个有说服力的实验，他们使一束微波通过波导管。随着波导管的加长，他们发现有一部分微波以超光速穿过了导管。

奥地利维也纳技工大学也做了类似实验，他们用高频大功率激光脉冲实现高精度时间解析后发现，不管势垒有多厚，光子穿越其间的时间都是固定的。

美国加州大学赵雷蒙等人取得了更有力的证据。他们利用一种新发明的、极其巧妙的干涉仪，准确地测量出光在一种势垒中的速度是真空光速的1.7倍。

美国尼米兹等人的研究成果则令人震惊。他们曾



在一个研讨会上播放了一段音乐。据称，这段音乐的信号载波是以4.7倍的光速传播12厘米后录制的。

2000年，更高的超光速现象出现了。美籍华人王利军等人把一个光脉冲发射到一个充满了经特殊处理的铯气体的容器中，他们发现光脉冲在铯气室中前进的距离是同一时间在真空中穿越距离的310倍。

除了实验室中的超光速现象外，天文观察也发现了超光速现象存在的证据。

1972 ~ 1974年美国一些天文学家发现塞佛特星3C120自身膨胀的速度达到光速的4倍。到1977年又陆续发现类星体3C273、3C345和3C279各自的两组成部分分离速度达到光速的7倍、10倍和19倍。后来，天文学家用分辨率极好的长基线射电干涉仪，又发现了10个类星体的两子源分离速度均达到光速的7到8倍。看来，河外射电源两组成部分的超光速膨胀现象并非罕见事例了。

(2)相对论在光速问题上的矛盾性：狭义相对论



认为，光速与光源的运动无关，与观察者的运动无关，具有不变性，真空中光速是宇宙间物体的极限速度。但广义相对论却认为，光会在引力场中加速，且加速度与普通物体在引力场中的加速度没有任何差别。比如，在地球周围，光线就有9.8米每平方秒的加速度。如果这种观点成立，则当光线正对着星球飞行时，其速度必然会超过原有的速度。这就是说，广义相对论实际上已经肯定了超光速现象的存在。很明显，狭义相对论和广义相对论在光速问题(尤其是超光速问题)上存在矛盾。

由于光速不变性是狭义相对论最基本的假设和前提，而光会在引力场中加速的观点是广义相对论基本思想最直接的推论，它们之间的矛盾性反映出狭义相对论和广义相对论之间存在着根本性矛盾。这表明，要么狭义相对论错误，要么广义相对论错误，甚至两者都错误。

(3)相对时空观质疑：相对论本质上是关于时空



的理论，但它提出的相对时空观却一直是人们争论的焦点。尽管“飞行介子的寿命增长”以及“原子钟环球航行实验”等似乎支持时间膨胀的观点，但严格说来，这些实验没有一个能证实时间会“相互”膨胀，最多只是证实了时间能“绝对”膨胀(可能连这一点也证明不了，因为它们都可以作其他解释)。事实上，时间相互膨胀的观点本身就存在着逻辑矛盾。

为了揭示这种矛盾，人们提出了许多悖论，其中最著名是“孪生子佯谬”。依据“时间膨胀”和相对运动的观点，“孪生子问题”必然会引出“兄弟俩都认为对方比自己年轻”的矛盾结论。但爱因斯坦等人认为，这种矛盾并不存在，孪生子之间扮演的角色是不对称的，外出的那位有加速、减速过程，在家的那位没有，因而外出的那位会更年轻。

很明显，这种说法与相对论关于“运动是相对的”基本观点相矛盾。如果只承认外出的那位有加速、减速过程而留在家里的这位没有，显然是站在绝对时空



的立场来说的。

“孪生子问题”的提出本意是为了论证“时间膨胀”的观点存在矛盾，这种“膨胀”效应是由“速度”引起的，但爱因斯坦等人的回答却将问题引到了“加速度”对时钟速率的影响上，似有转移话题之嫌。更主要的是，大量的实验事实表明，加速度根本不影响时钟的速率。

209

为了验证时间膨胀效应，人们做了大量的实验，加速度范围从 $10 \sim 13g$ 到 $10 \sim 16g$ ，实验结果均与狭义相对论预言的由“速度”引起的时间膨胀基本相符。这说明，加速度对其中的时间膨胀没有任何贡献。由此看来，爱因斯坦说外出的那位会因为加速、减速而年轻的说法根本不成立。

更重要的是，相对论对“孪生子佯谬”的解释还与原子钟环球航行实验结果相矛盾。如果爱因斯坦等人对“孪生子佯谬”的解释正确，那么在原子钟环球航行实验中，两组外出的钟，都应该比留在地面上的钟走

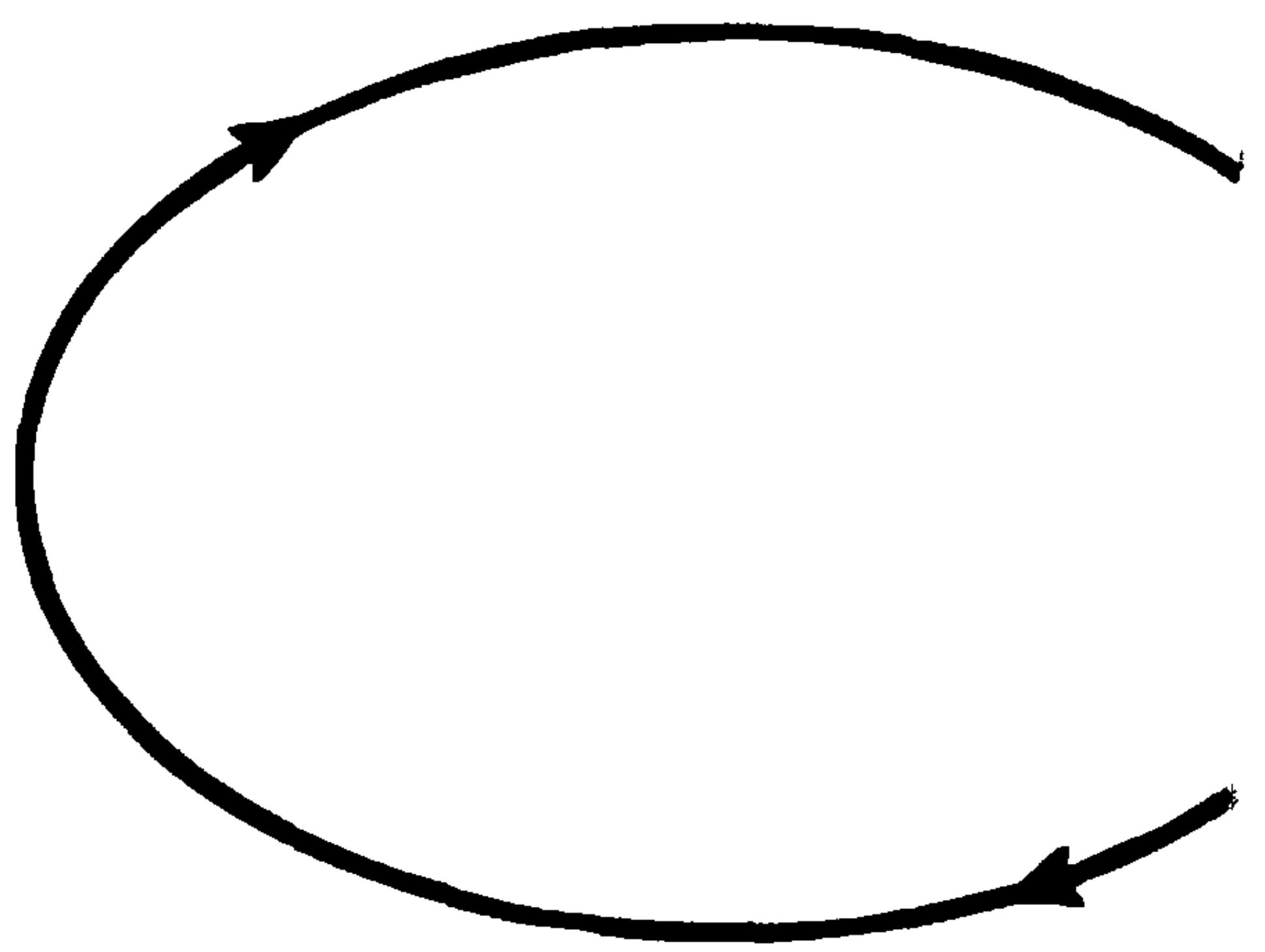


得慢才对。可是实验结果却是：返回的两组钟，一组比地面的时钟走得快，另一组比地面的钟走得慢。这说明，爱因斯坦等人对“孪生子佯谬”的解释与实验结果是不相符的。

相对时空观的矛盾性是实实在在的，“孪生子佯谬”只是更加形象地揭示了这一点。相对论如果连这个悖论都解决不了，也就无法真正消除人们对相对时空观的怀疑。



爱因斯坦关于相对论的论文





一、爱因斯坦关于狭义相对论的论文

经典力学中关于刚体位形的讨论，所根据的基础是不管欧几里得几何的有效性设定，而假设空间中的一切方向，或笛卡儿坐标系的所有位形，在物理上是等效的。这可以说是关于方向的相对性原理：按照这个原理，借助于张量几何可以来寻求方程（自然界定律）。现在要问：参照空间的运动状态是否有相对性：换句话说，相对运动着的参照空间在物理上是否是等效的。根据力学的观点，等效的参照空间看来确实是存在的，因为我们正以每秒30公里左右的速度绕日运动而在地球上的试验丝毫没有说明这个事实，另一方面，这种物理上的等效性，看来并不是对任意运动的参照空间都成立：因为在颠簸运行的火车里和在做匀速运动的火车里力学效应看来并不遵从同样的定律：在写下相对于地球的运动方程时，必须考虑地球的转动。所以好像存在着一些笛卡儿坐标系，所谓惯性系，参照这类坐标系便可将力学定律（更普遍地说是物理定律）表示成最简单的形式，我们可以推测下列命题的有效性：如果K是惯性系，则相对于K做匀速运动而无转动的其他坐标系K'也是惯性系；自然界定律对于所有惯性系都是一致的。

我们将这个陈述称为狭义相对性原理。就像对于方向的相对性所曾经做的那样，我们要由这个平动的相对性的原理推出一些结论。

为了能够这样做，必须首先解决下列问题。如果给定一个事件相对于惯性系K的笛卡儿坐标 x_v 与时刻 t ，而惯性系K'相对于K做匀速平动，如何计算同一事件相对于K'的坐标 x_v' 与时刻 t' ，在相对论前的物理学里解决这个问题时不自觉地做了两个假设：

213

1: 时间是绝对的：一个事件相对于K'的时刻 t' 和相对于K的时刻相同。如果瞬时的信号能送往远处，并且如果知道时钟的运动状态对它的快慢没有影响，则这个假定在物理上是适用的。因为这样就可以在K与K'两系遍布彼此一样并且校准得一样的时钟，相对于K或者K'保持静止，而它们所指示的时间会和系的运动状态无关：于是一个事件的时刻就能由其邻近的时钟读出。

2: 长度是绝对的：如果相对于K为静止的间隔具有长度 s ，而K'相对于K是运动的，则它相对于K'也有同样的长度 s 。如果K与K'的轴彼此平行，则基于这两个假设的简单计算给出变换：

$$\left. \begin{aligned} x_v' &= x_v - a_v - b_v t \\ t' &= t - b \end{aligned} \right\}$$

这个变换称为“伽利略变换”，对时间取微商两次，得



$$\frac{d^2 x_v'}{dt^2} = \frac{d^2 x_v}{dt^2}$$

此外，对于两个同时的事件，还有

$$x_v^{(1)} - x_v^{(2)} = x_v^{(1)} - x_v^{(2)}$$

平方并相加，结果就得到两点间距离的不变性。容易获得牛顿运动方程相对于伽利略变换的协变性。因此如果作了关于尺度与时钟的两个假设，则经典力学是符合狭义相对性原理的。

然而应用于电磁现象时，这种将平动的相对性建立在伽利略变换上的企图就失败了。迈克斯韦、洛伦兹电磁方程对于伽利略变换并不是协变的。特别是，我们注意到：根据上面的公式，对于K有速度c的一道光线对于K'就有不同的速度，有赖于它的方向。因此就其物理性质而论，K的参照空间和相对于它（静止的以太）作运动的所有参照空间便有区别。但是所有的实验都证实，相对于作为参照物体的地球，电磁与光的现象并不受地球平动速度的影响，这类实验当中最重要的是假定大家都知道的迈克尔逊与莫雷的实验。因此狭义相对性原理也适用于电磁现象就难于怀疑了。

另一方面，麦克斯韦、洛伦兹方程对于处理运动物体里光学问题的适用性已获得证实。没有别的理论曾经满意



地解释光行差的事实，光在运动物体中的传播和双星中观察到的现象。麦克斯韦、洛伦兹方程的一个推论是：至少对于一个确定的惯性系K，光以速度c在真空中传播；于是必须认为这个推论是证实了的。按照狭义相对性原理，还须假定这个原理对于每个其他惯性系的真实性。

从这两个原理做出任何结论之前，必须首先重新考察“时间”与“速度”概念的物理意义。由前面知道：对于惯性系的坐标是借助于用刚体作测度和结构来下物理上的定义的，为了测定时间，曾经假定在某处有时钟U，相对于K保持静止。然而如果事件到时钟的距离不能忽略，就不能用这只时钟来确定事件的时刻；因为不存在能用来比较事件时刻和时钟时刻的“即时信号”。为了完成时间的定义，可以使用真空中光速恒定的原理。假定在K系各处放置同样的时钟，相对于K保持静止，并按下列安排校准。当某一时钟 U_m 指着时刻 t_m 时，从这只时钟发出光线，在真空中通过距离 r_{mn} 时到时钟 U_n ；当光线遇到时钟 U_n 的时刻，使时钟

U_n 对准时刻 $t_n = t_m + \frac{r_{mn}}{c}$ 。光速恒定原理于是断定这样校

准时钟不会引起矛盾。用这样校准好的时钟就能指出发生在任何时钟近旁的事件的时刻。重要的是注意到这个时间的定义只关系到惯性系K，因为我们曾经使用一组相对于K为静止的时钟。从这个定义丝毫得不出相对论前物理学所



作的关于时间的绝对特性(即时间和惯性系的选择无关性质)的假设。

为了赋予时间概念以物理意义, 需要某种能建立不同地点之间的关系的過程, 为了这样的时间定义究竟选择哪种过程是无关紧要的。可是为了理论只选用那种已有某些肯定了解的过程是有好处的, 由于麦克斯韦与洛伦兹的研究, 和任何其他考虑的过程相比, 我们对于光在真空中的传播是了解得更清楚的。

根据所有这些讨论, 空间与时间的数据所具有的不仅仅是想象上的意义, 而是物理上真实的意义; 特别是对于所有含有坐标与时间关系的方程, 这句话是适用的。因此询问那些方程是否正确, 以及询问用来从一个惯性系K到另一对它作相对运动的惯性系K'的真实变换方程为何, 是有意义的。可以证明: 这将借光速恒定原理与狭义相对性原理而惟一确定。

为达到此目的, 我们设想, 按已经指出的途径, 对于K与K'两个惯性系, 空间与时间已从物理上得到定义。此外, 设一道光线从K中的一点P₁穿过真空通往另一点P₂, 如果r是两点间测得的距离, 则光的传播必须满足方程

$$r = c\Delta t$$

如果取方程两边的平方, 用坐标差 Δx 表示 r^2 , 则可写出

$$\sum (\Delta x_v)^2 - c^2 \Delta t^2 = 0$$

以代替原来的方程，这个方程将光速恒定原理表示成相对于K的公式。不论发射光线的光源如何运动，这个公式必须成立。

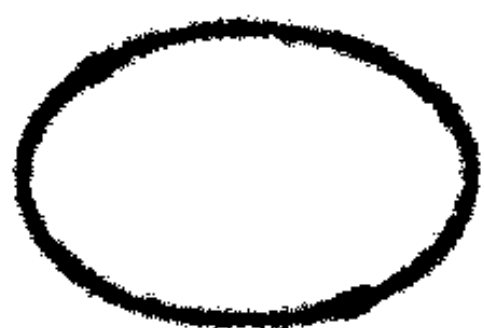
相对于K'也可考虑光的相同的传播问题，光速恒定原理在这个情况下也必须满足，因此对于K'，有方程

$$\sum (\Delta x'_v)^2 - c^2 \Delta t'^2 = 0$$

217

对于从K到K'的变换，上面两个方程必须互相彼此一致，体现这点的变换称为“洛伦兹变换”。

在详细考虑这些变换之前，我们还要对于空间与时间略作一般的讨论。在相对论前的物理学里，时间与空间是不相关联的事物。时间的确定和参照空间的选择无关。牛顿力学对于参照空间是具有相对性的，所以例如像两个不同时间的事件发生在同一地点的陈述则没有客观意义(就是和参照空间无关)。但是这种相对性在建立理论时没有用处。说到空间的点，就像说到时间的时刻一样，就好像它们是绝对的实在。那时不曾看到确定时空的真正元素是用 x_1, x_2, x_3, x_4 四个数所确定的事件。某事发生的概念总是四维连续区域的概念；然而对这一点的认识却被相对论前时间的绝对特性蒙蔽住了，放弃了时间的，特别是同时性的绝对性假设，时空概念的四维性就立即被认识到了。既不是



某事发生的空间地点，也不是它发生时间的时刻，而只有事件本身具有物理上的真实性。后面将会看到：两个事件间没有空间的绝对(和参照空间无关)关系，也没有事件的绝对关系，但是有空间和时间的绝对(和参照空间无关的)关系。并不存在将四维连续区域分成三维空间与一维时间连续区域的在客观上的合理的区分，这个情况说明如果将自然界定律表示成四维时空连续区域里的定律，则采取的形式是逻辑上最满意的。

在继续分析为洛伦兹变换下定义的条件之前，为了使今后推演的公式里不致明显地含常量 c ，将引用光时间 $l=ct$ 以代替时间 t ，于是规定洛伦兹变换，首先要求它能使方程

$$\Delta x_1^2 + \Delta x_2^2 + \Delta x_3^2 - \Delta^2 = 0$$

成为协变方程，就是说，如果方程对于两个既定事件(光线的发射与接受)所参照的惯性系能满足，则它对于每个惯性系都能满足。

最后，仿照闵可夫斯基的做法，引用虚值的时间坐标

$$x_4 = il = ict; \quad (\sqrt{-1} = i)$$

以代替实值的时间坐标 $l=ct$ ，于是确定光的传播的方程便成

$$\sum_4 \Delta^2 = \Delta x_1^2 + \Delta x_2^2 + \Delta x_3^2 + \Delta x_4^2 = 0$$

这个方程必须对于洛伦兹变换是协变的，如果

$$s^2 = \Delta x_1^2 + \Delta x_2^2 + \Delta x_3^2 + \Delta x_4^2$$

对于变换是不变量这个更普遍的条件能满足，则上述条件就总能满足了。要满足这个条件，只有用线性变换，即形式为 $x'_\mu = a_\mu + b_{\mu\alpha} x_\alpha$ 的变换，其中要求遍历 α 求和，即要从 $\alpha=1$ 到 $\alpha=4$ 求和。看一下上面两个方程就知道：如果不论维数以及实际性质，则这样确定的洛伦兹变换和欧几里得几何学的平动与转动变换是一样的。也能判断，系数 $b_{\mu\alpha}$ 必须满足条件 $b_{\mu\alpha} b_{\nu\alpha} = \delta_{\mu\nu} = b_{\alpha\mu} b_{\alpha\nu}$ 因为诸 x_ν 的比值是实数，所以除掉 a_4 ， b_{41} ， b_{42} ， b_{43} ， b_{14} ， b_{24} 与 b_{34} 具有纯虚值之外，所有其余的 a 与 b 都具有实值。

如果在 x_1 ， x_2 ， x_3 ， x_4 的任意惯性系里有四个量 A_ν ，在实际性质关系与变换性质上和 Δx_ν 相当，则用这四个量指明出来的物理量称为具有分量 A_ν 的四元矢量；它可以是类空的或者类时的。如果十六个量 $A_{\mu\nu}$ 按法则 $A'_{\mu\nu} = b_{\mu\alpha} b_{\nu\beta} A_{\alpha\beta}$ 作变换，则构成了二秩张量的分量。由此可知在变换性质与实际性质上， $A_{\mu\nu}$ 和两个四元矢量(U)与(V)的分量 U_μ 与 V_ν 的乘积是一样的。其中除掉只含一个指标4的分量有纯虚数之外，其余所有分量都具有实值。用类似的方法和更高秩的张量下定义。这些张量的加法，



减法，乘法，降秩与取商运算，完全类似于三维空间里张量的相应的运算。

现在谈到麦克斯韦方程，引用写法：

$$\left. \begin{array}{cccccc} \phi_{23} & \phi_{31} & \phi_{12} & \phi_{14} & \phi_{24} & \phi_{34} \\ h_{23} & h_{31} & h_{12} & -ie_x & -ie_y & -ie_z \end{array} \right\}$$

$$\left. \begin{array}{cccc} F_1 & F_2 & F_3 & F_4 \\ \frac{1}{c}i_x & \frac{1}{c}i_y & \frac{1}{c}i_z & i\rho \end{array} \right\}$$

并且约定 $\phi_{\mu\nu}$ 要等于 $-\phi_{\nu\mu}$ ，于是将上面两式带入麦克斯韦方程，便容易证明这些方程可以合并成以下形式：

$$\frac{\partial \phi_{\mu\nu}}{\partial x_\nu} = F_\mu,$$

$$\frac{\partial \phi_{\mu\nu}}{\partial x_\sigma} + \frac{\partial \phi_{\nu\sigma}}{\partial x_\mu} + \frac{\partial \phi_{\sigma\mu}}{\partial x_\nu} = 0$$

如果如我们假定的， $\phi_{\mu\nu}$ 与 F_μ 具有张量性质，则上面两个方程具有张量性质，因此对于洛伦兹变换是协变的。结果是，将这些由一个可容许的(惯性)坐标系到另一个所遵循

的规律是惟一决定的。

除了电磁场，只有电流密度出现为独立事物，这种方法上的进步是由于通过运动的相对性，使电场和磁场失去了它们不相关联的存在。由某个系来判断，一个场纯粹表现为电场；但由另一个惯性系来判断，这个场却还有磁场分量。将普遍的变换律应用于电磁场，则对于特殊洛伦兹变换这样的特殊情况就提供方程

221

$$\left. \begin{aligned} e'_x &= e_x & h'_x &= h_x \\ e'_y &= \frac{e_y - v h_z}{\sqrt{1 - v^2}} & h'_y &= \frac{h_y + v e_z}{\sqrt{1 - v^2}} \\ e'_z &= \frac{e_z + v h_y}{\sqrt{1 - v^2}} & h'_z &= \frac{h_z - v e_y}{\sqrt{1 - v^2}} \end{aligned} \right\}$$

如果对于K只存在磁场h，则没有电场e，则对于K'却还存在电场e'，它会作用到相对K'为静止的带电质点上。相对于K为静止的观察者会称这个力为洛伦兹电动势。

为了从形式上观察这个关系，让我们考虑作用于单位体积电荷上的力的表示：

$$k = \rho e + i \times h$$

其中I是电荷的矢速度，以光速为单位。如果按照麦克斯韦方程引用 F_μ 与 $\phi_{\mu\nu}$ ，则对于第一个分量有表示式



$$\phi_{12}F_2 + \phi_{13}F_3 + \phi_{14}F_4$$

注意到由于张量 ϕ 的对称性, 可知 ϕ_{11} 化为零, 于是四维矢量 $K_\mu = \phi_{\mu\nu}F_\nu$ 的前三个分量就是 k 的分量, 而第四个分量就是

$$K_4 = \phi_{41}F_1 + \phi_{42}F_2 + \phi_{43}F_3 = i(e_x i_x + e_y i_y + e_z i_z) = i\lambda$$

222

所以有单位体积上的力的一个四维矢量, 其前三个分量的 k_1, k_2, k_3 是单位体积上的有质动力的分量。而其第四个分量是单位体积的场功率乘以 $\sqrt{-1}$ 。

从四元矢量 K_μ 的存在与含义可以获得一项重要的结论。假定动量与能量原理对于每个物体是适用的。于是动量变化 $\Delta I_x, \Delta I_y, \Delta I_z$ 与能量的变化 ΔE 可以用下列式子表示:

$$\Delta I_x = \int_{l_1}^{l_2} dl \int k_x dx dy dz = \frac{1}{i} \int K_1 dx_1 dx_2 dx_3 dx_4$$

$$\Delta E = \int_{l_1}^{l_2} dl \int \lambda dx dy dz = \frac{1}{i} \int_{-1}^1 K_4 dx_1 dx_2 dx_3 dx_4$$

因为四维体系是不变量，所以推断四个量 I_x, I_y, I_z, I_t 的集体本身具有矢量特性；这些量所指的是物体的即时状态（例如在时刻 $t=t_1$ ）。

将这个物体当作质点，则这个四元矢量也可以用它的质量 m 与速度来表示。为了形成这样的表示式，首先注意到

$$-ds^2 = d\tau^2 = -(dx_1^2 + dx_2^2 + dx_3^2) - dx_4^2 = dl^2(1 - q^2) \quad 223$$

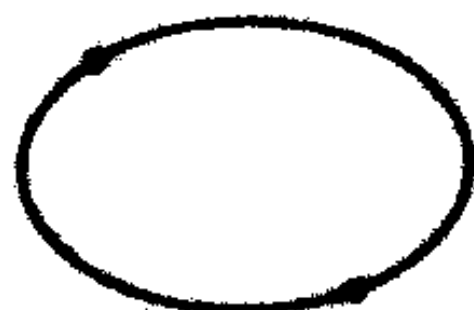
是不变量，它涉及表示质点运动的四维曲线的一个无限短的部分。容易给出不变量 $d\tau$ 的物理意义。如果选择时间轴，使它具有考虑中的线微分的方向，或者换句话说，如果将质点变换成静止，就会有 $d\tau = dl$ ；因此就可用和质点在同一地点，相对于质点为静止的光秒时钟来测定。所以称 τ 为质点的原时。可见 $d\tau$ 和 dl 不同，它是不变量。对于速度远低于光速的运动，它实际上等于 dl ，因此知道

$$u_\sigma = \frac{dx_\sigma}{d\tau}$$

正如 dx_σ 一样，具有矢量的特性； u_σ 称为速度的四维矢量，其分量满足条件

$$\sum u_\sigma^2 = -1$$

在三维里，质点的速度分量是以



$$q_x = \frac{dx}{dl}, \quad q_y = \frac{dy}{dl}, \quad q_z = \frac{dz}{dl}$$

为定义的：于是按照通常的写法，速度的四元矢量的分量

$$\text{是 } \frac{q_x}{\sqrt{1-q^2}}, \frac{q_y}{\sqrt{1-q^2}}, \frac{q_z}{\sqrt{1-q^2}}, \frac{i}{\sqrt{1-q^2}}$$

我们知道，速度的四元矢量是可能由三维里质点速度分量

形成的惟一的四元矢量，所以又知道 $m \frac{dx_\mu}{d\tau}$

必然就是应当和动量与能量的四元矢量相等的四元矢量，而动量与能量的四元矢量的存在性是上面证明了的。使对应的分量相等并用三维的写法，便得到

$$\left. \begin{aligned} I_x &= \frac{mq_x}{\sqrt{1-q^2}} \\ I_y &= \frac{mq_y}{\sqrt{1-q^2}} \\ I_z &= \frac{mq_z}{\sqrt{1-q^2}} \\ E &= \frac{m}{\sqrt{1-q^2}} \end{aligned} \right\}$$

事实上可以确认：对于远低于光速的速度，这些动量的分量和经典力学里的相符。对于高速度，动量的增长比随速度的线性增长要快，以至于在接近光速时趋于无穷大。

如果将上面式子里最后的方程应用于静止质点 ($q=0$)，便知道静止物体的能量 E_0 等于其质量，如果取秒为时间的单位，就会得到

$$E_0 = mc^2$$

225

所以质量与能量实质上是相像的：它们只是同一事物的不同表示。物体的质量不是恒量；它随着物体能量的改变而改变。由上面式子最后一个方程可知道，当 q 趋于 1，即趋近光速时， E 将无限增大。

如果在式子中对时间 t 求微商，并利用动量原理，即采用三维矢量的写法，就得到

$$k = \frac{d}{dt} \left(\frac{mq}{\sqrt{1-q^2}} \right)$$

这就是质点的运动方程。



二、爱因斯坦的广义相对论论文

226

我们曾经基于如下的假设：所有惯性系对于描述物理现象都是等效的，而且为了规定自然界的定律，则宁愿选择这类系而不用处于别的运动状态下的参照空间。想不到为什么要偏爱一定类型的运动状态而不取所有别的运动状态的原因。它好像迫使我们把物理上的客观性质归之于时空连续区域，就像“时间是绝对的”和“空间是绝对”的这两个说法，在牛顿的观点上是一致的一样，我们从狭义相对论的观点就必须说“时空连续区域是绝对的”，后面这句话里的“绝对”不仅意味着“在物理上是真实的”，而且还意味着“在其物理性质上是独立的，具有物理效应，但本身不受物理条件影响”。

只要将惯性原理当作物理学的奠基石，这种观点当然是惟一被认为合理的观点。然而对于通常的概念有两项严重的指摘。第一，设想一件本身起作用而不能承受作用的事物（时空连续区域）是违反科学上的思考方法的；第二，经典力学暴露了一个缺点，它不直接要求将相对性原理推广到互相不做匀速运动的参照空间。力学里两个物体的质量之比有两种彼此根本不同的定义方式——第一种，作为



同一推力给它们的加速度的反比(惯性质量), 第二种, 作为同一引力场里作用在它们上面的力的比(引力质量), 经典力学对于这种相等没有提供解释。

显然只有在将这个数值上的相等化为这两种概念在真实性质上的相等之后, 才能在科学上充分证实我们规定这样数值上的相等是合理的。

根据以下的考虑可以知道推广相对性原理可能实际上达到这个目的, 稍加思考就会表明惯性质量和引力质量可能相等的定律相当于引力场给物体的加速度和物体的性质无关的说法。因为将引力场里的牛顿方程用文字写出来就是:

(惯性质量)乘以(加速度)=(引力场强度)乘以(引力质量)

只有当惯性质量和引力质量数值上相等时, 加速度才与物体的性质无关。现设K为惯性系, 于是对于K, 彼此间足够遥远并和其他物体足够遥远的质量是没有加速度的。再就对于K有匀加速度的坐标系K'来考究这些质量。相对于K', 所有的质量都有相等而平行的加速度; 它们对于K'的行动就好像存在着引力场而K'没有加速度一样。暂且不管这种引力场的“原因”问题, 把它放在以后来研究, 那么就没有什么阻止我们设想这个引力场是真实的, 就是说, 我们可以认为K“静止”而引力场存在的观念和只有K是“可容许的”坐标系而引力场不存在的观念是等效的。坐标系K



和在物理上完全等效的假设称为“等效原理”：这个原理与惯性质量和引力质量之间的相等定律显然有着密切联系，它意味着将相对性原理推广到彼此做非匀速运动的坐标系。事实上我们通过这个观点，将惯性与万有引力的性质归于统一。因为按照我们的看法，同样的一些质量可以表现为仅仅在惯性作用之下(对于 K)，又可表现为在惯性和万有引力的双重作用之下(相对于 K')。利用了惯性和万有引力两者性质的统一，便使得它们在数值上相等的解释成为可能，我深信这种可能性使广义相对论具有远超过经典力学概念的优越性：要是和这个进步相比较，就必须认为一切遭遇到的困难都是微小的。

根据实验，惯性系凌驾于所有其他坐标系之上的优越地位象是肯定地建立了的，我们有什么理由取消这种优越地位呢？惯性原理的弱点在于它含有循环的论证：如果一个质量离其他物体足够遥远，它就作没有加速度的运动；而我们却又只根据它运动时没有加速度的事实才知道它离其他物体足够遥远。对于时空连续区域里非常广大的部分，乃至对于整个宇宙，究竟有没有任何惯性系呢？只要忽略太阳与行星所引起的摄动，则可以在很高的近似程度上认为惯性原理对于太阳系的空间是成立的。说得更确切些，存在着有限的区域，在这些区域里，质点对于适当选取的参照空间会自由地作没有加速度的运动，并且在这些



区域里的成立是异常准确的，这样的区域称为“伽利略区域”。让我们从把这种区域作为具有已知性质的特殊情况出发来进行研究。

按照惯性原理，不受外力作用的质点沿直线做匀速运动，在狭义相对论的四维连续区域里（含有实值的时间坐标），这是一条真实的直线。在不变量的普适（黎曼几何）理论的概念体系中，直线自然也就是最简单的推广意义，就是最直的线或者最短程线的概念。因此，就等效原则的意义而论，需要假定：只在惯性与引力的作用下，质点的运

229

动方程是以方程
$$\frac{d^2 x_\mu}{ds^2} + \Gamma_{\alpha\beta}^\mu \frac{dx_\alpha}{ds} \frac{dx_\beta}{ds} = 0$$

描述的。事实上，如果引力场的所有分量 $\Gamma_{\alpha\beta}^\mu$ 化为零，这个方程便化做了直线方程。

这些方程是如何和牛顿运动方程联系的呢？按照狭义相对论，对于惯性系（含有实值的时间坐标并适当选择 ds^2 的符号）， $g_{\mu\nu}$ 与 $g^{\mu\nu}$ 同样具有下列的值：

$$\begin{pmatrix} -1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$



于是运动方程成了 $\frac{d^2 x_\mu}{ds^2} = 0$

我们将此称为 $g_{\mu\nu}$ 场的“一级近似值”。考虑近似法时采用虚值的 x_4 坐标往往是有益的，在一级近似上，这些值可以合并成关系式

$$g_{\mu\nu} = -\delta_{\mu\nu}$$

以后为了达到二级近似，必须令

$$g_{\mu\nu} = -\delta_{\mu\nu} + \gamma_{\mu\nu}$$

其中的 $\gamma_{\mu\nu}$ 应看作一阶微量。

于是运动方程的两项便都是一阶微量。如果不计相对于它们是一阶微小的各项，就必须令

$$ds^2 = -dx_\nu^2 = dl^2(1 - q^2),$$

$$\Gamma_{\alpha\beta}^\mu = -\delta_{\mu\sigma} \begin{bmatrix} \alpha\beta \\ \sigma \end{bmatrix} = -\begin{bmatrix} \alpha\beta \\ \sigma \end{bmatrix} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial \gamma_{\alpha\beta}}{\partial x_\mu} - \frac{\partial \gamma_{\alpha\mu}}{\partial x_\beta} - \frac{\partial \gamma_{\beta\mu}}{\partial x_\alpha} \right)$$

现在要引入第二种近似法，设质点的速度和光速相比是很微小的，那么 ds 就会和时间的微分 dl 相同。其次，和

$\frac{dx_4}{ds}$ 相比较， $\frac{dx_1}{ds}$ ， $\frac{dx_2}{ds}$ ， $\frac{dx_3}{ds}$ 化为零。此外，要假定

引力场随时间变化得很缓慢，以至 $\gamma_{\mu\nu}$ 对于 x_4 的导数可以不计。于是运动方程化成了

$$\frac{d^2 x_\mu}{dl^2} = \frac{\partial}{\partial x_\mu} \left(\frac{\gamma_{44}}{2} \right)$$

如果将微分中的式子与引力场等同起来，这个方程和质点在引力场中的牛顿运动方程就相等同；这样是否容许，自然依赖于引力的场方程，就是说，要看这个量，按一级近似程度，是否像牛顿理论中的引力势一样，满足同样的场的定律。

其次，须试图寻求引力场的定律。为了这个目的，应将牛顿理论的泊松方程 $\Delta\varphi = 4\pi K\rho$ 当作范例。这个方程是以有质物质的密度引起引力场的观念作为基础的。在广义相对论里也必须如此。然而狭义相对论的研究曾经指出须以单位体积的能量的张量代替物质的标密度，前者不仅包含有质物质的能张量，还要包含电磁能张量。在更完整的分析中，以能张量表示物质只能当作是权宜之计，实际上物质是带电粒子组成的，其本身须当作电磁场的一部分，而事实上是主要部分。根据这个观点，我们引入二秩张量 $T_{\mu\nu}$ ，将电磁场的和有质物质的能量密度联合起来，以后这个张量称为“物质能张量”。

动量与能量的原理是用这个张量的散度等于零的陈述



来表示。在广义相对论中，将不得不假定相应的普遍协变方程是有效的。如果 $T_{\mu\nu}$ 表示协变的物质能张量， $\mathfrak{T}_{\sigma\nu}$ 表示相应的混合张量密度，则依照张量的数学理论要求必须满足

$$0 = \frac{\partial \mathfrak{T}_{\sigma\alpha}}{\partial x_\alpha} - \Gamma_{\alpha\beta}^\alpha \mathfrak{T}_\alpha^\beta$$

232

必须注意：除了物质能量密度外，还必须给定引力场的能量密度，这样就不能单独论及物质的动量与能量的守恒原理。

在广义相对论中的类泊松方程，是关于引力势的张量 $g_{\mu\nu}$ 的张量方程；物质能张量必然会出现在这个方程的右边。在方程的左边必定有一个由 $g_{\mu\nu}$ 表出的微分张量，需要寻求这个微分张量。它完全为下列三个条件所决定：

- 1、它不可能包含 $g_{\mu\nu}$ 的高于二阶的微分系数。
- 2、它必须对于这些二阶微分系数是线性的。
- 3、其散度必须恒等于零。

因此关于引力场的定律，得到方程

$$R_{\mu\nu} - \frac{1}{2} g_{\mu\nu} R = -\kappa T_{\mu\nu}$$

使用数学方法对这个理论进行推论，可以得出一些从物理学上看来有意义的结论和要点。我们注意到左边的散度必

须为零，这样物质的能量原理可以表示成

$$0 = \frac{\partial \mathfrak{I}_\sigma^a}{\partial x_a} - \Gamma_{a\beta}^a \mathfrak{I}_a^\beta$$

其中

$$0 = \frac{\partial \mathfrak{I}_\sigma^a}{\partial x_a} - \Gamma_{a\beta}^a \mathfrak{I}_a^\beta$$

233

由于我们所形成的量具有张量特性，因此就证明了它对于每个其他的坐标系，并且自然对于每个其他四维点，也就是等于零的。这样上面的物质的能量原理是场方程的数学推论。

为了要知道这个方程是否和经验一致，首先必须弄清楚这样的方程，作为一级近似，是否会引致牛顿理论。为此须将各种近似引用在这些方程里。

$$R_{\mu\nu} = -\kappa(T_{\mu\nu} - \frac{1}{2}g_{\mu\nu}T) = -\kappa T_{\mu\nu}^*$$

做上述的近似计算，左边便成了

$$-\frac{1}{2}\left(\frac{\partial^2 \gamma_{\mu\nu}}{\partial x_a^2} + \frac{\partial^2 \gamma_{aa}}{\partial x_\mu \partial x_\nu} - \frac{\partial^2 \gamma_{\mu a}}{\partial x_\nu \partial x_a} - \frac{\partial^2 \gamma_{va}}{\partial x_\mu \partial x_a}\right)$$

现在必须注意能量方程对于任何坐标系都是有效的。



我们曾经选用特定的坐标系，使得 $g_{\mu\nu}$ 在所考虑的区域内容和恒值 $-\delta_{\mu\nu}$ 只有无限小的差别。然而这个条件对于坐标的任何无限小的变化仍继续满足，因而 $\gamma_{\mu\nu}$ 还可以受到四个条件的制约，只要这些条件和关于 $\gamma_{\mu\nu}$ 的数量级条件不相冲突。现在假定选择坐标系时，使得四个关系式得到满足，用电动力学里常见的推迟势的方法可以解这些方程，用容易理解的写法表示，有

234

$$\gamma_{\mu\nu} = -\frac{\kappa}{2\pi} \int \frac{T_{\mu\nu}^*(x_0, y_0, z_0, t-r)}{r} dV_0$$

从唯像的观点考虑，这个能张量是由电磁场的和较狭义的物质能张量组成的。如果按照数量级来考虑这个能张量的不同部分，则根据狭义相对论的结果推知，和有质物的贡献相比较，电磁场的贡献实际上等于零。用我们的单位制，一克物质的能量等于1；和它相比较，电场的能量可以不计，还有物质形变的能量乃至化学能量也是如此。

无论产生场的质量相对于所选择的准伽利略坐标系的运动怎样快，前面的推演总是有效的。

$$\left. \begin{aligned} \gamma_{11} = \gamma_{22} = \gamma_{33} &= -\frac{\kappa}{4\pi} \int \frac{\sigma dV_0}{r} \\ \gamma_{44} &= \frac{\kappa}{4\pi} \int \frac{\sigma dV_0}{r} \end{aligned} \right\}$$

这样场方程就包括了牛顿的引力理论。我们可以看出，即使在一级近似里，引力场的结构和符合牛顿理论的引力场结构就有根本性的区别。这个区别在于引力势具有张量的特性而无标量的特性。

进行足够的近似有

$$\left. \begin{aligned} \sqrt{dX_1^2 + dX_2^2 + dX_3^2} &= \left(1 + \frac{\kappa}{8\pi} \int \frac{\sigma dV_0}{r}\right) \sqrt{dx_1^2 + dx_2^2 + dx_3^2} \\ dT &= \left(1 - \frac{\kappa}{8\pi} \int \frac{\sigma dV_0}{r}\right) dl \end{aligned} \right\}$$

235

我们所选择的特殊坐标系保证这个长度只依赖于地点，而和方向无关。如果选择不同的坐标系，这就不会如此。可是无论怎样选择坐标系，刚杆的位形总是和欧几里得几何学的定律不符合；换句话说，我们选择任何坐标系，都不能使相当于单位尺度端点的坐标差，按任何方向放置，总满足关系式 $\Delta x_1^2 + \Delta x_2^2 + \Delta x_3^2 = 1$ ，在这个意义下，空间不是欧几里得空间，而是“弯曲的”。

根据上面第二个关系式，单位时钟两次摆动间的间隔，以我们坐标系里所用的单位表示，就相当于“时间”。

照此说来，始终邻近的有质物质的质量越大，它就走得越慢。因此断定太阳表面上产生的光谱线，和地球上产生的相应光谱线相比较，大约要向红端移动其波长的 10^{-6} 。

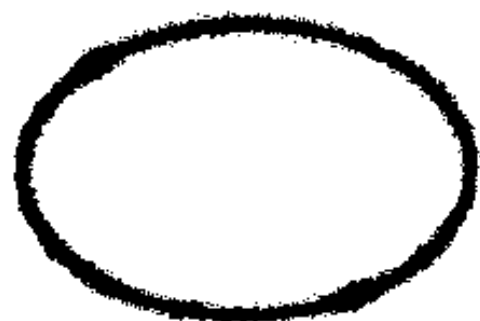
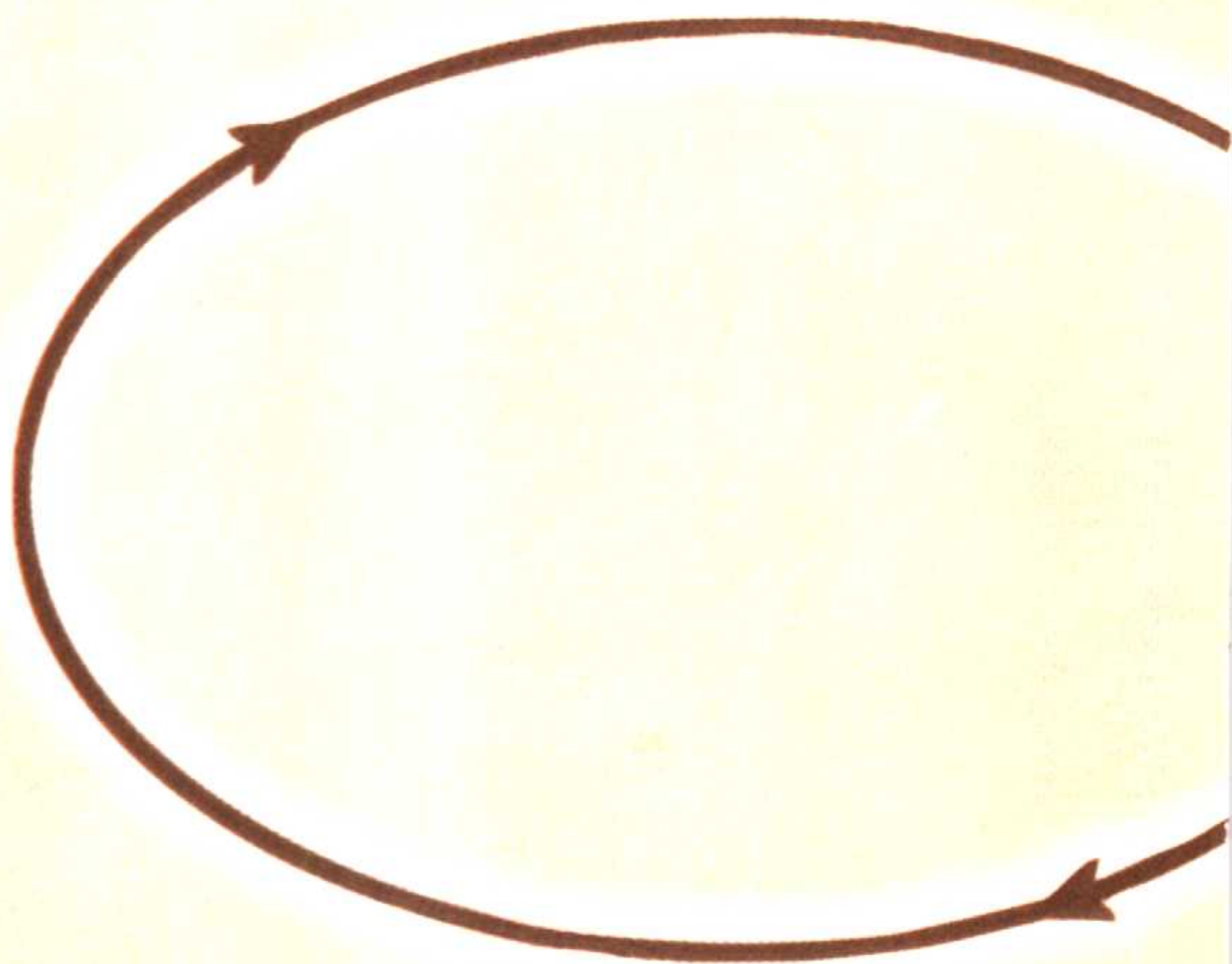


图 说 相 对 论

起初，理论的这个重要推论好像和实验不合；但是我们从过去几年所获得的结果来看，愈加相信这个效应的存在是可能的，很难怀疑理论的这个推论将在今后几年里得到证实。



相对论词典





牛顿重力定律 (Newton's law of gravity): 亦称“万有引力定律”。认为一切具有质量的物体都会互相吸引, 吸引力正比于两者质量的乘积, 反比于两者距离的平方, 比例常数称为(牛顿)重力常数, 通常记为 G 。

以太 (ether; aether): 一种早已被实验否定的假想物质。十九世纪的物理学家假设电磁波也需要介质, 这种介质便是所谓的以太。根据理论, 以太假如真正存在, 则应不具有质量、充斥宇宙各个角落, 而且在宇宙中绝对静止。

加利略变换 (Galilean transformation): 古典力学中两个惯性坐标系之间的时空坐标关系式。其中只有空间坐标发生转换, 两者的时间坐标毫无差异, 因为两者皆用绝对时间。

光速 (speed of light): 电磁波或光子在真空中行进的固定速率, 通常记为 c , 是基本物理常数之一。如今光速为每秒恰好299,792,458公尺, 公尺的长度则



根据上述光速来定义。

同时性(simultaneity): 某观测者若测得两个事件同时发生, 则称这两个事件“对于该观测者”具有同时性。不过对于其他观测者而言, 这两个事件却不一定同时, 因此“同时”并非绝对的物理概念。

协变(covariant): 一个物理定律以某方程式表示时, 若在不同的坐标系中, 该方程式的形式一律不变, 则称该方程式为协变。一般而言, 同一物理定律可用不同形式的方程式表示, 这些方程式有些为协变, 有些则否。

长度收缩: 即“菲次吉拉收缩”。

洛伦兹变换(Lorentz transformation): 两个惯性坐标系之间的时空坐标关系式, 由两坐标系的相对速度决定。在这个转换式中, 空间坐标与时间坐标皆进行转换。洛伦兹变换为狭义相对论的数学基础, 由洛伦兹最先以数学方法导出近似式, 其精确形式与物理意义则是爱因斯坦的贡献。两坐标系之相对速度若比光速小很多, 则洛伦兹变换就近似于加利略变换。

重力(gravity;gravitation): 俗称万有引力, 是自



自然界四种基本作用力中最微弱的一种。任何具有质量或等效质量的粒子都会产生重力，因此任何两个物体之间皆存在有重力作用。

重力质量 (gravitational mass): 在古典物理学中，质量具有两种表征，其中牛顿重力定律所描述之质量称为“重力质量”。

240

重力场方程式 (gravitational field equations): 广义相对论的基本方程式，是一组具有十个分量的张量方程式，描述物质与能量的存在如何使时空结构弯曲，重力则隐含在弯曲的时空中。牛顿重力定律是这组方程式在特例下的近似。

时空连续体 (space-time continuum): 时间与空间共同组成的四维时空结构，由闵可夫斯基最先提出。在平直的四维时空连续体中，“距离” s 的定义为 $s^2 = x^2 + y^2 + z^2 - (ct)^2$ ，其中 x 、 y 、 z 为空间座标， t 为时间座标， c 为真空光速。由此即可看出，它与四维欧氏空间最大的不同，在于第四个座标在四维毕氏定理中的地位。弯曲的四维时空连续体可视为前者的推广，正如弯曲的 N 维空间是欧氏 N 维空间的推广。



时间膨胀 (time dilation): 根据狭义相对论中的洛伦兹变换, 在静止的观测者看来, 运动中的时钟走得较慢, 意即观测者本身的时间会发生膨胀。膨胀因子为 $(1-v^2/c^2)^{-0.5}$, 其中 v 为时钟相对于静止观测者的速度, c 为真空光速。

狭义相对论 (special theory of relativity): 爱因斯坦于一九〇五年所发表的理论。它根据两项公设, 导出度量时间与空间的正确观念。对速率接近光速的物体, 牛顿力学的描述有重大误差, 狭义相对论则有正确的描述。

241

张量 (tensor): 一种数学量, 其特点为在座标变换时遵循一定的规律。根据变换规律的不同, 可将张量分为零阶、一阶、二阶……其中零阶张量即纯量 (例如温度), 一阶张量即向量 (例如力)。任何物理量皆可归为某阶张量, 例如电场与磁场同为某二阶张量的分量。

等效原理 (principle of equivalence): 广义相对论的基本假设。认为置身于等加速座标系中的观测者, 无法以任何物理方法分辨究竟是本身在加速抑或置身



某重力场中。

菲次吉拉收缩 (Fitzgerald contraction): 我们根据狭义相对论中的洛伦兹变换, 在静止的观测者看来, 运动中的物体其长度会沿运动方向收缩。收缩因子为 $(1-v^2/c^2)^{0.5}$, 其中 v 为物体相对于静止观测者的速度, c 为真空光速。由此可见物体运动愈快, 产生的菲氏收缩愈多, 但由于收缩量很小, 因此只有在物体接近光速时才较明显。

黑洞 (black hole): 广义相对论预测的一种特殊天体, 其特征为具有封闭的“视界”, 也就是黑洞的边界。外界的物质或辐射可以进入这个视界, 但是若不考虑量子效应, 视界内的物质与辐射不可能跑出来。就天文学的角度而言, 黑洞是某些恒星演化的终点, 如今几乎已能确定黑洞的存在。

电磁感应 (electromagnetic induction): 变动的磁场产生电场的现象。一八三一年, 法拉第首先提出电磁感应的数个例子, 例如磁体与线圈的相对运动会在线圈中感应出电流。

惯性座标系 (惯性参照系) (inertial frame): 为标



定事件发生的时刻与位置而选取的时间座标与空间座标称为(参考)座标系。若在某一座标系中, 不受外力的物体必保持静止或做等速度运动, 此座标系就属于惯性座标系。

惯性质量 (inertial mass): 在古典物理学中, 质量具有两种表征, 其中牛顿第二运动定律(作用力正比于质量及加速度)所描述之质量称为“惯性质量”。

243

广义相对论 (general theory of relativity): 爱因斯坦于一九一五、六年间所发表的理论, 将狭义相对论的惯性座标系推广到非惯性座标系(例如旋转座标系、重力场中的座标系)。主要内容是将重力解释成弯曲时空中的几何结构, 从而导出比牛顿重力定律更精确的重力理论。广义相对论已通过数项验证, 如今是天体物理学与宇宙学的基本工具。

质能关系 (energy-mass relation): 即爱因斯坦导出的著名公式 $E=mc^2$ (能量等于质量乘以光速的平方), 指出能量与质量实为两面的两面。

质量 (mass): 粒子携带的一种基本物理量, 是重力场的发射源(由牛顿重力定律或广义相对论描述),



亦是惯性的来源(由牛顿第二运动定律描述)。

黎曼几何(Riemannian geometry): 黎曼将曲面微分几何学推广至 N 维流形而发展出的几何学。其中 N 维流形拥有一个度量“无限小长度平方”的二次式(可视为毕氏定理的推广), 由此即可定义长度、角度、曲率等几何量, 进而研究这个 N 维流形的各种性质, 而不需要将它嵌入 $(N+1)$ 维空间中。

244

静质量(rest mass): 亦称静止质量。对静止于某座标系的质点而言, 在此座标系中测得的质量称为其静质量。根据狭义相对论, 运动中质点的质量会随着速度增加。

臆想实验(Gedanken experiment): 亦称假想实验。为解释或验证某一理论, 理论物理学家常根据现有知识设计一些纸上实验, 作为具体的论证对象, 此即所谓臆想实验。臆想实验之目的不在求得结果, 而在验证一个理论的正误。

[G e n e r a l I n f o r m a t i o n]

书名 = 图说相对论

作者 = 林为民编译

页数 = 2 4 4

S S 号 = 1 1 1 0 5 1 3 6

出版日期 = 2 0 0 3 年 0 3 月 第 1 版

前言
目录
正文