

物理学
基础
知识
丛书

方励之 褚耀泉 著



(第二版)

从牛顿定律 到爱因斯坦相对论

科学出版社

从牛顿定律 到爱因斯坦相对论

(第二版)

方励之 褚耀泉 著

科学出版社

1987

内 容 简 介

本书介绍了从牛顿定律到爱因斯坦相对论的一些主要发展线索，阐明了物质宏观运动的基本规律，较全面地叙述了狭义相对论和广义相对论的知识。着重介绍了近 20 多年来广义相对论天体物理和宇宙学的发展。

本书可供高中以上文化程度的广大读者阅读。

物理学基础知识丛书

从牛顿定律

到爱因斯坦相对论

(第二版)

方励之 褚耀泉 著

责任编辑 姜淑华

科学出版社出版

北京朝阳门内大街 137 号

中国科学院印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

*

1981 年 4 月第 一 版 开本: 787×1092 1/32

1987 年 2 月第 二 版 印张: 47/8

1987 年 2 月第四次印刷 字数: 89,000

印数: 39,401—44,100

统一书号: 13031·3372

本社书号: 5131·13—4

定价: 0.92 元

代 序

1978年8月，中国物理学会在庐山召开年会，不少物理学工作者有感于物理学在提高全民族科学文化水平和实现“四化”中的伟大作用，建议中国物理学会与科学出版社合作，编辑出版一套《物理学基础知识丛书》，有计划有系统地普及物理学的基础知识和物理学的新发展。这一倡议当即得到了广泛的响应。为此，中国物理学会理事会进行了认真讨论，积极热情地支持了这一建议，于是，就在风景绮丽的庐山，在中国物理学会和科学出版社的共同主持下，正式成立了本丛书的编委会，讨论和制定了丛书的编辑方针和选题计划，正式开始了丛书的编辑出版工作。

物理学研究物质的运动规律，物质的结构及其相互作用，它是许多科学技术的基础。从本世纪开始，物理学经历了极其深刻的革命，从宏观发展到微观，从低速发展到高速，由此诞生了量子物理学和相对论，并在许多科学技术领域引起了深刻的变革。本世纪以来，物理学在认识和改造物质世界方面不断取得伟大成就，不断揭开物质世界的奥秘。原子能的利用，使人类掌握了新的能源；半导体科学技术的发展，导致了计算技术和自动控制系统的革命；激光的出现焕发了经典光学的青春；凝聚态物理学的发展，使人们不断创造出

许多性能大大提高的材料……；因此，向广大读者宣传物理学的基础知识以及物理学的新发展，乃是提高全民族科学文化水平和实现“四化”的需要。我们编辑出版本丛书的目的，就是试图在这方面贡献一份力量。

本丛书将着重介绍现代物理学的基础知识，介绍物理学的最新发展，要求注重科学性。我们希望作者发扬创新精神，力求做到题材新颖，风格多样；勇于发表独创性、探索性的见解，以活跃读者思路。在文风上则要求做到准确、鲜明、生动，深入浅出、引人入胜，以说透物理意义为主，尽量少用数学公式。

在编辑出版丛书工作中，我们得到了广大物理学工作者的热情支持和鼓励，还得到老一辈物理学家严济慈、钱临照、陆学善等同志的热情赞助和关怀。美国加州大学热斐尔学院院长吴家玮教授应邀积极参加编委会工作，并约请了美籍学者为丛书撰稿。我们一并在此致以谢意。

《物理学基础知识丛书》编委会

1980年12月于北京

前 言

现在，越来越多的历史事实证明，人类文明之所以有今天，是同一些杰出物理学家的工作分不开的。其中尤其以创建了经典力学的伽利略、牛顿及创建了狭义和广义相对论的爱因斯坦最具有代表性。

当我们回顾这几位划时代的科学家的时候，就会发现，虽然他们生活在极为不同的时代，从经典力学到现代物理学也已经发生了巨大变化，但是，在这些人身上的，我们却可以看到许多共同的特征。

首先，他们都是不受成见或传统思想所束缚的探索者。他们的科学研究工作，往往是从那些被认为早有定论、不容怀疑的地方打开缺口的。他们研究的问题，就是我们今天看来，也会觉得是“太”基本了，“太”抽象了。比如，什么是时间？什么是空间？什么是相对？什么是绝对？什么是天体运动的规律？什么是宇宙的起源？等等。这些问题对于人们日常关心的现实世界来说，似乎是另一个世界的事。然而，事实证明，由于在这些“学院式”问题上的进展所带来的技术进步，是不能用任何其他东西代替得了的。

其次，他们都坚持自然科学的研究方法。尽管他们关心的是抽象的问题，但是他们并不进行思辨式的空谈。相反，他

们是采用理论和物理实验或天文观测相对比的方法来考查每一个概念、每一种假说，由此来判断理论的是非成败。

再次，他们大都不仅仅是狭义的自然科学家，而且是具有崇高胸怀的人。例如，爱因斯坦就是一位崇尚理性、崇尚科学和民主的代表。他曾经说过：“人只有献身于社会，才能找到那实际上是短暂而有风险的生命的意义。”^①他还愤慨于那种慑于强权而惧谈科学精神的态度，他说：“试问，要是乔尔丹诺·布鲁诺、斯宾诺莎、伏尔泰和洪保德也都这样想。这样行事，我们会在哪里呢？”^②

正因此，他们和他们的理论往往不见容于当时的统治者。伽利略遭到宗教法庭的迫害，爱因斯坦遭到德国法西斯的迫害。可笑的是，甚至在七十年代，不学无术的“四人帮”大搞法西斯文化专制主义时期，相对论还在中国遭到了围剿！尽管这些历史，都已像恶梦一样地过去了，但是，今天回顾一下，不仅对了解物理学的进展是有益的，甚至是必需的。因为，如果我们只了解学术的细节，而不掌握科学的精神和科学之成为真正科学的灵魂，那我们就可能真正把科学移植过来，让她生根、开花、结果。

这本小册子的目的，是打算介绍从牛顿定律到爱因斯坦相对论的一些主要发展线索。由于篇幅有限，加之不用（或仅少量用）数学工具，所以，我们仅仅想把最基本的思想和

① 赵中立、许良英编译：《纪念爱因斯坦译文集》，上海科技出版社，1979年版，第61页。

② 同上，第385页。

概念交待清楚。也许这也是主观的愿望，实际上并没有达到，或没有完全达到。很希望读者批评指正。

这本小册子是去年秋天在丛书编委会建议下才开始筹划的。后来，我和褚耀泉同志陆续写出了初稿。现在，趁我在意大利讲学期间，又抽出一些时间从头重新改写了一遍。这几天，我住在林琴科学院，窗外一眼看到的就是印在伽利略《对话》一书上的那个林琴科学院的院徽。虽然，这个世界上最老的科学院的徽记已经十分陈旧了，可是，每当写到伽利略的时候，它都不能不使你肃然起敬。明天就是一九七九年三月十四日，即爱因斯坦诞生整整百周年的日子，今天终于赶完了全书，谨以此作为对伽利略和爱因斯坦这两位永远值得人们景仰的科学巨子的纪念吧！

方励之

1979.3.13 于罗马

目 录

第一章 从亚里士多德到牛顿·····	1
时空观——亚里士多德的宇宙中心——牛顿时空观中的相对与绝对——马赫的批判	
第二章 时间、空间和运动·····	10
时间的测量——长度的测量——事件和世界线——运动的相对性——速度的合成	
第三章 从经典的速度合成到光速不变·····	19
光学现象中的疑难——超新星爆发和光速——以太假说——迈克尔逊-莫雷实验——光速是不变的——新的速度合成律——光速是极限——超光速问题—— c 的测量	
第四章 从伽利略相对性原理到狭义相对论·····	33
萨尔维阿蒂的大船——狭义相对论的两条原理——“同时”是相时的——谁先动手——因果关系	
第五章 钟和尺的相对与绝对·····	43
牛顿时空观中的时和空——运动钟的变慢—— μ 子的寿命——双生子佯谬——动尺的缩短——汤普金斯先生的错误——洛仑兹变换	
第六章 动力学问题·····	56

亚里士多德的力学——动者恒动——牛顿的力学规律——牛顿力学与光速极限的矛盾——惯性质量随速度的变化——懒惰=活泼——新时代的一块基石

第七章 从比萨斜塔到广义相对论.....65

比萨斜塔上的实验——万有引力——水星近日点的进动—— $\frac{\text{引力质量}}{\text{惯性质量}}$ 的普适性——引力的本性就是“没有”引力——局部惯性系——什么是引力？——爱因斯坦的引力场方程

第八章 从牛顿到后牛顿.....79

后牛顿修正——行星近日点的进动——自转轴的进动——引力红移——光线弯曲——雷达回波的延迟

第九章 从经典的引力坍缩到黑洞.....90

再谈强场条件——引力坍缩——强场天体在何处？——脉冲星是一种致密天体——中子星的结构——黑洞——黑洞是不毛的——临界质量——X射线双星

第十章 引力波的证实..... 106

爱因斯坦的预言——宇宙中的引力波源——韦伯的实验——双星引力辐射阻尼——PSR1913+16——一个理想的相对论天空实验室——引力辐射阻尼的证实

第十一章 从牛顿宇宙到宇宙的膨胀····· 117

从有限有边到无限无边——牛顿无限宇宙的困难——
—“白痴”的问题——有限无边的宇宙——宇宙的
膨胀——大爆炸宇宙学——天体的年龄——微波背
景辐射——氦的丰度

第十二章 爱因斯坦之后····· 134

对统一的追求——大统一和宇宙的极早期——引力
和量子论——黑洞的发射——超统一和奇性

第一章 从亚里士多德到牛顿

时 空 观

有一些物理概念是很平凡的。但平凡的概念却往往不是简单的。

比如，“今天早上八点钟我在家里开始看书”，这是一句很普通的话。然而，其中已经涉及两个最基本的概念。“今天早上八点钟”，是表示时间；“在家里”，是地点，也就是空间位置。时间和空间可以说是最常用、最平凡的概念了。可是，若问：究竟什么是时间，什么是空间？却又不容易找到恰当的答案。是的，这是两个很难回答的问题。尽管有不少人都曾给时空下过这样或那样的定义。不过，很少是能令人十分满意的。

在讨论物理学问题的时候，一种正确的方法可能并不是从概念的“严格”定义出发，而是从分析各种概念之间的具体关系入手。因此，对于时间和空间这两个基本概念来说，重要的问题并不在于它们的“纯粹”定义，而是它们之间的关系，以及它们与物质运动的种种联系。

还是用上面那句话为例子。“早上八点”这个时间是以你手上的表或家里的钟作为标准的。更正确地说，是采用北京

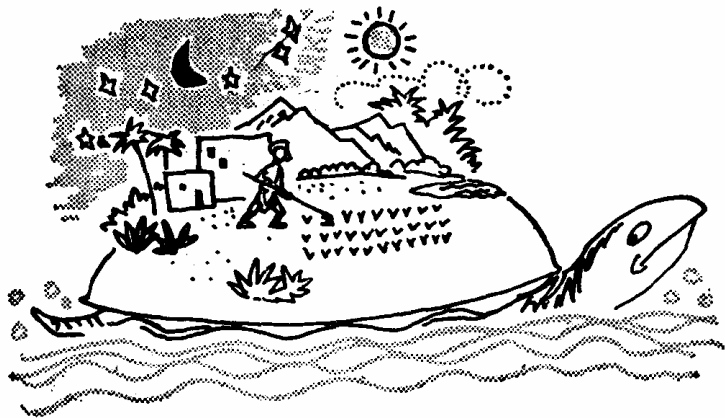
时间。显然，这个表述是相对的，如果东京时间，它就是九点，而不是八点。这就是时间表述上的一种**相对性**，也就是时间的一种属性。

如果有另外一个人，他说：“哈！我今天也是从早上八点钟开始看书的”，我们立即得到一个结论：这两个人是**同时**，即同在北京时间八点钟开始读书的。按照“常识”，我们一定会认为，“同时”这个性质是绝对的，而不是相对的。也就是说，如果有两件事，按照一种钟（例如北京时间）来计时，它们是同时发生的，那么，按照其它任何钟来计时，它们也必定是同时发生的。其实，这个习惯性的论断并不是完全正确的。上述两个人，同时开始看书这一点尽管按照北京时间或者东京时间来说都是正确的，然而，对一个正在高速飞行的观察者来说，当他用他的钟来计时，却发现，这两个人并不是“同时”开始看书的。同时性并不是绝对的，而也是**相对的**：对一个观察者来说是同时的两件事，对另一个观察者来说却可以是不同时的。这个“违背”习惯的结论就是爱因斯坦的相对论时空观与伽利略、牛顿的经典力学时空观的一个重要区别。

所谓时空观，就是有关时间和空间的物理性质的认识。时空观同自然科学的发展是密切相关的。科学上的重大变革往往伴随着新时空观的产生。甚至，在一定意义下可以反过来说，时空观的变革才是科学上大变革的基本标志。因此，如果我们要想了解在人类的认识史上从亚里士多德到牛顿，又从牛顿到爱因斯坦几次重大的进展，我们首先就应当了解他们各自的时空观。

亚里士多德的宇宙中心

在欧洲，直到中世纪为止，亚里士多德的时空观大体占据主导地位。在亚里士多德的理论体系中，地球位于整个宇宙的中心。整个宇宙由环绕着地球的七个同心球壳组成。月亮、太阳、行星和恒星分别处在不同的球壳上。它们都作完美的圆运动。今天，已经很少有人再相信这种宇宙结构图了。的确，用今天已有的知识去批评亚里士多德，是很容易的事。然而，昨天终归不是今天。在两千多年以前，亚里士多德就敢于对宇宙给出一个统一的解释，敢于主张地球是一个球形，不能不承认那是人类认识上的一次大飞跃。因为，在远古人的观念中，大地是平坦的，它被安置在一只龟背上，而龟又漂浮于大海之中（见图）。怎么能想象地球是一个球体呢？



按照当时“习惯”的想法会认为：那些居住在我们的对蹠点

上的人不是早就“掉下”去了吗？可见。树立球形的地球观念需要克服相当大的成见所带来的阻力。从时空观的角度来评价，可以说，亚里士多德的时空观是把“上”和“下”这两个方向相对化了。我们看对蹠点的人在“下”。对蹠点的人看我们也是在“下”。也就是空间各个方向是等价的，没有一个方向是具有特别的绝对优越的性质。这就是空间方向上的相对性，提出这个观念，是人类走向科学时空观的重要一步。

在亚里士多德的体系中，物体在宇宙中的位置具有关键的作用。空间的位置是绝对的，地球的球心就是宇宙的中心。每个物体都有各自的天然位置，只要没有阻挡，每个物体都力图到达各自的天然位置。物体之所以会运动，其原因就是它们还没有到达自己的天然位置。亚里士多德把宇宙空间分为“月上”（比月球远）和“月下”（比月球近）两个完全不同的世界。太阳、月亮、星星等“天上”的东西的天然位置是在天球上，因而它们随着天球作圆运动。地面附近的物体的天然位置是在地球的中心，因此它们都作落体运动。这样，在亚里士多德的时空观里，某些位置（例如地球的球心）是非常特殊的。在支配物体运动的自然规律中，这些空间点具有决定性的作用。这种特性，可以叫做空间点的绝对性。用今天的语言来说，亚里士多德的空间，具有各向同性的性质，但却是不均匀的，即空间各点的位置并不是等价的。

牛顿时空观中的相对与绝对

亚里士多德的时空观是在古希腊人对自然认识的基础上发展起来的，它能适应于当时人们对自然现象的解释。随着科学的发展，旧的认识被新的认识所替代，旧的时空观也发展到新的时空观。

以哥白尼—伽利略—牛顿为代表的新科学，在时空观上的特征就是否定了亚里士多德体系中空间位置的绝对意义。哥白尼否定了地球中心是整个宇宙中心这种绝对的意义。伽利略直接在当地提出了相对性原理（在第四章中还要加以详细讨论）。牛顿则打破了“月上”和“月下”的界限，发现苹果落地和月亮绕地球运行是由同一个原因引起的，而并不是由于它们要回到自己的“天然位置”上去。因而，在牛顿的力学方程中没有宇宙中心的地位，任何时空点都是平等的。相对于任何时空点来计算，物理规律都是一样的。这就是新时空观中的新相对性。

然而，路总是一步一步走的，牛顿尽管站在了亚里士多德的肩上。但是在他的力学中仍然引入了绝对静止的空间和绝对不变的时间这两个概念。在《自然哲学的数学原理》一书中，牛顿写道：“绝对空间，就其本性来说，与任何外在的情况无关，始终保持着相似和不变。”“绝对的、纯粹的数学的时间，就其本身和本性来说，均匀地流逝而与任何外在的情况无关。”总之，在牛顿的时空观中，空间、时间和“外在

的情况”这三者都是相互独立的，无关的，空间的延伸和时间的流逝都是绝对的。在这种意义上可以说，在牛顿的体系中仍然含有亚里士多德式的绝对。

把“空间”设想成物体作机械运动的舞台和背景，是一种十分自然的抽象。我们在日常生活中有这样的经验：在一个箱子中可以放进一定数量的东西。这是箱子的一种性质。可以叫做箱子的容积，也就是箱子的空间。这个容积大小或空间大小是与箱子里放什么东西（以及放不放东西）没有关系的。在卖箱子的商店里，总是要标出 $26 \times 20 \times 10$ 等等尺寸，之所以能这样标出，就是以容积是箱子的不受“外在的情况”影响的本性这一点为依据的。进一步我们设想箱子无限地扩大，这就得到了一个与任何特殊的物质无关的、绝对的空间。它就是牛顿的绝对空间。

牛顿是一个经验论者，他不能容忍在他的体系中存在先验的观念。他认为，物理的实在必须是能被感知的。那么，如何来感知他所规定的“绝对空间”呢？牛顿设计了一个理想实验，用来判断哪些运动是相对于绝对空间的绝对运动。这就是著名的水桶实验。若有一桶水，让它做旋转运动。开始时桶壁旋转而水不运动，水与桶壁之间虽有相对运动，但水面却和静止时是一样的，是一个平面。以后水逐渐被桶壁带动并且和桶壁一起旋转，此时虽然水与桶壁之间并没有相对运动，但水面呈凹形，桶边的水面略高，中间略低。因此，即使在水与桶没有相对运动的情况下。我们也可以判断出水桶体系究竟有没有相对于绝对空间的转动。这个判据是：若

水面平坦，则无绝对运动，若水面呈凹形，则有绝对的转动。这就是牛顿提出的判别法。

到这里，牛顿的体系似乎已经很严整了。然而事情并非如此。

马赫的批判

自从牛顿提出了绝对空间观念之后，就引起了一些科学家和哲学家的思考和怀疑。

如果真的存在一个有别于其它的绝对空间，那么，物体相对于这个绝对空间的运动就应当是可以测量的，也就是说，每个物体都具有一个确定的可以测量的绝对运动速度。这就要求必定存在一些物理规律，其中含有这个绝对速度。相反，如果任何物理规律中都不含有这个绝对速度，我们就无法测量它，也就不能感知它的绝对性。对于含有绝对速度的那些规律来说，沿着绝对速度的方向和垂直于绝对速度的方向应当是有区别的。换句话说，空间可能又变成各向不同性了。这一点不仅在理论上会引起困难，而且在观测上也没有发现这种各向异性现象。

莱布尼兹、贝克莱、马赫等人先后都对绝对时空观念提出过异议。他们的主要基于哲学的批判性分析对于时空观的进一步发展起了开路的作用。利用哲学思考来促进科学的研究，马赫等人的工作是个很好的典型。许多杰出的物理学家都十分重视并经常地进行哲学思考，在时空观的发展史上，尤其是如此。

马赫在《发展中的力学》一书中写道：“如果我们说一个物体 K 只能由于另一物体 K' 的作用而改变它的方向和速度，那么，当我们用以判断物体 K 的运动的其它物体 $A、B、C……$ 都不存在的时候，我们就根本得不到这样的认识。因此，我们实际上只认识到物体同 $A、B、C……$ 的一种关系。如果我们现在突然想忽略 $A、B、C……$ ，而要谈物体 K 在绝对空间中的行为，那么我们就要犯双重错误。首先，在 $A、B、C……$ 不存在的情况下，我们就不能知道物体 K 将怎样行动；其次，我们因此也就没有任何方法可以用以判断物体 K 的行为，并用以验证我们的论断。这样的论断因而也就没有任何自然科学的意义。”就是这样，马赫揭示出抛开一些物质（ $A、B、C……$ ）用所谓绝对空间来描述运动是不可能的。绝对空间是缺乏自然科学的意义的。

根据这种观点，马赫认为牛顿水桶中水面的形式，并不反映水桶是否相对于绝对空间有转动，而是反映水桶相对于地球和其它天体是否有转动。水面变凹，并不是由于绝对转动引起的，而是由于宇宙间各种物质对相对于它们转动的水桶的作用结果。无论是水桶相对于宇宙间物质进行转动，或者是宇宙间物质相对于水桶在转动，二者结果是一样的，因为水面都会同样地变凹。因此，水面变凹仅仅能证明水桶与宇宙间其它物质（ $A、B、C……$ ）之间有相对转动，而不能证明绝对空间的存在。马赫对水桶实验的分析，表现出他不仅把匀速运动看成是相对的（没有一个相对于绝对空间的绝对速度存在），而且把加速运动也看成是相对的（没有一个相

对于绝对空间的绝对加速度存在)。这个思想，在爱因斯坦发展广义相对论时，起过重要的作用。

爱因斯坦在讲到马赫时曾说：“马赫曾以其历史性的批判著作对我们这一代自然科学家起过巨大的影响。”^①马赫关于惯性及惯性力起源于宇宙间物质的相互作用的观点，被爱因斯坦等人称之为马赫原理。尽管马赫本人在晚年并不承认他自己是相对论的先驱，但是，客观地说，马赫对牛顿时空观的分析和批判。确实是相对论时空观诞生前的一种启蒙。

从亚里士多德的空间方向的相对性，到牛顿体系中的位置及时刻的相对性，再到马赫对绝对时空的批判，一代代自然科学家逐步摆脱了人类关于时间与空间性质的种种不正确成见，摆脱了种种似是而非的先验绝对性。爱因斯坦的工作是这一总的历史趋势的进一步发展。在爱因斯坦的相对论时空观中更进一步摒弃了一些我们习以为常但却并不正确的成见。人类的时空观发展史已经使我们清楚地看到，由于我们生活的时空范围太窄小了，因此，甚至我们对我们生活在其中的时间及空间也还没有十分正确的认识。这就是时间空间的物理学所能给我们的第一个有益的经验。

在下面几章，我们将更仔细地陈述从牛顿到爱因斯坦，从经典力学到相对论这一历史性的转变过程。在读这些章节的时候，希望读者经常回顾一下上述的历史经验：要相信科学的分析。而不要执着于某些似乎是与生俱来的成见。

① 许良英、范岱年编译：《爱因斯坦文集》，第一卷，商务印书馆1976年版，第84页。

第二章 时间、空间和运动

时间的测量

这一章主要是一些预备性的知识，我们先从最浅近的问题讲起。

物理学是一门实验科学，物理规律都是从实验而且大都是从定量的实验中总结出来的。因此，在研究空间和时间的物理问题时，首先应当了解时间和空间是怎样量度的。

说到时间的测量，自然会想到钟和表。不过，钟和表并不是测量时间的唯一工具。

1583年，有一位托斯卡纳的青年，他对比萨大教堂里的吊灯摆动发生了兴趣，准备研究一下摆的规律。可是，当时还没有钟。更没有秒表，吊灯摆动很快，怎样才能测定这种短暂的时间呢？这位年轻的实验家想出了一种办法。他一手按着自己的脉搏，数着跳动的次数，一边看着灯的运动。

结果发现了一条规律：摆幅尽管可大可小，而来回一次摆动中脉搏跳动的次数却是一样的，也就是说摆的周期与摆幅无关。这个有名的测量可以说是第一个科学物理学的实验。这位聪明的实验家就是物理学的奠基人伽利略。

伽利略的方法表明了测量时间的关键是什么。从原则上

说，任何具有重复性的过程都可以当作一种计时的钟。自然界里有许多重复性过程，其中有一些我们早就把它们当作计时的标准。比如太阳升没表示天；四季循环则为年；月亮的盈亏是农历的月。这些都是大家熟悉的。其它各种循环过程，诸如双星的旋转、人体的脉搏、吊灯的摆动、分子的振动等等也都可以作为计时的标准。总之，世界上千千万万种不同的周期运动都可以作为“钟”。当然，钟有好坏，比较两个人的脉搏，就会发现它们之间经常有明显的快慢波动，因之，脉搏不是一种好钟，它不够稳定。如果比较一下两个单摆的周期，就要稳定多了。脉冲里的脉冲周期稳定性更要好得多。在1967年之前，地球自转被认为是最好的测时标准。1967年以后，采用更稳定的“钟”作为标准，即以铯原子 ^{133}Cs 的基态超精细结构间的微波辐射周期 T 作为时间单位， T 与1秒之间的关系是

$$1 \text{ 秒} = 9,192,631,770T。$$



图 2-1 伽利略测量吊灯的摆动周期

长度的测量

测量长度的基本工具是尺。对于任何两点连线的长度，测量方法就是从一点出发，一尺一尺地量到另一点为止。唐代的天文学家张遂（一行）为了测定子午线上一度的距离，用拉绳方法在河南省的开封、滑县、上蔡等地之间一段一段地测量。这可能是人类史上严格按照用尺测长的最原始规定所进行的最大规模的测量了。

尺也有许多种。有一定长度的东西都可以当作尺。人体的一部分就可以作为标准，英文中的英尺和脚是同一个字（foot），原因就是在这个单位当初是以脚长规定的。和时间测量问题一样，应该选择一种好尺作为统一的标准。用各种材料制成的尺，或多或少都会受环境因素的影响，不适于作为标准。因此，近来已经放弃用巴黎的米尺原型作为国际标准，而改用原子的发光过程，即以氪原子 ^{86}Kr 的 $^2\text{P}_{10}-^5\text{d}_5$ 跃迁所发射的光的波长 λ 为标准单位。1 米的长度与 λ 的关系是

$$1 \text{ 米} = 1,650,763.73 \lambda。$$

在讨论太阳系中的问题时，可以用地球与太阳之间的平均距离作为单位，这把“尺”的长度叫做一个天文单位(A.U.)，至于恒星间的距离，则常用光年来表示。一光年是光传播一年所走过的距离，大约是 9.5×10^{15} 米。例如，离我们最近的一颗恒星比邻星，大约有 4 光年之远。这个数据不仅告诉我们距离的遥远，而且也告诉我们今天地面上看到的比邻星，

是它在 4 年之前的情况，因为 4 年前从那里发出的光，今天恰好到达地球。这就是说，当我们观看遥远的星体时，只要你能看得越远。你也就看到了时间上更早的情况。这个事实，已经开始显示出时间与空间往往是有联系的。

事件和世界线

规定了时间和长度的测量法，就可以研究物体的运动了。

所谓运动。就宏观物理来说，就是一系列由时间和空间所标志的事件。一张列车时刻表，写满了火车顺序到达的一系列站名及时刻。每一个站名和到达的时刻，就是一个事件。

站名	自昆明起计(公里)	昆沪直快
柳州	1246	08
		20.04
宜山	1157	26
		18.16
金城江	1085	17.00
		16.45
南丹	984	17
		14.12

火车的运动就是由这些事件构成的。一般地说，一个时刻和一个地点合在一起构成一个事件，宏观物体的运动可以分解为一系列的事件，事件是构成宏观物体运动的基本要素。

我们还可以用图形的方法来描写火车的运动。在下图中

横轴表示离开昆明的距离，纵轴表示北京时间。这是一幅时间-空间图。每一个事件（即一个位置和一个时刻）在图上相当于一个点。例如，A 点就表示列车于 16.45 在金城江这一

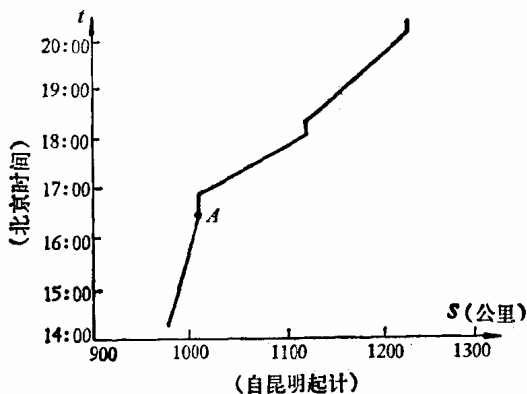


图 2-2 物体的运动可以用时间-空间图中相应的世界线来表示

事件。火车的运行在图上用一条线来表示。当火车到达一个车站停下来时，在时空图中就用一条平行于时间轴的直线来表达。因为，火车停了，所以它的横坐标（即位置）不变化，而时间仍在不停地流逝。时空图上的曲线称为世界线。任何一个运动，在时空图上都有自己相应的世界线。

运动的相对性

在上面的列车时刻表中，距离是“从昆明计起”，时间是北京时间。如果有人采用“自贵阳计起”的距离，或者不用北京时间，那么他编制的表上的数字就完全不同了。这就是

说，一个事件，如果用不同的标志时间和空间的方法来描写，其数值是不相同的，这种相对性在上一章已经交待过了。

不仅事件的描写有相对性，而且运动的形态也不是绝对的。意思是说，对于不同的观察者来说，同一运动也会表现出不同的形态。

在一个没有风的雨天，如果有两个人，一个 K ，一个 K' ，他们都来研究雨点的运动轨迹。观测者 K 站在地面上没有走动。他将看到雨滴是垂直下落的。因此，他总是把伞撑直。观测者 K' 在快步前进，他看到的雨滴是斜向着他运动的。因而，他总是斜撑着伞，以防被淋湿。所以，当有人问你雨滴到底是沿什么方向运动这个问题的时候，你必须反问：相对

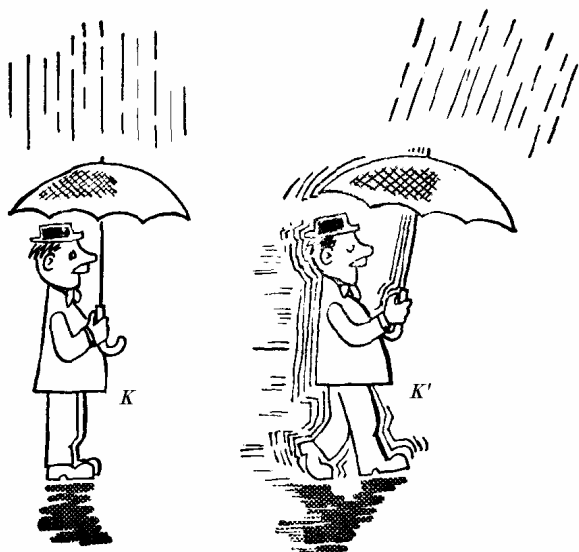


图 2-3 运动形态的相对性

于那一个观测者来说？不指明确定的观察者，这个问题本身就没有什么意义了。

通常。我们把一个观察者（即一种确定的时间和位置的测量）称做一个参考系。上面分析的结论是：相对于参考系 K ，雨滴是垂直向下运动的；相对于参考系 K' ，雨滴则是斜向运动的。这就是运动形态的相对性。

速度的合成

速度是标志物体运动快慢和运动方向的物理量。速度也有相对性。这是说，同一物体的运动速度，相对于不同的参考系（即不同的观察者）来说，是不相同的。物体运动是快是慢，向什么方向，只有对于一定的参考系来讨论才有意义。

再来谈谈我们的 K 和 K' 。当 K' 走得越来越快时，他不但会看到雨滴的倾斜程度越来越大（方向变了），而且还会感到雨滴的速度也变大了。在下雨天坐过敞篷汽车的人，都会与观察者 K' 有同样的感受。

下面，我们定量地描述一下雨滴速度与观察者运动速度之间的关系。在下图中，垂直向下的箭头表示静止在地面的观察者 K 所看到的雨滴速度（箭头的方向及长度分别代表速度的方向及大小）。水平箭头表示观察者 K' 相对于 K 的运动速度。而箭头 v' 表示雨滴相对于 K' 的速度。 u ， v 及 v' 三者之间构成一个三角形。可见，只要 K' 相对于 K 的运动速度越大，则雨滴相对于 K' 的速度也越大。用数学公式来表示，

就是

$$v = v' + u。$$

这条规律说明雨滴的速度和接收者的运动状态有关。它是速度相对性的一个方面。

速度相对性还有另一个方面。例如，标枪运动员在投掷的时候，总要作助跑动作。这是因为，如果被投掷的标枪相对于运动员（ K' 参考系）的速度是 v' ，运动员相对于地面参考系（ K 参考系）的助跑速度是 u ，那么，标枪相对于地面的速度就是 $v = v' + u$ 。所以助跑动作有利于增加标枪相对于地面的速度。因之，标枪相对于地面的速度与投掷者的运动情况有关。这又是一条物理规律。

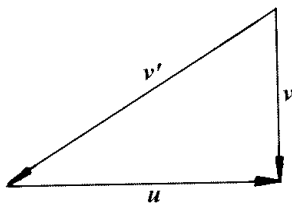


图 2-4 速度的合成

把有关速度相对性的这两方面意思合起来，就叫做速度的合成。

速度合成这个道理，许多人会认为是显而易见的。的确，在日常生活中，我们已经千百次地认识了它，并经常地利用它。当你在湍急的河流中游泳时，尽管你是朝着正对岸的方向用力游去，实际上你总是在它的下游登岸，这就是速度合成在暗中起着作用。

为了测验一下自己是否真的理解速度合成的公式，读者不妨试着回答下面的问题。有一条小河，宽 500 米，河水流速为每分钟 4 米。有 K 和 K' 两个人。他们在静水中游泳的速度相同，都是每分钟 50 米。 K 从 A 点出发游到对岸 B 点，并

返回出发点。 K' 则从 A 点出发顺水游到下游 C 点 (C 与 A 的距离也是 500 米), 然后再返回原点。如果二人同时离开 A 点, 请问谁先回到 A 点? 时间相差多少?

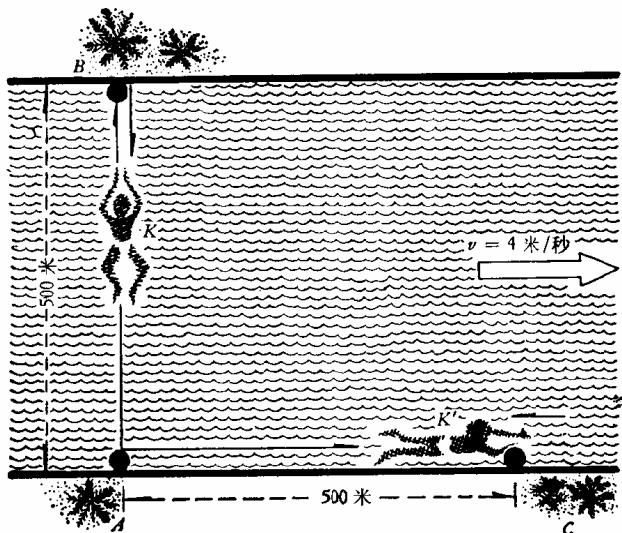


图 2-5 小河中的游泳比赛

读到这里, 有些人可能不耐烦了。因为, 这些讨论似乎都是十分浅显的, 用不着长篇大论人人也是可以明白的。不过, 物理学的特点之一, 就是不放过任何一个“浅显”的概念。经过一番认真的推理之后, 往往会发现“浅显”的事实则并不总是浅显的。

第三章 从经典的速度合成 到光速不变

光学现象中的疑难

上一章的核心问题是速度合成规律，它是经典力学的重要规律之一。这一章我们来讨论，当从经典力学发展到相对论时，速度合成这个概念应有怎样的发展。

首先我们要指出，经典速度合成规律的正确性是有限度的。

现在，我们用速度合成公式来分析一下有关光的传播现象。根据光学知识，我们知道，我们之所以能看到某个物体，那是由于该物体发出的光（或者它反射的光）传到了我们的眼睛里。不发光、不反射也不吸收光的东西，是不能被看到的。

下图表示 K 及 K' 两个人在玩投球运动。 K 投球， K' 接球。 K' 看到球是由于球发出的（或反射的）光到达了 K' 。当球在 K 手中静止时，如果球发出（或反射）的光的速度是 C ，而 K 与 K' 的距离是 d ，则 K' 看到 K 即将投球的时刻要比 K 本身即将投球的时刻晚 $\Delta t=d/c$ 。

当 K 刚刚将球投出去时。球速为 u 。如果光的运动也和

运动员投掷标枪一样，满足经典力学的速度合成律，那么，这时球发出的光的速度应当大一点。是 $c + u$ 。因而， K' 看到球刚刚从 K 手中投出的时间要比 K 作这个动作的时间晚 $\Delta t' = d / (c + u)$ 。

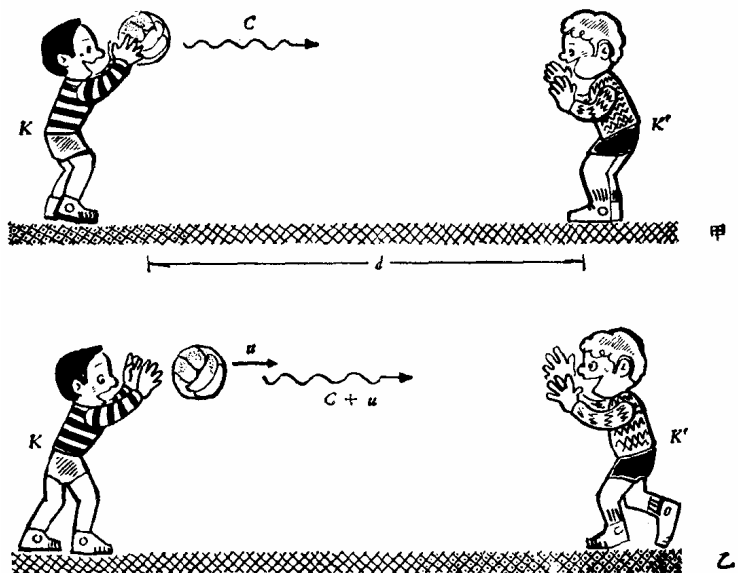


图 3-1 投球运动中的怪现象

比较 Δt 和 $\Delta t'$ ，就会发现，由于 $c + u > c$ ，故有 $\Delta t' < \Delta t$ 。意思是说， K' 会先看到 K 已将球投出，随后才看到 K 即将投球。更形象地说， K' 将先看到球飞出，而后才看到 K 的投球动作！这就是把前述速度合成公式应用到光传播问题上得到的一个混乱结果，它使我们先看到后发生的事，后看到先发生的事。然而，这种颠倒先后的怪现象谁也没有看到过。这

就证明，光速并不满足速度合成公式！

有人会说，光速是很大的，因而 Δt 及 $\Delta t'$ 实际上都近于零。所以即使 $\Delta t' < \Delta t$ ，也是觉察不到的。的确，在日常生活中涉及的速度与光速相比都是很小的，把光速看成无限大上述矛盾就没有了。但是，在天体的大尺度上，光速不能被认为是无限大的，光传播中的矛盾就不可能避免。下面就是一个真实的例子。

超新星爆发和光速

九百多年前。有一次非常著名的超新星爆发事件，当时北宋王朝的天文学家做了详细的记载。据史书称：爆发出现在宋仁宗至和元年五月（即 1054 年）。在开始的二十三天中这颗超新星非常之亮，白天也能在天空上看得到它，随后逐渐变暗，直到嘉祐元年（公元 1056 年）三月，才不能为肉眼看见，前后历时二十二个月。这次爆发的残骸就形成了著名的金牛座中的星云，叫做蟹状星云。

这条古老的记录同光速颇有关系。当一颗恒星发生超新星爆发时。它的外围物质向四面八方飞散。也就是说，有些爆发物向着我们运动（图中 A 处）。有些运动方向则在垂直方向（图中 B 处）。如果光线服从前面所讲的速度合成公式。那么，按照类似于对投球运动的分析即知， A 点向我们发出的光的速度是 $c + u$ ，而 B 点向我们发来的光的速度则大约仍是 c 。

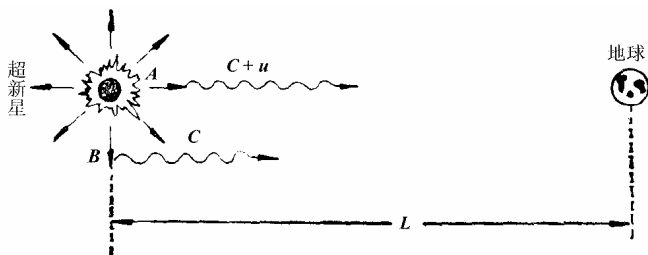


图 3-2 超新星爆发过程中光线的传播

这样，由 A 点发的光到达地球的时间是 $t=L/c+u$ ，而由 B 点发的光到达地球的时间是 $t'\approx L/c$ 。蟹状星云与地球的距离 L 大约是 5 千光年，爆发速度是每秒 1500 公里左右。用这些数据来计算，很容易得到

$$t' - t \approx 25 \text{ 年。}$$

也就是说，我们至少在 25 年里都可以看到开始爆发时所产生的强光。然而。这是错误的，不符合事实的。历史的记录是：岁余稍没，即一年多就看不见了。这就证明上面的推算有问题。结论似乎应该是：从 A 点或 B 点向我们发射的光，速度是一样的。即光速与发光物体本身的速度无关，无论光源速度多么大，向我们发来的光的速度都是一样的。光速并不遵从经典的速度合成律。

以太假说

对于上面的现象，可以有另一种解释。

如果我们仔细观察一下在海面上行驶的船，就会发现，

由船激起的海浪的传播速度，一般也不与船的速度有关。因为，对一定的海面情况，海浪的速度是一定的，它与船速并无关系。

因此，自然会想到一种类比，也许光是在某种“海洋”中的波。它的速度只决定于“海洋”的性质，同光源的速度无关。光的确有一系列的波动性质，这有利于“海洋”解释。所以，历史上这种观点流行一时，通常把传光的“海洋”叫做以太。由于光线能到处传播，所以假定以太也充满整个宇宙。这种假想的以太除了起着光传播媒介的作用外，我们却看不见它，也不能用其它方式感知它。为了能说明光传播的种种特征，不得不要求以太有许多特殊性质。例如，既要求以太有极大的刚性以使光波速度能高达每秒 30 万公里，同时又要求它对运动物体不施加任何阻力。这样的以太是不是真的存在呢？

迈克尔逊-莫雷实验

1887 年，迈克尔逊和莫雷一起完成了一项著名的实验，来检验以太假说。

他们的想法是这样的，如果在以太中光速是一定的。那么，当接收者以一定的速度相对于以太运动，光相对于他的速度在不同方向应是不同的。他看到迎面而来的光速大，从后面追来的光速小，即光速与接收者相对于以太的速度有关。如果能测量到这个差别，就支持了以太假说。

光速很大，一般物体速度都很小。所以，即使不同方向

的光速是不相同的，我们也很难测量得出来。迈克尔逊-莫雷实验的巧妙之点正是在于他们不去测量不同方向的光速值本身，而是测量不同方向的速度之间的差。

实验装置画在下图中。由光源 S 发出的光线，遇到半透

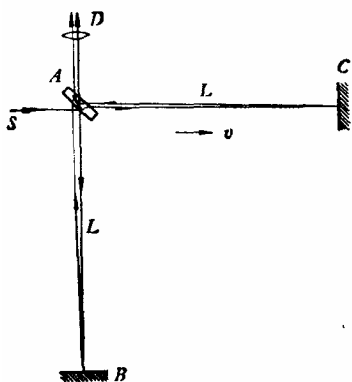


图 3-3 迈克尔逊-莫雷实验的示意图

镜 A 以后，一部分光线透射，另一部分反射。透射的光线经过 C 镜的反射后又回到 A ，其中一部分到达 D 。由 A 反射的光线经过 B 镜的反射后也回到 A 。其中一部分也到达 D 。如果地球沿着 SC 方向以速度 v 相对于以太运动，则沿 $A-C-A-D$ 传播的光与沿 $A-B-A-D$ 传播的光所用的时间是不一样的。这个问题

和上章最后所给的练习是一样的，沿着 $A-C-A$ 传播的光就相当于 K' ，沿 $A-B-A$ 传播的光就相当于 K 。容易计算，两束光的传播时间差是

$$\Delta t \approx \frac{L v^2}{c^2}$$

其中 L 是 \overline{AC} 或 \overline{AB} 的长度。利用两束光之间的干涉现象，可以测量出这个时差。

可是，实验结果是否定的，即没有观测到任何不为零的 Δt 。因此，出路只有两条：一是地球相对于以太的速度总为

零，一是以太假说不对；二者必居其一。前一个答案是不能令人接受的。因为，相对于太阳来说。地球有公转，还有自转，相对于银河系中心来说，还有太阳系本身的运动。怎么能认为恰恰是地球相对于以太的速度总为零呢？如果接受这一点，那不又是把地球看作一个地位极其特殊的天体了吗？自从哥白尼之后，人们再也不能同意任何形式的地球是宇宙中心的观念了。因此，结论只能是：以太假说是不对的！

就这样，光在假想的以太中传播的观念遭到了致命的否定。这个结论非常重要，所以，以后又有许多人在不同季节、不同时刻、不同方向上反复地重做迈克尔逊-莫雷实验。近些年来，利用激光使这个实验的精度大为提高，但是结论却没有任何变化。

光速是不变的

理论工作的重要之点就在于它能从一些个别的具体实验结果中抽取出具有普遍意义的结论。因为，特定的实验总是在一些特定条件下完成的，只有依靠理论的抽象才能到达普遍性。

上面的分析是用一些观测上的反例说明光线不服从经典力学的速度合成律。从这些个别的结果中，能概括出什么普遍的结论呢？这个结论就是光速不变性，即光速具有绝对性。所谓光速的绝对性。指的是当光在真空中传播时，它的速度总是一样的，其值与发光物体的运动状态无关。

应当再强调一遍，对一个普遍性的原理来说，我们在原则上是不能说通过实验证明了那个原理的，因为普遍的原理总是涉及无限多的具体情况，而在有限的时间里，我们只能完成有限的实验。因此，与其说实验证明了光速不变性，不如说光速不变性这个从科学实验中总结出来的规律与已有的实验结果全都不矛盾。

光速的不变性使光速与一般物体运动的速度有一个很大的差别。上一章强调过速度的相对性，即只有相对于一定的参考系才能谈速度的大小。而光速则不然，对于一束光，由观测者 K 来看速度是 c ，由观测者 K' 来看，速度也是 c 。

就象有许多地方我们不自觉地利用了经典速度合成律一样，光速不变性也有实际的应用。用雷达探测目标的距离，就是一个例子。如果雷达发出脉冲和收到回波的时间差是 Δt ，

那么，目标的距离就是 $d = \frac{1}{2} \Delta t \cdot c$ 。在实际使用雷达的时候，

我们从来不管是固定在地面上的雷达，或是装在高速前进的舰艇上的雷达，我们都用同一个光速值 c 来计算，其实这就是暗含地使用了光速不变原理。

新的速度合成律

总结我们关于速度的讨论，可以概括成两条。

1. 在经典物理中，要用速度合成律

$$v = v' + u; \quad (1)$$

2. 对于光速，则是

$$c = \text{不变量。}$$

这两条是“矛盾”的，但又都是正确的。显然一个更完整的理论应当把二者统一起来。这就是要从经典的速度合成律发展到能包含光速不变性的新的速度合成律。完成这个任务的就是狭义相对论的速度合成公式。它是

$$v = \frac{v' + u}{1 + \frac{v' u}{c^2}} \quad (2)$$

公式中各种符号的含义同公式（1）相同。

公式（2）如何得来，我们暂且留待以后再讲，这里先来讨论它的物理含义。在日常的条件下，物体运动的速度都远远小于光速，或者可以把光速看成无限大。取 $c \rightarrow \infty$ ，公式（2）就变成公式（1），即（2）中包含着公式（1）的真理。再者，如果我们研究的对象是光，则光相对于 K' 的速度是 c ，即 $v' = c$ 。将此式代入（2）立即得到 $v = c$ 。这就是说，不管 K 及 K' 之间的相对速度 u 有多大。它们二者所测得的光速都是 c 。所以，（2）中也包含着光速不变的真理。

光速是极限

我们来进一步比较经典力学公式（1）和相对论公式（2）。

在上一章中，我们曾经讨论过标枪运动员的投掷动作，他的助跑是为了提高标枪相对于地面的速度。如果我们假想

运动员的助跑速度接近光速，能不能使标枪的速度超过光速呢？若按照公式（1）来看，这是可能的。例如，设运动员相对于地面速度为 $u=0.9c$ ，标枪相对于运动员的速度也为 $v'=0.9c$ （二者都小于光速 c ），则标枪相对于地面的速度为 $v=v'+u=1.8$ （超过光速）。实际上，在经典力学中，速度合成律是没有上限的，重复地利用（1），我们可以用许多较小的速度合成为任何大的速度。

过渡到相对论物理时，这个结论也要改变。按照公式（2），上例中标枪相对于地面的运动速度应是

$$v = \frac{0.9+0.9}{1+0.9 \times 0.9} c = 0.995c,$$

即不超过光速。也就是说，不管相对于哪一个参考系而言，标枪速度都是不超过光速的。而且，可以一般地说，由许许多多的小于光速的运动合成起来，最终的速度仍然不超过光速。

这样，光速就成了物体运动速度的一个极限，这是光速的绝对性的另一方面的含义。

超光速问题

对光速极限这个结论要加几点注解。

有一种不正确的理解，认为光速极限是一切速度的极限。错了，光速只是物体运动速度的一种极限，或能量传递速度的一种极限。如果不注意这个条件，一般地谈速度。那么，找寻超光速的现象在物理学中并不是难事。

举一个极常见的例子。在节日的晚上，当探照灯射向高空的云层时，由于云层的反射，你会在云层上看到一个亮点。当地面上的探照灯慢慢转动时，亮点却以极快的速度在运动。如果能有足够高的云层，这个亮点的速度就可以超过光速。这时，沿着亮点运动的轨道并没有能量的传递，所以它的速度并不受光速极限的限制。

这个探照灯的例子并不仅仅是一个用来说明原理的例子，而且可能有真正有价值的应用。七十年代以来，射电天文观测的分辨率大大提高。利用所谓甚长基线干涉仪，则其分辨率相当于站在拉萨古城可以看清哈尔滨的一张邮票。用这种技术发现，许多类星体中包含两个相对称的射电子源（见图 3-4）。更有趣的是，发现有的类星体两个子源的间距在不断地增大。由间距增大的速率可以推算出两个子源的分离速度。对于 3C345, 3C273, 3C279

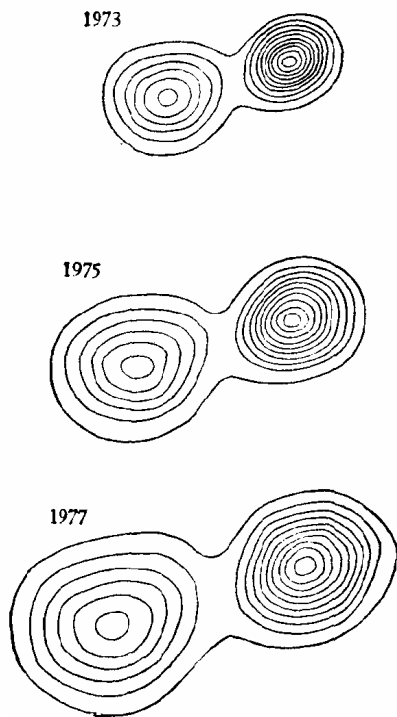


图 3-4 类星体 3C345 有两个射电发射区（从七十年代以来这两个发射区以超光速相互分离）

等几个类星体，这个分离速度都超过光速，有的甚至达到光速的十倍！

有一种解释这种超光速的模型，就是认为类星体的中心母体喷射出两股相反方向的粒子流（相当于探照灯的光），它照射在星系际介质上（相当于高空中的云），从而激起射电辐射（相当于亮点）。因此，只要中心母体有小的摆动。粒子流照射所激起的辐射区就会迅速地移动。光速不是这种辐射区移动速度的极限，因而超过光速是许可的。

当然，“探照灯”模型只是超光速运动的一种可能的解释。还有许多其它模型也都可以解释超光速现象。目前这个问题还没有公认的合理解释，需要进一步的观测以检验哪一种机制更加合理。

c 的 测 量

光速有这样多重要的性质，所以它是一个基本的物理常数。

第一个尝试测量光速的，也是伽利略。他和他的助手在夜间相隔数公里远面对面地站着，每人拿一盏灯。灯有开关（注意当时还没有电的知识，更没有电灯）。当伽利略在某个时刻打开灯，一束光向助手方向射去，助手看到灯后马上打开自己的灯。伽利略试图测出从他开灯到他看到助手开灯之间的时差，从而算出光速。但这个实验失败了，因为光传播速度太快，现在知道，要想通过这种方法测出光速，必须能

测出 10^{-5} 秒的时差，这在当时是完全不可能的。

第一个比较正确的光速值，是用天体测量得到的。1675 年，丹麦天文学家罗麦注意到，木卫消失在木星阴影里的时间间隔逐次不同，它随着各次卫星掩蚀时，木星和地球之间距离的不同而变长或变短。他认识到这是由于在长短不同的路程上，光线传播需要不同的时间。根据这种想法，罗麦推算出 $c=2 \times 10^8$ 米/秒。

直到 1849 年，地面实验室中才有较好的光速测量。当时，法国物理学家斐索利用高速齿轮进行这项工作。1862 年，傅科成功地发展了另一种测定光速的方法，他用一个高速转镜来测量微小的时间间隔。下图是经过改进后的实验装置示意图。转镜是一个正八面的钢质棱镜，从光源 S 发出的光射到转镜面 R 上，经 R 反射后又射到 35 公里以外的一块反射镜 C 上。光线再经反射后又回到转镜。所用时间是 $t = \frac{2D}{c}$ 。在 t

时间中转镜转过一个角度。实验时，逐渐加快转镜转速，当转速达到 528 转/秒时，在 t 时间里正好转过 $1/8$ 圈。返回的光线恰恰落在棱镜的下一个面上，通过半透镜 M 可以从望远镜里看到返回光线所成的像。用这种方法得到

$$c=299,796 \pm 4 \text{ 公里/秒。}$$

近代测量光速的方法，是先准确地测量一束光的频率 ν 和波长 λ ，然后再用 $c=\nu\lambda$ 来计算。1973 年以来，采用以下的光速值

$$c=299,792,458 \pm 1.2 \text{ 米/秒。}$$

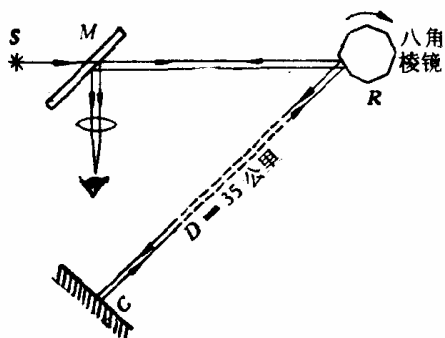


图 3-5 利用高速旋转的棱镜测量光速的示意图

顺便指出一点：各种测量光速的方法，得到的结果都很一致，这也成为光速不变性的一个有力佐证。

第四章 从伽利略相对性原理 到狭义相对论

萨尔维阿蒂的大船

在第一章中已经提到过，经典物理学是从否定亚里士多德的时空观开始的。

当时曾有过一场激烈的争论。赞成哥白尼学说的人主张地球在运动，维护亚里士多德—托勒密体系的人则主张地静说。地静派有一条反对地动说的强硬理由：如果地球是在高速地运动，为什么在地面上的人一点也感觉不出来呢？这的确是不能回避的一个问题。

1632年，伽利略出版了他的名著《关于托勒密和哥白尼两大世界体系的对话》。书中那位地动派的“萨尔维阿蒂”（图4-1）对上述问题给了一个彻底的回答。他说：“把你和一些朋友关在一条大船甲板下的主舱里，让你们带着几只苍蝇、蝴蝶和其他小飞虫，舱内放一只大水碗，其中有几条鱼。然后，挂上一个水瓶，让水一滴一滴地滴到下面的一个宽口罐里。船停着不动时，你留神观察，小虫都以等速向舱内各方向飞行，鱼向各个方向随便游动，水滴滴进下面的罐中，你把任何东西扔给你的朋友时，只要距离相等，向这一方向不

必比另一方向用更多的力。你双脚齐跳，无论向哪个方向跳过的距离都相等。当你仔细地观察这些事情之后，再使船以任何速度前进，只要运动是匀速，也不忽左忽右地摆动，你将发现。所有上述现象丝毫没有变化。你也无法从其中任何一个现象来确定，船是在运动还是停着不动。即使船运动得相当快，在跳跃时，你将和以前一样，在船底板上跳过相同的距离，你跳向船尾也不会比跳向船头来得远。虽然你跳到空中时，脚下的船底板向着你跳的相反方向移动。你把不论什么东西扔给你的同伴时，不论他是在船头还是在船尾，只要你自己站在对面，你也并不需要用更多的力。水滴将象先前一样，滴进下面的罐子，一滴也不会滴向船尾。虽然水滴在空中时，船已行驶了许多柞^①。鱼在水中游向水碗前部所用

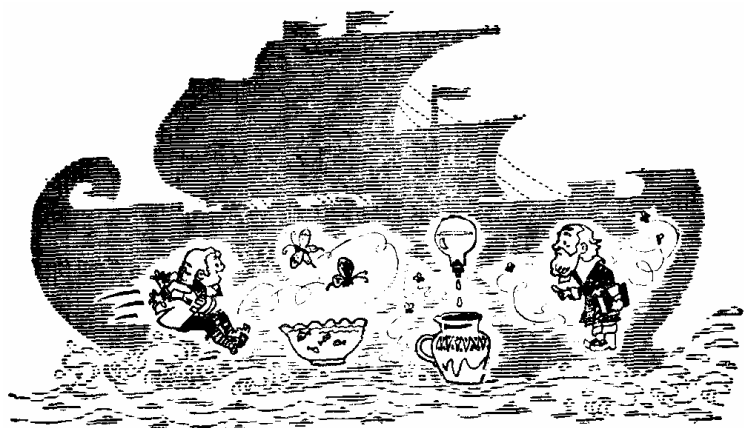


图 4-1 萨尔维阿蒂的大船

^① 柞为大指尖到小指尖伸开之长，通常为九英寸，它是古代的一种长度单位。

的力并不比游向水碗后部来得大；它们一样悠闲地游向放在水碗边缘任何地方的食饵。最后，蝴蝶和苍蝇继续随便地到处飞行。它们也决不会向船尾集中，并不因为它们可能长时间留在空中，脱离开了船的运动，为赶上船的运动而显出累的样子。”

萨尔维阿蒂的大船道出了一条极为重要的真理，即：从船中发生的任何一种现象，你是无法判断船究竟是在运动还是在停着不动。现在称这个论断为伽利略相对性原理。

用现代的语言来说，萨尔维阿蒂的大船就是一种所谓惯性参考系。就是说，以不同的匀速运动着而又不忽左忽右摆动的船都是惯性参考系。在一个惯性系中能看到的种种现象，在另一个惯性参考系中必定也能无任何差别地看到。亦即，所有惯性参考系都是平权的、等价的。我们不可能判断哪个惯性参考系是处于绝对静止状态，哪一个又是绝对运动的。

伽利略相对性原理不仅从根本上否定了地静派对地动说的非难，而且也否定了绝对空间观念（至少在惯性运动范围内）。所以，在从经典力学到相对论的过渡中，许多经典力学的观念都要加以改变，唯独伽利略相对性原理却不需要加以任何修正，而且成了狭义相对论的两条基本原理之一^①。

① 在许多教科书中，把伽利略相对性原理称为力学相对性原理，把狭义相对论中的相对性原理称为狭义相对论相对性原理。区别是：前者认为对一切惯性参考系观测力学现象是等价的。后者则作了推广，认为对一切惯性参考系观测任何物理现象都是等价的。其实，这种区分方法并不完全符合历史事实，“萨尔维阿蒂”明确说的是“任何一个现象”，并非只有力学现象。

狭义相对论的两条原理

1905年，爱因斯坦发表了狭义相对论的奠基性论文《论运动物体的电动力学》。关于狭义相对论的基本原理，他写道：

“下面的考虑是以相对性原理和光速不变原理为依据的，这两条原理我们规定如下：

1. 物理体系的状态据以变化的定律，同描述这些状态变化时所参照的坐标系究竟是用两个在互相匀速移动着的坐标系中的哪一个并无关系。

2. 任何光线在“静止的”坐标系中都是以确定的速度 c 运动着，不管这道光线是由静止的还是运动的物体发射出来的。”

其中第一条就是相对性原理，第二条是光速不变性。整个狭义相对论就建筑在这两条基本原理上。

爱因斯坦的哲学观念是自然界应当是和谐而简单的。的确，他的理论常有一种引人注目的特色：出于简单而归于深奥。狭义相对论就是具有这种特色的一个体系。狭义相对论的两条基本原理似乎是并不难接受的“简单事实”，然而它们的推论却根本改变了牛顿以来物理学的根基。

下面我们就来开始这种推论。

“同时”是相对的

“同时”概念的相对与绝对，在第一章中已经提到，这里比较仔细地论证它。

所谓两个事件是同时的，意思是说，两件事的空间位置可以不同，但发生的时间是一样的。举一个例，每当广播电台在播送对钟信号的时候，在不同地点的许多人都要对一下自己的钟或表。我们可以说，不同地点的人对钟动作是同时的。仔细分析，这个说法并不严格。因为电台发射的信号要经过一定的时间才能传到收音机那里。距离越大，传播时间越长，不同地点收到信号的时间，实际上并不完全一样。当然，由于电波速度很大，这种对钟方法产生的差别相当小，在日常生活中这种不严格性不会带来任何麻烦。不过，当我们在讨论原则性问题时，哪怕再小的不严格性也是不允许的。严格地说，只有当两个钟与电台的距离相等时，它们才会同时收到信号。

如图 4-2，两个钟分别放在 A 和 B 两点。它们与广播电台的距离都等于 L 。如果电台在 $t=0$ 时发出信号，则在 $t=L/c$ 时信号将同时到达 A 和 B 。或看说，信号到达 A 和到达 B 这两件事是同时发生的。通过这种手续，我们利用电台可以把同一惯性系中所有各点上的钟全部对准。这样，就在这个惯性系中有了共同的时间标准。

现在，我们站在另一个惯性参考系 K' 上，它以速度 v 相

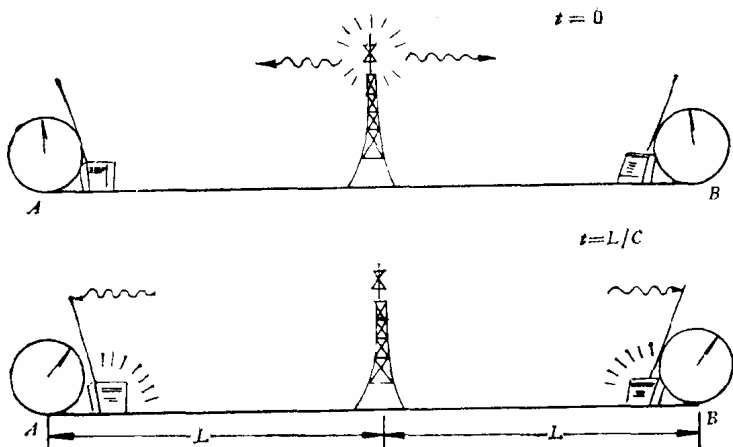


图 4-2 在同一惯性系中，利用电台的信号可以把 A、B 两地的钟对准

对于 K 向左运动 (图 4-3)。在他看来，电台和 A、B 三者都以速度 v 向右运动。这时，电台到 A 及 B 两钟的距离仍然相等，假定为 L' 。因为光速是不变的，相对于 K' ，信号的速度还是 c 。然而由于 A 具有向右的速度 v ，所以，在 K' 看来，A 和射向 A 的信号之间的相对速度是 $c + v$ ^①。同样的道理 B 和射向 B 的信号之间的相对速度是 $c - v$ 。因此，假如电台发信号的时间是 $t' = 0$ ，则 A 和 B 收到信号的时间分别是

$$t'_A = \frac{L'}{c+v}, \quad t'_B = \frac{L'}{c-v}。$$

显然 $t'_A \neq t'_B$ 。也就是说，在 K' 看来，信号到 A 和到 B 这两

① 这里我们又一次遇到光速极限问题，速度 $c+v$ 显然是超过光速的，但它并不同光速极限相矛盾。光速不变性是说光相对于观察者的速度不变。而这里的 $c+v$ 则是观察者看到的一束光与另一物体之间的相对速度，后者是可以超过光速的。

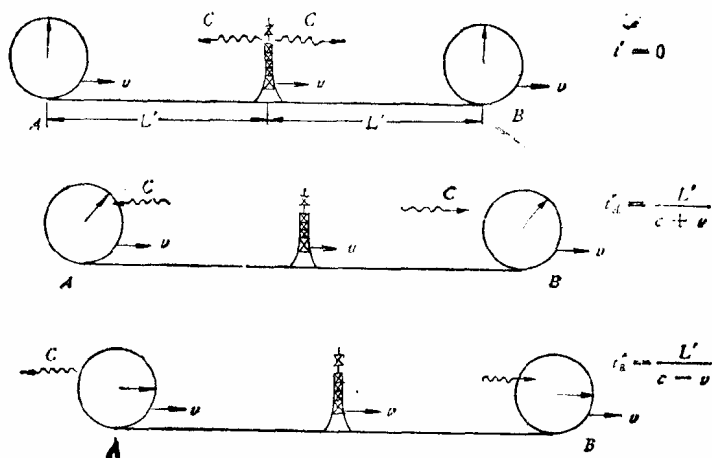


图 4-3 在以速度 v 运动的惯性系 K' 看来，电台信号到达 A, B 两地不是同时发生的

件事不是同时发生的。这就证明了“同时”是相对的，它决定于选用哪一个参考系。当参考系变化时，不同时的事可能变成同时，同时的事件也可能变成不同时。

谁先动手

按照狭义相对论，不仅“同时”是相对的，有时候，甚至事情的先后也都是相对的。举一个例子，一节长为 10 米的列车， A 在车后部， B 在车前部。当列车以 $0.6c$ 的高速度通过一个站台的时候，突然站台上的人看到 A 先向 B 开枪，过了 12.5 毫微秒， B 又向 A 发射。因而站台上的人作证：这场枪战是由 A 挑起的。但是，车上的乘客却提供相反的情况，

他们说，是 B 先开枪，过了 10 毫微秒， A 才动手。事件是由 B 发动的。

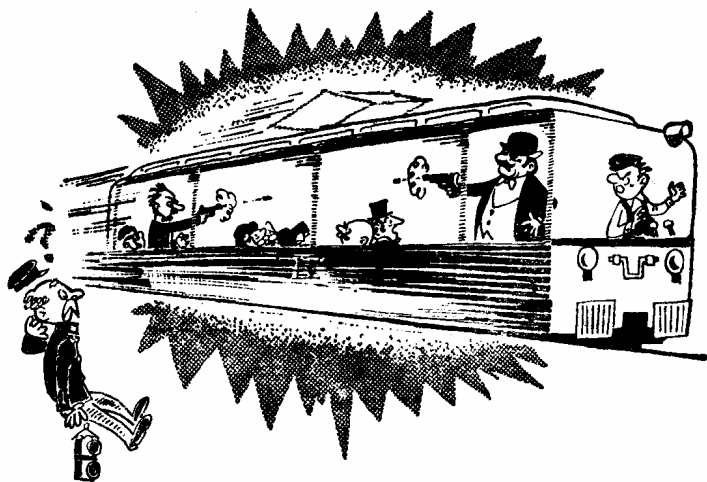


图 4-4 谁先动手

到底是谁先动手呢？没有绝对的答案。在这个具体事件中，谁先谁后是有相对性的。在列车参考系中， B 先 A 后，而在车站参考系中则是 A 先 B 后。

因果关系

读了上面的例子，有的读者一定会发生疑问。如果事件的先后次序是相对的，那么会不会在某个参考系中能看到一个人的死亡早于他的诞生，一列火车的到达早于它的出发呢？更一般地说，原因总是发生在结果之前，如果事件的次

序能颠倒，那不就出现结果在前原因在后的混乱了吗？

为了说明这个问题，我们先看下面这张图（图 4-5）。横轴代表空间坐标 x ，纵轴代表时间坐标 t 。如果一个事件在图上的位置是原点（即 $x=t=0$ 事件），则由它发射（或到达它）的光的世界线是两条 45 的斜线（如果取光速 $c=1$ ）。这两条线把整个平面分成四个锥状区域。利用等于或小于光速的信号可以把原点事件 O 与区域 I 和 II 中的任何事件联系起来，而不可能把原点事件 O 与区域 III 和 IV 中的任何事件联系起来。

由于光的速度是极限速度，事件 O 与区域 III 及 IV 中的任何事件不可能用任何信号联系起来。不能用任何信号联系起的两个事件是不可能互为因果的。因而，对这些事件来说，谁先谁后的相对性并不涉及因果关系。相反， O 与区域 I 及 II 中的任何事件均可能用信号联系，即可能存在因果关系。因此，这些事件的先后不应当有相对性，否则将与因果关系相矛盾。

区域 II 相对于事件 O 来说，是绝对过去，区域 I 对于它来说，则是绝对的将来。这种先后是不能由选择参考系加以改变的，是绝对的。所以，狭义相对论能适应因果关系的要求。

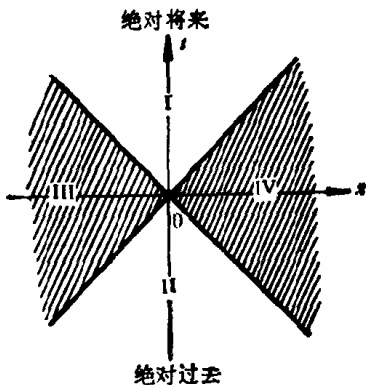


图 4-5 光锥图， O 事件与 III、IV 两区域中的任何事件不可能有因果关系，它与 I、II 中的事件则可能有因果关系

在牛顿的物理学中，我们并不清楚两个事件具有因果关系的必要条件是什么。爱因斯坦物理学则表明，两个事件具有因果关系的必要条件是两者可以用等于或小于光速的信号联系起来。再看一看上节讨论过的 A 和 B 的枪战，由于 A 和 B 并不满足这个必要条件（在十几个毫微秒时间内，光信号走不到十米远），所以， A 和 B 开枪动作的先后是相对的。

在这里我们再一次看到光速 c 的重要性。正是光速不变性保证了因果关系的成立，保证我们不会看到任何倒因为果的现象。

至此，我们可以用下面的表简单总结一下迄今已经讨论过的从经典力学到相对论的种种变化。其中“绝对的”意思是不随参考系的变化而变化，“相对的”则表示与参考系的选择有关。

	经典力学	狭义相对论
光 速	相 对 的	绝 对 的
同 时	绝 对 的	相 对 的
不可能有物理联系 的两事件的次序	绝 对 的	相 对 的
可能有物理联系 的两事件的次序	绝 对 的	绝 对 的

第五章 钟和尺的相对与绝对

牛顿时空观中的时和空

对上章最后的相对与绝对分类表，我们还可以逐步加以补充。在牛顿时空观里，还有两个绝对的概念，即时间的间隔和尺的长度。

一个人看到自己的手表走过一分钟，往往以为世界上所有的钟和表也都同样地走过一分钟，而不管是在哪一种运动状态的钟。这就是时间间隔的绝对性。

类似地，一把直尺的长度，如果从某一个参考系测量它是一尺。那么，从任何参考系来测量它，它仍旧是一尺。这就是尺长的绝对性。

时间间隔和尺长这两种绝对性，在牛顿时空观里是两个重要的角色，但在相对论中却都变成相对的了。

运动钟的变慢

前面已经说过，凡是能测量时间的工具，都是一种“钟”。利用光速不变性，我们也可以设计一种雷达钟。它的结构如图 5-1。其中有一部雷达和一块反射板，板与雷达天线之间的

距离是 d 。雷达发出的信号，受到板的反射后，可以再被雷达接收到。一个来回的距离是 $2d$ ，如果信号速度是 c ，那么一个来回所用掉的时间就是 $T=2d/c$ 。

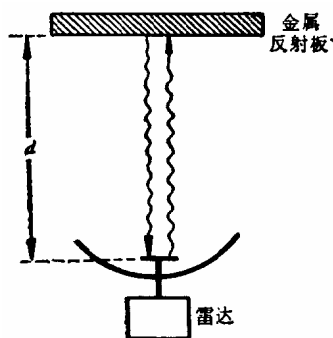


图 5-1 雷达钟的结构

怎样用雷达钟来测量时间呢？如果一个过程从开始到结束，雷达信号来回走了五次，这个过程所需的时间就是 $5T$ 。如果信号走了三个来回，所需时间就是 $3T$ 。这就是说，以信号来回一次作为度量时间间隔的单位。

有甲、乙两个人，他们各自有一个雷达钟。在甲乙两人相对静止时，校准两个钟，使它

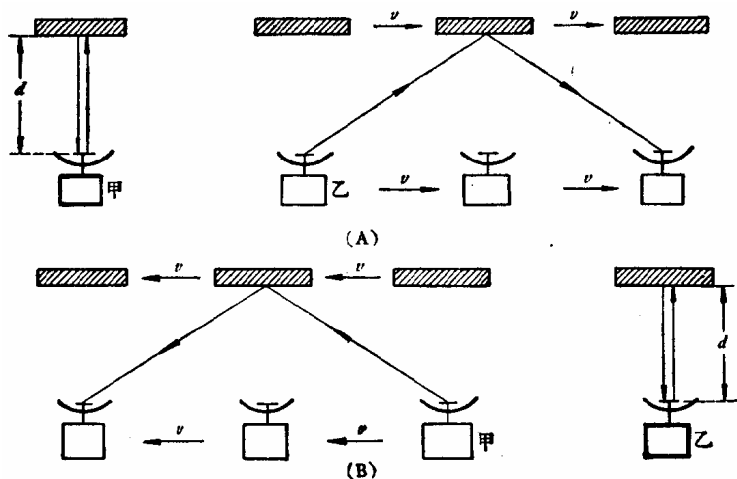


图 5-2 运动钟的变慢

们走得同样快慢。然后，让甲乙两人作相对运动。甲和甲钟向左，乙和乙钟向右。甲、乙各自会看到什么现象呢？

先来谈谈甲。站在甲的立场上，甲是静止的，甲钟相对于他也是静止的。他看到自己的钟仍与以前一样。没有变化（象萨尔维阿蒂大船中的其它东西一样）。这时，甲看到乙和乙钟正向右运动。在乙钟的发射—反射—接受的过程中，天线和反射板都不断地在运动，信号走的是斜线（见图 5-2(A)）。因此，在甲看来，乙钟信号一个来回走的距离大于 $2d$ 。可是，由于光速不变，无论甲钟或乙钟二者信号速度都是 c 。所以，甲看到的现象是：当甲钟走过一个单位时间时，乙钟还没有来得及走完一个来回。甲的结论是：乙钟比我的钟慢了。

相反，如果站在乙的立场，一切又都反过来了。乙认为自己是静止的，而甲钟向左边（见图 5-2(B)）。乙钟信号一个来回走的距离是 $2d$ ，而甲钟信号走的是斜线，一个来回走的距离大于 $2d$ 。因此，乙的结论是：甲钟比我的钟慢了。

甲和乙到底谁对呢？都对。他们的结论表面上相反其实并不矛盾。是一致的。这个结论就是：运动的钟要变慢。在甲看来乙在运动，在乙看来甲在运动。所以。他们都是看到对方的钟变慢了。

有人一定会不相信这个结论的普遍性。他们认为，毛病是出在用了雷达钟。他们以为总能找到一种“好”钟，无论甲乙之间有没有相对运动。它们总是走得一样快慢。其实，如果真有这种“好”钟存在，那么，萨尔维阿蒂大船中就要乱糟糟了。

那时，摆在大船里的有“好”“坏”两种钟，当大船静止时，它们走得同样快慢。而当大船运动起来时，就会有的快有的慢。果真如此，我们就可以根据这两种钟的差异来判断萨尔维阿蒂的大船到底是静止还是运动了。所以，如果假定有所谓“好”“坏”两种钟存在，就必定同相对性原理矛盾。相反，如果相对性原理是真理，那么，只要一种钟变慢了，其它一切与它一起运动的钟也都同样要变慢。

总之，在甲看来，当乙运动时，不仅乙的雷达钟，而且有关乙的一切能描述时间流逝的过程，比如生物的新陈代谢，放射性元素的衰变以及动物的寿命等等，都完全一致地变慢了。时间的流逝不是绝对的，运动将改变时间的进程。

μ 子的寿命

寿命也是一种“钟”。我们平常说一代人的时间，就是在用寿命来度量时间。所以，寿命也不是绝对的。同一东西的寿命，在不同参考系看来，应是不同的。事情的确如此。

有一种粒子，叫做 μ 子。它是不稳定的，而且寿命很短，从产生到衰变，只有大约百万分之二秒 (2×10^{-6} 秒)。这样，即使 μ 子以光速运动，也只能走过 $2 \times 10^{-6} \times c \approx 600$ 米的距离。可是，宇宙线的观测证明。在高空中产生的 μ 子也能达到地面。它们走的距离远远大于 600 米，这是为什么？利用运动钟变慢的道理，不难解开这个谜。

因为，在高速运动中，寿命“钟”象其它的钟一样，也

要延缓。因此，高速运动的 μ 子寿命远比 2×10^{-6} 秒要长，它的飞行距离可以远远超过 600 米。

图 5-3 表示物体运动的速度与时间延缓之间的关系。横轴是物体的运动速度，纵轴表示当运动钟走过一秒时，静止的钟走过了多少。例如，对于以 $0.6c$ 速度运动的钟，它的钟走过 1 秒时，静止钟已走过了 1.25 秒。从图中可以清楚地看到，只有

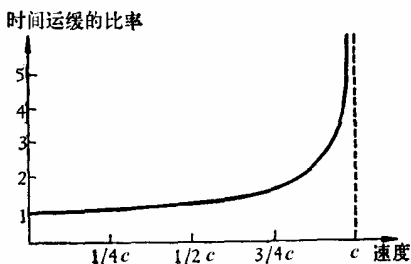


图 5-3 运动物体的速度与时间延缓的关系

当运动速度非常接近光速时，静止者看到的运动者的寿命延长效应才会变得很大。当速度接近光速时，静止者看到运动者的寿命趋向无限大。光速又是一个极限。

双生子佯谬

人，同 μ 子一样，寿命也是有限的。最多算是 100 年吧！如果不考虑运动钟的变慢，就是乘光速火箭，人生旅程的界限也不超过 100 光年，永远到不了遥远的恒星或其它星系。但实际上，地面上的人将看到光速火箭中乘客的寿命大大延长了，从而他们的旅程可以大大超过 100 光年。相反，火箭上的乘客也看到地球以高速远离火箭而去。因之，在他看来，地球上的人寿命也长了。当地球与火箭的距离超过 100 光年

时，地球上的弟兄们还活着。

这里碰到一个难题。

我们设想甲、乙是一对孪生弟兄。他们计划做一次高速飞船旅行，来检验一下狭义相对论。甲留在发射基地，乙周游天外。当飞船再度回到基地时，是甲比乙年轻，还是乙比甲年轻？这里有两种答案：(1)，甲看乙船上的钟变慢了，所以，甲说乙年轻些；(2)，乙看基地上的钟变慢了，所以，乙说甲应该比他更年轻一些。在这个两难的境地。运动钟变慢的结论，到底应当怎么办？这是个有名的疑难，叫做“双生子佯谬”。

问题的关键是乙要回到出发点。倘使乙的飞船仅仅作匀速直线运动，是办不到这一点的。乙的飞行路线必然是有来有去，或者是转一个圈子。因此，在甲看来，乙是在做有速度变化的运动，当然，在乙看来，甲相对于他也在做变速运动。

按照运动钟变慢的理论，甲看乙钟变慢，乙看甲钟变慢这种对称性，只有当甲和乙的相对运动速度不变时，才能保持。或者说，只有互相作匀速直线运动的两个惯性参考系，互相之间才是等价的。一旦出现了变速的相对运动，就不能使用这种对称性了。

不要忘记，甲和乙都生活在宇宙间。他们周围还有大量天体。因此，双生子问题中有三个因素：甲、乙和他们周围的宇宙，如果甲留在基地上，他相对于大量天体并没有做变速运动。在甲看来，只有乙在做变速运动。在乙看来，情况与甲不同。他不但看到甲在做变速运动而且整个宇宙都在做变速运动。一边是整个周围的宇宙，一边只是一个飞船，这

是明显的不对称性。所以由对称性引起的两难是不存在的。那么，到底谁年轻呢？

1966年，真的做了一次双生子旅游实验，用来判断到底那个寿命长，同时也一劳永逸地结束了纯理论的争论。不过旅游的不是人，仍然是 μ 子。旅途也不在天外，而是一个直径大约为十四米的圆环。 μ 子从一点出发沿着圆轨道运动再回到出发点，这同乙的旅行方式是一样的。实验的结果是，旅行后的 μ 子的确比未经旅行的同类年轻了。我们似乎可以这样作结论了：谁相对于整个宇宙做更多的变速运动，谁就会活得更长久。

动尺的缩短

现在转到尺长的相对性上。

1893年，为了解释迈克尔逊-莫雷实验，斐兹杰诺和洛仑兹先后都提出过一种假

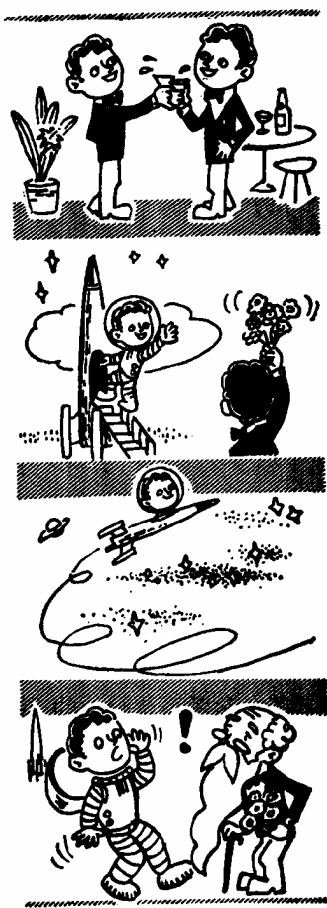


图 5-4 双生子佯谬

说，即一切物体都要在它的运动方向上收缩。后来就称为洛仑兹-斐兹杰诺收缩。按照斐兹杰诺所给出的定量关系，以每秒 11 公里速度飞行的火箭，在运动方向只收缩十亿分之二左右。但是，在高速运动时，尺的收缩量很可观。图 5-5 表示一把 1 米长的尺在运动过程中长度的变化。当速度达到光速的一半时，收缩百分之十五。当速度达到每秒 26 万公里时，收缩百分之五十，也就是说原来 1 米长的尺，现在只有五十厘米了。

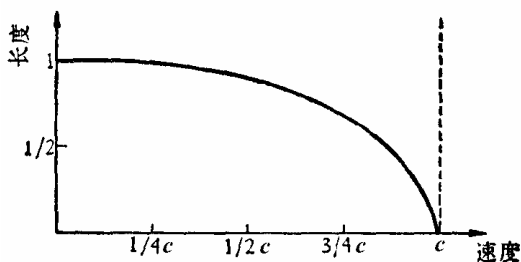


图 5-5 洛仑兹-斐兹杰诺收缩

在狭义相对论中，尺长也是相对的（决定于参考系）。尺长的变化方式和当初洛仑兹-斐兹杰诺所假定的完全一样。这里要多加一点说明的是，如何测量长度？一把尺子如果相对于某个参考系是静止的，那么，从尺两端空间坐标的差，就可得到尺的长度。

当尺相对于参考系运动时，我们可以按如下办法测量尺长。在给定时刻由两个人同时进行拍照，一个拍摄运动尺的前端，一个拍摄后端。由于照片是同时拍摄的，所以比较两张照片上空间坐标的差，就可以得到运动尺的长度。注意，

这里关键的字是“同时进行拍照”。我们知道，在相对论时空观中，“同时”是相对的，是与参考系的选择有关的。因此，对不同参考系来说，要按照各自的“同时”进行拍照，由此导致测量结果不同，是不难想到的。

尺缩也和钟慢一样，是对称的。即，如果甲、乙之间有相对运动，那么，甲看乙的尺缩短了，乙看甲的尺缩短了。这个结论表示空间的大小并不是绝对的，而是相对的。

汤普金斯先生的错误

汤普金斯先生是《物理世界奇遇记》^①里的主人翁。那本书的作者盖莫夫说，汤普金斯先生来到一座奇异的都市，由于在这城市里极限速度（相应于真实世界中的光速）异乎寻

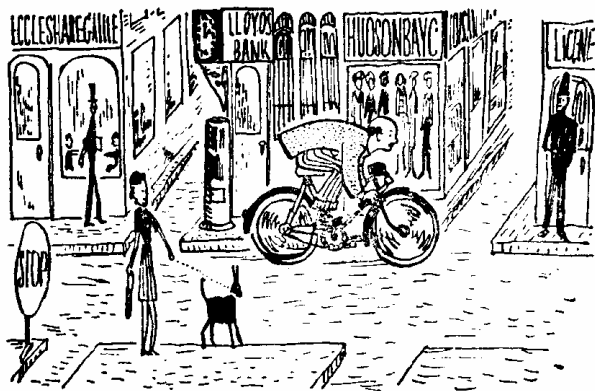


图 5-6 汤普金斯的见闻

^① G. 盖莫夫著：《物理世界奇遇记》，科学出版社，1978 年版。

常地小，因此，他很容易看到各种相对论效应。汤普金斯先生说，当他以高速骑自行车时，他发现这个城市都变成了图 5-6 的样子。

汤普金斯的所见所闻，几十年来被物理学家认为是正确的。大家相信，只要我们能以接近光速的速度运动，那么，我们也会象汤普金斯那样，看到一个扁的世界。由动尺缩短这个相对论效应，似乎很自然得到这个结论。

然而，它是错误的。运动尺的缩短，并不能证明汤普金斯先生将看到一个变扁的世界。关键在于尺缩是根据“同时进行拍照”而得到的。汤普金斯先生的“看”，恰恰不符合这个要求。因为当眼睛“看”到一个物体时，意味着物体各部分发射的光子同时到达眼睛。形成了像。这样，这些光子就不可能是在同一时刻发射出来的，因为物体距眼睛的距离不同。离开观察者较远的点，必定有较早的发射时刻。近的点。则有较迟的发射时刻。这就同尺长测量中要求的“同时”是矛盾的。

因此，我们根本看不到汤普金斯先生所说的那种景象。到底会看到怎样的景象呢？

我们来考虑一个边长为 1 尺的立方体。当这个立方体静止时，有一个在垂直于 bc 方向距立方体较远的观测者，他只能看到立方体的一个面 bc 。 a 点发出的光线他是看不见的（见图 5-7 (A)）。当立方体沿着 bc 方向以高速 v 运动时，沿着运动方向的 bc 发生收缩，它的长度变成 $\sqrt{1-v^2/c^2}$ （见图 5-7 (B)）。同时，现在观察者已可以接收到从 a 点发射的光线。由于从 a 点发出的光与 bc 两点发出的光是同时到达观测者的

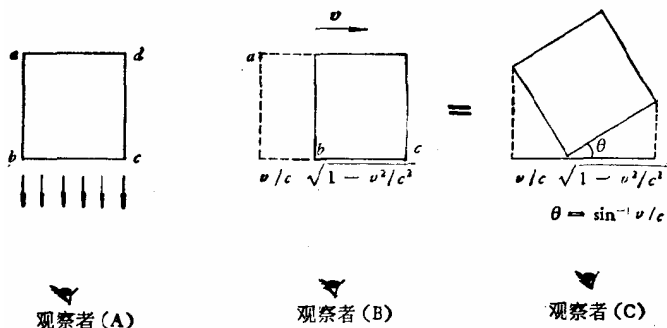


图 5-6 当立方体以速度 v 运动时，观察者将看到一个转动了的立方体，转动角度为 $\theta = \sin^{-1} \frac{v}{c}$

眼睛，所以观察者看到 a 点发出的光必定比 bc 边发出光的发射时间早 $1/c$ 秒。但在 $1/c$ 秒的时间内，立方体已向前运动了 v/c 的距离。所以，现在观测者已可看到立方体的 ab 边。总起来，相当于观测者看到了一个转动了的立方体。转动角度为 $\theta = \sin^{-1} v/c$ (参见图 5-7 (C))。

从这个例子看到，尺缩效应并非使我们看到的东西变扁了，而却是转动了。可以一般地证明，对于任何形状的物体，当它以速度 v 运动时，物体的形象，在观测者“看”来，只是相对于它静止时的形状略有转动，而并不是压扁了！

洛 仑 兹 变 换

上面的一系列讨论涉及到相对论的许多方面，但是它们有一个共同的问题，即我们总是需要从两个不同的参考系来考虑同一事件的地点和时间。不论是对于同时性的问题。还

是尺缩、钟慢问题，我们都是既要弄清一个事件相对于参考系 K 的时间和地点，又要知道它相对于另一个参考系 K' 中的时间和地点，而 K 和 K' 之间有相对的匀速运动。因此，这些问题的实质就在于我们需要找到各个事件相对于参考系 K 的时间和空间坐标，与相对于另一个参考系 K' 的时间和空间坐标之间的关系。

倘若一个事件相对于参考系 K 的空间位置是 x, y, z ，时间坐标是 t 。则同一个事件相对于另一个参考系 K' 的空间坐标 x', y', z' 和时间坐标 t' 应是多少？为了简单起见，我们假定 K' 与 K 仅仅在沿着 x 轴的方向有相对运动，运动速度为 v （见图 5-8）。根据光速不变原理和

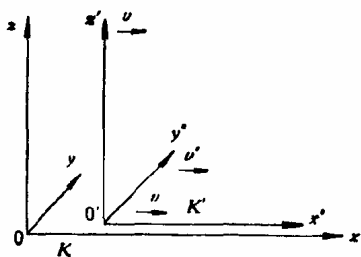


图 5-8 相对作匀速运动的两个惯性系 K 及 K'

相对性原理，就可以得到 (x, y, z, t) 与 (x', y', z', t') 这两组坐标之间的变换关系，它是

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

这就是著名的洛仑兹变换。

洛仑兹变换公式是狭义相对论运动学的核心。利用它可以自然地导出前面讨论过的各种相对论效应的定量关系。例如，一把静止时长度为 L_0 的尺子，当它相对于观察者以速度 v 运动时，其长度就成为 $L = L_0 \cdot \sqrt{1 - v^2/c^2}$ 。同样，当一个以速度 v 相对于观测者运动的钟经过了 $\Delta t'$ 时，静止的钟所指示的时间为 $\Delta t = \frac{\Delta t'}{\sqrt{1 - v^2/c^2}}$ 。图 5-3 和图 5-4 就是根据这些公式绘制出来的。

对于洛仑兹变换，我们再说几句。在通常的条件下，物体的运动速度总是远小于光速的。因此，如果我们把光速 c 看成一个无穷大，则上述公式就变成

$$\begin{cases} x' = x - vt \\ y' = y \\ z' = z \\ t' = t \end{cases} .$$

这组关系通常称作伽利略变换。它是牛顿力学时空观的基础。利用伽利略变换立即可以推出时间间隔和物体长度的绝对性，而 $t' = t$ 就意味着同时性是绝对的。伽利略变换公式只是洛仑兹变换公式的一个近似。洛仑兹变换公式适用于更为广泛的范围。这也就是说，比起牛顿力学来，狭义相对论是对于自然界的更加正确的描写。

第六章 动力学问题

亚里士多德的力学

所谓动力学，研究的问题是物体运动的原因。简单地说，就是为什么物体会运动？为什么会这样运动，而不那样运动？等等。

凭日常的经验，回答这些问题似乎不是十分困难的。我们走路的时候，要用力气。马车的运动，要靠马去拉。飞机的飞行，是由于引擎的推动。这些现象，使我们产生一种观念，即运动的原因是力，没有力也就不会产生运动，力是决定运动的根本因素。简单地说，这个观念是正确的，但进一步的问题是：力到底如何决定物体的运动性质？

亚里士多德对这个问题的回答是：力决定物体的运动速度。的确，要马车跑得更快，就要用更多的马去拉，或更强的马去拉。所以，力越大速度越大，力越小速度越小，没有力时，速度就为零（静止不动）。这就是亚里士多德的动力学规律。

动者恒动

亚里士多德的动力学规律，表面上能解释许多日常的现

象。所以在欧洲，无论教会或者世俗，都以此作为经典。

第一个起来批评这个规律的也是伽利略。他首先注意到各种物体都有一定的惯性。例如，一个正在很快运动的马车，即使马开始停止用力拉车，也要经过一段时间之后，马车才能停下来。这个现象是不能用亚里士多德的力学加以说明的。因为，按照亚里士多德的力学，如果没有拉力（即马停止用力拉），物体运动速度应立即为零（即马车应立即停止运动）。所以，从马停止拉车，到车完全停下来，这一段运动显然不是依靠外界的拉力，而是其它的原因。这个原因就是物体的惯性。即物体要保持自己原有运动状态的一种属性。

依靠惯性能够运动多久呢？由于马车很快会停下来，所以依靠惯性似乎只能维持有限时间的运动。这只是对亚里士多德力学的部分改变。

伽利略并没有停留在这个水平上。他分析一个理想实验。实验装置是一个光滑的斜面，上面的小球总是要滑下来。斜面倾角越小（即斜面长度越长），重力对小球的拉力也就越

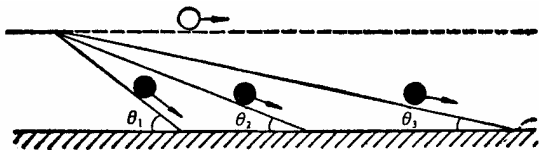


图 6-1 一个得出动着恒动说的理想实验

小，当斜面倾角为零时（即水平，这时斜面长度达到无限长），重力对小球的水平拉力为零。在斜面上（倾角不为零时），只要斜面非常光滑，小球总是能滑下来的。当小球在斜面上滑

动后，将斜面的倾角变为零，这时小球虽然不受任何拉力，但却还可能走无限远。这就是说，小球可以永恒地运动而不需要任何外界的拉力。这时小球的运动只有依靠惯性。所以，惯性能维持物体永恒的运动。马车之所以在有限的的时间里停下来，是由于地面对马车有摩擦阻力。如果地面也象理想实验中的斜面那样光滑，那么，马车也将永恒地运动下去。

这就是伽利略力学中的惯性定律，即有名的动者恒动说。用比较准确的语言来表达就是，一个不受任何外力的物体，将永远保持自己的运动状态。运动速度既不会增加，也不会减少。

这就完全否定了亚里士多德的速度决定于力的力学。惯性定律的力学认为，不受外力的物体，可以具有任何速度，并保持自己的速度永恒不变。

那么，力到底是怎样影响物体的运动呢？伽利略没有回答这个问题。

牛顿的力学规律

牛顿回答了上面的问题。

牛顿的观念是：力的作用并不是决定物体的运动速度，而是改变物体的运动速度。力越大速度的改变率越大，力越小速度改变率也就越小，当没有力时，速度就没有任何改变。最后一点就是伽利略的惯性定律。

牛顿引进加速度的概念来描写速度的改变率。他的力学

定律就是：对物体的作用力比例于该物体的加速度。比例系数叫做物体的惯性质量。用公式来写，就是

$$ma=f$$

其中 f 表示作用在物体上的外力， a 是物体的加速度， m 是物体的惯性质量。

可见，按照牛顿的力学，对一定的物体（即一定的 m ），加速度正比于外力；对一定的外力（即 f 一定），惯性质量越大的物体，加速度越小。

到牛顿为止，人们对动力学规律的认识，我们可以用下面的表来表示：

	力与运动的关系	公 式
亚里士多德	力 决 定 速 度	v 是 f 的函数
伽 利 略	惯性维持匀速运动	$f=0$ 时 v 不变
牛 顿	力决定加速度	$a=f/m$

直到相对论发展之前，牛顿的力学可以说是无往而不胜的。相对论发展后，才给上表添加了新内容。

牛顿力学与光速极限的矛盾

按照牛顿力学，一个确定的力，对物体产生确定的加速度。这就是说，这个物体在任何单位时间里，速度要增加（或减少）一个确定的数值。我们可以用下面的图来表示这个关系。图中横轴表示时间。纵轴表示速度。在恒定外力的作用

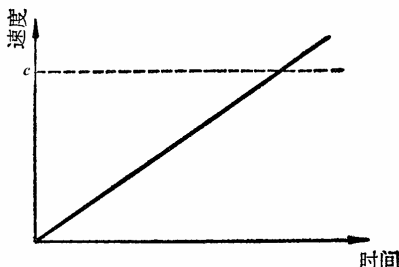


图 6-2 按照牛顿力学，在一个恒定力的作用下，物体的速度将直线地增加

下，物体的速度直线上升。因此，只要外力作用的时间足够长。物体的速度必定会超过光速值（图中虚线）。所以牛顿的力学规律不能适应相对论的时空观。“一定的力决定一定的加速度”在相对论中一定是不对的。

惯性质量随速度的变化

显然，由于光速极限的要求，动力学规律必定会有下面的性质：在一定外力作用下的物体。当它的速度越接近光速

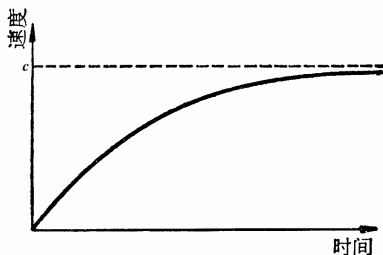


图 6-3 按照相对论，物体在恒定的外力作用下，速度的变化越来越小，最后稳定地趋于光速

时，这个外力产生的加速度就越小。当物体速度趋于光速时。外力对它的作用不产生任何加速度。这样就可以保证，不论外力作用时间多么长，也不会把物体的速度增加到超过光速的范围。如果像上面

那样也画出速度-时间图，则在恒定外力作用下物体速度随时间的变化，应当有图（6-3）那种形式。开始的加速度和牛顿力学计算的相同，然后加速度逐渐变小，最后速度稳定地趋于 c 。

如果我们把惯性质量定义为外力与加速度的比例常数，即

$$m = \frac{f}{a}。$$

那么，在相对论力学中，惯性质量并不是常数，而是一个决定于速度的量。速度越大，惯性质量也越大。当速度趋于光速时，惯性质量趋向无限。只有当速度近于零时，惯性质量才同牛顿力学中相同。在狭义相对论中，这个定量的关系是

$$m = \frac{m_0}{\sqrt{1-v^2/c^2}}$$

其中 v 是物体的运动速度， m_0 是物体静止时的质量。图 6-4

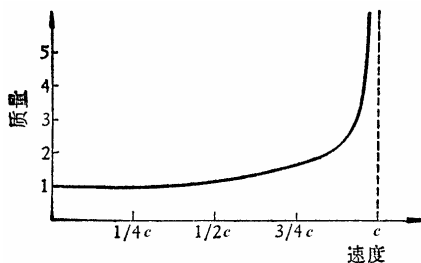


图 6-4 质量随速度变大而增大

中画出了惯性质量与速度的关系。可见，当 $v \simeq c$ 时， m 随着 v 有很明显的变化。

懒惰=活泼——新时代的一块奠基石

现在，我们再从能量的角度来分析一下上面的问题。

在牛顿力学中，我们知道，如果有一个力 f 对一个物体作用，那么，一般地说，这个力要对物体做功。功转变成物体的动能。作用时间越长。物体走的距离越长，做功就越大，物体速度也就越大，即表示物体的动能越高。

可是，按照狭义相对论，当 f 对物体作用时，最后并不增加物体的速度（因加速度趋于零），那么力 f 作的功转变成什么能量了呢？

由前面的讨论，当 v 接近 c 时， v 的变化是很小的（图 6-3），但是当 v 接近于 c 时， m 的变化很显著（图 6-4）。也就是说，当 v 接近 c 时，外力 f 的作用虽然不再使 v 有明显变化，但是却会使物体的惯性质量 m 有所增加，作用时间越长，走的距离越远， m 就越大（因 m 无上限）。所以，这个物体的能量的增加是和它的惯性质量 m 的增加相联系的。也就是说，惯性质量的大小应当标志着能量的大小。这是狭义相对论的又一个极其重要的推论。

1905 年爱因斯坦的第一篇狭义相对论论文发表后三个月，他又专门写了一篇不到两千字的论文来讨论惯性质量与能量的关系。文章的题目很别致，如果不用标准的物理术语来解释，那就是：《一个物体的懒惰性与它所包含的活泼性有关系吗？》。因为，在德文里懒惰与惯性是同一个字，能量与

活泼性也是同一个字。

他的答案是：物体的惰性就是物体的活泼性的度量。这个富有哲学味道的科学论断，就是那常常被誉为新时代标志之一的著名公式

$$E=mc^2,$$

其中 E 是物体的能量（活力）， m 是物体的质量（惯性）， c 是光速。它说明，一个物体，只要它的能量增加，它的质量也就成比例地增加。

在牛顿力学中，惯性与活力之间，或者质量和能量之间，是相互独立的，没有关系的。在相对论力学中，能量和质量只是物体的统一力学性质的两个不同方面。在表面上完全不同的事物之间，寻找它们内在的联系，这是自然科学的一个永恒的主题。

由上述公式我们可以看到，即使当物体静止时，它的能量 E 也不等于零，而是等于 $E_{静}=m_0c^2$ 。这个能量称为静能。在牛顿力学中，只认识到动能，势能等形式的能量。而不知道还有静能形式的能量。静能是通过相对论时空观的发展才被发现的一种能量的形态。

静能的数量是极大的。物体的静能一般要比它的化学能大亿倍以上。只要我们能开发出这种潜在于静止物体中的活力，能量的源泉可以说是取之不尽的。随着原子核物理学的发展，今天我们已经知道了一些开发静能的途径。例如，核反应堆就是一种。目前各国正在加紧研究的受控热核反应，也是一条开发静能的有希望的途径。

我们可回顾一下已经走过的路了。从同时是相对的还是绝对的这种最学院气的问题，直到受控热核反应这种技术性的问题。它们之间通过狭义相对论而紧密地联系在一起了。如果说世界上有哪一条真理能把那样多的哲学沉思、物理洞察和技术应用全都融汇于一身，充分显示出人类智慧的巨大潜在能力，那么，到目前为止， $E=mc^2$ 可能就是最好的一个了。

第七章 从比萨斜塔到广义相对论

比萨斜塔上的实验

世界上第一个被人们注意到的力，就是地球的引力。地球吸引着地面附近的所有物体，使各种物体落向地球。因此，人们很早就有兴趣研究这种力的性质。

我们仍然要从亚里士多德谈起。亚里士多德曾经在他的力学中给出过一条有关引力的性质。他说，当物体受到地球的引力而下落时，重的东西下落得快，轻的东西下落得慢。如果有两个同样大小的球，一个是木制的，一个是铁制的，让二者从同样的高度同时开始下落，那么，按照亚里士多德的论断，则铁球将先着地，而木球后着地。不过，亚里士多德并没有做这个实验，在他

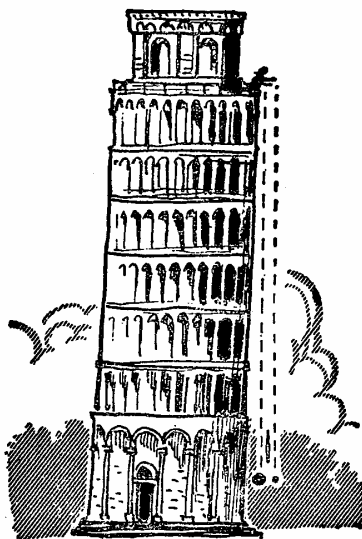


图 7-1 比萨斜塔

那个年代，还不是用实验与理论对比的方法来认识自然，而更多的是求助于思辨。

亚里士多德的论断到底对不对呢？靠思辨是不能最终解决问题的。第一次起来认真分析这个论断的还是伽利略。据说当时他真的做了一个实验来直接检验一下亚里士多德的理论。

他利用比萨斜塔进行这个实验^①（图 7-1）。他让不同材料构成的物体从塔顶上落下来，并测定下落时间有多少差别。结果发现，各种物体都是同时落地，而不分先后。也就是说，下落运动与物体的具体特征并无关系。无论木制球或铁制球，如果同时从塔上开始下落，它们将同时到达地面。就这样，亚里士多德的引力理论被实验否定了。

万有引力

牛顿在这个基础上进一步研究引力的性质。他的贡献主要有两个方面：

其一是观念上的。他打破了亚里士多德关于“月上”和“月下”两个世界的划分。这一点，我们在第一章中已经提

^① 据某些科学史家的考证，伽利略并没有作过盛传的比萨斜塔实验。当时，他并不是用斜塔，而是用斜面来完成这个实验的，他发现，不同质料的小球从斜面上滑下时所用时间是相同的。不过，今天的比萨斜塔仍然因这个轶事而成为物理学的“圣地”之一，吸引着“朝圣”的游客。甚至，在比萨和佛罗伦萨的某些博物馆里还陈列有据称是当年伽利略在实验中用过的木制球。

过了。牛顿认为，地面附近的物体的下落运动虽然与月亮不停顿的转动在形态上完全不同，但是二者是由同样的原因引起的，这原因就是地球的引力。牛顿的引力理论之所以称之为万有引力，“万有”二字即在于强调这种力在宇宙间有普遍的适用性。而不受亚里士多德给出的界限限制。

其二是物理上的。牛顿给出了任何两个物体之间的引力相互作用的一般定量表达式。倘若有两个质点，它们的引力质量分别是 m_1 及 m_2 ，相互之间的距离为 r ，则它们之间的吸引力为

$$F = G \frac{m_1 m_2}{r^2}$$

其中 G 是万有引力常数，其值是 $G = 6.67 \times 10^{-8}$ 达因·厘米²·克⁻²。

牛顿的万有引力理论是一个极成功的理论。根据它解释了极多的地面现象和天体现象。其中最成功的事例当属关于海王星预言的证实。十九世纪初发现天王星的运行中总有不能解释的“反常”。法国的勒维耶和英国的亚当斯猜测其原因可能是由一颗尚未发现的行星对天王星的引力作用而引起的。他们相互独立的计算得到相同的结果。这些预言于 1846 年 9 月 23 日寄到德国的柏林天文台，根据计算，当时这个未知的行星应当位于摩羯座 δ 星之东 5 度左右，它的移动速度应为每天后退 69 角秒。柏林天文台当晚就作了观测，果然在偏离预言位置不到 1 度的地方发现了一颗新的八等星，第二天继续观测。发现它的移动速度也与牛顿引力理论的预

言完全符合。这一成功使万有引力理论获得了不可动摇的声誉。

直到今天，牛顿万有引力理论仍然是精密的天体力学基础。人造卫星、宇宙飞船的运行轨道的研究，仍然要靠牛顿的理论。

到廿世纪初，万有引力理论看来是一种无往而不胜的理论了。仅仅有一个非常小的事实似乎是例外。这个事实就是水星近日点的进动。

水星近日点的进动

水星是距太阳最近的一颗行星。按照牛顿的引力理论，在太阳的引力作用下，水星的运动轨道将是一个封闭的椭圆

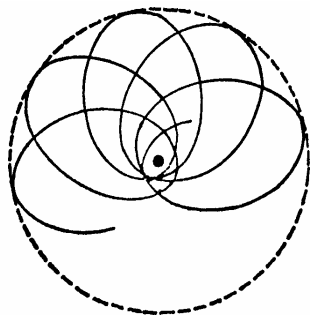


图 7-2 水星椭圆轨道的进动

形。但实际上水星的轨道并不是严格的椭圆，而是每转一圈它的长轴也略有转动（见图 7-2）。长轴的转动，就称为进动。水星的进动速率是每一百年 $1^{\circ}33'20''$ 。进动的原因是由于作用在水星上的力，除了太阳的引力（这是最主要的）外。

还有其它各个行星的引力。后者很小，所以只引起缓慢的进动。天体力学家根据牛顿引力理论证明，由于地球参考系以及各行星引起的水星轨道的进

动，总效果应当是 $1^{\circ}32'37''$ /百年，而不是 $1^{\circ}33'20''$ /百年。二者之差虽然很小，只有 $43''$ /百年，但是已在观测精度不容许忽略的范围了。

这个 $43''$ /百年，引起许多议论，成功地预言过海王星的勒维耶，这次又如法炮制，他认为在太阳附近还存在一颗很小的行星，是它引起水星的异常进动。不过，这一次勒维耶的预言并没有获得成功。在他预言的地方没有看到任何新的行星。

就这样，小小的 $43''$ /百年，在以牛顿力学为基础的天体力学中一直是个谜。不过， $43''$ /百年的确是太小太小了，比起整个牛顿理论体系中那么大那么大的成功来说，它是微不足道的。

然而，在科学的问题上，并不是以多数和少数来判断成败的。千百万次的成功并不构成忽略一次“小小”失败的充分理由。

问题等待着解决。

直到爱因斯坦确立了广义相对论之后，水星进动问题才第一次获得满意的解决。不过，广义相对论的研究并不是从这个具体问题开始的。像爱因斯坦的其它科学工作一样，广义相对论同样是从对一些简单而又基本的问题的思考开始的。

引力质量 惯性质量的普适性

牛顿的万有引力理论虽然正确地给出了这种力的定量表达式，但是在牛顿理论中看不清引力的最基本特征到底是什么。

到底那一点是引力的最重要性质呢？

我们已经多次看到，在许多方面都是伽利略首先从质的方面批评了亚里士多德体系中的谬误，而后又由牛顿加以发扬，给出经典物理的完整体系。我们也多次看到，虽然在伽利略那里只给出一些最基本的观念，还没有构成一个完整的体系，但是伽利略所奠定的一些观念在在不仅适用于牛顿力学，而且在相对论中它们仍然保持正确。伽利略相对性原理是如此，惯性定律仍然是如此。虽然在相对论中牛顿的绝对时空观和他的力学已经被修正了，但是伽利略提出的那些观念仍然可以不加任何修正地有效。

在引力理论的发展中，情况也完全相似。我们将看到，在广义相对论中，牛顿给出的万有引力具体表达式已经不再严格正确了。但是伽利略在比萨斜塔上发现的真理却成了广义相对论的最基本出发点。

比萨斜塔的实验说明了什么呢？

应用牛顿力学方程以及牛顿的万有引力定律。我们可以写出下列描写落体运动的方程

$$m_{\text{惯}}a = m_{\text{引}} \frac{GM}{r^2}$$

其中 $m_{\text{惯}}$ 及 $m_{\text{引}}$ 分别表示物体的（与加速度成反比的）惯性质量和（与引力成正比的）引力质量， M 是地球的引力质量， r 是物体距地心的距离。上式还可以写成

$$a = \frac{m_{\text{引}}}{m_{\text{惯}}} \left(\frac{GM}{r^2} \right),$$

比萨斜塔的实验说明，不论任何物体，在地球的引力作用下产生的加速度都是相同的。那么由上式看来，这就意味着各种物体的 $m_{\text{惯}}/m_{\text{引}}$ 值都应当是相同的。或者说

$$\frac{\text{引力质量}}{\text{惯性质量}}$$

是一个普适常数。它与具体的物性并无关系。

在物理学中，一个普适常数的发现往往要引出整套的理论。普适的光速 c 引出了狭义相对论，普朗克常数 h 引出了量子论。普适常数 $m_{\text{惯}}/m_{\text{引}}$ 则是解决引力问题的关键。

爱因斯坦曾这样写道：“……在引力场中一切物体都具有同一加速度。这条定律也可以表述为惯性质量同引力质量相等的定律。它当时就使我认识到它的全部重要性。我为它的存在感到极为惊奇，并猜想其中必定有一把可以更加深入地了解惯性和引力的钥匙。”^①

引力的本性就是“没有”引力

爱因斯坦是如何利用“ $m_{\text{惯}}/m_{\text{引}}$ 是普适常数”这把钥匙的

① 《爱因斯坦文集》，第一卷，第 320 页。

呢？

就同伽利略一样，爱因斯坦也设计了一个理想实验来分析问题，不过伽利略爱用斜面，而爱因斯坦爱用电梯。在爱因斯坦的理想电梯中装着各种实验用具，还可以有一位实验物理学家在里面安心地进行各种测量。

当电梯相对于地球静止的时候，实验家将看到，电梯里的东西都会受到一种力。如果没有其它的力与这种力相平衡，这种力就会使物体落向电梯的地板。而且，所有物体在落向地板时，加速度都是一样的。根据这些现象，实验家立即可以作出结论：他这个电梯受到了外界的引力作用。

好！现在让电梯本身也做自由下落的运动。这时，实验家将发现，他的电梯里的一切东西都不再受原来那种力的作用，所有物体都没有原来的那种加速度了。即达到了我们通常所说的“失重”状态。这时电梯里的物体不再表现出任何受引力作用的迹象。无论苹果或羽毛，都可以自由地停留在空间，而不“下落”。实验家既可以在电梯的底部行走，也可以在顶部行走，两种行走所用的力气完全一样，并不需要任何杂技演员那样的技巧。也就是说，实验家观测任何物体的任何力学现象，都不能看到任何引力的迹象。

接着，爱因斯坦作了更进一步的引伸，他认为，在上述电梯里的实验家不仅通过任何力学现象看不到引力的迹象，而且通过其它任何物理实验也都看不到引力的迹象。即是说，在这种电梯的参考系中，引力全部消除了。电梯实验家不能通过自己电梯中的物理现象来判断它的电梯之外是不是有一个

地球这样的引力作用源，他也测量不出自己的电梯是否有加

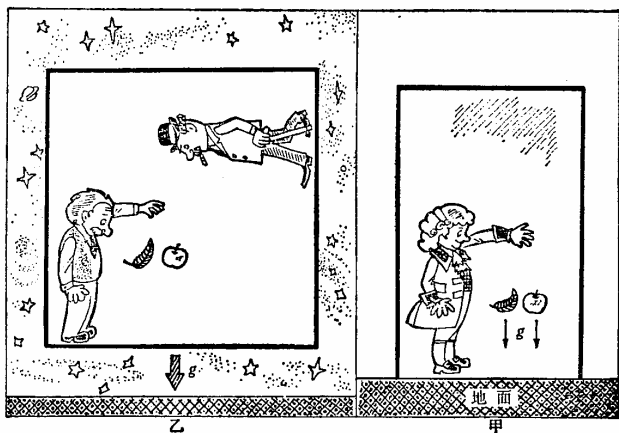


图 7-3 爱因斯坦理想电梯实验

速运动，就象在萨尔维阿蒂大船里的观察者测不到大船是否在运动一样。

简言之，我们可以在任何一个局部范围（关于局部一词的含义，下面还要再讨论）找到一个参考系（即爱因斯坦的电梯），在其中引力的作用全被消除了。这就是引力的最重要特性。在物理学中其它的力都没有这种属性。例如宏观的电磁力或原子核、粒子范围的强作用和弱作用，都不可能通过选择适当的参考系而完全加以消除。

引力的本性就在于引力能在某种参考系（爱因斯坦电梯）中局部地消除。这就是爱因斯坦根据比萨斜塔实验抽象出来的一个引力的基本性质。通常叫做**等效原理**。

局部惯性系

等效原理保证在任何一个时刻、任何一个空间位置上必定存在一个爱因斯坦的电梯，电梯中的一切现象就好象宇宙间没有引力一样。在这种电梯中，动者恒动，即惯性定律是成立的。按照定义，惯性定律成立的参考系是一个惯性参考系。这样，爱因斯坦电梯应是一个惯性参考系。

讲到这里，你可能产生疑惑。因为通常我们就是以匀速运动的萨尔维阿蒂大船作为惯性参考系的。而爱因斯坦的电梯相对于地球，也就是相对于萨尔维阿蒂大船来说，并不是匀速运动的，而是有加速度（自由落体加速度）的。这两者是否有矛盾呢？

是有矛盾！在广义相对论发展之前，萨尔维阿蒂大船一直被认为是惯性参考系。然而，严格说，这是不对的。因为，在萨尔维阿蒂大船中的实验家看到船中的水滴要向下作加速运动，可是他又看不到有谁对水滴施加了作用（注意，大船是完全封闭的，实验家不知道外界到底有没有东西）。这就是说水滴并不满足动者恒动这条定律，因而它不是真正的惯性参考系（顶多只能说是近似于惯性参考系）。反之，在爱因斯坦电梯里，倒是可以实现动者恒动。

现在来谈“局部”一词的含义。我们说引力对一切物体产生的加速度相同，这句话是对处在同一点上的物体来说的，在不同点上的引力加速度一般是不相同的。例如图 7-4，在地

球上不同地点的引力加速度是不相同的。因此，一个作自由落体运动的电梯，只能将一个点附近小范围内的引力作用（例如引力加速度）全部消除，而不可能在一个大范围中把引力的作用全部消除掉。例如，在图 7-4 中 A 点的电梯只能消除 A 点上的引力作用，而对 B 点就不适用。

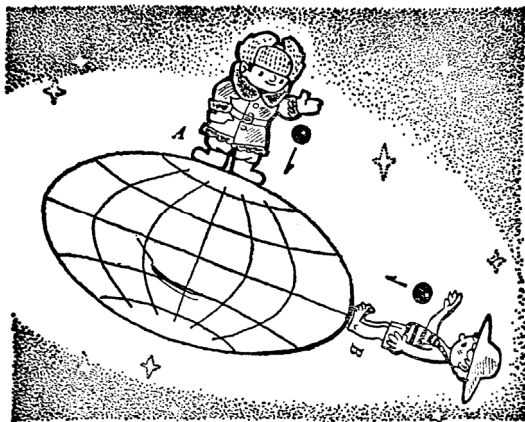


图 7-3 不同地点的重力加速度是不同的

因此，如果认为上述爱因斯坦电梯才是严格意义下的惯性参考系，那末这种参考系只能适用于局部的范围。 A 点处的电梯只是 A 点上的惯性参考系。 B 点处的惯性参考系则必须用 B 点处的自由下落电梯。

什么是引力？

现在我们可以试着来回答什么是引力这个艰深的问题了。

让我们再一次回顾萨尔维阿蒂那段有名的话。其中有这样一句“使船以任何速度前进，只要运动是匀速……”。这是表明，萨尔维阿蒂大船只能按匀速运动。也就是说，在广义相对论之前，人们认为不同的惯性参考系（萨尔维阿蒂大船）之间只能有相对匀速运动，不可能有加速运动。牛顿的力学，牛顿的万有引力理论都是建筑在这个基础之上的。

然而，广义相对论的发展表明，真正严格的惯性系只能是一些局部惯性系（爱因斯坦电梯）。现在各个点上的局部惯性系之间是可以有相对加速度的。例如前面图 7-3 中的 A、B 两点上的电梯之间是有加速运动的。

那么什么是引力呢，引力的作用就在于决定各个局部惯性系之间的联系。在任何一个局部惯性系中，我们是看不到引力作用的。我们只能在这些局部惯性系的相互关系中。看到引力的作用。

在物理学的其它部门中，我们的工作程序总是这样：取定一定的参考系用以度量有关的物理量，然后经过实验总结出其中的规律，发现基本方程。在这个过程中时空的几何性质（即所取的参考系）是不受有关的物理过程影响的。所以，这些问题中的基本方程只是物理量之间的一些关系，即

一些物理量 = 另一些物理量。

但是，在引力问题中，引力一方面要影响各种物体的运动，另一方面引力又要影响各局部惯性系之间的关系。所以，现在我们不可能先行规定时空的几何性质，时空的几何性质本身就是有待确定的东西。因此，在引力基本方程式中不可

能没有时空的几何量。它应当反映出，引力本身及引力与其他物质之间的作用，即应有下列形式的方程：

时空几何量=物质的物理量。

爱因斯坦的引力场方程

为了寻找这个引力的基本方程，爱因斯坦前后用去了七、八年时间。其中有多次的失败。到了1915年末，他终于找到了自己认为满意的引力场方程。当时，他写信给索末菲说：“上个月是我一生中最激动、最紧张的时期之一，当然也是收获最大的时期之一。我感到高兴的是，不仅牛顿理论作为第一近似值得出了，而且水星近日点运动（每一百年43''）作为第二近似值得出了”^①。

从比萨斜塔开始，到43''/百年为止，它们之间的联系终于又被找到了。

爱因斯坦寻找引力场方程的整个奋斗过程，是很值得研究的一段物理学史。它在方法论上给人很多启示。不过，在这本小册子中不可能详细地讨论了。因为，这些讨论不可避免地要涉及大量的数学工具。现在我们只写出它的最后结果

$$R_{\mu\nu} = -8\pi G \left(T_{\mu\nu} - \frac{1}{2} g_{\mu\nu} T_{\lambda}^{\lambda} \right),$$

① 《爱因斯坦文集》，第一卷，第80—81页。

其中 $g_{\mu\nu}$ 称为度规张量。 $R_{\mu\nu}$ 称为里契张量，它们就是描写时空几何性质的量， $T_{\mu\nu}$ 称为能量动量张量，它就是描写物理性质的物理量。

总之，在爱因斯坦广义相对论中，空间、时间和物质运动是相互作用着的。这里不但摆脱了牛顿意义下与物质运动无关的绝对时空，也超出了萨尔维阿蒂大船所反映的初级相对性。爱因斯坦曾经说：“空间—时间未必能被看作是一种可以离开物理实在的实际客体而独立存在的东西。物理客体不是在空间之中，而是这些客体有着空间的广延。因此，‘空虚空间’这概念就失去了它的意义”^①。

这就是他的科学和哲学的结论。

① 《爱因斯坦文集》，第一卷，第 560 页。

第八章 从牛顿到后牛顿

后牛顿修正

爱因斯坦的广义相对论尽管在基本概念上与牛顿的引力理论完全不同，但是，在牛顿理论适用的范围里，二者的具体结果应当没有差别。因为，我们已经说过，牛顿的万有引力理论是一个相当好的理论，能正确地说明许多现象。

所谓牛顿理论的适用范围，确切地说，就是弱引力场情况。

用什么来标志引力场的强弱呢？粗略地讲，如果在引力的作用下，物体的运动速度远小于光速，这个场就是弱的。反之，如果物体运动速度接近光速，场就是强的。

地球的公转速度只有 20 公里/秒，远比光速（30 万公里/秒）小，所以太阳引力场是弱的。一般说，在一个质量为 M 的物体附近的引力场中。运动速度大体是^①

$$v = \sqrt{\frac{GM}{R}},$$

① 对于一个质量为 M ，半径为 R 的球状物体，若有一小质点在 M 的引力作用下围绕这个物体表面做圆周运动，那么，它的速度 v 即为 $\sqrt{\frac{GM}{R}}$ 。

其中 G 是万有引力常数, R 是物体 M 的空间尺度, 由此可见,

弱场的条件是 $\sqrt{\frac{GM}{R}} \ll c$, 或

$$\frac{GM}{c^2 R} \ll 1。$$

强场的条件是

$$\frac{GM}{c^2 R} \simeq 1。$$

在下面的表中, 我们列出一些常见物体的 $\frac{GM}{c^2 R}$ 值

名称	质子	人	地球	太阳	银河
$\frac{GM}{c^2 R}$	10^{-40}	10^{-25}	$10^{-8.9}$	$10^{-5.4}$	10^{-6}

它们全都远远小于 1。这正是牛顿万有引力理论在大量问题中适用的根据。

对于爱因斯坦的引力场方程来说, 在 $\frac{GM}{c^2 R} \ll 1$ 的情况, 它应当过渡为牛顿的万有引力定律。比如, 在太阳引力场中运动的行星。它们受到太阳的引力作用, 这种力可以用上章的公式 $F = G \frac{m_1 m_2}{r^2}$ 来描写。也可以用太阳和行星之间的势能来描述。按照牛顿的理论, 这个引力相互作用势能是

$$U = -\frac{GmM_0}{r},$$

其中 m 是行星的质量, M_0 是太阳的质量, r 是它们之间

的距离。

按照广义相对论，太阳与行星之间的引力作用势能应修改成为以下的形式

$$U = -\frac{GmM_o}{r} - \frac{3v^2}{2c^2} \frac{GmM_o}{r} + \dots,$$

其中第一项和牛顿理论完全相同，第二项则是广义相对论带来的修正，它与第一项比较是很小的，因为 $\frac{v^2}{c^2} \simeq \frac{GM}{c^2 R} \simeq 10^{-6}$

（参见上表，对于太阳的值），如果忽略第二项。就回到牛顿的万有引力定律。

在上式中，第一项称为牛顿项，第二项等称为后牛顿项，在 $\frac{GM}{c^2 R} \ll 1$ 的情况，它是广义相对论对牛顿理论的小修正。

这种修正称为后牛顿修正。

行星近日点的进动

后牛顿修正虽然很小，但是有时它能起关键的作用。水星近日点的进动，就是依靠后牛顿项来说明的。如果仅仅有牛顿项，就不可能存在水星近日点的反常进动。

现在，不仅对水星观测到了反常的近日点进动，而且对其它几颗行星也都有了定量的观测结果。下面的表中给出有关几颗行星的反常近日点进动的观测值，以及根据后牛顿修正理论得出的结果。我们看到，理论与观测的符合是相当好的。

行 星	观 测	理 论
水 星	43."11±0."45/百年	43."03/百年
金 星	8."4±4."8/百年	8."6/百年
地 球	5."0±1."2/百年	3."8/百年
伊卡鲁斯 (小行星)	9."8±0."8/百年	10."3/百年

自转轴的进动

在牛顿的力学中，行星的自转是不参与引力相互作用的。意思是说，太阳对行星引力的大小，只与行星的质量有关，而与行星自转的快慢并无任何关系。牛顿的万有引力公式中，只有物体的质量因子，而没有自转量。

但是，广义相对论则不同。有一些后牛顿修正项中，不仅含有物体的质量因子，而且也含有物体的自转物理量，自转的快慢对引力作用也有贡献。两个没有自转的质点之间的引力相互作用与有自转的情况是不相同的。

这一新特征会引起自转轴的进动。也就是说，行星在运动过程中它的自转轴的方向应当慢慢变化。对太阳系中的行星来说，这个后牛顿的效应十分小，很难加以测定。何况还有其它因素也会造成行星自转轴的变化，淹没了后牛顿的贡献。

最近，利用脉冲星 **PSR1913+16**，对于自转轴进动已经给出了一个定性的观测证据。**PSR1913+16** 是由两颗致密星（关于致密星我们在下章中还要仔细地讲）组成的。其中一颗是具有高速自转的射电脉冲星。脉冲星的发射集中在一个

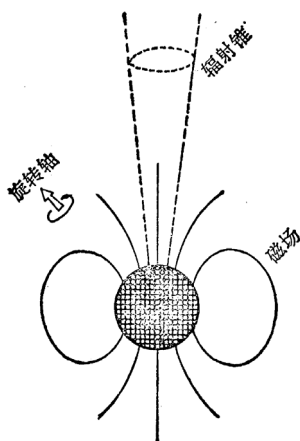


图 8-1 脉冲星的磁轴方向与它的转动轴方向是不一致的。沿着磁轴，有锥状的发射，因此，在转动过程中，每当辐射锥指向地球，我们就将收到一个脉冲

锥状体上（见图 8-1）。星体每自转一次，这个锥状辐射飞扫过地球一次，我们会测到一个射电脉冲。

PSR1913+16 于 1974 年底被发现后，几年来的观测显示出，它的射电脉冲形状（或叫脉冲轮廓）有少许的变化（见图 8-2）。这可能是自转轴进动的一种结果。

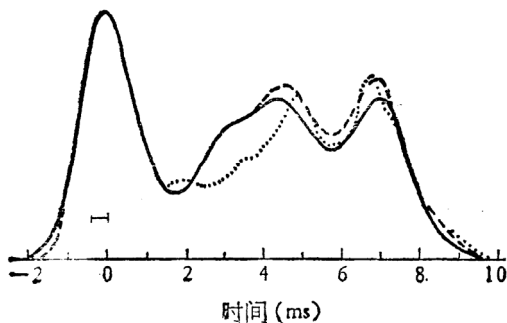


图 8-2 PSR1913+16 脉冲形状的变化，图中……线是 1977 年 7 月的观测结果，-----线和——线分别是 1978 年 6 月和 10 月的观察结果

因为辐射锥体的截面大体有下图所表示的形状。所以，当自转轴进动时，扫过地球的区域是不同的。在图中标出了1977年7月和1978年10月可能的扫过线。所以，从脉冲形状的变化使我们能估计自转轴进动的大小。按后牛顿修正理论 PSR1913+16 自转轴的进动速率，应当是1度/年，这个值和观测是符合的。

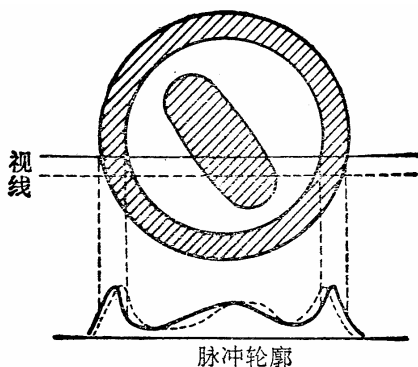


图 8-3 脉冲轮廓变化的一种解释 (阴影部分表示脉冲星辐射锥体的截面，水平线则表示当脉冲星旋转时观测者视线所扫过的轨迹。当自转轴进动时，视线穿过的区域发生了改变，使得观察到的脉冲形状也发生了变化。图中实线表示 1978 年 10 月的观察线，虚线表示 1977 年 7 月的观察线)

引力红移

既然对于在引力作用下速度大小可与光速相比拟时物体不能再用牛顿引力理论，那么，光本身在引力场中的运动，一定是从原则上就不能使用牛顿引力理论的。光与引力场之间的相互作用，在本质上属于后牛顿的范围。本章的最后几

节就来谈谈在引力场中传播的光的几个新现象。

第一个是引力红移。

这个效应是说，当光在引力场中传播时，它的频率或者波长会发生变化。一个在太阳表面的氢原子发射的光，到达地球时，我们将发现它的频率比地球上氢原子发射的光频率要低一点，即红移了（在可见光中，红光频率最低，所以一般把频率降低的现象叫做红移，反之叫蓝移）。这是因为太阳表面上的引力场比地球上的强（即 $\frac{GM}{c^2 R}$ 值大），如果有人太阳表面去接收从地球上发来的光，他会发现频率都要变高一点，即蓝移了。

总之，当光从引力场强（即 $\frac{GM}{c^2 R}$ 大）的地方传播到引力场弱（即 $\frac{GM}{c^2 R}$ 小）的地方时，频率都要变低一些。在相反情况，则要变高一些。

1960 年以后，在地面实验室中定量地检验了引力红移理论。庞德 (Pound) 等人在一个 22.6 米高塔的底部放一个 ^{57}Co 的 γ 光源，在塔顶放一个 ^{57}Fe 的接收器。这种穆斯堡尔实验^①装置的频率稳定性可以高达 10^{-12} 。这时，当 ^{57}Co 所发射的 γ 射线

① 当原子核中发射 γ 射线时，由于存在原子核的反冲，所以 γ 射线的能量总要比跃迁的能级小一些。因此，这种 γ 射线不能再被该对能级共振吸收。为了克服反冲的影响，穆斯堡尔把发射的原子核嵌在大块的晶体中，这样，由于反冲质量大大增加，从而降低了由于反冲引起的 γ 射线能量降低，使上述共振吸收成为可能。

到达顶部时，将发生一微小的红移。他们的测量结果与理论预言非常一致。 $\frac{\text{实验值}}{\text{理论值}}$ ，是 0.997 ± 0.008 。

光 线 弯 曲

一切物体在引力场附近时，都不可能走直线，因为引力的作用要使它们的轨道偏向引力源。根据等效原理可以判断，光在引力场中传播时，也会有类似的现象。因为，如果光的运动形态与其它物体不一致，那么，我们就找不到一个爱因斯坦电梯，能够在物体运动中以及在光的运动中同时消除引力的作用。所以，要求存在能消除引力的局部惯性系，就能推断光线在引力场中传播时一定要发生弯曲。

一束通过太阳表面附近引力场的星光，偏转角只有 $1''.75$ ，当没有太阳时，星光以直线传到我们的地球，但当太阳出现在星体与地球之间时，光线发生弯曲，我们将看到星体的位置移动到虚线的方向，即如图 8-4 所示。

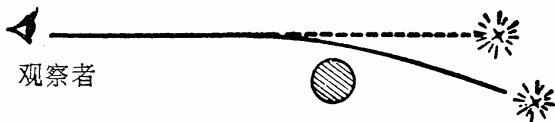


图 8-4 当太阳出现在星体与地球之间时，星光就会发生弯曲

1919 年爱丁顿领导的观测队，第一次定量地证实了光线弯曲的预言。在那年的 5 月 29 日，他们在西非的普林西比岛上拍摄了日全食时太阳附近的星空照片，然后与太阳不在这

个天区时的星空照片相比较，即可求出光线弯曲的数值，结果与理论预言相当好地符合。

1919年以后，几乎每逢有便于进行观测的日全食时。各国的天文学家都要做这个光线弯曲的实验一下表中列出各次观测的主要结果。

日全食日期	地点	观测值
1919.5.29	巴西	1."98±0.16
1919.5.29	普林西比	1."61±0.40
1922.9.21	澳大利亚	1."72±0.15
1929.5.9	苏门答腊	2."24±0.10
1936.6.19	苏联	2."73±0.31
1936.6.19	日本	1."28±2.13
1947.5.20	巴西	2."01±0.27
1952.2.25	苏丹	1."70±0.10
1973.6.30	毛里塔尼亚	1."60±0.18

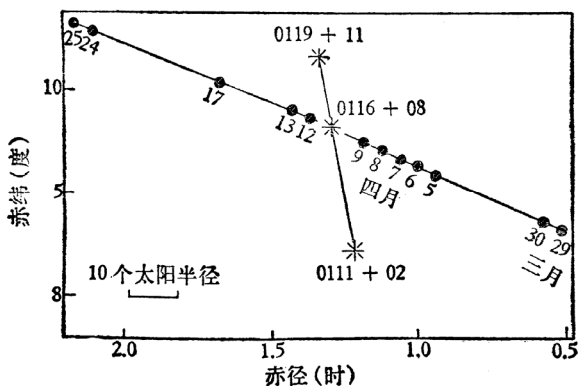


图 8-5 射电源 0116+08, 0111+02 及 0119+11 和太阳的位置示意图 (当太阳通过射电源 0116+08 附近时, 根据观察到的三个射电源之间位置的相对变化, 可测出光线在引力场中弯曲的数值)

近年来射电天文学的定位技术大大提高，分辨率超过了光学。因此检验光线弯曲的精度也大大提高了。可巧，每年三、四月间太阳要在射电源 0116+08 附近通过一次（见图 8-5）。0116+08 与 0119+11 及 0111+02 三个射电源几乎构成一条直线。而当太阳通过 0116+08 附近时，它们的相对位置将要发生变化。用这种方法得到的光线弯曲值是 $1.''775 \pm 0.''019$ 。

雷达回波的延迟

1964 年，夏皮罗等提出了一个光在引力场中传播的新的可以检验的效应。

夏皮罗从地球上利用雷达发射一束电磁波脉冲，这些电磁波到达其它行星之后，将发生反射，然后再回到地球，被雷达接收到。我们可以测出来回一次的时间，并对比两种不同的情况，一种是电波来回的路程远离太阳。这时太阳的影响可以不计；一种是电波来回的路程要经过太阳附近，受到引力场的作用。后一种情况的回波要比前者延迟一些，这就是太阳引力场造成的传播时间的加长，或叫做雷达回波的延迟。例如，地球与水星之间的雷达回波最大延迟时间可达 240 微秒。为了避免由于行星表面的复杂因素的影响，也有人用人造天体作为雷达信号的反射靶进行实验。

下页的表中列出雷达回波延迟的观测结果和它们的理论预言：

实验日期	射电望远镜	反射天体	工作波长	观测值 / 理论值
1966.11—1967.8	Haystack	金星, 水星	3.8 厘米	0.9
1967—1970	Haystack Arecibo	金星, 水星	3.8 厘米 7.0 厘米	1.015
1969.10—1971.1	Deep space Network	水手 6 号 水手 7 号	14 厘米	1.00

两方面的符合同样是令人非常满意的。

第九章 从经典的引力坍缩到黑洞

再谈强场条件

在上一章中我们曾经指出，强场的条件是 $\frac{GM}{c^2 R} \simeq 1$ 。

现在，我们从另一个角度来看这个问题。如果质量为 M 的体系所产生的引力场是强的，它们的空间尺度就应当是 $R \simeq \frac{GM}{c^2}$ 。换句话说，倘若质量为 M 的体系是强引力场的源，

那么这个体系就应该压缩到 $R \simeq \frac{GM}{c^2}$ 那么小的空间范围里

去。下面的表中给出一些物体的 $\frac{GM}{c^2}$ 的值。

名称	质子	人	地球	太阳	银河
$\frac{GM}{c^2}$ (厘米)	10^{-52}	10^{-23}	10^{-1}	10^5	10^{16}

根据我们在地面实验室中的经验，要想完成表中所要求的压缩，似乎是完全不可能的。用目前最强有力的压缩机也不能使水的体积缩小十分之一。所以，要想把偌大的太阳压缩成一个直径仅几公里的球，似乎是童话中的事。

自然界到底有没有强大的压缩机能把弱场物体压缩成强场呢？上面的经验使许多人对这个问题持否定态度。因此，自然界到底有没有强场物体存在，也使人们怀疑。如果根本没有强场物体存在，那么，广义相对论即使再好，也是无用武之地的东西了。

然而，有时候，比较起日常的经验来，物理学家更加相信经过检验的具有普遍意义的规律。寻常的经验往往不适于对非寻常的问题进行判断。就以压缩问题来说，从物理规律得到的结果与我们日常的印象正好相反：自然界不仅存在威力无比的压缩机，而且大多数天体几乎都逃不脱被压缩的命运。这种压缩机不是别的，正是天体自身的引力。

引 力 坍 缩

这个问题是从分析星的平衡性质开始的。一颗星的性质最主要的决定于两种力，一种是星体自身的引力，一种是星中物质的压力。倘若压力大于引力，星体将发生膨胀；若引力大于压力，则星体将收缩；两者相等时，星体达到平衡。

早在 1930 年，密尔恩分析一种没有能源的、由经典理想气体构成的星。他发现，在这种情况下，压力总是不能与引力相抗衡。任何质量的这种体系，在自身引力的作用下总要无限坍缩下去，一直到空间尺度缩小到零。物质密度增加到无穷为止。

随后，张德拉塞卡和朗道分别指出密尔恩的分析不完备。

因为在高密度下，物质的性质远远不能用经典理想气体来描写。这时必须考虑量子力学中的不相容原理。这种不相容原理能产生巨大的抵抗坍缩的力量。这种压力通常叫做简并性压力。仔细说来，在高密态情况下的简并性压力，大体可以分成两大类：一类是简并电子压力，当物质密度在 10^4 — 10^8 克/厘米³ 范围时，它起主要作用；另一类是简并中子压力，当物质密度在 10^{12} — 10^{15} 克/厘米³ 范围时，它起主要作用。具体计算表明，考虑到简并性压力后的确使问题有所好转，在一定质量范围内的天体不会出现密尔恩式的无限坍缩。张德拉塞卡的计算表明，当压缩到一定空间尺度后，简并电子的压力将与自引力达到平衡，稳定下来成为一种致密的星，叫做简并矮星，白矮星就是一种简并矮星。天狼 B 星是一颗白矮星。但是，简并电子压力也并不能彻底排除无限坍缩的威胁，特别是对于质量大于 1.5 个太阳质量的天体来说，不再能形成稳定的简并矮星。摆在它面前的命运依旧是坍缩。

张德拉塞卡曾经这样来描述当时的境遇：“我们的结论是，在我们能够回答下列基本问题之前，有关恒星结构的分析不可能获得较大的进展。这个问题就是给定一个含有电子及原子核（总体是电中性的）的封闭体，如果我们无限地压缩这些材料，将会发生什么事情？”

以上的讨论都是基于牛顿引力理论的。

到三十年代末，奥本海默采用广义相对论来分析这个问题。结果仍然没有变化。虽然他们证明了在一定质量范围内坍缩后能存在稳定的中子星（即简并中子压力与自引力抗衡

而形成的星体)。但是，他还说：“当所有热核能源耗尽之后，一颗足够重的星体将会（无限）坍缩。”

引力无限坍缩这个概念，就象潘多拉从“灾祸之匣”中放出的东西一样，它一经从“物理之匣”中放出之后，就再也没有能力将它收回了。总之，关于星体的最终结局的结论有两条：

1. 发生引力坍缩，形成大量的致密天体。

2. 致密天体大体有两大类，一是由有限坍缩形成的，例如白矮星和中子星，另一种则是由无限坍缩形成的天体。

第一个结论就牛顿引力理论或广义相对论来说都是一样的。第二个结论当然只能靠广义相对论来得到，因为牛顿的引力理论不适用于强场情况。先讨论第一个结论的观测证实。

强场天体在何处？

1934年巴德和茨维基发表了一篇短文，对找寻这种奇异的天体提出了一些猜测。这篇文章行文之短，涉及面之多，预测之大胆和准确在物理学和天文学史上是罕见的。我们与其复述他们的观点，不如原文照录：

超新星和宇宙线

在每个星系（星云）中，每几百年要发生一次超新星爆发。一个超新星的寿命大约是二十天，当它们绝对亮度极大时，可高达 $M_v = -14^m$ 。超新星的可见辐射 L_v 大约为我们太阳辐射的 10^8 倍，即 $L_v = 3.78 \times 10^{41}$ 尔格/秒。计算指出，总辐射（包括可见的和不可见的在内）数量大约是 $L_r = 10^7 L_v = 3.78 \times 10^{48}$ 尔格/秒。所以，超新星在它的

整个寿命中发射的总能量为 $E_r \geq 10^5 L_r = 3.78 \times 10^{53}$ 尔格/秒。如果超新星最初是十分普通的质量为 $M < 10^{34}$ 克的恒星，则 E_r/c^2 与它本身的 M 同量级。在超新星过程中，大块的物质湮灭了。此外，还可以设想，宇宙线是自超新星产生的。假定在每个星云中每一千年左右有一颗超新星出现，则在地球上所观测到的宇宙线强度将为 $\sigma = 2 \times 10^{-3}$ 尔格/厘米²·秒量级。观测值约为 $\sigma = 3 \times 10^{-3}$ 尔格/厘米²·秒作为存照，我们还提出这样的观点：超新星是表示从普通星到中子星的过渡；所谓中子星，就是星的最终阶段，它完全由挤得极紧的中子构成。

随后三十多年的观测研究证明巴德和茨维基的立此存照是正确的。最关键的证据是关于蟹状星云的研究结果。

蟹状星云是银河系中一个弥漫的气状星云。它的光度很大，差不多相当于 100 个太阳的光度。星云的能量从何而来？这个问题吸引着许多天文学家。

早在 1928 年就有人提出蟹状星云与 1054 年的超新星（见第三章）有关。后来又发现星云如今还在膨胀。根据膨胀速度可以算出星云从膨胀开始到现在大约用了 800 年。这个数字与 1054 年到现在的的时间非常相近，支持了二者有联系的观点。到底是怎样的联系呢？

以后，又研究蟹状星云当中的一颗恒星。这颗星也很奇怪，它的光度很大，约为太阳的 100 倍。但是在光谱中却看不到谱线。它与通常恒星的光谱全然不同。

到这时候，关于蟹状星云的研究似乎是积累的问题多，解决的问题少：1054 年超新星爆发留下了什么？星云辐射的能量是由什么提供的？中心的恒星到底属于哪一类？等等都是没有解决的问题。然而，问题越多，越尖锐，往往预示着

越接近解决。

关键的一步是进行了光变的观测。利用快速测光方法发现，蟹状星云中恒星的光度是变化的，它极有规则地发射周期的脉冲。周期 T 非常稳定，它是

$$T=0.03310615370 \text{ 秒,}$$

这是迄今为止天体现象中的最短周期。

脉冲星是一种致密天体

根据周期的稳定性可以断定它是由天体自转产生的。周期的短促又说明自转天体的空间尺度一定很小。此外，光度很大又表示它的质量不会太小。这样一个大质量而小体积的天体不正是那种引力坍缩后所产生的致密天体吗？

有了这个突破点，蟹状星云中的许多问题也就迎刃而解了。1)，这颗星是 1054 年超新星爆发过程中从普通恒星坍缩而来的。普通恒星的自转周期一般是一个月。由于角动量守恒，在坍缩过程中角速度将不断加快。所以在形成致密星之后，它的自转周期就可以短到几毫秒。2)，精确的测量发现，脉冲周期有极慢的变长趋势，这反映着致密星的自转在减慢，转动能量在逐渐减少。转动能的减少值正好等于通过星云及中心星辐射出去的能量。

这些满意的结果，最终支持了巴德、茨维基的观点：超新星是当普通星坍缩到致密星时发生的现象。

虽然蟹状星云中心星并不是第一个被发现的脉冲星，但

是脉冲星是一种中子星这个重要的结论却主要是根据对蟹状星云的研究而得到的。说来也很有趣，尽管几十年来不少人都观测过蟹状星云，但它的光变性质却一直没有被发现。这也不奇怪，因为人眼的视觉暂留效应使肉眼不能看到比 60 毫秒更短的周期或光强变化。蟹状星云脉冲星的 33 毫秒周期刚好被视觉暂留效应模糊掉了。如果蟹状星云脉冲星的周期稍微再长一点，那么，发现致密星的故事也许早结束了。大自然这样安排，似乎是有意要考验人们的智慧。

的确，中子星的发现是人的多方面智慧结晶。在物理理论上，它几乎用到了从经典到相对论的全部理论。在技术上涉及了天体测量，光谱分析及守时的工作，此外还有几百年前中国天文学家的忠实而详尽的记录。

今天在银河系中已经记录到三百余颗脉冲星。估计在银河系中，总共可能有 10^9 颗这种致密天体。

至此，我们证明了关于强引力场问题的第一个理论预言：一定存在着许多经坍缩而成的致密强场天体。

现在转向第二个问题：是否存在有限坍缩及无限坍缩两大类致密天体？

在介绍观测证实之前，我们再仔细介绍一下有关有限坍缩和无限坍缩的理论预言。

中子星的结构

有限坍缩可能形成白矮星、中子星，或者反常中子星、

层子星等等，名目繁多。这是因为目前对高密物态还知道得不很清楚，结论不完全一致。但它们有许多共同的方面。我们以中子星为代表来介绍它们。

一个质量约大于 1.4 个太阳质量的恒星，坍缩以后，压力非常大。在这种压力下，原子中的电子几乎全部与原子核中的质子产生俘获反应，放出中微子而使质子变成中子。因而整个星体几乎全由中子构成。这时它的密度比水约高万亿到百万亿倍（即约为 10^{12} — 10^{14} 克/厘米³）。一颗质量约等于太阳质量的中子星，其直径仅有数十公里左右。

因为所有恒星几乎都有自转，并且存在磁场。所以，当坍缩成中子星时，自转就会加快（这是由于角动量守恒）。磁场也会加强，因为原来的磁场分布在恒星内外很大的范围内，收缩之后，磁场就集中在很小的范围之中。从一颗太阳那样的星坍缩成中子星，它的磁场会增加上百亿倍。

这样，中子星往往是一颗具有强大磁场的高速自转的星体。一般说，磁极的方向和自转轴并不一致，正如地球的自

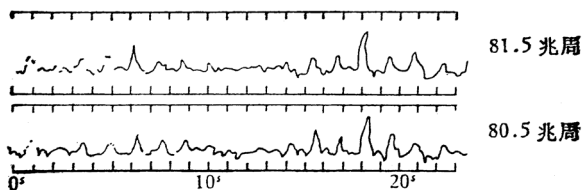


图 9-1 第一个被发现的脉冲星 CP1919 的脉冲式信号

转轴和地磁轴也不完全一致一样。在中子星的磁极附近，磁场特别强。电子在这个强磁场中运动就会放出很强的射电波。

射电波的发射方向主要集中在磁极的方向。当中子星的磁极指向地球时，地球就可以接收到它发射的电波。中子星每转动一周，我们就收到一次信号，形成脉冲式的射电波(图 9-1)。

这就是有限坍缩形成的天体的主要特征。

黑 洞

无限坍缩的结局是黑洞。

早在 1795 年，法国的天文学家、数学家和物理学家拉普拉斯就曾指出，在一个质量足够大的星球表面，光线是不可能逃出去的。按照牛顿引力理论，每个星体都有一定的逃逸速度。地球的逃逸速度就是所谓第二宇宙速度，大约是 11 公里/秒。对质量大而体积小的天体来说，这个逃逸速度可能大于光速。在这种情况下，星体发的光也不能发射到远处去。因而，在外部看来，它就是一个不发光的星体。可以称它为牛顿理论中的黑洞。不过，我们已经知道，牛顿的引力理论在原则上是不能处理光的问题，我们不能轻信这个结果。

广义相对论中依然存在无限引力坍缩的过程。设想一个人正站在发生坍缩的星体表面。他持有一盏强大的灯。在坍缩之前，引力场还很弱，他的灯光可以向四面八方发射出去。光线大体都沿着直线传播(图 9-2)。当恒星开始坍缩后，质量逐渐集中到越来越小的范围之内。当恒星的尺度减小时，它的表面引力就变得越来越大，引起光线弯曲。最初，只有那些在水平方向的光线才有明显弯曲，这些被弯曲的光线并

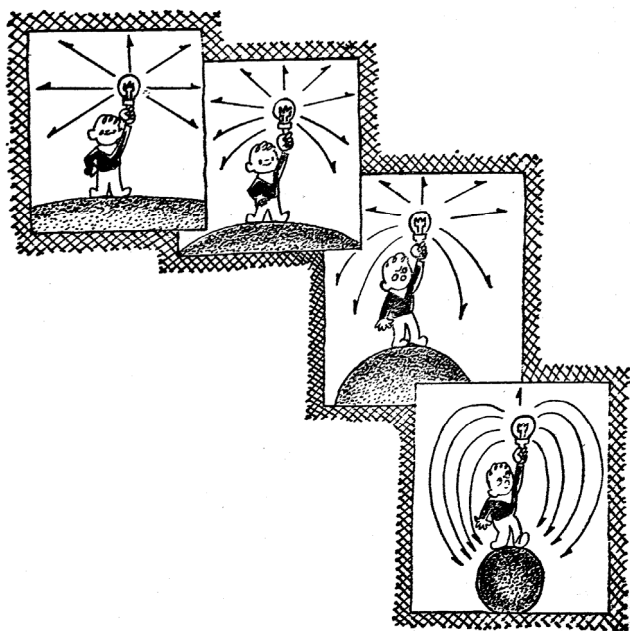


图 9-2

没有发射出星体，而是折回到星体表面。坍塌继续下去、灯的光线将越来越收拢。最后，所有的光线都不再能逃离星体表面。我们说，这是恒星缩小到它的“视界”之内了。落进视界之内的任何东西，都不可能再被外界的观测者看到。这就形成了黑洞。

“视界”就是黑洞的表面。质量为十个太阳质量的恒星，它的视界半径约为 30 公里。也就是说，当这种恒星坍塌到约 30 公里的大小时，就开始成为黑洞。

任何进入视界的東西，都不可能再出来。而且，当一颗

坍缩的星，收缩到自己的视界之内以后，就再也没有任何物理过程可以阻止住它进一步的坍缩。它必将无限地坍缩下去，最终变成一个点，在这个点上许多量都变成无限大，所以它叫做“奇点”。

在坍缩过程中，星体越来越暗，因为能逃出去的光越来越少。图 9-3 表示一颗星在坍缩过程中的亮度变化。从图上看到，恒星变暗的过程是极其快的。一颗质量为十个太阳质量的星体，在开始坍缩后约百分之一秒，就几乎完全看不见了。

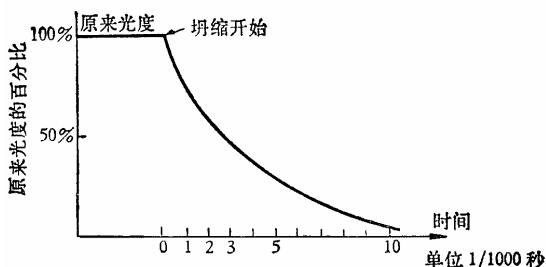


图 9-3 坍缩星的亮度变化

黑洞是不毛的

有限坍缩能形成种种复杂结构的天体，而无限坍缩所形成的黑洞却是一种极简单的东西。甚至它比任何我们看到过的物体都简单。因为，任何物体都是由复杂的原子、分子构成的。而对黑洞来说，我们根本不需要也不可能谈它的分子结构。因为，无论黑洞由什么东西坍缩而成，一旦它们进入

了视界，我们就不必去管也不能管他们的细节了。因为它们不再能给我们任何有关细节的信息。因之，本来不同质的东西形成的黑洞却都是一样的。

黑洞究竟简单到什么程度呢？有一个定理，这就是，黑洞只有三点性质，质量，电荷和角动量。只要这三个参量定了，黑洞的全部性质也就确定了，此外黑洞就没有任何其它的性质。在整个宇宙中，除了黑洞以外，可能找不到任何一个物体，只要用三个物理量就能标志它的全部性质。我们不可能赋予黑洞任何其他的性质，就如同一块不毛之地一样，因此，有人把这个定理称作为“黑洞是不毛的”。

按这个定理，宇宙间只有很少几种类型的黑洞，它们全都开列在下面的表中。

名 称	类 型	特 性
史瓦西黑洞	只有质量 角动量及电荷为零	球对称的最简单的黑洞
RN 黑洞	有质量及电荷 角动量为零	带电荷的球对称性黑洞
克尔黑洞	有质量及角动量 电荷为零	轴对称的旋转黑洞
KN 黑洞	质量、电荷、角动量 均不为零	轴对称的旋转的带电的黑洞、最复杂的黑洞

在这里要强调一点，各种黑洞都不可能具有磁极方向与自转轴方向不同的磁场。前面介绍的中子星的那种斜向磁场（图 9-1）结构，在黑洞中是不可能存在的。

临界质量

前面一再说过，质量小的天体将发生有限坍缩形成中子星等，而质量大的天体则将经过无限坍缩形成黑洞。这个质量界限叫做临界质量。

根据广义相对论等一般理论，可以求出，这个临界质量约是 3.2 个太阳的质量。

总结一下有关的结果：

1. 质量小于 3.2 太阳质量的星体，将形成中子星等，它可以具有斜向的磁场。

2. 质量大于 3.2 太阳质量的星体，将形成黑洞，它不可能具有斜向的磁场。

这就是有关坍缩结局的最主要理论结论。

如何检验这些预言呢？

X 射线双星

首先要谈一下黑洞的观测。黑洞本身是不能发出光来的，但是，当外界物质落到黑洞周围时，由于受非常强的引力场的作用，这些物质有可能发生很强的光，它的波长应当在 X 射线波段，甚至在 γ 射线波段。

当然，孤立在天空中的黑洞，很少有外界物质落到黑洞中去，很难观测它们。但是，天体中有许多双星，它们是由

两颗星组成的体系，相互围绕着旋转。这种体系在一定的演化阶段时，要发生强的物质交流，即一颗星的物质要落到另一颗星上去（图 9-4）。这样，如果另一颗星是黑洞，我们就有可能看到它。因为这种体系应该是一个发射 X 射线的双星体系。

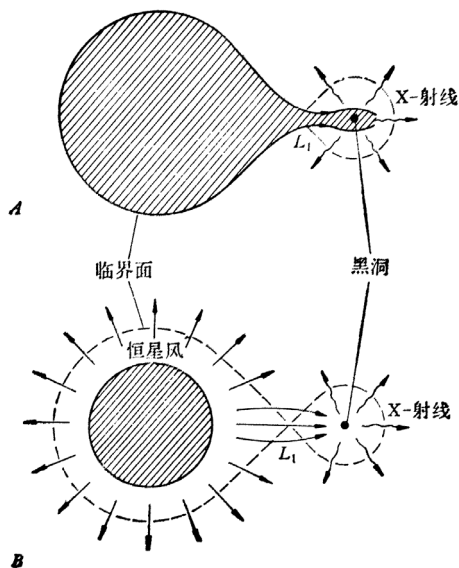


图 9-4 X 射线密近双星
 (A) 一个恒星的物质充满了临界面
 (B) 由恒星风引起的物质交流

七十年代以来，利用人造卫星或者火箭的大气外观测，发现了一批 X 射线双星。按照 X 射线强度变化的特点，可以分成两大类。

1. X 射线强度有脉冲式的变化，脉冲周期非常稳定（图

9-5)。

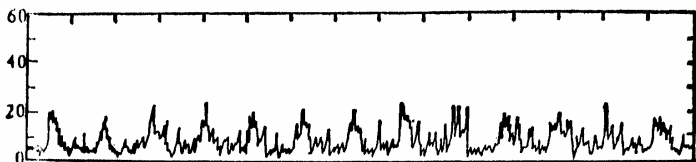


图 9-5 武仙座 X-1 的 X 射线强度变化

2. X 射线强度有爆发式变化。它由许多不规则的强度变化构成，没有任何周期性（图 9-6）。

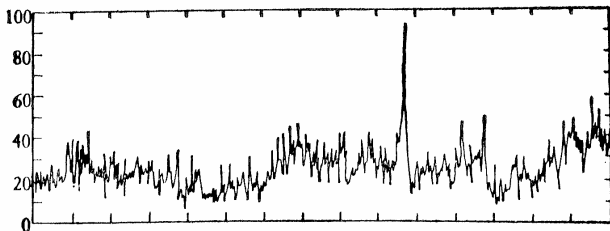


图 9-6 天鹤座 X-1 的 X 射线强度变化

由射电脉冲星的经验我们知道，脉冲式结构是由具有斜磁场的中子星的发射引起的。黑洞不可能产生有稳定周期的脉冲式强度变化。因为它不可能有斜向磁场。

这样，我们就有了一种可以检验上述理论预言的观测方法。因为，上述理论相当于说：

1. 具有脉冲式结构的 X 射线源，其质量应当小于 3.2 个太阳质量。

2. 质量大于 3.2 个太阳质量的 X 射线源不可能有脉冲式的强度变化。

这两条是可以通过观测来检验的，目前的观测结果列在下面表里

X 射线双星名称	X 射线源的质量 (以太阳质量为单位)	类 型
半人马座 X-3	0.7 ± 0.14	周期型
武仙座 X-1	1.3 ± 0.21	周期型
天鹅座 X-1	>1	爆发型
圆规座 X-1	~ 4	爆发型

由此可见，理论预言与观测结果很好地符合。强引力场物理的第二个预言，可以说也比较成功地通过了观测检验的关。

第十章 引力波的证实

爱因斯坦的预言

这一章讨论的问题，在牛顿的引力理论中是完全没有的。在牛顿体系中，完全没有引力波的地位。引力波是爱因斯坦场方程与经典引力理论的一个重要的质的区别。

什么是引力波？

我们可以作一个类比。图 10-1 中的 (A) 图表示两个带有电荷的物体构成的体系。当两个电荷发生振荡时，会发射出电磁波，这是电磁学的最基本结论之一。图 10-1 中的

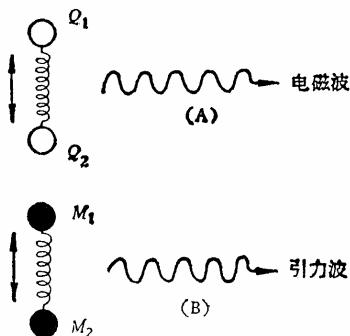


图 10-1

(A) 振荡的两点电荷辐射电磁波

(B) 两个质点发生振荡时，将辐射引力波

(B)图则是两个具有一定质量的物体构成的体系。按照广义相对论，这两个物体振荡时，就可能发射出引力波。

引力波的传播速度也是光速。并且，它携带着一定的能量。所以，它是一种实在的波。可以发射引力波，也可以接收引力

波。

这种种特点都与电磁波非常相似。因此，尽管在牛顿的理论中完全没有引力波的概念，但是广义相对论的这个预言却很容易被接受。这远不象黑洞的概念，虽然在经典力学中已经有黑洞式的结果，但广义相对论的黑洞概念仍然很不容易被接受。

尽管人们容易承认引力波的预言，但是，它的观测检验却异常困难。爱因斯坦根据广义相对论给出的其它的预言，都在不太长的时间里被观测证实了。唯独引力波的预言，经过了六十年，直到1978年底才取得了第一个定量的观测证据。

原因在于引力波实在太弱了。

宇宙中的引力波源

许多加速运动的物体都可以发射引力波。一个跳跃的小球，挥舞双臂的人，月亮围绕地球的运动……都能发射引力波。但都太弱了。如果用一根长为20米，直径为1.6米，重500吨的圆棒，让棒高速转动，它将发射引力波。但是，即使圆棒的转速达到它即将断裂的极限速度（约为每秒28转），它所发射的引力波功率也不过只有 2.2×10^{-19} 瓦，想要探测出如此微弱的波，即使利用今天最先进的技术也是不可能的。

宇宙间大质量天体的运动，是较强的引力波源。例如，双星体系就是一种引力波源，下表给出一些双星的引力波辐射的强度。

双星名	轨道周期	引力波强度 (尔格/秒)	到达地球表面的能流 (尔格/厘米 ² ·秒)
仙后座 η	480 年	5.6×10^{10}	1.4×10^{-29}
牧夫座 ζ	150 年	3.6×10^{12}	6.7×10^{-28}
天狼星	50 年	1.1×10^{15}	1.3×10^{-24}
天琴座 β	13 年	4.9×10^{28}	3.8×10^{-15}
狮子座 UV	14 小时	1.8×10^{31}	3.5×10^{-12}

可见尽管双星系统的发射强度比 500 吨的圆棒要高得多，但是，比起电磁波来仍是不足道的。例如，太阳的电磁波辐射强度高达 4×10^{33} 尔格/秒。比上表中任何一个都大得多。至于引力波到达地球时的能流那就更小了。

韦伯的实验

第一个企图接收宇宙中引力波辐射的是美国的韦伯。他设计和安装了能够接收引力波信号的天线。

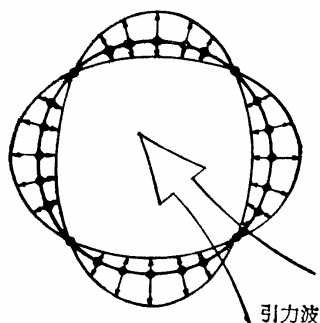


图 10-2 在引力波作用下，圆形的物体变成了椭圆形，来回地振荡

接收引力波的方式与接收电磁波的方式十分不同。接收电磁波很容易。人的眼睛、照相底板、收音机等等都是电磁波接收器。它们的基本道理都一样。即在电磁波作用下使电子发生运动，由电子的运动检测电磁波。

引力波的特点是能使物体发生扭曲和变形。如图 10-2 中一个圆形物体，当有引力波正面射到它的圆面时，它会由圆形变成椭圆形，来回地振荡。

韦伯的引力波天线是个铝制的圆柱体，重约 3.5 吨。在圆柱体的表面装有压电晶体。可以测量圆柱体极微小的形变。当引力波作用到天线时，就可以通过圆柱形的形变，把它们检测出来（图 10-3）。

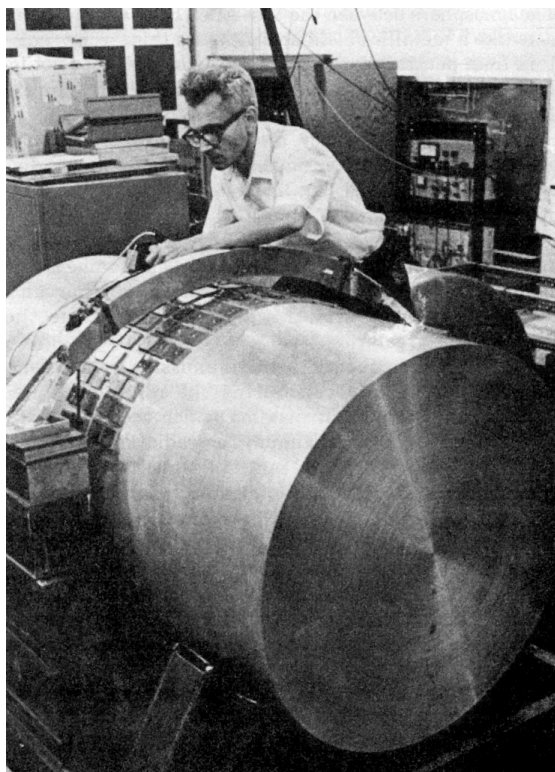


图 10-3 韦伯和他的引力波探测器

这个天线的原理非常简单。但实际制作起来却很困难。因为许多因素都会引起柱体的形变，只有排除掉外界“噪声”引起的形变，才能探测到引力波。

1969年韦伯声称，他的天线在1968年12月30日到1969年3月21日的81天观测中，收到了两次引力波的信号。

韦伯的实验结果公布后，引起了物理界广泛的注意。许多国家出现了引力波检测实验小组，企图重复他的实验。不过，韦伯的结果也引起很多疑问。

首先，如果韦伯收到的是引力波信号，而且如韦伯自己宣称的，这些信号来自银河系中心，那么，银河系中心必定有十分激烈的事件，可是，核对当时的天文观测资料，却没有看到任何异常的记录。

其次，如果引力波到达地球时的能量有韦伯宣布的那样大，竟能达到 10^{10} 尔格/厘米²·秒，那么银河系中每年就要消耗 10^4 个太阳质量，才能产生如此强的引力波。如果这样，我们银河系的寿命只能有 10^7 年。但天文观测证明，银河系已经约有 10^{10} 年的历史了。这又是一个矛盾。

更重要的是，其它各国的实验小组都没有重复出韦伯的结果。所以韦伯的结果并没有得到公认。

现在一般认为：目前实验室中引力波天线的灵敏度还太低，不足以测到宇宙间的引力波信号，设法提高天线的灵敏度，是各个引力波实验小组目前正在做的工作。

双星引力辐射阻尼

天体物理学家采取另一种途径来检验引力波理论。

前面说过，双星是一种典型的引力辐射源。引力辐射能把双星的能量慢慢带走，使整个双星体系的能量变小。结果使双星的周期越来越短。这个性质叫做引力辐射阻尼。

只要我们能证实引力辐射阻尼所引起的双星周期变短确实存在。尽管没有直接测到引力波，也是对引力辐射理论的一种支持。这就是天体物理学家采用的方法。

不过，这种方法同样不容易真正做到。因为，能引起双星周期变化的因素太多了。例如，两星之间的质量交流（图9-4），就能引起双星的周期变化。又如，两星体之间的潮汐作用，也会引起双星周期变化。根据地学，古生物学等方面的分析，在数亿年前月亮绕地球一周的时间同现在并不一样，这就是由于地球和月亮之间的潮汐作用引起的。此外，双星的辐射或者星风（星体上吹出的粒子流）都会使双星体系的质量减少，这也会引起周期的变化。

总之，引起双星周期变化的因素可以分成两类。一种是引力辐射阻尼，是相对论的效应。另一类是潮汐等非相对论因素引起的。一个适于检验引力辐射阻尼理论的双星体系应当是：

相对论因素 > 非相对论因素

按照广义相对论：引力辐射阻尼反比于双星体系中两星

之间的距离 a 的五次方（即 a^5 ）。所以为了观测相对论因素，应当选用距离较小的双星。然而，另一方面潮汐的作用比例于

$$\left(\frac{R}{a}\right)^3,$$

其中 R 是星体的半径，可见，要使非相对论因素减弱，又必须要求两星间的距离大。

这两方面的要求是矛盾的。以致由太阳那样的普通恒星所组成的双星体系，根本不可能满足全部条件。

由上式可以看到，只有 R 足够小的星，才可能使非相对论因素大大减弱，而使相对论因素明显超过非相对论因素。

所以，只有由两颗致密星（ R 很小）组成的双星体系，才有可能是一个良好的检验引力波理论的天空实验室。

然而，直到 1974 年以前，没有发现一个双星，是由两个致密星组成的。

PSR1913+16——一个理想的 相对论天空实验室

1974 年底，美国射电天文学家胡尔斯及泰勒发现了一颗射电脉冲星。名字叫做 PSR1913+16^①。这颗星与众不同。在当时，所有发现的射电脉冲星都是单星，唯独 PSR1913+16 肯

① PSR 是射电脉冲星的意思，1913 是赤经，+16 是赤纬。

定是双星中的一个成员。

这颗星的脉冲周期很短，只有 59 毫秒。在所有已发现的射电脉冲星中，它的周期仅次于蟹状星云脉冲星（见第九章），居第二位。此外，双星系统的周期也很短，不到 8 小时，但偏心率很大。这些特征集中在一起是十分罕见的事例。它引起了很多人的注意。

这个双星系统，我们只能测到其中的 PSR1913+16，另外一颗到底是什么星呢？可以通过双星的演化来作一些推测。

一个双星系统，大体按照图（10-4）所表示的几个阶段进行演化。其中第一个阶段是两个普通的恒星。第二阶段是，其中质量较大的一个开始膨胀，不断有物质从这颗星流到质量较小的星上去。第三阶段是质量较大的星发生超新星爆发变成一颗致密星。第四阶段是原来质量较小的星开始膨胀，不断有物质流到致密星上，这时的双星体系，应是一个 X 射线双星。第五阶段，原来质量较小的星也发生超新星爆发而形成致密星，这就到了双致密星阶段。

当发生超新星爆发的时候，要释放出大量的能量，常常会使整个双星体系解体，所以，在双星中有致密星的情况较少。形成双致密星要经过两次的超新星爆发，经过两次爆发居然还不发生解体，自然是非常稀罕的事。所以双致密星体系是一种很稀有的品种。

不过从 PSR1913+16 的性质来看，那颗看不到的星，大概也是一颗致密星。因为，PSR1913+16 不发射 X 射线，所

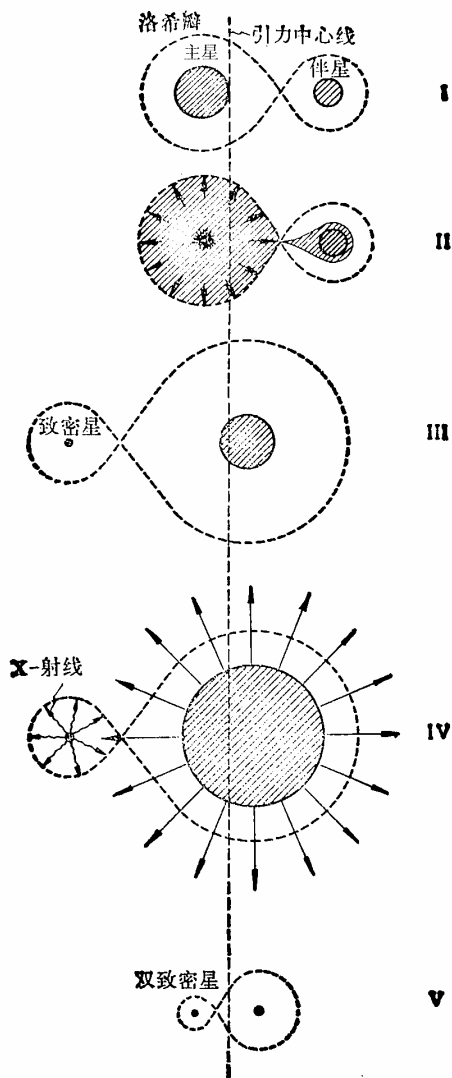


图 10-4 密近双星演化的几个主要阶段

以它不可能处于第四阶段。此外，PSR1913+16 的双星距离很小，也不可能是处在第三阶段的双星（即另一颗是非致密星）。第一及第二阶段根本不含任何致密星，所以更不可能是 PSR1913+16 的现状。这样就只留下了一种可能，即 PSR1913+16 是个双致密星体系。

PSR1913+16 是当时知道的唯一双致密星体系。它也是目前找到的唯一适用于检验相对论引力波理论的天空实验室。

引力辐射阻尼的证实

按照广义相对论，双致密星体系周期变短主要是由引力辐射阻尼引起的。因此，只要我们能观测到 PSR1913+16 存在这种周期变短现象，就能对理论的成败给出不含糊的证据。

泰勒等人对 PSR1913+16 进行了四年多的监视性观测。测量次数超过一千次。使许多观测参数的精度达到百亿分之几。他们确实发现了这颗双星的周期在稳定地变短。图 10-5 是它的转动位相与时间的关系图。如果没有周期变短，则应是一条水平线。但实际测量结果由图中的一些圆点表示，图中的曲线则是按照引力辐射阻尼理论计算出来的结果。

理论与观测之间的符合是一目了然的。

引力辐射阻尼理论的定量证实，意义十分重大。它把引力物理推进了一大步。再一次令人信服地证明了广义相对论

的正确性。

这个成功象中子星的发现一样，也是多方面工作的巧妙结合。在理论工作上它涉及广义相对论，双星演化理论、各种周期变化的计算。

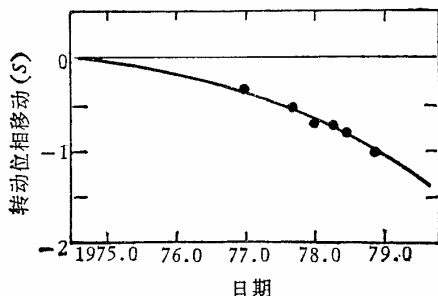


图 10-5 PSR1913+16 的转动
位相与时间的关系

而在实测方面，则用到了当今口径最大的（直径 300 米）射电望远镜，用到了精密的守时技术以及 X 射线和光学的观测。

如果说十九世纪牛顿引力理论最出色的观测证实就是海王星的发现。那么，二十世纪相对论引力理论最出色的观测证实可能就是这一次引力辐射阻尼的监测了。

第十一章 从牛顿宇宙 到宇宙的膨胀

从有限有边到无限无边

这一章我们转到最后一个也是最大的一个物理问题，即宇宙学。在从经典力学到相对论的发展中，人们对宇宙物理结构的认识有些什么变化呢？

在伽利略、牛顿之前，传统的宇宙结构可以由图（11-1）来表示。它是一个有限有边的世界。宇宙的最外层是由恒星天构成。恒星天是宇宙的边界。在它之外，就没有空间了。在哥白尼的太阳中心说中，仍然保持着有限有边的结构图。

在牛顿之后，开始普遍采用了无限无边的观点。即认为宇宙的体积是无限的，也没有空间边界。宇宙空间是一个三维欧几里德几何无限空间，即在上下，左右，前后这些方向上，都可以一直走下去延伸到无限远。

在这牛顿式的无限大的箱子中，到处布满着天体，这些天体也有无限多。无论我们向哪个方向走去，总会不断地看到这些天体。

总之，宇宙空间的无限性同牛顿理论的普适性一样，在



图 11-1 托勒密的宇宙结构图

经典物理学中被认为是已经公认的事。

的确，无限宇宙的自然哲学在冲破中世纪宗教宇宙学精神枷锁的斗争中，起过非凡的作用。以哥白尼—伽利略—牛顿为代表的科学革命，彻底推翻了以地球为宇宙中心的观念，它永远值得人们怀着崇敬的心情加以回顾。

但是，每一次科学上的重要成功，由于它的巨大声誉往往会使后来的人不去认真思索或者不愿认真思索由这些成功所带来的新东西中，哪一些是真正被证明了真理。哪些还只是设想或假设。其实，宇宙空间是三维无限的欧几里德空间以及牛顿理论可以在宇宙学上适用，就是属于后一类的两个观念。尽管人们已经习惯于接受它们，然而它们却不是属于已经弄明白了的。

牛顿无限宇宙困难

爱因斯坦在发展相对论宇宙学的时候，第一步工作就是指出牛顿的无限宇宙观念中的矛盾和不自洽。

牛顿力学在讨论一个有限力学体系的运动时，总是假定可以选取一个参考系，使引力势 ϕ 在无限远的地方成为常数。这个条件对于解决局部天体的运动问题，有时是相当关键的。但是，如果接受牛顿的无限宇宙图象，认为物质均匀布满在整个无限的空间之中，那么，根据牛顿力学又会得到无限远处引力势 ϕ 不可能为常数的结论，这就是一个矛盾。如果，为了要保证无限远处引力势 ϕ 为常数，我们暂且放弃物质均

匀布满在整个无限空间内的假设，并认为物质主要集中在我们周围有限的范围，那么无限远处的 ρ 虽然是常数，但物质的宇宙却仍然是有限的。

所以，牛顿力学在原则上不能用来描写（更谈不上精确）无限宇宙这一物理体系的动力学。要么应当修改牛顿的理论，要么应当修改无限空间的观念，或者两者都要加以修改。这就是爱因斯坦在宇宙学面前提出的“简单”而又根本的问题。

“白痴”的问题

爱因斯坦提出的问题究竟有没有意义呢？

有一种看法，认为宇宙是那样至大无边，那样复杂，探讨宇宙作为一个物理体系的动力学，恐怕是不会得到有意义的结果的！

然而，这种“解决”办法不能使爱因斯坦感到丝毫的满意。他写道：“要我在这个原则性任务上放弃那么多，我是感到沉重的。除非一切为求满意的理解所作的努力都被证明是徒劳无益时，我才会下那种决心”^①。事实上爱因斯坦不但从来没有下那种决心，而且总是抱定了相反的态度。他总是坚信宇宙必定有它普遍的有效性。他总是怀着“赞赏和敬仰的感情，但这种感情的对象不是人，而是我们出生于其中的自

^① 《爱因斯坦文集》，第二卷，第 357 页。

然界的神秘的和谐”^①。

当爱因斯坦思考并企图解决这个问题的时候，他曾经给德西特写过一封信，说道：“宇宙究竟是无限伸展的呢，还是有限封闭的呢？海涅在一首诗中曾给出过一个答案：‘一个白痴才期望有一个回答’”。的确，有许多令物理学家和天文学家醉心的问题，就是让最富于幻想力的诗人看来，也觉得是近乎荒诞的事。似乎只有白痴才愿意在这些问题上枉费精力。其实，这是不对的，在自然科学面前，可以说没有一个有关自然界的问题是不值得去研究的。如今世界上太多的可能不是“白痴”式的问题，而却是白痴式的答案。所谓“没有意义”者本身，往往就是这样一类的答案。

爱因斯坦觉得有必要来研究这个问题，还有另一个重要原因。这就是，宇宙学问题是当时唯一知道的强引力场问题。如果按牛顿的经典观点，天体大体均匀地分布在空间里，密度是 ρ 。那么，在直径为 R 的球体中总质量 M ，约为 ρR^3 ，因此它的

$$\frac{GM}{c^2 R} \simeq \frac{G\rho}{c^2} R^2$$

可见，当 R 很大时，这个值必定达到1。所以，宇宙学问题在原则上是不能用牛顿理论来处理的。在这个问题上，广义相对论不是对牛顿理论的一个小修正（象在后牛顿问题中），而将带来根本性的不同。

^① 《爱因斯坦文集》，第一卷，第277页。

有限无边的宇宙

最根本的不同点是，广义相对论认为不应当先验地假定宇宙空间必定是三维无限的欧几里得空间。因为宇宙空间的结构并不是与宇宙间的物质运动无关的。

爱因斯坦给出的第一个宇宙模型，既不是亚里士多德的有限有边体系，也不是牛顿的无限无边体系，而是一个有限无边的体系。所谓有限，指的是空间体积有限。所谓无边，指的是这个三维空间并不是一个更大的三维空间中的一部分，它已经包括了全部空间。

实际上，在宇宙学的历史上，有限无边的概念并不是在爱因斯坦的宇宙模型中才第一次遇到的。在第一章中已经讲过，亚里士多德认为大地并不是平坦无边的，而是一个球形。实质上，这就是用有限无边的球面结构代替了无限无边的平面结构。球面就是一个二维的有限无边的体系。沿着球面走，是总也遇不到边的。但是，球面的总面积却是有限的。

只要把亚里士多德的二维有限无边概念推广到三维，就可以得到爱因斯坦的三维有限无边体系。这两个概念的确有许多方面可以进行类比。例如，球面是一个二维的弯曲面，有限无边的三维空间也是一个弯曲空间。

所谓“弯曲”，实质的含义就是偏离欧几里得几何。例如，对于球面（二维）来说，我们做如下的测量。如图 11-2，从 A 点出发沿着大圆走到 B 。 A 到 B 的长度叫做 R 。然后以 A

为中心，以 R 为半径在球面上做一圆（一维）。这个圆的长度为 l 。在欧几里得几何中

$$\frac{l}{R} = 2\pi,$$

但是，在球面的情况

$$\frac{l}{R} < 2\pi,$$

所以球面是一个弯曲面，不是平面几何中所讨论的平面。

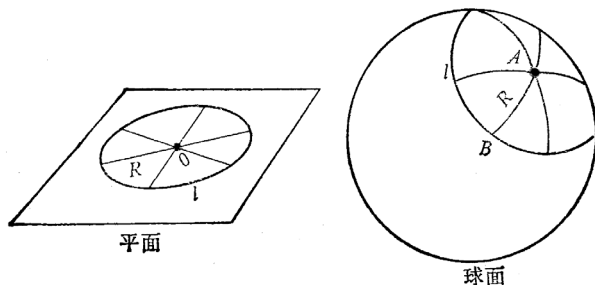


图 11-2 球面是个弯曲面，球面上的几何学不同于平面上的几何学（欧几里得几何）

类似，把二维的球面推广到有限无边的三维弯曲空间，我们作如下测量：从某个 A 点出发走到 B ， A 到 B 的长度叫做 R 。然后，把前面例子中一维的圆推广为二维的球面，以 A 为心、 R 为半径做一个球面。这个球面的面积为 S 。在欧几里得几何中

$$\frac{S}{R^2} = 4\pi,$$

而在有限无边的爱因斯坦模型中，则有

$$\frac{S}{R^2} < 4\pi,$$

在爱因斯坦的模型中，牛顿体系中的内在矛盾已经没有了。当然，没有内在矛盾只是理论的正确性的一个必要条件，而不是充分条件。重要的检验还是理论与观测之间的对比。

宇宙的膨胀

在爱因斯坦的第一个模型之后，陆续又有其它人提出了一些模型。其中，弗里德曼和勒梅特前后得到了膨胀的宇宙模型。所谓膨胀是指宇宙空间的尺度随时间而不断地在增大。如果我们仍用二维的有限无边球面来类比三维的有限无边体系，那么，一个膨胀的二维球，就如图 11-3 所示那样地运动。

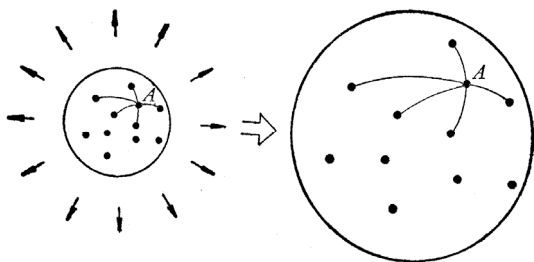


图 11-3 在一个膨胀的球表面，任何两个圆点之间的距离都要越变越大

图中的小圆点表示球面上的物质。可见当球面膨胀时，小圆点越来越稀。任何两个小圆点之间的距离都要越来越大。如果我们想象一个观测者站在其中的一个小圆点上，他就会发现，所有其它小圆点都在远离他而去。而且，与他距离近

的小圆点离去的慢一些，与他距离远的圆点离去的快一些。距离越大，相互远离的速度也越大。

1929年美国天文学家哈勃发现，河外星系普遍都有红移现象。红移就是光谱线的波长变长了（或频率降低了），如果原来某种原子发射的一条谱线的波长为 λ_0 ，那么，从河外星系来的这种谱线波长 λ 总要比 λ_0 大。通常用 $z = \frac{\lambda - \lambda_0}{\lambda_0}$ 来表示

红移的大小。 z 称为红移量。

从这种红移的特征看，它可能是由多普勒效应引起的。所谓多普勒效应是指当光源相对于观测者有运动时，观测者收到的谱线波长与光源静止时发射的谱线的波长有差别。如图 11-4，一个光源 A 向着观测者运动，另一个光源 B 远离观测者运动。如果两个光源 A 和 B 本身发射相同波长的光，波

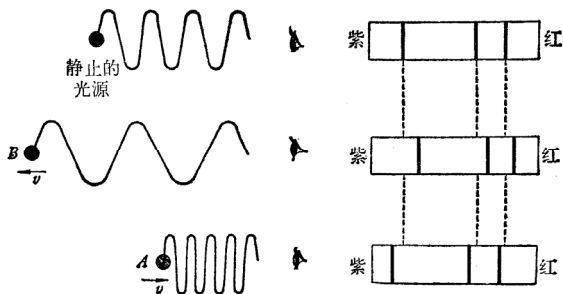


图 11-4 多普勒效应

长是 λ_0 ，那么观测者收到的光，波长都不相同。他看到 A 光源的波长 λ_A 要比 λ_0 小，而 B 光源的波长 λ_B 要比 λ_0 大。通常

称 A 光源的波长紫移了，而 B 光源的波长红移了。相对速度越大，红移或紫移越厉害。

采用多普勒效应的机制来解释河外星系的红移，那就表示河外星系正在远离我们。哈勃还发现，河外星系红移量的大小同其距离有关。距离越近的星系红移量越小，距离越远

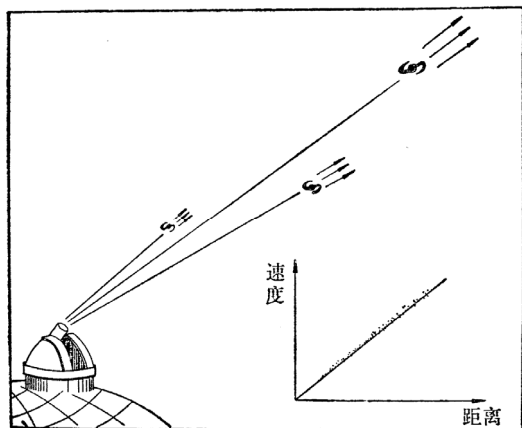


图 11-5 距离越远的星系，远离我们的速度也越大

的星系红移量越大(见图 11-5)。这个性质通常叫做哈勃关系。它是表示越远的星系远离我们的速度也越大。这一切都符合膨胀宇宙的预言。

哈勃研究的星系，红移量还都比较小。都在 $z < 0.003$ 的范围。哈勃之后的几十年来，已经发现了许多大红移的星系。在目前已知星系中最大红移已经达到 $z \sim 1$ 。在这样大的范围中哈勃关系仍然成立。至今观测的结果都符合膨胀模型的预言。

宇宙膨胀观念彻底改变了宇宙学上一种传统的观念，就是认为在“大”尺度上的天体，应当处在静态。换句话说，虽然太阳，银河等“小”范围中的天体是有运动的。但是在一个更“大”的尺度上看，天体系统的平均速度应当是零。形成这种观念是有客观根源的，因为我们肉眼常见的天空景象，除了东升西落之外，几乎看不见其它的变化。爱因斯坦也没有摆脱这种传统观念的束缚。尽管按照他的引力场方程只能得到运动的解的。但是由于他觉得大尺度的运动是不能接受的，所以他甚至不惜修改引力场方程，以给出一个静态模型。红移现象发现之后，他对他自己原来的做法深表后悔，本来宇宙膨胀是他的广义相对论的一个自然结果，可是他却放弃了它们。后来爱因斯坦曾说，这是他“一生中最大的错事”。

大爆炸宇宙学

如果宇宙是膨胀的。那么，昨天的宇宙应该比今天的宇宙更小，物质也更密集一些。所以，在宇宙的早期，可能是一种非常密集的状态。那时候物质密度非常之高，完全不同于我们今天看到的星空世界。

沿着这条线索来研究宇宙中物性的演化历史，称为大爆炸宇宙学。目前比较盛行的是热大爆炸宇宙学。

这一派的主要观点是，我们的宇宙曾有过一段从密到稀，从热到冷的演化历史。具体地说，大约在一百多亿年前，开始发生大爆炸过程。当时，宇宙间物质密度比原子核的密度

还要大，温度也极高，达到万亿度以上。爆炸初期宇宙间的物质形式是各种各样的粒子，例如中子，质子，电子，光子，中微子， μ 子， π 介子，超子等等。这些粒子不断地碰撞，并相互转化。整个宇宙基本上处于热力学平衡之中。例如，电子与正电子互相碰撞湮灭成一对 γ 光子，同样 γ 光子相互作用而产生一对电子和正电子。这些过程在一秒钟内可能发生几十亿亿次，但每一种反应都与相反的反应达到平衡。这是我们宇宙的极早期。

这个极早期是非常短暂的，也许不到一分钟。由于整个体系在不断地膨胀，温度迅速下降，宇宙演化进入了下一阶段。在这个阶段中，中子开始失去自由存在的条件，中子要么发生衰变，要么它与质子结合成重氢、氦等元素。宇宙中的化学元素就是在这一时期才开始形成的。这一阶段的时间大约是30分钟，温度在一亿度左右。

在高温阶段的几十万年的时间里，宇宙中的热辐射是十分强的。热辐射和其它粒子处于平衡状态。过了这个阶段之后，物质密度降低，特别是温度降低到了几千度以下时，热辐射与其它粒子的作用才大大降低，热辐射大体不再受物质的影响，可以自由地传播。这种自由的热辐射，随着宇宙膨胀温度也逐渐降低。但是，还保持着原来的热辐射的特点^①。

热辐射与其它物质间的相互作用减弱之后。到现在，大

① 在一定的温度，如果处于热平衡，以辐射强度按其频率有一定的分布，具有这种频率分布特性的辐射，叫做热辐射。

约已有一百多亿年了。在宇宙的演化史中，这个阶段最长，在这个阶段开始时，宇宙中主要是气状物质。以后逐渐发展出星云，再进一步收缩成星系，星团，恒星，行星……直到形成我们今天看到的星空世界。

下面的图表示热大爆炸宇宙学所描述的宇宙的几个主要演化阶段。

有哪些事实支持热大爆炸宇宙学呢？

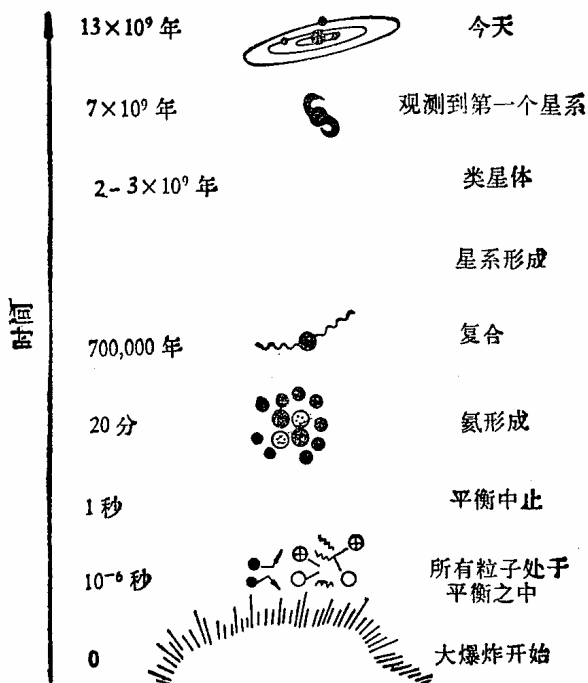


图 11-6 热大爆炸宇宙学所描述的宇宙演化的几个主要阶段

天体的年龄

第一个事实是天体的年龄。因为大爆炸宇宙学主张，在一百多亿年之前，宇宙间根本没有任何星体。所以，所有星体的年龄都应当小于一百多亿年。观测支持这一点。

测定天体年龄的一种方法是利用放射性同位素。例如，铀有两种同位素， ^{235}U 及 ^{238}U 。它们都具有放射性的，但半衰期不同，前者为 7 亿年，后者为 45 亿年。由于 ^{235}U 衰变得快，所以随着时间的推移， ^{235}U 的含量就要越来越比 ^{238}U 少。根据 ^{235}U 与 ^{238}U 的含量比值，我们就可以估算天体的年龄。用这种放射性年代学方法得到太阳系的年龄大约是 45 亿年。而太阳系中的铀元素大约是在 50 亿年到 110 亿年之前产生的。

另一种测定年龄的方法，是利用球状星团。球状星团是由上百万颗恒星组成的体系。我们可以测量其中各个恒星的辐射强度和它的表面温度。用这些数据画一张图，图中横坐标是表面温度，纵坐标是辐射强度（又称光度）。把球状星团中的各个恒星点标在图上，就会发现，对于不同的球状星团，有不同的分布（见图 11-7），根据恒星演化的理论，不同的形状实质上表示不同的年龄。图 11-7 中的顺序就是按年龄增长来排的。利用这些图可以测定球状星团的年龄。最老的球状星团大约都在 90 亿年到 150 亿年之间。

所有这些结果都不违背大爆炸宇宙学的要求。

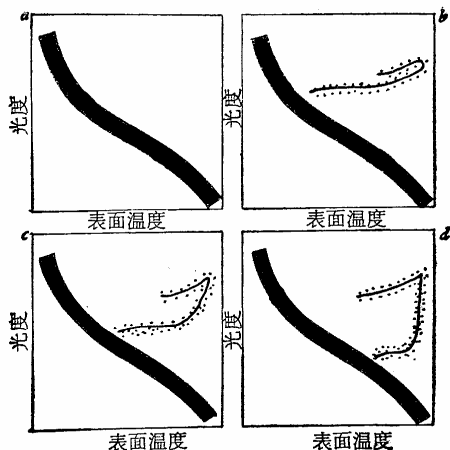


图 11-7 球状星团的赫罗图

微波背景辐射

大爆炸理论还预言宇宙中应当找到早期留下来的热辐射。它是宇宙温度的标志。

1965 年美国贝尔电话公司的彭齐斯和威尔逊从事装置人造卫星通讯地面站的工作。他们发现总有原因不明而且消除不掉的“噪声”干扰他们的接收器。当时他们的工作波长是 7.35 厘米。后来，这个消息被普林斯顿大学的天体物理学家得知，他们判断，这就是热大爆炸理论所预言的宇宙辐射。因为这种辐射弥漫在整个空间中，所以形成不可能消除的“噪声”。

近十几年来，对这种辐射反复进行测量，的确证明它们是相当均匀地分布在宇宙空间中的一种热辐射，其温度大致

为绝对温度三度。

这是对大爆炸宇宙学的又一个支持。

氦 的 丰 度

天然的化学元素有九十多种，它们在自然界中的含量是很不均等的。从天体的尺度看，氢与氦是最丰富的元素，二者之和占总质量的 99%，其余的元素仅约占 1%。此外，对宇宙学特别有意义的是，在许多不同种类的天体上，氢含量与氦含量之比竟是大体相同的，即按质量二者之比约为 3 比 1。下表给出一些星系氦含量（称为氦的丰度）的数值。

星 系	氦的丰度
银 河 系	0.29
小 麦 云	0.25
大 麦 云	0.29
M 33	0.34
NGC 6822	0.27
NGC 4449	0.28
NGC 5461	0.28
NGC 5471	0.28
NGC 7679	0.29

氦丰度问题在天文学里长期得不到解释。一方面不能解释为什么不同天体具有相同的氦丰度，另一方面也不能解释为什么其值是 $\sim 30\%$ 。

大爆炸宇宙学可以定量地解释氦丰度问题。因为，在宇宙早期高温的几十分钟里，生成氦元素的效率很高。根据宇

宙膨胀速度的测量，以及热辐射温度的测量，我们可以计算出宇宙早期产生的氦丰度。这个数值恰好是 30%。这就是说，今天我们看到不同天体上都约有 30% 的氦，这可能正是一百多亿年前的一次事件所留下来的痕迹。

大爆炸宇宙学是正在发展中的一个宇宙学派。除了上述的成功，它还有一系列待解决或未解决的问题。不管怎么说，通过从经典宇宙学到现代宇宙学这些认真的实践和思考，今天，我们居然有一定的办法，来判断一百多亿年之前的许多事件。这不能被看做人类认识力量的巨大成功。

第十二章 爱因斯坦之后

对统一的追求

回顾从亚里士多德到牛顿再到爱因斯坦的科学发展进程，似乎可以看到自然科学的一个执着不变的追求：企图找到支配各种过程的统一规律，企图发现不同形态的物质的统一起源。

亚里士多德早就提出过，千变万化的世界源于一种事物，称之为物元（ylem）。不过，那只是一种哲学性的猜想。真正具有科学性的第一次统一，就是牛顿发现万有引力定律，这是支配天体运行和地面落体运动的共同规律。这一点，在第一章中已经讲过了。

第二次的大进展是由十九世纪的麦克斯韦完成的，他建立了电磁理论，使电、磁及光现象得到了统一。

爱因斯坦在建立了狭义相对论和广义相对论之后，用了整个后半生的精力去寻找引力和电磁的统一。他曾经说：

“……但是还不能断言，广义相对论中今天可看作是定论的那些部分，已为物理学提供了一个完整的和令人满意的基础。首先，出现在它里面的总场是由逻辑上毫无关系的两个部分，即引力部分和电磁部分所组成的。其次，象以前的

场论一样，这理论直到现在还未能提出一个关于物质的原子论性结构的解释。”

这就是爱因斯坦的统一场论观。直到爱因斯坦去逝，他的企图找到逻辑上统一的总场的愿望一直没有实现。有一段时间，一些人对爱因斯坦的统一场论思想没有充分的认识，而持完全否定的态度。当然，对于任何没有做成功的事情，做否定性的评价并不是件难事，反正事情是失败了。然而，问题是要作出正确的评价。直到近年来，在粒子物理发展的推动下，寻找统一场又成了一个主要的理论方向。事情要从六十年代谈起。

大统一和宇宙的极早期

到六十年代末，我们已经认识到，宇宙中的所有物理对象可以分成两大类，一类称为“物质”；另一类称为“相互作用”。前者如夸克、电子、中微子等等；后者如引力、电磁力等等。在目前的宇宙中，基本的相互作用只有四种，按其强度的排列顺序是：强子参与的强相互作用、荷电粒子参与的电磁相互作用、强子和轻子都参与的弱相互作用以及最弱的任何粒子都参与的引力相互作用。然而，那时各种相互作用的理论各自单独地发展，缺乏相互联系。其中以强相互作用和弱相互作用的理论最不能令人满意，因为这些理论的计算结果中有许多无限大，曾用许多方法试图消除这个困难，但都没有成功。

到 1967 年，这种状况开始有所改变。温伯格、萨拉姆和格拉肖等人再次着眼于统一。他们前后提出了电磁作用与弱作用二者统一的理论，称为弱电统一理论。这个统一的理论，一方面解决了弱作用理论中的无限大问题。另一方面也得到了许多实验结果的支持。

这一成功启示人们进一步去寻找更大的统一理论，即把强作用也同电磁作用和弱作用统一起来。这通常称为大统一理论。目前大统一的方案有很多，还不能说哪一个已经得到了决定性的证实。证实这些理论的困难是有关的实验太难作了。大统一理论中有一个基本观念，即认为强作用的耦合强度随着能量的增高而逐渐减小，电磁作用的耦合强度随着能量的增加保持不变，而弱作用耦合强度则随能量的提高而变大。几方面达到相等的能量约为 10^{24} 电子伏（约为 10^{12} 尔格）。

10^{24} 是太高了，指望用加速器来做这种高能实验，似乎是永远不可能的。今天的加速器在质心系中的能量约为 10^{11} 电子伏，下一代可望达到 10^{13} 电子伏，这个能量对检验温伯格-萨拉姆的弱电统一理论是很有意义的，但对大统一理论来说仍是太小太小了。

什么地方才能找到如此大的能量？

也许，在我们生存于其中的宇宙里，只有在大爆炸的极早期曾经有过能量尺度为 10^{24} 电子伏的粒子过程。这样，极早期宇宙，即宇宙年龄小于 10^{-6} 秒的一瞬间，可能是检验大统一理论、弱电统一理论的高能行为的唯一“实验室”。这就是最近以来粒子宇宙学迅速发展的直接起因。

粒子宇宙学中最有兴趣的一项进展就是用大统一理论来解释粒子及反粒子之间的不对称起源。如果要仔细地讨论这个问题，那就会离开本书的主题太远，这里只概要地讲一讲它的意义。1928年，狄拉克建立了电子的相对论性量子理论，1932年由于正电子的发现而被证实。从此人们相信，宇宙间存在粒子以及相应的反粒子，粒子和反粒子的各种性质都是相互对称的，并进而推断，粒子和反粒子在宇宙中的含量也应当是对称的。可是，天文观测的结果却相反。在今天的宇宙中，粒子的含量远大于反粒子的含量，这被称为粒子和反粒子的宇宙不对称。

对于这种不对称的起源，大统一理论能给出一种相当自然的解释。这主要是因为，大统一理论中容许存在粒子与反粒子之间的不对称的过程，它可能导致粒子反粒子数量的不相等。不过，这种过程在今天宇宙中的作用微乎其微，只在很少的几个实验中能看到它。然而，在宇宙的极早期，即宇宙寿命大约是 10^{-36} 秒的时候，这种微小的不对称过程会影响到整个宇宙，使其中的质子数目多于反质子数目。这种不对称的数量在当时仍然是很小的，大约只有十亿分之一。然而，当宇宙冷却之后，它的后果变得越来越显著。今天我们生活的地球以及整个星球世界就是由宇宙极早期中的一点“多余的”粒子形成的。

尽管这种解释还没有得到足够的证据，不过它揭示的思路却是十分吸引人的。因为，自从牛顿之后，研究自然的路就分成两条，一条研究越来越小的物质结构，一条研究越来越

大的宇宙现象。现在，探索极早期的宇宙演化与探索越来越深入的物质结构，开始合流了。沿着这条思路，人们自然希望能走得更远，即去寻求比大统一更加统一的理论，去探索比极早期更加早期的宇宙。

引力和量子论

在大统一之后等待统一的只有引力相互作用了。引力是最早被认识的一种相互作用，可是它的统一问题却最难。原因之一是引力和量子论关系一直没有协调起来。爱因斯坦对标准的量子力学的解释是持否定态度的，他认为可以通过引力与其他相互作用的统一找到代替现有量子理论的正确理论。这条路没有走通。相反，迄今成功的统一都是在量子场论的基本框架内完成的，所以，现在一般认为，在引力论与量子论的关系上，应当把爱因斯坦的观点倒过来，即只有找到能与量子论相适应的引力理论之后，才能最终完成它的统一。因此，尽管在目前实验室的能量范围内还没有直接看到任何的引力量子效应，可是寻找量子引力理论的工作却持久不衰。

然而，这项工作困难重重。人们已经意识到，这个困难可能不是技术性的，而是涉及到最根本的观念。比如，引力的量子论中也有一个能量尺度，大约是 10^{28} 电子伏特，当能量大于这个值时，时空本身不再是一个描述运动进行的平坦背景，而是有明显的量子涨落。因而，在这尺度之后，不可能再谈更深的物质构成的层次。或者说，量子引力论将给物

质结构带来一个微观方面的界限。

量子引力论中的第二个根本性问题与因果规律有关。我们知道，在经典物理中我们可以准确地预言一定的粒子的位置和动量，而在量子理论中，按测不准原理，只能确定地预言一定的粒子的位置或者它的动量，即预言能力减小了一半。这是因果律的削弱。在引力的量子论中，因果律会进一步地削弱。例如，在黑洞周围的量子发射过程中，我们只能预言某种粒子在某个模式上的几率。黑洞的发射还不是彻底的量子引力效应的结果，而只是一种半经典半量子的理论，下面我们稍微仔细地来介绍它。

黑洞的发射

1970年，在经典黑洞理论中证明了一条定理：在演化过程中黑洞视界的表面积只能增大而不能减小。外来物质或辐射掉进黑洞时，黑洞视界表面积就增大。当两个黑洞因碰撞而合成一个黑洞时，最终的黑洞视界表面积也比原来的两个大。物质不可能从黑洞中出来，一个黑洞也不可能分裂成两个黑洞。所以，黑洞视界面积只能增大。这叫做面积不减定理。

黑洞面积的不减性使人们联想到热力学中的熵。熵在演化过程中也有不减性。一个孤立体系的熵总是随着时间而增大（或者不变）的，决不会减少。

后来，进一步发现，黑洞面积与热力学熵之间的类比不仅是形式上的，而是实质性的。面积也就是黑洞的熵。同时，

我们也可以定义黑洞的温度。这个温度也应与热力学中的温度具有相同的含义。例如，温度相同的物体应当达到热平衡等等。

我们知道热平衡是一种动态平衡。两个相同温度的物体 A 和 B 在达到平衡时，二者是有能量交换的。但是，单位时间从 A 传到 B 的能量，等于从 B 传到 A 的能量，所以总的效果应是 AB 的温度都不变化。如果一定温度的黑洞也能与同样温度的其它物体达到热平衡，那么，单位时间内从物体传给黑洞的热量，应等于单位时间从黑洞传给物体的热量。然而，经典的黑洞理论认为不可能有任何物质从黑洞内部出来。这就是黑洞热力学中的矛盾。

1974 年霍金解决了这个矛盾。最关键之点就是考虑了量子论的作用。按照量子论的观点，真空并不是简单意义下的“空”，它具有丰富的物理内容。整个物理空间中都充满着“虚粒子”。这种虚粒子的作用，可以通过它们的物理效应加以证实。在通常的情况下，虚粒子不断地产生，也不断地湮灭。所以真空中永远不会自动产生粒子。但当存在引力场，特别是存在黑洞时，情况就不同了。这时，如果真空中产生了一对虚的电子和正电子，其中有一个掉到黑洞中，它永远不可能再出来，于是剩下另一个就失去了伴儿，再也无法湮灭。这个孤独的粒子或者不久之后也掉进黑洞中，或者能逃离黑洞附近，其效果看起来就如同黑洞在发射一样（见图 12-1）。这是黑洞强场引起的真空发射，发射的结果是使黑洞的质量变小。

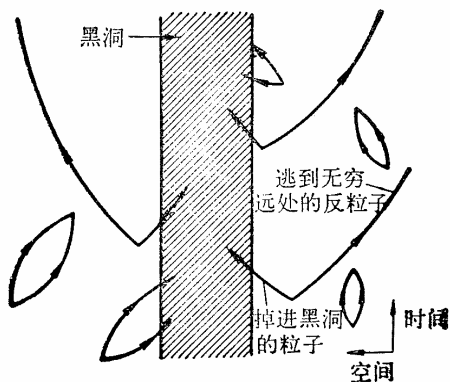


图 12-1 在黑洞的附近，正反粒子对中有一个可能会掉进黑洞，留下的另一个粒子就没有对象可以和它湮灭。剩下的那个粒子有可能逃到无穷远处。于是，看起来就好像黑洞在发射粒子或反粒子一样

黑洞的发射，是一种热发射，即各种辐射谱都是黑体类型的。因此，无论黑洞由什么物质演化而形成的，我们只能给出某种粒子在某种模式上的几率的预言。这就是前面已谈到的结论。这个理论只考虑到真空的量子涨落性质，而对黑洞的引力场仍然采用经典的结果，所以总的说是一种半经典半量子的结果。

超统一和奇性

尽管量子引力理论遇到上述种种问题，引力的统一化和量子化还是有进展的。有希望的途径是把广义相对论推广到超引力理论或最近发展起来的超弦理论。这种超统一、超对

称或超弦理论都是企图把所有作用都合而为一，而且它们有一个非常诱人的性质，即把物理学中传统的“物质”与“相互作用”之间的界限也打破了。在物理学中，往往用半整数自旋的场来表示“物质”粒子，用整数自旋的场来表示“相互作用”粒子，而在超对称理论中，半整数自旋与整数自旋之间也统一了。此外，在超引力理论中也不引入外加的参数值。这样，这种理论不仅在统一所有物理粒子和相互作用的意义上是完整的，而且在没有任何不确定参数的意义上也是完整的。

现在指望在超统一的水平上，也许能解决宇宙奇性问题。所谓奇性就是某些“不合理”的无限大。例如，按照牛顿引力理论，无限宇宙中的引力势就会出现无限大。按照一般的观点，在出现无限大的地方，是说明理论不再适用了，应当用更合理的新理论来代替旧的理论。的确，广义相对论的发展，使牛顿引力理论中的一些无限大自然地消除了。这种结果似乎向人们暗示：只要找到越来越正确和完整的理论，则奇性也就会越来越少。然而，事实并不尽然。

广义相对论虽然消除了牛顿理论中的奇性，但也带来了一系列新的奇性。在黑洞解中有奇点，在宇宙学中也有奇点。引力坍缩的结局是奇点；大爆炸的起始也是一个奇点。

有一段时间里物理学家相信，上述奇点只是数学形式上带来的东西，而实际上是可以避免的。如果不用完全对称的几何结构，也许就没有奇点。但是七十年代以来的一系列工作证明，在广义相对论中，奇点是一个普遍不可避免的东西，在宇宙的演化中一定要遇到奇点。

现在我们则期望，量子引力理论也许能避免上述奇性。姑且不论量子性是否能避免上述奇性，而引力的量子效应带来了上述的 10^{28} 电子伏特的界限已是确实的。

这样，就出现了一种大胆的猜想。一当我们找到了预期统一完整的超引力理论之后，就可以追溯到宇宙年龄小于 10^{-43} 秒的绝早期，在那里，奇点没有了，代之以宇宙的创生，故可叫做创生期。在创生期，宇宙中只有一种相互作用，即“超引力”。在 10^{-43} 秒之后，由于宇宙的膨胀发生“相变”，才逐一出现引力、强作用、弱作用及电磁作用的现今形态。这样，大爆炸的起点就是宇宙的创生。如果宇宙真是以这种方式统一起来的话，那么，“奇点”亦即创生是否就是人类两千多年来孜孜以求的物元呢？^①

① 有关这一问题的更全面论述，请参见方励之、李淑娴著的《宇宙的创生》，科学出版社 1986 年。

《物理学基础知识丛书》编委会

主 编：褚圣麟

副主编：马大猷 王治梁 周世勋 吴家玮（美籍） 汪 容

编 委：王植东 陆 埏 陈佳圭 李国栋 汪世清
赵凯华 赵静安 俞文海 钱 玄 薛丕友
潘桢镛

*

*

*

本书责任编辑：汪 容 陆 埏

更多精彩尽在读书中文网：<http://www.rbook.net>



开卷有益，如喜欢此书籍，请购买正式出版物

《从牛顿定律到爱因斯坦相对论》(第二版) 一校图文版

全书由 [Ken777](#) 进行OCR、校对、翻拍插图、制作。

2008年04月14日一校

