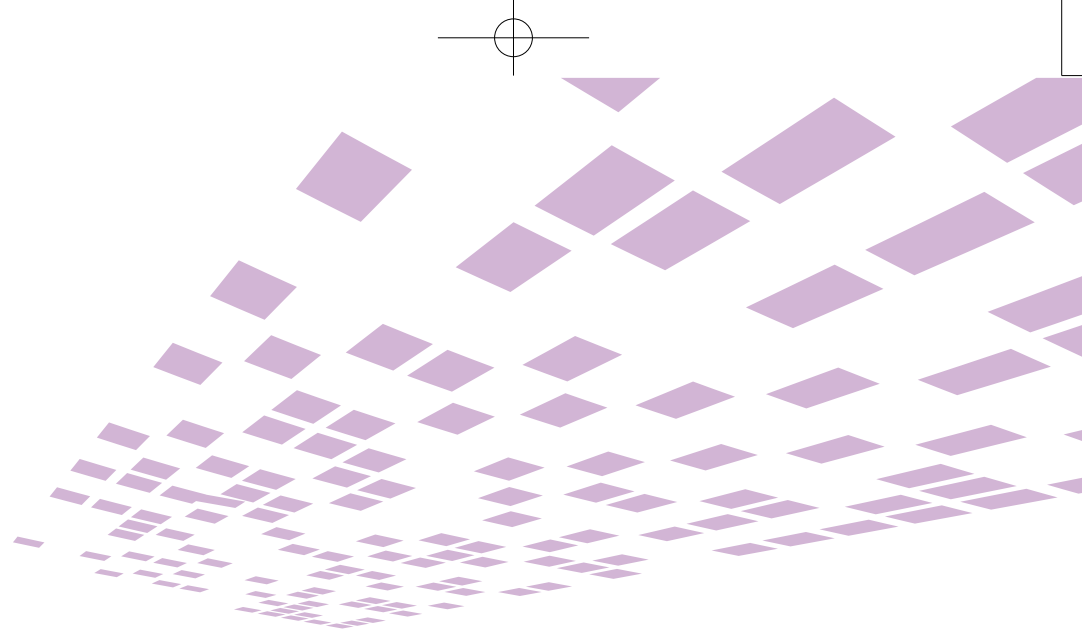
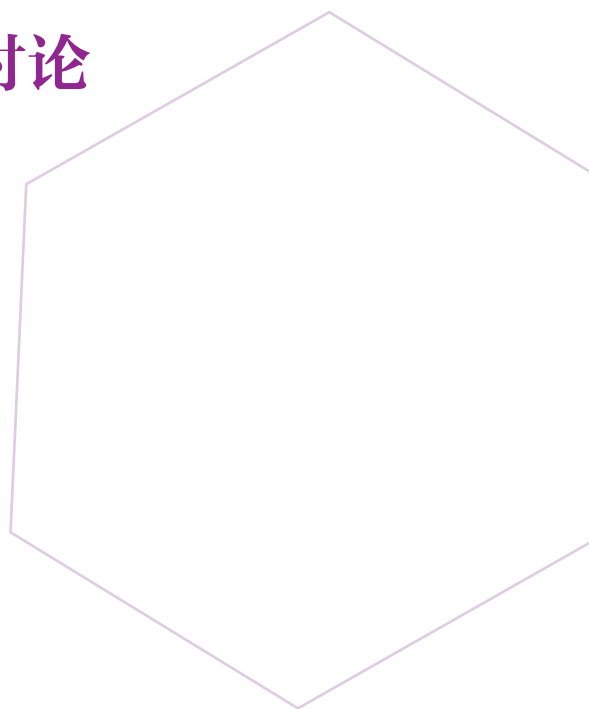


第一部分 狭义相对论





时间与空间

最熟悉的陌生人

相对论是关于时间、空间、物质及运动的理论，所以就让我们从时间和空间说起吧。

古罗马有一句流传很广的名言：“何为时间？无人问我，我自知晓；一旦问起，我便茫然！”这句话之所以成为名言，是因为它说出了每个人的心里话。时间和空间，看似熟悉得不能再熟悉，细想却陌生得不能再陌生，也许，它们是宇宙中最深奥的概念。

多少世纪以来，无数哲人在到底什么是时间、什么是空间的问题上费尽了脑筋，可还是无法总结出明确的概念。最后，爱因斯坦用最简洁的语言回答了这个问题：可以用时钟来测量的就是时间，可以用尺子来测量的就是空间。那么问题又来了，什么是时钟，什么又是尺子呢？

1.1 什么是时间？

“看时光飞逝，我祈祷明天，每个小小梦想能够慢慢地实现……”

“我的时间嘀嗒嘀嗒嘀嗒不停地转动，我的心在扑通扑通扑通扑通不停地跳动……”

每当这些美妙的歌声响起，空气中就会飘荡出时间的音符，其中的意境你自然不难体会。可是如果有人问你什么是时间，你能答上来吗？你的头脑中也许已经出现了答案的影子，但却无法用合适的语言描述出来，正所谓“只可意会，不可言传”。为什么呢？因为我们对时间太熟悉了，熟悉到就像呼吸一样自然，因而从来没有去认真思考过什么是时间。



那么现在就请你闭上眼睛思考一下，如果你从来没见过钟表，你将如何判断时间的流逝呢？

我们的祖先就没有钟表，他们的时间概念主要来自于对自然的观察。混沌初开的远古人类日出而作，日落而息，他们发现太阳每天都会东升西落，周而复始，于是就出现了“日”这样的时间单位。再通过对月亮的观察，他们发现虽然有月圆月缺，但它也是周而复始变化的，于是就按月亮的周期性变化规律发明了另一个时间单位“月”。然后又发现春夏秋冬也是交替循环的，于是就出现了“四季”，四季合为一年，日复一日、年复一年，时间就这样开始流逝了。

再后来，人们对满天星辰的观测越来越精细，他们很自然地就把年、月、日编排在一起，制定出日历来计时，农历中还会通过闰月来消除按月计时和按年计时的累积误差。正所谓“天地玄黄，宇宙洪荒，日月盈昃，辰宿列张。寒来暑往，秋收冬藏，闰馀成岁，律吕调阳”。

以“日”作为计时单位显然在生活安排中不够细致，于是人们又发明了日晷。最早的日晷就是竖在地上的一根木杆，后来做成一根有一定倾斜角度的指针（见图 1-1），在每一天内，通过这根指针的阳光投影可以把一天分成不同的时刻，以方便在更小尺度下计时。

如果这时候让你来总结一下古人的计时方法，你会得出什么结论呢？没错，结论就是：周期性运动的物体可以用来做计时工具。无论是地球还是太阳或月亮，它们都是具有周期性运动规律的物体。“日”是靠地

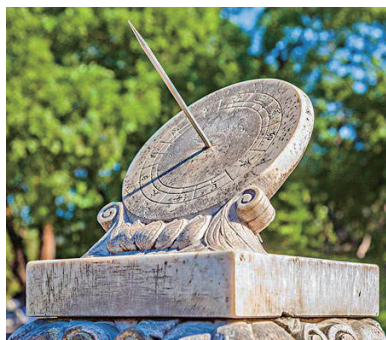


图 1-1 利用阳光投影方向来测定并划分时刻的日晷

球自转的周期性计时的，“月”是靠月球绕地球公转的周期性计时的，“年”是靠地球绕太阳公转的周期性计时的。古人也逐渐认识到了这一点，于是钟表就自然而然地被发明了。

1.2 钟表的计时原理

到了17世纪，意大利物理学家伽利略偶然注意到，悬在空中的吊灯被风吹动后，会有规律地晃来晃去，他按自己的脉搏来计时，发现吊灯往复运动的时间总是相等的。经过试验，他发现用绳子悬挂的物体在小幅摆动时，只要绳子长度不变，不管摆动幅度有多大，它返回原位的时间总是相同的（见图1-2）。

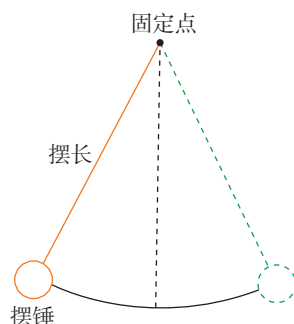


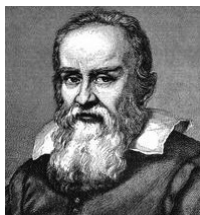
图1-2 单摆的周期性摆动，摆角较小时，单摆周期只与摆长有关

实际上，伽利略已经发现了单摆的等时性原理。在一根绳子末端系一个小铁球，就制成了一个单摆。单摆是利用重力势能和动能之间的相互转化而进行周期性摆动的，满足能量守恒定律。小球被释放后摆回到初始点所用的时间就是单摆的摆动周期，小角度单摆的摆动周期只与摆长有关，而与摆锤的质量和摆动角度无关。

发现单摆具有周期性运动后，伽利略想到了用它来计时。1637年，他设计出了根据单摆原理制作的钟表装置图。1657年，荷兰物理学家惠更斯利用伽利略的装置图成功地制成了世界上第一台摆钟。摆钟利用摆锤的周期性运动来控制其他机件，通过齿轮组记录钟摆的次数并缓慢驱

动指针转动。当然，由于空气阻力，以及各种机件的摩擦阻力，钟摆的周期会逐渐受到影响，所以需要隔一段时间上一次发条，以使其继续摆动下去。

最初摆钟的误差大约是每天 10 s，后来经过不断改进，计时越来越精确。1920 年，英国人肖特制造出双摆天文守时钟，其误差仅每天几个毫秒，达到了机械钟的巅峰。



伽利略·伽利莱（Galileo Galilei, 1564—1642），意大利物理学家、天文学家，现代科学先驱。伽利略出生在以比萨斜塔闻名的城市比萨，他在 19 岁就发现了单摆的等时性原理。伽利略倡导数学与实验相结合的研究方法，他提出了原始的惯性定律和惯性系的概念，发现了自由落体定律，定义了加速度的概念，是经典力学的鼻祖。伽利略发明了可用于天文观察的望远镜，给哥白尼的日心说以决定性支持，但由于教会威胁而被迫宣布撤回他的发现，晚年被教廷判处永久软禁。伽利略创建了一整套科学研究的方法，其程序大致为：观察现象—提出假设—运用数学和逻辑进行推理—实验检验—形成理论。爱因斯坦评价道：“伽利略的发现以及他所应用的科学推理方法，是人类思想史上最伟大的成就之一，标志着物理学的开端。”

1929 年，一种新的钟表——石英钟问世了。石英钟的主要部件是一个石英晶体振荡器。天然石英晶体你一定听说过，它就是美丽的水晶。当然，石英钟上用的石英晶体基本上都是人造的。石英晶体振荡器是用具有压电效应的石英晶体薄片制成的，在薄片两侧导入交变电流时，它就会产生很稳定的周期性振荡。石英钟内部集成电路以此振荡周期作为

计时基准信号，从而实现精确计时，误差可控制在每天 0.1 ms 以内。

到了 20 世纪 50 年代，原子钟诞生了。原子钟是目前世界上最准确的计时工具，它是利用原子中的电子在特定能级间跃迁时辐射出的电磁波的周期来计时的，这个周期是非常稳定的。通过精确测定，人们知道电子在铯原子（Cs-133）基态的两个超精细能级之间跃迁时，辐射电磁波的周期为 $1/9\,192\,631\,770\text{ s}$ 。据此，国际计量大会给出了“秒”的定义：铯原子（Cs-133）基态的两个超精细能级跃迁辐射振荡 $9\,192\,631\,770$ 个周期所持续的时间就是 1 秒。“秒”的单位符号为“s”。

不论计时器如何发展，其核心原理都是利用周期性运动来计时的，从单摆的周期，到石英振荡周期，再到电磁波周期，运动周期越来越精确，所以计时也越来越精确。以后再讨论计时问题的时候，任何周期性运动的物体都可以拿来当钟表使用，这对研究相对论是大有帮助的。

1.3 时间的本质

明白了时间概念的由来和计时工具的原理，这时候再来回答“什么是时间”的问题，也许你就能说出答案了。仔细想想，你就会发现时间反映的是物质运动变化过程的持续性。

宇宙自诞生之日起，就开始了持续不断的演化过程，所有物体都在持续不断地运动变化着：电磁波在不断地振荡，原子在不停地振动，动物的机体在不断地更新，地球在不停地旋转，太阳在不停地燃烧，星系在不断地演化……从微观粒子到天体星系，无一不在以各种形式不断地运动变化，连空间都在不断膨胀。根据量子力学的不确定原理，没有任何粒子能是静止不动的，可以说，运动是永恒的，世界上没有绝对静止的物体。假如你看到一座雕塑，按日常说法你可以说它静止不动，但如果深究起来，实际上它内部的原子在不停地振动、电子在不停地运动，它

也在随着地球不停地旋转，根本静不下来。

由于运动是永恒的，运动的结果就是事物在不断变化，为了反映出事物运动变化的先后次序和持续性质，就需要引入“时间”这个概念，这就是时间的本质。

让我们做一个假设，假设光线不再前进、原子不再振动、人体不再更新、宇宙不再演化、空间不再膨胀……如果宇宙中的一切运动都停止了，任何事物都不再发生变化，那么这时候还会有时间吗？显然，这时候时间也停止了，也就没有时间的概念了。所以说，是运动造就了时间，时间是对运动的反映。

1.4 什么是空间？

相比于时间，空间的概念在我们头脑中似乎更清晰一些。一直以来，人们凭直觉认为空间就像一个大容器，宇宙中所有物体都被容纳其中。

对于容器我们是很熟悉的，一个长方形盒子就是一个典型的容器，这个盒子内的任意一点都可以用长、宽、高三个方向的坐标表示出来，坐标原点也可以任意选择，不影响两点之间的相对位置。整个宇宙空间当然不是一个长方形盒子，但是宇宙太大了，在我们目所能及的范围内，我们完全可以把空间想象成是一个大盒子，我们被装在里头，可以用三维坐标来表示空间中某一点的位置（见图 1-3）。所以我们把空间叫作三维空间。

时间是一去不复返的，但空间却可以任由我们在其中来回走动，所以

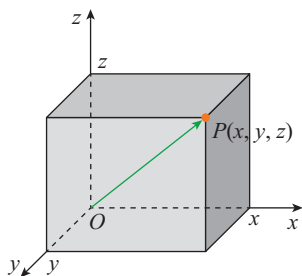


图 1-3 三维空间坐标系

对于空间的测量，就是对各个方向距离的测量。

测量距离就要找出一个长度单位。最初人们用步数来测量距离，但不同人的步子大小不一样，于是就找一根木棍来作为单位长度，大家都按这根木棍的长度来计量，就可以统一了，这根木棍就被叫作“尺子”。

不同国家的尺子长度不一样，这在古代没什么问题，但世界变成地球村以后，就带来了很多不便，于是国际上统一规定用法国的尺子“米”来作为标准长度单位。

法国的尺子是怎么来的呢？1791年，法国科学家提出把地球子午线的四千万分之一的长度定为1米，并用金属铂制成了第一根标准米尺——铂杆，于是“米”这一单位正式诞生。1889年，第一届国际计量大会正式将其采用为国际单位制。“米”的单位符号为“m”。

铂杆保存得再好，也会慢慢发生细微的变形，所以当人们确认了真空光速的精确值为 $299\,792\,458\text{ m/s}$ 以后，国际计量大会于1983年对米做了重新定义：“米是光在真空中 $1/299\,792\,458\text{ s}$ 的时间间隔内的行程长度”。

1.3节说过，时间是对运动的反映。如果凭直觉，你可能觉得空间与运动扯不上什么关系。通常大家都认为空间对谁来说都是一样的，这就是绝对空间的概念。但是根据狭义相对论却发现，不同运动速度的人对空间距离的测量结果是不一样的，绝对空间的概念是错误的！这说明我们的直觉是靠不住的，空间与运动还是有关系的。

另外，一直以来，人们都认为空间这个大容器空空荡荡，与其中的物质没有任何关系，但是广义相对论却发现，物体会使这个容器内部发生变形。就像一个橡胶垫子上放一个铁球，垫子会被压出一个小坑一样，太阳、地球以至于每一个有质量的物体，都会把时空（包括时间与空间）压出大大小小的“坑”。而且天文观测发现，宇宙空间并不是静态的，它

正在不断地膨胀。如此说来，空间也是一种物理实体了。

空间既与运动有关，又与物质有关，还是一种物理实体，这和我们头脑中的印象可谓大相径庭，原本清晰的空间图像是不是又模糊起来了呢？我们真的了解空间吗？

1.5 时空本性

你可能注意到了，上文中已经提到了时空，有质量的物体不光能使空间变形，也能使时间变形。时空在英语中称为 *space-time*，按语序应译作“空时”，但我们一般根据汉语习惯译成“时空”。“空时”和“时空”这两种叫法并没有本质的区别，它们都反映了时间-空间的整体性，所以没必要计较到底哪个翻译更好，按汉语习惯叫“时空”就挺好。

时空是爱因斯坦的相对论中首次出现的概念，它发现了空间和时间的神秘联系，掀开了人类认识时空的新篇章。相对论如何把时间和空间联系在一起，以及时空有哪些令人惊异的特性，我们将在后文慢慢道来，本节先来了解个大概，以助你进一步思考时空的本质。

在狭义相对论范畴内，爱因斯坦发现时间是相对的，空间也是相对的，但时空作为一个整体是绝对的，他说：

“从牛顿的观点看来，下面两个陈述是相容的：时间是绝对的，空间是绝对的。而从狭义相对论的观点来看，我们应当这样说：时空连续域是绝对的。”

“随着同时性的相对性的发现，空间和时间就融合为一个单一的连续域，正像以前的空间三维连续域一样。物理空间因此扩大为四维空间，它包括了时间的一维。狭义相对论的四维空间像牛顿的空间一样刚硬和绝对。”

爱因斯坦此处所说的四维空间就是我们常说的四维时空。“四维空间”

这个概念是爱因斯坦的数学老师闵可夫斯基在相对论的基础上提出来的，这是数学家的名词，体现了时空的数学意义；物理学家为了更直观地体现其物理意义，通常把它叫作“四维时空”。四维时空为相对论提供了直观的几何图像，对人们认识时空的本质有着重要的意义。

在狭义相对论中，两个事件的时间间隔和空间距离在以不同速度运动的人看来是不一样的，但他们对这两个事件的“时空距离”的测量却完全相同！这就是说，时间与空间并不像我们想象的那样各行其是，它们是交织在一起的！就如爱因斯坦所言，时空作为一个整体是绝对的。

狭义相对论虽然发现了时间与空间的联系，但是还没有完全发现时空的本性。狭义相对论中的时空是平直的，而在广义相对论中，爱因斯坦发现时空竟然是可以弯曲的！广义相对论发现了时空与物质和运动之间的联系，物质的存在会造成时空的弯曲，弯曲的时空反过来又会影响物质的运动。用物理学家惠勒的话来说就是：“物质告诉时空如何弯曲，时空告诉物质如何运动。”

不过，令爱因斯坦不满意的是，在相对论中，物质消失后，时空不会消失，时空依然存在，只不过由弯曲变成了平直。晚年的爱因斯坦曾经表达过对上述图像的不满，他在《狭义与广义相对论浅说》第15版的说明中写道：

“我想说明，时空未必能看作是可以脱离物质世界的真实客体而独立存在的东西。并不是物体存在于空间中，而是这些物体具有空间广延性。这样看来，关于‘一无所有的空间’的概念，就失去了意义。”

爱因斯坦写的这本也许只有专家才能看懂的“科普读物”在1917年就出了第1版，上面这段话是他在1952年出第15版时特意加上的。按这段话的观点，当物质不存在的时候，时空也不应存在，时空与物质是

同存同灭的，但是相对论并未做到这一点，显然这是爱因斯坦经过几十年思考后得出的新的哲学观点。我们可以顺着爱因斯坦的思路设想一下，宇宙大爆炸的时候，如果没有物质产生，时空还会诞生吗？

爱因斯坦的哲学观点走在了他的相对论理论前面，人类对于时空本性的探索，也许才刚刚开始……

2

牛顿时空观 固定舞台上的世界

牛顿是我们最熟悉的物理大师，因为他的经典力学描述的就是我们身边的各种运动现象，揭示了物体的运动规律。运动与时空有着千丝万缕的联系，讨论运动就不可避免地要涉及时间和空间，所以牛顿提出了他的时空观——绝对时空观。牛顿的时空观符合人们对时空的直觉想象，如果你没学过相对论，你肯定会和牛顿想法一致，所以绝对时空观理所当然地得到了科学界的认可，而且一直延续了近 200 年。

2.1 牛顿与苹果那些事儿

1665 年，一场大瘟疫在伦敦爆发，每周都有上千人死于瘟疫。虽说疫情主要集中在伦敦市，但亦渐渐影响到了英国各地。为了躲避瘟疫，各大学被迫关闭，正在剑桥大学三一学院读研究生的牛顿回到了他的家乡——林肯郡乡下的一个小村落，这一年他 22 岁。

在悠闲的乡下，牛顿躺在苹果树下，啃着从树上掉落的苹果，神游天际，思考自然和宇宙。瘟疫在第二年结束，而牛顿在这短短的两年内，竟在数学、物理学和天文学中取得了举世瞩目的成就，其中就包括微积分、力学三定律和万有引力定律。正如他在后来的一封信中写的那样：“所有这些发现都是在 1665 年和 1666 年的鼠疫年代里作出来的。”

虽然牛顿的研究在 23 岁就取得了重大成果，但直到 42 岁，他才开始撰写《自然哲学之数学原理》这部巨著。他花了 18 个月时间，用拉丁文写成了这本书。



艾萨克·牛顿 (Isaac Newton, 1643—1727), 英国著名的物理学家、天文学家和数学家, 现代自然科学的奠基人。

1687年,《自然哲学之数学原理》(以下简称《原理》)正式出版。此书模仿欧几里得《几何原本》的范式,以“定义”开篇。牛顿首先给出的几个基本定义如下。

定义1: 物体的质量等于它的密度和体积的乘积。

定义2: 物体的动量等于物体的质量和速度的乘积。

定义3: 一个物体的质量是它的惯性大小的量度,质量大的物体惯性大。

定义4: 外力是加于物体上的,改变其静止或匀速直线运动状态的一种作用。

在定义了质量、动量、惯性和外力之后,牛顿给出了他总结的运动三定律。

定律Ⅰ: 每个物体都保持其静止状态或匀速直线运动状态,除非有外力作用于它迫使它改变这种状态。

牛顿认识到,只有匀速直线运动才是物体的自然运动。物体之所以保持其运动状态不变是由于它的惯性所致,所以这条定律又叫作惯性定律。

定律Ⅱ: 物体的加速度正比于它所受的外力,方向沿外力作用的直线方向,且与物体的质量成反比。

第一定律指出了物体不受外力时的运动状态,第二定律则指出了物体受到外力作用时运动状态如何变化。加速度的概念是伽利略最早提出的,就是速度随时间的变化率($\Delta v/\Delta t$);牛顿则指出了加速度产生的原因,

那就是力。牛顿第二定律的表达式简单而优美：

$$F = ma \quad (2-1)$$

其中 a 就是物体的加速度。

定律Ⅲ：每一个作用力总存在一个相等的而且方向相反的反作用力；或者说，两个物体彼此施加的相互作用力总是大小相等、方向相反的。

第三定律也叫作用力与反作用力定律。既然每一个作用力总有一个反方向的反作用力，那么有人 would 问，为什么作用力与反作用力不会抵消呢？其实很简单，因为它们并不是作用在同一个物体上，只有作用在同一物体上的力才会抵消。如图 2-1 所示，地球对苹果施加一个引力，苹果也对地球施加一个引力，但这两个力分别作用在苹果和地球上。

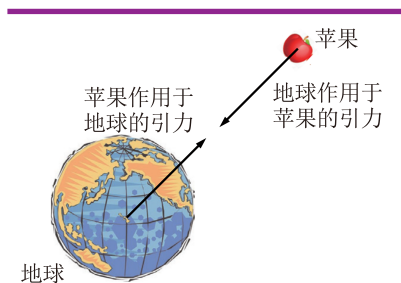


图 2-1 地球与苹果的作用力与反作用力

牛顿运动三定律也叫力学三定律，因为第一定律说明了力的含义——力是改变物体运动状态的原因；第二定律指出了力的作用效果——力使物体获得加速度；第三定律揭示出力的本质——力是物体间的相互作用。由这三个定律，牛顿推导出了一系列关于物体运动的推论、定理和命题，并讨论了万有引力定律和宇宙系统的运动，从而构建了一座经典力学的恢宏大厦。

《原理》的出版震动了整个欧洲学界，牛顿一跃成为欧洲最负盛名的科学家，成为一颗最耀眼的明星，各国王公贵族都以结识他为荣。

牛顿为何能取得如此伟大的成就，我们可以从他的几句名言中一窥

究竟：

“把简单的事情考虑得很复杂，可以发现新领域；把复杂的现象看得很简单，可以发现新规律。”

“思索，继续不断的思索，以待天曙，渐近乃见光明。”

“没有大胆的猜测就做不出伟大的发现。”

把这几句话联系起来看，就能看出牛顿善于思考、喜欢思考，而且知道如何思考。

1704 年，出版《光学》。

1707 年，出版《数学通论》。

1727 年 3 月，牛顿逝世，终身未娶。

一代天才虽然逝去，但关于他的故事则流传下来，流传最广的莫过于苹果与万有引力的故事。这个故事的真假众说纷纭，但牛顿自己说的一段话却颇有意思：

“有时候，爱情就像是树上的一个苹果，当你无意中散步到树下的时候，它可能一下子就掉下来砸在你的头上！”

牛顿没把掉落的苹果与万有引力联系在一起，而是和爱情放到了一起，对于终生未娶的牛顿来说，他真的被那只苹果砸中过吗？

2.2 牛顿与微积分那些事儿

牛顿是研究运动的，有一个问题是他无论如何也避不开的，那就是——运动的瞬时速度。

速度是用来表示物体运动快慢的物理量，涉及物体位置随时间的变化，它在数值上等于单位时间内通过的路程：

$$\text{速度} = \frac{\text{路程}}{\text{时间间隔}}, \text{ 即 } v = \frac{\Delta s}{\Delta t} \quad (2-2)$$

如果一个人驾车在 10 s 内跑了 500 m，那么他的平均速度是

50 m/s。但是如果有人问：他在第 5 s 的速度是多少呢？在第 5 s 那一瞬间——时间短到看似停滞——那么人看起来在那一瞬间是静止的，他还有速度吗？

直觉与经验告诉我们，运动的物体在每一时刻都有一个相应的瞬时速度。但是，如何定义并计算瞬时速度呢？

你会发现，直接按平均速度的定义方式来定义瞬时速度是行不通的，因为在某一瞬间，时间间隔是 0，物体的运动距离也是 0，如果按路程除以时间来计算， $0 \div 0$ 是没有意义的。

牛顿解决这个问题的办法是，观察物体在某时刻附近越来越短的时间间隔内的运动（即 $t \rightarrow t + \Delta t$ 这段时间），显然，观察时间越短，平均速度越能逼近物体在该时刻的瞬时速度。这个测量原则上可以推到一个极限，当时间间隔 Δt 无限趋于 0 而不等于 0 的时候，测得的速度就是 t 时刻的瞬时速度。我们把这段微小的运动距离和微小的时间间隔分别记为 ds 和 dt ，称之为“微分”。显然，瞬时速度等于 ds 除以 dt ：

$$v_{t \text{ 时刻}} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta s}{\Delta t} = \frac{ds}{dt} \quad (2-3)$$

这就是微分运算方法。符号 $\lim$ 是英文 limit （极限）的缩写，用这个极限过程，可以得出一个对瞬时速度的精确描述。

如果物体运动速度忽快忽慢，或者运动方向不断变化，就要引入加速度的概念了。加速度在数值上等于单位时间内速度的变化，可以用下式计算：

$$\text{加速度} = \frac{\text{速度的变化量}}{\text{时间间隔}}, \text{ 即 } a = \frac{\Delta v}{\Delta t} \quad (2-4)$$

比如一辆汽车在 10 s 内从静止加速到 100 km/h，那它的平均加速度就是 10 km/(h · s)。也就是说，它的速度每秒钟增加 10 km/h。

坐汽车或电梯时，我们可以轻易感受到速度的变化，或者说能感受

到加速度。牛顿第一定律说，每个物体都会保持静止或匀速直线运动状态，除非有外力迫使它改变这种状态。如果我们坐在车上，速度变化时必然会受到外力作用，比如司机踩一脚油门，我们会受到车座背的推力而增加速度，于是就有了加速的感觉。如果是一个小球放在光滑的桌面上，司机踩一脚油门，由于小球有保持静止的趋势，在光滑的桌面上又没有摩擦力，小球就会向后滚去（见图 2-2）。第一定律又叫惯性定律，所以也可以简单地说由于惯性作用我们会感受到加速度。

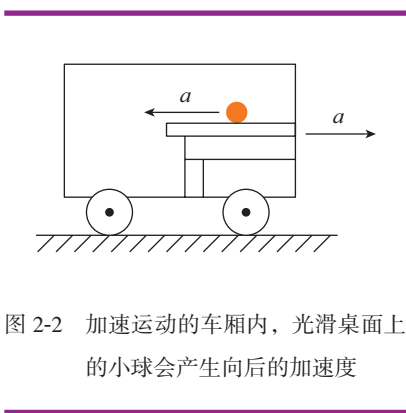


图 2-2 加速运动的车厢内，光滑桌面上的小球会产生向后的加速度

如果想知道某一瞬间的加速度，我们也可以用微分的方法来计算：

$$a_{t \text{ 时刻}} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta v}{\Delta t} = \frac{dv}{dt} \quad (2-5)$$

我们看到，在定义速度和加速度时，都用了求极限的方法，这种方法对物理学的发展起到了极大的推动作用。17 世纪，牛顿最先发明了这种现在称为微积分的数学方法。牛顿当时称之为“流数术”，他把微分法叫作“正流数术”，把微分运算的逆运算——积分称为“反流数术”。

关于谁是微积分的发明者，人们在牛顿和德国数学家莱布尼茨之间是有争议的。事实上，牛顿和莱布尼茨差不多在同一时期各自独立地建立了微积分方法。建立微积分的出发点是直观的无穷小量，因此这门学科早期也称为无穷小分析。莱布尼茨是作为几何学家对这些问题产生兴趣的；而牛顿则是从研究物体运动的需要而提出这些问题的。他们都研究了微分、积分的概念和运算法则，从而建立了微积分的数学基础。据考证，

牛顿在发明时间上比莱布尼茨早 10 年，而莱布尼茨公开发表的时间却比牛顿早 3 年。现在微积分中的一些基本符号采用的都是莱布尼茨使用的符号。

2.3 牛顿的绝对时空观

从速度和加速度的计算公式可以看到，研究运动一定要先弄清时间间隔和空间距离的关系，进一步说，应该先给出时间和空间的定义。然而牛顿并没有这样做，他在《原理》一书中只给出了一些说明：

“我没有定义时间、空间、位置和运动，因为它们是人所共知的。”

“绝对的、真实的和数学的时间，由其特性决定，自身均匀的流逝，与一切外在事物无关，又名延续。”

“绝对空间的自身特性与一切外在事物无关，处处均匀，永不移位。”

牛顿认为，时间是绝对的，时间就像一条无头无尾的河流均匀流逝，宇宙各处的时间处处相等并同步计时。也就是说，只要两个人对好了表，不论两人在宇宙中如何运动，也不管他们到了宇宙中的哪一点，他们看到的时间都是相同的，这就是“绝对时间”。

牛顿认为，空间也是绝对的。绝对空间就像分布在宇宙中的巨大的三维网络结构（见图 2-3），每一个坐标点都是固定的，任意两点之间的距离也是固定的，不受其中任何物质以及运动的影响。空间静静地存在在那儿，永恒不变，这就是“绝对空间”。

在牛顿的绝对空间里，空间就像一个巨大的舞台，宇宙

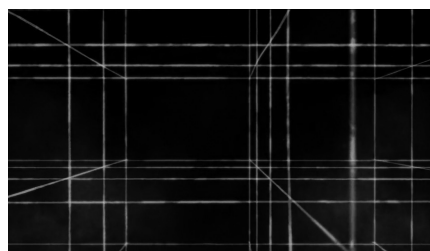


图 2-3 绝对空间就像分布在宇宙中的静止的三维网络

中的物质就是舞台上的演员，演出并不会影响舞台，舞台也不会影响演出。而且，即使没有演员，这个舞台也不会消失，它还在那儿，亘古不变。牛顿认为，对任何运动来说，绝对空间都可以作为一个固定的参照物，空间就是一个绝对参考系。

绝对时间和绝对空间符合人们的直觉，就像牛顿所说的，它们是人所共知的，所以牛顿提出绝对时空观后，在 200 年内没有任何人提出异议。

3

以太危机与光速之谜

与绝对时空观一样，当时的欧洲学者头脑中还存在另一个根深蒂固的观念——以太。以太（ether）这个词听起来很怪异，是因为它是一个音译词，就像我们把水（water）叫作“沃特”一样别扭。这个词最早由亚里士多德提出来，他设想“以太”是充满天地间的一种媒质，这完全是一种凭空假想，没有任何根据，但后来光学家们竟然把这个词借用过来，并赋予它新的含义——光的传播媒质。

3.1 光与以太

光是什么？这个问题看似简单，实则不然。光与时间和空间一样，就在我们身边，我们却不了解它。

历史上对于光的本性的争论分为两大阵营，惠更斯主张波动说，牛顿则主张粒子说，物理学家们纷纷站队，两派几乎水火不容。一开始人们倾向于牛顿的微粒说，因为沿直线传播的光线怎么看也不像波，但是随着光的干涉（见图 3-1）、衍射等现象的发现，人们开始倾向于波动说，粒子说逐渐式微。

既然光是一种波，那么它到底是什么波呢？1865 年，英国物理学家麦克斯韦建立了完善的电磁场理论，预言了电磁波的存在，他通过计算发现，电磁波的传播速度与光速吻合，于是大胆地预言光就是电磁波。1888 年，德国物理学家赫兹用实验证明了电磁波的存在，并确认电磁波就是光，光就是电磁波。至此，波动说似乎完胜粒子说。

但是，故事还没有结束，因为波动说无法解释光电效应等实验现象，人们又陷入了困惑。后来，还是爱因斯坦慧眼过人，指出光既具有粒子性又具有波动性，他提出光由携带能量的基本粒子——光子组成，光子具有波粒二象性。波粒二象性是一种很奇怪的性质，光在需要被当作粒子看待时，它就是光子流，在需要被当作波看待时，它就是电磁波，所以我们既可以把它当“光线”看，也可以把它当“光波”看，你可以根据自己研究的方便随意选取，这实在是太不可思议了。波粒二象性是一种普遍的量子现象，并非光子所独有，其他粒子也都有这种性质，量子的神奇绝对超乎你的想象，感兴趣的读者不妨一读拙著《从量子到宇宙——颠覆人类认知的科学之旅》（清华大学出版社，2017年）。

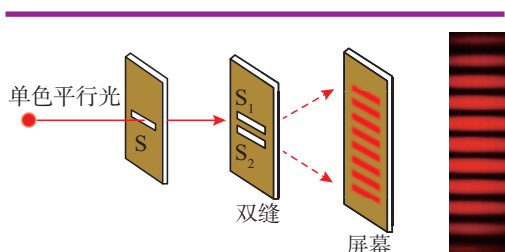
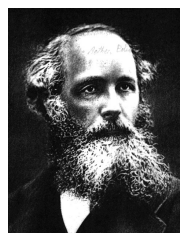


图 3-1 杨氏双缝干涉实验示意图。用单色平行光照射一个窄缝 S ，窄缝相当于一个线光源。 S 后放有与其平行的两狭缝 S_1 和 S_2 ，双缝后面放一个屏幕，可观察到明暗相间的干涉条纹。干涉是两列波叠加而产生的相长与相消现象，所以这个实验证明了光是一种波



詹姆斯·克拉克·麦克斯韦 (James Clerk Maxwell, 1831—1879)，英国物理学家。在科学史上，牛顿把天上和地上的运动规律统一起来，实现了第一次大融合；而麦克斯韦则把光和电磁波统一起来，实现了第二次大融合。他于 1873 年出版的《电磁通论》奠定了电磁学基础，成为重要的物理学经典。描述电场、磁场与电荷密度、电流密度之间关

系的麦克斯韦方程组，可以概括所有宏观电磁现象，被誉为世界上最优美的方程之一。爱因斯坦评价其建树“是牛顿以来，物理学最深刻和最富有成果的工作”。

虽然麦克斯韦建立了完善的电磁学理论，但当时人们对电磁波的传播介质并不清楚。人们认为既然声波、水波等波都需要传播介质，那么电磁波也应该有传播介质。于是学者们推断，“以太”就是光的传播介质。在他们的假想中，以太是充满了整个空间的一种弹性粒子，透明而稀薄。

麦克斯韦并没有挑战以太说，他认为麦氏方程组得出的光（即电磁波）的传播速度是光相对于以太的传播速度。其实，麦氏方程组并未对参考系的性质作过特殊规定，但当时以太说太根深蒂固了，以至于连麦克斯韦也深信不疑。

3.2 寻找以太行动

既然以太充满整个空间，那么地球在以太的汪洋大海中遨游，和以太之间必有相对运动，就好像以太在反方向漂移。这就给人们提供了一种可能的途径，即通过测量以太的漂移速度，来证实以太的存在。于是，一场大规模的、持续几十年之久的寻找以太的行动开始了。

麦克斯韦很关心以太漂移的测量，他认为光速只有相对于以太这个参照系才是确定的，相对于其他参照系是会变化的。而这一点，正好可以用来证实以太的存在（见图 3-2）。他在为《大英百科全书》撰写的“以太”条目中提出，可通过测量相反方向的光速变化来确定以太相对于地球的漂移速度，但他同时指出，这个变化量只有亿分之一，很难测量。

1879 年，麦克斯韦写信给美国航海天文历编制局（U.S. Nautical Almanac Office），咨询有关寻找以太的天文学可能性。这封信被迈克尔

逊读到了，当时，年仅 25 岁的迈克尔逊正在那里进行光速测量工作。麦克斯韦的信让迈克尔逊对寻找以太产生了兴趣，不久，他就迈出了决定性的一步。他设计出了一种新的光学干涉系统——迈克尔逊干涉仪，通过两束彼此垂直的光的干涉来比较光速的差异，据此可判断以太的存在。这种干涉仪的灵敏度极高，可以达到麦克斯韦要求的精度：亿分之一。

图 3-3 所示为迈克尔逊制作的干涉仪原型，实验在 1881 年完成。可是，让迈克尔逊失望的是，他并没有发现光速差异现象。

1886 年，迈克尔逊找到一个合作者莫雷，继续这个实验。迈克尔逊—莫雷实验使用的基本装置还是迈克尔逊干涉仪，不过经过巧妙设计，其稳定性和灵敏度大大提高。他们满怀信心，认为这次一定有把握发现以太，而实验结果则震动了整个物理学界。

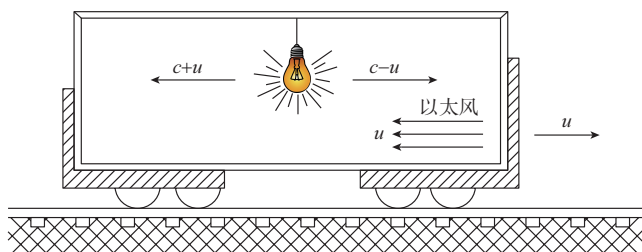


图 3-2 当时人们认为，受“以太风”的影响，光速是会变化的。在一个相对于以太以速度 u 运动的火车中，等效于以太风向反方向“刮风”，因此，如果打开一盏电灯，则沿着运动方向的光速是 $c-u$ ，反方向上的光速是 $c+u$

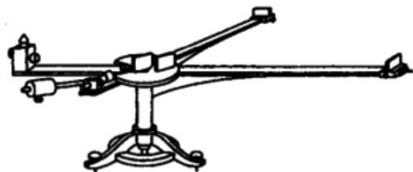
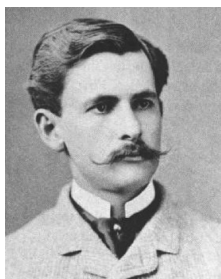


图 3-3 最早的迈克尔逊干涉仪



迈克尔逊 (Michelson, 1852—1931), 波兰裔美国物理学家。从 1879 年至 1926 年, 迈克尔逊后从事光速测量工作近 50 年。1907 年, 迈克尔逊因发明光学干涉仪并用其进行光学研究而成为美国第一个诺贝尔物理学奖获得者。1926 年, 他测定的光速值为 $299\,796\text{ km/s}$, 和现在的国际标准值 $299\,792.458\text{ km/s}$ 已经很接近, 成为当时公认的光速值。但是迈克尔逊为大众所熟知并不是因为光速测量工作, 而是因为著名的迈克尔逊-莫雷实验。

3.3 迈克尔逊-莫雷实验: 最成功的失败

迈克尔逊-莫雷实验使用的基本装置还是迈克尔逊干涉仪, 其原理如图 3-4 所示。该装置的核心部件是位于中间的分束器, 用 B 来表示。分束器是一种光学器件, 它能使射到它上面的光一半透射一半反射。单色光源 S 发出的光, 经分束器 B 分成反射光束 1 和透射光束 2, 二者互相垂直。光束 1 经反射镜 M_1 反射, 返回 B 后再透射到接收器 D 中; 光束 2 经反射

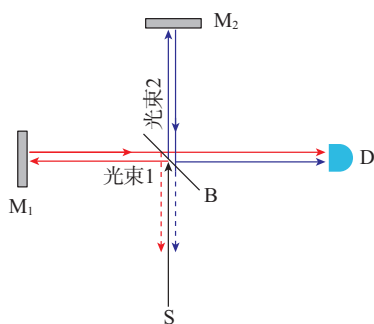


图 3-4 迈克尔逊干涉仪原理图。该仪器的优点在于光源 S、两个反射面 M_1 和 M_2 、接收装置 D 四者在空间完全分开, 东、西、南、北各据一方, 便于在光路中安插其他器件, 以便进行精密测量。它设计精巧, 用途广泛, 许多其他干涉仪是由此派生出来的

镜 M_2 反射后也返回 B，再反射到接收器 D 中。于是两束射向 D 的光会相互叠加发生干涉，在 D 上出现干涉条纹（见图 3-5）。

假设地球公转会产​​生以太风，在图 3-4 中，光束 1 和光束 2 相互垂直，二者受以太风的影响程度不同，其光速是不一样的，所以两束光在分束器与反射镜之间折返所用的时间不同。如果这个装置不断旋转，则光路与以太飘移方向的角度不断变化，两束光的速度将会相应地不断变化，所以它们返回分束器的时间差不断变化，最后反映到干涉条纹上的结果就是干涉条纹会不断地移动，具体数值可根据光程差的变化计算。

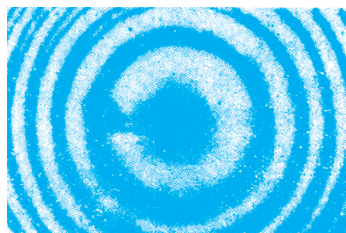


图 3-5 迈克尔逊-莫雷实验中产生的干涉图样。当时实验中的环状条纹是用高精度望远镜测量的，现在这种测量则使用光电二极管探测器，其精度远高于望远镜

为了提高干涉仪的稳定性和灵敏度，迈克尔逊和莫雷把光学系统安装在大石板上，石板浮在水银槽上，可以自由旋转改变方位。而且光路经巧妙设计可多次反射，光程延长至 11 m，比迈克尔逊 1881 年实验的精度提高了 10 倍。

他们认真地测量了 4 天，然而，实验结果却令他们大失所望。如图 3-6 所示，图中虚线代表干涉条纹理论位移的 $1/8$ ，也就是说，理论曲线应该比图中虚线放大 8 倍。根据理论值，干涉条纹最大位移会达到 0.4λ （ λ 为光波波长），而实际位移小于 0.01λ ，这基本处于误差范围之内。也就是说，光速根本没有变化。两人非常失望，于是把原定的后续测量计划全部取消了。

实验结果发表后，科学界大为震惊。虽然仍有科学家试图从物体运

动会拖曳以太一起运动来进行解释，但这样的解释很快就被一些新设计的实验所否定。后来不断有科学家改进实验装置，以提高测量精度，甚至考虑到了让装置缓慢反向转动以补偿地球自转产生的影响，但结果是，测量越精确，越证明光速不变。到

2009 年时，测量结果表明光速在各个方向的差异小于 3 nm/s，显然，这只能归结于测量误差，光速是不变的。

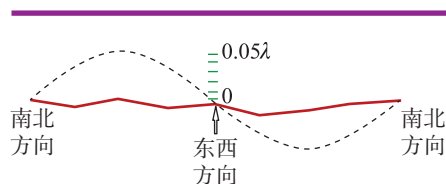


图 3-6 迈克尔逊-莫雷实验得到的曲线。 λ 为光波波长，实线是装置沿东南西北方向旋转一周的实验结果，虚线要放大 8 倍才是理论预期值

3.4 洛伦兹的离奇假说：长度收缩

迈克尔逊-莫雷实验对以太说是致命的打击，光速看上去丝毫不受以太的影响，也许以太压根就不存在。但是当时的学界权威可不敢这么想，他们绞尽脑汁地为以太说辩护。为了保留以太理论，同时还能解释迈克尔逊-莫雷的实验结果，著名的荷兰电磁学家洛伦兹（Lorentz）于 1892 年提出了长度收缩假说。

洛伦兹发现，如果假设迈克尔逊干涉仪沿地球运动方向臂长缩短，就能解释迈克尔逊-莫雷实验。于是他提出一个假说：一条相对于以太运动的刚尺，会在运动方向上产生收缩，但垂直于运动方向不会收缩。假设刚尺相对于以太静止时的长度为 l_0 ，则当它沿长度方向相对于以太以速度 v 运动时，其长度将收缩为

$$l = l_0 \sqrt{1 - v^2/c^2} \quad (3-1)$$

这一收缩被称为洛伦兹收缩。根据洛伦兹收缩计算迈克尔逊干涉仪的光路距离，会发现两束光之间不再有光程差，干涉条纹将不会移动。

洛伦兹认为这种“收缩”是一种真实发生的物理现象，他将其原因归之于分子力的作用。

这个假说提出之后，由于它纯属推测，因此受到人们的普遍质疑。1902年，英国物理学家瑞利指出，长度收缩如果是真实的物理现象，则可导致透明体的密度发生变化，从而产生双折射现象（一条入射光线产生两条折射光线的现象）。瑞利亲自做了实验，但未观察到双折射现象产生。两年后，美国光学专家布雷斯以精湛的实验技术重复了瑞利的实验，其观测灵敏度达到 $10^{-12} \sim 10^{-13}$ ，但是，他也没有观察到双折射现象。

除此以外，洛伦兹的假说还被其他一些实验所否定。这些实验都表明，物体不存在真实的收缩，洛伦兹假说是严重缺陷的，这也意味着，拯救以太的努力最终以失败告终，以太说已经走到了尽头。

3.5 发射假说：光速受光源影响吗？

以太说已经走进了死胡同，必然会被抛弃，但是路在何方却无人知晓。在大家都在黑暗中摸索的时候，两个新理论出现了，一个是瑞士专利局技术员爱因斯坦于1905年提出的相对论，另一个是瑞士物理学家里兹（Ritz）于1908年提出的“发射假说”。

发射假说虽然晚于相对论的提出，但它毕竟是物理学家提出的，所以在当时影响还挺大的。爱因斯坦在一次采访中谈到，在1905年以前，他曾经考虑过后来里兹提出的发射假说，但很快就放弃了，他对采访者说，按发射假说，传播的光会糟糕地完全“混杂在一起”，甚至可以“向着自己后退”，这是一个糟糕的假说。那么我们就来看看这个糟糕的假说是如何糟糕的吧。

里兹否定了以太的存在，他假设光是光源以恒定的速度 c 发射出来的，并不需要借助任何媒质来传播。但他认为如果光源以速度 v 运动，

则光的速度应为 v 和 c 的叠加。比如一个手电筒以 1000 km/s 的速度前进，那么打开手电筒，其发出的光将会以 $301\,000 \text{ km/s}$ 的速度前进。这其实是最简单的速度叠加原理。

用发射假说可以解释迈克尔逊-莫雷实验。在迈克尔逊干涉仪中，光源相对于测量系统是静止的，那么水平和垂直方向的两束光的速度就一样，不会变化，自然不会有干涉条纹的移动。

但是这个假说很快就被各种实验证据所否定，实验原理很简单，只要测量运动物体发出的光的速度就可以了。

首先是在双星轨道观测中得到的证据。所谓双星，是两颗恒星围绕它们共同的质量重心互相绕转。从地球上观察，这两颗恒星的运动方向不同，且不断变化，有时候朝向地球，有时候背向地球，按发射假说，它们发出的光速也在不断变化，这样我们就会看到双星的运行会忽快忽慢，轨道也会不断发生变化。但天文观测却从来没有看到过这些现象，说明光速与光源的运动无关。

还有人曾用运动光源来做迈克尔逊-莫雷实验，以便检验光源的运动对光速是否有影响，结果是并没有影响。

最有说服力的，是粒子加速器发明以后，测得被加速到接近光速的粒子辐射出的光仍为光速。粒子加速器是利用电场加速带电粒子的装置，在加速器中，电场将粒子向前推进加速而达到高能高速状态。20 世纪 60 年代，科学家们在加速器内制造出达到 $0.999\,75c$ 高速的 π^0 介子。 π^0 介子寿命极短，会在极短时间内衰变为 γ 光子，这就相当于你用一个以 $0.999\,75c$ 运动的光源发出 γ 光，按发射假说，此 γ 光的速度将达到 $1.999\,75c$ ，但测定结果却是，此 γ 光的速度仍为光速。

这些事实有力地说明，对于光来讲，不论光源如何运动，光速都是不变的！

4

经典时空变换

人们很早就发现，什么是运动、什么是静止，必须在有参照物的情况下才变得有意义。如果你在一列没有窗户也没有声音还没有颠簸的匀速行驶的火车里睡着了，醒来的时候你能判断火车停没停吗？这个问题我们在日常生活中有体验，你肯定知道答案：不能。但是，如果要你把这件事情总结成一条物理原理，你能总结出来吗？要知道，这可是物理学中一条极为重要的原理，连相对论都是从这个原理中孕育出来的呢！

4.1 运动的相对性与惯性系

当我们坐火车时，列车停稳后，我们会说停在站台上的车厢处于静止状态，列车启动后，我们说它处于运动状态，它会先经历一个加速运动过程，然后进入匀速运动状态。

大家都知道，我们所说的列车的状态都是相对于地面而言的，如果相对于地心或太阳而言，就不是这样的状态了。所谓“坐地日行八万里，巡天遥看一千河”。我们坐在地上不动，这是相对于地面静止，可要是相对于地心的话，地球在自转，我们也跟着旋转，所以“坐地日行八万里”；如果再考虑地球绕太阳的公转、太阳系绕着银河中心的公转，那就是“巡天遥看一千河”了。

由此可见，静止和运动都是相对的。在描述物体的运动时，必须首先选定另一个物体作为参照，否则就没有意义。为了描述运动物体与参照物体之间相对位置的变化，需要给参照物体固连一个坐标系，这就叫

作参照系（或叫参考系）。

同一物体相对于某一参照系是静止的，对另一参照系则可能是匀速运动的，对再一参照系又可能是非匀速运动的。因此，要说明一个物体是运动或静止，必须事先明确所用的参照系。如果在某个参照系中，一个不受外力作用的物体将保持静止或匀速直线运动状态，我们就把这个参照系叫惯性系。

如图 4-1 所示，如果 S 为一惯性系，则任何相对于它静止或相对于它作匀速直线运动的参照系都是惯性系，而相对于它作加速运动的参照系则是非惯性系。

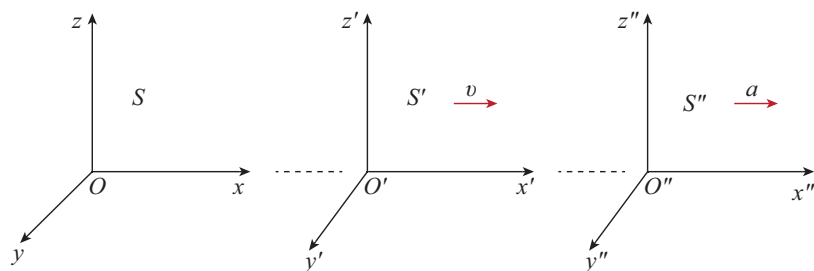


图 4-1 如果 S 为惯性系，则相对于 S 作匀速直线运动的参照系 S' 也是惯性系，而相对于 S 作加速运动的参照系 S'' 是非惯性系

严格来讲，惯性系是不存在万有引力作用、不存在自身加速度的参照系，由于宇宙中无处不在的引力，所以宇宙中不存在真正的惯性系，只可能在局部区域选择近似惯性系。实践表明，在研究地面上物体小范围内的运动时，地面是一个良好的惯性系；但在研究航天器的运行时，必须考虑地球缓慢自转的影响，这时地心坐标系（坐标原点在地心）就是一个更精确的惯性系；如果研究空间探测器的星际飞行，还需考虑地球的绕日公转，应以日心坐标系作为惯性系。

4.2 伽利略相对性原理

运动的相对性并不难理解，所以古人很早就知道了这一现象，成书于东汉以前的《尚书纬·考灵曜》中就有这样的记载：

“地有四游：冬至，地上行北而西三万里；夏至，地下行南而东三万里；春秋二分是其中矣。地恒动而人不知，譬如闭舟而行，不觉舟之运也。”

《尚书纬》在隋时被禁焚毁，但《考灵曜》中的这段文字仍然保存下来，见于隋代以后的历代典籍中。虽然在转引中个别字稍有增减，但基本内容是一致的。

这段话说明了两个意思。第一，说明了古人知道地球在绕着太阳运动，而且是规律的周期运动；第二，说明了人感觉不到地球运动的原因，与坐在封闭的船舱中时感觉不到船的行驶是一个道理。

对于第二个意思，伽利略在《关于托勒密和哥白尼两大世界体系的对话》中有过一段更生动的描述：

“船停着不动时，你留神观察：鱼向各个方向随便游动；水滴滴进下面的罐子中；你双脚齐跳，无论向哪个方向跳过的距离都相等。当你观察完这些现象后，再使船以任何速度前进，只要船是匀速的，也不左右摆动，你将发现，上述现象没有丝毫变化，你也无法从其中任何一个现象来确定船是在动还是不动。”

这些现象我们在日常坐车坐船的经历中早已习以为常了，我们都知道在匀速直线前进的车、船中，其力学规律与地面上完全一样。这种现象如果用物理学的语言来表述，就是：力学定律在所有的惯性坐标系中都是等价的。或者说：在任何一个惯性系中，都不可能通过任何力学实验，来确定这个参考系是处于静止状态还是匀速直线运动状态。这就是所谓的“伽利略相对性原理”。你可千万别小看这条看似简单的原理，它对相

讨论的诞生可是起过莫大的推动作用呢。

4.3 伽利略时空变换

伽利略相对性原理提出后，严谨的物理学家们希望通过数学的方法来证明它。证明过程涉及一组简单的坐标变换式，大家为了纪念伽利略，把此变换命名为伽利略变换。

出一道简单的应用题：你去车站送朋友，你们一个在车上，一个在车下，面对面站立。当火车启动后，假设忽略加速过程，火车以速度 v 匀速直线前进，那么经过一段时间 t 以后，你的朋友离你有多远？

你肯定会不假思索地给出答案： vt 。没错，就是这么简单，这就是伽利略变换的基本原理。

如图 4-2 所示，设 S 和 S' 是两个相对运动的惯性系（比如说 S 是地面， S' 是匀速运动的火车），设它们的坐标轴 x 和 x' 重合， S' 以速度 v 相对于 S 沿 x 轴作匀速直线运动。

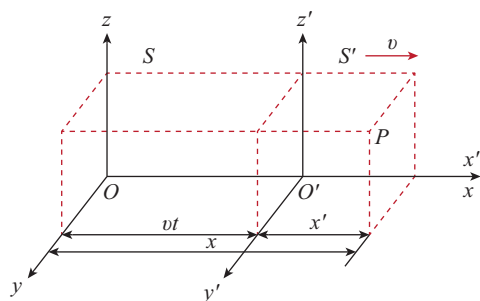


图 4-2 P 点在两个惯性系里的坐标变换

现在，让我们来研究空间中任意一点 P 的坐标变换。设 P 点在 S 系里的空间坐标为 (x, y, z) ，在 S' 系里的空间坐标为 (x', y', z') 。当两个坐标原点 O 和 O' 重合时，取 $t=t'=0$ ，于是，两组坐标之间有如下关系：

$$\left. \begin{aligned} x' &= x - vt \\ y' &= y \\ z' &= z \end{aligned} \right\} \quad (4-1)$$

两个坐标系的时间之间是什么关系呢？根据牛顿绝对时间的观念，有

$$t' = t \quad (4-2)$$

式(4-1)和式(4-2)组合起来就是著名的伽利略变换。由于这四个式子既包含空间坐标，又包含时间坐标，合起来就是时空坐标 (x', y', z', t') 与 (x, y, z, t) 之间的变换，所以称之为时空变换。

如果把这个坐标变换代入牛顿力学定律中，你就会发现，当 S 系的力学定律被变换到 S' 系中时，形式是一模一样的，这就证明了伽利略相对性原理。

在伽利略变换中，空间距离和时间间隔是绝对的，与参考系无关，所以它可以看作绝对时空观的数学表述。

上述内容是不是太简单了？没错，经典的时空变换就是这么简单，因为它就是我们日常的生活体验嘛！但是，不要得意得太早，我们把时空想得太过简单了！伽利略变换在牛顿力学中看似无懈可击，但随着电磁学的发展，其破绽开始逐渐显现了。

5

狭义相对论的建立

1900 年，新世纪的第一年，物理学已经走到了大变革的边缘。这一年，德高望重的英国物理学界权威开尔文勋爵已经 76 岁了，为经典物理学贡献毕生的他，对物理学的发展还是相当满意的，但满意之余却也夹杂着一丝忧虑。他意识到，如果一些困扰人们长达几十年的问题不解决，物理学是难以前行的。

4 月 27 日，开尔文在英国皇家研究学会发表题为《飘在热和光动力理论上空 的 19 世纪乌云》的著名演讲，指出在经典物理学的晴朗天空中飘浮着两朵“乌云”，第一朵是黑体辐射规律无法解释，第二朵是以太理论矛盾重重。开尔文没想到，他所提到的这两朵乌云带来了 20 世纪即将发生的最激动人心的物理学变革：量子力学和相对论。

有时候，幸福来得就是那么突然。同年 12 月，德国科学家普朗克提出能量量子化假设，量子理论由此发端，第一朵乌云已经拨云见日了。那么，驱散第二朵乌云的重任会落到谁的肩上呢？当人们把期盼的目光投向各所大学的知名教授时，恐怕谁也没有注意到那个名不见经传的专利局小职员——阿尔伯特·爱因斯坦。

5.1 巨变的前夜

长期以来，伽利略相对性原理被应用于各种力学问题中，一直都很好用。到了 19 世纪末期，随着电磁学的发展，人们对相对性原理的普适性有了更深的兴趣，于是自然而然地产生了一个疑问：电磁学定律是不是

在所有惯性系中也是等价的？也就是说，相对性原理能否从力学定律扩展到电磁学乃至一切物理定律？它是否是一个普遍性的原理？

因为当时物理学家们把伽利略变换和相对性原理等同起来，所以他们解决这个问题的方式是：看看麦克斯韦电磁理论在伽利略变换下是否形式不变。然而，结果却令人失望，麦克斯韦方程组似乎并不遵从相对性原理。

在电磁理论中，光速 c 是由麦克斯韦方程组导出的，假如麦氏方程组符合相对性原理，即它在所有的惯性系中形式相同，那么就能得出一个结论：光速在所有的惯性系中都相等。可是如果按照伽利略变换去进行推导，得出的结论却是光速在不同惯性系中并不相等。

这个结果让人吃惊！麦克斯韦方程组、伽利略变换和相对性原理三者之间出现如此矛盾，着实让当时的物理学家们头疼不已（见图 5-1）。

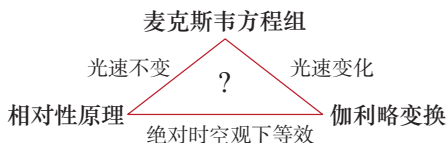


图 5-1 三者的矛盾到底出在哪里

法国科学家庞加莱坚决支持相对性原理，并于 1902 年在《科学的假设》一书中对牛顿的绝对时空观提出质疑。1904 年，庞加莱在一次题为《数学物理原理》的演讲中正式表述了“相对性原理”：“所谓相对性原理，就是指根据这个原理，不管是对于固定不动的观察者，还是对于匀速运动的观察者，各种物理现象的规律应该是相同的。”可以说，庞加莱已经走到了相对论的门前，但却没有推开这扇门。

1904 年，洛伦兹从一些假设出发，提出一组新的时空变换方程——洛伦兹变换（详见 5.4 节）来取代伽利略变换，以论证为什么观察不到光相对于以太的运动，或者说为什么观察不到光速的变化。洛伦兹虽然放

弃了伽利略变换，但他的理论仍然认为以太是电磁场的载体，而且人为地引入了 11 条假设，致使概念烦琐，理论庞杂。在他的理论中，麦氏方程组只是近似地符合相对性原理，所以他也不可能推开相对论这扇大门。

还有一本值得注意的著作，是奥地利物理学家马赫于 1883 年出版的《力学史评》。该书从经验论的观点出发，尖锐地批判了牛顿的绝对时空观，并对以太是否存在提出质疑。《力学史评》对爱因斯坦创立相对论产生了重要的影响，他后来在悼念马赫的文章中写道：“是恩斯特·马赫，在他的《力学史评》中冲击了这种教条式的信念，当我是一名学生的时候，这本书在这方面给了我深刻的影响。”

5.2 一篇划时代的论文

正当各路专家们还在黑暗中摸索的时候，当时还默默无闻的爱因斯坦敏锐地察觉到，麦氏方程组、伽利略变换和相对性原理三者之间的矛盾就出在伽利略变换上。因为伽利略变换代表的是绝对时空的坐标变换，而绝对时空观本身就是有问题的。所以他选择了一条正确的道路：抛弃绝对时空观和根本不存在的以太，放弃伽利略变换，建立新的时空变换关系。他建立的新变换和洛伦兹 1904 年提出的变换差不多，所以也叫洛伦兹变换（详见 5.4 节）。这样一来，矛盾就解决了（见图 5-2）。

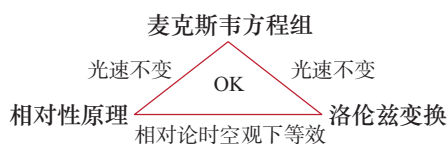


图 5-2 用洛伦兹变换取代伽利略变换矛盾就解决了

1905 年 6 月，爱因斯坦写出了论文《论运动体的电动力学》，同年 9 月，发表在著名的德文杂志《物理学年鉴》上，这篇惊世骇俗的论文彻底颠覆了人们对时空的传统观念，正式创立了划时代的新理论——狭义

相对论。

研究力与运动之间关系的科学称为动力学，“电动力学”简单来说就是带电物体的动力学。这篇论文很长，但是条理很清晰，分为两个部分：第一部分是运动学部分，重点提出洛伦兹变换及相对论时空效应；第二部分是电动力学部分，重点论证电磁理论在洛伦兹变换下满足相对性原理。

爱因斯坦首先在引言中否定了以太和绝对静止空间的存在，然后在第一部分提出两条公设。

(1) 相对性原理：任何物理定律在所有惯性系中都是等价的，都具有相同的数学表达形式。

(2) 光速不变原理：真空光速在任意惯性系中的速度恒为 c ，且与光源是否运动无关。

通过这两条看似简单的原理，爱因斯坦得出“同时性是相对的”的结论。这是帮助爱因斯坦厘清相对论整体思路的一个很重要的结论，他写道：

“我们不能给予同时性这个概念以任何绝对的意义。两个事件，从一个坐标系来看是同时的，而从另一个相对于这个坐标系运动着的坐标系来看，它们就不能再被认为是同时的了。”

接下来，爱因斯坦以这两个原理为基础，推导出了两个存在相对运动的惯性系之间的时空变换关系——洛伦兹变换。然后推导出“时间延缓”和“长度收缩”两种让人难以置信的相对论效应。最后推导出相对论的速度叠加定理，论证了光在真空中的传播速度是一切物体运动的极限速度。

在第二部分电动力学部分，爱因斯坦证明了麦克斯韦方程组在洛伦兹变换下保持形式不变，并讨论了洛伦兹变换对各种电动力学现象的应

用。他把洛伦兹变换施加于电场、磁场、电荷密度和电流密度，解决了一系列电磁学上的疑难问题。最后，还提出了几个关于电子运动性质的预言，并指明这些性质可以通过实验来验证。

在这篇论文里，爱因斯坦遵循着一条逻辑演绎路线，开头介绍旧理论不能解释的难题，对旧理论提出质疑；然后提出两个普遍性的原理，再由此推导出结果，解决难题；最后得出几个可以用实验来验证的预言。整篇论文一气呵成，脉络清晰、论证严密，是科学史上不可多得的佳作。

爱因斯坦的论文简洁明晰，不光表现在行文布局方面，还在于科学概念的高度概括。这篇论文只有两条公设，而洛伦兹 1904 年的论文却包含了 11 个假设。爱因斯坦曾多次强调简单性原理，他认为科学的伟大目标是“要从尽可能少的假说或者公理出发，通过逻辑的演绎，概括尽可能多的经验事实”。

5.3 相对性原理和光速不变原理

爱因斯坦建立狭义相对论的基础是两条基本公设，狭义相对论的所有结论都是从这两条公设导出的，所以我们有必要来仔细分析一下这两条公设。

第一条是相对性原理，表述为：任何物理定律在所有惯性系中都是等价的，都具有相同的数学表达形式。

伽利略相对性原理只适用于牛顿力学定律，而爱因斯坦的相对性原理适用于一切物理定律，是伽利略相对性原理的推广。这条原理肯定了所有惯性系的平权性、不可分辨性，否定了绝对静止惯性系的存在，由此彻底否定了绝对时空的存在。这条原理也为电磁学的发展扫除了障碍，电磁理论在此基础上才发展成为完整的、适用于任何惯性系的理论。

另外，这条原理虽然叫“相对性原理”，说的却是物理定律的绝对性，

由此我们才能理所当然地总结各种物理定律，而不必费心考虑它是哪个坐标系里的定律。

第二条是光速不变原理，表述为：真空光速在任意惯性系中的速度恒为 c ，且与光源是否运动无关。

这条原理指出，任意一个惯性系中，不论光源运动还是观测者运动，对所有的观测者来说，测出的真空光速都是相同的，光速是一个基本常数。

很多人可能都曾经想过，如果我们跑得足够快，能否追得上一束光？这正是爱因斯坦 16 岁时苦思冥想的一个问题。根据直觉，我们会觉得只要跑得足够快，我们会离这束光越来越近，如果我们也能跑得像光一样快的话，就能和这束光齐头并进。但是，26 岁的爱因斯坦却告诉你，你的直觉是错误的，不论你跑得多快，你永远不会追上前面的任何一束光，光永远以每秒 30 万 km 的速度离你远去，这就是光速不变原理。比如图 5-3 所示的例子中，无论何种情况下测得的光速都是 c 。

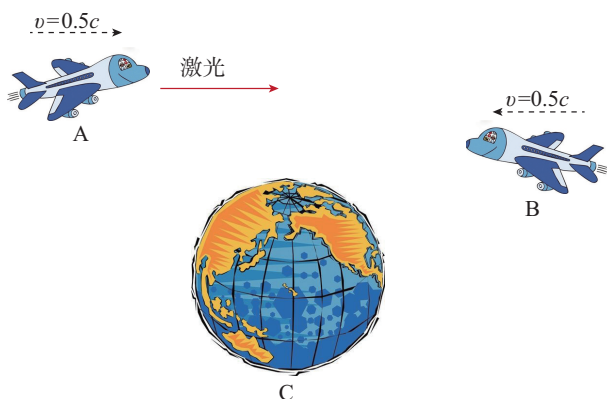


图 5-3 宇宙飞船 A 相对于地球 C 以 $0.5c$ 的速度飞行，宇宙飞船 B 相对于地球以 $0.5c$ 的速度与 A 反向飞行，如果 A 发出一道激光，则 A、B、C 三处的测量者测得这道激光的速度都是光速 c

你也许会觉得光速不变原理难以理解，但所有实验都证明事实就是这样的，比如我们在 3.5 节提到的那些例子。而由光速不变原理所揭示的时空性质也被各种实验所证实。一切事实都表明，它是对的！

光速不变原理完全摒弃了以太理论，根本没有以太什么事儿。这样，在以太理论下难以解释的迈克尔逊-莫雷实验就迎刃而解了。在这个实验中，根本就不存在地球相对于以太的速度，也不存在以太漂移速度，所以整个实验体系处于地球惯性系中，是一个静止的装置，光速又恒定不变，因而光在水平和垂直方向不会产生光程差，所以不可能会有干涉条纹的移动。

由此，人们对电磁场的认识也发生了一个飞跃，电磁波可以不需要任何介质直接传播，和水波、声波等机械波的传播原理完全不同，这使人们认识到电磁波就是电磁场本身的运动形式，而不是在某种介质内的机械振动现象。

在相对论中，相对性原理和光速不变原理是作为公设提出来的，它们不能为逻辑所证明，只能由实验来验证。迄今为止，所有的实验都是支持这两条原理及其所推得的各种结论的，所以将其上升到原理的高度并无不妥。

5.4 洛伦兹变换

前面提到，1904 年，洛伦兹提出洛伦兹变换来取代伽利略变换，而 1905 年，爱因斯坦也推导出了一组时空变换方程——也称为洛伦兹变换，奠定了狭义相对论的基础。那么，这两个洛伦兹变换到底是什么关系呢？它们是完全一致的吗？

很多书上都说二者是一致的，说爱因斯坦推导出来的方程就是洛伦兹已经得到的方程。笔者以前对此也深信不疑，因为都叫洛伦兹变换嘛！

后来看的书多了，发现个别书上说二者不一致，笔者将信将疑。现在自己要写书了，为了不误人子弟，必须亲自核实一下，于是费了九牛二虎之力找出两人写的原始论文来核对，这不看不知道，一看吓一跳，原来两种变换根本不一样！

我们先来看一下爱因斯坦 1905 年发表的论文《论运动体的电动力学》中提出的变换。

如图 5-4 所示，设 S 和 S' 为两个作相对运动的惯性系，设它们的坐标轴 x 和 x' 重合， S' 系相对于 S 系以速度 v 沿 x 轴作匀速直线运动。 t 是 S 系中的时间， t' 是 S' 系中的时间，当两个坐标系的原点 O 和 O' 重合时，取 $t=t'=0$ ，则两组时空坐标之间有如下变换关系：

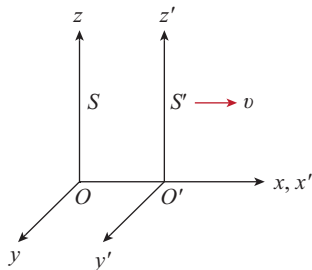


图 5-4 洛伦兹变换坐标系示意图

$$\left. \begin{aligned} x' &= \frac{x - vt}{\sqrt{1 - v^2/c^2}} \\ y' &= y \\ z' &= z \\ t' &= \frac{t - \frac{v}{c^2}x}{\sqrt{1 - v^2/c^2}} \end{aligned} \right\} \quad (5-1)$$

式中 c 为光速。这个变换是爱因斯坦在相对性原理和光速不变原理的基础上推导出来的。

下面再来看一下洛伦兹 1904 年发表的论文《速度小于光速的运动系统中的电磁现象》中提出的变换。

仍然可以参照图 5-4，设 S 系为一个相对于以太静止的惯性系（即绝对空间系）， S' 系为相对于 S 系沿 x 方向以速度 v 运动的惯性系，则二者之间的变换关系如下：

$$\left. \begin{aligned} x' &= \frac{x}{\sqrt{1-v^2/c^2}} \\ y' &= y \\ z' &= z \\ t' &= \frac{\left(1 - \frac{v^2}{c^2}\right)t - \frac{v}{c^2}x}{\sqrt{1-v^2/c^2}} \end{aligned} \right\} \quad (5-2)$$

对于这个变换，洛伦兹并没有给出推导过程，而是直接通过假设引入。

对比这两组变换式，显然它们是大有区别的，最重要的区别有以下三点。

(1) 爱因斯坦的变换表示的是任意两个惯性系之间的时空变换，而洛伦兹的变换表示的是某一惯性系相对于以太系的时空变换。

(2) 变换公式看起来相似，其实不一样，这一眼就看出来了。

(3) 从爱因斯坦的变换中，可以得出两个惯性系的坐标之间满足以下关系：

$$x^2 + y^2 + z^2 - c^2 t^2 = x'^2 + y'^2 + z'^2 - c^2 t'^2$$

这是一个描述时空性质的非常重要的等式，我们以后讲四维时空时离不开这个式子，而洛伦兹的变换则不满足此等式。

无论是从变换提出的方式，还是从变换的严谨性和物理意义来看，个人认为爱因斯坦的变换都不能看作洛伦兹的变换的发展，而是完全不同的全新变换，也许应该叫爱因斯坦变换才更合适。但由于相对论刚发表时人们还没有认识到它的重大意义，甚至还有很多人反对相对论，加之爱因斯坦又是没有名气的年轻人，于是爱因斯坦的变换基本被大家无视了。

到了1906年，庞加莱在一篇名为《电子动力学》的论文中，对洛伦兹1904年提出的变换进行了修正，这才写出了与爱因斯坦变换形式完全

一样的变换式，庞加莱将其命名为“洛伦兹变换”，由此一直沿用了下来。要知道，庞加莱一直是反对相对论的。爱因斯坦率先提出这个变换，却没有得到命名权，这不能不说是一个历史性的遗憾。

洛伦兹变换是狭义相对论的理论基础，在狭义相对论中占据中心地位，爱因斯坦指出：“相对论要求物理学中的方程在洛伦兹变换下保持形式不变。”正是这条判据，引导爱因斯坦发现了震惊世界的方程： $E=mc^2$ 。

比较伽利略变换和洛伦兹变换可看出，如果两个惯性系之间的相对速度远远小于光速，则洛伦兹变换可转化为伽利略变换。这说明伽利略变换是洛伦兹变换的低速近似。

5.5 狭义相对论的发展

《论运动体的电动力学》发表后不久，爱因斯坦就发现了一个不为人知的关系——质量和能量的关系。他写信给好友说：

“我又发现电动力学论文的一个推论。相对性原理同麦克斯韦方程一道，要求质量成为一个物体中包含能量的一种直接量度。”

爱因斯坦在 1905 年很快发表了第二篇有关狭义相对论的论文，题为《物体惯性与其所含能量有关吗？》，专门讨论了惯性和能量的关系。在这篇论文中，他利用洛伦兹变换和相对性原理，发现物体的质量是其所含能量的量度。随后不久他就提出了著名的质能方程 $E=mc^2$ 。这样一来，质量的内涵就被大大地扩充了，质量和能量成了等价的概念。

1908 年，爱因斯坦的大学数学老师闵科夫斯基提出了把三维空间和一维时间结合成一个四维空间的思想。四维闵氏空间既充分体现了相对论的时空关联的思想，又为相对论提供了优美的几何图像，大大促进了相对论的发展。几十年后，爱因斯坦给出了这样的评价：

“在闵科夫斯基之前，为了检验一条定律在洛伦兹变换下的不变性，

人们就必须对它实行一次这样的变换；可是闵科夫斯基却成功地引进了这样一种形式体系，使定律的数学形式本身就保证了它在洛伦兹变换下的不变性。”

1909年以后，相对论的结论为越来越多的实验所证实，比如对高速粒子的观察证实了相对论质量随速度变化的关系式，相对论的动量和能量表达式解释了氢原子光谱的精细结构，相对论质能关系在核反应实验中的应用，等等。事实表明，相对论已成为现代物理的坚实基础。

附录 一块石头的成长史

1879年3月14日，一个普通的星期五，这一天，德国乌尔姆市诞生了一个不起眼的小婴儿——阿尔伯特·爱因斯坦（Albert Einstein）。他的父母都是犹太人，父亲是一个不太成功的小工厂主，母亲则是一位钢琴家。

爱因斯坦名叫阿尔伯特，爱因斯坦是他的姓。在德文中，“爱因斯坦”这个词的意思是“一块石头”。这个姓听起来挺有趣，如果放在中国，爱因斯坦也许应该姓“石”。

爱因斯坦看上去有点发育迟缓，直到三岁还不会说话，可把他的父母急坏了。好在有一天他突然开口说话了，说的话还挺长，挺令人费解。那天有个小姑娘骑小自行车来访，从未开过口的小爱因斯坦突然冒出一句话：“是的。可是，她的小轮子在哪儿呢？”这句无厘头的话语让客人迷惑不解，却让他的父母欣喜若狂，谢天谢地，他终于开口说话了。

爱因斯坦还是三岁时，有一天妈妈在弹钢琴，忽然发现小爱因斯坦正歪着脑袋全神贯注地倾听，妈妈开玩笑说：“瞧你这一本正经的样子，像个大教授！”妈妈不知道，她竟然无意中猜中了爱因斯坦未来的职业。

爱因斯坦从小就对科学表现出异乎寻常的兴趣。五岁那年，父亲送给他一个指南针，指南针的指针永远只朝着一个方向，让他感到非常惊奇，觉得一定有什么深层次的东西隐藏在这个现象后面。这个指南针他玩了好长时间，这种深刻而持久的印象，他直到老年时还能鲜明地回忆出来。

6岁的时候，爱因斯坦开始学拉小提琴，像其他孩子一样，他开始时也不喜欢拉琴，只是为了服从妈妈而不得不把小提琴夹在下巴底下练习。但到13岁的时候，他终于体会到了演奏的技巧和奥妙，从此，他喜欢上了小提琴，小提琴也成为陪伴他一生的乐器。爱因斯坦曾说过：“如果我不是物理学家，就可能会变成音乐家。我整天沉浸在音乐之中，把我的生命当成乐章。我生命中大部分欢乐都来自音乐。”

12岁那年，一个受到爱因斯坦父母资助的俄国犹太大学生送给爱因斯坦一本《圣明几何学小书》，爱因斯坦第一次接触到了欧几里得几何。研究直线、圆、多边形的平面几何从几个简单的公理就可以推出许多复杂的定理，简明扼要，推理清晰。12岁的爱因斯坦被其中的逻辑与美学彻底迷住了，他很快就自学完了这本书。爱因斯坦后来曾说：“12岁时的我，刚开始接触基础数学就惊喜地发现，仅仅通过推理便可能发现真理……我越来越相信即便是自然也能被理解为一种相对简单的数学结构。”

从此，爱因斯坦对数学产生了极大的兴趣，他开始学习更高一级的数学知识。到16岁时，他已经自了解析几何、微积分等高等数学内容，而且认真地通读了一本科普读物《自然科学通俗读本》。从这本书中，爱因斯坦知道了整个自然科学领域里的主要成果和方法，这对他将来步入物理领域有着深刻的影响。

《自然科学通俗读本》把光速问题放在第一卷的最前头，以此作为所有自然观察的开端，这个读本还讨论了“如何测量地球重量”“如何测量电流速度”“光强和距离有什么关系”等有趣的问题。从这本书中，爱因

斯坦了解到了很多关于光的知识。16岁那年，他就开始思考一个问题：如果他以光速追随一束光，那么他将看到什么景象？电磁波会在身边凝固吗？他后来回忆道：“在阿劳中学这一年中，我想到这样一个问题，如果一个人以光速跟着光波跑，那么他就会处在一个不随时间变化的波场中，但看来不会有这种事情！”正是这样的思考为他开启了发现光速不变原理的大门。

17岁时，爱因斯坦考入苏黎世联邦理工学院的数学物理师资班。在大学里，他的数学老师是数学家闵可夫斯基，但爱因斯坦不喜欢听他的课，经常逃课，以至于闵可夫斯基对爱因斯坦印象很不好，甚至说他是懒虫。当时两人谁也不会想到，他们日后竟会深深地交集在一起，联手开创一片物理新天地。

爱因斯坦的物理教授韦伯是一位电工专家，由于爱因斯坦喜欢物理，韦伯最初对他印象不错，爱因斯坦第一次考大学落榜时，韦伯还鼓励他下次再考。上大学之初，爱因斯坦以很大的热情去听韦伯的课，还经常到韦伯的实验室做实验。但后来，他发现韦伯讲的课程内容比较陈旧，特别是电磁理论，竟然不包括麦克斯韦的电磁场理论，这令他大失所望，于是爱因斯坦物理课也经常逃课。

爱因斯坦在学校附近租了一间小阁楼，买来了物理大师们的著作，躲在小阁楼里自学。他认为自学有助于独立思考问题。正如他后来记述的那样，他以“虔诚的狂热”拜读了基尔霍夫、亥姆霍兹、赫兹、玻尔兹曼、洛伦兹、麦克斯韦等人的主要著作。

这个师资班只有5个人，爱因斯坦老不去上课，也不知道老师们是怎么想的，竟然听之任之。可是考试怎么应付呢？幸亏学校里一共只考试两次，大二期末一次，大四毕业一次，而且爱因斯坦还有两个好同学帮忙，这两个好同学就是米列娃（后来成了爱因斯坦的女朋友）和格罗

斯曼。他们每堂课都不落，笔记记得特别认真，课后还要加以整理，每遇考试，爱因斯坦就借他们的笔记突击复习。这种考前突击还真见成效，大二期末的考试，爱因斯坦居然考了第一名，格罗斯曼反而是第二名。可是大四毕业考试，爱因斯坦只考了个第四，米列娃更是只考了第五——倒数第一。

爱因斯坦的理论功底那是没得说，不过，他的实验技能可能要差一些。他有一次做实验因为没有按照规范操作，结果发生了爆炸，当然没多大规模，但把他的右手炸伤了，一段时间里都没法写字。看来，天才也不可能在任何方面都是天才，还是要认清自己的特长。爱因斯坦这一点就做得非常好，他后来只搞理论不做实验，但是他关心别人的实验进展，也设计实验让别人去验证，他把自己的特长发挥到了极致。

毕业时，格罗斯曼和另两位同学都留校做了助教。爱因斯坦向韦伯申请留下来做物理助教，但韦伯没答应，而是把助教空缺给了两个机械系的学生，这使爱因斯坦的自尊心受到了极大的伤害，他带着遗憾离开了学校。而他的女朋友米列娃则连文凭都没有拿到。

毕业即失业，找工作对爱因斯坦来说成了一个难题。他在随后两年的时间里没有固定职业，只做过临时的中学代课教师。好在后来在好友格罗斯曼的帮助下，他终于被瑞士伯尔尼专利局录用为技术员，从事专利申请的技术鉴定工作，这一年是1902年，爱因斯坦23岁。这份工作拯救了爱因斯坦，他在后来纪念格罗斯曼的信件中写道：“这对我是一种拯救，要不然，即使未必死去，我也会在智力上被摧毁了。”

第二年，爱因斯坦和米列娃正式成婚，米列娃不仅要承担一个家庭主妇的责任，还经常和爱



爱因斯坦在专利局办公室里的照片

因斯坦讨论物理问题，协助爱因斯坦做数学计算和撰写论文。

在专利局工作的爱因斯坦并没有放弃对物理的狂热，他与贝索等几位热爱科学与哲学的好友组织了一个叫作“奥林匹亚科学院”的读书俱乐部。几个年轻人利用休息日或下班时间，一边读书一边讨论。阅读的内容广泛，包括哲学、物理、数学和文学等。他们读了马赫、安培、亥姆霍兹、黎曼、庞加莱等人的著作，尤其是庞加莱的名著《科学与假设》，他们连着讨论了几个星期。这个小组活动了三年左右，于1905年秋天停止。这些读书和讨论活动对爱因斯坦建立相对论有重要影响，爱因斯坦自己也高度评价这个俱乐部，认为俱乐部培养了他的创造性思维，促成了他在学术上的成就。虽然俱乐部停了，但好友贝索和爱因斯坦终身都保持着联系，无论有什么想法，爱因斯坦都会写信与贝索交换意见，后来，贝索先于爱因斯坦一个月离世，二人可谓是一辈子的知音。

厚积必然薄发。1905年，爱因斯坦震动了世界。他在德国的《物理学年鉴》上连续发表了四篇论文，分别为《关于光的产生和转化的一个启发性观点》《根据热的分子运动论研究静止液体中悬浮微粒的运动》《论运动体的电动力学》《物体惯性与其所含能量有关吗？》。这四篇论文每一篇都具有划时代的意义——第一篇提出光子概念，对量子力学有奠基性作用；第二篇提供了原子存在的重要证明；第三篇提出了狭义相对论，相对论正式诞生；第四篇证明了物体的质量是其所含能量的量度。随后不久他就提出了著名的质能方程 $E=mc^2$ 。后来，1905年被称为“爱因斯坦奇迹年”。

应该说，爱因斯坦是非常幸运的。他的首篇相对论论文《论运动体的电动力学》没有引用任何参考文献，没有做任何物理实验，只是做了“思想实验”就推翻了牛顿的时空观和流行的以太说，而且他还只是一个

名不见经传的专利员！这样的论文，如果被别的审稿人遇到，很可能就被丢到垃圾桶里去了，幸运的是，他遇到的审稿人是独具慧眼的物理学大师普朗克。爱因斯坦这几篇论文都投到了普朗克主编的顶级期刊《物理学年鉴》上，而普朗克则连续支持了爱因斯坦所有论文的发表，从而使1905年成了爱因斯坦的奇迹年。正是普朗克的慧眼识珠，才使爱因斯坦顺利走上了物理学界的康庄大道。

6

震惊世界的 $E=mc^2$

考察一个物理方程是否满足相对性原理，就要看它在洛伦兹变换下是否具有不变的形式。爱因斯坦已经证明，电磁学定律在洛伦兹变换下形式不变，但遗憾的是，牛顿力学定律并不满足这一点，因此，牛顿定律是需要修正的。通过相对论修正，爱因斯坦发现了质量和能量之间的神秘联系： $E=mc^2$ 。这一公式简洁而优美，以至于家喻户晓，几乎成了相对论的代名词。

6.1 光速极限

牛顿力学定律满足的是伽利略变换，由伽利略变换可以推出经典的速度叠加公式。举例来说，如果火车相对于地面的运动速度是 v_1 ，当你在火车上以速度 v_2 向前跑时，你相对于地面的运动速度 v 就是

$$v = v_1 + v_2 \quad (6-1)$$

在我们日常生活体验中，这个公式是毫无问题的，可是，假如速度能达到光速的量级，比如这列火车的速度是 $0.8c$ ，你在火车上跑步的速度是 $0.6c$ ，那么你相对于地面的运动速度是多少呢？

如果按经典叠加公式，那就是 $1.4c$ 了，轻轻松松超光速，但是爱因斯坦告诉我们，这是错的，光速是一切物体运动的极限速度！为什么呢？因为经典公式是由伽利略变换得到的，而伽利略变换在高速状态下就不适用了。

既然如此，这个速度该怎么算呢？显然，这时候我们要通过洛伦兹

变换来导出速度合成公式，具体导出的公式如下：

$$v = \frac{v_1 + v_2}{1 + \frac{v_1 v_2}{c^2}} \quad (6-2)$$

把上述例子中的 $v_1=0.8c$ 和 $v_2=0.6c$ 代入上式，可以得出 $v=0.946c$ ，也就是说，在地面的人看来，你并没有超过光速。显然，如果 v_1 和 v_2 远远小于光速 c ，那么上式就可以近似成经典的速度叠加公式。

从式（6-2）可以看到，如果在火车上发出一道光，即 $v_2=c$ ，那么在地面上测量这道光的速度为

$$v = \frac{v_1 + c}{1 + \frac{v_1 c}{c^2}} = c \quad (6-3)$$

显然，不论火车和地面之间的相对运动速度 v_1 是多少，在地面测量的光速都是 c ，这正是光速不变原理的反映。

6.2 时间能否倒流？

按照牛顿力学，宇宙中是没有极限速度的。给物体施加一个恒定的作用力，根据牛顿第二定律，物体会产生一个恒定的加速度，不管这个加速度有多小，只要力的持续时间足够长，总可以得到超过光速的速度。比如，一艘宇宙飞船从地球上出发，给它施加一个恒定的推力，使其加速度为 10 m/s^2 ，按照牛顿力学，它只要一年时间就能达到光速，然后超过光速。

如果是这样，就会出现一种不可思议的情景：你会看到时间倒流！你能看到一个婴儿出生，是因为这个婴儿反射的光线进入你的眼睛里，假如没有大气层阻挡，这些光线会飞向宇宙深处，这个婴儿随后的生长、衰老直至死亡的影像光线也会连续不断地飞向宇宙深处。如果一个外星人观察这些光信号，他将看到这个婴儿从出生到死亡的全过程，这没有

问题。但是如果你坐上飞船从地球出发，并不断加速直至超过光速，那你将先看到这个人死亡，然后才看到这个人出生，因为你先追上的是后面的光线，再追上才是前面的光线。这是多么奇怪的景象啊！完全不符合因果逻辑。

这样的情景到底会不会出现呢？相对论告诉我们：不会！按照相对论，一切物理定律必须在洛伦兹变换下保持形式不变。遗憾的是，牛顿力学定律并不满足这一点。牛顿定律只是在伽利略变换下形式不变，这说明牛顿定律只是力学定律在低速状态下的近似，高速状态下是不适用的。

那么我们该如何修正力学定律呢？修正要满足两点要求：第一，修正后的力学定律应当在洛伦兹变换下保持形式不变；第二，当物体的运动速度远小于光速时，修正后的运动方程能自然地转化为牛顿运动方程。

结果发现，满足以上两点的唯一要求是，牛顿力学方程中的质量 m 必须用下式替换：

$$m = \frac{m_0}{\sqrt{1 - u^2/c^2}} \quad (6-4)$$

式中， m_0 是物体在某一惯性系中保持静止时的质量——静止质量； m 是物体在该惯性系中以速度 u 运动时的质量——运动质量（或称相对论质量）。可见，物体的质量随速度增大而增大，质速关系曲线见图 6-1。如果静止质量不为零，那么速度接近光速时，物体的质量将趋于无穷大。比如一个体重 70 kg 的宇航员，如果飞行的速度达到 $0.99c$ ，那么他的质量将接近 500 kg，但是他自己却不会感到任何变化。

质量增加效应需要在极高的运动速度下才能显示出来，对宏观物体而言，这样的速度太难达到了，而被加速器加速的微观粒子则成为满足这个条件的绝佳试验品。在美国斯坦福大学的直线电子加速器中，当电子被加速到 $0.98c$ 时，其质量会变为静止质量的 5 倍；当电子被加速到 $0.999\ 999\ 999\ 7c$ 时，其质量会变为静止质量的 4 万倍，完全符合相对论

的预言。

这样，如果给物体施加一个恒定的作用力，由于物体质量随着速度的增加而变得越来越大，它的加速度就会越来越小，当速度接近光速时，质量趋于无穷大，是无法用有限的外力使其继续加速的，所以光速就成为极限速度，是不可能超越的^①。比

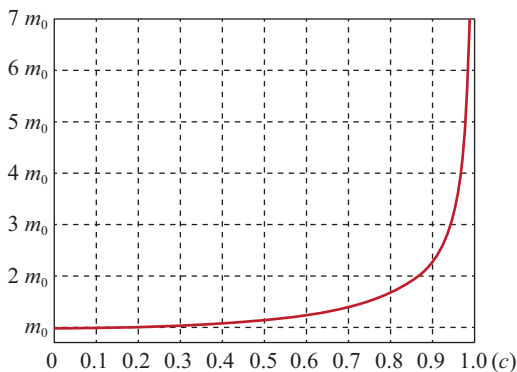


图 6-1 物体质量随速度的变化关系（横坐标是光速的倍数）

如本节开头所举的例子，虽然按照牛顿力学计算这艘飞船 1 年内就能达到光速，但根据相对论可知，1 年后其速度只能达到 $0.76c$ ，2 年后能达到 $0.96c$ ，4 年后能达到 $0.9993c$ ^②……它只能无限接近光速，但永远不能超越。

所以，如果按照相对论理论来看，就不存在时间倒流的问题。因为在相对论中，首先，宇宙飞船不会超过光速，其次，不论它以多大的速度飞行，光相对于它永远是光速。也就是说，它永远不会追上以前的任何一束光，在宇宙飞船上的人绝不会看到过去发生的任何事情，时间不

① 狭义相对论指出，任何物体的运动速度以及任何信号的传递速度都不可能大于光速，这称为光速极值原理。但是第三者观察两个物体的相对速度是可以超光速的，因为第三者观察的是两个对象而不是一个对象。比如你站在铁轨中间，看到两列火车分别以 $0.6c$ 的速度朝两头开走，那你测量两列火车的相对分离速度就是 $1.2c$ ，但是在这两列火车上测量对方的速度都是 $0.88c$ ，并没有超光速。另外，不能传递信息的速度也是可以超过光速的。

② 这个时间是以宇航员的手表为标准的，由于时间延缓效应（见第 7 章），宇航员的 4 年相当于地球时间大约 27 年。

会倒流!

6.3 三大守恒定律的秘密

动量守恒定律、能量守恒定律和质量守恒定律是大家熟知的三大守恒定律。那么在相对论中,质量随速度变化,这些守恒定律又该如何遵守呢?

大量实验表明,动量守恒定律是一个普遍的定律,既适用于宏观领域,也适用于微观领域(比如光子和电子的碰撞、光子转化为电子等),既适用于低速运动系统,也适用于高速系统,它是自然界中最普遍的基本规律之一。

在相对论中,动量在形式上仍可写作 $p=mu$, 不过式中的 m 应为相对论质量,即相对论动量表示式为

$$p = mu = \frac{m_0 u}{\sqrt{1 - u^2/c^2}} \quad (6-5)$$

这就是牛顿定律的爱因斯坦修正。式中 u 表示所选惯性系中物体的运动速度。

通常情况下,动量守恒定律表述为:若质点体系不受外力作用,或所受外力的合力为零,则系统的总动量保持不变。

牛顿摆是一个体现动量守恒定律的最直观的装置(见图 6-2)。5 个质量相同的小球由吊绳固定,彼此紧密排列,当摆动最左侧的球撞击其他球时,最右侧的球会被以相同速度弹出;当最左侧的两个球同时摆动并撞击其他球时,最右侧的两个球会被弹出;摆动 3 个、4 个也都一样。

在牛顿摆中,球与球之间的碰撞属于弹性碰撞。打过台球的人都知道,当母球撞击一个静止的球时,如果碰撞合适,母球会停在原地,而被撞球会以母球的速度被击出,我们称此为弹性碰撞。

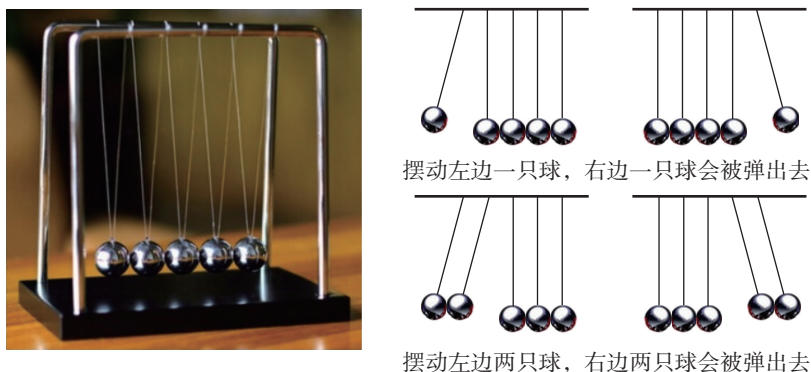


图 6-2 牛顿摆既体现了动量守恒定律，也体现了能量守恒定律。比如拉起左边两只球，如果右边一只球以两倍的速度弹出去，动量也是守恒的，但这种情况却从来不会发生，就是因为能量不守恒的原因

另一种情况，如果两个物体碰撞后合成一体，则称之为完全非弹性碰撞，比如一颗子弹打进一个木块，然后留在木块中和木块一起运动。

让两个质量和速率都相等的小球对撞，如果是弹性碰撞，这两个小球会反向弹开，以原速反向运动；如果是完全非弹性碰撞，则两个小球会结合在一起而停在碰撞点。由于碰撞过程产生的作用力都是内力，并没有外力作用，所以这两种情况的动量都是守恒的，即碰撞之前的总动量等于碰撞之后的总动量。

现在我们来考虑上述完全非弹性碰撞现象。假定两个相同的小球（静止质量为 m_0 ）以相等的速度 u 相向运动，彼此碰撞后结合在一起，成为一个新的物体，如图 6-3 所示。根据动量守恒原理，新物体保持静

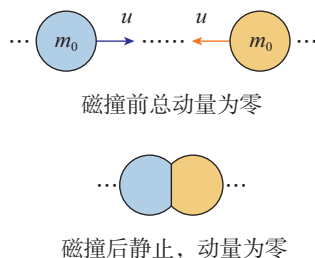


图 6-3 两个小球的完全非弹性碰撞

止。那么这个合成后的新物体的质量是多少呢？

你也许会说，肯定是 $2m_0$ 啊，因为质量守恒嘛！且慢下结论，要知道，在相对论中，质量可是会变化的。根据相对论质量公式，小球的运动质量等于 $m_0/\sqrt{1-u^2/c^2}$ ，两个小球合并为一个物体，质量加在一块，于是可得到新物体的质量为 $2m_0/\sqrt{1-u^2/c^2}$ 。因为新物体静止不动，所以这就是它的静止质量。

但真是太让人吃惊了，让两个静止质量为 m_0 的物体运动起来，它们合成的新物体的静止质量竟然会大于 $2m_0$ ！那么这些多出来的质量是从哪里来的呢？

我们来分析一下：两个小球的运动速度 u 越大，运动质量就越大，多出来的质量就越多。 u 越大，意味着小球的动能就越大，而最终的复合物体是静止的，其动能为零，也没有其他能量放出。那么，小球的动能跑哪儿去了呢？显然，能量被吸收了。被吸收的能量并没有凭空消失，而是转换成质量储存了起来，复合物体多余的质量就是由小球的动能转换而来的！

能量和质量可以相互转换，这可以说是相对论中最惊人的发现！

你可能会问，能量转换成了质量，能量守恒定律岂不是被破坏了？其实，能量守恒定律不但没被破坏，这里还包含着一个更深层次的规律：质量和能量是等价的，能量守恒等价于质量守恒，这两个守恒定律其实是同一条守恒定律！用爱因斯坦的话说，就是：“质量守恒定律失去了它的独立性，而同能量守恒定律融合在一起了。”

值得一提的是，在四维时空（见第 8 章）中，能量和动量可以结合成一个四维矢量，叫“四维动量”或“能量-动量矢量”，这个四维矢量是守恒的，称为能量-动量守恒定律。这个四维矢量的三维空间分量就是动量，且保持守恒；而它的时间分量则是能量，也保持守恒。也就是说，

我们熟知的动量守恒定律和能量守恒定律实际上是一个统一的能量-动量守恒定律的分定律^①。

在相对论中，质量守恒和能量守恒是一回事儿，而动量守恒和能量守恒又被统一成了一条定律，闹了半天，原来三大守恒定律竟然就是一条定律啊！

6.4 质能等价： $E=mc^2$

能量和质量的转换关系在相对论中是可以严格推导出来的。爱因斯坦在相对论建立后不久就发现了二者之间的内在联系：

$$E=mc^2 \quad (6-6)$$

这个公式叫相对论质能方程，爱因斯坦将其总结为：获得质量需要能量，质量消失释放能量。当光速 c 用米/秒 (m/s) 为单位，质量 m 用千克 (kg) 为单位时，能量 E 的单位是焦耳 (J)。由于 c^2 数值巨大，因此很小的质量就对应着巨大的能量。

对于运动物体，式中的 m 是其运动质量，即

$$E = mc^2 = \frac{m_0 c^2}{\sqrt{1 - u^2/c^2}} \quad (6-7)$$

从上式可见，当 $u=0$ 时，即物体静止时，它的能量并不为零，而是

$$E_0 = m_0 c^2 \quad (6-8)$$

E_0 称为物体的静止能量或固有能量。也就是说，即使物体没有运动，只要其静止质量不为零，它就已经具有了能量。这是一个异常巨大的能量，例如 1 g 任意物质都蕴藏着 9×10^{13} J 的能量，相当于燃烧 3000 t 煤的化学能。尽管物体的固有能量很大，但是它蕴含在物质内部，在没有释放出

① 后来德国女数学家诺特发现，任何严格的守恒律都和某种对称性有关。例如，物理规律在时间平移下不变，会导致能量守恒；在空间平移下不变，会导致动量守恒；在空间转动下不变，会导致角动量守恒。这三种对称性说明，不存在绝对时间、绝对空间位置和绝对空间方向。

来以前，是测量不出来的，因此在牛顿力学时代人们始终不知道这一点。

显然，当物体的质量发生 Δm 的改变时，能量有相应的变化 ΔE ，它们之间的关系是

$$\Delta E = \Delta mc^2 \quad (6-9)$$

由上式可见，如果一物体的质量发生变化，则物体的能量也一定有相应的变化。当物体吸收或放出能量时，必伴随以质量的增加或减少。应当注意的是，这里 ΔE 并不仅指动能的变化，它包括各种能量变化，如物体因吸热或放热、吸收或辐射光子等所引起的能量变化。任何能量变化都伴随着质量变化，通电以后的灯泡、加热以后的物体、压缩以后的弹簧，因为能量增加，它们的质量比原来都会有所增加。比如 1 kg 水从 0 °C 加热到 100 °C 时，质量会增加 4.7×10^{-12} kg。

如果我们将总质量为 1 g 的一个个分离的电子聚到一起，并迫使它们聚集成一个直径 10 cm 的球体，你能猜到这个球体的质量会有多大吗？由于电子之间相互排斥，需要很大的能量才能维持它们不分开，因而这个聚集体的质量将达到 400 亿 kg！

由此可见，方程 $E=mc^2$ 所表达的意思远非质量和能量可以相互转换这么简单，它表达的真正意思是：能量和质量是等价的，质量就是“凝结了”的能量，质量和能量是同一枚硬币的两面！对此，爱因斯坦在一次演讲中有过精彩的总结：

“质量和能量在本质上是类同的，它们只是同一事物的不同表达形式而已。物体的质量不是一个常量，它随着其能量的变化而变化。”

6.5 光速的本质

在历史上，爱因斯坦第一个发现光具有波粒二象性，后来德布罗意指出实物粒子也具有波粒二象性，并获得实验证实。

虽然光子和电子、质子等实物粒子一样，都具有波粒二象性，但是它们之间却有着本质的区别：光子的运动速度和光波的传播速度是相等的，都是光速 c ；而实物粒子的运动速度并不等于其物质波的传播速度。之所以出现这种差别，就是因为静止质量的差别：光子的静质量为零，而实物粒子的静质量不为零。这个差别造成的结果是，光子的速度永远是 $3 \times 10^5 \text{ km/s}$ ^①，而实物粒子永远也达不到这个速度。

需要注意的是，虽然光子的静质量为零，但它的动质量并不等于零。相对论和量子力学表明，光子的动质量由光波频率决定，频率越大，其动质量就越大。

在物理学家们建立的粒子物理标准模型中，宇宙中存在 62 种基本粒子，其中有三种基本粒子的静止质量为零，分别是光子、胶子（强力的传递粒子）和引力子（物理学家预言引力的传递粒子是引力子，但到现在还没有找到），而它们的运动速度都等于光速。

为什么它们都以光速运动呢？这并不是巧合，而是必然的结果。通过相对论动量公式和质能方程可以证明以下两条结论：

- （1）以光速运动的粒子，静止质量必为零；
- （2）静止质量为零的粒子，必以光速运动。

仔细思考以上结论，你就会发现，光速并不仅仅是光的速度，它是静止质量为零的粒子的特定运动速度。这就是光速的本质。如果你不嫌麻烦的话，可以把光速叫作零静质量粒子速度。

在此之前，你的头脑中也许出现过以下疑问：凭什么光速不变？凭什么光的速度就是极限速度？凭什么光就这么特殊？现在了解了光速的

^① 爱因斯坦曾说，他一辈子也没想明白什么是光子。他并不是在开玩笑，试想，光子只能以 $3 \times 10^5 \text{ km/s}$ 的速度运动，那么，它是如何没有经过加速过程就直接达到这个速度的呢？其他难以理解的现象还有不少，感兴趣的读者可参阅拙著《从量子到宇宙》。

本质，你头脑中的疑问就会消除了，光并不特殊，特殊的是静止质量为零的粒子，它们被迫以光速在宇宙中飞行。静质量为零是质量的极限，所以它们的飞行速度就是速度的极限，这是宇宙自身的规律所决定的。

6.6 核时代的开启

20 世纪二三十年代，人们经常用 α 粒子轰击各种原子以进行核物理研究， α 粒子其实就是氦原子核，是带正电的。1932 年，中子被发现后，意大利物理学家费米意识到，如果用中子作为入射粒子对原子进行轰击，要比 α 粒子有效得多。因为中子是中性的粒子，轰击原子核时不受电磁排斥作用，会有更大的碰撞几率。他立刻和助手们开展实验，制造中子源，按照元素周期表的顺序依次轰击各种原子。

到 1934 年春，费米小组已经用中子轰击过 68 种元素，然后开始轰击当时所知的最重的原子——U-238。

铀是元素周期表里的 92 号元素，天然铀矿中的铀有三种原子，它们都有 92 个质子，但中子数分别是 142、143 和 146。把质子数和中子数加起来就是它们的核子数，分别是 234、235 和 238，因此科学家们把这三种铀原子记作 U-234、U-235 和 U-238。U-234 在铀矿里的含量只有大约 0.006%，可以忽略不计，U-235 的含量在 0.7% 左右，剩下的全是 U-238。

费米小组发现，用中子轰击 U-238 得到的产物和用中子轰击其他重元素大不一样，使他们大为惊异。其实，他们已经发现了原子的核裂变现象，不过，费米当时做出了错误的判断，以为是发现了 93 号元素，因此错过了这一发现。

1938 年底，德国化学家哈恩用慢中子轰击铀，经过一系列精细的实验，他确定在产物中出现了元素钡。哈恩对此无法解释，于是将实验结果写信告诉了跟他长期合作过的同事迈特纳（奥地利女物理学家）。迈特

纳当时正跟她的侄子弗利胥在一起，弗利胥也是物理学家，两人自然少不了对哈恩的结果讨论一番。

弗利胥起初对此结果表示怀疑，但迈特纳坚信哈恩工作严谨，不可能有错。在争论中，弗利胥想起了玻尔（丹麦物理学家，量子力学领军人物）不久前提出的“液滴核模型”。这个模型是说，在某些情况下，可以把原子核想象成液滴，在外来能量的作用下，“液滴”可能由于振动而拉长。他们想，如果这时原子核被中子击中，就可能发生分裂，铀核被分裂成更轻的原子核，所以出现了钡。

核裂变现象终于被发现了，弗利胥和迈特纳立即撰文论证重核裂变的产生，“裂变”一词就是他们提出来的。

核裂变一经证实，科学家们马上意识到，由于轻重元素的原子核质量不同，核裂变过程会有可观的质量损失，会释放出巨大的能量，具备制造威力巨大的原子弹的潜力。很快，德国、美国、苏联、日本都启动了核武计划。最终还是美国一马当先，于1945年试爆成功第一颗原子弹，人类从此进入了有核时代。

6.7 核裂变与原子弹

在通常的物理、化学或生物反应中，系统释放出能量，也是由于系统的质量减小造成的，但这个减小的量微乎其微，与其静质量相比小得几乎无法观测。但在核裂变反应中，系统的静质量会发生可观的改变，从而释放出巨大的能量。

如果你把元素周期表拿来，仔细研究原子核的组成，就会发现一个有趣的现象：随着原子序数的增大，中子数在核子中所占的比例越来越大。在20号元素之前，原子中的质子数和中子数大致相等；20号元素以后，中子数和质子数的数目差距越拉越大。比如8号元素氧，O-16有8个质

子和 8 个中子，中子比例为 50%；而对于 56 号元素钡，Ba-138 有 56 个质子和 82 个中子，中子比例为 59.4%；到了 92 号元素铀，U-238 有 92 个质子和 146 个中子，中子比例为 61.3%。

为什么中子的比例越来越大呢？这就要从核子之间的基本作用力说起了。

自然界中有四种基本作用力：引力、电磁力、强力和弱力。影响原子核稳定性的主要是电磁力和强力。强力是核子之间一种很强的吸引力，但是只能作用在原子核的尺度范围内，且随着距离增大而迅速衰减，核子间主要靠强力“聚合”在一起构成原子核。荷电粒子间的电磁力就是库仑力，大家都知道，同性相斥、异性相吸。挤在原子核里的质子因库仑作用而相互排斥，多亏了强力才把它们紧紧束缚在一起。

质子之间、质子和中子之间、中子之间都存在强力，但只有质子之间存在库仑斥力，所以中子是原子核内的“胶黏剂”。对于重原子核，由于质子比较多，它们互相间的库仑斥力比轻原子核要大得多，而且距离较远的核子之间的强力又衰减很快，因此等量的中子数已不足以保持原子核的稳定性，所以核内需要更大量的中子来充当“胶黏剂”。

仔细思考上述事实，你就会有有一个惊人的发现：如果一个重原子核被中子击中分裂成两个轻原子核，轻核实际上用不了那么多中子，就会有多余的中子释放出来，这些多余的中子又可以继续击中更多的重原子核，放出更多的中子，于是重原子核会被以几何级数增长的中子轰击，就像发生雪崩一样瞬间分裂完毕。这就是所谓的链式反应（见图 6-4）。

当然，并不是所有重核被中子击中都容易发生裂变，对于铀来说，U-238 很难裂变，而 U-235 很容易裂变。所以在制造原子弹的过程中，从含量只有 0.7% 的铀矿中分离 U-235 是一项非常艰巨的任务。U-235 的原子核被中子击中后，裂变方式有几十种，会分裂成不同的轻核，有时

会放出 3 个中子，有时会放出 2 个，偶尔还有 1 个和 4 个，平均来说，裂变产生的中子数是 2.5 个。

链式反应会使发生核裂变的原子以指数形式增长，那么，为什么核裂变会放出巨大的能量呢？

这就要用到爱因斯坦的质能关系了。我们知道，能量和质量是等价的，质量就是“凝结了”的能量。这就意味原子核的质量并不一定等于孤立核子（质子和中子）的质量和，还与它们之间的作用能有关。如果核子之间相互吸引，它们的总能量会降低，质量就会减轻；如果核子之间相互排斥，它们的总能量会升高，质量就会增大。我们把每种元素原子核中核子的平均质量做成一张图（见图 6-5），就会看到它们之间的变化规律，这张图是理解核裂变能量来源的关键。

核子平均质量在氢原子中最大，在铁原子中最小，图中给出的数值是原子质量

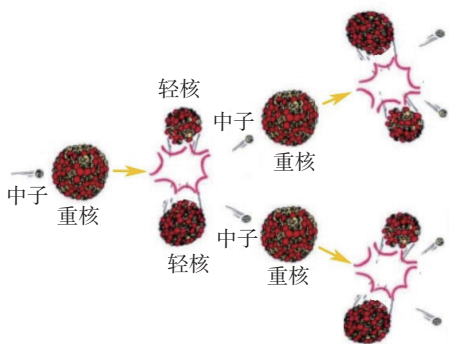


图 6-4 链式反应示意图。重原子核被中子击中后，分裂成两个轻核，同时释放出两个多余的中子，这两个中子下一步击中两个新的重原子核，又放出 4 个中子，如此持续下去，被分裂的重原子核会以指数形式增长

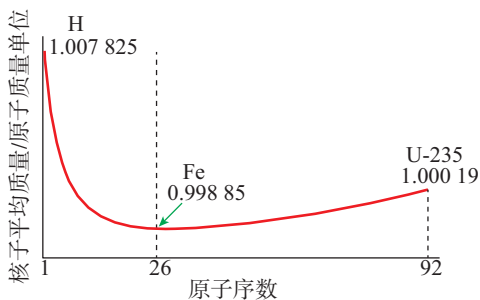


图 6-5 原子核中核子的平均质量随原子序数的变化关系

单位 ($1.66 \times 10^{-24} \text{g}$) 的倍数。

由图 6-5 可见, 最大的单个核子质量出现在氢原子中, 它只有一个孤零零的质子。随着原子序数的增加, 核子数越来越多, 它们之间既有强力的吸引作用, 又有库仑力的排斥作用 (质子之间)。总体来讲它们既然能聚在一起, 还是吸引作用更强, 因此平均质量会逐渐降低, 到了铁原子达到极小值, 这意味着铁原子中核子之间吸引最为紧密。超过铁元素后, 这一趋势反了过来, 质子间的排斥力起的作用又开始逐渐增大, 因此总能量又开始缓慢上升, 平均质量也逐渐增大。

U-235 裂变时, 分裂的碎片介于 30 号元素锌和 64 号元素镉之间, 核子的平均质量都小于原来的质量。所以, 除了释放出去的孤立中子质量稍增大一些, 其他所有核子的质量都是减少的, 最终结果是裂变后这 235 个核子的总质量会减少。这时, 方程 $E=mc^2$ 就会大显身手了, 减少的质量会转换为能量释放出去! 减少的这一点点质量虽然很小, 但乘以 c^2 (9 亿亿 m^2/s^2), 这个能量就相当可观了。

实际上, 化学反应释放能量的过程中质量也会减少, 但是由于原子核没有变化, 所以它的质量损失比核反应小得多。化学反应释放出来的能量只相当于质量减少了约十亿分之一, 而核反应的质量损失约为千分之一, 所以原子弹会释放出比普通炸弹大上千万倍的能量!

核裂变质量亏损加上链式反应就是原子弹的原理。但并非任意质量的 U-235 都会发生爆炸, 如果用量太少, 一个铀核裂变释放的中子可能没等碰到另一个铀核就从铀块表面逸出了, 链式反应就无法持续。只有达到一定量才能触发可持续的链式反应, 这个最低用量就称为临界质量。

当年德国原子弹计划的领导者海森堡就算错了 U-235 的临界质量, 他认为至少要达到 1 t! 而实际上裸铀球的临界质量仅为 60 kg, 远远小于他的估计。所以当海森堡听到广岛被原子弹轰炸的消息时, 他根本不

相信。要知道，分离 U-235 是一项非常艰巨的任务，海森堡的估算让德国人泄了气。令人啼笑皆非的是，1940 年初，美国核科学家曾将 U-235 的临界质量低估至 0.6 kg，客观上推动了美国的原子弹计划。

原子弹在储存的时候是将几块小于临界质量的核原料分开放置的，当需要引爆时将它们瞬间合并在一起超过临界质量，并通过内部放置的放射性中子源来引发反应，于是链式反应会雪崩式地建立起来，巨大的能量瞬间释放，造成恐怖的破坏力。

6.8 核聚变与氢弹

仔细分析图 6-5，你会发现铀核裂变的质量变化并不算大，质量变化最大的部分当属最开始的那一段。在这一段内，如果轻原子核聚合成稍重一点的原子核（比如氢原子核聚变成氦原子核），就会有很大的质量亏损。这就是核聚变，它会释放出比核裂变还大的能量。

氢有三种同位素，分别是氕（H-1）、氘（H-2）、氚（H-3），它们都只有一个质子，但分别有 0、1、2 个中子。氘和氚可以发生聚变反应，生成氦核（He-4）并放出一个中子。这个聚变反应释放的能量要比相同质量的铀核裂变反应大 3~5 倍。

但是聚变反应并不是那么容易发生的，为了使原子核克服库仑斥力以相互碰撞，这种反应一般需要极高的温度（要达到 1000 万℃以上），因此又叫热核聚变。太阳内部就在一刻不停地发生着热核聚变反应，每 4 个氢原子核聚变成一个氦原子核，它每秒钟都会有 430 万 t 的质量亏损，这就是太阳能量的来源。

核聚变的启动温度如此之高，在发明原子弹之前人们是根本不敢想象的。但是原子弹发明之后，人们发现原子弹爆炸中心温度竟可达到几千万摄氏度，这就为研制氢弹开创了条件。1952 年，美国以液态的氘、

氘作为热核装料，利用原子弹进行引爆，第一颗氢弹诞生了。但这颗氢弹重 65 t，体积十分庞大，没有实战价值。直到 1954 年找到了用固态的氘化锂代替液态氘作为热核装料之后，才制出可用于实战的氢弹。

核能是把双刃剑，和平利用可以作为极为高效的能源为人类服务，用于战争则会对地球造成毁灭性的破坏，何去何从，命运只掌握在人类自己手中。



牛顿时空观的颠覆

“相对论”这个名字并不是爱因斯坦本人起的，而是人们在引述爱因斯坦的理论时给它起的名字，后来爱因斯坦也认可了这个名字。这个名字很容易让人产生误解，以为一切都是相对的，其实，这个理论恰恰是建立在两个绝对性的前提之上：物理定律的绝对性和光速的绝对性。在这两个前提下，爱因斯坦发现，人们原本以为是绝对的时间和空间竟然是相对的，由此彻底改变了人们对时空的认识。

7.1 同时性的相对性

在生活中，我们经常会用到“同时”这个词，比如说“两道闪电同时击中火车的车头和车尾”，或者说“两束光线同时到达车头和车尾”，等等。

你有没有想过，在别人眼里同时发生的事情在你眼里可能并不同步呢？你也许会说，这怎么可能呢？太荒唐了！是的，这是大多数人听到这个问题的第一反应。在牛顿的绝对时间观里，宇宙中每个点的时刻在任何人看来都是一样的，那就意味着如果一个人看到两个事件同时发生，其他所有人都会看到这两事件同时发生。

但是，爱因斯坦却并不这样认为。他提出一个看似简单但还真不好回答的问题：如何判断两个事件是在同一时刻发生的？

你能答上来吗？

爱因斯坦根据光速不变原理给出了一种判断方法：假设你站在两个

地点的正中间，如果这两个地点发生的事件发出的光同时到达你的眼中，那就说明在你看来这两事件是同时发生的。

有了这个判据，我们再来分析这个问题：别人眼里同时发生的事情在你眼里也一定是同时发生的吗？

咱们来做一个实验，假设观测者可以非常精细地辨别光的飞行细节。如图 7-1 所示，设想有一列火车在地面上匀速行驶，车厢正中间有一盏灯，一个站在灯下的观察者一按开关打开灯，灯光就会向车厢两端传去。根据光速不变原理，他会看到灯光同时到达车厢的两端，即他认为光信号到达车厢前端和到达后端这两个事件是同时发生的。

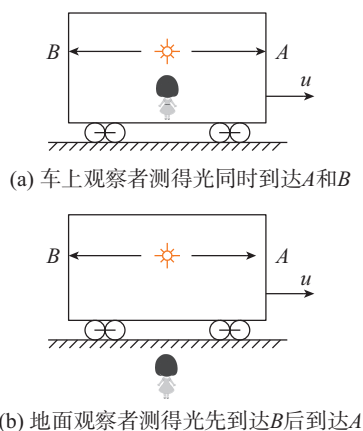


图 7-1 同时性的相对性

然而对于站在地面上的你来说，你会看到什么情景呢？当灯打开后，在你看来，灯光离开灯泡以光速向前、后传播，由于火车向行驶，光信号到达车厢两端又需要一段时间，在这段时间内车厢向前运动了一段距离，所以灯光会先击中车厢后端，然后才击中前端。故在地面上看来，光信号到达车厢两端不是同时发生的。

由此可见，同时性是相对的，在一个惯性系中不同地点同时发生的两个事件，在另一个惯性系看来不一定是同时发生的。

为什么会出现这样违反直觉的结果呢？仔细分析一下，就会发现其根源在于光速不变原理。在上面的例子中，假如光速能和火车速度按经

典速度叠加公式叠加(即向前传播的光速是 $c+u$, 向后传播的光速是 $c-u$), 那么在地面上看来, 光信号到达车厢两端也是同时的。所以说, 正是光速不变原理使得同时性失去绝对的意义, 同时只能是相对的。

需要注意的是, 在同一地点同时发生的两个事件, 在所有惯性系中都是同时的。比如在车上由两个灯泡发出两束光, 如果车上的人看到两束光同时到达车厢后壁, 那么地上的人看这两束光也是同时到达车厢后壁的。

总结一下, 就是说异地发生的两个事件, 其同时性是相对的; 而同时地发生的两个事件, 其同时性是绝对的。

上面的结论是可以通过洛伦兹变换证明的, 这一结论正是爱因斯坦建立相对论时空观的突破点。

7.2 时间延缓效应

大家可能都听说过“时间延缓”和“长度收缩”这两种看似不可思议的相对论效应。其实, 就像同时性具有相对性的根源在于光速不变一样, “时间延缓”和“长度收缩”这两种相对论效应也是光速不变原理的必然结果。这两种效应都可以通过洛伦兹变换推导出来。

“时间延缓”也叫“动钟延缓”, 简单来说就是运动的时钟会变慢。这个效应还可叫作“时间膨胀”, 就是说同样的时间间隔(比如说时钟嘀答一下、波形振荡一次、脉搏跳动一下)被拉长了, 跟时间变慢是一个意思。我们可以通过一个简单的实验来证明这个效应。

还记得第1章中讨论过的计时方法吗? 任何周期性运动的物体都可以用来做计时工具。那么我们来构建一个最精确的周期性运动装置: 光子钟!

光子钟的构造很简单, 就是上下两面镜子, 一个光子在其中来回反射, 如图 7-2(a) 所示。由于光速不变, 所以光子的来回周期是恒定不变的,

我们可以把光子在两面镜子中来回一次想象成“嘀嗒”一声，那么这台钟就嘀嗒、嘀嗒、嘀嗒……不停地开始工作了。

现在，假设你把这台光子钟带到一列火车上，当火车进入匀速行驶状态时，你打开开关让光子钟开始工作。你肯定坐过火车，所以你能想象得到，在你看来，这台钟不会发生任何变化，光子照样规律地在镜子间跳动计时，嘀嗒、嘀嗒、嘀嗒……，就跟上车前一样，如图 7-2(b) 所示。

可是，在地面上的人看来，你这台钟已经和原来不一样了，为什么呢？很简单，对地面观察者来说，他会看到光子走的是一条折线，光子镜面间走的距离增长了！如图 7-2(c) 所示。因为光速不变，所以他测量到你的光子钟时间变慢了！嘀—嗒—嘀—嗒—嘀—嗒—，比地面走得慢。

注意，火车上的你看到的光子轨迹是直上直下的，所以你不会感受到时间的变慢，你对时间的感觉和上车前是一样的。

通过简单的计算就能得知火车上的时间变慢多少。如图 7-2 所示，对于这台光子钟，在火车上观察，把光子从下镜面反弹到上镜面的时间间隔记为 T_0 ，则两镜面间的垂直距离是 cT_0 。在地面观察，把光子从下镜面反弹到上镜面的时间间隔记为 T ，则光子在这段时间内走过的距离是

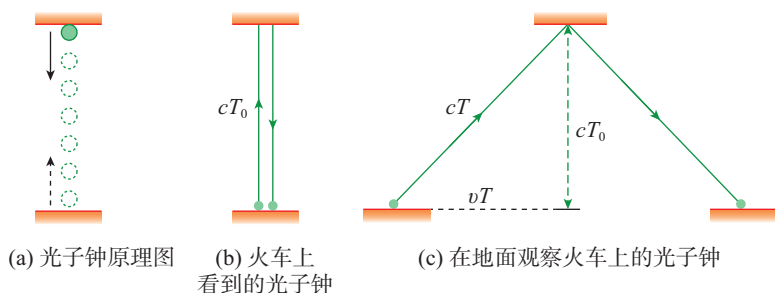


图 7-2 光子钟原理图以及不同观察者看到的光子路径