

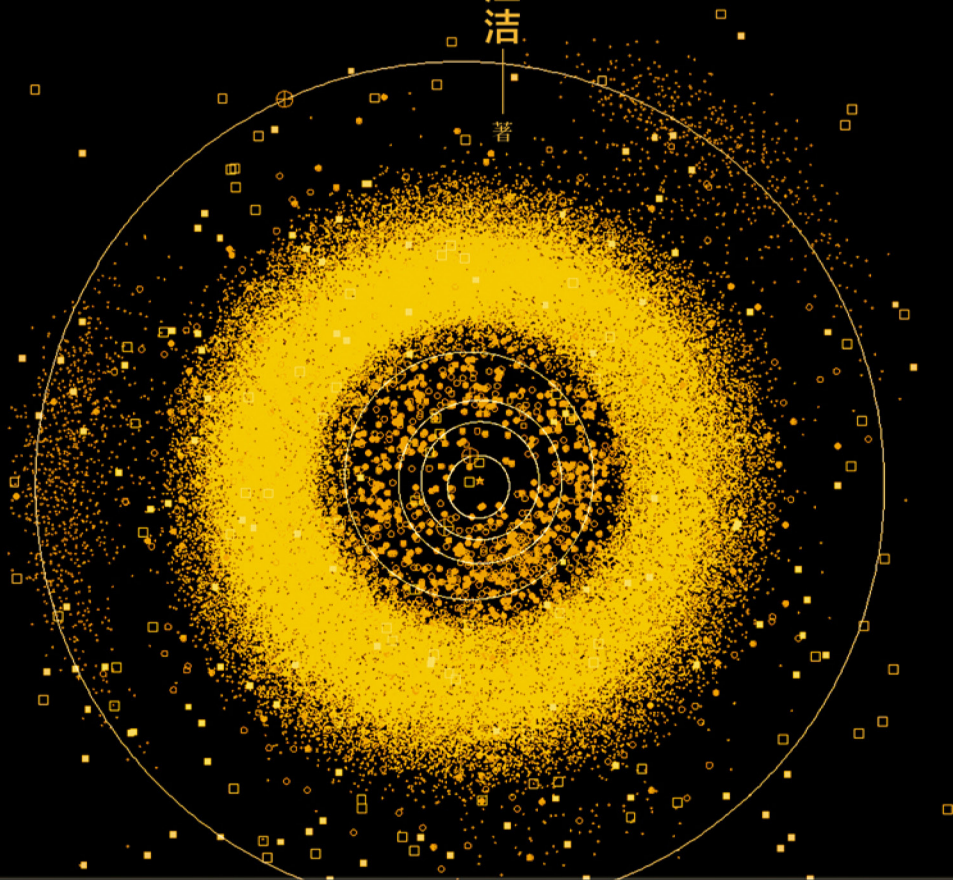
(升级版)

时间的形状

相对论史话

汪洁

著



第八届文津图书奖 获奖图书
作者汪洁历经五年全新修订 彩图升级

一本人人都能读懂的相对论，用最轻松幽默的语言讲解深奥的科学道理

永恒流淌的时间，是真的摸不着看不见，还是有形状和色彩？_____

我们所处的空间，是三维四维还是五维？_____

我们能不能穿越时空回到未来？_____

一本难得的国内科普前沿佳作，权威性与趣味性兼具
与《上帝掷骰子吗？》并称国内科普两大经典

科学声音
Voice of Science

COL 中文在线

THE SHAPE OF
TIME

时间的形状

相对论史话

汪洁
—
著

北京时代华文书局

图书在版编目 (CIP) 数据

时间的形状 / 汪洁著. -- 北京 : 北京时代华文书局, 2017. 1
ISBN 978-7-5699-1406-1

I. ①时… II. ①汪… III. ①相对论—普及读物 IV. ①0412.1-49

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2017) 第 026326 号

时间的形状：相对论史话

Shijian de Xingzhuang: Xiangduilun Shihua

著 者 | 汪 洁

出 版 人 | 王训海

选题策划 | 高 磊

责任编辑 | 余 玲 高 磊

封面设计 | 天行健设计

版式设计 | 段文辉

插图绘制 | 吴京平 钱 力 张国华 赵于君

责任印制 | 刘 银 誉 敬

出版发行 | 北京时代华文书局 <http://www.bjsdsj.com.cn>

北京市东城区安定门外大街 136 号皇城国际大厦 A 座 8 楼

邮编：100011 电话：010-64267955 64267677

印 刷 | 北京卡乐富印刷有限公司 010-60200572

(如发现印装质量问题, 请与印刷厂联系调换)

开 本 | 787mm×1092mm 1/16 印 张 | 15.5 字 数 | 206 千字

版 次 | 2017 年 4 月第 1 版 印 次 | 2017 年 4 月第 1 次印刷

书 号 | ISBN 978-7-5699-1406-1

定 价 | 48.00 元

版权所有，侵权必究

目录 / CHAPTER ONE

时间

序 / 001

前言 / 003

的

形状



第一章 不得不说的废话

关于相对论的谣言粉碎机 / 002

你必须了解的四个概念 / 003

第二章 伽利略和牛顿的世界

相对性原理 / 010

伽利略变换式 / 015

史上最牛炼金术士牛顿 / 020

牛顿的绝对运动观 / 022

牛顿水桶实验中的绝对时空观 / 025

第三章 光的速度

伽利略吹响冲锋号 / 030

光速测量大赛 / 033

惊人的发现 / 036

科学史上最成功的失败 / 038

第四章 爱因斯坦和狭义相对论

两朵乌云 / 046

巨星登场 / 048

第一个原理：光速不变 / 050

第二个原理：物理规律不变 / 052

时间 的 形状



- 环球快车谋杀案 / 055
- 同时性的相对性 / 062
- 时间会膨胀 / 064
- 空间会收缩 / 075
- 速度合成 / 079
- 质速神剑 / 082
- 光速极限 / 084
- 质能奇迹 / 087
- 四个搞脑子问题 / 090

第五章 广义相对论的宇宙

- 爱因斯坦的不满 / 094
- 生死重量 / 097
- 等效原理 / 103
- 太空大圆盘 / 108
- 时空弯曲 / 114
- 引力的本质 / 118
- 水星轨道之谜 / 124
- 星光实验 / 126
- 没见过这么黑的洞 / 130
- 从黑洞到虫洞 / 135
- 压轴大戏 / 137

第六章 时空那点事

- 时空中的运动 / 144
- 四维时空 / 148
- 时间旅行 / 149

目录

CHAPTER ONE

星际殖民 / 158

星际贸易 / 164

第七章 再谈四维时空

宇宙时空的终极图景 / 168

神奇的四维 / 178

第八章 上帝的判决

上帝玩不玩骰子? / 190

美剧《生活大爆炸》 / 191

要命的双缝 / 192

玻尔的上帝 / 198

EPR实验 / 203

宇宙大法官 / 205

上帝的判决 / 208

万物理论 / 211

第九章 宇宙是一首交响乐

万物皆空唯有音乐 / 214

击碎原子 / 216

宇宙中的四种“力” / 222

超弦理论 / 224

伟大的设计 / 227

序



本书自第一版出版以来，已逾五年，但热度不降反升。有幸能出第二版，实在是仰赖读者们的抬爱。科普书有个特点，不太容易过时，很多经典的科普书即便过去了几十年，依然广受读者们的喜爱，父亲推荐给儿子，儿子又推荐给孙子，一代接一代地阅读。我的女儿现在上小学四年级，等她上了初中，最迟到高中，我就会推荐本书给她阅读，我想等她的孩子长到了上初中的年龄，我还会推荐这本书。因为科学的发展史永远都不会过时，科学家们的探索精神到了哪个时代都值得人们学习。

五年前，对待科普写作，我还缺乏敬畏，本书的第一稿是在一种“玩票”的心态下用了很短的时间创作完成的。然而这五年来，自己的人生经历了非常大的坎坷起伏，期间更是受到了美国科普、科幻作家阿西莫夫的精神感召，促使我立志将自己的下半生投身到人类的科普事业中。这种人生志向的转变让我一下子对科普写作充满了宗教般的敬畏。在这次修订过程中，我想尽可能地把最初那种展露嬉笑怒骂、玩世不恭心态的文字都去除干净，但毕竟不是重写，所以当年写作心态的痕迹依然非常明显。如果这种心态引起你的反感的话，请接受我的歉意，其实人家这两年已经改变了许多。

《时间的形状》是我的第一部科普作品，如果你喜欢我的写作风格，也希望能给我的其他作品捧场，我给自己定的目标是一年一本新书。

今年是一个自媒体爆炸的年份，尤其是网络电台的兴起，给我们这些从事文字创作的人又开辟了一个巨大的施展舞台。如果你关注音频科普节目的话，你会发现《卓老板聊科技》的卓克老师和《科学史评话》的吴京

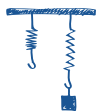
平老师都是现在网络上最受欢迎的科技主播，而我在网络电台上也开播了自己的科普节目，叫作《科学有故事》。今年，我们三个科技主播一起发起成立了“科学声音”组织，旨在利用声音的形式普及科学知识、传播科学精神。我们希望能将“科学声音”做成一个优秀的科普品牌，不断地推出好书、好节目。

最后祝大家阅读愉快。友情提示，在开始看书之前先准备点吃的，因为据说很多读者都是一口气读完，欲罢不能，连饭都顾不上吃。很多人没有想到，一本科普书也能搞得像悬疑电视剧似的，一环扣一环。

汪洁

2016年10月25日

前言



我希望这是一本很有趣的书。我认为这本书与传统科普书最大的差别在于，它更像是一本茶余饭后的休闲书，或是一本有点意思的小说。在这本书里，你会看到很多天马行空般的小故事。牛顿带着 Tom 和 Jerry 来到一个大水桶里面，观看神奇的水面凹陷；爱因斯坦化身大警长，先是调查了一起环球快车谋杀案，然后又要奔赴云霄电梯处理可怕的超级炸弹，最后又在太空中建造了一个超级大圆盘以展示他那神奇的时空观。虽然这一切看上去不像是正经八百的科普，但我可以很负责任地说，故事里包含的都是些很靠谱的科学真相。很多科学真相用“不可思议”来形容是一点都不过分的，你平常之所以感受不到物理学的神奇，那是因为没有人告诉你很多看似普通的物理现象背后的故事。现在的高中生都会在实验室做一个观察光的双缝干涉图像的实验，这是一个普通得不能再普通的高中光学实验，可是却没有人告诉他们这个实验背后隐藏着的惊天大秘密，这个秘密足以撼动以爱因斯坦为代表的一代科学家苦苦建立起来的物理学信仰。一个简单的光学实验，如果你了解了它藏在最深处的本质，会惊讶地发现：这个世界不再是我们头脑中原来的那个世界了，我们头脑中很多朴素的哲学观念，例如物质决定意识、原因决定结果等等，都将受到空前猛烈的冲击。而且，我确实是在讲科学，不是在讲神学或者宣扬神秘主义。

我的这本书大致可分为上下两部分。前六章和大家一起回顾物理学走过的四百多年坎坷历程，这段历史中的悬念，其精彩程度不亚于任何一段战争史，因为物理学的发展本身就是一部精彩的好莱坞悬疑大片。在伽利略、牛顿等巨星纷纷谢幕之后，我们的超级巨星爱因斯坦闪亮登场，而他

成为我们的主角的时候不过 26 岁。他就像是一个横空出世的大侠，无门无派，但是一出手就让天下震惊，他的绝招就是“相对论”。在第六章，我将讲述一段跨越半个多世纪的厚重和真实的历史故事，这个故事尘封已久，但我想告诉大家，真相往往比小说更曲折。后四章是本书的下部，故事更神奇，真相更惊人。在下部中，我将帮你细致地剖析时空真相，带你领略神奇的四维时空奇景。我们先一起去了解整个宇宙时间光锥的终极图景，再回到原子的深处见识一下不可思议的微观世界，最后看一看当下物理学的最新进展——万物理论。你只要随便记住其中的一两段，就能让你在平时和朋友们的吃饭聊天中大放异彩，只是要当心别聊得兴起忘了吃菜，不要发生总是发生在笔者身上的悲剧：话讲完了，菜也被别人吃光了。

看完这本书，也许你对这个世界的看法会大大改观。潮起潮落，斗转星移，这些平常司空见惯的大自然现象在你眼里会突然产生完全不同的意义。当你晚上抬头仰望星空，看着夜空中的皓月星辰，宇宙在你眼里将会换一番景象，过去的宇宙观一去不复返，一个崭新的宇宙观将在你的头脑中建立起来。

自小到老，你可能一直会有这样的疑问：

时间到底是什么东西？

我们能跨越未来吗？

我们能回到过去吗？

光到底是什么东西？

宇宙到底长什么样？有大小吗？有生死吗？

我们能像星际迷航一样穿梭在银河系吗？

这个世界的物质到底是由什么构成的？

物质可以无限分割吗？

……

这些令人不可思议的问题，科学家到底是如何找到答案的？

看完这本书，或许你将对以上这些问题不再感到疑惑，说不定，你还

可以很自信地为你的亲朋好友解答他们心中同样的疑惑。

所有这一切，都要从爱因斯坦发现的相对论开始讲起。这的确是一个伟大的理论，这是20世纪人类对这个宇宙秘密最深刻的一次发现。你可能还是在茫然地看着我：“我听说过相对论，可是它跟我们的日常生活有关系吗？”

当然是有关系的。比如，GPS导航系统现在已经是一个常用设备，我估计很多读者都有一个车载的，或者手机里面就有一个。知道吗？如果没有相对论，那么这玩意可就会出大问题。因为根据相对论，卫星上的时钟会比地面上的时钟走得快，每天大约快38微秒（0.000038秒）。这个时钟的快慢并不是因为计时器精度不够造成的，而是因为卫星上的时间真的变快了。你设想一下，如果人类没有掌握相对论的知识，那么就不会知道发射到天上的卫星哪怕用再精确的计时工具计时，也不可能消除这个误差。你千万不要小看这似乎微不足道的38微秒，如果不校正的话，那么GPS导航系统每天积累的误差将超过10千米（当然这个误差是垂直方向上的，不是水平方向上的），如果美军用这个来导航导弹的话，那麻烦可就大了。因此在GPS卫星发射前，要先把其时钟的走动频率调慢100亿分之4.465，把10.23兆赫调为10.22999999543兆赫，这些数字全靠相对论才能精确地计算出来。

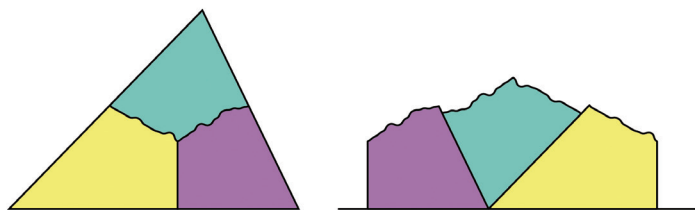
“神奇！”你大概会惊呼一声，“相对论原来就是这个啊。”哦不，这并不代表相对论，卫星上的时间变快只不过是相对论无数推论中的一个，我们通过相对论可以精确地计算出卫星上时钟和地面上时钟的误差到底是多少。相对论还有很多很多推论，小到推测水星的运行轨道、发生日全食时星星的位置，大到可以推演太阳的过去与未来，甚至宇宙的过去与未来。

“神奇！”你再次惊呼一声，“不过你越说越玄乎了，我还是有点不信。你先别说得那么远，你前面说啥来着？时间本身变慢了？这个太让我难以理解了。在我眼里时间本身是匀速流逝的，我们感受的所谓快慢无非是我们自己的感觉在变化，即便是你的表和我的表走时不准那也不是时间本身不准，而是我们的手表精度不够造成的。中午12点整开饭，对任何

人来说都是 12 点整开饭，这是一个客观事实，不会因为我们的是一块真的劳力士还是一块山寨劳力士而改变。”坦诚地说，我非常理解你的这种想法，并且我还要恭喜你，你的这个思想和伟大的牛顿是一模一样的。但非常遗憾，这个想法错了，真的错了。

相对论是研究时间、空间、运动这三者关系的理论体系的总称，它是这一百多年来人类最伟大的两个理论之一（还有一个是量子理论，那又将是一个长长的激动人心的故事，推荐阅读《上帝掷骰子吗？量子物理史话》，作者曹天元），诺贝尔物理学奖是不足以来评价相对论的伟大的。如果上帝真的存在，那么过去他说：“人类一思考，上帝就发笑。”相对论之后，他改口了：“人类一思考，上帝就发慌。”

我们对相对论的误解实在是太多了。大多数人都觉得相对论很神秘、很深奥，是大科学家才能理解的东西。这种误解来源于一个广为流传的关于相对论有多难懂的故事，说的是一个记者问天文学家爱丁顿：“听说全世界总共只有三个人能懂爱因斯坦的相对论，您是其中之一，是不是这样？”爱丁顿一时沉默了，正当记者以为爱丁顿要反驳的时候，没想到爱丁顿说：“我在想另外两个人是谁。”我估计当时这个记者就震惊了。不管这个故事是真是假，总之给我们的一个印象就是相对论很难懂。但是大家千万不要忘了，这个故事发生在一百多年前的1906年，那时候相对论刚刚被爱因斯坦用严谨的数学语言描述出来，对那个时代的人来说确实是很难理解的。不要说相对论了，你想象一下如果你回到乾隆年间，对大知识分子纪晓岚说随便找一个三角形的东西，把三只角割下来拼在一起，不多不少，总是恰好能拼出直直的一条边。



【图0-1】

把三角形的石桌的三个角割下来拼在一起，必定可以得到一条直边

铁齿铜牙的纪晓岚一开始肯定不信任你，当他真的去找一些三角形的物件来验证，发现完全正确，即便是我们的大知识分子纪晓岚也会表示很神奇。但要是现代，随便找一个初中生都能给你证明三角形的内角和是180度，他会告诉你这是一个很简单的几何常识。

同样，相对论的一些基本原理和概念对我们现代人来说，也一点都不高深，不神秘，很好懂，关键在于你是不是愿意听我娓娓道来。

在正式开始我的叙述之前，我很想把我刚刚在网上看到的一则新闻讲给大家听。当然，你也可以直接跳过这部分从第一章开始看起，并不会影响你对本书的理解。

搜狐新闻报道：

※今年60岁的黄其德是宁乡县金洲乡箭楼村一名地道的农民。这位只有高中学历的农民，在对爱因斯坦的相对论进行了二十多年的独立研究后，对这一著名理论产生了质疑和挑战，并做出了近30万字的论述，引起了有关专家学者的关注。

※“世界文明的异化和倒退，人类社会伦理的堕落，虽然不能说完全是相对论的责任，但也是最重要的原因之一。”在研讨会上表达对爱因斯坦相对论学说的深恶痛绝时，60岁的农民黄其德表情严肃，一字一顿。

※黄伯伯在他的《爱因斯坦相对论在科学和哲学上对人类思维的扭曲》一文中写道：“我做过粗略的调查：理科大学生知道相对论的，100个人中不到1个，约占0.3%，而认定相对论无比深邃高明的却占99.5%；理科大学教授中知道相对论的不到2%，也几乎都认可并崇奉相对论；社会上一般知识分子中知道相对论的约占百万分之一，几乎无不崇奉相对论！这个数据说明了什么？首先说明地球人类崇奉相对论是由虚荣心支配着的极端盲目的权威效应。”

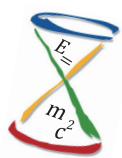
※他还写道：“我保证，只要有高中学历，都可以大致听懂我的论文，并取得评论相对论的有把握发言权。认识到爱因斯坦相对论是一个伪科学大骗局。”

前言结束之前，让我借黄伯伯的文风写下：

我保证，只要有高中学历，都可以大致看懂本书，并取得评论黄伯伯奇文的有把握的发言权，认识到爱因斯坦的相对论足以让上帝对渺小的人类产生敬畏。作为人类的一分子，我以此感到深深的自豪！

第一章 CHAPTER ONE

不得不说的废话



本章之所以叫做“不得不说的废话”，那就是因为这章的内容跟相对论本身并不直接相关，如果你完全跳过不看，直接从第二章开始看起，也不会觉得有任何缺失，但我又不得不写。本章的内容对你理解相对论会有莫大的帮助，看似有点扯远的内容恰恰是教会我们如何用一种正确的思维去阅读，甚至去“挑刺”。

关于相对论的谣言粉碎机

一、某些伪哲学家最喜欢说的一句话，就是“伟大的爱因斯坦发现了这个世界的奥秘——世间万物都是相对的，没有什么是绝对的。”

胡说八道！尤其是每当我跟某些人说“这是不会变的”，对方却告诉我爱因斯坦的相对论禁止这种想法的时候，我就会忍不住大喊一声：“胡说八道，谁告诉你爱因斯坦说过这句话，别给爱因斯坦抹黑！”事实上，爱因斯坦在晚年一直很不喜欢别人把他的理论叫作“相对论”，他自己觉得他的这个理论应该叫作“不变论”，因为他的理论中最重要的部分是那些数学方程式中的不变量。爱因斯坦深以为自豪的是他发现了宇宙中一些永恒不变的常量，更何况整个相对论都是从“在任何惯性系中，所有物理规律保持不变”和“在真空中光的传播速度恒定不变”这两条原理上发展而来的。如果当年相对论真的如爱因斯坦希望的那样叫作了“不变论”，我很想知道伪哲学家们是否又要说：“伟大的爱因斯坦发现了这个世界的奥秘——不管世界怎么变化，永恒的永远就是永恒的。”

二、有很多人认为相对论是用来造原子弹的理论，爱因斯坦正是现在人类面临的核危机的罪魁祸首。2011年日本大地震导致的福岛核电站的泄漏，又一次带来了这样的谣言，例如“要不是爱因斯坦，要不是相对论，何至于此。”

事实是，关于原子弹，爱因斯坦唯一做过的事，就是在一封由西拉德起草写给美国总统罗斯福的信上签了字，这封信主要讲的是希特勒有可能正在研制一种威力巨大的“新型炸弹”，如果研制出来，很有可能改变二战的进程，美国也应该组织力量进行研制，以阻止可怕的灾难性后果。而相对论只不过是对于这种新型炸弹为什么会有如此巨大威力的一种理论解释，即便没有相对论，这种炸弹也一样能造出来，只不过人类不知道为什么威力如此巨大而已。这就好比放了一个屁把自己臭死了，但我百思不得其解为什么会这么臭，直到有一天化学家和生物学家通过研究发现了臭屁的原理，但是没有理论仍然不能阻止我放出臭死自己的这个屁。正如有着“活着的爱因斯坦”之称的霍金指出的那样：把原子弹归咎于爱因斯坦的相对论，就如同把飞机失事的责任，归咎于牛顿的万有引力定律一样（霍金《果壳中的宇宙》）。

你必须了解的四个概念

波普尔的证伪说——科学与伪科学的量尺。

波普尔是一个著名的科学哲学家，他阐明了一个被科学界广为接受的道理：所有的物理规律（或者说科学定律）都是无法真正完全“证实”的，通俗来讲就是科学规律永远不可能用摆事实讲道理的方法来给你证明，尤其是证明给那些伪哲学家们。乍一听这个说法，似乎很难理解，其实很好理解。比如说我现在发现了一个科学规律：天下乌鸦一般黑。那我怎么证明这个规律呢？我只能到全世界去抓乌鸦的样本，每抓到一只都发现是黑的，然后我就跟你说：“你看，我从全世界抓了那么多的乌鸦，无一不是黑的，这下你总该相信我关于天下乌鸦一般黑的理论了吧？”你说：

“不，你又没有把地球上的所有乌鸦都抓来给我看，你怎么就知道没有一只白色的乌鸦呢？就算你把地球上所有的乌鸦都抓来了，你怎么知道宋朝的乌鸦也都是黑的呢？你怎么知道以后不会生出白色的乌鸦呢？总之你跟我说什么都不能让我相信天下乌鸦一般黑这个理论。”波普尔认为确实无法证明这个规律是正确的，因为只要举出一个反例就可以将它推翻，这便是“证伪”。但是我可以根据这个规律大胆地做出一种预言，哪一天你跟我说你又在非洲的某个丛林里面抓到了一只乌鸦，我不用去看，我就敢说那只乌鸦是黑的。你每抓到一只黑色的乌鸦，我只能说给“天下乌鸦一般黑”这个理论增加了一分可信度，直到我们有一天发现了一只白色的乌鸦，这个理论就不攻自破了。因而科学理论之所以能称之为科学，首先他要能做出一些预言，而这些预言恰恰是要能够被“证伪”的，也就是说这个科学理论做出的预言是有可能被实验推翻的。只有满足了“预言”和“证伪”这两个条件，我们才能为其冠以科学之名。反过来说，如果你提出的一个理论并且做出的预言是永远不可能被实验推翻的，那么就不能称之为科学理论。比如说，你给出了一个理论：有一种屁放出来是香的。于是我们把全天下的人放的屁都收集过来闻一下，发现都是臭的，但是这也无法推翻你的理论，因为我们并不能证明你说的那种香屁从来就没有存在过。另外，你的这个伟大理论也不能做出一个准确的预言：在何年何月何地何人会放出一个香屁来。因此，当一个理论只能“证实”而不能“证伪”，并且也无法做出可靠的预言时，我们暂不能承认他是科学的，而只能当作一种“见解”来对待，比如“某些人能与死者的灵魂对话”之类的说法。波普尔认为所有的物理规律都只能算作一种“假说”，他可以做出大量的预测，指导我们的发明创造，但总有一天会找到一个不符合理论的反例来要求我们修正理论，不过在没有找到反例之前，我们仍然认为该理论是正确的、科学的，相对论也不例外。

奥卡姆剃刀原理——科学需要什么样的假设？

大概是八百多年前吧，英格兰有一个叫奥卡姆的地方，那里出了一个叫威廉（这在英国是一个超级大众化的名字，就跟中国有很多人叫王刚

一样)的哲学家,他说了一句话至今影响着科学界,甚至开始辐射到管理学界、经济学界等,这句话的原文是“Entities should not be multiplied unnecessarily”,译成中文意思是“如无必要,勿增实体”,这就是“奥卡姆剃刀原理”。为啥不叫威廉原理呢?你想啊,如果中国有一个住在桃花岛的王刚讲了一个流传后世的著名道理,叫“王刚原理”就会显得有点平淡无奇,但如果叫“桃花岛原理”,给人的感觉就完全不一样了,而且从此桃花岛也就出名了,还可以大力开发旅游资源。不过你看不出奥卡姆剃刀原理有啥深奥对吧?是的,要是不解释,我也跟你一样糊涂。但是一经解释,就发现那是大大地有道理。

奥卡姆剃刀原理说的首先是这样一个道理:如果你发现了一个很奇怪的现象,要对它进行解释就不得不做很多假设,可能不同的解释需要不同的假设,而根据奥卡姆剃刀原理,那个需要假设最少的解释往往是最接近真相的解释。童话《皇帝的新衣》大家都应该耳熟能详吧?看到皇帝在大街上光着屁股走路这个奇怪的现象时,总理大臣和邻居家流着鼻涕的小毛都各自有一番解释。先看总理大臣的解释:(1)假设皇帝身上穿着一件世界上最华美的衣服;(2)假设只有聪明人才能看见这件衣服;(3)假设我是蠢人,所以我看到的是光着屁股的皇帝。小毛的解释:假设皇帝根本没有穿衣服,所以我看到的是光着身子的皇帝。根据奥卡姆剃刀原理,小毛的解释最有可能接近真相!因为他的假设最少。奥卡姆剃刀原理还说明了另外一个道理:如果有某个条件是不能被我们感知和检测到的,那么和没有这个条件根本就是等价的。比如说,天上发生闪电的时候,某大师告诉我们,这是我发功召唤来的一条天龙正在吐火,但是这条天龙你们凡是永远不可能看见的,也永远别想用任何科学手段检测到,只有我能看见。根据奥卡姆剃刀原理,某大师的说法和没有这条龙的存在是等价的。换句话说,我们应当把所有的一切不能被我们所感知和检测的条件都毫不留情地像剃刀刮肉一样从我们的理论中刮去,毫不犹豫。奥卡姆剃刀原理从提出到现在已经有八百多年了,这个原理是人类智慧的精华,也是帮助我们看清这个纷繁迷乱世界的“第三只眼”。我们将会在本书中看到爱因斯坦如何灵光闪动地运用奥卡姆剃刀原理,他就像说破皇帝根本没有穿衣服

的那个小孩（那一年他26岁，在物理界确实可以算是小孩），一语点醒整个物理界对于光速的普遍看法。如果用我的话说，奥卡姆剃刀原理说的就是——“上帝喜欢简单”。

思维实验——在大脑中运行的实验。

说到实验，你首先想到的是什么？是跟我一样永远不能忘记第一次物理实验课，看到老师用火柴点燃倒扣在塑料杯下面的氢气时，发出的那一声巨大的爆炸声和自己的惊呼声吗？还是传说中伽利略在比萨斜塔上扔下一大一小两只铁球（当然，这只是个传说而已）？你的脑海中一定翻腾起许多你曾经看到过或者亲自做过的实验。但是你有没有想过，有一种实验叫作“思维实验”，而正是这种思维实验极大地推动了科学的发展。可能你已经在心里嘀咕了：“真的假的”？我就给你一个例子。关于思维实验，科学史上最著名的例子就是伽利略以此推翻了亚里士多德重物下落更快的论断。

（以下对话为虚构）

伽利略：“亲爱的亚里士多德先生，您不是说重的东西比轻的东西下落得更快吗？那么如果我们把一个铁块和一个木块用绳子拴在一起，从高处扔下来会发生什么？按照您的说法，较轻的木块下落得慢，因此它会拖累铁块的下落，所以它们会比单扔一个铁块下落得慢一点，是不是这样？”

亚里士多德：“没错，逻辑正确。”

伽利略：“但是，铁块和木块拴在一起以后，总重量却要比一个铁块更加重了啊，那么岂不是它们又应该比单个铁块下落得更快？”

亚里士多德：“呃……”

伽利略：“这个实验不用实际去做了吧，单单就在我们脑子里面做一下就可以发现您的理论是自相矛盾的。”

亚里士多德：“你让我想想，你让我想想……”

上面就是一个思维实验的生动例子，在头脑中运行的实验有时候往往比真正的实验更具有说服力。爱因斯坦就是一个思维实验的大师，相

对论的诞生和思维实验密不可分，甚至可以说，没有爱因斯坦在大脑中运行的那些实验，相对论就不可能诞生。在本书中，我将带你一起领略很多充满奇思妙想的思维实验，感受头脑风暴所带来的快乐。

佯谬——乍一看肯定是不对的，但没想到却是真的。

在物理学中，经常会遇到一些很有趣的事情，这些事情一开始让你觉得不可能发生，但恰恰最后又被实验证明是千真万确的。像这样的事情，中文里有一个词就叫作“佯谬”。佯，是佯装、伪装的意思，谬，是谬误、错误的意义；佯谬就是佯装是错误的，其实是正确的。在我们这本书中，会出现很多有趣的佯谬。我们先举一个统计学中著名的例子给大家看（本例子来源于“果壳网”）：

我高考终于考完了，考得相当不错呢，终于到了填写志愿的时候，东方大学（简称东大）和神州大学（简称神大）都是我向往的学校，录取分数都差不多，到底第一志愿要填报哪所大学呢？想来想去，为了终身大事我决定报考女生更多的大学，于是我从网上搜索这两个大学的数据进行研究。物理系，东大男女比例高于神大（东大是5:1，神大是2:1，两所学校都是男生多）；外语系，东大男女比例又高于神大（东大是0.5:1，神大是0.2:1，两所学校都是女生多，但东大的男女比例更高一点）……哇，怎么所有专业东大的男女比例都高于神大啊？那还犹豫什么呢，我肯定报神大了！两个月后我顺利地进入了神州大学。正当我得意于自己的选择时，无比悲愤地看到一份资料，上面写得清清楚楚：东大的男女整体比例小于神大。我靠，有没有搞错？！怎么可能东大的所有专业男女比例都高于神大，但是整体男女比例却低于神大了呢？！不带这样玩我的！！肯定是哪里算错了吧？于是我拿出计算器狂敲，却发现网上的数据没错，我也没有算错数据，结果却是千真万确的。这种情况真的可能发生吗？是的，这就是统计学上著名的“辛普森佯谬”，看起来不可能的事情真的发生了。

你可能还是不相信，那么我们来编造两份数据，你可以亲自动手演算一下。

物理系数据：

	男生人数	女生人数	男女比例
东方大学	35	7	5 : 1 (大)
神州大学	100	50	2 : 1

外语系数据：

	男生人数	女生人数	男女比例
东方大学	50	100	0.5 : 1 (大)
神州大学	10	50	0.2 : 1

学校整体数据（两个专业之和）：

	男生人数	女生人数	男女比例
东方大学	85	107	0.8 : 1 (小)
神州大学	110	100	1.1 : 1

所以说，这个世界的奇妙往往远大于你的想象，还有无数更加不可思议的佯谬在前面等着我们。在本书中你会看到，发生在一对双胞胎兄弟身上的佯谬推动了爱因斯坦的深度思考，让相对论发生了质的飞跃。

第二章
CHAPTER TWO

伽利略和牛顿的世界



相对性原理

我们的故事要从四百多年前开始讲起。你可能会嘀咕，相对论不是一百年前的爱因斯坦发明的吗，怎么一下子就要多倒回去三百多年？知足吧，我已经比《生活大爆炸》中的谢耳朵好多了，他一讲起物理，总是从古希腊开始说起。是的，为了让你能充分领略人类在通往相对论这条道路上经历过的蜿蜒曲折、峰回路转，我们必须回到这条路的起点。

现在请跟我一起回到16世纪末的意大利比萨，此时正值文艺复兴后期，国富民强。文学、艺术、科学的春风从意大利席卷整个欧洲，空气中弥漫着新世纪即将到来的新鲜气息（中国此时正值明朝万历年间）。在比萨大学的一间大教室里，宫廷数学家奥斯提里欧·利奇（Ostilio Ricci, 1540-1603）正在讲台上。讲台下面坐得满满当当。利奇是闻名全国的著名数学家，一向只在皇宫中讲课，他要来比萨大学的消息在几个月前就已经传遍了整所学校。医学系的一个叫伽利略·伽利雷的学生起了个大早，终于抢到了最前排的好座位。

利奇开始讲解数学的新进展——代数学，他用简洁流畅的手法向大家展示了什么是一元二次方程，并且给出了 $ax^2+bx+c=0$ 通用解法的证明，进而开始讲解因式分解的概念以及现场演算了 $(a+b)^n$ 的分解过程。

利奇熟练的演算和生动的讲解博得了阵阵掌声，他注意到坐在第一排的一个年轻学生自始至终都在聚精会神地听讲，脸上不时闪过兴

奋和满足的表情。利奇一下子对这个学生产生了好感，讲课的间隙利奇问道：“同学，你叫什么名字？”

“伽利略。”

“哪个专业的？”

“我是医学系的。”

“啊，真是了不起！”利奇赞叹道，“学医学的也能对数学如此感兴趣，你一定会成为一名伟大的医生！”

伽利略的脸一下就红了：“其实，先生，我不喜欢医学，我更喜欢数学和物理。但是我的父亲希望我能成为一名医生，我为此感到十分苦恼。”

利奇说：“别泄气，年轻人。你可以自学，大学很短暂而生活很长，追随自己的兴趣，你一定能成功的。不管什么时候，你都可以来找我，我愿意成为你的良师益友。”

伽利略受到了极大鼓舞，从此更是疯狂地喜欢上了数学和物理，并且经常向利奇请教问题。

我们应该感谢利奇对伽利略的帮助，这虽然让世界少了一名医生，却催生了一位伟大的物理学家、天文学家和哲学家。

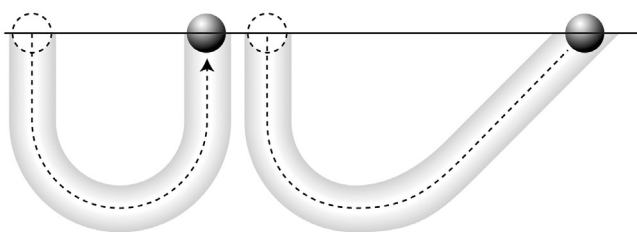
伽利略在力学和物体运动规律方面的贡献是无与伦比的，是他打下了牛顿经典力学的基桩，而牛顿在这片基桩之上盖起了足以让后人仰视的经典力学大厦。

伽利略第一项最为人知的成就是提出了自由落体定律，这个定律说的是：如果不考虑空气阻力的话，那么任何物体的下落速度都是一样的，且都是呈一个固定的加速度（这个加速度上过中学的人都知道，就是 $g \approx 9.8 \text{米/秒}^2$ ）。

伽利略把类似自由落体定律这样的现象和规律统称为“力学规律”。

我们再来看一个伽利略发现的著名的“惯性定律”，其实这就是牛顿第一运动定律（当然，伽利略没有像牛顿那样精确地表述出来，因此这一定律的正式发现权仍然归于牛顿）。伽利略发现这个定律，也是从一个思维实

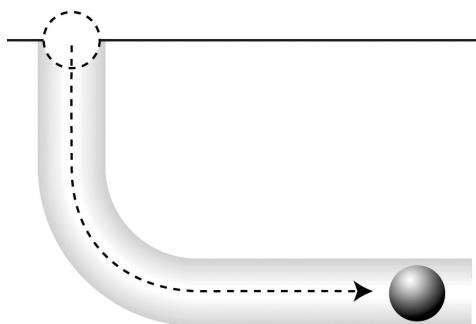
验开始的，这个思维实验具备非凡智慧。伽利略设想把一个小球放到一个U型管的一端，松手让小球自由滑落，那么这根U型管表面越光滑，小球在另一头就上升得越高。伽利略假想如果能发明一种完全没有阻力的材料，则小球应该能恰好在另一头到达跟起点同样的高度。这个现象就好像在一根绳子上挂一个小球做一个钟摆，如果完全没有空气阻力的话，小球从一头摆到另一头的高度应该是完全相同的。



【图2-1】

小球从U型管一头落下，应当滚到与起点相同的高度。

伽利略的这个思维实验没有停，他继续往下想：好，现在假设找到了一种完美的材料，那么我把U型管的另一端拉平，则小球从起点滑落后，为了能在终点达到和起点同样的高度，它只能不停地，永远地滚下去，不可能停下来。



【图2-2】

如果U型管的另一端是平的，小球就永远不会停下来。

从这个思维实验中，伽利略得出了关于运动的又一个力学规律，那就是在一个完美光滑的表面运动的物体，会保持这个运动的“惯性”，除非有外力阻止这个惯性，伽利略称之为“惯性定律”。

我相信对于各位读者来说，自由落体定律和惯性定律都是再熟悉不过的物理常识了，但是在四百多年前能有这样的认识那可是大大的了不起。讲到这里，我就要抛出本章的重点了，那就是**伽利略相对性原理**。因为你通过上面的阅读已经知道了什么是力学规律，有了这个基础，我们就可以继续往下讲了。

伽利略相对性原理：在任何惯性系中，力学规律保持不变。

“得，我刚理解了什么是力学规律，你马上又冒出‘惯性系’这个专业术语。别卖关子好吗？”边上一位同学看我打出上面的黑体字后，忍不住开始鄙视我。

莫急，我这就开始解释“惯性系”是什么意思。

为此，我们来假想一个伽利略和你之间穿越时空的对话。

伽利略：“我想问你一个问题，怎么区分静止和运动？”

你：“这也叫问题？我开着法拉利一溜烟地从你身边开过，我就是在运动，难道这有什么不对？”

伽利略：“对不起，请问法拉利是谁？”

你：“哈，不好意思，忘记你是古人了，那我不说法拉利了，咱们说火车吧。”

伽利略：“火车？”

你（崩溃状）：“你那个时代连火车也没有！！伤不起啊！想想也是，蒸汽机还没发明，瓦特都没出生，好吧，那我们说船总可以了吧，船你总知道吧？”

伽利略：“船，当然知道，你的意思是说如果你在开动的船上，我在岸上，那么我就是静止的，你就是运动的对吗？”

你：“哈哈，我可不会上你的当，好歹我也学过几年物理，我知道

你要说的是什么，我替你说了吧。说到运动，必须要有一个参照物，如果以你为参照物，那么你是静止的，我就是运动的。如果反过来以我为参照物，你就是运动的。对不对？你还真以为我是文盲啊，伽利略先生。”

伽利略：“未来人果然牛啊。那好吧，我们继续，现在假设你在一个没有窗户的船舱里面，完全看不到外面的情况，你有没有办法知道船相对于我是运动的还是静止的？”

你（想了想）：“你这个问题也难不倒我，如果船不是以匀速直线运动在开动的話，我很容易知道船是不是在开。如果船是加速的，我会感到有一股无形的力在把我向后推，如果船是减速的，我就会不由自主地往前踉跄。我天天坐地铁，对这种感觉太熟悉了。呃，你就不用问什么是地铁了，跟你解释不清，反正以此我就可以判断船是在加速还是在减速了。我说得没错吧，伽利略先生？”

伽利略：“完全正确。那如果船的加速度很小，你又是固定在座位上的，很难察觉到微小的推背感的时候，你该用什么办法来判断呢？”

你：“这个……让我想一想。有了，这也不难，我只要做一点力学实验就可以了，比如我用绳子挂一个小球，看这个小球是不是完全垂直的；或者，我把一个小球放在一张平稳的桌子上，看小球会不会自动滚起来。通过很多力学实验我都可以发现船的运动状态。”

伽利略：“回答得完全正确，确实不能小瞧你。这也就是说，如果船做的不是匀速直线运动的话，在船上的力学实验结果会被改变，换句话说，力学规律会被改变，比如惯性定律、自由落体定律（自由落体的方向和加速度都有可能改变）等等。但是，如果现在假设船是在做着完美的匀速直线运动的话，你还能通过力学实验来知道船是否在运动吗？”

你：“那显然就不可能了，如果船舱里面没有窗户的话，我就根本不可能判断出我是静止的还是运动的，不论我做什么样的力学实验，我都无法知道。”

伽利略：“是的，也就是说，在匀速直线运动状态下面，所有的力

学规律和你在静止的状态时都是完全一样的。况且，你也知道，没有什么所谓真正的静止，我们地球也是在运动的，在地球上的每一个人哪怕站着不动，也在随着地球一起运动，运动不运动的关键在于怎么选取参照物。”

你：“我感觉，被你这么一说，静止和匀速直线运动这两个词好像失去了准确的意义，我根本无法定义自己到底是静止的还是在做着匀速直线运动，静止和运动永远都是相对的。”

伽利略：“你越来越接近真理了。没错，用我的话来说，静止和匀速直线运动这两个词的物理意义是相同的，或者说都是不精确的，我用了一个新的词来统一他们所描述的状态，这个词就是‘惯性系’。不论你站在岸上做实验，还是在一艘匀速直线运动的船舱里做实验，在我眼里，你都是在一个惯性系里做力学实验。我的相对性原理说的就是：在任何惯性系中，力学规律保持不变。”

你：“哦，原来说来去就是这个啊，嗯，不难理解，我完全同意。”

伽利略的相对性原理对于我们现代人来说，是相当好理解的。请大家千万记住这个原理，在后面我们还会提到它，这个原理跟相对论的诞生可是有莫大的关系，同时请注意千万别把伽利略的相对性原理当作是相对论了。

伽利略变换式

伽利略在提出了相对性原理之后，觉得用一句话来表述这个原理还是显得不够简洁、不够酷。伽利略想，好歹我也是个数学家，怎么着也应该用数学的语言来描述我发现的这条伟大原理吧。于是没过多久，伽利略就提出了几个数学公式，用来描述相对性原理，后人把这几条数学公式就叫作**伽利略变换式**。在我们现代人看来，这个变换式其实是相当简单的，只

需要用到一点点小学数学知识即可。现在我要给大家出一道小学数学的应用题（我相信这道数学题能勾起你很多美好的童年回忆）：

小明和小红一起来到公交车站，两人见面以后互相对了手表确定时间。小红要坐的车先来，她登上公交车，车开动的时候刚好是7点整，公交车以10米/秒的速度开走了。问：1分钟以后小红距离小明多远？小红和小明的手表分别是几点？

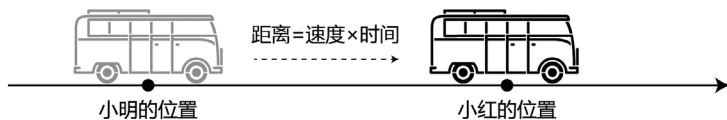
可能你脑袋里会冒出一大堆问号，怀疑是不是我在出脑筋急转弯题。小明和小红的手表走时完全准吗？公交车走的是直线吗？小明在一分钟内确实没动吗？你这个距离是按照公交车头还是车尾算？小明是一直站着的吗？真的没趴下来？

我理解你这种心情，社会上混久了，总觉得简单的背后藏着什么陷阱。我现在很诚恳地告诉你，确实没有任何陷阱，忽略你的那些疑惑，这就是一道小学数学应用题。下面是解法：

1.一分钟等于60秒。小红距离小明的距离 $s=vt=10\times 60=600$ （米）。

2.小明和小红的手表都是07：01。

上小学的时候，为了解这道题，老师一般喜欢给我们画一幅这样的图来解释：



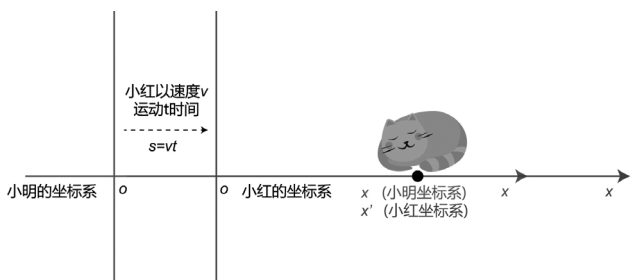
【图2-3】
数学题图示

看到这幅图，有没有勾起点童年的回忆？好了，从这道题出发，我们继续往下深入一步，我把这道小学数学题改写为一道初中数学题，如下：

小明和小红各自代表一个坐标系的坐标原点，且初始位置相同，有一只大懒猫在小明的坐标系中的坐标 x 处睡大觉，此时小红以速度 v 沿着 X 轴

方向做匀速直线运动， t 时间以后，设大懒猫在小红的坐标系中的坐标为 x' （注意这个是 x 一撇），求 x' 和 x 之间的关系式以及小明的时间 t 和小红的时间 t' 之间的关系式。

我知道你对上面的题看了不止一遍，读上去有点拗口，看上去也有那么一点儿专业了，但这道题实质上 and 上面那道小学题是完全一样的，所要运用到的数学知识跟第一道题完全一样，我们看一下这道题的图解：



【图2-4】

数学题图示

画完上面这个图解，我必须顺便提一下，像这样一根横着的 X 轴加一根竖着的 Y 轴的坐标系叫作直角坐标系，这是数学家笛卡尔发明的，我们在高中的时候还学到过一种极坐标系，那个只需要一个极点和一根极轴就够了（任何一个点的坐标是用到极点的距离和与极轴的夹角来表示）。直角坐标系因为特别容易理解，所以用得最广泛，以至于我们经常省略直角两个字，直接叫坐标系。我教你一个“装”的招数，就是下次遇到机会就这样说：“各位，首先让我们来构建一个笛卡尔坐标系……”加上笛卡尔三个字，听众立马就会觉得你很厉害。如果你只是平淡无奇地说：“各位，首先让我们画个坐标系。”这效果马上大打折扣。

言归正传，就着上面的图解，我直接写下答案，我想你一定能理解：

$$x' = x - vt$$

$$t' = t$$

以上这两个数学表达式我们称之为伽利略变换式。我知道你此时正在想： x' 到 x 的变换马马虎虎还能算个数学公式，不过也真是够简单的，但这个 $t'=t$ 真是要让我喷饭了，这算啥意思？就是告诉我们小明的手表过去了几分钟，小红的手表也过去了几分钟吗？这也需要伽利略当作一个伟大定理来告诉我们？

你先不用这么愤愤不平，让我来解释一下这两个数学表达式的伟大意义。坐标 x 我们可以把它抽象地认为是小明眼中的世界，而坐标 x' 可以抽象地认为是小红眼中的世界，有了这个关系式以后，只要知道了小红的速度和时间，我们就能把小红眼中的世界转换为小明眼中的世界。嗯，上面几句话我承认还是有点费解，所以需要来举例子。

现在你想象一下：小红在一艘匀速直线运动的船舱里做各种各样的力学实验，测量各种实验数据来推导各种力学定理。力学实验要测量什么？你仔细一想，会发现，所有的力学实验对于物理学家来说只需要测量两样东西，一个是坐标（比如小球的起点坐标和终点坐标），一个是用一个尽可能精确的钟表测量时间（当然通常还要测量一个质量，不过那个一般都是一次性测量或者取一个标准质量的物体）。所有的力学实验无非就是测量各种各样的坐标和时间的数据，然后从这些杂乱的数据中寻找普遍规律，从而总结出力学定律。

现在小红是一个在船舱中做实验的物理学家，小明是一个站在岸上的物理学家，对于同一个实验，小红以自己为参照系可以很方便地测量出来一堆数据，但是你想想如果小明也想测量小红所做的那些力学实验的数据，他该怎么办？小明既没有千里眼，也没有千里手，船每时每刻都在离他而去，小明对此只能望洋兴叹。

伽利略突然出现了，他看着愁眉苦脸的小明，微笑着说：“不用发愁，山人自有妙计。”

小明问：“什么妙计？”

伽利略：“你只需要知道船的速度即可，剩下的事情就都好办。”

小明：“船的速度不难知道，测出来以后接下来怎么办呢？”

伽利略：“你只要让小红把她测量到的所有实验数据下船以后给你，然后用我强大的伽利略变换式，你就能把她测得的所有坐标数据和时间数据变换成以你为参考系的数据。”

小明：“原来如此，伽利略你真了不起！”

于是，小明按照伽利略的办法如愿得到了所有他想要的实验数据。然后，小明和小红分别用自己手头的数据开始研究力学定律，研究完毕，两人把他们各自总结出来的规律一比较，竟然完全一致。

你看，有了伽利略变换式，我们就能证明对于同一个力学实验，不管是站在小明的角度观测，还是站在小红的角度观测，所得到的规律是相同的。这说的不就是伽利略相对性原理吗？看来伽利略还真是有点不简单。

大家应该还记得我们在上中学的时候学过一个关于自由落体的定律： $h = \frac{1}{2}gt^2$ 。这个定律告诉我们的是，只要知道物体下落的时间，就能算出物体下落的高度。

我本来想以这个为例子来说明虽然通过伽利略变换后实验数据的绝对值变了，但是最后用数学的方法倒腾来倒腾去，等式两边同时加加减减，居然所有的差异都神奇地抵消了，最后总结出来的公式，不论是在小明的参考系中还是在小红的参考系中都是完全等价的。但是考虑到很多人对数学公式的天生惧怕，我担心吓跑了各位耐心的读者，那就悲剧了！因此，我还是不卖弄数学风骚了。

伽利略变换式的伟大意义就在于，他用数学的方法证明了伽利略相对性原理。

说到这里，我相信各位读者已经完全理解了伽利略相对性原理和伽利略变换，一点儿都不难。正因为简单好懂，符合我们日常生活中观察到的所有现象给我们造成的印象，因此，伽利略大侠的这一原理，一变换就像是倚天剑、屠龙刀，统治了物理学江湖长达二百多年之久。在二百余年的时间里，无人不臣服，无人敢挑战，就好像此刻的你不也认为这是天经地义的吗？难道这真可以有挑战的地方吗？是的，二百多年后一个叫洛伦兹（Lorentz, 1853–1928）的侠士拿着一把锈迹斑斑的大刀，向伽利略变换

发出了挑战，并且竟然一刀就将伽利略变换这把屠龙刀斩为两截。随后，又有一个 26 岁的年轻人，无门无派，不知道从何方冒出来，携一把木剑向伽利略相对性原理这把倚天剑发出了挑战，这一战可谓刀光剑影，霹雳惊雷。这个年轻人，姓爱因斯坦，名阿尔伯特，那真是五百年一遇的一位奇男子。当然，这些是后话，且听我慢慢道来。

1642年1月8日凌晨4点，在故乡意大利，78岁的伽利略走到了人生的尽头，他不断地重复着一句话：“追求科学需要特殊的勇气。”声音越来越轻，终于，伽利略吐出了最后一口气，合上眼睛，一位科学巨星陨落了。冬去春来，斗转星移，整整一年后，在英格兰的林肯郡有一名男婴呱呱坠地，一位新的科学巨星诞生了，力学的接力棒从伽利略手上交到了这名男婴的手上，这名男婴叫作艾萨克·牛顿。

史上最牛炼金术士牛顿

牛顿是历史上最伟大的炼金术士，没有之一，最伟大的物理学家、天文学家、数学家、自然哲学家、神学家之一。纵观古今中外所有的“家”们，能集如此众多的“家”于一身的，古往今来可能就只有牛顿一人。非但空前，而且极有可能绝后，因为现代科学的分支越来越细，研究越来越深，任何一个领域想要成为“家”都得穷其一生才行……打住打住，你说什么？牛顿是最伟大的炼金术士，还没有之一，真的假的？对于这件事，我没有半分开玩笑的意思，是千真万确的。牛顿用其一生追求点石成金之术，不过没有证据说明他是为了财富才炼金，我想他去炼金也应该是出于对大自然奥秘的追求。牛顿多次说过他最大的兴趣是炼金术，而且他用自己的实际行动证明了这一点，他流传下来的关于炼金方面的著述超过 50 万字，他在炼金方面花费的时间，相当于他在其他学科所花费的时间的总和。但大多数人都不知道牛顿是炼金术士，主要还是因为他在这个方面没有成就，因为以当时人类对自然科学的认识，是不可能掌握点石成金之术的。

牛顿在自然科学方面到底有哪些贡献，那真是可以用多如牛毛来比喻。

在物理学方面，他提出了著名的牛顿运动三定律；在天文学方面，他发现了万有引力定律（还记得那个苹果掉在牛顿头上的传说吗？苹果只是个传说，别太当真），发明了反射式望远镜；在数学方面创立了微积分；在光学方面发现了色散现象、牛顿环现象，写出了《光论》；在经济学方面，奠定了英国的“金本位”体制，牛顿是英国皇家造币局局长。这个清单如果继续往下还能写得很长很长，但是上面说的这些你都可以在看完本书后忘掉，只有一样，你一定要记住。记住这一样，以后跟人谈起牛顿，你只要一提起，人家就会认为你对牛顿了解得不少，那就是你一定要记住牛顿写过的一本书，李敖曾说过“牛顿其人，五百年不朽；牛顿其文，一千年不朽”就是指的这本书，书名叫作《自然哲学的数学原理》（*Philosophiae Naturalis Principia Mathematica*），我们一般简称为《原理》。这本书代表了经典物理学的巅峰，牛顿把从远到天上的皓月星辰，近到海边的潮起潮落，一切的自然规律都纳入到这本震烁古今的《原理》中。这本书就像是神话中的魔法书，读懂了它就可以预测一切天文奇观。我们前面说过伽利略为经典力学打下了基桩，牛顿在上面构筑了雄伟的大厦，而《原理》就是这座大厦的丰碑，希望你能记住。好了，毕竟我们这本书是讲相对论，不是给牛顿著书立说，总之我们只要知道一点，牛顿是一个光芒万丈的天才科学家即可。对了，他的墓志铭必须要说一下，诗人蒲柏为牛顿所作的墓志铭中写下了这样的名句：

自然和自然的规律隐藏在黑夜里，上帝说：降生牛顿！于是世界就充满光明。

看看，诗人就是诗人，你说牛顿哪里还是个人，简直就是神的化身啊。你说就这么一个神一样的人物，用了自己生命的一半时间去研究炼金术，这世界上还有谁能比他炼得更出色？牛顿炼金炼累了，顺便想一下物理、数学、天文，想出来的东西就够我们后人仰视一辈子了，这样的人如果还不是史上最牛的炼金术士，谁敢是？但我们毕竟要说的是相对论，因此，我只谈牛顿跟相对论有关的内容，牛顿在其他方面的成就我就不再多说了。

牛顿的绝对运动观

下面，我要虚构一段牛顿在剑桥大学给物理系的新生们授课的场景。有史料表明，牛顿的讲课水平烂得出奇，据说在他的课堂上，常常到第一节课结束时，座位上的学生已经寥寥无几，牛顿只好对着空荡荡的教室快点把剩下的内容讲完，然后匆匆回到实验室做研究。以至于后来牛顿把每节课的时间减少到 15 分钟，这样才不至于要对着空气讲课。可见，牛顿实在不能算得上一个称职的老师。但为了让各位可敬可爱的读者能坚持看下去，我尽可能地要把牛顿的这个短板补上，把课讲得有趣一点。特别申明，场景和对话纯属虚构。

牛顿：“同学们，上课了！下面开始点名。Tom, ok; Jerry, ok。嗯，不错，今天来了两个，比昨天多了一个。今天我们要讲的是时间、空间和运动。

“我们假设有一艘船正以 10 米/秒的速度开着（画外音：船，怎么又是船，我说你就不能新鲜点吗？换个火车啥的。唉，我也不想啊，那个时代没有火车、飞机、火箭，能开的东西不是马车就是船，所以那会儿的物理学家一说起运动，就只能说船，但我跟你保证我们这本书的后面不但有飞机还有宇宙飞船，包你过瘾）。Tom，现在我把你扔在船尾，你以 1 米/秒的速度朝船头方向走动。Jerry，你站在岸上，我想问一下，Tom 在你眼里的速度是多少？Jerry, Jerry，这才刚开始你怎么就打瞌睡了，振作点，这还有读者呢！好吧，Jerry，看在你这么诚恳地看着我的分上，我就不难为你了。

“我们可以利用伽利略变换式很容易地算出，在 Jerry 的坐标系里面，Tom 的移动速度是船的移动速度加上 Tom 自己走路的速度，也就是 $10+1=11$ 米/秒。

“那么，问题一：如果 Jerry 自己在岸上用 2 米/秒的速度和船做同方向运动，在 Jerry 眼里 Tom 的速度是多少呢？问题二：如果 Jerry 和船做着反方向运动，在 Jerry 眼里 Tom 的速度又是多少呢？

“我们再次利用伽利略变换，可以算出，问题一是 $10+1-2=9$ 米/秒，问题二是 $10+1+2=13$ 米/秒。Tom and Jerry，你们的老师我如此婆婆妈妈啰啰唆唆地问你们这些看似很无聊的问题，是希望你们能自己总结出速度合成的规律，给出速度合成的定律。怎样，你们两个谁先表现一下？”

Tom举手，说：“教授，我知道了，假设A的速度是 v ，B的速度是 u ，那么他们的相对速度 w 的公式是：

$$w = v \pm u$$

“取加号还是减号关键看两个速度的方向，如果一致就取减号，否则取加号。”

牛顿：“非常好。那么，Jerry，你同意Tom的结论吗？”

Jerry：“我完全同意，教授。我想补充说明的是，速度到底是多少，绝对不能脱离参考系，同样运动的物体，在不同的参考系中，速度是完全不一样的。比如，在我眼里Tom的速度是11米/秒，但是如果从一个站在太阳上的人眼里看来，Tom的速度还得再加上地球绕太阳运行的速度。”

Tom：“我再补充一句，当我们说某某的运动速度是 v 的时候，必须先设定该速度的参考系，否则就会失去物理意义。按照这个道理，世界上也不存在绝对的速度快慢。当我站在船上，Jerry站在岸上，在船上飞舞的苍蝇眼里，Jerry运动得比我快；反过来，在岸上飞舞的苍蝇眼里，我运动得就比Jerry快。”

牛顿：“说得很好，你们两个今天果然精神多了，有观众和没有观众真是不一样啊。但是接下来我要问你们一个有深度的问题了，请问，什么东西可以做参考系？”

Tom和Jerry异口同声：“任何东西都可以做参考系。”

牛顿：“很好，那空间本身是不是也可以做参考系？”

Tom和Jerry：“呃……这个，还真是没想过这么深奥的问题。”

牛顿：“请你们想象一下，宇宙中充满了空间，宇宙延伸到哪里，

空间就延伸到哪里。这个巨大的空间本身代表的就是宇宙的母体，处处均匀，永不移动，所有的东西，天上的星星，地上的蝼蚁，我们所居住的地球都在这个空间中运动。如果把空间本身看作是一个参考系，这个参考系就是一个‘绝对空间’，所有物体在这个参考系中的运动速度就是一种‘绝对速度’，它们就可以比较快慢了，我们会发现，原来地球的绝对运行速度比太阳的绝对速度要快。”

Tom：“教授，您的这个思想真是太深刻了，学生佩服。”

Jerry：“可是，我还是有点无法理解。”

牛顿：“Jerry，在上帝的眼里，我们的宇宙就像一个巨大的玻璃球，玻璃球中充满了水，水安安静静地待在那里，没有一丝一毫的流动。太阳星辰和我们就像水中的鱼儿一样在里面游动，鱼儿感受不到水的存在，我们也同样无法感受到空间中的某样实体的存在。亲爱的Jerry，就像水充满这个宇宙大玻璃球一样，我们的宇宙也被一种叫作**以太**的物质充满，宇宙万物的运动都相对于这个以太有一个绝对速度。你能理解了吗，亲爱的Jerry？”

Jerry：“是的，教授，我理解了。但是，您说的这个以太总是让我心里有点不安，因为它无法被我们感受到，根据我们老家奥卡姆很流行的一句话来说，似乎这样的东西就跟没有是一样的。教授，您能设计一个实验来证明绝对空间的存在吗？”

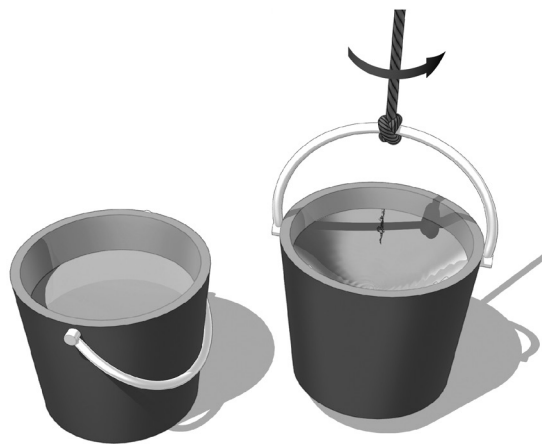
Tom：“我说Jerry，你是不是想多了，教授是多么伟大的人，他的思想还能有错吗？”

牛顿：“不，Tom，别这么说，我可不是胡克（另一位著名的英国科学家，发现了胡克定律，也就是弹性定律。胡克与牛顿一生争执不断）那个小矮子，不容得别人质疑。我是站在巨人肩膀上的人，当然比胡克那个小矮子看得远点，哈哈。Jerry，你提的问题很好，我已经想到了一个思维实验来证明绝对空间的存在。”

💡 牛顿水桶实验中的绝对时空观

牛顿转身在黑板上画了一个大大的水桶的俯视图，又在水桶的里面画了一些水，要不是牛顿一边画一边解释这是什么，Tom和Jerry都会以为牛顿在画大饼。

牛顿：“我们下面来做一个水桶实验。Jerry你看到我画的这个装着半桶水的水桶了吗？外面这一圈就是桶壁，里面都是水。



【图2-5】

牛顿的水桶实验

“现在，Jerry你想象你的身体突然缩小了，缩得很小，然后我把你固定在水面附近的桶壁上，让你可以很方便地看到水的状态。注意了，我现在用一根绳子把水桶吊起来，然后我把水桶这么用力一转，于是水桶就转起来了。Jerry，你，在水桶里面感觉好吗？”

Jerry：“教授，感觉很不好，我的头要晕了，我的眼睛在冒金星。”

牛顿：“坚持住，孩子，集中精神，观察水面。”

Jerry：“放心吧，教授，我能坚持。”

牛顿：“Tom，我已经跟你们讲过我的第一运动定理，物体会保持自己的惯性。水桶在刚刚开始旋转起来的时候，整个水体因为要保持

惯性，不会马上跟着转起来，水桶会转得比水快很多，这一点不用怀疑。那么在水桶刚开始旋转的时候，在Jerry眼里看来，水相对于他开始转动起来了，我们现在向Jerry求证一下，看看是不是这样。Jerry，快点告诉我你看到了什么？”

Jerry：“教授，我听到你跟Tom说的话了，正如你所说，我看到水转动起来了。”

牛顿：“很好Jerry，我们都知道一个旋转的物体会产生向外的离心力（准确地说是向心力），这个离心力表现在一个呈圆柱形的水体中，就会使得水面中心向下凹陷，这是我们在生活中经常观察到的现象。Jerry，你看下水面发生了什么。”

Jerry：“教授，我看到水面依然平静如故，没有往下凹陷，这可真奇怪了，我明明看到水在我眼前转动啊？”

牛顿：“Tom，看到了吧，在我们眼里，转动刚开始的时候水面不凹陷非常正常，因为在我们眼里水由于惯性还没转起来嘛。换句话说，水相对于绝对空间尚处于静止状态，但是对于桶壁上的Jerry来说，他把自己视为静止状态，所以水相对于他就是转动的。现在我们稍等一下，因为水的黏着力，我们俩会看到水桶会带着水最终一起旋转起来，然而对于桶壁上的Jerry来说，水就慢慢变成静止的了。Jerry，你现在看到了什么？”

Jerry：“教授，我看到水越转越慢，越转越慢，快要不动了。哦天哪，太不可思议了，水面正在向下凹去，这真是我这辈子见过的最不可思议的景象，水停止了旋转，而水面凭空就凹下去了，但是又没有旋涡，就好像水面上有一个无形的大铁球把水给压下去了一样！”

牛顿：“你看，在Jerry眼中的神奇景象，在我们眼里看来平常无奇，原因很简单，此时的水相对于绝对空间开始旋转起来了，这个旋转的本质不因观察者所取的参考系而改变。好了Jerry，我现在把你复原，你回来吧。”

Jerry擦了擦汗：“这真是一次奇妙的经历，教授！”

牛顿：“让我们再来回顾一下刚才那个水桶实验，如果运动都是相

对的，没有一个绝对参考系的存在，那么桶壁上的Jerry应该看到水面是先凹后平，因为在Jerry眼里，水相对于自己是从转动到静止的。但是实际上Jerry和我们一样都看到了水面是先平后凹的，这就是绝对空间存在的证明。”

牛顿得意地说完，看着Tom和Jerry，俩人还愣着呢，一时半会儿反应不过来。牛顿的水桶实验虽然具备大智慧，但却并不能让所有人满意，物理学界对这个实验的质疑声从来就没有停止过。但毕竟牛顿的光芒实在太耀眼了，其他人的声音很难发得出声响。

Tom：“教授，你的这个思维实验太伟大了，我折服了。”

Jerry：“教授，我恐怕一下子还不能完全理解，让我回去再想想。”

牛顿：“Jerry，看不见摸不着而又真实存在的东西有很多，不只是绝对空间，还有一样东西，你也看不见摸不着，但是我们谁也无法否认它的存在，那就是——时间。你们说说看，时间是什么？”

Tom：“时间就是生命，时间就是金钱，时间就是知识，时间就是胜利，时间就是丰收，时间就是灵感，时间就是思考。”

Jerry：“时间就是教堂的钟声，时间就是太阳的东升西落，斗转星移，我说不清楚时间是什么，但我分明感受到时间在流逝。”

牛顿：“时间是它自个儿的事情，它真实存在但又与外在的一切事务都无关，它绝对地、均匀地流逝，不与任何性质相关，任何力量都无法改变它绝对不变的频率。威斯敏斯特大教堂的钟声12点整敲响，它就是12点整敲响，不会因为你在洗澡还是在跑步而改变它12点整敲响这个本质。Tom在伦敦，Jerry在巴黎，如果忽略声音的传播时间的話，当钟声响起的时候，你们都应当听到钟声，在听到的那一刹那你们俩若有心灵感应，你们会同时感受到对方传递的感受。时间对于世间万物都是公平的，上帝他老人家既像一个慷慨的施主又像是一个超级吝啬鬼，不论你是国王还是乞丐，他老人家从不……”

此时，下课铃响了，Tom和Jerry几乎是在铃声响起的同时消失在教室门口，消失速度之快，甚至让牛顿都怀疑时间是不是真的存在了。

“……多给一点也不少给一点。”牛顿对着空气（他早就习惯了）

把最后一句话说完，也夹着讲义走出了教室。

牛顿的时空观符合我们大多数人的日常生活体验，因此，牛顿的这套思想体系我相信也很容易被各位读者所接受。况且，和牛顿的想法一样本身就是一件多么值得自豪的事情啊，牛顿那就是跟神一样的存在，他是当时物理界的泰山北斗，他是物理界的教皇，牛顿说出的话就像是来自上帝的启示。牛顿的绝对时空观被郑重地写入他那本神书《原理》中。神书之所以是神书，是因为用神书中所描述的定理可以准确地预测月食、日食发生的时间，精确到分秒不差，还能通过计算，预言当时尚未被观测到的太阳系行星的存在（海王星）。当预言被证实的时候，牛顿和他的神书的声誉达到了空前的顶峰，再没有人怀疑神书中描述的任何事情，牛顿的经典世界观大有千秋万载、一统江湖之势。

然而，就在牛顿死后又过了一百多年，一系列的物理实验都得到了让人匪夷所思的结果，这些结果让物理学家如此诧异，以至于他们一次次地怀疑自己的实验设备是不是出了问题。但是所有的实验被一再地重复，而且实验结果都在无情地推翻着牛顿的绝对时空观，整个物理界都陷入了疯狂，物理学遇到了前所未有的危机。如若牛顿地下有知，他一定会说：“上帝啊，这一切到底是怎么了？”

如果说到目前为止，本书所说的一切都还让你觉得这个世界就是我所认识的那个天经地义的世界，那么，接下去发生的一切，都将慢慢颠覆你的常识，开始挑战你的思维极限。

第二章 CHAPTER THREE

光的速度



经过了漫长的前面两章的阅读，我们终于要开始真正进入到相对论的世界了。如果说相对论是隐藏在山谷中的桃花源的话，那么正是“光”引导着懵懂的人类拨开草丛，沿着蜿蜒的小溪进入一个幽暗的洞穴。穿出洞穴后，一切豁然开朗，桃花源就在眼前。

说相对论就必须谈谈人类对光的传播速度的探索历程，你必须再耐着性子，压着对相对论到底是什么的强烈好奇，和我一起回顾一下人类和自然界中最普通也最神秘的光的故事。注意，这绝对不是废话，“光”是我们本书最重要的主角之一。

伽利略吹响冲锋号

在人类漫长的历史中，大家曾一度认为光线的传播是不需要任何时间的，也就是光的传播速度无限大。这非常符合我们的常识，你在漆黑的房间里划亮一根火柴，火柴的亮光发出的一刹那，整个房间就被照亮了，谁也没有看到过自己的手先亮起来，然后是自己的脚再亮起来，再看到房间的墙壁慢慢显现在黑暗中。当太阳从山后升起的那一刹那，地面上所有的东西都同时披上了金色的外衣，谁也没有看到过阳光像箭一样朝我们射过来。

但是，在今天，连小学生都知道，之所以我们无法感觉到光的传播速度，不是因为光的传播不需要时间，而是光传播的速度竟然达到惊人的30万千米/秒。这是一个多么快的速度啊，如果用这个速度跑步，一秒钟可以

绕地球7圈半。如果用这个速度从地球跑去月球，1秒钟多一点就到了，而人类最快的飞行器阿波罗登月飞船要飞4天。你可能很好奇，这么快的速度，到底是怎么测量出来的？这正是本章要讲述的故事——测量光速。但是所有参与这个故事的人都只猜到了开始，却没有猜到结局，人类对光速的测量本是一个普普通通的物理实验行为，没想到最后却给整个经典物理学说笼罩上了一层乌云。

第一个对光速无限大提出质疑的人就是我们的老熟人伽利略先生。伽利略从哲学的角度思考，认为物质从一个地方到达另一个地方不需要时间是一件无论如何都无法想象的事情，上帝既然创造了空间，那么就不应该再创造出可以无视空间存在的东西。伽利略毕竟是伽利略，他不仅仅是停留在对光速无限大提出质疑上，而是着手开始用实验来测量光速。

我们来看看伽利略是怎么做的。

伽利略一行四人，分成两组，分别登上两座相隔甚远的山峰，每组各自携带一个光源。很不幸的是，那个时代能够让伽利略他们挑选的光源只有两样：火把和煤油灯。伽利略他们只好带上两盏自己改良后的煤油灯。煤油灯其实只是做了一个简单的改进，就是在灯的一面加上了一个滑盖，当放下滑盖时，亮光就可以被挡住，而把滑盖拉起后，亮光又会照射出来。通过这样快速地拉动滑盖，就能制造出从远处看来煤油灯一闪一闪的效果。除了两盏煤油灯外，还需要两只一模一样的钟摆计时装置（这种装置也是伽利略发明的，利用钟摆的等时性原理制成，是摆钟的前身），以及记录数据的纸笔。好了，这就是伽利略他们全部的装备。各位如果你们现在来到山顶，拿着这些装备，得到的任务是测量光速，你会怎么办？是不是会一筹莫展呢？且看我们的大科学家伽利略是怎么做的吧。

在上山前，伽利略开始给队员们布置任务：“卡拉齐，你和我一组去A区，贝尼尼和卡拉瓦乔一组，你们去B区。我和贝尼尼负责掌管煤油灯，卡拉齐和卡拉瓦乔负责数据记录。贝尼尼，你给我记住，当看到我的煤油灯发出的信号时，你也立即拉开滑盖给我信号，我一看到你的信号我就会关上灯，然后你一看到我的灯灭了，你也赶紧把灯关

上，我看到你关上了灯我就迅速地再把灯打开发出信号，于是你也按照前面的步骤重复，我们就这么循环做下去，只要我给信号你就不要停。听明白了吗？贝尼尼。”

贝尼尼：“是！”

看到这幅场景，如果不知道的人，保证以为伽利略是特种部队的头，正在打真人CS呢。

伽利略继续说：“卡拉齐，卡拉瓦乔，你们两个负责记录数据，你们听好了，你们的任务是记录在钟摆的一个来回内，你们总共看到你们的同伴发出了多少次信号。任务大家都清楚了吧？还有没有问题？”

众人齐声：“没有问题！”

伽利略：“有没有信心完成任务！”

众人齐声：“保证完成任务！”

于是，带着必胜的信念他们上山去了。伽利略的智慧是过人的，他已经有了用统计学的方法来消除误差的想法。他很清楚，他们在打开关闭煤油灯的过程中，必然会有很多来自方方面面的误差，要消除这个误差，就必须重复做大量的次数取均值。你可以想见在那个寒风凛冽，伸手不见五指的山顶（为了实验效果，他们还要特意选择没有月光、星光干扰的阴天），伽利略和他勇敢无畏的助手们为了探求光速的秘密，不知疲倦地做着开关煤油灯的机械动作，边上还有两个人一边数着煤油灯开关的次数，一边还要注意钟摆的摆动，其难度可想而知。

然而不幸的是，虽然有必胜的信念，但这却是一个不可能完成的任务。如果伽利略地下有知光速是30万千米/秒的话，他也只能用他的那句名言“追求科学需要特殊的勇气”来自嘲一下了。用煤油灯和钟摆计时器测量光速，无异于把比萨斜塔抱起来去测量细菌的长度，但我们仍然要向伽利略致敬，是他吹响了人类向光速测量进攻的号角。

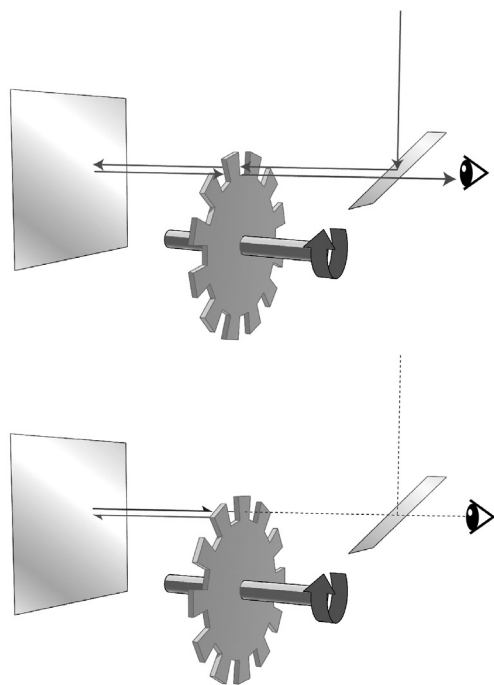
光速测量大赛

伽利略死后又过了三十多年，也就是到了1675年左右，人类终于首次证明了光是具有传播速度的。这个荣誉要授予一个丹麦天文学家，他的名字叫罗默（Romer，1644-1710）。罗默特别喜欢观测木星（这是最容易在地球上看到的一颗星星，很大很亮。像我在上海这样的城市，夜晚的天空很亮，天上只能看见少数的几颗星星，一般来说，那颗最亮的像灯泡一样挂在天上的星星，通常就是木星）。当年伽利略第一个发现木星原来也有卫星，而且至少有四颗。这四颗卫星围绕着木星公转，从我们地球的角度看过去有时候这些卫星会转到木星的背面去，于是就产生了如同我们在地球上看见月食一样的现象，木星的卫星慢慢地消失，然后在木星的另一侧慢慢出现。罗默对木星的“月食”现象整整观察了9年，积累了大量的观测数据。他惊奇地发现，当地球逐渐靠近木星时，木星发生“月食”的时间间隔会逐渐缩小，而当地球逐渐远离木星时，木星发生“月食”的时间间隔会逐渐变大。这个现象太神奇了，因为根据当时人们已经掌握的定理，卫星绕木星的运转周期一定是固定的，不可能忽快忽慢。罗默经过思考，突然灵光一现：我的天，这不正是光速有限的最好证据吗？因为光从木星传播到地球被我们看见需要时间，那么地球离木星越近，光传播过来的用时就越短，反之则越长，这用来解释木星的“月食”时间间隔不均现象真是再恰当不过了。罗默的计算结果是光速为22.5万千米/秒，已经和真相差不远了。罗默最大的贡献在于，他用翔实的观测数据和无可辩驳的逻辑证明了光速有限，并且还精确地预言某一次木星“月食”发生的时间要比其他天文学家计算的时间晚10分钟，结果事实与罗默的预言分毫不差。从此，光速有限还是无限的争论画上了句号，整个物理学界都认同了光速是有限的。

接下来的事情就像一场比赛，大家比赛看谁能更精确地测量出光速。在这场比赛中，有两大阵营，就是天文学家阵营和物理学家阵营。天文学家用天文观测的方法来计算光速（除了利用我们前面说到的类似罗默观测木星卫星的方法来观察其他行星的卫星，还有一种方法叫光行差，

这里不多介绍，有兴趣可以自己上网查)，而物理学家试图在实验室中精确地测量出光速。刚开始，天文学家一直跑在前面，毕竟光的速度太快了，在天文的大尺度范围内显然更容易观测到因为光速有限而产生的各种天文现象，但对实验物理学家来说，要想让实验的精度提高到足以测量光速，那真是比登天还难。不过，普通大众总是更愿意相信实验室中的数据，因为天文观测离我们太遥远，人们迫切地希望能在实验室中真正测量出光速来，毕竟看得见摸得着的实验设备还是更让人觉得温暖一点。但是想要提高实验精度谈何容易，因此一直到罗默证明光速有限后又过去了一百七十多年，直到 1849 年，法国物理学家菲索（Fizeau, 1819–1896）才想出了一个绝妙的主意来测量光速。这个点子实在是太棒了，下面我们来看看菲索的旋转齿轮法是如何测定光速的，凡是见过这套实验设备的人无不拍案叫绝。

菲索的旋转齿轮法的原理图如下：



【图3-1】

菲索的旋转齿轮法测量光速的原理图

一束光穿过齿轮的一个齿缝射到一面镜子上，然后光会被反射回来，我们在这个镀了银的半透镜后面观察（这种镜子有种特殊的性质，就是一半的光会被反射掉，一半的光会被透射过去。这种现象一点都不稀奇的，你在家对着窗户朝外看，如果明暗合适，就既能看到自己的影像又能看到外面的景物，这就是光的半透射现象），想象一下，如果齿轮是不转的，那么被反射回来的光原路返回，仍然通过那个齿缝被我们看到。此时，你开始转动齿轮，在刚开始转速比较慢的时候，因为光速很快，光仍然会通过这个齿缝回来。但是当齿轮越转越快，越转越快，到一个特定的速度时，光返回的时候这个齿缝刚好转过去，于是光被挡住了，我们就看不到那束光了。当齿轮的转速继续加快，快到一定程度时，光返回的时候恰好又穿过了下一个齿缝，于是我们又能看见了。这样的话，我们只要知道齿轮的转速，齿数，还有我们的眼睛到镜子的距离，就能计算出光速了。注意，这个实验的最伟大之处就是不再需要一个计时器，在这之前所有的实验室测量都失败的根本原因，就在于找不到有足够精度的计时器。但是你们也别以为菲索很轻松，事实上因为光速实在太快了，菲索只能不断地加大光源到镜子的距离，这样就对光源的强度提出了更高的要求，还要不断地提高齿轮的齿数，齿数太少精度也不够。就这样，在菲索不懈的努力下，终于当齿数上升到720齿，光源距镜子的距离长达8千米之遥，转数达到每秒12.67转的时候，菲索欢呼一声，他首次看到了光源被挡住而消失了，当转速被提高一倍以后，他又再次看到了光源。菲索终于胜利了，他计算出了光的速度是31.5万千米/秒，和光速的真相已经咫尺之遥了。

光速测量的比赛还在继续，各种各样的新方法被发明出来，实验精度被一步步地提高，我们就不再继续深究下去了。我只想通过前面的讲述让你明白，人类在测量光速的路上是如何艰难跋涉的，光速也绝不是某人的凭空想象，而是几代人的不断努力才发现的大自然的奥秘。但本章关于光速的故事才刚刚开始，好戏即将上演。

惊人的发现

菲索在实验室测算出光速的二十多年后的1873年，英国科学家麦克斯韦（Maxwell，1831-1879）出版了堪与牛顿《原理》比肩的物理学经典巨著《论电和磁》，不过这本书并不像《原理》那样一诞生就技惊四座、光芒四射。《论电和磁》刚开始的时候并未得到大多数人的认同，这也难怪，电和磁都是虚无缥缈的东西，对它们进行描述的理论总不像对小球的运动规律进行总结的理论那样让人觉得实在。麦克斯韦认为电和磁是同一种物质的不同表现形式，麦克斯韦用一组简洁优美的方程组描述出它们之间的性质和相互作用力，这个方程组叫作“麦克斯韦方程组”。你只要随便翻看一本讲物理学或科学史的书，里面基本上都会提到麦克斯韦方程组是数学美的典范，无数大科学家都被它的美震撼。单从它的表现形式之美来说，它就不可能是错误的（事实上直到今天，所有经典物理学中的公式除了麦氏方程组以外，都被相对论修正，唯独麦氏方程组仍然保留着他那简洁优美的形式，似乎添加任何一笔都是多余）。不过，我不需要在这本书中把这个方程组写下来，我和很多读者一样也是电磁学门外汉，无法体会它的美，如果读者当中恰好有懂行的朋友，我相信麦氏方程组已经深深地印在了你们的头脑中，也不需要我再抄出来。

根据这一套优美的方程组，麦克斯韦预言了一种神奇的叫作电磁波的东西。麦克斯韦说：“随着时间变化的电场产生了磁场，反之亦然。因此，一个振荡中的电场能够产生振荡的磁场，而一个振荡中的磁场又能够产生振荡的电场，于是，这些连续不断同相振荡的电场和磁场循环往复，永不停歇，就像一粒石子扔入湖中产生的涟漪，电磁场的变化也会像水波一样向四面八方扩散出去，这个扩散出去的电磁场我把它叫作——电磁波。虽然我现在还无法用实验的方法证明它的存在，但我坚信它一定存在。”

很遗憾，天才麦克斯韦只活到48岁，到死也没能亲眼见证电磁波的诞生。他死后没几年，一位德国的青年物理学家赫兹（Hertz，1857-1894）接过了麦克斯韦的衣钵。1888年，赫兹终于在实验室里发现了人们怀疑和期待已久的电磁波。赫兹的实验公布后，轰动了全世界的物理学家，大家纷

纷纷仿此实验，所有的实验结果都证明麦克斯韦的电磁理论是正确的，麦氏方程组取得了决定性的胜利，麦克斯韦的伟大遗愿也终于得以实现。既然电磁波是一种波，那么它的传播速度就可以用频率乘以波长算出来。频率很好办，是由实验设备的各种参数决定的，而波长也不难测，只要拿着一个感应器找到波峰（感应电流最强）和波谷（感应电流最弱）即可算出波长。赫兹没有费多大劲就拿到了波长和频率，他把两个数值一乘，得出了电磁波的传播速度是31.5万千米/秒（限于实验精度，和真实的速度有误差），一个惊人的速度。

等等，等等，我相信你和赫兹一样，看到这个数字突然觉得很熟悉。这个数字好像在哪里见过，31.5万千米/秒，31.5万，啊！这个数字不正是菲索旋转齿轮法测出的光速吗？难道天下竟有如此的巧合？这真是一个巧合呢还是说，还是说……光就是一种电磁波？赫兹被这个想法弄得兴奋不已。不光是赫兹，全世界还有很多的物理学家都因为这两个一致的数字在猜测光是否就是一种电磁波。正所谓众人拾柴火焰高，很快，大量的实验数据接踵而至，各种电磁波和光的相同特性被发现，科学界很快就达成一致意见：没错，光就是一种电磁波！

现在我们从电磁波的角度来研究一下，光的传播速度到底是相对于什么而言的。波的传播速度等于介质震动的频率乘以波长，因而这个速度是相对于介质而言的。比如我们熟悉的水波，当一颗石子扔到水中产生涟漪的时候，这些涟漪在产生的瞬间也就脱离了跟石子的联系，它们会在水中按照相对于水的恒定速度传播出去，因而在讲水波的传播速度的时候，隐含的参考系是水而不是那颗石子。同理，当我们谈论光的速度的时候，根据前面这种思想，隐含的参考系也不应该是光源，而是光的传播介质。但众所周知，光是一种能够在真空中传播的东西，遥远的星光穿过空无一物的宇宙空间到达我们的视线，那么这个参考系、这个介质到底是什么？

那不就是牛顿所说的绝对空间和以太吗（注意，以太这个词并不是牛顿发明的，牛顿是以太学说的主要支持者）？牛顿的绝对时空观在统治了物理学界两百年后达到了顶峰，伟大的艾萨克·牛顿爵士，您的光芒无人能挡，您为物理学构建起了雄伟的大厦，现在，就差最后一个能证明以太存在的实

验，来为这座雄伟大厦砌上最后一块砖了！

既然已经知道了光相对于以太的传播速度约为30万千米/秒，那么光速就成为能证明以太存在的最佳证人，关键是要说服它出庭作证。我们看看让光速出庭作证的这个实验是怎么构想的：我们的地球以30千米/秒的速度绕太阳公转，在宇宙空间中飞行，换句话说，我们的地球在以太中高速地飞行。如果把我们的地球想象成一艘大船，我们站在船头，就会迎面吹来强劲的“以太风”，那么通过伽利略变换和速度合成公式，我们很容易得出光在“顺风”和“逆风”中的传播速度，这两个速度显然会不一样。我们只要能用实验证明以上猜想，那么就确定无疑地证明了以太的存在。

物理学界举杯同庆，新世纪就要到来了，这个实验无疑将是献给新世纪最好的一份厚礼。具体的实验设计众望所归，落到了实验物理学的两位泰山北斗级人物身上，他们就是迈克尔逊（Michelson，1852-1931）和莫雷（Morley，1838-1923）。这二位也的确是当仁不让的人选，尤其是迈克尔逊，此人一生痴迷于光速的测量。



科学史上最成功的失败

本章的压轴大戏即将上演，在上演之前，我必须提醒你，本书中提到的所有实验你都可以看完之后忘掉，唯独这个“迈克尔逊—莫雷实验”千万不能忘掉，随便打开任何一本物理学史书，或者打开任何一本关于相对论的书，甚至随便打开一本科学史书，都一定会提这个实验。如果你记不住迈克尔逊—莫雷这么拗口的五个字，那你也可以记住“MM实验”，很多书上都这么叫；如果你连“MM实验”四个字也记不住，那么你就记住“美眉实验”。总之，这个实验对于整个物理学史甚至对于整个人类的科学史，都有着举足轻重的地位，它是给经典物理学带来狂风暴雨的两朵乌云之一。这个实验刚好发生在世纪之交，怎么看都有一种史诗大片的感觉，它喻示着物理学新旧两个世纪的交接。所以，我需要在这个实验上多花一番笔墨，让大家对这个实验了解得多一点。当你看完本书以后跟人闲聊的时候，如果还能记得聊一聊“MM实验”，这将是笔者莫大的荣幸。

(以下迈克尔逊和莫雷的对话为虚构)

迈克尔逊：“莫雷兄，你先说说看，你对这个实验怎么想？”

莫雷：“麦克兄（虽然莫雷比迈克尔逊大14岁，但是迈克尔逊在实验物理界的威望很高，所以莫雷尊称迈克尔逊一声‘兄’，但听起来有点像是在说“麦克风”），光速在顺风 and 逆风的理论差值是30千米/秒，而光速是30万千米/秒，这意味着我们的实验精度必须要达到万分之一才行，以我们现在的实验条件，似乎离这个精度还差得很远。”

迈克尔逊：“这个情况我很清楚，所以想听听你的想法，讨论一下我们怎么才能解决这个难题。”

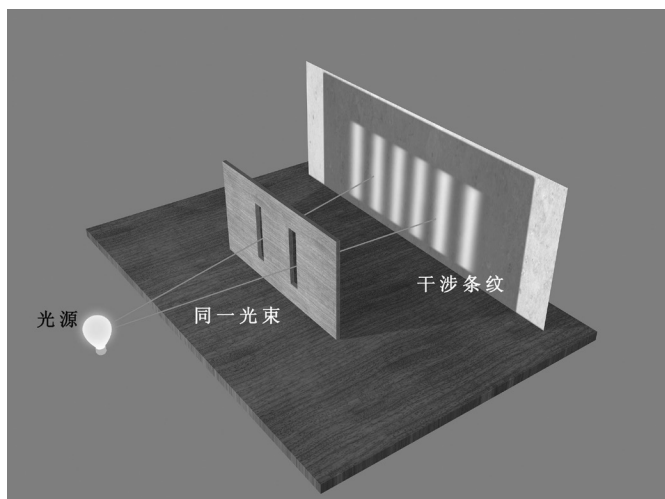
莫雷：“在短期内提高实验精度这条路估计是走不通的，我们必须绕开直接测量光速，要想一个什么间接方法来测量才行。”

迈克尔逊：“莫雷，我跟你的想法是一样的，肯定不能硬着头皮去测量，必须要想点儿什么别的办法。我想，我们是不是先把目标放低一点，不要想一步就测量出绝对数值，我们第一步先想出一个可以比较两束光谁快谁慢的办法。其实我们只要能先证明在顺风逆风中光速有差异，就迈出了胜利的第一步。”

莫雷：“麦克，你说得很对，我们把目标分成两个阶段，先想出第一阶段如何达成。你是不是已经想到什么好办法了？就别卖关子了。”

迈克尔逊：“我想到了英国人托马斯·杨（Thomas Young, 1773-1829）发现的光的干涉现象，我们或许可以利用这个特性来比较两束光的速度是否发生了变化。”

莫雷突然转身面向观众，说：“各位亲爱的读者，我给大家解释一下什么是光的干涉现象。听说你们现代人上高中的时候，都要做这个光的双缝干涉实验。简单来说，就是把一束光照到两根互相靠得很近的狭长的缝隙上，在这个双缝的后面如果我们竖上一面白墙，就会在墙上看到明暗相间的条纹。”



【图3-2】

光的双缝干涉实验

这是因为，光是一种波，同一束光被分成两束以后会自己跟自己产生干涉，所谓的干涉就是波峰与波峰相遇，强度就会增加一倍使得光更加明亮，而如果波峰与波谷相遇，则刚好互相抵消，光就会变暗，明暗相间的条纹就是这么来的。”

莫雷转回去，朝迈克尔逊尴尬地一笑：“不好意思，作者告诉我会有很多一百年后的读者观看我们的对话，我跟他保证我们之间的对话要让读者能听懂，请多多包涵，麦克风（一紧张把麦克兄说成了麦克风）。”

迈克尔逊表示不介意，听说有观众，他表现得反而更积极了，他继续说：“如果我们能想出一个什么办法，让同一束光分别走不同的路线，一条路线是顺风的，一条路线是逆风的，然后让它们最终会合到一起互相产生干涉现象。由于这两束光的速度不同，因此它们产生的干涉条纹一定和我们正常情况下做出来的干涉条纹有所区别，你说对不对，莫雷兄？”这句话看似对莫雷讲，迈克尔逊却有意无意地侧侧身子，似乎是想更多地引起观众的注意。

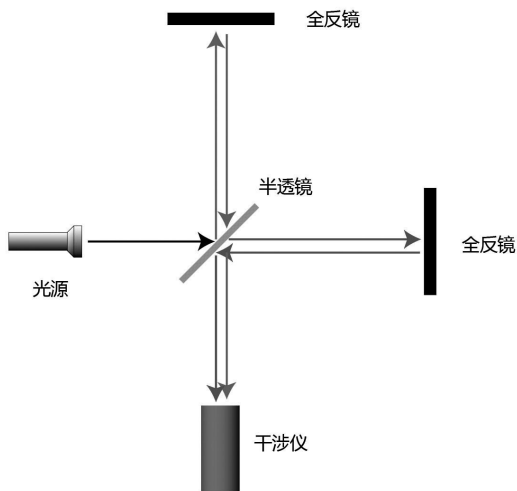
莫雷：“麦克，你太牛了，这个点子实在是太绝了！”

迈克尔逊：“我还有更精彩的没说呢。在实验过程中，如果我们把整个实验装置慢慢转动起来，你说会发生什么？”

莫雷：“我明白你的意思了，麦克。转动实验装置相当于偏转我们这艘地球大船相对于以太风航行的角度，那么两束光的速度也会相应地发生变化，最后反映到干涉条纹上的结果就是条纹会慢慢地移动！如果这个神奇的现象发生了，那么就确定无疑地证明了两束光的速度在发生着变化。麦克，你太伟大了！”

迈克尔逊突然面朝观众，手里拿着张硬纸板，上面写着“鼓掌”两个字，又很快转了回去。

迈克尔逊：“这个利用光的干涉性质来证明光速变化的实验原理图我已经想出来了，我画出来给你看，关键就在于中间那块半透镜，它可以把光分成两路，一路被反射90度朝上，一路直接透过去。”



【图3-3】

迈克尔逊—莫雷实验原理图

迈克尔逊：“我发明的干涉检测仪现在可就大有用武之地了，它比我们肉眼观测的精度可不知提高了多少倍。我计算了一下，如果地球的航行速度真是30千米/秒的话，那么在整个实验装置转过90度以后，

我们应该观察到干涉条纹移动了0.4个条纹的宽度，我的干涉仪可以分辨出0.01个条纹宽度的移动，因此，我们的实验精度绰绰有余。”

莫雷：“不过这个实验装置要造起来也不容易，我们必须尽可能地消除地面震动带来的干扰，如果整个实验装置的底座不稳，则很可能前功尽弃。”

迈克尔逊：“这个问题我也想到了，我准备建造一个巨大的水泥台，并且把这个水泥台放到注满水银的水槽上，让水泥台浮在水银上面，这样就能有效地消除震动。”

莫雷：“好的，麦克，你怎么说我就怎么办，别看我脑子没你聪明，可我有力气啊，体力活儿你就交给我吧。”

莫雷在制作实验器具方面确实是一把好手，没过多久，MM实验台建造完成。现在一切就绪，只欠东风了，牛顿的夙愿即将实现，经典物理大厦就要落成，物理界全都在翘首以待实验结果。所有的人都对实验结果相当乐观，前有伟大的牛顿，后有做物理实验尤其是测量光速的泰山北斗，一切都应该合乎逻辑，没有人怀疑大结局必将以喜剧收场。这一年爱因斯坦还只有8岁，此时的他正在痴迷地玩着父亲送给他的一个小小罗盘（爱因斯坦在回忆录中经常提到这个罗盘），连头都没有抬起来看我一眼。（我女儿正在看电视，里面传出一个声音：唯一看破真相的是外表看似小孩，智慧却过于常人的名侦探柯南。）

可能读者们已经猜到了，最终的实验结果大跌所有人的眼镜，迈克尔逊的干涉仪自始至终没有观察到条纹的任何移动，干涉条纹就像被定格在了干涉仪里面，不论怎么旋转实验装置，干涉条纹都纹丝不动。本来这个实验计划要做半年，要分别测量地球在近日点和远日点时对干涉条纹的影响，因为地球在近日点和远日点的公转速度不一样。但是实验仅仅做了四天就停止了，因为实验结果如此确定无疑地表明了光速没有丝毫变化，干涉条纹根本不动，实验值和理论预测值相差十万八千里。这个实验没必要继续做下去了，一定有什么地方不对。

整个物理界一时哗然，大家都明白，要么是理论出了问题，要么是实

验出了问题。但牛顿的绝对时空观和以太学说看上去都是如此完美，而且也符合我们的日常生活经验，因此，当时的物理界也和此时的读者你一样，不愿意相信是理论出错了，而都倾向于实验本身出了问题，于是各种各样的解释冒了出来。有的说是以太会被地球所拖拽，这就是著名的拽引说，一度特别流行；也有的说是长度在运动方向上会发生收缩刚好抵消干涉变化；还有的说光的速度会受到光源移动速度的影响等等。总之，各种各样的解释一时风起云涌，这股热潮一直从 19 世纪延续到了 20 世纪。但从总体上来说，所有的解释都还是建立在相信牛顿的绝对时空，相信以太的存在，相信伽利略变换的成立等基础之上的，很少有人站出来质疑理论的根基是不是出了问题。

19 世纪最后一天的太阳落山了，20 世纪的曙光照亮了人类写满沧桑的脸庞。人类文明经过数千年的艰难跋涉，即将在新世纪来临的时候迎来一次彻底的洗礼。

第四章

CHAPTER FOUR

爱因斯坦和狭义相对论



1900年，20世纪的第一场雪似乎来得比以往时候更晚一些，这不是一个平静的年份。在中国，孙中山接任了兴中会会长，正式登上政治舞台，他后来成为中国第一个共和制总统；随后，义和团运动达到高潮，八国联军攻入北京，慈禧太后和光绪皇帝仓皇逃出北京城；而沉睡了近千年的敦煌莫高窟也在这一年被首次打开，中华文明史被重新发现；在欧洲，尼采死了，弗洛伊德发表了她的传世名著《梦的解析》，巴黎正在举办世博会和第二届夏季奥运会。这一切，都带着创世纪的味道。

两朵乌云

4月27日，此时的英国伦敦天气还有点阴冷。在阿尔伯马街上的英国皇家研究所门前，人来人往，一位绅士彬彬有礼地扶着贵妇人上了马车，赶去听普契尼的歌剧《波希米亚人》。马车驶过后，两位老太太望着马车远去，羡慕地讨论着刚才那个贵妇人的礼帽式样。在两位老太太的身边，一个个穿着考究、表情严肃的绅士们走进皇家研究所的大门。老太太们不知道，这些绅士都大有来头，全是当时欧洲最有名望的科学家，他们风尘仆仆地从欧洲各国赶来参加科学大会，这在科学界是一件大事。

皇家研究所的主席台上，站着一位白发苍苍的老者，此人就是德高望重而又以顽固著称，已经76岁高龄的开尔文勋爵（Kelvin，1824-1907）。他用他那特有的爱尔兰口音开始了演讲：“The beauty and clearness of the dynamical theory, which asserts heat and light to be modes of motion, is at present

obscured by two clouds. The first came into existence with the undulatory theory of light, and was dealt with by Fresnel and Dr. Thomas Young; it involved the question, how could the earth move through an elastic solid, such as essentially is the luminiferous ether?"

各位听我说，说到演讲，马丁·路德·金的《我有一个梦想》是在励志界被引用最多的；而在物理学界，开尔文的这段演讲则是被引用最多的，所有关于物理学史的书一定会引用。虽然本书不是一本严肃的物理学史书，只是一本通俗的科普小书，但我也不能打破行业潜规则，必须要引用一下。上面这段话的中文版本很多，五花八门，各种译法都有，考虑到我们都是物理学门外汉，所以我尽量用大家都容易理解的口语化的语言给大家翻译一下，至于精确性我就不管那么多了，业内人士尽管拍砖。

开尔文讲道：“在我眼里，我们已经取得的关于运动和力的理论是无比优美而又简洁明晰的，这些理论断言，光和热都不过是运动的某种表现方式（热是分子的运动，光是电磁波的运动）。但是我们却看到，在经典物理学这片蓝天上有两朵小乌云让我们感到有些不安。自从菲涅尔先生和托马斯·杨博士创立了光的波动学说以来，我们一直都在苦苦寻觅一个问题的答案，那就是：我们的地球是如何在以太中航行的？以太这种被我们称为‘弹性固体’的看不见摸不着的物质存在的证据又在哪里？这就是我要说的第一朵乌云。”

毫无疑问，开尔文说的第一朵乌云，就是迈克尔逊-莫雷实验，不但没有能证明以太的存在，反而貌似恰恰证明了以太的不存在。估计大家还很好奇开尔文说的第二朵乌云是什么，那么第二朵是黑体辐射实验的结果和理论不一致带来的困惑。这第二朵乌云牵出的又是一个长长的激动人心的故事，那是一个关于量子力学的故事，但那个故事不是本书的重点。

这第一朵乌云已经在我们耳旁传来了隐隐雷声，很快就要遮云蔽日、掀起狂风大浪。此时的物理学界，已是“山雨欲来风满楼”。

巨星登场

时间终于走到1905年，后来这一年被人们称为物理学的“奇迹年”，100年后的2005年被定为“国际物理年”，全球举行了各式各样盛大的纪念活动，就是为了纪念1905年这个特殊的年份，或许人类文明史上再也不会出现这样的奇迹年了。这一年之所以被称为奇迹年，是因为我们本书的一号男主角在这一年中连续发表了5篇论文，每篇论文都像一颗耀眼的超新星照亮了宇宙，改变了物理学的纪元。

下面让我荣幸地介绍并邀请我们的一号男主角——阿尔伯特·爱因斯坦先生登场。虽然在各位的心目中，爱因斯坦的形象早已固化，乱蓬蓬的头发，满是皱纹的脸，经常叼着的烟斗，鹰一样深邃的眼神，在很多人的心目中这个老头代表的就是科学。但是，爱因斯坦成为本书一号男主角的时候，可是一个只有26岁的英俊小伙子，完全不是你头脑中的那个形象。瞧瞧，这就是青年爱因斯坦。



【图4-1】

青年时代的爱因斯坦

下面是爱因斯坦应聘本书一号男主角时投递的简历：

姓名：阿尔伯特·爱因斯坦

性别：男

国籍：瑞士
年龄：26
婚姻：已婚
职业：专利局三级技术员
单位：瑞士伯尔尼专利局
学历：苏黎世联邦工业大学 物理专业 本科毕业
爱好：拉小提琴和思维实验
成就：没有（没结婚就要当爸爸了，不知道这个算不算）

如果这份简历被一个平庸的导演看到，不用想，肯定直接被扔进垃圾桶，桌上堆积如山的简历最次也是个博士的，教授、博导更是多如牛毛，怎么可能轮得上这个不知道从哪里冒出来的、专利局的一个小小的三级技术员呢？但是笔者向来不爱走寻常路，所以决定前往瑞士伯尔尼一探究竟。

作为未来人的好处就是我可以看到爱因斯坦，但是他却看不到我。我不会跟过去的世界产生任何交流，也无法影响过去的世界，我只是一个全能的观察者。（科学原理：假设此时你能突然出现在距离地球 100 光年外的地方，你拿起天文望远镜朝地球看，看到的就是 100 年前的地球，只要精度足够，你就能看清地球上 100 年前发生的事情的每一个细节。）

作为一个三级专利员，爱因斯坦的工作主要是审查提交过来的各种发明专利是否具备原创性，是否符合专利申请的标准。最近一段时间，爱因斯坦发现关于远距离对时方面的发明专利申请特别多。这是因为火车性能正在快速提高，这个钢铁机器居然比马车跑得还快，并且不知疲倦，只要不停地给它吃煤，它就能不停地跑，而你给马不停地吃草只能把它撑死。因为火车跑得太快了，所以就催生了一个新的需求，就是要求能远距离对时。欧洲的各个城市之间还没有统一的时间标准，各个城市都拥有自己的地方时间，过去只有马车的时候，从一个城市到另外一个城市，只需要把自己的钟表根据当地的时刻调整一下即可，从来也没人觉得会遇到什么麻烦。但是火车出现后，情况可就变了，火车跑得那么快，如果两个城市之

间的钟表时间不调到一致的话，那么在同一个铁轨上跑的多辆火车很可能就会撞在一起，因此，对时绝对不是一件小事。

此时，利用电磁波来通讯的无线电技术已经逐步趋向成熟。我们前文已经说过，电磁波的传播速度是光速，所以利用无线电来实现远距离对时就是一个很靠谱的想法。很多这方面的发明专利开始涌向伯尔尼专利局，爱因斯坦因为是物理专业毕业的，所以这类发明往往都会交给他来审查。小爱很敬业，也很细致，为了提高自己的业务水平，小爱也跟着要思考电磁波、光速、时间这方面的问题。但是最近小爱有点儿烦，他申请二级专利员的申请书被驳回了，理由是专业能力还不够，这也促使小爱必须多努力思考，提升业务水平。

第一个原理：光速不变

每当专利局的工作结束后，小爱总是不急于回家，而是坐在办公室，用自己写完的草稿纸卷起一根纸烟，点燃，深吸一口，往椅子上一靠，开始他的思考：

光为什么传播得那么快？因为它是一种电磁波；电磁波是怎么传播的呢？根据麦克斯韦那组漂亮的方程组可以看出来，振荡的磁场必然产生振荡的电场，而振荡的电场又必然产生振荡的磁场，如此循环下去就成了电磁波。那么，我是不是可以这样认为，电磁波的传播速度正是第一个“振荡”引起第二个“振荡”的反应速度呢？嗯，没错，这就好像一队人站成一排报数一样，听到一的人报二，听到二的人报三……光速其实就是这个报数的传递速度，它和我们常见的小球或者火车的运动速度显然有很大不同。火车从这里运动到那里，就是火车这个实体的位置从这里移动到了那里，但是电磁波，也就是光，它的传播速度其实是“每一个报数的人，他们的反应速度”，真空充当的就是这个报数人的角色，而交替变换的电、磁场就是报出去的这个“数”。

1865年，伟大的麦克斯韦在《电磁场的动力学理论》中证明过，电磁

波的传播速度只取决于传播介质。到了1890年，第一个在实验室里发现电磁波的天才赫兹也明确地指出，电磁波的波速与波源的运动速度无关。麦克斯韦的方程组实在是太美了，我深信蕴含如此深刻数学美的理论一定是正确的。

电磁波的速度和波源的运动速度无关，也就是光速和光源的运动速度无关，让我来想象一下这是什么概念。当我朝平静的湖中扔下一颗石子，不管我是垂直地从上空扔下去，还是斜着像打水漂一样地扔过去，这颗石子产生的涟漪都应该以相同的速度在水中扩散出去。

我可不可以做这样的一个思维实验：假设我现在一个人在黑漆漆的宇宙中飞行，虽然我飞得跟光一样快，但是因为没有任何参照物，我感觉不到自己的速度，就我自己的感觉而言和静止是一样的。这时候如果我身边有一束光，或者一个电磁波，我将看到什么呢？一束和我保持静止的光吗？一个静止的电磁波吗？也就是看到一个虽然在振荡的电磁场，但是它却不会交替感应下去吗？哦，不，这显然违背了麦克斯韦的方程组，波的速度和波源的运动速度无关，虽然我在以光速飞行，不论是我自己用发生装置发生一个电磁波，还是我飞过发生装置，我看到的电磁波都应该是相同的，因为介质没有变。我将看到一个振荡中的电场能够产生振荡的磁场，而一个振荡中的磁场又能够产生振荡的电场，这个交替反应绝不会停下来。再想象一下报数的情况，如果我和这队报数的人都在一节火车车厢中，火车高速行驶，但是我并不能感觉到火车是静止的还是运动着的，我会看到报数人的反应速度提高了吗？这也显然很荒谬，火车跑得再快也应该跟报数人的反应速度无关，我应该仍然看到它们以同样的反应速度传递着“一、二、三……”才对啊。

这么说来，光速应该相对于任何参照系来说，都是恒定不变的。哦，我这个想法实在有点疯狂，但是MM实验是怎么解释的呢？MM实验得出的最直接的结论不就是光速不变吗？为什么我们首先要把这个简单的结论复杂化，想出各种各样的理论和假设来否定光速不变呢？为什么我不先承认这个实验结果是正确的，然后再去考虑怎么解释这个结果呢？

要解释MM实验为什么测量不到以太的存在，无非就是下面两种思路：

第一种思路：

假设一：以太是存在的。

假设二：因为某种原因，无法检测出以太。

结果：我们没有在MM实验中检测到以太。

第二种思路：

假设一：以太是不存在的。

结果：我们没有在MM实验中检测到以太。

根据奥卡姆剃刀原理，第二种思路更有可能接近真相，它需要的假设更少。

想到这里，爱因斯坦手上纸烟的烟灰掉落在地上，瞬间碎成一片。爱因斯坦从沉思中回过神来，对刚才的思考感到满意，他想这个问题已经不止一天两天了。他拿起笔在草稿纸上写下一句话：光速与光源的运动无关，对于任何参考系来说，光在真空中的传播速度恒为 c 。写完他马上匆匆收拾东西回家，再不回去，老婆该冲他发火了。

第二个原理：物理规律不变

最近小爱被这些想法搞得有点兴奋，上班也不大有心思，脑子里都是这些关于光速的想法。小爱的思考如汹涌的潮水般朝笔者的思维中涌过来，让笔者应接不暇。在所有这些思考中，关于伽利略相对性原理的思考尤为精彩，而且是从另外一个思考角度出发，同样得到了光速必须不变的结论。让我们来一起听听小爱的思考：

伽利略相对性原理说的是，在任何惯性系中，力学规律保持不变。这一原理简洁而深刻，看起来是如此优美。但我想问的是，为什么上帝只偏爱“力学规律”呢？电磁学规律就会变吗？热力学规律就会变吗？这说不通。上帝一定是一个喜欢简单的老头子，他不想把问题复杂化。

我的想法是：在任何惯性系中，所有的物理规律都不变。对，应该是不变的，如果在不同的惯性系中，普遍的物理规律是不同的，那么我们会看到什么？天文学家早就测算出来，我们居住的地球是以每秒钟30千米的高速绕着太阳公转，对我们地球上的每一个人而言，我们都坐在地球这个大火车中，那么物理规律在不同的空间取向上就应该不同才对，因为地球的运动方向每时每刻都在发生着变化。换句话说，空间会有各向异性，我们做任何物理实验都不能忽略这个空间各向异性。但是，实际情况是怎样呢？我们从来没有想过，做一个赫兹的电磁实验要考虑实验室的朝向吧？如果有人告诉你：实验室的朝向将决定电磁实验的结果，你一定会觉得荒谬。对我们这个地球空间来说，哪怕是最小心的观察，也没有发现任何物理规律的不等效性，也就是没有发现任何空间各向异性的证据。

在我看来，MM实验的实质就是对空间各向是否异性的检测。这是迄今为止对空间各向是否异性的检测精度最高的实验了，但即便是如此高精度的实验，也没有发现任何空间各向异性的证据，反而恰恰说明了伽利略的相对性原理应该被修正为：在任何惯性系中，所有物理规律保持不变。

伽利略曾经写过一个生动的故事，说如果在一艘大船的船舱中，你带上一些小飞虫，在舱内放上一只大水罐，里面养上几条鱼，再挂起一个水瓶，让水一滴一滴地滴到下面的水罐中。然后你观察飞虫的飞行，观察鱼的游动，观察水滴入罐。但是不论你多细心地观察，你也不可能通过观察这些情况，来判断船是静止的还是处于匀速直线运动中（这个故事在我们中学的物理书中被称为“萨尔维柯蒂之船”）。同样，你试图用力学实验的所有方法来判断船的状态的行为也都是徒劳的，不管你做什么样的力学实验，都不可能判断出船的状态。

我的想法是，不仅是做力学实验不行，你在上面做任何物理实验，不论是光学、电学还是热学实验，都无法判断出船到底是静止的还是正在做匀速直线运动。上帝不偏爱任何物理规律，在惯性系中，众生平等。

这就是我爱因斯坦的相对性原理，它比伽利略的相对性原理更简洁、更深刻、更优美，我很难想象它是错的。

根据这个原理，真空中的光速必定是恒定不变的，如若不然，我就可以通过做光速测量实验，来判断萨尔维柯蒂之船到底是静止的还是运动的。

小爱想到此节，立即拿出昨天那张稿纸，在昨天写的那句话下面又加上了一句话：“在任何惯性系中，所有物理规律保持不变。”写完他马上匆匆收拾东西回家了，再不回去，老婆又该冲他发火了。

这天晚上躺在床上，爱因斯坦失眠了，对妻子的暗示也置若罔闻，他满脑子都是草稿纸上的那两句话。说实在的，小爱觉得物理学中蕴含的奥秘比身边的妻子更值得迷恋，他心底里有点后悔大学时过于冲动，干了不该干的事情。但是总该对米列娃负责吧，想起自己的婚姻，小爱总是觉得有点无奈。这些东西还是别多想了，草稿纸上的两句话在爱因斯坦的脑袋中一遍遍地显现出来：

1. 在任何惯性系中，所有物理规律保持不变（相对性原理）。
2. 光在真空中的传播速度恒为 c （光速不变原理）。

这两句话就像一个魔咒，在小爱的脑中挥之不去：如果说我的思考是正确的话，这两个假设成立，那么到底意味着什么呢？如果一个人在一列以速度 v 行驶的火车上，用手电筒打出一束光，那么从站台上的人看来，这束光的速度难道不应该是 $c+v$ 吗？但如果真的是 $c+v$ 的话，明显又和我上面写的两句话相抵触。看来我要么放弃简洁优美的相对性原理，要么放弃我头脑中对于速度的既有理解。如果一只小鸟也在车厢里以 w 的速度飞，那么站台上的人看来，小鸟的速度显然应该是 $v+w$ ，对这个观念，现在没有人会否认。但是，凭什么我们对小鸟的结论硬要安在光的头上呢？我们对光速的认识太浅薄了，相对于光速，不论是小鸟还是火车，其速度都低得可以忽略不计。我们生活在一个速度低得可怜的世界里，在这个世界里总结出来的规律难道真的也可以适用于高速世界吗？在火车上的人和站台上的人看到的光速都仍然是 c ，这个结论之所以让我们感到奇怪，是因为我们一厢情愿地把我们在低速世界的感受直接往高速世界延伸，但事实超出了我们的想象。我们应该果断地抛弃旧观念，接受新观念。

小爱不再纠结了，他决定接受光速恒定不变这个新观念，以此为基石，继续往下推演，看看到底会得到些什么结论。不论这些结论是多么的光怪陆离，至少应该有这个勇气往下想，再奇怪的结论都可以交给那些实验物理学家们用实验去检验真伪。

小爱想起了自己非常崇拜的古希腊数学家欧几里得，他写的《几何原本》一直是小爱少年时代最钟爱的书。欧几里得从5条公理、5条公设出发，推导出了23个定理，解决了467个命题。这种从基本的几个公理出发，逻辑严密而又无懈可击的推导过程，让少年时期的小爱深深地感受到数学之美。他还记得当自己第一次亲手证明出三角形内角和是180度时候的兴奋，还记得自己苦苦推导了两个月，终于亲手证明了毕达哥拉斯定理（勾股定理）时的激动，这些小时候的事情历历在目。“那么我是否可以从几何学的公理思想出发，把光速恒定不变作为基本公理，在此基础之上往下推导呢？”小爱想着想着，眼皮开始发沉，意识逐渐模糊起来。小爱睡着了，他做了一个梦，这个梦非常精彩。虽然小爱第二天起床以后把这个梦的情节忘记掉了，证据是在他以后的著作中再也没提到过梦中的情节，但是显然这个梦中的结论他没有忘记，证据是在他以后的著作中，他以另外一个不同的故事描述了同样的结论。但在笔者看来，小爱这个梦远比他自己后来写下来的故事要精彩得多，下面让我把小爱的这个梦记述下来：

环球快车谋杀案

凌晨五点，爱因斯坦卧室。

一阵急促的电话铃声惊醒了熟睡中的爱因斯坦，爱因斯坦从被窝中伸出一只手，拿起了电话：“喂，什么事？”

电话里传出声音：“警长，环球快车上发生枪击案，一死一伤，嫌犯受伤，请您速来现场！”

“我马上就到。”

爱因斯坦警长从床上蹦起，穿衣出门。

天刚蒙蒙亮，环球快车伯尔尼站，一列银白色的外形酷似鱼雷的火车停在站台上，车身上刷着一行标语：环球快车，一小时环球旅行。

现在，车站四周拉起了警戒线。

一位探员上来迎接爱因斯坦，他一边陪同爱因斯坦朝火车走去，一边介绍案情。

探员：“警长，我们30分钟前接到一位女士的报案，声称环球快车上发生枪击案。我们赶到现场的时候，发现两名男子分别倒在车厢的两头，其中一人头部中弹，当场死亡，另外一人只是手臂中枪，没有生命危险，目前正在列车上的医务室休息。他拒绝回答我们的问题，说一定要见到我们的上司才肯开口。案发当时除了这三个人，该车厢没有其他人。”

爱因斯坦问：“那个报案的女士呢？”

探员：“报案的女士叫艾尔莎，是一位年轻漂亮的小姐，我们赶到时她正在给受伤男子包扎手臂。她声称枪击双方都是自己的朋友，其他的就不肯说了，也是要等您到才肯开口。”

发生枪击案的列车车厢中，三四名探员正在仔细勘查现场。

爱因斯坦看到死亡男子已经被搬离了现场，在他倒下的地方用白色粉笔勾勒出了一个人形，在车厢的另一头也用白色粉笔勾出了一双脚印，看位置可以想象出发案当时受伤男子坐在地板上，背靠着车厢壁。

爱因斯坦看到在列车中间的走道上，有一盏自制的电灯还在亮着，这盏灯跟普通的电灯没有什么两样，只是上面似乎多加了一个自动延时装置。

探员：“警长，这盏灯我们刚才已经试过了，在打开开关后，它会延迟五分钟再亮，不知道有什么用意。”

爱因斯坦没有回答探员，只是简单地说了声：“走吧，我们去医务室。”

列车医务室，艾尔莎坐在椅子上，表情忧郁。她边上坐着一位英

俊的年轻男子，上臂靠肩的位置包扎着纱布，隐隐有血迹透出来，表情非常镇定。

爱因斯坦在他们对面的椅子上坐下来，对着年轻男子说：“我是爱因斯坦警长。”

男子：“我是泡利。”

爱因斯坦：“中枪的男子你认识吗？”

泡利：“认识，他叫狄拉克，我们是情敌。”

爱因斯坦转头看着艾尔莎，报以询问的目光。

艾尔莎忧郁地说：“是的。可惜我来晚了一步。”

爱因斯坦：“泡利，这么说，你和狄拉克先生是为了这位小姐在决斗吗？”

泡利：“是的，警长，我们在决斗，为了神圣的爱情。”

爱因斯坦问艾尔莎：“泡利先生和狄拉克先生同时爱上你，是这样吗？他们之前提到过决斗这回事吗？”

艾尔莎哭泣了起来：“他们总是在我面前争吵，逼我从他们中选一个，可是我实在不知道该选哪一个。昨天晚上，我看到他们俩留给我的信，说要在环球快车上决斗，让我嫁给胜利的一方。信上有他们的亲笔签名，我看到信以后立即往车站赶，终于在开车前一分钟登上了火车，但我不知道他们在哪节车厢，等我找到他们的时候，一切都已经晚了。”

爱因斯坦：“泡利先生，根据决斗法案，如果你能提供证据，证明你们俩之间的决斗是完全公平和自愿的，你将无罪。”

泡利从上衣口袋中拿出了一份文件，递给爱因斯坦，说：“这份文件是我们俩商定的决斗规则，有我们的亲笔签名，请过目。”

爱因斯坦接过文件，阅读起来。

泡利继续说：“我们的决斗规则是这样的——我和狄拉克分别站在车厢的两头，在我们的正中间放一盏灯，这盏灯在按下开关后，会延迟5分钟亮起。我们约定，当看到灯亮起的刹那，就可以互相开枪射

击。我们站立的位置有脚印，可以证明我们距离灯的位置完全相同。”

爱因斯坦看完文件，想了一下，说：“光速是恒定的，这个规则看起来的确公平，但是必须要有证据证明你确实是在看到灯亮起后才开的枪，否则，你将被以一级谋杀罪指控。”

泡利：“这很容易，我们之所以选择在环球快车上决斗，就是因为环球快车上每节车厢都有全世界最先进的高速影像记录仪，只要调出记录仪的画面记录，就可以证明我是在看到灯亮以后才开的枪。”

一个探员在边上说：“警长，灯的位置我们已经仔细测量过，确实如泡利先生所说，离他们脚印位置的距离完全相等。”

爱因斯坦：“那么我们现在就一起去列车的影像记录仪室，当场查证。”

影像记录室。

一位工作人员正在屏幕前调阅影像，他一边操作仪器，一边对众人说：“该仪器是目前全世界最先进的影像记录仪，理论上它可以无限放慢画面，甚至连光的运动都能看得一清二楚。找到了，这个时点记录的画面就应该是案发当时的影像，警长你可以操作这个旋钮来前进或者后退画面。”

车厢中泡利和狄拉克两人正站在车厢的两头，手都放在腰间的枪套上，屏幕右下角显示：Time: 4:15:20:345:667

爱因斯坦轻轻地转动旋钮，屏幕右下角的数字跳动着。

只见车厢中间的灯泡上的灯丝慢慢地变红，渐渐地由红变黄，然后又由黄转白，接着整个灯丝突然被一个黄白色的光球包裹起来。

爱因斯坦知道此时灯亮了，他继续转动旋钮。

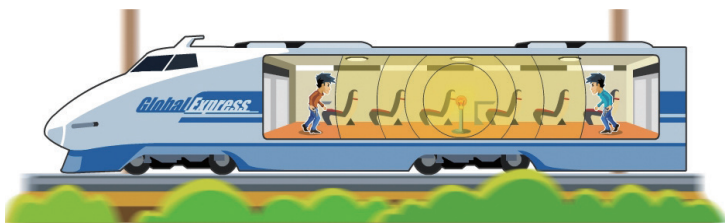
黄白色的光球迅速扩大，就像一个膨胀的气球。

爱因斯坦小心翼翼地转动着旋钮。

光球迅速膨胀开，一下子就把整个车厢都包裹进去了，整个车厢都被照亮。

所有人都看得很清楚，光球同时到达泡利和狄拉克所在的位置，

到达的时候，双方的手都没有动。



【图4-2】

从快车上看到的决斗现场

屏幕右下角的数字在跳动，但是整个车厢就跟定格了一样，等了很久，双方都没有动。

爱因斯坦：“怎么回事？”

工作人员：“请快进，警长！”

爱因斯坦一拍脑门：“是的，我怎么忘记了，人的反应在光速面前是多么微不足道。”

屏幕右下角的数字快速跳动起来。

终于，人们看到了两人几乎同时拔枪的画面，但泡利的动作稍稍快了一点点，两束火光从两把枪口冒出来，接着，两人都倒地了。

爱因斯坦按下停止键：“看来，事情都清楚了，泡利和狄拉克先生自愿决斗，决斗规则公平合理，双方也都遵守了规则，这样的话，泡利先生应该是无罪的。但我不是法官，我会把我的意见在法庭上陈述，在此之前，泡利先生必须被限制自由行动。”

爱因斯坦松了一口气，点上一支烟，走出列车，准备收工回家。

突然，他听到背后有人大声喊道：“警长，等一等。”

一个头戴礼帽的中年绅士急匆匆地从远处跑来。

中年绅士还没站定便大声说道：“警长先生，我是狄拉克的哥哥，我叫玻尔，请您别被无耻的杀人犯蒙骗了，我有证据证明这是泡利精心设计的一场谋杀。”

爱因斯坦：“您有什么证据？”

玻尔：“请跟我来警长，我有证据显示给您看。”

爱因斯坦：“我们去哪里？”

玻尔：“我的职业是环球快车的监控员，我得知弟弟出事的消息后，立即赶到了车站。哦上帝，真难以相信我的眼睛，我可怜的弟弟就这么轻易地被夺去了年轻的生命。泡利说这是一场公平的决斗，我刚开始也误信了，因为我也调阅了车厢里影像记录仪的画面，看到了当时的那一幕。从车厢记录仪的画面上来看，他们确实同时看到了灯光，并且都是在看到灯光之后才开的枪。但是我总有一种直觉，事情没有这么简单。我查找了枪案发生的那个时点，环球快车恰巧通过巴黎站，于是我就去调阅了巴黎站站台上的影像记录仪画面，那个站台也安装了这种最先进的影像记录仪。于是，我看到了完全不同的一幕。”

环球快车巴黎站的监控室。

玻尔熟练地操作着各种仪器，很快，画面被定格在了环球快车通过巴黎站的影像上，站台上的影像记录仪非常灵敏，从列车的窗户中可以看到清晰地看到车厢内的影像。

玻尔一边操作一边解说：“警长，请注意，泡利的位置在车尾方向，狄拉克的位置在车头方向。看，灯光亮起来了，警长，请注意，此时环球快车正以每小时3万千米的速度行驶着。你看，当黄白色的光球扩散开的时候，泡利是迎着光球的方向运动，而狄拉克刚好相反，他正朝着光球前进的方向运动。警长，我现在定格在这个位置，你看，在泡利与光球相遇的这个时点，光球还没有追上狄拉克。也就是说，泡利先看到了灯亮起，并不是像他所说的，两人同时看到了灯亮起。他是个无耻的杀人犯，他必须为我弟弟的死负责，他欺骗了我们，警长！”



【图4-3】

从站台上看到的决斗现场

爱因斯坦看着影像记录仪中的画面，脑中一片空白，他感到有一个想法重重地击中了自已的大脑。短暂的眩晕之后，爱因斯坦恢复了神志，他把整个事件在脑子里回放了一下，一字一顿地说：“列车上的仪器记录的画面是真实的，没有造假；站台上的仪器记录的也是真实的画面，没有造假。从列车的角度来看，他们俩确实同时看到了灯光，这不难理解，因为在列车上看，灯泡发出的光球到达车头与车尾的距离相等，且光球射向两端的速度都为 c ，所以光球同时与两人相遇。但从站台上看来，泡利却先于狄拉克看到灯光。这一切都是因为光速与光源的运动无关，也就是光速不变造成的。从这件事情上来说，时间也是相对的，对于列车上的人和站台上的人来说，没有真正的同时，任何所谓同时发生的事情，都只能是对在同一个惯性系中的人才成立的。”

玻尔：“警长，站台仪器记录的画面是确凿无疑的证据，泡利的决斗规则是不公平的，对泡利有利！他应该被指控一级谋杀罪。”

爱因斯坦：“玻尔先生，我只能把我的观点如实地陈述给法官，至于法庭怎么判断，我无权干涉。您提供的证据非常重要，我非常感谢您。”

说完，爱因斯坦转身离去，玻尔在后面生气地大声吼道：“阿尔伯特，你这个蠢货，你怎么能无视证据的存在，你给我醒醒！你给我醒醒！”

爱因斯坦突然感到很奇怪，玻尔的喊声怎么不见小呢？我在走远，但这喊声怎么越来越大了？爱因斯坦突然感到脸上一阵疼痛，他惊醒了。

只见米列娃站在床边又在准备打自己的脸，嘴里还叫着：“阿尔伯特，

你今天怎么又睡过头了？快点，你这个懒猪，该去上班了，要迟到了！”

爱因斯坦一骨碌爬起来，跌跌撞撞地穿戴好，赶紧夹着公文包出门了。



同时性的相对性

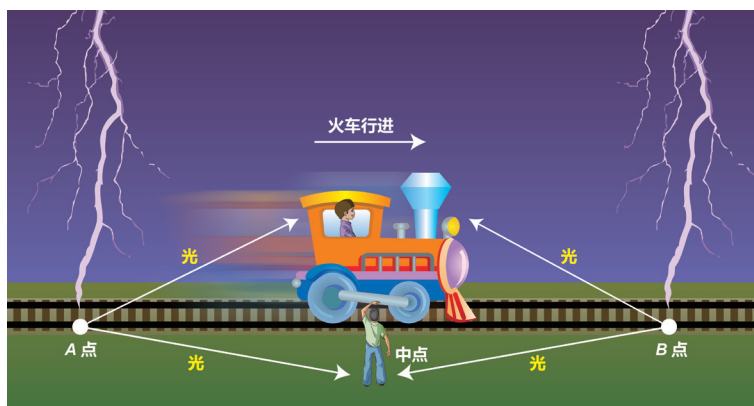
小爱来到自己的办公室，打开抽屉，昨天那张稿纸还静静地躺在里面，自己写下的两句话赫然在目。他喃喃自语：“光速不变……光速不变到底意味着什么？”他恍惚记得昨天晚上似乎做了一个很精彩的梦，他努力想要回忆起梦中的情节，但是有点难，他只记得梦中似乎说过“时间是相对的，没有真正的同时”这样的话。他还恍惚记得昨天晚上的梦跟火车有关。为了帮助回忆，小爱埋头在那张稿纸上画了一段铁路，又画了一个长方形表示火车，他又想起点儿什么，于是又在火车中间画了一个小人，他感觉就要想起来了。突然，局长哈勒（根据记载，哈勒也是物理爱好者，后来成了小爱的粉丝）的声音从门口传来：“阿尔伯特，客户来催前两天提交的那个申请了，你审查得怎样了？”小爱吃了一惊，用肚子朝抽屉一顶，迅速合上抽屉，局长刚好走进来。小爱赶忙说：“这就好了，局长。”

局长走了以后，小爱擦了一把汗，再次悄悄地打开抽屉。可是思路被打断后，他怎么也想不起来昨晚的梦了。但是幸好他还没忘记梦中得出的结论——没有什么真正的“同时”，车上的人认为是同时发生的事情，到了站台上的人的眼里，就不再是同时发生的。经过一番思绪整理，小爱想出了另外一个例子，它后来被小爱郑重地写入了那本广为流传的著作《相对论浅说》中，书中是这样描述的：

在铁路的路基上，雷电同时击中了相隔很远的 A 点和 B 点。如果我问你，这句话有没有意义时，你多半会不假思索地回答我说“有”。但是如果我让你解释一下这句话的准确意义时，你在经过一番思考后会发现，这个问题貌似不像原来想象的那么容易回答。你很可能会这么回答我：“这句话的意思本来就很清楚，没有必要加以解释。”但这样的回答显然是无法让我

满意的。那么我们这么想，如果有一个气象学家宣称他发现某种闪电总是能同时击中 A 点和 B 点，这时候总要提出一种实验的方法来验证他所说的对不对吧。对于严谨的物理学家来说，首先要给出一个同时性的定义，然后还得有实验方法能验证该定义是否能被满足，如果这两个条件没有达成的话，那么那个气象学家就是在自欺欺人了。好了，经过一段时间的思考后，你提出了一个检验同时性的方法，你说：请把我放到铁路上 A 、 B 两点的正中间的位置，然后通过一套镜子的组合能让我看到 A 、 B 两个点；如果闪电发生之后，我能在同一时刻感觉到闪光，那么这两道闪电必定是同时击中了 A 、 B 两点。于是你提出同时性的定义，就是一个人能在同一时刻感受到闪电的闪光。我很高兴你能提出这个定义，当然这个定义的前提还得加上你在 A 、 B 两点的中点上。

好了，让我们想象一下：有一列火车正在铁轨上从 A 点开向 B 点，此时，你正站在 A 、 B 两点中间的路基上。突然，有两束闪电击中了 A 、 B 两点，过了一小会儿，两束闪光经过相同的距离到达你的眼里，你同时看到了它们，所以你毫不犹豫地认为这两束闪电是同时发生的。但是我们再设想一下：这次你站在了火车里，正从 A 点开向 B 点。



【图4-4】

行驶中的火车上的人会认为闪电并不是同时发生

当 A 、 B 两点被闪电击中时，你正好经过 A 、 B 两点的中点。你经过中

点后，继续跟随火车向 B 点行进，因此在闪电光到达你眼睛之前的这段时间里，你又向 B 点前进（同时向 A 点远离）了一段距离，而因为 A 、 B 两点闪光的光速恒定不变，所以 B 点闪光一定会先于 A 点闪光到达你眼里。于是就出现了这样的结论：你认为这两束闪电以路基为参考系时是同时发生的，但是以火车为参考系时，对于火车上的你来说，却是先后发生的。

这是怎么回事呢？这说明“同时”也是相对的，当以路基为参考系时是同时发生的事情，但换成了以火车为参考系时，却不是同时发生的了，反之亦然。每一个参考系都有自己的特殊时间，如果不指明参考系，宣称一件事情同时发生是没有任何意义的。这乍一听起来似乎很荒谬，在我之前的物理学家一直都在给时间赋予绝对的意义，而我却认为这种绝对的意义与我们前面讲的那个最自然的的同时性定义并不相容，如果我们能坦然地抛弃我们对时间的绝对化的概念，则真空中光速恒定不变就会变得可以理解和接受了。

不知道各位读者是否听明白了爱因斯坦关于闪电击中铁轨的这个故事？不管你现在脑子是不是如堕五里雾中，一会儿在想那个环球快车，一会儿又在思考这个闪电的问题，总之爱因斯坦是在告诉我们这样一个重要概念：同时性的相对性。

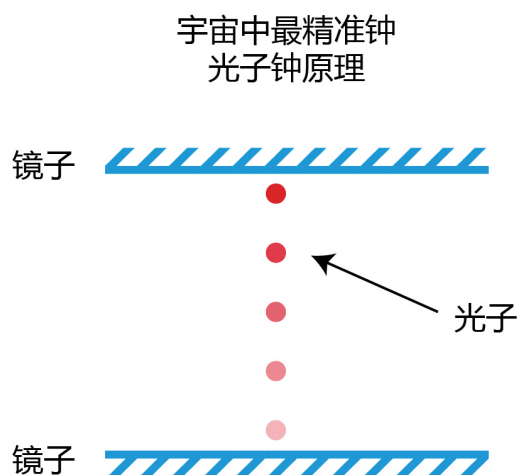
我听到有几位已经理解的读者欢呼起来了：“哈哈，同时性的相对性，我想明白了！原来这就是相对论，不难理解啊！”

别急别急，相对论的大门只是刚刚打开了一条缝隙而已，同时性的相对性只是爱因斯坦运用相对性和光速不变这两条原理推出来的第一个结论。让我们跟随爱因斯坦的思维继续往下推导，马上就会有更多不可思议的推论出现在你面前，保证你会惊讶得嘴都合不拢。准备好了吗？这就开始我们的头脑风暴。

时间会膨胀

首先我们先想一下什么是“时间”，怎么定义这个词。你很快就会发

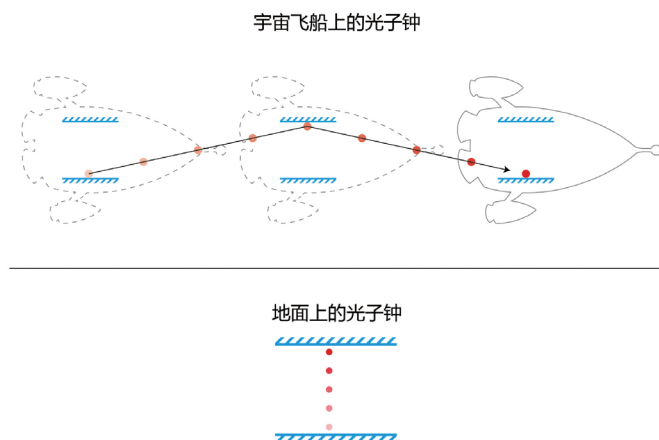
现这个词很难定义，在做了各种试图定义它的尝试之后，我们不得不承认，我们总是会陷入不得不用时间来定义时间的逻辑怪圈。最后会发现，借助一个外部衡量工具来描述时间，可能是一个避免落入逻辑怪圈的最好方法。比如说一个钟摆，摆动一个来回我们就认为这代表过去了一秒，但是钟摆这种东西不够精确，误差太大，我们不能对这样的外部衡量工具满意。现在，让我们借助强大的思维实验和光速不变原理来构造一个宇宙中最理想、最精确的计时器，我把这个计时器叫作“光子钟”。下面看一下这个光子钟长什么样：



【图4-5】
光子钟原理图

这个光子钟的构造非常简单，但是很实用。上下两面镜子相距15厘米，中间有一个光子可以在两面镜子中间来回地反射折腾。光子在两面镜子中间来回弹一次，可以想象成“嘀嗒”一声。我们已经知道光速是恒定不变的30万千米/秒，那么就很容易计算出，这个“嘀嗒”一下的时间是十亿分之一秒，换句话说，“嘀嗒”10亿次就代表时间走过了1秒。现在有了这个强大的光子钟，就不需要太纠结于时间的定义了，于是我们达成共识，通过“嘀嗒”的次数来衡量和比较时间这个虚无缥缈的东西。好了，现在你拿上这个光子钟坐上宇宙飞船，发射，你飞了起来。而我也拿着一

个光子钟，站在地面上，看着你的宇宙飞船从眼前飞过。注意，既然是思维实验，我就想象我拥有神奇的能力，能够看清你手上那个光子钟的情况。现在我把这个情况画出来，你看是不是这样：



【图4-6】

地面上的观察者看到的宇宙飞船中的光子飞行路线比地面上的要长

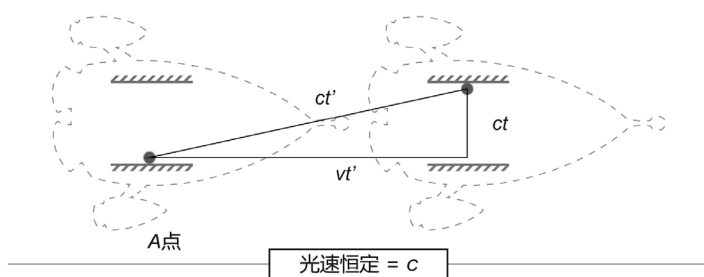
请开动你的脑筋，我保证本书中需要你像现在这样动脑子的地方很少，但无论如何这都是最关键的一次，这次想明白了，以后别处再遇到类似的图全部都可以轻松跳过，扫一眼就知道怎么回事。当我手上的光子钟在来回折腾时，你的飞船就会从 A 位置飞到 B 位置，那么我将会看到你手上那个光子钟里面的光子走过的是一条斜线。这是显而易见的，如果光子飞过的路径在我眼里不是斜线的话，光子必定飞到光子钟外面去了。现在我们运用光速不变原理来看一下，由于宇宙飞船上的光子飞行的路线比我手里的光子更长了，那么也就意味着，当我手里的光子钟“嘀嗒”一次的时候，飞船上的光子钟还来不及“嘀嗒”一次呢。换句话说，当我手里的光子钟“嘀嗒”了 10 亿次的时候，我看到飞船上的光子钟可能只“嘀嗒”了 5 亿次（打个比方，不要纠结 5 亿次是怎么算出来的）。根据我们前面已经达成共识的对时间最自然的定义，我得出这样的结论：在宇宙飞船上，你的时间过得比我慢！

或许你还是觉得不放心，你会想：“你用的是光子钟这种我从来没见过的东西，我还是对我自己的劳力士比较放心一点。”好吧，那么我们现在就拿你的劳力士来做实验吧，我们把飞船也换成你更熟悉的火车，这样你就更放心了吧。现在你坐在一列火车里，左手一只钟（光子钟），右手一只表，火车在做着匀速直线运动，窗户外面黑漆漆一片，你完全不知道自己是静止的还是运动的，那么你觉得你能用观察光子钟或劳力士的走时情况，来知道火车是静止的还是开着的吗？根据我们前面已经阐述过的爱因斯坦的相对性原理（在任何惯性系中，所有物理规律保持不变），你不可能靠任何实验的方法来确定自己的运动状态。反过来想，在一间密闭的车厢中，如果你能观察到光子钟和山寨劳力士走时忽然一样，忽然又不一样，那才是咄咄怪事呢。

我们在这里谈论的是时间本身变慢了，不是任何机械的或者化学的原因，就是时间本身变慢了，与时间有关的一切都变慢了，用一个很酷很形象的说法就是——时间膨胀了。还是回到刚才那个宇宙飞船的实验，在地面上的我会看到，不光是你的光子钟变慢了，你的动作、你眨眼的速度、你的新陈代谢、你一切的一切都变慢了。于是，你现在开始感到震惊了。趁着你现在精神好，赶紧让我们来计算一下，时间变慢的尺度和飞船的速度是什么关系呢？这个计算要用到我们非常熟悉的勾股定理，直角三角形的两个直角边和斜边的关系式： $a^2+b^2=c^2$ 。

我们把刚才那个你坐宇宙飞船的景象再次画出来：

v =飞船相对于地面的速度， t =飞船上经过的时间， t' =地面上经过的时间



【图4-7】

利用勾股定理可以推导出相对论因子

我在上面画了一些辅助线，并且用一些字母来表示飞船上经过的时间、地面上经过的时间、飞船相对于地面的速度和光速。注意那个 t 和 t' ，我们曾经在本书刚开始没多久见过这个一撇。上面那个三角形的两个直角边分别是 vt' 和 ct 我估计你很容易理解，只是斜边为什么是 ct' 呢？这就是说从我（地面上的人）的角度来观察的话，光子以恒定速度 c 在地面上经过的时间 t' 走过的距离刚好是那个直角三角形的斜边。下面我们利用勾股定理写出这样一个等式。

$$(ct')^2 = (ct)^2 + (vt')^2$$

接下来我们用一点最基础的方程变换的知识，来做点公式变形，我们的目的是要算出以地面为参考系时飞船上经过的时间 t 和地面上经过的时间 t' 之间的关系式：

第一步，先把括号都去掉：

$$c^2 t'^2 = c^2 t^2 + v^2 t'^2$$

第二步，两边同时减去 $v^2 t'^2$

$$c^2 t'^2 - v^2 t'^2 = c^2 t^2$$

第三步，两边同时除以 c^2

$$t'^2 - \frac{v^2}{c^2} t'^2 = t^2$$

最后一步，整理成最终形式

$$t' = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} t$$

结束。

如果你顺着我上面的步骤一步步下来，毫无阻碍地得到了最终形式，那么请你深吸一口冷气，因为你发现了这个宇宙中一个最深刻的奥秘，这是迄今为止让人类第一次感到深深震撼的等式，这一刻，我们根深蒂固的时间观念崩塌了。

让我们凝视这个等式十秒钟，解读一下它的含义。

当 v 的速度相比光速很小的时候（比如汽车、火车甚至飞机速度都不及光速的百万分之一），则 $\frac{1}{\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}}$ 约等于 1，这个公式就退回到了我们熟悉的伽利略变换式 $t = t'$ ，但如果我们的速度能达到光速，则 t' 等于无穷大。时间等于无穷大？怎么理解？这就是说随着运动速度的增加，时间会越来越慢，最后慢到了停止的地步。假如我们的速度能超过光速呢？那就不得不面临一个负数的平方根，大家知道这叫虚数。那个虚数用在时间上表示什么？难道这就是传说中的穿越？哦，不，这不代表时光倒流，虚数没有现实意义，事实上我们后面马上就要证明达到或者超过光速都是不被允许的，本书将在第五章跟大家讨论关于时空穿越的可能性，但那也绝不是通过超光速来实现的。请不要着急，这次奇妙的时空旅程才刚刚开始，还有很多奇景等待你前去观赏。

现在我们已经掌握了这个时间变换的神奇公式：

$$t' = \frac{1}{\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}} t$$

为了让这个公式看起来更加简洁一点，我们把 $\frac{1}{\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}}$ 这个时间 t 前面的系数记为 γ （读作伽马），于是可以把这个公式写作： $t' = \gamma t$ ，这个 γ 就是流芳千古的“相对论因子”，也被称为“洛伦兹因子”。你可能奇怪为什么不叫爱因斯坦因子，那是因为荷兰物理学家洛伦兹（Lorentz，1853—1928）首先写出了这个式子，但他没有深刻认识到这个式子的时空含义。洛伦兹是绝对时空观和以太的捍卫者，因此在相对论问世后，洛伦兹与爱因斯坦有过许多争论，不过这并不影响两人建立起深厚的友谊和合作关系。关于洛伦兹的事情我们很快还要提到，这里先放一放，让我们来继续

思考时间变慢意味着什么。

你可能已经在心底欢呼终于找到了长寿的秘诀，因为运动的速度越快，时间就能变得越慢。姑且认为这没错，那么让我们来粗略地计算一下，你到底能年轻多少呢？先从坐火车开始吧，近似地认为现在火车的速度是200千米/小时，也就是55米/秒，相对论因子 $\gamma \approx 1.00000017$ 。什么意思？也就是说在这列火车上坐了100年以后，你下了车，会发现比你的双胞胎兄弟年轻了53.6秒。火车太废柴了，你暗骂一声，给我换飞机。好，那我们就换飞机吧，飞机的速度大概是300米/秒， $\gamma \approx 1.0000005$ ，就是说你坐飞机100年以后下来，年轻了26.3分钟。原来飞机也这么废柴，你有点怒了，给我换登月飞船。满足你，我把你换到登月飞船上。登月飞船的速度是10500米/秒， $\gamma \approx 1.000613063$ ，就是说你在登月飞船上飞100年下来后，年轻了22.4天。这次你可能真的发火了，什么？登月飞船上飞100年也只能年轻22.4天？这叫什么世道啊。给我快、快、快，再快一点！在你的淫威之下，我发明了速度可以达到 $0.9c$ 的飞船，现在坐上这艘飞船会发生什么呢？相对论因子达到了2.3，也就是说你的衰老速度差不多只相当于地面上人的一半，你的1年等于他们的2.3年，这个 γ 的神奇之处在于它会随着速度接近光速而迅速增大。

比如我们的速度如果能达到 $0.99c$ ，则 $\gamma \approx 7$ ，也就是你的1年相当于地球人的7年，如果达到了 $0.99999c$ ，则 $\gamma \approx 224$ ，你的1年比地球人的两个世纪还长。我们不用再算下去了，因为我知道你已经禁不住开始狂喜了，哈哈！原来长生不老真的可以实现啊。对不起，我不得不再次粉碎你的这个长生不老梦。我的计算确实没错，如果你坐上 $0.99999c$ 的飞船飞了1年后回来，地球确实已经过去了224年之久，但是对于你自己的感受来说，你真真切切的还是只活了1年，一秒钟也不会多，一秒钟也不会少。如果你的寿命是100年，你一直在飞船上飞，当你回到地球的时候，地球确实确实过去了22400年，但是对于你自己来说，仍然只能感受到你自己生命中的100年，一天也没多，一天也没少，每天仍然是24小时，1小时仍然是60分钟。只是在走出飞船舱门的那一刹那，你看见的地球上的景物，已经隔世。你自己的一生验证了你向前穿梭了22400年的时间。从我们地球人的

眼里来看，其实你也并没有比我们潇洒多少，虽然你的1分钟相当于我们的224分钟，可是在我们眼里，你的一切动作全都变慢了，我们吃一个包子1分钟就完了，而在我们眼里，你吃一个包子却要224分钟；我们打一个响指只用1秒钟，而在我们眼里，你却花了224秒钟才慢慢腾腾地把一个响指打完。我们在地球上仰望着飞船中的你，感慨道：“噢，可怜的人啊，行动得比蜗牛还慢，活着还有什么意思呢？”

所以，很遗憾，相对论无法让你长寿。

伽利略的相对性原理这把“倚天剑”，已经被爱因斯坦用他的相对性原理斩为了两截，那伽利略变换呢？伽利略变换此时在你的心中可能也会变得不那么天经地义了，看了前面那些由光速不变推导出来的奇怪结果，你可能已经意识到伽利略变换多半也是站不住脚的。你的想法非常正确，伽利略变换这把“屠龙刀”也早就保不住“武林盟主”的地位了。事实上早在1895年，一位叫作洛伦兹的中年侠士，就已经不把伽利略变换这把“屠龙刀”放在眼里了。

下面，让我来隆重介绍本书最重要的角色之一，来自荷兰的韩德瑞克·安通·洛伦兹先生。各位观众，还记得你们读中学的时候，老师让你们用手握住一个线圈，然后通过大拇指的方向来判断受力方向吗？大声回答我。对了，很好，你们都还记得“左手定则”和“右手定则”吗？什么，你们恨死他了？哦，可以理解，我那个时候也跟你们一样，都快分不清自己的左右手了。电子在磁场中受到的力就是以洛伦兹先生命名的，叫作“洛伦兹力”，什么，我又勾起了你们痛苦的回忆？放轻松，放轻松，我们今天不考试。

洛伦兹在那个年代的物理学界有多出名，有两个事情可以说明。第一件事情，洛伦兹是索尔维会议的定期主席（1911-1927），一直担任到临终前一年。可能你不知道索尔维会议有多牛，那你总知道体育盛会里奥运会最牛，财主盛会里500强财富论坛最牛吧。物理学家的会议里就是索尔维会议最牛了（当然是在20世纪早期）。无图无真相，现在上图：



【图4-8】

1927年第五届索尔维会议

这张图片有很多别名，列举一二：物理学全明星梦之队合影、科学史上最珍贵照片、地球上1/3最具智慧的大脑合影。看到没，爱因斯坦居而而坐，他的旁边就是洛伦兹，其他人的名字我就不多说了。无数学校大楼的走廊上、教室里，都挂着这些人的头像，对这些名字你多多少少都会看着眼熟的（你居然还发现了环球快车谋杀案里的三个演员，你或许在想，那艾尔莎应该也有来头吧？哈哈，有的，暂时保密，答案在第六章）。第二件事情，洛伦兹于1928年2月4日在荷兰哈勃姆去世，终年75岁。举行葬礼那天，荷兰全国电信、电话中止三分钟，全世界的科学大师齐聚荷兰，爱因斯坦在他的墓前致悼词。爱因斯坦的悼词中有这样一句话：“洛伦兹先生对我产生了最伟大的影响，他是这个时代最伟大、最高尚的人。”

看到此处，相信你对洛伦兹的敬仰已经如滔滔江水了，我也一样。洛伦兹是电磁理论方面的大师级人物，麦克斯韦的电磁方程组在洛伦兹眼里美得不可思议，多少次在梦中都惊叹它的简洁、深刻和美。但是，洛伦兹在研究电子运动的时候，惊讶地发现，伽利略变换和麦克斯韦方程组不可能同时正确，这件事情让洛伦兹非常郁闷，伽利略变换似乎是天经地义的，但是麦克斯韦的方程组更是神圣的。经过一番痛苦的纠结，洛伦兹决

定放弃伽利略变换式，麦克斯韦的电磁方程组是神圣不可侵犯的，既然伽利略变换式没法运用到电子的运动上，那什么样的坐标系变换式能呢？洛伦兹用他高超的数学技巧，通过微积分推出了一个变换式，如果用这个坐标变换式取代伽利略的变换式，就和麦克斯韦的电磁方程组不矛盾了。洛伦兹在1904年正式发表了这个著名的变换公式：

$$x' = \frac{x - vt}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$
$$t' = \frac{t - \frac{v}{c^2}x}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

这个式子被人们称为“洛伦兹变换”，在这个式子里面我们看到了熟悉的 $\frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$ ，这就是为什么把它叫做洛伦兹因子的原因。你可能有点被搞糊涂了，我们前面亲手推导出来的 t' 和 t 之间的关系式好像不是这样的嘛？在这里我要提醒我亲爱的读者，你一定要明白坐标变换的概念。所谓坐标变换，就是当你的参照系（不是你自己运动，是你的参照系）在你面前运动的时候，你所处的坐标在运动前和运动到“某一时刻”时所处的新坐标之间的关系。这个关系代表着我们对这个世界中运动和运动之间最本质的认识，换句话说，也就是小红眼中的世界和小明眼中的世界到底有什么不同。所以，洛伦兹变换中的 t 代表的是“时刻”“时点”，而我们之前那个时间和速度的公式中的 t 代表的是“时长”“间隔”。这里还要说明的是，在洛伦兹心目中，变换所引入的量仅仅被看作是数学上的辅助手段，并不具有物理本质。

洛伦兹可是权威啊！他的这个变换式一经发表，立即引起强烈反响，各界纷纷响应，有赞扬的，有拍马屁的，有质疑的，有惊讶的，当然也有大受启发的（比如当时还默默无闻的小爱同志）。下面是虚构的一场新闻发布会，发布会的主角是洛伦兹，接受全世界同行的提问。请注意这场发布会的时间是1904年，相对论还没有发表，人们对MM实验的结果还在争论不休。

问：“洛伦兹先生，我们注意到您这个新的变换式中含有光速这个参数，很让我们费解，为什么参考系的运动引起的坐标变换，会跟光速 c 相关呢？”

洛伦兹：“因为电和磁也是运动的一种方式，在考虑它们的运动时，就必然会引出光速这个常数来，至于普通物体的运动为什么会跟光速相关我一下子也说不明白，总之普通物体的运动速度相较光速来说，都小到可以忽略不计，对最终的结果似乎没有什么影响。”

问：“先生，按照您这个公式，一列火车在运动的时候，如果车头取的坐标是 x_1 ，车尾的坐标是 x_2 ，火车的长度就是 $x_2 - x_1$ ，根据这个新变换式，我做了一个简单的计算，我发现火车在运动的时候长度居然比静止的时候缩短了，这也有点太不可思议了吧？”

洛伦兹：“根据我的公式，结果确实如你所说，虽然听起来很荒谬，但是我认为这是有可能的，而且有实验可以支持这个现象，就是著名的麦克尔逊-莫雷实验。在这个实验中，我们之所以没有发现干涉条纹的变化，正是因为实验设备在随着地球运动的时候，在运动方向上长度会发生收缩，这个效应刚好抵消了光速的变化。而且根据我的公式计算出来的结果，和实验的结果也吻合得非常好。”

问：“那您依然认为以太是存在的吗？”

洛伦兹：“那当然，以太是一定存在的，我们总会在实验室里把它揪出来的。”

问：“在您的公式中，我还发现一个神奇的地方，时间 t' 跟速度 v 和光速 c 以及坐标 x 都有关系，坦诚地说，这让我们很费解。难道时间的流逝是不均匀的吗？跟速度相关吗？”

洛伦兹：“千万不要那么想，这只是一种数学的辅助手段而已，时间就是时间，那是上帝主宰的东西，别想打时间的主意。”

问：“您仍然支持牛顿的绝对时空观吗？”

洛伦兹：“当然，毫无疑问。”

新闻发布会在各界的热烈讨论中结束。

洛伦兹变换式发表的时候已经 51 岁了，人年纪一大，往往就容易失去勇气和丰富的想象力，这导致洛伦兹与伟大的相对论失之交臂。历史有时候真是很有戏剧性，虽然洛伦兹先于爱因斯坦写出了流芳千古的公式，但是，虽曰同工实属异曲，洛伦兹看不穿皇帝的新衣，没有大胆地抛弃以太，也没有大胆地突破牛顿的绝对时空观，在回答时间 t' 为什么会跟速度相关时，含含糊糊，连自己都说服不了自己。在洛伦兹的脑子里，绝对时空观是神圣不可侵犯的，他一直到死都没有放弃证实以太的存在。一个不可否认的事实是，近 100 年以来，物理学上取得的几乎所有重大突破，都是杰出的科学家们在 30 岁左右的时候取得的，量子力学更是被戏称为“男孩物理学”，连爱因斯坦这样伟大的天才，在他人生中的后 30 年中也没有取得什么重大成就。有一句流传很广的话是这么说的：“如果爱因斯坦在他 38 岁的时候死了，那么今天这个世界不会有什么不同。”各位亲爱的读者，如果你现在正值 20 来岁的大好青春年华，请接受我对你的羡慕，你很有可能跨入“男孩”们的行列。

空间会收缩

我们此时已经把一号男主角爱因斯坦同志冷落了好久，小爱快要失去耐心了，迫不及待地要求再次登场。经过前一段对时间和速度关系的思考，小爱的思想已经越来越成熟。根据两个基本原理，他又能推导出些什么令人惊异的结果呢？让我们再次回到瑞士伯尔尼专利局，一探究竟。

仍然是我们已经很熟悉的专利局的那间办公室，唯一不同的是，有一次小爱在上班时间偷偷做计算的时候，被哈勒局长发现了。在了解了小爱的工作之后，哈勒局长对爱因斯坦那是相当的佩服，特别准许他可以在工作之余安心计算，还时不时地来跟小爱打听又有啥新鲜玩意出炉。哈勒后来成了小爱最忠实的粉丝，并以此自豪了一辈子。这一天，哈勒又来到了小爱的办公室，满怀期待地走到小爱身边。

（以下对话纯属虚构）

哈勒：“小爱啊，最近又有什么新鲜玩意儿告诉我啊？上次你跟我讲的时间会变慢真是让我大开眼界啊，虽然最后对于没法延长生命还是有点小遗憾，不过你的推导真是无懈可击，还有没有了？”

爱因斯坦：“局长，我发现，不但时间是相对的，空间也是相对的，就跟没有什么绝对的同时一样，也没有什么绝对的大和小，长和短。”

哈勒：“天哪，这太夸张了，你得给我说说这是怎么回事。”

爱因斯坦：“这还得从洛伦兹变换说起，去年洛伦兹先生公布了他的洛伦兹变换式，这个您听说了吧？”

哈勒：“当然听说了，虽然我觉得伽利略变换式被推翻了这事有点难以置信，但是洛伦兹先生可是大师级的人物，他的结论应该不会错吧？”

爱因斯坦：“其实从惯性系中物理规律不变和光速不变这两个原理出发，我也推导出了洛伦兹变换式，推导过程不难，我给您演算一下。我们只要做这样一个思维实验：让我们测量在两个坐标系内光在同一段时间走过的距离。因为光速不变，他们走过的距离是 ct 和 ct' ……”

爱因斯坦边说边在草稿纸上画了张草图，并且开始熟练地演算起来（推导过程略，本书毕竟不是教科书）。很快，就得到了和洛伦兹完全一样的两个变换式：

$$x' = \frac{x - vt}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$
$$t' = \frac{t - \frac{v}{c^2}x}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

哈勒：“这太有趣了，你跟洛伦兹得出了同样的公式，但推导过程却有所不同。”

爱因斯坦：“我们从洛伦兹变换式出发，让我们来研究一个关于长度的问题。局长你现在到一列飞驰的火车上去，火车上有一根铁棍，我们想测量一下在我眼中铁棍的长度 L 和在你眼中铁棍的长度 L' 有什么不同，该怎么办？在此之前，我们先来给长度做一个定义。我们只要同时读出铁棍两头在我们各自坐标系的坐标值，将两头的坐标值分别相减，得到的数值就是铁棍的长度，你对这个定义没有任何异议吧，局长？”

哈勒：“当然没有异议，这就跟我们拿一把长尺去量铁棍是一样的，把一头放在 a 刻度上，另一头的刻度读出来是 b ，那么 $b - a$ 就是铁棍的长度啦。”

爱因斯坦：“很好，但是火车一旦运动起来，我就没法实际去拿把尺子量一下了对吧？但好在我们有坐标变换公式，你只要把你读出来的坐标值记录下来，然后我们只要知道火车的速度，用公式一变换，就可以求出在我眼中铁棍两头的坐标值，完了把两个坐标值一减就可以得到长度了。把我所在地面的坐标系设为 K ，你所在火车的坐标系设为 K' ，现在 K' 正在运动，于是我们就要用到坐标变换式来求出我眼中正在运动的铁棍的长度了。假设现在的坐标变换式是伽利略变换，我们很容易就可以得到你我眼中的铁棍长度是一样的结果。就像这样：

$$x'_2 - x'_1 = (x_2 - vt) - (x_1 - vt) = x_2 - x_1$$

“根据定义，两个坐标值相减就是长度，于是得到：

$$L' = L$$

“但问题是，现在的坐标变换式已经不是伽利略变换了，我们刚刚推导出坐标变换式应该是洛伦兹变换，那就让我们用洛伦兹变换，来计算一下运动中的铁棍的长度是多少吧：

$$x'_2 - x'_1 = \frac{x_2 - vt}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} - \frac{x_1 - vt}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

“整理公式，得到：

$$x'_2 - x'_1 = \frac{x_2 - x_1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

“依然根据定义，两个坐标值相减就是长度，于是进一步整理得到：

$$L' = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} L$$

“为了看起来更舒服一点，我们把它换成相乘的形式：

$$L = \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}} L'$$

“看，我们的长度变化公式出来了，这里面的L就是在K坐标系中，也就是我眼中运动铁棍的长度，而 L' 则是在 L 坐标系中的你眼中静止铁棍的长度。让我们来解读一下它的含义吧。”

哈勒迫不及待地抢着说：“我理解了，铁棍在运动方向上的长度缩短了！ $\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}$ 总是小于1，所以运动的物体在我们眼里会在运动方向上发生长度收缩现象。如果我在火车上，你会看到我变瘦了，但我的高度不会变，洛伦兹先生也得出了这个结果。啊！如果这列火车的速度超过光速怎么办？根号里面变成负数了，会发生什么？”

爱因斯坦：“谁也不知道会发生什么，负数的平方根是虚数，是没有意义的。虽然洛伦兹先生也得到了长度在运动方向上收缩这个结论，但我跟他的解释不一样。洛伦兹先生认为这种长度收缩是由于某种压力效应产生的收缩，他并不是从光速不变这个原理出发的；而我的观点不一样，从我们刚才推导的过程中也可以看出来，其实不需要用铁棍打比方，用任何东西打比方都能得到同样的结果，我的结论是……”

爱因斯坦顿了一下。

哈勒问：“是什么？”

爱因斯坦做了一个神秘的表情：“是空间本身收缩了！就跟没有绝对相同的时间一样，也没有绝对相同的空间，牛顿先生再次错了。运动物体的收缩不是任何机械的、化学的、材料的原因，跟任何外力无关，这是我们这个宇宙的物理规律，看似空无一物的空间本身也必须当作一个实体来看待。”

小爱说完上面的话，露出一一种得意的表情朝观众的方向看了一眼，那意思好像在说：“如何？我没有辜负观众的期待吧？”

哈勒：“太神奇了，小爱，你太给力了！”

爱因斯坦：“局长，还有一个事情，我不知道当讲不当讲？”

哈勒：“讲啊，讲啊，有什么不当讲的，还有什么，快说，快说。”

爱因斯坦脸一红：“局长，我那个二级专利员的申请，您看，是不是能再考虑考虑？”

哈勒脸上的笑容突然就消失了，板起脸正色道：“爱因斯坦先生，公事是公事，一切都要按规矩、按流程办，明白了吗？”

爱因斯坦：“知道了，局长。”

速度合成

各位亲爱的读者，我相信因为前面已经有了一次时间膨胀（时间变慢你也可以理解为时间膨胀了，这种说法比较酷，很多书都喜欢这么说，我也继续附庸风雅）的神奇经历后，再看到这个空间收缩的结论时，你已经能平静地接受了。那让我们来算一下，这个空间收缩的效应跟速度的关系到底有多大，不举一些例子相信你们始终没有一个直观的感受。一辆时速 300 千米的高铁火车从你身边开过，它的长度会收缩多少呢？一算，大约收缩了 10^{-13} 米。这是多少呢？差不多就是一根针尖的千万分之一长度，人类到目前为止还不能测量这样的精度呢。但是如果你能坐上一艘速度为

0.99999c 的宇宙飞船，那收缩效应就可观了，你地面上的亲人将看到“压缩”了 224 倍的你和飞船，你和飞船都变成一个很扁很扁的玩具模型了；但是在飞船中的你，却不会有任何感觉。我们所说的收缩，是指一个参考系相对于另一个参考系的收缩效应。飞船没有发射的时候，你拿一把尺子丈量出飞船的长度是 10 米，飞船飞起来后，你用这把尺子一量还是 10 米。尽管地面上的亲人看到飞船“压缩”成了玩具模型，但你的这把尺子也同样缩短了，随着你的宇宙飞船运动的一切物体都缩短了。

我们勤奋的小爱已经通过两个基本原理，推导出了同时性的相对性、时间膨胀、洛伦兹变换、空间收缩这几个推论，但他并没有停止他非凡大脑的思考活动，紧接着又从洛伦兹变换推导出了新的速度合成公式，这个公式可以解决你脑袋中可能冒出来的若干疑惑。比如第一个疑惑：如果两艘宇宙飞船一艘朝东飞，一艘朝西飞，飞船的速度都达到了 $0.9c$ ，那么从其中一艘飞船看另外一艘飞船，岂不是另一艘飞船的速度可以超过光速 c 了吗？第二个疑惑：如果我从一艘速度达到 $0.9c$ 的飞船上再发射一艘速度为 $0.9c$ 的飞船（或者导弹）出去，那地面上看到的第二艘飞船（或者导弹）的速度岂不是也应该超过光速 c 了？之所以还有这样的疑惑，那是因为牛顿时代建立起来的速度合成公式 $w = u + v$ （此处的 w 代表合成后的相对速度），在你的脑海里仍然是一个天经地义的常识，而且根深蒂固。但是牛顿的经典物理学已经在爱因斯坦的两个原理下崩溃了，几乎所有的公式都需要修正，都需要考虑光速这个看似不搭界的东西。让我们来看一下爱因斯坦推导出的新的速度合成公式是怎样的：

$$w = \frac{u + v}{1 + \frac{uv}{c^2}}$$

你仔细一看就会发现，当 uv 远小于 c 时，这个公式就近似等于经典速度合成公式。那让我们用这个新公式来解决一下你上面的两个疑惑吧：

$$w = \frac{0.9c + 0.9c}{1 + \frac{0.9c \cdot 0.9c}{c^2}} = \frac{1.8c}{1 + 0.81} \approx 0.9944c$$

看，不论你速度多快，两个速度的合成速度最终都超不过一个 c ，哪怕两束光背道而驰，利用这个速度合成公式简单一算，结果最多也还是 c 。当然了，其实这个公式本身就是在光速不变的基础上推导出来的。但这绝不是文字游戏，这叫作物理公式的“自洽性”，也是非常重要的一条物理定律法则。

到此，爱因斯坦对自己的思考和得出的推论比较满意了。他把抽屉里演算用过的草稿纸都翻了出来，还好，最关键的几张都还在，没有被卷上烟丝当香烟抽掉（爱因斯坦有用草稿纸当卷烟纸的习惯，以至于他当初演算的众多草稿纸都这么被白白烧掉了。从今天的眼光来看，这烧钱烧得可够厉害，如果保留到现在，每张草稿纸都准能在拍卖会上卖个好价钱）。爱因斯坦整理了一下自己的劳动成果：

1. 相对性原理：在任何惯性系中，所有物理规律保持不变。
2. 光速不变原理：光在真空中的传播速度恒为 c 。
3. 同时性的相对性。
4. 洛伦兹变换。
5. 时间膨胀。
6. 空间收缩。
7. 新的速度合成公式。

爱因斯坦用 5 周时间把以上这些成果写成了一篇论文，题目叫作《论运动物体的电动力学》。在这 5 周时间里，爱因斯坦的快乐心情无法言表，他对专利局的好兄弟索特（经常与爱因斯坦探讨物理学问题）只说了一句话：“我无法表达我的快乐。”1905 年 6 月底，爱因斯坦将论文投给了德国的学术期刊《物理学年鉴》（这份期刊上还发表过爱因斯坦的许多著作）。该刊物负责理论的一位编辑——大物理学家普朗克（Planck, 1858-1947）对文章中的观点感到非常吃惊，虽然与自己的概念相冲突，但开明的普朗克依然大胆地决定将论文发表出来，并且在日后，他成为相对论在科学界得到承认的过程中最重要的人物之一。

各位读者，请特别注意，到此时“相对论”三个字还没有正式出生，更不要说本章的标题“狭义相对论”五个字了。笔者正是要牢牢抓住你的这个好奇

心，放到本章的最后再来解释为何要加上“狭义”二字。

论文虽然发表了，但是爱因斯坦自己心中的一个困惑始终还没有解开，总是搞得他茶饭不思，连晚上做梦也总在想：如果物体的运动速度超过光速会怎么样？从公式上看，会得到一个虚数，但虚数是一个数学概念，它到底有没有实际的物理意义呢？爱因斯坦非常纠结，不论他怎么做思维实验，总会遇到虚数这个数学怪兽跳出来挡住去路。

但爱因斯坦终究是爱因斯坦，此时的他已经打通了六脉中的三脉，虽然离最终神功炼成还有 10 年的时间，但仅凭这三脉神剑也让他成功地战胜了这只数学怪兽。且让我们来看一看，爱因斯坦是如何用一招“质速神剑”一剑封喉的。

质速神剑

为了能让各位读者更好地理解爱因斯坦这神奇的一招，请让我们一起来回忆一个最基本的物理规律——动量守恒。还记得我们小时候打玻璃弹珠吗？如果你用你的玻璃弹珠把对方的玻璃弹珠打飞至一定的距离，你就可以赢得那颗打飞的弹珠。每一个打玻璃弹珠的人都会有一个自然的体会，那就是自己的弹珠越重、打出的速度越快，则对方的弹珠就会飞得越远。但这里面还有些特别的技巧要掌握：首先，你要正面击中对方的弹珠，如果打偏了效果就不好；其次，如果你能打出一个“旋转弹”，则这个弹珠打到对方的弹珠后，会停在原地旋转，而对方的弹珠则会滚得很远。这里面的道理就是动量守恒定律。在一个理想化的状态下，如果你的弹珠质量是 m_1 ，弹珠出手的速度是 v_1 ，对方弹珠的质量是 m_2 ，对方弹珠被撞后的速度是 v_2 。假设对方弹珠被撞击后，你的弹珠停在原地不动，则符合下面的关系式：

$$m_1 v_1 = m_2 v_2$$

这便是动量守恒定律。由这个最基本的动量守恒的公式，我们还能得出另外一个含义相同的公式。比如有一个物体的质量是 m_0 ，以速度 v_0 运动，在运动途中由于某种原因（比如某个定时断开的机关）突然一分为二，分成两个质量为 m_1 和 m_2 的物体，分开后的速度分别为 v_1 和 v_2 ，则它们之间也要符合动量守恒定律。如果用公式写出来就是这样：

$$m_0 v_0 = m_1 v_1 + m_2 v_2$$

爱因斯坦把玩着这个公式，突然想到：根据用洛伦兹变换推导出的新的速度合成公式，两个物体的合成速度不可能无限增大，而是会随着接近光速而递减，那么为了满足动量守恒，质量 m 的数值就必须增大。爱因斯坦想到了马上就动手，他很快就利用洛伦兹变换和动量守恒定律得到了下面这样一个公式：

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

我们又看到了熟悉的相对论因子，这个公式改写一下就是：

$$m = \gamma m_0$$

这个公式正是爱因斯坦解决超光速问题的神奇一招——“质速神剑”，通常我们也把它叫作“质速关系式”，就是说明质量和速度的关系。这个公式中 m_0 表示物体相对静止时的质量， m 表示物体以速度 v 运动后的质量。一看到 m_0 旁边有我们的老朋友 γ ，你一定能马上反应过来，这就是说物体的运动速度越快，质量就越大。

牛顿如果地下有知，必定又会睁大惊恐的眼睛，暴怒道：“这个世界疯了！”在牛顿力学中，所有的定律都隐含着这样的一个前提，那就是物体的质量是不变的。我们用小球做实验，不管这个小球是在岸上还是在船上，不论是在实验室里还是在山顶上，它的质量是多少就是多少，根本不需要

我们去重复称量。现在，爱因斯坦居然告诉我们，物体的质量并非是恒定不变的，质量也是相对的，就跟没有什么绝对的快慢，没有什么绝对的长短一样，对不起，也没有什么绝对的质量大小。刘慈欣在他的科幻小说神作《三体》三部曲中，描写了一个外星文明用一个玻璃弹珠大小的物体，击毁了另一个外星文明的“太阳”，其中的理论正是这个质速关系式。当“玻璃弹”的速度接近光速的时候，其相对论质量就会变得无比巨大，足以击毁一颗恒星（有兴趣的读者可以去读一读《三体》这部中国科幻界的扛鼎之作）。

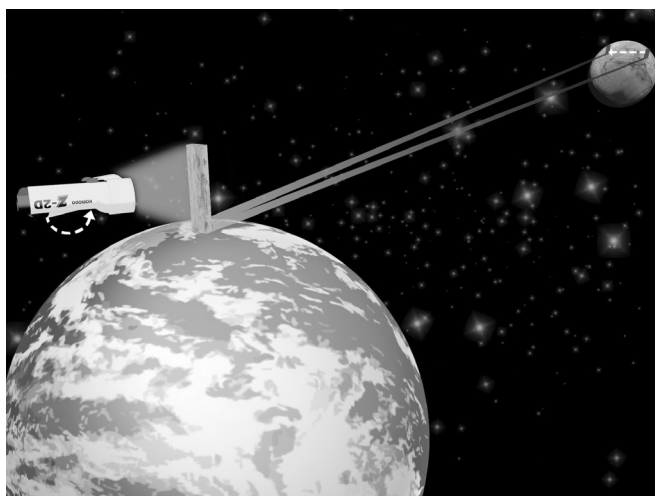
我已经听见了你的嘀咕声：“喂，跑题了，你还没讲清楚为啥爱因斯坦用这个质速关系式杀死了那只数学怪兽，这个公式跟超光速到底有什么关系嘛？”抱歉，我一想到《三体》就开始神游宇宙。还记得牛顿第二定律吗？物体的加速度和受到的力成正比，和质量成反比。通俗地讲，就是你要把一个物体推得运动起来，物体质量越大你要用到的力就越大，想想看，质速公式告诉我们，物体的速度越快，则质量就越大，那么要推动它加速的力就必须越大。当物体速度无限接近光速，质量也会逐渐变得无穷大，那么显然要推动它继续加速的力也必须变得无穷大。对不起，无穷大的力是不存在的，谁也不可能创造无穷大的力，你就是把全宇宙的能量都集中起来，那也比无穷大要小。这就证明了没有任何有质量的物体的运动速度能达到光速，达到都不能，更别说超过了。那光本身呢？因为光在静止时没有质量，所以它能达到光速。

光速极限

关于超光速的话题还没完，还要解决一些你心中的疑惑。爱因斯坦说的没有物体的运动速度能够超过光速，准确地说，是没有能量和信息的传递速度能超过光速；如果失去了这个前提，那么超光速的“东西”可就多了。比方说，你在地面上插一根棍子，用一支手电筒去照这根棍子，在棍子后面很远很远的地方（比如说在阿凡达居住的潘多拉星球上）放一个白

板，理论上这根棍子的影子就会出现在这个白板上。这时候，你把手电筒轻轻转一个角度，那么远在潘多拉星球的影子就会迅速移动，可以想象只要距离足够长，这个移动速度绝对会超过光速。

这个想法有一个很酷的名字，叫作“暗影之疾”，它并不违反相对论。因为首先影子并不能储存能量，所以这里并没有能量的传递。我们再来看看通过这个暗影之疾能不能传递信息呢？你可能想，如果我在棍子上用刻刀小心地刻一个空心字“喂”，由影子组成的这个“喂”，在潘多拉星球上不就能以超光速传递了吗？我非常佩服你能想到这个点子，但是这个方法真的能让潘多拉星球上的人超光速传递信息吗？



【图4-9】

移动速度可以超过光速的影子

好，那么就让我们来设想在潘多拉星球上，男主角杰克站在白板的这头，女主角奈特莉站在白板的那头。现在杰克跟奈特莉在分手的时候约好，如果看到一个“3”的影子，表示我们3点开始进攻人类的基地；如果看到一个“4”的影子，就表示4点开始进攻。杰克在前方侦察完敌情，决定4点开始进攻，现在他要把这个信息传递给奈特莉，可麻烦的是，杰克必须先告诉远在地球的我，赶紧把“4”的影子扫过去，杰克跟我之间的信息传递马上碰到了光速极限问题，因此4点进攻的消息依然无法突破光速

极限。

若取消能量和信息传递这个前提，要得到超光速还有更简单的方法。比方说，你找一个晴朗的夏夜，站在满天繁星下面，脚尖点地，来个轻巧的360度大旋转。乖乖不得了，整个宇宙都在你的眼中转了一圈，这宇宙的转动速度何止光速，简直神速！对不起，你可以认为这种神速是超光速运动，但这并未违反相对论，因为没有实际的信息和能量在这个运动中传递。

总之，自从爱因斯坦得出了能量和信息的传递无法超过光速之后，有无数聪明人设计了各种各样的思维实验，经常有人宣称自己成功地设计出了超光速信息传递的方案，可惜除了那种死不认账的自恋狂外，所有的方案都经不起推敲。直到1982年，法国人阿斯派克特（Aspect）领导了一个实验小组，成功地做了一个可能会在历史上成为第二个MM实验的特殊实验，这个实验的名称叫作EPR实验，实验结果把相对论关于光速极限的推论逼到了墙角（注意我的用词，我可没有说证伪或者推翻）。特别有趣的是，这个实验正是以爱因斯坦为首的三个科学家——E代表爱因斯坦、P代表波多尔斯基（Podolsky）、R代表罗森（Rosen）——提出的。最初只是一个思维实验，爱因斯坦他们的目的，是为了嘲笑当时出生没多久的量子理论有多荒谬。因为在这个思维实验中，按照量子理论的说法，两个基本粒子居然可以在相隔很远的距离时，在光速都来不及跑完的时间内，互相知道对方的旋转状态（基本粒子就是一种比原子还要小千万倍的某种粒子）。爱因斯坦和另外两个科学家嘲笑道：“哈哈，看看，这有多荒谬，量子理论居然发明了超光速的信息传递。”这个思维实验是1935年提出来的，当时的爱因斯坦早已经是物理学界的权威，但是当时的技术条件还无法实现这个EPR实验。

时光飞转，时隔47年之后，爱因斯坦都过世27年之后的1982年，科学家们的实验条件终于具备，而实验结果震惊了全世界！被爱因斯坦称为荒谬的结论居然是事实，量子理论和相对论的矛盾彻底激化。EPR实验到底有没有违反相对论，这个话题引发了从物理学界到民间科学家旷日持久的热烈讨论，关于这个话题我们还将第九章中详细说到。但直到

今天（2016年9月15日）为止，人类并没有发现任何超光速运动，所有关于超光速的报告都被证实是错误的。因此，光速极限仍然是相对论的坚实基础。

质能奇迹

聊完了超光速，我提醒各位亲爱的读者注意，一个伟大的时刻就要到来了，本章的压轴大戏正式上演。爱因斯坦马上就要写下古往今来最出名、最牛，连小学生都知道的一个惊天地泣鬼神的传世公式。请屏住呼吸，下面是见证奇迹的时刻了。

爱因斯坦现在手上有这样一个质速公式：

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

此外，人们很早就知道一个运动的物体是具有能量的，子弹能把木板打穿，断头台能砍下路易十六的脑袋，靠的就是物体的动能。经典物理学对动能的计算公式是：

$$E = \frac{1}{2}mv^2$$

现在，这两个公式到了爱因斯坦手里，他知道经典的动能公式肯定也需要修正，于是他开始像搭积木一样把这两个公式搭来搭去。笔者就不写出具体的推导过程了，因为那要用到一些“无穷级数展开”的数学手法，会影响很多读者阅读时的愉悦感。总之我们的爱因斯坦用魔术师似的神奇手法把玩着手里的方程式，很快，奇迹出现了，爱因斯坦的草稿纸上出现了下面这个公式：

$$E = mc^2$$

爱因斯坦写出这个公式后（爱因斯坦最早的论文是用 L 来代表 E 的，这里笔者有意换了一下），拿笔在这个公式上面画了一个圈，禁不住激动地抬起头来看了我们一眼，说：“魔术是骗人的，我这是真的。”

这就是大名鼎鼎的质能公式。我保证这是本书出现的最后一个公式，从现在开始再不会有恼人的公式来刺激你了。

它代表了质量和能量是可以相互转换的，它解开了英国科学家卢瑟福（Rutherford, 1871-1937）在前不久发现的、神秘的放射性物质为何能发出巨大的能量之谜，也解开了开尔文勋爵（就是前面提到过的那个演讲中用乌云做比喻的老头）冥思苦想也想不通的、太阳为何能经久不息地放出如此巨大能量之谜。

这真的是不可思议，因为这个 c^2 是个大得不得了的数量，这个数字是 $90,000,000,000$ （千米/秒）²，也就是说1克的物质如果全部转换为能量就可以产生90万亿焦耳的能量。这是多大的一个能量呢？打个比方，假设我能自爆，把我自己70千克的质量全部转换为能量，那么就相当于30多颗氢弹的威力。这太恐怖了！你惊呼一声，周围每个人都随身携带30多颗氢弹啊，以后得躲远一点。别激动别激动，没人能把自己变成氢弹自爆，即便是威力巨大的原子弹，也仅仅能把1%的质量转换为能量而已。如果你对这个结论是怎么做出来的仍然感到难以理解，我可以这么帮你一下：你想想，任何物体在光的眼里看来，是不是都在以同样的速度，也就是光速运动呢？那么相对于光而言，每个物体都是具有庞大动能的子弹也就丝毫不稀奇了。当然这只是便于你理解的一种思考方式，真实的理论并不是从这个角度出发的。

但我请你千万记住的两点是：（1）爱因斯坦并没有参与原子弹制造，质能公式也不是造原子弹的理论；（2）即便没有质能公式，原子弹也一样能造出来，只不过原因仍然会很神秘。

这个质能公式是如此的简洁而又不可思议，以至于它成了相对论和爱因斯坦的代名词，甚至被用来代表科学。但如果爱因斯坦地下有知，他可能会觉得用这个质能公式来代表相对论并不妥，如果用相对论因子 γ 的公式来代表，也许马马虎虎还能接受。

在《论运动物体的电动力学》这篇论文即将发表的前夕（1905年9月底），爱因斯坦把他最新发现的质速公式和质能公式写了一篇仅仅三页纸的论文，作为上一篇论文的补充，定名为《物质的惯性同它所含的能量有关吗？》，又投给了《年鉴》杂志，两篇文章终获发表。不过，文章在发表后的很长一段时期内，并没有立刻获得惊天动地的反响，就好像一粒沙子扔进了沙漠，迅速埋在沙海中。那是一个物理学创世纪的时代，每天都在产生大量新论文、新思想，物理学的新发现如潮水般涌进人们的大脑。一个新学说想要被学术界承认，不是一件轻而易举的事情。但毕竟，爱因斯坦的理论不是沙子而是金子，迟早会发出耀眼的光芒。爱因斯坦耐心地等待着。

非常有趣的是，爱因斯坦虽然是相对论的创立者，却并非这个名称的创造者，他自己并不喜欢这个名称，完全是“被迫”接受。在他的这个新学说渐渐受到重视，被越来越多的学者讨论时，也许是受到文章中无处不在的“相对”一词的影响，大家很自然地提出了“相对论”这个新词，并且普遍使用。时间一长，爱因斯坦也只好无奈地接受了这个新名称。

正当相对论逐渐被更多物理学家和数学家接受时，爱因斯坦本人却冷静地看到了其中的两个缺陷。是什么呢？请大家注意一下，爱因斯坦的相对性原理前半句是什么——在任何惯性系里。惯性系也就是相对静止或做匀速直线运动，但问题是，我们的生活中真的有惯性系存在吗？船在海浪中颠簸，火车要加速减速，孩子们扔出去的小球的轨迹是个抛物线……即便是我们一直把它当成惯性系的地球本身，也是在绕着太阳做圆周运动，真正的惯性系几乎找不到。而放眼宇宙，更是非惯性系主宰了我们的世界。同时，无论他如何尝试，都无法将引力纳入到相对论的理论中，新的障碍横亘在了爱因斯坦面前。然而10年后，爱因斯坦便再次做出巨大突破，将相对论极大地提升到了一个全新而更广阔的高度。于是人们把1905年的相对论称为“狭义相对论”（Special Relativity），把1915年的称为“广义相对论”（General Relativity）。



四个搞脑子问题

写到这里，本章的内容即将结束。如果你此时的感觉是：“狭义相对论原来也并不难懂嘛，我基本上都看明白了。”那是笔者莫大的荣幸；如果你此时的感觉仍然是不明所以，一头雾水，那也一定不是你的问题，是我的问题。但是，我想问前一类读者：你真的明白了吗？抱歉，我马上要给你一点小小的打击了，你以为你全都明白了，其实也许并非如此，让我来问你这么几个问题，请你思考一下：

第一个问题：

想象一下，爱因斯坦和哈勒各自驾驶着一艘同一型号的宇宙飞船，在黑漆漆的太空相遇。在爱因斯坦的眼中，哈勒的飞船开始是一个小亮点，然后越来越大，最后以高速从他身边飞过，一转眼就不见了。爱因斯坦心里想，根据狭义相对论的时间膨胀和空间收缩效应，哈勒的时间过得比我慢，哈勒的飞船相对我的飞船缩小了。但是，让我们跑到哈勒那里，在刚才那起相遇事件中，哈勒看到爱因斯坦的飞船开始是一个小亮点，然后越来越大，最后以高速从他身边飞过，一转眼就不见了。哈勒心里也在想，根据狭义相对论的时间膨胀和空间收缩效应，爱因斯坦的时间过得比我慢，爱因斯坦的飞船相对我的飞船缩小了。亲爱的读者，请问，他们到底谁比谁的时间变慢了？谁比谁的飞船缩小了？

第二个问题：

想象一下，你即将坐上一艘亚光速飞船，告别地球上的双胞胎弟弟去太空旅行，当你弟弟看到你的飞船瞬间冲上云霄，一下子就飞得不见踪影时，他在心里想，等哥哥回来的时候，我就比他老了，哥哥会比我显得更年轻。可是，你在飞船上可不一定这么想，对于你的感觉来说，你觉得是地球载着你的弟弟突然飞离你而去了。你越想越觉得有道理，所以感慨道：“等我再见到弟弟的时候，我就更老了。”亲爱的读者，你觉得你们见面的时候，你到底是变得更年轻了，还是更老了？（双生子佯谬）

第三个问题：

洛伦兹开着一辆亚光速飞车正在平坦的北极冰面上飞驰，他越开越快，真是爽极了。突然，车载雷达显示，前方有冰面出现了一道裂缝，裂缝的宽度刚好和飞车一样宽，情况十分紧急，到底要不要刹车？洛伦兹突然想到，啊哈，那个裂缝正相对我做高速运动，它会在运动方向上收缩，于是会小于我的车长，我应该能顺利地冲过去。这么一想，洛伦兹心里一宽，反而踩下了油门加快速度。可是马上就要到裂缝时，一个念头突然冒出来，他吓呆了：如果裂缝里有一个人，从他的眼里看来，我正在朝他飞速运动，因此我的车子在运动方向上会收缩，我会更容易一头跌入冰缝，天哪，得赶紧刹车！可是此时已经来不及了。亲爱的读者，请问倒霉的洛伦兹先生到底有没有掉入那个冰缝中呢？（长棍佯谬）

第四个问题：

庞加莱先生正指挥着一艘潜水艇在大西洋中游弋，海里的景色真是美不胜收，看上去比数学公式要有趣得多。突然，一阵凄厉的警报声把庞加莱的思绪拉回现实。中士慌慌张张地跑来报告说一个不明物体击中了潜水艇，撞坏了深度控制箱，潜水艇正在下沉，情况危急。庞加莱不愧是久经考验的大师级人物，临危不乱，他想：只要我加快潜水艇的前进速度，那么对面的海水就会相对潜水艇做高速运动，根据狭义相对论的质速公式，海水的质量会增加，那么密度就会增加，浮力就会增大，我们的潜水艇就能顺利上浮了。当庞加莱正要发出以亚光速加速前进的指令时，他突然又想：哎哟不对，一加速，在海水看来，潜水艇的质量就增大了，我岂不是下沉得更快？庞加莱这时也无法保持镇定了，看着全体艇员焦灼的目光，大颗汗水从额角落下。亲爱的读者，请问可怜的庞加莱先生到底该不该下达加速前进的命令？（潜水艇佯谬）

问题问完了。

请原谅我，你本来已经清楚的头脑，突然一下子又坠入深渊，你忍不住火冒三丈，这该死的相对论到底该相对谁啊！

请息怒，我亲爱的读者，你一点都不需要感到郁闷，这些问题不但困扰你，同样也曾经困扰着比我们聪明十倍的大科学家们，那个双胞胎到底孰老孰少的问题也曾经引发过全世界范围的大讨论。

要搞清这些问题，不是我三言两语就能说得清的。请你系好安全带，我们的旅程才刚刚过半，更刺激、更惊险、更不可思议的故事和风景还在前面等着我们。犹豫什么，这就跟我继续出发吧！

第五章

CHAPTER FIVE

广义相对论的宇宙



从狭义 (special) 到广义 (general) 是文字上的一小步，却是人类对我们这个宇宙认识的一大步，其意义绝不亚于阿姆斯特朗在月球上跨出的那一步。这一步，爱因斯坦整整跨了 10 年。当在 1915 年最终完成广义相对论的所有内容后，爱因斯坦自己写道：“让我好好休息一阵子，我实在是太累了。”他是应该好好休息一下，如果说狭义相对论是爱因斯坦集各门各派武功之大成的话，那么广义相对论则是爱因斯坦傲视天下的独门秘籍，其难度是可想而知的了。



爱因斯坦的不满

当时，有很多学者已经触摸到了狭义相对论的边缘。我们前面提到过，洛伦兹与相对论只有一步之遥；另外一位法国数学家庞加莱已经正确地阐述了相对性原理，并推测真空中的光速可能是常数；此外还有与爱因斯坦同时代的奥地利物理学家马赫，率先向牛顿的绝对时空观提出了挑战，坚定地认为不存在绝对空间和绝对运动（可惜在相对论发表后，庞加莱和马赫却一直表示反对）。可以说，当时狭义相对论在整个物理学界已经呼之欲出，即使没有爱因斯坦，不超过 5 年，也一定会有别的“斯坦”发表狭义相对论。但广义相对论就不同了，它几乎是爱因斯坦一个人潜心修炼的成果，如果没有爱因斯坦，我们可能今天还在等待这个理论。在一本美国人写的科学史书中，广义相对论被评价为“这无疑是人类历史上最高的智力成就”。你有点迫不及待地想知道了吧？这事还

得从头说起。

我们的故事要从……（读者：不会吧，又要讲四百多年的历史？）要从 1905 年开始讲起（读者：还好，吓死我了！），让我们再次回到瑞士的伯尔尼，还是那家专利局，故事的主角自然还是爱因斯坦，故事的配角仍然是我们的局长大人哈勒先生。话说爱因斯坦申请二级专利员被驳回后，一直对局长有些耿耿于怀，他有些不服气：自己已经凭借《分子大小的新测定法》顺利取得了博士学位（这篇论文是奇迹年 5 篇论文中的第 2 篇，据后人统计，爱因斯坦一生的所有论文中，这篇论文被引用得最多），可是却连二级专利员都没能批下来，太不尊重人才了吧，此处不留爷自有留爷处。对学术圈充满情怀的爱因斯坦开始申请伯尔尼大学的物理系讲师，准备跳槽，然而申请却被拒绝了（此后他坚持不懈地申请了 3 年，直到 1908 年，终于获得了一个编外讲师的职位）。既然大学讲师当不成，爱因斯坦又试着去申请苏黎世中学的教师职位，没想到这也没有成功，只好继续干着专利员的工作。

这一天，哈勒又走进了爱因斯坦的办公室，笑嘻嘻地对爱因斯坦说：“小爱啊，最近怎么样？又有什么新想法了没？”

爱因斯坦：“最近很不好，很多事我想不通。”

哈勒：“耐心点嘛，小爱，明年，明年一定提升你。”

爱因斯坦：“我想不通的不光是这件事情。”

哈勒：“还有什么事？”

爱因斯坦突然意识到自己说漏了嘴，自己准备跳槽去申请伯尔尼大学讲师的事情怎么能让局长知道呢？得赶紧想办法绕开去，爱因斯坦急中生智，说道：“惯性系！因为惯性系！”

哈勒：“什么意思啊？”

爱因斯坦：“我前不久告诉你的相对性原理你还记得不？”

哈勒：“记得啊，不就是在任何惯性系中，所有的物理规律保持不变么？我觉得很深刻，很伟大啊，这又怎么了？”

爱因斯坦：“所有的物理规律为什么只在惯性系中才维持不变

呢？我们的生活中根本不存在真正的惯性系啊，所有的运动没有一个是理想中的匀速直线运动，你能给我举出一个真正的惯性参考系的例子吗？”

哈勒想了想：“我们就用大地做参考系，这总是惯性系了吧？”

爱因斯坦：“显然不是，别忘了我们的地球是以10.8万千米的时速，绕着太阳做着圆周运动的，匀速圆周运动是一种加速运动，产生加速度的力就是太阳对地球的引力。速度是有方向的，哪怕速度的绝对值不变，只要方向在不停地变化，就是一种加速运动。所以，我们的大地根本就不是惯性系。”

哈勒恍然大悟：“想想还真是这样，我们身边一个惯性系也找不到。”

爱因斯坦：“惯性系实在是太特殊了，上帝这个老头子不应该这么偏爱根本不存在的惯性系嘛。我们在惯性系中总结出来所有公式，其实根本不能解决实际问题嘛，最多只能求出一些近似值而已，你如果想求出点精确值，马上就会遇到加速度这只怪兽。”

哈勒：“那我们干脆就不加惯性系了，直接说在任何参考系里面物理规律不变，一了百了，哈哈哈。”

爱因斯坦：“哈你个头啊哈，说得倒是轻巧，可怎么个不变法呢？比如你坐在电梯里面，电梯加速上升的时候，你抛起一个小球，这个小球的落地时间就会跟电梯匀速上升时不一样。显然，在这个参考系里面，物理规律变了。”

哈勒：“我只是随便说说，随便说说，你别认真嘛。”

爱因斯坦：“但从内心深处来说，我又认为你说的是对的，物理世界应该是民主平等的世界，各种参考系都应当众生平等，惯性系不应该在这个世界中具有特权，凭什么惯性系的地位就那么特殊呢？”

哈勒见今天问不出什么新鲜玩意儿来，也就走了。

在此后差不多接近两年的时间里，爱因斯坦都被这个问题折磨得茶饭不香。不过到了第二年，也就是1906年，哈勒局长果然没有食言，爱因斯坦升

为二级专利技术员，薪水福利都涨了。又只过了一年，到了1907年，爱因斯坦再次升职，这次升到了一级专利员，同时爱因斯坦还拥有了更宽敞的办公室和更舒适的椅子，这下爱因斯坦的心情好多了。虽然看起来伟大的灵感往往来自于一些偶然发生的小事，但其实偶然中蕴含着必然。某些书里说一只苹果砸到了牛顿的头上，让他得到了万有引力定律，这种故事虽然真实性经不起推敲，但确实让人觉得很浪漫、很令人神往。有些书里说有一次爱因斯坦看到一个工人从房顶上摔下来，让他灵光闪现，解决了困扰他两年的疑惑，这个故事不但不浪漫也经不起推敲。爱因斯坦自己说过，当他想到那个绝妙的点子的时候，他是坐在椅子上的。当时的情况是这样的（别问我是怎么知道的）：爱因斯坦午后抽完一支烟，舒服地半躺在椅子上，不知不觉就进入了梦乡，他做了一个噩梦，当他从噩梦中惊醒的时候，万万没有想到，这个噩梦却造就了他“一生中最快乐的想法”。

生死重量

逐渐模糊的视线，画面渐渐黑下去。

突然——

画外音：“警长，警长，快醒醒！”

画面一阵摇晃，渐渐亮起。

爱因斯坦睁开眼睛，看见很多探员围在他的周围。

“出什么事了？”爱因斯坦问。

探员罗森：“出大事了，在云霄电梯里发现一枚定时炸弹，拆弹组已经赶去，目前尚不知是何人所为，有何目的。”

“距离爆炸还剩多少时间？”

“不到24小时。”

“我们走！”

一座酷似埃菲尔铁塔的建筑物耸立在眼前，唯一不同的是一眼望不到顶，人们只能看到它直入云霄的塔身。塔基处挂着一行大字：云

霄电梯，让你重新发现世界。

罗森说道：“这是本月刚刚落成的全世界最高的观光电梯，高度达到2万米，电梯往返一趟最短仅需30分钟，可以同时容纳100人左右。我前两天曾经上去过一次，真是让人震撼。天气好的时候，感觉可以把整个欧洲尽收眼底，天气不好的时候，可以看到一望无际的云海包围着大地，云海里透出阵阵闪电，如入仙境。”

两人穿过警戒线。

罗森继续说：“据初步判断，炸弹威力可能极大，方圆1千米内已经开始疏散。”

爱因斯坦：“炸弹是怎么发现的？”

罗森：“今天早上维修工人对电梯做运行前的例行检查时，在电梯的底部发现了这颗炸弹，吸附在电梯的底盘上，上面有一个倒计时显示器，上面显示为23：20：32，他们当即报了警。”

爱因斯坦：“你们初步估计何人所为？目的是什么？”

罗森：“我们的初步判断是某个极端环保主义组织所为。环保组织一直反对云霄电梯这个工程浩大的项目，但目前尚没接到任何组织或个人声称对此事负责。”

说着两人走到电梯跟前，通过一个楼梯下去，进入一个检修通道，在这里，抬头就能看见那颗炸弹，炸弹边上站着两个专家，其中一位正拿着仪器仔细检查，另一位在拍照。

爱因斯坦抬头朝炸弹看过去，首先映入眼帘的就是那个非常显眼的倒计时屏：

22：35：48

计时屏非常有节律地一秒钟跳动一下。

炸弹比普通人的手掌大不了多少，呈椭圆形，银白色，非常光亮，人影都能照得出。爱因斯坦问其中一位正在用仪器扫描的专家：

“我是爱因斯坦警长，有什么新发现？”

那人回答：“你好，警长，我叫普朗克，国土安全局的首席爆破专家。这枚炸弹很复杂，是高手制作的。”

爱因斯坦：“爆炸威力能准确地预计吗？”

普朗克：“这枚炸弹用的是目前威力最大的C4炸药，虽然我现在还不能准确算出杀伤半径，但要把整座电梯塔炸塌是肯定没问题的。”

爱因斯坦：“有可能拆除吗？”

普朗克：“没有把握，这个炸弹用的防拆装置是一个精密的重力感应器，只要感应到重力的变化超过一个阈值，炸弹就会立即爆炸。炸弹是用一种特殊的胶水粘在底盘上的，如果我们想要把它和底盘分离，就必须切割，切割过程中引起的震动肯定会让重力感应器超过阈值。”

爱因斯坦：“那能不能把整个电梯厢拆下来，搬离现场？”

普朗克：“我刚刚咨询过电梯制造商，想要拆除这种电梯厢，最快也需要花48小时，时间肯定来不及，而且也不能保证在拆除的过程中所引起的震动在安全范围内。”

爱因斯坦：“看来，我们遇到麻烦了。”

两小时后，国土安全局总部大楼。

会议室里面坐满了人，每个人都表情严肃，一言不发。国土安全局的开尔文局长居中而坐，爱因斯坦坐在他的旁边。

开尔文环顾了一下全场，说道：“今天召集大家过来，是因为我们正面临一场严重的危机，需要各方拿出解决办法来。我们请负责这个案件的爱因斯坦警长做一个情况简报。”

爱因斯坦立刻站了起来：“各位，事情是这样的，今天早上我们在云霄电梯的底盘上发现一枚威力超强的定时炸弹，一旦爆炸，不但威力会波及1千米范围内的所有建筑物，最重要的是，爆炸威力足以把云霄电梯炸塌。这么一个庞然大物如果倒塌，后果不用我多解释，绝对是个大灾难，而现在离爆炸还有……”爱因斯坦看了看表，“还有20小时。关于炸弹的情况，我们请安全局的首席爆破专家普朗克先生介绍一下。”

普朗克：“这枚炸弹里面安装了一个非常精密的重力感应装置，只要发现重力稍有变化，立即会爆炸。目前我们还在想办法拆除它，但

是情况不容乐观，我们必须做好无法在爆炸前拆除的准备。”

开尔文：“情况大家都了解了，请大家各抒己见，拿出办法来。”

消防局长：“我的意见是，让电梯开上去，万一拆不掉，就直接让它在顶上炸了，这样受损的范围有限。”

爱因斯坦在心里暗骂一声“文盲”，对消防局长说：“这是不行的，电梯离地面越高，重力就越小，您不会连牛顿的万有引力定律都不知道吧？在上升的过程中，重力感应器就会感应到重力的变化，炸弹会立即爆炸。”

消防局长脸一红，不说话了。

建设局长：“那么，我们是不是可以在电梯上升的过程中慢慢地加重炸弹的重量，比如，把吸铁石一小块一小块地吸附上去。”

爱因斯坦：“没用，注意，重力感应器感应的是自身重力的变化，并不是整个炸弹的重量，往炸弹上加东西，根本不会改变重力感应器自身感受到的重力。”

普朗克：“我补充一下，其实，根本不用等到电梯升到半空，只要电梯一启动，炸弹就爆炸了，因为电梯启动的时候必然会产生一个加速度，这个加速度会让重力感应器感受到一个如同重力增加的力。我们坐过电梯的人都知道，当电梯刚往上升的时候，我们会感觉自己变重了，就是这个道理。”

安静的会议室出现骚动，大家纷纷交头接耳，但一时谁也拿不出好主意。

爱因斯坦低着头沉思，突然他抬起头，脸上闪过一丝喜色，站起来大声说：“大家安静，请听我说，我想到了一个办法。”

会场立刻安静下来。

爱因斯坦：“刚才普朗克先生启发了我，电梯的加速度会产生如同重力的效应，而电梯升得越高，则重力越小。请大家想一想，如果我们能精确地控制电梯的加速度，则刚好可以把重力降低的效应完全抵消，这样我们就能把电梯安全地升到顶端，然后引爆炸弹，这样我们就可以保住整座云霄电梯塔了。”

开尔文：“爱因斯坦警长的这个方案从理论上来说可行，不过，请云霄电梯的制造商方面出来回答下，是否有可能精确控制电梯的加速度。”

一个谢顶的中年人站了起来：“我是云顶电梯公司的总工程师爱丁顿。从理论上来说，云霄电梯具备任意加速度的能力，但控制系统需要加一个控制模块，当初设计的时候没有考虑到需要如此精细的控制。”

开尔文说：“制造这个控制模块需要多久？”

爱丁顿看了看手表，想了一下说：“如果现在马上动手的话，应该能赶在爆炸前半小时左右完成，时间还来得及，不过……”

爱丁顿迟疑了一下。

开尔文：“有话就直说，爱丁顿先生。”

爱丁顿：“因为考虑到摩擦力和空气阻力的变化，电机必须要不停地调节输出功率。但在这么短的时间内，恐怕无法做出自动控制模块，必须……必须手动控制。也就是说，必须要有一个人在电梯内手动微调参数，直到电梯升顶。不知道我是否说明白了，开尔文先生。”

开尔文瞬间就明白了爱丁顿的意思，不愧是久经沙场的老将，开尔文冷静地说道：“请你立即动手去制作控制模块，剩下的事情交给我们，谢谢你，爱丁顿先生。”

爱丁顿说了声“是”，立即三步并作两步离开了会场。

此时，整个会场鸦雀无声，其实所有人都明白了爱丁顿的意思。

开尔文环视了一周，镇定地说：“我想大家应该已经明白了，电梯只能在加速状态下才能维持重力不变，一旦升顶后开始减速，就会立即引爆炸弹。”

会场安静得可以听见一根针落地的声音。

“我已经一把老骨头了，对这个世界也没有什么留恋了。”开尔文一字一顿，“让我对这个国家的国土安全再尽最后一次责任吧。”

安静，死一般的安静。

开尔文缓缓地站起来，稳稳地一步一步走出门外。

云霄电梯检修通道。

倒计时血红的数字：00：26：23

每跳动一下仿佛都是死神的敲门声。

云霄电梯中，爱丁顿在电梯控制面板上忙碌着，终于小心地合上面板，旋紧螺丝，面板上露出一个圆形的旋钮。爱丁顿抬起头来，脸色凝重地看着开尔文，郑重地把一个手掌大小的仪表交给开尔文。

仪表上面什么按键都没有，只显示了一行醒目的数字：9.80665

爱丁顿：“尊敬的开尔文先生，再多的语言都无法表达我此刻对您的感激，这是重力常数测定仪，请您注意看仪表上的数字，如果数字增大，说明电梯加速度过大，请把旋钮逆时针转动减小输出功率；反之请顺时针旋转增大输出功率。请注意，数字必须维持在9.81和9.79之间。”

开尔文：“相当明白了。启动电梯吧，时间不多了。”

爱丁顿郑重地朝开尔文鞠了一躬，缓缓地退出电梯。此时，电梯外所有人都注视着开尔文。开尔文回敬了一个注目礼，沉着地发出命令：“启动电梯。”

突然，一个人影冲进了电梯，迅速抢过开尔文手里的仪表，并把开尔文往外一推，拉下扳手。开尔文一个踉跄的同时，电梯门缓缓地合上了。

在电梯门合上的那个瞬间，所有人都认出来了，那正是爱因斯坦警长。

开尔文大怒，冲着电梯喊：“岂有此理，你怎敢这么做！”

爱因斯坦在电梯里对大家说：“请立即启动电梯，时间已经来不及了。我已经下定决心了，电梯门我已经反锁，我再重复一遍，请启动电梯，时间来不及了。”

僵持了一会儿，尽管开尔文暴跳如雷，但也无计可施，大家心里都明白，时间一分一秒地过去，必须启动电梯了。

开尔文痛苦地看着电梯里面的爱因斯坦，知道已经不可能改变了，红着眼睛对爱丁顿吐出两个字：“启动。”

电梯顶上一盏红灯变成了绿灯。

电梯无声无息地启动，刚开始几乎看不出任何移动，慢慢地，看出了一点点抬升，随着时间的推移，移动越来越明显。

爱因斯坦一只手按着控制旋钮，一只手拿着重力测定仪，眼睛盯着读数，不时地调节旋钮，以维持读数的稳定。

电梯的速度越来越快。20分钟后，电梯终于要接近顶端了，爱因斯坦明白，电梯升顶前的减速会立即破坏炸弹上重力感应器的平衡，炸弹会立刻爆炸。

最后的时刻到了，爱因斯坦听到“咣当”一声，猛然感到自己的身体一下子轻了起来，手中仪表上的数字急剧变小。

等效原理

“啊——”爱因斯坦一声惊叫，从椅子上跳起来，他惊醒了，一身冷汗。

刚才的梦实在太深刻了，几乎历历在目。“加速度和重力等效，加速度和重力等效，加速度和重力等效……”爱因斯坦一声比一声大地念了三遍，他得到了一生中最快乐的想法。此时，哈勒也走进了爱因斯坦的办公室，显然他听到了爱因斯坦的叫声。

哈勒：“小爱，发生什么事了？”

爱因斯坦冲过去一把抱住哈勒：“那个问题我想明白了，哈哈，哈哈！”

哈勒推开爱因斯坦：“别激动别激动，你说的是哪个问题？”

爱因斯坦：“惯性系。明白了吗？惯性系。上帝这个老头子不偏心，这个世界又回到了民主的世界，所有的参考系都是平等的。现在我们可以大声地宣布：在任何参考系中，所有物理规律保持不变。只要在这个前面加上一个等效原理的前提即可。”

哈勒一脸茫然：“我不明白。”

爱因斯坦：“加速度和重力，也就是加速度和万有引力，它们是完全

等效的。请想一下，局长，如果你被关在一个密闭的电梯中睡着了，当你醒过来的时候，你如何区分自己是在太空中做着加速运动还是在静止的地面上呢？你能不能用做任何物理实验的方法，判断自己是静止地待在地面上，还是在太空中加速上升？”

哈勒仔细想了一下：“好像是不能。”

爱因斯坦：“反过来，如果你醒来的时候，发现自己漂浮在电梯中，请问，你能区分自己是在太空中失重了，还是电梯在地球引力场中做着自由落体运动吗？你能用做任何物理实验的方法，区分这两种状态吗？”

哈勒又仔细想了想：“很对，确实完全无法区分，不可能用实验的方法来知道自己的确切状态。”

爱因斯坦：“因此说，加速度就是引力，引力就是加速度，它们在物理性质上是完全等价的，这个我称之为等效原理。对于任何参考系来说，我们都可以把它分解为一个在引力场中的惯性系来考虑，这样一来，所有的参考系就平等了，参考系与参考系之间就没有任何区别了。比方说，你在地球上一列匀速直线运动的火车中做物理实验，我可以理解为是在一个施加了地球引力的惯性系中做实验；同样，如果我在太空中一部加速上升的电梯中做实验，假设上升的加速度刚好等于地球的重力加速度的话，那么在没有等效原理之前，我们只能认为这部电梯不是一个惯性系，但是现在，我们可以看成是在一部地球上的、静止的电梯中做实验。再比方，如果我们在地球上一部加速上升的电梯中做实验，我们也可以等效地认为，是在太阳上一部匀速上升的电梯中做实验，假设电梯的加速度与地球引力之和刚好与太阳的引力相同的话。你看，有了这个等效原理后，我们就可以把任何非惯性系都转换为惯性系，只要额外处理一个引力场的影响即可。”

哈勒：“那做匀速圆周运动的参考系也能做同样的转换吗？”

爱因斯坦：“当然可以，你想象一下，现在你处在一个密闭的链子球里面，我把你甩起来，你会感到一股无形的力把你贴在外壁上，这个力就是向心力，但是对于在密闭的球中的你来说，是无法区分这是向心力还是引力的，如果我在太空中甩这个链子球，那么你就会感觉跟在地球上静止时一样，受到同样的重力。因此，只要考虑了引力场，任何参考系，不论是加

速还是减速直线运动，还是非直线运动，都可以分解为惯性系不变、引力在发生变化。因此，最重要的是我们要找出一个引力场方程来。在狭义相对论中，我们只研究了时间、空间、运动这三者的关系，现在我们必须再加入一个重要的对象，那就是——引力！”

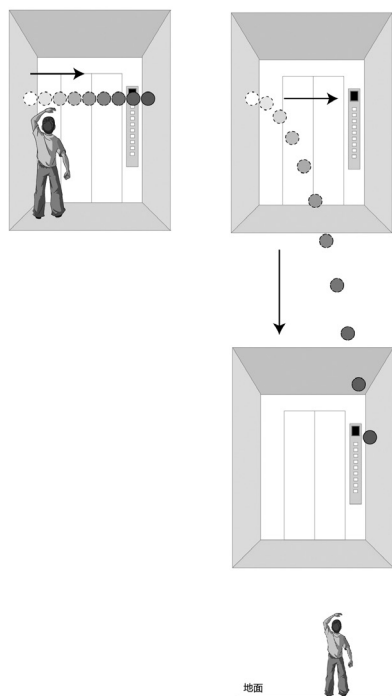
哈勒若有所思地点点头：“我开始明白了。”

爱因斯坦为了这个快乐的想法高兴了很多天，每天都觉得思路比上一天更加清晰，在引力这条路上开始往前探索，无数崭新的风景一下子涌过来，很多过去想也没想过的问题接踵而至，让爱因斯坦有一点应接不暇。

爱因斯坦首先通过一个思维实验，很容易就得出了引力会使得光线弯曲的结论。你可能觉得非常难以理解，光线怎么可能弯曲呢？我们从来也没有见过手电筒打出去的光有任何一丝一毫的弯曲，其实那一切不过是光的速度太快，弯曲的程度太低，令我们的眼睛无法察觉。我可以用一个思维实验很容易就向你证明——光，是不可能在任何时候都走直线的。

请闭上你的眼睛，跟我一起来想：假设现在你在一部做着自由落体运动的电梯中，你会感觉到失重，所有的东西在你身边都漂浮起来。你随手从口袋里拿出一个玻璃球，在眼前松手，你会看到玻璃球在眼前漂浮起来；你轻轻地一弹，玻璃球在你眼皮底下以匀速直线运动朝前飞去。这一切都如此正常，天经地义。

现在我是站在地面上的一个观察者，我看到的情况就完全不同了，假设电梯是透明的，我会看到什么呢？我会看到那个在你面前做匀速直线运动的玻璃球，以一个抛物线的轨迹下落。

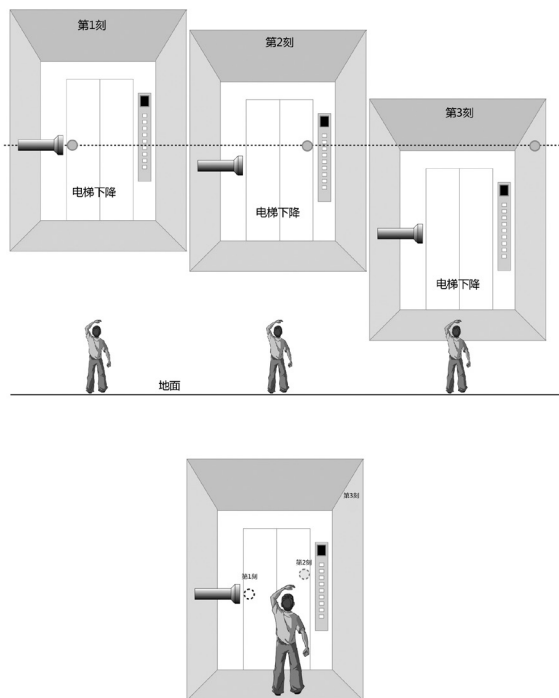


【图5-1】

不同参考系的人看到的小球飞行路线不同

这个情景就如同你在运动的火车上从窗口扔出一个物体，你自己看到这个物体直线下落到地上，可是站台上的人来看，物体是一个抛物线运动。这一切都是如此正常，天经地义。

那么，再次闭上你的眼睛，还是回到那部失重的电梯中，你打开手电筒，一束光从你的手里打出去，请把这束光想象成是一个小球。请问，这束光对你而言是不是做着匀速直线运动呢？如果是，那么对于地面上的观察者我而言，这束光就必定也是个抛物线。如果你觉得这想不通，你一定要认为地面上的我看到的光是直线而不是抛物线，那么，如果我看到的是直线，你看到的就一定是向上弯曲的抛物线了，别忘了，你正在不停地下落呢。换句话说，我们俩不可能同时看到光走的是一条直线，要么你看到的是抛物线，要么我看到的是抛物线，只能二选一。

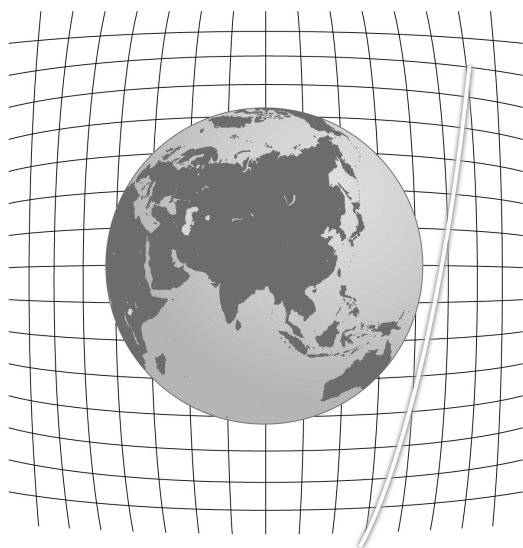


【图5-2】

如果地面上的人看到的是直线，那么电梯中的人看到的就是曲线

稍稍经过思考后，所有人都会选择后者，也就是从地面上的观察者来看，光走的路线跟小球一样也是抛物线。只是光的速度太快了，这根抛物线拉得很长很长，因此弯曲度很低很低，我们的肉眼根本察觉不出来。但是我们都应该能达成共识，那就是地球的引力确实会使光线弯曲。

那么显然，既然地球的引力可以使光线弯曲，那么所有的引力场应当都会使得光线弯曲，我们这个地球不应当有什么例外的特权。引力越大，光线也就弯曲得越厉害。再根据等效原理，加速度就是引力，引力就是加速度，因此，加速度同样会造成光线的弯曲。



【图5-3】

地球的引力会使经过地球附近的光线弯曲

太空大圆盘

这个世界已经变得越来越神奇了，连光线都不再是直的，但这又不由得我们不信。还有更神奇的，爱因斯坦用一个非凡的思维实验论证了这样一个事实：引力其实造成的是时空弯曲，也就是时间和空间同时被弯曲了。这下你的脑袋彻底晕了，你完全无法想象出时间和空间弯曲是什么概念，如果我说时间变慢，甚至说时间膨胀、空间收缩什么的，你大概觉得还马马虎虎能想象得出来，但是这个时空弯曲实在太令人费解了。别慌，爱因斯坦这个非凡的思维实验叫作“爱因斯坦圆盘实验”。“有趣啊，”你心里想，“前有牛顿水桶实验，后有爱因斯坦圆盘实验。干脆我们把有趣进行到底，把Tom和Jerry再次请出来吧。”你的主意很好，我这就请出这两位小家伙，这回让他们担任爱因斯坦的学生，一起来做这个思维实验。

爱因斯坦：“欢迎Tom和Jerry来到我的广义相对论大讲堂，本次讲课包你们满意。”

Tom托着腮帮子：“我讨厌上课。”

Jerry眯着眼睛：“能再睡会儿吗？”

爱因斯坦：“你们听我说，这节课我们不在教室里上，我们去太空中上，怎么样？”

Tom和Jerry：“太空？哇，太好了！怎么去？快走快走。”

爱因斯坦：“请你们闭上眼睛，准备好了吗？般若波罗蜜！”

Tom和Jerry突然感到自己漂浮起来了，睁开眼睛一看，三人已经悬浮在漆黑的太空中了，四面八方全是星光点点。

爱因斯坦：“现在，我需要把你们俩放到一个特殊的、非常好玩的转盘游乐机里面去。”

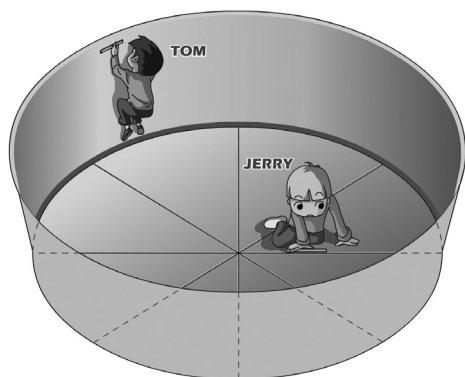
Tom和Jerry：“在哪里？在哪里？”

爱因斯坦：“巴巴变！”

突然，三人眼前突然出现了一个巨大的转盘，就好像一个超级巨大的圆形饼干铁盒。

爱因斯坦：“这就是我们要去上课的地方，你们俩进去。因为我是这里的上帝，所以，你们俩的一切行动我都能看见，你们能听到我说的话，我也能听见你们说话。好了，现在给你们发道具，一人一只原子钟和纳米尺，这可是全世界最精确的时钟和量尺，千万要保护好。”

Tom和Jerry接过钟和尺，丈二和尚摸不着头脑，完全不知道爱因斯坦教授有何用意。先进去再说，看看有什么好玩的。于是两人抓着“饼干盒”的门框，稍一用力，轻轻巧巧地就漂进去了。



【图5-4】

爱因斯坦圆盘实验

爱因斯坦：“Tom，现在请你在圆盘的内壁上就位；Jerry，请在圆盘底的圆心就位，我们的实验马上就要开始了。”

Tom：“这让我想起了我家关小白鼠的笼子里那个轮盘。”

Jerry：“这让我想起了我小时候最喜欢玩的东西。”

爱因斯坦：“请注意，我马上就要把它旋转起来了，你们准备好了吗？”

Tom 和 Jerry：“准备好了。”

爱因斯坦手一挥，整个转盘飞快地转动起来。

Tom 由于是在圆盘的内壁位置，瞬间就感受到向心力。从我们观众的角度来看，他感受到的是向心力，但是对 Tom 自己来说，他根本分不出是重力还是向心力。且看我们的 Tom 怎么说。

Tom：“啊哈，我们是不是回到地球上了？我突然就感觉回到了地面，能正常走路了。”

爱因斯坦转身面向观众，解释说：“匀速圆周运动的实质是一种加速运动，根据我的等效原理，加速度和重力是一回事，所以 Tom 感受到了像在地球上一般的重力感。”

Jerry 站在圆心的位置，所以他相对观众来说是静止的，Tom 在 Jerry 周围一圈圈地转着。且看我们的 Jerry 是怎么说的。

Jerry 说：“我没有感觉到任何变化，这里能见度不够，我甚至连

Tom都看不到。”

爱因斯坦再次转向观众，解释说：“Jerry就好像处在引力的边缘一样，他此时仍然是悬浮在太空中的，没有受到任何引力的影响。我们用这样一个旋转的圆盘创造了一个小小的人工引力场环境。接下去，我们就要研究这个引力场对我们的时间和空间到底造成了什么样的影响。先让我们来研究一下相对比较容易研究的时间问题。”

爱因斯坦转过身去对两人问道：“Tom和Jerry，请你们告诉我，你们的原子钟的时间是多少？”

Tom：“11点55分，教授。”

Jerry：“12点整，教授。”

爱因斯坦解释说：“很好。大家请注意，Tom相对我们在运动，而Jerry相对我们则是静止的，根据狭义相对论的时间膨胀效应，运动会使得时间变慢，因此，我们可以很容易得出结论，那就是Tom的时间变慢了。但现在请大家把视角放回到Tom身上，对Tom来讲，他感觉自己并未运动，只不过是受到了引力而已，因此Tom可以得出这样的结论——引力使得时间膨胀了。让我们继续往下深入研究。”

爱因斯坦对Jerry说：“Jerry，现在我要你沿着圆盘上的径线往前去一点点。”

Jerry往前挪了一点点，突然就感受到了一点轻微的引力，这股引力在把他向远处拖拽，Jerry赶紧打开了绑在腰上的推进装置，以维持平衡。

爱因斯坦：“Jerry，请你再告诉我你的时间。”

Jerry报了一个精确的数字，爱因斯坦发现比自己的原子钟慢了1秒钟。

爱因斯坦：“很好。Jerry，请你继续沿着径线朝前挪一点，跟刚才挪动的距离一样，再告诉我时间。”

Jerry照做，又报了一个精确的数字。

这次比爱因斯坦的原子钟时间慢了2.5秒。

爱因斯坦继续指挥着Jerry一点点朝前挪动，每挪一段距离，就报

一个时间，爱因斯坦记下每次Jerry时间变慢的幅度。

爱因斯坦解释说：“Jerry的时间为什么会变慢，道理很简单，Jerry一旦离开了圆心，他就会产生速度，所以时间就会变慢，而且他的线速度是随着离开圆心的距离不断增大的，因此他的时间变慢幅度就会逐步增大。现在让我们构建一个笛卡尔坐标系，把X轴当作距离的变化，Y轴当作时间变慢的幅度大小，然后我们把刚才Jerry告诉我的所有数据用一个个点标在这个坐标系里，最后把这些点用线连起来，我们很快就会发现，这是一根抛物线，一根完美的曲线。换句话说，随着离开圆心的距离增大，引力会逐步增大，而时间会逐步变慢，但时间变慢的幅度是一根曲线。我们可以这样理解，在圆盘上时间弯曲了；进一步说，也就是引力使得时间弯曲了。”

你禁不住鼓起掌来，太精彩了，爱因斯坦不愧是大师级人物啊，我似乎明白了时间弯曲是怎么回事了。继续继续，那空间弯曲又该怎么理解呢？

爱因斯坦：“Tom和Jerry，请拿出你们的纳米尺，不要告诉我你们弄丢了，那一把尺子可要花去教授我一个月的薪水呢。”

Tom：“教授，尺子在我手里呢，让我做什么？”

Jerry：“这把尺子真好看。”

爱因斯坦：“Jerry，我要你现在开始量一下圆盘的半径长度。Tom你呢，就帮我量一下圆盘周长，就是你刚好走一圈的长度。”

不一会儿，两人都把数字报过来了。爱因斯坦用Tom量的周长除以Jerry量的半径，得出的数字发现比 2π 要大，这是怎么回事？

爱因斯坦解释说：“请注意，从我们观众的角度看起来，Tom由于在运动，那么根据狭义相对论，在运动方向上就会发生尺缩现象，所以Tom手里的那根纳米尺就会缩短一点点。而同时，Jerry是在沿着径线方向丈量，在这个方向上，纳米尺没有运动，自然也就不会发生尺缩现象。于是，Tom量出来的周长就会比静止时长一点点，而Jerry量出来的半径则不会变化。于是，奇怪的事情发生了，这个转动的圆盘的圆周率大于 π 。我们进一步想下去，在这个圆盘的人造引力场中，所

有以 Jerry 为圆心的半径不同的圆都可以用同样的方法得出圆周率大于 π 的这个惊人事实。观众们，你能告诉我在什么情况下一个圆的圆周率大于 π 吗？”

一个聪明的观众说道：“我知道，我知道。”

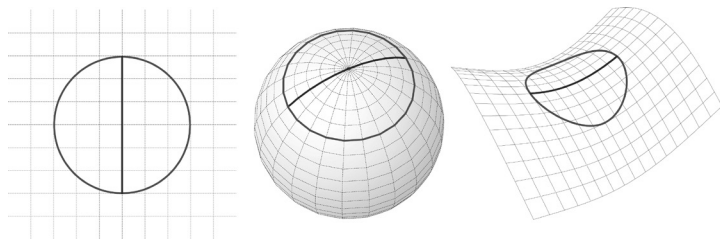
爱因斯坦：“请讲。”

观众：“圆规的质量不过关，不小心把圆画成了椭圆的情况下。”

爱因斯坦：“拜托，我们这不是脑筋急转弯呢，不考虑这种意外误差情况。”

观众一脸不好意思：“那我就知道了。”

爱因斯坦：“如果你在一张纸上画一个标准的圆，圆周率自然是 π 。但是，如果你在一个篮球上画一个标准的圆，然后去测算一下的话，就会发现篮球上那个圆的圆周率小于 π 。同理，如果你在一个马鞍面上画一个标准的圆，则圆周率就会大于 π 。观众们，我们的结论就是，如果在一个曲面上画圆，圆周率就不会等于 π 。由此可见，在圆盘引力场中，我们发现圆周率大于 π ，这说明这个圆盘引力场中的空间并非平直，而是——弯曲的。”



【图5-5】

平面上的圆、球面上的圆、马鞍面上的圆

你再一次禁不住鼓起掌来，真是精彩啊！其实我在理解了爱因斯坦的这个圆盘实验后，也是禁不住大声喝彩，这实在是一场思维的盛宴。你马上就想到：我这么抬起手来，朝空中一劈，使一招“扭转乾坤”，显然我的手劈下去不是匀速直线运动而是加速运动，那岂不是我这一招真的可以把时空给弄弯曲了？没错，你的思考完全正确，只是你这一劈造成的时空弯

曲效应，恐怕要把你的手放大到银河系那么大才有可能被察觉到。

作者注：本文所举的例子来源是美国物理学家格林的科普著作《宇宙的琴弦》（湖南科学技术出版社），对于这个例子，格林有一段注释，现基本原文引用如下：

关于所谓“刚性转盘”（即太空大圆盘更科学的叫法）的分析，很容易引起混乱。实际上，在这个例子中，许多方面到今天也没有达成一致意见。正文遵从了爱因斯坦本人的分析精神，现在我们还是照那个精神来澄清几点可能会令人迷惑的性质。第一点，也许有人奇怪，为什么转盘的周长不跟尺子一样产生洛伦兹收缩，那样 Tom 测量的周长应该和我们原先看到的一样。不过应该记住，那个转盘在我们的整个测量过程中都是旋转着的；我们从来没有分析过它静止的情形。这样，从我们静止观察者的立场看，我们的测量与 Tom 的测量的唯一区别是，他的尺子发生了洛伦兹收缩。我们测量时，转盘在旋转，我们看到 Tom 测量时，转盘仍然在旋转。由于我们看他的尺子收缩了，所以认为他需要多测几步才能测完一个周长，那当然就比我们测量的长。只有当我们比较转盘在旋转和静止的性质时，转盘周长的洛伦兹收缩才有相对意义，但我们并不需要这种比较。

第二点，虽然我们不需要分析静止的转盘，你可能还是想知道，假如它慢慢停下来，会发生什么事情呢？看来，这时候我们应该考虑由于不同旋转的洛伦兹收缩引起的随速度的改变而改变的周长。但这如何与不变的半径一致呢？这个问题很微妙；回答这个问题的关键一点是，世界上并没有完全的刚体。物体可以伸长或者收缩，从而能够协调我们看到的伸长和收缩。假如不是这样，就会像爱因斯坦说的那样，通过熔铁在旋转运动中冷却形成的转盘将因后来旋转速度的改变而断裂。关于刚性转盘历史的详情，请看 Stachel, "Einstein and the Rigidly Rotation Disk"（爱因斯坦与刚性转盘）

时空弯曲

这就是广义相对论的时空弯曲效应，在引力越强的地方，时空被弯曲

得越厉害，也就是时间变得越慢。地面上的地球引力比在高山上的地球引力要大，所以地面上的时钟会比高山上的时钟走得慢一点。

细心的读者可能会发现这里面有个特别有趣的事情：地球是在自转的，因此离地面越高，自转的线速度就会越大，根据狭义相对论，速度越快，时间越慢，因此似乎高山上的时钟应该比地面上的慢；但是根据广义相对论，高山上的地球引力更小，所以高山上的时钟又应该比地面上的快。那么到底是狭义还是广义相对论的效应更显著一点呢？根据精确的计算，是广义相对论效应更加显著，高山上的时钟走得比地面上的快。这一点在20世纪90年代得到了实验数据的有力支持。同样，天上的卫星也是同时受到狭义和广义相对论效应的影响，结论也是广义相对论效应更显著，因此GPS卫星上的时钟要比地面上的时钟走得更快一点。再来看看坐飞机的人，民航飞机时速一般是800到1000千米，那么你的时间到底是变快了还是变慢了呢？较真儿的读者还会想到，考虑到大气环流的影响，飞机相对地面的速度跟飞机自西向东飞还是自东向西飞有关。是的，没错，根据精确的计算，发现以飞机的时速考虑的话，如果是顺着大气环流方向飞，你的时间会变慢；若是反过来逆着大气环流的方向飞，你的时间就会变快。

1971年，有两位美国科学家，一个叫哈费勒（Hafele），一个叫基廷（Keating），他们带上了全世界精度最高的铯原子钟（这种超精确钟600万年才会误差一秒）先后2次从华盛顿的杜勒斯机场出发，乘上一架民航客机做环球航行，一次自西向东飞，一次自东向西飞，飞行高度9000米左右，飞行时速800千米左右。两次飞行一次花了65小时，一次花了80小时。落地后他们与地面上的铯原子钟进行了比较，实验数据与相对论的计算结果吻合得几乎完美。因此，请你记住结论，以后从中国飞美国就会年轻一点（不考虑从北极走的那条航线），从美国飞中国就会老一点。看来坐飞机能让你变得年轻还真不是假的。不过英国的大物理学家霍金开玩笑说：吃飞机餐对你寿命的损害要远远大过相对论效应（霍金《果壳中的宇宙》）。有读者提出要求说，把广义相对论的时间变化的公式告诉我嘛，我以后就可以自己算了，多好玩。很抱歉，广义相对论的公式都是微分方程（为什么是微分方程，因为引力是一个随着距离不断变化的值，这种不断变化

的量，我们知道，必须要用到强大的、头晕的、天书般的微积分来处理。爱因斯坦当年为了弄出引力场方程，还特别去大学里学习了一年的微积分呢），所以必须把微积分学得很好才会计算，像我这样早就把微积分还给老师的人就跟看天书一样，而且我前面有过保证，不再出现任何公式来刺激读者了。

还记得我们上一章结束的时候，我提出的第一个问题吗？现在有了广义相对论的基础概念，我们就可以来研究一下了，让我们再回顾一下这个问题：

想象一下，爱因斯坦和哈勒各自驾驶着一艘同一型号的宇宙飞船在黑漆漆的太空相遇。在爱因斯坦的眼中，哈勒的飞船开始是一个小亮点，然后越来越大，最后以高速从他身边飞过，一转眼就不见了。爱因斯坦心里想，根据狭义相对论的时间膨胀和空间收缩效应，哈勒的时间过得比我慢，哈勒的飞船相对我的飞船缩小了。但是，让我们跑到哈勒那里，在刚才那起相遇事件中，哈勒看到爱因斯坦的飞船开始是一个小亮点，然后越来越大，最后以高速从他身边飞过，一转眼就不见了。哈勒心里也在想，根据狭义相对论的时间膨胀和空间收缩效应，爱因斯坦的时间过得比我慢，爱因斯坦的飞船相对我的飞船缩小了。亲爱的读者，请问，他们到底谁比谁的时间变慢了？谁比谁的飞船缩小了？

我们先来研究一下谁的时间慢的问题。为了把这个问题研究清楚，我们首先要想一个能比较两个人时间的方法，你同意吗？你心想，这还不简单？两个人一对表，谁快谁慢不是一目了然吗？但我们现在说的是两艘相对飞过，且越飞越远的飞船，不是并排坐着的两个乘客。那不是也很简单吗，一个人打个手机（你突然意识到可能手机没信号）或发个电报给另一个人，告诉他自己是几点了，另一个人看看表也就知道谁快谁慢了，难道不是吗？你的主意很不错，我非常赞同，那就让我们来模拟一下吧。

现在爱因斯坦坐在飞船的驾驶室里面，开始呼叫哈勒：“哈勒哈勒，我是爱因斯坦，当你接下来听到‘嘀’的一声时，表明我这里是12点整，一切正常。请立即回报你的时间。”爱因斯坦认为只要哈勒听到“嘀”声的时候，看看表，就能确定到底是谁的时间更慢了。

可是亲爱的读者们，大家千万不要忘了，信号传递不是瞬时的，信号的极限速度是光速。因此，当爱因斯坦发出“嘀”的一声时，哈勒什么时候听见取决于他们两艘飞船之间的距离。但不管怎么说，我们可以肯定的是哈勒在听到“嘀”声时，爱因斯坦的手表肯定是过了12点了。过了几秒钟，爱因斯坦收到了哈勒的回报：“爱因斯坦，我于12点05秒听见‘嘀’声，当你听到我下面发出的嘀声时，正好是12点15秒。”爱因斯坦听到“嘀”的一声后迅速记下了听到“嘀”声的时间是12点25秒。但是爱因斯坦马上就发现，靠这个时间无法证明哈勒的钟走得是比我的慢还是快，还得扣除信号在中途传递的时间。于是，爱因斯坦迅速拿出计算器，欢快地计算起来，结果他惊讶地发现，信号传播的时间居然超过了五秒钟，也就是说，哈勒是在12点05秒才听到了“嘀”声，哈勒会自然地认为爱因斯坦的表走慢了，但是扣除信号传递的时间后，爱因斯坦仍然认为哈勒的表走得更慢。当哈勒给爱因斯坦回报“嘀”声时，他们俩之间的距离进一步加大，再计算一下信号传播的时间，对比一下爱因斯坦收到“嘀”声的时间，爱因斯坦得出的结论也是哈勒的时间走得比自己的时间慢。但问题是哈勒此时仍然认为爱因斯坦的时间更慢，哪怕他再次收到爱因斯坦报告的时间，但哈勒总是要在爱因斯坦报告的时间之后才能收到。不好意思，我知道你的脑子开始有点发懵了。我只想说一点，在以往我们完全不会考虑的信号传递时间，居然在这个比对时间的游戏中起到了决定性作用。再进一步计算，我们会发现，随着速度的增加，信号传递的时间总是要大于相对论效应拉慢的时间。也就是说，在这个游戏中双方完全处于对称的地位，一方的计算完全可以想象成是另一方的计算，最后如果你经过一番仔细的计算和论证，你会得出一个惊人的结论：尽管看起来像一个悖论，但是无论爱因斯坦和哈勒用什么方法对比时间，他们都会得出同一个结论，那就是对方的时间变慢了。

疯了，你大声叫道，这完全没有道理嘛，我不想看你上面啰啰唆唆的一大堆，我就用一个最简单也最可靠的办法可以不？让他们俩见面，把两个人的表并排放一起，谁快谁慢不就一目了然了吗？

我没意见，这确实是个好办法，但是首先我们必须决定一下是让谁掉头去见另一个。“让哈勒那家伙去见爱因斯坦。”你不耐烦地说。OK，现在

就让哈勒先生减速，掉头，然后加速追上爱因斯坦。亲爱的读者，注意到没有，如果让哈勒去见爱因斯坦，就必须让哈勒减速再加速，于是广义相对论的时间膨胀效应在哈勒那里急速地显现出来。让我们假设他们分开的相对速度是光速的 99.5%，哈勒掉头后仍然以这个相对速度去追赶爱因斯坦，等他终于追上爱因斯坦的时候，哈勒觉得用了六年的时间。六年前的情景历历在目，哈勒激动地跟爱因斯坦问好，但是爱因斯坦却已经老了 60 岁，爱因斯坦要苦苦追寻自己 60 年前的记忆，回想他们相对而过的那一刻。如果你要求爱因斯坦去见哈勒，那么情况也是一模一样的。因此，最后的结论又是如此的让人啼笑皆非：谁要想去见另外一个人，谁就会变得更年轻。换句话说，谁要是掉头去追另一个人，就是在向着对方的未来前进。

理解了这个时间谁慢的问题，再来思考谁的飞船缩得更小的问题也就很容易了。答案就是，只要他们有相对速度，那么从任何一方看来，对方都缩小了，但一旦他们速度一致可以放在一起比较的时候，他们的长度又变成完全一模一样了。

此时，我们关于双胞胎兄弟孰老孰少问题的答案也就水落石出了：你乘着宇宙飞船飞离地球而去，只要你还在匀速飞行，你们兄弟两个都很欣慰，互相都知道对方跟自己相比是越来越年轻了，但是一旦你想返回地球，在返回掉头的那个时刻，时光开始飞逝，你的弟弟对你而言开始迅速地老去。

不看不知道，世界真奇妙！你发出了一声由衷的感叹。我跟你感同身受。



引力的本质

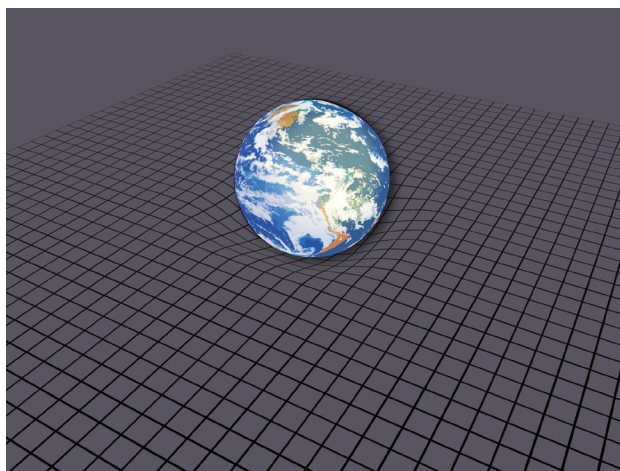
引力，这正是广义相对论所要研究的核心问题，关于引力的话题我们还要深入讲下去，这趟旅程比你能想象的还要出人意料。引力这东西到底是什么？我们看不见它，摸不着它，但它又无所不在。从你有记忆的第一天起，你就能记得自己是怎么走在路上跌倒，又是怎么费力地爬起来；当

你逐渐长大，你丢沙包，打篮球，一头扎进水里游泳，这一切都让你无时无刻不在感受着地球的引力；再长大一点，你开始明白潮起潮落是因为月球的引力影响了海水。有一天，你终于抬头好奇地注视着浩渺的星空，日月星辰，斗转星移，你能看到的宇宙中的一切都被引力这双无形的大手控制着。你是否跟牛顿一样好奇过：这引力到底是什么？牛顿认为，引力就像一根无形的线，牵引着宇宙中的所有物体。从牛顿优美的万有引力公式我们可以看到，引力的大小跟物体的质量成正比，跟距离的平方成反比。我们地球正是被一根从太阳上拉出的无形的线牵引着，绕着太阳做着有规律的圆周运动，就好像我们甩一个链子球一样。按照牛顿的公式，如果太阳突然爆炸了，那么太阳的质量瞬间降为零，引力的大小也会瞬间降为零，就好像这根线突然断掉了，那么地球就应该瞬间被甩出去，这就叫引力的超距作用。也就是说，在爱因斯坦之前，人们一直认为引力的相互作用是瞬间产生的，不管距离有多远，只要质量发生变化，引力的大小也立即跟着发生变化。

爱因斯坦对这个观点产生了严重的怀疑。根据狭义相对论所证明的，没有什么信号或者能量的传递速度能超过光速，如果太阳突然爆炸，地球最快也要在八分钟后才能得知真相，引力的传播绝不能逾越光速这个极限。如果引力真是可以超距作用的话，那么就可以靠有规律地改变质量的大小来向远方传递信息，就跟莫尔斯电码一样，这显然违反了狭义相对论的基本推论。牛顿肯定错了，但是，如果不是牛顿所说的看不见的线，引力又到底是什么呢？为什么它可以隔着遥远的真空而相互作用？

爱因斯坦点燃一根纸烟，陷入深思。引力可以引起光线的弯曲，光为什么会弯曲？因为光要走最短的路径，在一个弯曲的空间里，光的最短路径看起来就像一条曲线，就好像我们在一个皮球上的两点间画一条最短的线，它看上去就是一条曲线。既然光总是走最短的路径，物理规律都是一样的，一个扔出去的小球是不是也应该走最短路径呢？我想应该是的，如果没有地球引力，这个小球就会沿着直线一直飞下去。现在有了地球引力，这个小球走了一个抛物线落在地上，它的运动轨迹是一根曲线，那么，我觉得这根曲线就应该是小球认为的在这个空间中的最短路径，我们

这个空间是被地球引力包裹的空间。所以，对了，就是这样，引力的实质并不是一种力，只不过就是空间弯曲的外在表现而已，没有什么无形的线，只有弯曲空间这个实质。我们的宇宙空间就好像一张张开的大网，地球就压在这张网上，网被压得凹陷了下去。

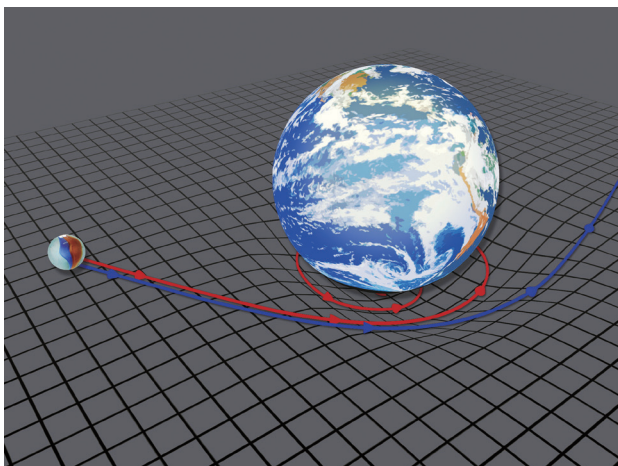


【图5-6】

地球使得周围的空间弯曲

就好像我现在一屁股坐在沙发椅上，我的屁股底下凹陷了一块。这个凹陷的比喻和图示都非常粗糙，只是一种近似，你千万不要认为空间真的就是这么凹下去的。实际上，三维空间是在所有的维度上都弯曲了，以我们人类有限的想象力，是很难把它真正形象化的，更不用说把它在一张二维的纸上画出来。但不管怎样，有这么一个比喻总比没有这个比喻好，虽然结果可能会让这个世界上的少数聪明人更晕菜，但好处是会让大多数普通人突然理解了时空弯曲。

我们在地球边上被压凹陷的网上放一个玻璃球，这个玻璃球当然会滚落到凹陷的最深处，直到和地球碰在一起。如果我们从远处贴着网朝地球打一个玻璃球出去，当玻璃球滚到凹陷的地方时，如果速度不够，就会绕着地球一圈圈地滚，越滚越深，最后和地球撞在一起。但如果玻璃弹的速度足够快，它就会滚到凹陷的地方下沉一下，然后在另一头出来，在凹陷的地方的轨迹看上去就是一根曲线。



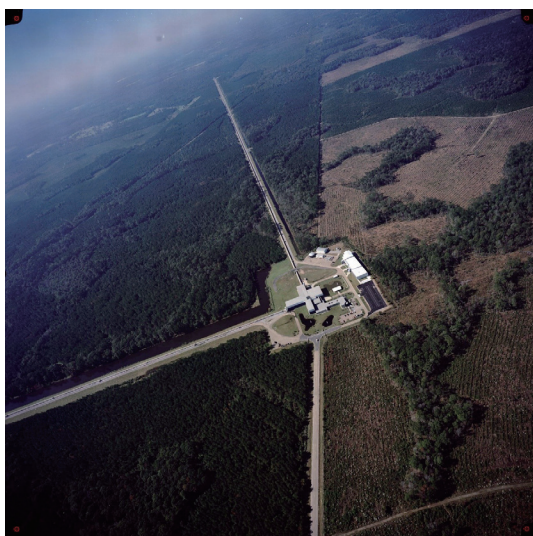
【图5-7】

玻璃球走过的最短路径看上去像一根曲线

我的这些想象和真实世界中的一切都是如此的吻合。流星划过地球的轨迹就是一根曲线，如果流星速度很快，就会划过天际，掠过地球而去。如果大网上的地球质量变化了，就好像这个球在网上抖动了一下，于是下陷的深度就会产生变化，这个深度的变化会从中心迅速地传递出去，但是不可能瞬间抵达边缘，必然会有一个传递的过程，就好像卷曲的空间泛起了一个波澜，这个波澜的传递速度也是光速。这个波澜，可以称之为引力波，引力波的传播速度也是光速。爱因斯坦在1916年和1918年分别发表了两篇论文预言了引力波的存在。

引力波，多么动人的一个词，如果引力波真的存在，它就是宇宙空间中的涟漪，靠着时空的卷曲在宇宙中震荡。不过，关于引力波的理论确是一波三折，到了1936年，也就是爱因斯坦57岁那年，他却开始怀疑自己对引力波的预言是错误的，他还与自己的学生罗森一起写了一篇否定引力波存在的论文，好在正式发表这篇文章之前，爱因斯坦在罗伯逊的启发下，又改变了自己的观点，从否定引力波的存在转变为不确定。自从爱因斯坦预测引力波的存在以来，近100年来，人类一直致力于通过实验捕捉来自宇宙空间的引力波，这个努力延续了将近100年。2011年我写这本书的初稿时，我是这么写的：很遗憾的是，我们至今尚未成功地探测到引力波。

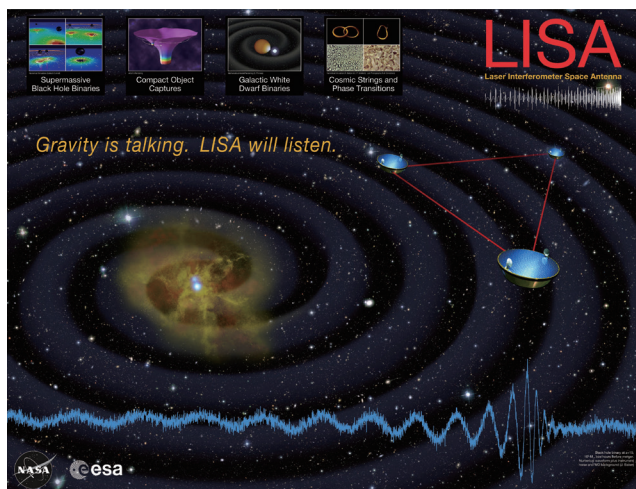
但是我很庆幸的是，我竟然如此幸运，就在写下上面那段文字的5年多后，在2016年2月11日，地球上最大的引力波探测器LIGO正式宣布：引力波被找到了。我居然在有生之年亲眼见证了如此激动人心的物理大发现，我坚信，在今后的物理学年鉴上，2016年将成为一个极为重要的里程碑式的年份。引力波的发现就好像人类又进化出了一双新的眼睛一般，在未来，这双新的眼睛必定会看到前所未有的宇宙奇景。在人类揭开宇宙奥秘的历史中，望远镜的发明、电磁波的发现、引力波的发现就好像三级台阶，让我们一次又一次地站到一个新的高度。如果爱因斯坦还活着，那么2016年的诺贝尔物理学奖将毫无悬念地再一次颁发给他。



【图5-8】

LIGO引力波探测器

另一个好消息是，耗资数百亿美元的人类迄今为止最大的引力波探测器LISA，有望在2018年开始工作，这个探测器将被部署在太空中，由三个绕着太阳运行的航空器组成。



【图5-9】

引力波探测器LISA的效果图

当爱因斯坦有了引力的实质是空间的弯曲这个想法后，他并没有急于写论文向外界公布，因为爱因斯坦深知，如果他的假想不能提出有力的实验证据的话，没有人会相信他。要能被实验证实，就首先要设计一个实验，而且这个实验的结果要能根据自己的理论预测出来，只有实验的观测数据和理论预测的数据完全一致话，这个理论才能站得住脚，被科学界所接受。爱因斯坦知道，真正的挑战来了。第一步，他要能找到计算空间弯曲程度和引力大小的关系公式，然后才可以再谈实验，否则一切都是空中楼阁。为此，爱因斯坦开始潜心学习微积分的知识；同时，为了能够掌握曲面上的几何学知识，他专程去大学深造了一年，深入学习黎曼几何。在平面上的几何学是由欧几里德开创的，就是我们中学都学过的欧式几何，但如果是球面上的几何，就无法用欧式几何来计算了。比如你在篮球上画一个三角形，它的内角和就会大于 180 度；你在篮球上画一个圆，周长和直径比也不再是 π 。研究曲面上的几何问题，就需要用到德国数学家黎曼创立的黎曼几何学知识。就这样，爱因斯坦在打通了狭义相对论的三脉神剑后，继续朝着打通六脉的目标潜心修炼。仅有广义相对论的思想还远远不够，关键是要用数学的语言描述出来才行，因为数学是科学界通行的语言。

终于在1915年，爱因斯坦打通了剩下的三脉，六脉神剑大功告成。此时的爱因斯坦已经掌握了强大的数学工具，他已经能精确地推算出引力对空间造成的弯曲程度。下一步便是实验，且看爱因斯坦是如何设计那个将在4年后震撼全世界的著名实验的。这真是一个梦幻般的实验，他的视觉震撼力绝不亚于大卫·科波菲尔的神奇魔术，爱因斯坦将一战成名。别走开，整点新闻之后马上回来。



水星轨道之谜

下面是今天的整点新闻。

主持人：“各位听众，爱因斯坦先生近日宣布，他解决了困扰世人长达一百多年的水星运行轨道之谜。这一事件引起了天体物理学界的热烈反响。不过，对我们大多数普通人而言，都还不知道什么是水星轨道之谜。我们今天有幸请到了著名的天文学家爱丁顿先生作为嘉宾，请他来给我们简单介绍一下这方面的相关知识。”

爱丁顿：“大家好。自从开普勒的行星运动三定律和牛顿的万有引力定律发现后，人类已经可以精确地计算天体运行的轨道。总的说来，太阳系里面的行星都是绕着太阳运行，运行轨道不是一个标准的圆形，而是一个椭圆。为什么是椭圆呢？因为……”

主持人：“爱丁顿先生，可以跳过这段解释，大多数听众并不需要知道理论细节。”

爱丁顿：“好，简而言之，行星绕太阳运行的轨道不但受到太阳引力的影响，还受到太阳系中所有天体的影响，区别在于影响力有大有小。行星最终的轨道是一个椭圆形，当它运行到离太阳最近的地方，我们称之为近日点，最远的地方则称为远日点。水星是距离太阳最近的一颗行星，几百年来，我们对水星积累了大量的观测数据。早在一百多年前，天文学家就发现，水星的近日点位置与理论计算值有轻微差异，每个水星年的近日点居然都不在同一个位置。刚开始，人

们以为是观测精度导致的，但是随着观测手段越来越先进，观测精度逐步提高，反而越来越明确了这个差异的存在，这一百多年来的观测结果是水星的近日点已经运动了43角秒（1角秒=1/3600度）。这就很让天文学家感到费解，于是人们就推测在水星附近还有一颗我们尚未发现的行星，这颗未知行星的引力影响了水星的运行轨道。但是，这一百多年来，我们始终未找到这颗神秘的未知行星。事实上我早就不相信有这么一颗X行星的存在了，水星附近的空间对我来说早就像我家的后花园一样，一草一木尽收眼底。但如果不是因为未知行星的影响，又是什么影响了水星的轨道呢？这就是水星轨道之谜，我们学界一般称之为‘水星的近日点进动问题’。”

主持人：“谢谢爱丁顿先生。那么最近爱因斯坦宣布他解决了这个问题，又是怎么回事呢？”

爱丁顿：“爱因斯坦先生认为并没有任何东西影响了水星的轨道，原因很简单，我们之前的理论不够精确，用粗糙的理论自然只能计算出粗糙的结果。”

主持人：“原来是这样。那么爱因斯坦先生的理论又是什么呢？”

爱丁顿：“爱因斯坦先生在10年前发表了狭义相对论，最近又发表了他的广义相对论。说实在的，他的理论看起来非常大胆，也非常挑战人们的想象力。爱因斯坦在10年前说运动会使时间变慢，这已经够疯狂的了；最近他又说引力会使时间和空间弯曲。太阳的引力很强，所以离太阳越近，时空就会被弯曲得越厉害。水星离太阳很近，尤其是在近日点的时候，因此这个时空弯曲效应产生的后果，已经达到了能够被观测到的程度。根据他那晦涩难懂的方程式，由他的新理论计算出来的水星近日点的位置，和观测数据吻合得非常完美。”

主持人：“坦率地说，我无法理解什么是时空弯曲，我相信大多数听众也跟我一样无法理解，但我们现在知道爱因斯坦发明了一种新理论，修正了开普勒和牛顿的理论，可以解释水星的进动问题，我这样理解对吗？”

爱丁顿：“完全正确。”

主持人：“那这么说，爱因斯坦的新理论是正确的？”

爱丁顿：“我相信这个理论，但是也有不少反对的声音。”

主持人：“现在有一个听众打电话进来，让我们来听听这位听众的高见。”

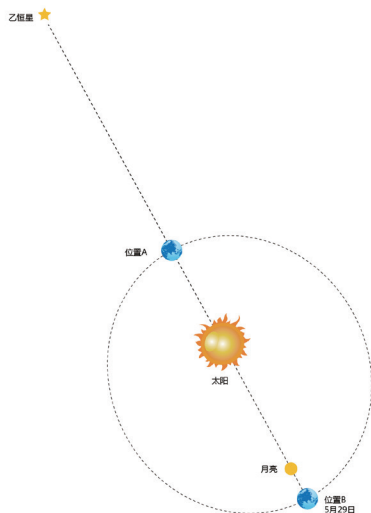
听众：“我认为，虽然爱因斯坦的方程式计算出了水星的进动现象，但是，这不能证明爱因斯坦的理论就是对的，这是典型的事后诸葛亮行为，先有了大量的观测数据，然后爱因斯坦根据这些数据凑出了一个公式而已。时空弯曲之类的鬼话谁能相信呢？请问主持人，你见过一束弯曲的光线吗？”

主持人：“我们谁也没有见过，谢谢这位听众的参与。我们今天有幸，把爱因斯坦先生也请到了我们的线上。我们不妨来听听爱因斯坦先生他自己是怎么说的吧。喂，你好，是爱因斯坦先生吗？对，您可以讲了。”

星光实验

爱因斯坦：“谢谢。我给大家带来的这个实验叫作星光实验，有些魔术师可以把飞机瞬间挪动位置，而我，要把星星挪动位置，并且，这不是魔术，是真实的世界。

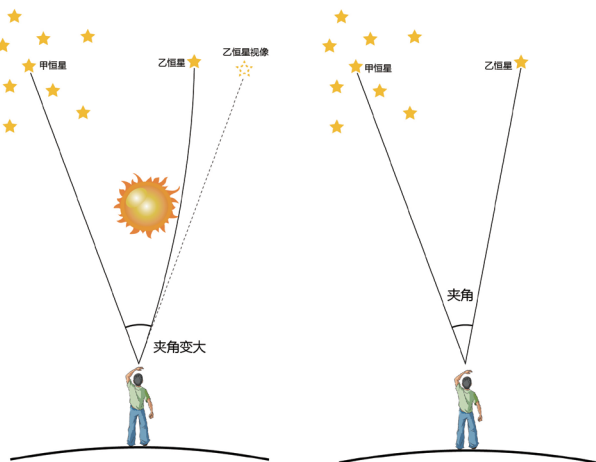
“首先我们找一个晴朗的夜晚，给某一块星空拍张照片。我们会看到很多星星彼此靠得很近，我们可以把他们彼此之间的距离测量出来。我们都知道恒星之所以叫恒星，就是因为它在天上的位置相对于地球是不动的，也就是说每年地球运行到同一相对位置时，这幅星空的照片应该是完全一致的，星星之间的距离也应该是完全相同的。地球绕着太阳做着圆周运动，那么每年地球都会有两次机会和恒星的相对位置保持一致，也就是在图5-10的位置 *A* 和位置 *B* 时。由于恒星离我们非常非常遥远，所以在位置 *A* 和位置 *B* 拍出来的同一块星空也是完全相同的，至少以人类目前的观测精度，是无法发现差异的。



【图5-10】

每年地球在位置A和位置B时，其相对于恒星的位置是完全相同的

“但是，请大家注意，下面是我要说的重点：当地球在位置B时，与在A位置相比，有一个巨大的不同，那就是太阳挡在了中间。根据我的广义相对论，太阳的引力是如此之大，以至于星光经过太阳时会发生弯曲，从而使我们在B位置观察到的那些离太阳比较近的恒星的视位置发生可以观测到的改变。那么如何检验恒星的位置发生了改变呢？我们只要测量离太阳很近的恒星与其他离太阳很远的恒星之间的距离即可。拿在位置B处和在位置A处的星空照片相比较，我们会发现，恒星之间的距离发生了变化，这就好像魔术师凭空把星星挪了个地方一样，请看图5-11。



【图5-11】

太阳的引力使得星光偏转，恒星的视位置发生了位移

“我们可以发现，离太阳近的乙恒星的视位置会朝着远离太阳的方向偏这么一点点。这一点点是多少呢？根据我的计算，这一点点是1.7角秒。我知道你们心中的疑惑，当地球处在B位置的时候是根本无法看到恒星的，因为是白天，谁也无法在白天看到星星。可是，大家千万别忘了，有一个特殊的时刻可以在白天看到星星，那就是当日全食发生的时刻。我希望天文学家们别闲着，再下次也就是1919年日全食来临的时候，验证我这个伟大的预言。谢谢主持人。”

主持人：“谢谢，那么本期节目就到这里。我们期待着那一天的到来。”

爱丁顿：“我都有点儿等不及了。”

（爱因斯坦在《相对论浅说》中的原文是这样的：尽管光线穿过引力场时其曲率极其微小，但是当星光掠过太阳时，其曲率的估计值达到1.7角秒，这应该以下述的方式来证明：从地球上观察，某些恒星与地球相隔并不遥远，因此它们在日全食时能够被加以观测，当日全食时，这些恒星在

天空中的视位置与非日全食时相比，应该偏离太阳。这一个极其重要的推断，它的正确与否，希望天文学家能够早日予以解决。）

爱因斯坦提出的这个星光实验是具有非凡意义的。为什么爱因斯坦自1905年发表狭义相对论直到1915年广义相对论的发表，10年来，这些理论在科学界一直受不到广泛的认同和重视呢？关键的原因就在于，之前提出的所有推论都无法用实验来验证。无论是时间膨胀也好还是空间收缩也罢，以当时的实验精度来讲，都是不可能测量出来的。但是这个星光实验就不同了，这是当时的观测精度能够达到的，是一个可以真实去做的实验，而爱因斯坦对这个实验的预测，在那个时代绝对可以用“疯狂”两个字来形容，毕竟“时空弯曲”这四个字对于大多数常人来讲，既无法想象也难以理解。现在，居然可以让人们真实地看见时空弯曲所产生的效应，这实在是有一种梦幻般的感觉。

爱因斯坦的“皇榜”已发，且看哪位英雄来揭榜。

爱丁顿（Eddington, 1882-1944），英国的大天文学家，只比爱因斯坦小三岁，爱因斯坦的第一个粉丝。他相信相对论，决定去完成爱因斯坦交给天文学家的这个使命，验证星光实验的预测到底准不准确。最近一次日全食将在1919年到来，当时，第一次世界大战还没有完全结束，世界各地都还有未尽的战火，但是爱丁顿这些科学家们已经等不及了，毅然决定冒着一战的炮火，奔赴日食发生地去进行观测。特别有趣的是，英国和德国是一战中的敌对国，爱丁顿是英国人，爱因斯坦可以被认为是德国人（他拥有德国国籍，出生并长期生活在德国），于是我们看到一个英国人为了证明德国人的理论，不惜风尘仆仆、远征万里，这为战后两国修好做出了巨大贡献。为了使观测的误差降到最低，同时也为了取得更多的公信力，爱丁顿还以他的号召力邀请到了很多出名的天文学家，比如柯庭汉、克罗姆林、戴维森等。他们分成了两个远征观测队，一个队远赴巴西的索布拉尔，另一个队由爱丁顿亲自率领，远赴西非的普林西比岛。1919年5月29日，日全食如约而至，虽然当时天公不作美，两支远征队都遇到了阴天，但是在最关键时刻还是拍到了至少八颗恒星的图片。他们把照片带回英国后，和半年前拍摄的照片仔细比较，经过长达五个月的数据分析，同时邀请了全世界的天文学家齐聚英国皇

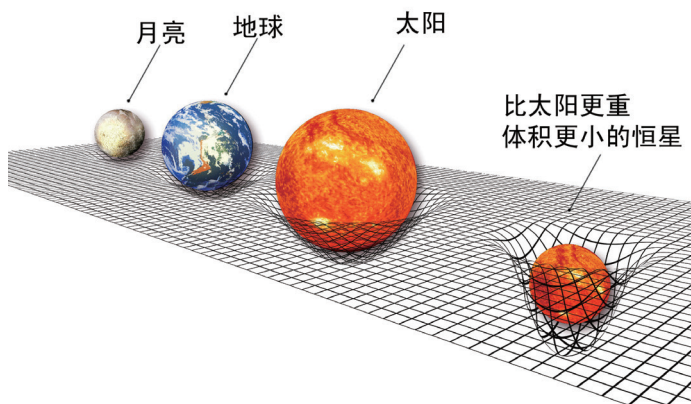
家研究所一起分析与计算，最后，他们宣布，爱因斯坦的理论取得了完美的证实，观测值与理论计算值吻合得非常好！“这是一次彻底而满意的结果。”爱因斯坦自己说。

星光实验的成功，让爱因斯坦瞬间走红全世界，一战成名。全世界的记者蜂拥而至，镁光灯乱闪，全球的各大报纸争相报道。英国的《泰晤士报》刊出头版大标题“科学革命——宇宙新理论——牛顿理论大崩溃”。最可爱的要属美国人了，《纽约时报》不知道出于什么原因，派出了一个专门采访高尔夫球赛的记者去采访爱因斯坦，结果这个“科盲”记者几乎把所有的知识都搞错了，并且错得离谱，最后文章居然还发表了，据说这是美国人接受相对论比别的国家较晚的原因之一。

没见过这么黑的洞

宇宙的神秘面纱已经被我们轻轻掀起了一小角，人类就像一个好奇的小孩小心翼翼地往里面瞄了一眼，顿时从头震撼到脚。但是各位亲爱的读者，你仅仅是看到了真相的冰山一角，后面的风景才将真正挑战你的思维极限。让我们顺着时空弯曲这条道路继续往下，看看还有什么惊人的推论等在前方。

通过水星进动现象和星光实验，我想我大概已经让你相信引力确实可以使空间弯曲了。那么让我们顺着这根线索，继续深入下去。什么东西产生引力？对，是质量。质量越大，引力越强；引力越强，空间弯曲得越厉害。请把我们的宇宙空间想象成一张细密的网，任何有质量的物体就像一个球放在这张网上，这个球质量越大，体积越小，则在这张网上下陷得就越深。刚开始只是像一个小小的凹陷坑，但是随着下陷的深度越来越大，就会越来越像一个空间中的“洞”。

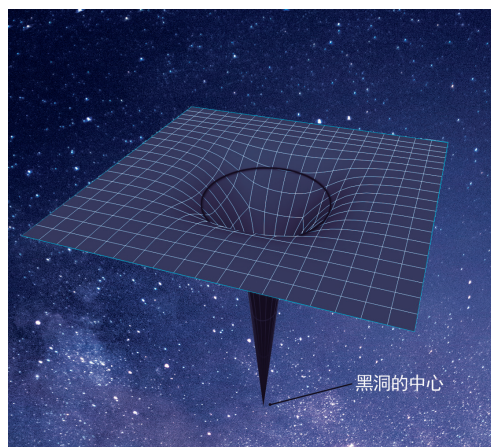


【图5-12】

质量越大的物体在空间上形成的洞越深

任何掉进这个洞里面的东西想要出来，就好像井下的青蛙想要跳出来，必须达到一个能逃出来的最低速度才行，我们称这个速度为“逃逸速度”。地球也会在宇宙空间中形成一个“洞”，不过地球质量很小，这个“洞”充其量也就像是沙滩上的一个屁股印。那么要从地球上逃逸出去的速度是多少呢？这个在牛顿时代人类就会计算了（当时的人类并不知道引力是空间弯曲这个概念，当然更不可能有什么“洞”的概念，但是从研究运动和力的关系出发，同样能计算出逃逸速度），是11.2千米/秒，这也叫作第二宇宙速度。这个速度大约是民航客机速度的40倍，所以要发射卫星到太空去用飞机是不行的，非得用火箭才行。逃逸速度的值取决于天体的质量和半径这两个参数，用个形象的比喻，就是同样重量的木球和铁球，因为铁球的体积要小得多，所以造成的洞就会深得多，因此要从这个洞中逃出来的速度也会大得多。大家想想，宇宙中跑得最快的东西是什么？上一章已经说过了，是光，没有什么东西比光的速度还快。那么有没有一种可能，这个洞是如此之深，深到令它的逃逸速度比光速还要大，那就意味着连光都休想从洞里面逃出来，更别提其他任何东西了。如果真有这样的洞存在，那么这个洞可真够黑的，永远是只进不出。德国天体物理学家史瓦西（Schwarzschild，1873-1916）首先开始思考这个问题，他也是爱因斯坦的粉丝之一。他仔细研究了广义相对论，通过广义相对论的引力场方程算出了名垂千古的“史瓦西半径”（史瓦西自

已当然不会给这个半径取名叫“史瓦西半径”，这里先提前借用一下，如果我是史瓦西，宁可不要用我的名字命名，看到后面就知道了）。他的意思是说，任何天体都存在这样的—个半径临界值，如果小于这个半径，那么它在宇宙空间这张网上抠出的这个洞就会成为—个名副其实的“黑洞”（这个词的正式出现—直要到1967年，笔者为了表述方便，提前借用，对严谨的学者们说声抱歉），这个半径的大小取决于天体的质量。史瓦西计算出来，说如果太阳的半径缩小到三千米的话，那么太阳就会成为—个黑洞，什么光也发不出来了。他还说如果把地球压缩到半径只有九毫米的话，那么地球也可以变成—个黑洞。任何物体，只要有质量，压缩到史瓦西半径以内，都会成为—个黑洞。史瓦西半径之内也被形象地称之为“视界”之内，因为人类的视线以这个半径为临界点，—旦越过这个半径，就是“全黑”的。史瓦西半径—公布出来，—立即引起了包括爱因斯坦在内的很多天文学家和物理学家的兴趣，吸引了—大批科学家去深入研究这个恐怖的黑洞。只是我们可怜的史瓦西先生在算出史瓦西半径的当年就死于意外，年仅43岁，真是科学界的大—损失，为了纪念他，就把这个天体要成为黑洞的临界半径称作“史瓦西半径”。



【图5-13】

黑洞原理

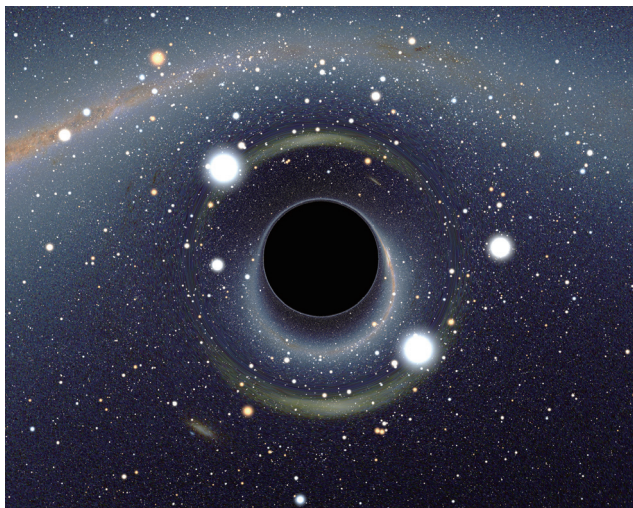
黑洞在—开始仅仅是作为—个方程的解而存在，也就是说黑洞仅仅是一个数学概念，宇宙中到底有没有这样恐怖的洞存在，谁也不知道。因为

既然是黑洞嘛，就是完全不发光的，那么天文学家当然也就认为黑洞是永远无法观测到的。不过后来随着研究的深入，人们渐渐发现其实黑洞也是能观测到的，并且有很多方法。比如，黑洞虽然是全黑的，但是它的质量和引力是实实在在的，引力产生的空间弯曲效应可以通过观测它旁边的星光的扭曲来验证，黑洞就好像一个透镜一样，在宇宙中运动的时候，边上的星光都会被扭曲变形。再比如，黑洞如果与一个恒星相遇，则这颗倒霉的恒星会被黑洞一点点地吞噬掉，那个景象就好像一只猫在玩一个毛线球，把毛线一点点地抽出来一样。再到后来，科学家又通过研究发现，由于吸积盘效应，黑洞其实并不是全黑的，黑洞的两极（视界之外）会喷发出巨大的 X 射线，但并不是从黑洞里面喷出来的。虽然这些辐射流不是可见光，但是用射电望远镜可以检测到它们。所有上面说到的这些方法，都已经在最近的几十年，被天文望远镜所证实。为了便于大家直观理解，我们来看一些经过艺术加工和夸张后的黑洞图片：



【图5-14】

电影《星际穿越》中的黑洞，计算机逼真模拟



【图5-15】
黑洞的引力透镜效应



【图5-16】
喷出巨大辐射流的黑洞

黑洞是广义相对论最重要的推论之一，一开始也是引起了巨大的争议，而且由于刚开始大家普遍认为的不可观测性，所以质疑其存在的人就更多了（还记得我们在第一章说过的奥卡姆剃刀原理吗，如果一样东西永远无法被检测到，那就跟没有一样）。但是时至今日，已经没有任何人怀疑黑洞的真实存在性了。黑洞已经成为广义相对论和天文学研究的标准

对象。

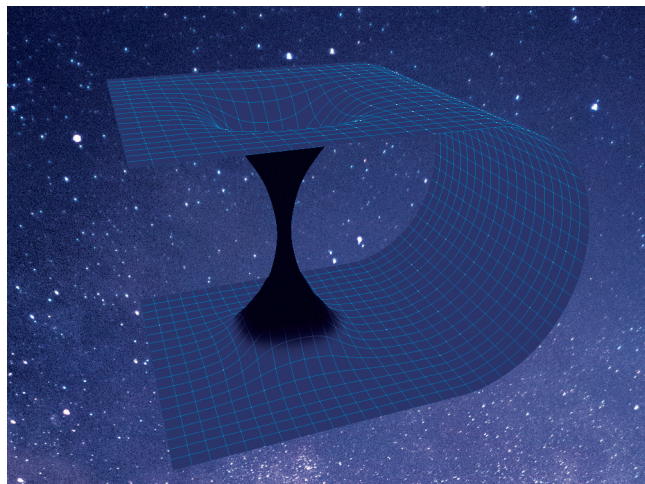
黑洞还有个特别有趣的性质，就是它的质量大到把时间和空间都扭曲成了一个洞。空间被弄成一个洞还好理解，不就是进去的东西出不来嘛；那时间被扭曲成一个洞，你能想象是怎么回事吗？在黑洞里面，时间停止了，准确地说，时间不存在了，时空在这个地方被打了一个死结（别再追问了，我也想象不出是啥样子），人类对宇宙的认识止步于黑洞的“视界”。假设有一个倒霉的宇航员不幸掉入一个黑洞，他在掉入黑洞的一刹那，从外面的观察来看，这个倒霉宇航员的时间停止了，他的动作也停止了，他就像照片定格一样被永远定格在了黑洞的边缘，宇航员的亲人们永远也看不到他掉进去，宇航员的子孙后代世世代代都可以看到这幅定格的恐怖画面。但是，如果你是那个倒霉的宇航员，时间对你自己来说仍然是流逝的，你仍然会感到自己掉了进去。至于到底掉进去以后会发生什么，谁也不知道。如果你去问霍金，他会这么回答你：“所谓黑洞，就是一切永远无法了解的事件真相的集合。”你明白了吗？他看似回答了你的问题，其实跟我的回答是等价的。这个事情是不是很难以想象：外人直到宇宙末日那天，都认为倒霉的宇航员永远处于将掉入未掉入的状态，而宇航员自己则认为已经掉进去了。

我们的思维不要停，继续往下深入，越往下越神奇。让我带着你继续沿着上面的线索往下想，千万别走开，更神奇的事情马上就要发生。



从黑洞到虫洞

黑洞就是宇宙这张大网中时间和空间形成的一个洞（图5-13），越看越像一个漏斗。你有没有想过，如果宇宙中有两个这样的漏斗，刚好漏斗嘴对漏斗嘴接上了（图5-17），会发生什么情况？



【图5-17】
虫洞原理

爱因斯坦和另外一个叫罗森的美国物理学家一起研究发现，广义相对论的方程中有一个解可以从理论上允许这种情况发生，物理圈的人把它称为“爱因斯坦—罗森桥”，说这个连接部位就像一座桥一样，连通了宇宙空间中两个本来相隔得非常非常遥远的区域。但很快人们就觉得，这情景还是更像一个洞，只不过这个洞就好像一只虫子咬穿了一个苹果一样。这个比喻更形象，更深入人心，因此，大多数情况下这个爱因斯坦—罗森桥都被叫作“虫洞”。

虫洞这个洞太神奇了，不但可以连通相隔遥远的宇宙空间，让你能突然从一个地方跨越几百光年出现在另一个地方，而且，它还能连通时间，让你从一个时间突然出现在另外一个时间，不光是从现在到未来，也有可能是从现在到过去。虫洞成了现在关于宇宙旅行和时间旅行的科幻小说的标准化理论，也成了地球上发生的无数离奇古怪的失踪案件和穿越事件的元凶。反正一切不可思议的事情都能用虫洞来解释，简直“无所不能”。

但是让我们从理性的角度再看一下这个虫洞，我们会发现，如果桥的两头都是两个黑洞的话，那有什么意义呢？你从洞的这头掉进去，你也无法从洞的那头出来，无非就是从宇宙的一个监狱跳跃到了另外一个监狱而

已。除非，广义相对论的另外一个叫“白洞”的推论也能存在。所谓白洞就是刚好跟黑洞性质相反的一个洞，这个洞不停地把物质以辐射的方式“吐”出来（迄今为止，尚未有任何直接或者间接的观测证据出现）。如果虫洞的一头是个黑洞，另一头是个白洞，那么你就有可能从黑洞这头掉进去，从白洞那头被吐出来，不过即便被吐出来了，你也变成了辐射的形式，也就是被还原成了基本粒子。看来，不论虫洞的两头是黑洞还是白洞，指望它来做真正的时间和空间旅行，似乎死亡率都达到100%。真是不够给力！

为了让虫洞这个纯数学的产物能够更加富于浪漫色彩，更加便于科幻小说作家创作，最近十多年来有了无数种关于虫洞存在，并允许我们活着通过的可能性的理论问世，那真叫一个五花八门，每个理论都被冠以很牛的名称，还出现了很多超级玄的名词，不过这些名词我大多数都不认识。说实话，我是没有辨别真伪的能力的，因为在这些理论被实验证实或做出预测之前，都只能被认为是“假说”。但不管怎样，人类最可贵的精神就在于无限的想象力，没有这些想象力，我们是不可能从茹毛饮血的古人类进化成为能登上月球的万物之灵的，从这个角度来说，我们都应该感谢科学家、幻想家甚至妄想家。

压轴大戏

讲到这里，本章已经接近尾声，让我们来梳理一下前面看过的那些风景。首先，爱因斯坦从对狭义相对性原理的不满意出发，把狭义相对性原理推广到了等效原理加广义相对性原理；然后从这两个原理出发，推导出了引力使得时空弯曲，继而又推导出了黑洞；再从黑洞想到了虫洞，于是时空旅行有了理论可能性。这么一路走来，风景越来越奇特，但都十分具有说服力。如果我们不是这么一路走过来，而是直接从光速不变跳转到了虫洞这个神奇的概念，你一定会嘲笑我是不是精神出了问题。科学的神奇就在于一步步往前走的时候，觉得每一步都是合理的，一段时间以后再回

头一看，发现连自己都快不相信脚下的这片神奇土地了。难怪爱因斯坦会讲出下面这句名言：

“宇宙最不可理解之处在于它竟然是可解的。”

本章就到这里……

等等，等等，你突然大声叫起来：作者，你忘记了一件重要的事情。

什么事？

压轴大戏啊，压轴大戏还没上演呢，前面两章都有压轴大戏的，这章怎么可以没有？

哈哈，就等你们这句话呢，压轴大戏自然是早就准备好了，而且这部压轴大戏是绝对可以堪称压轴的，我们要让整个宇宙成为我们的演员，我们要对宇宙本身的生死做出终极思考。好戏这就上演！

爱因斯坦在打通六脉神剑之后，很快就把目光投向了整个宇宙，他把整个宇宙当作一个整体来研究。在深入地研究广义相对论的引力场方程后，他得出了一个让自己无法相信的结论：宇宙不可能是稳定的。也就是说，如果手头的方程式是正确的话，那么我们生存的这个宇宙要么是在不断膨胀的，要么就是在不断收缩的，总之方程的所有解都不可能得到一个稳态的宇宙模型。爱因斯坦被自己亲手得出的这个计算结果震惊了，晚上连觉都睡不着。在爱因斯坦那个年代，人类对天文学的认识还仅仅停留在银河系内，当时的天文学家认为银河系就是整个宇宙，宇宙的尺度大约是十万光年的量级。爱因斯坦毕竟不是天文学家，他对宇宙的认识也局限于当时天文学的普遍认识。

爱因斯坦一边看着手中的方程式，一边抬头仰望苍穹。看着满天繁星，他知道头顶上的这些星星在那里已经存在了亿万年，在有历史记录以来，星空都是同样的景象，北斗七星的勺子在大熊座上指引了人类上百年的航海史，就像一个忠于职守的灯塔老人，从来没有出过一次差错。这个深邃而美丽的宇宙始终给人一种沉着、稳定、永恒的精神力量。现在，在我手中的这个方程式里，宇宙不再是那个忠于职守的灯塔老人了，宇宙居然是不稳定的，它要么收缩要么膨胀，这怎么可能呢？

爱因斯坦怎么也无法接受这种结论，宇宙的博大和深邃的宁静深深地震撼着他的内心。于是，爱因斯坦拿起笔，在方程式中增加了一个“常数”。有了这个人为添加进去的常数，宇宙就是一个稳态的宇宙了，既不会膨胀也不会收缩。爱因斯坦长舒了一口气，合上本子，终于可以美美地睡一觉，做一个好梦了。

可惜，爱因斯坦的美梦没过几年就被一个叫作哈勃（Hubble，1889—1953）的美国年轻天文学家打破了。哈勃首先发现，在仙女座附近的一片淡得像云一样的薄雾，根本不是之前普遍认为的银河系中的尘埃云，在最新的大型天文望远镜里，这层淡淡的薄雾居然被发现是由数以亿计的恒星组成的，这就是第一个被人类发现的银河系外的星系——仙女座大星系，距离我们有几十万光年之遥（今测值为250万光年）。很快，一个又一个星系被发现，而且一个比一个遥远，我们的宇宙比我们之前认为的显然要大得多。然而哈勃接下来的进一步发现才是重点，他接着发现，几乎所有的星系都在远离我们而去，宇宙中几乎所有的星系和我们之间的距离都在不断增大（仙女座大星系是个例外），而且距离越远的星系跑得越快。这一切只能有一个解释，那就是宇宙就像一个正在膨胀中的气球，每个星系都是气球表面的一个点，当气球膨胀的时候，每个点之间的距离都会增大。哈勃用他确定无疑的观测数据向爱因斯坦展示了这么一个事实：宇宙正在膨胀。

“当啷”一声，当爱因斯坦读到哈勃的论文时，手中的酒杯落地摔得粉碎。天哪，宇宙竟然真的不是稳态的，而我，居然天真地在我的方程式中画蛇添足地加上了一个常数，这真是一个不可饶恕的错误。但恰恰是这个错误，反过来证明了广义相对论的伟大，它对整个宇宙模型的预言居然如此之精准，而且这么快就被天文观测数据所证实。

既然宇宙是在膨胀中的，那么就是说，明天的宇宙会比今天的大，换句话说，今天的宇宙比昨天的大，昨天的宇宙比前天的大。如此一路想下去，就跟没有什么东西能阻止宇宙的膨胀一样，也没有什么东西能阻止前一天的宇宙小于后一天的宇宙。既然是这样，那么是不是宇宙有一个诞生

的时刻，是从很小的一个点开始，然后突然就爆炸出来的呢？这个疯狂的宇宙大爆炸想法首先被一个叫作勒梅特（Lemaitre，1894-1966）的比利时学者公布出来，但名不见经传的勒梅特的声音并没有引起世人太多的注意。直到几十年后，有两个美国人（彭齐亚斯和威尔逊）在新泽西州滋滋作响的天线上，无意中发现了宇宙微波背景辐射，宇宙大爆炸理论才从一个疯狂的想法变成了一个有实验数据支撑的硬理论。这里面又有一个很长、很精彩、很有趣的故事，但这毕竟跟本书的主题关系不大，如果你有兴趣，可以阅读笔者另一本拙作《星空的琴弦——天文学史话》。

虽然按照伽莫夫的说法，爱因斯坦认为宇宙学常数是他在一生中的最大错误，然而富有戏剧性的是，在爱因斯坦去世多年后的最近几年，最新的理论却又让这个宇宙常数死而复生了。爱因斯坦原本人为加上的这个常数居然像是冥冥之中的谶言，在今日的宇宙学研究中起着举足轻重的作用。但这个宇宙学常数的复活有着复杂的背景和故事，并不是说广义相对论有什么错误。

宇宙竟然有一个起点，这个起点用科学家的话说叫作“奇点”（Singularity Point 奇异点）。宇宙诞生于一场疯狂的大爆炸，这个大爆炸的强度之大超出了人类的任何想象，大爆炸完了之后就是无休止的膨胀。请注意，我这么描述宇宙你们是否听出来了？我有一个潜台词，那就是早期的宇宙是有明确大小的。

一旦说到宇宙是有大小的，1000个人里面999个人会问一句话：“那么，你说宇宙的外面又是什么，你说宇宙诞生于一个奇点，那么奇点的外面又是什么呢？”我知道各位亲爱的读者此时心中正在发出同样的疑问。今天，我一定要帮你把这个问题弄清楚，以后再遇到女生们向你问这个问题，你就能跟她们解释得清清楚楚了，要知道，能把这个问题解释清楚可是一种高深的体现，有助于你提升在她们心目中的魅力指数。经常有人打这样的比方，说我们就像一只在篮球上爬啊爬的蚂蚁，永远爬不到尽头，但是篮球却是有限的，这么回答会让女生们稍稍感觉好一点点，但也就是那么一点点而已，因为她们还是会追问：“那么篮球外面又是什么呢？”

现在，让我们做一个疯狂的假想：如果我们回到 137 亿年前，那时候的宇宙只有一个牢房那么大，20 平方米左右，那么，当你身处这个宇宙中，你会看到什么？你会看到，如果朝前看，自己的背影就在几米开外的前方；朝后看，另一个自己就在几米开外的后方，与你做着同样的动作，再朝上朝下看，都能看到一样的自己。当你朝前面跑时，前方的自己也开始跑，只用了几步你又跑到了自己出发的位置，不管你朝任何一个方向飞去，都会回到原点，这是一个无限循环的三维空间，你根本不可能“出去”，因为根本没有“外面”，整个宇宙就在你眼中，这就是“有限无界”的宇宙观。听上去有点儿恐怖，这样的牢房是真正无法越狱的完美牢房。现在，请把这样一个有限无界的宇宙不断地在你的脑海中缩小再缩小，一直缩小到只有一个原子大小，注意，没有“外面”，也没有黑暗。空间和时间都禁锢在这个“宇宙”中，然后，上帝说“要有光”，于是，这个宇宙开始急速膨胀，这就是“宇宙大爆炸”理论。

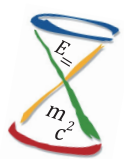
请注意，我刚才的那个牢房的比喻是针对宇宙刚刚诞生的时刻。那么，我们今天的宇宙在经历了 137 亿年的膨胀后是不是依然是一个巨大的恐怖牢房呢？如果我们朝一个方向一直飞一直飞，最后会不会回到原地呢？虽然还没有定论，但是越来越多的宇宙学家认为，我们今天的宇宙是一个无限大的宇宙，我们永远也无法飞回到原地，而且得到了理论和观测的有力支持。

从光速不变这个起点出发，一路走来，最后，我们竟然看到了恢宏的宇宙大爆炸，又看到了一个神奇的有限无界的空间。但请相信我，还有更神奇的事情等在后面。从第六章开始，我将带你去领略难以想象的神奇。在本章的结尾，请允许我用爱因斯坦式的口吻，写下这么一句话作为本章的结束语：

宇宙最神奇之处就在于，它比我们所能想象的还要神奇！

第六章
CHAPTER SIX

时空那点事



自从相对论诞生以后，我们看到，时间和空间再也不是两个毫无关系的概念了，时间和空间就像是焦不离孟、孟不离焦的一对结义兄弟，又像是难分难解地纠缠在一起的 DNA 双螺旋结构，我们再也不能只谈空间而不谈时间，只谈时间而不谈空间。爱因斯坦指出，时间和空间不仅不能独立于宇宙，而且不能互相独立，引力不可能只使得空间弯曲而时间却安然无恙。

从此我们多了一个新的名词——时空。请注意，千万不要把“时空”等价于“时间和空间”，时空就是时空，它是一个整体，就好像你不能把“牛奶”看成是“牛”和“奶”的简单相加一样。被我这么一解释，我知道你开始对“时空”这个词感到疑惑了，你能想象出时间，也能想象出空间，但是你却无法想象出时空的模样。

请跟随我来，让我来帮你在头脑中建立“时空”这个诞生于20世纪的伟大名词，它是人类对宇宙认识的一次大飞跃，我将再次带你踏上一次惊奇之旅。



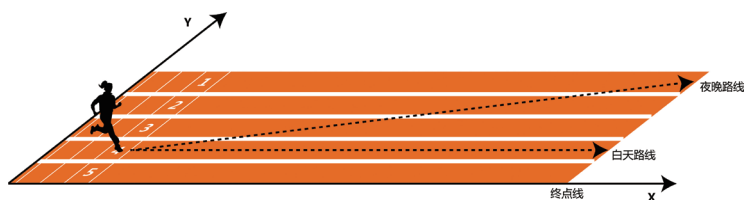
时空中的运动

我们的故事要从一次跑步开始讲起，这个故事无所谓年份，无所谓地点，无所谓具体人物。

为了叙述的方便，就让我们一起去学校的操场跑步吧。现在，让我来计时，你来跑步。我们的规则是跑两次，白天一次，晚上一次。你先克制一下你的疑惑，让我们跑完再说。白天这次你跑了 16.8 秒，离达标还差一点。为了晚上取得更好的成绩，你努力锻炼了一下，试图恢复一些当年的

勇猛。晚上又跑了一次，这次你自我感觉很不错，觉得应该会比白天那次跑得更好一点，可是我把成绩一告诉你，你却吃了一惊，怎么反而只有17.2秒了？

下面这幅示意图可以解释为什么你晚上状态更好，成绩却更差了。原因很简单，晚上视线太差，黑漆漆的你跑了一条斜线都不自知。



【图7-1】

跑步的方向不一样导致成绩不同

看了这张图，你恍然大悟了，原来你小子让我在晚上跑步是别有用心的，故意就是要让我把方向跑偏。你不用生气，为了科学，牺牲这么点儿自尊不要紧。现在我来问你：“假设你两次跑步的速度是一样的，为什么晚上的用时比白天更长了呢？”

你白了我一眼说：“你不是明知故问嘛，晚上我方向跑偏，跑的路程更长了，所以用时就更多了。”

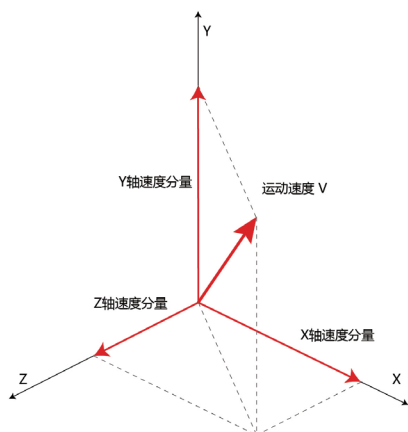
我说：“回答正确，用距离来解释这个现象是我们最直观、最朴素的想法。但是你知不知道，还有另外一种更抽象的解释，在这个解释中，我们不需要距离这个概念。”

你说：“哦？什么解释，你说说看。”

我说：“你刚才自己也提到，运动是有方向的，你的运动速度我们可以分解为 x 轴方向的速度和 y 轴方向的速度合成速度。假设你跑步的速度是 v ，白天跑步的时候，你在 y 轴方向的速度是 $v_y = 0$ ，而在 x 轴方向的速度 $v_x = v$ 。但是到了晚上，你在 y 轴方向的速度大于零，在合成速度不变的情况下，你在 x 轴方向上的速度就必然小于 v 了。这就好像在 y 轴方向的速度分走了一部分你的跑步速度，你在 x 轴方向上运动的速度变慢了，所以你晚上的成绩不如白天。”

你若有所思地点点头说：“明白了，速度的方向看来很关键。”

千万别小看这个看起来更抽象一点的解释，这是我们对运动本质认识上的一次大飞跃。我们认识到，任何一个物体在空间中的运动速度，都可以分解为在互相垂直的三个方向上运动的合成，像下面这个示意图显示的那样：



【图7-2】

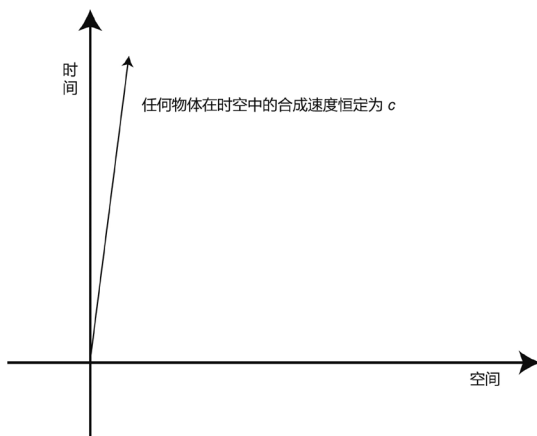
物体的运动速度是三个方向的合成速度

一个物体的运动速度 v 是由它在 x 、 y 、 z 三个轴方向上的速度的合成，如果总速度恒定的话，其中一个方向上的速度增大，另外两个方向上的合成速度就必然减小，就好像速度是被切成三块的蛋糕，你可以随便怎么切这三块，但是蛋糕的总大小不会改变。这 x 、 y 、 z 三个方向，物理学家用了一个听起来很“拉风”的词来描述，那就是“维度”。我前面所说的概念如果让物理学家来说的话，他们就会说：“物体在三维空间中的运动可以分解为在三个维度上的运动合成”。这种物理学描述方式听起来很拉风，但其实意思跟我们前面用方向来表述是一样的。

下面又该爱因斯坦登场了。爱因斯坦向我们大声宣布了一个惊人的发现，他说：“这个宇宙中任何物体的运动速度都是光速 c 。对，没错，你我的速度是 c ，太阳、月亮、星星，还有光本身，我们的运动速度都是光速 c 。只不过这个速度不是在三维空间中的速度，而是在“时空”中的速度。除了空间的三个维度以外，我们必须再增加一个维度，这个维度就是

时间，多了个时间维度后，空间就不再是空间，时间也不再是时间，而是纠缠在一起成为时空。时间空间是一个整体，我们每个人都是生活在这样一个四维时空中，我们每个人在时空中的运动速度都恒定为 c ，永远不会快一丁点儿，也不会慢一丁点儿。”

这个发现实在是太让人震惊了，我们把爱因斯坦的这个发现画成一个简单的示意图的话，就会是下面这个样子：



【图7-3】

物体在时空中的运动速度恒定

你是不是已经在头脑中模模糊糊地建立起了时空概念了呢？一旦我们明白了时空的含义，就会发现，任何物体的运动速度不再是把蛋糕切成三块了，而必须切成四块，蛋糕的总大小永远恒定为 c 。

这是一个如此简洁、优美而深刻的发现，这是人类对宇宙认识的一次飞跃。每当我想起它，总是一次又一次地被深深震撼。用这个简洁而深刻的思想来解释狭义相对论中关于时间和速度的关系，就成了天经地义的事情：物体在空间中的运动速度会分走在时间中的运动速度，空间中运动得越快，在时间中就越慢。时间空间是一个密不可分的整体，任何物体都是在时空中做着相对运动，时间和空间是互相垂直的两个维度。运用这个思想，就可以用普通的速度合成公式极其简单地推导出相对论因子。这个思想还蕴含着这样一个显而易见的事实：物体在空间中的运动速度有一个极限，那就是光速 c

。我们不再需要用眼花缭乱的质能公式和牛顿第二运动定律去联合解释为什么光速是极限，这个时空运动的思想简洁而有力地告诉我们：假设物体的运动速度完全从时间这个维度中转移到空间中，那么物体在空间中的运动速度就达到了最大速度 c 。以光速在空间中运动的事物，在时间中就停止运动了，所以，光是不会变老的，从宇宙大爆炸中诞生出来的光子仍然是过去的样子，在光速运动中，没有一丁点儿时间的流逝，时间真的停止了。现代的相对论学家认为，光速 c 很可能是我们这个宇宙时空的一个几何性质，就像圆周率是 π ，它是一种数学性质，跟物理性质无关。

从此，我们不再分开谈论时间的流逝和空间中运动的速度，只要是运动，就是在时空中的运动。当你进行百米冲刺的时候，你我在时空中进行着相对运动，空间发生变化的同时，时间也一定会发生变化。看来，我们经常在科幻小说中看到的“时空穿梭”其实一点儿都不稀奇，你大可以理直气壮地宣布：我以百米冲刺的速度在时空中穿梭，我们每个人每时每刻都在时空中穿梭。你也可以理直气壮地宣布：我离一秒钟前的自己距离 30 万千米。这真是一个遥远的距离啊，如果你和你的爱人错开了一秒钟，那么你要不停地步行九年半才能追上你的爱人。我们都是生活在低速世界中的生物，我们在空间的三个维度中能达到的速度和光速相比实在是小得可怜，这才会让我们产生时间和空间这两个完全不同的概念。如果我们想象宇宙中有一种日常生活的速度都是接近光速运动的智慧生命，那么在那些智慧生命的概念中，将不再区分时间和空间，在它们的感觉当中，时间和空间只不过是不同的方向而已，他们看狭义相对论的各种效应都会像我们看太阳的东升西落和大自然的花开花落一样平常。在相对论学家的眼里，时空才是我们这个宇宙的本质。请你务必在头脑中牢牢地建立时空这个概念，牢牢地记住没有单纯的空间运动，这对于理解我们后面要讲的东西至关重要。

四维时空

其实，我们在日常生活中早就已经有了四维时空的概念。不是吗？回

忆一下你和朋友约会是怎么约的。“我们在老地方（人民广场喷水池旁）见”，只是这么一个空间坐标够吗？如果就这么一句话的话，你们俩多半还是见不了面，你还得再加一句“老时间（晚上七点）”，这样你们才能确保双方达成了——一个准确的协议，也就是说一个约会的事件在时空中的坐标必须包含四个维度的信息，空间的三个维度加上时间的一个维度。在我们低速的地球世界中，似乎“老时间老地点”这句话已经能确保你和朋友见面了；但是，如果我们到了银河联邦的莱因哈特时代（什么，你不知道银河联邦和莱因哈特是谁？那杨威利也不知道吗？拜托，《银河英雄传说》（田中芳树著）怎么能没看过？我不管了，凡是不看“银英传”的人，我不照顾了，默认当大家都看过的，本人是“银英”迷），在银河帝国时代，如果只是这么一句约会的口头禅很可能就要犯大错了，你和朋友多半永远也见不着面了。因为没有设定统一的时空坐标参考系，那可真是差一秒就差十万八千里还多了。关于这个话题，我们在本章的后面讲到星际旅行的时候还会详细说，这里先跳过，你可以趁此机会去读一下《银河英雄传说》这部传世之作，会让你更容易理解本章中后面要举的一些例子。

不过，在时空的四个维度中，时间这个维度有一点特殊性，那就是你只能在时间这个维度中朝一个方向运动，而空间的三个维度可以朝正反两个方向运动。

本章主要讲的是时间旅行、星际殖民和星际贸易这三件有趣的事情。但是请各位读者千万注意，我绝不是在创作科幻小说，我要从科学的角度去帮你分析和看待以上三件科幻小说中最常出现的元素，帮你提高以后欣赏科幻小说的能力，帮你找出科幻小说和幻想小说的区别。

时间旅行

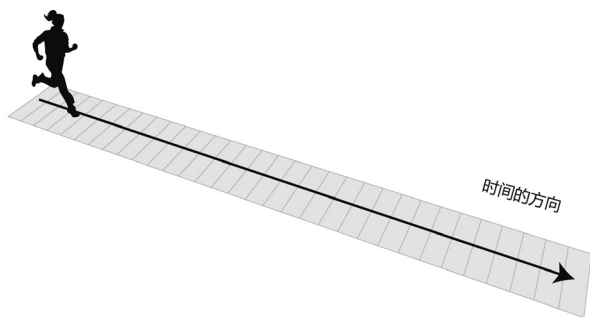
让我们先从最让你感到激动的时间旅行开始说起吧。

现在这年头，穿越类的小说真多，俨然已经成为各大文学网站和影视

剧的一个大类，各种各样的穿越手法真是五花八门，令人眼花缭乱，不过那种“月光宝盒”式的无厘头穿越不在我们今天讨论范围之列。偶尔你也会看到一些对穿越行为的“科学原理”的描述，其中最多的是说“根据相对论，只要速度能超过光速，我们就可以回到过去”。各位，以后凡是看到这种利用超光速穿越的小说，可以立即定义为“科盲幻想小说”，简称“盲想小说”。这种“根据相对论，超光速就能穿越”的科学原理简直自相矛盾得一塌糊涂。相对论的一个最基本的原理，就是光速是任何运动的速度极限，是不可能被超过的，而一旦允许超光速运动，那么相对论本身就被推翻了，又何谈“根据相对论”呢？这是一个显而易见的自相矛盾，那么多的“盲想小说家”把这个奉为至宝——但凡穿越，必超光速，实在是让我异常惊讶。我一个朴素的愿望是穿越小说家们能随手翻翻我这本书，就是编也要编得靠谱一点。

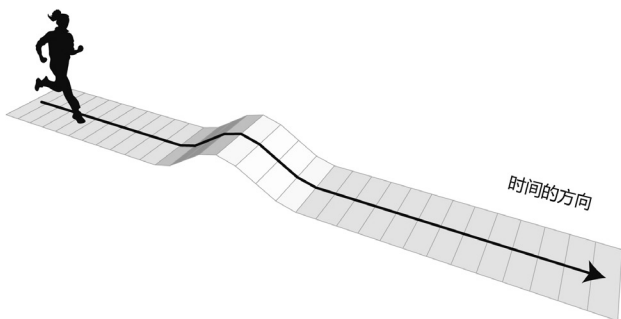
那我们来了解一下，真正的物理学家研究的时间旅行到底是一些什么样的科学原理和依据吧。

时间旅行是广义相对论研究的课题，目前全世界确实有很多严谨的科学家在探讨这方面的可能性。根据广义相对论，引力会使时空弯曲，引力越强，则时空的弯曲程度越大。也就是说，根据广义相对论的这个原理，我们会发现时空不是平坦的，时空是有形状的。我知道我这么说还是让你感到不太明白，那么我就来打一些粗糙的比喻来帮助你理解。我们首先把时空想象成一张纸，我们在时空中运动，就好似沿着纸面运动，但是请注意一点，如果这张“时空纸”延伸的方向表示时间这个维度的话，那么我们只能朝着一个方向运动，因为时间维是只能朝一个方向运动的，这是时间维的物理性状。



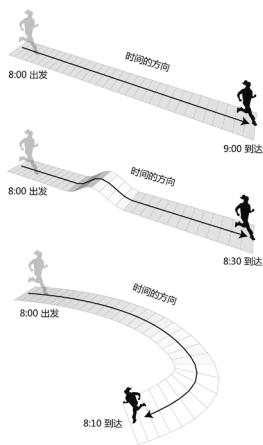
【图7-4】
在平坦的时空中朝着时间的方向运动

但是请千万注意一点，在爱因斯坦的时空观里，这张纸是不平坦的，有起伏，有褶皱，我们在“时空纸”上的运动就像在崎岖不平的山路上走路一样，是高高低低的。



【图7-5】
真实的时空不是平坦的

现在假设我们在一个平坦的时空中，上午8:00出发，从时空的一头运动到另外一头，到达终点的时候，刚好是上午9:00（注意，前面我们已经说过，任何物体在时空中运动的速度都是光速，所以，在这个比喻中，你就不要再问我们的运动速度是多少这样的傻问题了）。现在再假设我们经过的这段时空被某种力量弯曲了，那么我们达到终点的时候，会变成上午8:30；如果弯曲的更厉害一点，我们就会在8:10分到达终点。



【图7-6】

随着时空弯曲程度加大，到达时间越来越早

现在重点来了。如果时空这张纸被弯曲成了一个莫比乌斯带的形状，头尾相连了起来，你就有可能在 7:50 达到终点。也就是说你沿着弯曲的时空走了一圈回来以后，发现到达的时间比你出发的时间竟然还早。这意味着你回到了过去。



【图7-7】

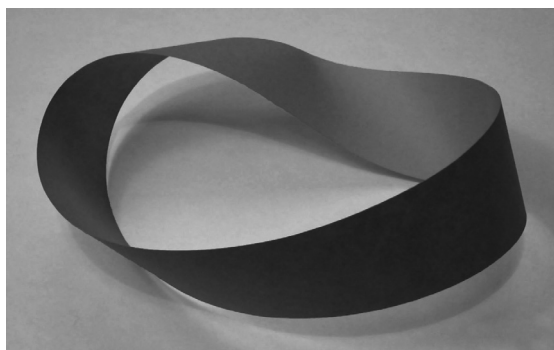
在一个时间圈环中，到达时间早于出发时间

因此，在广义相对论中，时间旅行的科学原理是通过一个时空的圈环回到过去，这个时空圈环在《时间简史》这本书中被霍金称为“类时闭合曲线”（有点拗口，我更喜欢我翻译的“时空圈环”）。爱因斯坦的狭义相对论是不允许时

间旅行的，等到广义相对论刚刚诞生的时候，爱因斯坦也不认为时空能弯曲成一个圈环。直到1949年，他的好朋友——大数学家哥德尔（Gödel, 1906–1978）在广义相对论方程中发现了一个解，这个解居然允许宇宙中这种时空圈环存在。爱因斯坦当时就震惊了，但随后他就意识到这个时空圈环正是自己和助手罗森一起发现的“虫洞”的某种特性（还记得我们在第五章最后讲到的爱因斯坦—罗森桥吗）。

所以，靠谱一点的时空穿梭原理一般都要借助虫洞来完成，以后看穿越小说记得先翻翻，有没有提到爱因斯坦—罗森桥或者虫洞什么的。

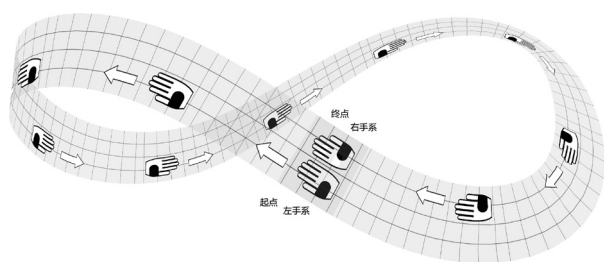
非常抱歉，前面出现了一个让你莫名其妙的名词——莫比乌斯带。不是我故意不解释，而是这个东西实在是太迷人了，我非得另起一段单独讲讲才觉得过瘾呢。莫比乌斯带，也经常被叫作魔比斯环，或者梅比乌斯带、麦比乌斯带等等，都是翻译带来的麻烦，英文名称是Möbius Strip。这是诸多科幻小说、科幻电影经常出现的一个神奇事物，它往往象征着时空穿梭。以它的发现者莫比乌斯命名，到现在也快有两百年了。



【图7-8】
莫比乌斯带

看到没？上面这个就是莫比乌斯带，其实就是把一张纸条的一头拧半圈然后和另一头粘起来，形成一个圈圈。但是你千万千万不要小看这个圈圈，这个圈圈有着许许多多迷人的特性。如果你在这个圈上跑步，你就可以一直往前跑，不用翻越任何边界而跑过所有的面。如果你拿一只毛

笔，沿着纸面只用一笔就可以把颜色涂满整个纸带。这个圈圈和我们平常认识的任何像手镯这样的圈圈不同，这个莫比乌斯带只有一个面，如果你沿着手镯表面的中线一刀剪下去，那么手镯就会一分为二成为两个各自独立的手镯。但是神奇的是，如果你同样沿着莫比乌斯带的中线剪一圈，你会发现，这个莫比乌斯带不会一分为二，而是会成为一个更大的圈圈。然后再沿着这个圈圈的中线剪开，你会神奇地发现，这次剪出了互相嵌套在一起的两个圈圈。然后把两个圈圈再各自沿着中线剪开，又会变成互相嵌套的四个圈圈。这么剪下去永无止境，最后圈圈套圈圈复杂得可以把你搞疯掉。你是不是很有冲动去试试看了？别忙，还有更有意思的特性。首先来跟我认识一下所谓自然界中的“左右手系”对称。想一下左右两只手套，这两只手套你怎么看它都像是对称的，但问题是，如果你不把手套在空间中翻一个面的话，你永远也无法把两只左右手套完全重合地上下叠在一起，就好像你怎么也不能把左手套在不翻过一面的情况下戴进自己的右手中。不过，如果你让一只左手套沿着莫比乌斯带转刚好一圈（不是两圈），这只手套就会翻过一面成为一只右手套，但是请千万记住它的神奇之处就在于：如果手套有感觉的话，它根本不会发现自己其实被翻过了一个面，在它的感觉中，它只是沿着一个面不停地运动，不知怎么的就从左手系变成了右手系，再运动一圈又变回了左手系。真是要命的感觉。



【图7-9】

左手套转一圈变成了右手套

伽莫夫写的著名的科普经典《从1到无穷大》中就说，如果类似莫比乌斯带这样的事情也能发生在三维空间中，我们的鞋子制造商就会大为欣喜，他们只要生产左脚的鞋子，然后通过莫比乌斯空间传送带转一圈回

来，就成了右脚的鞋子，真是爽死了。而一个人如果上了这个莫比乌斯空间传送带，转一圈回来则发现自己的心脏跑到右边去了，这就不爽了。但问题是，我们很容易想象两维的纸片做成的莫比乌斯带，那到底有没有三维的物体形成像莫比乌斯带这样神奇的左右手系互转的形状呢？答案是有的，1882年德国数学家克莱因（Klein，1849-1926）找到了一种以他的名字命名的模型，叫作“克莱因瓶”。



【图7-10】
克莱因瓶

瞧瞧，就是这种极其怪异的瓶子（但这仅仅是克莱因瓶的近似样子，真正的克莱因瓶是没法直接做出来的，因为真正的克莱因瓶是不会互相穿过的，这需要一点空间扭曲的想象力）。你盯着它看3分钟，想象你在这个瓶子的表面跑步的情景，我保证你会越看越神奇，越看越觉得不可思议，直到逻辑彻底混乱为止。好了，咱别看瓶子了，继续看书。你想象一下，如果时空扭曲成这种神奇的形状，那么你就完全有可能坐着宇宙飞船从21世纪出发，到19世纪返回；穿越了一个世纪的时间，如果继续往前又会返回21世纪。

太神奇了，物理学家居然真的给他们搞出了一套回到过去的理论。但是很快，人们就发现，如果允许回到过去的话，会产生一些逻辑上的悖论，或者说一些怪圈。比如最著名的“祖母悖论”，你可能早已耳熟能详

了，就是你如果回到过去杀死了你的祖母，那么你祖母既然死了，你又怎么能存在？你不存在了又怎么能回去杀死你的祖母呢？我总觉得这个故事写得拗口不已，完全没必要这么复杂的嘛，简单说来就是如果你回到过去杀死以前的自己的话，又怎么能有后面的你回到过去自杀呢。

总之，这样的祖母悖论型的逻辑悖论我们随便就能想出很多很多。有一个最变态的悖论说的是，你在未来给自己做了变性手术，然后回去找到自己，和原来的自己生下了自己。我真服了想出这个逻辑悖论的“淫”（人）。这些悖论又如何解决呢？物理学家们研究广义相对论，确实用严谨的数学方法论证出了时空圈环的可能性，但是祖母悖论又显然在挑战我们的常识，没有人能接受祖母悖论会真的发生。

现代的物理学家们为此争论不休，想出了各种各样的解决方案来避免逻辑悖论的发生，有代表性的解决方案有这么几种：

第一种，叫作自由意志丧失说。物理学家说所有该发生的历史都已经发生了，你不可能改变这个历史，所以一旦你回到过去，你就会丧失自由意志，你完全被历史所控制，你无法改变任何历史的一丁点。

第二种，叫作时空交错说。物理学家说你是可以回到过去，但是你回到那个时空和真实的历史时空是平行纠缠在一起的，但永远不可能相交，你可以看见历史，但不能影响历史。这个我听懂了，不就是说“只能看，不能摸”嘛。

第三种，叫作多历史说。这个理论首先是由一个叫费曼（Feynman，1918—1988）的美国物理学家提出来的，他说历史不止有一个，你可以回去杀死你的祖母，你也可以回去干任何事情，甚至杀死罗斯福让希特勒取得胜利，什么都可以干。但是请记住，你影响的那个历史和我们这个世界的历史不是同一个。换句话说，当你干下了任何改变历史的事情时，世界就分裂成了两个世界，在我这个世界中希特勒倒台了，在你那个世界中希特勒最后成了全世界的偶像。说老实话，这个理论真够疯狂的，为了让时间旅行合理，动不动就克隆出无数个世界出来。但恰恰是最后这个看起来最疯狂的理论，却得到了最多物理学家的支持，包括像霍金这样的大科学家也支持该理论（霍金《大设计》）。这就是现在大热的“平行宇宙”说。

难道物理学家都疯了吗？这世界有这么疯狂吗，怎么会去相信听起来如此不靠谱的一个理论呢？这是有原因的。因为在过去几十年中，随着物理学家们对量子物理的深入研究——所谓的量子物理，就是研究比针尖还小几万万万（至少还得打好几个万）亿倍的基本粒子的行为的物理学。物理学家们越来越发现，这个世界真是不可思议，很多微观世界的现象只能用一些听起来很唯心的、很过分的、很疯狂的理论去解释，否则如果按常理的话怎么也说不通，包括这个多历史的现象似乎在微观世界中每时每刻都在发生着。关于量子物理的话题，我们在第九章还得再简单讲一讲，但也只能简单地讲讲，如果真要说开去的话，还得有一本比本书更厚的书才行。

你可能也看出来，真要想时间旅行，以我们人类现在的技术是不可能达到的。要扭曲时空就必须要有巨大的引力，产生引力就要有巨大的质量，而质量和能量又是可以互相转换的，所以归根到底要有巨大的能量。日裔美籍著名的物理学家和科普作家加来道雄在他的《不可能的物理学》中曾经做了一个简单的计算，说：“如果我们能把太阳一天放出的能量全部采集下来的话，可以打开一个只有几纳米大小的虫洞，这个虫洞最多只能允许把你分解成无数的原子通过后，再在另外一头组装起来。”这个能量大约是多大呢？太阳 24 小时放出的能量大约是 10^{28} 千瓦时，2015 年全球消耗的能量大约是 10^{14} 千瓦时，两者相差了 10^{14} 倍，也就是 100 万亿倍，换句话说，太阳一天放出的能量就够地球使用 100 万亿年，呜呼，看来真是难啊。但你可能也会跟我一样想到这样一个问题，我们现在是没有能力制造时间机器，但是未来人呢？如果在遥远遥远的未来有人造出了时间机器，那么那个人就有可能乘坐时间机器，回到我们或者我们以前的时代。但是为什么我们从来没有见到过这样的未来人呢？历史上也从未记载有未来人光临。假设未来无限远的话，假设时间机器确实可以造出来的话，那么概率再小也应该有未来人回来了啊。有这个想法的人还真不少呢，2005 年，为了庆祝国际物理年，同时也是为了庆祝相对论诞生 100 周年，美国麻省理工学院举办了一场“时间旅行者大会”，举办方郑重地在报纸上刊登广告，邀请未来的时间旅行者光临会场，并且携带未来的物品作为证据。大会开了一天，确实来了很多“旅

行者”，可惜没有一个能让人相信是“时间旅行者”。这些旅行者都辩称时间旅行只能光着屁股旅行，就像施瓦辛格扮演的终结者那样，所以没有信物。各位亲爱的读者，这件事，你们相信还是不相信呢？

星际殖民

好了，关于时间旅行的话题我们就聊到这里。这个话题其实蛮有趣的，我建议你把我前面说的那些好好地看上三五遍，然后记下来，和朋友喝茶吃饭聊天的时候用自己的语言复述一遍，保证能让你大放异彩。本人就是经常这样大放异彩的，结局往往是话讲完了，菜也被别人吃完了。

讲完了时间旅行，我们该来说说同星际殖民有关的话题了。在《银河英雄传说》中，自由行星同盟的国父海尼森远征两万光年，去寻找适合人类居住的外星球。那么真正的星际旅行可能吗？会遇到什么样的事情？如果我们真的能在几十甚至几百光年（几万光年我是不敢想的）的范围内建立第二个、第三个地球，我们这些星际殖民者的日常生活和时空观念在相对论的理论下又该是一个怎样的情景呢？这类题材的科幻小说也不少，包括著名的《银河英雄传说》，但是小说中的很多事情都是不可能真实发生的，真实的世界可能会令人非常沮丧。让我们先从一堂令人沮丧的算术课开始这个话题吧。

同学们，如果我们要到太阳系以外的地方去殖民，首先我们至少要飞往一个恒星系，只有在恒星的附近才有可能出现适宜人类居住的星球，恒星就是那颗星球的太阳，给它温暖和能量，如果没有恒星，那么在黑漆漆的宇宙中我们肯定是被冻死的。让我们仰观苍穹，看看满天的星星离地球有多远吧。天文学家早就发现，离地球最近的一颗恒星叫作比邻星（半人马座 α 星 C），距离我们的时空距离是 4.3 光年。所谓光年就是光跑一年走过的距离。光年这个单位，在你小的时候，看到后可能会认为是一个时间单位，长大后懂的多一点了，才知道是个距离单位。现在当你有了时空的概念以后，会发现光年这个单位其实是时空

单位。在宇宙空间中，因为时空的不平坦性，其实你是没法用千米去定义距离的，在宇宙中只能用光年来定义时空距离，你可以把它看成是距离单位，你把它看成是时间单位也问题不大，时间空间已经成为一个整体，不分你我。总之，即使是离我们最近的恒星听上去也是离我们非常遥远的，光都要走 4.3 年嘛。同学们，现在我们来做一些简单的数学计算，看看这颗比邻星离我们到底有多远。以人类目前掌握的技术而言，最快最快的宇宙飞船能飞得多快呢？即使是按照最乐观的估计，大概也只能达到光速的万分之一。来，算算看，它飞到比邻星得多少年？没错，是 4.3 万年。有没有搞错？！你惊呼一声，我以为人类的宇宙飞船已经够快了，没想到那么慢啊。抱歉，我这还是给足了人类面子了，阿波罗登月飞船飞到月球差不多用了四天时间，我已经让人类最快的宇宙飞船飞到月球的时间减少到三小时了。而且，我这还是忽略了加速和减速的时间（这大概还要耗掉两百年呢）。看来，以人类目前的技术实力，飞往比邻星是没戏了，4.3 万年，不用说人类的寿命问题，就算你能在飞船上生儿育女一代代地延续，也没有任何机器设备能工作那么久的时间，金属也会疲劳。

看来必须要提升飞船的速度。那么你们觉得至少要达到什么速度才有可能进行星际殖民呢？掐指一算，可能得出的结果是最低速度怎么着也得达到光速的十分之一，也就是 $0.1c$ 吧，这样我们飞到最近的比邻星就只需要 43 年了。我们且不谈把速度从光速的万分之一提到光速的十分之一技术难度有多高，因为今天只是一堂算术课。听起来貌似靠谱，从地球出发，算上加速减速的时间，飞 50 年到达目的地，到了以后发个电报回来告知情况，地球用四年多收到电报。这样的话，如果我有幸 30 岁的时候能到 NASA（美国国家航空航天局）参与这个伟大的比邻星探索计划，那么当我 84 岁的时候就有望听到从比邻星那边传回来的消息。总算马马虎虎还能接受，在我有生之年还是有希望知道实验结果的。

但是，同学们啊，千万别忘了，我们说的只是离地球最近的比邻星，我们的目的可是要寻找适合人类居住的星球，并不只为了到别的恒星系中看看风景。遗憾的是，比邻星系很可能找不到任何行星，去了也是白去。

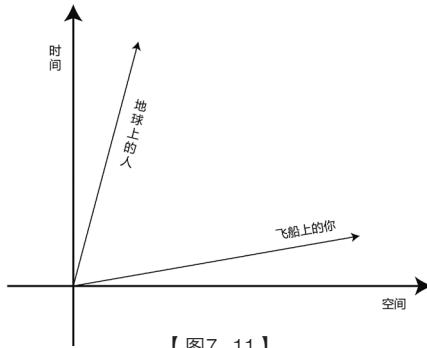
按照现在天文学家的估计，我们距离最近的宜居行星，大概至少有 50 光年的距离。这也就意味着，我们即便达到了 $0.1c$ 的速度，飞过去至少也要花 500 年的时间。并且随着最大速度的增加，加速减速需要消耗的时间也会迅速上升，要达到 $0.1c$ 的速度，加速减速所需要的时间可能要占到总飞行时间的一半。显然，人类不可能到来回飞一趟要 1000 年的地方去拓展殖民地的，就好像你不能指望原始人靠游泳从欧洲去美洲新大陆拓展殖民地一样。这个速度还是不够，还得提升。那你觉得，以 50 光年考量的话，我们的速度至少要达到多少，才有可能进行星际殖民呢？

你心里想着可能需要反算一下，也就是我们先设定多少年能飞到的心理预期，然后再反推要达到的速度。经过一番挣扎，你可能会想，好吧，不管怎样，让我在到达目的地后，能让我的亲人在有生之年知道我活着到达就可以了。但是我将非常遗憾地告诉你，不管我们怎么努力，哪怕我们的星际飞行速度能无限接近光速，你的这个朴素的愿望还是无法实现，你的亲人也不可能在有生之年得到你的消息。理由很简单，假设 50 光年外的那颗星球叫作“奥丁”（《银河英雄传说》中银河帝国的首都星），你首先至少要用 50 年的时间飞到奥丁，到达以后你往回发一个电报，这个电报也需要 50 年的时间到达地球，你在地球上的亲人从你出发那天起最少最少也要等 100 年才能等到你这个报平安的电报。

这确实是一堂令人沮丧的算术课。看来，要想星际移民，你出发的那天就是和你所有亲人永别的一天；对你的亲人来说，你不但是一去不复返，而且这一去就是杳无音信，他们等待一生也得不到你平安抵达的消息。

但是，如果我们的飞船速度能在很短的时间内加速到无限接近光速（虽然这在今天在技术上还是无法想象的，甚至连理论上的可能都没有），对于星际旅行者的你来说，情况却要乐观得多，50 光年的距离对你来说就像是在地球上做了一次长途旅行而已。根据时空中运动速度恒定的原理，你在空间中的运动速度会分走你在时间中运动的速度，换句话说，你飞得越快，你的时间流逝得越慢。假设你以 $0.9999c$ 的速度飞向 50 光年外的奥丁星的话，你自己感觉仅仅用 81 天就抵达了，而你在地球上的亲人则已经老了 50 岁，我

们用下面的时空运动图来表现这个概念：



【图7-11】

地球上的人和星际飞船上的你在时空中运动

在这张图中，大家都以奥丁星为参照物，地球上的人在时间中运动得很快（接近光速），但是在空间中运动得很慢；而星际飞船上的你则恰恰相反，你在时间中运动得很慢，但是在空间中运动得飞快（接近光速）。所以，以你自己的感觉，你没有用多少时间就从地球飞过来了，但与此同时，地球上的时间却在飞速流逝。

沿着上面这个思路，我们可以得出一个推论：如果地球和奥丁的时空距离是 50 光年的话，那么就意味着它们的时间距离至少为 50 年，也就是说，这两颗星球的人想要发生任何相互接触，不管是通讯还是旅行，总之，这个 50 年是不可逾越的。我们现在假设你供职于地球上的一家公司，公司派你去奥丁的分公司出差，你坐上星际飞船到达奥丁，办了几天公事再回到地球的时候，尽管你自己觉得只用了几个月甚至更短的时间，但是地球已经过去了一百多年，你的老板早就过世了，你供职的这家公司是否存在也很难说了。因此，在星际殖民时代，恐怕不会发生派人去别的星球出差办点事再回来这种事情，虽然这样的情节在星际殖民题材的科幻小说中比比皆是（比如电影《阿凡达》）。

那么我们再来看看在星际殖民时代的约会又会有哪些特点呢？你和你的朋友都在地球上，有一天你们心血来潮相约要到奥丁去见面，比如说你们约定在一年后的今天见面，然后分手各自准备行程去了。我提醒你们注意，你们千万不要以自己的手表为准，哪怕你们分手的时候对表对得再精

确也没用。你们必须非常精确地算准你们的时空坐标，特别要注意时空运动速度恒定这条铁律，各自小心翼翼地算好自己的空间运动速度会如何影响时间运动速度，否则将要发生的可就完全不是一个人早到一会儿等着另外一个人飞过来，而是很可能发生这种情形：先到的一个人苦苦等待一生之后，老得牙齿都快掉光了才终于见到了活蹦乱跳的另外一个人。

在星际旅行时代，两个人的年龄再也无法处于一种稳定的状态了。拿《银河英雄传说》里面的故事来说，情节会变成这样：米达麦亚和罗严塔尔奉命去星际空间打击海盗，这两人指挥着各自的战舰出发了。由于战事激烈，他们在广袤的太空中作战，经常要变换自己飞船的速度，而且偶尔能刚好在太空中会合一下，互相见见面。于是在这些日子里，他们会每次见面相隔的时间产生完全截然不同的意见，米达麦亚觉得隔了好几个月才遇上罗严塔尔，而罗严塔尔却说我们昨天才刚刚见过面呀。下一次见面的时候，米达麦亚觉得也就过了不到一个礼拜，但是罗严塔尔却坚持声称至少已过去了三个月。这哥俩每见一次面就争吵一次。他们都得特别小心地控制自己飞船速度，万一速度太快了，等他们回到奥丁的时候，他们的司令官莱因哈特就已经过世很多年了。

因此，在星际殖民时代，必须建立宇宙历、宇宙标准时和统一的时空坐标参照系。好在咱们的银河系有一个好处，那就是所有的恒星基本处在相对静止的状态。我们地球和奥丁星之间的相对运动速度应该是很小的，并且我们不妨假设人在奥丁星和在地球上所受到的引力大小基本相当。这个应当好理解，人类不会习惯在一个能使自己体重突然增加好几倍或者轻好几倍的地方长期生活，总还是要在一个能基本适应的范围内，而这个引力大小对于时空弯曲程度来说是可以忽略不计的。

所以，如果真到了那个在奥丁星殖民的时代，地奥联邦政府可能会同意我的建议，把地球和奥丁星看成是一个大的参考系，这个参考系跨越了 50 光年的时空，在这个 50 光年的范围内建立时空坐标。以新的宇宙历法规则通过的那天零时为银河纪年元年，仍以地球日和地球年作为标准宇宙历法的标准日和标准年，在银河纪元元年的零时零分启动一只精心调快过的原子钟，然后把这只原子钟放上星际飞船，以接近光速的速度带到奥丁星，到

达以后再把原子钟的频率调成跟在地球上一样。于是我们会看到，在奥丁星上的宇宙历生效的那个时刻，原子钟显示的可能已经是：银河纪年 50 年 2 月 21 日 9 时 13 分 10 秒。因此，奥丁星上的宇宙标准历和标准时的时间是直接从 50 年后开始的，而不是像地球一样从元年开始，当然，奥丁星上的人必然还要根据自己星球的自转和公转日期（奥丁星不一定有卫星，所以可能没有月份的概念）制定自己的地方时，以便生活。

所以，奥丁星上的手表一般都必须显示两个时间，一个是标准宇宙历的时间，一个是奥丁历的时间。这些手表还得有一个特殊功能，那就是登上星际飞船后，可以根据星际飞船的飞行速度调节手表的频率，飞得越快，表的频率就得跟着调得越高。

假想一下你在星际飞船上看着时间飞快地跳动，一年一年就在你眼前像走马灯一样流逝，你会产生一种什么样的感觉呢？最要命的是，这些走马灯般流逝的时间并不是幻觉，而是实实在在地发生在地球和奥丁星上的时间流逝。地奥联邦政府还有一条不得不颁布的法令，那就是所有的星际飞船上的时间频率调快的行为都必须全部详细记录在案，调快频率后流逝的时间不能算作年龄的增长。如果不颁布这条法令，那么这个世界的伦理就要彻底混乱了，人们再也搞不清楚谁比谁年龄大了。

以上这些就是最粗略的星际殖民时代的时间观念。对于那些要登上星际飞船的人来说，他们必须要做好十足的心理准备，因为登上飞船的那个时刻就是他们真正告别过去、奔向未来的时刻。星际飞船是一艘真正的时间机器，只不过这部时间机器只能把人带向未来而无法返回过去。一旦登上了星际飞船，那么过去的一切就将过去，对于过去的一切亲朋好友来说，你死了，而对你自己来说，亲朋好友们死了，因为你们此生再也不可能相见了。当亲朋好友们向你挥手道别，看着你登上星际飞船的景象，那就跟看着你走入棺材是一模一样的心情。各位亲爱的读者，我很想知道，此时此刻的你对于星际殖民时代是感到兴奋呢，还是沮丧呢？过去曾经看到过的很多此类题材的科幻小说和科幻电影，是不是都有一点点变味了呢？

如果你刚好是感到沮丧的那大多数人，那么接下来我将告诉你一个让你感到振奋的好消息，那就是虽然你告别了过去，奔向了未来，看起来你抛弃了一切，可是你完全有可能在瞬间拥有巨大的财富。此话怎讲？想象一下，如果你在出发去奥丁前，把自己所有的积蓄拿出来，虽然只有很可怜的 1 万块钱，你咬咬牙买了一个年化收益率为 8% 的理财产品，约定到期后每年都把本金加利息一起继续投资，然后，你飞向奥丁星，并且在奥丁星逗留了几天后坐飞船返回了地球。此时对于你来说，地球上已经过去了 100 年，你知道你那 1 万块钱变成多少钱了吗？做一个简单的复利计算，1.08 的 100 次方就是你最后的本息合计数，当然单位是万元，然后再按照 5% 的平均年通货膨胀率扣除蒸发掉的钱，我告诉你是多少，千万别吓着，是 2068 万元，你从一贫如洗的无产阶级一下子就变成了千万富翁。还有更爽的，如果你努力一点，找到了一个年化收益率为 10% 的理财产品（这并非不可能），年化收益率多了 2%，看起来只多了一点，但是 100 年后，你的 1 万块钱变成多少了呢？是 1 亿 3649 万元，你都不敢相信自己的眼睛了吧，一下子又从千万富翁变成了亿万富翁。“太好了，太好了！”你咬牙切齿地叫道，“这星际飞船我是坐定了，哪怕是棺材，为了我亿万富翁的梦想，我也非上不可了。”

你忽然明白了，原来利息是这么强大的一个东西啊，我们平时往银行存钱一年两年看不出啥来，但是没想到时间一长，这复利的力量还真是强大啊。那么既然你都意识到了利息的重要，对于往来于星际间做贸易的那些精明的商人，他们更是算计得极其精确。

在你朴素的观念中，所谓的贸易，不就是低买高卖嘛？我在深圳花 10 万元买了一批手机，到了北京 15 万元卖光，从中获利 5 万元，当然可能还要扣掉几千元的运输和所得税之类的成本。但总体来说，能不能赚钱的关键在于买卖的差价，差价越高，赚得越多，差价越小，则赚得越少。如果跑到北京的时候，很不幸手机的价格还跌破买入价了，你就等着赔钱吧。

在这个观念中，你不太会考虑钞票的“时间价值”，至少不会很在意。你一般不会去算计这笔钱如果不去做贸易，放在银行是不是会赚得更多。

但是到了星际贸易时代，如果观念不改变，那可就要大大地吃亏了。想象一下有弟兄俩，同时登上了星际飞船从地球去奥丁，哥哥听说黄金的价格在奥丁比地球上贵100倍，哥哥一激动就把1万块钱积蓄全部买了金条，准备带到奥丁去卖掉，大赚一笔。但是这个弟弟比较傻，经不住银行那些卖理财产品的销售的劝说，买了一个年化收益率8%的理财产品。两人上了飞船后，哥哥嘲笑弟弟太愚蠢了，放着100倍的差价不赚，居然去收那可怜兮兮的8%的利息。两人飞到了奥丁，哥哥如愿以偿，1万元变成了100万，他心满意足地和弟弟一起坐飞船回到地球。到了地球才发现，弟弟变成了千万富翁，他的1万元变成了2000多万。

可见，在星际贸易中，金钱的时间价值，换句话说也就是利率，成了最关键的因素。2008年诺贝尔经济学奖得主保罗·克鲁格曼（Krugman, 1953-），曾经写过一篇论文，题目就叫作《星际贸易学》，发表在2010年3月的《经济探究》上。在这篇论文中，保罗提出了星际贸易学的两大基本定理：

星际贸易第一定理：做贸易别忘了利率，而且计算利息记得一定要用宇宙历，千万别用自己飞船上的时间；

星际贸易第二定理：随着贸易的往来，不同星球间的利率最后一定会趋于一致。

这第一条定理我想你一定看懂了，说得太在理了，要是做星际贸易忘记了计算利息，那简直亏惨了。因为真正做贸易的往往都是先贷款，然后进了货去卖掉，再还银行钱，赚取价格差和利息之间的差价。所以，在星际贸易中，只有价格差足够大，而且足够偿还利息的时候，商人才有利可图。

那第二条定理呢，其实也很好理解，商人们都是精明的，他们很快就会发现星际贸易的成本主要是金钱的时间成本，利率差一点点都是天大的事，因为动不动就是50年100年的，所以，赚钱的关键在于两星球之间的利率差异。但是随着商人们自由市场竞争的加剧，价格战的升级，利润会逐步降低，最后的结果一定是两星球的利率逐步趋同，只要一边敢稍微提升一点点利率，那么大量的热钱立刻就会涌进来。这个情况居然跟

我们现在这个时代国家间的利率调整产生的效应是一样的。

克鲁格曼在论文最后得出的结论是：星际贸易中的经济规律在本质上和地球上的国际贸易没有啥太大的区别，虽然相对论效应会在时间和空间上带来许多不可思议的改变，但是在经济学上，相对论却改不了什么，经济学规律貌似凌驾于物理规律之上。不过呢，大多数经济学家也不太懂相对论，他们对克鲁格曼的这篇奇异论文也就是一笑了之。至于我们该不该相信克鲁格曼，我想这不重要，重要的是我们在茶余饭后多了很多有趣的谈资，我们对这个宇宙又多了一份认识。

在本章中，从建立时空这个概念开始，由此出发，我们看到了神奇的时间旅行；再来到广袤的太空，做起了星际旅行和星际贸易。希望这趟旅程能称得上我一开始就跟你承诺的“惊奇之旅”。

你可能还意犹未尽，沉浸在时间旅行和星际贸易的遐思中，甚至有点恋恋不舍——难道关于时空的惊奇之旅就这样结束了吗？真的就这样结束了？

哦，我很高兴地告诉你，没有，还没有结束，时空之旅还有最后一段旅程。可能这最后的一段旅程称不上惊奇，但我敢保证，最后这段旅程绝对是一场思维的盛宴，它将挑战你想象力的极限，这是相对论的最高潮部分，就像伟大的贝多芬第九交响乐的最后一个乐章《欢乐颂》一样，旋律和节奏都没有任何惊奇之处，但是它所展现出来的恢宏气势，堪称人类交响乐史上的喜马拉雅。如果真有一个上帝的话，那么我们时空之旅的最后一段将要闪耀出来的人类理性的光辉，必会让上帝都感到炫目。

我们将在下一章体会相对论的高潮，同时揭秘2005年国际物理年标志的含义，为什么全世界的科学家会选择用这个标志，来纪念相对论诞生100周年呢？



【图7-12】

2005年国际物理年标志

第七章

CHAPTER SEVEN

再谈四维时空

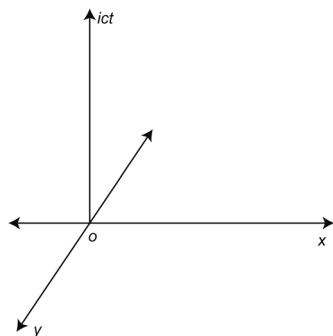


宇宙时空的终极图景

我们人人都是生活在一个四维时空中，其中，空间有三个维度，时间是一个维度，我们在四维时空中的运动速度恒定为光速。这是我们在上一章中了解到的内容。把三维的空间拓展到四维，这并不是爱因斯坦首先想出来的，而是他的大学老师，德国数学家闵可夫斯基首先提出——应该把时间也作为空间的一个维度与另外三个维度整合起来。在看到学生爱因斯坦的相对论之前，他就有了时间维的初步想法，等看到相对论后，闵可夫斯基恍然大悟。数学大师不愧为数学大师，他很快（1908年）就在相对论的基础上，建立起了闵可夫斯基时空的数学模型，爱因斯坦对此也是敬佩不已。下面首先让我们来看看闵可夫斯基的四维时空图是怎么回事，这可是一个相当有趣的模型。

图只能画在二维的平面上，在二维平面上想表达三维的物体本就已经很困难了，还要学会透视法什么的，现在闵可夫斯基居然想在二维的平面上表达四维空间的运动，那真是需要具备超凡的勇气和智慧。闵可夫斯基是这么想的，运用二维上的透视法，最多只能画出三个维度的物体形象，这个是我没法改变的，现在我必须要体现出时间这个维度，那么既然如此，我只好牺牲一个空间维度，让我们先把三维的空间压缩成两维的空间，这样我们就能在纸上把空间和时间尽可能地画在一起了。

于是，闵可夫斯基画出了这样一张时空图：



【图8-1】

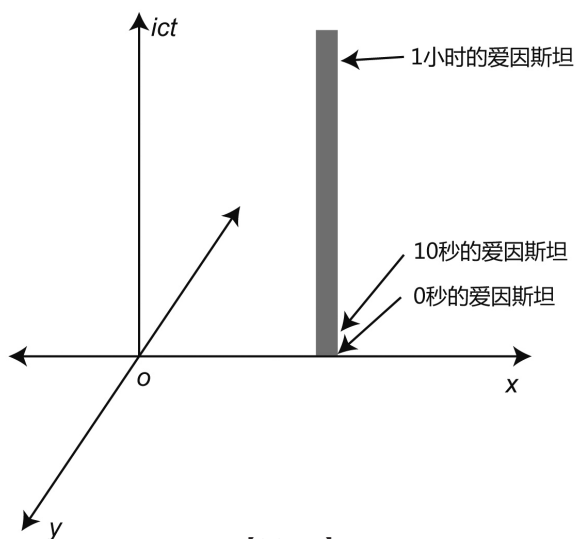
闵可夫斯基四维时空基本图

我已经看到了你失望的眼神，你可能满心期待能看到一张惊世骇俗的做梦也没想到过的神图，可是，眼前就是一张随便打开一本中学数学课本就能看到的图。各位，耐心点，真正精彩的大片往往都是从平淡的开头开始的，鲁迅先生诗曰：“心事浩茫连广宇，于无声处听惊雷。”我觉得形容的正是你接下去将要看到的内容。请先耐着性子听我解释一下，上面这张图的 x 轴和 y 轴表示空间坐标（把一个空间维度，也就是 z 轴给忽略了），并且空间坐标是两端延伸的，表示在空间中可以朝正反两个方向运动。竖着的这根线就是时间坐标（ ict ），为了让坐标系的单位统一，所以这根坐标的单位是光速 c 乘以时间 t ，这样得到的就是跟空间坐标单位一样的距离概念了。那为什么前面还要加一个 i 呢？在高等数学里面， i 表示虚数，也就是说，闵可夫斯基为了表达时间这个维度和空间维度的区别在于时间维只能朝一个方向运动，所以加了一个表示虚数的 i 以示区别。

闵可夫斯基四维时空坐标的要点是：（1）所有的坐标轴互相垂直；（2）坐标轴单位统一；（3）表示时间维度的轴只能朝一个方向运动。

接下去，我们的思维盛宴要开始慢慢上菜了。第一道菜：如果以地面为时空坐标原点，站在地面上不动的爱因斯坦，他的时空运动轨迹是怎样的？

先思考5秒钟，然后我们上菜：



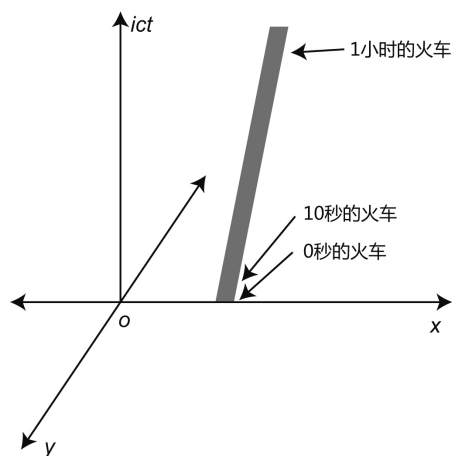
【图8-2】

爱因斯坦在时空中的轨迹

爱因斯坦在时空中的运动轨迹是一根和时间轴平行的直线，他在空间中并没有相对运动，但是在时间中运动，因此时空图如上所画。应该很好理解对吧？闵可夫斯基把物体在时空中运动的轨迹称为“世界线（World Line）”，这根世界线上的每一个点称为“世界点（World Point）”，请记住这两个名词，我们后面就直接用这两个名词来说事，可以节省很多笔墨。我想特别请各位读者注意，世界线是真实存在于我们生活中的宇宙中的，你不能仅仅把它当作是闵可夫斯基的“头脑风暴”练习，或者是一种假想图。它是一个客观存在，就如同民航管理局绝不能忽视一架飞机在空间中的飞行轨迹一样（如果轨迹计算不精确，可是要撞机的）；未来如果有一天成立了时空管理局，那么世界线就会如同现在的飞机飞行轨迹一样重要。

第二道菜：仍然是以地面为时空坐标原点，一列在地面上行驶的高铁，它在时空图中的世界线是怎样的？

你可能脑子里面有答案了，我们上菜，看看是不是想的一样：

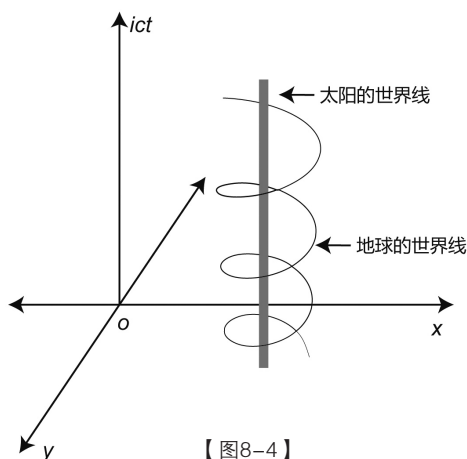


【图8-3】
高铁运行时的世界线

高铁的世界线是一根斜线，因为它在时间维运动的同时，也在空间维中运动，所以时空轨迹就是一根斜线。

第三道菜：这次如果以太阳作为参照系，请分别画出地球和太阳的世界线。

这次的题目貌似难了一点，地球是绕着太阳做圆周运动的，它的世界线应该是怎样的呢？让我画出来给你看：

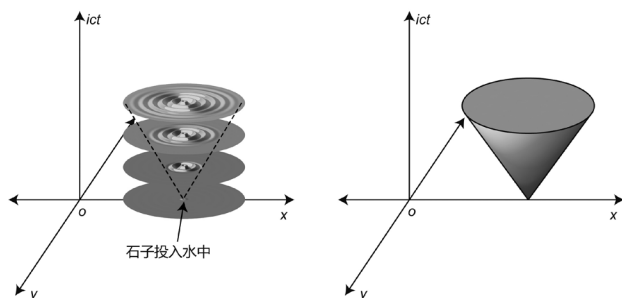


【图8-4】
地球的世界线是一根螺旋线

地球的世界线就像是一条盘绕在太阳世界线上的蛟龙，蜿蜒而上，是一条规则的螺旋线。这次你可能要稍稍想一下才能理解，不过我相信这肯定难不倒你，这道菜你还是很轻松地吃下去了。

第四道菜：以湖面作为参照系，请画出一颗石子扔进湖水中产生的一个涟漪的世界线。

这道菜看来有点复杂，不知道该从哪里下筷子，别心急，让我来帮你一起画出涟漪的世界线：



【图8-5】

石子投入湖水，产生的一个涟漪的世界线是一个倒圆锥

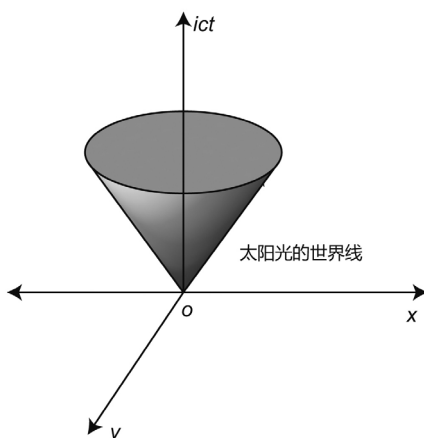
湖水中的一个涟漪的世界线不再是一根“线”，因为涟漪无法再看成一个“点”了，它的世界线实际上是一个倒放的圆锥体，随着时间的增加，体积不断增大。

第五道菜：以太阳为参考系，请画出太阳光的世界线。

这次真正的挑战来了，太阳发出的光不同于一个平面上的涟漪，太阳是一个球体，它向空间的四面八方发出光芒。把太阳想象成一个灯泡，在点亮的那个瞬间，就会形成一个光球。这个光球在百万分之一秒直径就达到了600米，一秒后，直径就达到了60万千米，相当于地球直径的47倍，可以装下10万个地球。

这个光球不同于火车和涟漪，它在空间的三个维度中都有运动，因此是不可能准确地只有在三个维度的时空图中画出它来的。但是如果

略其中的一个空间维度的话，会发现光球的扩散在二维平面上的投影和湖水的涟漪是一样的，随着时间的增加而不断地向四面八方扩散。于是，如果在忽略了一个空间维度的时空图中画出来的话，太阳光的世界线和涟漪的世界线是一样的。如下图所示：



【图8-6】

太阳光的世界线形成了一个圆锥体——光锥

这个由光形成的圆锥体，闵可夫斯基把它称为“光锥”。当然，真实的四维时空中的光锥是一个四维光锥（或者可以叫超光锥），我们现在看到的只是它的三维近似形状，但是这个四维光锥的基本特点在上面这张图上是基本准确的，随着时间的增加，光锥的体积迅速增大。

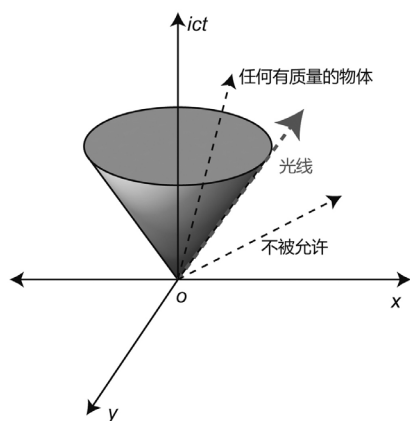
我们现在是用了一个会发光的太阳作为时空坐标原点，很容易就画出了该时空坐标的光锥图。下面是重点来了，请一定听仔细：任何一个事件都可以当作是时空坐标原点，不管这个事件会不会发光，我们都可以假想这个事件是发光的，那么就可以画出这个事件的光锥图，这个光锥被闵可夫斯基称为“事件的将来光锥”。什么叫事件？宇宙中发生的任何事情都可以称为一个事件，小到一根针落地，大到太阳爆炸，一切一切的事情都可以称为一个“事件”。

下面，闵可夫斯基为我们隆重献上第一道大菜，这是一个伟大而深刻

的发现，它是狭义相对论的一个气势恢宏的推论，直接把我们的视野扩展到了全宇宙。闵可夫斯基在1908年的一次名为“时间与空间”的演讲中，向世人大声宣布了他的发现：

“宇宙中的任何事件都只能影响它的将来光锥内的物体，凡是在事件的将来光锥外的物体不会受该事件的任何影响。”

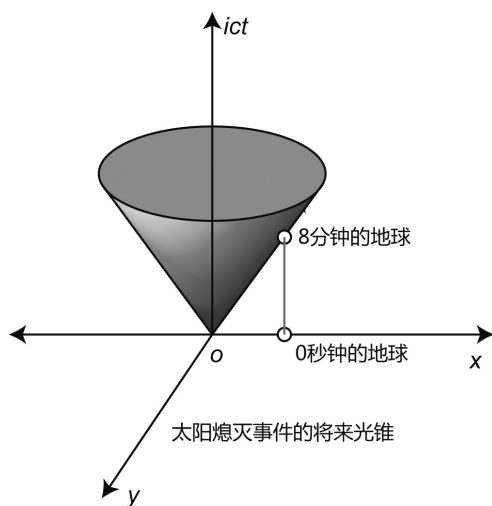
上面这句话有点长，有一个更文学化的版本是这么说的：光锥之内即命运。请你仔细阅读一下，这是本章的第一个惊雷，高潮正在慢慢酝酿。可能你没有完全读懂，让我来画一个图示帮你理解：



【图8-7】

任何有质量物体的世界线，必在事件光锥之内

根据狭义相对论，任何有质量的物体的运动速度都不可能超过光速，因此事件的光锥是该事件能够影响到的最大时空范围，凡是处于这个光锥之外的东西均不受影响。举个例子，如果此时此刻太阳突然熄灭了，由于我们在太阳熄灭的头一秒钟仍然处在太阳熄灭事件的光锥之外，所以这个事件不会对我们造成任何影响，我们也根本不可能知道这个事件；只有当8分钟后，事件光锥覆盖到了地球所在的位置时，该事件才对我们产生影响。

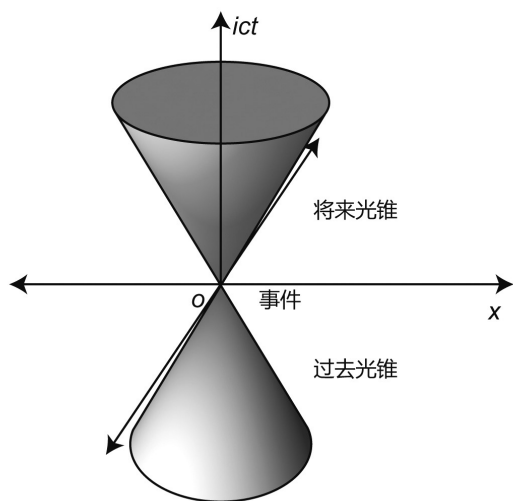


【图8-8】

太阳熄灭事件的将来光锥8分钟后和地球的世界线接触

千万不要小看这个发现的意义，这是对宇宙规律最深刻的发现之一。这个发现告诉我们宇宙是一个“定域”的宇宙，也就是任何一个事件能影响的时空范围是有大小的，不但有大小，而且大小还是固定的一个圆锥形。注意我的用词，我说的是时空范围，并不是空间范围，我把时间增大及光锥体积增大的情景已经一并说了。

那么请大家继续再往下深想一步，既然现在发生的任何事件对将来的影响是“定域”的，那么曾经发生过的事情对现在的影响必然也是“定域”的。既然有了事件的将来光锥，那么同样也应该有事件的过去光锥，过去光锥代表的是过去发生的事件对现在的影响，我们画出图来：



【图8-9】

事件的过去光锥和将来光锥

事件的过去光锥刚好是把将来光锥倒过来放置，形成一个沙漏的形状。这个不难理解，打个比方就是只有8分钟前的太阳熄灭事件会影响到现在的我，2分钟前的熄灭事件不可能影响到现在的我。

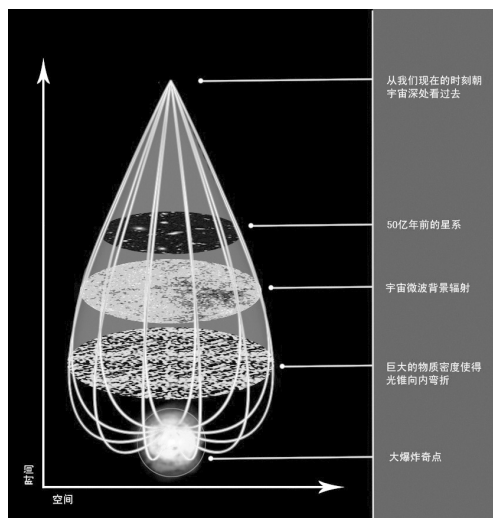
这下你明白国际物理年，同时也是纪念相对论诞生100周年的标志的含义了吗？（图7-12）

它就是一个抽象的事件光锥的全貌，喻示着物理学的过去与未来，这个事件光锥与 $E=mc^2$ 一样，都是相对论的标志性象征，它蕴含着深邃的宇宙奥义，足够你我用一生去慢慢回味。

闵可夫斯基的四维时空图和事件光锥的发现深深震撼了爱因斯坦。但同时他们两人心里都明白，这事肯定还没完，宇宙的奥义只是刚刚露出了冰山一角，四维时空图也只是一幅刚刚展开一点点的卷轴画，这幅卷轴画全部展开后，到底会在人类的面前呈现出一幅怎样的全景图呢？闵可夫斯基和爱因斯坦都怀着深深的好奇心，他们都迫不及待地想要一览卷轴中的秘密。这一年闵可夫斯基44岁，爱因斯坦29岁，他们一个沿着数学的思路，一个沿着物理的思路，继续发掘时空图中隐藏的秘密。

第二年圣诞节刚过，天气异常寒冷，闵可夫斯基和两个不满10岁的女儿亲吻道晚安，看着她们甜甜地进入梦乡。然后，他回到自己的书房，点亮台灯，迫不及待地开始了演算。最近他正为一些新的发现和计算结果感到兴奋不已，他觉得自己已经快要解决狭义相对论的缺憾了，那就是狭义相对论不能包含非惯性系的问题。突然，他感到中腹有隐隐的疼痛。闵可夫斯基并没有特别在意，他想可能是自己吃坏了肚子，没事，挺一挺就过去了。但是很快中腹的疼痛开始向右下腹转移，而且越来越剧烈，很快就疼得他掉下了大颗大颗的汗珠。他一声惨叫，妻子闻声跑过来，看到此情景吓坏了，立即把闵可夫斯基送往医院，但最终抢救无效，闵可夫斯基于三天后去世。科学界的一位重量级人物在正值创作力巅峰的时候突然陨落，实在让人感到万分遗憾。夺去闵可夫斯基生命的病症，其实就是在今天看来毫不起眼的急性阑尾炎，切除阑尾只是现代外科手术中最简单的一个，任何一个乡镇医院的外科医生都会做，然而它却夺去了闵可夫斯基的生命。若不是闵可夫斯基的意外身亡，第一个完整打开卷轴看到宇宙时空终极图景的人，很可能就不是爱因斯坦而是闵可夫斯基。

闵可夫斯基死后，他的生前挚友希尔伯特整理了闵可夫斯基的遗作，并且结集出版。爱因斯坦在看到闵可夫斯基的遗作后深受启发，最终一个人独立完成了广义相对论说。广义相对论发现了时空弯曲这个惊人的事实，后来爱因斯坦又从数学的角度推断出宇宙要么膨胀要么收缩，最后由美国人哈勃证实了我们的宇宙正在快速膨胀，从而，人类开始认识到宇宙是有一个开始的，并且很可能开始于一次恢宏的宇宙大爆炸。这些是我们在第五章最后已经了解过的内容，在这里重提此事，因为它事关时空的终极图景。下面，就让我来为你打开卷轴，让我们一览这个宇宙时空的终极图像。这是以爱因斯坦为首的广义相对论学家们和天文学家们苦苦追寻了几十年的图像，这是他们日思夜想、梦寐以求的图像：



【图8-10】
宇宙时空的终极图像

这就是我们这个浩瀚宇宙从最初到现在整个时空的终极图像。宇宙的未来还未发生，我们不敢妄言它的图像。现在请你跟我一起闭上眼睛，让我们一同想象一下你站在星空下，朝着宇宙的任何一个方向望去，你看到的既是浩茫的空间，也是深远的时间，天上星星发出的光芒跨越了漫长的时空到达地球。我们看得越远，看到的景象就是越早的。每当我们抬头看星空，看到的其实就是宇宙的历史。这个终极的宇宙时空图景看上去像什么呢？是不是很像一个坚果呢？比如一颗瓜子，一颗松子，一颗榛子。霍金为他的第二本科普巨著取名为《果壳中的宇宙》，他自己说书名是引用自《哈姆雷特》中的一句台词。然而每当我看到这幅宇宙时空图，总不禁感到，宇宙过去的时空也正像是个坚果的外壳，包裹着宇宙万物。从这个角度讲我们的宇宙是一个“果壳中的宇宙”，似乎也很贴切。

💡 神奇的四维

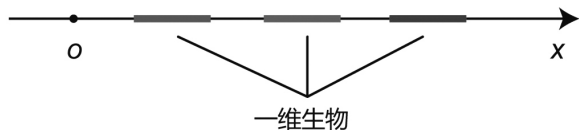
本章的内容就像是一首古典交响乐，由平静的序曲开始，逐渐进入主

题，然后达到高潮。现在本章的高潮已经来临，让我们一同来继续领略四维时空的奇景。

我们每个人都已经习惯了三维世界，所有的物体都有长、宽、高的基本属性，我们也很容易知道二维平面的图景，一幅画就是二维的，而一根线就是一维的。可是我们却怎么也想象不出来四维的物体长什么样，有什么特性。一个三维空间的正方体，我们很容易想象出它的样子，可是一个四维的正方体，我们称之为超正方体，或者一个超圆锥体、超圆柱体、超金字塔，你能想象出它们的样子吗？这似乎已经开始挑战我们的想象力极限了，但是不要怕，让我帮助你一步步地把四维物体的形象建立起来，我们从研究超正方体开始这段思维之旅。

在想象超正方体的形象之前，让我们先来研究一下维度之间的关系，每多一个维度意味着什么？会带来哪些变化呢？

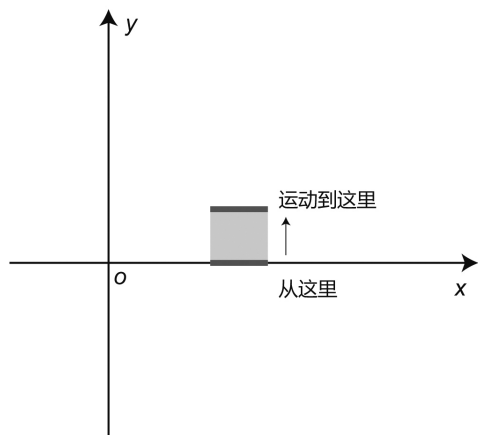
让我们先从一维的世界开始。如果这个世界是一维的话，那么这个世界的生物都是一根线段，只有长度，没有高度和宽度。它们的头尾各有一个眼睛，它们可以在 x 轴方向左右移动，但是永远也无法超越前面的人，要与隔着的一个“人”打声招呼都是不可能的，更不要说与别的同伴见面，他们只能通过与其相邻的“人”传话过去。一维生物的交流就永远只能是报数，一个挨一个地报过去。



【图8-11】

一维世界中万物都是一根线段

这个一维世界是一个狭窄得让人窒息的世界，在这个世界中自然不可能有任何形状的概念，一切都是线段。那么如果突然有一天，一根一维的线段获得了朝另外一个维度，也就是 y 轴方向运动的能力，那么它的运动轨迹会变成什么呢？让我们画个图来研究一下：

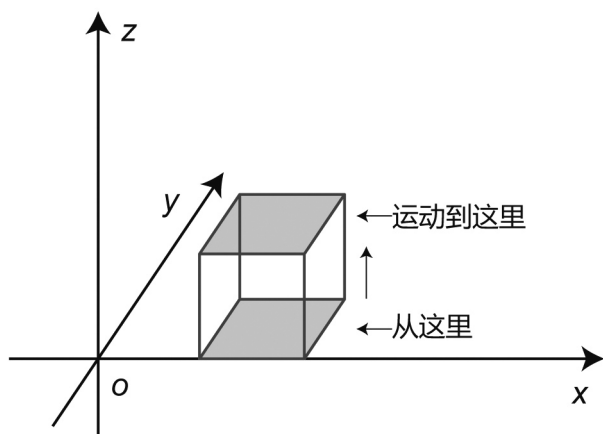


【图8-12】

一根一维的线段朝 y 轴方向运动一段距离后，轨迹形成一个正方形

一维线段只有 2 个顶点 1 条边，它在二维方向运动一段距离后，2 个顶点就多了一倍，变成了 4 个。我们把 2 个顶点运动前后的位置用线连起来，于是我们看到轨迹就形成了一个正方形，这个正方形有 4 个顶点 4 条边。一旦从一维的世界拓展到了二维的世界，整个天地豁然开朗，世界从一根只有长度没有高度的“线”突然变成了一幅“画”。在这个二维世界中，“人”可以任意游走和穿行其间，可以跨过相邻的同伴直接与别的同伴见面。如果一维生物有感知的话，它们会被眼前的奇景所震撼，做梦也想不到居然可以有如此宽广的天地，天地开阔了岂止两倍，并且这个二维世界中的物体再也不是只有长度区别的一根线段了，他们可以拥有如此复杂多变的形状，形状之多简直就是无穷无尽的。一个一维诗人在看到了二维世界的奇观后，带着他奇特的口音由衷地吟出这样的“诗句”：嘛叫宽广，界（这）就叫宽广。

然后，突然有一天，一个二维的正方形获得了在另外一个维度，也就是 z 轴运动的能力，那么它的运动轨迹又会变成什么样？让我们画出图来看一下：



【图8-13】

二维正方形朝第三个维度运动后形成正方体

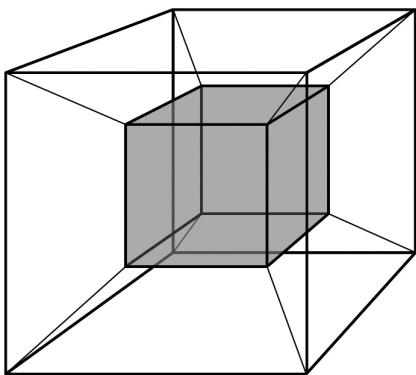
我们看到，一个二维的正方形在三维方向运动一段距离后，原来的4个顶点翻了一倍，在新的位置又形成了4个顶点。于是我们还是用老方法，把顶点在运动前后的位置连起来，于是形成了8个顶点和12条边（正方形本来有4条边，运动后在新位置又有4条边，然后定点连线再形成4条边，加起来刚好是12条边）的一个正方体。这个世界从二维的“画”变成了三维的空间，天地开阔了岂止百倍。如果生活在“画”上的二维生物突然来到了这个三维世界，再回看自己曾经生活过的二维世界的话，你觉得它会怎么想。它必定会被眼前的景象惊呆了：旧有的世界观一去不复返：原来我们以前那个世界是如此狭窄得令人窒息啊；原来我们认为是牢不可破的监狱根本无法关住犯人，一个犯人如果跟我现在一样能在第三维运动，只要轻轻一跨，就在看守们做梦也想不到的地方越狱了；原来我们以前那个二维世界的保险箱是如此的不保险，从我现在三维的角度看过去，一切都不再是保密的，保险箱内的东西全都一览无余，可以轻易取出来。眼前的这个三维世界实在宏大得不可思议，万物不仅仅只有形状，还有体积，无穷无尽的形体变化除了用“难以置信”去形容，实在找不出第二个恰当的词了。

霍金在《果壳中的宇宙》一书中风趣地说二维生物和三维生物的区别在

于，二维生物想要消化食物会非常困难，因为如果它们的嘴到肛门是被一根肠子联通的话，那么他们必然会被一分为二。其实别说肠子了，二维生物的血管会把它们分割成无数的小块，彼此不相连。

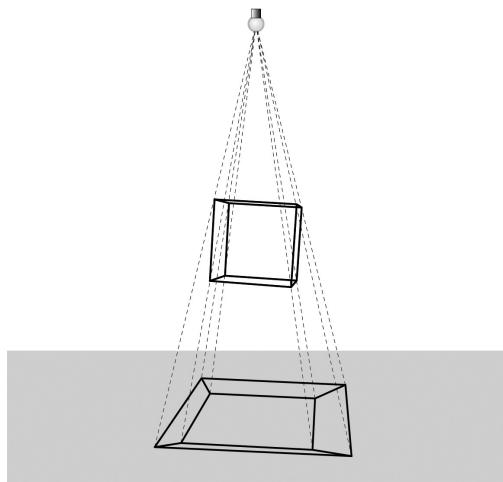
下面是重点来了，各位读者务必打起精神。

如果，突然有一天，一个三维的正方体获得了朝第四个维度运动的能力，那么它的运动轨迹会形成一个什么样的形状呢？虽然我们暂时无法在头脑中想象出来，但是根据之前的维度增加的经验，我们至少可以推断出，这个四维的超正方体必然有 16 个顶点（原位置 8 个顶点，运动后在新位置产生 8 个顶点），然后有几条边呢？在原位置有 12 条边，新位置又有 12 条边，然后把 8 个新老顶点连接起来又产生 8 条边，因此，这个超正方体就会有 $32(12+12+8)$ 条边。这样我们就得出结论：超正方体有 16 个顶点 32 条边。我们至少可以画出它在三维空间中的近似图，或者认为这是它在三维空间中的投影：



【图8-14】
超正方体的三维投影

看，这就是超正方体在三维空间的投影。哦，可能有些读者对投影的概念不是很理解，那么我画一个正方体在二维平面的投影图出来，你马上就理解了，这也会帮助你想象超正方体的真正形态：

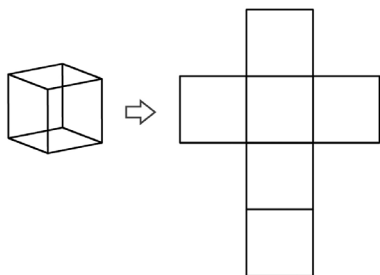


【图8-15】
正方体在二维平面的投影

从上面这幅图中，我们可以看到，物体的投影虽然并不是物体的真正形态，但是它能准确地体现出该物体的基本特征。请把两张图结合起来，然后，闭上眼睛，努力在脑中冥想一下，过一会儿告诉我你想到的四维超正方体的真正形态是什么样子的。

过了一分钟，你睁开眼睛，然后茫然地告诉我：“大哥，很抱歉，还是没想出来！”

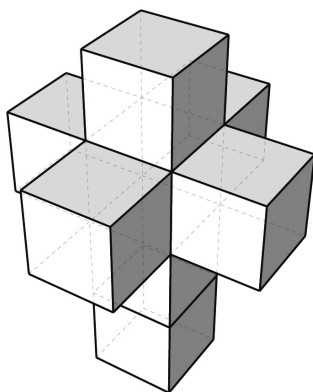
嗯，不奇怪，我料到了，这玩意儿确实不是太容易想。还好我留了一招后手，让我来继续帮助你做这个思维体操。下面我们来看看，如果你把一个三维正方体在二维平面上展开，会得到一个什么样的形状呢？换句话说，其实就是把一个纸板箱展开全部平铺在地面上，会是一个什么样子呢？我们画出图来看一下：



【图8-16】

正方体在二维平面展开的样子

一个正方体总共有6个面，注意看正方体的二维投影也是6个面，这个基本特征是相当准确的。把6个面展开，就得到了上图所示的样子，其实就是一个纸盒子剪开压平的样子。那么，你能不能画出超正方体在三维空间展开后的样子呢？三维到二维展开的关键是研究总共有多少个“面”，那么将四维在三维展开的关键就是研究总共有多少个“体”，我们从超正方体在三维空间的投影可以数出来，总共是8个“体”，这个基本特征是准确无误的，所以，超正方体在三维空间展开后的应该是这样的：



【图8-17】

超正方体在三维空间展开后的形态

现在，我要你再次闭上眼睛，把超正方体在三维空间的投影和展开图都在脑子里面过一遍，然后努力想象一下超正方体的真正形态，你能想象

得出来吗？

这次过了整整五分钟，你睁开眼睛，还是一脸茫然地告诉我：“大哥，还是想象不出啊！”

别难过，其实我跟你一样，也想象不出来。这种状况，就跟三维世界中的我们去跟一个二维世界的人讲解什么是正方体一样。在二维世界中，只有正方形，没有正方体，你费尽口舌，举了无数例子，从三维正方体在二维上的投影讲到三维正方体在二维平面上的展开，然后再画出正方体在二维平面上的投影以及展开图，希望通过类比的方法让二维人想象出正方体的真正形态，口水都讲干了，可是，二维人仍然茫然地看着你，摇摇头说：“大哥，还是想象不出来。”其实，在对超正方体的想象力上，我们比那个可怜的二维人好不了多少。当一个二维人有一天终于能看到三维的世界后，他的震惊该是多么巨大，他除了不停地重复“难以置信”这个词以外，实在找不出其他恰当的形容词了。

其实我们人人都生活在四维时空中，从理论上说，我们每时每刻都在时间这个第四维上运动。但问题是，时间这个维度是单方向的，因此我们无法回头看见过去的自己，从而也无法感受到四维空间之大。但是，难道就不能有第四个空间维度存在吗？时间可以看成是第五维，四维时空变成了五维时空。如果真有第四个真正可以正反两个方向运动的空间维度，那么我们三维人是真的有可能跨出我们这个世界的“画”，从第四个空间维度俯瞰我们这个世界，请想象一下我们将面对的将是怎样一番令人难以置信的奇景呢？

天地之大，你该如何用语言去形容四维空间的宽广呢？我真的是无法形容出来，但是好在有比我高得多的高手，刘慈欣先生在他的《三体3·死神永生》中对四维空间的奇景有着惟妙惟肖的描述，其逼真感和现场感令人叹为观止，如果你有兴趣想对四维空间有进一步的认识，不妨读读此书。

如果真有第四个空间维度，那么为什么就不能有第五个、第六个，以至于无穷多个空间维度呢？发出同样诘问的人不仅仅是我，也有全世界许多著名的物理学家，恰恰是这个诘问引领现代物理学家，打开了基础理论

物理研究的一个全新领域。按照目前最新的理论，我们这个宇宙在诞生的时候总共有十个维度，其中有九个空间维度，一个时间维度。经过百亿年的演化，现在六个空间维度已经蜷缩在了微观世界中。关于这个话题，我们在本书的最后一章还要再次讨论，那又将是一段充满挑战的思维之旅。

好了，关于时空的旅程到此就正式结束了，结束这段时空之旅的同时，我们关于相对论本身是什么的话题也就全部讲完了，我希望这十多万字阅读下来，你终于对相对论有了一个基本的认识，不再觉得相对论很神秘，很难懂了。

但是，相对论结束了，物理学并没有结束，我们的书也还没有结束，因为，好戏还在后头。最后两幕大戏上演之前，我必须先来带你认识一下爱因斯坦的世界观、宇宙观。爱因斯坦对这个宇宙的认识有“一个中心，两个基本点”，先说两个基本点。

第一，爱因斯坦认为这个宇宙是“定域”的。这个概念我们在本章前面刚刚讲到过，也就是说一个事件的将来光锥决定了这个事件对时空的影响范围，而它的过去光锥决定了什么样的时空范围可以影响到这个事件本身。过去光锥和将来光锥都是有大小和形状的，也就是说这个宇宙是一个定域的宇宙，任何事件之间都不可能超越这个范围而相互影响。

第二，爱因斯坦认为这个宇宙是“实在”（客观存在）的。宇宙万物的运动规律独立于观察者而存在，不论是否有人存在，皓月星辰、茫茫星海，它们的运动是一个客观存在。不管是在人类诞生之前，还是人类灭亡之后，宇宙仍然是在按照它自身的发展规律一丝不苟地演化，用宇宙自己的话说就是“我膨胀也好收缩也好，与人类何干”。

围绕着这两个基本点，爱因斯坦还有一个中心思想，那就是“因果律”，宇宙万物有果必有因，有因必有果。宇宙从大爆炸开始的那天起，就在朝着确定无疑的方向演化，不管我们知道也好不知道也好，宇宙的未来早已经就是一本写好的剧本，宇宙必然会按照剧本的要求丝毫不差地演化下去。

爱因斯坦虽然用相对论改写了牛顿物理学，但是在因果律这个基本宇宙观上，爱因斯坦和牛顿是一模一样的。牛顿认为，如果我们能够知道

某一时刻宇宙中所有物体的运动状态，那么只要拥有足够强大的计算能力，我就可以确定无疑地计算出宇宙的过去和未来，分毫不差。爱因斯坦的名言是“宇宙最不可理解之处在于它是可解的”。爱因斯坦经常喜欢拿上帝来说事，还经常称呼上帝为“老头子”，但爱因斯坦实际上是一个彻底的无神论者，他口中的上帝其实指的是斯宾诺莎（西方近代哲学史上最著名的理性主义者，对西方科学思想影响深远）的“上帝”，那就是——宇宙规律本身。

爱因斯坦还有一句名言：“上帝不掷骰子！”这个宇宙万物的演化规律不是靠每次掷骰子得出的随机点数来决定的，“老头子”是一个一丝不苟的人，他过去从没有犯过错误，将来也不会犯错误，宇宙的剧本早已定稿。从这一点上来说，爱因斯坦和牛顿都是属于经典的，他们心中的宇宙是经典的宇宙，是一个温暖、有秩序、一丝不苟的宇宙，或许这也是我们大多数人心目中的宇宙。

然而，我们的宇宙真是爱因斯坦心目中那个温暖的宇宙吗？爱因斯坦心目中的上帝真是他希望的那个一丝不苟的上帝吗？伟大的相对论难道就没有一点破绽吗？自从 20 世纪以来，人类在研究微观世界时发现了一系列令人费解的实验结果，从此诞生了理论物理学另外一个重要的分支——量子物理学。爱因斯坦曾是量子物理学的奠基人之一，然而后期他自己又对量子物理学发出了一系列的诘难。他亲手设计了一个试图推翻量子物理学基本理论“哥本哈根解释”的思维实验，因为哥本哈根解释让上帝从一个温文尔雅的君子变成了一个疯狂的赌徒。这个著名的思维实验被称之为 EPR 实验，以爱因斯坦、波多尔斯基和罗森三个人名字的首字母命名。为什么只能在思维中进行呢，那是因为当时，人类的技术水平还发展不到实验要求的精度。但是在爱因斯坦死后 27 年，也就是 1982 年，人类终于突破了技术难关，具备了把 EPR 实验从思维中搬到实验室的能力，于是，我们将看到人类对爱因斯坦的上帝进行了审判。“老头子”到底是一个和蔼慈祥的绅士还是一个捉摸不定的赌徒，答案将在下一章揭晓。

第八章

CHAPTER EIGHT

上帝的判决



上帝玩不玩骰子？

1982年，法国，巴黎，夏秋之交。

第12届世界杯足球赛在西班牙刚刚结束没多久，全法国都还沉浸在比赛的余热中。普拉蒂尼率领的法国队被称为史上最强的“黄金一代”，他们一路凯歌高奏，杀入半决赛，遇上了老冤家西德队。90分钟后1:1打平，不分胜负，比赛进入到加时赛，幸运女神一开始站在法国人这边，特雷佐和吉雷瑟在8分钟内连入两球，整个法国开始提前庆祝胜利。然而，具备钢铁意志的德国人开始了绝地反击：第102分钟，鲁梅尼格在禁区内抽射扳回一球；第108分钟，费舍尔用一记精彩的凌空倒勾射门将比分扳平，3比3！法国人还没有在惊愕中回过神来，比赛已经进入到残酷的点球大战。这一次，幸运女神眷顾了德国人，舒马赫扑出了法国队最后一个点球，而赫鲁贝什的劲射破门为德国队锁定胜局，法国队止步半决赛。整个法国在比赛结束后整整沉默了5分钟，所有人都不敢相信眼前的事实。

世界杯的热潮还没有完全褪去，球迷们还在夜以继日地在酒吧谈论普拉蒂尼，谈论点球大战。“只是，有多少人知道，在不远处的奥赛光学研究所，一对对奇妙的光子正从钙原子中被激发出来，冲向那些命运交关的偏振器，我们的世界，正在接受一场终极的考验……”（引自曹天元著《量子物理史话》）爱因斯坦信奉的上帝正在接受一场终极审判，他信奉的“定域”、“实在”、符合“因果律”的经典温暖的宇宙，正在接受一次严苛的洗礼。它会浴火重生，披上更为耀眼的金色铠甲呢？还是被揭开慈祥严谨的面具，突然变成一个阴晴不定、捉摸不透的赌徒呢？

已经过世 27 年的爱因斯坦的神灵和过世 20 年的玻尔（量子物理学奠基人之一）的神灵，也在天国注视着这场实验，他们俩在世的时候，就不断争论，使得爱因斯坦和玻尔旷日持久的争论成为物理学史上最重要的一段史话。此刻，俩人一见面，老毛病又犯了。

爱因斯坦：“玻尔老弟，看着吧，这次的实验结果会让你闭嘴的。跟你说过多少次了，上帝不玩骰子。”

玻尔：“老爱，你也看着吧，这次实验会让你明白这样一个基本道理——别对上帝指手画脚。”

这到底是一场怎样的实验？为什么连他们都赶来凑热闹？为什么说这次实验是一次对上帝的审判？要把这些问题回答得让你满意，我们就必须耐着性子回顾一下量子物理学的发展简史。如果说相对论让你对宇宙规律充满惊奇和敬畏的话，那么量子物理学则必定让你对宇宙规律充满茫然和困惑，甚至还会发火。玻尔有一句名言：“如果你不对量子物理学感到困惑，那说明你没有搞懂量子物理学。”

美剧《生活大爆炸》

故事由美剧《生活大爆炸》开启，让我们从《生活大爆炸》第一季第一集的第一秒开始，来重温一下这部经典美剧：

我相信大多数看过生活大爆炸的读者，都已经忘记了这位天才剧作家为整部戏的开端设计的台词到底是什么了，或许你根本没有在意当时谢耳朵一边上楼一边在唠叨些什么。下面，我把经过我改良后的中文翻译和英文原文对照着列出来，一起重温谢耳朵在最开始说的几句台词：

So if a photon is directed through a plane with two slits in it

如果一个光子通过有两个狭缝的平面，

and either slit is observed,

只要观察了其中的任意一个狭缝，

it will not go through both slits.

那么光子就不会同时通过两条狭缝。

If it's unobserved, it will.

但如果不进行观察，那它就会同时通过两条狭缝。

However, if it's observed after it's left the plane,

然而，即便光子是在离开平面（狭缝后）后，

but before it hits its target,

在击中目标之前被观察了，

it won't have gone through both slits.

它居然也不会同时通过两个狭缝。

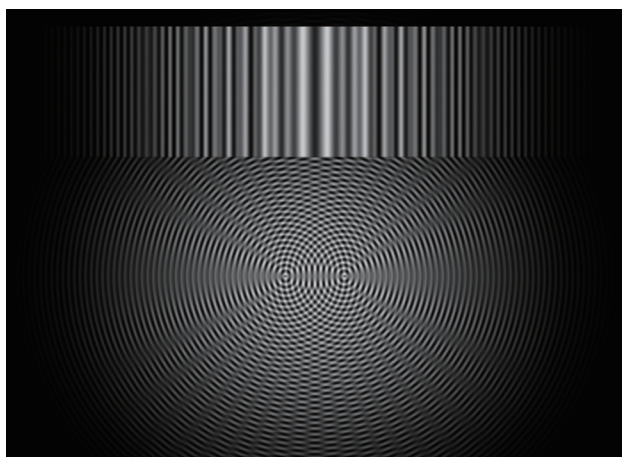
我知道你已经很努力地逐字逐句地读了这段话，但是你仍然无法完全理解谢耳朵到底在说些什么。知道我是怎么猜到的吗？因为我看到你没有发火，也没有发疯，说明你并没有读懂上面这段台词的真正含义，否则你要么会发火，要么会发疯，至少要感到困惑。



要命的双缝

谢耳朵说的其实是物理学史上非常非常非常著名的“杨氏双缝干涉实验”。这个实验虽说不如 MM 实验那样在物理学史上具有分水岭的意义，但我敢跟你保证，任何一本讲量子物理学历史的书籍，这个双缝干涉实验都是必定被提及的，不但是必定提及，而且还会一而再再而三的提及。这个实验最早是在 1801 年被一个叫作托马斯·杨的英国医生（他同时也是一个物理学家）做出来的，当时他做这个实验的目的是为了向世人证明光是一种波而不是一种微粒，这个实验非常有力地证明了光具有波才具备的自我干涉性质。现在的高中物理都会做到这个实验（图3-2）。

光因为是一种波，所以在通过双缝之后，会发生干涉现象，从而在屏幕后面形成明暗相间的条纹，这个现象具备高中物理知识的人都可以明白。如果刚好你对高中物理忘得差不多了，那么我再把这个明暗条纹产生的原理图画出来，帮助你回想一下：



【图9-1】

双缝干涉实验原理图

迈克尔逊和莫雷也正是利用光的这种自我干涉现象，设计了著名的 MM 实验，试图通过干涉条纹的移动来证明光在不同方向上的速度不同，MM 实验最终导致了伟大的相对论的诞生。那么这个看似普普通通，现在每个高中生都做的双缝干涉实验中到底藏着什么玄机，让谢耳朵念念不忘呢？那是大大的有门道。这个实验刚开始并没有在物理学界引起多么巨大的轰动效应，但是随着人们对光、原子、电子的进一步认识，这个实验开始逐步引起越来越多的物理学家的关注，直到最后引发了空前的全“民”大讨论，整个物理学界开始为这个实验抓狂（用抓狂来形容一点都不过分）。于是这个实验在它被发明的一百多年后，再次成了整个物理学的中心，甚至成了现代量子物理学开端的标志性实验，大物理学家费曼（就是我们讲时间旅行时提出多历史假说的那位）写道：“双缝实验包含量子物理学的所有秘密。”难怪《生活大爆炸》的剧作者要在第一集的第一秒，迫不及待地提到它。

还记得那个物理学的奇迹年吗？1905年，爱因斯坦接连发表了5篇传世论文，其中第一篇不是关于相对论的，而是叫作《关于光的产生和转化的一个试探性观点》，我们一般简称为“爱因斯坦关于光电效应的那篇论文”（貌似一点都不简）。在这篇论文中，爱因斯坦解决了困扰物理学界多年的一个问题，那就是为什么光会在金属上“打出”电子来——光电效应。爱因斯坦的观点认为光是由一个个的“光量子”（简称“光子”）组成，这

些光子聚集在一起，表现出波的特性，但是单独来看，它又具备粒子性。这就是现在每个高中生都知道的光的“波粒二象性”。换句话说，光既是粒子又是波，爱因斯坦因为这篇论文在1921年获得诺贝尔物理学奖。

光既是粒子又是波，你在读到这句话的时候不感到奇怪，是因为你对“波”和“粒子”并没有感性认识，但是如果我说“XX既是猫又是狗”“XX既是石头又是金子”“XX既是活的又是死的”，你一定会大声说“荒谬”“脑子坏掉了吧”。在上世纪初，许许多多物理学家听到“光既是粒子又是波”，与你听到“XX既是猫又是狗”时感到荒谬是一模一样的。在物理学家的眼里，波就是波，粒子就是粒子，两者截然不同。比如说水波吧，水分子的上下振动引发了波纹，这个波纹只是表示能量的传递，并不是一个真实的客观实在的物体；再比如说声波，也只不过是空气分子振动形成的而已，除了空气分子和传递的能量外，再也没有别的什么东西。水波和声波都不可能是一个个实实在在的小球在水中、空中飞来飞去。那时候的物理学家坚信，光如果是一种波，就必然要在一种叫作“以太”的介质中传播，并没有什么真正的客观实在的“光”，它只不过是“以太振动”在人们眼中造成的效应而已。

然而随着各种各样的实验被设计出来，随着理论物理研究的深入，物理学家们终于开始接受，原来波的产生并不是一定要有介质，以太是不存在的，在真空中光波也能传播，而且光波中真的含有数量无比巨大的光子，单个光子的行为看起来就像是一个经典粒子的行为，但是聚集在一起，就形成了波。当这个观点被越来越多的物理学家接受的时候，突然有人站出来问了一句：“那么请问，在双缝干涉实验中，单个光子到底是通过了左缝还是右缝呢？”

本来喧闹欢腾的场面突然安静下来，每个人都开始思考起这个问题。很快，物理学家们都意识到，这下好了，物理学的真正麻烦来了，这个问题就像是打开了阿甘的巧克力盒子，从此物理学界陷入迷惘、混乱、猜疑、神秘之中，有人愤怒，有人抓狂，有人绝望，有人欣喜，有人趁火打劫，有人面壁思过，这场混乱一直持续到今天都没有停歇。

“那么请问，在双缝干涉实验中，单个光子到底是通过了左缝还是右

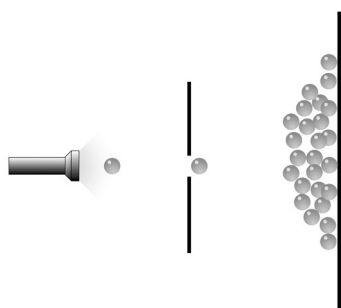
缝呢？”

这个普普通通、简简单单的问题到底意味着什么？是什么力量使基础理论物理中经典世界观陷入了万劫不复的深渊呢？让我给你详细解说这个问题对物理学家们造成的震撼。

一束光如果只通过一条狭缝，那么在屏幕上不会产生干涉条纹；如果通过两条狭缝，则会产生干涉条纹。请你想象一下，假如我们把一束光看成是由亿万万个光子聚合而成，每一个光子就像一个小球（当然光子并不是一个小球的形状，只是打个比方，并不影响我们对问题的探讨），当其中一个光子遇到了狭缝的时候，按照我们朴素的观念，这个光子要么通过左缝，要么通过右缝，二者必选其一。但问题是，当一个光子通过左缝的时候，它是如何知道还有另外一条右缝的存在呢？光子只是一个无生命的小球，它可不像人，在快飞到狭缝的时候用眼角的余光扫一眼就知道边上是否还有一道缝隙，如果看到还有一道缝我就这么飞，如果没有另外一道缝，我就那么飞。

你可能还没听懂，没关系，我来画图讲解，这个事情我必须要喋喋不休地说到你完全听明白了才能罢手，这事关整个量子物理学的理论根基，绝不能含糊过去。

现在我们先在平面上开一条缝，看看如果只有一条狭缝的情况下，光子会怎么通过这条单缝：



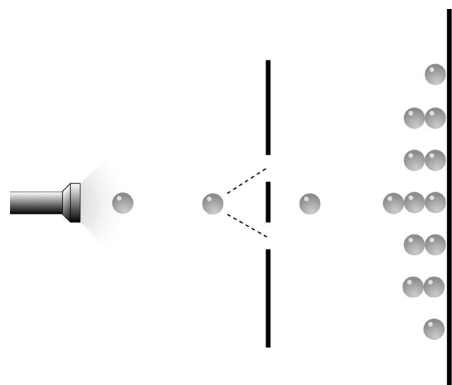
【图9-2】

光子通过单缝时，随机落在屏幕后面的一片区域内

如果我们做一个简单实验，很容易就发现这是所谓光的“衍射”现象，一束光通过一条狭缝照在后面的屏幕上，会形成一片光亮区域，离狭

缝越近的区域越亮，离狭缝越远的区域越暗。上面这幅图中我们用了一种很直观的比喻，把光子看成一个个小球，它们通过一条狭缝后，并不是走直线，而是根据概率分布在屏幕上，中间多两边少。

但是，一旦在那条狭缝的边上再开一条狭缝，情况马上会变得很神奇，我们会看到光子就像一支训练有素的军队，排成了整整齐齐的队形。

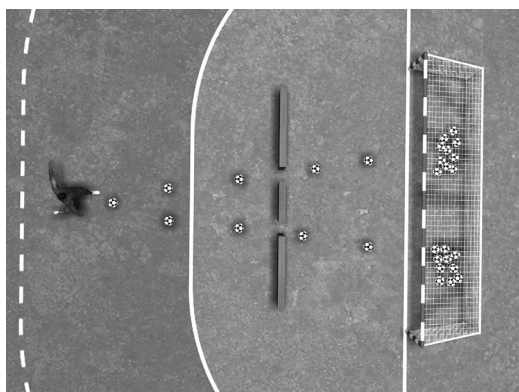


【图9-3】

如果是双缝，光子在通过双缝后会规则地排列在屏幕上

这个事情确实有点神奇。光子会排列成整齐的队形也就算了，毕竟可以用波的干涉现象去解释；但是单个光子在通过了左缝的时候如何知道有右缝的存在，通过右缝的时候又如何知道有左缝的存在呢？你要知道，相对于光子的尺度来说，双缝之间的距离就好像从地球到月球一样远。把这个问题问得更简洁一点，就是：单个光子到底通过了左缝还是右缝？

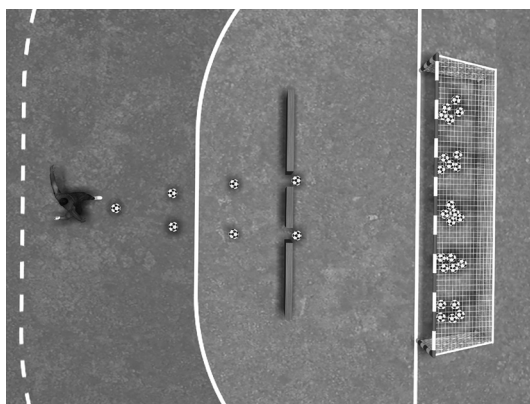
我怕你还是没有搞清楚这个事情有多怪异，为保险起见，我再来打个比方。假如你是一个足球运动员，在球门和你之间竖着一道开了双缝的墙，然后你开始对着两条缝射门，你觉得会呈现出怎样一幅情景？是不是下面这幅图显示的那样：



【图9-4】

你对着双缝的墙射门的场景

但是现在，如果你脚下踢的不是足球，而是一个个光子，就会呈现出下面这样怪异的图像：



【图9-5】

如果用光子当足球，会射成这样

如果在现实生活中看到这样的情景，你是不是会觉得太怪异了，就像玩魔术一样？难道这竟然是真的？这是为什么呢？

玻尔的上帝

以丹麦物理学家玻尔为首的哥本哈根学派站出来跟大家解释道：“这个问题本身不成立！光子既不是通过左缝，也不是通过右缝，而是同时通过了左缝和右缝。”注意，这里玻尔可并不是指光子会分身术，一分为二，一半通过了左缝一半通过了右缝，他说的意思很明确，就是指同一个光子同时通过了左缝和右缝。

对，你没有听错，这确实是从严谨的物理学家嘴里说出来的话。请相信我，就在你感到莫名其妙的同时，我也跟你一样感到无法理解，量子的所有行为几乎都不是正常思维能够理解的。按我们惯常的理解，爱因斯坦和玻尔两人可以同时分别位于德国和丹麦，或者他们可以今天位于德国，明天位于丹麦；但是如果你告诉我爱因斯坦同时位于德国和丹麦，玻尔同时通过了凯旋门和埃菲尔铁塔，我一定会认为你脑子坏掉了。

当哥本哈根学派这么站出来解释的时候，同样也是冒天下之大不韪。大多数物理学家起而攻之，尤其是爱因斯坦，对玻尔连连摇头叹息，说玻尔丢掉了最基本的理性思想。还有某位最激烈的物理学家，说如果哥本哈根学派的解释是对的，他宁愿改行去当医生，从此不再搞物理了。

你可能会想，大家何必吵吵闹闹呢？光子到底通过了左缝还是右缝，我们在实验室里仔细观察一下不就好了吗？与其坐而论道不如实际行动，去做个实验不就知道了吗？你的想法完全没错，物理学家们也都这么想，只是这个实验的难度远远超过人类的想象。光子可不是一个足球，天下还没有那么强大的摄影机能把光子的飞行轨迹录下来，也不可能光子身上绑一个微型跟踪器，然后全天候跟踪。再说得深一点，你想想我们为什么能“观测”到一样东西？照相机、摄像机为什么能把物体的影像拍下来，本质原因在于物体发射出无数的光子，或者反射出无数的光子，这些光子在我们的视网膜或者底片上成像，于是被我们“看”到。但如果我们要“观测”的对象就是光子本身，那麻烦可就大了，这个光子如果射到了我们的眼睛里，那它就自然不会跑到左缝那里去，也不会跑到右缝那里去（跑到我们眼睛里来了）。那有没有可能反射别的光子？很抱歉，不能，别

的光子跟它长得一样大，能量一样强，它没有能力把别的光子反射出来而自己的运动又不改变，就好像一粒子弹无法把另外一粒子弹给反弹出去一样。总之要“观测”光子通过左缝还是右缝这个事情，基本上，很难。

但物理学家毕竟是物理学家，他们的探索精神不是常人能比的。他们很快发现，光有双缝干涉现象，一束电子流同样也有双缝干涉现象，一束电子流跟光一样具备波粒二象性。记录和测量电子就比测量光子容易得多了，因为电子不但有质量，而且带电，大小也比光子大得多。我们大可以在双缝上各安装一个用来观测和记录的仪器，来观察电子有没有通过这道狭缝。于是，很多物理学家都是为了证明哥本哈根解释有多荒谬，不辞辛劳地苦苦改良实验设备，一次次地提高精度，没日没夜地在实验室挥汗如雨。他们想拿到明确的证据，来说明在双缝干涉实验中，电子是确定无疑地通过了某条缝隙。

但结果怎样呢？好在我们的物理学家们都有诚实客观的本性，尽管他们是如此地厌恶哥本哈根解释，但是全世界的物理学家都不得不承认，他们的实验表明：

一旦在狭缝上装了记录仪，他们确实可以观测到电子通过了某条狭缝；但怪异的是，一旦电子被观测到了，双缝干涉条纹也就消失了，如果不去观测，双缝条纹又会神奇地出现。这就好像在那个用光子当足球踢的实验中，一旦有人在某个墙缝上看到了足球，足球就不再会整齐地落在网的固定位置，而一旦没有人去看足球到底飞过了哪个墙缝，足球又会神奇地出现在那些固定位置上。这事实实在是太怪异了，物理学家们怎么也想不通，电子的行为怎么还跟观测有关？一旦观测，它就只通过一条狭缝，不产生干涉条纹；不观测，它就同时通过（看来只能这么理解了）两条狭缝，留下干涉条纹，这实在太不可思议了。再打个比方，如果你用一杆冲锋枪瞄准了标靶，然后把冲锋枪用装置固定住，让枪自动开枪射击，枪枪都正中靶心，你很满意。于是你换上由电子制成的子弹，再次开枪射击，但是怪异的事情出现了：如果你盯着标靶看的话，枪枪都命中靶心，可是一旦你背过身去，不看靶子，打了一梭子之后，你转头一看，发现子弹以靶心为圆心成散状分布。你以为枪的固定装置出了问题，于是再盯着靶

子打一次；这次又是枪枪命中靶心，当你再次转过头去开枪，子弹又开始“乱打”了。这事已经远远超出了怪异的范围，简直是让人抓狂。还记得爱因斯坦的世界观说的一个中心两个基本点吗？一个中心是“因果律”，两个基本点是“定域”和“实在”。现在“实在”这个爱因斯坦的理想宇宙的基本点遭到了严重的怀疑，这个实验居然再三向物理学家们展示：电子的行为跟我们的观测有关。电子似乎不再是一个超脱于我们意识而存在的“客观实在”，它似乎是为我们而存在，为我们而表演，它的行为受我们“看”与“不看”影响，爱因斯坦的世界观遭受到第一次最直接的冲击。

玻尔领衔的哥本哈根学派此时又站出来跟大家解释说：“实验结果大家都看到了，我们也反复地做了电子的双缝干涉实验，结果都是一样的。这说明电子必须符合‘不确定原理’，也就是说电子的运动轨迹是不确定的，它的运动轨迹不能用一根线来表示，只能用一朵概率云来表示。我们在观测之前永远无法说出电子的确切位置，只能说出它在某一个位置的概率。当我们观测到电子以后，电子虽然处于确定位置，但它是怎么到这个位置、通过什么路径来的，我们仍然不可能知道。事实上这个电子同时存在于那朵概率云中的所有位置。而且，我们对电子的位置测量得越精确，对它的速度就必然测量得越模糊，测量行为本身就会影响电子的运动。反之，我们对它的速度测量得越精确，对它的位置就必然测量得越模糊。换句话说，我们永远不可能同时知道一个电子的位置和速度。因此不确定原理也可以叫作‘测不准原理’”。

如果牛顿地下有知，听到了玻尔的这段话，必然会蹦出来大骂玻尔离经叛道。牛顿是坚定的决定论者，他认为只要知道了某一时刻的所有信息，就能预言未来发生的一切。然而现在玻尔很无情地告诉牛顿：对不起，你连最基本的速度和位置信息都是永远无法同时准确地知道的，又何谈计算和预测呢？爱因斯坦也站出来反对说：“玻尔先生，很抱歉，本人实在不喜欢你们的这个解释，没有确切的运动轨迹，只有概率，这叫什么解释？你以为上帝是一个喜欢掷骰子的赌徒吗？时间和空间都被你们拿到赌桌上来碰运气了！”

双缝实验做到这一步已经够疯狂的了，居然引出了一个“不确定性”

原理：物质的最基本构成——电子，以及所有跟电子差不多大小的基本粒子的行为都是不确定的，我们要么只能知道他们在什么地方，要么只能知道它们的运动速度，想同时知道两样，想都别想。但接下去的实验进一步告诉我们这样一个道理：在量子的世界，没有最疯狂，只有更疯狂。物理学家们又几乎同时发现了一个更“恐怖”的结果：哪怕你是在电子已经通过了双缝之后再去观测电子实际通过了哪条狭缝（这里的原理比较复杂，我们在这里不需要去搞清楚具体是什么样的观测手段，总之你只要知道物理学家们有巧妙的方法可以观测），只要一观测，干涉条纹就消失了。也就是说哪怕你在电子通过了双缝之后再观测，电子也不再同时通过双缝；而只要不观测，电子又同时通过双缝了，让电子同时还是不同时通过双缝是在电子实际通过以后再决定的。

诡异，诡异，真是太诡异了！这个实验结果直接违背了爱因斯坦信仰的“因果律”，本来事情的原因影响结果，结果是原因导致的，现在好了，事后观测行为居然影响到了电子之前做出的选择，这岂不是变成了结果影响原因了吗？难道历史是可以改变的吗？（费曼辩护说，不是历史可以改变，而是历史本身就是有无数个，可能发生的历史实际上都已经发生了，很多人听完当场昏厥在地）这严重违背因果律，严重离经叛道。

哥本哈根学派继续解释说：“在我们看来，没有什么真正的因果，只有‘互补原理’，原因和结果是一种互补关系而不是先后关系，你我既是演员又是观众，观测者和被观测者互相影响，形成互补关系，原因会影响结果，结果也一样会影响原因。”

爱因斯坦这次是真的坐不住了，他写了一系列文章，还在公开会议上和玻尔辩论。他认为玻尔已经从一个物理学家变成了一个形而上的哲学家，玻尔的理论哪里像是物理学，简直就是一种哲学，还是带伪字的。爱因斯坦虽然对实验结果也同样感到震惊，但他认为一定会有一个温暖的符合经典世界观的理论去解释这些现象，只是我们还没找到这个理论罢了。另外，他对物理学家的实验方法也提出了一些质疑，认为所有的实验结果只能作为一种统计近似，并非是颠覆自己所信仰的“因果律”和“实在性”的直接证据。

但不管怎么说，这个双缝干涉实验，对爱因斯坦一个中心两个基本点中的两项内容都造成严重冲击。整个物理界发生大混乱，从此狼烟四起，天下不再太平。要知道，这世界的所有物质从本源上来说，都是由基本粒子，也就是量子构成的，如果量子是不确定的，那么是不是由量子构成的我们也是不确定的呢？最惊人的一次实验是 1999 年由一组物理学家在奥地利做的，他们用 60 个碳原子组成了一种叫“巴基球”的东西，用这个巴基球来模拟双缝实验，结果他们同样得到了神奇的干涉现象。现在的科学家们设想用更大的病毒来做双缝实验，病毒从某种意义上来说，已经是生命体了，它们或许具备“意识”。不知道他们会如何体验这种同时通过双缝的感觉。此时，我再把谢耳朵的话写出来给大家回顾一下，你是否能看懂谢耳朵的唠叨了呢？

So if a photon is directed through a plane with two slits in it

如果一个光子通过有两个狭缝的平面，

and either slit is observed,

只要观察了其中的任意一个狭缝，

it will not go through both slits.

那么光子就不会同时通过两条狭缝，

If it's unobserved, it will.

但如果不进行观察，那它就会同时通过两条狭缝。

However, if it's observed after it's left the plane,

然而，即便光子是在离开平面（狭缝后）后，

But before it hits its target,

在击中目标之前被观察了，

it won't have gone through both slits.

它居然也不会同时通过两个狭缝。

这次我相信你一定看懂了，不但看懂了，而且开始感到抓狂了。很显然，我们每个普通人心目中的那个朴素的宇宙观受到了冲击，这种感觉和爱因斯坦是一样的。但好在，爱因斯坦还保有自己最后一块神圣不可侵犯的领地，那就是“定域性”：这个宇宙是定域的，不存在什么超光速的信

号，光速是一切运动速度的极限；两个事件之间想要产生相互影响，必然不可能突破光锥所划定的时空范围。

然而事情真的像爱因斯坦认为的那样吗？这最后一个定域性的堡垒真的有那么坚固吗？

EPR实验

1935年5月，爱因斯坦同美国两位年轻的物理学家波多尔斯基和罗森在美国第47期《物理评论》杂志上，发表了题为《能认为量子力学对物理实在的描述是完备的吗？》的论文，在物理学界、哲学界引起了巨大反响。

这篇论文提出了一个名垂千古的思维实验，以论文的三位联合作者的首字母命名，称为“EPR实验”。正如这篇论文的标题所表达的意思那样，爱因斯坦想用这个思维实验告诉物理界，哥本哈根的量子力学解释是有问题的。这个实验简单说来是这样的（注意，我在这里把它通俗化了，略去了很多术语和数学公式，但是精髓大差不差）：

想象一下，如果有一个基本粒子在空中飞着，突然，在某一时刻因为某种外力一分为二，分裂成了两个更小一点的A粒子和B粒子，于是A、B两个粒子就分开了，而且越飞分开得越远。当它们分开得足够远的时候，我们去观测A粒子的“自旋”（基本粒子都有自旋的特性），我们可以确定其自旋的方式。此时，根据大家都公认的某个守恒公式，我们可以知道，A粒子如果是“左旋”的，那么B粒子必定是“右旋”的，否则就会违反守恒，而违反守恒是不可想象的。那么我想请问玻尔先生，如果量子的运动按你们的所谓“不确定原理”讲的，在我们观测A粒子之前，是不确定的，那么A粒子的自旋方式一旦确定是“左旋”的时候，B粒子是怎么知道自己必须是“右旋”的呢？它们之间难道会有超光速的信号在通讯吗？还是说，你要用神秘主义的语气告诉我，说两个量子之间存在某种“心灵感应”呢？不能自圆其说了吧，傻眼了吧？让我来告诉你吧，唯一的可能性就是，这个基本粒子在分裂的那一刹那，A、B粒子的自旋方向就是已经确

定了的，不管我们观测到A粒子是左旋还是右旋，这个观测行为并不会影响到A、B粒子早就已经确定了的自旋方向。玻尔先生，如果你想证明你的不确定性原理是正确的，请先帮我把超光速这个事情解释清楚吧，请先推翻我的狭义相对论吧。

大家要知道，在讲出上面这番话的时候，已经是狭义相对论发现20年后了，狭义相对论已经得到了无数严苛实验的验证，是久经考验的坚强战士，没有人再怀疑它的正确性。玻尔在听到这个EPR实验之后确实大吃一惊，据说茶饭不思好多天。隔了几个月后他终于出声了，居然以同样的标题写了一篇论文，来回应爱因斯坦们的挑战。简单说来（抱歉我只能“简单说来”，复杂了我也说不来），玻尔说狭义相对论我是不反对的，但是这里面的关键问题在于，粒子A和粒子B在你爱因斯坦看来是不同的两个粒子，但是在我玻尔眼里，它们从未分开，它们仍然是一个完整的整体，不论它们相隔得有多远，它们都是一个整体，两个量子是难分难解地纠缠在一起，组成了一种量子纠缠态，这种纠缠与空间距离无关，哪怕它们分别位于宇宙的两端，它们也是纠缠在一起的。因此，它们之间根本不需要什么超光速信号，就能确保达成一致，一个左旋另外一个必定右旋。在我们观测之前去讨论它们俩到底是左旋还是右旋是“没有意义”的，我们只能认为它们俩同时处在左旋和右旋的两种状态中，观测行为本身就是结果的一部分，没有观测这个行为就不会有左右旋的结果。

玻尔的这个回答没能让爱因斯坦信服。在爱因斯坦看来，玻尔虽然没有反对相对论，没有承认超光速，但是他放弃了物理世界的客观实在性，这是唯心的，是形而上的哲学，是不能容忍的，玻尔把上帝当作什么了！

爱因斯坦和玻尔都急切地盼望实验物理学的高手们能把这个EPR实验真的做出来，互相都想让对方心服口服。但是，这个实验说起来容易，做起来可是难如上青天啊。最难倒不在于检测量子的自旋状态，因为很多基本粒子都带电，自旋的方向是可以被检测出来的。但是最难的却在于如何确定“左”还是“右”。你可能一下子没想通，茫然地问我，这很难吗？是的，相当之难，而且几乎没可能。现在请你想象一下，如果你手里面有两个白色的球，注意是纯白色的，上面任何标记都没有，这两个球不论从

什么方向什么角度看过去都是一模一样的，现在你把这两个球平放在手里面，让它们一个逆时针转动，一个顺时针转动，然后，你把这两个球随手往外扔出去，有人捡到了这两个球。你想一想，那个人能判断出这两个球当初在我手上的时候，是同方向转动的还是反方向转动的？很显然是不能的，原因是我们这个世界是一个三维的世界，两个球在扔出去的过程中不知道翻了多少个跟头，也不知道是怎么个翻跟头法的，等到了别人手里的时候，谁知道两个球到底怎么个翻滚过了呢？球上又没有任何的标记，不管从哪个方向看过去都是一样的，所以在别人手里的时候，在那个人的眼里看来，这两个球的自旋方向有可能是朝着任何方向的。

宇宙大法官

这个事情确实很烦，量子在空中怎么翻滚是不可能观测到的，即便我们看到了结果，也猜不出开始，很多实验物理学家都非常苦恼，他们绞尽脑汁想要找到解决方案，但是苦苦寻觅了几十年，都没有找到办法。直到出现了一个英国数学奇才，他的名字叫贝尔（注意不是发明电话的那个贝尔），他发现了一个数学“不等式”，这个不等式被科学界称为“贝尔不等式”，被誉为“科学中最深刻的发现”。这个惊天地泣鬼神的贝尔不等式有一个巨大的魔力，可以对我们这个宇宙的本质做出终极裁决，它可以使得EPR实验从思维走向实验室。只是很遗憾的是，贝尔不等式发现的时候，爱因斯坦和玻尔都过世了，他们只能在天国注视着人间发生的一切，他们过去耗费了无数个不眠之夜来研究分析但一直悬而未决的世纪大争论，很快就要有一个终极判决了。爱因斯坦和玻尔在天国想必也都肃然起立，等待着那个庄严的时刻。让我们先来看一眼这个神奇的贝尔不等式：

$$|P_{xz} - P_{zy}| \leq 1 + P_{xy}$$

有心的读者估计要跟我抱怨了：你前面承诺过再也不出现一个数学公

式的，怎么又搞出这种让人看了头大的东西来了。

哦，哦，哦，亲爱的读者们，为了这个科学中最深刻的发现，请原谅我一次吧，这个贝尔不等式太至关重要了，它是审判我们这个宇宙本质的大法官，怎么着也得让我们一起认识一下吧，下面我给你解释一下这个不等式的含义。

绝对值符号 $||$ 不用我解释了吧？初中就学过了。小于等于符号 \leq 也不用我解释了。

下标 x 、 y 、 z 代表着在空间中朝着 x 、 y 、 z 三个方向去测量的意思，也就是说我们拿到一个小球，可以从正面看过去，也可以从侧面看过去，也可以从上面往下看，总之取三个固定的方向看过去，记作 x 、 y 、 z 。

然后就是要解释一下这个 P 是什么意思了，这个 P 叫作“相关率”，一个让你费解的名词，没关系，我解释一下，很好理解。看过金·凯利演的电影《楚门的世界》（The Truman Show）吗？里面有一个让人难忘的经典镜头。楚门坐在车里看着车窗外的世界，然后嘴里念念有词，朋友过来问他：你在看什么呢？楚门说注意，很快就会有一个人抱着花的女人经过我的面前，然后一分钟后，必定会有一辆黄色的“甲壳虫”小汽车开过，我今天已经观察一天了，绝对是这样的，不信我们等着。结果果然如楚门预言的那样，把他朋友吓坏了。在这个镜头里，女人的出现和汽车的出现，这两件事情的相关率就是 1，也就是只要女人出现，必定就会有一辆汽车出现，这事板上钉钉，绝不会错。相关率就是 A 事件出现和 B 事件出现之间的相关联程度。如果是 0，表示两者完全没关联；50%，则表示若 A 事件出现 10 次，则有 5 次会出现 B 事件。那么这个 P_{xy} 代表什么意思呢？就是说我们从 x 这个方向去测量量子的自旋状态和从 z 这个方向去测量量子的自旋状态，得到的结果的相关率。这里面请注意一点，量子的自旋并不是真正的“左”和“右”的概念，量子本身也不是一个小球，它的自旋其实是“正”和“负”这样的概念，当然其实也不是严格意义上的正、负，总之说起来太复杂，其实我也不是太懂，我们没必要去搞得那么清楚，总之只要知道是两种相对的状态即可。比如说，飞过来 10 个量子，我从 x 方向测量过去和 y 方向测量过去有 8 次都是同为正，那么我就认为 $P_{xy} = 0.8$ 。我

们可以认为同为正是相关，也可以认为一边正一边负为相关，这个都无所谓，只要所有的标准都一致就可以。

了解了 P 的概念后，我们就很容易理解贝尔不等式了。它的意思就是如果飞过来一个量子，我们从 x 、 y 、 z 三个方向去测量这个量子的状态，最后计算各个方向的相关率。不管我们测量多少个量子，最终的结果必然要符合以上的贝尔不等式。

这里我要特别特别说明的是，贝尔不等式是用严格的数学手段推导出来的，数学是凌驾于物理学之上的规律。这个贝尔不等式在 EPR 实验中的含义是说：如果两个量子是在分开的那一瞬间就已经决定了自旋方向的话，那么我们后面的测量结果必须符合贝尔不等式。也就是说，假如上帝是爱因斯坦所想象的那个不掷骰子的慈祥老头子，那么贝尔不等式就是他给这个宇宙定下的神圣戒律，两个分离后的量子绝不敢违反这个戒律。其实这根本不是敢不敢的问题，而是这两个量子在逻辑上根本不具备这样的可能性。如果我们测量的结果不符合贝尔不等式，那么只能说明两种可能：（1）真有超光速的信号存在，两个量子之间瞬间可以互相知道对方的状态；（2）量子的自旋状态不是一个客观实在，在我们观测之前不存在确定的状态，只有我们观测之后状态才确定。

上帝的最终命运，取决于 EPR 实验中量子的各个方向上自旋状态的测量结果。如果贝尔不等式是成立的，那么爱因斯坦就会长吁一口气，这个宇宙终于回到了温暖的、经典的轨道上。但如果贝尔不等式不成立了，则上帝就摘下了慈祥的面具，变身为靠概率来玩弄宇宙的赌徒。用科学的话来讲的话，那就是要么放弃“定域性”要么放弃“实在性”，这两个不可能兼得。到底要放弃哪个，你自己选择，但你必须放弃一个。

这里特别有意思的是，贝尔是爱因斯坦的忠实拥护者，当他发现了贝尔不等式后，兴奋不已，踌躇满志，他信心满满地认为：只要安排一个 EPR 实验来验证我的贝尔不等式，物理学就可以恢复光荣，恢复到那个值得我们骄傲和炫耀的物理学，而不是玻尔宣扬的那个玩弄骰子的上帝了。物理学已经被玻尔们的量子理论搞得混乱不堪、乌七八糟，整个天下都乱了，冒出来各种形形色色的搞不清是物理学家，还是哲学家，

还是神秘主义者的人，什么超光速、量子心灵感应、多个历史、多个宇宙、结果决定原因……我已经厌倦了这些疯狂的想法，是到了该做个了断的时候了。

真的，也许就差那么一小步，真的只有一小步，我们就可以回到温暖经典的宇宙的怀抱了，我们多么渴望上帝是一个慈祥的老头子啊。但是，当年麦克尔逊为了证明以太存在的悲剧，又在贝尔身上上演了。



上帝的判决

1982年，法国奥赛研究所。

人类历史上，这是对 EPR 实验进行的首次严格的实验检测，这次实验被称为“阿斯派克特实验”，以这次实验的领导者阿斯派克特命名。这次实验总共进行了三个多小时，两个分裂的量子分离的距离达到了12米，积累了海量的数据。最后的结果与量子论的预言完全相符，爱因斯坦输得彻彻底底，从此EPR实验也被称之为“EPR 佯谬”。

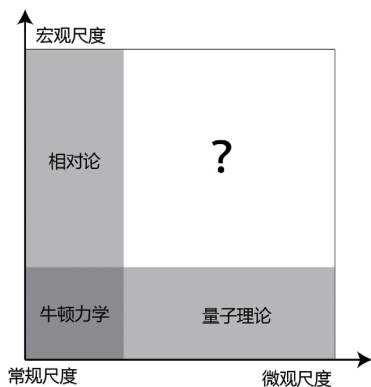
从阿斯派克特开始，全世界的量子物理实验室展开了一直持续到今天的 EPR 实验竞赛，实验精度越来越高，实验的原型越来越接近爱因斯坦最原始的想法，两个量子分离的距离越来越远，而且实验对象甚至增加到六个量子。在中国，2010年全国各大报纸都出现了一条报道，说是中国首次把 EPR 实验的距离扩展到了16千米，为当时世界第一。但是看看各地不同报纸的报道，我感到很好笑，很多科盲记者完全不了解什么是 EPR 实验，随意捏造各种骇人听闻的词，什么“超时空穿梭”“超光速通信”“时空穿越”……真是看得我汗如雨下。

EPR 实验的结果无可辩驳地呈现给当时的整个物理学界这样一个事实：要么放弃定域，要么放弃客观实在。定域性是经受了几十年严苛考验的伟大的相对论的推论，而客观实在则是大多数物理学家心目中的公理，不证自明的。如果是你，你会怎么选择呢？我看你可能最好奇的是那个发现贝尔不等式的可怜的贝尔，到底会做出怎样的选择。

还真有这样的好事者，英国一个很著名的科普作家访问了包括贝尔在内的8位物理界最知名的物理学家，想听听他们怎么看待这次“上帝的判决”，最后出版了一本叫作《原子中的幽灵》这本书。我没有看过这本书，但从在网上搜索来的零星的信息拼起来的结果看，似乎愿意放弃定域而保留客观实在的科学家多一点，但多得不多。那个可怜的贝尔在被逼急了以后，只好表示如果非要放弃一个的话，他只能放弃定域了，但他仍然试图想说或许不用两个都放弃。也有很多物理学家津津乐道于观测者的作用，也就是我们人类本身对量子状态的作用，从意识谈到了精神。但不论从哪个角度说，要让物理学家们放弃其中任何一个都是极其痛苦的。但是我要特别提请读者注意一点，EPR 佯谬只是证明了定域和实在不可能同时正确，并没有证明有超光速的信号存在，这是两个不同的概念。如果愿意放弃实在性，则相对论依然是牢靠的。

量子这种纠缠态也被称之为量子的超隐形传输，可以用来做通信的加密，但是不能用来做超光速的通信。更加需要强调的一点是，量子的超隐形传输，传递的是量子态，而不是能量和物质。而我国各大报纸曾经头版报道的量子超隐形传输实验，把量子通信说得神乎其神，肆意夸大渲染。尤其是2016年8月16日，中国发射了全世界第一颗量子通信卫星，各种舆论对量子通信的报道达到了顶峰，但这次的舆论报道相对准确了许多。我说几点：第一，量子通信卫星的主要功能是加密，通讯方式依然是传统的光通讯。第二，量子通信无法保证信息不被窃听，只能保证信息一旦被窃听，可以第一时间报警，中断通信或者改变密钥，从而间接保障信道安全。第三，量子通信再牛逼也无法做超光速通信，现在不行，将来也不行，理论上就行不通。第四，至于说未来通过量子通信能够把物体甚至人体超光速瞬移，那就更是扯淡了，没那么厉害。要知道，无线电通讯为什么能达到光速，因为传递信息的媒介是光子，光子没有静质量，所以能达到光速。而一旦要传递有质量的物质，理论上就不可能达到光速，更不要说超过光速。迄今为止，人类还没有发明任何一种理论可以允许超光速传输能量、物质、信息。

物理学走到今天，已经大大出乎了牛顿和爱因斯坦们的预料，它逐渐在人们眼前显现出这样一副图景：



【图9-6】
目前物理学的图像

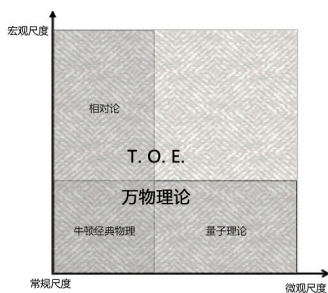
在我们日常身处的常规尺度下面，用牛顿物理学就足够了。但是随着尺度的不断扩大，尤其是扩展到了宇宙尺度的时候，就必须要用相对论来解释宇宙万物的规律了。而随着尺度的不断缩小，到了量子的世界，就必须要用量子理论来解释了。简言之就是：尺度越大，相对论与实际观测结果越符合；尺度越小，量子理论与实际观测结果越符合。但是要命的是这两大现代物理学的基础理论似乎是不相容的，它们不可能同时正确。在某些说不清楚是大尺度还是小尺度的地方，比如说黑洞的内部、宇宙大爆炸的奇点，都是质量巨大，但是体积微小，在这种时候，不论用相对论还是量子论都会得到一些根本不可能正确的结果，例如“质量无限大”“密度无限大”“概率无限大”等等。在物理学中出现“无限大”这样的数学概念，本身就意味着理论出错了。相对论是如此的简洁、优美，并且经受住了近百年的风霜洗礼，它俨然已成为人类智慧的丰碑。而量子理论，从一出生就很不遭人喜欢，所有的原理都是那么诡异，那么让人难以想象，然而正是这个诡异的理论造就了我们今天这个信息时代。不论喜欢还是不喜欢，凡是有芯片的东西，从手机到电脑，都离不开量子理论，没有量子理论我们根本不可能像今天这样通过互联网与整个世界联通。量子理论在实际生活中的应用程度是相对论的百倍、千倍。

请各位读者务必记住，我们必须小心翼翼地使用“推翻”“颠覆”这

样的字眼来描述新旧理论之间的关系。在某些特定场合中为了吸引眼球，我们偶尔这么说说是可以的，但真想表达自己发现了一个新理论时，最好不要说你推翻了旧理论。我们可以看到，相对论是对牛顿理论的修正，在常规尺度下面，相对论就会退化为牛顿理论，量子理论也是同样的情况。而且，以后出现的新理论也一定是对相对论和量子理论的修正，这两大理论也一定是新理论的近似理论。以后你凡是看到有人宣称牛顿理论和相对论都错了，已经被他推翻了，这种文章你基本看个开头就不用再看下去了，这绝不会是真正的物理学家写出来的东西。

万物理论

现在要命的是，相对论和量子论这两位久经风霜、战功赫赫的“战士”，从本性上是水火不相容的，他们之间的鸿沟无法跨越。那么，有没有一个能兼容相对论和量子物理理论的崭新理论呢？物理学家坚信，这种理论是否存在无须争论，那是肯定存在的，我们要想的应该是如何找到它，而不是去怀疑它的存在性。这个包容了牛顿理论、相对论、量子理论的新理论，物理学家们给它起了一个名字，叫作“T. O. E.”也就是英文“Theory of Everything”的首字母简写，中文叫作“万物理论”。这个T.O.E能够解释我们已知的所有尺度的物理现象，而且不管是牛顿物理还是相对论还是量子物理，都是这个万物理论的近似理论：



【图9-7】
万物理论图示

这就是最近几十年来大批理论物理学家孜孜不倦、梦寐以求的理论。而现在我们所处的这个时代，似乎又是一个创世纪的时代，天下英雄辈出，万物理论的尾巴似乎已经被我们揪到了。物理学的又一个黄金时代已经到来，错过了这个时代的未来物理学家在翻看今天的物理学史的时候，那种感叹可能就如同我们现在看上世纪初的那些激动人心的物理大发现的日子。

万物理论到底离我们还有多远？真实的宇宙到底是什么模样？我们这个世界的本原到底是什么？我们何以会存在？我们的宇宙将通向何方？这一切有答案吗？

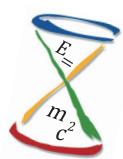
或许，正如现代的物理学家告诉我们的那样：我们的宇宙真的是一首气势恢宏的交响乐。

请看下一章，全书的压轴大戏即将上演。

第九章

CHAPTER NINE

宇宙是一首交响乐



万物皆空唯有音乐

我们这个世界的万物到底是由什么构成的？

这个朴素的问题从两千多年前的古希腊开始就不断地被人类追问。德谟克利特第一个提出了原子说，他认为世间万物都是由一种叫作原子（希腊文原意就是不可分割的意思）的小球构成的，每个小球都是一模一样的，它们的不同组合构成了万物的不同形态，包括你和我。两千多年弹指一挥，人类对世界的认识飞速增长。很快，化学元素被发现，门捷列夫发现了元素周期表；再后来，现代的原子理论发展起来，卢瑟福发现原子并非不可分割，可以分解为原子核和电子；再往下，原子核又可以分割为质子和中子，质子和中子又可以继续分割为夸克；然后又是形形色色的“子”被发现，什么费米子、玻色子等等。似乎物质没有尽头，可以无限分割下去……

但是，终于有到头的一天。根据现代最新的物理理论，到头来，一切都是——空。

“拜托，刚才还一本正经地给我们上科学史课，怎么突然跟我们玩起哲学概念了。”我已经听到了你的嘀咕声。

NO，我是在很认真地告诉你，真的，到头来一切都是空。比如，你拿起一杯水，仰头一口气喝下去了，我来问你，你喝到的是什么？

你说：“水啊，化学分子式为 H_2O ，两个氢原子和一个氧原子组成了水分子。”

我说：“好，我承认你喝下了无数的氢原子和氧原子。那你知道原子又是一番怎样的情景吗？让我来告诉你，原子是由原子核和电子组成，原子核只占到整个原子体积的几千亿分之一，而电子比原子核还要小 1000 倍。

我给你打个比方，整个原子就像一个足球场那么大的一个气泡，原子核就是当中的一粒沙子，而电子就像一小颗灰尘一样在气泡里飞来飞去。如果你看到这样的一个气泡，你会认为这几乎是空无一物的气泡，你再仔细也难以找到原子核和电子。你喝下去的一杯水，就是由无数个这样的气泡组成的，看起来满满一杯水，其实里面 99.999999999999% 是空的。如果把这杯中所有原子中空的部分全部抽走，只留下原子核和电子，那么这杯水剩下的东西，你要用现在全世界最强大的电子显微镜放大差不多一亿倍才能看到，现在你还认为你喝下的是杯水吗？”

你说：“好吧，我承认我其实只喝下了很小很小的一点东西，但你也不能就认为我喝下的是空，好歹还有点原子核和电子嘛。”

我说：“很遗憾，我的话还没说完。那么原子核和电子又是由什么组成的呢？由一些更小更小的基本粒子组成。这些基本粒子又是什么东西构成的？有些物理学家告诉我们说，这些基本粒子到头来都是一根根的‘橡皮筋圈’，它们就像吉他弦一样在空间中振动着。构成这些橡皮筋的材料不是别的，也正是空间本身，一段弯曲的六维空间。到头来什么也没有，只有一段弯曲的六维空间蜷缩在你无法想象的小的三维空间中，构成一个橡皮筋圈，以不同的频率振动着。”

如果这个理论是对的，那么，你其实喝下去的什么也没有，只是空间本身而已。这个宇宙除了空间本身真的是什么也没有，你和我，世间万物，到头来，一切都是空。

以上所说的一切都不是我的胡思乱想。这些正是最近 30 年在物理学界迅猛发展起来的“超弦理论”，也是谢耳朵的专业方向，它现在是万物理论的候选理论。

在超弦的世界中，一个个振动着的“橡皮筋圈”就是构成物质的最小单位，不同的振动频率构成了不同的基本粒子，不同的基本粒子组合又构成了质子、中子和电子，质子和中子组合在一起构成了原子核，原子核和电子一起构成了原子，原子构成分子，分子构成材料，材料构成了世间万物，包括你和我。

上帝就像是一个神奇的魔术师，在空无一物的空间中，随手这么一

抓，然后在手中一搓，一段空间被搓成了一根弦。然后他捏起弦的两头，在空中打了一个结，再用手指这么轻轻一弹，于是，弦振动了起来，这就是夸克。接着上帝又用同样的手法制作了胶子、中微子、费米子、玻色子……最后，他用眼花缭乱的迅捷手法不知怎么地就用这些“子”组成了质子、中子、电子、原子、分子、金子、银子……

如果上帝可以听见振动着的弦发出的声音，那么每一个基本粒子就是一个音符，原子就是乐句，分子就是乐段，世间万物、你和我就是乐章，整个宇宙就是一首恢宏的交响乐。这首交响乐从宇宙诞生的那天起就开始演奏，一刻不停歇，直到宇宙消失的那天为止。

这些听起来美妙但又不可思议的事情，到底是怎么被发现的？物理学家何以敢向世人宣布“到头来一切都是空”这样的宣言呢？超弦理论家们到底有些什么样的线索？未来我们又需要怎样去证明它？

这就让我带你去了解一下他们是如何探索隐藏在物质最深处的秘密的，你一定会被人类展现出来的惊人智慧所折服。宇宙让我们敬畏，但是物理学家们也同样值得我们敬畏。

击碎原子

如果有一种理论能称为万物理论的话，那么它首先要解决我们这个宇宙中最基本的两个问题：（1）物质到底由什么东西构成的，怎么形成的，物质有没有最小单位？（2）宇宙中的“力”到底是什么，有没有一种最基本的理论和一个统一的公式，能描述宇宙中所有的“力”？

让我们先从第一个问题开始——寻找物质的最小单位。

观察一个篮球，我们用眼睛看就可以了；如果要观察一粒灰尘，那么需要拿一个放大镜仔细地看；如果要观察一个病毒，就不得不借助显微镜。如果要观察一个比病毒还要小几千万、几亿倍的东西，你觉得应该怎么办呢？我知道你肯定抓耳挠腮想不出办法了，等着我告诉你答案。

其实，要观察一个东西的形状和性质不是一定要直接观察，还可以通

过一种间接的办法去了解这个东西，我把它叫作“子弹射击法”。

打个比方，我现在把一样东西用一根棍子支在空中，然后我在这样东西的周围裹上一层白雾（假设我发明了一种不会散去的雾气），于是你无法看到雾气中的东西到底是什么，自然也就不知道它的形状、性质等。现在我给你一把枪，装满一种轻柔的橡皮子弹，你用这把枪不断地对着白雾中的东西射击。射击几次以后，通过橡皮子弹被反弹的次数和反弹的角度，你大概就能感到这个东西的大小，还能模糊地感觉到这个东西的硬度。

随着射击次数的增加以及观察反弹子弹的细致程度的提高，你越来越有经验，你现在连这样东西的形状都已经能大致确定下来了：是一个圆形的东西。但是你很快就发现，子弹的大小问题是个瓶颈，虽然你已经发现了那样东西的表面肯定是不光滑的，但是橡皮子弹太大了，以至于你无法进一步了解那个东西的表面性质到底粗糙到什么程度。

于是，你要求我把橡皮子弹换成米粒子弹。当你开始用米粒子弹加大射击频率，仔细地观察反弹出去的米粒，你对这样东西的外形已经掌握得越来越清晰了，这是一个近似椭圆形的东西，上下似乎有两个尖头。

然后你开始专注于研究那些反弹角度很小的米粒，因为这些米粒能反映出这样东西表面的粗糙程度，一段时间以后，你发现米粒被反弹的角度呈现周期性变化，于是你可以确定这样东西的表面有一些明显的沟壑。但问题是米粒还是太大了，你无法细致地掌握这些沟壑的粗细和深浅。这次你换上了沙粒子弹，于是这样东西的表面细节被你掌握得更多。你再换上更小号的沙粒子弹，于是每减少一次子弹的大小，你对那样东西的掌握程度就增加一分。直到最后，你正确地猜出了我放在支架上的那样东西——一个大核桃。

如果你想通了我上面说的“子弹射击法”，认可这种方法能够确定一个无法被直接看到的物体的形状和性质，那么恭喜你，你已经掌握了人类探索隐藏在物质最深处的秘密的方法，那就是尽可能地找到更小的子弹，不断地轰击你要研究的对象。如果对象穿着“衣服”，就把衣服打下来后继续打。没错，这个方法很黄很暴力，但是真的很管用。不管对象是什么东西，我就是这一招鲜，只要我的子弹与对象相比足够小，就能搞清楚对象

的所有细节。

人类很快发明了一种用电子作为子弹的探测装置，这种装置就是被我们称为电子显微镜的东西，用这种显微镜甚至能“看到”原子的形状和大小。虽然电子这种子弹足够小，但问题是电子的“力道”太小，打到原子上就被反弹开（后来人们知道是因为电子带电，因为同性相斥的道理，被带着电子的原子排斥开了），就好像我们用沙子去击打篮球，虽然我们能掌握篮球的形状和大小，但是我们却无法进一步了解篮球内部到底是由什么组成的。

但是勇敢无畏的物理学家们很快又在自然界中找到了一些神奇的矿物质，这些矿物质会天然地放射出大量微小粒子（ α 粒子），而且这些粒子和电子比起来，就好像是真手枪子弹和玩具手枪子弹的区别一样，它们的速度甚至可以达到光速的 $1/10$ ，力道大得惊人，可以轻而易举地穿透金属制成的箔片，更不要说人体了。

被人类发现的第一种这样的物质叫作镭，它是由大名鼎鼎的居里夫人发现的。但是就像我前面说的，镭时时刻刻都在放射看不见的超级子弹，可以把人体细胞中的 DNA 都打得稀烂，居里夫人就是这样被镭夺去了宝贵的生命，为人类的科学事业献了身。除了镭，还有名震四海的铀，因为它是制造原子弹的材料（我就是在核工业部某大队长大的，这个大队的主要任务就是四处寻找铀矿。我的父亲是新中国第一批这个专业的大学生，找了大半辈子的铀矿。只是据我所知，他们金矿找到了不少，铀矿却没找到多少。也好在找到的不多，幸使家父至今身体健康）。这些矿物质被统称为“放射性材料”，有时候也简单地称为“核材料”。

英国物理学家卢瑟福第一个想到了用这种放射性材料做成“枪”，用它们放射出来的力道十足的粒子作为子弹，他准备用这把“枪”去轰击原子，看看会发生什么。1909年3月，卢瑟福用一把“镭射枪”对着一张金箔（就是把金子做成薄薄的一张纸）猛烈开火，然后他详细地记录了所有发射出去的子弹在遇到金箔后的散射情况。他发现几乎绝大部分 α 粒子都如入无人之境，直接射穿了金箔，但是有大概八千分之一的 α 粒子发生了大角度的偏转，然后大概有十万分之一的 α 粒子竟然被反弹了回来。卢瑟福后来回忆说，当时发现居然有被反弹回来的粒子，他实在是相当吃惊：“这是我一辈子

中遇到的最不可思议的一件事情，这就好像用一门大炮对着一张纸轰击，打了十万发炮弹出去，全都直接穿透那张纸（这太正常了），但第十万零一发炮弹打过去，居然这发炮弹没有穿过纸，直接被反弹了回来，打着了自己。”就这样，卢瑟福发现了原子的秘密，原子内部有一个密度非常大的原子核，但是体积只占了整个原子的一丁点儿。伟大的卢瑟福一生培养了十三位诺贝尔物理学奖得主，还不包括他自己在内。可惜的是，卢瑟福也步了居里夫人后尘，死于自己最亲密的伙伴——放射性材料的手中。

原子核被发现以后，人类继续往下探索的挑战就更大了。因为原子核实在是太坚硬了，天然的镭射枪根本打不碎它。打不碎，自然就无从知晓原子核内部的秘密了。但是，没有什么事情能难倒牛逼的物理学家们，他们很快就找到了一种提高子弹力道的方法，那就是“电磁加速”。 α 粒子是带正电的一种粒子，读过中学物理的人都知道，一个带电的物体在电磁场中会受到洛伦兹力。于是人们想到：可以利用电磁场给 α 粒子加速，一旦速度提高，那么 α 粒子的能量就提高了，只要不断地提高能量，总能把原子核轰开。于是人类开始制造这种被称为“粒子加速器”的机器，用来加速粒子，轰击原子核，从而去探究原子核里面的秘密。粒子加速器一般都是一个超级巨大的环形轨道，粒子在里面被一圈圈地加速，甚至能够被加速到接近光速！但这玩意儿耗电巨大。

人类如愿以偿地把原子核击碎了，并且发现原子核是由质子和中子组成的，还惊讶地发现，原来用来做子弹的 α 粒子，其实就是由两个质子和两个中子组成的。既然质子能被加速，那么电子也能被加速，用电子做子弹的好处就在于电子比质子还要小 1000 倍，正如我们前面所说的，子弹越小探测得越精确。但子弹光是小没用，还要力道足够大，也就是速度足够快，这样才能击碎目标。于是要提高电子的速度，就需要更强的电力和更长的加速距离。

建造粒子加速器是目前人类认识物质深层次秘密的唯一途径，因此全世界都展开了竞赛，看谁建造的粒子加速器更强大。目前暂时取得世界第一的是坐落于日内瓦附近的欧洲大型强子对撞机（简称 LHC），这个庞然大

物恐怕是目前人类建造的最大的一部机器，花费了一百多亿美元，它的环形加速轨道的周长有 27 千米，埋在地底下。下面这张卫星照片可以让你对它的大小有一个直观感受。



【图10-1】

LHC 的卫星示意图



【图10-2】

LHC 的环形加速轨道

这个庞然大物一旦开动起来，所需要的电力实在惊人，据说它一开动，整个日内瓦市所有的电灯都会变暗，因此它往往都在夜里用电低谷的时候开动。它需要一个可以给一座中型城市供电的发电厂专门为它供电。

这么一个庞然大物，里面跑的居然只是一些小得不能再小的粒子。当粒子加速器把一些粒子加速到接近光速后，就要让这些粒子对撞。但是你知道要让那么小的粒子正面对撞的概率有多小吗？这就好像一个人在上海，一个人在旧金山，两个人各拿一把手枪，隔着太平洋对射，要让子弹刚好和子弹撞上，你说这个概率有多小。因此，为了提高对撞的几率，只有一个办法，那就是一下子打出去几亿甚至几十、几百亿颗子弹，总会有那么几颗子弹对撞的。

人类就是靠着这种让粒子对撞，然后再观察对撞后粉碎的粒子的轨迹来研究微观世界，寻找新的粒子。不负众望，越来越多的新粒子在实验室中被发现，这些粒子要么具备以前没有发现过的质量，要么就是自旋的方式不一样。现在，人类基本上已经掌握了一张数据表，里面标明了已经发现的各种各样粒子的各种性质，例如质量、大小、自旋方式、电荷、相互作用力等等。现在人类不禁要问：有没有一种统一的理论，在这个理论下，所有这些基本粒子都可以看成是同一种物质的不同表现形式？就好像石墨和钻石，看起来如此不同的两样东西，最后发现其实都是碳元素（C）的不同表现形式，C原子的不同排列形式决定了材料的性质。那么所有这些看起来质量、自旋方式、电荷、大小都不同的基本粒子，是不是也能够用一种统一的理论去描绘呢？如果有的话，那么这就有可能发展成为万物理论（T.O.E.）。

我们了解了基本粒子的本质成因，就能了解由基本粒子构成的原子、分子、材料、万物的性质和成因。打个比方，这就好像如果掌握了每个大气分子的运动规律，就能计算出整个大气的运动规律。当然，这需要超级庞大的计算能力，但从理论上来说，就是这样的。而一个分子相对于所有基本粒子来说，就像是整个大气，我们把组成分子的每个基本粒子的规律掌握了，那么要掌握分子的规律也就是顺理成章的事情。

当然，像这样的一种关于基本粒子成因的理论绝不是可以随意胡思乱想的。必须找到一种理论，在这种理论下可以得到描述这个理论的数学方程式，并且用这些数学方程式，能够自然而然地运算得出所有已经发现的基本粒子的各种属性，并且不但能解释已经发现的所有基本粒子，还能预言没有发现的基本粒子的各项属性。

就好像广义相对论，虽然成功地解释了水星的进动现象，但是仅能解释已有的现象还是不能让人信服的，只有成功地预言了星光偏转现象之后，才让全世界的物理学家信服了这个新理论。寻找这样的—一个可以解释所有基本粒子成因和准确地推算出各种数据的理论，就是人类向万物理论发起冲锋的第一步。

宇宙中的四种“力”

再让我们来看看第二个问题——宇宙中的“力”。

我如果问你“力”是什么，你可能马上想到，力不就是力气、力量、力度吗？我如果问你受力的大小怎么理解，你可能会挥起拳头这么—挥，说拳头往沙包上打去，打得越狠，沙包受到的力就越大。可是，这些力都不是物理学家眼中这个宇宙中最根本的力。我们—拳打在沙包上，—一个小球撞向另外—一个小球，或者—颗子弹洞穿标靶，这些是动量守恒定理在起着作用。只要知道物体的运动速度和质量，就可以计算撞击后发生的一切事情。

什么才是最根本的力呢？根据牛顿定理知道，力是改变物体运动状态的作用。那么到底是什么作用在改变着物体的运动状态呢？两个小球相撞，虽然两个小球各自的运动状态都改变了，可是从整个系统的角度来看，两个小球仍然符合动量守恒，其实并没有什么“力”掺和在这起小球相撞事件中，只不过是“速度”从—一个小球转移到了另外—一个小球身上。

宇宙中的第—种基本的力是万有引力。你想想，我们平常所感受到的力，究其本质都是引力在起作用，比如我们每个人自身感受到的重力，就是地球对我们的引力，大气压力是空气的重力，静止在高山上的石头滚落也是引力在起作用。

接着，人们又发现了宇宙中的第二种力，那就是电磁力。两块磁铁异性相吸，同性相斥，特别是当你感受同性相斥的效应时，尤其能实实在在地感受到磁力的存在。我们看到的火车开动，电梯升降，甚至煤气灶把水烧开，这些现象究其根本，其实都是电磁力在起着作用。

除此之外，还有没有第三种力了呢？在爱因斯坦活着的时代，没有了。在爱因斯坦的时代，物理学家们发现，宇宙中一切运动的物理现象，究其根本只有两种力在起着作用——引力和电磁力。不论是什么样的运动状态的改变，研究到最后，发现归根结底是引力和电磁力的作用。

在引力方面，我们先有牛顿的万有引力公式，后有广义相对论修正了的引力公式来描述；在电磁力方面，我们有优美的麦克斯韦电磁方程组来描述。而且我们发现引力比电磁力弱得多的多。比如把一根塑料棒在头上擦两下，就能把桌上的纸片轻而易举地吸起来，也就是说在头上擦两下产生的电磁力，就远远大于整个地球对纸片产生的引力。

爱因斯坦在人生的最后三十年中，一直致力于把引力和电磁力统一到一个数学表达式中，这被称为“统一场理论（GUT）”。爱因斯坦认为如果统一了引力和电磁力，他就找到了这个宇宙中最深的奥秘，并且他坚信利用他发现的广义相对论能够找到这个统一场理论。然而，爱因斯坦苦苦追寻了30年，直到去世，也没有把这个理论堡垒给炸掉。其根本原因还在于，广义相对论这个炸药包在统一场理论这个堡垒面前，仍然显得太渺小了。在爱因斯坦之前的所有物理学家都习惯于“自大而小”地寻找理论，也就是先从最大的宏观上找到一个近似的理论，然后逐步地去修正它，使之和实验值契合得越来越精确。在后爱因斯坦时代，人们开始意识到可能这个方法根本就错了，或许“自小而大”才是根本解决之道。

在爱因斯坦死后，人类对微观世界的了解越来越多，尤其是有了威力巨大的粒子加速器之后，人类对原子的了解突飞猛进。于是，又有两种最基本的力被发现，一种叫作弱核力，它是产生物质的放射性现象的根本原因；另一种叫作强核力，这种力把质子和中子结合成了原子核。说到这个强力，看过《三体2·黑暗森林》的朋友都对那个威力无穷的“水滴”印象深刻吧，那个“水滴”又叫“强相互作用力探测器”。“强相互作用力”指的就是“强核力”，它是人类迄今为止发现的最强的“力”，它有多强，看看《三体2·黑暗森林》就知道了，保你印象深刻。

现在，上帝把这四种力摆在人类的面前，就好像是四块拼图板。上帝

说：这四块拼版原本是完全没有缝隙的一个完整的正方形，我用了一种巧妙的手法把它分割成了四块，请你们人类思考一下该如何还原回去。

上帝留给了人类两道终极思考题：一道题是，用一个统一的理论解释所有基本粒子的起源和成因；另一道题目是，把宇宙中的四种基本作用力用一个统一的数学公式描述出来。

经过三千年的科学攀登，经过无数的磨难和坎坷，我们曾经掉在陷阱中几百年出不来，也曾经被困在迷宫中差点找不着出路。终于，这一天来临了——我们，这个居于银河系边缘的一个毫不起眼的太阳系中的一颗美丽蓝色行星上的两足生物，站到了上帝的面前。上帝说如果你们能解开这两道题目，那么请接受我最诚挚的敬意，从此我收回我以前的一句玩笑话“人类一思考，上帝就发笑”。

我们朝上帝微微一笑：“不论你发不发笑，我们都不会停止思考。”

超弦理论

上帝有时候对人类挺好，经常会给我们一点好运气，弦理论的发现也是这样。物理学界流传着这样一句话——“弦理论是 21 世纪的理论偶然落到了 20 世纪，被好运气的物理学家们拾到了。”

1968 年，有一个叫作维尼齐亚诺（Veneziano, 1942-）的年轻意大利物理学家，他就职于大名鼎鼎的欧洲核子研究中心（简称 CERN，这个机构出过很多牛逼哄哄的人物，包括互联网之父蒂姆·伯纳斯·李，我们前面提到的那个全世界最大的粒子加速器 LHC 也是这个机构建造的）。大多数物理学家都是数学家，这个维尼齐亚诺也不例外，他对数学是相当有兴趣。有一天，他闲来无事开始把玩两百多年前大数学家欧拉发明的一个函数——所谓的欧拉 β 函数，即，给一个 x 值，算出一个 y 值，再给一个 x 值，再算出 y 值，然后写在纸上，就好像小孩子孜孜不倦地把积木摆来摆去一样。你可能觉得物理学家真奇怪，这有啥好玩的？我们大多数人都对数字很讨厌，唯恐避之不及，所以我们大多数人就只能当普通老百姓，当不了

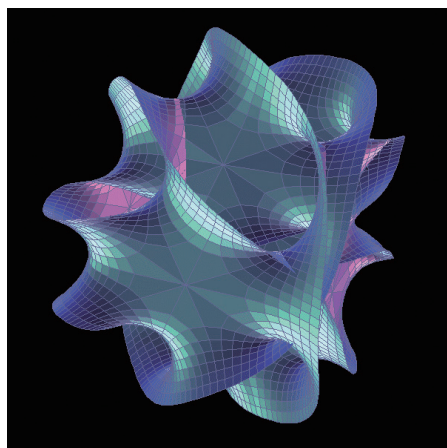
神奇的“家”。

维尼齐亚诺玩着玩着，突然发现眼前这些数字怎么越看越熟悉。物理学有时候就会出现这种惊奇和意外，维尼齐亚诺手中的这些数字，让他突然就联想到了全世界各地汇集过来的粒子对撞中产生的大量的原子碎片的各种数据，它们似乎有着极其惊人的关联。冥冥之中，似乎两百多年前的欧拉获得了上帝的启示，写下了这个欧拉 β 函数；历经两百多年的时空穿越，维尼齐亚诺偶然发现了这个函数的惊人秘密。但问题是，这个函数虽然很管用，但是没有人能知道这个函数到底代表着什么物理意义，就好像一个小孩背会了九九乘法表，可以轻松地为奶奶算出菜价，但是小孩却完全不知道这个像歌谣一样的九九乘法表是怎么来的，表示什么意义。维尼齐亚诺面临的尴尬就跟这个小孩是一样的。

要把一团乱麻给理成一根线，最关键也是最难的是要找到线头。现在，揭示微观世界秘密的线头被找到了，就是这个欧拉函数。两年之后，芝加哥大学、斯坦福大学、玻尔研究所的几位科学家几乎同时发现，如果用小小的一维的振动的弦来模拟基本粒子，那么它们之间的核作用力就能精确地用欧拉函数来描写。这根弦非常非常小，小到在我们现有的所有实验条件下，它表现出来的都仍然像一个点，实在太小了。

然而，弦理论的这条路非常坎坷，似乎一堆刚刚冒出一火星的柴堆，还没窜出第一个火苗就被当头浇了一盆凉水。弦理论最初的几个预言被实验数据无情地推翻，全世界的物理学家们在一片唏嘘中，都不情愿地把弦理论扔进了废纸篓，只有谢尔克、格林和施瓦兹等几个少数物理学家仍然没有放弃。他们觉得弦理论所展现出来的数学之美实在是太让人印象深刻了，哪怕在实验数据上有瑕疵，他们也不愿意放弃，他们愿意去修正理论而不是将它扔到垃圾桶中。经过十多年的努力，终于在一篇里程碑式的文章中，他们解决了矛盾，并且向世人宣告弦理论有能力成为万物理论。这篇文章在物理学界激起千层浪，许许多多物理学家放下手头的工作，激动地阅读格林和施瓦兹的文章，读罢，很多人都马上停掉了手中的研究项目，转而一头奔向这个终极理论的战场，有什么事情能比得上探求统一全宇宙的理论更令人激动呢？

1984年至1986年，出现了物理界中的“第一次超弦革命”。为什么在弦理论前面又增加了一个“超”字呢？格林和施瓦兹认为每一个基本粒子必须要有一个“超对称”的伙伴，电子有一个超伙伴叫作超电子，光子的超伙伴叫作光微子等等。弦理论和超伙伴的假想一结合，立即发挥出巨大的威力，就好像脱去普通西装，露出内裤外穿的超人本尊。从此，弦理论升级为超弦理论。超弦理论认为，任何基本粒子都不是一个点，而是一根闭合的弦，当它们以不同的方式振动时，就分别对应于自然界中的不同粒子。我们这个宇宙是一个十维的宇宙，但是有六个维度紧紧蜷缩了起来。就像远远地看一根吸管，它细得就像一条一维的线，但是当我们凑近一看，发现它其实是一根三维的管，其中的二维卷起来了。那六个维度的空间收缩得如此之紧，以至于必须要放大一亿亿亿亿多倍（1后面34个零）才能发现，其实所有的粒子都不是一个点，而是一个六维的“橡皮筋圈”，不停地在空间中振动，演奏着曼妙的音乐。



【图10-3】
超弦假想图

从第一次超弦革命爆发到现在，已经过去了二十多年，物理学界又有了很多很多的发现。例如从超弦理论中又派生出M理论，现在正热门。这个理论把十维宇宙又扩展了一维，变成了十一维的宇宙（十个空间维加上一个时间维）。再往下讲就不是本书力所能及的了，毕竟我们这仅仅是一本

介绍相对论的闲书，甚至都不能称为一本严谨的科普书。如果你对超弦理论还想了解得更多，推荐阅读美国人B·格林写的《宇宙的琴弦》。

伟大的设计

这本书带领大家一起走过的旅程到这里就差不多要到达终点了。然而终点并不意味着结束，恰恰意味着一个新起点的开始。这个宇宙留给我们的两道终极思考题还没有找到答案。

2013年北京时间10月8日下午6点45分，在瑞典斯德哥尔摩音乐厅，白发苍苍的希格斯老先生激动地坐在台下，这位84岁的老人为了这一天，足足等了将近半个世纪。虽然诺贝尔物理学奖还未正式揭晓，但是几乎所有人都知道，今年的这个奖项非他莫属，老先生含泪等待着宣布结果的那一刻。瑞典皇家科学院没有让希格斯老先生失望，2013年的诺贝尔物理学奖众望所归地颁给了希格斯和比希格斯小3岁的恩格勒，以表彰他们在49年前提出的希格斯玻色子模型。就在一年多前的2012年7月4日，欧洲核子研究中心正式宣布，他们以99.99994%的置信度发现了希格斯玻色子。这条消息在那一年绝对是整个科学界的第一大新闻，所有报纸的头版头条都在追踪报道这个事件，无数科普文章铺天盖地向公众涌来，很多知名科学家认为这是物理学四十多年来最重大的发现之一，堪比登月。为什么希格斯子如此重要？因为这是整个标准粒子模型中最后一个没有找到的粒子，而恰恰是这最后一个粒子又是最为重要的一个粒子，它产生了世间万物的质量，你想想，如果没有了质量，那么我们所见的一切有形物都将不复存在，因此，希格斯子还有另外一个非常震撼的别名——上帝粒子。但物理学家们还没有到能沾沾自喜的地步，虽然标准粒子模型预言的所有粒子都找到了，但这个模型却很难看，一点儿也不简洁。打个比方来说，如果一个人问：麻雀、蚂蚱、青蛙、鲫鱼的共同祖先是谁？生物学家把这四种动物用胶水粘到一起，然后扔给你说：“瞧，就是这家伙。”这差不多就是标准粒子模型留给物理学家们的直观感受，它虽然很好地解释了每一个

粒子的性质，但是这个模型就像是前面那只共同祖先生物一样，是个长得极为丑陋、复杂、怪异的生物。科学家们普遍相信，一定还有一个比标准粒子模型更加简洁的理论模型，可以自然而然地推导出标准模型，人类对微观世界的探索还远远没有到达尽头。一个里程碑的到来意味着下一段更加艰苦的赛道开始了。

2016年2月12日早上7点50分，像每一个平凡的早晨一样，我洗漱完坐到餐桌旁边准备吃早饭，习惯性地拿起手机，准备放一点什么东西边吃边听。点开微信上的订阅号，我惊讶地发现，被一个词刷屏了——引力波。

尽管几天之前引力波可能被正式发现的消息已经传得满大街都是了，但是当这个消息真正到来的时候，我还是热泪盈眶了，这又是一次人类智力的伟大胜利，爱因斯坦广义相对论的最后一个预言也被证实了，一个人类探索宇宙奥秘的新纪元到来了。像这样的新纪元事件之前还有过两次，第一次是光学望远镜的发明，它让人类拥有了一双真正的“千里眼”；第二次是无线电波的发现和射电望远镜的发明，它让人类突破了肉眼的局限，开启了一种全新的观测宇宙的方法。前两次的飞跃，每一次都让人类获得了难以想象的新发现。而这次引力波的出现，与前两次技术飞跃的意义同样深远，从此人类又获得了一个全新的观测宇宙的方法。我坚信，在不久的将来，我们又能对宇宙有令人难以置信的新发现。关于引力波，我在网上能看到的最好的一篇文章是原载于《纽约客》的长文：《发现引力波背后最完整的内幕故事》，作者是NICOLA TWILLEY，这篇文章的开头写得极好，以至于我实在忍不住要一字不落地引用给你们看：

十几亿年前，距离这里有数百万个河外星系之外，两个黑洞发生了碰撞。它们彼此围绕旋转了亿万年，好像是求爱的舞蹈，每一圈后都在加速，呼啸着靠近对方。到了它们间距只有几百英里的时候，它们几乎以光速旋转，释放出强大的引力能量。时间和空间被扭曲，像是壶里面煮沸的水一样。在不到一秒钟的分毫瞬间里，两个黑洞终于合并为一，它们辐射出比全宇宙的恒星辐射出还多几百倍的能量。它们生成了一个新的黑洞，质量约是62个我们的太阳一般，面积几乎和缅因州一样。在

它（新黑洞）平静下来的过程中，逐渐形成一个扁平的球状，最后几缕颤抖的能量逃离出去。然后时间和空间再次寂静了。

黑洞碰撞产生的引力波向四周传播，旅途中随着距离衰减。在地球上，恐龙崛起，演化，消亡。引力波继续前进，大概五万年前，引力波到达了我们的银河系，正当智人开始取代其近亲尼安德特人，开始成为地球上最主要的人猿。100年前，爱因斯坦，灵长类物种中进化得最先进的人类的一员，预言了引力波的存在，激发了数十年的猜测和无果的寻找。20年前，一个巨大的探测器开始建设：the Laser Interferometer Gravitational-Wave Observatory (LIGO)。终于，在2015年的9月14号，在中午11点（中欧时间）前，引力波到达了地球。Marco Drago，一位32岁的意大利籍博士后学生，全球LIGO科学合作组织的成员，成为第一个注意到它们的人。Marco当时坐在位于德国汉诺威阿尔伯特·爱因斯坦研究所他自己的电脑前，远程观看LIGO的数据。引力波出现在他的屏幕上，就像一个被压缩了的曲线，不过LIGO装置着全宇宙最精致的耳朵，可以听到千亿分之一英尺的振动，应该仿佛听到了被天文学家称为「蚰蚰叫」的声音——一声微弱的由低到高的呼叫。一年之后，在华府的新闻发布会上，LIGO团队正式宣布那个信号即为历史上第一个直接观测到的引力波。

上面这篇文字我百读不厌，每一次阅读都会产生无限遐想，这是宇宙间最渺小的个体对最恢宏事件的倾听，这是人类文明向宇宙展示智力成就。

在短短不到两年的时间，我就见证了必定会在人类文明史上留下印记的两大科学新发现，我们这代人难道不是幸运儿吗？2016年2月20日，LIGO团队宣布他们又确认发现了一起引力波事件。但这一次引起的关注就要小得多，这是对的，因为引力波从此会成为天文学研究的常规手段，全世界将会有无数的引力波探测器拔地而起，或者飞向太空。科学将带领着我们窥探隐藏在深处的宇宙奥秘。

1999年，霍金在一次演讲中公开宣称，他愿以1：1的赔率跟任何人打

赌，人类将在 20 年之内找到万物理论，现在离霍金的赌局结束还剩下几年的时间。这几年来物理学还会有些什么激动人心的发现，谁也无法预知。

超弦理论作为目前万物理论的唯一候选仍然面临诸多挑战，前途似乎非常坎坷。即便是像 LHC 这样全世界最大的粒子加速器，也只能探测到一百亿亿分之一米大小的尺度（探测更小的尺度需要更高的能量，这意味着把能量聚集到单个粒子的加速器必须做得很大很大），而弦的尺度比我们今天能探测到的尺度还要小 17 个数量级。因此，如果用今天的技术，至少要把我们的加速器造得跟银河系那么大，才有可能探测出一根根的弦。但是我们不是要等到直接“看”到弦的那一天，才能证明超弦理论是否正确，仍然可以用很多间接证据和实验信号来验证超弦理论。

从第一只古猿直立身体仰望星空，到今天建造出 LHC 这样的庞然大物，不过大约 300 万年，和宇宙 138 亿年的历史来比，就如同一个百岁老人一生中不到 8 天的时间。然而正是在这“8天”里，我们的哈勃太空望远镜已经能看到 138 亿光年外的宇宙尽头；我们的 LHC 能探测到比肉眼能看到的尺度小一亿亿倍的东西；我们发明的理论大到能推测宇宙的膨胀系数，描述星系的运动轨迹，小到可以解释令人难以置信的量子行为。现在，或许就差那么最后一步，人类将站到一个全新的高度来审视我们所处的这个神奇宇宙。难怪霍金在《大设计》中发出尼采式的宣言：

它（万物理论）将是人类长达三千余年智力探索的成功终结，我们将找到这个宇宙中最伟大的设计！

霍金的理想或许已经真的离我们不远了，在我们的有生之年，很有可能等到物理学家向我们宣布找到万物理论的那一天，我从内心深处为生活在这个激动人心的时代感到庆幸。唯一遗憾的是，我除了静静地等待，似乎什么也做不了。但是如果我亲爱的读者中有即将选择自己人生方向的学子的话，那么请接受我对你的羡慕，你将有机会投身到这场寻找大设计、解答上帝两道终极思考题的智力探索中。未来之路刚刚在你脚下展开，你的这一步或许决定了我能不能在有生之年看到答案！

（全书完）

后记

多年来，我一直有一个理想，等将来获得了财务自由，要为中国的科普事业做点儿贡献，比如赞助一些科普作家，投资拍点科普的动画片、电视剧甚至电影等等。因为我一直有一个朴素的信念，那就是中国的希望在于开启民智，而开启民智在于科普教育。

突然有一天，我想明白了一件事情，做科普跟有没有钱完全是两件事情，没钱人有没钱人的做法，有钱人有有钱人的做法，关键在于是去做还是不去做，早一天做就是早一天实现自己的理想，早一天实现自己的理想等价于延长自己的生命。想通了这点后，我决定立即动手去做，自然，在现有的条件下面，写点儿科普类的文章是一个最现实的选择。我手头有一本令我爱不释手的曹天元写的《上帝掷骰子吗？——量子物理史话》，这本书曾经在网上传播，最后结集出版。我想，我也可以以曹天元为榜样，写点东西。于是，我想到了写相对论。虽然我最喜欢的是天文学，但是鉴于大众对于相对论的陌生感要远远超过天文方面的知识，因此，我决定先写一本介绍相对论的浅显的书。我的目标是凡是受过高中以上教育的普通人，都能轻松地阅读这本书。我并没有写一本非常严谨的科普读物的能力，我只能按照自己平常跟人聊天的习惯，以一种“侃大山”的形式来聊聊相对论这个话题，有很多地方加入了“戏说”的成分。希望那些被我戏谑过的大科学家们，看在我卖力传播科学知识的分上，在天堂里不会生我的气吧。

有了这个想法以后，我马上就开始动笔了。我怕自己没有毅力坚持下去，所以不急于在网上发表，想等写了一大半以后再发到网上连载，这样不至于成为“太监贴”，对得起网友。写完第二章的时候，我拿给几个好朋友看，其中有一个朋友把我这个书稿传给了出版社的高磊老师，没想到

她看过后，立即跟我取得了联系，说愿意出版这本书，这下实在让我有点受宠若惊。有了来自出版社的压力后，我一方面不得不更加认真地对待我的写作，另一方面也得到一种暗示，要坚持。

2011年5月29日动笔，到7月9日，终于完成了这本书，我在写后记的时候想计算一下到底用了多少天。我把电脑右下角的日历点开一看，不禁哑然失笑，还真是巧，大家看看：



刚刚好 42 天（不由得让人想起《银河系漫游指南》中的那个宇宙终极问题的答案），都不用数，一天也不多一天也不少，而且动笔的具体时刻和完稿的时刻都几乎是一模一样的。这 42 天来，我坚持每天晚上睡觉前写两三小时，周末则写一个通宵。说实话能坚持下来，我自己觉得并不是一件易事，因为我根本谈不上是一个作家，甚至称不上是一个写手，在写这本书之前，我从来没有一口气写过一篇超过 1 万字的文章。你们可以想到，这么一本接近 17 万字的书稿对我而言是一个多么大的挑战。

我能完成这个挑战，有两个人功不可没。一个是我的妻子，她永远是我的第一位读者，每次我写完一段，她总是第一个阅读并且不忘给我以鼓励，每次看到她看稿的过程中发出的会心一笑，我就感到莫大安慰。除了给我鼓励外，她还得起忍受我每天晚上在床头“噼里啪啦”的键盘敲击声和屏幕亮光，但是这 42 天来，除了有一个晚上把我赶到了书房以外，其他时间都毫无怨言。另一个就是出版社的高磊老师，是她每天当我的第二个读者，给了我很多的鼓励和督促，如果没有她的督促，我想我肯定会借机偷懒的。我每次完成当天的写作任务后，都会很惴惴地问：“昨晚写得还行吗？能看得

下去吗？”对第一次写书的人来说，很害怕受到打击。好在高老师作为资深编辑，深知这点，从来不给我任何打击，全是鼓励和肯定的话，甚至对我的“的地得”不分的语文水平也抱以非常大的宽容。她宽慰我说你完全不用管“的地得”的用法，我们的审稿编辑会帮你修订，我真是大为感激。我深知自己如果写字的时候一旦去考虑何时用“的”，何时用“地”，我就完了，思路完全没有办法延续。

同时也要特别感谢我的几位同事，他们为本书绘制了精美的插图，他们是平哥、大力、国华和君君，他们的工作为这本书增添了很多很多的温暖。

写到这里，我想对能坚持看到这里的用心读者说：有一件事情我没有忘记，在本书的第四章结尾的时候提出的四个问题，还有两个我没有回答。我想能坚持看到这里的读者，或许真的都是些用心的读者，你们之中估计有些人还对此念念不忘。其实那两个问题（长棍佯谬和潜水艇佯谬）的答案已经不是很重要了，长棍佯谬必须考虑重力对时空的弯曲效应，而潜水艇佯谬则要复杂得多，如果你真的有兴趣，大可以在网上自己搜索答案。本书的最大目的在于激发读者的求知欲和好奇心，至于多一点少一点问题的答案，其实并不是关键，如果到此时你仍然没有忘记那两个问题，说明我的目的已经达到了。

按正常理，我应当在后记之后开一个长长的参考书目的列表，但是我忍不住想问，这真的有必要吗？我的确看了不少书，如果要列出来的话，也能开一个长长的清单，但是其实要说参考，维基百科还有各种各样的网站是我参考最多的，但是我仍然觉得完全没有必要列出来。不列参考书目，我觉得还可以向广大读者表明我是一个不懂学术研究的普通人，对我来说，了解科学知识就跟看美剧、打游戏、健身娱乐没有什么本质区别，它们都是生活的一部分，都是能给人带来享受的活动。

一个业余的、不懂学术研究的、大学专业是文科的人，能不能写一点有科普价值的书呢？是不是只有真正的科学家或者至少是科班出身的正统科普作家才能写科普书呢？我想显然是未必的。在我看过的所有这类书籍中，恰恰是两个“外行人”写的书最好看，一个就是前面提到的写《万物简史》

（A Short History of Everything）的比尔·布莱森，还有一个就是中国人曹天元。我想，恰恰因为他们是外行人，所以他们更能知道普通人能看懂什么，看不懂什么，什么样的术语是恰当的，什么样的术语是过于专业的。

比尔·布莱森在《万物简史》的引言中给我们讲了一个他小时候的故事，说学校发下来一本地理教科书，他一下子就被一张精美的地球剖面图吸引住了。回到家里迫不及待地读了起来，可是却发现，这本书一点都不激动人心，它没有回答任何正常人脑子里都会冒出来的问题：我们的行星中央怎么会冒出一个“太阳”（高温的地核）？怎么知道它的温度的？为啥我们的地面不被烤热？为啥地球的中间不融化？要是地心都烧空了，会不会在地面形成一个大坑，我们都掉进去呢？等等。可是作者对这些有趣的问题却只字不提，永远在那里翻来覆去地说背斜啊、向斜啊、地轴偏差啊。作者似乎是有意要把一切都弄得深不可测，并且，这似乎是所有教科书作者的一个普遍阴谋：确保他们写的东西决不能去接近那些稍有意思的东西，起码要回避那些明显有意思的东西。这个故事很容易引起我的共鸣，想想我们从小到大看过的那些教科书和指定的课外读物吧，对于那些真正有意思的问题，那些始终在我们脑中萦绕的朴素疑问，似乎那些书从来不愿意正面回答，似乎一回答那些问题就丢掉了作者的荣耀。我们其实可以改变这些。

我这一辈子最大的愿望之一是，在我老得快要死掉的时候，收到几张世界知名的科学家的信或者卡片或者电子邮件什么的任何东西，上面说：年轻的时候曾经看过您写的一本好像是讲科普的书，虽然名字和内容现在都已经想不起来了，但是我记得我当年看完以后就毅然决定投身物理学，以至于有今天的一点点小成就，非常感谢您，祝您老一路走好。

如果真有这样的一天到来，我想我会带着非常愉快的心情上路，这远比能睡进豪华骨灰盒、住进豪华墓地，来得重要得多。

完。

汪洁