



时空之舞

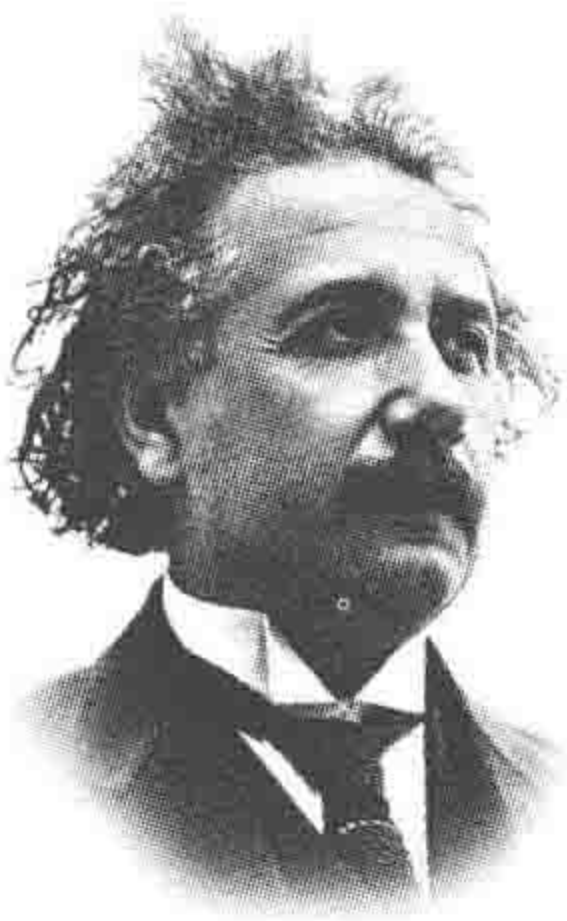
中学生能懂的相对论

陈海涛 / 著



北京大学出版社
PEKING UNIVERSITY PRESS

Shikong zhi Wu
Zhongxuesheng Neng Dong
de Xiangduilun



时空之

舞

中学生能懂的相对论

陈海涛 / 著

Shikong zhi Wu

Zhongxuesheng Neng Dong
de Xiangduilun



北京大学出版社
PEKING UNIVERSITY PRESS

图书在版编目(CIP)数据

时空之舞:中学生能懂的相对论/陈海涛著. —北京:北京大学出版社,2017.9

ISBN 978-7-301-28589-3

I. ①时… II. ①陈… III. ①相对论—青少年读物 IV. ①O412.1-49

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017)第 195728 号

书 名 时空之舞——中学生能懂的相对论

著作责任者 陈海涛 著

责任编辑 刘 啸

标准书号 ISBN 978-7-301-28589-3

出版发行 北京大学出版社

地 址 北京市海淀区成府路 205 号 100871

网 址 <http://www.pup.cn> 新浪微博 @北京大学出版社

电子信箱 zpup@pup.cn

电 话 邮购部 62752015 发行部 62750672 编辑部 62754271

印 刷 者 北京大学印刷厂

经 销 者 新华书店

730 毫米×980 毫米 16 开本 18.75 印张 插页 4 270 千字

2017 年 9 月第 1 版 2017 年 9 月第 1 次印刷

定 价 46.00 元

未经许可,不得以任何方式复制或抄袭本书之部分或全部内容。

版权所有,侵权必究

举报电话:010-62752024 电子信箱:fd@pup.pku.edu.cn

图书如有印装质量问题,请与出版部联系,电话:010-62756370

序言 1



陈海涛先生的《时空之舞》一书，用年轻人常用的语言，优美的笔法，对相对论做了通俗易懂的介绍。

此书用主要篇幅介绍了爱因斯坦的狭义相对论，包括它的建立、主要内容和有趣的结论，诸如时钟变慢、动尺收缩、速度合成、质能关系、双生子佯谬、车库佯谬等等，还用中学生可以看得懂的初等数学，介绍了相对论的一些重要公式的推导，对于希望深入了解相对论的普通读者有一定参考价值。

这本书还用一定篇幅对广义相对论做了介绍，包括它的物理基础“等效原理”、它的主要内容及三个最重要的实验验证。

特别难能可贵的是，作者用自己设计的方法，推导了质能关系，用狭义相对论和等效原理探讨了引力红移，避开了广义相对论中难懂的黎曼几何，得到了与广义相对论相同的结果。

总之，这是一本很好的科普读物，值此广义相对论发表 100 周年之际，我向读者们推荐这本书。

A handwritten signature in black ink, consisting of stylized Chinese characters, located at the bottom right of the page.

北京师范大学物理系教授 赵峥

序言 2



2015 年是爱因斯坦建立广义相对论 100 周年，提出狭义相对论 110 周年。爱因斯坦的相对论是 20 世纪物理学的两个重大发现之一，已经成为了现代物理学不可或缺的基石。相对论，特别是狭义相对论，已经在大量科学实验中得到了非常精确的检验，也得到了广泛的应用。对于普通民众而言，也许已经从各种科幻小说或者《接触》《星际穿越》等电影中接触到了诸如时间旅行、黑洞、虫洞等概念，对这些可能的物理现象所涉及的相对论知识感兴趣。但是在真正接触到相对论以后，大部分人对相对论仍然感到莫测高深，甚至有的人开始质疑相对论的正确性。

理解相对论的困难之处在于其中的很多物理效应，如尺缩效应、钟慢效应等与我们通常的直觉相抵触。然而现代物理学的发展已经摆脱了对朴素直觉的依赖。在学习和研究物理知识时，我们也需要培养新的物理直觉。如何向普通读者介绍相对论知识，帮助读者理解并掌握这些知识是对科普工作者的一个挑战。

在本书中，作者对相对论的基本原理的发展、建立进行了全面细致的介绍，其中穿插着不少有趣的历史故事，可读性很强。此外，作者对相对论中重要的物理效应以及佯谬进行了通俗易懂的诠释，有利于读者正确地理解相对论。特别让人欣慰的是，在不失物理正确性的前提下，书中的讨论并未用到高深的数学知识，而只依赖于中学数学



的知识。一个有求知欲的读者如果肯多花一点时间对书中的内容进行思考和推敲，完全可以很好地掌握狭义相对论的基础知识。即便对于相对比较困难的关于引力的广义相对论，作者也努力给出了较易理解的物理图像。

在此，我向广大读者郑重地推荐此书。

北京大学物理学院教授 陈斌

序言 3



非常高兴看到陈海涛大神关于相对论的科普书问世。对于广大的天文爱好者来说，陈海涛的名字大家可能都不熟悉，不过说到他的网名小醉 (littledrunk)，会有很多跟我一样的 BBS 时代的天文爱好者知道这个名字。我初次见到小醉是在 2001 年初的一次 BBS 活动上。当时我在北大未名 BBS 上做一个天文讲座，他是北大未名 BBS 的站长，进行这次活动的组织。后来我们经常在水木清华 BBS 和未名 BBS 的天文版上进行热情洋溢的灌水和讨论。小醉表现出很高的天文水平和科学素质，他对问题讨论的认真和专业让我吃惊，可以看出他阅读了大量的天文书籍并进行了深入的思考，是我认识的最为低调、同时又对天文了解最多的非天文专业的爱好者。2001 年 11 月我们在兴隆观测狮子座流星雨，当时在微软亚洲研究院做软件研发工作的小醉提出用 PDA 来记录流星雨，并很快写了一个程序工具来进行记录，显示出他的创新思想和执行力。小醉后来还出任了水木清华 BBS 天文版的版主，多次组织和参加天文爱好者的聚会活动。

2006 年 9 月份，我在水木清华 BBS 天文版为《天文爱好者》杂志上使用矮行星 Eris 的中文名字征求意见，小醉在回帖中首次提出了“阋神星”这一富有文化底蕴的命名，并于 2007 年 6 月被中国天文学会天文学名词审定委员会通过投票正式选用。大家从本书的文字中也可以看到作者多处引经据典，表现出很高的文史修养。

天文学对人类科技进步具有巨大的推动作用。天文观测一开始对历



法和农业发展起到指导作用，然后推动了航海的发展和牛顿力学的建立。光速的第一次成功测量来自于天文观测。相对论与天文学的关系密不可分，狭义相对论与广义相对论从诞生到发展和验证都离不开天文学。作者在书中使用中学水平的数学对相对论进行了深入浅出的介绍，同时介绍了很多与相对论相关的天文知识和天文现象，并对其中的一些效应和原理进行了浅显易懂的分析和解释。书中介绍了太阳边缘的星光偏折、引力红移、水星近日点进动、雷达回波延迟等广义相对论的几大天文学实验验证，以及木卫食测光速、光行差、蟹状星云、爱因斯坦行星、回光效应、类星体喷流视超光速、中微子爆发、超新星、引力透镜、黑洞、脉冲星、引力波等天文现象和天文发现，内容精彩生动，引人入胜。书中也讲述了很多有趣的故事，介绍了许多出人意料的科学发现，表明兴趣和努力对于发现的重要性。同时本书还介绍了一些年轻学生的科学贡献，鼓励学生从小开始学科学、爱科学。

本书既是关于相对论的科普书，也是一本极好的天文科普书。特此向广大学生和天文爱好者强烈推荐！

北京天文馆馆长、中国天文学会

普及工作委员会主任 朱进

前言



爱因斯坦的相对论是人类建立的最伟大的理论之一。这一理论好像“光彩夺目的火箭，它在黑暗的夜空，突然划出一道十分强烈的光辉，照亮了广阔的未知领域”（德布罗意语）。狭义相对论的公式简单而美丽，但是却很难理解，因为它改变了人们的常识，改变了人们的时空观念，让人们很难接受。20 世纪初曾有“只有三个半物理学家懂相对论”的说法，诺贝尔奖委员会给爱因斯坦的授奖理由也只是“由于爱因斯坦发现光电效应定律以及他在理论物理学领域的其他工作”而没有直接提及相对论。可见相对论的思想确实惊世骇俗，连很多当时的物理学家也难以接受。但是相对论提出迄今已经一百多年，通过了广泛的实验验证，经受住了时间的考验，它的正确性已经毋庸置疑。狭义相对论的公式是如此的简单，初中生都能看懂，它的理解就这么难吗？观念的改变如此难以逾越吗？

科学发展到今天，计算机已经从科学家的实验室搬到了普通人的桌面上，互联网已经无处不在。计算机、互联网的普及又推动了社会科技水平的提高。信息极大丰富，人们在生活、资讯中广泛接触科学，从天文、航天到飞机、汽车、家电、电脑、手机，从能源到医疗、投资、娱乐，处处都有科学。但是，相对论还处于科学家们的神坛上，只是科学家的工具。一般文献中对于相对论的介绍充满各种高深的数学和难以理解的概念，这让大众更加望而却步，感到神秘和膜拜。人们对学习和理解相对论失去自信，听到相对论时想到的往往是时空穿越、长生不老等



等科幻、神话故事，也出现了很多相关的文学、影视作品。相对论成为人们的一种娱乐题材。还有很多热爱科学的人士，因为不能理解相对论，走上了挑战和反对相对论的道路，耗费了大量的青春和精力。

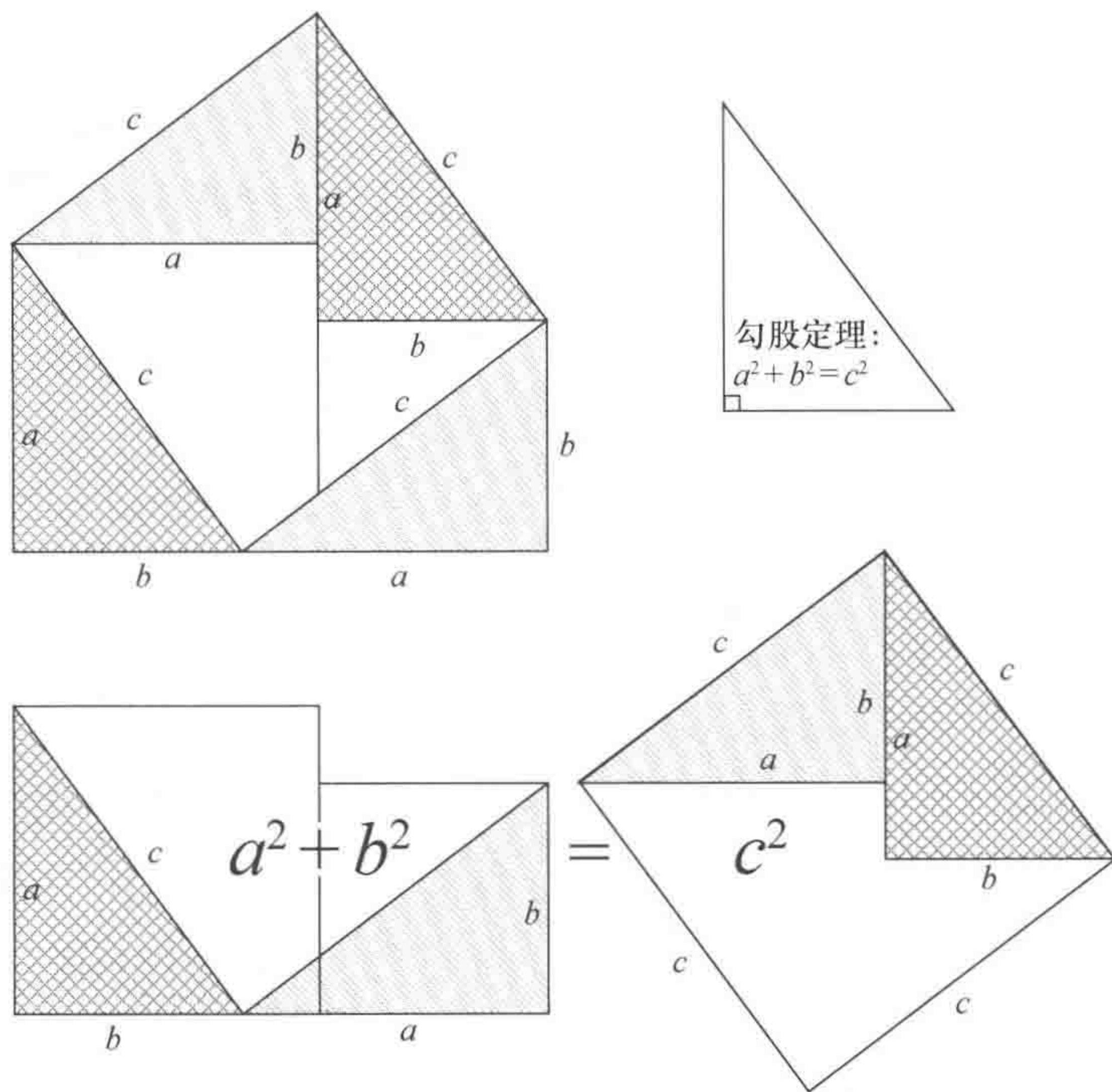
我在 15 岁的时候就已经会推导洛伦兹变换公式了，但是却更加困惑。光速为什么不变？垂直于运动方向上的长度为什么不收缩？惯性系变换为什么是线性的？难道就是因为书上这么说吗？一切变得似是而非，尽管会做书上的很多习题，却不能真正理解，只是知其然而不知其所以然。那时候我在家里参加劳动，白天挑担子把肩膀磨破了，晚上衣服跟血肉粘在一起结成痂，撕都撕不下来，疼痛难忍，但是却不忘思考科学的奥秘，乐此不疲。多年以后我成为一名科研人员，在方正、微软、盛大研究院等研究机构工作，虽然从事计算机领域的研发，却一直保持着对相对论的浓厚兴趣。愚者千虑，必有一得，多年断断续续的业余思考和学习，使我积累了不少收获，对相对论的理解和认识更加清晰。我最近有空闲把自己的收获总结整理了出来，在这里与大家一起分享，希望对读者学习和理解相对论有所帮助。

我相信，只需要高中生的基础知识就完全可以理解相对论，一些优秀的初中生也有能力理解。因此本书基本在初等数学的范围内进行介绍，尽量不涉及高等数学。同时为了更多的人能够看懂，本书内容的线索不同于其他常见的相对论讲述方式，并不介绍以太论、迈克尔逊-莫雷实验、闵可夫斯基空间以及黎曼几何、测地线等内容或概念，以免增加复杂性和理解上的困扰。另外，很多人误认为迈克尔逊-莫雷实验是狭义相对论的基础，但是在相对论出现以前斐兹杰惹和洛伦兹已经在以太论的基础上对迈克尔逊-莫雷实验的结果给出了解释，因此迈克尔逊-莫雷实验既不支持也不反对相对论。1954 年爱因斯坦在给达文波特的信中说：“在我自己的思想发展中，迈克尔逊实验的结果并没有引起很大的影响。我甚至记不起，在我写关于这个题目的第一篇论文时，究竟是不是知道它。”

本书中有一些数学公式推导。有些读者是不喜欢数学公式的，但是本书所用到的数学都比较浅，只需要付出一点点耐心，就会得到很大的



收获。同时本书尽量把公式较密集，计算和推导比较复杂的部分放到了附录中，以适应不同层次的读者。另外书中用了很多图形来进行说明，即使不看公式推导，也能很容易理解大部分内容。相对论的初等理解不需要复杂的数学，其基本公式只需要用到勾股定理。勾股定理以其简单、重要和美妙而充满魅力，其证明方法有 500 多种，是数学定理中证明方法最多的定理。下图是一个简单直观的割补法证明，无须任何公式



勾股定理的直观证明

推导，一看便知。如此深刻而基础的定理却有如此简洁精彩的证明，给人以强烈触动，同时也给人以信心：科学并不必然是高深莫测的，只要有正确的方法，普通人也可以弄明白。

小 醉

2017 年春于北京

目 录

第一章 子非鱼思想	001
第二章 相对性原理	008
§ 2-1 惯性参考系	008
§ 2-2 伽利略相对性原理	010
§ 2-3 狭义相对性原理	013
第三章 绝对时空观	018
§ 3-1 牛顿对绝对时空观的表述	018
§ 3-2 伽利略变换	019
第四章 光速不变原理	024
§ 4-1 光速的测量	024
§ 4-2 光的本性	047
§ 4-3 光速与光源的运动无关	055
§ 4-4 光速与观察者的运动无关	061
第五章 相对时空观	065
§ 5-1 绝对时空观的困境	065
§ 5-2 时间相对性	068
§ 5-3 空间相对性	081
第六章 狭义相对论	085
§ 6-1 背景假设	085
§ 6-2 洛伦兹变换	088
§ 6-3 尺缩效应	089
§ 6-4 同时的相对性	094
§ 6-5 钟慢效应	101
§ 6-6 相对论速度合成	106



§ 6-7	前灯效应与光行差	110
§ 6-8	相对论多普勒效应	113
§ 6-9	双生子佯谬	117
§ 6-10	隧道佯谬	123
§ 6-11	车库佯谬	125
§ 6-12	爱因斯坦行星	127
第七章	超光速存在吗?	132
§ 7-1	光斑和影子的移动	132
§ 7-2	第三观察者	135
§ 7-3	超光速旋转	136
§ 7-4	回光效应	137
§ 7-5	横向视超光速与类星体视超光速喷流	138
§ 7-6	视向超光速星系	140
§ 7-7	刚体振动	141
§ 7-8	相速度与群速度超光速	142
§ 7-9	切伦科夫效应	146
§ 7-10	超新星 SN1987A	150
§ 7-11	其他超光速实验	154
第八章	相对论动力学	155
§ 8-1	牛顿力学与狭义相对论的冲突	155
§ 8-2	考夫曼实验	156
§ 8-3	贝托齐实验	157
§ 8-4	质心运动守恒	158
§ 8-5	运动物体的质量	161
§ 8-6	相对论动量	164
§ 8-7	相对论动能与质能方程	165
§ 8-8	相对论能量-动量关系	168
第九章	广义相对论	174
§ 9-1	惯性质量与引力质量	175



§ 9-2	厄缶实验	180
§ 9-3	等效原理与爱因斯坦电梯	182
§ 9-4	等效原理的空间验证	185
§ 9-5	广义相对性原理	187
§ 9-6	引力场方程	189
§ 9-7	光线弯曲	192
§ 9-8	引力红移与引力时间膨胀	197
§ 9-9	时空弯曲与引力几何化	201
§ 9-10	雷达回波延迟	205
§ 9-11	引力透镜	207
§ 9-12	黑洞	212
§ 9-13	虫洞	217
§ 9-14	水星近日点进动	219
§ 9-15	引力波	220
§ 9-16	文学影视作品中的相对论效应	236
附录	关于相对论的一些数学推导	243
1	惯性系之间的变换是一次变换	243
2	洛伦兹变换的初等推导	255
3	惯性系变换只有伽利略变换和洛伦兹变换两种	261
4	相对论动能公式的初等推导	265
5	从开普勒三定律到万有引力定律	268
6	从等效原理到时空弯曲	275
7	太阳边缘的星光偏折角计算	280

第一章 子非鱼思想



理解相对论的关键在于换位思考，就是要理解不同观察者对同一事物的观察结果是有差别的，我们把它叫作子非鱼思想。

《庄子·秋水》中有一段很有意思的对话：庄子与惠子游于濠梁之上。庄子曰：“鲦鱼出游从容，是鱼之乐也。”惠子曰：“子非鱼，安知鱼之乐？”庄子曰：“子非我，安知我不知鱼之乐？”惠子曰：“我非子，固不知子矣；子固非鱼也，子之不知鱼之乐，全矣。”庄子曰：“请循其本。子曰‘汝安知鱼乐’云者，既已知吾知之而问我。我知之濠上也。”这段话的大意是：庄子和惠施在濠水的一座桥上散步。庄子看着水里的鲦鱼说：“鲦鱼在水里游得从容自在，它们真是快乐啊。”惠子说：“你又不是鱼，怎么会知道鱼的快乐呢？”庄子说：“你不是我，怎么知道我不知道鱼的快乐呢？”惠子说：“我不是你，所以不知道你；但你也不是鱼，因此你也无法知道鱼是不是快乐。”庄子说：“请回到我们开头的话题。你问‘你怎么知道鱼快乐’这句话，这就表示你已经肯定了我知道鱼快不快乐。我是在濠水的桥上知道的。”

这就是著名的濠梁之辩。惠子的推理体现了严密的逻辑思维，而庄子则在无可辩驳之处灵活巧妙地转换了话题，飘然而过，体现了逍遥游的自由境界，这段对话历来为人们所津津乐道。

这场辩论看起来是庄子赢了，但是这种胜利使得古人对事物的探究



陷入所谓文字的智慧和哲学的思辨，而失去了科学的精神。蔡元培说过：“我国从前无所谓科学，无所谓美术，惟用哲学以推测一切事物，往往各家玄想独断。”这种思辨和争论没有科学的标准，只要双方愿意，可以一直继续辩论下去，往往是后息者为胜，能言善辩者具有优势。



图 1-1 子非鱼

如果庄子和惠子换一种说话的方式，就不会发生争论，皆大欢喜了：“你看那些鱼儿，我觉得它们游得好快乐啊！你觉得呢？”“我觉得它们游得有些忧伤。”“那是你自己有些忧伤吧，哈哈！”陈述观察状态的时候加上观察者是客观、尊重别人的做法，因为别人的观察结果未必和你一样，把个人的观点强加于别人是对别人的不尊重。要是人人都能独立思考，尊重理解对方，不把个人意愿强加于别人，那么世界上会减少很多的矛盾与冲突！

母亲为女儿的假期报满了辅导班，女儿生气地说：“为什么你说什么就是什么？也不问一下我的意见！”我们的老师和家长担心孩子走弯



路、犯错误，往往代替孩子思考，把自己认为正确的东西强加于孩子，让孩子接受。这对孩子是一种不尊重，同时扼杀了孩子独立思考的机会，很自然地会招来反抗。没有人是可以代替别人思考的，你认为正确的经验对别人不一定是正确的或者合适的，即使对别人是正确的你也不能左右对方是否接受。

莎士比亚说过：一千个读者就有一千个哈姆雷特。对于同一个事物，不同的观察者由于观察的角度不同，完全有可能得到不同的观察结果。“横看成岭侧成峰，远近高低各不同。不识庐山真面目，只缘身在此山中。”苏轼《题西林壁》一诗表明由于人的观察角度局限，对事物的认识具有片面性。即使是同一个人的两只眼睛，同时看到的图像也是有区别的。如果有人把自己的观察结果或者推断当作是绝对的，进而想要其他人接受，那么就可能会发生冲突。有一幅著名的“青蛙与马”图画(见图 1-2)，两个人从相差 90 度的不同角度观察，一个人看到的是青蛙，而另一个人看到的则是马。如果这两个人都不肯改变观察的角度，坚持认为自己看到的是对的，那么谁也说服不了谁，都成了不识庐山真面目的山中人。我们要学会换位思考，换一个角度看问题，才能够全面、正确地获得知识。

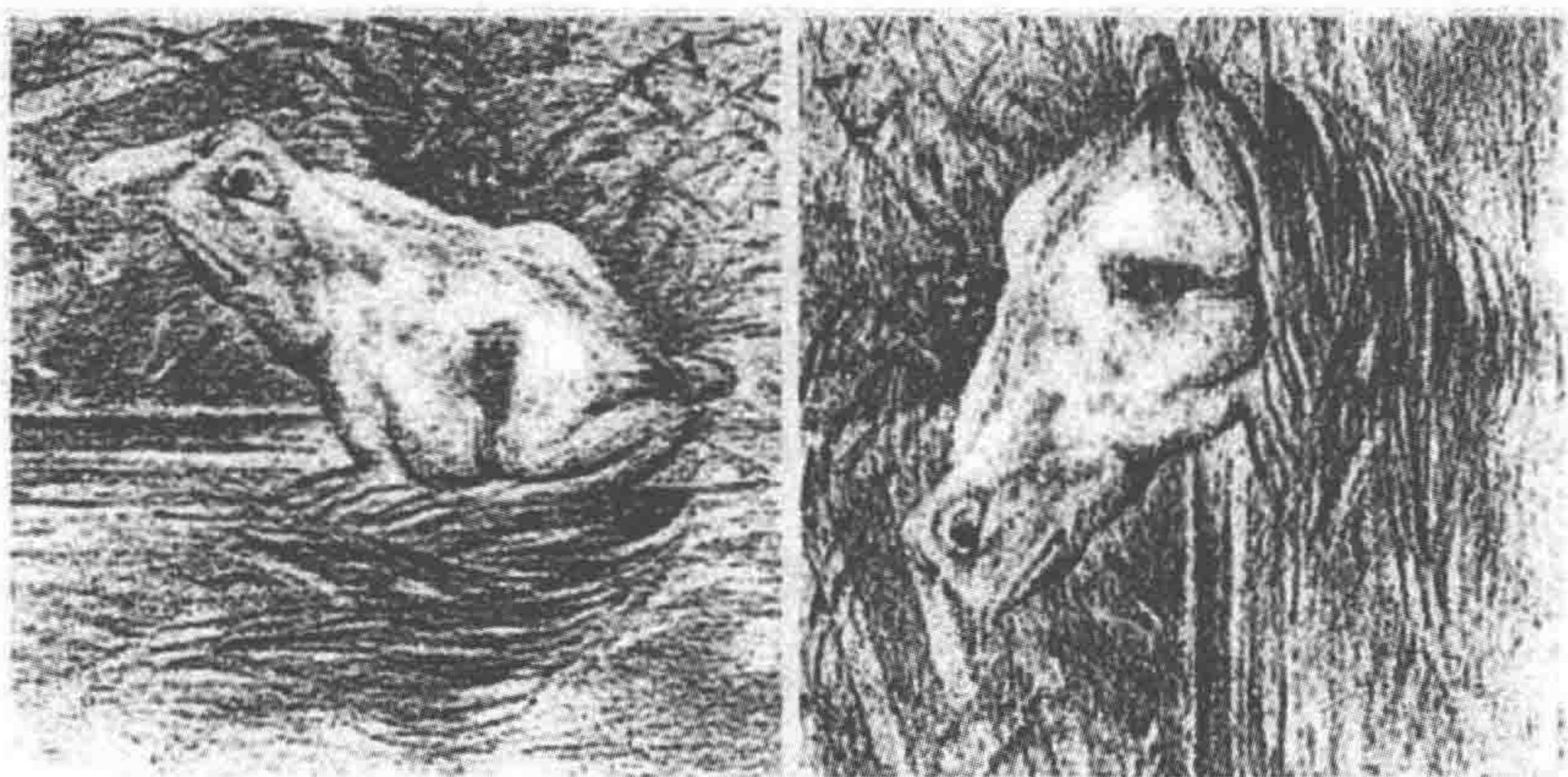


图 1-2 青蛙与马

不同观察者的经验存在差别，在承认差别的基础上才能建立共同的