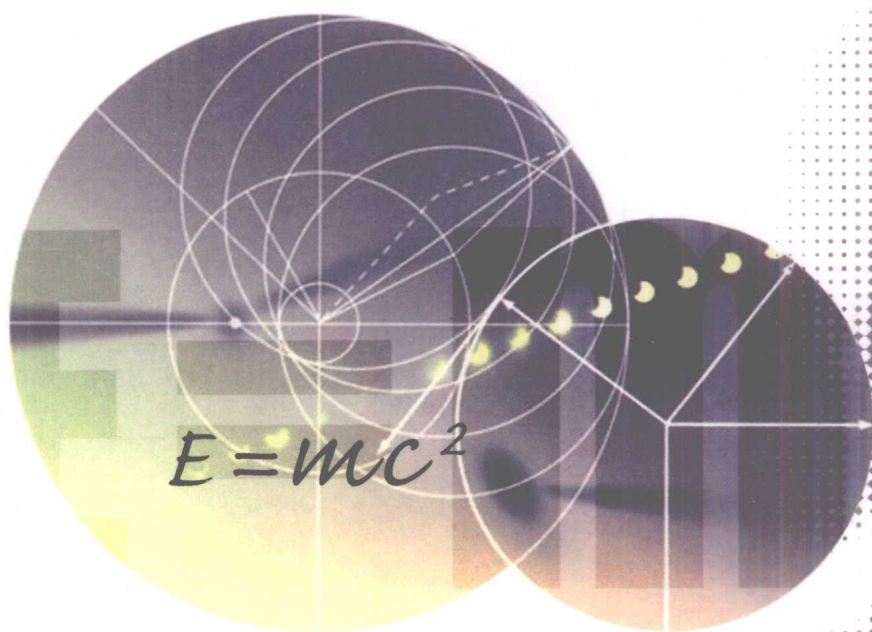




$$E=mc^2$$

108 Questions
on Relativity

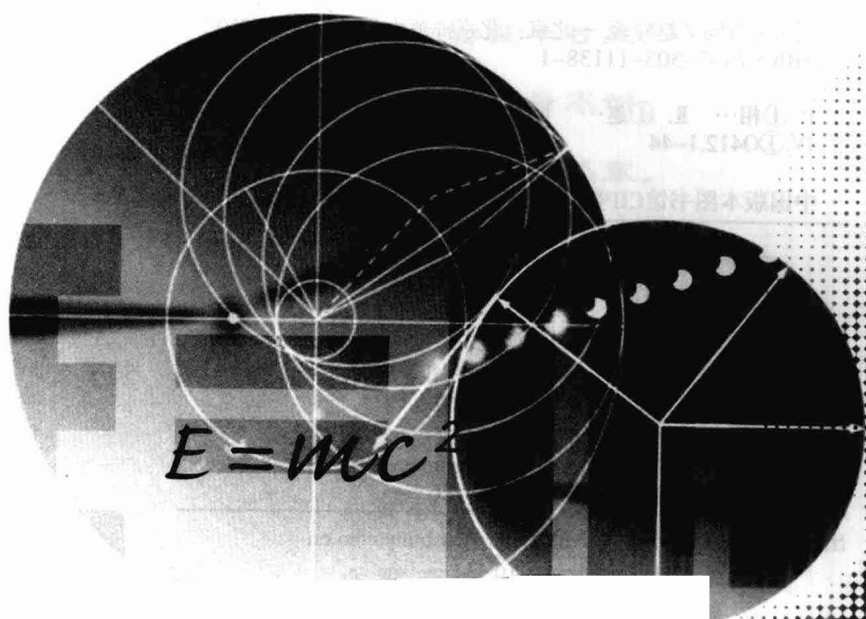
相对论百问

赵 峥 ◎ 著

0112.1



北京师范大学出版集团
BEIJING NORMAL UNIVERSITY PUBLISHING GROUP
北京师范大学出版社



on Relativity

相对论百问

赵 峥 ◎ 著



北京师范大学出版集团
BEIJING NORMAL UNIVERSITY PUBLISHING GROUP
北京师范大学出版社

图书在版编目(CIP)数据

相对论百问 / 赵峥著. —北京: 北京师范大学出版社, 2010.7
ISBN 978-7-303-11138-1

I. ①相… II. ①赵… III. ①相对论—问答
IV. ①O412.1-44

中国版本图书馆CIP数据核字 (2010) 第 126676 号

营销中心电话 010-58802181 58808006
北师大出版社高等教育分社网 <http://gaojiao.bnup.com.cn>
电子信箱 beishida168@126.com

出版发行: 北京师范大学出版社 www.bnup.com.cn
北京新街口外大街 19 号
邮政编码: 100875

印 刷: 北京画中画印刷有限公司
经 销: 全国新华书店
开 本: 170 mm × 230 mm
印 张: 8.5
字 数: 130 千字
版 次: 2010 年 7 月第 1 版
印 次: 2010 年 7 月第 1 次印刷
定 价: 14.00 元

策划编辑: 梁志国 责任编辑: 梁志国 范 林
美术编辑: 毛 佳 装帧设计: 毛 佳
责任校对: 李 菡 责任印制: 李 丽

版权所有 侵权必究

反盗版、侵权举报电话: 010-58800697

北京读者服务部电话: 010-58808104

外埠邮购电话: 010-58808083

本书如有印装质量问题, 请与印制管理部联系调换。

印制管理部电话: 010-58800825

飞花两岸照船红，
百里榆堤半日风。
卧看满天云不动，
不知云与我俱东。

宋·陈与义

只闻白日升天去，
不见青天降下来。
有朝一日天破了，
大家齐喊“阿瘡瘡”！

明·唐伯虎



序 言

相对论是青少年最感神奇，也觉得最为难懂的科学理论。不过，狭义相对论诞生（1905年）至今已经100多年了，广义相对论也将要迎来它的100岁生日（1915年），相对论已不再是最新的科学理论。今天的科学发展水平和教学条件已经完全有可能让青少年对相对论有一个初步的、基本正确的了解。这对于提高他们的科学素质，培养他们的创新精神和探究能力，增强他们的学习兴趣，拓宽他们对客观世界的认识都非常重要。

目前，大学物理专业的“普通物理”和“理论物理”课，以及非物理专业的“大学物理”、“近代物理”课中，都会讲授狭义相对论（一般不讲广义相对论）。中学课程改革后的高中物理课本中，也在选修部分加进了狭义相对论的初级内容。然而，由于相对论的时空观念与经典物理学以及人们生活中的直观感受有很大不同，老师和同学往往觉得理解上非常困难。对于同学提出的五花八门的问题，老师感到难以招架。许多中学老师干脆略去课本中的相对论部分，反正是“选修”，不选也可以。大学老师无法略去不讲，于是下了很大工夫去钻研，但许多人仍感到底气不足，担心讲得不对误人子弟，也担心讲错了面子上过不去。

笔者长期从事相对论的研究与教学，经常做科普讲座，同时参与了大学与中学的课程改革，对老师感受到的困难深有体会。

为了能够对大学和中学的相对论教学有所帮助，作者尝试把自己长期学习、讲授、研究相对论积累的知识和体会，以“问答录”的形式写出来，与广大老师和同学交流探讨，希望有助于大家对相对论的理解，有助于大学和中学的相对

论教学。

本书共分五个部分。第一部分“狭义相对论”是这本书的重点，它描述在运动速度接近光速时凸显出来的时空特性。出现在大学和中学教科书中的正是这一部分内容。所以本书列出了较多的问题从各个角度加以阐述。不仅对同时的相对性、动尺收缩、动钟变慢、双生子佯谬、质能关系等相对论效应做了尽可能清楚的讲解，而且对通常相对论书籍中很少解释的一些基本问题也着力加以说明，例如狭义相对论最核心的思想是什么，爱因斯坦如何完成最关键的思想突破，为什么要“约定”（规定）光速，为什么光速在相对论中处于核心地位，为什么相对论的缔造者是爱因斯坦而不是其他人，等等。弄清这些问题对于老师把握相对论的理论至关重要。

第二部分“广义相对论”是狭义相对论的推广和发展，广义相对论认为万有引力不是一般的力，而是时空弯曲的表现。相对论专家惠勒这样形象地解释爱因斯坦的广义相对论：“物质告诉时空如何弯曲，时空告诉物质如何运动。”本书在这一部分中，尽可能通俗地介绍了广义相对论的理论基础、框架和实验验证，并简明地讲解了它的数学工具——黎曼几何。广义相对论是爱因斯坦一生最得意的杰作。他曾说过：“狭义相对论如果我不发现，5年之内就会有人发现；广义相对论如果我不发现，50年之内也不会有人发现。”

第三部分“黑洞”和第四部分“宇宙学”是目前相对论研究的两个最重要的前沿领域，也是青少年最感兴趣、媒体上不断出现的科学内容。

黑洞最初被认为是一颗只进不出的看不见的星，后来发现黑洞有温度和热辐射。本书阐明了黑洞的这些特点，列出了最近关于黑洞理论的“打赌”和争论的问题，同时还介绍了伴随黑洞理论而升起的一颗科学界的明星——霍金。霍金是继爱因斯坦之后对相对论贡献最大的人。他曾说过一句名言：“当爱因斯坦讲‘上帝不掷骰子’的时候，他错了。对黑洞的思索向人们揭示：上帝不仅掷骰子，而且有时还掷到人们看不见的地方去了。”

本书在宇宙学部分，描绘了相对论给出的宇宙演化图像，有限无边的脉动宇宙模型和无限无边的膨胀宇宙模型， α 、 β 与 γ 提出的大爆炸学说及其观测验证。书中还简介了近年来宇宙学研究中的“暗物质”、“暗能量”概念，以及对宇宙学红移和哈勃定律的最新理解：它们反映的不是多普勒效应，而是引力效应。本书还对神乎其神的虫洞（时空隧道）和时间机器做了简要解释，这些问题的讨论近年来进入了相对论研究的范围。不过本书对宇宙早期演化的细节着墨不多，相关的、大同小异的宇宙模型层出不穷。正如一位相对论专家所告诫：“千万别去追一辆公共汽车、一个女人或者一个宇宙学新理论，因为用不

了多久，你就会等到下一个。”

本着给读者“一个真实的爱因斯坦”的精神，作者在第五部分“爱因斯坦”中，对这位相对论的缔造者做了尽量实事求是的描述。从中不仅能看出爱因斯坦的伟大，也能看到他独特的成才之路。特别值得注意的是：爱因斯坦对自发组织的读书俱乐部“奥林匹亚科学院”的肯定，对大学和中小学教育方式的批评，以及他对阿劳州立中学的赞扬，这是他一生中唯一称赞过的学校：“这所学校用它的自由精神和那些毫不依赖外部权威的教师的淳朴热情，培养了我的独立精神和创造精神，正是阿劳中学成为了孕育相对论的土壤。”

本书共列出108个问题，其中36个是与目前的大学和中学教学直接相关的狭义相对论问题，另外72个是关于广义相对论、黑洞、宇宙学和爱因斯坦生平的用以开拓视野的辅助性问题，问题的选择除了顾及知识性之外，还注意提供培养学生探究精神和创新能力的素材。

我对写这样一本书原本有顾虑，主要是担心自己水平有限，难免发生错误。后来想起曾在一本书中看到华罗庚先生对陈景润先生讲过这样一句话：一个人要想一点错误都不犯，最好是什么都别写。于是我以尽量少犯错误并虚心向读者求教的精神来写好这本书，以期通过共同的探讨，求得共同的进步。如果本书能对我国大学和中学的相对论教学有一点帮助，笔者写作本书的目的就达到了。

本书在写作过程中得到我的老师刘辽先生的鼓励与帮助。陆埏先生向作者提供了有关宇宙学红移和爱因斯坦成就等方面的宝贵资料。裴寿镛教授为本书，特别是其中狭义相对论部分，提了大量修改、补充意见，书中有些文字直接取自他的修改稿，作者在此表示深切的感谢。

相对论组的研究生黄基利协助作者做了大量的工作，书稿的大部分是他帮助打字、整理的。周史薇、张聚梅等研究生也协助作者做了许多工作。本书的写作还得到郭玉英教授、胡擎环教授、刘文彪教授、梁志国博士、范林编辑和北京师范大学出版社的支持。作者在此一并表示感谢。

赵峰

2010年3月于北京

目 录

一、狭义相对论 /1

1. 什么是相对论?	1
2. 什么是以太理论? 相对论诞生前夜以太理论遇到了哪些困难?	2
3. 什么是光行差效应?	3
4. 迈克耳孙实验说明了什么?	4
5. 相对论诞生前夜电磁理论遇到了什么困难?	6
6. 什么是洛伦兹收缩?	7
7. 什么是洛伦兹变换, 它与伽利略变换有何不同?	8
8. 狭义相对论建立在哪两条公理的基础之上?	9
9. 相对性原理最初是如何提出的?	10
10. 牛顿的“水桶实验”是怎么回事? 牛顿与马赫如何解释这一实验?	11
11. 相对论诞生前夜, 物理学界对相对性原理有什么争论?	13
12. 光速不变原理是如何建立的?	14
13. 爱因斯坦是如何建立狭义相对论的? ...	15
14. 什么是“同时的相对性”?	17
15. 怎样从洛伦兹变换导出同时的相对性? ...	19

16. 相对论如何解释洛伦兹收缩?	20
17. 什么是动钟变慢效应?	21
18. 什么是双生子佯谬?	23
19. 什么是多普勒效应?	25
20. 星际飞船上的宇航员会看到什么景象? 感受到哪些相对论效应?	26
21. 相对论的速度叠加公式怎么写? 可以用速度叠加达到或超过光速吗?	28
22. 相对论的质量公式是什么? 可以把火箭加速到光速吗?	29
23. 为什么相对论中的光速是极限速度?	30
24. 如何理解质能关系式 $E=mc^2$? 经典力学中的动能与相对论能量之间有什么关系?	31
25. 什么是狄拉克真空?	32
26. 什么是反物质? 反物质是如何预言和发现的?	33
27. 时间有什么特点? 什么是时间的“流逝性”和“测度性”?	34
28. 如何确定“相继时间段”的相等?	35
29. 不同地点的钟如何校准? 为什么说真空中光速各向同性是一个约定?	36
30. 为什么测量的光速都是双程光速, 不可能测量单程光速?	38
31. 相对论中空间距离如何测量?	39
32. 为什么说光速在相对论中处于核心地位?	40
33. 什么是四维时空?	41
34. 建立狭义相对论最困难的思想突破是什么?	42
35. 为什么相对论的缔造者是爱因斯坦而不是其他人?	43
36. 数学大师庞加莱如何评价爱因斯坦的工作?	44

二、广义相对论 /45

1. 狭义相对论遇到什么重要困难?	45
-------------------------	----

2. 针对上述困难, 爱因斯坦有什么新思路?	45
3. 什么是马赫原理?	46
4. 什么是引力质量? 什么是惯性质量?	47
5. 什么是等效原理?	48
6. 爱因斯坦升降机是怎么回事?	49
7. 为什么说等效原理只在一点的邻域严格成立?	50
8. 在相对论中惯性系如何定义?	50
9. 非欧几何是怎样建立的?	50
10. 欧氏、罗氏和黎氏几何各有什么特点?	52
11. 爱因斯坦怎样构建广义相对论?	53
12. 能否简单介绍一下广义相对论?	55
13. 能否对弯曲时空做一个形象的比喻?	57
14. 广义相对论有哪些实验验证?	58
15. 什么是引力红移?	58
16. 什么是行星轨道近日点的进动?	59
17. 什么是光线偏折?	60
18. 什么是引力波?	61
19. 引力波是怎样提出的?	62
20. 目前检测到引力波了吗?	62
21. 广义相对论建立后有哪些重要进展?	63

三、黑洞 /65

1. 什么是黑洞?	65
2. 黑洞是怎样形成的?	66
3. 作为黑洞边界的事件视界是怎么回事? 奇点与奇环是怎么回事?	67
4. 什么是“时空坐标互换”? 什么是单向膜区?	68
5. 落向黑洞的飞船能够掉进黑洞吗?	69
6. 什么是白洞?	70
7. 转动带电的黑洞有什么特点?	71

8. 什么是黑洞无毛定理?	72
9. 什么是奇性定理?	72
10. 什么是宇宙监督假设?	73
11. 什么是黑洞面积定理? 黑洞热力学是怎么回事?	74
12. 什么是霍金辐射?	76
13. 黑洞的负比热是怎么回事?	77
14. 什么是黑洞的信息疑难?	78
15. 信息不守恒会产生什么影响?	78
16. 霍金对信息疑难有什么看法?	79
17. 解决信息疑难的前景如何?	79

四、宇宙学 /81

1. 为什么爱因斯坦不把广义相对论用于量子论的研究, 而把它用于宇宙学的研究?	81
2. 什么是宇宙学原理?	81
3. 爱因斯坦主张的“有限无边静态宇宙”是怎么回事?	82
4. 什么是宇宙学常数?	83
5. 什么是膨胀宇宙模型和脉动宇宙模型?	84
6. 什么是哈勃定律?	85
7. 什么是火球模型?	86
8. 如何理解宇宙的“大爆炸”?	87
9. 为什么说宇宙学红移不是多普勒效应?	90
10. 为什么河外星系的退行速度可以“超光速”?	91
11. 宇宙年龄有多大? 宇宙的可观测距离又有多大?	92
12. 哪些观测结果支持了大爆炸宇宙模型?	93
13. 宇宙如何创生? 宇宙极早期是什么情况?	94
14. 宇宙到底有限还是无限?	96
15. 什么是暗物质?	98
16. 什么是暗能量?	100
17. 有没有时空隧道? 能不能制造时间机器?	102

18. 制造“可通过虫洞”和“时间机器”有什么困难?	103
----------------------------------	-----

五、爱因斯坦 /106

1. 爱因斯坦究竟是哪国人?	106
2. 中、小学时代的爱因斯坦是优秀学生吗?	106
3. 爱因斯坦为何赞扬阿劳中学的教育方式?	107
4. 爱因斯坦的大学生活有什么特点?	108
5. 爱因斯坦怎样开始自己的科学生涯?	109
6. 爱因斯坦的家庭、婚姻状况如何?	110
7. 为什么说没有比专利局对爱因斯坦更合适的工作单位了?	111
8. 在爱因斯坦的成长过程中有哪些值得注意之处?	112
9. 什么是“奥林匹亚科学院”? 它对爱因斯坦的成长有什么 影响?	113
10. 为什么说 1905 年是爱因斯坦的丰收年?	113
11. 提名授予爱因斯坦诺贝尔奖的领域有哪些?	114
12. 授予爱因斯坦诺贝尔奖的理由是什么? 为什么说爱因斯坦 未因创立相对论获诺贝尔奖?	114
13. 此后颁发的哪些诺贝尔奖与爱因斯坦的成就有关?	115
14. 爱因斯坦怎样看待自己取得成就的原因?	115
15. 爱因斯坦有哪些主要后继者?	116
16. 霍金怎样成长为卓越的学者? 他的主要成就有哪些? ...	117

主要参考文献 /120

一、狭义相对论

1. 什么是相对论？

相对论是爱因斯坦创立的一个关于时间、空间和物质三者之间关系的理论。它分为狭义相对论和广义相对论两个部分。

1905 年创立的狭义相对论是一个时空理论，描述不同惯性系之间的时空关系。

1915 年创立的广义相对论是狭义相对论的发展与推广，这是一个关于时间、空间和引力的理论。它讨论了时空与物质之间的关系，指出万有引力不是普通的力，而是一种几何效应，是时空弯曲的表现。

狭义相对论始于爱因斯坦 1905 年发表的一篇论文。这篇名为《论运动物体的电动力学》的论文，探讨了惯性系之间的时空关系，指出对于做相对运动的不同惯性系而言，两个异地事件是否“同时”发生是一个相对的概念。也就是说，静止系中的观测者认为“同时”发生在不同地点的两件事情，运动观测者认为并不是“同时”发生的。除去“同时的相对性”之外，爱因斯坦还指出了“运动时钟变慢”、“运动刚尺缩短”等时空效应。在此后发表的文章中，他又指出物质的质量和运动速度有关，并得出著名的质能关系式 $E=mc^2$ 。式中 m ， E 分别为物体的质量与能量， c 是真空中光速。

由于爱因斯坦理论的核心公式(洛伦兹变换)与洛伦兹早先提出的公式在数学形式上完全相同，但在物理解释上完全不同，为了区分自己的理论和爱因斯坦的理论，洛伦兹把爱因斯坦的理论称为“相对论”。爱因斯坦接受了这一命名。顺便说一下，“洛伦兹变换”这个名字也不是洛伦兹本人命名的，而是著名数学家庞加莱建议的。

“相对论”原来是描述平直时空中惯性系之间时空关系的一个理论。1915 年，爱因斯坦把这一理论推广到包括非惯性系和弯曲时空的情况。他认为物质的存在会造成时空弯曲，万有引力就是时空弯曲造成的效应，实际上是一种几何效应，因而只与物体的能量和动量有关，与物体的具体物质结构和成分无

关。他又认为“时空弯曲”会反过来影响物质的运动，质点在弯曲时空中的自由运动只与时空弯曲情况有关，与质点自身的物质结构和成分无关。他把自己的新理论看做“相对论”的推广，称为“广义相对论”，而把原先的“相对论”，称为狭义相对论。人们把狭义与广义相对论合在一起简称“相对论”。

在相对论诞生的前几十年中，大多数人认为平直时空中描写惯性系之间关系的时空理论属于狭义相对论，弯曲时空中的时空理论以及平直时空中涉及非惯性系的时空理论都属于广义相对论。

近几十年来，相对论界的普遍观点是把狭义与广义相对论的分界线定义在平直时空和弯曲时空之间。这就是说，平直时空中的时空理论（包括惯性系和非惯性系）都属于狭义相对论，弯曲时空中的时空理论则属于广义相对论。

由于平直时空是弯曲时空的特殊情况，狭义相对论可以看做是广义相对论的一个组成部分。

2. 什么是以太理论？相对论诞生前夜以太理论遇到了哪些困难？

1801年，托马斯·杨的双缝干涉实验表明，光是一种波动。大家都知道，水波的载体是水，声波的载体是空气或其他气态、液态、固态的物质。光既然是波，应该有一种载体。人们想起了古希腊哲学家亚里士多德的以太理论。

亚里士多德主张地球是宇宙的中心。月亮、太阳、水星、金星等天体都围绕地球转动，天体中离地球最近的是月亮。他认为“月下世界”由土、水、火、气4种元素组成，它们组成的万物都是会腐朽的。而比月亮离地球更远的“月上世界”是永恒不变的，充满了轻而透明的“以太”。不过亚里士多德认为，以太只存在于“月上世界”。19世纪的学者们则进一步认为：以太充斥全宇宙。他们认为光就是以太的弹性振动，也就是说光波的载体就是以太。光能从遥远的星体传播到地球，表明以太不仅透明而且弹性极好。

相对论诞生前夜，实验观测引发了与以太理论有关的矛盾。

既然光波是以太的弹性振动，那么以太相对于地球是否运动？当时哥白尼的“日心说”已经被普遍接受，地球不是宇宙的中心。如果认为以太整体相对于地球静止，就等于倒退回“地心说”，大家无法接受这种看法。科学界认为比较合理的设想是：以太相对于牛顿所说的“绝对空间”静止，因而在绝对空间中运动的地球，应该在以太中穿行。这就是说，以太相对于地球应该有一个“漂移”

速度。

天文学上的“光行差”现象似乎支持存在以太漂移。然而，迈克尔孙的精确实验却没有测到以太相对于地球的“漂移”速度。也就是说，作为介质的地球似乎带动了周围的以太跟自己一起运动。光行差现象认为地球(介质)运动没有带动以太，迈克尔孙实验又认为带动了以太，这一观测上的重大矛盾，就是开尔文勋爵在 1900 年英国皇家学会迎接新世纪的庆祝会上所谈的物理学的两朵乌云中的一朵。

此外，斐佐的流水实验表明“流水”(运动介质)似乎部分地带动了以太，但又没有完全带动。

总之，光行差现象表明运动介质没有带动以太，迈克尔孙实验表明运动介质完全带动了以太(即以太相对于介质静止)，斐佐实验则表明运动介质部分地带动了以太，而又没有完全带动。这三个实验的结论相互矛盾。

洛伦兹等众多物理学家注意的是迈克尔孙实验与光行差现象的矛盾。爱因斯坦注意的则是斐佐实验与光行差现象的矛盾。应该说，这两个矛盾都可以引导人们去创建相对论。

3. 什么是光行差效应？

所谓光行差效应(即光行差现象)，是天文学家早就注意到的一种现象：观测同一恒星的望远镜的倾角，要随季节做规律性变化(图 1-1)。

此现象很容易理解。比如，不刮风的下雨天，空气不流动，雨滴在空气中垂直下落，站立不动的人应该竖直打伞，跑动的人则应该把伞向跑动的方向倾斜，因为奔跑时空气相对于他运动，形成迎面而来的风，所以雨滴相对于他不再竖直下落，而是斜飘下来。如果有人想接雨水，无风时他应该把桶静止竖直放置。如果他抱着桶跑，则必须让桶向运动方向倾斜，雨滴才会落入桶中。

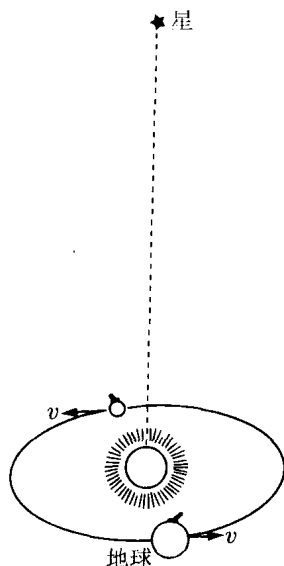


图 1-1 光行差现象

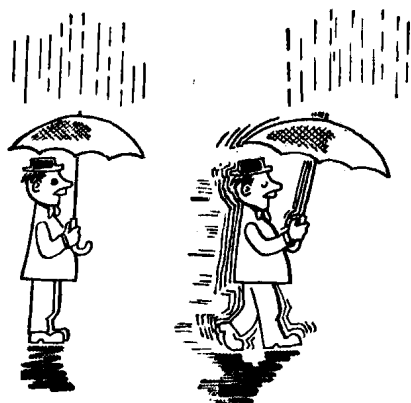


图 1-2 雨中打伞

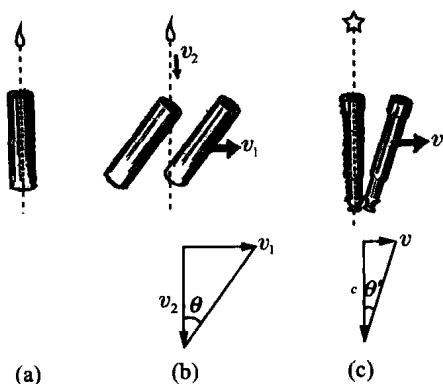


图 1-3 接雨水的桶

恒星距离我们十分遥远(除太阳外,最近的恒星离我们也在 4 光年以上),从它们射来的光可以近似看做平行光。星光在以太中运动,就像空气中的雨滴一样。如果地球相对于以太整体静止,望远镜只要一直指向星体的方向看就可以了。然而地球在绕日公转,地球上的望远镜就像运动者手中的雨伞和水桶一样,必须随着地球运动方向的改变而改变倾角,才能保证所观测恒星的光总是落入望远镜筒内。

“光行差”现象早在 1728 年就已被发现,1810 年又被进一步确认,此现象似乎表明地球在以太中穿行。当时科学界认为以太相对于“绝对空间”静止,因此地球相对于以太的速度也就是相对于“绝对空间”的速度。人们非常希望精确地知道这一速度,然而“光行差”效应的测量精度不够高,于是美国科学家迈克尔孙试图用干涉仪来精确测量地球相对于以太的运动速度。

4. 迈克耳孙实验说明了什么?

迈克耳孙干涉实验如图 1-4 所示, A 为光源, D 为半透明半反射的玻片。入射到 D 上的光线分成两束,一束穿过 D 片到达反射镜 M_1 , 然后反射回 D, 再被 D 反射到达观测镜筒 T。另一束被 D 反射到反射镜 M_2 , 再从 M_2 反射回来, 穿过 D 片到达观测镜筒 T。把此装置水平放置, v 为以太漂移方向(与地球公转方向相反)。DM₁ 沿以太漂移方向, DM₂

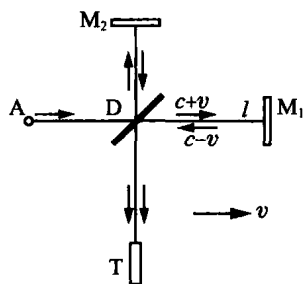


图 1-4 迈克耳孙干涉实验示意图

与以太漂移方向垂直。

在迈克耳孙干涉装置中运动的光波，就像在河中游泳的人一样。如图 1-5 所示，河水以速度 v 相对于河岸流动，河宽 $AB=l_0$ 。一个游泳的人从 A 出发以速度 u (相对于河水) 游到下游 C 点，再返身以同一速度 u 游回 A 点， AC 的长度与河宽相等，即 $AC=l_0$ 。再让同一游泳者以速度 u (相对于河水) 从 A 出发游向对岸的 B 点，到达后再以同一速度游回出发点 A 。但要注意，由于水往下游流，横渡者的游泳方向不能垂直于河岸，那样的话他将被河水往下冲，不可能恰好抵达 B 点，返回时也会出现同样的情况。为了从 A 游到 B ，游泳者游动的方向必须向上游倾斜一个角度，如图 1-6 所示。所以游泳者垂直渡河的速度应是 $u' = \sqrt{u^2 - v^2}$ 。虽然游泳者横渡的距离与向下游游动的距离都为 l_0 ，但两种情况所需的时间却不同，时间差为

$$\Delta t = \frac{l_0}{u+v} + \frac{l_0}{u-v} - \frac{2l_0}{\sqrt{u^2 - v^2}} \quad (1.1)$$

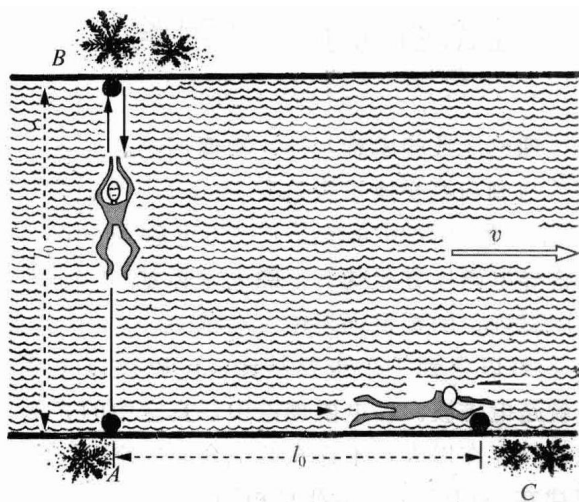


图 1-5 在水中游泳的人

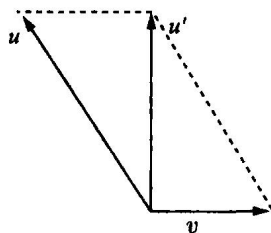


图 1-6 渡河速度合成图

迈克耳孙干涉仪中的光波，就像上面所说的游泳者，河水好比漂移的以太，河岸相当于地球。河水相对于河岸的流动可类比以太相对于地球的漂移。虽然距离 DM_1 与 DM_2 相同，但光波经过这两段距离所需的时间却由于以太的漂移而不同，用光波相对以太的速度 c 取代 u ，我们用同样的分析可知二者的时间差为

$$\Delta t = \frac{l_0}{c+v} + \frac{l_0}{c-v} - \frac{2l_0}{\sqrt{c^2 - v^2}} \approx \frac{l_0}{c} \left(\frac{v^2}{c^2} \right) \quad (1.2)$$