

智慧巨人书系

# 不断持续的幻觉

霍金点评爱因斯坦科学文集

## A Stubbornly Persistent Illusion:

The Essential Scientific Works of  
Albert Einstein

[英] 史蒂芬·霍金 ◇ 编评 黄雄 ◇ 等译

CIS K 湖南科学技术出版社

.. 013737064

智慧巨人书系

Z471.2  
08

# 不断持续的幻觉

霍金点评爱因斯坦科学文集

## A Stubbornly Persistent Illusion:

The Essential Scientific Works of  
Albert Einstein



北航

C1645174

Z471.2  
08

[英] 史蒂芬·霍金◇编评 黄雄◇等译

CIS K 湖南科学技术出版社

## 图书在版编目 (C I P) 数据

不断持续的幻觉 霍金点评爱因斯坦科学文集 / (英) 霍金 编评 ;  
黄雄 等译. — 长沙 : 湖南科学技术出版社, 2013. 1  
(智慧巨人书系)  
书名原文: A Stubbornly Persistent Illusion: The  
Essential Scientific Works of Albert Einstein  
ISBN 978-7-5357-6982-4  
I. ①不… II. ①霍… ②黄… III. ①爱因斯坦, A. (1879~1955)  
—文集 IV. ①Z471.2  
中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2011) 第 265184 号

*A Stubbornly Persistent Illusion: The Essential Scientific Works of Albert Einstein*

Copyright © 2007 by Stephen Hawking

Simplified Chinese translation copyright © 2012 by Hunan Science & Technology Press

Published by arrangement with Running Press, a Member of Perseus Books Group

ALL RIGHTS RESERVED

湖南科学技术出版社通过台湾博达著作权代理有限公司获得本书中文简体版  
中国大陆地区出版发行权。

著作权合同登记号: 18-2009-044

智慧巨人书系

不断持续的幻觉 霍金点评爱因斯坦科学文集

编 评: [英] 史蒂芬·霍金

译 者: 黄 雄等

责任编辑: 孙桂均 吴 炜

文字编辑: 陈一心

出版发行: 湖南科学技术出版社

社 址: 长沙市湘雅路 276 号

<http://www.hnstp.com>

邮购联系: 本社直销科 0731-84375808

印 刷: 长沙超峰印刷有限公司

(印装质量问题请直接与本厂联系)

厂 址: 宁乡县金洲新区泉洲北路 100 号

邮 编: 410600

出版日期: 2013 年 1 月第 1 版第 1 次

开 本: 710mm×1000mm 1/16

印 张: 20.5

插 页: 4

字 数: 348000

书 号: ISBN 978-7-5357-6982-4

定 价: 58.00 元

(版权所有·翻印必究)

## 中译本序

牛顿曾经说过：“我不过就像是一个在海滨玩耍的小孩……而对于展现在我面前的浩瀚的真理海洋，却全然没有发现。”“如果说我比别人看得更远些，那是因为我站在了巨人的肩上。”

人们通常认为，在这里够格充当巨人的应是哥白尼、伽利略和开普勒。但更为重要的巨人却应该是阿基米德。阿基米德的年代甚至比哥白尼的年代还早 17 个世纪。有人说过，他是世界上第一个物理学家，第一个应用数学家。他在物理学上的贡献主要是静力学、流体静力学和杠杆原理，在数学上的贡献是原始的积分法和无穷级数求和。他是有史以来最伟大的三位数学家之一（另外两位是牛顿和高斯）。尤为奇特的是，在他之前没有一个巨人的肩膀可以让他站上去，可以说他几乎是无中生有的。

牛顿的天才是无与伦比的。他是经典力学的创立者。他发现了白光分解和提出了光的微粒说。他和莱布尼茨各自独立地发现或发明了微积分。牛顿的动力学和微积分是阿基米德静力学和积分学思想的发展。他认为地上的自由落体和星体的运行都起源于万有引力，从而发现了引力定律。

爱因斯坦是牛顿之后的最伟大的科学家。他是狭义相对论的主要创立者，量子论的重要创立者和广义相对论的创立者。他的贡献几乎涵盖了物理学所有领域，甚至涉及化学领域。

在狭义相对论方面，他把伽利略-牛顿体系中的伽利略相对性原理推广到法拉第-麦克斯韦的电磁学体系。他引进了光速不变原理，使得同时性不再是绝对的，进而排斥了超距作用，并导致能量和质量的等效性。

为了使引力论和他的相对论思想相协调，他引进了等效原理，加速坐标系中的惯性力和引力是无法区分的。直至广义相对论的等效原理的提出，伽利略比萨斜塔实验，即惯性质量和引力质量等同的科学含义才得到充分的揭示。引力场由时空的弯曲度规来体现，自由粒子沿测地线运行。物质的分布使时空弯曲甚至改

变其拓扑结构。至此，无论在阿基米德静力学中，还是在牛顿动力学中被认为固定的时空背景才参与到物理演化中来。

爱因斯坦把他的场方程应用于整个宇宙，开创了相对论性宇宙学。爱因斯坦学说变革了人类的时空观和宇宙观。

这本文集收录的只是爱因斯坦对相对论的贡献。本书的编者霍金是剑桥大学卢卡斯数学教授，牛顿和狄拉克是他的这个教席的两位伟大的前任。作为当代最伟大的引力物理学家，他对爱因斯坦学说的评论特别值得关注。

2007年4月，他在佛罗里达体验了“失重之旅”，以身试法验证了等效原理，可谓现代版的比萨斜塔实验。

霍金本人的最著名的贡献是发现了弯曲时空的热性，即通常称为黑洞的霍金辐射。在这个场景中，引力论、量子论和热物理得到完美的统一。他由此开创了引力热力学的新学科。

他还把费恩曼的路径积分量子论和广义相对论相结合，提出无边界宇宙的思想，实现了宇宙创生的无中生有的场景，进而摒除了长期困扰人类的第一推动问题，从而开创了量子宇宙学的新学科。宇宙没有以外，宇宙创生也没有以前，因为宇宙和时空不可分离。霍金认为，这是他的更重要的贡献。

书名“不断持续的幻觉”取自于爱因斯坦悼念好友贝索的文字：“对于像我们这些信仰物理学的人而言，过去、现在和未来之间的区别只不过是一种不断持续的幻觉。”众生万象都将在时间中寂灭，唯有科学艺术之花永葆其青春。

吴忠超

2008年8月26日于杭州望湖楼

# 目 录

|                            |       |
|----------------------------|-------|
| 中译本序                       |       |
| 引 言 .....                  | (1)   |
| 第一部分 相对论原理 .....           | (3)   |
| 导 言 .....                  | (4)   |
| 运动物体的电动力学 .....            | (6)   |
| 物体的惯性同它所含的能量有关吗 .....      | (27)  |
| 引力对光的传播的影响 .....           | (30)  |
| 广义相对论基础 .....              | (38)  |
| 哈密顿原理和广义相对论 .....          | (80)  |
| 广义相对论中的宇宙学研究 .....         | (86)  |
| 引力场在物质的基本粒子结构中起重要作用吗 ..... | (95)  |
| 第二部分 狭义相对论和广义相对论.....      | (102) |
| 导 言.....                   | (103) |
| 狭义相对论和广义相对论 (普及本) .....    | (105) |
| 第三部分 相对论的附加知识.....         | (163) |
| 导 言.....                   | (164) |
| 以太和相对论.....                | (165) |
| 第四部分 几何学和经验.....           | (172) |
| 导言.....                    | (173) |

|                  |       |
|------------------|-------|
| 几何学和经验           | (175) |
| 第五部分 《相对论的意义》 摘选 | (184) |
| 导 言              | (185) |
| 相对论前物理学中的空间与时间   | (187) |
| 第六部分 《物理学的进化》 摘选 | (200) |
| 导 言              | (201) |
| 场，相对论            | (203) |
| 量子               | (213) |
| 第七部分 自传笔记        | (239) |
| 导 言              | (240) |
| 自传笔记             | (242) |
| 第八部分 《晚年文集》 摘选   | (269) |
| 导 言              | (270) |
| 相对性理论            | (271) |
| $E = Mc^2$       | (276) |
| 相对论是什么           | (279) |
| 物理与实在            | (283) |
| 理论物理学基础          | (305) |
| 科学的共同语言          | (313) |
| 科学定律和道德规范        | (315) |
| 质能等价性的初等推导       | (317) |

# 引 言

史蒂芬·霍金

几年前，全世界庆祝爱因斯坦奇迹年的一百周年纪念日。他在那个奇迹年的一系列令人吃惊的新观念，多方面地变革了物理学，并深刻改变了科学家的宇宙观。人的直觉告知我们，空间是我们活动的事件的舞台，而时间是由一台普适的钟制约的。但在 1905 年以及随后的 10 年，爱因斯坦证明，对于坐在椅子上的，在飞机上航行的，在地球上和我们一道公转的，还有在室女座星系团某处饮茶的，或者正被黑洞吸入的观察者，空间和时间的含义是不相同的。

爱因斯坦的思想一度使物理学界震惊。现在这些思想已被自动地纳入每个物理专业本科生学习的方程和公式之中。爱因斯坦在本文集的一篇文章中写道，只要这些思想成立，德国人就称他为“德国天才”，而英国人则称他为“瑞士犹太人”。但是他的思想一旦受到置疑，他写道，对于德国人而言，他就成为“瑞士犹太人”，而对于英国人而言就成为“德国天才”。对爱因斯坦作为一名活生生的诙谐者印象留在记忆中的物理学家，在世的已寥寥无几了。他的空间和时间相互纠缠的思想今天已深深地在大众文化之中扎根，好几代作家都描述过它。但是最清晰的，且不说最有趣的爱因斯坦思想的支持者总是非他本人莫属。

正如爱因斯坦在本卷中描述的，他于 1905 年提出的狭义相对论起源于一个简单的观察。詹姆斯·克拉克·麦克斯韦 1860 年代发现的电磁学理论证明，无论你是迎向还是离开一束光，光都以相同的速率趋近你。这在我们日常世界的经验中是不成立的。如果你逃离迎头奔驰而来的列车比你向它冲去能多存活几秒钟（假定你没跑到旁边去的话）。在前一种情形下，列车趋近你的速率是它的速率和你相对于铁轨速率之差。在后一种情形下，其速率为两速率之和。根据麦克斯韦理论，这同样的说法不适用于从列车车头照明灯发射出的光。光速在前一种情形下怎能不显得较慢，而在后一种情形下怎能不显得较快呢？



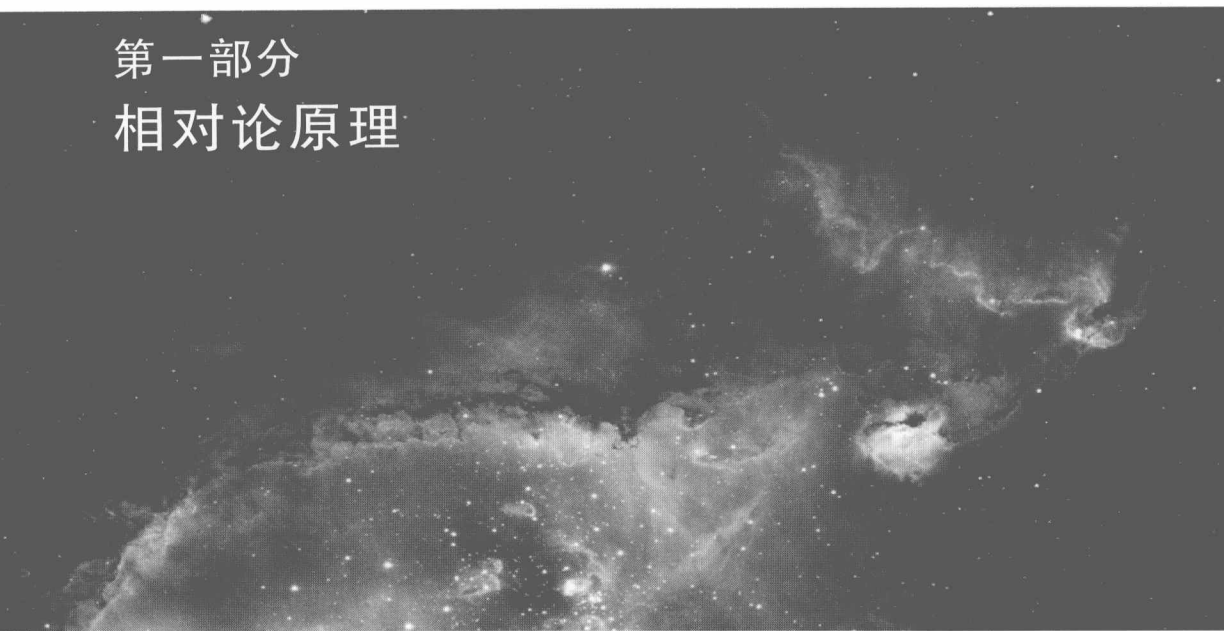
我们用速率指的是由行进的距离除以行进的时间。由此，爱因斯坦意识到，如果我们对麦克斯韦理论坚信不疑，就必须改变我们时间和空间的观念。它们不是固定不变的，而要依观察者而调整，要以恰好使光速保持常数的必要方式弯曲或者拉伸。这同样的弯曲和拉伸当然意味着，列车本身趋近的速率也不是简单的和或者差，不像我前面描述的那样。但在远比光速低得多的速率的情形，在爱因斯坦推导出的和相加或相减之间的差异只有可忽略的效应。相同的逻辑之链还进一步要求质量和能量等价，这正是我们能拥有原子能，以及很不幸地，也是原子武器的原因。我们在这里从爱因斯坦自己的语言中，比所有其他地方都更好地解释了他推理的细节以及它背后的简单代数。

爱因斯坦的广义相对论也起源于一个简单的观察。在牛顿的运动定律中出现了一个叫做质量的量，它确定一个物体受外力作用时多么容易被加速。使一辆重质量的卡车比使一辆质量小很多的大众汽车获得速度要困难得多。在牛顿时代已经知道三种力：电力、磁力和引力。在牛顿运动定律中对速度改变的抵抗与外力的种类无关。但是牛顿还发现了制约其中一种力即引力的定律。在该定律中还出现了另一种量，它确定一个物体在另一个物体存在时施加和感受到的引力拉力的大小。这个量也被称作质量。这两个质量定义起着完全不同的作用，但它们有充分理由都被称作质量：结果它们是同一个东西。为什么它们必须等同？这个问题加上爱因斯坦天才横溢的逻辑使他意识到，空间和时间的结构对物质和能量存在的反应。

爱因斯坦写道：“就像目前这样，当经验迫使我们寻求更新更坚实的基础，物理学家不能轻易地屈从于哲学家对理论基础的批评性的思索，因为他本人最清楚知道，并更深切感觉何处不适。”爱因斯坦并非狭隘地只对科学，而且还对科学哲学和科学语言，甚至还对它的伦理含义有兴趣。有关这些主题的若干文章也收录于此。而且，尽管爱因斯坦上述言论是在1936年写下的，现在仍然是物理学家寻找新基础的时期，也仍然是这类形而上论题正和当年一样具有直接关系的时期。今天，鉴于爱因斯坦已把空间和时间描写成了动力量，于是我们可以认为宇宙不仅拥有一个，而且拥有所有可能的历史。我们不仅思考弯曲的空间和时间，还研究宇宙是否具有额外的维度。我们猜测那些概念的真正意义，它们是否被很好地定义，或者只不过是近似。我们现在寻找所有力的统一理论，以及我们在其中领略宇宙呈现千姿万态的空间和时间的框架。这正是爱因斯坦想必会赞成的探索，而本卷中的杰出工作为此探索奠定了基础。

(吴忠超译)

# 第一部分 相对论原理



## 导 言

有时我们会误解，以为诸如爱因斯坦相对论这样伟大的科学突破是从零开始，而与此前的研究完全无关。在《相对论原理》一篇中，我们可以看到爱因斯坦由之发展其理论的背景，包括一些作为基础的几篇重要论文。

最好了解一下物理学在 19 世纪和 20 世纪之交的状态，以便在这个背景中考察他的贡献。1864 年，詹姆斯·克拉克·麦克斯韦发展了完备的电磁学理论，并且指出静电荷产生电场，而动电荷产生磁场。这两种力看起来是根本不同的。

亨德里克·A. 洛伦兹于 1895 年和 1904 年发表的一系列论文中询问似乎简单的问题。如果电荷静止，而我们从它边上跑过去会发生什么？洛伦兹指出，对于运动的观察者，静止电荷“就像”运动电荷，并由此电场就会显得像磁场。洛伦兹证明，电磁波对于一个运动的观察者，正如对于一个静止的观察者一样，会以相同的速率——光速传播。

1905 年爱因斯坦得到相似的结论，电力和磁力是根本上相互关联的，对于以不同速率运动的观察者，它们以不同的比例显现。但是爱因斯坦走得更远得多。他假定在任何“惯性参考系”（以固定速率和方向运动的）中所有物理定律必须同样成立，而且对于任何这样的观察者光速都必须是常数。

无论是麦克斯韦理论，还是迈克耳孙-莫雷实验都很好地支持这些假设。迈克耳孙和莫雷显示，无论地球如何运动，光总是以常速率行进。爱因斯坦假定，两位携带相同钟表和米尺并作相互运动的观察者，每位都会测量出另一位一米尺被缩短，而且测量出另一位的钟表变慢。这表观上似是而非的矛盾处于相对论的核心。

运动参考系之间的变换习惯上被称作洛伦兹变换。这种变换对艾萨克·牛顿爵士的运动定律有另一个重要改正。根据牛顿的观点，对一个物体施加不变的力将使它加速，这样不断地进行会无限地增加物体速率。然而，爱因斯坦相对论显示，没有东西可以超过光速，只能趋近于光速这个极限值——牛顿是错误的。

爱因斯坦承认相对论是不完备的。它只能解释以常速度运动的物体系统，而在引力场中物体一直在被加速。这样他在从 1911 至 1916 年的几篇里程碑式的论文中发展了“广义相对论”。其主要结果在《相对论原理》的第七、第八两章中描述。

爱因斯坦在他的“理想实验”之一中假设，在一个静止地停留在地球表面上升降机中和在远离大量物质的太空中正在从下往上加速的升降机中分别进行的实验，不应该有差别。由于加速参考系使所有投掷物，包括光线弯曲，爱因斯坦证明了引力场必然弯曲光线。事实上，广义相对论说的是，弯曲的正是**空间和时间**本身，光或者其他任何物体只不过是沿着“直线”通过空间和时间而已。

按照约翰·阿契巴尔德·惠勒的说法，“物质指示时空如何弯曲，而时空指示物质如何运动。”爱因斯坦意识到，他的方程不仅制约光束和星体，而且还制约整个宇宙。他意识到宇宙不能是静止的，它要么膨胀要么坍缩。这样，广义相对论就形成了现在称作宇宙学的领域的基础，正如在第十章描述的。

为了使宇宙处于永恒静止状态，爱因斯坦先验地把称作“宇宙常数”的一项引进他的场方程。当埃德温·哈勃在 1929 年发现膨胀宇宙时，爱因斯坦意识到他的过失，并把宇宙常数认为是“一生最大的错误”。近年来，宇宙常数又以一种新形式——渗透宇宙的“暗能量”被重新引进宇宙学。对遥远超新星的最近观测暗示，暗能量正在为宇宙的加速增添燃料。

爱因斯坦提出的模型迄今仍然非常有效，在大尺度上仍然经受了观测的检验。当我们仔细阅读他关于物质世界的思想时，给我们留下了非常深刻印象的是，从这么简单的起始假设出发，他本人以及后继的思想家们能够推断出这么多的预言。

（吴忠超译）

# 运动物体的电动力学

爱因斯坦

英文版译自“Zur Elektrodynamik bewegter Körper”, Annalen der Physik 17, 1905

人们知道：按照目前通常的理解，麦克斯韦的电动力学在应用于运动物体时，会导致非对称性，此非对称性似乎不是该现象所固有的性质。以磁体和导体相互的电动力学作用为例，这里可观察到的现象只依赖于导体和磁体的相对运动，然而通常的观点却严格地区分这两个物体中究竟是哪一个在运动。因为如果磁体在运动而导体静止，那么在磁体周围会产生一定能量的电场，从而在导体所处的地方会产生电流。但是如果磁体静止而导体在运动，那么在磁体周围就不会引起电场。然而，在导体中我们却发现了电动势，它本身没有对应的能量，却产生了电流，其路径和强度都与前一种情形下电力产生的电流相同（假设两种情形的相对运动相同）。

这类例子，连同企图发现地球相对于“光介质”运动的失败尝试一起，揭示出：电动力学现象和力学现象的所有性质都与绝对静止观格格不入。相反地，它们揭示出，正如已经由一阶小量所证明的，电动力学和光学的同一组规律，在使得力学方程成立的所有参考系中，都应该有效（注：之前的洛伦兹回忆录当时还不为作者所知）。我们将把这个猜想（其主旨今后就称为“相对性原理”）提升到基本原理的高度，同时引入另一个只是表面上似乎与前述原理不相协调的假设，即光在真空中总是以一定的速度  $c$  传播，而与发射物体的运动状态无关。这两个假设，足以用来得到一个基于麦克斯韦静止物体理论的、简单一致的运动物体的电动力学理论。引进“传光的以太”被证明是多余的，因为本文提出的观点不需要具有特殊性质的“绝对静止空间”，也不需要给电磁过程发生的真空点赋予一个速度向量。

本文提出的理论，像所有电动力学理论一样，是基于刚体运动学，因为任何

这种理论的论断都离不开刚体（坐标系）、时钟、电磁过程之间的关系。对这种情况考虑得不周全正是目前的运动物体电动力学所遇到的困难之源。

## 一、运动学部分

### 1. 同时性的定义

取一个使牛顿力学方程成立的坐标系（注：即在一阶近似下）。为使我们的陈述更准确，也为在字面上把该坐标系与下面将要引入的其他坐标系区分开，我们称该坐标系为“静止系”。

如果一个质点相对于该坐标系静止，那么使用刚性度量标准和 Euclid 几何方法可以相对于该坐标系定义它的位置，并且表达为 Descartes 坐标。

若希望描述质点的**运动**，就把它的坐标值表示为时间的函数。这里必须小心地记住：这种数学表示没有物理含义，除非我们对于所谓的“时间”理解得非常清楚。必须认识到，所有涉及时间的判断都是关于**同时事件**的判断。例如，如果我说，“火车 7 点到达这里”，我是指类似下面的话：“我的手表的短针指向 7 与火车到达是同时事件。”（注：这里不讨论近似在同一个地方的两个事件的同时性概念中隐藏的不准确性，唯有抽象化才能排除这种不准确性。）

以“我的手表的短针位置”来替代“时间”，似乎就可以克服所有关于“时间”定义遇到的困难了。实际上，如果我们只想要给手表所处的位置定义时间的话，这个定义是令人满意的；但是当我们必须把发生在不同地点的时间序列中的事件联系起来的时候，或者等价地说，必须确定在远离手表的位置上发生事件的时间的时候，这个定义就不再令人满意了。

当然，以如下方式确定的时间值也可以让我们满意，即让观察者和手表一起处在坐标系的原点，当每一个待定时的事件发出的光信号穿过真空到达他时，确定相应的指针位置。但是这种协调有一个缺点，即从经验得知，它与持表或钟的观察者的位置有关。采用下面的思路，我们可以得到一种实际得多的定时方法。

若在空间点 A 有一个时钟，A 点的观察者通过确定与事件同时发生的时钟指针的位置，就可以确定紧邻 A 点的事件的时间值。若在空间点 B 有另一个时钟，所有方面都与 A 点的时钟类似，则 B 点的观察者就可以确定紧邻 B 点的事件的时间值。但是若没有更多的假设的话，就时间来说，就无法比较 A 点的事件与 B

点的事件了。至此我们仅仅定义了“A时间”和“B时间”，还没有定义A和B的共同“时间”，因为后者根本不可能有定义，除非我们由定义确立光线从A到B所需的“时间”等于从B到A所需的“时间”。设一束光在“A时间” $t_A$ 从A出发射向B，设它在“B时间” $t_B$ 在B处反射回A，并且在“A时间” $t'_A$ 回到了A处。

依照定义，若下式成立，则这两个时钟同步：

$$t_B - t_A = t'_A - t_B。$$

假设该同步性定义没有矛盾，对任意数目的点都可行，并且以下的关系普遍成立：

1. 如果B点的时钟与A点的时钟同步，则A点的时钟与B点的时钟同步；
2. 如果A点的时钟与B点的时钟同步，还与C点的时钟同步，则B点和C点的时钟也彼此同步。

于是，借助一下想象的物理实验，我们已经澄清了处于不同位置上的同步静止时钟是怎么回事，而且已经显然获得了“同时性”或“同步性”，以及“时间”的定义。事件的“时间”就是与事件同处一地的静止时钟在事件发生的同时给出的标示，该时钟与一个指定的静止时钟同步，而且确实是对于所有的时间测定都是同步的。

与经验相一致，我们进一步假定量

$$\frac{2AB}{t'_A - t_A} = c,$$

是一个普适常量——光在真空中的速度。

利用静止系中的静止时钟来定义时间，这是非常关键的。这样定义的适合于静止系的时间，我们称之为“静止系时间”。

## 2. 长度和时间的相对性

以下的思考基于相对性原理和光速不变原理。我们定义如下两条原理：

- 1 不论相对于匀速平移运动的两个坐标系中的哪一个，物理系统的状态变化所遵循的定律都是一样的。
- 2 任何光线在“静止”坐标系中都以确定的速度 $c$ 传播，不论发射光线的物体静止还是运动。因此

$$\text{速度} = \frac{\text{光线路径}}{\text{时间间隔}},$$

此处时间间隔遵循第 1 节的定义。

假设有有一个静止的刚性杆，其长度  $l$  由同样静止的量杆测量出。想象刚性杆的轴线与静止坐标系的  $x$  轴重合，并且刚性杆开始以速度  $v$ 、与  $x$  轴平行地、沿着  $x$  增加的方向匀速平移运动。现在研究运动杆的长度，设想其长度由下面两个操作确定：

(a) 观察者与给定的量杆和待测杆一起运动，直接把量杆放在刚性杆上测量其长度，就好像它们 3 个都是静止的一样。

(b) 利用静止系中设置的、按照第 1 节的方法同步化了的静止时钟，观察者测定，在一确定的时刻，待测杆的两端分别处于静止系的哪两个点。这两个点之间的距离由上面的量杆测出，此时测量是静态的，这个距离也可以称为“杆的长度”。

根据相对性原理，由操作 (a) 得出的长度——我们称之为“杆在运动系中的长度”——一定等于静止杆的长度  $l$ 。

由操作 (b) 得出的长度，我们称之为“(运动)杆在静止系中的长度”，其值将在我们的两个基本原理的基础上得出，我们会发现它与  $l$  不同。

目前的运动学默认这两种操作得出的长度是完全相同的，换句话说，在时刻  $t$  运动刚体的几何属性完全可以由同一物体在一确定位置上静止时的几何属性代表。

我们进一步想象，在杆的两个端点 A 和 B 上放置了与静止系时钟同步的两个时钟，就是说在任何时刻，它们都指示了它们所在位置处的“静止系时间”。因此这两个时钟是“在静止系中同步的”。

我们进一步想象，每个时钟都伴随一个运动的观察者，这些观察者将第 1 节中建立的同步时钟的准则应用于这两个时钟。设一束光在时间<sup>①</sup>  $t_A$  从点 A 出发，在时间  $t_B$  于点 B 处被反射，于时间  $t'_A$  返回 A 处。考虑到光速不变原理，我们有：

$$t_B - t_A = \frac{r_{AB}}{c - v} \text{ 和 } t'_A - t_B = \frac{r_{AB}}{c + v},$$

其中  $r_{AB}$  指运动杆在静止系中测量的长度。于是随着运动杆一起运动的观察者会发现这两个时钟不同步，而在静止系中的观察者会宣称它们是同步的。

所以我们看到，我们不能赋予同时性概念以绝对的含义。在一个坐标系中看来是同时的两个事件，从另一个与之相对运动的坐标系中看来，就不再是同时的了。

① 这里的“时间”指“静止系时间”，也指“处于所讨论的位置上的运动时钟的指针位置”。



### 3. 从静止系到与之做相对匀速平移运动的坐标系的坐标和时间变换理论

在“静止”空间中取两个坐标系，每个坐标系有3条刚性的直线，从一点出发，并且彼此垂直。假设这两个坐标系的 $X$ 轴重合，而且 $Y$ 轴和 $Z$ 轴分别平行。每个坐标系都有一个刚性量杆和许多时钟，这两个量杆，以及同样地所有的时钟，在各个方面都是一样的。

现在假设这两个坐标系之一( $k$ )的原点以恒定的速度 $v$ 沿着使另一个坐标系( $K$ )的 $x$ 坐标增加的方向运动，并且该速度也传给了坐标轴、相应的量杆以及时钟。那么在静止系 $K$ 的任何时刻，运动系的轴都有一个相应的具体位置。又由于对称性，我们可以假设 $k$ 的运动使得在时刻 $t$ (这里“ $t$ ”总是指静止系的时间)运动系的轴平行于静止系的轴。

现在我们想象从静止系 $K$ 中使用静止量杆度量空间，得到坐标 $x, y, z$ ；同时从运动系 $k$ 中使用与其一起运动的量杆度量空间，得到坐标 $\xi, \eta, \zeta$ 。进而，照第1节的方法，利用光信号，给所有放置了时钟的空间点确定静止系时间 $t$ ；类似地，照第1节给出的方法，利用点之间的光信号，给运动系中所有放置了时钟的点确定运动系时间 $\tau$ ，这些时钟相对于该运动系静止。

对于完全定义了一个事件在静止系中的空间和时间的任何一组值 $x, y, z, t$ ，相应地存在一组值 $\xi, \eta, \zeta, \tau$ ，它们确定该事件相对于参照系 $k$ 的状态，现在的任务就是找到把这些数量联系起来的方程组。

首先，很清楚：该方程必定是**线性的**，因为我们认为空间和时间是均匀的。

如果我们令 $x' = x - vt$ ，那么显然在参照系 $k$ 中静止的点就有一组值 $x', y, z$ ，与时间无关。我们先把 $\tau$ 定义为 $x', y, z$ 和 $t$ 的函数，为此我们得在方程中表达出 $\tau$ ， $\tau$ 等于参照系 $k$ 中静止时钟数据的总和，其中时钟已经按照第1节给出的规则同步化了。

在时刻 $\tau_0$ ，从参照系 $k$ 的原点出发沿着 $X$ 轴发射一束光，于时刻 $\tau_1$ 到达 $x'$ 并被反射，于时刻 $\tau_2$ 回到坐标原点。我们必有 $1/2 (\tau_0 + \tau_2) = \tau_1$ ，或者插入函数 $\tau$ 的自变量并应用静止系中光速不变原理得到：

$$\frac{1}{2} \left[ \tau(0, 0, 0, t) + \tau \left( 0, 0, 0, t + \frac{x'}{c-v} + \frac{x'}{c+v} \right) \right] = \tau \left( x', 0, 0, t + \frac{x'}{c-v} \right).$$

因此，若 $x'$ 取无穷小，则有

$$\frac{1}{2} \left( \frac{1}{c-v} + \frac{1}{c+v} \right) \frac{\partial \tau}{\partial t} = \frac{\partial \tau}{\partial x'} + \frac{1}{c-v} \frac{\partial \tau}{\partial t},$$