



相对论

Xiangduilun Tongsu Yanyi

通俗演义

张轩中 著

相对论通俗演义

Xiangduilun Tongsu Yanyi

张轩中 著

图书在版编目 (CIP) 数据

相对论通俗演义 / 张轩中著. — 桂林: 广西师范大学出版社, 2008.6

ISBN 978-7-5633-7544-8

I. 相… II. 张… III. 广义相对—普及读物
IV. O412.1-49

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2008) 第 076979 号

广西师范大学出版社出版发行

(广西桂林市中华路 22 号 邮政编码: 541001)
(网址: <http://www.bbtpress.com>)

出版人: 何林夏

全国新华书店经销

桂林漓江印刷厂印刷

(广西桂林市西清路 9 号 邮政编码: 541001)

开本: 787 mm × 1 092 mm 1/16

印张: 15.25 字数: 220 千字

2008 年 6 月第 1 版 2008 年 6 月第 1 次印刷

印数: 0 001~5 000 册 定价: 29.80 元

如发现印装质量问题, 影响阅读, 请与印刷厂联系调换。

张生轩中是北京师范大学广义相对论专业的研究生,从本科到研究生阶段,他陆续学习了引力与相对论专业的基础课程(包括广义相对论、整体微分几何、群论、高等量子力学、量子场论、量子统计、黑洞物理、宇宙学、弯曲时空量子场论、量子引力等),并在难度极大的现代微分几何、高维引力和量子引力方向进行了钻研。同时,对文学、历史和科普的爱好驱使他阅读了许多科学史方面的书籍和资料,并在研究生期间进行了科普创作。他的高级科普作品在网上发表后,受到许多年轻人的喜爱。

我虽然对网上文学的语言不大习惯,但对他勇于实干、创新的精神,及作品中内容的正确与生动深感钦佩。

有志青年都应该知道,自己的创造旅程应该从年轻时开始,千里之行,始于足下,路在哪里,路在脚下。

历史上杰出的科学家、工程师、文学家、艺术家、政治家大都在 20~30 岁之间就有所成就,甚至作出伟大贡献。牛顿和爱因斯坦的重大成就大都产生于 20~40 岁之间。青年人应该注意:奇迹不是老头子、老太太创造的,而是年轻人创造的。青年时代就应该开始自己的创造生涯,最重要的是勇于迈出第一步。

轩中学习和工作的北京师范大学相对论小组是目前国内最强的相对论研究团队之一。它诞生于改革开放的初期,它的创始人刘辽教授 1952 年毕业于北京大学物理系,1957 年被错划为右派。他在平反前的 20 多年中承受了巨大的政治压力和精神压力,正是在这样的逆境中,他开始了自己的相对论生涯。他的思想在爱因斯坦的弯曲太空中游荡,那美妙的科学理论给他压抑的心灵带来了少许安慰。即使在“文化大革命”的漫漫长夜中,刘辽先生仍在劳改的疲劳之后,继续广义相对论的钻研,并在牛棚中收

了两个因反林彪而被打成反革命的青年学生(杨以鸿、刘忠柱)作为自己最早研究相对论的弟子。

改革开放的春风使刘辽先生获得了施展才华的机会,在天文系和物理系的支持下,他带领一批中青年教师展开广义相对论的研究,在全国各地举办广义相对论讲习班,并开始正式招收研究生,为广义相对论在中国的传播作出了重要贡献。

1981年至1983年,北京师范大学相对论小组的梁灿彬先生赴美国追随国际著名相对论专家 R. Wald 和 R. Geroch 教授学习广义相对论,把用整体微分几何表述的现代广义相对论形式引进中国。梁先生把大量精力投入现代微分几何与广义相对论的教学中,对推动中国的相对论研究作出了重要贡献。

在过去的 20 多年中,北京师范大学的广义相对论小组是中国最活跃的相对论研究团队之一。其研究内容覆盖经典广义相对论,时空的因果结构,场方程的严格解、黑洞物理、弯曲时空量子场论、暴涨宇宙学、量子宇宙学、黑洞与时间机器、量子引力,等等,从经典到量子,展开了一个宽大的研究扇面。

近年来,虽然老一代的几位教师(物理系的刘辽、梁灿彬、王永成、赵峥、裴寿镛,天文系的李宗伟、曹盛林、吴时敏等)逐渐退休,但新一代的几位年轻有为的教师(物理系的朱建阳、马永革、刘文彪、周彬、高思杰,天文系的朱宗宏、张同杰等)已经承担起科研与教学的重任,并翻开了北师大相对论研究新的一页。

轩中学子正是在这一学术环境中成长起来的。轩中在本书中用生动的文笔介绍了相对论建立、发展的历史及其物理思想,还介绍了现代微分几何在相对论中的应用,以及若干研究前沿。

几何与算术原本是最早应用于自然科学的数学工具,有文字的记载可追溯到公元前古希腊时代。此后,几何与代数有了长足的发展。17 世纪,微积分开始创立,但还没有成熟到可以得心应手地运用的程度,因此,牛顿的物理研究主要以几何为工具,《自然哲学之数学原理》中有大量几何图形。此后的 100 多年中,微积分飞速发展,逐渐取代几何成为物理学研

究的主要数学工具。拉格朗日的著作《分析力学》是一个明显的标志,该书没有一张图,拉格朗日把几何“彻底”赶出了物理学。这种情况一直持续到爱因斯坦建立广义相对论、黎曼几何作为工具被引进,几何学才再次返回物理领域。

20 世纪中期以后,由于彭若斯、霍金等人的努力,现代微分几何被引进相对论研究,并逐渐扩散到物理学的其他领域。现代微分几何与爱因斯坦等人使用的古典微分几何有所不同,其特点之一是把“坐标”赶了出去,使坐标系的应用处于可有可无的地位,这是一般物理工作者所不熟悉的。

轩中曾追随梁灿彬教授和马永革教授学习过现代微分几何。他是马永革教授的研究生,在马教授的指导下做过相对论研究。轩中在本书中,尝试用幽默的语言对现代微分几何及广义相对论的若干前沿作通俗的介绍,并取得了一定的成功。

希望本书能引起青年读者对现代几何学与相对论的兴趣,也希望轩中能在科研和科普工作中再接再厉。

赵峥^①于北京师范大学物理系

2007 年 8 月 28 日

^① 中国物理学会引力 and 相对论天体物理分会前理事长,北京师范大学物理系教授。

当张华邀请我为他的书作序时,我欣然接受。在中国,我们需要更多受过专业训练的科学工作者投身于科普事业之中,因为只有如此,科学才能够更好地融入主流文化之中。我个人认为,科学不仅仅是人类发展技术、探索未知世界所倚重的一种方法,它更是我们的一种生活态度和思维方式。有一天,当科学能够深深植根于传统中国文化,也许就是我们实现科教兴国的强国梦的时候。

本书伊始在回顾整个引力理论发展的同时穿插了很多的人物逸事,之后作者以自己的视角介绍了其钟爱的旋量和扭量。通读全书,作者流畅的文笔和富有感染力的文字给我留下了极为深刻的印象,本书的写作风格将有助于读者尽快熟悉这一领域。相信本书会吸引一大批读者,尤其是那些希望能尽快对相对论有所了解的高中生和大学低年级的学生。

在最近 30 年中,随着相对论天体物理的迅猛发展,GPB^① 实验技术的日益成熟,LIGO(激光干涉仪引力波天文台)^②和其他地面探测引力波实验已开始读取数据,再加上极有发展前景的空间引力波探测实验 LISA(激光干涉仪空间天线)^③的开展和一些旨在验证爱因斯坦广义相对论理论的实验提案的相继问世,促使相对论的研究进入一个崭新的时代,而整个学科面貌的改观又迫使理论工作者们越来越多地与从事天文物理、宏观量子力学、量子光学、计算物理、空间科学、统计学及实验物理的同事们交流和

① GPB, Gravity Probe B 的简称,是一种利用陀螺来检测引力场的技术。

② LIGO, Laser Interferometer Gravitational Wave Observatory 的简称,是一种利用激光干涉来检测引力波的实验技术。

③ LISA, The Laser Interferometer Space Antenna 的简称,指在卫星上利用激光干涉来检测引力波的计划,目前卫星尚未上天。

合作。

可以预见,在未来的 20 年里,相对论将会与越来越多的学科交叉,蓬勃发展。张华的这本书将可为以后从事这方面研究的学生提供一个有趣的补充教材。

刘润球^①

(白珊/译)

附:“序二”英文原文

When Zhang Hua asked me to write a preface for his book, I gladly agreed to do so. In China, we need more people who understand science to write about science for the general public. This will help to assimilate science into the Chinese culture. Personally, I hold the view that science is more than just advancing our frontier in knowledge or technologies, it should also be a way we think and live our daily lives. One day when science takes root in our culture, perhaps that is the moment we realise the aspiration of being a strong nation through science and education.

The book begins with a historical introduction of the development of gravitation theory, and then concludes by a very personal account of spinors and twisters Zhang Hua is very fond of. I am much impressed by the literary style and fluency of the writing. No doubt this will help the readership to acquaint with the subject.

The book will appeal to a very wide spectrum of readerships, in particular, to the high school students and beginning undergraduates who want to have a glimpse of the subject.

In the last three decades, due to the advance in relativistic astrophysics, the GPB experiment, LIGO and other ground based effort to detect

^① 中国科学院数学和系统科学研究院应用数学研究所研究员。

gravitational radiation, plus the very ambitious proposed LISA project in space and a host of other proposed experiments in space to test Einstein's theory of general relativity, the research in general relativity has already entered a new era. This change of landscape in general relativity also forces theoreticians to have a better understanding and collaboration with their colleagues in astrophysics, macroscopic quantum mechanics, quantum optics, computational physics, space science, statistics plus possibly experimental physics as well.

It is likely that general relativity research in China will become more interdisciplinary in the next two decades. Zhang Hua's book may serve as supplementary reading material for students who take an interest in this field.

目 录

序一（赵峥） / 1

序二（刘润球） / 4

全书关系图 / 1

第一章——早期的“英雄时代” / 3

第二章——一个美丽的椭圆 / 10

第三章——等效原理 / 16

第四章——闵氏时空 / 22

第五章——经典场 / 30

第六章——狭义相对论 / 38

第七章——地图背后的几何学的整体观念 / 51

第八章——广义相对论 / 60

第九章——黎曼曲率 / 65

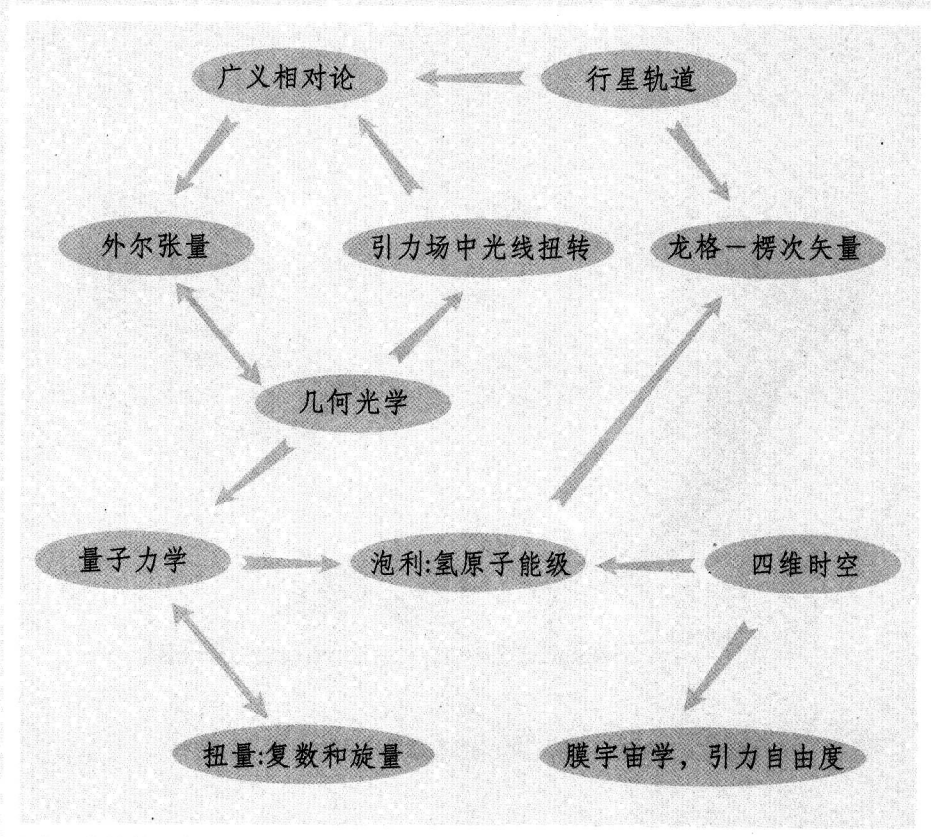
第十章——宇宙膨胀：宇宙“怀孕”之事实 / 72

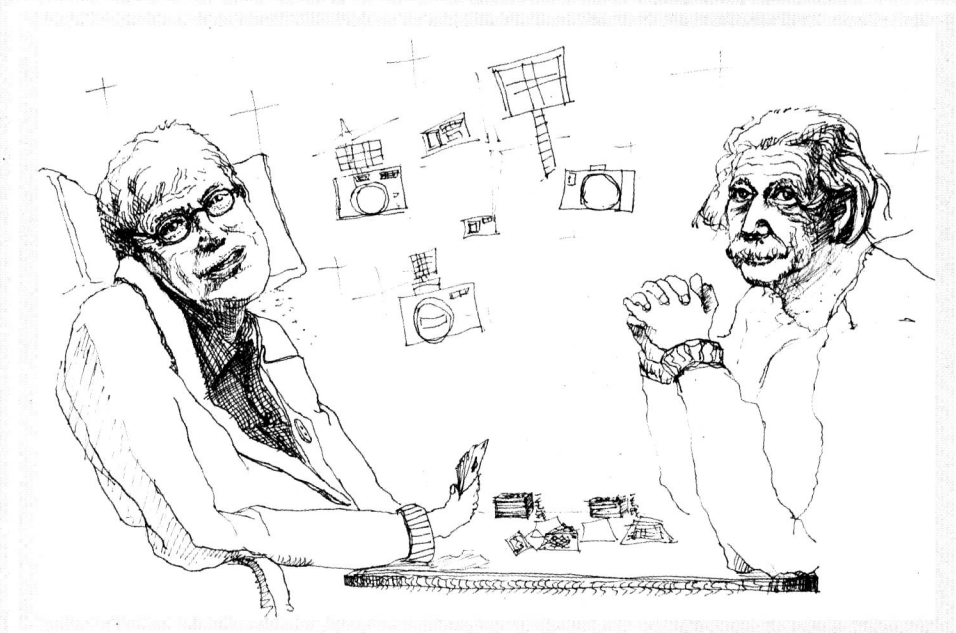
第十一章——最早的光 / 80



- 第十二章——黑洞的惊鸿一瞥 / 88
- 第十三章——钱德拉塞卡 / 94
- 第十四章——中子星的辉芒和插曲:玻恩彩虹般的人生 / 98
- 第十五章——史瓦西解 / 104
- 第十六章——伯克霍夫定理 / 109
- 第十七章——外笛亚解:耀眼的火球 / 116
- 第十八章——从可见光到电磁张量 / 122
- 第十九章——外尔张量 / 132
- 第二十章——克尔解和卡特运动常数 / 140
- 第二十一章——二分量旋量 / 147
- 第二十二章——时空为什么是四维的? / 152
- 第二十三章——贝肯斯坦 / 160
- 第二十四章——爱因斯坦流形 / 168
- 第二十五章——素描:艾虚特卡的量子引力 / 175
- 第二十六章——年轻的圈量子宇宙学 / 183
- 第二十七章——四元数 / 189
- 第二十八章——扭量方程 / 196
- 第二十九章——返璞归真:开根号 / 203
- 第三十章——宇宙学常数:最完美的错误 / 210
- 第三十一章——霍金辐射 / 219
- 附录:引力简史 / 225
- 参考文献 / 227
- 跋 / 229

全书关系图





充满概率的不确定的宇宙：霍金与爱因斯坦打扑克(涂明、张曦/绘)

第一章 早期的“英雄时代”

引子：英雄是炼出来的。

(一)

在爱因斯坦(Einstein, 1879~1955)大学毕业以后的两年里,他没有找到一份正经的工作,还曾经有一段日子依靠做家教来维持生计。1902年2月5日出现在瑞士《伯尔尼都市报》的一则广告这样写道:

由联邦工学院教师文凭持有者——阿尔伯特·爱因斯坦为大学生及中小學生提供最完善的数学和物理私人授课。

正义街32号,二楼。

免费试听。

历史是被淹没在荒烟蔓草间的,当后人回头看历史的时候,尤其能看到一些神话和英雄史诗,即使模糊不清,它们仍让人感觉到心潮澎湃,有些往事,已在人们的心灵上被镌刻为“神迹”。

广义相对论一直是地球上最美丽的学问。这一门学问是爱因斯坦创立的,它研究的是我们的宇宙。因为宇宙只有一个,而我们身处其中,于是,很多人难免担心,我们作为宇宙的一部分,能不能认识宇宙。正如通过认识你的一个手掌,我们不知道能不能认识你这个人。这个问题是玄妙的,中国古代的庄子和屈原等人也思考过这样的问题,他们只有一个很模

糊的认识,因为他们没有具备一些数学描述。

宇宙洪荒^①很玄很妙。关键在于如何认识它,历史上很多人的思想在这里汇集其中,北宋苏东坡在《题西林壁》的一句诗影响深远,他说:“不识庐山真面目,只缘身在此山中。”

苏东坡是一个大才子,他的这首诗本身是具有哲理性的,当我们把它运用到这个宇宙的时候,我们会反躬自问:是否因为处在宇宙之中,所以我们无法认识宇宙的真面目。这个问题本身没有唯一的答案,从爱因斯坦的说法上,我们可以看到一个自然科学家的态度。

爱因斯坦说:“宇宙最不能理解的地方是,它居然是可以理解的。”爱因斯坦为什么这样说?原因是他站在高台之上,“不畏浮云遮望眼,只缘身在最高层”,他的高台,当然用广义相对论砌成。

可知论和不可知论这两种论调是人类个体不同性情的分水岭,但这样分界是不明显的,很多人从来没有问过自己,自己到底属于可知论者还是不可知论者。很多时候,这样的分类也是缺乏意义的。但一个事实永远存在,那就是一定有很多人对于未知事物充满好奇心。

(二)

在认识宇宙,或者说认识未知世界的道路上,尸横遍地。相对于其他人,数学家们以其特有的执著和特立独行,给这个宇宙创造了一件描述的工具——数学,并且这件工具是最基本的。数学比绘画和音乐要更加基本。绘画和音乐能描述世界,但要依赖于人的眼睛和耳朵。而数学,它依赖于大脑。

毕达哥拉斯(Pythagoras,前580至前570之间~约前500)是一个杰出的古代数学家,他认为,世界的本质是数。他的说法听起来好像是有点夸张了,但初衷是善良的,不是说他要故意压迫那些非数学家。2,3,5,7…这些数字,称为素数,它们是基本的。

数是基本的,数学是仰望宇宙的透镜。

^① 在本书中,“洪荒”一词,将作为对英文“bulk”的中文翻译,bulk在膜宇宙模型中专指高维时空。

数的分类就有很深的学问。

如果你不知道什么叫无理数,那么你就不知道圆周率里的数会不会出现循环,不知道圆周率能不能成为一个代数方程的根,不知道圆周率的根号二次方是什么东西。

因此,数是一片黑暗的大海。

几何学也有很深的学问,最简单的问题就有非凡的美感,比如已经知道一个三角形的三条边长,如何写出三角形的面积公式,这背后就是海伦公式。

广义相对论更多地和几何学发生了关系,这一点在后面的篇幅中再逐渐展开。获得 1936 年菲尔兹奖的数学家道格拉斯(Douglas, 1897 ~ 1965)^①曾经说过:“我的切身体会是,几何学家是好人。”

在古代的数学家中,有一个人,他让我们知道,生活在这世上是那么好,这个人的名字是欧几里得(Euclid, 约前 330 ~ 约前 275)。

(三)

欧几里得写了一本众所周知的书——《几何原本》,这是 2000 多年前的事情了,但中国人看到该书的时候,是在明朝的徐光启时代。

《几何原本》里有五条公理。虽然一般人说不全,但第五条说所有平行直线永不相交,这一条大家全知道,叫作第五公设。但有的人认为,这一条不能作为一个公理,因为它可能由其他公理推出来。

《几何原本》好像古代的一座神庙,它由五块巨大的石头作为支撑,但第五块石头,有的人认为,靠不住。

爱因斯坦的广义相对论与第五公设这个问题休戚相关。当然,我不准备在这里做任何数学证明,通俗的演义往往与数学相隔遥远,我们引用爱丁顿(Eddington, 1882 ~ 1944)的话:证明是一个偶像,数学家在这个偶像面前折磨自己。

第五公设折磨了一代又一代的人,当他折磨到高斯(Gauss, 1777 ~

^① 1936 年菲尔兹(Fields)奖得主,极小曲面(普拉多问题)研究者,道格拉斯泛函提出者。

1855)的时候,这个折磨就告结束,高斯得到了新的几何学,他称为星空几何。高斯的数学成就很大,但他是一个保守的革命者,没有发表这个结果。欧几里得的几何学,是关于平坦空间的几何学,而真正广泛的几何学,不仅要处理平坦空间里的情景。黎曼(Riemann, 1826~1866)是研究弯曲空间几何学的大师,他死的时候不到40岁,但他活着的时候一直很优秀。1854年,他为了获得哥廷根大学一个讲师的职位,发表了一个关于几何学的演讲,演讲的题目是“论几何学之基础”,这次演讲是一个开天辟地的壮举。下面的听众很多,但据说几乎没有人能够听懂,频频点头表示赞同的人只有一个人,是一个老头,名字叫高斯。高斯很清楚黎曼在干什么,因为他自己干过星空几何。

这个故事发生在黎曼为了在大学里得到讲师职位的时候。那为什么一个讲师讲的东西在那大学里别的教授全听不懂?这说明黎曼实在是太有才华了。

我们知道,在当时,黎曼是伟大的,他后来的贡献很多,并以其在微分几何和复分析方面的伟大建树影响历史,现在的黎曼猜想还是研究的中心问题之一。这个猜想说,黎曼级数的非平凡零点全在 $\zeta=1/2$ 这条直线上。在物理学里,黎曼级数在量子场论中经常出现,在相对论中,研究量子场在含有边界的区域的卡西米尔(Casimir)效应也要用到。

黎曼几何的出现,给爱因斯坦的引力理论提供了一个先天的数学工具。历史表明,数学物理在这个时候达到了一个全新的高度。

(四)

“今月曾经照古人。”看到月亮,很多人有一些基本的问题,比如人不看月亮的时候月亮是否存在^①,或者说为什么月亮只以一面面向地球。

1665年,英国的剑桥大学三一学院毕业了一个本科生,一个叫牛顿(Newton, 1643~1727)的人,因为伦敦地区闹瘟疫,他回到了乡下老家,伍尔索普领地。牛顿在乡下的一年半,后来被证明只有爱因斯坦在瑞士专利

^① 这个问题是从量子力学中引申出来的。量子力学的思想精髓说:“这个世界是一个属人现象,在观测之前没有‘实在’。”