



赵峥 刘文彪

广义相对论 基础

清华大学出版社

广义相对论 基础

赵峥 刘文彪

清华大学出版社

北京

内 容 简 介

本书是一本简明扼要的广义相对论入门教材,在内容选择上,突出物理图像、物理内容和物理思想,同时在数学上自给自足。注意把广义相对论基础与科研前沿衔接起来,希望能让初学者尽快进入科研的大门,然后再“干中学”,边研究,边学习,在实践中逐步提高。叙述上兼顾了科学性和可读性,作者尽可能阐释相对论的关键和难点,帮助读者克服学习中的困难,掌握相对论的精髓。书中还介绍了广义相对论研究的若干前沿问题,注意把广义相对论展示为一个开放的科学领域,让读者看到它发展的曲折经历,以及当前尚未解决的问题,特别是其中的基本问题。内中一些带有根本性的问题,也许会给读者带来愉快的、有益思考。此外,书中还评述了相对论的建立和发展过程中的一些重要突破,增加了学习的趣味性,并使读者能从中体会科学研究的方法,提高科研创新的能力。

本书可用于研究生和本科生一学期的教学,也可用于具有大学理工科一、二年级数理水平的读者自学。目的是使他们能在半年内掌握广义相对论的数学、物理基础,基本内容和具体的计算方法,并进入科学研究的前沿。

版权所有,侵权必究。侵权举报电话:010-62782989 13701121933

图书在版编目(CIP)数据

广义相对论基础/赵峥,刘文彪.--北京:清华大学出版社,2010.12

ISBN 978-7-302-24078-5

I. ①广… II. ①赵… ②刘… III. ①广义相对论—高等学校—教材 IV. ①O412.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2010)第 221943 号

责任编辑:朱红莲

责任校对:赵丽敏

责任印制:王秀菊

出版发行:清华大学出版社

地 址:北京清华大学学研大厦 A 座

<http://www.tup.com.cn>

邮 编:100084

社 总 机:010-62770175

邮 购:010-62786544

投稿与读者服务:010-62776969, c-service@tup.tsinghua.edu.cn

质 量 反 馈:010-62772015, zhiliang@tup.tsinghua.edu.cn

印 装 者:北京市清华园胶印厂

经 销:全国新华书店

开 本:185×260 印 张:15.5 字 数:368 千字

版 次:2010 年 12 月第 1 版 印 次:2010 年 12 月第 1 次印刷

印 数:1~3000

定 价:28.00 元

产品编号:037475-01

物质告诉时空如何弯曲,时空告诉物质如何运动。

惠勒(J. A. Wheeler)

伟大的以及不仅是伟大的发现都不是按照逻辑的法则得来的,而是由猜测得来,换句话说,大都是凭着创造性的直觉得来的。

福克(V. Fock)



PREFACE

爱因斯坦 1905 年创建了狭义相对论,1915 年又在狭义相对论的基础上创建了广义相对论。广义相对论是一个关于时间、空间和引力的理论。它把万有引力解释为时空的弯曲,认为万有引力不同于其他力,是一种几何效应。相对论专家惠勒把广义相对论形象地描述为“物质告诉时空如何弯曲,时空告诉物质如何运动”。

这一人类思想史上的创新杰作,是爱因斯坦一生最引以为自豪的成就。他曾说道:“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。”

广义相对论诞生至今已近 100 年了。在过去的 100 年中,与相对论同时降生的量子论取得了长足的发展,相形之下,广义相对论却发展缓慢。除去数学上的困难和物理内容不好理解之外,最重要的原因是缺少检验引力理论的实验。有一段时间,相对论的研究几乎停步不前。著名量子论专家费曼在参加 1962 年于华沙举行的广义相对论研讨会时,忍不住在给妻子的信中写下了如下的感想:“我没有从会上获得任何东西。我什么也没有学到。因为没有实验,这是一个没有活力的领域,几乎没有一个顶尖的人物来做工作。结果是一群笨蛋(126 个)到这儿来了,这对我的血压很不好。以后记着提醒我再不要参加任何有关引力的会议了。”

不过情况很快有了改观。类星体、中子星和微波背景辐射的发现,促进了黑洞物理、宇宙学和引力波的研究。整体微分几何的引进又大大推动了时空理论的发展,取得了诸如“时空因果结构”、“奇性定理”、“面积定理”等一系列重要成果,并最终导致了黑洞热力学的创建。此外,超弦和引力场量子化的探讨也进一步增强了广义相对论在学术领域的地位。

作者曾长期从事广义相对论的研究和教学,常年在北京师范大学为物理系和天文系的研究生与本科生讲授广义相对论,近年来又在清华大学开设此课程,在长期的教学过程中,逐渐形成了自己的风格与特点。我们的课程强调物理基础和物理概念,突出物理思想和物理图像,力求用较短的时间把初学者领进广义相对论的大门,并把他们引向科研的前沿。值此广义相对论受到越来越多重视的时期,我们感到有必要把自己常年使用的讲义编写成正式的教材,奉献给读者。

我们长期追随刘辽先生学习和研究广义相对论,他在被错划成“右派”的困难日子里自强不息,终于在北京师范大学建立起国内一个重要的相对论研究基地。他倾毕生精力编写的《广义相对论》一书,内容丰富,包括对广义相对论理论基础的深刻分析和引力与相对论天体物理的前沿内容,在国内相对论界产生了很大影响。我们正是在他的引导下跨进了相对论研究的大门。

作者曾经听过梁灿彬先生连续几个学期的整体微分几何与广义相对论讲座,后来又阅读过他与周彬博士编写的《微分几何与广义相对论》以及 Wald 编写的《General Relativity》等书籍,受益很大。加深了我们对广义相对论的理解,使我们对时空因果结构、奇性定理等内容有了较好的认识。

我们还曾多次阅读过俞允强先生编写的《广义相对论引论》一书,这本书的清晰论述和简明风格使我们受益匪浅。

本书是一本简明扼要的广义相对论入门读物,可用于研究生和本科生一学期的教学,也可用于具有大学理工科一、二年级数理水平的读者自学,使他们能在半年内掌握广义相对论的数学、物理基础,基本内容和具体的计算方法,并进入科学研究的前沿。本书兼顾了科学性和可读性,作者尽可能阐释相对论的关键和难点,帮助读者克服学习中的困难,掌握相对论的精髓。书中还介绍了广义相对论研究的若干前沿问题,其中一些带有根本性的问题,也许会给读者带来愉快的、有益思考。此外,本书还评述了相对论的建立和发展过程中的一些重要突破,增加了学习的趣味性,并使读者能从中体会科学研究的方法,提高科研创新的能力。

学完本书后,进一步学习刘辽先生的《广义相对论》,可以扩展和加深广义相对论的数学物理基础,更全面地了解这一理论在天体物理、宇宙学和物理学其他分支中的应用。学过本书的读者,也会在学习整体微分几何及其应用时,不至于感到过分抽象。

总之,本书是一本突出物理图像、物理内容和物理思想,同时在数学上自给自足的简明教材。本书注意把广义相对论基础与科研前沿衔接起来,希望能让初学者尽快进入科研的大门,然后再“干中学”,边研究,边学习其他书籍和文献,在实践中逐步提高。

另外,作者还注意把广义相对论展示为一个开放的科学领域,让读者看到它发展的曲折经历,以及当前尚未解决的问题,特别是其中的基本问题。

本书前4章为广义相对论的物理基础、数学基础、主要理论和实验验证。5、6、7章对三个重要前沿领域(引力波、黑洞和宇宙学)做了简明介绍,作为初学者进入相关研究领域的入门阶梯。第8章介绍了几个带有基本性的问题,供感兴趣的读者参考。

作者在编写过程中主要参考了刘辽先生、梁灿彬教授和俞允强教授的著作。在写作过程中得到过陆埏先生和裴寿镛教授的大力帮助。

在长期的教学过程中,作者曾多次向刘辽先生、梁灿彬先生求教,还曾与郭汉英、张元仲、王永久、李新州、王永成、吴忠超、桂元星、沈有根、章德海、刘润球、黄超光等专家,黎忠恒、朱建阳、杨树政、马永革、周彬、高思杰、田贵花、张靖仪、杨学军、刘成周、方恒忠、任军等同事进行过有益的探讨。

清华大学尚仁成教授、阮东教授和清华大学出版社朱红莲编辑为促成本书的出版提供了宝贵的支持和帮助。

黄基利同学做了本书的大部分打字工作,参加打字和校对检查的还有周史薇、刘显明、丁翰、李赤喆、翟忠旭等同学。

我们在此对他们表示深切的感谢。作者水平有限,疏漏和不足之处在所难免,欢迎批评指正。

赵 峰 刘文彪

2010.7



凡例

1. 本书采用爱因斯坦惯例,重复指标(上、下指标重复)代表求和。

2. 本书在四维时空中讨论,四维张量的分量指标用希腊字母 μ, ν, σ, τ 等表示; 四维张量的抽象指标用拉丁字母 a, b, c, d 等表示。

抽象指标仅表示张量的阶数,不表示张量的分量。本书绝大多数情况使用张量分量形式,仅在个别章节(8.6节)用到了张量的抽象指标。

为了方便,本书还用拉丁字母 i, j, k 等表示四维时空中的三个空间指标。

3. 本书四维时空坐标一般取 (x^0, x^1, x^2, x^3) , 其中 $x^0 = ct$ 为时间坐标, x^1, x^2, x^3 为空间坐标。在 2.1 节中,为了与狭义相对论相衔接,四维时空坐标取 (x^1, x^2, x^3, x^4) , 其中 $x^4 = ict$ 为时间坐标, (x^1, x^2, x^3) 为空间坐标。

4. 度规号差取 +2, 即 $(-, +, +, +)$ 。

5. 四维时空两点之间的距离(即线元)取 $ds^2 = g_{\mu\nu} dx^\mu dx^\nu$ 。

6. 曲率张量定义为 $R_{\lambda\mu\nu}^\rho = \Gamma_{\lambda\nu, \mu}^\rho - \Gamma_{\lambda\mu, \nu}^\rho + \Gamma_{\sigma\mu}^\rho \Gamma_{\lambda\nu}^\sigma - \Gamma_{\sigma\nu}^\rho \Gamma_{\lambda\mu}^\sigma$ 。

7. 里奇张量的定义采用一、三缩并, 即 $R_{\mu\nu} = R_{\mu\lambda\nu}^\lambda$ 。

8. 爱因斯坦方程为 $R_{\mu\nu} - \frac{1}{2} g_{\mu\nu} R + \Lambda g_{\mu\nu} = \kappa T_{\mu\nu}$ 。



CONTENTS

绪论	1
第 1 章 广义相对论的物理基础	5
1.1 狭义相对论的成就与困难	5
1.2 等效原理与广义相对性原理	10
1.3 对新理论的构想	14
习题	15
第 2 章 黎曼几何与张量分析	16
2.1 狭义相对论中的张量	16
2.2 广义相对论中的张量	18
2.3 张量代数	21
2.4 平移与联络	23
2.5 协变微商	25
2.6 测地线与仿射参量	26
2.7 曲率与挠率	28
2.8 度规张量	31
2.9 克里斯多菲符号	34
2.10 短程线	36
2.11 黎曼空间的曲率张量	37
2.12 几个重要的运算	41
习题	42
第 3 章 爱因斯坦场方程与时空的基本理论	44
3.1 广义相对论中的时间与空间	44
3.2 同时的传递性	49
3.3 场方程与运动方程	51
3.4 运动方程的导出及其牛顿近似	55
3.5 广义相对论中的力学和电磁学方程	60
3.6 场方程的牛顿近似	65

3.7 坐标条件与边界条件	66
习题	70
第4章 广义相对论的实验验证	72
4.1 史瓦西解	72
4.2 史瓦西时空的坐标量和固有量	76
4.3 测量及测量的比较	78
4.4 引力红移	84
4.5 史瓦西时空中的运动方程	89
4.6 水星近日点的进动	92
4.7 光线偏折	95
4.8 若干引力实验简介	99
习题	101
第5章 引力波初步	102
5.1 平面引力波	102
5.2 引力场的能量	106
5.3 引力辐射能	108
5.4 脉冲双星的引力辐射	112
5.5 引力四极共振	115
5.6 引力波的探测	118
习题	121
第6章 黑洞物理入门	122
6.1 史瓦西黑洞	122
6.2 克鲁斯卡时空和彭若斯图	128
6.3 克尔-纽曼黑洞	133
6.4 黑洞的非热效应	140
6.5 黑洞的热性质	145
6.6 霍金辐射的证明	150
习题	157
第7章 宇宙学简介	159
7.1 相对论宇宙学的进展	159
7.2 运动学宇宙论	164
7.3 动力学宇宙论	168
7.4 极早期宇宙	172
7.5 暴涨模型	175
7.6 关于宇宙学的评注	180

7.7 时空隧道	184
7.8 时间机器	189
习题.....	191
第 8 章 时空理论若干问题探讨.....	192
8.1 惯性的起源	192
8.2 时间尺度变换的补偿效应	196
8.3 黑洞的定义	200
8.4 动力学黑洞的热辐射	205
8.5 信息疑难	210
8.6 奇性疑难	216
8.7 时间的性质	223
8.8 时间的测量	227
参考文献.....	233

19世纪末叶,经典力学、热学、波动光学和电磁学所取得的辉煌成就,使那个时代的物理学家感到充分的自信和满足。1900年,在英国皇家学会迎接新世纪到来的庆祝会上,开尔文勋爵(Kelvin,即威廉·汤姆孙,W. Thomson)自豪地宣称:“物理学的大厦已经建成,未来的物理学家们只需要做些修修补补的工作就行了。”然而,科学家的慧眼仍然使他看到,“明朗的天空中还存在两朵乌云,一朵与黑体辐射有关,另一朵与迈克耳孙实验有关。”

时隔不到一年,从第一朵乌云中降生了量子论(1900年底)。五年之后,又从第二朵乌云中降生了相对论(1905年)。经典物理学的大厦被动摇了,就在大家认为物理学已经发展到顶峰,马上就要无事可做的时候,新的纪元开始了。

作为现代物理学奠基人的爱因斯坦(A. Einstein),1879年诞生于德国一个犹太工厂主的家庭。少年时代他没有表现出杰出的智慧,除数学外,其他功课皆属平常。他沉默寡言,不喜欢学校中呆板的教学方法,学习成绩一般,很少得到老师和同学的喜爱。引起同学注意的,是他自幼对音乐的爱好和独立思考的习惯。1896—1900年,爱因斯坦在瑞士苏黎世工业大学求学,他主要靠自学度过了自己的大学生涯。

爱因斯坦一生中对学校很少有好评,只有上大学前在瑞士阿劳中学的那一年补习生活是个例外。他晚年时回忆,“这所学校用它的自由精神和那些毫不仰赖外界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。”

犹太血统、无神论信仰和对真理正义的追求,给他的生活带来不少麻烦。大学毕业后有两年找不到正式的工作,他在穷困中开始了自己的科学生涯。

1902年,幸运之神开始敲响爱因斯坦的门户。他的一位“伯乐”式的同学格罗斯曼(M. Grossmann),通过自己的父亲把他推荐到伯尔尼发明专利局工作,使他终于有了一个正式的职业。专利局的工作使他有充分的闲暇进行自己喜爱的研究。虽然他也不得不经常为处理一些“永动机”之类的发明申报而耗费时间,然而荒唐而活跃的思想也多少给他输入了新的灵感。

在专利局工作期间,爱因斯坦与他的几位热爱科学与哲学的好友组织了一个叫做“奥林匹亚科学院”的小组,这是一个自由读书与自由探讨的俱乐部。爱因斯坦高度评价这个读书俱乐部,认为这个俱乐部培养了他的创造性思维,促成了他在学术上的成就。爱因斯坦曾经提醒,不要过分渲染他的童年和少年时代,希望大家注意“奥林匹亚科学院”对他的影响。

在发表若干关于毛细现象和分子运动论的文章之后,爱因斯坦终于在1905年公布了多年深思熟虑的结晶——《论运动物体的电动力学》(关于狭义相对论的划时代论文)。虽然在

那个时期,已有一些物理学家非常接近相对论的发现,甚至已经得到了洛伦兹收缩和洛伦兹变换之类的数学公式,然而只有爱因斯坦一个人跳出了绝对时空观的框架,成为狭义相对论的当之无愧的创始人。

这篇数学并不高深(只相当于当时大学物理系学生的数学水平)、没有引用任何文献,而在物理上却极其难懂的论文,幸运地得到理论物理学权威普朗克的支持而很快见诸于世。

此后的十年,爱因斯坦几乎是单枪匹马地开始了相对论性引力论的研究。起先几年,他试图把牛顿引力定律纳入狭义相对论的体系。错误和挫折使他认识到这个问题远比原来预想的要深远和复杂,伟大物理学家的天才直觉使爱因斯坦抓住了等效原理和广义相对性原理,把惯性和引力等同起来考虑,并窥视到时空和物质之间的内在联系,猜测到万有引力很可能是一种几何效应。他的物理思想已经深入到弯曲时空的领域,困难是找不到合适的数学工具。1912年,他的同学格罗斯曼再次帮助了他,向他介绍了当时不为物理学家所熟悉的黎曼几何和张量分析。经过深入的自学,爱因斯坦终于掌握了这一工具,并在1915年完成了他的广义相对论。宏伟的理论框架建立起来了。至此,他的物理思想和数学水平,已远远超前于那个时代的所有物理学家。

表明广义相对论正确的三大验证的结果,使爱因斯坦名震全球。然而,在弱引力场中广义相对论与牛顿引力理论的差别过于细微,场方程的非线性又给求解带来极大困难,所以在此后的几十年中,广义相对论理论本身进展不大。比较重要的是在20世纪30年代时,爱因斯坦和福克(V. Fock)分别独立地解决了广义相对论的“二体问题”,并从场方程推出运动方程,使广义相对论的基本方程从两个减少到一个,理论体系更趋完备。除此之外,值得一提的进展是1916年得到静态球对称的史瓦西解;1917年在场方程中引入了长期存在争议的宇宙项;1922年弗里德曼(A. Friedmann)求得膨胀或脉动的宇宙解,此解得到1929年发现的哈勃(E. P. Hubble)定律的有力支持;1948年伽莫夫(G. Gamov)据此提出“大爆炸宇宙模型”。

物理学上的杰出成就,使爱因斯坦于1922年获得了1921年的诺贝尔物理学奖。由于当时一些物理学家怀疑相对论的正确性,获奖原因被委婉地写为“由于他在光电效应和理论物理学其他方面的成就”,而没有直接提到他的划时代杰作。

爱因斯坦的犹太出身和反法西斯情绪使他受到希特勒的迫害,不得不于1933年移居美国。此后他在普林斯顿高级研究所工作,直到1955年去世。爱因斯坦的正义感和傲骨使他不屈服于任何反动势力的压迫,不脱离他所处时代的社会斗争。继在第一次世界大战期间参加反战运动之后,又在第二次世界大战期间参加反法西斯运动。第二次世界大战后,他又为世界的和平与民主而呼喊。

爱因斯坦晚年致力于统一场论的工作。由于时代的限制,到他去世为止,这项工作没有取得重大成就。然而,他的工作应该看作是今天蓬勃进展的以规范场论为基础的“弱电统一”、“大统一”和“超统一”工作的序幕。

毫无疑问,爱因斯坦是继牛顿之后最伟大的物理学家,他的成就涉及相对论、量子论和统计物理各个领域。爱因斯坦去世之后,他所创立的理论得到广泛传播,并得到了长足发展。

不过,在20世纪50年代前后,相对论的进展与量子论相比,曾经是令人失望的。粒子物理学家费曼(R. P. Feynman)参加了在华沙举行的广义相对论与引力研讨会。在听了一

些驴唇不对马嘴的报告之后,他忍不住在给妻子的信中写下了如下的感想:

“我没有从会上获得任何东西。我什么也没有学到。因为没有实验,这是一个没有活力的领域,几乎没有一个顶尖的人物来做工作。结果是一群笨蛋(126个)到这儿来了,这对我的血压很不好。以后记着提醒我再不要参加任何有关引力的会议了。”

然而,情况很快有了重大改观。1963年克尔(R. P. Kerr)解的得出和1967年脉冲星的发现促使致密星和黑洞物理的研究进入高潮;1970年前后,彭若斯(R. Penrose)和霍金(S. W. Hawking)证明了奇点定理;1973年,黑洞热力学的四条定律建立起来;1974年霍金又预言了黑洞热辐射。

1965年微波背景辐射的发现,使大爆炸宇宙学获得新动力,各种宇宙模型应运而生,宇宙早期、极早期的研究进入高潮。20世纪70年代到90年代,粒子物理、宇宙论和量子引力的研究汇为一体。进入21世纪后,关于暗物质和暗能量的讨论愈演愈烈,掀起了理论物理学和天体物理学研究的一个又一个新浪潮。

为了更好地理解广义相对论,我们还要回顾一下它的数学工具黎曼几何建立的历史,新几何开拓者的命运并不都像爱因斯坦那样幸运。

起源于古埃及、完成于古希腊的欧几里得几何,以它逻辑的严密、形式的完备和优美,两千年来为数学家和哲学家所倾倒。唯一使人感到美中不足的是它的第五公设,即平行公理。这个公设与其他公设比较,显得过于复杂,人们自然希望第五公设能从其他公设推出,从而不再是一个公设。这方面的尝试开始于公元前5世纪,一千多年中,许多杰出的数学家为它绞尽脑汁,结果都一无所获。无数前人的失败,终于使后人悟出了一个道理。第一个察觉其中奥妙的大概是高斯(C. F. Gauss)。然而,由于欧氏几何在数学、哲学和神学中的神圣地位,高斯缺乏公开挑战的勇气。第一个公布新几何初步成果的,是年轻的匈牙利数学家鲍耶(J. Bolyai)。他的父亲是高斯的同学,曾为第五公设的证明耗费了自己的大量精力。当他得知儿子又走上这条自我毁灭的道路时,立即加以劝阻,然而此时鲍耶已经领略了其中的奥妙。他较为幸运,开始这一研究不久就走上了正确的道路。关键在于他采用了反证法,企图从“第五公设不成立”引出谬误。然而,他却在反证的道路上越走越远,始终不见“谬误”的影子。最后,他终于产生了思想上的飞跃,认识到第五公设确实是不可证明的独立公理;但是人们可以引入不同于第五公设的其他公理,例如“过直线外一点可以引两条以上的直线与原直线平行(不相交)”,来取代“第五公设”建立新的几何学。然而,可惜的是鲍耶误解了高斯对他工作的评价,以为高斯要借自己的地位窃取他的成果,于是愤而终止了自己的研究。

首先建立完整的新几何学的是俄国数学家罗巴切夫斯基(N. I. Lobachevski),他用“过直线外一点,可以引两条以上直线与原直线平行(不相交)”的新公设来取代第五公设。然而,他的理论在国内无人能懂,这位天才的数学家被人视为骗子,俄国科学院决定对他的工作今后不予理睬。他出国演讲遭到冷遇,唯一听懂了他的理论的高斯,没有明确表示支持。不过高斯建议普鲁士科学院授予他通讯院士的称号,对他的数学水平表示了肯定。罗巴切夫斯基晚年双目失明、处境凄凉,但仍顽强地通过口述完成了自己的工作,并终于得到世界的认可。罗巴切夫斯基的理论被称为罗氏几何。

黎曼(G. F. B. Riemann)用另一个公设来代替第五公设,他提出“过直线外一点的任何直线都必定与原直线相交”,他所建立的几何称为黎氏几何。

实际上,这三种几何描述不同曲率的空间;欧氏几何描述零曲率空间(如平面),黎氏几



何描述正曲率空间(如球面),罗氏几何描述负曲率空间(如伪球面与马鞍面)。1845年,黎曼在更高的层面上统一了这三种几何,建立黎曼几何,用来描述弯曲和扭曲的几何客体。

20世纪初叶,黎曼几何与相对论互不相关、各自发展。爱因斯坦把二者有机地联系起来,使这两门科学都获得了新的动力,互相促进、共同发展。

爱因斯坦把引力看作时空的几何效应,看作时空的弯曲,而时空弯曲的根源在于物质的存在与运动。狭义相对论把时间和空间看成不可分割的整体,把能量和动量看成另一个不可分割的整体。广义相对论表明,时空和能量、动量之间也存在不可分割的联系。

相对论的出现,在物理学上是一场革命,在哲学上也有着重要的意义。它与牛顿的绝对时空观彻底决裂,与马赫(E. Mach)的纯相对主义的时空观也不一致。爱因斯坦在创立相对论的过程中,曾受到马赫思想的启发,他认为自己的相对论与马赫的思想一致,并认为广义相对论的某些效应体现了马赫原理。然而马赫坚决否定相对论,认为相对论与自己的思想毫无共同之处。事实上,相对论与马赫的思想确有不同,广义相对论与马赫原理也确有出入,牛顿水桶实验造成的佯谬还远未澄清。此外,爱因斯坦晚年对时空的看法也是发人深省的:“我想说明,空间-时间未必能看作是可以脱离物质世界的真实客体而独立存在的东西。并不是物体存在于空间中,而是这些物质具有空间广延性。这样看来,关于‘一无所有的空间’的概念就失去了意义。”显然,爱因斯坦的哲学思想走在了他创立的物理理论的前面。

广义相对论不是最终的理论,任何建立最终理论的企图都是注定会失败的,理论不可能发展到绝对完善。“完善”只能意味着理论的死亡,只有不完善的理论,才是朝气蓬勃的、有生命的理论。

广义相对论的物理基础

本章首先介绍爱因斯坦在创建狭义相对论过程中最重要的思想突破,介绍光速在相对论中的核心地位,以及狭义相对论所取得的成就和遇到的困难;然后介绍广义相对论的物理基础——等效原理、马赫原理和广义相对性原理,分析了牛顿为论证存在绝对空间而提出的著名的水桶实验。最后介绍了爱因斯坦对新理论的重要猜测和构想。

1.1 狭义相对论的成就与困难

1. 狭义相对论的建立

1687年发表的牛顿(I. Newton, 1642—1727)巨著《自然哲学之数学原理》,集伽利略(G. Galilei, 1564—1642)以来力学研究之大成,展示了一个逻辑上完美的力学体系。书中阐述了力学三定律和万有引力定律,牛顿把这些定律放置在绝对空间和绝对时间的框架之中,认为绝对空间和绝对时间是互不相关的,也不依赖于物质的存在和运动。在牛顿力学中,惯性系被定义为相对于绝对空间静止或作匀速直线运动的参考系,力学定律正是在这些惯性系中成立。这些惯性系在描述力学定律上是平权的,它们之间以伽利略变换相联系

$$\begin{cases} x' = x - vt \\ y' = y \\ z' = z \\ t' = t \end{cases} \quad (1.1.1)$$

认为各种惯性系平权的思想,被称为伽利略相对性原理(又称力学相对性原理)。

虽然绝对空间和绝对时间的提法是可疑的,不断遭到马赫等人从哲学角度进行的批判,但牛顿的力学体系自身还是自治的;而且,力学三定律和万有引力定律得到了物理实验和天文观测的广泛支持。

这种情况一直持续到1864年麦克斯韦(J. C. Maxwell)电磁理论的建立。当时的电磁理论建立在力学的基础上,认为电磁波是介质或以太的弹性振动,而以太无所不在地充满整个宇宙空间。不久之后,人们便认识到光波是电磁波,于是以太便被看作光波的载体。一个

重要的问题是,以太是否被运动物质所带动,例如是否被地球或流体的运动所带动。天文学上的光行差现象告诉人们,以太不被地球带动。迈克耳孙(A. A. Michelson)实验又告诉人们,以太似乎是被地球带动的。斐佐(A. H. Fizeau)实验则告诉人们以太被流体有所带动,但是又不完全带动。大多数物理学家注意的是迈克耳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,这两个矛盾都可以把思考者引向相对论的发现。面对着矛盾的实验事实,当时的杰出物理学家,如洛伦兹(H. A. Lorentz)等,对原有的物理理论作了若干修改尝试,但都未能抓住问题的本质。

除去上述实验观测上的矛盾外,理论上也遇到了严重困难。麦克斯韦电磁理论有一个重要结论:电磁波(即光波)在真空中的传播速度是一个常数 c 。如果相对性原理不仅适用于力学,对麦克斯韦电磁理论也成立,那么光波在任何一个惯性系中的速度都应该是 c ,与惯性系之间的相对运动无关,也与观测者相对于光源的运动速度无关。生活常识和伽利略变换都告诉我们,如果相对于光源静止的观测者测得的光速是 c ,那么迎着光以速度 v 运动的观测者测到的光速应该是 $(c+v)$;顺着光运动方向以速度 v 奔跑的观测者测得的光速应该是 $(c-v)$,怎么可能这三位观测者测得的光速都是 c 呢?麦克斯韦电磁理论和相对性原理都得到大量实验支持,伽利略变换则被视作相对性原理的数学体现,怎么会产生上述矛盾呢?爱因斯坦被这个难题卡了很长时间。经过反复思考,终于在一次和好友贝索(M. Besso)的讨论中突然悟出了其中的真理。他意识到应该坚信得到实验支持的麦克斯韦电磁理论,坚信真空中的光速不仅是一个常数,而且与惯性系的选择无关。爱因斯坦抓住了这个事实,提出光速不变原理:真空中的光速在所有惯性系中都相同,都是同一个常数 c (即光速与光源相对于观测者的运动速度无关)。爱因斯坦还正确地认识到伽利略变换并不等价于相对性原理,相对性原理比伽利略变换更为基本。于是,他保留了得到实验支持的相对性原理和麦克斯韦电磁理论,抛弃了并无坚实实验基础的伽利略变换。然后,他把相对性原理和光速不变原理一起作为新理论的基础,建立了狭义相对论。

应该说明,提出光速不变原理是非常不容易的事情。这一原理如果成立,就表明光速是绝对的,这将导致一个崭新的观念:“同时”是相对的。也就是说,在一个惯性系 S 中同时发生的两件事情,对于另一个相对于 S 以速度 v 运动的惯性系 S' 中的观测者,这两件事将不是同时发生的,而是一先一后发生的。这个结论与人们的生活经验严重冲突,很难被人理解;因此可以说,理解狭义相对论的关键就在于理解“同时的相对性”。相对论诞生前夕,爱因斯坦的思路被卡住一年多,就是因为他长时间没有认识到“同时”这个概念不是“绝对”的,而是“相对的”。

从在阿劳中学上补习班的时候起,爱因斯坦就开始思考一个“追光”实验:如果一个观测者追上光,以光速运动,将会看见什么?他觉得这个观测者会看到不随时间变化的波场,但是谁也没有见过这种现象。如果这个以光速运动的人在前面用手举着一个镜子,他能在镜中看见自己的像吗?如果能看见,那么自己的脸发出的光相对于自己的速度还是 c 吗?如果还是 c ,那么依据伽利略变换,静止于地面的观测者岂不将看到此光相对于自己的速度是 $2c$ 吗?但是谁也没有见过以速度 $2c$ 运动的光,所有测得的光速都是同一个值 c ,似乎应该承认不存在以光速运动的、相对于光静止的观测者,光相对于所有观测者都是运动的,而且运动速度都相同,都是同一个值 c 。也就是说,应该承认光速与光源相对于观测者的运动速度无关。爱因斯坦还知道,天文学上对双星的观测也支持光速与光源运动无关的观点。

如果有关,双星轨道将发生畸变,但是从未观测到任何双星的轨道有畸变。

长期的反复思考使爱因斯坦倾向于承认“光速的绝对性”,即承认光速各向同性,是一个常数 c ,而且在所有相互运动的惯性系中都是同一个常数 c 。但是,进一步的思考表明,承认“光速的绝对性”,会造成“同时”概念的混乱,爱因斯坦觉得这可真是个难解之谜。在与贝索的讨论中,爱因斯坦突然意识到这些混乱都与人们默认“同时”的绝对性有关。其实,“同时的绝对性”只是人们一个“想当然”的观念,并没有经过实验的认真检验。如果放弃这一观念,把“同时”看作相对的,而且从“光速的绝对性”出发来定义“同时”,那么一切就都迎刃而解了。爱因斯坦的头脑豁然开朗,相对论的大厦呈现在他的眼前。

爱因斯坦明确强调,他的狭义相对论与经典物理学的根本区别不在于相对性原理,因为伽利略、牛顿都赞同相对性原理。他认为根本区别在于他提出的光速不变原理,这一原理才是经典物理学与狭义相对论的分水岭。

爱因斯坦从光速不变原理和相对性原理出发,得到了联系不同惯性系的洛伦兹变换

$$\begin{cases} x' = \frac{x - vt}{\sqrt{1 - v^2/c^2}} \\ y' = y \\ z' = z \\ t' = \frac{t - \frac{v}{c^2}x}{\sqrt{1 - v^2/c^2}} \end{cases} \quad (1.1.2)$$

用以取代伽利略变换,又在指出“同时的相对性”之后,提出“动尺缩短”、“时间延缓”和“质能关系”等新概念。然后他又在闵可夫斯基的帮助下,把电磁理论和动力学定律写成了四维协变的张量形式。

洛伦兹变换表明,时间和空间存在内在联系。“能量动量张量”的表达式和“质能关系式”等表明,质量与运动不可分割。

光速不变原理和相对性原理告诉我们,一切惯性系都是平权的,不可能测出相对于绝对空间的运动速度;所以,牛顿的绝对空间和绝对时间的概念必须放弃。不存在绝对速度,一切匀速直线运动都是相对的;绝对时空的概念和以太一起,被爱因斯坦抛弃了。

需要说明的是,最早得出洛伦兹变换的人不是爱因斯坦,在他之前拉摩(J. Larmor)、斐兹杰惹(G. F. Fitzgerald)、洛伦兹等人早已给出了洛伦兹变换的正确数学表达式,但他们对洛伦兹变换的物理理解都是错误的。洛伦兹等人认为 S 系 (x, y, z, t) 是相对于绝对空间(以太)静止的特殊惯性系,因此 S' 系相对于 S 系的运动速度 v 是绝对速度,即相对于绝对空间的运动速度; S' 系中的时间 t' 是所谓“地方时”,并非真正的时间;动尺收缩是相对于绝对空间运动而产生的真实的物理效应,会导致原子内部电荷分布的变化等。爱因斯坦在不知道他们工作的情况下,独立地得出了洛伦兹变换,并给出了正确的物理解释:根本不存在以太和绝对空间, S 系和 S' 系都是同等的惯性系, v 是它们之间的相对速度; t 与 t' 都是真实的时间,在各自的惯性系中都有测量意义;动尺收缩是相对的,是一种时空效应,不会导致原子内部电荷分布的变化。洛伦兹等人最初反对爱因斯坦的理论,为了区分自己的理论和爱因斯坦的理论,他给爱因斯坦的理论起了个名字叫“相对论”,爱因斯坦觉得这个名字还可以接受,于是“相对论”这一名称便被保留了下来。