

· 大学教材系列 ·

GUANGYIXIANGDUILUNDAOLUN

广义相对论导论

唐肇华 刘素芸 翁甲强 编著



广西师范大学出版社

广义相对论导论

唐肇华 刘素芸 翁甲强 编著

广西师范大学出版社

广义相对论导论

唐肇华 刘素芸 翁甲强 编著

责任校对: 肖向阳

广西师范大学出版社出版发行

邮政编码: 541001

(广西桂林市中华路36号)

核工业中南 310 印刷厂印刷

*

开本: 850×1168 1/32 印张: 7.375 插页: 1 字数: 185千字

1997年8月第一版

1997年8月第一次印刷

印数: 0001—1200册

ISBN7-5633-2449-6/O·020

定价: 16.00元



内 容 提 要

本书是一本学习广义相对论的入门书。全书共分七章,第一章介绍学习广义相对论必备的黎曼几何和张量知识,第二章至第五章介绍广义相对论的基本理论和实验验证,第六、七章介绍广义相对论对黑洞和宇宙的探索。

本书采用较通俗的语言由浅入深地介绍广义相对论的有关概念和理论;在内容的取舍方面,既重视基础知识的介绍,也注意最新的进展情况。本书理论系统严密,具有高等数学和普通物理基础的读者一般不必借助其他参考书即可阅读。

本书可作为高等师范院校物理专业高年级学生和研究生的教科书,也可供中学物理教师和对广义相对论有兴趣的读者参考。

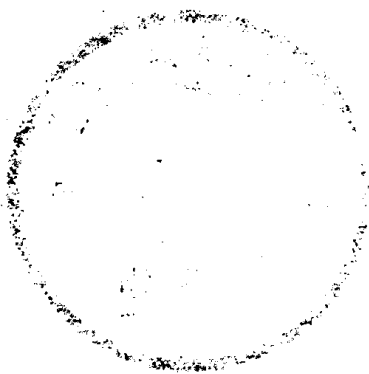




图6.11(b) 哈勃空间望远镜拍摄到的星系团 (AC114)的引力透镜现象

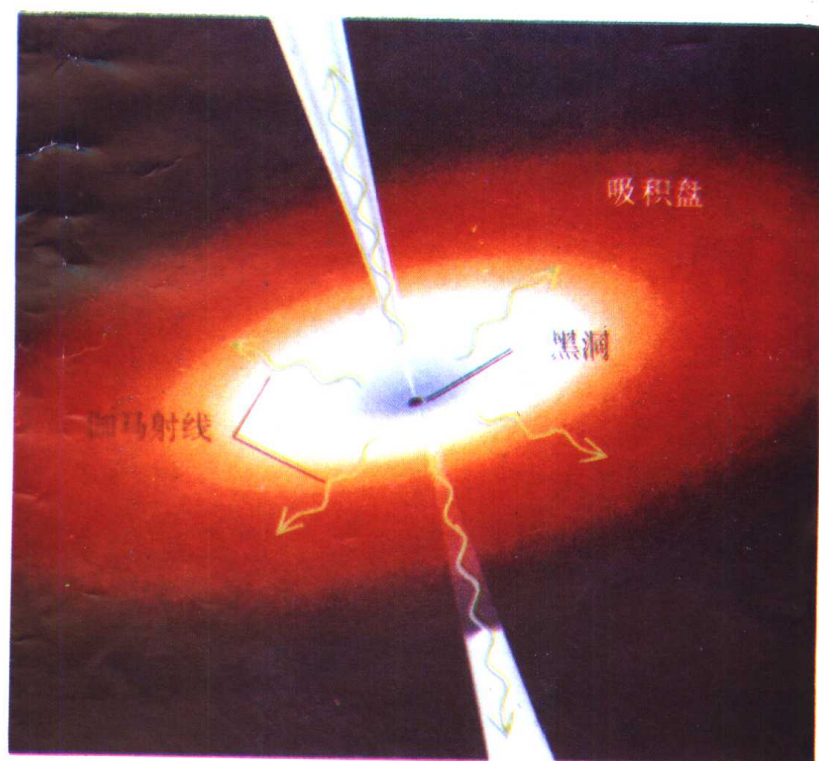


图 6.14 类星体的伽马射线束



(a)



(b)

图 6.13 哈勃空间望远镜拍摄到的星系核吸积盘

对于广义相对论的提出，我过去和现在都认为是人类认识大自然的最伟大的成果。

——1954 年诺贝尔物理学奖获得者

M. 玻恩(Max Born)

在这 100 年中，没有哪一个人可以与爱因斯坦相媲美，很可能在整个人类思想史上涉及物理学的任何情况，也是无与伦比的。毫无疑问，没有一个人像他那样成为如此多姿多彩的革命思想的开创者。

——1979 年诺贝尔物理学奖获得者

A. 萨拉姆(A. Salam)

序

本世纪初,在经典物理学的沃土里萌发出两枝鲜艳的花朵,一朵是普朗克的量子论,另一朵是爱因斯坦的相对论.在两论的引导下,20 世纪的科学和技术获得了空前的发展.

相对论分为狭义相对论和广义相对论.狭义相对论和量子理论早已列为大学物理系的必修课程,但广义相对论至今尚未正式进入大学课堂.其原因可能是:第一,广义相对论的实验大多不可能在实验室内进行,而天文观测技术在广义相对论创立后很长一段时间内又停滞不前,对于广义相对论推论出的一些科学预见,60 年代前除水星近日点的进动,光线在引力场中的偏折,以及光谱线的红移三项先后得到观测证实外,其余的迟迟未能给出验证.而且,在广义相对论之后,因为受到爱因斯坦引力场方程的启发,又产生了多种引力理论,它们也由于缺乏实验检验,故难分泾渭,令人无所适从.第二,广义相对论关于时间、空间、引力和宇宙结构等观念与人们头脑中的根深蒂固的传统观念很不协调,令人难以接受.第三,一些介绍广义相对论的著作所使用的数学语言往往超出了物理专业学生的数学知识水平,令人望而却步.以上诸因,均有碍于广义相对论的讲习.

进入 60 年代以后,情况发生了变化.由于空间技术、射电天文学、粒子物理学以及高精度天文观测技术等的发展,广义相对论推导出的一些令人震惊和困惑不解的物理和天文现象陆续获得了

验证,有多项成果还荣获诺贝尔物理学奖.这些验证,也是对其他引力理论的否定,从而广义相对论被公认为是人类迄今所建立的最精确、最完善、最完美的引力理论.这一理论,也是留给 21 世纪继续探索并把它应用于现实世界的重要理论.因此,我们深感今日物理专业学生缺乏广义相对论知识是一大憾事,它不利于现代科学技术的发展,有碍于培养跨世纪的科技人才.为了弥补学生这方面知识的不足,从 1981 年起,我们尝试在物理专业本科开设广义相对论课,讲授广义相对论的基本内容.本书就是在当时编写的讲义的框架上增加近年来的观测验证成果等内容而重新编写的.

广义相对论是爱因斯坦以物体的惯性质量和引力质量相等这一事实为基点,运用科学的思辨能力和数学逻辑推理建立起来的,它的一些极富革命性的预言和推论都是从数学演绎导出的,所展示的一些新奇的现象又超越了我们的经验知识,甚至不能用语言文字来讲清楚,必须应用数学语言才能给出恰当的描述.不借助数学推演是不可能理解广义相对论的.但我们也认为,要使人们理解广义相对论,所使用的数学语言,首先要切合读者的知识范围;其次,数学毕竟是用来表述物理现象的工具,不宜用抽象的数学概念取代物理概念,只能是借助数学来阐释物理现象和深入地理解物理现象.本书就是本着这一认识来编写的.对于各有关问题,均尽量先从人们已经认识的现象出发,再引申而用数学形式表述.数学演算力求详尽和浅明,着重分析它的物理的和几何的意义.尽量少用或不用纯数学的抽象概念,更避免从一开始就给出几条抽象的数学定义、定理等,然后作纯数学的推演的方法.特别是对那些没有引出什么新意又无助于对广义相对论加深理解的数学方法,本书均不选用.本书的目的在于传播现代科学基础理论,扩大物理专业学生的基础理论知识范围.

本书内容除引言外共分为七章.在引言中简要介绍从伽利略-

牛顿时代以来人们对时空概念的几次重大变革. 第一章讲述本书用到的几个黎曼几何的基本概念, 着重阐明它们的几何的和物理的含义. 第二章讨论引力时空的内禀性质, 导出广义相对论引力场方程. 第三、四两章介绍球对称引力场方程的解及其实验验证. 第五至七章分别介绍引力辐射、黑洞和宇宙学的基本理论及近期观测成果.

广西大学阳兆祥教授和广西师范大学张振球教授审阅了本书的全稿, 广西师范大学陈赤高工协助制作部分插图, 并得到广西师范大学出版社编审于诗藻同志的关心和支持, 借此谨表谢忱.

编 者

1995 年 8 月于桂林独秀峰下

目 录

引言	(1)
第一章 张量与黎曼空间	(20)
§ 1.1 空间的内禀性质	(20)
§ 1.2 曲线坐标系	(27)
一、协变基矢量与逆变基矢量	(29)
二、矢量的协变分量和逆变分量	(35)
三、曲线坐标系中的长度、面积和体积	(37)
四、坐标系的变换	(39)
§ 1.3 张量	(42)
一、张量的概念	(42)
二、张量的加减法	(45)
三、张量的乘法	(45)
四、张量的缩并	(46)
五、张量的除法	(47)
§ 1.4 度规张量	(48)
一、度规张量的定义	(48)
二、度规张量的性质	(49)
三、张量指标的升降	(53)
§ 1.5 协变微商	(53)
一、矢量的平移	(53)
二、协变微商与联络	(55)

三、联络的性质	(60)
四、克里斯托菲符号	(61)
§ 1.6 弯曲空间的曲率张量	(62)
一、黎曼-克里斯托菲曲率张量	(62)
二、曲率张量的性质	(66)
三、曲率张量的缩并	(68)
四、爱因斯坦张量	(69)
第二章 广义相对论基本原理	(71)
§ 2.1 等效原理	(73)
一、惯性质量与引力质量	(73)
二、等效原理	(75)
§ 2.2 广义相对性原理	(80)
一、广义协变性	(80)
二、广义协变的物理方程	(81)
§ 2.3 广义相对论的时空特性	(87)
一、引力对时间的效应	(89)
二、引力对空间的效应	(90)
三、时钟校准问题	(93)
四、引力场中的光速	(95)
§ 2.4 引力场方程	(97)
一、场方程的基本要求	(97)
二、质量、能量、动量张量	(98)
三、引力场方程	(100)
四、坐标条件	(102)
五、引力场中质点的运动方程	(104)
第三章 球对称引力场	(106)
§ 3.1 弱引力场近似解——牛顿方程	(107)
§ 3.2 真空场方程的解	(109)
一、静态球对称引力场时空度规	(110)
二、史瓦西外部解	(112)

§ 3.3 史瓦西度规的物理意义	(114)
一、引力时延	(114)
二、空间弯曲	(115)
三、引力半径	(117)
§ 3.4 伯克霍夫定理	(117)
§ 3.5 静止带电球的引力场	(118)
第四章 广义相对论效应与实验检验	(121)
§ 4.1 行星轨道近日点的进动	(122)
§ 4.2 光线在引力场中的偏折	(128)
§ 4.3 引力红移	(133)
§ 4.4 雷达回波延迟	(136)
第五章 引力辐射	(141)
§ 5.1 引力波方程	(141)
§ 5.2 引力能量辐射	(143)
§ 5.3 引力波的检测	(150)
第六章 黑洞	(152)
§ 6.1 黑洞的形成	(154)
§ 6.2 史瓦西黑洞	(159)
一、史瓦西黑洞内部的时空特性	(160)
二、无限红移面	(163)
三、视界	(164)
四、坐标奇异性	(169)
§ 6.3 克鲁斯卡坐标系	(170)
* § 6.4 黑洞的分类	(174)
一、静止带电黑洞	(176)
二、旋转黑洞	(176)
三、带电旋转黑洞	(180)
§ 6.5 黑洞的探测	(181)
一、引力透镜现象	(181)

二、强射线源.....	(182)
§ 6.6 黑洞热力学简介	(185)
一、黑洞面积增加原理.....	(185)
二、黑洞的熵与温度.....	(187)
§ 6.7 黑洞的辐射	(188)
第七章 宇宙学	(191)
§ 7.1 宇宙学原理	(193)
§ 7.2 共动参考系	(195)
§ 7.3 罗伯逊-沃尔克度规	(196)
§ 7.4 膨胀的宇宙	(202)
一、弗里德曼宇宙动力学方程.....	(202)
二、哈勃定律.....	(206)
三、宇宙的理论模型.....	(210)
四、宇宙的有限与无限.....	(214)
§ 7.5 宇宙的演化	(215)
一、元素的形成.....	(216)
二、宇宙的年龄.....	(218)
三、氦丰度.....	(219)
四、微波背景辐射.....	(220)
结束语.....	(223)
参考书目	(224)

引 言

在能够对科学做出的一切
贡献中,观念的突破是最伟大
的。

——1906 年诺贝尔物理学奖获得者

J. J. 汤姆逊(Joseph John Thomson)

爱因斯坦(A. Einstein)创立的相对论是关于时间、空间和引力的理论. 任何一条物理定律都需要用与时间和空间有关的物理量来表述,因此,相对论是物理学的基础理论.

从 17 世纪中叶起到 20 世纪初,在这 200 余年间,人们关于时间和空间的观念经历了三次巨大的变革. 第一次变革是从伽利略-牛顿的运动定律开始的,它突破了亚里士多德的“绝对空间”观念,引导出力学相对性的时空理论. 第二次变革发生在 1905 年,爱因斯坦发表《论运动物体的电动力学》论文,突破了传统的“绝对时间”观念,提出后来称之为狭义相对论的时空理论,10 年后,发生第三次变革,即在 1915 年 11 月爱因斯坦又提出广义相对论引力理论,论述时间、空间和引力(物质)的内在联系,揭示引力时空的

弯曲特性,突破了狭义相对论的平直时空理论.

时空观念的这3次变革,每次都引起了物理学发生巨大的革命,使物理学跃上一个又一个新的台阶,人们对物理世界的认识也就更加深入和全面.

下面简要介绍这三次时空观念变革及其对物理学发展的巨大影响.

一、伽利略-牛顿力学相对性时空观

现代物理学和现代科学技术,可以说发轫于伽利略-牛顿力学体系.“要是没有牛顿的明晰的体系,我们到现在为止所取得的收获就会成为不可能”(爱因斯坦).从17世纪起直到19世纪末的200余年间,牛顿力学理论一直是科学工作的纲领.就是时至今日,虽然我们不知道如果要更加深入精确地理解某些物理现象,必须用另一些离直接经验领域较远的概念来代替牛顿力学中的概念,但在许多技术领域仍把牛顿力学定律奉为必须遵循的准则.

人们关于空间和时间的认识,在牛顿以前纯系由感觉经验形成的.在西方,人们都信奉亚里士多德的空间和时间的观念.亚里士多德认为物体的自然状态是静止的,可以给物体指定一个绝对的空间位置,或称绝对空间.一物体受到其他物体冲击后,它的位置虽然发生了变化,但它所在的空间并没有移动.对于时间,亚里士多德则认为测量两事件之间的时间间隔,不论谁测量,所得到的结论都是一样的,时间也是绝对的.时间和空间是完全分立的,而且它们都与观测者的运动状态毫无关联.亚里士多德的绝对时空观还认定自然界有一个绝对静止的参考系,地球就是这样一个绝对静止的参考系,也是宇宙的中心,亚里士多德的“绝对时空”观念统治人们的思想近2000年,直到17世纪30年代,伽利略先后发表了《关于两大世界体系的对话》(1632年)和《关于力学和局部运

动两门新科学的谈话和数学证明》(1638年),以浅明的物理现象和清晰的语言批驳了亚里士多德的绝对空间观念,才表述了运动相对性思想.随后牛顿在1687年出版的《自然哲学的数学原理》一书中发表了力学运动的3个基本定律,并推论:在一个给定的空间,不问其是否静止或沿一直线等速运动,只要不作任何转动,那么其中各个物体的运动都遵守相同的力学运动定律.这个推论确切地表述了伽利略的运动相对性思想.后人称之为伽利略-牛顿力学相对性原理.

力学相对性原理论证了自然界没有“绝对静止”和“绝对运动”,一切运动都是相对的.这是第一个否定亚里士多德的“绝对空间”概念的理论.

相对静止或作匀速直线运动的给定空间,通称为惯性参考系或惯性系.两个相对作匀速直线运动的参考系之间的时空坐标变换关系为:

$$\left. \begin{aligned} x' &= x - vt, \\ y' &= y, \\ z' &= z, \\ t' &= t. \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

这一组关系通常称为伽利略变换式.它们是概括日常生活经验总结出的关于力学相对性原理的数学表述式.牛顿力学定律和万有引力定律的数学形式经伽利略变换后是不变的.虽然伽利略变换只舍弃了绝对空间概念,保留了绝对时间观念,但仍是人类科学认识史上的一个重大的飞跃.爱因斯坦誉之为“人类思想史上最伟大的成就之一,而且标志着物理学的真正开端”.

但是牛顿却坚持他的绝对时空观,他对隐含在他的力学定律中不存在绝对空间深感忧虑,为此曾作出许多辩解,因而受到了他同时代的以及后来的一些科学家和哲学家的严肃批评.即使如此,他的力学相对性原理仍不失为留给我们的光辉的科学思想,并于