

Wulixueyugaojishuqianyan

物理学与 高技术前沿

蒋士亮 编



广西民族出版社
GUANGXI MINZU CHUBANSHE

物理学与高技术前沿

蒋士亮 编

广西民族出版社

图书在版编目(C I P)数据

物理学与高技术前沿/蒋士亮编. —南宁:广西民族出版社, 2006. 9

ISBN 7-5363-5135-6

I. 物... II. 蒋... III. 物理学—研究 IV. 04

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2006) 第 068921 号

Wulixue Yu Gao Jishu Qianyan
物理学与高技术前沿

蒋士亮 编

出版发行	广西民族出版社(地址 南宁市桂春路 3 号 邮政编码 530028)		
发行电话	(0771)5523216 5523226	传 真	(0771)5523246
E-mail	CR@gxmzbook. cn		
责任编辑	韦启福		
封面设计	玉荣奖		
责任校对	黄一清		
责任印刷	蓝剑风		
印 刷	广西大学印刷厂		
规 格	787mm×1092mm 1/16		
印 张	31.25		
字 数	773 千		
版 次	2006 年 9 月第 1 版		
印 次	2006 年 9 月第 1 次印刷		
印 数	1~3000 册		

ISBN 7-5363-5135-6/G · 2040

定价:38.00 元

Wulixue yu gaojishu qianyan

物理学与 高技术前沿

蒋士英·编



人民邮电出版社

前言

20 世纪现代科学技术获得了全面、迅速的发展,空前地改变了人类社会的物质生活和精神生活,建立起现代文明。

在这 100 年内,科学和技术都发生了革命性的变化:科学上形成了相对论、量子力学、基因理论和系统理论等四大理论;对自然系统的描述建立了宇宙演化的大爆炸模型、深层物质结构的标准模型、遗传物质 DNA 双螺旋结构模型、智力活动的图灵计算机模型和地壳构造的板块模型等五类基本模型;在技术上形成了物质变化技术、能量转换技术和信息控制技术等三大基本技术以及按不同标准分类的多种技术;在科学、技术与社会之间,形成了相互越来越密切的关系,即科学技术化和技术科学化,科学社会化和社会科学化,技术社会化和会技术化。在 21 世纪里,创造性的科学与技术活动将普遍成为人类社会的主要活动,并向社会的许多领域渗透,以至引起国际社会的巨大变化。

一直被认为是精密科学典范的物理科学是基本的科学,起着基础性的作用,对整个科学技术系统产生了深刻的影响。近代物理学的一些重大突破为基础科学、技术科学以及工业生产带来了革命性的变化,并促进一系列新科学、新技术、新产业的形成与发展。例如,没有 20 世纪以来以相对论和量子力学作为理论基础的近代物理学的巨大进展,就不会有今天的计算机、激光和光通讯、核能、纳米科学和技术等各种各样的新科学与高技术。

近代物理学和高技术都已发展成为庞大的复杂系统,要在有限的篇幅内全面阐述清楚是很困难的。本书主要介绍近代物理学几个重要分支的前沿及其成果(其中很多与诺贝尔物理奖有关)和一些与物理有关的高技术前沿及其应用,多为近年来备受重视的研究方向,内容包括广义相对论和宇宙学、空间物理学与航天工程、原子分子结构、原子核和粒子、固体物理学与新材料、纳米技术、新能源、激光和光信息处理、红外辐射与遥控、近代物理分析技术等。本书是作为高校物理专业选修课材料、理工科非物理专业《大学物理》后续课程的教材而编写的。编写中力求:讲基础,但尽量反映前沿;讲近代物理与讲高技术结合;介绍现代科学技术知识与介绍科学思想方法结合;注意深入浅出,但又不至于太难或过于肤浅。

本书是在编者所编写的讲义和讲稿的基础上修改、增补而成的。本书编写成功得益于以下著作:《近代物理与高新技术物理基础——大学物理续编》(陈泽民主编,清华大学出版社,2001 年)、《大学物理(当代物理前沿专题部分)》(蔡枢、吴铭磊编,高等教育出版社,1996)、《现代科学技术基础》(周光召主编,群众出版社,2001)、《纳米科学与技术》(刘古平、郝向阳编著,科学出版社,2002 年)。本书的结构和内容都是参考上述著作拟定的。衷心感谢上述著作的作者在书中提供了大量的、最新的国内外参考文献、资料。

由于编者学识所限和时间紧迫,书中难免有疏漏和不当之处,恳请读者谅解并批评指正。

编者

2006 年 9 月于南宁相思湖畔

内容简介

本书介绍近代物理学几个重要分支的前沿及其成果和高技术前沿与应用,多为近年来备受重视的研究方向和热点。全书包括广义相对论和宇宙学、空间物理与航天工程、原子分子结构、原子核和粒子、固体物理和新材料、纳米技术、新能源、激光和光信息处理、红外辐射与遥感和近代物理分析技术。

本书可作为高校物理专业选修课教材或教学参考书,也可作为高校理工科非物理专业《大学物理》后续课程的教材,也可供其他物理学工作者参考。

目 录

第 1 章 广义相对论和宇宙学	(1)
1.1 广义相对论的基本原理	(1)
1.1.1 等效原理	(1)
1.1.2 广义相对性原理	(3)
1.2 广义相对论的重要推论	(3)
1.2.1 光线偏折	(3)
1.2.2 时空弯曲	(4)
1.3 引力场方程及其史瓦西解	(5)
1.3.1 爱因斯坦引力场方程	(5)
1.3.2 史瓦西场中的时空性质	(7)
1.4 广义相对论的实验检验	(10)
1.4.1 光谱线的引力频移	(10)
1.4.2 光线的引力偏折	(12)
1.4.3 雷达回波的引力延迟	(14)
1.4.4 行星近日点的相对论进动	(17)
1.5 史瓦西黑洞	(18)
1.6 大爆炸宇宙学简介	(21)
1.6.1 当今宇宙学的概貌和恒星的 演化	(22)
1.6.2 宇宙学原理和哈勃定律	(26)
1.6.3 物质为主时期的宇宙	(29)
1.6.4 辐射为主时期的宇宙—— 宇宙早期的历史	(34)
第 2 章 空间物理学与航天工程	(40)
2.1 空间物理学概述	(40)
2.1.1 空间物理学的特点	(40)
2.1.2 空间物理学的研究对象和 分支学科	(41)
2.1.3 空间物理学的研究方法	(42)
2.1.4 空间物理学研究的意义	(43)
2.2 地球的中高层大气	(45)
2.2.1 大气的分层结构	(45)
2.2.2 静态大气	(47)
2.2.3 太阳电磁辐射与大气的相互 作用	(47)
2.2.4 电离层的形成及其对电波 传播的影响	(49)
2.2.5 极光	(51)
2.3 地外空间	(53)
2.3.1 地球磁场	(53)
2.3.2 带电粒子在磁场中的运动	(56)
2.3.3 太阳的粒子辐射	(61)
2.3.4 磁层	(63)
2.4 太空和太空资源	(68)
2.4.1 太空	(68)
2.4.2 太空资源	(68)
2.5 太空航天器工程系统	(69)
2.5.1 航天运载系统	(70)
2.5.2 航天器任务系统	(70)
2.6 航天运载器	(71)
2.6.1 航天运载器的组成	(71)
2.6.2 航天器的宇宙能量	(73)
2.6.3 航天运载器的级数	(75)
2.6.4 航天运载器的发展概况	(78)
2.7 航天器	(81)
2.7.1 航天器的分类	(81)
2.7.2 航天器的组成	(82)
2.7.3 航天器的轨道	(85)
2.7.4 航天器的发展概况	(90)
2.8 中国的航天事业	(94)
第 3 章 原子 分子结构	(98)
3.1 氢原子的量子力学描述	(98)
3.1.1 粒子在中心场中的运动	(98)

3.1.2 氢原子结构	(100)
3.1.3 氢原子光谱	(103)
3.1.4 里德伯态	(104)
3.2 碱金属原子	(105)
3.3 磁矩、角动量空间量子化及 自旋	(107)
3.3.1 轨道角动量与轨道磁矩	(108)
3.3.2 角动量的空间量子化	(109)
3.3.3 自旋和自旋磁矩	(110)
3.3.4 角动量的合成	(111)
3.4 自旋轨道耦合与精细结构	(113)
3.5 氦原子	(116)
3.5.1 全同粒子与波函数的对称性	(116)
3.5.2 泡利不相容原理	(118)
3.5.3 氦原子的能级结构	(118)
3.5.4 角动量耦合与原子态	(122)
3.6 多电子原子结构	(123)
3.7 X 射线	(126)
3.7.1 连续谱:韧致辐射	(126)
3.7.2 特征谱:内壳层电子的跃迁	(128)
3.8 原子在外电磁场中的行为	(129)
3.8.1 原子在磁场中的行为	(130)
3.8.2 原子在电场中的行为	(132)
3.9 分子结构的一般性质	(134)
3.10 电子运动与价键的形成	(136)
3.10.1 NaCl 分子:离子键的形成	(136)
3.10.2 H_2^+ 离子:共价键的形成	(137)
3.11 双原子分子的振动与转动	(139)
3.12 分子光谱	(140)
3.12.1 纯转动光谱	(140)
3.12.2 振动-转动光谱	(141)

第 4 章 原子核和粒子

4.1 核结构模型	(146)
4.1.1 原子核稳定性的实验规律	(146)
4.1.2 液滴模型和质量的半经验 公式	(150)
4.1.3 壳层模型和超重核	(152)
4.1.4 集体模型	(155)
4.2 原子核的放射性衰变	(157)
4.2.1 放射性衰变的基本规律	(157)
4.2.2 α 衰变	(160)
4.2.3 β 衰变	(162)
4.2.4 γ 衰变和诱发 γ 辐射	(167)
4.3 原子核反应	(168)
4.3.1 反应能和阈能	(168)
4.3.2 反应截面	(170)
4.3.3 核反应的过程和机制	(171)
4.4 粒子的分类和结构	(172)
4.4.1 粒子的分类	(174)
4.4.2 粒子和反粒子	(176)
4.4.3 粒子和场	(180)
4.4.4 强子结构——夸克模型	(181)
4.5 粒子的相互作用	(183)
4.5.1 四种相互作用	(183)
4.5.2 场和媒介子	(184)
4.5.3 电-弱相互作用的统一	(186)
4.6 物理规律的对称性和宇称守恒	(187)
4.6.1 对称性和守恒定律	(187)
4.6.2 空间反演不变性和宇称守恒	(188)
4.6.3 弱作用宇称不守恒问题	(193)

4.6.4 FC联合变换和CPT定理	··· (195)	5.6.2 雅布里诺维奇的早期工作	····· (254)
4.6.5 弱作用和生物手性	····· (196)	5.6.3 其他光子晶体	····· (254)
4.7 启示和困惑	····· (197)	第6章 纳米技术	····· (256)
第5章 固体物理和新材料	····· (198)	6.1 纳米技术概述	····· (256)
5.1 金属的自由电子理论	····· (198)	6.1.1 基本概念	····· (256)
5.1.1 特鲁德的自由电子理论	··· (198)	6.1.2 纳米技术发展简史	····· (257)
5.1.2 量子自由电子理论	····· (201)	6.2 纳米粒子的性质	····· (258)
5.1.3 态密度	····· (203)	6.2.1 纳米粒子效应	····· (258)
5.1.4 电子在允许状态上的分布	··· (205)	6.2.2 纳米粒子的物理和化学性质	····· (259)
5.1.5 电导率	····· (208)	6.3 纳米技术领域	····· (262)
5.1.6 电子气的热容	····· (209)	6.3.1 纳米粉体制备技术	····· (262)
5.2 固体的能带	····· (211)	6.3.2 碳纳米管	····· (265)
5.2.1 晶体中电子的能量	····· (211)	6.3.3 纳米检测和加工的核心技术	····· (271)
5.2.2 晶体中电子的波函数——布洛赫函数	····· (214)	6.4 纳米技术在日常生活中的应用	····· (271)
5.2.3 能带的性质,布里渊区	··· (215)	6.4.1 纳米纺织品	····· (271)
5.2.4 能带中的状态密度	····· (217)	6.4.2 纳米食品加工	····· (272)
5.2.5 有效质量	····· (218)	6.4.3 纳米涂料	····· (273)
5.2.6 导体、绝缘体和半导体	··· (219)	6.4.4 纳米化妆品	····· (275)
5.3 半导体微结构	····· (221)	6.4.5 纳米体育器材	····· (275)
5.3.1 半导体与PN结	····· (221)	6.5 纳米陶瓷与金属及其应用	··· (276)
5.3.2 半导体微结构:量子阱与超晶格	····· (228)	6.5.1 纳米陶瓷	····· (276)
5.3.3 共振隧道晶体管	····· (230)	6.5.2 纳米金属	····· (278)
5.4 超导	····· (234)	6.6 纳米技术在催化、能源、环保领域中的应用	····· (280)
5.4.1 超导体的主要特性	····· (235)	6.6.1 纳米催化剂	····· (280)
5.4.2 超导的微观理论	····· (238)	6.6.2 纳米电源材料	····· (280)
5.4.3 约瑟夫森效应	····· (240)	6.6.3 纳米环保材料	····· (281)
5.4.4 高温超导的研究	····· (243)	6.7 纳米光学材料及其应用	··· (283)
5.5 新型热电材料与温差发电	····· (245)	6.7.1 聚合物基纳米光学材料	··· (283)
5.5.1 塞贝克效应	····· (245)	6.7.2 智能塑料自组装光学材料	··· (284)
5.5.2 温差发电	····· (249)		
5.6 光子晶体	····· (251)		
5.6.1 光子晶体和光子带隙	··· (251)		

6.7.3 菌紫质	(285)	7.3.1 巨大的能源	(323)
6.8 纳米技术在电子技术中的应用	(286)	7.3.2 基本的聚变反应过程 ...	(324)
6.8.1 纳米电磁材料	(286)	7.3.3 实现受控热核反应的基本条件	(325)
6.8.2 纳米器件	(290)	7.3.4 磁约束原理和装置	(327)
6.8.3 芯片上的实验室	(293)	7.3.5 惯性约束	(328)
6.8.4 纳米计算机	(294)	7.3.6 核聚变研究的进展和聚变反应堆	(330)
6.8.5 纳米传感器	(295)	7.4 原子弹和氢弹	(332)
6.8.6 纳米家电	(295)	7.4.1 原子弹	(332)
6.9 纳米微机械技术	(295)	7.4.2 氢弹	(334)
6.9.1 纳米微机械	(295)	7.5 太阳能	(335)
6.9.2 纳米技术对制造业的影响	(297)	7.5.1 太阳能的来源和太阳辐射	(335)
6.10 纳米技术在分子生物与医学领域中的应用	(300)	7.5.2 太阳能的热利用	(338)
6.10.1 纳米生物技术	(300)	7.5.3 太阳能的光电转换——太阳能电池	(342)
6.10.2 纳米技术在医学中的应用	(301)	7.5.4 太阳能的光化学转换——光合作用	(344)
6.11 纳米技术在军事领域中的应用	(303)	7.6 氢能和其他能源	(345)
第7章 新能源	(308)	7.6.1 氢能	(345)
7.1 核裂变能	(308)	7.6.2 其他能源	(346)
7.1.1 核裂变理论	(309)	第8章 激光和光信息处理	(350)
7.1.2 裂变截面和激活能	(314)	8.1 激光原理简介	(350)
7.1.3 裂变产物	(315)	8.1.1 爱因斯坦的辐射理论 ...	(350)
7.2 链式反应及反应堆核电站	(316)	8.1.2 光谱线的线宽	(352)
7.2.1 核裂变的链式反应	(317)	8.1.3 激光的基本原理	(355)
7.2.2 链式反应的控制——反应堆	(319)	8.1.4 He-Ne 激光器简介	(362)
7.2.3 热中子反应堆	(320)	8.2 半导体激光器	(363)
7.2.4 快中子增殖堆	(321)	8.2.1 半导体激光器原理	(363)
7.2.5 低温核供热堆	(322)	8.2.2 异质结激光二极管	(366)
7.3 聚变能	(323)	8.2.3 量子阱激光器	(367)
		8.3 全息术	(369)
		8.3.1 什么是全息术	(369)
		8.3.2 全息照相的原理	(370)

8.3.3 全息图的类型及应用	··· (373)	9.4.2 红外测温	····· (422)
8.4 空间滤波和光信息处理	····· (375)	9.4.3 红外无损检测	····· (424)
8.4.1 二维矩形光栅实验	····· (376)	9.4.4 环境监测	····· (425)
8.4.2 相衬法	····· (377)	9.4.5 热成像仪的应用	····· (425)
8.4.3 θ 调制	····· (378)	9.4.6 红外技术在军事上的应用	····· (427)
8.4.4 光信息处理的 $4f$ 系统	····· (378)	9.5 红外遥感技术	····· (427)
8.5 非线性光学简介	····· (379)	9.5.1 遥感的物理基础	····· (428)
8.5.1 强光与介质的相互作用	··· (379)	9.5.2 遥感仪器	····· (431)
8.5.2 二阶非线性效应	····· (380)	9.5.3 遥感信息的处理与判读	··· (437)
8.5.3 三阶非线性效应对折射率的 影响	····· (384)	第 10 章 近代物理分析技术	··· (440)
8.5.4 光学相位共轭	····· (385)	10.1 共振散射和穆斯堡尔效应	····· (440)
8.5.5 光学双稳态	····· (389)	10.1.1 γ 射线的共振吸收	··· (440)
8.6 光通信与光存储	····· (392)	10.1.2 穆斯堡尔效应——无反冲 共振散射	····· (442)
8.6.1 光通信	····· (392)	10.1.3 穆斯堡尔效应的应用	····· (444)
8.6.2 激光存储技术	····· (396)	10.2 扫描探针显微术	····· (450)
第 9 章 红外辐射与遥感	····· (401)	10.2.1 引言	····· (450)
9.1 热辐射的基本规律	····· (401)	10.2.2 扫描隧道显微镜	····· (451)
9.1.1 热辐射的基本概念	····· (401)	10.2.3 扫描探针显微术	····· (457)
9.1.2 热辐射的基本规律	····· (404)	10.2.4 近场扫描光学显微镜	····· (461)
9.1.3 实际物体的热辐射	····· (405)	10.2.5 单原子操纵和控制	··· (463)
9.2 红外辐射及红外辐射源	····· (407)	10.3 核磁共振及其应用	····· (464)
9.2.1 红外光谱的波段划分	····· (407)	10.3.1 核自旋与核磁矩	····· (465)
9.2.2 红外辐射的发射机理	····· (408)	10.3.2 核磁矩与恒定外磁场的 相互作用能	····· (467)
9.2.3 红外辐射源	····· (408)	10.3.3 核磁共振	····· (468)
9.3 红外辐射的传输	····· (411)	10.3.4 饱和与弛豫	····· (470)
9.3.1 红外辐射在传输媒质中衰减的 规律	····· (412)	10.3.5 核磁共振技术的应用	····· (471)
9.3.2 红外辐射在大气中的传输	····· (412)	10.4 单个原子和分子的探测和 识别	····· (476)
9.3.3 红外辐射在固态媒质中的 传输	····· (416)		
9.4 红外辐射的探测及应用	····· (418)		
9.4.1 红外辐射的探测	····· (418)		

10.4.1 用共振电离光谱学探测 气体中的单个原子和分子	(477)
10.4.2 利用激光激发分子荧光的 方法来检测液体中的单个分子	(481)
10.5 光学相干断层扫描成像新技 术 OCT	(483)

10.5.1 OCT 的基本原理.....	(483)
-----------------------	-------

10.5.2 超外差法测量原理 ...	(484)
---------------------	-------

10.5.3 实验装置	(486)
-------------------	-------

10.5.4 应用	(486)
-----------------	-------

主要参考书目	(488)
---------------------	--------------

第 1 章 广义相对论和宇宙学

1905 年爱因斯坦发表的论文《论运动物体的电动力学》，标志着狭义相对论的诞生。狭义相对论打破了牛顿绝对时空观，认为时间和空间都不是绝对的，对时间和空间的描述与观察者有关，时间和空间也不是毫无关系的，它们都与物质的运动有关。狭义相对论是 20 世纪物理学对人类科学思想产生的震撼的冲击和深刻的影响，开创了物理学的新纪元。根据狭义相对论，物理规律对一切惯性系是不变的，那么，对非惯性系的物理规律是否也具有不变性？对这一问题的研究导致了广义相对论的建立，从而实现了继牛顿以来，人类对时空观和物质与能量统一性认识的科学革命。

广义相对论是研究物质在时空中如何进行引力相互作用的理论。本章在狭义相对论基础上，介绍广义相对论的基本物理思想和基本原理，讨论最简单也是最重要的球体物质引力场，并介绍广义相对论在宇宙学中的应用。

1.1 广义相对论的基本原理

广义相对论基于两个基本原理：等效原理和广义相对性原理，其中等效原理是整个广义相对论的基础和出发点，而物质惯性质量等于引力质量是等效原理的实验基础，也是建立广义相对论唯一的实验依据。

1.1.1 等效原理

1. 惯性质量和引力质量

惯性质量 m_i 开始是由牛顿运动定律 ($f=ma$) 定义的，反映物质惯性的大小。爱因斯坦在建立狭义相对论中，进一步将 m_i 与物质的能量联系起来 ($E=mc^2$)， m_i 是物质本性的一个定量体现。引力质量 m_g 则是由牛顿引力定律 ($F=\frac{Gm_1m_2}{r^2}$) 定义的，反映物质的引力特性，也是物质本性的一个定量体现。从表面看来， m_i 和 m_g 分别是物质两种不同本性的体现，两者不应该有确定关系。但由实验知，各种物质的 m_i 与 m_g 成正比，比例系数与物质无关。选择合适的单位后，可取 $m_i=m_g$ ，最后通过实验确定万有引力常数 G 的数值。

最早的实验是伽利略的著名自由落体实验。落体受地球引力为 $m_g g$ ($g \equiv \frac{GM_E}{R_E^2}$)，由牛顿运动定律 $m_i a = m_g g$ ，故落体加速度 $a = \frac{m_g}{m_i} g$ 。实验表明，质量不同，但从同一高度同时下落的物体同时落到地面，说明 a 与落体无关，即 $\frac{m_g}{m_i}$ 是与物体无关的常数。当然，伽利略做这个实验的目的并不是讨论 m_i 与 m_g 的关系，因为当时还没有引力质量的概念。

牛顿在发现万有引力定律之后，就注意到 m_i 与 m_g 的区别。为此，他做了空心单摆实验。他把单摆摆钟做成空心的，里面分别装上不同的物质，分别测其周期。设单摆受到的引力为

$m_g g$, 对悬挂点的角动量为 $m_i \dot{\theta} l^2$, 由角动量定理, 在小角度摆动的情况下, $m_i l^2 \frac{d^2 \theta}{dt^2} = -m_g g l \theta$,

所以单摆的周期 $T = 2\pi \sqrt{\frac{m_i l}{m_g g}}$, 如果 m_g 与 m_i 没有确定的关系, 则周期各不相同。实验结果是各种不同材料、不同质量的摆的周期都相同, 以 10^{-3} 的精度验证了 $m_i \propto m_g$, 以后不断有人继续做类似的实验, 实验精度不断提高, 到 20 世纪 70 年代, 以 10^{-12} 的精度验证了 $m_i \propto m_g$ 。

除“有形”物体的惯性质量外, 还有“无形”的与能量相联系的惯性质量, 像引力场能、放射能、原子和原子核的结合能等, 都对应着惯性质量。研究表明, 这些能量也都有对应的引力质量, 并且引力质量等于惯性质量。

2. 等效原理

$m_i = m_g$ 的事实中蕴含着自然界深刻的“神秘”, 这个“神秘”是爱因斯坦揭开的。在牛顿力学中, 非惯性系与惯性系的区别在于前者存在惯性力 f_i , $f_i \propto m_i$ 。由于万有引力 $f_g \propto m_g$, 所以 $m_i = m_g$ 就引出两力 f_i 与 f_g 的等价性或等效性。

设想在一个密闭的小室中做自由落体实验, 测出落体的加速度 g 。根据牛顿定律, 有两种可能:

(1) 小室静止在地面, 地球引力使落体具有加速度 g ;

(2) 小室在自由空间相对惯性系向上以 g 做匀加速运动, 以小室为参考系, 物体受到向下的惯性力 $m_i g$, 从而产生向下的加速度 g 。

单凭小室内的自由落体实验, 小室里的人无法确定是哪一种情况, 即无法区分作用在落体上的是引力还是惯性力。实际上在这样的小室中做任何力学实验也都无法区分引力和惯性力。

再设想一个在地球表面自由下落的小室, 以小室为参考系, 任何物体所受的惯性力和重力完全抵消, 因此在其中做任何力学实验都看不到地球引力的影响。

以上两个理想实验说明引力和惯性力在力学实验中的等效性。当然, 真实的引力场和惯性力场还是有区别的。像地球的引力场是中心力场, 引力指向地心, 自由下落时小室的惯性力是均匀的, 各处的惯性力彼此平行。所以, 如果小室比较大, 而且实验精度极高, 那么若在小室内 A 处惯性力与地球引力完全抵消, 则在其他各处惯性力与引力就不能完全抵消, 离 A 处较远处就可观测到地球引力的影响。所以严格讲, 只是在时空某一点的微小邻域(局域)上引力与惯性力等效, 这称为等效原理的弱形式或称之为弱等效原理, 也有人直接将 $m_i = m_g$ 称为弱等效原理。

弱等效原理直接来自力学实验这个事实, 仅仅说明在力学实验上等效, 在弱等效原理的基础上不可能构建新的引力理论。爱因斯坦的贡献是将弱等效原理推广为强等效原理: 惯性力与引力的任何物理效应在局域内等效。这是一个大胆的假设。就在强等效原理(下面简称等效原理)的基础上, 爱因斯坦按全新的引力几何化途径解决引力问题并建立了广义相对论。

引力与惯性力在局域内等效并不意味着引力与惯性力等同。引力与惯性力有本质的区别。引力场由物质产生, 充满了整个宇宙; 选一个附着在引力场中自由下落的质点作为参考系, 只能在质点邻域内消除引力, 不可能在整个空间消除引力; 有限物质产生的引力场, 在距物质无穷远处其强度趋于零; 引力造成时空弯曲。而惯性力是由于选择非惯性参考系引起的, 换成惯性系就没有惯性力, 或者说消除了惯性力; 对平动的非惯性系, 无穷远处惯性力并不为零,

对旋转的非惯性系,无穷远处的惯性力可以为无穷大;有惯性力的区域里时空可能保持平坦。

1.1.2 广义相对性原理

狭义相对性原理告诉我们:物理定律在一切惯性系都具有相同的形式,即对物理定律来说,一切惯性系都是平等(等价)的。爱因斯坦在提出等效原理的同时,把相对性扩展到加速度参考系中。1911年,爱因斯坦指出:“在一个局域惯性系中,重力的效应消失了;在这样一个参考系中,所有物理定律和在一个太空中远离任何物体的真正惯性系中的一样。反过来说,在一个在太空中加速的参照系中将会出现表观的引力。在这样的参照系中,物理定律和该参照系静止于一个引力场物体附近一样。”于是爱因斯坦把相对性原理推广到一切惯性系和非惯性系:所有参考系都是平等(或平权)的,无论是惯性系还是非惯性系,物理定律的数学形式相同。这就是广义相对性原理。

等效原理和广义相对性原理是广义相对论的两个基本原理。从这两个基本原理出发,就可以一并解决引力和加速系问题,构建起广义相对论理论。

1.2 广义相对论的重要推论

利用等效原理和广义相对性原理,可以得到许多重要的推论,使我们对引力场中的时空特性有初步的了解。

1.2.1 光线偏折

由等效原理就可以直接推论光线在引力场中必然偏离直线,推论过程中不必考虑引力是否对光子有作用的问题。引力场中自由下落的小室是局惯系,在此参考系中狭义相对论成立,光线沿直线传播。设有一条光线在局惯系内从左向右沿直线穿过小室,如图 1.2.1 虚线所示。以引力场为参考系观察这条光线,该光线在向右传播过程中,还随小室一起以引力场强 g 为加速度向下加速运动,因此引力场中观察者看到的光线向下(引力方向)偏折,如图 1.2.1 中实线所示。这样由等效原理就直接推证出光线要向引力方向偏折。反过来,光线在引力场中是否偏折,是广义相对论是否成立的决定性的检验。

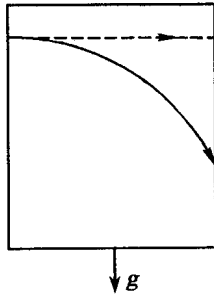


图 1.2.1 引力场中光线偏折

实验观测的是恒星发的光在太阳引力场的偏折。恒星发的光通过引力极弱的空间基本上沿直线到达地球,当太阳运动到光线附近时,太阳引力场使光线与原来直线产生可测量的偏离。普通日子里,强烈的太阳光掩盖住星光,使观测无法进行,只有在日全食时才可以观测到

经过太阳边缘的恒星光。但是仅测出光线有偏折还不够,因为按牛顿力学也可以解释光线的偏折,所以还要有定量的结果,才可以判断是哪个理论的预言正确。按牛顿力学,考虑到光子具有能量 $h\nu$,因而具有质量 $\frac{h\nu}{c^2}$,在经过太阳附近时受太阳引力影响,光线将偏转,其偏转角为 $0.875''$ (角秒)。按广义相对论,爱因斯坦在 1915 年计算出偏转角为上述角度的 2 倍^①。1919 年 5 月 29 日发生日全食时,两组英国科学家首次测量光线偏折角:在西非几内亚湾普林西比岛测量结果为 $1.98'' \pm 0.16''$,在巴西北部测量结果为 $1.61'' \pm 0.40''$ 。测量结果符合广义相对论的预言,这引起举世轰动,从而奠定了广义相对论的地位。以后凡有日全食时都要进行类似观测,迄今为止,共测了几百颗恒星的光线,基本上都与广义相对论的理论值符合。以后又用射电波进行测量,测射电波的偏转,精度大大提高,1975 年测得偏转角为 $1.761'' \pm 0.0016''$,与理论值相当符合。

1.2.2 时空弯曲

更详细的分析、计算表明,牛顿力学和广义相对论的计算结果不同,来自两种理论的时空结构不同。牛顿的三维空间与时间无关,为欧几里德空间,狭义相对论的三维空间与时间相联系构成四维的闵可夫斯基空间。这两个空间都是平直的。平直空间的特征是空间的测地线(又叫极值线或短程线,指空间两点之间的各条连线中长度为极值的那条路线)为直线。闵可夫斯基空间中无引力,四维时空是平直的,三维纯空间也是平直的,因此在狭义相对论的三维纯空间里才有直线的概念,光线沿直线传播。在建立完整的广义相对论之前,爱因斯坦在 1911 年也曾计算过光线通过太阳引力场的偏折角^②。当时他是按均匀引力场(实质上是平直空间)来计算的,结果与牛顿力学结果相同,也是 $0.875''$ 。所以,如果是平直空间的话,引力引起的偏折角只能是 $0.875''$ 。广义相对论第一次向世人指出:引力场的四维时空和三维纯空间都是弯曲的。在光线偏折现象中,引力起了双重作用:①使三维空间弯曲,测地线不再是直线,偏离原来的直线 $0.875''$;②使光线偏离三维空间测地线 $0.875''$,无论是在平直空间还是弯曲空间都是如此。两种作用合起来使光线偏离原来的直线 $1.75''$ 。实验观测的事实,既支持了广义相对论,也直接地、确切无误地证实引力场中的空间是弯曲的,这正是光线偏折实验观测的重要性所在。

从前我们涉及的都是平直空间——三维欧几里德空间(简称欧氏空间)和四维的闵可夫斯基空间(简称闵氏空间)。平直空间的几何学是欧几里德几何,其测地线为直线,圆周率为 π ,三角形内角和为 π ……现在我们知道,我们所处的物理空间中有引力存在,空间是弯曲的,适用的几何学为黎曼几何。在弯曲空间中无直线概念。代替直线的是测地线,由三条测地线构成的三角形内角和不是 π ,圆周率也不是 π 。置身于弯曲空间的人感觉不到所处空间的弯曲,他测不出空间测地线是“弯”的,因为他没有“直”的标准。对太阳引力场的观察者而言,光线偏离直线 $1.75''$ 也是没有意义的,他们能测量的是光线相对于测地线的偏离。“不识庐山真面目,只缘身在此山中。”只有处于高维平直空间的旁观者,才可以直观地看到低维弯曲空间与与它同维的平直空间的差别。例如欧氏空间中,直线和曲线分别是一维平直和弯曲空间,平面

① 范岱华等译. 爱因斯坦文集(二). 北京:商务印书馆,1997, p334

② 范岱华等译. 爱因斯坦文集(二). 北京:商务印书馆,1997, p222

和曲面分别是二维平直和弯曲空间。图 1.2.2 所示球面是曲率为正常数的二维弯曲空间。在球面上不存在直线,它的测地线为大圆曲线。以圆上 P 点为中心,以测地线 PQ 为半径 R 做圆周,周长为 $2\pi r < 2\pi R$,周长除以直径为 $\frac{2gr}{2R} < \pi$,即圆周率小于 π 。球面上三条大圆曲线构成的球面三角形内角和大于 π 。于是人们想到,虽然我们“感觉”不到所处的物理空间是否平直,但我们可以通过测量来判断它是否平直。即测量空间中以测地线为半径构成的圆的周长;或是测量以测地线为半径构成的球的表面积,看圆周率是否为 π ;或是测量测地线构成的三角形内角和,看是否为 π 。远在爱因斯坦提出广义相对论之前,在非欧几何诞生以后,人们就想用测量方法判断实际空间是欧氏的还是非欧的。数学家高斯在 1821~1823 年期间精确测量德国境内三个山顶构成的三角形内角和,结果为 $179^\circ 59' 59.320''$,在测量精度内分不出与 π 的区别,无法对此问题作出确切结论。百年后诞生的广义相对论解决了这个问题,并得到实验验证。应用广义相对论可以算出弯曲空间的曲率半径,如地球表面径向线的曲率半径为 $3.43 \times 10^{11} \text{ m}$ 。如此大的曲率半径,说明地球引力场中空间虽然弯曲,但与平直空间差别极小,无怪乎高斯的“小”尺度测量分辨不出平直与弯曲。实际上,即使在太阳系或银河系内,按平直空间计算的星体运动规律与实测相符,广义相对论效应(包括空间弯曲的影响)极小。

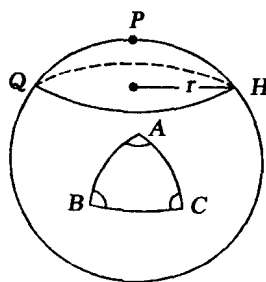


图 1.2.2 球面上的二维弯曲空间

1.3 引力场方程及其史瓦西解

1.3.1 爱因斯坦引力场方程

1. 引力几何化

由于 $m_i = m_g$, 所以仅受引力作用的粒子(广义相对论中称为自由粒子)在引力场中各处的加速度是确定的,也就是说引力场强度 g 与粒子的本身性质无关。这样在确定的引力场中,自由粒子的运动规律都相同,如果初始条件相同的话运动轨迹也都相同。也就是说,自由粒子的运动完全由引力场决定,这是引力场独有的性质,任何其他的力场都没有这样的性质。我们知道,在惯性系中自由粒子沿直线运动,直线是平直空间的测地线,所以在惯性系中自由粒子沿测地线运动,按广义相对性原理,在有引力的弯曲时空里,自由粒子也应沿弯曲时空的测地线运动,这就是测地线假设。自由粒子的运动唯一的由引力场决定,就意味着时空的测地线唯一的由引力场决定。微分几何理论指出,空间的几何性质,如是否弯曲、弯曲的程度等,与空间