

“十一五”国家重点图书出版规划项目

The Series of Advanced Physics of Peking University

北京大学物理学丛书·理论物理专辑

黑洞与时间的 性质

刘 辽 赵 峥 田贵花 张靖仪 著



北京大学出版社
PEKING UNIVERSITY PRESS

第1111号

The Series of Advanced Physics of Peking University

北京大学物理学丛书·理论物理专辑

黑洞与时间的性质



北京大学出版社
PEKING UNIVERSITY PRESS

图书在版编目(CIP)数据

黑洞与时间的性质/刘辽等著. —北京:北京大学出版社, 2008. 12

(北京大学物理学丛书)

ISBN 978-7-301-14675-0

I. 黑… II. 刘… III. ①黑洞—研究 ②时间—研究 IV. P145.8 P19

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2008)第 186696 号

书 名: 黑洞与时间的性质

著作责任者: 刘 辽 赵 峥 田贵花 张靖仪 著

责任编辑: 顾卫宇

封面设计: 锦绣东方

标准书号: ISBN 978-7-301-14675-0/O · 0772

出版发行: 北京大学出版社

地 址: 北京市海淀区成府路 205 号 100871

网 址: <http://www.pup.cn> 电子信箱: zpup@pup.pku.edu.cn

电 话: 邮购部 62752015 发行部 62750672 编辑部 62752038

出版部 62754962

印 刷 者: 北京大学印刷厂

经 销 者: 新华书店

730 毫米×980 毫米 16 开本 18.75 印张 336 千字

2008 年 12 月第 1 版 2008 年 12 月第 1 次印刷

定 价: 38.00 元

未经许可,不得以任何方式复制或抄袭本书之部分或全部内容。

版权所有,侵权必究

举报电话:(010)62752024 电子信箱: fd@pup.pku.edu.cn

前 言

物理学是自然科学的基础,是探讨物质结构和运动基本规律的前沿学科。几十年来,在生产技术发展的要求和推动下,人们对物理现象和物理学规律的探索研究不断取得新的突破。物理学的各分支学科有着突飞猛进的发展,丰富了人们对物质世界物理运动基本规律的认识和掌握,促进了许多和物理学紧密相关的交叉学科和技术学科的进步。物理学的发展是许多新兴学科、交叉学科和新技术学科产生、成长和发展的基础和前导。

为适应现代化建设的需要,为推动国内物理学的研究、提高物理教学水平,我们决定推出《北京大学物理学丛书》,请在物理学前沿进行科学研究和教学工作的著名物理学家和教授对现代物理学各分支领域的前沿发展做系统、全面的介绍,为广大物理学工作者和物理系的学生进一步开展物理学各分支领域的探索研究和学习,开展与物理学紧密相关的交叉学科和技术学科的研究和学习提供研究参考书、教学参考书和教材。

本丛书分两个层次。第一个层次是物理系本科生的基础课教材,这一教材系列,将几十年来几代教师,特别是在北京大学教师的教学实践和教学经验积累的基础上,力求深入浅出、删繁就简,以适于全国大多数院校的物理系使用。它既吸收以往经典的物理教材的精华,尽可能系统地、完整地、准确地讲解有关的物理学基本知识、基本概念、基本规律、基本方法;同时又注入科技发展的新观点和方法,介绍物理学的现代发展,使学生不仅能掌握物理学的基础知识,还能了解本学科的前沿课题和研究动向,提高学生的科学素质。第二个层次是研究生教材、研究生教学参考书和专题学术著作。这一系列将集中于一些发展迅速、已有开拓性进展、国际上活跃的学科方向和专题,介绍该学科方向的基本内容,力求充分反映该学科方向国内外前沿最新进展和

研究成果。学术专著首先着眼于物理学的各分支学科,然后再扩展到与物理学紧密相关的交叉学科。

愿这套丛书的出版既能使国内著名物理学家和教授有机会将他们的累累硕果奉献给广大读者,又能对物理的教学和科学研究起到促进和推动作用。

《北京大学物理学丛书》编辑委员会

1997年3月

理论物理专辑前言

彭桓武先生在他的专著《理论物理基础》(彭桓武、徐锡申著,北京大学出版社,1998年)序中对理论物理作了精辟的阐述:

随着人们通过多次观察和实验等科学实践,对物质世界中在一定条件下一定现象之出现,获得大量可靠的感性认识,得到数据和经验规律。然后经过反复综合整理改造,形成概念,并用判断和推理的方法给以合乎逻辑的描述或解释,这样达到某种理性认识。如能以此为据对新现象有所预见且为而后的科学实验所证实,则表明这理性认识正确可靠。对越来越多方面的物质现象得到的越来越普遍的正确可靠的理性认识,便构成发展着的理论物理。

理论物理的发源可以从伽利略和牛顿对地面上物体坠落和天空中行星绕日等现象的统一解释算起。这奠定了牛顿力学,并从此动力学观点流行。这种观点和方法,结合对气体的物理实验和化学实验的多个经验规律,产生并逐渐澄清原子和分子的概念,阐明了热的分子运动本质,又结合电磁现象的观察和大量实验所总结的一系列经验规律,特别是法拉第的有关磁力线和电力线的形象思维,帮助麦克斯韦形成电磁场的概念和其动力学理论。不仅利用运动把电现象与磁现象联结起来,并且从理论上预见到电磁波动现象,光的现象即归结为电磁波动的现象。这预见为而后的实验证实,并为无线电通讯奠定基础。法拉第电解定律表明分子原子内部有带有一定的基本电荷的电子。有鉴于此,洛伦兹对物质中的电磁现象,提出电子论,引入带有电子运动的分子和微观电磁场的概念,后者的局部的多分子的统计平均即是麦克斯韦的宏观电磁场,这样解释了物质对光的折射率随光波长的变化的色散现象。但对电子和其运动规律的较清楚的认识,则尚待从更多的近代物理实验和其伴随的20世纪才发现的相对论和量子论。在这两个理论中,对时间和空间,粒子和波,概念上比以前有所深入,有些人称之为革命,实际上不过是,随着认识到更深一层次,原来认为割裂的或对立的却是统一的或同一的,而回过头来看,原来的认识,在一定范围内仍是对的或可靠的到一定的近似程度而已。

理论物理是有用的。作为工程设计原理的早已成熟的那部分理论物理更不必谈。在开展理论、实验与工程技术相结合的工作时,理论工作先行一步常

可以减少实验和工程的工作量。

为了促进我国的理论物理研究,国家自然科学基金委员会“理论物理专款”学术领导小组决定资助出版这套《北京大学物理学丛书·理论物理专辑》。希望从事理论物理研究的科学工作者介绍国际理论物理前沿和自己的研究工作,吸引更多的年轻人投入并献身于理论物理学的研究,为营造重视基础研究、安心基础研究的大环境,为发展我国理论物理学的研究及其在国际上占有一席之地作出贡献。有关申请出版资助的情况,请参阅国家自然科学基金委员会网站中有关“理论物理专款”的通告。本专辑的出版得到了北京大学出版社的大力支持,特此感谢。

国家自然科学基金委员会

“理论物理专款”学术领导小组

2005年10月20日

当爱因斯坦讲“上帝不掷骰子”时，他错了。对黑洞的思索向人们提示，上帝不仅掷骰子，而且有时还把骰子掷到人们看不到的地方去了。

——霍金(S. W. Hawking)

时间是什么？人不问我，我很清楚；一旦问起，我便茫然。

——圣奥古斯丁(St. Augustine, 公元4世纪)

序 言

对黑洞的探讨可以追溯到 200 多年前。1790 年前后,米歇尔(R. J. Michell)与拉普拉斯(P. S. Laplace)从牛顿力学和光的微粒说出发,预言了“暗星”的存在。他们认为,当一颗恒星的万有引力强大到可以把自身发射的光子拉回来的时候,这颗星就将成为外部观测者看不见的暗星。1801 年托马斯·杨(T. Young)的双缝干涉实验使光的波动说战胜了微粒说,这种建立在光的微粒说基础上的“暗星”理论,逐渐被人们淡忘。

1939 年奥本海默(J. R. Oppenheimer)及其合作者从广义相对论出发,再次预言了暗星的存在。有趣的是,他们从爱因斯坦理论出发预言的暗星条件与拉普拉斯等人从牛顿理论得出的暗星条件相同。

爱因斯坦 1915 年发表广义相对论,指出万有引力是时空弯曲的表现。1916 年,史瓦西(K. Schwarzschild)得到了广义相对论场方程的一个重要的严格解——静态球对称真空解。该解很好地描写了太阳周围时空弯曲的情况,为广义相对论的实验验证打下了坚实的理论基础。然而此解有一个中心奇点,还有一个奇面。研究表明,中心奇点是真奇点,该处时空曲率发散,而且不能通过坐标变换消除这种发散。奇面处的奇异则是假奇异,该处时空曲率并不发散,仅度规发散,而且度规的这种发散可以通过坐标变换加以消除。奥本海默的“暗星理论”诞生后,人们惊奇地发现,这个似乎意义不大的奇异球面恰是“暗星”的表面。

不过奥本海默等人的工作没有受到物理学界的重视,包括爱因斯坦在内的不少物理学家不相信自然界中真会有这样的“暗星”存在。

事实上,20 世纪 40 年代和 50 年代,整个引力和相对论研究都处在低潮,没有什么重大的进展出现。粒子物理学家费曼(R. P. Feynman)参加了 1962 年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。”

不过,引力与广义相对论研究的状况很快有了重大改观,由于类星体、中子星和微波背景辐射的发现,也由于理论上的突破,宇宙学和黑洞研究都在 20 世纪 60 年代和 70 年代取得了长足的进展。

就在费曼发出上述感想的第二年(1963 年),克尔(R. P. Kerr)得到了广义相对论场方程的另一个重要解——稳态轴对称真空解。该解很好地描述了转动星体外部时空弯曲的情况。克尔解比史瓦西解复杂,所含的信息量也大大增加,为研究“暗星”提供了极好的理论模型。同时,中子星和类星体的发现也使更多物理学家和天文学家意识到了“暗星”存在的可能。在对暗星的兴趣与日俱增的情况下,惠勒(J. A. Wheeler)于 1967 年建议把暗星称做黑洞。

对黑洞的大规模研究在 20 世纪 60 年代展开,人们从几何和经典物理学的角度澄清了黑洞的许多性质。当时认为黑洞是一种只进不出的天体,任何东西都可以掉进去,什么东西(包括光)都不可能跑出来。

突破性的进展发生在 70 年代。首先是霍金(S. W. Hawking)在 1970 年提出面积定理,指出黑洞的表面积随着时间的发展只会增加不会减少。1972 年,惠勒的研究生贝肯斯坦(J. D. Bekenstein)大胆推测黑洞的表面积可能是“熵”。这一猜测遭到霍金等人的反对,他们认为贝肯斯坦曲解了面积定理。如果黑洞有熵,从热力学角度来看也应该有温度,有温度就会有热辐射,黑洞是任何东西都不可能逃出的天体,怎么可能有热辐射呢?霍金等人在 1973 年发表论文,否认黑洞有真正的热性质。1974 年霍金的态度来了个 180° 大转弯,他不仅承认了黑洞的表面积是熵,黑洞有温度,而且用弯曲时空量子场论证明了黑洞有热辐射,此即著名的霍金辐射。

霍金辐射的发现揭开了黑洞研究的新篇章。黑洞不再被看做一颗死亡了的星体,它有着活跃的量子热效应。此后,人们把黑洞热性质的研究推广到各种黑洞。几乎与此同时,安鲁(W. G. Unruh)证明,闵可夫斯基时空的真空态,在匀加速直线运动的观测者看来是一个具有有限温度的热态,其温度与观测者的固有加速度成正比。安鲁效应与霍金效应有相同的本质,这进一步推动了黑洞的研究。

80 年代以后,黑洞研究的重点逐渐从温度转向熵,转向信息佯谬。人们早已知道,黑洞外部观测者会失去形成黑洞以及后来落入黑洞的物质的几乎全部信息,只能探知黑洞的总质量、总电荷和总角动量,这就是所谓的“无毛定理”。人们最初认为,虽然外部观测者不能探知形成黑洞和落入黑洞的物质的信息,但这些信息并没有从宇宙中消失,只不过隐藏在了黑洞的内部。霍金辐射发现

之后,人们知道黑洞中的物质最后将全部转化为热辐射,而热辐射几乎不帶出任何信息。这样,形成和落入黑洞的物质的信息将从宇宙中消失,信息不再守恒,不仅重子数守恒、轻子数守恒等定律不再成立,量子论的么正性也将受到破坏。面对如此严重的理论困难,物理学家展开了激烈的争论。理论物理学家大都相信信息守恒,坚信么正性这一量子论的基石不会被破坏。他们认为霍金辐射不会是纯热谱,一定会有信息被辐射帶出,或者辐射一定会残留“炉渣”,信息将遗留在“炉渣”中。总之,信息应该守恒。以霍金和索恩(K. S. Thorne)为代表的相对论专家则认为信息不一定守恒,么正性完全有可能被破坏;霍金和索恩甚至为此与坚信信息守恒的普瑞斯基(J. Preskill)打赌。

2004年7月,霍金的态度又来了个 180° 转弯,表示自己原来的观点错了,信息应该守恒。原因是先前把黑洞想得太理想化了,把黑洞热辐射也想得太理想化了。不过,霍金一直没有给出严格的证明来支持自己的新观点。索恩表示此事不能由霍金一个人说了算,他仍坚持信息不守恒的看法。普瑞斯基则表示没有听懂霍金的演讲,不明白自己为什么赢了。目前,这一牵扯到量子论基础的敏感问题,还远未解决。

黑洞理论的研究已经超出了黑洞本身,它不仅通过信息疑难触及了量子论的重要基石——么正性,而且掀开了探讨时间性质的新篇章。

按照信息论的观点,信息是负熵。热力学第二定律指出熵不守恒,这样看来信息也不应该守恒。只要热力学第二定律正确,只要信息确实是负熵,我们就不应指望存在信息守恒定律。可以预期,黑洞信息疑难的研究,将促进对不可逆性和时间流逝性的研究。

1985年,一本与黑洞和虫洞有关的科幻小说诱发了人们对时空隧道与时间机器的探讨。这一神乎其神的科幻内容居然进入了物理学的研究领域。索恩等相对论专家用量子宇宙学探讨了时空隧道存在的物理条件以及制造时间机器的可能性。时间机器和时空隧道导致的时间循环造成了因果疑难,进一步推动了人们对时间流逝性的研究。

另一方面,黑洞的奇性疑难促使彭罗斯(R. Penrose)和霍金在70年代初提出并证明了“奇性定理”。这个定理指出,任何一个物理上合理的时空,一定至少存在一个时间有开始或有终结的过程。该定理把时间有无开始和终结,这一通常由哲学家和神学家去讨论的问题纳入了物理领域。

早在相对论诞生的前夕,一些著名的数学家和哲学家就对时间的测量和定义问题进行过讨论。庞加莱(H. Poincaré)指出,时间的测量与定义分为两个部分:一是异地时钟如何校准,二是“相继时间段(又称绵延)相等”如何定义。他

认为这两个问题相互关联,都离不开对光传播性质的“约定”。在庞加莱这一思想的启发下,爱因斯坦约定真空中的光速各向同性,并是一个常数,解决了异地时钟如何校准的问题,即如何定义不同地点的“同时”问题,从而打开了相对论的大门。后来,朗道(L. D. Landau)等人又进一步发展了爱因斯坦的对钟理论。不过,他们的工作没有涉及“相继时间段(绵延)相等”的问题。在相对论中,绵延相等的定义建立在对“好钟”的约定之上。“好钟”的思想起源于18世纪著名数学家欧拉(L. Euler)的建议。我们在最近的工作中指出,对“光速”的约定可以同时解决绵延相等的定义问题,因而不需要再对“好钟”的约定。正如庞加莱猜测的那样,时间的测量和定义只需要一个约定,那就是对真空中光传播性质的约定。

本书将从研究黑洞出发,深入到对时间本性的讨论,并进而探讨时间属性与热力学的关系。

第一、二章介绍了黑洞的基本性质以及我们课题组以往对黑洞热辐射的研究。

第三至六章介绍了我们最近5年来对广义相对论与黑洞的基本问题和热点问题的研究。第三章前一部分介绍了我们提出的计算黑洞熵的薄膜模型;后一部分介绍了我们对 M. Parikh 和 F. Wilczek(诺贝尔物理学奖得主)量子隧穿过程的研究和推广。

Wilczek 等人的理论在相对论界颇有影响,似乎证明了霍金辐射过程满足量子理论的么正性,因而证明了该过程信息守恒。我们的研究表明,他们的工作仅对可逆过程成立,而真实的霍金辐射过程都是不可逆的。所以他们并未能证明黑洞热辐射过程满足量子理论的么正性,也即未能证明有关过程信息守恒。

第四章介绍了我们对奇性定理的质疑,特别是对与奇性定理有关的类光测地线的研究。我们证明了,“可无限延伸的类光测地线”与“有共轭点的类光测地线”均可看做固有加速度为无穷大的世界线,有关研究支持了我们对“奇性定理与热力学第三定律冲突”的猜想。

第五章介绍了虫洞、时空隧道与时间机器的基本理论以及我们课题组对上述理论的研究,其中包括“欧几里得虫洞”对量子场论的影响以及制造和维持可穿越洛伦兹虫洞与时间机器的可能性。

第六章介绍了现代物理学中时间测量的理论基础,也介绍了我们对“异地时钟同步”和“相继时间段相等”的研究成果,并探讨了“同时传递性”与热力学第零定律的关系。

近年来有哲学家对物理学的时间观展开了批评,主要是认为物理学家把时间空间化了,忽视了时间的流逝性。应该说,哲学界的批评对于物理学的大多数领域都是正确的,除去热力学之外的所有物理分支,物理学的确都忽略了不可逆性显示的时间箭头。但是,作为物理学重要分支的热力学强调了时间的流逝性。而且,正是热力学第二定律最根本地反映了时间箭头的存在。所谓“宇宙学的时间箭头”、“心理学的时间箭头”,可能归根到底都不过是热力学第二定律的表现。

本书第三章和第五章的内容,与时间的流逝性(热力学第二定律)有关,第四章的内容涉及“时间有无开始和终结”,可能与热力学第三定律有关。第六章的内容涉及时间的定义,这一问题可能与热力学第零定律有关。我们早已知道,能量守恒(热力学第一定律)与时间的均匀性有关。由此可以看到,时间的属性与热力学之间可能存在比以往所知更为深刻的本质联系。

我们希望本书内容能引起物理和天文工作者、教师及青年学生的兴趣,起到抛砖引玉的作用。

本书第三章主要由张靖仪教授执笔,第四章后半部分取自田贵花教授的博士论文,第五章主要取自刘辽教授的《量子宇宙学》讲义及科研论文,赵峥教授撰写其余章节并负责全书策划与统稿。

本书内容涉及国内外许多同行的工作,我们尽可能在书中加以引用,以供读者参考。

沈有根研究员、朱建阳教授、刘文彪副教授、裴寿镛教授、吴忠超教授、黎忠恒教授、杨学军教授、杨树政教授、李翔教授、高长军副研究员、王棣生老师等曾对本书的写作提供过帮助;书中的部分科研内容曾与梁灿彬教授、王永成教授、许殿彦教授、王永久教授、桂元星教授、黄超光教授、刘润球教授、李立新教授、马永革教授、高思杰副教授、周彬副教授作过有益的探讨;课题组的研究生胡亚鹏、阳劲松、丁优,心理系研究生李雪燕以及刘冬梅等帮助打字、修订,数学系研究生秦雯帮助绘图,我们在此表示深切感谢。作者还要感谢胡岗教授促成了这本书的出版;感谢责任编辑认真精细的工作,提高了本书的质量。

书中所列作者的科研工作得到国家自然科学基金(项目编号:19773003,10073002,10373003,10475013)的资助,亦在此致谢。

作 者

2008年1月

目 录

第一章 黑洞的几何性质	(1)
§ 1.1 黑洞与无限红移	(2)
1. 历史上的黑洞	(2)
2. 史瓦西时空的奇点和奇面	(4)
3. 引力红移	(5)
4. 无限红移面	(7)
§ 1.2 黑洞的表面——事件视界	(8)
1. 世界线	(8)
2. 光锥	(9)
3. 零超曲面	(10)
4. 事件视界	(12)
5. 单向膜区	(13)
6. 时空坐标互换	(14)
§ 1.3 时空的延拓	(15)
1. 史瓦西坐标的缺点	(15)
2. 自由下落观测者	(16)
3. 乌龟坐标与爱丁顿坐标	(17)
4. 克鲁斯卡尔坐标	(19)
5. 彭罗斯图	(20)
§ 1.4 最一般的稳态黑洞	(22)
1. 克尔-纽曼度规	(22)
2. 无限红移面与视界	(24)
3. 单向膜区与能层	(25)
4. 内禀奇异性	(27)
5. 彭罗斯图	(28)
6. 极端黑洞、裸奇异与宇宙监督假设	(29)
7. 不可抵达的奇点与奇环	(31)

§ 1.5	黑洞的非热效应	(33)
1.	拖曳效应	(33)
2.	黑洞的表面积、表面引力和静电势	(35)
3.	彭罗斯过程	(38)
4.	黑洞的受激辐射	(39)
5.	黑洞的自发辐射	(39)
第二章	黑洞的温度与热辐射	(43)
§ 2.1	黑洞的热性质	(43)
1.	无毛定理	(43)
2.	面积定理	(44)
3.	贝肯斯坦-斯马尔公式	(45)
4.	极端黑洞的热性质	(47)
5.	稳态黑洞的表面引力	(48)
6.	黑洞力学的四条定律	(48)
§ 2.2	黑洞的热辐射	(48)
1.	霍金辐射的物理机制	(49)
2.	粒子在黑洞附近的运动	(51)
3.	视界对粒子的散射	(53)
4.	辐射是黑体辐射	(54)
5.	克尔-纽曼黑洞的热辐射	(56)
§ 2.3	黑洞的热平衡	(58)
1.	一般系统的热平衡	(58)
2.	史瓦西黑洞与外界的热平衡	(59)
3.	R-N 黑洞的相变	(60)
4.	黑洞的演化	(61)
§ 2.4	安鲁效应	(62)
1.	伦德勒坐标	(62)
2.	安鲁效应	(63)
3.	不等价的真空	(64)
4.	博戈留波夫变换与安鲁效应的证明	(66)
5.	史瓦西时空与伦德勒时空的相似性	(68)
6.	伦德勒时空的视界	(69)

§ 2.5 有视界就有热效应	(70)
1. 稳态时空中确定事件视界的普遍方法	(71)
2. 表面引力、乌龟坐标与热辐射	(72)
3. 导致热效应的坐标变换	(73)
4. 惯性的起源	(75)
§ 2.6 非稳态黑洞的热性质	(76)
1. 黑洞的几何定义——整体定义	(76)
2. 黑洞的物理定义——局域定义	(78)
3. 非稳态黑洞的研究	(79)
4. 计算非稳态黑洞热辐射的方法	(81)
第三章 黑洞熵与信息疑难	(85)
§ 3.1 黑洞熵综述	(85)
1. 黑洞熵的提出、贝肯斯坦-霍金熵	(85)
2. 广义热力学第二定律、熵界	(86)
3. 关于黑洞熵本质的探讨	(87)
§ 3.2 黑洞熵,特霍夫特的砖墙模型	(90)
§ 3.3 薄膜模型——对砖墙模型的改进	(96)
1. 史瓦西黑洞	(97)
2. 史瓦西-de Sitter 黑洞的熵	(98)
3. Vaidya 黑洞的熵	(101)
4. 讨论	(104)
§ 3.4 黑洞信息佯谬	(106)
§ 3.5 静态球对称黑洞的量子隧穿辐射	(108)
1. 计算霍金辐射谱时存在的问题	(108)
2. Painlevé 坐标系	(109)
3. 量子隧穿辐射谱	(111)
§ 3.6 稳态转动黑洞的量子隧穿辐射	(114)
1. 坐标钟同时与克尔-纽曼-Painlevé 坐标系	(114)
2. 霍金辐射修正谱	(117)
§ 3.7 静止质量不为零的粒子的黑洞隧穿和 de Sitter 隧穿	(119)
1. 有静止质量的粒子在穿越视界时的行为	(119)

2. 黑洞事件视界处的势垒贯穿	(122)
3. de Sitter 视界的势垒贯穿几率	(123)
§ 3.8 带电粒子的量子隧穿效应	(125)
1. 带电粒子穿越视界时的行为	(125)
2. 出射率	(126)
3. 讨论	(128)
§ 3.9 霍金辐射信息疑难的再讨论	(128)
第四章 质疑彭罗斯与霍金的奇性定理	(132)
§ 4.1 奇点, 时间的开始与终结	(132)
1. 时空的本性奇点	(132)
2. 对奇点的重新认识	(134)
§ 4.2 彭罗斯与霍金的奇性定理	(135)
1. 奇点与奇异性的定义	(135)
2. 时空的因果结构	(137)
3. 能量条件	(138)
4. 共轭点与最长线	(138)
5. 奇性定理简介	(139)
§ 4.3 奇点的若干性质	(141)
1. 一类不可抵达的奇异区	(141)
2. 奇环附近存在闭合类时线	(141)
3. 奇环以光速转动	(142)
4. 奇环的温度	(143)
§ 4.4 热力学第三定律与宇宙监督假设	(144)
1. 解释霍金辐射的困难	(144)
2. 霍金“吸收”和内禀奇区的热辐射	(145)
3. 奇区的温度和热力学第三定律	(147)
§ 4.5 热力学第三定律与时空奇异性	(147)
1. 第三定律与类时奇点	(148)
2. 奇异区的坐标温度	(149)
3. 完备时空处在绝对零度	(150)
4. 启示与猜想	(152)
§ 4.6 弯曲时空中类光测地线的加速度	(153)
1. 伦德勒变换的启示	(153)