



黑洞吸积盘

〔日〕 加藤正二 (Shoji Kato)

〔日〕 福江纯 (Jun Fukue) 著

〔日〕 岭重慎 (Shin Mineshige)



科学出版社

黑洞吸积盘

〔日〕加藤正二 (Shoji Kato)

〔日〕福江纯 (Jun Fukue) 著

〔日〕岭重慎 (Shin Mineshige)

钱磊 译

吴学兵 审校



科学出版社

北京

内 容 简 介

吸积盘是天体物理中广泛使用的一种理论模型,观测中也找到了它们存在的证据。黑洞吸积盘包含了吸积盘模型的几乎所有结构,是研究吸积理论最好的对象。虽然名字中含有“黑洞”二字,但黑洞吸积盘的研究成果可以用于其他天体的吸积,如原恒星、中子星、白矮星等。

本书是吸积盘研究的经典著作,是从事相关研究人员的必读书目。

图书在版编目(CIP)数据

黑洞吸积盘/(日)加藤正二等著;钱磊译,吴学兵审校. —北京:科学出版社, 2016

书名原文: Black-Hole Accretion Disks

ISBN 978-7-03-048892-3

I. ①黑… II. ①加… ②钱… ③吴… III. ①黑洞-吸积盘-研究 IV. ①P145.8 ②O142.6

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016) 第 134190 号

责任编辑: 王丽平 / 责任校对: 彭珍珍

责任印制: 张 伟 / 封面设计: 陈 敬

科学出版社 出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码: 100717

<http://www.sciencep.com>

北京京华虎彩印刷有限公司 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2016 年 6 月第 一 版 开本: 720×1000 B5

2016 年 6 月第一次印刷 印张: 30 3/8

字数: 600 000

定价: 178.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换)

前言

黑洞的吸积是理解宇宙中众多活动现象所需的重要概念之一, 这些活动现象包括活动星系核 (AGNs) 和恒星质量黑洞候选体. 黑洞吸积流的理论研究始于 20 世纪 60 年代, 吸积盘的经典图像确立于 20 世纪 70 年代早期. 这些年来积累了大量的观测数据, 经典模型和观测之间的差异也变得明显起来, 尤其是涉及高能辐射性质之时. 我们一直在等待一个完全不同的模型, 现在我们相信, 径移主导的能量输运是开启一个黑洞吸积盘研究新时代的关键.

从 20 世纪 70 年代起, 京都的一个研究组就开始致力于黑洞吸积流理论的研究. 回顾 20 世纪 90 年代的快速发展和最近对黑洞吸积不断增长的兴趣, 我们认为, 对比经典模型而对新的盘模型进行第一次系统性的综述, 同时强调一下我们自己工作的结果是必要而适时的.

到现在为止已经出版了一些关于吸积盘的优秀著作, 例如 Frank, King 和 Raine 合著的 *Accretion Power in Astrophysics* (天体物理中的吸积能) (剑桥大学出版社, 1985, 1992) 及 Wheeler 编著的 *Accretion Disks in Compact Stellar Systems* (致密恒星系统中的吸积盘) (世界科技出版社, 1993). 但是我们特别注重新类型的吸积盘模型 (也就是径移主导吸积流), 而这些书中并没有讨论. 这本书也是第一本广泛讨论吸积盘中各种类型的不稳定性和振荡 (波) 的教科书.

这本书由五部分组成: 第一部分简述黑洞吸积盘的历史背景和观测证据. 然后在第二部分中总结吸积盘的经典图像. 第三部分考虑基本方程的完整项, 构造新的模型. 第四部分是对黑洞吸积盘中的不稳定性、波和振荡现象的一个总结. 最后, 第五部分讨论其他重要的物理过程, 诸如辐射流体力学、湍流和磁场. 附录中总结了基本方程的几种不同形式 (例如, 流体动力学、磁流体、广义相对论等) 和相关的重要物理概念. 本书最后给出了一个符号列表.

这本书希望能满足读者的各种要求. 刚开始学习黑洞吸积流的学生应该首先阅读第一部分以获得一个基本的认识. 如果你想从基础开始学习经典的和现代的吸积盘模型的基本公式, 请从第二部分开始阅读. 已经熟悉经典模型的读者可以从第三部分读起. 所有必要的内容, 包括基本方程和用于理解的重要概念, 都将在第三部分介绍和扩展.

感谢 Fred Myers 帮忙校对英文, 也十分感谢 Marek Abramowicz, Ramesh Narayan, Robert Wagoner, Toshi-hiro Kawaguchi, Hiroyuki Hirashita, Yasushi Nakao, Kunji Nakayama, Alphonse Sterling 和 Tatsuya Yamasaki 对手稿审慎的阅读和有

益的评论. 在此也想感谢 Anatol Cherepashchuk, Masahito Hirose, Makoto Ideta, Taichi Kato, Shunji Kitamoto, Tadahiro Manmoto, Katsuya Nakagawa, Kenji Nakamura, Hitoshi Negoro, Mitsuru Takeuchi, Masami Toshiyoshi, Satoru UeNo, Miho Uezono 和 Kohji Yoshikawa 为这本书所用的图提供数据. 但是, 我们对这本书中的任何印刷错误和误解负责. 书中所述理论的一大部分都是通过与 Fumio Honma, Masaaki Kusunose, Ryoji Masumoto, Hiraku Nishimori, Atsuo Okazaki, Yoji Osaki, Masayuki Umemura, Craig Wheeler, Janet Wood, Akira Yoshizawa 和其他上面所列的各位的合作与讨论而产生的. 我们从心里感谢他们的巨大贡献. 最后, 十分感谢京都大学出版社的 Tetsuya Suzuki 的编辑工作. 本书的出版部分得到了日本文部省科研基金 Grant-in-Aid for Scientific Research Result 的支持.

加藤正二 (Shoji Kato)

福江纯 (Jun Fukue)

岭重慎 (Shin Mineshige)

1998 年 1 月 31 日于京都

译 者 序

本书的翻译起初是每天的翻译训练, 几年下来完成了全书的翻译. 在岳友岭、李会贤的鼓励下决定推动本书中文版的出版. 有幸得到科学出版社王丽平编辑的帮助.

本人才疏学浅, 疏漏在所难免, 请读者批评指正. 本书勘误表的地址为 <http://blog.sciencenet.cn/blog-117333-825907.html>, 读者如发现错误, 请在勘误表后回复.

感谢我的妻子和我的父母一直以来对我工作的理解和支持.

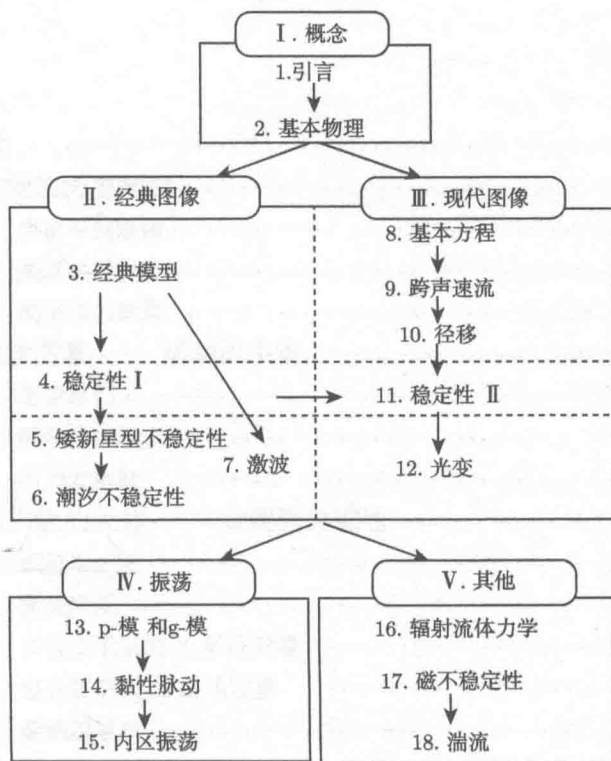
本书得到了国家重点基础研究发展计划资助 (项目编号: 2012CB821800).

钱 磊

邮箱: lqian@nao.cas.cn

2015 年 10 月

本书大纲



目 录

前言

译者序

本书大纲

第 1 章 绪论	1
1.1 吸积能的历史渊源	1
1.1.1 宇宙中的能源	1
1.1.2 类星体的发现	3
1.1.3 类星体的能量	4
1.2 吸积盘图景 —— 活动的宇宙	6
1.2.1 理论家们	7
1.2.2 吸积盘的概念	8
1.2.3 引力发电站	12
1.3 吸积供能的天体 —— 对观测的综述	12
1.3.1 恒星形成区	13
1.3.2 激变变星	15
1.3.3 含有中子星的 X 射线双星	19
1.3.4 包含黑洞的 X 射线双星	21
1.3.5 活动星系核	28
参考文献	34
第 2 章 与吸积相关的物理过程	38
2.1 爱丁顿光度	38
2.1.1 爱丁顿光度的推导	38
2.1.2 超爱丁顿光度	40
2.2 邦迪吸积	41
2.2.1 基本方程	41
2.2.2 声速和临界点	42
2.2.3 马赫数和奇异点分析	43
2.3 黏滞过程	45
2.3.1 转动盘的最低能量态	45
2.3.2 盘中的黏性	48

2.4 相对论效应	50
2.4.1 牛顿类比	50
2.4.2 伪牛顿势	53
参考文献	58
第 3 章 经典模型	59
3.1 黏性吸积盘	59
3.1.1 黏滞扩散的基本方程	59
3.1.2 黏滞扩散的例子	61
3.2 光学厚盘	63
3.2.1 标准 Shakura-Sunyaev 模型	63
3.2.2 盘的能量	67
3.2.3 稳态盘结构	69
3.2.4 热平衡曲线	71
3.2.5 盘黑体谱	74
3.2.6 盘的线谱	76
3.3 光学薄盘	79
3.3.1 Shapiro-Lightman-Eardley 盘	79
3.3.2 平衡结构	81
3.3.3 高能谱	81
3.4 几何厚环	82
3.4.1 环的基本结构	84
3.4.2 环的连续谱	87
3.4.3 环的线谱	88
3.5 相对论性标准盘	89
3.5.1 相对论性盘的基本方程	90
3.5.2 相对论性盘的结构	94
3.5.3 连续谱	96
3.5.4 线谱	100
3.6 吸积盘中的辐射	102
3.6.1 均匀盘中的辐射能流	102
3.6.2 电子散射效应和康普顿化	105
3.7 辐照盘	107
3.7.1 辐照效应的光度	108
3.7.2 辐照加热率	109
3.7.3 辐照盘的径向结构	111

3.7.4 辐照盘的谱	114
参考文献	115
第 4 章 长期不稳定性 和 热不稳定性	119
4.1 长期不稳定性	119
4.1.1 基本方程	120
4.1.2 负扩散	121
4.1.3 不稳定性判据	122
4.2 热不稳定性	124
4.2.1 基本方程	124
4.2.2 热力学行为	125
4.2.3 稳定性判据	125
4.3 $M-\Sigma$ 和 $T-\Sigma$ 平面上的稳定性研究	126
4.4 稳定性判据的数学推导	128
4.4.1 基本方程	129
4.4.2 扰动	130
参考文献	134
第 5 章 矮新星型不稳定性	135
5.1 热电离不稳定性	135
5.1.1 X 射线新星的两个旗鼓相当的模型	135
5.1.2 氢的部分电离	136
5.1.3 对流盘的垂向积分	138
5.1.4 局域的极限环行为	140
5.2 X 射线新星盘的时间演化	145
5.2.1 不稳定盘的整体演化	145
5.2.2 光变曲线	146
5.2.3 基本的谱变化	151
5.2.4 辐照的影响	152
5.3 宁静态发射线的形成	154
5.3.1 光学薄盘	154
5.3.2 来自盘大气的发射线	156
5.3.3 总结: 盘不稳定性模型	157
参考文献	158
第 6 章 潮汐不稳定性	160
6.1 潮汐驱动的偏心不稳定性	160
6.1.1 X 射线新星中的长驼峰	160

6.1.2	偏心盘中的 3:1 共振	162
6.1.3	ΔP - q 关系	165
6.2	热不稳定性 and 潮汐不稳定性 of 相互作用	167
6.2.1	盘半径的时变	167
6.2.2	含时的全盘计算	168
	参考文献	171
第 7 章	含有激波的稳态盘吸积	173
7.1	黑洞吸积的拓扑性质	173
7.2	相对论性跨声速盘吸积	175
7.2.1	基本方程	175
7.2.2	临界点和它们的拓扑性质	178
7.2.3	临界解和它们的分类	179
7.3	多重驻激波	182
7.3.1	中子星	183
7.3.2	黑洞	184
7.3.3	激波的稳定性	184
	参考文献	185
第 8 章	构造一般模型的方程	187
8.1	基本方程和径移的重要性	187
8.1.1	基本方程	187
8.1.2	径移的重要性	190
8.2	单温盘	191
8.2.1	垂向积分的方程	191
8.2.2	垂向等温盘	196
8.2.3	光学厚盘	197
8.2.4	光学薄盘	197
8.3	双温盘	197
8.3.1	离子和电子的方程	198
8.3.2	库仑耦合	199
8.3.3	韧致辐射冷却	200
8.3.4	同步辐射冷却	200
	参考文献	201
第 9 章	吸积流的跨声速性质	202
9.1	临界半径处的正规性条件	202
9.1.1	基本方程和跨声速流的类型	202

9.1.2	等温盘中 $T_{r\varphi} = -\alpha\Pi$ 的情形	204
9.1.3	等温盘中 $T_{r\varphi} = \alpha\Sigma c_T^2 d \ln \Omega / d \ln r$ 的情形	208
9.1.4	对一般情况的评价	209
9.1.5	对使用洛必达定理的评述	209
9.2	跨声速流的数值实例	211
	参考文献	214
第 10 章	径移主导吸积流	215
10.1	辐射压主导盘	215
10.1.1	高吸积率和径移	215
10.1.2	数值模型和 S 形序列	220
10.2	光学薄的单温盘	223
10.2.1	低密度盘和径移	223
10.2.2	解析模型	229
10.2.3	跨声速数值模型	232
10.3	双温盘和辐射谱	234
10.3.1	光学薄双温盘模型	234
10.3.2	辐射谱	237
10.3.3	标准盘和径移主导吸积流的对比	238
	参考文献	238
第 11 章	径移主导盘的热力学行为	240
11.1	径移主导盘的局域稳定性	240
11.1.1	热稳定性和整体扰动	241
11.1.2	局域扰动的热不稳定性	241
11.1.3	描述局域扰动的方程	243
11.1.4	热不稳定性的增长率	244
11.1.5	湍动热传导的影响	245
11.2	轴对称扰动的含时方程	246
11.3	热吸积盘中的弛豫振荡	248
11.3.1	历史注记	249
11.3.2	$T_{r\varphi} = -\alpha\Pi$ 的情形	249
11.3.3	$T_{r\varphi} = -\alpha(\Pi_{\text{gas}}\Pi^3)^{1/4}$ 和 $-\alpha(\Pi_{\text{gas}}\Pi)^{1/2}$ 的情形	252
11.3.4	$T_{r\varphi} = -\alpha_0(H/r)^n\Pi_{\text{gas}}$ 的情形	254
11.4	X 射线新星中的径移主导流	255
11.4.1	盘不稳定性导致的谱的变化	255
11.4.2	爆发循环	257

参考文献	260
第 12 章 X 射线光变的模型	262
12.1 黑洞天体的 $1/f$ 光变	262
12.1.1 观测的光变特征	262
12.1.2 $1/f$ 光变的性质	264
12.2 光变的元胞自动机模型	266
12.2.1 自组织临界性	266
12.2.2 一个元胞自动机的步骤	267
12.2.3 自组织临界态的性质	269
12.2.4 $1/f$ 涨落谱的产生	272
12.2.5 关于自组织临界性模型的一点注记	274
12.3 涨落和径移主导盘	275
12.3.1 径移主导吸积流中的 X 射线脉冲的形成	276
12.3.2 波反射	277
12.3.3 具有临界行为的径移主导盘	279
12.3.4 什么触发了扰动?	280
参考文献	281
第 13 章 盘振荡基础	283
13.1 振荡和方程的分类	283
13.1.1 观测的注记	283
13.1.2 盘振荡的分类	284
13.1.3 基本方程	287
13.2 惯性-声波和惯性-重力波	289
13.2.1 $N^2 = 0$ 情形的基本方程	290
13.2.2 常微分方程的推导	290
13.2.3 色散关系	292
13.2.4 波和褶皱波的分类	293
13.2.5 传播区域和波的禁闭	294
13.3 非零 Brunt-Väisälä 频率的效应	297
13.3.1 $k_r \gg m/r$ 情形的色散关系	297
13.3.2 $k_r \gg m/r$ 情况下的禁闭和吸收	300
13.3.3 对流模式	301
13.4 单臂低频全局振荡	302
13.4.1 $n = 0$ 的单臂惯性-声波	303
13.4.2 单臂褶皱波	304

参考文献	307
第 14 章 声波的黏滞脉动不稳定性	309
14.1 黏滞对振荡的影响	309
14.2 等温盘中的不稳定性判据	310
14.2.1 描述扰动的方程	310
14.2.2 不稳定性判据	311
14.3 不稳定性判据的数学推导	314
14.4 描述拉格朗日扰动的方程	314
14.4.1 一般稳定性判据	316
14.4.2 轴对称振荡	317
14.4.3 非轴对称振荡	319
参考文献	320
第 15 章 吸积盘内区的声波扰动	321
15.1 声速点和不稳定性的类型	321
15.1.1 基本方程	321
15.1.2 局域化在声速点附近的声波扰动	323
15.1.3 结点型临界点和不稳定性	325
15.1.4 拓扑结构和不稳定性之间的一般关系	327
15.2 时变的模拟	328
15.2.1 适宜声学振荡的情形	328
15.2.2 等温盘中的模拟	329
15.2.3 非等温盘的模拟	331
参考文献	334
第 16 章 辐射流体力学	335
16.1 辐射阻力和雪崩过程	335
16.1.1 康普顿阻力造成的角动量损失	336
16.1.2 基本方程	338
16.1.3 外辐射阻力驱动的吸积盘	340
16.1.4 外辐射场引起的辐射雪崩效应	345
16.2 盘辐射场	345
16.2.1 吸积盘上方附近的辐射场	346
16.2.2 标准盘上方的辐射场	348
参考文献	353
第 17 章 磁流体不稳定性	354
17.1 交换不稳定性 and 帕克不稳定性	354

17.1.1	磁漂浮不稳定性 and 交换不稳定性	354
17.1.2	等温大气中的帕克不稳定性	357
17.2	转动盘中的帕克不稳定性	361
17.2.1	平衡盘模型	361
17.2.2	扰动和色散关系	363
17.2.3	增长率	367
17.3	磁转动不稳定性	368
17.3.1	不稳定性机制概述	369
17.3.2	轴对称扰动的色散关系	370
17.3.3	不稳定性判据和增长率	374
	参考文献	376
第 18 章	吸积盘中的湍流	378
18.1	湍流的起源和建模	378
18.1.1	盘中湍流的起源	378
18.1.2	湍流的建模	380
18.1.3	二阶闭合模型	381
18.2	流体力学湍流	382
18.2.1	湍流雷诺应力的输运方程	382
18.2.2	闭合近似	384
18.2.3	柱坐标中的输运方程	385
18.2.4	雷诺应力张量模型	387
18.2.5	关于因果性的注记	390
18.3	磁流体力学湍流的二阶模型	393
18.3.1	输运方程	393
18.3.2	柱坐标系中的方程和结果	395
18.3.3	平均磁场的效应	398
18.4	各种能量形式间的平衡	400
	参考文献	404
附录 A	克尔度规及其基本性质	405
A.1	基本性质	405
A.2	克尔时空中的圆周运动	408
	参考文献	413
附录 B	纳维-斯托克斯方程	414
B.1	一般形式	414
B.2	柱坐标表达式	416

附录 C 相对论黏性流体的基本方程	418
C.1 度规和能量-动量张量	418
C.2 一般形式	420
参考文献	421
附录 D 辐射转移方程	422
D.1 辐射场	422
D.2 辐射转移方程	423
D.2.1 转移方程	423
D.2.2 矩量方程	423
D.2.3 闭合关系	424
D.2.4 源函数	425
D.3 物质耦合	426
参考文献	426
附录 E 相对论辐射流体力学的基本方程	427
E.1 度规和能量-动量张量	427
E.2 辐射转移方程	430
E.2.1 转移方程	431
E.2.2 矩量方程	432
E.2.3 闭合关系	433
E.3 物质耦合	433
参考文献	435
附录 F 磁流体力学方程	436
F.1 麦克斯韦方程和磁流体力学近似	436
F.2 磁流体力学方程	437
F.3 柱坐标表达式	438
附录 G 相对论性物态方程	439
G.1 物态方程	439
G.2 绝热声速和等效绝热指数	440
参考文献	441
附录 H 相对论性气体的冷却	442
H.1 韧致辐射冷却	442
H.2 同步辐射冷却	443
H.3 康普顿化	444

参考文献	444
附录 I 扩散方程的解析解	445
I.1 解析解	445
I.2 自相似解	449
参考文献	451
符号列表	452