

宇宙中那些神秘的

于我们的

关

望

洞

我们

已

知

的

和

未

知

的事

# 从爱因斯坦相对论 到霍金辐射

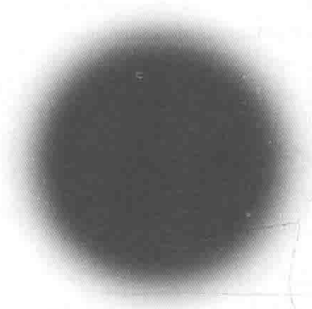
[美] 史蒂文·古布泽 (Steven S. Gubser)

[美] 弗兰斯·比伦陀利乌斯 (Frans Pretorius) 著

苟利军 郑雪莹 赵雪杉 译

中信出版集团

# 黑洞之书



【美】史蒂文·古布泽 (Steven S. Gubser)

【美】弗兰斯·比勒陀利乌斯 (Frans Pretorius)

著

苟利军 郑雪莹 赵雪杉

译

## 图书在版编目 ( CIP ) 数据

黑洞之书 / (美) 史蒂文·古布泽, (美) 弗兰斯·比勒陀利乌斯著; 苟利军, 郑雪莹, 赵雪杉译. -- 北京: 中信出版社, 2018.11

书名原文: The Little Book of Black Holes

ISBN 978-7-5086-9365-1

I. ①黑… II. ①史… ②弗… ③苟… ④郑… ⑤赵… III. ①黑洞-普及读物 IV. ①P145.8-49

中国版本图书馆CIP数据核字 (2018) 第187454号

The Little Book of Black Holes by Steven S.Gubser & Frans Pretorius

All rights reserved. No part of this book may be reproduced or transmitted in any form or by any means, electronic or mechanical, including photocopying, recording or by any information storage and retrieval system, without permission in writing from the Publisher.

Simplified Chinese translation copyright © 2018 by CITIC Press Corporation

ALL RIGHTS RESERVED

本书仅限中国大陆地区发行销售

## 黑洞之书

著 者: [美] 史蒂文·古布泽 [美] 弗兰斯·比勒陀利乌斯

译 者: 苟利军 郑雪莹 赵雪杉

出版发行: 中信出版集团股份有限公司

(北京市朝阳区惠新东街甲4号富盛大厦2座 邮编 100029)

承印者: 北京盛通印刷股份有限公司

开 本: 787mm×1092mm 1/32

印 张: 6.5 字 数: 100千字

版 次: 2018年11月第1版

印 次: 2018年11月第1次印刷

京权图字: 01-2018-2262

广告经营许可证: 京朝工商广字第8087号

书 号: ISBN 978-7-5086-9365-1

定 价: 49.00元

版权所有·侵权必究

如有印刷、装订问题, 本公司负责调换。

服务热线: 400-600-8099

投稿邮箱: author@citicpub.com

## 前 言

2015年9月14日，自阿尔伯特·爱因斯坦（Albert Einstein）写下广义相对论方程后几乎过去了100年。两台巨大无比的探测器，一台位于路易斯安那州，另一台位于华盛顿州，正在为探测引力波做最后的准备。突然且出人意料地，探测器记录下了一串独特的啁啾信号。如果把这串信号转化成声音，那么它听起来就像微弱而低沉的捶击声。

5个月后，在对探测器记录下的数据进行了谨慎检查的前提下，LIGO（激光干涉引力波天文台）团队公开宣布了他们的探测结果。那串啁啾信号正是他们希望探测到的引力波，来自一对合并的黑洞。整个物理学界都为之沸腾，就好

像我们一直都是红色盲患者，突然在某个时刻眼前豁然开朗，我们生平第一次看到了一枝红玫瑰。

这是一枝多么漂亮的红玫瑰啊！LIGO团队的最佳估计表明，这个微弱的信号是10亿年前两个黑洞的合并产生的，它们中的每一个都约为太阳质量的30倍那么大。在碰撞过程中，有相当于三倍太阳质量的能量被蒸发成了引力辐射。

黑洞和引力波都是爱因斯坦广义相对论预言的结果。广义相对论预测了在黑洞碰撞事件中，LIGO探测器将会看到的引力波类型，2015年9月14日记录下的啁啾信号就非常接近这个预言。引力波的第一次成功探测不仅证明了长久以来的理论猜想，也预示着引力波天文学时代的到来。LIGO探测器实现了几十年来我们梦寐以求的愿望。现在，我们希望能探索这个盛开着惊喜之花的全新引力花园。

科学很难具有数学意义上的确定性，因此我们会问：LIGO团队的解释有多大把握是正确的，即这个微弱的声音来自10亿年前两个黑洞的合并？答案是：非常确定。所有证据都与这个结论相吻合。两台探测器都记录下了这个信号，附近似乎也没有发生什么能解释这个信号的事件。对于此前的探测技术来说这个信号实在太微弱了，但对于现在的设备来说，它已经足够强了。双黑洞在10亿年前合并的假设也未与一般的天体物理学和宇宙学理论发生冲突。关键的

一点是，我们有希望能探测到更多此类事件去验证它。事实确实如此，LIGO团队后来又宣布了第二例被证实的引力波事件，发生在2015年的圣诞节，第三例事件发生在2017年1月4日，<sup>①</sup>这些事件与第一次的发现大体一致，因此我们应该有充分的信心认为LIGO真的探测到了双黑洞合并事件。总而言之，我们相信现在正是天体物理学新时代的黎明时分，黑洞将在未来扮演关键角色。

在本书里，我们将从两个方面来讲述黑洞。一方面，作为天体物理的一个重要研究对象，黑洞的存在几乎毋庸置疑；另一方面，作为理论的实验室，它有助于我们锤炼对引力、量子力学及热力学的理解。在第1章和第2章里，我们将以狭义相对论和广义相对论作为开场白。在之后的章节中，我们将一一讨论有关施瓦西黑洞、自转的黑洞、黑洞碰撞、引力辐射、霍金辐射和信息丢失等问题。

那么，黑洞到底是什么？从本质上说，它是一个时空区域，物质一旦被拉入这个区域，将无法从中逃逸（图0-1）。让我们来看一下最寻常的黑洞，即所谓的“施瓦西黑洞”，它是以其发现者卡尔·施瓦西（Karl Schwarzschild）的名字

---

① 截至本书中文版编辑出版之际，LIGO和Virgo（室女座引力波探测器）已经探测到了6例引力波事件，其中包括一例中子星合并事件。——译者注

命名的。古语说：“世事有起终有落。”但在施瓦西黑洞的内部，有一个更确切的事实：没有“起”，只有“落”。但是，我们不太确定这样的“落”最终会到达哪里。从施瓦西黑洞背后的数学原理出发得出的最直截了当的假说是，黑洞核心有一个可无限压缩的物质核，落入这个核是万物的终结，也

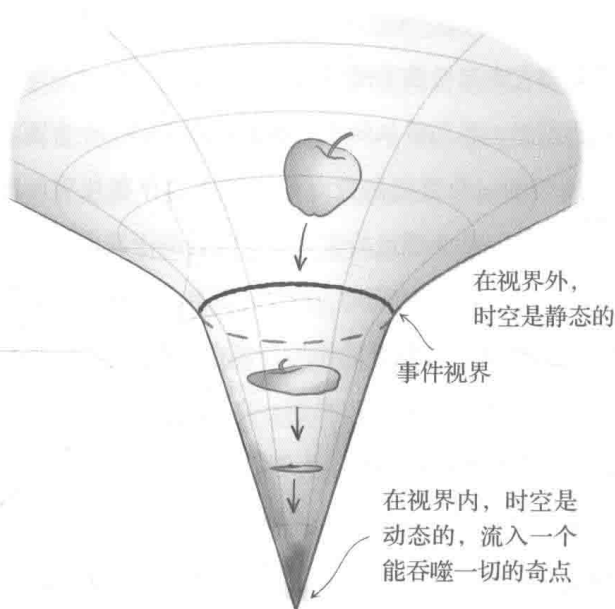


图 0-1 黑洞的几何剖面图。在视界外很远的地方，时空是平直的。随着向视界移动，时空会逐渐变得弯曲，但依然独立于时间，换句话说时空仍是静态的。然而，在进入视界之后，时空就变成动态的了：随着时间的流逝，两个空间维度（球面几何）被压缩，而第三个维度（图中没有展示出来）被拉长，直至所有空间都被拉伸和挤压成一个无限细长的奇点

是时间的终点。这个假说非常难以检验，因为进入黑洞的观测者不可能回来告诉我们他看到了什么。

在更深入地探索施瓦西黑洞之前，让我们先退一步思考一下比较温和的引力。在地球表面，如果一个物体具有足够的上升速度，那么它将飞离地球，永不回头。能够做到这一点的最小速度就是逃逸速度，如果忽略空气摩擦力，地球表面的逃逸速度大约是每秒11.2千米。相较而言，人类投球的速度很难超过每秒45米，比逃逸速度的0.5%还慢；大火力来复枪的子弹出膛速度大约是每秒1.2千米，略快于逃逸速度的10%。所以，我们通常所说的“有起终有落”，是指用一般方法使物体上升，相对于这个强度而言，地球引力还是比较强的。

火箭是我们克服地球引力并把物体送入太空的现代手段。想要摆脱地球引力，火箭的速度无须严格地超过每秒11.2千米（尽管有些火箭达到了）。事实上，火箭会以一个稍低的速度飞行，并借助充足的燃料保持向上推进的状态，直至地球引力场明显减弱的高度。在这样的高度上，逃逸速度也相应减小。换句话说，为了把空间探测器完全带离地球引力场，在推进器熄火后，火箭的飞行速度必须比这个高度所需要的逃逸速度还快。

现在我们会问，如果地球的密度增大，会怎么样？

因为引力场变得更强，地球表面的逃逸速度也会变大。在已知宇宙中，普通物质能形成的最致密且稳定的天体是中子星，它相当于把大约1.5倍的太阳质量塞进一个半径只有12千米的球里，尽管这个半径的测量不是非常精确。强度大约是地球引力场的1 000亿倍的巨大引力把普通物质塞进中子星内部，假设中子星的半径是12千米，那么其表面的逃逸速度大概是光速的60%。

我们才不会就此打住呢，我们还可以做一个思想实验：进一步压缩中子星。如果将这颗中子星的半径压缩到只有4.5千米，它的逃逸速度就需要达到光速。而如果它的半径小于4.5千米，引力效应就会完全变样。这时，任何形式的物质都不可能在引力的作用下保持原样，时间的向前流逝就等同于沿着半径向内移动，逃逸是不可能的。这就是黑洞。

本书前几章的主要目的是让读者更精确地了解黑洞。我们即将探索的一个关键概念是事件视界，即黑洞的“表面”，它是几何意义上三维空间里的一个二维位置。比如，对于最寻常的施瓦西黑洞而言，事件视界是完美的球形，其半径被称为施瓦西半径。黑洞视界的奇怪之处（至少根据通常的理解）在于，它并不是任何具体事物的表面。在你穿过它的那一刻，你并不会感觉有什么特别之处。但如果你想转身出

去，问题就来了：无论你费多大力气——用火箭、激光炮或其他任何方法，也不管外界给予你什么帮助，你都不可能再回到视界之外了，就连发出求救信号说你被困住了也做不到。打个诗意的比方，我们可以视黑洞视界为瀑布边缘，一旦进入，时空就会不可避免地跌落至能摧毁一切的奇点中。

黑洞远不只是一项思想实验。我们相信在宇宙中至少有两种情况会生成黑洞，一种是沿着前文中关于中子星的讨论，当大质量恒星耗尽其核燃料时，它们就会发生坍缩。坍缩的过程混乱不堪，大量物质都在爆炸时被吹入周围的宇宙空间，我们称之为超新星爆发。（实际上，一般认为超新星在将金属和其他重元素散布到宇宙的过程中扮演了关键角色。）爆发后剩余的质量足够大，以至于不能形成一个保持稳态的中子星，于是它们将坍缩成一个黑洞，其质量至少是太阳的几倍。LIGO团队探测到的双黑洞质量更大些，但它们也很可能是由恒星坍缩产生的。

人们认为在星系的中心存在着质量更大的黑洞。那些黑洞到底是如何形成的，至今还是一个谜，这也许与暗物质或宇宙早期的物理过程有关，抑或是与两者都有关。星系中心的黑洞质量大得惊人，可以达到太阳质量的成千上万倍，

乃至几十亿倍，<sup>①</sup>通常认为银河系的中心有一个约400万倍太阳质量的黑洞。我们也许会感到好奇，既然没有信号能从黑洞视界中逃逸，我们又是如何知道那里有黑洞存在的？答案是：黑洞附近的物体会受到它的吸引。通过跟踪研究银河系中心附近的恒星运动，我们可以肯定那里有一个质量非常大、密度非常高的天体。虽然依靠这种方法并不能证明它就是一个黑洞，但如果它不是黑洞，那么它必定也是一个更加不可思议的东西。简言之，黑洞是最简单的可能，而且现在学界普遍认为，即使并非绝大多数星系的中心都存在黑洞，中心潜藏着黑洞的星系也有很多。

黑洞是非常有用的理论实验室，因为和大多数天体比较，关于它的计算比较简单。而恒星则非常复杂，其内核的核反应为它们提供能量。同时，恒星内部的物质承受着高压，也会有流体动力学运动。虽然我们可以对这些情况进行数值模拟，但确实还不能完全理解它们。此外，恒星表面的动力学就像地球的天气情况那样复杂。相比之下，黑洞要简单得多。在不存在其他外部物质的情况下，黑洞的形式只会几种明确的可能，所有这些形式都可以用求解爱因斯坦的

---

① 星系中心的黑洞质量通常至少是太阳质量的几十万倍。——译者注

广义相对论方程得到的弯曲时空几何结构来解释。可以肯定的是，下落的物质会使事情变得复杂一些，但我们对普通物质落入黑洞的行为也有不错的理解。如今，我们甚至已经有了较好的黑洞碰撞的数值模拟，这本书第6章的主要内容之一就是解释这是如何实现的，以及这好像LIGO这样的探测实验有什么意义。

事情的奇怪之处就在于黑洞并不黑。借助量子力学，史蒂芬·霍金（Stephen Hawking）证明了黑洞有一定的温度，这跟它们表面的引力相关。事实上，专门有一个名为“黑洞热力学”的研究领域，致力于研究黑洞解的几何特征与我们熟悉的热学特征（比如温度、能量和熵）之间的精确对应关系。甚至有观点认为，在宇宙遥远区域的黑洞内部会发生重叠，编码出一种名为“纠缠”的量子效应。我们将在本书的第7章介绍这部分内容。

黑洞持续地吸引着科学家们的的好奇心。天文学家一直在寻找关于自转黑洞特征的更精确的证据，现在他们热切期望与引力波天文台合作，以进一步理解与黑洞合并相关的灾难性事件。这只是引力波天文学的开端，全世界正在努力建造引力波探测网络，包括美国（华盛顿州汉福德和路易斯安那州利文斯顿的两台LIGO探测器）、欧洲（Virgo和GEO600）、日本（KAGRA）、印度（LIGO India）等国家和

地区。同时，弦理论物理学家们从更高维度研究黑洞，不仅将其作为探索引力的量子效应的方法，还将其与重离子碰撞、黏性流体和超导体等物理现象进行类比。黑洞启发我们思考一些最奇怪的问题：有朝一日，黑洞能否为我们所用？它们的内部到底有什么？掉入黑洞究竟会怎么样？或者——有没有可能我们已经身处黑洞之中却浑然不觉呢？

# 目 录

|            |     |
|------------|-----|
| 前 言        | III |
| 第1章 狭义相对论  | 001 |
| 第2章 广义相对论  | 023 |
| 第3章 施瓦西黑洞  | 049 |
| 第4章 自转的黑洞  | 083 |
| 第5章 宇宙中的黑洞 | 109 |
| 第6章 黑洞碰撞   | 129 |
| 第7章 黑洞热力学  | 159 |
| 结 语        | 185 |
| 译后记        | 191 |

## 第 1 章

# 狭 义 相 对 论



为了理解黑洞，我们需要学习一些相对论知识。相对论分为两个部分：狭义相对论和广义相对论。爱因斯坦于1905年提出了狭义相对论，主要是关于物体相对于其他物体的运动，他还提出，观测者的运动状态会影响到观测者的空间和时间体验。狭义相对论的核心思想可以用一种被称为“闵可夫斯基时空”（Minkowski spacetime）的优美的几何形式来表述。

广义相对论在狭义相对论的基础上加上了引力理论，它是我们真正理解黑洞所需要的理论。爱因斯坦花了10余年的时间来构建广义相对论，直至在1915年年末发表的一篇论文中，他才提出了最终的爱因斯坦场方程。这些方程描述了引力是如何将闵可夫斯基时空扭曲成弯曲时空的，比如在第3章中我们将会介绍的施瓦西黑洞时空。相较于广义相对论，狭义相对论更简单，这是因为狭义相对论没有考虑引力，也