

捕捉 引力波 背后的故事

程 颢/著

The Story behind Capturing
Gravitational
Waves

每一个电磁波谱的
打开，都会为我们带来
前所未有的发现。天文
学家们同样期望引力波
也是如此。



科学出版社

捕捉引力波背后的故事

程 鶚 著



科 学 出 版 社

北 京

内 容 简 介

本书以叙述历史的笔调回顾了物理学家研究、探索及至成功地捕捉到引力波的百年经历,注重其中的人物经历和细节过程,展示科学发现中所特有的喜怒哀乐、科学家的个体性格以及大科学协作中的矛盾冲突。在这个历史叙事的过程中,本书潜移默化地融入与相对论、引力波、精密物理测量等相关科学技术的基础知识以及美国政府、科学界针对科研项目的资金的审批和管理模式。

本书面向对科学知识、科学研究过程和历史演进感兴趣的读者。虽然书中内容涉及一些物理学前沿的概念、理论,但并不要求读者具备这方面的基础知识或理解能力,本书适合具有中学学历及以上的所有人。

图书在版编目(CIP)数据

捕捉引力波背后的故事/程鸷著. —北京:科学出版社,2019.6
ISBN 978-7-03-061345-5

I. ①捕… II. ①程… III. ①引力波-普及读物 IV. ①P142.8-49

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2019)第 107654 号

责任编辑:钱 俊 陈艳峰/责任校对:杨 然
责任印制:吴兆东/封面设计:无极书装

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>

北京虎彩文化传播有限公司 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

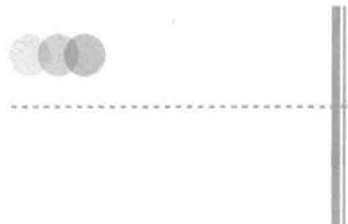
2019 年 6 月第 一 版 开本:720×1000 B5

2019 年 6 月第一次印刷 印张:12 1/4 插页:2

字数:163 000

定价:49.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)



前言

2016 年 2 月 11 日，人类探测到引力波的消息一经发布便在全世界引起很大的反响，掀起一场不大不小的“物理热”。相应地，美国的新闻媒体和出版社相继推出一系列报道和书籍，深度揭示这一发现的历史过程。¹ 他们并不局限于相关科学知识的普及，而是更侧重于挖掘科学突破背后的人物、社会背景、政策抉择以及各种不为大众所知的过程和细节。正是在跟风阅读这些资料时，作者才意识到在这个轰动新闻的背后，隐藏着一个曲折动人的故事。

因为这样的内容和着眼点在中文世界中还不是很常见，作者从 2018 年年初开始在中国科学报社主办的科学网博客网站*以连载的形式介绍这个历史过程。这一系列文章主要取材于已有的英文书籍，以作者根据其中线索进一步搜集、整理的内容作为补充，试图以中文读者更为习惯的方式讲述这一故事。

该系列在科学网博客连载期间由“中国物理学会期刊网”[†]的微信公众号同步转载。在中文社交媒体上得到一定数量的读者跟踪阅读和支持。

* <http://blog.sciencenet.cn/u/eddiecheng>

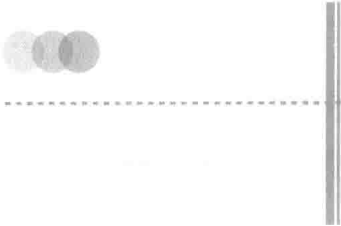
† <http://www.cpsjournals.cn>

其后，在科学出版社钱俊编辑的大力协助下，得以汇编成此书出版。

除了少量的后期文字修改，本书基本保持了博客网络版的原貌。因为版权的原因，网络版的一些插图未能包括在书内，甚为遗憾。作为纸质出版物，本书附加了大量的注释，明确书中内容出处，希望能为有心的读者提供进一步探究的线索。注释中提供的参考书页码均根据相应的英文版本。类似地，书中所用的一些专用名词、名称等也以脚注的方式提供了相应的英文原名，尽管原文可能来自其他语言（某些特定名称除外）。

程 鶚

2018 年 10 月



插图目录

1.1 荷兰布尔哈夫科学博物馆 (Museum Boerhaave) 东墙上纪念广义相对论的壁画	3
2.1 费曼 1957 年在教堂山广义相对论会议上解释“粘珠论”所用的示意图	15
3.1 美国海军少校韦伯	18
3.2 韦伯在他的“韦伯棒”上装置压电传感器的工作照	22
4.1 韦斯 1972 年在麻省理工学院内部发表的引力波干涉仪设计草图	33
6.1 脉冲星示意图	46
9.1 沃格特等 1989 年提交的资金申请书导语页	74
12.1 引力波波形横截面的运动模式, 在互相垂直的方向上运动方向正好相反	90
13.1 iLIGO (左上小图) 和 aLIGO (大图) 悬挂镜子方式的比较	101
13.2 两个熔融石英制作的 LIGO 反射镜	103
14.1 1993 年, 德瑞福在汉福德附近的沙漠中一锹定音, 选定建造干涉仪	

的地点	106
14.2 汉福德（左）和利文斯顿（右）两个地点的干涉仪和它们在美国地图上的位置（中）	107
14.3 参与 LIGO 科学合作组织的部分大学和科研机构	110
16.1 1990~1992 年间 COBE 卫星拍摄的宇宙微波背景辐射温度分布图	126
17.1 图中顶排是汉福德（左）和利文斯顿（右）干涉仪在 2015 年 9 月 14 日测得的引力波信号	134
17.2 2015 年 9 月 14 日汉福德测得的（去除背景噪音后）引力波信号（灰线）与理论计算（红线）的对比	137
18.1 韦斯、索恩、巴里什（从右到左）荣获 2017 年诺贝尔物理学奖	143
19.1 地球上现有和建设中的引力波干涉仪分布图	152
19.2 在地球环绕太阳轨道上运行的引力波干涉仪 LISA 设计示意图	154
19.3 不同种类引力波的频率范围和相应的探测手段	157



目 录

前言

插图目录

第一章	爱因斯坦的先知、失误和荒唐	1
第二章	费曼的机灵和罗森的固执	10
第三章	命运多舛的先行者韦伯	17
第四章	聆听天籁之音的韦斯	28
第五章	好赌的索恩与铁幕后的布拉金斯基	36
第六章	“外星人”来电中的引力波	43
第七章	随心所欲的德瑞福	52
第八章	枪口下的强迫婚姻	60
第九章	较真的加文和专断的沃格特	67
第十章	惊心动魄的外争内斗	75
第十一章	起死回生的接盘侠巴里什	83
第十二章	柱面引力波与激光干涉仪	89
第十三章	挑战前所未有的灵敏度	96

第十四章	超越国界的大协作	105
第十五章	新世纪的新一代	114
第十六章	南极上空的乌龙	122
第十七章	终识引力波真面目	131
第十八章	引力波带来的宇宙声光大秀	141
第十九章	天罗地网捕捉引力波	150
参考文献		160
注释		163
索引		173
彩图		

爱因斯坦的先知、失误和荒唐

当牛顿*坐在树下被掉下来的苹果砸了脑袋时，他突然领悟到苹果之所以掉下来，是因为地球对苹果有吸引力，这个“重力”促使苹果加速落到地面。

这多半只是一个美丽的传说。²但牛顿的确发现了“万有引力”——任何两个物体之间都存在着吸引力。将引力与牛顿同时发明的动力学三定律结合，不仅可以解释地球上苹果等物体的下落，还能准确地描述月球绕地球、行星绕太阳的公转，甚至预测、发现过去不知道的海王星、冥王星。这是 17 世纪物理学的顶峰。

万有引力定律很简单：两个物体之间的引力大小与它们的质量成正比，与它们之间的距离平方成反比。牛顿没有去深入探究一下，如果两个物体相距非常远，它们如何知道彼此的质量和距离？如果一个物体的质量变了或者挪近了一点，另一个物体怎么就会知道自己受到的引力应该不一样了？对于牛顿来说，这是不言而喻、理所当然的。³

直到 20 世纪初，爱因斯坦†觉得这很不可思议。传说他在阿尔卑斯

* Issac Newton

† Albert Einstein

山中开会，与一些大物理学家登山时曾对居里夫人*抱怨：你看我们从山下走到山上，地球的质量分布有了变化。如果月球上、火星上有智慧生物的话，他们通过测量地球引力的变化，马上就能知道有人上了山。这个信息的传递超过了光速，违反了相对论。

相对论是爱因斯坦在 1905 年建立的。当时他 26 岁，在瑞士专利局里打着一份小工。⁴ 相对论惊世骇俗，指出日常生活中习以为常的空间、时间是“相对”的，因人的所在而异：一个人看到一辆高速开过的火车中的距离会缩短（“尺缩”）、时间会变慢（“钟慢”）。而更有意思的是这个现象是反之亦然：火车里的人也会觉得站台上的尺子缩短了，钟变慢了。他们都没有错，只是时间间隔和空间距离在不同的参照系中不具有 consistency，是相对的。唯一例外的是光传播的速度：光速在所有的参照系中都是一样的、绝对的。而且，其他任何有实际意义的速度都不能超过光速。

这样一来，牛顿那不需要时间传播的引力便违反了相对论。因此，虽然相对论已经革命性地颠覆传统物理学的概念，爱因斯坦明白那还只是初步的结果，是所谓的“狭义相对论”[†]。

为了解决这个问题，爱因斯坦又花了整十年的时间，在 1915 年发表了“广义相对论”[‡]。这时，空间和时间不仅仅是相对的，而且不平坦、会弯曲。苹果之所以掉下来，月球之所以绕地球转，是因为地球附近的时空因为地球的质量而弯曲了。[§]还不仅仅是苹果、月球，就连光也会因为空间的弯曲而不走直线。

* Marie Curie

† special theory of relativity

‡ general theory of relativity

§ 严格来说，广义相对论之对于狭义相对论的推广不只是包含了引力，而是从所谓“惯性参照系”到“非惯性参照系”的推广。

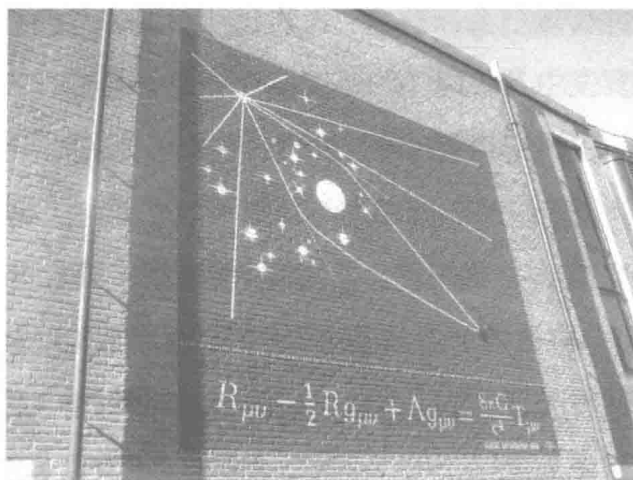


图 1.1 荷兰布尔哈夫科学博物馆 (Museum Boerhaave) 东墙上纪念广义相对论的壁画。上面是恒星光线因为太阳质量而弯曲的示意图，下面是广义相对论场方程

(来自维基百科网站, Vysotsky (Wikimedia) 提供) (后附彩图)

爱因斯坦用这新理论推算了水星公转轨道近日点的进动，成功地解决了观测结果与牛顿力学不符合的难题。1919 年，英国天文学家爱丁顿*通过对日全食时恒星位置的测量证实了光线的确因为太阳的质量而弯曲，符合广义相对论的“空间弯曲”预测。这个结果轰动一时。爱因斯坦一下子成为超越科学界的社会大明星。然而，当爱因斯坦和居里夫人从山下走到山上时，地球上这个变化的信息是如何通过弯曲时空传递到月球和火星的，却依然不明朗。



经典物理学在 19 世纪的一个伟大成就是麦克斯韦†在 1865 年以一组方程式统一了电和磁两种作用力，同时改变了人类的世界观：看不见摸不着的电磁场是一种物质存在；电磁场随时间的变化形成电磁波，可

* Arthur Eddington

† James Clerk Maxwell

以在空间传播并传输信息和能量。我们日常熟悉的光，就是电磁波。所有的电磁波在真空中具备同样的速度，也就是光速。

牛顿的万有引力定律与库仑*发现的两个电荷之间作用力的库仑定律在数学形式上完全一致：力都是与距离平方成反比，与物理性质——分别为质量和电荷——成正比。因此，当麦克斯韦揭示出电荷之间的作用是以电磁场、电磁波的形式传播时，人们自然而然地会联想，万有引力是不是也会以一种类似的引力场、引力波传递？即使在相对论问世之前，包括著名科学家庞加莱†在内的很多人已经做过这方面的推断和研究。

在广义相对论中，引力场是质量附近弯曲的时空。那么，质量的变化或运动势必会引起弯曲程度的变化，于是这随时间而起伏的弯曲变动便如同水面上荡漾的涟漪，不就是可以传递爱因斯坦登山信息的引力波吗？

只是直觉的图像不能代替严谨的逻辑。自从确立了广义相对论的场方程之后，爱因斯坦和他的同行们便孜孜不倦地试图从中寻找、推导出引力波的数学形式。却遇到未曾意料的困难。



广义相对论的场方程由十个非线性方程组成，几乎无法求解。只有德国物理学家施瓦西‡在最简单的条件下找出了一个精确解§。除此之外，只能用逼近修正的办法寻求近似结果，而如何找到合适的近似方式十分让人头疼。

1916年初，爱因斯坦给施瓦西写信时颇为悲观地叹道，“在引力场中

* Charles-Augustin de Coulomb

† Henri Poincare

‡ Karl Schwarzschild

§ 后来才知道他这个解对应于黑洞，只是当时还没有那个概念。

可能并不存在与光波对应的引力波。”他解释说可能的原因是电荷有正负之分，因此电磁力有时异性相吸，有时同性相斥。而自然界不存在负质量的物质，只有引力，没有斥力。正负电荷组成的偶极子的振荡正是产生电磁波最基本的方式，而引力场中却不存在这样的偶极子。⁵

不过也就在那年六月，爱因斯坦在柏林的普鲁士科学院*做报告时，宣布他已经通过一种近似方法找出了引力波的形式。与电磁波一样，引力波以光速传播。他说他一共得到三种引力波模式，其中两种不传输能量，可能没有意义。但第三种应该是实在的引力波。

可惜好景不长。一年后芬兰的物理学家诺德斯特龙†指出爱因斯坦的推导中有严重错误，结论并不成立。爱因斯坦知错便改，在1918年1月发表一篇题为《论引力波》‡的论文作了订正。⁶

1922年，相对论最卖力的“宣传部长”和捍卫者爱丁顿也对这问题感兴趣，自己钻研后发现爱因斯坦引力波的前两种模式的速度其实是无穷大，不由大乐。他嘲讽说引力波不是以光速，而是在“以人类的想象力（之速度）”传播。一时思想混乱。⁷

研究广义相对论动用的数学十分复杂，所需要的许多概念、工具当时还没有发展出来。包括爱因斯坦在内，大家都在盲人摸象般地探索。而与此同时，引力波依然虚幻飘渺。



十几年后，爱因斯坦为了躲避纳粹政权的迫害，离开了德国。他定居于美国的新泽西州，在新成立的普林斯顿高等研究院§继续学术研

* Royal Prussian Academy of Sciences

† Gunnar Nordstrom

‡ *On Gravitational Waves*

§ Institute for Advanced Study

究。1936年，他与年轻助手罗森*再次审度广义相对论场方程，结果出乎意料：他们居然从数学上证明了引力波根本无法存在——因为那会导致物理上不能成立的奇点。

他们立即写就一篇论文，送交美国权威的《物理评论》[†]杂志发表。标题就石破天惊地设问《引力波存在吗？》[‡]，而结论是否定的。爱因斯坦同时还写信给他的朋友、也已经逃离德国在英国定居的物理学家玻恩[§]通报这一“有趣的结果”。他说“虽然引力波被假设在第一近似条件下肯定存在，但其实不对。相对论的非线性场方程比我们现在所相信的要更复杂。”⁸

不到两个月，《物理评论》给爱因斯坦寄来了一份匿名的审稿意见，有十页之长。它指出了论文中的一些错误，并表明审稿者怀疑其中的推导和结论。《物理评论》编辑希望能看到爱因斯坦的回应。

正在湖边别墅度假的爱因斯坦看到这封信顿时火冒三丈。他大概压根就没有去看看审稿意见究竟有些什么内容，当即龙飞凤舞地直接用德文给杂志社写了一封简短回信：

亲爱的先生，

我们（罗森和我）给你们寄去论文是为了发表，并没有授权给你们在付印之前把稿件给专家看。我看不出有任何理由来回应你们那匿名专家的意见——反正那意见也是错的。因为出了这样的事，我准备把稿件改送其他地方发表。

* Nathan Rosen

† *Physical Review*

‡ *Do Gravitational Waves Exist?*

§ Max Born

尊敬地,【签名】

附笔:已经去了苏联的罗森先生授权我在这件事上代表他。

科学论文发表之前需要通过匿名的同行评议审查这个制度今天已经非常普遍,但在当时还属于新鲜事物。爱因斯坦在德国发表了大量论文的《物理年鉴》*那时没有这个制度。到美国后,他虽然已经在《物理评论》上发表过论文,但还从没有收到过反对意见。如此破天荒遭遇让他感到羞辱,便以为是杂志破了规矩。(其实,爱因斯坦离开德国前担任普鲁士科学院院长,曾经常为院刊审稿。当他看到他认为毫无价值的投稿时,也从来没有客气过。†)他说到做到,转身就把论文原封不动地寄往另一家小刊物《富兰克林研究所所刊》‡。

罗森在投稿后就去了苏联。接替他的是新到的英菲尔德§。虽然同样任助手,英菲尔德年近四十,已经不年轻了。他是因为在英国与玻恩合作的相对论工作引起爱因斯坦的注意而被他招募而来的。

英菲尔德第一天上班,就碰见爱因斯坦与意大利数学家列维奇维塔¶站在黑板前叽里咕噜地用“一种他们以为是英语的语言”讨论引力波。看着爱因斯坦“平静地”阐述着引力波不存在的缘由,英菲尔德大吃一惊。不过他很快说服了自己接受这个结论,还自己找出了一个证明办法。

后来英菲尔德在看球赛时遇到刚从加州理工学院||度完一年学术假

* *Annalen der Physik*

† 严格来说,那不是同行评议而只是专家评议。

‡ *Journal of the Franklin Institute*

§ Leopold Infeld

¶ Tullio Levi-Civita

|| California Institute of Technology

回来的天文物理学家罗伯森*，两人一拍即合成了好朋友。第二天，英菲尔德在数学系大楼见到罗伯森，得意洋洋地说他明白引力波为什么不存在。罗伯森自然不相信。两人仔细推敲了论证过程，罗伯森很快就找出了其中的毛病，令英菲尔德敬佩不已。他立即告知了爱因斯坦。爱因斯坦倒是回答说他也是刚刚发现了有问题。

巧合的是爱因斯坦已经安排好第二天在普林斯顿的学术例会上讲解他这个新成果。他一五一十地推演了引力波不能存在的“证明”后立即又坦承这个结论可能并不成立。他几乎自嘲地感慨道，“如果你问我有没有引力波，我只能说我也不知道。但这是一个非常有意思的问题。”[†]⁹



我们在地球上习惯用经纬度作为坐标系，球面上每一个点都有特定的经度和纬度。只有两个例外：南极和北极。在这两个点上经度完全没有意义，无法定义。这在数学上是奇点，但并不说明这两个位置不能存在。它们其实与地球上其他地方在几何上没有区别。如果我们换一下坐标或者方向，原来的极点就可以有“正常”的坐标值了。

爱因斯坦和罗森的错误属于同样的性质，只是其中的数学复杂得多。还是罗伯森进一步建议道：如果把论文中的平面坐标系改换成柱形坐标，那么不仅原来的奇点不复存在，还可以推导出引力波来——不过那不再是他们想寻找的平面波，而是柱面波。

这时候，《富兰克林研究所所刊》已经毫无悬念地接受了投交的论文并寄来排好版的清样请爱因斯坦校对。爱因斯坦也不含糊，直接就在校样上大刀阔斧，改得面目全非。因为结论已经完全相反，他干脆把原来

* Howard Robertson

† 这句话至今还经常被人援引作为爱因斯坦曾经怀疑引力波的证据。