



传播，以思想的速度

Daniel Kennefick

**TRAVELING AT
THE SPEED
OF THOUGHT**

*EINSTEIN AND THE QUEST
FOR GRAVITATIONAL
WAVES*

丹尼尔·肯尼菲克 著

黄艳华 译



上海科技教育出版社

哲人石
丛书

Philosopher's Stone Series

当代科普名著系列

传播， 以思想的速度

爱因斯坦与引力波

丹尼尔·肯尼菲克 著



上海科技教育出版社

图书在版编目(CIP)数据

传播,以思想的速度:爱因斯坦与引力波/(美)肯尼菲克(Kennefick,D.)著;黄艳华译. —上海:上海科技教育出版社,2010.12

(哲人石丛书.当代科普名著系列)

ISBN 978-7-5428-5132-1

I. ①传… II. ①肯…②黄… III. ①重力波—研究
IV. ①0412.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2010)第 230008 号

对本书的 评价

在这本书中，肯尼菲克描述了三代物理学家为揭示相对论所预言的引力波而进行的历时 70 年的探索。凭借他那历史学家般的技巧、他对相对论的精通和出色的叙事能力，肯尼菲克编织了一个关于智力较量和数学格斗的扣人心弦的故事——同时概括出一些引人入胜的洞见，涉及数学、直觉、类比、风格、证明的标准等各因素的作用以及学术竞争的社会学。

——索恩(Kip S. Thorne)，
加州理工学院

这本书对爱因斯坦研究，以及对普通物理学史都有很重要的促进作用。对于正在进行的探测引力波的尝试也是很适时的。作者以独一无二的视角讲述了这个故事。作者与研究爱因斯坦的学者团体、过去和现在工作在引力波领域的物理学家以及从事这一学科史研究的人都有极为紧密的联系。

——詹森(Michel Janssen)，
明尼苏达大学

这本书是一项令人印象深刻的成就。肯尼菲克巧妙地把现代物理中源于爱因斯坦引力波理论的最深奥但极有趣的概念介绍给读者。他描绘了近一个世纪的历程中，一些常常是偶然的、曲折的、有时又有争议

的想法的发展过程。这本书不仅是一部智力史,也是一个探索故事。披露的线索、个人的洞察力、公共机构的演变、个体的作用和苦苦的思索等等相交织,读者可以了解理论物理学家是如何工作的。直到现在,实际上我们并没有认真研究过在爱因斯坦发表了他那著名的方程之后,他的广义相对论发生了什么。肯尼菲克是首批续写这个故事的人之一。

——凯泽(David Kaiser),《掀开理论的
帷幕:战后物理学中费恩曼图的弥散》
一书的作者

内容提要

自爱因斯坦近一个世纪前第一次描述引力波以来,引力波问题遭遇了可能是物理学史上最持久的争议。到目前为止,尚未探测到这些由爱因斯坦的广义相对论首先预言的时空波动,只是在21世纪初的今天,我们才终于快有可能观测它们。

爱因斯坦的理论发表后,理论论战和棘手的辩论一直伴随着引力波这一课题,肯尼菲克这部划时代的著作将带领读者了解这段历史。那些鲜为人知的关于我们如何获得引力波定论的故事,涉及一系列20世纪物理学的一流人物,包括费恩曼、邦迪、惠勒、索恩和爱因斯坦本人,爱因斯坦曾两次宣称引力波不存在,但又两次改变了自己的想法。

本书的书名来自爱丁顿在1922年作出的一个著名的怀疑论的评论——“引力波以思想的速度传播”。肯尼菲克以这个书名,来隐喻每一个物理学家设法解决引力波问题时所表现出来的个人的卓越才华,同这个领域那令人沮丧的整体进步迟缓所形成的鲜明对照。

本书以新的眼光看待与引力波故事有关的种种麻烦与冲突,通过直接确证引力波的存在而第一次为其画上了一个圆满的句号。

作者简介

丹尼尔·肯尼菲克 (Daniel Kennefick), 1997年于加州理工学院获物理学博士学位, 现任美国阿肯色大学物理系助教, 主要研究引力波物理学以及现代物理学史。肯尼菲克博士还是LISA国际科学小组的成员, LISA是美国宇航局的一个项目, 目标是在太空运行引力波探测器, 国际科学小组为该项目提供理论指导。肯尼菲克博士也是《爱因斯坦全集》(*The Collected Papers of Albert Einstein*)(普林斯顿)的一名编辑, 该项目致力于出版爱因斯坦的全部文稿并对其20世纪20、30年代的研究论文进行分析。

献给我的父母

丹·肯尼菲克 (Dan Kennefick)

和

莫拉·肯尼菲克 (Maura Kennefick)

致谢

写这本书的主意来自我的物理学导师、加州理工学院的基普·索恩(Kip Thorne),他部分参与了本书中讨论的几个大辩论,并觉得应该有人来讲述这个故事。很幸运,我有一个很开明的导师,对各种思想都能包容,这使得我能够将物理学研究与科学史的相关工作结合起来。我的双倍的幸运还在于找到了一位历史学导师,戴安娜·布赫瓦尔德(Diana Buchwald),因为她能给我这个新手提供如此多的资源,戴安娜现任爱因斯坦全集项目的主编,正致力于《爱因斯坦全集》的编辑工作。在我完成学位论文之后,与加迪夫大学的柯林斯(Harry Collins)进行了为期两年的合作,这使我受益匪浅,他是《引力的阴影》(*Gravity's Shadow*)一书的作者,该书讲述了引力波物理实验的历史。

戴安娜确保我在早期从《爱因斯坦全集》的第一任编辑施塔赫尔(John Stachel)那里得到了许多有价值的建议。彼得·豪沃什(Peter Havas),另一位转自物理学家的历史学家,像基普一样作为主要角色参与了我研究的这段历史,他最初怀疑以我的背景和经验能否客观地讲述这个故事。然而,这并没有影响他以各种可能的方式亲自以及通过写信向我提供帮助。

我尤其需要对同意接受我采访的众多物理学家表达谢意,在此一并致谢。在本书的结尾,我列出了一个采访表,并列出了采

访时间。这些采访均为本书提供了重要的资料,即使未直接引用的采访也是如此。完成这些采访工作得到了国家科学基金的一个博士论文改善助学金项目的资助。

许多人友善地阅读了手稿并提出了很多有益的建议,在此表示感谢,其中特别要感谢的是克里格(Martin Krieger)、普瓦松(Eric Poisson)、索尔(Tilman Sauer)、詹森(Michel Janssen)和凯泽(David Kaiser)。

我要感谢耶路撒冷的希伯来大学阿尔伯特·爱因斯坦档案馆准许引用爱因斯坦(Albert Einstein)的信函。感谢加州理工学院同意我引用罗伯逊(Howard Percy Robertson)的信件及他们收藏的理查德·费恩曼(Richard Feynman)的一封信。同时感谢他们同意我全文引用罗伯逊对爱因斯坦和内森·罗森(Nathan Rosen)的论文的审稿报告,附录 A 即为该报告的副本。我还要感谢米歇尔·费恩曼(Michelle Feynman)允许我引用她父亲的信函。数学家小约翰·泰特(John Tate, Jr.)友善地允许我引用他父亲的信件,为此向他表示感谢,还有内森·罗森的两个儿子,乔(Joe)和戴维·罗森(David Rosen),同意我引用他父亲写给爱因斯坦的信函,在此深表谢意。

我的妻子朱莉娅·肯尼菲克(Julia Kennefick)审阅了手稿全文,并自始至终对这项研究给予了不断的鼓励和建议。最后,我要感谢我的父母,丹和莫拉·肯尼菲克,没有他们的爱和鼓励,我可能永远也不能开展这项工作,谨以此书献给他们。

目 录

致 谢

第一章 引力波类比	1
第二章 爱因斯坦之前的引力波	21
第三章 引力波的起源	45
第四章 思想的速度	73
第五章 引力波存在吗?	87
第六章 引力波及广义相对论的复兴	117
第七章 类比法辩论	139
第八章 运动问题	161
第九章 怀疑论者的肖像	201
第十章 接近探测的边缘	227
第十一章 四极公式争议	259
第十二章 跟上思想的速度	291
附录 A 审稿人的评审报告	315
附录 B 采访及其他新的资料	323
注释	325

第一章

引力波类比

在 21 世纪的最初几年里，几个大型的引力波探测器陆续投入运行，这是第一批引力波观测站。要说到这些探测器的身世，可追溯到 40 年前。在 1960 年前后，在马里兰大学工作的美国物理学家韦伯(Joseph Weber)第一次开始尝试引力波的实验探测。直到 1969 年，引力波探测这个“领域”中，还只有韦伯和他的学生，但当他宣称已经探测到引力波时(韦伯，1969)，其他人(其中有些人原来就考虑过做这个课题)也开始着手建造他们自己的设备。结果证明，这是个错误的开始。这个富有争议的插曲持续了好几年，所有新的探测器小组都没能用他们自己的装置再现韦伯的结果(柯林斯，2004)。虽然起步备受争议且充满曲折，但多数研究小组仍然在这个领域中坚持下来，进行了几十年的艰苦努力，并尝试了很多种实验装置。现在普遍的预期是，将在 10 年内首次直接探测到引力波。

对引力波探测这一尝试的最热情的支持者之一是索恩，他曾打赌在 20 世纪末就会探测到引力波，这件事也反映了在引力波探测初期人们对此可能抱有的看法。在 1981 年要找下个下注的人并不困难，这个肯下注的人就是天文学家奥斯特里克(Jeremiah Ostriker)，对于当时提出的大型探测器计划，他是有名的反对者之一，而索恩则是最大型的新探测器项目——5 亿美元的激光干涉引力波观测台(也称为 LIGO)的重要支持者之一。当然，索恩赌输了，记录就贴在加州理工学

院桥形建筑(桥楼)的西侧走廊,索恩办公室的外面,它旁边是超过半打的索恩和他的同事间的其他赌局[索恩的赌伴中最著名的是霍金(Stephen Hawking)],这些赌局中的大多数都是索恩赢了。在他的认输记录上写着:“我低估了 LIGO 完成观测所需的时间。”他和其他人设法使 LIGO 成为现实,在考虑到这个领域充满争议的历史的时候,可以想象这并非易事,尤其是争论存在于整个领域而不仅仅局限于实验方面。引力波理论的争议由来已久,有个错误的开始,又屡屡受挫。很多理论家甚至怀疑过这种波是否真的存在。爱因斯坦于 1916 年创立了引力波理论,但即使是他本人也曾至少两次站到了怀疑者的行列中。这种争议如何逐步变成了对理论的信

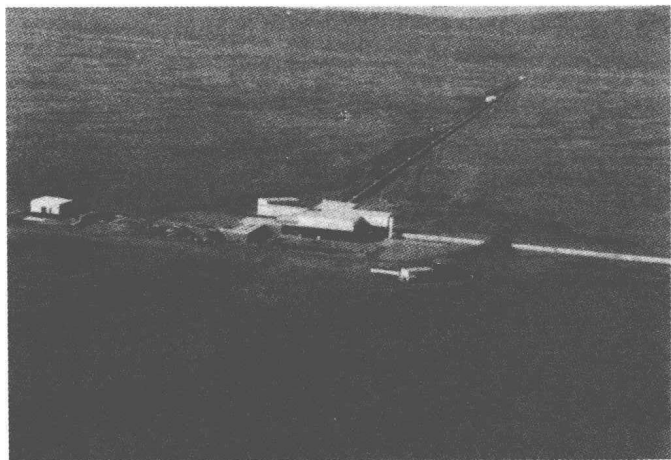


图 1.1 华盛顿汉福德的 LIGO 装置,它是 LIGO 系统的两个分立探测器中的一个。这个激光干涉引力波观测台主要由两个 4 千米长的管道组成,激光在管道中被激发并沿着管道在高品质的镜子间来回反射。光沿着管道传播所用时间的任何改变都是引力波通过的可能证据。可以看到两个管道中的一个伸向远处。(承蒙 LIGO 实验室惠允)

心和对实验装置必要性的认同,并促成了今天的了不起的大项目,这正是本书的主要内容。

在韦伯的探测结果备受争议的这段时间里(20世纪70年代初期),物理学领域对引力波有种矛盾的情感。《20世纪70年代的天文学和天体物理学》(*Astronomy and Astrophysics for the 1970s*)是一份来自美国科学院的报告,下面引用的是其中与韦伯宣布的发现有关的评论,从中可以看出当时的这种矛盾状态。这个报告写于1971年,是随后10年美国政府基金管理机构,特别是国家科学基金会的指南:

能够作为独立实体运作的类似“引力场”的东西是否存在,是与引力波的探测直接相关的问题。所有活跃着的引力理论都涉及引力场这个概念,所以仅仅是引力波存在并不能排除这些理论中的任何一种。因此,这种基本的场的假设在没有任何观测结果支持的情况下被普遍接受了。只有在与最深层的和最基本的假说有关的情况下,科学家中才会出现这样的盲从,因为他们没有办法以同样详尽和一致的方式做出不同的思考。19世纪在实验结果否定以太而证实原子存在之前的几十年时间内,类似的态度导致了对以太和原子的普遍接受。

迄今,所有物理学的基本形式都是在场的概念基础上建立起来的,场代替了不复存在的以太而出现在电磁场理论中。在实验和工业应用中进行检验时,发现这种场的思想具有如此强大的说服力,于是科学家们试图把所有其他已知的物理学的基本领域都以同一个模式包装起来。场论在电磁场中毫无争议地获得了成功。场的概念已经成功地应用在粒子物理学中的很多方面,但仍然还有很多未解的难题。证实引力波的实验将会表明,场的概念至少在另一个习惯地使用这个概念的领域,即引力现象中也是适用的。(第282—283页)

在 20 世纪 70 年代初期,虽然还未得到任何物理证据的支持,但相信引力波存在在大多数物理学家中非常盛行。这是因为,除了与描述电磁理论的场论类比之外,他们看不到构建引力模型的其他任何方法。1916 年,在发现广义相对论的场方程组后不久,爱因斯坦成为完全采用引力场论描述引力波的第一人。从他这种描述引力波的方法开始,相对论理论家们开始寻求与电磁场理论的各种类比,他们试图在没有实验证据的情况下去构建引力波理论。在这个过程中,对引力波现象的理论描述产生了争议,甚至对这种理论是否真的预言了引力波的存在也产生了争议。一些相对论者认为,这种类比虽然增加了对引力波的传统图像的信心,但并不足够,考虑到前面的怀疑,这一观点就不奇怪了。有些人由于怀疑而公然反抗公众对假说的一致理解,审视那些人的观点是非常有趣的,没有这种假说,现代物理学家们就没有“以一种……详尽和一致的方式……进行思考的能力”。

“没有观测结果支持”的科学是如何得到普遍地或至少是“一般性”地认同的?对大多数人来说,不管他们是科学家还是非专业人士,这听起来似乎都相当地不科学。可是,在科学界这种情况实际上并不罕见,因为它确实会发生。为了对所观察到的现象提供一个根本的解释,就要设计一个非常有用的概念(比如力“场”的概念),而它本身并不需要被检测或是可被检测的。引力波的情况有些不一样,这里发生的由场概念导致的对物质的影响之类的现象应该是可被探测的。然而,几十年来,从来就没有探测到过这种现象,甚至连间接的证据也没有,但人们还是普遍坚信它的存在。这种信念的背后必定还隐含着一些更为强大的动力,如果我们去寻找就会发现,这种惊人般顽强的科学信念背后的力量就是类比。具

体地讲，此处所讨论的就是引力场和电磁场之间的类比，引力场是现代引力理论（广义相对论）的基础，电磁场起源于19世纪法拉第（Michael Faraday）和麦克斯韦（James Clerk Maxwell）的工作，也是现代物理学的核心。麦克斯韦理论最引人注目的地方就是预言和证实了无线电波的存在，它是包括光本身在内的电磁辐射谱的一部分，电磁波在麦克斯韦及其后继理论中扮演了重要的角色。此处基本的类比是，如果用场论来描述引力，那么像麦克斯韦理论中的电磁波那样，在引力理论中是不是应该存在扮演重要角色的引力波？

场概念的历史本身就充满了争议，主要是来自类比的争论。当电磁辐射的思想被广为接受时，19世纪的物理学家们就会自然地将其与像声音这样的其他波动现象进行类比。声波使人想到波需要由介质（比如声波需要空气作介质）来传播。没有介质就意味着没有波。在19世纪，场的概念与以太的思想联系在一起。以太是一种充满整个空间，且具有奇异性质的不可见物质；它是电磁场的介质或载体。在20世纪初期，旧的以太理论被彻底抛弃，我们如今所说的电磁波确实有介质，这种介质就是电磁场，它是一种实体，但并不是物质世界的一部分，虽然它当然是由形成物质世界的粒子所产生的。电磁场只能由带电粒子产生，但是由于有能量就有质量，所以物质世界中的所有粒子都会产生引力场。当然应当记住，粒子本身被理想化是为帮助物理学家在他们的方程组中设计物质模型。从某种意义上讲，我们并不是像对实物那样去直接观察场，而是观察它们对我们周围物质的影响。因此，到目前为止，对我们来说，电磁波仅仅在这种情况下才是存在的：当它经过时，我们手边有些设备可以从中吸收能量。

那么，像力场这样的高度抽象的思想怎么会在物理学中扮演了如此重要的角色呢？这是一个阶段性发展的过程，在

每一步进展中,其抽象程度都在不断地增加。这种发展与数学在物理学中越来越占有支配地位是密切相关的。比如在牛顿(Newton)之前,曾经认为物理学并不是一个非常适于应用数学的学科,物理学起初只是用来解释事物特性的学科。自牛顿以来的现代物理学的一个特征就是,学科的数学化程度在逐步增加。实际上,和牛顿在《原理》(*Principia*)中提出万有引力理论一样,爱因斯坦广义相对论的提出在这个数学化的进程中也扮演了重要的角色。这种抽象性不断增加的一个非常重要的原因就是创造性地使用了类比。例如,在古代,古希腊哲学家和古罗马机械师们提出,声音是一种在空气中传播的波,他们将之与波在水面上的运动进行了类比。经过亚里士多德(Aristotle)的物理学,这个概念进入到了中世纪的物理学。在牛顿时代,通过同时代的惠更斯(Christiaan Huygens)的工作,又是在19世纪,基于与声音传播的类比,人们提出光也是一种波动现象。在这个阶段,类比已经变得更加远离与之相比较的直接的物理对象,因为光的波动理论的提倡者更倾向于与声音比较而不是直接与水波比较。电磁辐射的麦克斯韦理论主要应归功于麦克斯韦、赫兹(Heinrich Hertz)和其他一些人的工作。随着这一理论的发展,在19世纪的下半叶,与直接物理经验的脱节进一步增强。在20世纪的第一个10年,当早期的相对论理论家们假设在引力场论中可能存在引力波的时候,又进一步增强了这种抽象。他们把类比建立在电磁波的基础上,这与我们在水的表面可以实际看到的那种波已经相差几个阶段了。而且,在这种情况下,类比已经延伸到用来预测而不仅仅是解释新现象的存在了。20世纪物理学变革的一些大的驱动力来自新类型辐射和新粒子的发现,然而,在这个世纪的大部分时间里,引力波还是依旧没有着落,虽然被预言但却未被观测到。