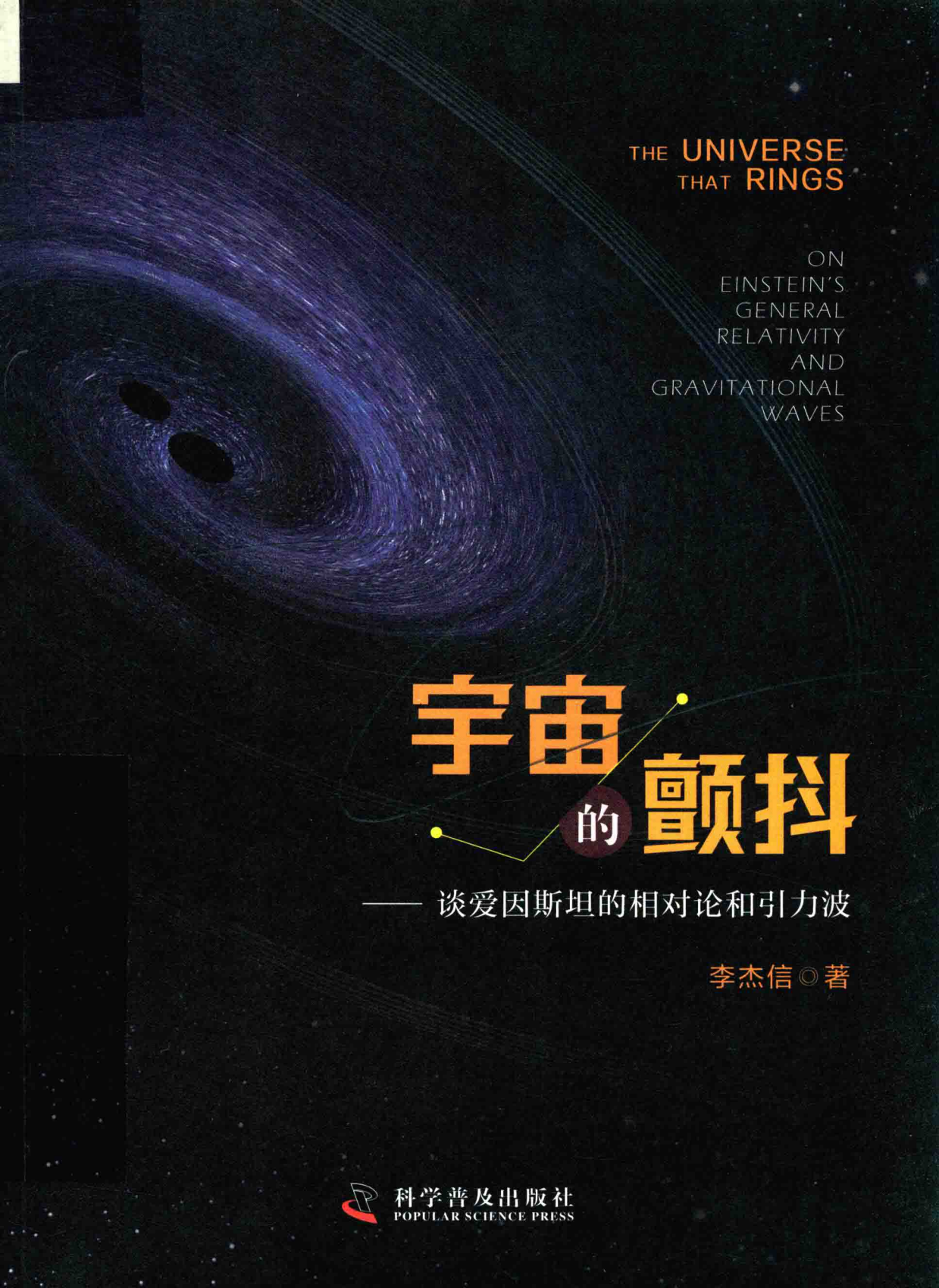




THE UNIVERSE
THAT RINGS

ON
EINSTEIN'S
GENERAL
RELATIVITY
AND
GRAVITATIONAL
WAVES

宇宙 的 颤抖

——谈爱因斯坦的相对论和引力波

李杰信◎著



科学普及出版社
POPULAR SCIENCE PRESS

宇宙的颤抖

——谈爱因斯坦的相对论和引力波

李杰信◎著

THE UNIVERSE
THAT RINGS

ON
EINSTEIN'S
GENERAL
RELATIVITY
AND
GRAVITATIONAL
WAVES

科学普及出版社

·北京·

图书在版编目（CIP）数据

宇宙的颤抖：谈爱因斯坦的相对论和引力波 / 李杰信著.
—北京：科学普及出版社，2018.7
ISBN 978-7-110-09843-1

I. ①宇… II. ①李… III. ①相对论—普及读物②引力
波—普及读物 IV. ①O412.1-49 ②P142.8-49

中国版本图书馆 CIP 数据核字（2018）第 128565 号

著作权合同登记号：01-2018-2690

本书简体中文版由台湾大学出版中心授权科学普及出版社独家出版，未经出版者许可不得以任何方式抄袭、复制或节录任何部分。

责任编辑	单 亭 崔家岭
装帧设计	中文天地
责任校对	焦 宁
责任印制	马宇晨

出 版	科学普及出版社
发 行	中国科学技术出版社发行部
地 址	北京市海淀区中关村南大街16号
邮 编	100081
发行电话	010-62173865
传 真	010-62173081
网 址	http://www.cspbooks.com.cn

开 本	787mm × 1092mm 1/16
字 数	160千字
印 数	1-5000册
印 张	11.25
版 次	2018年7月第1版
印 次	2018年7月第1次印刷
印 刷	北京盛通印刷股份有限公司
书 号	ISBN 978-7-110-09843-1 / O·190
定 价	59.00元

（凡购买本社图书，如有缺页、倒页、脱页者，本社发行部负责调换）



李杰信

李杰信，美籍华裔科学家，美国国家航空航天局（NASA）太空任务科学家。2018年4月30日由华盛顿美国国家航空航天局总部退休。

李杰信，生于中国黑龙江省牡丹江，台湾大学物理系毕业，获美国洛杉矶加州大学物理学博士，后在职进修获麻省理工学院科技管理硕士。先进入美国加州理工学院喷气推进实验室从事太空研究，后调任华盛顿美国国家航空航天局总部，负责管理太空科学飞行实验任务。美国国家航空航天局给李杰信的退休赠言：感谢40年来对美国航空航天局在科研上的领导和巨大的贡献。

李杰信工作出色，曾荣获美国国家航空航天局“杰出成就奖章”“杰出服务奖章”“银斯努匹奖”、第一届太平洋盆地国际太空年“松长纪念奖”。在中国台湾，曾获“李国鼎通俗科学写作第一奖”“优良图书金鼎奖”和台南第一中学“杰出校友奖”等奖项。李杰信管理的太空飞行实验项目，有8位诺贝尔奖得主参与。在国际太空合作领域，他是一位具知名度及影响力的人物，并拥有9项美国专利、发表过90多篇科学及科技管理论文。

李杰信热心投入科普教育，在美国创立了美国促进中国科普协会并出任会长，致力推动青少年科普活动；曾举办两届中国青少年航天飞机科学实验活动，5位中国内地和香港青少年航天爱好者设计的太空实验搭载，在1992和1994年，成功地乘坐美国的航天飞机飞上太空。

李杰信是一位科普知识传播者，经常受邀在美国和中国大陆及台湾地区中学、大学和社会团体做科普演讲；同时，也受邀在中央电视台、凤凰卫视、东森电视台以及众多平面媒体开展科普活动。李杰信还是一位热情的科普作家，曾在海峡两岸出版了数部科普作品，如《追寻蓝色星球》《我们是火星吗？》《生命的起始点》《别让地球再挨撞》《天外天》《宇宙起源》以及《宇宙的颤抖》。曾担任中国台湾《中国时报》“浮士绘”和中国大陆《中国科技财富杂志》专栏作家。



爱因斯坦出生于德国南方多瑙河畔小城市乌尔姆（Ulm），他出生的房子于1944年12月第二次世界大战中毁于战火，现仅立一座纪念碑，上面写着：原本矗立在此的房子是1879年3月14日爱因斯坦的出生地。

（李杰信摄于2017年3月11日）

序

——丘成桐

杰信是内人在台湾大学的同学，我们认识很久了。他任职美国航天总署多年，在太空科学深耕细种，以其独到的见解获奖无数，尤其值得敬佩的是，杰信有暇时从事科普写作，对于喜爱科学的普罗大众，有莫大的裨益。最近他写了一本书，名叫《宇宙的颤抖》，由另外一位物理学家，也是内人的同学朱国瑞转赠给我，我读了以后，惊喜莫名，光从书本的名字就可以窥见作者的卓识。我研习广义相对论已经四十多年了，初次看到物理学家用这么客观的态度和漂亮的文笔，深入浅出地介绍广义相对论，不但是从物理学的观点讲述广义相对论的起源和它的物理意义，更难得的是作者也中肯地指出数学家在广义相对论上的重要贡献。

爱因斯坦 1915 年的伟大工作，曾得到不少几何学家的帮助，这是我多年来深深的体会。除了书中提到的 Grossmann 和 Hilbert 外，还要溯源到 19 世纪大数学家黎曼对于空间概念的划时代贡献。在黎曼以前，空间只有三种：欧氏空间、球空间和双曲空间，都可以用一个坐标系来描述。黎曼却在 1854 年的著名论文中彻底地改变了空间的观念，他的空间和上述三种空间完全不同，它可以孤立地存在，在小范围内，它和欧氏空间类似。我们可以用各种不同的坐标系去描述黎曼空间的特性，但空间里有意义的性质必须和坐标选取无关。这个看法很重要，因为这就是广义相对论中重要的等价原理。黎曼在他引进的抽象

丘成桐：国际知名数学家，美国科学院院士、中国科学院外籍院士。

空间中定义了曲率，广义相对论中的重力场就是由曲率来量度的，而物质的分布则是由曲率的一部分来表示。物质的分布随时间的推移变化，曲率也随之，这些变化使时空“颤抖”，爱因斯坦从此得出结论：引力波虽然微小，却会出现。在爱因斯坦方程的描绘下，引力场和时空的几何不可分割，俨然一物。

值得注意的是，黎曼当时已经指出，他的空间是用来了解物理现象的。他甚至提出空间中极小的和极大的部分应该用不一样的方法来描述。从近代物理的观点来看，黎曼在找寻量子空间的可能结构！黎曼曾经考虑过离散空间对解释这个问题会不会有帮助。黎曼从 25 岁开始著作，39 岁时得了肺病去世。去世前三年，他每年要到意大利去避寒，因而影响了一批意大利和瑞士的几何学家，其中出色的有 Christoffel, Ricci 及 Levi-Civita 等。他们推广了黎曼的想法，严格定义了张量和连络，两者都是广义相对论和规范场不可或缺的。Ricci 引进了 Ricci 曲率张量，并且证明从这个张量可以产生一个满足守恒定律的张量。这些工作都是由几何学家在 19 世纪中叶到后叶完成的，恰好给广义相对论提供了最主要的工具。

爱因斯坦在 1934 年写了一篇文章“Notes on the Origin of the General Theory of Relativity”（见 *Mein Weltbild*, Amsterdam: Querido Verlag），在这篇文章里，他回顾了发展广义相对论的心路历程。第一阶段当然是狭义相对论，这个理论的主要建构者除了爱因斯坦本人外，还有 Lorentz 和 Poincaré。一个极为重要的结果是距离受到时间的影响。但是爱因斯坦已经了解到狭义相对论和牛顿引力理论的 *action at a distance* 是不兼容的，所以必须要矫正！刚开始物理学家没想到空间的概念经过黎曼的突破后已经有了根本性的改变，他们还在三维空间的架构上，企图修正牛顿的引力理论来符合刚发现的狭义相对论。这个想法让爱因斯坦误入歧途三年之久！爱因斯坦在苏黎世读书时，他的数学教授是和 Hilbert、Poincaré 齐名的 Minkowski。他说，我班上有

个懒惰的学生最近做了一个重要的工作，让我用几何的观点去解释它。在 1908 年的论文中，Minkowski 构造了一个四维空间，参照黎曼的方式引进了一个度量张量，完美无缺地解释了狭义相对论。狭义相对论中对称群很自然地成为 Minkowski 空间的对称群。

这篇文章让人类第一次晓得我们生活在四维时空中。爱因斯坦 1908 年得到他一生最重要的启示，他看到 Minkowski 论文的重要性。一般认为爱因斯坦在这年最重要的思想是他的 thought experiment。这个当然重要，但是我认为这是爱因斯坦在企图消化 Minkowski 理论的一个心路过程！为什么 Minkowski 的文章这么重要？从三维空间到四维空间，不单是概念上的一大跃进，有了四维空间，新的引力场才有足够的空间来展现它的动态现象。牛顿的引力理论是静态的，只要一个函数就足够描述引力现象。Minkowski 却指出了一个新的观点，即我们需要用一个张量才能完满地描述引力场。Minkowski 的张量完美地描述了狭义相对论，但爱因斯坦要进一步将牛顿力学和 Minkowski 空间结合，所以他想象中的时空在极度小的范围内必须和 Minkowski 的张量相当。当时物理学家对张量的观念一无所知（事实上也只是一小部分的几何学家懂得张量分析）。爱因斯坦从等价原则中隐约地知道他需要类似张量的工具，但是并不清楚。于是他向同学 Marcel Grossmann 求救，终于搞清楚引力场应该由尺度张量来描述。这个张量在时空中不断变化，但是在每一点上，它可以由 Minkowski 尺度作一阶逼近。Grossmann 是学几何的，他念大学时曾经帮助爱因斯坦做数学习题。但是单引入尺度张量这个观念还是不够描述引力场，我们需要知道如何在非平坦的空间里进行微分，同时要求微分的结果和坐标选取无关（等价原则的要求）。这就是 Christoffel 和 Levi Civita 的联络理论。爱因斯坦在他上述的广义相对论的回忆录中说这是他的第一个问题，发现早已被 Levi Civita 和 Ricci 解决了。爱因斯坦第二个问题是在这个框架上，如何推广牛顿的引力方程。牛顿

的方程很简单，即引力势的两次导数等于物质密度。当时爱因斯坦和 Grossmann 都不知道如何对尺度张量微分，使得出来的结果和坐标选取无关，即是说，它必须要是某种张量。在爱因斯坦的苦苦要求下，Grossmann 勉为其难，终于在图书馆里找到了 Ricci 有关张量的文章，原来 Ricci 早已将黎曼的曲率张量收缩成为一个对称的二阶张量，它和尺度张量有相同的自由度，可以看做是尺度张量的二次微分。爱因斯坦知道后欣喜若狂，将它看作方程的左手部分，右手部分则是一般物质分布的张量（在平坦空间上，这个张量早已发展成熟）。于是乎爱因斯坦和 Grossmann 于 1912 年和 1913 年发表了两篇文章，提出了这个方程式。

好事多磨，当爱因斯坦尝试用渐近方法来解这个方程时，却得不到他企图解释的天文现象，这使他很沮丧。在往后的一段日子中，为了解释天文现象，他尝试选择特殊坐标，实质上放弃宝贵而简洁的等价原则。他和 Levi Civita 多次通信，都无济于事。直到 1915 年春，他到哥廷根访问伟大的数学家 David Hilbert 时，情况才有了新的进展。Hilbert 当然深懂几何学，但是最重要的是他是现代几何不变量理论的创始人。围绕着他的都是一代大师，除了 Felix Klein 擅长于用对称群来分类几何学外，Hilbert 的学生 Hermann Weyl 是规范场理论的奠基人，还有历史上最伟大的女数学家 Emmy Noether，当时也在哥廷根，正在发展以后以她命名的 Noether current 理论。爱因斯坦的访问可谓适逢其会！Hilbert 在同年十月就发现了 Hilbert action，从这个 action 很快便能推导出正确的引力方程。爱因斯坦在得知这个消息和收到 Hilbert 的明信片后，也很快地得到了他的方程，并且基于这个方程，推算出他一直想解决的天文问题。开始时，爱因斯坦对 Hilbert 的捷足先登很不高兴，但是 Hilbert 很快地宣布这个工作应该完全属于爱因斯坦，爱因斯坦才转忧为喜。这是划时代的工作，后世的物理学家和数学家都应该向爱因斯坦致以最崇高的敬意。但是希望大家不要忘记一

批几何学家背后的功劳！我讲的大部分都在上述的爱因斯坦文章提到，可惜的是他没有提到 Hilbert 的贡献。

值得注意的是，爱因斯坦和 Grossmann 1912 年写下的方程，在没有物质分布的时候，其实是正确的。他们大可以用这个方程推导出 Schwarzschild 的著名的方程解，这个解已经足够爱因斯坦做他要的天文计算了。从这里可以见到 Grossmann 对广义相对论的贡献是极为重要的，可惜他的名字没有得到应有的注意，我觉得这是不公平的。但是有一点也要怪 Grossmann 自己不用心，他没有仔细参考文献。其实 Ricci 早已发现爱因斯坦方程的左手部分，并且知道只有这样的组合才能满足守恒定律。守恒定律是物理上极为重要的定律，毕竟方程的右手部分已经知道满足守恒定律，所以左手部分也必须满足它。从这个角度看，这个方程应该在 1912 年前就可以被发现。之所以没被发现，是因为爱因斯坦没有深入去了解 1912 年的方程左手并不完美，而坚持解释物理现象比了解几何的内在美更为重要。

完成广义相对论后，爱因斯坦改变了他的观点，现在他认为物理学最基本的部分应该由数学和 thought experiment 来指引。他在文章结尾时说，找到广义相对论的方程后，一切都来得这么自然，而又这么简单，对一个有能力的学者来说，是轻而易举的事。但是在找到真相前，他费尽心思，经过长年累月的努力，饱受日夜的煎熬，其中艰辛实不足为外人道。爱因斯坦这项工作可说是人类有史以来最伟大的科学工作，这段经历由杰信这本书娓娓道来，对于一般有志于科学的朋友来说，定会启发良多，我很乐意地推荐给大家。

2018 年 2 月

自序

爱因斯坦的相对论可能是人类有史以来最美丽而又极深奥的物理理论。但是作为一个一般的读者，很难读到一本比较深入浅出，又能全面介绍爱因斯坦相对论的科普书籍。

市面上介绍爱因斯坦相对论的科普书籍，内容不是太过简单，就是太过深奥，两极分化严重。内容简单的书，和我看过的那十本（包括霍金的两本《时间简史》）一样，讲的都是读者早就知道的事情，读者不懂的地方仍然没有提及，还是让人搞不清楚。内容深奥的，往往直接以爱因斯坦的场方程张量数学开场，第一行还能勉强看下去，但第二行中的专家术语迅速地给读者当头一棒，瞬间浇灭了学习的热情。

即使以简单易懂为目的的相对论科普书籍，也不容易阅读。主要困难在于介绍爱因斯坦的一些核心思维时，常以孤立的形式出现，未能与他的整体思维发展进程为主轴，先来后到，抽丝剥茧，使读者的理解能找到每个时期的关键点，循序渐进，获得知识融会贯通的喜悦和满足。

于是，我就开始鼓励自己去写一本介绍爱因斯坦相对论的科普书，内容走中间路线，介于浅深之间，使热爱知识的读者，也是我的知音们，和朋友闲聊时能和我一样，能全方位地使用专家科普术语侃侃而谈相对论。当然更重要的，我希望读者们能和我一样，从人类智慧结晶的爱因斯坦相对论中，感受到知识斩获的无比满足。



我的信念是：以高层次科普角度来全面理解爱因斯坦相对论，并不是不可能完成的任务。

在我的想象中，一直把爱因斯坦弯曲的几何四维时空，当成一种数学上的便宜，从没认真地考虑过它也可能是真实的宇宙结构。从目前人类侦测到的引力波证明，爱因斯坦的四维时空真实存在的程度，几乎就像金属材料或是钻石晶体，已经到了能用手触摸得到的地步。

回首一望，人类对宇宙的理解，从百年前的静态，经过 60 多年的膨胀，在 21 世纪初进入了加速膨胀的黑暗宇宙。而爱因斯坦的相对论，虽出世于静态宇宙的年代，却在 100 年后的今天，人类发现，它竟然包容了被黑暗能量掌控的加速膨胀宇宙的内涵。爱因斯坦的相对论真神奇，经历了 100 年的严格验证，依然波涛壮阔，历久弥新。

2015 年 9 月 14 日，人类直接侦测到爱因斯坦 100 年前就预测的引力波。引力波的幅度其实就是一丝丝微弱的宇宙颤抖，但它强悍到给了我极大的震撼，激发出了写出这本书的能量。

直接侦测到引力波发现，获 2017 年诺贝尔物理奖。

感谢德国乌尔姆（Ulm）大学希来奇教授（Professor Dr. Wolfgang Schleich）和埃夫雷莫夫博士（Dr. Maxim Efremov）给予作者对相对论理论的咨询。在此并感谢刘凤川博士和王海燕教授的技术审读。

导 读

爱因斯坦（Albert Einstein，1879—1955）出生于人类对光波开始理解的迷惑年代。爱因斯坦从中学开始，就对光速在当时流行的以太介质中的变化产生了无比的好奇。起初，他幻想自己是个御光者，骑在光束上，能和另一束光并驾齐驱，借由这个机会，好把和他同行的光的性质看个清楚。这个思维实验一开始做，他就陷入更大的迷惑中，几乎到头脑炸裂、思路枯竭的地步。还好很快的午夜梦回灵感泉涌，他想出了另一个在火车站的思维实验，所用的道具包括高铁列车一辆、两位观察者和两道闪电（见第 23 页图 6）。实验结果为：在不同相对速度的坐标中，时间不是绝对的，而是相对的。没错，就是这么一个简单的思维实验，瞬时推翻了牛顿以绝对时间为基石的力学理论，打响了人类有史以来最伟大的科学革命，也向世界宣告，一位千年不遇的天才现世了。

假如您看懂了图 6，我就可以向您说，即使这本书只看到这就打住，您已经学到了爱因斯坦相对论最基本的概念。但因为您看懂了图 6，会更兴奋地往下看，绝不会在此就打住。

爱因斯坦把时间的问题想通后，所有对光速和以太的迷惑一扫而空：宇宙中没有以太介质，光波不需介质传播，光速在所有相对匀速运动的坐标系统中恒定相等，即每秒 30 万千米。

我们已提到两次“坐标”字眼。爱因斯坦的相对论，就是坐标不

停转移的力学理论。坐标转移好像是深奥的数学，我在台湾参加的大专联考，数学考题就是聚焦在坐标转移上。课堂上没学过，那届考生惨被修理，平均得分在 20 分上下，台大数学系状元得最高 59 分。然而坐标转移并不只是数学上的游戏，我们每天其实都在坐标转移中打滚，以相对速度运行的空间和时间过各自的生活，我在书中第 3 章花了些文字形容，希望读者有所体会。

爱因斯坦 1905 年的相对论，给人类一个有史以来最出名的方程式： $E = mc^2$ ，也顺手制造出一架神奇的“时光机”，打开人类未来在有生之年实现宇宙万年之旅的可能性。

其实爱因斯坦的工作才开始。他虽然炮声隆隆地批判牛顿力学的失误，但他尚未在他的相对论中，加入牛顿的引力场。他以一个跳楼者自由落体的思维实验为起点，想通了引力场和加速度中间的“等效原理”，找到了数学工具“黎曼流形”，开始了 8 年艰苦卓绝的智慧搏斗旅程，途中历经了“苏黎世笔记本”和“摘要论文”将近 3 年的歧途，归根结底还得自己苦读，学会了张量“绝对微分”技巧。在 1915 年底，劈开了 20 世纪的红海，完成了一件千年不遇、绝对天才级的伟大宇宙工程。

再说得通俗些。在我们每天生活其中的三维空间活动，每走一步路其实都得使用一组三维坐标，其中含有方向如东南西北上下以及距离如几米几千米等“度量”尺标，才能不迷失方向而最终抵达目的地。所以，开步走之前，先要把“度量”尺标讲清楚，才能使用它导航到达目标地点。属平面几何范畴的三维空间一般每一点用三个“度量”尺标就够了。同样地，在爱因斯坦复杂的四维时空“黎曼流形”空间中活动，也得使用一组四维时空坐标的几何“度量”尺标导航，才能安全抵达目的地。但在上弯下扭的四维时空空间中，一般每一点得需要 16 个“度量”尺标才够用。

用最简单的语言来说，爱因斯坦的相对论，就是在四维时空空间中，寻找在每一点的一组 16 个能满足所有相对论物理要求的“度量”尺标——爱因斯坦费时八年才找到。

“度量”尺标到手，就得到在宇宙每一点的曲度。有了曲度，就知道在宇宙中每一点引力场的强度和加速度。于是，爱因斯坦就可送出光子、粒子等尖兵在“度量”尺标连接成的“捷线”上奔驰，探清整个宇宙面貌。

2015 年 9 月 14 日，爱因斯坦百年前预测的引力波，终于在 21 世纪人类最先进的科学仪器中现形，讯号记录的是 13 亿年前一个宇宙发生过的有如滔天海啸的暴烈事件，经过 13 亿光年距离的传播后抵达地球，只剩下一丝微弱的宇宙颤抖。

事实上，2006 年以后出现的新证据已能鉴定出：现在命名为“爱因斯坦场方程”（Einstein's field equations, EFE）的方程式，其实是由希尔伯特（David Hilbert, 1862—1943）在 1915 年 11 月 11 日至 16 日之间率先导出，这段案子我们留到“后记”再谈。

目录

CONTENTS

序	丘成桐
自序	i
导 读	iii
第一章 牛顿的苹果	001
第二章 御光者——十年一惑	013
第三章 问题解决了	021
第四章 时光机	031
第五章 最幸运的思维	039
第六章 等效原理	047
第七章 黎曼流形	055
第八章 苏黎世笔记本	063
第九章 摘要论文	079
第十章 绝对微分	085
第十一章 开红海	095
第十二章 引力波	111
第十三章 宇宙的颤抖	119
后 记	133

附 录 1	参考资料	137
附 录 2	解读爱因斯坦场方程	140
附 录 3	爱因斯坦和他的巨人们	148
中文索引		150
英文索引		158