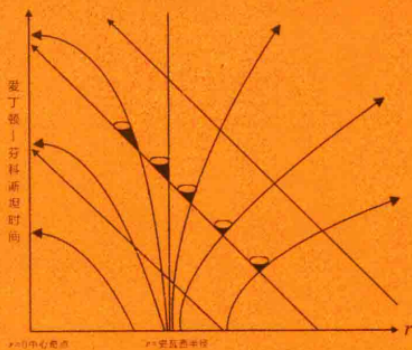


鲜为人知的传奇故事
大师间的恩怨分合

GENERAL

RELATIVITY



A CENTENNIAL
PERSPECTIVE

相对论百年故事

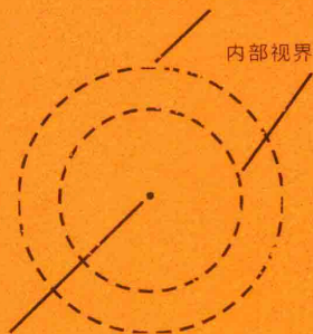
全新增订本

台湾重力学会◎主编 余海礼 等◎著

物理与 数学的 火花

事件视界 (event horizon)

内部视界 (inner horizon)



93 北京时代华文书局

奇点 (point singularity)

图书在版编目(CIP)数据

物理与数学的火花：相对论百年故事 / 台湾重力学会主编；余海礼等著。

— 北京：北京时代华文书局，2019.11

ISBN 978-7-5699-3199-0

I. ①物… II. ①台… ②余… III. ①广义相对论IV. ①0412.1

中国版本图书馆CIP数据核字(2019)第211914号

本书由大块文化出版股份有限公司经由成都天鸢文化传播有限公司授权北京时代华文书局有限公司独家在大陆地区出版简体字版，发行销售地区仅限大陆地区，不包含香港、澳门地区。

北京市版权著作权合同登记号 字：01-2018-2384号

物理与数学的火花：相对论百年故事

WULI YU SHUXUE DE HUOHUA XIANGDUILUN BAINIAN GUSHI

主 编 | 台湾重力学会

著 者 | 余海礼 等

出 版 人 | 王训海

责任编辑 | 周 磊 余荣才

装帧设计 | 李尘工作室 赵芝英

责任印制 | 刘 银

出版发行 | 北京时代华文书局 <http://www.bjsdsj.com.cn>

北京市东城区安定门外大街138号皇城国际大厦A座8楼

邮编：100011 电话：010-64267955 64267677

印 刷 | 北京凯德印刷有限责任公司 010-87743828

(如发现印装质量问题，请与印刷厂联系调换)

开 本 | 710mm×1000mm 1/16 印 张 | 17.5 字 数 | 185千字

版 次 | 2020年3月第1版 印 次 | 2020年3月第1次印刷

书 号 | ISBN 978-7-5699-3199-0

定 价 | 48.00元

版权所有，侵权必究

序一 广义相对论一百年

余海礼*

百年前，英国哲学家罗素应梁启超、张东荪等人的邀请，首次把当时诞生不久的爱因斯坦关于牛顿万有引力的新经典——广义相对论介绍到中国。经过数代人的努力与传承，百年后的今天，我们这一代的广义相对论研究社群，终于能够广泛地在广义相对论各个相关领域及课题——诸如弯曲时空的黑洞物理、起始数据问题、数值广义相对论、时空的哲学分析及引力的量子化之类问题上，做出由点及面的历史性贡献。

百年来用英文（及其翻译）书写关于广义相对论的科普书虽不至于汗牛充栋，但也不胜枚举；不过，以地道的中文来阐述台湾广义相对论研究社群创作的成果，在科普史上是首次。本书的结集出版，不仅是台湾广义相对论研究社群（或更广义地称作引力研究社群）在带有继往开

* 余海礼，台湾重力学会理事长、“中央研究院”物理研究所研究员。

来性质的行动中的里程碑，更是一次向世界自信地展现自我观点的盛事。本书是介绍广义相对论的一般科普书籍，我们也期许，本书能成为人类文明史上一本重要的历史文献。

广义相对论是对我们赖以生存的浩瀚无垠的宇宙本身及其中抽象的时间、空间学问的研究，既真实又现实。书中的文章，除了呈现广义相对论神秘有趣的各个方面外，更试图架构一幅超越百年前由爱因斯坦一手建立的宇宙图，以超越经典；尤其是在关于能量密度及时间的概念上，更是直指广义相对论内在的矛盾核心，尝试一举解开其内在的逻辑谬误。

书中每位作者都尽最大可能地运用最简单有趣的词语及例子，介绍广义相对论的各种深奥的概念和问题。但我们认为，当真理简单到不能再简单时，就不应刻意强求简单，以致扭曲了真理的本貌。同时，本书作为一份历史文献，也就无可避免地牵涉到一些超越我们这个时代所理解的概念。读者如一时无法消化，可以默记于心中，时间终将会让今日难以完全言喻的真理，在日后呈现出来。

本书说不定会成为读者们的传家宝。

序二 迎向第二个百年

游辉樟*

广义相对论是20世纪对人类文明影响最大的自然科学理论之一，2015年，距爱因斯坦创立广义相对论已长达一百周年之久。

在这个非同寻常的一百年内，广义相对论取得了意想不到的、令人惊喜的长足发展和进步。首先，作为以实验为基础的物理学的一个重要分支，广义相对论从刚刚创建时的三大经典实验验证开始，百年来已经非常漂亮地经受住了每一个实验的检验，大获全胜。当前及不久的将来，精度更高和难度更大的许多实验还将继续进行。其次，从20世纪60年代用黑洞成功地解释类星体开始，加上爱因斯坦方程在宇宙学中的成功应用，广义相对论已经愈来愈被天文学家重视。再次，随着全球定位系统（GPS）的推广应用，狭义相对论和广义相对论均已经进入人们的日常生活。可以预期，随着高精密测量技术的发展，人类将很快实现引

* 游辉樟，台湾成功大学物理系教授。

力波的直接探测。届时，引力波测量将和电磁波测量一起为人们带来宇宙的信息，特别是早期宇宙和黑暗宇宙部分的信息。回想这一系列的发展，我们联想到一个个伟大的名字：爱因斯坦、希尔伯特、爱丁顿、史瓦西、克尔、邦迪、弗里德曼、钱德拉塞卡、霍金、潘洛斯……

中国近年来对广义相对论及相对论天体物理学的研究，均取得了巨大的进展。学者沈志强利用甚长基线干涉测量技术（VLBI），精确观测到了银河系中心超大质量黑洞的情况；学者马中佩发现了当时所知道的最大质量的两个黑洞，每个质量约为太阳的100亿倍；学者吴学兵更是在距离地球128亿光年处，发现120亿个太阳质量的黑洞。这一系列激动人心的发现，既显示了我们在广义相对论与相对论天体物理学研究中的长足发展，也预示着广义相对论与相对论天体物理学在接下来的自然科学发展中的蓬勃发展势头。

为了纪念广义相对论创建一百周年，台湾重力学会编写并出版了这本文集。虽然只包含六篇文章，但都具有很高的阅读价值。《广义相对论百年史》一文，讲述了爱因斯坦与合作者创建广义相对论的历程，一个个故事让我们重温前辈们发展基础理论的艰辛。《宇宙学百年回顾》除了回顾大爆炸学说的缘起，更前瞻性地预测了太初引力波所扮演的重要角色及方向。《黑洞》一文介绍了广义相对论、天文学、量子力学、量子引力、信息论、凝聚态物理等物理学中的基本问题如何与黑洞关联到一起。引力波是广义相对论除黑洞外的另一个重要理论预言，《引力波与数值相对论》一文清晰地描述了如何结合数值相对论和引力波探测仪

序二

迎向第二个百年

器，来直接测量引力波的原理和方法。什么是时间，什么是空间？《时间、广义相对论及量子引力》和《物理中的时空概念》两篇文章，为我们展开了精彩的思辨性讨论。

广义相对论的第一个一百周年即将逝去，我们将迎来广义相对论的第二个一百周年。崇尚科学、追寻真理的读者们，定能在本文集的鼓舞和影响下，回顾前辈们发展科学理论的艰辛历程，循着他们的脚步不断前进；继往开来，进一步挖掘时间和空间的深刻含义，揭开黑洞特别是奇点的奇妙面纱，探索宇宙演化的深层奥秘。我相信，在这个即将到来的新的一百周年里，海峡两岸的青年读者们，定能与世界同行一起为发展广义相对论与相对论天体物理学而辛勤研究，并携手合作，共创佳绩。

序三 历史回顾与展望

台湾重力学会

20世纪影响人类文明、最大的自然科学理论之一就是广义相对论。2015年是爱因斯坦创立广义相对论的第一百周年。为了纪念这一重大的自然科学进展，台湾重力学会研究团体编写了本书。

本书包括对广义相对论的历史回顾、对黑洞和现代宇宙学的综述、对引力波和数值相对论的介绍，以及对物理学中时空概念与量子引力的探讨。

聂斯特（James Nester）教授和陈江梅教授在所作文章中，对广义相对论百年历史做了非常精彩的回顾。该文讲述了爱因斯坦同其合作者建立广义相对论的历程，介绍了爱因斯坦和希尔伯特独立发现爱因斯坦方程的故事——他们也曾为争论谁先发现爱因斯坦方程而不愉快过，最终他们的友谊战胜了争执，两人在爱因斯坦方程建立过程中做出的不可磨灭的贡献，也得到人们的公认。该文还讲述了观测引力场弯曲光线的故事、宇宙学常数在广义相对论理论发展历程中的戏剧化过程，以及对引力波存在性问题的曲折讨论历程。引力能在广义相对论中是一个非常微

序三

历史回顾与展望

妙的问题，文中讲述了爱因斯坦探讨这个问题的故事。统一场论是爱因斯坦在建立广义相对论后投入极大精力研究的课题，书中亦讲述了爱因斯坦关于统一场论研究的一系列故事。

黑洞是广义相对论理论中最重要的概念性预言之一。黑洞理论发展到今天，与广义相对论、量子力学、量子引力、信息论、凝态物理等物理学中的基本问题均有关联。在天文观测中，超大质量黑洞和恒星级质量黑洞的存在已得到确认。而且黑洞被认为是宇宙中诸如类星体等天体的能量来源，黑洞是高能吸积、喷流等的核心动力。此外，黑洞的成长还被认为与星系的演化，以及宇宙的大尺度结构形成间有着密切的关系。

“中研院”天文及天文物理研究所的卜宏毅研究员、彰化师范大学物理系的林世昀教授和淡江大学物理系的曹庆堂教授，对有关黑洞的这一系列问题做了极好的综述。该文从黑洞概念在广义相对论中的出现开始讲起，一步一步深入黑洞的事件视界、黑洞的奇点等艰深的理论问题。接下来还对天文观测的黑洞做了介绍，描述黑洞同吸积盘和喷流的关系，最后更对黑洞热力学及黑洞信息等问题做了深入介绍。

宇宙论是广义相对论被成功应用的一个典范。广义相对论在宇宙论中的应用，把一个曾经只能用神学探讨的话题，变成一个自然科学的课题。结合人类高新技术的发展，宇宙学发展到今天已变成高、精、密宇宙学。到目前为止，研究宇宙学的学者分别在（1978年）宇宙微波背景辐射、（2006年）宇宙微波背景辐射各向异性、（2011年）宇宙加速膨胀三个领域获得三项诺贝尔物理学奖。台湾师范大学的李沃龙教授和东吴

大学物理系的巫俊贤教授所作的宇宙学短文，从哥白尼原理谈起，引入时空概念，介绍了现代宇宙学的发展。文中对宇宙学常数问题、加速膨胀问题、宇宙大尺度结构形成问题等，做了生动的讲解，还对宇宙起源的大爆炸问题做了深入介绍——该问题不仅是个宇宙学问题，还把量子理论和引力理论联结到了一起。同时，早期宇宙产生的引力波，很可能在不久的将来被观测到。届时，这些测量结果将改变当前对量子引力理论的研究处于纯理论研究的状态。我们也可以预期，到时很可能会有很多新的物理研究成果展现出来。

引力波是广义相对论除黑洞外的另一重要的理论预言。如聂斯特教授和陈江梅教授所描述，对引力波存在性在理论上所作的探讨，于历史上有过非常曲折的经历。最终邦迪等人的论述确定了其原则上的存在性。后来泰勒等人通过双脉冲星观测，提出引力波存在的间接证据，泰勒等也因此而获得诺贝尔物理学奖。在广义相对论建立一百周年之际，世界上对引力波探测最灵敏的探测器Advanced LIGO（引力波天文台）已基本建立完毕。其测量精度可达到 10^{-23} ，接近量子力学的标准极限，达到了人类空前的高精度长度测量要求。在后文将证实，引力波信号已被直接观测到。林俊钰研究员和成功大学物理系的游辉樟教授，对引力波做了极好且饶有趣味的通俗介绍。为了提高引力波探测的能力，增强硬件的测量灵敏度是一个方面；在既定硬件的基础上，建立好的引力波波源模型，是提高引力波探测能力的另一个方面。现实的引力波源涉及超强引力场、强动态时空区域，而且几乎无对称性存在。这些特点使得

数值计算的方式，成为引力波波源建模的几乎唯一可行的办法。但即使是数值计算，爱因斯坦方程依然是极难处理的问题。数值相对论这个研究方向也应运而生。如何让数值计算稳定、让计算具有高精度、让计算具有高效率以满足实际波源建模的需要，是数值相对论研究的核心问题。林俊钰研究员和游辉樟教授对这些问题做了深入浅出的描述。

狭义相对论是协调麦克斯韦方程组与伽利略变换的矛盾而产生的理论，广义相对论是协调牛顿万有引力理论和狭义相对论洛伦兹变换间的矛盾而产生的理论。但广义相对论特有的时空观同量子力学之间的矛盾，至今仍是一个谜。“中研院”物理所的余海礼研究员和成功大学物理系的许祖斌教授，为我们讲述了时间、广义相对论及量子引力的故事，带着我们回顾了爱因斯坦建立广义相对论过程中，对时间的思考。该文也为我们描述了爱因斯坦获得诺贝尔奖时，同中国上海结下的鲜为人知的不解之缘。广义相对论的时空观同量子力学的矛盾是突出的，该文为我们介绍了一种新的思考方式——也许量子引力比时间的概念更基本，时间只是量子引力自然而然的结果。余海礼研究员和许祖斌教授在该问题上展开了非常精彩的思考性讨论。

广义相对论的时空概念优美而引人入胜。但同时，像余海礼研究员和许祖斌教授讲述的那样，这个时空概念的玄妙又让人捉摸不透。什么是时间，什么是空间？江祖永教授为我们探讨了物理学中的时空概念，对牛顿的时空观做了深入介绍，并探讨了质点动力学描述同牛顿时空观的关系。江教授不但描述了广义相对论的时空观，还探讨了该时空观同

场论动力学的内禀关系。通过对比场论动力学与质点动力学，他比较了牛顿时空观和广义相对论时空观的直观性。两者的直观性有所不同，但作为确定性的存在，两者的直观性是人们容易理解和接受的。相反地，量子物理世界的不确定性，把问题完全推向了不可理解。量子引力理论的时空观，势必同量子物理的不确定性相关联。江祖永教授为我们讲述了对这种不确定性时空观的理论思考。

本书出版正好赶在爱因斯坦创立广义相对论一百周年之际。崇尚科学、追寻真理的读者们，定能在本书的引领下，回顾前辈们发展科学理论的艰辛历程，循着他们的脚步继续往前，追寻时间和空间的奥秘，探索黑洞神奇的时空结构；循着引力波携带的信息，探索宇宙演化的奥秘。

CONTENTS | 目录

第一章

广义相对论百年史 聂斯特 陈江梅 1

探索新视界：广义相对论的发展 4

物理与数学的火花：广义相对论诞生 12

爱因斯坦的预言：光线弯曲与观测 17

宇宙的动、静与宇宙常数项 21

引力波存在吗？ 28

对统一场论的追求 31

引力能——对称与守恒 35

第二章

宇宙学百年回顾 李沃龙 巫俊贤 39

我的位置决定我的星空 42

牛顿的绝对空间 44

空间几何大不同	47
爱因斯坦的弹性空间	49
看似不存在的宇宙常数	52
光的红移：德西特效应	54
弗里德曼的宇宙演化论	56
膨胀的宇宙与创世纪	58
空间膨胀的标准模型？	61
对宇宙大爆炸的发现	63
大爆炸宇宙仍有后遗症	66
古斯的暴胀宇宙	69
量子起伏与宇宙微波	72
空间扰动的波澜：引力波	78
南极观测：对太初引力波的测量	80
宇宙真的有起点？	83
宇宙原来可以理解！	85

第三章

黑洞	卜宏毅 林世昀 曹庆堂	87
黑洞概念的萌芽		89
史瓦西的数学精确解		91
奇异的史瓦西时空与事件视界		93

CONTENTS

目 录

神秘的中心奇点	97
带电的黑洞——两个视界	103
潘多拉的盒子——克尔的旋转黑洞	105
对黑洞的观测证据	109
黑洞与吸积流	112
黑洞喷流——壮观的宇宙风景	114
错综复杂的黑洞生态系统	117
寻找黑洞存在的直接证据	119
黑洞热力学	122
诡异的黑洞信息	127
黑洞互补性与防火墙	129
对黑洞辐射的观测与实验	133
为何世间多杞人	136

第四章

引力波与数值相对论	林俊钰 游辉樟	139
广义相对论与引力波		140
如何观测引力波?		146
引力波捎来宇宙的信息		156
数值相对论: 计算宇宙的奥秘		164
引力波天文学的未来		174

第五章

物理中的时空概念	江祖永	181
从牛顿开始		184
质“点”是主角		187
弯曲的时空与场		191
有场论便毋需质点		194
量子物理像要改变一切		197
“气一元论”——时空就是一切		202
微观的世界——量子时空		205
不断发展的时空观		208

第六章

时间、广义相对论及量子引力	余海礼 许祖斌	210
牛顿、苹果与月亮		212
爱因斯坦和他的诺贝尔奖		216
时间存在与否?		220
四维时空对称与量子引力势不两立		227
广义相对论扑朔迷离的一面		231
时间起源于量子引力		235
古典时空重建		239
杞人“忧天”有道理		241

CONTENTS

目 录

引力与标准模型中杨 - 米场的模拟	244
宇宙的初生与时间箭头的方向	250
延伸阅读与参考文献	253