

中国科学院理论物理研究所
成立40周年

从夸克到宇宙

理论物理的世界

中国科学院理论物理研究所 / 编

FROM QUARK TO UNIVERSE
THE WORLD OF THEORETICAL PHYSICS



科学出版社

中国科学院理论物理研究所
成立40周年

从夸克到宇宙

理论物理的世界

中国科学院理论物理研究所/编

科学出版社

北京

内 容 简 介

理论物理学是研究物质、能量、时间和空间以及它们的相互作用和运动规律的科学,它揭示的是自然界中所有物理现象的本质。理论物理的研究对象小到物质的基本组分夸克,大到整个宇宙,研究对象极其丰富。理论物理学经过 20 世纪的蓬勃发展后,现在仍有大量的重要问题亟待回答,如暗物质的性质、暗能量的本质、粒子物理标准模型的完备性以及是否存在超越标准模型的新物理、爱因斯坦的广义相对论是否是引力理论的终极理论、大统一理论是否存在、宇宙的起源、量子力学的诠释、黑洞的本质以及引力的量子化和时空的起源等。另外,理论物理在其他学科领域具有广阔的应用,如生物体系、社会复杂系统、能源问题等。本书收集了中国科学院理论物理研究所科研人员近年来撰写或者翻译的,涉及上述课题的一些优秀科普文章。

本书适合高中生、本科生、研究生和相关科研人员,以及科学爱好者、科技管理人员参考阅读。

图书在版编目(CIP)数据

从夸克到宇宙:理论物理的世界/中国科学院理论物理研究所编. —北京:科学出版社, 2018.5

ISBN 978-7-03-057238-7

I. ①从… II. ①中… III. ①理论物理学—普及读物 IV. ①041-49

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2018) 第 083452 号

责任编辑:钱 俊/责任校对:杨 然
责任印制:张 伟/封面设计:有道文化

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>

北京京华虎彩印刷有限公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2018 年 5 月第 一 版 开本: 720×1000 1/16

2018 年 5 月第一次印刷 印张: 22 1/2 插页 1

字数: 325 000

定价: 98.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)



前 言

2018年，中国科学院理论物理研究所迎来建所40周年。40年前，改革春风吹遍神州大地，全国科学大会胜利召开。1978年6月9日，经时任国务院副总理邓小平等中央领导同志的批准，中国科学院正式发出《关于建立理论物理研究所的通知》。40年来，伴随着祖国改革开放的步伐，承载着国家发展理论物理事业的使命，寄托着我国物理学界的期望，坚持“开放、流动、竞争、联合”的办所方针和“开放、交融、求真、创新”的办所理念，中科院理论物理所走过了风雨兼程的40年，在科学研究、人才培养、学术交流等方面取得了辉煌的成就，为我国理论物理事业的发展做出了重要的贡献！

40年来，在党和国家、中国科学院等各界领导的关怀和指导下，在海内外朋友的大力支持和帮助下，秉持“两弹一星”功勋奖章获得者、理论物理所老所长彭桓武、周光召等老一辈科学家倡导的开放办所的战略思想，在历任所长的带领下，理论物理所全所职工共同努力，攻坚克难，追求卓越，敢为人先，取得了许多个“第一”。理论物理所是我国第一批博士学位授予点，第一批博士后流动站；理论物理所是中科院第一个开放所，第一批进入中科院的知识创新工程；理论物理所是中科院基础研究领域第一个全面接受国际评估的研究所，并成立了以诺贝尔物理奖获得者戴维·格罗斯教授为主席的国际顾问委员会，也是第一个建立国际化交流合作平台的研究所；依托理论物理所成立了中国科学院交叉学科理论研究中

心，我国首个理论物理国家重点实验室也曾在理论物理所建立。

40 年来，理论物理所积极推动发展我国理论物理事业，组织和承担国家重大科研任务。理论物理所推动组织了国家自然科学基金的理论物理重大项目、理论物理专项基金和国家基础性研究重大项目“攀登计划”，承担了国家重点基础研究发展计划（973 项目）和国家自然科学基金重大项目。如：“七五”期间国家自然科学基金重大项目“理论物理若干重大前沿课题研究”、国家科委（科技部）“八五”期间国家基础性研究重大关键项目（“攀登计划”）“九十年代理论物理学重大前沿课题”、科技部“九五”期间国家基础研究预研项目“面向 21 世纪理论物理学重大前沿课题”、基金委重大研究计划“理论物理学及其交叉科学若干前沿问题”，以及从 1993 年一直执行至今的“国家自然科学基金理论物理专款”项目。这些计划和项目的实施极大地推动了我国的理论物理研究，稳定和壮大了理论物理研究队伍。近十年来，理论物理所每年承担国家级科研项目 70 余项。

40 年来，理论物理所科研成绩突出。理论物理所作为第一完成单位，获得国家自然科学奖二等奖 7 项，国家科技进步奖二等奖 1 项；作为参与单位，获得国家科技进步奖特等奖 2 项，国家自然科学奖一等奖 1 项，国家自然科学奖二等奖 1 项，以及省部级各类科技奖励 30 多项。有 2 人获得“两弹一星”功勋奖章，1 人获得求是基金会“中国杰出科学家”奖，1 人获得求是基金会“杰出青年学者”奖；1 人获得何梁何利科学成就奖，3 人获得何梁何利科学与技术进步奖，以及其他 40 多项个人奖励。近年来，理论物理所每年发表高水平论文 200 余篇。最近汤森路透发布了 2007 年 1 月 1 日—2017 年 12 月 31 日期间论文统计数据 ESI，我国共有 117 所研究机构进入全球前 1%，其中中国科学院占了 62 所，理论物理研究所 2618 篇论文和 35160 次被引榜上有名，位列全国各大研究机构第 39 位，中科院第 28 位。

40年来,理论物理所人才辈出。曾经在理论物理所工作和学习的科研人员已有16位当选两院院士,其中11位院士是在理论物理所当选,7位当选发展中国家科学院院士。先后引进28位中科院“百人计划”研究人员,17位研究员获得国家杰出青年基金资助,3位入选“万人计划”,7位入选“青年千人计划”,1位获得优秀青年基金资助,11位入选“百千万人才工程”国家级人选。这些优秀人才为理论物理所的发展和薪火传承奠定了雄厚的基础。

40年来,理论物理所为国家不断培养和输送优秀人才,逐步发展成为我国理论物理英才辈出的人才培养基地。理论物理所已培养博士学位研究生358人,硕士学位研究生120人。其中有5人获得全国优秀博士学位论文,2人获得全国优秀博士学位论文提名,12人获得中国科学院优秀博士学位论文,9人获得中国科学院院长特别奖。理论物理所培养的研究生中,已有2人当选为中国科学院院士。理论物理所于2005年和2015年被评为全国优秀博士后科研流动站。已进站博士后251人,出站博士后206人。出站的博士后中,已有3人获得全国优秀博士后奖,4人当选中国科学院院士,1人当选中国工程院院士。理论物理所毕业的学生和出站的博士后中已有多人获得了国家杰出青年基金、长江学者、青年千人、优秀青年基金、青年拔尖人才等各类荣誉,成为了我国理论物理及其相关学科研究和教学队伍的骨干力量。

40年来,理论物理所实施了一系列重要举措和体制机制创新,举办了许多具有重要国际影响的学术活动;每年吸引数百名海内外学者来所访问交流,包括许多诺贝尔奖获得者和具有国际影响的顶级科学家的来访交流,如诺贝尔奖获得者杨振宁、李政道、丁肇中、格罗斯、盖尔曼、格拉肖、科恩、益川敏英、巴理希、索恩,菲尔兹奖获得者丘成桐、弗里曼、威腾以及世界著名物理学家霍金等。这些学者的来访和学术活动为提升理论物理所的影响力,推动国内外的理论物理发展发挥了重要作用。

40 年来，理论物理所的科学家们除了进行前沿科学研究外，还积极关心国家战略需求，关心国家科技政策，积极组织和承担中国科学院学部的咨询项目，为国家科技政策、战略需求、学科建设、科学前沿、大科学工程等建言献策，在中科院“出成果，出人才，出思想”的三位一体战略定位方面走在了各所的前列。欧阳钟灿院士等撰写的《基础研究与战略性新兴产业发展》咨询报告，得到了时任总理温家宝同志的批示，根据总理批示，发改委、科技部、工信部、财政部派代表与中科院咨询专家召开了座谈会。不久，国务院批准成立了战略性新兴产业发展专家咨询委员会。张肇西院士等关注我国高能物理发展，积极推进超级 Z 工厂的物理论证，使其成为我国未来高能物理加速器实验的一个重要选项。何祚庥院士等关注国家能源发展，撰写《关于建设以三峡枢纽为中心，由水、火、核、日、风组成，抽水蓄能核站群为有效调节，智能电网连接的超巨型能源体的建议》，得到了李克强总理批示，并向国家领导人报送了《科学发展核能必须坚决贯彻“稳中求进”》以及《科学发展观和捍卫国家安全》等报告。吴岳良院士主持了学部咨询项目《暗物质暗能量与粒子宇宙物理研究》和《全球化背景下中国基础科学研究的优先领域选择》。

2017 年 10 月，举世瞩目的党的十九大胜利召开。习近平总书记向大会作了题为《决胜全面建成小康社会 夺取新时代中国特色社会主义伟大胜利》的报告。习近平总书记在报告中指出，要在本世纪中叶将我国建设成为一个社会主义现代化强国。要加快建设创新型国家，要瞄准世界科技前沿，强化基础研究，实现前瞻性基础研究、引领性原创成果重大突破。要建设科技强国，要培养造就一大批具有国际水平的战略科技人才、科技领军人才、青年科技人才和高水平的创新队伍。2016 年 6 月，习近平总书记在全国科技创新大会、两院院士大会、中国科学技术协会第九次全国代表大会上向全国发出了建设世界科技强国的动员令，明确了未来我国科技事业

的发展路径并进行了总体布局。总书记明确强调：“科技创新、科学普及是实现科技创新的两翼，要把科学普及放在与科技创新同等重要的位置。”

理论物理所科研人员和学生在过去 40 年里，一贯高度重视科学普及和科学文化传播工作，在科学文化普及、科学知识传播、提高全民科学素养等方面做出了积极贡献。理论物理所的研究人员和学生在中学、高校和科研机构等做了大量的科普报告，在杂志和网络上撰写了大量的优秀科普作品。这次以庆祝建所 40 周年为契机，收集近期完成的分散在各个杂志上或者网站上的部分优秀科普作品结集出版，一方面用以庆祝理论物理所建所 40 周年，另一方面可以更好地传播科学知识并鼓励大家为传播科学精神、科学文化和科学知识做出更大贡献。

理论物理是物理学各分支学科的理论基础，是研究物质、能量、时间和空间以及它们的相互作用和运动规律的科学。理论物理的每一次重大突破都意味着人类对自然界认识的又一次深化，乃至给人类的时空观和自然观带来革命性的变革。理论物理研究的对象从空间尺度上小到夸克，大到整个宇宙；从时间尺度上从宇宙的诞生直到宇宙的未来，所以研究对象极其丰富，研究内容博大精深。理论物理所目前在粒子物理和核物理、量子场论和超弦理论、引力理论和宇宙学、统计物理和理论生物物理、凝聚态物理和量子物理等研究领域部署了一支人员精干、学科方向齐全的研究队伍。这本科普文集收录的文章内容十分丰富，主要内容大致可以分为四个方面的内容：第一部分涉及量子力学的本质、粒子物理标准模型和宇宙的起源和演化，如谈论宇宙是如何起源的《宇宙如何起源》，早期宇宙模型的研究和进展的《暴涨宇宙学的研究和进展》，粒子物理标准模型和宇宙学关系的《探索自然、揭示奥秘——极小夸克和极大宇宙的内在联系》，上帝粒子到底是怎么回事的《希格斯粒子理论浅析》，爱因斯坦大统一梦想的《爱因斯坦的未竟之梦：物

理规律大统一》，量子力学本质问题的《量子力学诠释问题》，量子力学和时空关联的《量子纠缠创造了虫洞》，超弦理论中时空观的《弦论编织的多重宇宙》，自然界中最神秘的天体黑洞和引力本质问题的《黑洞的本质》，解读 2017 年诺贝尔物理奖（引力波直接探测）的《来自宇宙的微弱声音》；第二部分涉及核物理及超重元素，如《超重元素和超重元素稳定岛》和《原子核的电荷和质量极限探索》；第三部分内容为统计物理、生物物理及其相关交叉学科，如讨论自然中无处不在的相变现象的《相变和临界现象》，物理学和生物学关系的《物理学和生物学》，自然界中混沌现象的《世界是必然的还是偶然的》，软物质科学新机遇的《从液晶显示到液晶生物膜理论：软凝聚态物理在交叉学科发展中的创新机遇》，DNA 动力学的《DNA 的弹性理论》；第四部分涉及科学研究方法和建议，如《谈谈统计物理的对象和方法》，《向前辈学者和各位学者学习科学研究方法》，《理性的胜利——从上帝粒子到引力波》，《物理：从 IT 到 ET》以及《超级“Z-玻色子工厂”》等。

这次收集科普作品结集出版，得到了全所科研人员和学生的积极响应，也得到了同行的热情鼓励。但是由于篇幅限制，我们无法收录更多的好作品。另外，受编者水平所限，所选作品也不一定是大家提供的作品中最好的文章。在此，我代表编委会向大家致歉。在收集和编排过程中，王延颀、庄辞、方晓、刘瑾等同志花费了大量的时间和精力，在出版过程中得到了科学出版社钱俊先生的大力协助，在此一并致谢。

蔡荣根

中国科学院理论物理研究所副所长（主持工作）

2018 年 4 月 22 日

目 录

黑洞的本质	蔡荣根 曹利明	001
来自宇宙的微弱声音——2017 年度诺贝尔物理学奖成果简析	郭宗宽 黄庆国	021
谈谈统计物理学的对象和方法	郝柏林	031
物理学和生物学	郝柏林	045
世界是必然的还是偶然的——混沌现象的启示	郝柏林	073
弦论编织的多重宇宙	拉斐尔·布索 (Raphael Bousso), 约瑟夫·波尔金斯基 (Joseph Polchinski) 何颂 译	089
向前辈学者和各位学者学习科学研究方法	何祚庥	106
宇宙如何起源?	黄庆国 朴云松	112
理性的胜利——从上帝粒子到引力波	李 森	131
从液晶显示到液晶生物膜理论: 软凝聚态物理在交叉学科发展中的创新机遇	欧阳钟灿	135
DNA 单分子弹性理论	欧阳钟灿	149
物理: 从 IT 到 ET	欧阳钟灿 周善贵	157
量子力学诠释问题	孙昌璞	172
量子纠缠创造了虫洞? ... 胡安·马尔达西纳 (Juan Maldacena) 王少江 译 蔡荣根 校		205
探索自然、揭示奥秘——极小夸克与极大宇宙的内在联系	吴岳良	214
爱因斯坦的未竟之梦: 物理规律的大统一	杨金民 王飞	237
希格斯粒子之理论浅析	杨金民	248

相变和临界现象	于渌	郝柏林	264
暴涨宇宙学的研究与进展	朴云松	张元仲	301
超级“Z-玻色子工厂”——高能物理实验研究的 特种正负电子对撞机		张肇西	313
超重元素和超重稳定岛	赵恩广		323
原子核的电荷与质量极限探索	周善贵		326
如何让爱因斯坦走进大众（代后记）	方晓	庄辞	王延颢
彩图			343
			350

黑洞的本质

◆ 蔡荣根 曹利明

1 经典黑洞的本质

1.1 什么是黑洞？

粗略地说，“黑洞是时空中连光都逃逸不出的区域”。这是一个朴素但又非常不平凡的关于黑洞的描述方式。真正地理解这一描述是一件不容易的事，原因在于人们对于时空概念理解的不同，或者对连光都逃逸不出这一过程界定的不同。这里我们愿意从历史发展的眼光来看待这个问题。

在介绍黑洞这个概念时，很多人愿意提及如何在牛顿力学的框架下理解一个黑洞。这种想法可以追溯到 18 世纪的英国牧师兼自然哲学家米歇尔（Mitchell）。1783 年，米歇尔在写给卡文迪许

蔡荣根：中国科学院理论物理研究所研究员，中国科学院院士。研究领域：引力理论和宇宙学。

曹利明：原中国科学院理论物理所博士研究生，现中国科学技术大学物理学院教授。研究领域：引力理论和宇宙学。

(Cavendish) 的一封信中提出了暗星的概念(图1)。这封信中的内容于1784年在英国皇家学会发表^[1]。同时代的法国著名学者拉普拉斯(Laplace)于1796年也独立地提出暗星的想法,且将这个想法写到了其著作 *Exposition du Système du Monde* 的第一和第二版中,并于1798年给出了一个光逃逸不出的证明。拉普拉斯的工作被霍金(Hawking)和埃利斯(Ellis)翻译成英文,并放在他们1973年所著的 *The Large Scale Structure of Space-time* 一书的附录中,因此广为人知。1979年,剑桥大学的引力物理学家杰彭斯(Gibbons)在 *New Scientist* 杂志中的一文指出了米歇尔的工作。自那时起,米歇尔的贡献才被人们广泛知悉。

50 Mr. MICHELL on the Means of discovering the

[35]

VII. On the Means of discovering the Distance, Magnitude, &c. of the Fixed Stars, in consequence of the Diminution of the Velocity of their Light, in case such a Diminution should be found to take place in any of them, and such other Data should be procured from Observations, as would be farther necessary for that Purpose. By the Rev. John Michell, B. D. F. R. S. In a Letter to Henry Cavendish, Esq. F. R. S. and A. S.

29. If there should really exist in nature any bodies, whose density is not less than that of the sun, and whose diameters are more than 500 times the diameter of the sun, since their light could not arrive at us; or if there should exist any other bodies of a somewhat smaller size, which are not naturally luminous; of the existence of bodies under either of these circumstances, we could have no information from sight; yet, if

图1 米歇尔写给卡文迪许的信中关于暗星的部分^[1]

拉普拉斯关于暗星的讨论基于牛顿引力理论和光的粒子学说:如果星体表面光子的动能小于它的引力势能,光子便不能够逃逸到无限远处。由此可以很容易得到质量为 M 的星体成为暗星时的最大半径为 $R=2GM/c^2$, 其中 c 是光速, G 是牛顿常数。这就是所谓的暗星,也是迄今为止人们能够发现的人类关于黑洞最早的一个认识。需要指出的是:这个半径恰好是爱因斯坦广义相对论中所预言的施瓦西黑洞的施瓦西半径。但这只是一个巧合。事实上,在同时代的学者看来,拉普拉斯等人的讨论存在着明显的漏洞,即需假定光速不依赖于参考系。但这和牛顿力学中任何物体的速度(包括光速)是一个相对的量相冲突。在牛顿力学框架下,总有一些物理过程(例如星体表面附近速度很大的电子发射光)使得光子的速度超过 c , 并可以逃逸到无限远处天文学家的望远镜(图2)。在牛顿力学的框架下,物理信号可以以无限大的速度运行,因此牛顿理论所

在的时空中不存在信息逃逸不出的区域，即不存在真正黑洞的概念。当然我们现在知道光速不依赖于参考系是狭义相对论的一个基本假设。可见，若希望理解黑洞，相对论性的时空观是必要的。

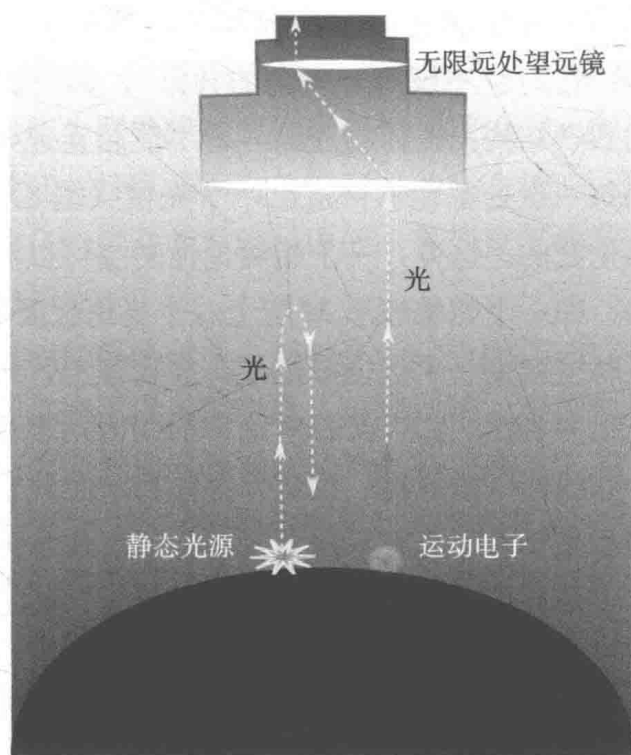


图2 米歇尔和拉普拉斯的暗星。牛顿时空中不存在真正意义上黑洞的概念

在牛顿时代或更早，人们关于时空的认识是接近日常生活的。先知告诉我们：在这些时空中时间和空间是分离的（这是一种典型非动力学的，人为加入的“背景结构”），每一个时刻都存在一个三维的空间。

时间和空间的分离意味着我们需要两套度量，分别来衡量时间的间隔和空间的间隔。牛顿引力理论就是建立在这样的时空之上，相应的引力场方程是一种典型的椭圆方程，即泊松方程。因此牛顿引力理论中没有引力波的概念。而引力相互作用是一种超距作用，物理信号的传播速度可以是无限大。虽然牛顿引力理论在物理上简单直观，但其数学结构是相对复杂的。除了需要引入两套退化的度规，人们还需要额外的联络结构。而且这种联络结构并不能由这两

套度规确定。在相对论性时空中时间和空间没有先验地分离，而是融合在一起成为一个四维的对象。这意味着相对论性的时空只需要一个衡量“时空间隔”的度量，或者说只需要一个度规。更进一步地，很多情况下，用来描述时空弯曲程度的联络也由度规唯一确定。因此相对论性时空中没有“人为的背景”，具有比牛顿引力理论更为简单的数学结构。任何物理信号都不能超光速，这一基本假设要求时空的每一点处都能够构造出一个光锥（图3）。换句话说，这个度规是洛伦兹的。这样，一个相对论性时空可以看成是一个二元组 (M, g) ，即一个四维流形 M 配上一个洛伦兹度规 g 。或者说一个相对论性时空就是一个洛伦兹流形。在物理上，相对论性时空上的引力理论更为自然。如广义相对论中的爱因斯坦场方程，通常可以写成一个非线性（拟线性）偏微分方程组，而且在一些特殊的坐标系（如谐和坐标）下具有双曲方程的特征。这意味着相对论性的引力理论具有传播自由度，存在引力波的概念。事实上，最近位

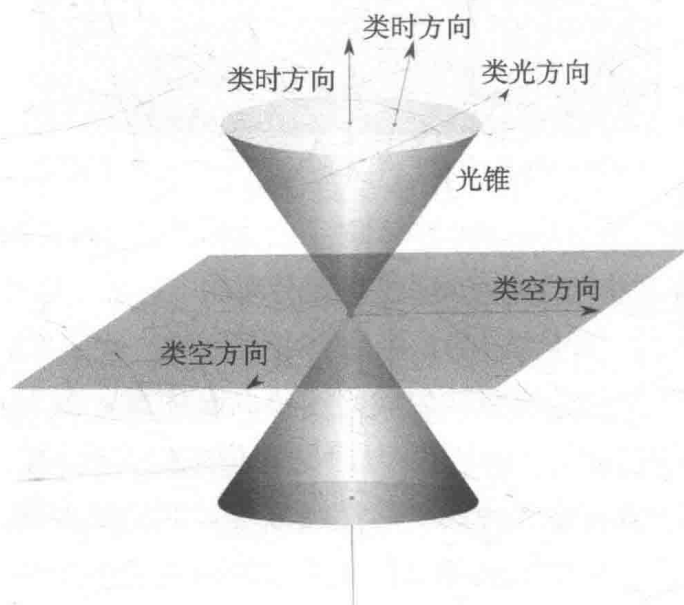


图3 相对论性时空上每一点处的矢量可以分为三类：类时、类光、和类空。类时矢量可以看作过该点的质点世界线在该点的切矢量，而类光矢量可以看成是过该点的光的世界线的切矢量，即光的4-波矢

于美国路易斯安那州和华盛顿州的激光干涉引力波天文台 (LIGO) 已经直接观测到了引力波的存在。这一引力波是由二个转动黑洞并合后产生的^[2]。在相对论性引力理论中, 引力相互作用以有限的速度 (如光速) 传播, 而不是超距作用。引力现象归结为时空的弯曲程度, 这表明在一个相对论性的引力理论中度规也是动力学的, 而不是简单地作为背景或舞台出现在物理理论中。度规即是背景又是动力学变量这一特征是相对论性理论的一个核心。可以说, 相对论性引力理论 (如广义相对论) 中的一系列重要的结论和困难都和这一事实密切相关。

比起牛顿或伽利略时空, 相对论性时空除了拥有类时和类空无限远, 还拥有类光无限远的概念。形象地说, 所谓的类光无限远可以理解成时空上光线能够延伸到的最远的“端点”的集合。通常来说, 人们用来 $\mathcal{I}^+$ 代表未来类光无限远。在闵氏时空上的任意一点发射的光都可以达到类光无限远。但是不是所有时空都有类似的性质呢? 答案并不是。黑洞就是这样的时空, 在这个时空中的一些区域发出的信号无法到达类光无限远。如果我们记时空为 (M, g) , 那么这样的区域可以记为

$$B = M - \mathcal{I}^-(\mathcal{I}^+)$$

这就是时空上的黑洞区。其中 $\mathcal{I}^-(\mathcal{I}^+)$ 代表未来类光无限远 $\mathcal{I}^+$ 的过去。简而言之, 所谓的黑洞区就是时空上连光都逃逸不出的区域。需要强调的是: 这里的时空是相对论性的时空, 而光逃逸不出指的是光不能够到达未来类光无限远。黑洞区域的边界称为“黑洞事件视界” (event horizon)。因此人们常说: 所谓的“黑洞事件视界是时空未来类光无限远过去的边界”。事件视界这个词最早由奥地利物理学家伦德勒 (Rindler)^[3,4] 于 1956 年在宇宙学的研究领域内引入。当然他研究的是所谓的观测者的事件视界, 不同于我们这里的黑洞事件视界 (图 4)。1969 年英国数学物理学家彭罗斯 (Penrose) 将这一概念发展成所谓的“绝对事件视界”, 也就是我

们这里的黑洞事件视界^[5]。当然黑洞事件视界也可以理解为一族逃逸到无限远处的观测者共有的事件视界^[5]。因此我们也可将黑洞区定义为 $M - \mathcal{I}^-(\mathcal{R})$ ，其中 $\mathcal{R}$ 是上述的所有观测者所形成的集合。黑洞事件视界是时空中的类光超曲面（时空的 3 维子流形），也就是说它的母线是类光曲线。

(a) VISUAL HORIZONS IN WORLD-MODELS

W. Rindler

(Received 1956 November 23)

We shall define a horizon as a frontier between things observable and things unobservable. (The vague term things is here used deliberately.) There are then two quite different horizon concepts in cosmology which satisfy our definition and to which cosmologists have at various times devoted their attention. The first, which I shall call an *event-horizon*, is exemplified by the de Sitter model-universe. It may be defined as follows: An *event-horizon*, for a given fundamental observer A , is a (hyper-) surface in space-time which divides all events into two non-empty classes: those that have been, are, or will be observable by A , and those that are forever outside A 's possible powers of observation. It was this horizon,



(b) Gravitational Collapse: The Role of General Relativity¹

R. Penrose

Department of Mathematics, Birkbeck College - London

[Current address: Mathematical Institute, University of Oxford, 24-29 St. Giles,

Oxford, OX 13 LB, UK]

(Rivista del Nuovo Cimento, Numero Speciale 1, 257 (1969))

appropriate is the term "event horizon", since $r = 2m$ represents the absolute boundary of the set of all events which can be observed in principle by an external inertial observer. The term "event horizon" is used also in cosmology for essentially the same concept (cf. Rindler [5]). In the present case the horizon is less observer-dependent than in the cosmological situations, so I shall tend to refer to the hypersurface $r = 2m$ as the *absolute event horizon*³ of the space-time

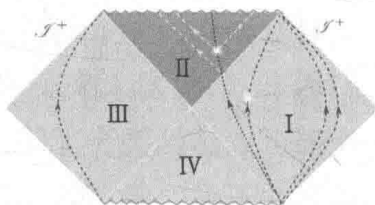


图 4 (a) 为某个观测者的事件视界。观测者世界线的过去是图中的阴影部分，也是观测者有可能探测到的时空的最大区域。而他（她）的事件视界是这个区域的边界。图 (b) 中的 II 区为最大扩张施瓦西时空中黑洞区 B 。黑洞的事件视界是这个区域的边界。上图中的每一点代表一个二维的曲面。图 (b) 中的各种无限远已经通过共性映射拉到有限处。这样，压缩掉两维后，我们可以将时空画在一张纸上。这种图称为彭罗斯-卡特图。在这种图中光的世界线都是和竖直方向成 45° 夹角的直线，如图中的直虚线。图 (b) 上下的锯齿线代表最大扩张施瓦西时空中的奇点

1.2 广义相对论中黑洞的小历史

1915 年爱因斯坦建立了广义相对论。这是一种典型的相对论性引力理论，时空度规满足的引力场方程就是著名的爱因斯坦场方程。20 世纪 60 年代以前，人们关于广义相对论的研究主要集中在