

时空奇点和黑洞

——2020年诺贝尔物理学奖解读

蔡荣根^{1,†} 曹利明² 李理¹ 杨润秋^{3,††}

(1 中国科学院理论物理研究所 北京 100190)

(2 中国科学技术大学物理学院 合肥 230026)

(3 天津大学理学院 量子交叉研究中心 天津 300350)

Singularities and black holes

——On the 2020 Nobel Prize in Physics

CAI Rong-Gen^{1,†} CAO Li-Ming² LI Li¹ YANG Run-Qiu^{3,††}

(1 Institute of Theoretical Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

(2 School of Physical Sciences, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China)

(3 Center for Joint Quantum Studies, School of Science, Tianjin University, Tianjin 300350, China)

2020-11-09收到

† email: cairg@itp.ac.cn

†† email: aqiu@tju.edu.cn

DOI: 10.7693/wl20210102

摘要 2020年度诺贝尔物理学奖于北京时间2020年10月6日晚揭晓,其中一半奖金授予罗杰·彭罗斯(Roger Penrose),表彰他“发现黑洞的形成是广义相对论的必然预言”;另一半奖金授予莱因哈德·根泽尔(Reinhard Genzel)和安德里亚·格兹(Andrea Ghez),因为他们“在银河系中心发现了一个超大质量的致密天体”。文章着重对彭罗斯及其时空奇点研究进行介绍,包括黑洞、奇点定理、宇宙监督假设等内容。

关键词 诺贝尔物理学奖, 黑洞, 奇点, 宇宙监督假设

Abstract The 2020 Nobel Prize in Physics was announced on the evening of October 6 (Beijing time). Half of the prize was awarded to Roger Penrose for the "discovery that black hole formation is a robust prediction of the general theory relativity"; the other half was awarded to Reinhard Genzel and Andrea Ghez for the "discovery of a supermassive compact object at the centre of our Galaxy". This paper focuses on Penrose and his research on the singularity of space-time, including black holes, the singularity theorem, cosmic censorship hypothesis, and so on.

Keywords Nobel Prize in Physics, black hole, singularity, cosmic censorship hypothesis

1 引言

北京时间10月6日晚,总奖金为1000万瑞典克朗(约合760万人民币)的2020年诺贝尔物理学奖在众人瞩目中揭晓,黑洞的理论研究和天文观测成为最大赢家(图1)。其中罗杰·彭罗斯(Roger Penrose)因为其“发现黑洞是广义相对论的必然预言”而获得一半的奖金;奖金的另外一半则授予莱因哈德·根泽尔(Reinhard Genzel)和安德里

亚·格兹(Andrea Ghez),因为他们“在银河系中心发现了一个超大质量的致密天体”,这个致密天体被人们普遍认为是一个大约400万倍太阳质量,离我们大约26000光年位于人马座的超大质量黑洞。本文依据诺贝尔物理学奖委员会的官方介绍^[1]以及其他资料,着重对彭罗斯的时空奇点研究进行介绍。

彭罗斯的学术成就极为全面,跨越了数学、物理学和哲学等多个领域。事实上在获得诺贝尔



图1 2020年诺贝尔物理学奖获得者。从左到右依次分别是：罗杰·彭罗斯、莱因哈德·根泽尔和安德里亚·格兹

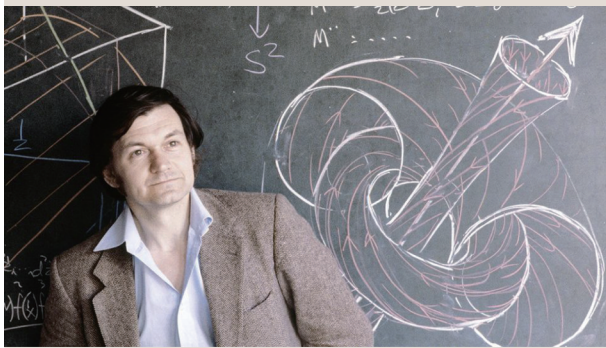


图2 青年时代的彭罗斯

奖之前，彭罗斯已经在数学领域和物理学领域享有极高的声誉。现已近90岁高龄的彭罗斯是广义相对论研究领域最为杰出的科学家之一。彭罗斯与以往其他的诺贝尔物理学奖获得者有一个显著不同。以往大多数诺贝尔物理学奖获得者都是从事物理或者工程技术方面研究出身，但是彭罗斯却是从非常抽象的代数几何步入学术研究。彭罗斯的数学天赋极高。在20世纪50年代末，受到剑桥大学广义相对论研究专家 Bondi 和 Sciama 的影响，彭罗斯开始了广义相对论方面的研究（图2）。拥有纯数学的研究背景使得彭罗斯考察广义相对论的方式和当时的许多物理学家有所不同，并最终在广义相对论的理论发展方面做出了巨大贡献。这其中和本次诺奖关系最大的就是他关于“时空奇性”的若干研究和“宇宙监督假设”。为了能够以最为通俗的方式让读者理解相关内容，我们在不至于导致谬误的基础上将不得不牺牲一些严谨性。希望对相关话题进一步深入了解的读者可以参阅文章中所列举的一些参考文献。

2 广义相对论和黑洞

彭罗斯关于时空奇性和宇宙监督假设的工作都是基于广义相对论的框架，因此我们首先简要介绍广义相对论和黑洞的相关知识。

引力现象无处不在，引力也是自然界中最普适的一种基本相互作用。牛顿在1687年的巨著《自然哲学的数学原理》中提出了万有引力定律，统一了地球上的引力现象

和天体的运动规律。事实上万有引力定律也是人类最早发现的自然规律。在牛顿的万有引力定律中，引力是物质之间的一种相互吸引力。由于它在描述引力现象时非常成功，在广义相对论诞生前的200多年间，牛顿万有引力定律被广泛接受。1905年爱因斯坦提出了狭义相对论。狭义相对论认为所有的惯性系都是等价的；任何信号的传播都需要时间，最高速度是光速。因此，牛顿万有引力定律本身固有的超距作用与狭义相对论无法兼容。包括庞加莱和闵可夫斯基在内的一些物理学家当时都在找寻一个能够将牛顿引力理论和狭义相对论相结合的新理论。但是，爱因斯坦基于等效原理和马赫原理，认为相对论性的引力理论必然要超越狭义相对论。经过近10年的艰苦探索，1915年11月，爱因斯坦在普鲁士科学院报告了引力场方程，正式宣告了广义相对论的建立。广义相对论将时空的几何和时空中的物质分布用一个张量方程——爱因斯坦引力场方程——联系起来。在广义相对论中，物质之间的引力相互作用来自于时空本身的弯曲效应，时空的弯曲方式又是由物质的分布决定。著名物理学家约翰·惠勒对引力场方程有一句形象的描述：物质告诉时空如何弯曲，时空告诉物质在其中如何运动。作为关于时间、空间和引力的理论，爱因斯坦广义相对论是自牛顿引力以来人类认识引力现象的一次质的飞跃。一百余年以来，爱因斯坦的广义相对论仍然是最为成功的引力理论，通过了大量的实验观测检验。基于广义相对论和宇宙学

原理建立的宇宙学标准模型也取得了巨大成功，其基本预言已经被大量的宇宙学和天文观测所证实。广义相对论甚至也在人们日常生活中发挥了重要作用，比如全球定位系统(GPS)为了精确定位，就需要考虑广义相对论带来的修正。黑洞和引力波作为广义相对论的两个重要预言，近几年也终于得到了实验的直接证实，为广义相对论奠定了坚实的实验基础。

所谓黑洞，通俗地说就是一类引力强到连光也无法逃逸的特殊致密天体。广义相对论中对黑洞的定义是“时空中光也无法逃逸的区域”。所以黑洞是“黑”的。这个区域的边界称为黑洞的事件视界，也是人们通常理解的黑洞的边界。从上面的定义可以看出黑洞的一个典型特征：一旦有物体穿过视界进入黑洞便再也无法逃逸出来，即“只进不出”。黑洞的另一个重要特征是黑洞内部通常会存在一个奇点，这也是本文将要介绍的彭罗斯获得诺贝尔奖工作的主角，下面两节会重点解读。

作为爱因斯坦引力场方程的一类特殊解，黑洞是纯粹理论研究的产物。宇宙中是否真的存在黑洞，早年一直为人们所怀疑，爱因斯坦本人也不相信黑洞的存在。但是现代天文观测表明宇宙中存在着大量的黑洞。这里大家可能就会疑惑，按照上面的理解，黑洞引力效应使得宇宙中跑得最快的光也逃不出去，应该是宇宙中最黑暗的天体，天文学家又是如何知道黑洞的存在呢？很有意思的是，让人们“看到”黑洞的也是引力！这是因为黑洞的超强引力效应会导致很独特的“气质”，“暴露”了黑洞的存在。对黑洞的探测可以分为间接和直接两种方法。间接探测主要是通过监测黑洞周边的吸积盘或者伴星来确定黑洞的存在。当黑洞以强大胃口吞噬周围物质时，会形成吸积盘，发出各种电磁信号，成为寻找黑洞踪迹的探针。事实上，银河系中绝大部分的恒星级黑洞是通过黑洞吸积伴星气体所发出的X射线来识别的。如2019年轰动全球的一件大事情就是发布了黑洞的照片(图3)^[2, 3]，也是利用黑洞周围的电磁波来探测到黑洞的。对于那些平静的黑洞，没有吸积伴星气体，黑洞超强引力会干扰临近星体

的运动，通过明亮伴星的运动轨迹就可以推知黑洞的存在，并测量黑洞质量。比如，这次诺贝尔物理学奖的另一半授予莱因哈德·根泽尔和安德里亚·格兹，他们就是通过这种方法来探测银河系中心的“大家伙”。

直接测量可以通过黑洞碰撞产生的引力波进行。引力波是时空的涟漪，即时空本身的涨落通过波的形式从辐射源向外传播。1916年爱因斯坦基于广义相对论预言了引力波的存在。理解引力波最简单的出发点是考虑线性化的引力场方程。在弱场近似下，考虑闵氏时空背景上度规的一个小扰动，这个度规的扰动满足线性化的爱因斯坦场方程，可以发现扰动方程正好就是以光速传播的无质量粒子的波动方程。这个以光速传播的度规扰动(时空涟漪)就是引力波。由于规范自由度，引力波的独立自由度只有两个(通常称为“+极化”和“×极化”，两个极化方向的夹角为 45°)，而且波的振动方向与传播方向垂直，因此引力波是一种横波(图4)。2015年9月14日，位于美国的LIGO引力波探测器首次直接探测到了双黑洞并合的引力波信号(GW150914)^[4]。此次观测结果与广义相对论的预言相符，不仅直接证明了引力波的存在，也证实了黑洞的存在，同时也打开了一扇研究宇宙的新窗口。

虽然黑洞看起来很复杂很神秘，但是事实上刻画黑洞却非常简单。对于一般含有电磁场的引力系统，刻画黑洞只需要三个参数：黑洞有多



图3 事件视界望远镜(Event Horizon Telescope)得到的人类第一张黑洞照片。黑洞位于室女座星系团中的星系M87，距离地球5500万光年，质量为太阳的65亿倍(图片取自事件视界望远镜合作组)

重、带多少电荷、转动有多快。也就是说，只要给定质量、电荷和角动量三个参数，就可以唯一地确定一个黑洞。这就是广义相对论中黑洞的唯一性定理(也叫无毛定理)。作为对比，可以想象描述一只小猫需要多少参数。不论前身多么复杂，一旦黑洞形成后，人们对黑洞所能获取的信息只有质量、电荷和角动量，其他的信息全部丧失了。从这个意义上来说，黑洞又是宇宙中最简单的一类天体。

黑洞可以按照“体重”分为如下几类：恒星级黑洞、中等质量黑洞、超大质量黑洞以及小黑洞(也称为微型黑洞)。恒星级黑洞的质量大约为几倍(3倍以上)到几百倍太阳质量，一般是大型恒星死亡后直接坍缩形成。中等质量黑洞大约为1千至10万个太阳质量，这种黑洞不能通过恒星演化直接形成。目前的研究认为，中等质量黑洞是通过大量吸收周围物质和互相合并而形成，简单来说就是“吃出来的”。超大质量黑洞可以达到太阳质量的数十万到数百亿倍。观测证据表明，几乎所有的大型星系都有一个位于中心的超大质量黑洞。超大质量黑洞的质量是如何变得如此巨大一直困扰着天文和物理学家。此外，理论上也存在质量很小的黑洞，它们的质量接近或者远小于太阳质量。这种小质量黑洞来自于宇宙早期的密度涨落坍塌。在宇宙演化的早期，物质非常稠密，在小尺度上分布可以非常不均匀，所以密度极高的小区域中的物质可以直接塌缩成黑洞，形

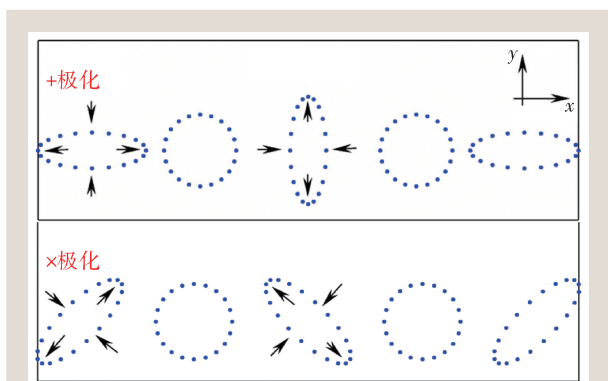


图4 沿 z 轴传播的引力波对 xy 平面上按照环形静止分布的质点的影响。上图对应“+极化”，下图对应“ \times 极化”。引力波是一种以光速传播的横波，在其传播所经过的空间点，会发生空间拉伸和压缩等物理现象

成所谓的“原初黑洞”。原初黑洞是当前的热门研究领域之一。它不仅在理论研究中具有重要价值，而且还是暗物质的一种可能候选者。原初黑洞也被用来解释宇宙中的伽马射线暴。对于太阳系可能存在的第九大行星，也有研究推测可能就是原初黑洞。

3 奇点定理

在广义相对论建立的早期，由于人们对这一充满革命性的理论知之甚少，在探索这一理论的过程中也曾遇到许多“困惑”。广义相对论中的爱因斯坦引力场方程是一个高度耦合的非线性方程。对这种方程的求解是一个极为困难的事情。早期人们只能求解一些具有高度对称性的情况。这其中最早的一个结果就是由德国物理学家施瓦西(Schwarzschild)在广义相对论提出后一个月得到的真空球对称解——施瓦西解，这也是第一个真正意义上的黑洞解。另外一个同样著名的成果则是由俄国物理学家弗里德曼(Friedmann)在1922年得到的，它是描述各向同性均匀宇宙演化的弗里德曼—勒梅特—罗伯逊—沃尔克度规。虽然这两个解描述的物理非常不同，但是人们发现它们有一个特别的相似之处：它们都表明时空中存在一个曲率无限大的点——“时空奇点”。这里说的曲率无限大确切地说是由曲率张量构成的某些标量是无限大的，这种类型的奇点称作“曲率奇点”。实际上除了曲率奇点外，在广义相对论中还有许多其他形式的奇点，比如“测地不完备”奇点。还有一些时空奇点处曲率并不发散。详情可以参阅文献^[5]。后来，钱德拉塞卡、朗道和奥本海默等对于大质量恒星演化的研究表明：球对称的大质量恒星在其核燃料燃烧耗尽之后将会不可避免地塌缩成为一个黑洞，从而导致时空奇点的形成(图5)。由于在广义相对论中时空的曲率具有可观测效应，物理学上这种具有可观测效应的无限大并不是物理学家所乐见的。因为在物理世界中并不存在什么真正的无限大。一个理论预言了“无限大”往往预示着这个理论的危机。

广义相对论的奇点疑难几乎与广义相对论同时诞生。然而在广义相对论研究早期，包括爱因斯坦在内的许多物理学家并不认为在广义相对论的框架下奇点会出现在真实的世界中。首先，施瓦西解和恒星晚期的演化都假设了球对称性，但是真实的星体不可能具有那样精确的球对称性；其次，在弗里德曼—勒梅特—罗伯逊—沃尔克度规里，人们则假设了宇宙是均匀且各向同性的，但是真实的宇宙不可能具有理论模型中那样完美的均匀对称性。这使得一些物理学家认为真实的物理世界中并不存在奇点。这一想法非常自然。比如，在经典电磁学里一个点电荷的电场强度在中心处是发散的，但是这并不导致经典电磁学的任何危机——因为现实世界里不存在一个真正的“点”电荷。那么在广义相对论里发现的那些“无穷大”也是因为模型过于简化所致吗？对于“球对称”的偏离可以有效地避免时空奇点的产生吗？关于这个问题的回答分为两派：一派认为“发散”的出现是因为人们采用了过分理想、以至于现实中不存在的模型，其代表人物就包括苏联物理学家栗弗席兹(Lifshitz)和卡拉特尼科夫(Khalatnikov)等人；另外一派则认为在广义相对论框架下时空的奇点是不可避免的，其代表人物就是彭罗斯以及2年前去世的史蒂芬·霍金(Stephen Hawking)。经过几年的研究，最终彭罗斯和霍金的观点胜出。这其中彭罗斯的数学背景起到了关键作用。

促使彭罗斯研究奇点问题的动机是20世纪70年代天文学上类星体的发现。类星体是距离我们非常遥远的天体，远在几十亿光年之外，但是其可见光区的辐射功率是普通星系的成百上千倍。类星体辐射的能量来源因此成为困扰天文学家的一个难题，而黑洞就为类星体的能源问题提供一个自然的解决方案^[6]。1965年彭罗斯给出了第一个奇异性定理(也称为奇点定理)的证明^[7]。这一工作是里程碑式的。它首次在不依赖对称性的情况下证明了：只要时空中的物质是由一些“正常”的物质构成(指它们满足某些“能量条件”)，并且时空满足一些基本的性质，那么时空的奇点是普遍存在、不可避免的。在彭罗斯最早的证明中

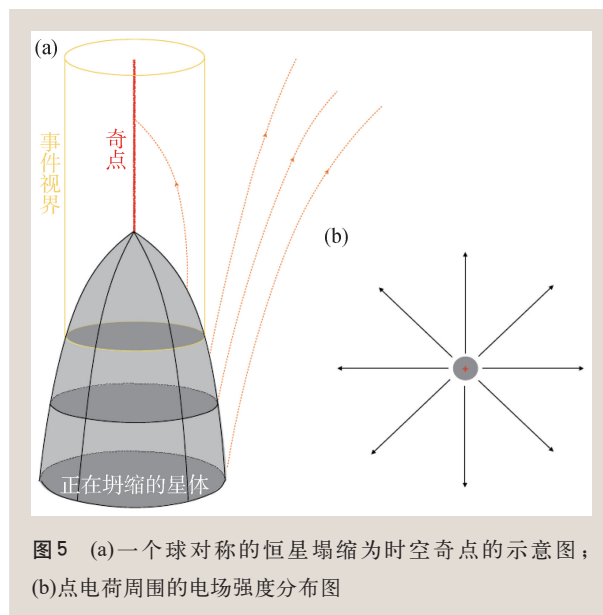


图5 (a)一个球对称的恒星塌缩为时空奇点的示意图；(b)点电荷周围的电场强度分布图

要求时空满足“整体双曲性”，后来这个条件被放宽为满足“编时条件”^[8, 9]。在证明奇异性定理的过程中，彭罗斯引入了现代广义相对论研究中的许多重要概念，比如时空的奇异性、俘获面、柯西面和时空的整体双曲性等数学概念；并进一步发展了在描述时空整体因果结构极为有用的“彭罗斯图”。这些数学概念与工具的发明极大地澄清了广义相对论中的许多内容，奠定了广义相对论中关于奇异性研究的基调，并在当代成为研究广义相对论的标准语言。彭罗斯的这一篇开创性工作一经问世就迅速地吸引了许多物理学家的注意，这其中最为突出的代表就是霍金。实际上，1965年的文章只是彭罗斯一系列关于奇点定理文章的开篇。在其后的系列研究工作中，彭罗斯和霍金合作对彭罗斯1965年的结果进行了推广(图6)，并应用到宇宙学中证明了大爆炸奇点的普遍存在性^[8, 9]。至此彭罗斯和霍金等人彻底地回答了广义相对论中奇点的存在性问题：球对称性的偏离并不能有效地克服奇点的产生，奇点的形成在广义相对论中几乎是不可避免的。

4 宇宙监督假设

当意识到奇点的不可避免性后，奇点附近的行为成为物理学家，尤其是广义相对论研究者需



图6 彭罗斯(右)与史蒂芬·霍金的合影。史蒂芬·霍金已于2018年去世

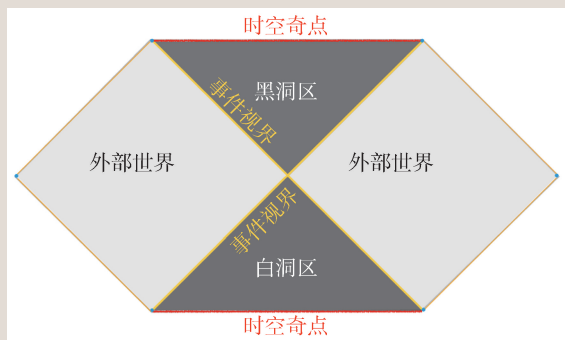


图7 施瓦西黑洞的彭罗斯图。视界将奇点和外部时空隔绝开来

要面对的一个棘手的问题。在奇点附近，将会出现各种“诡异”的现象。例如，奇点附近大量物质的产生。另外，裸奇点的存在甚至会影响到无限远处的观测者。如何避免这种不良的影响？为此，在1968年到1969年间，彭罗斯提出了弱宇宙监督假设：除了宇宙大爆炸奇点外，奇点总是被一个称为“黑洞事件视界”的表面所包裹，因此不再裸露，遥远的观测者不再受其影响^[7, 10, 11]。

在广义相对论的研究中，人们通常将事件视界定义为一个黑洞的边界。事件视界独特的性质使得其两侧的物理世界是因果隔绝的。由于人们生活在黑洞的外面，如果所有的奇点都隐藏在黑洞内部的话，那么奇点的存在就不会对人们所能够观测到的物理世界产生任何影响了。这就从一定意义上解决了奇点导致的各种破坏性问题。基于彭罗斯的“奇点普遍存在”的结论和“弱宇宙监督假设”，人们可以作如下思考：物理上可以产

生的奇点必须包裹在一个事件视界中。由于宇宙中物质演化产生奇点是普遍存在的，这些奇点都应该隐藏在黑洞的事件视界中，因此黑洞的形成也一定是普遍的。这就是说，在广义相对论中物质的演化必然导致黑洞的出现。弱宇宙监督假设的成立与否对广义相对论自身和天体物理研究具有重要意义。弱宇宙监督假设如果成立，那么大质量星体的最终归宿只能是黑洞。

例如，人们发现的第一个时空奇点——施瓦西黑洞的奇点。对于这样的奇点，奇点的外部的确存在一个被称之为“事件视界”的边界。这一边界将施瓦西黑洞中的奇点包裹起来，如图7所示。事件视界完美地将施瓦西黑洞的奇点隐藏了起来，使得在奇点处任何破坏物理的怪异行为都不会对生活在视界外部的人们产生影响。从这个角度来说的话，施瓦西黑洞的奇点是一个“无害”的奇点(图7)。对于已发现的大部分精确解，彭罗斯的弱宇宙监督假设都能被满足。另外，研究表明：在一般条件下，普通物质组成的球对称塌缩星体形成的黑洞，奇点也会被视界所包裹。然而，在某些特殊的情况下，球对称的引力塌缩也可能导致裸露在视界外的奇点^[12-15]。

然而，对这样一些特例适用的解决方案到底有多大的普遍性呢？这需要人们对弱宇宙监督假设进行证明或证否。和彭罗斯证明奇点定理不同，宇宙监督假设是一个相当困难的问题，到目前为止仍然没有获得完全解决。事实上，黑洞视界定义本身就与时空的整体演化有着密切关系，不像奇点的定义那样具有局域性，这自然也导致对宇宙监督的证明要比奇点证明困难得多。

鉴于宇宙监督假设如此重要，在无法直接解决这一问题的情况下，人们试图对这个问题进行“旁敲侧击”。彭罗斯本人就曾提出过两个思想实验来验证宇宙监督假设。其中一个就是考虑可否通过一些物理允许的过程将一个黑洞“摧毁”，但是却保留黑洞内部的奇点。实际上不难发现，如果宇宙监督假设正确，那么这样的过程就不会存在。因此，如果有人能够设计一个物理过程(哪怕只是理论上可行)来“摧毁”黑洞并使得奇点暴

露出来,那么他就否定了宇宙监督假设;相反,如果人们在尝试各种努力之后仍然无法摧毁黑洞,那么就从一定程度上暗示了宇宙监督假设的正确性。经过几十年的努力,人们确实在理论上没有发现摧毁黑洞的方法。这在很大程度上坚定了人们对宇宙监督假设的信心。彭罗斯本人提出的第二个思想实验是考虑黑洞的视界面积大小,他发现如果宇宙监督假设成立的话,任何一个黑洞的视界面积都不会比相同质量的施瓦西黑洞的视界面积大。这个不等式在被提出后就吸引了许多数学家和物理学家的兴趣。Trudinger, Gibbons, Geroch, Wald 和 Jang 等人在这个不等式或改进型不等式的证明中都做出了重要贡献。在彭罗斯提出这一结论 20 多年后,也就是 2001 年,数学家在证明这个不等式上取得了重要进展^[16, 17],证明了一大类情况下黑洞的视界面积确实不会比同样质量的施瓦西黑洞的视界面积大。不过,这个不等式在更一般情况下是否也成立目前还是一个尚未解决的问题。除了这两个思想实验外,人们也可以研究黑洞视界在扰动下的稳定性。这可以看成是在微扰意义下研究是否可以“摧毁”黑洞。若黑洞事件视界在微扰下不稳定,则奇点可能裸露在视界外部。因此关于黑洞稳定性的研究可以从另一个侧面检验宇宙监督假设^[18]。一系列研究表明^[11, 19-21]:在线性微扰下,大部分黑洞都是稳定的。因此奇点不会因为线性微扰而从视界内部裸露出来。实际上最近 LIGO 观测到的双黑洞合并产生的引力波以及“事件视界望远镜”对黑洞的直接成像都从实验上验证了黑洞的稳定性,因为倘若黑洞视界不稳定,实验上就不可能观测到黑洞存在的证据。

奇点的存在使得人们无法有效地预言时空中物理现象的演化^[7, 22, 23]。广义相对论的一个重要物理意义就在于它能够计算并且预言时空的演化,但是奇点的出现破坏了这种可预言性。这对于广义相对论来说是一个致命的挑战。那么有什么机制能够消除或者至少是减弱这种挑战呢?为此彭罗斯提出了一个强宇宙监督假设:物理的时空都是可预测的。彭罗斯的工作表明奇点在经典

广义相对论中是不可避免的,为了使视界内的观测者也无法观测到奇点,这就要求奇点必须是类空的(类空奇点的一个例子是前文提到的施瓦西黑洞的奇点)。虽然人们可以依据广义相对论预知其存在,但只有当真正撞上时才能“观测”到这样的奇点。关于强宇宙监督的研究也是近几年的前沿热点,本文作者近期的一个工作证明了对一大类带毛黑洞而言其奇点一定是类空的^[24],算是对强宇宙监督假设成立证据的“添砖加瓦”。

5 结束语

广义相对论是一个经典理论。上述关于黑洞和时空奇点的讨论都是在经典广义相对论的框架下进行的。结合二十世纪的另一重大科学成就——量子力学,人们对黑洞物理和引力本质等的理解又有了重要进展。考虑黑洞外量子效应,20 世纪 70 年代,人们发现黑洞具有一个反比于其质量的温度和正比于其视界面积的熵。由于黑洞是热的,它会不断辐射能量,其质量会逐渐减少。随着黑洞不断变小,黑洞的温度会不断上升,蒸发速度也会不断加快,这就是霍金提出的“黑洞蒸发”理论^[25]。“黑洞蒸发”是人们对于强引力场区域量子效应的里程碑认识,但同时也带来了黑洞信息佯谬^[26],即黑洞在形成到相继蒸发过程中是否满足量子力学的么正性(信息守恒),通过霍金、贝肯斯坦等人的努力,建立了黑洞的热力学定律,揭示了引力、热力学和量子理论之间的深刻联系。黑洞热力学,尤其是引力全息性质的发现,不仅对深入理解引力本质提供了重要帮助,也为研究强耦合体系提供了有效方法。这些是近些年来引力和相关领域的重要前沿研究,黑洞也成为连接理论物理诸多重要学科的桥梁。近期一个重要进展是对黑洞信息佯谬的理解,基于引力全息,一些研究者采用半经典的方法解释了黑洞的存在不会破坏信息守恒^[27],但是半经典理论目前还无法给出信息具体如何从黑洞内部逃逸的机制。一般来说,为了解决黑洞信息佯谬,人们还需要量子理论和广义相对论的深入统一。

广义相对论提出一百多年来，彭罗斯关于奇点的一系列开创性工作仍然被认为是自爱因斯坦以来对广义相对论最重要的贡献之一。正如诺贝尔物理学奖委员会主席大卫·哈维兰所说“今年获奖者的发现为致密和超大质量物体的研究开辟了新天地。但是，这些奇异的物体仍然提出了许多问题，这些问题需要解答，并激励了未来的研究”。彭罗斯等人获得诺贝尔奖并不意味着这个研究领域已经“盖棺定论”。相反，关于引力、时空以及宇宙中的那些超大质量致密天体的研究仍然存在着太多的未解之谜等着人们去探索，而且广义相对论也不是关于引力本质的终极故事。不过稍微有些遗憾的是，彭罗斯昔日的研究搭档，曾经提出过著名的“黑洞蒸发”理论，开创了黑洞热力学研究的先河，并因为奇点相关研究工作而与彭罗斯一起获得1988年“沃尔夫奖”的著名物理学家史蒂芬·霍金已经于两年前去世，未能见证这一荣耀的时刻。

从1916年施瓦西发现第一个黑洞解到现在，人们对黑洞已经有了深刻的理解。一方面，理论研究表明黑洞是一类特殊的致密天体，也是一个热力学系统。从黑洞热力学又发现了引力全息性质，对引力的认识有了质的飞越，为建立一个自洽的量子引力理论提供了启示和方向。另一方面，实验技术的革新不仅使人类聆听到双黑洞并合产生的引力波信号，也成功实现了直接给黑洞拍照。从某种意义上说，我们正生活在研究引力和黑洞的黄金时代。但是，关于黑洞仍然存在很多未解之谜，比如黑洞的内部结构和奇点，黑洞熵的微观自由度，黑洞蒸发面临的信息丢失问题。还有一些相关的更基本的问题：黑洞的本质是什么？引力的本质是什么？时空是否从一个基本的理论中产生？对这些问题的最终解决还有很长一段路要走。但是这些问题的突破必将引导人们打开新物理的大门，而黑洞无疑将是打开这扇大门的一把关键钥匙。

参考文献

- [1] The Nobel Committee for Physics, 2020, Theoretical foundation for black holes and the supermassive compact objects in the Galactic center
- [2] Akiyama K *et al.* *Astrophys. J.*, 2019, L1(1): 875
- [3] Akiyama K *et al.* *Astrophys. J.*, 2019, L4(1): 875
- [4] Abbott B *et al.* *Phys. Rev. Lett.*, 2016, 116(6): 061102
- [5] 梁灿彬, 周彬. 微分几何入门与广义相对论(上册), 第二版. 北京: 科学出版社, 2019
- [6] Salpeter E E. *ApJ*, 1964, 140: 796
- [7] Penrose R. *Phys. Rev. Lett.*, 1965, 14: 57
- [8] Hawking S, Ellis G. *The Large-Scale Structure of Space-time.* Cambridge: Cambridge University Press, 1973
- [9] Hawking S, Penrose R. *Proc. R. Soc. London A*, 1970, 314(1519): 529
- [10] Penrose R. *Singularities of Spacetime.* In: Lebovitz N R, Reid W H, Vandervoort P O. *Theoretical Principles in Astrophysics and Relativity.* University of Chicago Press, 1981
- [11] Vishveshwara C V. *Nature*, 1970, 227: 936
- [12] Singh T P. *Gravitational Collapse and Cosmic Censorship.* In: Date G, Iyer B R. *Classical and Quantum Aspects of Gravitation and Cosmology.* Date G Iyer B R. 1996. arxiv:gr-qc/9609054
- [13] Choptuik M W. *Phys. Rev. Lett.*, 1993, 70: 9
- [14] Christodoulou D. *Commun. Math. Phys.*, 1986, 106: 587
- [15] Christodoulou D. *Commun. Math. Phys.*, 1987, 109: 613
- [16] Huisken G, Ilmanen T. *J. Diff. Geom.*, 2001, 59: 353
- [17] Bray H L, Lee D A. *Duke Math. J.*, 2009, 148(1): 81, arXiv: 0705.1128
- [18] Penrose R. *J. Astrophys. Astr.*, 1999, 20: 233
- [19] Price R H. *Phys. Rev. D*, 1972, 5: 2419
- [20] Wald R M. *Journal of Mathematical Physics*, 1979, 20: 1056
- [21] Kay B S, Wald R M. *Class. Quantum Grav.*, 1987, 4: 893
- [22] Penrose R. *Singularities and time-asymmetry.* In: Haw King S W, Israel W. *General Relativity, and Einstein Centenary Survey.* Cambridge University Press, 1979
- [23] Wald R M. *Gravitational Collapse and Cosmic Censorship.* 1997, arXiv:gr-qc/9710068
- [24] Cai R G, Li L, Yang R Q. *No Inner-Horizon Theorem for Black Holes with Charged Scalar Hair.* 2020, arXiv:2009.05520
- [25] Hawking S W. *Communications in Mathematical Physics.* 1975, 43 (3): 199
- [26] Hawking S W. *Phys. Rev. D*, 1976, 14(10): 2460
- [27] Almheiri A, Hartman T, Maldacena J *et al.* 2020, arXiv: 2006.06872