

DOI:10.12405//j.issn.2097-1486.2022.01.005

诺贝尔物理学奖的科学哲学突破:从彭罗斯和霍金说起

施郁

复旦大学 物理学系, 上海 200433

摘要:2020年诺贝尔物理学奖的一半表彰彭罗斯的理论工作。一个引起广泛兴趣的问题是,如果霍金2020年还健在,能否也获诺贝尔奖?本文首先讨论了这个问题,认为在他去世之前,本来就可以获得诺贝尔奖。然后澄清,彭罗斯-霍金奇点定理不是一个定理,而是一系列关于奇点的定理,而彭罗斯获诺贝尔奖的理由是他1964年独立完成的奇点定理。该定理指出,在引力塌缩中,普遍存在奇点。本文最后指出,彭罗斯的诺贝尔奖是诺贝尔物理学奖历史上第一次授予以前没有、将来可能也没有直接实验或观测验证的理论发现,标志着诺贝尔物理学奖的科学哲学突破以及新时代的开始。

关键词:诺贝尔物理学奖;罗杰·彭罗斯;斯蒂芬·霍金

中图分类号:G301 **文献标志码:**A **文章编号:**2097-1486(2022)01-0049-06

Scientific and philosophical breakthrough of Nobel Prize in Physics: A discussion starting with Penrose and Hawking

SHI Yu

Department of Physics, Fudan University, Shanghai 200433, China

Abstract: Half of the Nobel Prize in Physics 2020 awarded Roger Penrose for his theoretical contribution. An interesting question widely discussed is whether Stephen Hawking would have also received Nobel Prize. This paper first discusses this question, arguing that Hawking should have received Nobel Prize in Physics even before he passed away. Penrose-Hawking Singularity Theorems are a set of theorems about singularities, rather than a single theorem. The reason that the Nobel Prize awarded to Penrose is the Singularity Theorem presented by himself in 1964, stating that the singularity exists robustly in a gravitational collapse. The paper finally points out that the Nobel Prize awarded to Penrose was the first time in history for a theoretical discovery that had not been and would unlikely be directly confirmed in experiments or observations, representing a scientific and philosophical breakthrough and the beginning of a new era of Nobel Prize in Physics.

Key words: Nobel Prize in Physics; Penrose; Hawking

罗杰·彭罗斯(Roger Penrose)因为“发现黑洞的形成是广义相对论的普遍(robust)预言”而分享了2020年的诺贝尔物理学奖^[1-2]。很多人立即联想到斯蒂芬·霍金(Stephen Hawking)。霍金和彭罗斯的名字经常联系在一起,也对黑洞物理做出重大贡献,在公众中名气更大,也高调得多。1990年代,

彭罗斯封爵,但是霍金为了抗议英国政府将两个科研经费管理机构合并,拒绝了封爵。霍金虽然已经去世,但继续引起关注。

本文首先讨论一个热议的问题:“如果霍金健在,是否也能获诺贝尔奖?”然后拓展到更深更广的视野。

1 如果霍金健在,是否也能获诺贝尔奖?

霍金生前一直未获诺贝尔奖。人们普遍相信,这是因为他的理论没有实验或观测的验证。现在,既然彭罗斯因黑洞理论而获诺贝尔奖,大家不禁好奇,如果霍金健在,是否也能获诺贝尔奖?

如果仅仅是这个问题,我的答案简单,也与众不同:霍金健在的时候,就应该获得诺贝尔奖,虽然当时彭罗斯还没得诺贝尔奖。

考察诺贝尔物理学奖自创立以来的情况,可以看到它的传统风格。它所授予的理论工作,都与实验有密切、具体和直接的关系。比如,有一个或多个实验的结果非用这个理论解释不可;或者这个重要理论预言了某个现象,被实验证实。

重要的理论工作有广泛的意义,自然不局限于对个别现象的解释。但是以前,获诺贝尔奖的理论工作往往直接解决了实验中的问题,或者预言了实验现象。

例如,量子力学是极为重大、极为基础的理论,或者说理论的理论。但是它在建立过程中,也不断地直接解释和预言了很多实验,大量的实验非用它解释不可。所以绝大多数量子力学创立者获得了诺贝尔奖,除了纳粹党人帕斯卡·约当(Pascal Jordan)。

阿尔伯特·爱因斯坦(Albert Einstein)获诺贝尔奖的理由不是相对论,甚至也不是光量子理论本身,而是在光量子假说基础上的光电效应解释。而且爱因斯坦是于1922年获得“补发”的1921年诺贝尔奖。当时,作为一个革命性的理论,爱因斯坦1905年提出的光量子理论还没有被普遍接受,而光电效应解释只是光量子理论的应用,只占了光量子论文中的一章,但是直接解决了实验中的问题。同于1905年提出的狭义相对论反而很快被广为接受,然而当时又往往与1915年提出的广义相对论放在一起评价,而后者受到质疑,主要因为与当时的引力红移实验不符,也因为爱因斯坦作为犹太人受到责难^[3]。

作为另一个例子,1965年发表、1978年获奖的宇宙微波背景辐射的发现以来,宇宙学的观测工作已经得过好几次诺贝尔奖,但是理论工作直到2019年才第一次获诺贝尔奖。

回到霍金。霍金的工作长期没有得到实验或者观测验证,但是这个情况后来有了改变,虽然这个“后来”比较迟。2016年,美国的激光干涉引力波天

文台(LIGO)宣布,他们于2015年直接探测到引力波,这个引力波来自两个黑洞合并成为一个大黑洞。观测结果验证了霍金提出的黑洞视界面积不减。黑洞的视界是一个包围着黑洞中心的球面(转动黑洞的视界对球面有非常小的偏离),任何物体,包括光,落进去以后,便再也不能出来。它的面积正比于质量的平方。比较并合前后的黑洞总质量可以发现,大黑洞的质量平方大于原来两个黑洞的质量的平方的和,因此总视界面积增加了。后来又探测到几次黑洞并合所产生的引力波,结果都与黑洞面积不减定理一致。

黑洞视界面积不减定理的研究正是源于霍金为了推广彭罗斯的奇点定理而发展的因果性分析,但是可以从观测中验证。

彭罗斯的奇点定理说,引力塌缩下,普遍存在奇点,即质量集中于一点(体积为0),因此在这个点,密度和时空弯曲程度都是无穷大。2020年诺贝尔物理学奖官方文件里解释,彭罗斯的获奖成果就是这个奇点定理。

因此,按照诺贝尔奖传统,霍金本来是有机会获得诺贝尔奖的。在2017年诺贝尔奖公布前和霍金去世后,我都说过霍金可以以此分享2017年物理学诺贝尔奖^[4-6]。可惜这没有发生。

黑洞视界面积不减定理与热力学第二定律(孤立系统熵不减小)类似,引发了一系列理论探索,最终导致霍金辐射和黑洞熵的发现。这是霍金最重要的贡献^[6-7]。但是它们作为黑洞的量子效应,非常非常小。比如,与太阳同质量的黑洞的温度只有绝对零度以上亿分之六度(在绝对零度没有辐射)。所以目前无法得到实验验证,哪怕是间接的。所以即使霍金健在,也无法因此获得诺贝尔奖。

霍金辐射与黑洞熵公式标志着量子力学和广义相对论的初步结合。对于未来更深入的量子引力理论来说,能否重现它们可以作为是否成功的标准^[6-7]。所以霍金辐射温度公式现在刻在西敏寺教堂里的霍金墓碑上,位于牛顿和达尔文的墓之间,而黑洞熵公式刻在霍金生前所属的剑桥冈维尔和凯斯学院(Gonville and Caius College)里的霍金纪念碑上,显示其重要性^[8-10]。

2 彭罗斯-霍金奇点定理

因为彭罗斯的获奖成果就是奇点定理,所以人们联想到“彭罗斯-霍金奇点定理”,认为如果霍金健在,要因这个定理分享这份诺贝尔奖。

值得指出,“彭罗斯-霍金奇点定理”的英文是 Penrose-Hawking Singularity Theorems。有没有注意到,定理(Theorems)这个单词是复数?

真相是,“彭罗斯-霍金奇点定理”不是一个定理,而是一系列关于奇点的定理。

首先,1964年,彭罗斯单枪匹马证明,在很宽泛的条件下(主要要求塌缩物质的能量不是负数),黑洞能够形成,包围一个奇点(密度和时空弯曲程度无穷大)^[11]。这表明黑洞在致密区域很容易产生,引力塌缩的奇点是普遍存在的。这是广义相对论的普遍、对条件不敏感的推论,可以称为彭罗斯的黑洞奇点定理。彭罗斯用了拓扑学方法,开启了广义相对论中的整体分析。

这个1964年独立完成,1965年发表的开创性证明是彭罗斯获得2020年诺贝尔奖的理由。

当时彭罗斯是伦敦大学伯贝克学院的 Reader(相当于美国的某些教授职位)。他从1952年大学四年级开始,特别是在剑桥读数学研究生以及后来的研究员时期,受到剑桥的理论宇宙学家西阿玛(Dennis Sciama)很大影响。彭罗斯说过,除了他父亲,对他科学道路影响最大的就是西阿玛。

1965年初,彭罗斯在伦敦公布奇点定理的时候,霍金是西阿玛的研究生。霍金将彭罗斯的奇点定理推广到宇宙大爆炸的起始点。

现在我们简单回顾一下宇宙大爆炸理论(或者说大爆炸宇宙学)的起源^[12]。1922年,俄国数学物理学家弗里德曼(Alexander Friedmann)假设宇宙在大尺度上均匀、各向同性,提出描述宇宙大尺度时空的数学模型^[13]。1927年比利时主教勒梅特(Georges Lemaître)重新发现这个模型。这个数学模型显示,宇宙从一个奇点膨胀而来。1929年,美国天文学家哈勃(Edwin Hubble)发现遥远星系远离我们而去,说明宇宙确实在膨胀^[14]。1935年左右,罗伯森(Howard P. Robertson)和沃克(Arthur G. Walker)进一步澄清了弗里德曼模型的数学细节。1940年代末,俄裔美国物理学家伽莫夫(George Gamow)提出大爆炸宇宙学模型^[15],并与合作者阿尔法(Ralph Alpher)、赫尔曼(Robert Herman)预言了宇宙背景辐射^[16-17]。“大爆炸”名称最初是1949年英国天体物理学家霍伊尔(Fred Hoyle)作为讽刺而起的名称^[18]。

弗里德曼的宇宙模型与施瓦西(Karl Schwarzschild)1915年最初的黑洞模型颇有类似之处,都包含奇点。因此出现类似的问题:在现实中,

对称性的破坏是否可以使得奇点得以避免?施瓦西黑洞模型的对称性是球面对称,而宇宙学的对称性是指“大尺度上均匀,各个方向等价”。1963年苏联的栗夫席兹(Evgeny Lifshitz)和卡拉尼科夫(Isaak Khalatnikov)提出,在没有对称性的情况下,爱因斯坦方程的解没有奇点^[19]。这个否定既适用于黑洞形成,也适用于宇宙大爆炸。在黑洞方面,这个结论被1964年的彭罗斯黑洞奇点定理推翻^[11]。

1965年,霍金证明了,在弗里德曼宇宙模型中,不依赖于对称性,彭罗斯提出的俘获面也不可避免,奇点也不可避免,因此宇宙膨胀类似于引力塌缩的逆过程,起源于一个奇点^[20]。之后他又发表了一系列文章,讨论各种模型参数的情况,奇点定理的条件也不尽相同^[21]。其中有一篇是与同学埃利斯(George Ellis)的合作。美国的杰勒(Robert Geroch)也讨论过一个情况。

1965年5月,美国工程师彭齐亚斯(Arnold Penzias)和威尔逊(Robert Wilson)发表论文,汇报1964年发现的宇宙背景辐射^[22]。作为标准的黑体辐射,这证明了宇宙大尺度的均匀,成为大爆炸宇宙学的最强支持。这个观测发现使得霍金的奇点定理更令人信服,在广义相对论框架中,宇宙不可避免始于奇点。

从彭罗斯最初的黑洞奇点定理,到霍金将它推广到宇宙学,都假设了存在柯西视界。柯西视界代表了有因果关联的时空区域的边界,本身是类光的(只有通过光才能实现因果关联),将类空区域(无因果关联)与类时区域(有因果关联)隔开。

1970年,霍金和彭罗斯将奇点定理做了推广^[23],证明了在合理的前提下,奇点不可避免。这里仍然有能量非负的前提,但是不需要假设存在柯西视界,最重要的假设是时间不能回到过去。这些条件当然很合理。这个推广的奇点定理适用于引力塌缩和大爆炸宇宙学,因此在经典广义相对论框架里,引力塌缩终结于奇点,而宇宙起源于奇点^[23]。

量子引力理论可能消除黑洞奇点,类似地,也可能消除宇宙起源的奇点。毕竟量子力学的一个基本论点就是位置和动量不能同时确定,与一个固定的点这样的概念不融洽。另外,为了解决标准宇宙学的一些问题(粒子视界、平坦性、理论上磁单极过多等等),现在普遍认为,在标准宇宙学过程之前,宇宙还曾经有过一个极速膨胀的暴涨过程。研究人员对于暴涨能否消除初始奇点,还有不同意见。比如有人猜测暴涨模型可以向过去无限扩展,从而避免初

始奇点,但是有人认为奇点依然不可避免。

霍金自己曾经说过,他对经典引力理论最重要的贡献是面积不减定理和与他人合作证明黑洞无发定理^[20]。黑洞无发定理是说,黑洞只需要由质量、电荷和转动角动量描述。这是惠勒(John Wheeler)猜想,由霍金与卡特(Brian Carter)、以色列(Werner Israel)和罗宾孙(David C. Robinson)在某些合理前提下证明^[20]。

3 彭罗斯获奖标志了诺贝尔奖的科学哲学突破

如上文所述,以往诺贝尔物理学奖通常授予能直接解决实验问题或预言实验现象的理论,但彭罗斯的获奖是诺贝尔奖历史上第一次授予至今没有、将来也基本上没有直接的实验或观测验证的理论发现。

这首先是因为黑洞的奇点在视界之内,无法直接观测。视界将这部分时空与宇宙其他部分隔离开来。

黑洞也好,同质量的其他天体也好,在它们外面足够远的时空是没有区别的。区别在于,同质量的其他天体要大得多,因此外面的物质或者星体不可能离它的中心那么近,由此可以判断中心天体是否黑洞。

比如,与彭罗斯分享诺贝尔奖的两位天文学家根策尔(Reinhard Genzel)和盖兹(Andrea Ghez)分别观测到,银河系中心附近有一个恒星(这是他们最主要的观测目标),距离银河系中心很近,只有17光年,所以只需要16年就运动一周(作为对比,太阳围绕这个中心一周需要2亿年)。由此可以判断中心是个黑洞,否则不能这么近。

事实上,17光年是这个黑洞的施瓦西半径的1400倍。施瓦西半径正比于质量,是黑洞视界的1到2倍(倍数依赖于转动快慢,不转动的黑洞的视界半径就是施瓦西半径,转动极快的黑洞的施瓦西半径是视界半径的2倍)。

黑洞无毛定理也表明,我们只能测量出黑洞的质量、电荷和转动角动量,所以没有更多的指标可以增加辨识度。

人们可以观测到黑洞之外靠近视界处的一些特征,比如被黑洞吸积的物质发出的电磁波,包括视界望远镜拍到的黑洞照片所显示的光子环。但是并没有观测结果能够与黑洞中心的奇点直接相关。另一方面,正因为代表经典广义相对论失效的奇点包在

视界之类,我们能够放心地对黑洞视界外面的现象进行理论预言。

更有甚者,1969年,彭罗斯提出宇宙监督(cosmic censorship)猜想:引力塌缩导致的奇点都藏在视界之内,因为引力塌缩产生奇点时,也必须产生视界。也就是说,宇宙中不存在裸奇点。这意味着外界永远不会获得关于奇点的信息。

如果这个猜想是正确的,就使得黑洞奇点定理永远无法实验验证。另一方面,如果找到一个裸奇点,就可以证伪宇宙监督猜想。但是这个猜想还没有被证明或证伪。所有在经典广义相对论范畴内,试图从理论上证伪它的努力都失败了。霍金认为这是经典广义相对论主要的未解决的问题^[20]。

1991年,霍金曾与普雷斯基尔(John Preskill)和索恩(Kip Thorne)就宇宙监督猜想打赌^[24],霍金认为,黑洞裸奇点被经典物理禁止,普雷斯基尔和索恩认为,裸奇点由量子引力描述,可以存在。几个月后,霍金发现,作为量子过程,黑洞蒸发后,可以留下裸奇点。但是他坚持,这与原先打赌内容不矛盾,因为当时说是被经典物理禁止。

所以,彭罗斯的诺贝尔物理学奖是诺贝尔奖历史上第一次授予至今没有,将来也基本上没有直接实验或观测验证的理论发现。

这固然改变了诺贝尔物理学奖的风格,但我认为这是一个好的突破,具有划时代的意义。这不同于爱因斯坦因广义相对论获奖,或者霍金因黑洞面积不减定理获奖(当然,事实上这两个情况都没有发生),因为这两个理论是有实验验证的。

理论物理当然不能脱离实验。但是另一方面,对于某些极端问题,特别是终极性问题,由已经经过实验检验和时间考验的理论(对于奇点定理而言,就是广义相对论)严格推论出结果,即使无法直接实验验证,也是正确的科学结论,特别是黑洞奇点这种具有定义性的结论,应该有获奖机会。

这是不是意味着可以放弃科学的可证伪性?我觉得不是。这些原则上不能直接观测的重要问题的研究,必须是已经被证伪的理论在极端情形的严格外推。所以,所依赖的理论(例如广义相对论)必须已经通过实验得到确认,而外推又必须在数学和逻辑上是严格的。当然,这些问题也必须特别重大。当然,这样的候选理论也极少。

霍金辐射不属于这种情况,因为它涉及量子力学与引力理论的结合,这是一个新的领域,本身还没有实验检验,超出了广义相对论范畴。但是原则上,

未来是可以有实验检验的。

2020年诺贝尔奖的颁发还体现了一种智慧。对于可以直接实验验证的理论,要等待验证;而对于确实无法直接验证的重大理论结果,只需要基础稳固,在理论上以及间接相关的实验上,显示它经受了时间的考验。这自然对该理论的创立者的寿命有一定要求,彭罗斯满足了这个要求,霍金很接近但可惜没满足。

或许诺贝尔物理学奖委员会也注意到了本次诺贝尔奖有特别之处。主席的话意味深长:“今年获奖人的发现开辟了关于致密和超大质量天体的新领域。但是关于这些奇异的天体,仍然有很多问题有待回答,并驱动未来的研究。”获奖成果可以是提出重大问题,而不必提供完备的答案。这无疑也扩大了诺贝尔奖候选者的范围。

本次诺贝尔物理学奖也可算是颁发给数学物理(mathematical physics),或者理论物理中与实验联系不具体、不直接的方面。诺贝尔奖对这些领域的态度变得更友好。这些领域不都是研究像黑洞奇点那样完全不能直接观测的课题,但是与围绕实验或观测的相关领域相比,关心的问题、研究的风格和方法,乃至价值标准都有所不同。彭罗斯的工作属于与天体物理相关的引力理论。类似的数学物理领域,还有与凝聚态物理相关的统计物理,与粒子物理相关与实验关系不是那么具体的量子场论的形式理论,等等。传统来说,它们的成果显然不容易获得诺贝尔奖。在少数的例子中,相变的重整化群理论属于统计物理,非阿贝尔规范场论(杨-米尔斯理论)的重整化属于后者。而弱相互作用宇称不守恒、量子电动力学重整化、电弱统一理论的得奖工作都是与实验直接相关的,更多地属于粒子物理理论,而不是数学物理。

将来数学物理领域的获奖机会将增加。2021年,帕里西(Giorgio Parisi)因为统计力学方面的自旋玻璃理论的研究,分享了诺贝尔物理学奖。这验证了笔者的判断。

诺贝尔物理学奖的新时代开始了。除了对于基础理论的态度更友好,各领域的获奖机会分布也在改变。在一定时期内,基于加速器的粒子物理实验以及相关理论成果变少,天体物理成果变多,也会改变两者的诺贝尔奖比例。

4 总结

如果霍金在世,虽然不会因霍金辐射而得到诺

贝尔奖,但是他在经典广义相对论范畴内的工作足够为他赢得诺贝尔奖,具体来说:霍金可以以黑洞视界面积不减定理而获得诺贝尔奖,单独获奖也是可以的;霍金不大可能因为宇宙学奇点定理单独获得诺贝尔奖,因为这起源于彭罗斯原创的黑洞奇点定理,最后的推广形式也是与彭罗斯的合作;霍金可以因奇点定理与彭罗斯分享诺贝尔奖,正如两人共同获得沃尔夫奖;如果霍金与彭罗斯分享诺贝尔奖,奇点定理和黑洞视界面积不减定理都会被提及,而且也会提及宇宙学奇点,这个由霍金开始的推广对于人类更有意义,因为这关乎包含万事万物的宇宙的起源,我们人类也是宇宙的一分子。

诺贝尔物理学奖的新时代来临,显示诺贝尔奖的科学哲学观取得突破,对数学物理或基础理论物理更友好,甚至可以是不能被直接实验验证的极端或终极情形的研究。诺贝尔物理学奖在不同领域的分布也在调整。

参考文献:

- [1] 瑞典皇家科学院. 2020年诺贝尔物理学奖[EB/OL]. 瑞典:诺贝尔奖,2020[2022-05-13]. <https://www.nobelprize.org/prizes/physics/2020/press-release/>.
- [2] 施郁. 彭罗斯为什么获诺贝尔奖? 2020年诺贝尔物理学奖深度剖析[J/OL]. 北京:知识分子,2020[2022-05-13]. <http://www.zhishifenzi.com>.
- [3] 施郁. 爱因斯坦的奇葩诺贝尔奖[J]. 科学文化评论, 2018,14(6):111-120.
- [4] 施郁. 引力波得诺贝尔物理学奖? 可能还有神秘人物来分享[EB/OL]. I, Scientist, 2017[2022-05-13]. <https://year2020.iscientist.de/>.
- [5] 施郁. 引力波猎手[J]. 科学文化评论, 2018,14(6):109-117.
- [6] 施郁. 霍金为何不朽[J/OL]. 北京:知识分子,2018[2022-05-13]. <http://www.zhishifenzi.com>.
- [7] 施郁. 纪念霍金[J]. 科学, 2018,70(3):25-28.
- [8] 施郁. 霍金归葬西敏寺大教堂,哪些伟人能获此殊荣?[J/OL]. 北京:知识分子,2018[2022-05-13]. <http://www.zhishifenzi.com>.
- [9] 施郁. 霍金的墓碑为何未能如他所愿? [J/OL]. 北京:科学春秋,2018[2022-05-13]. <http://www.zhishifenzi.com/u/58.html>.
- [10] 施郁. 霍金的墓碑[J]. 科学画报,2018(12):43.
- [11] PENROSE R. Gravitational collapse and space-time singularities[J]. *Phys Rev Lett* 1965(14):57-59. DOI:10.1103/PhysRevLett.14.57.
- [12] WEINBERG S. Gravitation and Cosmology[M].

- New York, John Wiley & Sons, 1972.
- [13] FRIEDMANN A. Über die Krümmung des Raumes [J]. *Zeitschrift für Physik*. 1924, 10(1): 377-386. DOI: 10.1007/BF01328280.
- [14] HUBBLE E. A Relation Between Distance And Radial Velocity Among Extra-Galactic Nebulae [J]. *Proc Natl Acad Sci U S A*. 1929 Mar 15, 15(3): 168-173. DOI: 10.1073/pnas.15.3.168.
- [15] ALPHER R A, BETHE H, GAMOW A G. The origin of chemical elements [J]. *PhysRev*, 1948, 803(73). DOI: <https://doi.org/10.1103/PhysRev.73.803>.
- [16] RALPH A A, HERMAN R C. Evolution of the Universe [J]. *Nature*, 1948 (162): 680-682. DOI: <https://doi.org/10.1038/162680a0>.
- [17] RALPH A A, HERMAN R C. On the Relative Abundance of the Elements [J]. *The Physical Review*, 1948(74): 1737-1742. DOI: 10.1103/PhysRev.74.1737.
- [18] Continuous Creation [Z]. *Radio Times*. No. 1328. BBC. 27 March 1949.
- [19] LIFSHITZ E M, Khalatnikov I M. Investigations in relativistic cosmology [J]. *Adv Phys* 1963, 12 (46): 185-249. DOI: 10.1080/00018736300101283.
- [20] HAWKING S. *The Big Bang and Black Holes* [M]. Singapore, World Scientific, 1993.
- [21] HAWKING S W. Black holes and thermodynamics [J]. *Phys Rev D*, 1976, 191(13). DOI: 10.1103/PhysRevD.13.191.
- [22] PENZIAS A A, WILSON R W. Measurement of excess antenna temperature at 4080 Mc/s [J]. *Astrophys* 1965(142): 419-421. DOI: 10.1086/148307.
- [23] HAWKING S W, PENROSE R. The singularities of gravitational collapse and cosmology [J]. *Proc Roy Soc Lond* 1970(314): 529-548. DOI: 10.1098/rspa.1970.0021.
- [24] THORNE K. *Black holes and Time Warps* [M]. New York, Norton & Company, 1995.



施郁,男,复旦大学物理学系教授,博士生导师;1989年和1994年在南京大学分别获学士和博士学位博士;担任全国量子力学研究会副理事长,《物理》,International Journal of Physics B, Modern Physics Letters B等学术期刊编委;从事理论物理若干领域的研究,包括量子物理与量子信息、凝聚态物理、高能物理、物理学史,也做过很多科学传播工作;主持完成或正在进行6项国家自然科学基金面上项目、2项上海市项目;在Phy Rev Lett, Phys Rev A, Phys Rev B, Phys Rev D, Phys Rev E, JHEP等英文SCI期刊发表论文约90篇,中文科学史或高级科普文章约120篇。E-mail: yushi@fudan.edu.cn

(责任编辑:陈立)