

黑洞照亮宇宙 ——银河系中心黑洞及其物理意义

王建民[†]

(中国科学院高能物理研究所 北京 100049)

Black holes light up the universe ——Black holes in Galactic center and its physical implications

WANG Jian-Min[†]

(Institute of High Energy Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

2020-12-20收到

[†] email: wangjm@ihep.ac.cn

DOI: 10.7693/wl20210104

摘要 2020年度诺贝尔物理学奖颁发给为黑洞和超大质量致密天体做出突出贡献的三位科学家，他们分别从理论和观测上提供了令人信服的证明和证据。他们的工作打开了理解宇宙中大质量天体命运的窗口。人们普遍相信超大质量黑洞存在于每一个星系的中心，是这些黑洞照亮了再电离时期的宇宙，也是它们为揭开宇宙膨胀历史、暗能量宇宙演化性质、纳赫兹低频引力波等诸多谜团提供了十分强大的工具。预计未来5年内，反响映射和GRAVITY/VLTI联合观测将在以黑洞研究为支撑的领域取得重大进展。

关键词 黑洞，活动星系核，类星体，引力波

Abstract The Nobel Physics Prize in 2020 was awarded to three scientists for their fundamental contributions to the research of black holes and the discovery of a supermassive compact object located in the center of the Milky Way, providing clues to understand the fates of supermassive celestial objects in the universe. Nowadays, it is generally believed that supermassive black holes are located in galactic centers of all galaxies, and that they play key roles in galaxy structure formation and evolution. Those formed in earlier eons and provided energy sources in reionization of the universe, and shed light on our understanding of cosmological expansion history, dark energy physics, and nano-Hz gravitational waves of close binaries of supermassive black holes. The future joint observations of reverberation mapping campaigns and GRAVITY/VLTI of active galactic nuclei will help us make further progress in cosmology and gravitational wave studies.

Keywords black holes, active galactic nuclei, quasars, gravitational waves

2020年10月6日瑞典诺贝尔奖委员会宣布，因对黑洞理论和大质量致密天体观测研究，本年度物理学奖分别授予英国牛津大学罗杰·彭罗斯(Roger Penrose)教授，德国马普地外物理研究所莱因哈德·根泽尔(Reinhard Genzel)教授和美国加州

大学洛杉矶分校安德里亚·格兹(Andrea Ghez)教授(图1)。其中，彭罗斯教授证明了黑洞是广义相对论的必然结果，引力坍缩是大质量天体的必然命运；根泽尔教授和格兹教授在银河系中心发现超大质量致密天体(即银河系中心的超大质量黑



图1 2020年3位诺贝尔物理学奖获得者。左起：罗杰·彭罗斯，莱因哈德·根泽尔和安德里亚·格兹

洞)。新闻发布会上，诺贝尔物理学奖评委会主席戴维·哈维兰德谈到，“今年获奖者的发现为研究致密和超大质量天体开辟了新天地。但这些奇特的物体仍然提出了许多有待进一步解答的问题，并激发未来的研究”。物理学家和天文学家均认为获奖是实至名归。大质量黑洞研究正处于方兴未艾的初创阶段，关于它们如何形成与如何演化以及在宇宙演化中的重要作用等重大问题的探索才刚刚拉开帷幕。

1 引言

在爱因斯坦发表引力场方程不到半年的时间，德国 Potsdam 天文台台长，正在第一次世界大战前线的施瓦西(K. Schwarzschild)在战壕里求解了引力场方程，得到了第一个解析解，度规如下：

$$ds^2 = -(1 - R_s/R)c^2 dt^2 + \frac{dr^2}{1 - R_s/R} + R^2(d\theta^2 + \sin^2\theta d\varphi^2),$$

其中 $R_s = 2GM/c^2 \approx 2 \times (M/10^8 M_\odot) \text{AU}$ 为施瓦西半径， G 为引力常数， c 为光速， AU 为日地距离，大约为 $1.5 \times 10^{13} \text{cm}$ 。度规中的第一项显示出了引力红移，第二项出现奇点 R_s 。这个奇点是真实的吗？如此高的密度，这个大质量的物体在宇宙中是何种天体？萦绕在物理学家和天文学家头脑中的这一重大问题在20世纪60年代才有了突破性进展。施密特(M. Schmidt)于1963年发现了类星体，激起了彭罗斯对引力坍缩的浓厚兴趣，在

1964年底证明了这个奇点是广义相对论的必然结果，即黑洞是大质量天体的必然命运^[1]。然而，对类星体的物理解却经历了20多年的时间。在探索宇宙的道路上，对大质量黑洞的研究中充满了挑战和艰辛。

美国天文学家赛弗特(K. Seyfert)最早注意到某些星系的中心区域特别亮。他首次拍摄了NGC 4151等6个星系的核心光谱，被后人称为赛弗特星系，或者活动星系核。令人惊讶的是，光谱被发射线主导而且谱线轮廓宽度高达每秒6000 km，完全不同于恒星光谱。令人遗憾的是，这些结果并没有受到同行的重视。直到1958年Chicago大学L. Woltjer在他的博士论文里深刻地认识到，这些宽发射线所在的核心区域，一定被一个 $10^8 M_\odot$ 质量的强引力场束缚，才不至于土崩瓦解。这个深刻认识其实来自一个简单判断：如果这个每秒6000 km的速度对应于热运动速度，那么这个区域的温度将达到 10^8K 以上，所有的元素都将全部电离，这样就不可能看到发射线，因此，这个运动速度一定是非热运动。除了红移，NGC4151的光谱与类星体无异，这些物理思考已经非常接近预言类星体的存在了，但是复杂凌乱的天文现象遮挡了深层次的物理图像。

然而，类星体研究的第一个大问题是，它们红移的本质是什么？是宇宙学红移还是局部物理过程引起的红移？从1960年代开始，著名学者领导的两个学派坚持各自的学术观点，进行了十分激烈的争论。随着类星体样本数量增加，红移越来越高，红移的宇宙学起源在经历了20多年的争论之后，逐渐成为科学界的共识。胜利属于具有敏锐智慧的学者。在宇宙学起源的假设下，前苏联著名天体物理学家Y. Zel'dovich教授(苏联原子弹之父)和美国康奈尔大学E. Salpeter教授，在类星体发现之后不到一年的时间里，各自独立地提出超大质量黑洞存在于星系中心，由于吸积周围气体释放出大量能量，形成类星体。这一大胆充满睿智的解释奠定了类星体内部结构的基本框架，人类对能源机制的认识又从核能回到了引力

能。如果赛弗特星系和类星体是由星系中心黑洞的吸积产生,在河外星系观测启发下,一个自然的问题是银河系中心是否存在黑洞?根泽尔和格兹教授就是在此信念支持下,对银河系中心进行了长达30多年的观测研究,从观测上证明了超大质量黑洞的存在。这一里程碑式的进展,获得诺贝尔物理学奖是实至名归。

2 银河系中心大质量黑洞

虽然早在百年前哈佛大学H. Shapley教授就已经确定了银河系中心位置,但直到1960年代,射电天文观测发现银河系中心区域的射电辐射很强后,才极大地促进了对银河系中心的大规模研究。然而,要精密检测这个区域的物理条件,首先需要克服三大困难:(1)中心辐射区域具有很多气体和尘埃,因此消光和吸收十分严重;(2)需要高空间分辨率的观测设备,即大口径望远镜,特别是物理目标集中在检验是否有大质量黑洞时,要求空间分辨率高达毫角秒,只有10 m级望远镜才能实现;(3)地球大气扰动极大地限制了空间分辨率,必须采用自适应光学消除或者极大减弱扰动效应之后,才能观测中心区域的物质分布和时空。

观测技术经历了大约三个阶段,使得空间分辨率达到了目前的10微角秒。(1)光斑干涉技术阶段:为了减弱大气扰动干扰,观测时控制曝光时间使之短于大气扰动时标,然后把图像叠加起来,可以有效减弱干扰;(2)自适应技术应用阶段,使得恒星图像变得清楚足以测量出恒星轨道;(3)光干涉阶段,测量恒星轨道十分精确,并可以测量恒星光谱的引力红移和轨道的施瓦西进动。天文学家制造了功能强大的终端仪器,马普地外物理所根泽尔团队研制了:8 m VLT+NACO(成像)+SINFONI(光谱);加州大学洛杉矶分校格兹团队研制了:10 m Keck OSIRIS。三个阶段的技术不断提高,不断缩小测量半径及其以内的质量,最终提供了足够证据表明超大质量黑洞的存在。

与之相应的观测研究大致经历了5个主要阶段:

(1)研究初期,只能通过观测中心气体动力学的方法进行。在1970年代美国伯克利团队发现银心气体的运动速度很快,高达200 km/s,意味着大质量引力势的存在。这是大质量黑洞存在的最早证据。

(2)1990年后期,根泽尔团队利用欧洲南方天文台的3.5 m新技术望远镜(New Technology Telescope)观测获得进展,虽然不能分辨单一恒星及其轨道,但是可以测量中心区域内恒星速度弥散。他们发现中心恒星速度弥散满足 $v \propto R^{-1/2}$,显然,这一观测证明了大质量引力势的存在^[2]。

(3)格兹团队利用10 m Keck望远镜通过光斑干涉技术分辨出银心存在若干个恒星^[3],并开始测量恒星轨道。稍后几年,根泽尔团队不断缩小银河系中心半径范围,测量了中心质量。

(4)从2000年Keck望远镜装配了自适应光学系统之后,大气扰动得到了极大改善,能够清晰分辨并测量出恒星轨道。图2(a), (b)显示恒星S2的轨道以及投影速度。其椭圆率大约是0.88,近心点为17光时,到地球的距离为8 kpc。从1995年开始直到2020年为止,已知周期最短(16年)的S2恒星在30年间大约经历了2个轨道周期,对轨道的精确测量获得了精度在5%的可靠黑洞质量 $M = 4.3 \pm 0.20 \pm 0.30 \times 10^6 M_{\odot}$ 。随着空间分辨率的提高,分辨半径以内的天体质量不再发生变化(图2(c))。在能够空间分辨的最小半径内,即在125个日地距离内的密度为 $5 \times 10^{15} M_{\odot} \cdot \text{pc}^{-3[4]}$ 。在已知的大尺度天体中,如此高的密度只能是黑洞,各种高密度的星团都会在很短的时间内坍缩而变成黑洞。

(5)经过5年时间,2017年根泽尔团队花费大约8000万欧元成功研制出GRAVITY终端设备,并将其装配在欧洲南方天文台甚大望远镜干涉阵列(VLTI)上。短短的8个月后,在近心点处他们精确测量了S2光谱的引力红移为 6.7×10^{-4} (相当于速度为200 km/s)^[5]。更令人惊奇的是,GRAVITY团队还高精度地测量了S2轨道的施瓦西进动速度: $\delta\phi = 12''/\text{周期}^{[6]}$,比太阳系水星的施瓦西进动幅度 $43''/\text{世纪}$ 大100倍。这两项观测毫无争议地证实了黑洞的存在及其广义相对论效应。第5

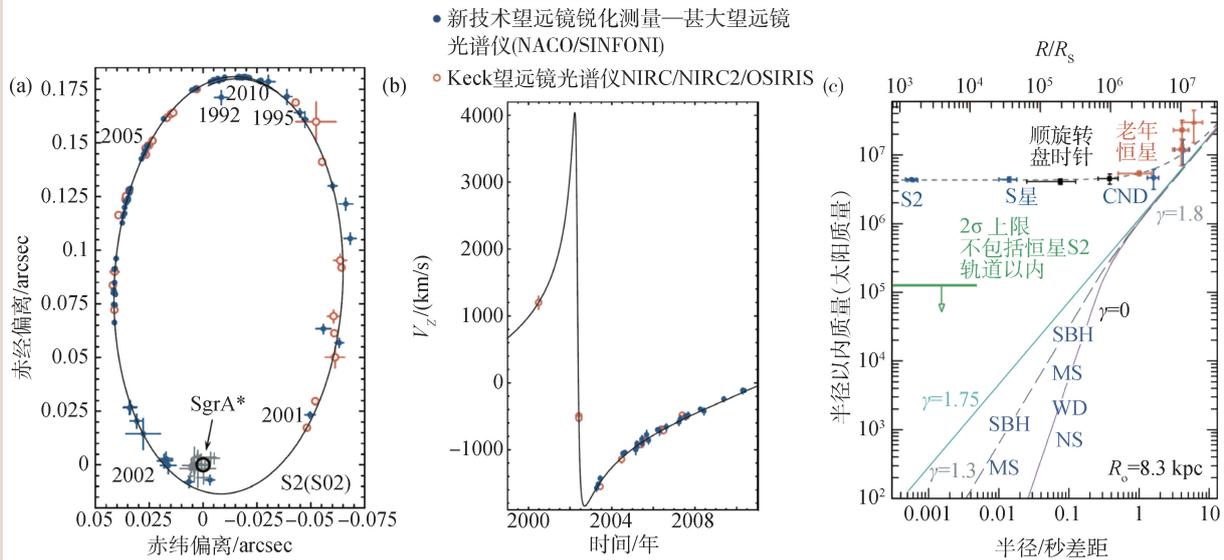


图2 (a)周期最短的恒星S2轨道；(b)该恒星投影速度随轨道变化；(c)随着空间分辨率的提高，分辨半径以内的天体质量不再发生变化^[4]

阶段的工作最终促成了这个崇高荣誉。特别值得注意的是，目前尚未确定银河系中心是否还有质量比低于 10^{-3} 的小黑洞，是否组成一个引力束缚的双黑洞系统。如果存在，那么银河系中心就会变成理想的引力波实验室。时下有关理论研究是一个热点课题。目前马普所的天文学家们正在积极进一步提高仪器性能，以能够测量出银河系中心黑洞的自转角动量，这样才能完整地描述黑洞的物理状态。

根泽尔和格兹在仪器设计和观测方面均是行家里手，同时也都具有长期坚持不懈的专注品质，造就了今天辉煌的学术成就，为大质量黑洞存在于宇宙之中提供了最为坚实的观测基础。同时，超大质量黑洞作为星系的一部分，为研究星系的形成与演化、丈量宇宙和纳赫兹低频引力波打开了未来探测之门。

3 河外大质量黑洞

不同于测量银河系中心，对活动星系核中黑洞质量地测量相对要容易。这是因为在黑洞周围存在宽线区，可以采用反映射监测核区光谱变化，获得宽发射线和连续谱的光变曲线，测量出

两者的时间延迟，它就是宽发射区的特征尺度。通过物理模型与观测数据的详细拟合，可以获得高精度的黑洞质量。到目前为止，采用反映射大约测量了150个活动星系核的黑洞质量，仅占活动星系核总数的0.3%，大量研究工作有待完成。

首个亟待回答的问题是，银河系中心存在大质量黑洞这一结论是否适合于所有星系？严格来说，这个问题至今并没有准确的回答。可以肯定的是，所有活动星系核中心都有至少一个黑洞(某些有双黑洞)，从它们占有所有星系的比例和活动星系核演化的角度来看，大部分星系的核心应该都有一个大质量黑洞。其次，1998年，天文学家利用哈勃望远镜观测附近星系，通过恒星动力学方法获得了大约30多个中心黑洞质量，惊奇地发现黑洞质量与星系核球质量成正比，比例因子大约为0.2%，也就是说，黑洞与星系核球存在共同增长。这是令人十分困惑的，因为从尺度上来说，两者相差8—9个量级，实现共同演化十分困难。这其中一定存在某种机制使得两者增长同步。但恒星形成与黑洞吸积之间存在 $10^7 \sim 10^8$ 年的时间延迟。黑洞活动的反馈机制是一种十分可能的过程，但是反馈机制的观测研究却十分困难，尚缺

乏强烈的观测证据。

事实上，河外星系中心的黑洞质量测量精度很低，大约为 0.3 dex 左右，相对误差大约 200%，依此得到的共同演化结论令人担心。这一粗糙的精度完全掩盖了共同演化的具体行为细节，例如恒星形成与黑洞活动之间存在一定的延迟 ($10^7 \sim 10^8$ 年)，两者之间是否存在因果关系？只有精度明显好于 50% 时，才会看到这些细节，如何高精度测量黑洞质量是一项十分紧迫的任务。

4 丈量宇宙的新标尺

欧洲普朗克卫星高精度测量了微波背景辐射，基于宇宙学标准模型可以得出哈勃常数最新测量值 $H_0 = 67.4 \pm 0.5 \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$ ；与此同时，诺贝尔奖获得者里斯 (A. Riess) 等人利用传统造父变星和超新星等距离阶梯工具得到的最新测量值 $H_0 = 74.03 \pm 1.42 \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$ 。两者差异在 4.4σ 以上，被称为哈勃常数危机，如图 3 所示。能否建立一个独立于现有测量工具的新方法？特别是，几何测量方法，在已知的宇宙学天体中，只有类星体和活动星系核是候选几何测距天体。干涉观测可以测量活动星系核宽线区角尺度 ($\Delta\theta$)，反响映射可以测量其对应的线尺度 (ΔR)，几何方法直接给出距离

$$D_A = \frac{\Delta R}{\Delta\theta}$$

欧洲南方天文台光学干涉阵列 GRAVITY/VLTI 首次空间分解了 3C273 的宽线区几何^[7]，为实现几何测距奠定了基础。实际测量时，应该考虑宽线区的空间分布模型，距离和黑洞质量是其中的参数，完整拟合光变曲线和干涉信号，可以同时得到这两个最重要的参量。这套几何方法既不同于传统距离阶梯工具，也不同于宇宙背景辐射测量。中国科学院高能物理研究所王建民团队率

先将几何方法成功应用于 3C273，测量出 $D_A = 551.50^{+97.31}_{-78.71} \text{ Mpc}$, $H_0 = 71.5^{+11.9}_{-10.6} \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$ ，精度达到 16%^[8]。若能完成大约 50 个活动星系核样本的观测，实现精度为 1%—2% 的哈勃常数测量，将为解决日益尖锐的哈勃常数危机提供新途径^[9]。图 3 显示了与 1900 年代“量子”概念诞生的对比，GRAVITY/VLTI 及其下一代仪器 GRAVITY+ 和反响映射观测将直接测量红移高达 $z = 2-3$ 的类星体，有望实现丈量宇宙，揭开膨胀历史，为理解暗能量物理打开了一条“几何通道”。

5 大质量双黑洞和低频引力波

大质量双黑洞作为星系并合的必然产物必定存在于星系中心。自从 LIGO 探测到恒星级黑洞并合产生的百赫兹引力波 (gravitational waves, GWs) 之后，天文学家正在大力开展利用“脉冲星计时阵列” (Pulsar Timing Array, PTA) 探测大质量密近双黑洞 (Close binary of supermassive black holes, CB-SMBHs) 纳赫兹引力波 (Nano-GWs) 的观测研究。然而，与 LIGO 探测模式完全不同，PTA 探测和检验面临两大困难有待突破：

(1) Nano-GWs 随机背景辐射探测已经看到曙光，而探测单一 CB-SMBH 的 Nano-GWs 是一项有重大突破意义的物理课题，国际上竞争十分

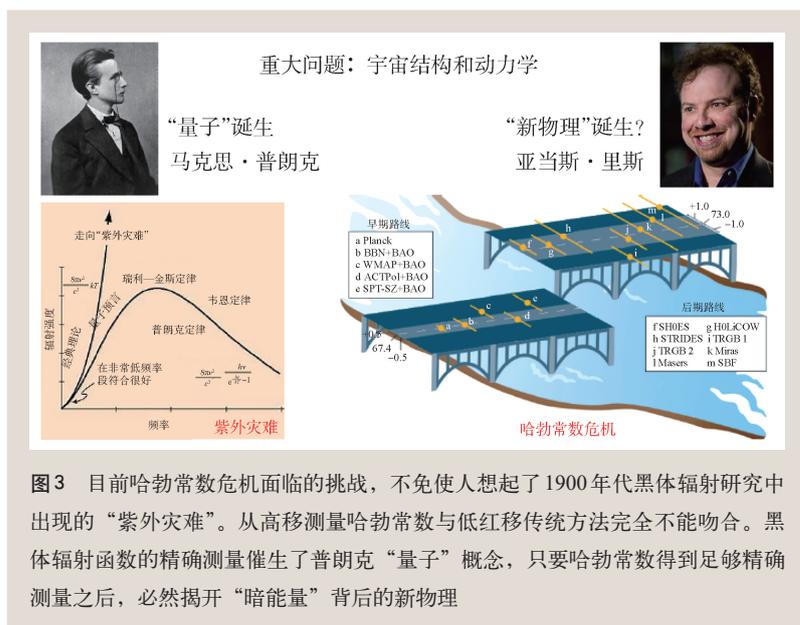


图3 目前哈勃常数危机面临的挑战，不免使人想起了1900年代黑体辐射研究中出现的“紫外灾难”。从高红移测量哈勃常数与低红移传统方法完全不能吻合。黑体辐射函数的精确测量催生了普朗克“量子”概念，只要哈勃常数得到足够精确测量之后，必然揭开“暗能量”背后的新物理

激烈。但是，面临的首要困难是如何证认CB-SMBHs目标。需要单独搜寻和证认出邻近的双黑洞，将盲搜变成有目标性的搜寻。

(2)CB-SMBHs的轨道周期很长，并合时标更长，PTA观测只能得到Nano-GWs的波形片段，无法得到并合时期啁啾阶段的波形变化。必须采用其他独立的方法获得轨道参数，才能检验Nano-GWs的物理性质。

我们已经提出解决这些问题的关键方案：利用反响映射和VLTI的干涉观测证认出若干个CB-SMBHs^[10, 11]，并测量它们的轨道参数，与国内FAST-PTA以及国际上诸多PTA网络一起探测才能检验引力波的物理性质。这也将推动黑洞并合过程研究、星系并合及其演化研究。目前GRAVITY团队已将这个研究方案列为核心科学目标(<https://www.mpe.mpg.de/ir/gravityplus>)，有望在未来五年内获得突破性进展。

最后，简单介绍另一个热门重大课题——超大质量黑洞的形成问题。理论上两类模型：(1)原初分子云的直接坍缩形成大质量黑洞；(2)种子黑洞通过超爱丁顿吸积快速增长为超大质量黑洞，而种子黑洞则由恒星级黑洞形成。值得注意的是，这两种形成机制并没有解释超大质量黑洞为何位于星系中心，否则，宇宙中应该存在很多孤立的大质量黑洞。回答这些重大问题，全世界天文学家都等待着美国即将发射的James Webb空间望远镜对高红移星系和类星体的观测。

的观测。

6 结论与展望

银河系中心黑洞的发现是物理学和天文学中里程碑式的进展，它极大地激励了对超大质量黑洞的研究兴趣。首先，超大质量黑洞作为星系的一部分如何与星系之间相互作用并对星系的演化起着极为关键的作用？第二，它作为宇宙学探针，将对丈量宇宙和膨胀历史发挥关键作用，进而对探测暗能量物理性质起到重要的推动作用；第三，作为引力波探测的下一次突破，引力波源及其纳赫兹引力波的物理性质均需要GRAVITY/VLTI和反响映射独立测量双黑洞的轨道参数之后才能得到观测检验。人们热切期待着引力波和宇宙学研究领域取得突破性进展。

参考文献

- [1] Penrose R. *Phys. Rev. Lett.*, 1965, 14: 57
- [2] Eckart A, Genzel R. *MNRAS*, 1997, 284(3): 576
- [3] Ghez A M, Klein B L, Morris M *et al.* *ApJ*, 1998, 509: 678
- [4] Genzel R, Eisenhauer F, Gillessen S. *Rev. Mod. Phys.*, 2010, 82: 3121
- [5] Gravity collaboration. *A&A*, 2018, 615: L15
- [6] Gravity Collaboration. *A&A*, 2020, 636: L5
- [7] Gravity Collaboration. *Nature*, 2018, 563: 657
- [8] Wang J M, Songsheng Y Y, Li Y R *et al.* *Nature Astronomy*, 2020, 4: 517
- [9] Songsheng Y Y, Li Y R, Du P *et al.* 2020, *ApJS*, submitted
- [10] Wang J M, Songsheng Y Y, Li Y R *et al.* *ApJ*, 2018, 862: 171
- [11] Songsheng Y Y, Wang J M, Li Y R *et al.* *ApJ*, 2019, 881: 140

读者和编者

订阅《物理》得好礼

——超值回馈《岁月留痕——<物理>四十年集萃》

为答谢广大读者长期以来的关爱和支持，《物理》编辑部特推出优惠订阅活动：向编辑部连续订阅2年《物理》杂志，将获赠《岁月留痕——<物理>四十年集萃》一本。该书收录了1972年到2012年《物理》发表的40篇文章，476页精美印刷，定价68元，值得收藏。

希望读者们爱上《物理》!

订阅方式(编辑部直接订阅优惠价180元/年)

(1) 邮局汇款

收款人地址：北京市中关村南三街8号中科院物理所，100190
收款人姓名：《物理》编辑部

(2) 银行汇款

开户行：农行北京科院南路支行
户名：中国科学院物理研究所
帐号：11 250 1010 4000 5699

(请注明《物理》编辑部)

咨询电话：010-82649029；82649277

Email: physics@iphy.ac.cn