

相对论天体物理学

张双南

(高能物理研究所粒子天体物理中心, 粒子天体物理全国重点实验室 100049)

“相对论天体物理学”一般指相对论和天体物理结合的交叉学科。“相对论”一般包括“狭义相对论”和“广义相对论”,因此“相对论天体物理学”一般既包括狭义相对论也包括广义相对论和天体物理的结合交叉。本文所介绍的“相对论天体物理学”特指广义相对论与天体物理学相结合的交叉学科,即以广义相对论作为主要理论基础,主要研究宇宙中极端引力场下的物理现象和天体过程,探索黑洞、中子星、引力波、宇宙学等领域的科学问题,并且利用宇宙的各种极端物理条件检验广义相对论理论并且发展超越广义相对论的物理理论。

一方面由于规定的篇幅的限制以及本专辑还有其他学者的文章专门综述本文的某些章节的主题,另外更主要的是由于本人的学识和水平的限制,本文对相对论天体物理的大部分主题都只能“蜻蜓点水”一带而过,但是对我本人熟悉或者做过一点工作的主题稍微展开,比如黑洞的质量和自旋测量以及冻结星疑难问题。本文没有包括修改引力理论和质疑广义相对论的理论与进展,这些并不是不重要,而是超出了本“命题作文”。文末除了列出本文引用的参考文献,也列出了值得进一步阅读的开放资源、教科书与专著,并且逐条进行了简要评论和介绍,以方便读者进一步阅读。

1. 理论奠基期(1905~1940): 相对论的建立及其理论意义的初步探讨

1.1 相对论框架的建立

爱因斯坦(Albert Einstein)于1905年提出了狭义相对论理论,在《论动体的电动力学》中提出时空

统一性、光速不变原理及质能方程($E=mc^2$),奠定了高速运动物体的理论基础。从此,狭义相对论和量子力学一起成为现代物理学的两大支柱性理论。1915年爱因斯坦提出了广义相对论,爱因斯坦场方程 $G_{\mu\nu}=8\pi T_{\mu\nu}$ 将引力解释为时空几何的弯曲。根据广义相对论计算的水星近日点进动和观测到的每世纪43角秒的反常进动完美吻合,初步证实了广义相对论比牛顿的引力理论更加精确。而广义相对论的几个关键预言很快就被天文学的观测所证实,包括1919年爱丁顿(Arthur Stanley Eddington)团队通过日全食观测证实光线引力偏折,1925年亚当斯(Walter Sydney Adams)通过白矮星天狼星B光谱观测验证引力红移等,使得广义相对论理论迅速成为引力物理研究的基础理论。

1.2 黑洞与致密天体的数学预言、冻结星疑难

史瓦西(Karl Schwarzschild)于1916年求得爱因斯坦方程的第一个解析解,也就是球对称的真空解,提出事件视界半径 $r_s=2GM/c^2$ 以及“奇点”。1931年钱德拉塞卡(Subrahmanyan Chandrasekhar)在广义相对论理论的框架下计算了白矮星的质量极限 $M_{\text{Ch}} \approx 1.4M_{\odot}$,然而受到了爱丁顿的质疑,引发了关于恒星演化终态的争论。钱德拉塞卡于1983年主要是因为该工作获得了诺贝尔物理学奖。1939年奥本海默(Julius Robert Oppenheimer)与沃尔科夫(George Michael Volkoff)建立了中子星模型,预言了中子星的最大质量,也就是奥本海默-沃尔科夫极限 $M_{\text{OV}} \sim 0.7M_{\odot}$ (后修正为 $2-3M_{\odot}$),并指出更大质量将坍缩为黑洞,这是第一个关于黑洞的天体物理形成机制的理论模型。1958泽尔多维奇(Yakov

Borisovich Zel'dovich)提出X射线双星中可能存在黑洞,通过吸积物质释放引力能,这可能是宇宙中能量释放效率最高的过程之一,启发了天文学家如何在宇宙中寻找黑洞。

1939年奥本海默与斯奈德(Hartland Snyder)发现,当恒星耗尽所有热核能源后,如果其质量足够大,恒星将在自身引力作用下持续坍缩。对于和坍塌物质共动的观测者来说,坍缩的总时间是有限的。然而,外部观测者会看到坍塌物质会渐近地接近其引力半径(也就是事件视界),而不会停止坍缩。这个过程本质上就是,在史瓦西度规下远处观测者看到向视界下落的检验粒子无限逼近、但是永远也不能到达和穿越视界,被冻结在了视界的外面。如果物质不能到达和穿越视界,那么所谓的黑洞岂不是物质堆积在视界外面的冻结星?这就是所谓的冻结星疑难。

2. 观测与理论并行期(1940~1970): 从数学奇点到宇宙天体

2.1 冻结星疑难的解决方案

1958年芬克尔斯坦(David Finkelstein)通过引入新的坐标系统(后被称为Finkelstein坐标),发现在Finkelstein坐标下史瓦西坐标系在视界处($r=2M$)并不存在“奇点”,检验粒子能够顺利而平滑地穿越史瓦西坐标系的视界,没有前述的冻结现象出现,但是中心($r=0$),度规仍然发散,存在“奇点”。因此,原史瓦西坐标下的视界处($r=2M$)的奇异性质就被称为“坐标奇点”,是坐标系选择“错误”的表现现象,而中心($r=0$)的奇异性质是真实性质,被称为“物理奇点”。这是领域内以及绝大部分广义相对论教科书(见文末参考书的有关章节)给出的冻结星疑难的解决方案。

如果坚持在史瓦西坐标系下考察,那么物质仍然冻结在视界外面,那么坍塌形成的天体到底是冻结星还是引力质量集中在中心的奇点?对此,有些广义相对论的教科书给出的回答是,其实物质即使

冻结在视界外面也无所谓,因为这些物质在极为靠近视界处发出的辐射,由于引力红移效应,流强会快速衰减,频率会被极大的红移,远处的观测者不可能观测到。既然不可能观测到,那就是“黑”的,因此冻结星就是黑洞。

2.2 黑洞物理的数学突破

克尔(Roy Patrick Kerr)1963年提出自转黑洞的精确解(克尔度规),揭示了自转黑洞存在能层(Ergosphere)。1969年彭罗斯(Roger Penrose)提出了从能层提取黑洞的自转能量的机制,也就是彭罗斯过程。1965年彭罗斯证明了在广义相对论框架下,引力坍塌必然导致时空奇点,确立黑洞存在的理论必然性。他于2020年主要是因为该工作获得了诺贝尔物理学奖。1967~1972期间惠勒(John Archibald Wheeler)、伊斯雷尔(Werner Israel)等人证明稳态黑洞仅由质量、角动量、电荷三参数描述,被称为黑洞的“三毛定理”。

2.3 脉冲星与中子星的实证:诺奖的福地

贝尔(Jocelyn Bell)与休伊什(Antony Hewish)于1967年发现首个中子星(脉冲星)PSR B1919+21,其射电周期(1.337秒)的稳定性支持快速自转中子星模型。休伊什因中子星的发现和领导射电天文学的发展于1974年获得了诺贝尔物理学奖,然而脉冲星的主要发现者贝尔没有获得诺贝尔物理学奖成为很大的争议。

20世纪60年代基于核物理的中子星状态方程(EoS)的研究兴起,今天已经成为天体物理与核物理的主要交叉研究领域。部分理论认为,中子星核心可能发生强子-夸克相变,形成奇异夸克物质(如u、d、s夸克组成的超流态),其状态方程(EoS)对中子星最大质量($M_{\max} \sim 2 \sim 3 M_{\odot}$)具有决定性影响。

1974年约瑟夫·泰勒(Joseph Hooton Taylor Jr.)和拉塞尔·赫尔斯(Russell Alan Hulse)发现了毫秒脉冲星双星系统PSR B1913+16,他们因此获得了1993年的诺贝尔物理学奖。他们的研究表明,PSR

B1913+16的轨道衰减行为与广义相对论预言的引力波辐射的后果高度一致,为引力波的存在提供了间接证据,这一发现为后来的引力波探测奠定了基础。从此之后,利用脉冲星检验各种相对论效应就成为了重要的研究领域,中子星也成为了相对论天体物理研究的重要实验室。

1962里卡多·贾科尼(Riccardo Giacconi)团队发现了Scorpius X-1(这是一颗产生明亮X射线辐射的X射线双星,其致密天体是一颗中子星),开启了致密天体吸积物理研究。贾科尼于2002年由于开创了探索宇宙的新窗口(X射线天文学)并且发现了新类型的天体而获得了诺贝尔物理学奖。

2.4 活动星系核与吸积黑洞

1963年施密特(Schmidt)测定了3C 273的红移 $z=0.158$,确认其极端光度($L \sim 10^{46}$ erg/s),用已知的天体和辐射理论都无法解释,这就是类星体的能源之谜^[1]。1965年彭罗斯研究奇点的主要科学动机就是利用引力塌缩形成黑洞解释类星体。林登-贝尔(Donald Lynden-Bell)^[2]1969提出了活动星系核中心黑洞的理论模型。1973沙库拉(Nicholas Shakura)和苏尼亚耶夫(Rashid Sunyaev)提出了 α 标准吸积盘模型^[3],通过定量关联吸积率与辐射效率($L \sim \dot{M}c^2$),能够解释包括中子星和黑洞吸积在内的一系列天体物理现象。

今天学术界普遍认为类星体就是超大质量吸积黑洞,利用这些黑洞可以研究广义相对论效应。然而这些黑洞的形成和增长机制,以及这些过程对星系以及宇宙结构的形成与演化的影响还远未理解,对超大质量黑洞的质量进行精确测量十分重要。传统的测量方法有两种。

第一种是1980s开始发展的宽发射线区(BLR)反响映射方法,通过光变曲线延迟 τ 测量BLR半径 $R_{\text{BLR}}=c\tau$,结合发射线宽度 Δv 示踪引力势,计算质量: $M_{\text{BH}}=f \frac{R_{\text{BLR}}(\Delta v)^2}{G}$,其中 f 为几何因子(通常取 $f \approx 3 \sim 5$)。

第二种是利用星系核球动力学与 $M-\sigma$ 关系,也就是2000年两个团队独立发现的星系核球的恒星速

度弥散与中心黑洞质量的关系^[4,5] $M_{\text{BH}} \propto \sigma^4$,该关系表明超大质量黑洞的质量与宿主星系演化紧密耦合。

3. 黄金时代(1970~2000):多波段观测与相对论天体物理学的成熟

3.1 黑洞热力学与量子引力的探索

1972年雅各布·贝肯斯坦(Jacob Bekenstein)提出黑洞熵 $S = k_B A / (4l_p^2)$,揭示了黑洞与热力学定律的深刻联系。1974年霍金结合量子场论与弯曲时空,预言黑洞通过粒子对产生辐射,也就是著名的霍金辐射,温度 $T_H = \hbar c^3 / (8\pi G M k_B)$ 。1976年霍金提出黑洞蒸发导致量子信息丢失的信息悖论,引发持续至今的争论。

3.2 高能天体物理的突破:伽马射线暴与黑洞

伽马射线暴。1973年Vela卫星意外发现伽马射线暴^[6],1997年对一例伽马射线暴^[7]的宿主星系的红移测定确立了其宇宙学起源,表明致密天体并合或者大质量恒星的塌缩爆发产生了明亮的伽马射线暴发。至今伽马射线暴已经成为时域和多信使天文学的主要研究对象之一。

恒星级质量黑洞的证认。1964探空火箭探测到天鹅座X-1的强X射线辐射,推测源自致密天体吸积。1971对天鹅座X-1光学对应体HDE 226868的光谱观测显示其为一颗O型超巨星^[8],轨道周期5.6天,通过开普勒第三定律推算不可见伴星质量下限 $M \geq 15M_\odot$,远超中子星质量极限,这是第一个X射线双星中的黑洞候选体。

双星中致密天体的动力学质量测量的标准方法就是质心速度曲线法,基于双星轨道运动,测量可见恒星视向速度 v_r ,结合轨道倾角 i (通过椭圆光变曲线或星风模型估计),计算黑洞质量: $M_{\text{BH}} = \frac{PK^3(1+q)^2}{2\pi G \sin^3 i}$,其中 K 为伴星速度半幅, $q=M_{\text{comp}}/M_{\text{BH}}$ 为质量比。

从测量天鹅座 X-1 的致密天体质量开始,主要通过 X 射线和硬 X 射线观测发现吸积致密天体,然后通过后续的光学观测证认其是否为恒星级质量黑洞,至今已经在银河系内发现了几十个恒星级质量的吸积黑洞双星系统,这些系统中的致密天体的质量 $M > 5M_{\odot}$,远超中子星的质量上限,在广义相对论框架下的最合理解释就是黑洞。

黑洞自转。1977 布兰福德(Roger Blandford)和兹纳耶克(Roman Znajek)提出了吸积喷流理论^[9](BZ 机制),解释黑洞自转能量驱动相对论性喷流。至今发现很多吸积黑洞系统能够产生相对论喷流。然而黑洞的自转测量十分困难,目前的主要测量方法有两种,都依赖围绕黑洞的吸积盘性质的理论模型。

铁 K α 线法测量黑洞自转。1989 法比安(Andrew Christopher Fabian)等人建立了铁线反射模型的早期理论工作并且做了初步应用^[10]。1991 年拉奥尔(Ariel Laor)计算了克尔度规下铁线的轮廓^[11],建立自转-线形映射关系,成为反射谱法的标准工具。1995 年 Tanaka 等通过 ASCA 卫星观测活动星系核 MCG-6-30-15,发现铁 K α 线展宽至 4~7 keV,提出强引力场下的相对论反射模型^[12]。该方法已经用来对很多黑洞的自转做了测量^[13]。

连续谱拟合法测量黑洞自转。1997 年张双南等首次提出基于吸积盘多温黑体连续谱拟合的自转测量方法^[14],不依赖铁 K α 线,假设吸积盘发射遵循多温黑体谱,内边缘位于最后稳定圆轨道(ISCO),温度分布符合标准薄盘模型 $T(r) \propto r^{-3/4}$,通过拟合 X 射线连续谱的归一化因子 $K = (r_{\text{in}}/D)^2 \cos i$ (D 为距离, i 为倾角),结合独立测距与倾角数据,反推 $r_{\text{in}} = r_{\text{ISCO}}$,计算黑洞的自转参数 a 。该方法已经用来对很多黑洞的自转做了测量^[15,16]。

4. 多信使天文学时代(2000 至今): 从引力波到超大质量黑洞的精确测量

4.1 引力波天文学的诞生

根据广义相对论理论,宇宙中主要有以下三种

引力波波源。

双致密天体并合。引力波的主要来源为双黑洞、双中子星或中子星-黑洞系统的旋近、并合及铃荡过程,通过引力波的测量,可以同时确定并合前后的致密天体的质量和自转。此类系统的引力波波形可分为三个阶段:1) 后牛顿近似阶段(低频, $f \sim 10^{-4} \sim 10^2$ Hz);适用于双星缓慢旋近的动力学描述。2) 数值相对论阶段(高频, $f \sim 10^2 \sim 10^3$ Hz);通过超级计算机模拟并合阶段的强场时空几何,提供精确波形模板。3) 铃荡阶段:如果并合的产物是新生黑洞,其准正则模(quasi-normal modes)辐射的频率和衰减时间与黑洞质量和自转直接相关。

宇宙学起源引力波主要有三种。1) 暴胀时期:量子涨落激发的原初引力波,其功率谱与暴胀能标直接相关,可通过宇宙微波背景(CMB)B 模式偏振探测。2) 一阶相变:早期宇宙的对称性破缺相变(如电弱相变)可能产生随机引力波背景,频率范围在 $10^{-4} \sim 10^{-1}$ Hz,适合空间探测器(如 LISA)探测。3) 宇宙弦:拓扑缺陷的动力学过程可能产生特征性引力波谱,为超出标准模型的新物理提供线索。

极端质量比旋近(EMRI)。由恒星级致密天体与超大质量黑洞(SMBH)组成的系统,其引力波信号包含丰富的 SMBH 时空几何信息,是检验黑洞无毛定理和广义相对论强场效应的关键探针。

基于德雷弗(Ronald William Prest Drever)、索恩(Kip Stephen Thorne)和韦斯(Rainer Weiss)的设计,激光干涉引力波天文台 LIGO 的成功建设(2002~2015)以及 Advanced LIGO 达到空间扭曲测量的设计灵敏度 $10^{-23}/\sqrt{\text{Hz}}$,标志着引力波天文学的正式诞生。2015 年首次探测到了引力波爆发 GW150914,这是首次直接探测到双黑洞($36+29M_{\odot} \rightarrow 62M_{\odot}$)并合产生的引力波,验证了广义相对论非线性动力学。2017 年的诺贝尔物理学奖授予了建立和领导 LIGO 项目的三位科学家索恩、韦斯和巴里什(Barry Clark Barish)*。

2017 年首次探测到双中子星并合产生的引力波爆发 GW170817,该事件触发了全球电磁波段的

跟踪,证实了千新星与r过程元素合成,并约束了中子星状态方程,正式开创了多信使天文学时代。

引力波天文学正在以及将对相对论天体物理在多个方面带来革命性的进步。1) 广义相对论验证:通过引力波极化模式、传播速度(与光速一致性)及铃荡相位分析,排除标量-张量引力理论等修正模型。2) 量子引力效应:探索黑洞信息悖论与霍金辐射的观测关联,需结合极早期宇宙引力波与量子引力理论(如弦论)。3) 宇宙学参数测量:引力波作为“标准汽笛”,通过光度距离与红移关系独立测量哈勃常数。

4.2 脉冲星计时阵列测量引力波

当引力波通过地球和脉冲星之间的空间时,会引起时空的微小扰动,从而导致脉冲星信号的到达时间发生微小变化。中国天眼脉冲星计时阵列(FAST PTA)利用天眼的高灵敏度和纳秒级别的高时间分辨率,初步探测到了纳赫兹频段的引力波信号^[17],为未来的脉冲星引力波天文学研究奠定了基础。

4.3 “冻结星疑难”的理论解决以及观测验证

2009年刘元和张双南指出^[18],宇宙中真实的观测者由于远离黑洞,只能选择史瓦西坐标系,观测者的时间就是史瓦西坐标的“坐标时”。如果把Finkelstein坐标下穿越视界的时间转换回到史瓦西坐标的“坐标时”,时间仍然是无穷大。由于观测者的观测时间必然是有限的,因此观测者仍然无法“看到”物质穿越时间。事实上物理宇宙中黑洞的寿命也必然是有限的,在有限的时间内物质就不可能穿越黑洞的视界,靠坐标转换得到的结论实际上是“幻觉”。

刘和张进一步指出,冻结现象出现的本质是由于假设了下落物质为检验粒子,而检验粒子不影响引力场,引力场的度规是静态的。如果考虑下落物质的影响,视界不断膨胀,最后和下落物质撞在一起,下落物质能够在有限的时间内平滑地穿越膨胀

的视界。简单地说,就是膨胀的视界吞噬了下落物质,而这种情况在静态度规下不可能发生。这样就从理论上严格地解决了冻结星疑难。如果两个冻结星撞在一起,除了产生引力波之外,这些逼近视界的物质也会产生电磁波辐射,冻结星并不“黑”,但是已经被近年来引力波和电磁波的联合观测所排除^[19],与刘和张的预言完全一致。

计算还发现,在外部观测者的有限时间内,穿越视界的物质不会到达中心($r=0$),因此物理宇宙中的黑洞中心没有物质,也就是没有“物理奇点”。注意这个结论和彭罗斯1965年的“奇点定理”没有矛盾,因为“奇点定理”是把1939年奥本海默与斯奈德计算的球对称的引力坍缩扩展到了—般的引力坍缩,所谓的中心奇点仍然是坐标系变换之后的结果,物质到达中心所需要的外部观测者的时间仍然是无穷长,在物理宇宙中不可能发生。当然,如果观测者亲自穿越视界,他自己的确可以很快到达中心奇点。

4.4 银河系中心的超大质量黑洞的精确测量

自20世纪90年代初,赖因哈德·根策尔(Reinhard Genzel)和安德烈娅·盖兹(Andrea Ghez)各自领导的研究团队,使用位于智利的甚大望远镜(VLT)和夏威夷的凯克望远镜(Keck),通过长期观测银河系中心的恒星运动,发现这些恒星围绕一个看不见的大质量物体快速旋转^[20,21]。这些观测结果表明,银河系中心存在一个质量约为400万倍太阳质量的超大质量黑洞,提供了黑洞存在的最确凿的证据。根策尔和盖兹因其在观测银河系中心超大质量黑洞方面的贡献而获得了2020年诺贝尔物理学奖。

4.5 黑洞视界尺度成像

事件视界望远镜(EHT)通过全球VLBI网络实现了1.3 mm波段亚毫角秒分辨率,于2017年对M87*黑洞进行了观测,于2019年公布了第一个黑洞阴影的照片,显示直径约40微角秒的环形结

构^[22],与克尔黑洞预测一致。2022年事件视界望远镜公布了对银河系中心的超大质量黑洞 Sgr A* 的阴影图像,进一步验证了超大质量黑洞存在的普遍性以及广义相对论预言的正确性。

4.6 极端天体物理的数值革命

随着对广义相对论理论的深入理解、数值模拟计算的发展和超级计算能力的提升,对宇宙极端天体物理过程的数值模拟计算发生了革命性的进步,标志性的成果包括:1)先后采用了Excision方法^[23]和移动穿刺法^[24,25]的开源代码“爱因斯坦 Toolkit”,能够克服以往广义相对论数值模拟的发散问题,实现双黑洞并合的高精度模拟,支撑了引力波模板库建设;2)广义相对论磁流体数值模拟(GRMHD),能够揭示吸积盘-喷流耦合机制(如HARM代码,2005)。

5. 结语:相对论天体物理学的范式演进

相对论天体物理学历经波澜壮阔的百年,从爱因斯坦的纯理论构想,发展为依赖超算、空间与多信使探测、量子技术的实验科学,在这个过程中获得了多个诺贝尔物理学奖。其核心范式经历了三次跃迁:1.)几何范式(1915~1960),以时空弯曲解释引力现象。2)热力学范式(1970~2000),黑洞熵与量子效应统一微观与宏观。3)多信使范式(2010至今),引力波、中微子、电磁辐射与宇宙线的协同探测。

随着国际上的JWST、SKA、LISA、ATHENA、Einstein Telescope、PTA,以及中国的脉冲星计时阵列(CPTA)、阿里原初引力波望远镜(ALICPT)、太极、天琴和增强型X射线时变与偏振空间天文台(eXTP)等设施的运行和部署,未来人类将进一步揭示黑洞生长史、中子星的内部结构、极端引力规律、极强磁场中的真空涨落、暗物质粒子属性及早期宇宙的量子印记,相对论天体物理学将继续扮演宇宙极端与终极规律探针的角色,中国也将在这个领域扮演越来越重要甚至领跑的角色。

致谢

特别感谢蔡荣根院士邀请我写本文,特别致谢DeepSeek、Kimi和ChatGPT这三款AI工具对我调研资料的大力帮助(但是所有的遗漏和错误都由我负责)。

参考文献

- [1] Schmidt, M. (1963). 3C 273: A Star-Like Object with Large Red-Shift. *Nature*, 197, 1040-1041. [DOI: 10.1038/1971040a0] (类星体 3C 273 的发现及其宇宙学红移的证认)
- [2] Lynden-Bell, D. (1969). Galactic Nuclei as Collapsed Old Quasars. *Nature*, 223, 690-694. [DOI: 10.1038/223690a0] (活动星系核中心黑洞的理论模型)
- [3] Shakura, N. I., & Sunyaev, R. A. (1973). Black Holes in Binary Systems. Observational Appearance. *Astronomy & Astrophysics* 24, 337-355. (标准薄盘模型(SSD),建立吸积盘辐射与自转关联)
- [4] Ferrarese, L., & Merritt, D. (2000). A Fundamental Relation between Supermassive Black Holes and Their Host Galaxies. *Astrophysical Journal Letters*, 539, L9-L12. [DOI: 10.1086/308207] (建立 $M_{\text{BH}}-\sigma$ 关系)
- [5] Gebhardt, K., et al. (2000). A Relationship between Nuclear Black Hole Mass and Galaxy Velocity Dispersion. *Astrophysical Journal Letters*, 539, L13-L16 [DOI: 10.1086/312840] (独立发现 $M_{\text{BH}}-\sigma$ 关系)
- [6] Ray W. Klebesadel, Ian B. Strong, Roy A. Olson (1973) Observations of Gamma-Ray Bursts of Cosmic Origin. *The Astrophysical Journal Letters* 182, L85 (首次发现伽马射线暴)
- [7] E. Costa et al. (1997) GRB 970228: The First Gamma-Ray Burst with an X-ray Afterglow. *The Astrophysical Journal Letters* 484, L37-L40 (首次发现伽马射线暴的X射线余辉,直接导致了其宿主星系的发现及其红移的测量)
- [8] Bolton, C. T. (1972). Identification of Cygnus X-1 with HDE 226868. *Nature*, 235, 271-273. [DOI: 10.1038/240124a0] (天鹅座 X-1 作为首个黑洞候选体的确认)
- [9] Blandford, R. D., & Znajek, R. L. "Electromagnetic Extraction of Energy from Kerr Black Holes." *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 179, 433-456 (1977). (黑洞自转能量提取的BZ机制)
- [10] Fabian, A. C., et al. (1989). X-ray Fluorescence from the Inner Disc in Cygnus X-1. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 238(2), 729 - 736. (铁线反射模型的早期理论工作及其应用)
- [11] Amos Laor (1991) Line Profiles from a Disk around a Rotating Black Hole. *The Astrophysical Journal* 376, 90-97 DOI: 10.1086/

- 170257(计算了在克尔度规下围绕旋转黑洞的吸积盘发出的谱线轮廓)
- [12] Tanaka, Y., et al. (1995). Gravitationally Redshifted Emission Implying an Accretion Disk and Massive Black Hole in MCG-6-30-15. *Nature* 375(6533), 659-661. (铁 $K\alpha$ 线相对论展宽的首个观测证据)
- [13] Miller, J. M. (2007). Relativistic X-ray Lines from Accretion Disks and Black Hole Spin. *Annual Review of Astronomy and Astrophysics* 45(1), 441-479. (铁 $K\alpha$ 线法自转测量的综述)
- [14] Zhang, S. N., Cui, W., & Chen, W. (1997). Black Hole Spin in X-Ray Binaries: Observational Consequences *Astrophysical Journal Letters* 482(2), L155-L158. (张双南等连续谱拟合法奠基论文, 首次基于 X 射线连续谱约束自转)
- [15] McClintock, J. E., et al. (2006). The Spin of the Near-Extreme Kerr Black Hole GRS 1915+105. *Astrophysical Journal* 652(1), 518-539. (产生射电喷流的吸积黑洞双星微类星体 GRS 1915+105 的极端自转测量, 验证连续谱法可靠性)
- [16] Gou, L., et al. (2014). The Spin of the Black Hole Cygnus X-1 in the “Soft” State *Astrophysical Journal* 790(1), 29. (天鹅座 X-1 自转的连续谱拟合法高精度测量)
- [17] Zhu, W., et al. (2021). “Detection of Nanohertz Gravitational Waves with the FAST Pulsar Timing Array.” *Chinese Journal of Astronomy and Astrophysics*, 21(2), 13-24. (中国天眼初步探测到了纳赫兹频段的引力波信号)
- [18] Liu, Y., & Zhang, S. N. (2009). Exact solutions for shells collapsing towards a pre-existing black hole. *Physics Letters B* 679(1): 88-94 DOI: 10.1016/j.physletb.2009.07.033 (解决了冻结星疑难, 发现物理宇宙中物质能够穿越膨胀的视界形成黑洞, 但是物质不会到达中心, 因此黑洞既不是冻结星, 也不是奇点)
- [19] Yang, R.J., et al. (2021). Test the growth models of black hole by jointing LIGO and Insight-HXMT observations. *Journal of High Energy Astrophysics* 32: 6-10 DOI: 10.1016/j.jheap.2021.07.002 (验证了 Liu & Zhang 2009 关于区分冻结星和黑洞的理论预言)
- [20] Reinhard Genzel, Stefan Gillessen, Frank Eisenhauer 等 (2020) The Mass of the Black Hole in the Galactic Center from the Orbit of S2. *Astronomy & Astrophysics* 643, A12(精确测量银河系中心超大质量黑洞的质量)
- [21] Ghez, A. M., et al. (2008). Measuring Distance and Properties of the Milky Way’s Central Supermassive Black Hole with Stellar Orbits. *The Astrophysical Journal*, 689(2), 1044-1062 (精确测量银河系中心超大质量黑洞的质量)
- [22] Event Horizon Telescope Collaboration (2019). First M87 Event Horizon Telescope Results. I. The Shadow of the Supermassive Black Hole. *Astrophysical Journal Letters*. 875, L1 [DOI:10.3847/2041-8213/ab0ec7](M87*黑洞阴影成像与质量测量)
- [23] Baker, J. G., et al. (2006) Gravitational-Wave Extraction from an Inspiral Configuration of Merging Black Holes. *Phys. Rev. Lett.* 96, 111102. DOI: 10.1103/PhysRevLett.96.111102 (同期提出和 Campanelli, 等的类似方法, 验证移动穿刺法的普适性)
- [24] Campanelli, M., et al. (2006) Accurate Evolutions of Orbiting Black-Hole Binaries without Excision. *Phys. Rev. Lett.* 96, 111101. DOI: 10.1103/PhysRevLett.96.111101 (首次实现基于移动穿刺法的双黑洞合并模拟)
- [25] Baker, J. G., et al. (2006) Gravitational-Wave Extraction from an Inspiral Configuration of Merging Black Holes. *Phys. Rev. Lett.* 96, 111102. DOI: 10.1103/PhysRevLett.96.111102 (同期提出和 Campanelli, 等的类似方法, 验证移动穿刺法的普适性)

开放资源

Einstein Online: <https://www.einstein-online.info/> (马克斯·普朗克引力物理研究所的引力波科普与专业资源)

LIGO 开放科学中心: <https://www.gw-openscience.org/> (引力波数据与软件工具)

教科书和专著

Baumgarte, T. W., & Shapiro, S. L. *Numerical Relativity: Solving Einstein’s Equations on the Computer*. Cambridge University Press (2010). (数值相对论的数学基础(3+1 分解、约束方程)与黑洞碰撞的代码实现(如 Einstein Toolkit))

Chandrasekhar, S. *The Mathematical Theory of Black Holes*. Oxford University Press (1983). (黑洞微扰理论(准正则模、稳定性分析)、克尔黑洞的分离变量法)

Frolov, V. P., & Novikov, I. D. *Black Hole Physics: Basic Concepts and New Developments*. Springer (1998). (黑洞的经典与量子性质, 包括霍金辐射、黑洞热力学及量子修正的数学框架)

Hawking, S. W., & Ellis, G. F. R. “*The Large Scale Structure of Space-Time*.” Cambridge University Press (1973). (广义相对论的数学基础, 黑洞热力学、奇点定理及能量条件的系统性论述)

Lorimer, D. R., & Kramer, M. *Handbook of Pulsar Astronomy*. Cambridge University Press (2005). (脉冲星观测技术的百科全书, 涵盖射电计时、偏振测量及脉冲星风云的高能辐射机制)

Maggiore, M. “*Gravitational Waves: Volume 1: Theory and Experiments*.” Oxford University Press (2007). (系统推导引力波的产生机制(四极公式)、传播特性及与广义相对论的关联, 涵盖连续波、双星并合等源的解析模型)

Maggiore, M. *Gravitational Waves: Volume 2: Astrophysics and Cosmology*. Oxford University Press (2018). (聚焦引力波天体物理应用, 包括双

- 星演化、随机引力波背景及宇宙学起源(如暴胀产生的原初引力波))
- Misner, C. W., Thorne, K. S., & Wheeler, J. A. *Gravitation*. Princeton University Press (1973). (广义相对论“圣经”,也称为“大黑书”,涵盖黑洞、宇宙学与微分几何基础)
- Poisson, E., & Will, C. M. *Gravity: Newtonian, Post-Newtonian, Relativistic*. Cambridge University Press (2014). (黑洞动力学,引力波辐射,后牛顿近似与数值相对论)
- Shapiro, S. L., & Teukolsky, S. A. *Black Holes, White Dwarfs, and Neutron Stars: The Physics of Compact Objects*. Wiley-VCH (1983). (致密天体物理经典教材,TOV 方程与吸积物理详解)
- Norbert Straumann *General Relativity: With Applications to Astrophysics* Springer (2004) (结合微分几何与广义相对论,详细分析引力理论在黑洞、中子星、引力波等领域的应用。包含数值相对论与多信使天文学的前沿进展)
- Yakov Zeldovich & Igor Novikov *Relativistic Astrophysics* 苏联科学出版社 (1967) / 芝加哥大学出版社 (1971 年英文版) (百科全书式著作,分两卷讨论恒星演化、黑洞、宇宙学及早期宇宙物理。第 1 卷聚焦致密天体,第 2 卷探讨宇宙结构与引力不稳定性)
- 袁业飞 *《相对论天体物理》* 北京大学出版社 (2024) (聚焦致密星物理,施瓦西黑洞、克尔黑洞、吸积理论及数值相对论方法、伽马射线暴的“火球-激波模型”)
- * 德雷弗于 2017 年 3 月 7 日去世,未等到诺贝尔奖。

封三说明

量子场论和规范理论及应用研讨会

2025 年 3 月 13 日至 15 日,由浙江大学物理学院主办,浙江大学物理学院院长林海青院士、盛正卯教授、王凯教授与复旦大学虞跃教授共同组织的量子场论和规范理论及应用研讨会在浙江大学紫金港校区顺利举行。这次研讨会也是对汪容先生学术师德与成就的回顾和纪念。

汪容先生是我们学院第一个博士点(理论物理,全国第一批),博士后流动站(全国第一批),浙江近代物理中心的创建者之一,出版的研究生教材《量子规范理论》和《数学物理中的微分几何与拓扑学》在全国有重要影响。此次研讨会旨在纪念这位德高望重、对中国量子场论研究、教学、教材和科普等方面发展有重要贡献的杰出学者,发扬光大他的科学精神和学术成就,进一步促进国内量子场论及其应用研究学者之间的学术交流,加强同行间的合作以及推动不同领域的交叉融合。汪容先生十分关心物理学科普工作,曾担任《现代物理知识》的前身《高能物理》的主编。

会议吸引了众多汪容教授的同事、学生、博士后及学界同仁,研讨会在浙江大学紫金港校区理学部 201 报告厅正式开幕。开幕式由盛正卯教授主持,物理学院党委委员、副院长王凯教授代表学院致辞,浙江近代物理中心罗民兴院士介绍了汪容先生生平,家属代表中科院空间中心的汪大星先生,介绍了汪先生的家庭背景、在浙大求学过程中利用特殊家庭背景为进步学生组织所提供的帮助,以及与李政道先生一起

创建浙江近代物理中心的过程等。随后汪容先生的学生,虞跃教授主持了自由发言环节,首都师范大学吴可教授,中国科学院物理所前所长王玉鹏院士,西北大学杨文力教授,北京计算科学中心冯波教授,《现代物理知识》副主编姬扬教授,汪先生的学生代表沈建民、徐开文、胡红亮、李有泉、李康和浙江近代物理中心教师代表陈一新,应和平、杨李林等回忆了汪先生过往,缅怀他为中国理论物理的发展做出的贡献以及对浙江大学物理学院学科发展和研究生教育做出的突出贡献。3 月 14 日下午,宁波大学楼森岳教授、清华大学王青教授、中国科技大学卢建新教授、南开大学赵柳教授、北京大学陈斌教授和浙江大学物理学院张欣宇研究员等学者分别围绕经典和量子物理问题、量子理论教学、超弦理论、规范理论等主题进行精彩报告,涵盖多个前沿研究领域。3 月 15 日上午,中国科学院物理所曹俊鹏研究员、中国科学院半导体研究所骆军委研究员、复旦大学虞跃教授,杭州师范大学胡愈挺教授、以及浙江大学物理学院青年教师吕丽花、袁野等学者带来了关于 Bose - Hubbard 模型、后摩尔硅器件半导体物理、规范理论及应用等方面的最新成果进行了分享。

此次研讨会内容丰富、成果丰硕,不仅加深了学界对量子场论和规范理论的理解,促进了不同研究方向的交流融合,传承和弘扬了汪容教授的科学精神和优秀师德师风。(浙江大学 盛正卯/供稿)