核心坍缩超新星中心黑洞超吸积在星系尺度上的贡献

刘彤*

厦门大学物理科学与技术学院天文学系, 厦门 361005

*联系人, E-mail: tongliu@xmu.edu.cn

收稿日期: 2020-11-02; 接受日期: 2020-11-24; 网络出版日期: 2021-01-22

国家自然科学基金(编号: 11822304)资助项目

摘要 核心坍缩超新星(Core-Collapse Supernova, CCSN)是大质量恒星演化末期的爆发现象, 产生了宇宙中大多数的中子星和恒星级黑洞等致密天体. 爆发可能伴随着强磁场中子星或黑洞超吸积引发的剧烈长时标伽马射线暴. CCSN还被认为是宇宙重元素的主要来源之一. 本综述介绍了我们近期对CCSN中心黑洞超吸积过程的系列研究成果, 主要包括研究了大质量星系中心附近伽马射线暴余辉阶段, 因大量暗物质粒子湮灭电子注入而引发的光变和能谱的形态变化, 探讨了其作为暗物质探测手段的可能性; 研究了坍缩星框架下, 中微子主导吸积流外流对核合成的贡献, 及对太阳临近空间、(活动)星系等化学组分和演化的影响; 最后, 从数值模拟角度讨论了CCSN起源的致密天体质量分布, 给出了低质量间隙可能起源于CCSN爆发能量分布的结论.

关键词 超新星, 黑洞, 吸积和吸积盘, 暗物质, 化学演化

PACS: 97.60.Bw, 97.60.Lf, 97.10.Gz, 95.35.+d, 98.62.Bj

1 引言

超新星和双致密星并合是天体物理中非常重要的前沿研究领域. 大于约 $8M_{\odot}$ 的单颗恒星演化末期, 其核心坍缩为中子星或黑洞, 强大的反冲(中微子携带大量能量)将外部包层迅速驱散, 形成超新星爆发, 99%以上的能量由中微子释放出来, 剩余能量部分转化为电磁辐射. 这类超新星称为核心坍缩超新星(Core-Collapse Supernova, CCSN). 在双星演化中, 如果两颗恒星存在质量交换甚至并合, 则其演化途径更为复杂, 但

同样也会催生致密天体在其中心形成. 双致密星(双黑洞、双中子星或黑洞与中子星)并合事件是当今引力波探测的主要目标, 一般认为, 双中子星或黑洞与中子星并合是短时标伽马射线暴(Short-Duration Gamma-Ray Burst, 短暴)、千新星(Kilonova)等现象的起源机制, 但也不排除双黑洞并合可能也会产生电磁辐射^[1]. 超新星爆发事件率远高于双致密星并合, 超新星爆发是大尺度结构形成和演化的关键因素, 对恒星形成、气体输运等有着决定性影响. 比如, 超新星爆发后, 大量气体会裹挟着金属向外部扩散, 实现对下一代恒星

引用格式: 刘彤. 核心坍缩超新星中心黑洞超吸积在星系尺度上的贡献. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2021, 51: 030015

Liu T. Galaxy-scale contributions of black hole hyperaccretions in the center of core-collapse supernovae (in Chinese). Sci Sin-Phys Mech Astron, 2021, 51: 030015, doi: [10.1360/SSPMA-2020-0437](https://doi.org/10.1360/SSPMA-2020-0437)

形成的再分配,同时,作为途径之一将气体不断输运到星系中心,供给中心超大质量黑洞吸积.

无论CCSN,还是双致密星并合,都可能在中心形成一个黑洞超吸积系统(图1).其基本特征是在数百秒内吸积率极高(约 10^{-5} – $10M_{\odot} \cdot s^{-1}$),从而导致盘处于高温高密状态;吸积过程还伴随着盘外流(或盘风)和极端相对论喷流.如果吸积率在约 $10^{-3}M_{\odot} \cdot s^{-1}$ 以上,则超吸积可能处于中微子主导吸积流(Neutrino-Dominated Accretion Flow, NDAF)模式^[2],这时光子几乎完全被囚禁在吸积盘内,仅有中微子可以逃逸出来,释放黑洞引力能.大量正反中微子在盘外空间湮灭,其湮灭区域集中在黑洞上(下)方,尺度在约10–20个史瓦西半径($r_g=2GM/c^2$, M 指黑洞质量)的范围内,进而形成初始喷流结构;此外,吸积物质的磁场在黑洞附近被聚集起来,形成磁场不断耗散和累积的动态过程,通过提取黑洞转动能(旋转黑洞具有能层结构),亦可形成喷流向外释放能量,这被称为Blandford-Znajek (BZ)机制^[3].两种机制通过喷流产生相同光度的情况下,BZ机制对吸积率要求较NDAF低约2–3个量级.对于强磁场中子星,可通过较差转动或spin down过程,释放磁层能量,触发伽马射线暴.在坍缩星框架下,无论何种喷流机制,一旦喷流突破包层,在视线方向上就会产生

长时标伽马射线暴(Long-Duration Gamma-Ray Burst, 长暴).

一般而言,因为物质供给率不断减小,在CCSN中心的黑洞NDAF系统产生的喷流在突破包层之前就可能被BZ机制代替(除非外部包层物质在前身星阶段已丢失,如Wolf-Rayet星),但其仍在至少5个方面体现了巨大贡献:(1) NDAF是一个强MeV中微子源,虽然典型流量较CCSN低1–2个量级,但其发生在CCSN之后,仍有探测的可能.我们通过计算本星系群(Local Group, <1 Mpc)内的NDAF事件率发现,NDAF中微子可以被Low Energy Neutrino Astronomy (LENA)和Hyper-Kamiokande等未来探测器观测到^[4,5].(2) NDAF盘驱使黑洞进动或中微子辐射各向异性都可以产生1–100 Hz的引力波辐射.如果NDAF发生在10 kpc,甚至到1 Mpc尺度内,则可以被Einstein Telescope (ET),Decihertz Interferometer Gravitational Wave Observatory/Big Bang Observer (DECIGO/BBO)和ultimate-DECIGO等探测到^[6–8].(3) 坍缩星(Collapsar)框架^[9]下,黑洞回落(Fallback)超吸积过程吸积率极高,如果盘外流不显著,则黑洞质量将可能迅速增长.这可以用来解释致密天体质量分布中的低质量间隙(Lower Mass Gap)问题^[1].(4) NDAF的外流会与包层气体碰撞融合,

图 1 (网络版彩图)星系内高能爆发天体示意图

Figure 1 (Color online) Schematic diagram of high-energy explosions in galaxies.

1) Liu T, Wei Y F, Xue L, et al. Final compact remnants in core-collapse supernovae from 20 to $40M_{\odot}$: the lower mass gap. *Astrophys J*, in press, arXiv: 2011.14361

再次转化为被吸积物质, 起到延长吸积时标和引发吸积率微小波动等反馈效应. 这一机制可以解释某些超亮超长的超新星爆发现象, 如持续几千天、光变中至少有5个峰的超新星iPTF14hls, 也可以用于理解某些超新星的双峰光变^[10]. 这是我们在国际上首次提出恒星尺度的反馈模式. (5) NDAF的高温高密物态使得盘内出现大量自由质子和自由中子, 这些物质一旦随外流溢出, 通过核合成过程可以产生大量金属元素, 是对CCSN本身核合成的显著补充^{2)[11,12]}.

本综述将基于我们对坍缩星下黑洞超吸积过程的系统研究, 在星系尺度上考量其可能的影响和贡献, 主要包括: 星系中心附近伽马暴余辉中的暗物质湮灭信号, 坍缩星中心黑洞超吸积外流的核合成及对太阳临近和星系化学组分、演化的影响和CCSN起源的致密天体低质量间隙问题.

2 星系中心附近伽马暴余辉中的暗物质湮灭信号

时至今日, 我们对暗物质的本质仍然知之甚少. 当前, 一种主流的暗物质模型是弱相互作用的大质量粒子^[13–15]. 这种暗物质粒子可以通过湮灭的方式产生标准模型的粒子, 如中微子、光子、正负电子等. 其中暗物质湮灭电子又可以通过同步辐射产生射电波段的辐射, 所以一般情况下可以通过射电信号来间接地探测暗物质. 然而这种信号是相当弱的, 探测范围被限制在近邻星系和矮星系^[16]. 如果想要暗物质湮灭电子能够产生更强更显著的辐射, 那就必须要有一个强大的“加速器”. 在暗物质密度高的环境下, 想要把暗物质湮灭电子加速到更高的能段, 靠近大质量星系中心的伽马暴喷流可能是一个理想的“加速器”.

为此, 我们选择暗物质粒子候选者之一——最轻的超对称粒子neutralino作为研究对象, 计算了暗物质湮灭电子在余辉外激波中的加速机制和辐射机制, 预测和分析暗物质湮灭电子对伽马暴余辉光变和能谱的贡献^[17].

数值计算的主要结论是, 在一个星际电子密度低且暗物质密度高的环境下, 暗物质湮灭电子的贡献能

图 2 (网络版彩图)有无暗物质湮灭贡献下的伽马暴余辉能谱

Figure 2 (Color online) Spectra of gamma-ray burst afterglows including or excluding the contribution of dark matter annihilation.

够很好地体现在伽马暴余辉的光变和能谱中. 如图2所示, 10^4 s时, 介质密度为 1 cm^{-3} , 在 $b\bar{b}$ 湮灭通道下, 红线和黑线分别代表有无暗物质贡献的伽马暴余辉能谱(暗物质密度为 $5 \times 10^5 \text{ GeV cm}^{-3}$, 暗物质粒子质量为 100 GeV), 两者在流量和形态上都存在一些差别. 这个问题的本质是, 暗物质湮灭电子注入到外激波中, 其数密度与介质电子数密度具有可比性时, 才能体现显著的辐射效果.

既然要求暗物质密度较高, 那么星系中心附近区域势必是理想场所. 我们在不同星系暗物质密度轮廓下进行估算, 发现有显著暗物质湮灭贡献的伽马暴的位置可能在距离大质量星系中心几个到几十个pc的范围内. 同时, 我们还利用M31中心伽马射线超出的观测结果验证了我们的理论是自洽的.

这是首次研究在伽马暴辐射阶段暗物质贡献的理论预言工作. 如果今后高能观测能捕捉到星系中心附近的伽马暴, 通过分析其光变和能谱, 结合星系本身暗物质的可能分布情况, 在一定程度上可以限制暗物质的性质. 同时, 也将对伽马暴起源机制和喷流理论做出一定限制.

2) Liu T, Qi Y Q, Cai Z Y, et al. Neutrino-dominated accretion flows: Second nucleosynthesis factory in core-collapse supernovae and regulation of ion markets in galaxies. 2020, arXiv: 2008.05087

3 坍缩星中心黑洞超吸积外流的核合成及对化学演化的贡献

普遍认为, 宇宙中的金属元素(比He重的元素)是由超新星和致密星并合产生的. 关于CCSN核合成的工作不胜枚举^[2]. 其核心目的之一就是解释宇宙中或邻近宇宙中金属元素的起源、分布、输运等问题. 比如, 邻近宇宙中金属丰度在观测上比理论预期要高^[18], 高红移类星体的高金属丰度问题^[19]等. 但是, CCSN产生金属的能力毕竟是有限的, 何况金属产量越高意味着前身星爆发能量越高, 质量也越大, 而大质量恒星的数量可能无法满足观测要求. Kobayashi等人^[18]提出, 如果超亮超新星(Hypernova)的贡献足够大, 则可以解决邻近宇宙金属丰度的问题. 我们认为, 绝大部分超新星爆发能量还是偏低的(否则我们将观测到远比现在多得多的超新星爆发现象), 甚至是“失败”的超新星, 超亮超新星毕竟是非常极端的情况. 鉴于此, 可能的解决途径是, 提高质量偏低的大质量前身星(25–50 $M_{\odot}$)的金属产量.

坍缩星前期的物质供给率可以达到NDAF的点火条件. 不同质量前身星对应于不同的中心黑洞质量, 我们考虑围绕不同质量黑洞的含外流NDAF的局域解, 并计算其不同外流率下核合成的情况^[2]. 我们发现, 仅在前身星质量低于约60 $M_{\odot}$ 的情况下, NDAF外流核合成是有效的, 而且在不同外流强度下, 其 ^{56}Ni 产量与CCSN大致相当, 如图3所示. 换句话说, NDAF弥补了CCSN在大质量恒星的低质量段 ^{56}Ni 产能不足的困境. 随之带来的是, 考虑NDAF贡献后, ^{56}Ni 的产量与前身星质量相关性被大大削弱了, 即无法通过 ^{56}Ni 产量来初步判断前身星质量、金属丰度等属性.

人们一般认为, 太阳临近空间金属丰度偏高是因为该区域之前曾经发生过非常剧烈的核心坍缩超新星, 甚至是超亮超新星爆发现象. 从我们对NDAF外流核合成研究的结论来看, 较为暗弱的超新星爆发辅以NDAF的贡献亦可解释该观测.

^{56}Ni 不稳定, 会衰变为 ^{56}Fe . 我们可以将NDAF的贡献考虑进来, 结合CCSN来分析在星系及宇宙大尺度上 ^{56}Fe 及其他元素的化学演化问题. 结果表明, 考虑NDAF贡献后, 比原有 ^{56}Fe 产率最高可提高近50%, 这为解决邻近宇宙的金属丰度问题提供了可能途径; 如再将Ia型超新星的贡献考虑进来, 则NDAF外流对高红移

图3 (网络版彩图) NDAF外流和CCSN起源的 ^{56}Ni 产量随前身星质量的变化示意图

Figure 3 (Color online) Schematic diagram of ^{56}Ni yields from the NDAFs with outflows and the CCSNe as functions of the progenitor star masses.

的贡献被进一步凸显出来, $[\alpha/\text{Fe}]$ 在红移8处可以提升1倍左右, 这可能用于理解高红移星系的高金属丰度观测.

该工作是国际上首次提出并讨论NDAF外流核合成对星系或宇宙化学演化影响的原创性研究. 下一步, 还需要将坍缩星框架下爆发和回落吸积过程统一考虑, 以便得到更为自洽的结论.

4 CCSN起源的致密天体低质量间隙问题

经过数十年的努力, 人们在CCSN数值模拟研究领域取得了巨大的进步, 但仍有一系列基本问题未能完全解决. 最为突出的困难是, 如何完整、自洽地描述中微子驱动的爆发机制. 此外, 二维和三维坍缩星数值模拟不相容, CCSN核合成、转动、磁场和星风等因素的影响, 超长伽马射线暴和超亮超新星起源等问题也亟待解决. 现在面临的棘手问题, 也是近期最热门的课题之一是致密天体质量分布中的质量间隙.

质量间隙分为低、高(或第一、第二)质量间隙. 低质量间隙指, 约2–5 $M_{\odot}$ 致密天体的缺失(亦有其他质量范围的提法, 比如2.3–5 $M_{\odot}$ 或2.5–5 $M_{\odot}$, 源于中子星质量上限的不确定性). 最初恒星演化理论上并没有所谓低质量间隙的预言, 但早期X射线双星观测从未发现2–5 $M_{\odot}$ 的致密天体^[20]; 近十年来, 人们利用Shapiro Delay效应测定发现三颗质量在2 $M_{\odot}$ 左右的中子星:

PSR J1614-2230^[21], PSR J0348+0432^[22]和MSP J0740+6620^[23], 其他电磁观测手段观测陆续发现一些处于 $2-5M_{\odot}$ 的中子星或黑洞候选体^[24,25], 引力波探测更是发现三个候选体, 即双中子星并合事件GW170817^[26]和GW190425^[27]的并合产物, 以及GW190814^[28]并合前的一颗致密星. 也就是说, 低质量间隙可能存在, 但并非空无一物, 其宽度和深度犹未可知. 高质量间隙指理论预言大质量前身星因为pair-instability效应会被完全炸掉而没有剩余, 故不存在由单颗大质量恒星(约 $130-250M_{\odot}$)中心坍缩形成大于约 $45M_{\odot}$ 的黑洞, 但引力波探测却发现很多在并合前大于 $45M_{\odot}$ 的黑洞.

对于质量间隙, 可能的解决途径主要有两类: (1) 从单颗恒星演化的角度, Belczynski和Fryer等人^[29,30]提出快速爆发(Rapid Explosion)机制, 计算表明, 对 $20-40M_{\odot}$ 前身星而言, 可以完全清空 $2-5M_{\odot}$ 的所有中心致密剩余物质, 解释了当时的观测^[20]. 以Farmer和Renzo等人^[31,32]为代表的诸多论文提出某些机制(比如wind, convection等)可抑制pair-instability效应, 用于解释高质量间隙存在黑洞. (2) 从双星甚至多体的角度, 近期亦有多篇论文提出, 通过双(多)致密星并合、双星演化、共同包层演化等途径可以分别解释两个质量间隙^[33,34].

红移1以内, 现有观测到的超新星数目远远低于实际爆发数, 主要是因为绝大多数超新星爆发能量低, 无法被观测到. 而爆发能量低, 则意味着回落吸积物质较多, 这样有利于中心致密天体形成后质量继续增长. 基于此, 独立于前人的数值模拟工作, 我们利用Athena++编写了一维CCSN爆发模拟程序, 计算不同金属丰度和质量的前身星在不同爆发能量下最终剩余的中心致密天体质量^[1]. 这里我们主要关注 $20-40M_{\odot}$ 的前身星, 因为这类前身星中心铁核质量基本上小于 $2M_{\odot}$. 通过回落吸积过程可能实现中子星到黑洞的转变. 即使爆发能量很低, 小于 20 (或 25) $M_{\odot}$ 的前身星中心中子星一般无法转变为黑洞, 而大于 $40M_{\odot}$ 的前身星中心基本会直接坍缩为 $5M_{\odot}$ 以上的黑洞. 所以低质量间隙存在与否基本上取决于 $20-40M_{\odot}$ 的前身星坍缩后的剩余致密物质多寡.

我们发现, 如果 $20-40M_{\odot}$ 低金属丰度前身星占主导, 其典型初始爆发能量约 $2B$ (其中 $1B=10^{51}$ erg), 剩余的能量为 $0.02-0.83B$, 远低于现有观测超新星, 则必然会出现存在一定深度和宽度的低质量间隙. 如图4所示, 如果认为所有前身星初始爆发能量呈高斯分布, 典

图 4 (网络版彩图)对致密天体低质量间隙的理论解释

Figure 4 (Color online) Our understanding on the lower mass gap of compact remnants.

型值为 $2B$, 那么小于 $20M_{\odot}$ 的前身星(蓝色区域)产生大量中子星; 约 $20-40M_{\odot}$ 低金属丰度前身星(黑色区域)通过回落吸积, 中心致密天体质量多数增长到 $5M_{\odot}$ 以上; $20-40M_{\odot}$ 太阳金属丰度前身星(绿色区域)质量增长很小, 仍停留在质量间隙(黄色区域)内; 大于 $40M_{\odot}$ 前身星则主要贡献高于质量间隙的黑洞质量分布. 这一结果与现有观测吻合; 同时, 暗示我们必须积累足够多的致密天体质量样本, 才能确定质量间隙的形状, 以此可以进一步限制前身星在宇宙中的分布、爆发机制和各种属性.

除了数值模拟上的讨论, 还可以考虑利用长暴和短暴样本, 在中微子湮灭过程或BZ机制下, 分别研究黑洞质量和自旋的演化, 以期从观测角度对低质量间隙进行限制.

该工作独立实现了一维CCSN数值模拟, 下一步还需要通过中微子驱动的二维、三维CCSN数值模拟进行验证.

5 总结与展望

综上, 我们从星系甚至更大的尺度上研究了恒星级爆发现象—CCSN中心黑洞超吸积过程的主要贡献. 可见, 黑洞超吸积在CCSN研究中是不可忽略的重要一环. 实际上, 黑洞超吸积对于双致密星并合多波段多信使研究亦是不可或缺的^[2].

下一步, 我们有望在以下方面开展更多具有一定原创性的研究工作: (1) 考虑不同暗物质模型对伽马

暴余辉的贡献, 提出区分不同暗物质模型的预言; (2) 在坍缩星框架内寻找新的强引力波源, 比如极端相对论喷流的引力波辐射, 同时, 还可以考虑中心黑洞超吸积或强磁场中子星释放的引力波对喷流的影响, 以期在电磁辐射中找到引力波辐射的印记; (3) 求解外流下(磁化)NDAF的含时解, 对其核合成问题开展细致研究, 最终能与CCSN完全联动, 实现CCSN核合成的总览图像; (4) 运用Athena++编写程序, 进行CCSN的二维和三维数值模拟研究, 重点研究中心黑洞弹开机制、吸积盘外流反馈机制、大质量坍缩星pair-instability效应等; (5) 结合超新星观测和元素演化历史,

全面分析各类超新星的爆发事件率、爆发能量分布, 以及相关统计规律, 用来进一步限制恒星演化理论, 指导多波段多信使天文学观测.

本文部分展示CCSN框架下, 黑洞超吸积过程对星系尺度的多角度贡献. 涉及的暗物质探测、太阳临近空间的金属丰度、星系化学演化、质量间隙等问题是现代高能天体物理领域的热点和难点, 仍需进一步深入细致的理论和观测研究. 同时, 黑洞超吸积物理中, 从吸积盘动力学到中微子微观过程, 从喷流理论到盘外流形成机制等问题, 亦需要后续开展理论研究.

参考文献

- 1 Liu T, Romero G E, Liu M L, et al. Fast radio bursts and their gamma-ray or radio afterglows as Kerr-Newman black hole binaries. *Astrophys J*, 2016, 826: 82, arXiv: [1602.06907](#)
- 2 Liu T, Gu W M, Zhang B. Neutrino-dominated accretion flows as the central engine of gamma-ray bursts. *New Astron Rev*, 2017, 79: 1–25, arXiv: [1705.05516](#)
- 3 Blandford R D, Znajek R L. Electromagnetic extraction of energy from Kerr black holes. *Mon Not R Astron Soc*, 1977, 179: 433–456
- 4 Liu T, Zhang B, Li Y, et al. Detectable MeV neutrinos from black hole neutrino-dominated accretion flows. *Phys Rev D*, 2016, 93: 123004, arXiv: [1512.07203](#)
- 5 Wei Y F, Liu T, Song C Y. Black hole hyperaccretion in collapsars. I. MeV neutrinos. *Astrophys J*, 2019, 878: 142, arXiv: [1905.04850](#)
- 6 Sun M Y, Liu T, Gu W M, et al. Gravitational waves of jet precession in gamma-ray bursts. *Astrophys J*, 2012, 752: 31, arXiv: [1204.2028](#)
- 7 Liu T, Lin C Y, Song C Y, et al. Comparison of gravitational waves from central engines of gamma-ray bursts: Neutrino-dominated accretion flows, Blandford-Znajek mechanisms, and millisecond magnetars. *Astrophys J*, 2017, 850: 30, arXiv: [1709.09810](#)
- 8 Wei Y F, Liu T. Black hole hyperaccretion in collapsars. II. Gravitational waves. *Astrophys J*, 2020, 889: 73, arXiv: [1912.07785](#)
- 9 Heger A, Woosley S E. The nucleosynthetic signature of population III. *Astrophys J*, 2002, 567: 532–543, arXiv: [astro-ph/0107037](#)
- 10 Liu T, Song C Y, Yi T, et al. A possible feedback mechanism of outflows from a black hole hyperaccretion disk in the center of jet-driven iPTF14hls. *J High Energy Astrophys*, 2019, 22: 5–9, arXiv: [1902.03464](#)
- 11 Liu T, Xue L, Gu W M, et al. The vertical composition of neutrino-dominated accretion disks in gamma-ray bursts. *Astrophys J*, 2013, 762: 102, arXiv: [1211.2206](#)
- 12 Xue L, Liu T, Gu W M, et al. Relativistic global solutions of neutrino-dominated accretion flows. *Astrophys J Suppl Ser*, 2013, 207: 23, arXiv: [1306.0655](#)
- 13 Jungman G, Kamionkowski M, Griest K. Supersymmetric dark matter. *Phys Rep*, 1996, 267: 195–373
- 14 Bertone G, Hooper D, Silk J. Particle dark matter: Evidence, candidates and constraints. *Phys Rep*, 2005, 405: 279–390, arXiv: [hep-ph/0404175](#)
- 15 Bergström L. Dark matter evidence, particle physics candidates and detection methods. *Ann Phys*, 2012, 524: 479–496, arXiv: [1205.4882](#)
- 16 Ackermann M, Albert A, Anderson B, et al. Searching for dark matter annihilation from milky way dwarf spheroidal galaxies with six years of Fermi large area telescope data. *Phys Rev Lett*, 2015, 115: 231301, arXiv: [1503.02641](#)
- 17 Huang B Q, Liu T, Huang F, et al. Contribution of dark matter annihilation to gamma-ray burst afterglows near massive galaxy centers. *Astrophys J*, 2020, 904: 17, arXiv: [2009.01416](#)
- 18 Kobayashi C, Karakas A I, Lugaro M. The origin of elements from carbon to uranium. *Astrophys J*, 2020, 900: 179, arXiv: [2008.04660](#)
- 19 Barth A J, Martini P, Nelson C H, et al. Iron emission in the $z=6.4$ Quasar SDSS J114816.64+525150.3. *Astrophys J*, 2003, 594: L95–L98, arXiv: [astro-ph/0308005](#)
- 20 Bailyn C D, Jain R K, Coppi P, et al. The mass distribution of stellar black holes. *Astrophys J*, 1998, 499: 367–374, arXiv: [astro-ph/9708032](#)

- 21 Demorest P B, Pennucci T, Ransom S M, et al. A two-solar-mass neutron star measured using Shapiro delay. *Nature*, 2010, 467: 1081–1083, arXiv: [1010.5788](#)
- 22 Antoniadis J, Freire P C C, Wex N, et al. A massive pulsar in a compact relativistic binary. *Science*, 2013, 340: 1233232, arXiv: [1304.6875](#)
- 23 Cromartie H T, Fonseca E, Ransom S M, et al. Relativistic Shapiro delay measurements of an extremely massive millisecond pulsar. *Nat Astron*, 2020, 4: 72–76, arXiv: [1904.06759](#)
- 24 Linares M, Shahbaz T, Casares J. Peering into the dark side: Magnesium lines establish a massive neutron star in PSR J2215+5135. *Astrophys J*, 2018, 859: 54, arXiv: [1805.08799](#)
- 25 Thompson T A, Kochanek C S, Stanek K Z, et al. A noninteracting low-mass black hole-giant star binary system. *Science*, 2019, 366: 637–640, arXiv: [1806.02751](#)
- 26 Abbott B P, Abbott R, Abbott T D, et al. GW170817: Observation of gravitational waves from a binary neutron star inspiral. *Phys Rev Lett*, 2017, 119: 161101, arXiv: [1710.05832](#)
- 27 Abbott B P, Abbott R, Abbott T D, et al. GW190425: Observation of a compact binary coalescence with total mass $\sim 3.4M_{\odot}$. *Astrophys J*, 2020, 892: L3, arXiv: [2001.01761](#)
- 28 Abbott R, Abbott T D, Abraham S, et al. GW190814: Gravitational waves from the coalescence of a 23 solar mass black hole with a 2.6 solar mass compact object. *Astrophys J*, 2020, 896: L44, arXiv: [2006.12611](#)
- 29 Belczynski K, Wiktorowicz G, Fryer C L, et al. Missing black holes unveil the supernova explosion mechanism. *Astrophys J*, 2012, 757: 91, arXiv: [1110.1635](#)
- 30 Fryer C L, Belczynski K, Wiktorowicz G, et al. Compact remnant mass function: Dependence on the explosion mechanism and metallicity. *Astrophys J*, 2012, 749: 91, arXiv: [1110.1726](#)
- 31 Farmer R, Renzo M, de Mink S E, et al. Mind the gap: The location of the lower edge of the pair-instability supernova black hole mass gap. *Astrophys J*, 2019, 887: 53, arXiv: [1910.12874](#)
- 32 Renzo M, Farmer R J, Justham S, et al. Sensitivity of the lower edge of the pair-instability black hole mass gap to the treatment of time-dependent convection. *Mon Not R Astron Soc*, 2020, 493: 4333–4341, arXiv: [2002.08200](#)
- 33 Zevin M, Spera M, Berry C P L, et al. Exploring the lower mass gap and unequal mass regime in compact binary evolution. *Astrophys J*, 2020, 899: L1, arXiv: [2006.14573](#)
- 34 Yang Y, Gayathri V, Bartos I, et al. Black hole formation in the lower mass gap through mergers and accretion in AGN disks. *Astrophys J*, 2020, 901: L34, arXiv: [2007.04781](#)

Galaxy-scale contributions of black hole hyperaccretions in the center of core-collapse supernovae

LIU Tong^{*}

Department of Astronomy, College of Physical Science and Technology, Xiamen University, Xiamen 361005, China

Core-collapse supernovae (CCSNe) are dramatic explosions of the massive stars at the end of their lives, which produce most of neutron stars and stellar-mass black holes in the Universe. The explosions might be associated with long-duration gamma-ray bursts originating from the black hole fallback hyperaccretions or neutron stars with strong magnetic fields. CCSNe are also considered to be one of the main factories of the heavy elements. In this review, I briefly introduce our recent work on the black hole hyperaccretions in the center of CCSNe. We studied the effects of dark matter annihilation on the shapes of the light curves and spectra in the gamma-ray burst afterglows near the galaxy centers, which might be considered as a possible detection method for dark matter. We also studied nucleosynthesis of the disk outflows from neutrino-dominated accretion flows in the collapsar scenario, and their contributions to the chemical components and evolutions of the solar neighborhood and (active) galaxies. Finally, we simulated the explosions of CCSNe and demonstrated that the distributions of the explosion energies might lead to the lower mass gap of compact remnants.

supernovae, black holes, accretion and accretion disks, dark matter, chemical evolution

PACS: 97.60.Bw, 97.60.Lf, 97.10.Gz, 95.35.+d, 98.62.Bj

doi: [10.1360/SSPMA-2020-0437](https://doi.org/10.1360/SSPMA-2020-0437)