

• 特约综述 •

核心坍缩型超新星前身星简述

宋翠英^{1,2}, 刘 彤^{1*}

(1. 厦门大学物理科学与技术学院, 福建 厦门 361005; 2. 上海交通大学李政道研究所, 上海 200240)

摘要: 大质量恒星($>8 M_{\odot}$, $M_{\odot}$ 表示太阳质量)的死亡伴随着超新星爆发和伽玛射线暴等剧烈现象. 研究和限制不同类型超新星的前身星属性一直是天体物理领域的热点. 本文总结了核心坍缩型超新星前身星的观测和理论研究现状, 介绍了质量损失和自转等因素的影响.

关键词: 大质量恒星; 恒星演化; 超新星; 伽玛射线暴

中图分类号: P 142

文献标志码: A

文章编号: 0438-0479(2021)06-0962-09

多数恒星在演化末期会经历剧烈的爆炸^[1-4], 整个过程中释放的能量可达 $10^{40} \sim 10^{45}$ J, 产生的电磁辐射可以照亮其所在的整个星系. 依据接近最大亮度时光谱中是否出现氢发射线, 超新星被分为 I 型(无氢发射线)和 II 型(有氢发射线)^[5]; 根据光谱中是否含有硅吸收线和氢发射线, I 型超新星又被进一步细分为 Ia(热核爆炸型超新星, 与恒星爆炸无关, 有明显的硅吸收线)、Ib(无硅吸收线, 有氢发射线)和 Ic 型(无硅吸收线和氢发射线). 通常观测上很难完全区分 Ib 与 Ic 型超新星, 所以它们被合称为 Ibc 型超新星^[5]. 此外, 光谱中具有宽发射线的 Ic 型超新星, 又被称为 Ic-BL 型超新星^[6].

根据光变曲线特征, II 型超新星可以进一步被细分为 II-P 和 II-L 型^[5,7]. 前者的光变曲线先出现持续约 100 d 的平台结构^[8], 之后快速衰减; 后者的光变曲线达到峰值亮度后呈线性衰减^[9]. 随观测数据的增加, 新的 II 型超新星子类 II_n 和 II_b 型被提出. II_n 型超新星的氢发射线通常有多个速度分量, 且具有强的“窄”轮廓^[10]. II_b 型超新星会从 II 型过渡到 I 型, 其最初光谱与 II 型超新星相似, 但会迅速演化, 当其光谱出现氢线的同时, 氢线减弱并逐渐消失^[11].

Ia 型超新星可在邻近宇宙任何类型的星系中找到^[12], 而 Ib 和 Ic 型超新星主要发生在大质量恒星群中, 类似于 II 型. 除 Ia 型超新星外, 其他 I、II 型超新

星又被称为核心坍缩型超新星(core-collapse supernovae, CCSNe), 均与大质量恒星死亡时的铁核坍缩有关^[13].

除了超新星爆发, 一些大质量恒星死亡时, 还会伴随着更为剧烈的电磁现象——伽玛射线暴^[14-15](简称伽玛暴). 在几秒内, 伽玛暴释放出的能量比太阳一生的辐射还多, 如无特殊说明下文中所有的伽玛暴均指持续时间大于 2 s 的长暴. 观测上, 一些 Ic-BL 型超新星与伽玛暴成协^[16-17], 说明伽玛暴与 Ic-BL 型超新星应具有相同的前身星特征. 但是目前尚不完全清楚前身星与超新星类型的对应关系, 也未彻底揭示恒星在演化过程中的哪些因素导致了其在生命的最终阶段产生伽玛暴.

1 CCSNe

1.1 超新星的爆炸机制

超新星的爆炸机制和前身星的性质仍不完全明确^[18-20]. 目前, 人们普遍认为 Ia 型超新星与密近双星中的碳氧白矮星的热核爆炸有关^[21]. 流行的两种 Ia 型超新星前身星模型为单简并星模型和双简并星模型(更多关于 Ia 型超新星前身星模型的介绍, 请参考综述^[22-23]). 单简并星模型认为 Ia 型超新星起源于一颗中等质量恒星(可能为主序星、氦星、红巨星或亚

收稿日期: 2020-10-09 录用日期: 2021-02-09

基金项目: 国家自然科学基金(11822304)

* 通信作者: tongliu@xmu.edu.cn

引文格式: 宋翠英, 刘彤. 核心坍缩型超新星前身星简述[J]. 厦门大学学报(自然科学版), 2021, 60(6): 962-970.

Citation: SONG C Y, LIU T. A brief review on progenitors of core-collapse supernovae[J]. J Xiamen Univ Nat Sci, 2021, 60(6): 962-970. (in Chinese)



巨星)和一颗白矮星组成的双星系统. 白矮星不断吸积伴星物质, 当质量超过 Chandrasekhar 极限 (约 $1.44 M_{\odot}$, $M_{\odot}$ 为太阳质量) 时, 星体引力坍缩, 发生热核爆炸^[24-27]. 在双简并模型中, 两颗互相绕转的白矮星通过引力波辐射造成的角动量损失而逐渐靠近, 最终并合, 若总质量超过 Chandrasekhar 极限亦会产生 Ia 型超新星爆炸^[28-29]. 关于热核爆炸型超新星的观测特征请参考综述^[30].

最低质量的 CCSNe 的前身星 (约 $8 M_{\odot}$) 通过碳燃烧形成氧-氖-镁核, 但在氖被点燃之前已达到电子简并^[13]. 由于氖和镁的反应阈值较低, 不断增加的电子费米能使电子俘获成为可能. 当质量密度达到核电子俘获的临界密度时, 星体开始引力坍缩, 产生超新星爆发现象. 一般认为, 这种超新星具有较低的爆炸能 (约 10^{43} J) 和较低的 ^{56}Ni 产量 (约 $10^{-3} M_{\odot}$), 其爆炸可能是由中微子加热机制驱动, 又被称为电子俘获超新星. 这类超新星约占总数目的 20%~30%, 其候选体有蟹状星云的前身超新星 SN 1054^[25], 以及比较暗的一些超新星 SN 1997D、SN 1999br、SN 2005cs 和 SN 2008S 等.

质量约为 $9\sim 100 M_{\odot}$ 的恒星在经历硅燃烧阶段后会形成铁核^[31]. 内核在温度为 10^{10} K 左右时, 铁核开始分解成 α 粒子和其他自由核子. 铁核因引力不稳定向内坍缩, 随之其密度和电子化学势增加, 核子和一些自由质子的电子俘获加快, 并加速内爆. 只有当核密度大于 $2.7\times 10^{14} \text{ g/cm}^3$ 时, 动力学坍缩才停止. 而内核外围的物质却继续以超音速坍塌并撞击在内核上, 产生很强的向外行进的反弹激波, 最终导致爆炸. 大部分 CCSNe 都属于铁核坍缩型. 观测到一些超新星的抛射物动能达到 $10^{43}\sim 10^{44}$ J, 超亮超新星甚至可以超过 10^{45} J. 爆炸能远远超过抛射物最初的引力束缚能, 这意味着可能还有除传统的中微子加热机制以外的其他驱动模式, 如中微子延迟爆发机制^[32]、磁旋转机制 (磁场提取原初中子星的旋转能)^[33-34] 等.

质量在 $100\sim 130 M_{\odot}$ 之间的大质量、低金属丰度 (Z , 除氢和氦以外的所有元素的质量百分比) 恒星, 在经历碳燃烧阶段后, 若氦核质量在 $32\sim 64 M_{\odot}$ 范围内, 会经历脉动不稳定性^[20,35], 导致恒星产生剧烈的脉冲, 抛出大量物质, 但未把恒星完全摧毁. 根据恒星的质量和初始脉动的强度, 次级脉动在 $1\sim 10^4$ d 后会接踵而至, 脉冲动能可以超过 10^{44} J. 初始脉动将氢包层抛出, 之后的次级脉动也可能抛出氦核的外包层^[36]. 虽然这类恒星脉动的动能可能超过正常的超新星, 但由于缺乏 ^{56}Ni 或其他放射性元素, 无法为后期的辐射提

供能源, 因此其光度较低, 约 $10^{34}\sim 10^{37}$ J/s. 脉动会一直持续到恒星质量或中心熵下降到不再遭遇对不稳定 (pair-instability). 之后, 恒星形成静力学平衡的铁核. 在经历脉动对不稳定脉冲星阶段, 因其铁核质量较大, 最终也可能会直接坍缩为黑洞^[37].

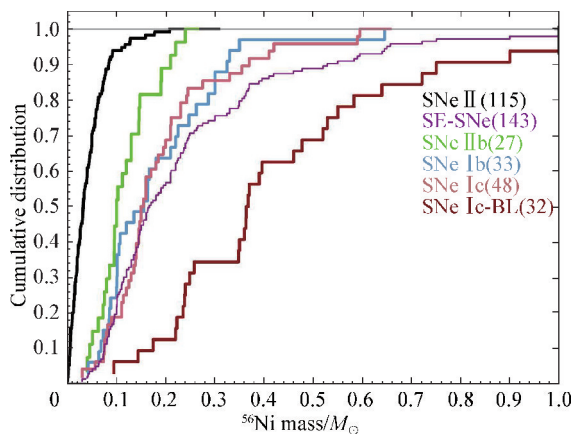
质量在 $130\sim 250 M_{\odot}$ 之间的大质量恒星, 若氦核质量在 $64\sim 135 M_{\odot}$ 范围内, 核心温度约达到 10^9 K, 伽玛射线和原子核之间的碰撞产生电子-正电子对, 电子对湮灭为中微子对, 辐射带走大部分热能, 导致恒星内部压强下降, 在引力作用下发生局部坍塌, 坍塌区域的温度和压强迅速升高, 导致原子核快速聚变, 并释出大量能量^[20,35]. 由此产生的爆炸能可达 10^{46} J, 恒星被完全炸碎, 不会留下黑洞或中子星等剩余物^[1]. 这种爆炸一般被称为对不稳定性超新星. 近年来观测到的极端亮的超新星, 如 SN 2006gy、SN 2007bi 等, 被认为是这类超新星的候选体^[36,38-39].

1.2 CCSNe 的前身星特征

超新星光变曲线的峰值光度和持续时间可以反映出其前身星的包层质量、半径等特征. 对 II-P 和 II-L 型超新星观测样本的分析表明, 它们的前身星为红超巨星, 在主序阶段的最小初始质量约为 $8 M_{\odot}$, 最大光度约为 $5 L_{\odot}$ ($L_{\odot}$ 为太阳光度). 当然, 这个数值具有一定的模型依赖性^[31]. 一般认为, Ibc 型超新星的前身星为失去氢氦包层的大质量恒星. 关于前身星是如何失去氢氦包层的这一问题仍有争议, 即恒星风^[40]、恒星自转^[41-42]、双星相互作用^[43-45] 或核燃烧不稳定性等, 哪个或哪些因素主导. 越来越多的观测证据 (较弱的恒星风^[46]、较低的抛射物质量^[47-48] 和星周介质密度^[49-50]、较高的双星占比) 表明 II 型超新星的前身星可能属于双星系统.

大质量恒星爆炸时, 抛射物中的放射性元素衰变 ($^{56}\text{Ni}\rightarrow^{56}\text{Co}\rightarrow^{56}\text{Fe}$) 是超新星后期辐射的主要能量来源^[51]. 超新星爆炸中合成的 ^{56}Ni 的质量与爆炸特征和前身星结构有关^[52-54]. 对 CCSNe 的测光特征 (镍质量、抛射物质量和动能) 统计分析表明, 剥去氢氦外包层的超新星 (IIb、Ib、Ic) 的 ^{56}Ni 产量比 II 型超新星高得多 (图 1)^[55]. II 型超新星的 ^{56}Ni 产量中值为 $0.032 M_{\odot}$, 而 IIb 和 Ibc 型超新星的产量是其 3 倍和 5 倍. 与伽玛暴成协的超新星抛射物的动能和 ^{56}Ni 质量最大, 其次是 Ic-BL 型超新星的, 二者可能是中心引擎——黑洞吸积系统或磁陀星 (magnetar) 驱动的爆炸. 因 Ic-BL 型超新星的前身星具有更高的 Z 值, 在爆炸前的质量和角动量损失更大, 其中心引擎可能不如与伽玛暴成协的超新星强大^[56]. Ib 和 Ic 型超新星的爆炸参数 (如

光球速度、抛射物的质量和动能等)十分相似,可能具有相似的前身星. Lyman 等^[47]利用测光特征,对不同类型的超新星进行 Kolmogorov-Smirnov 检验,发现至少有两种演化途径可以产生 Ib 和 Ic 型超新星:大部分来自中等质量的密近双星,少部分来自单个大质量的 Wolf-Rayet 星. Ic-BL 型超新星的前身星质量约 $30 M_{\odot}$,与伽玛暴成协的超新星的前身星质量约 $35 M_{\odot}$,大于 Ib 和 Ic 型超新星的前身星质量(约 $20 M_{\odot}$)^[57].



Ic-BL 型超新星(其中包括与伽玛暴成协的超新星)在本图中没有完成其累积分布,因为少数事件合成了 $1 M_{\odot}$ 以上的 ^{56}Ni .

图1 CCSNe 的 ^{56}Ni 质量^[55]

Fig. 1 ^{56}Ni masses of CCSNe^[55]

另外,也可以直接通过光度和有效温度探测超新星的前身星特征. 目前为止,已经通过直接检测爆炸前超新星的图像,确认了 5 个 IIb 型超新星^[58-64](SN 1993J、SN 2008ax、SN 2011dh、SN 2013df 和 SN 2016gkg)起源于初始质量为 $8 \sim 18 M_{\odot}$ 的红超巨星. 然而,目前还未观测到较大质量的 II 型超新星的前身星,即所谓的“红超巨星”问题^[65-66]. 第一个可能的 Ic 型超新星 SN 2017ein 的前身星被观测到^[67],初始质量可能 $\geq 45 M_{\odot}$. Ib 型超新星 iPTF13bvn 的前身星最初被认为是大质量的 Wolf-Rayet 星^[68],但是研究人员对超新星爆炸前的测光图像分析后发现,其前身星质量约为 $12 M_{\odot}$ ^[69],可能为双星系统^[70]. 此外,SN 1993J、SN 2001ig 和 SN 2011dh 的前身星处于双星系统中的证据也被观测到^[71-72].

CCSNe 是大质量恒星死亡的产物,其中一部分恒星还会产生宇宙中最为剧烈的爆炸——伽玛暴. 下面将继续探讨自转、质量损失等因素对恒星演化的影响,及产生伽玛暴前身星的途径.

2 质量损失和自转对恒星演化的影响

2.1 恒星演化中的质量损失

大质量恒星在演化过程中伴随着巨大的质量损失^[46,73]. 一颗初始质量为 $60 M_{\odot}$ 的恒星,由于强辐射压驱动的星风,在主序阶段会失去一半的质量,在红超巨星阶段,整个氢包层都可能被抛射掉,最终演化到超新星爆炸时的质量可能只剩余 $10 M_{\odot}$. 理论模型预测 O/B 型星的质量损失率 M 具有 Z 依赖性: $M \propto Z^{0.7 \sim 0.8}$ ^[74-75],与观测吻合^[76]. 由于质量损失的不确定因素很多,在计算恒星模型时,通常采用观测结果推演的经验关系.

2.2 自转对恒星演化的影响

恒星演化的“标准模型”一般忽略恒星自转的影响,但事实上所有的恒星都在自转. 在恒星演化中,自转的作用主要体现在以下 4 个方面^[77-78]:

1) 对恒星结构的影响:当自转产生的离心力与引力相等时,恒星达到平衡状态,表面是一个等势面. 此时,恒星极点的离心力为零,赤道处的离心力最大. 由于自转的作用,恒星沿着极轴方向不断被拉长,自转速度越大,恒星越扁. 随着恒星表面形状的改变,表面有效温度和引力也会随之改变^[77,79].

2) 对恒星质量损失的影响:由于自转的出现,恒星的质量损失不再是各向同性的. 与赤道附近区域相比,恒星的极点附近温度较高,辐射压更强,驱动的星风也更强,质量损失更大. 对于给定光度和有效温度的恒星,自转的出现使平均质量损失率增加.

3) 自转混合对恒星表面 Z 值的影响:对于质量低于 $30 M_{\odot}$ 的太阳金属丰度的恒星,主序阶段质量损失对表面元素丰度的影响不大,自转混合对元素丰度的改变起主导作用. 混合效应主要由剪切湍流的扩散产生. 径向环流也会起到一定的传输元素的作用,但主要是转移角动量. 在主序阶段,自转混合将 CNO 循环产生的元素(主要为 ^{14}N 和 ^{13}C)传输到恒星表面,从而影响恒星表面 N/H ^[80](N 元素与 H 元素的粒子数之比). 差动自转产生的不稳定性也有助于传输过程的进行. N/H 的超出与恒星自转速度之间并不存在单一的关系,它由恒星初始 Z 值、质量、自转速率、年龄等因素共同决定. 整体来说,质量越大、 Z 值越低的恒星,氮丰度越大^[81],这已经被观测所证实. 值得注意的是,对于质量大于 $30 M_{\odot}$ 的太阳金属丰度的恒星,主序阶段的质量损失对表面元素丰度的改变起主导作用. 此

外,低自转的双星可能由于潮汐混合或红巨星氮丰富的包层的转移而具有较高的 N/H . 相反,双星也可能通过吸积包层物质,获取大量的角动量,从而具有很高的自转速度,而没有 N/H 过剩.

4) 恒星从在分子云中诞生到死亡的过程中,都离不开自转与磁场的相互作用. 内部磁场的存在可能会产生旋转的内部耦合,导致刚体自转. 而外部磁场会产生一定的磁制动,如太阳和太阳风之间的磁耦合加剧了恒星在主序前和主序阶段的角动量损失. 自转及磁场的相互作用对超新星和伽玛暴爆发也会产生重要的影响. 快速自转可能会导致激波以及中微子辐射的全局不对称,在两极处形成外流. 数值模拟已经证明,当自转与能够提取旋转能的强磁场相结合时,该效应最为明显^[82-83]. 该过程已被用来解释与超亮超新星 SN 2011kl 成协的超长伽玛暴 GRB 111209A^[84].

自转对恒星演化的影响在低 Z 值时尤为重要. 此时,恒星风引起的质量损失减少,自转混合导致的表面元素丰度增加比高 Z 值时更明显. Ekström 等^[78]、Georgy 等^[85] 和 Groh 等^[86] 研究了自转和金属丰度对恒星演化的影响. 他们采用相同的物理参数,用 Geneva 程序计算了初始质量在 $0.8 M_{\odot} \sim 120 M_{\odot}$, $Z = (1/35)Z_{\odot}, (1/7)Z_{\odot}, Z_{\odot}$ ($Z_{\odot}$ 为太阳金属丰度)的自转和非自转恒星的演化模型. 结果显示,当初始自转速度为临界速度的 40% 时,自转的恒星寿命比非自转的恒星寿命增加了约 20%. 此外, Z 值和自转对恒星在赫罗图上的演化轨迹、恒星内部结构、表面元素丰度及最终剩余物等都有重要影响.

3 伽玛暴的前身星

3.1 伽玛暴前身星的特征

目前尚不完全清楚一颗大质量恒星是如何失去其氢包层,并在坍缩后形成吸积盘系统,进而产生伽玛暴喷流的. Woosley 等^[87] 首先提出了伽玛暴由快速自转的、失去氢包层的单个大质量恒星坍缩产生,同时伴随着超新星的爆发, Wolf-Rayet 星是其天然的前身星候选体. 要求前身星失去氢包层的原因有二:其一,由中微子湮灭或磁流体动力学机制驱动的相对论喷流必须要突破前身星的包层才能产生伽玛暴. 有氢包层的大质量恒星半径约为 10^{12} cm,即使喷流以接近光速的速度在恒星内部运动,突破包层所需要的时间也至少 100 s,这对喷流强度要求较高. 对于要求中心引擎活动千秒甚至万秒的长暴,有氢包层的红巨星或蓝巨星可能是其前身星. 其二,任何类型的巨星作为

前身星,其中心都是自转缓慢的氦核. 如果出现包层,氦核必然在相当长的时间内已经被加速到很高的速度了. 单个恒星演化过程中的星风损失或双星相互作用都可能使恒星失去氢氦包层^[88-89]. 单星和双星模型对前身星系统的 Z 值要求不同. 由于高 Z 值的恒星具有更强的星风,在坍缩之前会失去大部分的角动量,这降低了它们通过坍缩产生伽玛暴的可能性.

观测到伽玛暴与超新星成协^[90] 证实了坍缩星模型的预言^[16]: 相对论喷流突破大质量恒星的包层产生伽玛暴,与此同时,抛出大量物质,产生超新星^[14]. 无论是典型的中微子驱动或喷流驱动的超新星,由于炙热的抛射物向外膨胀时的光球演化,都可以在爆炸后 10~30 d 出现光学波段的峰值. 通常认为,多数长暴都应该伴随着超新星爆发. 由于长暴的发生率至少要比 Ibc 超新星低两个量级^[91-92],要求的自转率甚至比最快的脉冲星还要高一个量级,因此自转可能是一颗恒星最终产生伽玛暴的关键因素.

此外,伽玛暴倾向于出现在低 Z 值的宿主星系中. 若伽玛暴的前身星为低 Z 值恒星,其在爆炸之前的演化过程中,星风损失较小,有利于保留足够的角动量产生伽玛暴,但依然需要一种机制剥去恒星的外包层. 为了解决这一问题,快速自转的单星的准化学均匀恒星模型^[41-42] 被提出来. 快速自转使恒星内部不同包层之间的物质充分混合,从而让氢氦包层充分燃烧;同时,也让恒星在演化过程中避免进入巨星阶段. 大质量恒星的核质量增加,更有利于直接坍缩成黑洞,形成黑洞吸积盘系统.

^{56}Ni 也可能在吸积盘外流中产生^[93-95]. 对于坍缩星中心黑洞吸积盘系统,内流与伽玛暴喷流光度密切相关,外流为光学余辉中观测到的超新星鼓包做贡献,内流与外流的分配可能会导致伽玛暴光度与超新星光度的竞争. 较大的吸积盘外流率会导致 ^{56}Ni 的质量增大,伽玛暴的喷流光度变低. 本课题组分析了 15 个与超新星成协的伽玛暴光度、持续时间、 ^{56}Ni 质量等特征,并结合不同质量、 Z 值的前身星模型,限制了它们的前身星特征^[96]. 结果表明,大多数与超新星成协的伽玛暴样本可以通过大质量 ($> 34 M_{\odot}$)、太阳金属丰度或低金属丰度 ($Z \lesssim 10^{-2} Z_{\odot}$) 的前身星来解释.

3.2 不同中心引擎对前身星角动量的要求

并非所有的大质量恒星死亡都伴随伽玛暴,它必须拥有可产生极端相对论喷流的中心引擎. 当黑洞作为伽玛暴的中心引擎时,前身星的物质要有足够的角动量才可在黑洞周围形成吸积盘. 该黑洞吸积盘系统通过连接黑洞视界处的大尺度磁场提取黑洞的旋转

能(Blandford-Znajek 机制^[97-98]),或吸积盘上的中微子-反中微子湮灭过程^[99-102]产生伽玛暴喷流.当伽玛暴的中心引擎为快速自转(周期约为 1 ms)、高度磁化(表面磁场约为 10^{15} G)(1 T=104 G)的磁陀星时,前身星也需满足创造磁陀星的条件^[103-105].无论哪种中心引擎,前身星的自转速度都是产生伽玛暴的关键因素^[77,106-107].

如果在克尔黑洞周围形成离心力支持的吸积盘,最内稳定轨道半径 r_{ms} 处的特殊角动量 L_{ms} (即单位质量的角动量)至少为^[108-109]:

$$L_{\text{ms}} = 2(3\sqrt{R_{\text{ms}}} - 2a_*)GM_{\text{BH}}/(\sqrt{3}R_{\text{ms}}c),$$

其中 M_{BH} , a_* 分别为黑洞的质量和无量纲的自旋.以施瓦西半径 r_g 为单位的最内稳定轨道半径 $R_{\text{ms}} = r_{\text{ms}}r_g^{-1} = 3 + Z_2 - [(3 - Z_1)(3 + Z_1 + 2Z_2)]^{1/2}$, 其中 $Z_1 = 1 + (1 - a_*^2)^{1/2}[(1 + a_*)^{2/3} + (1 - a_*)^{1/3}]$, $Z_2 \equiv (3a_*^2 + Z_1^2)^{1/2}$, $0 \leq a_* \leq 1$. 对于极端克尔黑洞($a_* = 1$), 对应 $L_{\text{ms}} = 2GM_{\text{BH}}/(\sqrt{3}c) \sim 1.5 \times 10^{16} M_{\text{BH}}/(3M_{\odot})$; 对于 Schwarzschild 黑洞($a_* = 0$), $L_{\text{ms}} = 2\sqrt{3}GM_{\text{BH}}/c \sim 4.5 \times 10^{16} M_{\text{BH}}/(3M_{\odot})$.

新生成的毫秒磁陀星(半径 R_{NS} 约 10 km, 周期 P 约为 1 ms), 特殊角动量 $j \sim 2\pi R_{\text{NS}}^2 P^{-1} \approx 6 \times 10^{15} \text{ cm}^2/\text{s}$.

由此可见,黑洞超吸积作为伽玛暴的中心引擎,相较于磁陀星,对坍缩之前的恒星的角动量要求更高.值得注意的是,恒星的最内区(约 $3 M_{\odot}$)的 j 太大($> 2 \times 10^{17} \text{ cm}^2/\text{s}$)时,也无法产生伽玛暴喷流.因为在离心力作用下,吸积盘在距中心几百千米以外的区域就开始形成,在这个区域,中微子损失并不重要.更严重的是,会造成吸积率显著降低.无论伽玛暴喷流是由中微子湮灭还是磁流体动力学过程驱动的,高吸积率都是必不可少的条件^[110].

如果恒星在演化的末期依然保留足够的角动量,将难于产生伽玛暴.在演化过程中,恒星风带走物质的同时,也会带走角动量.此外,恒星内部的一些角动量转移机制,如不同包层之间的磁力矩,也会将恒星核的角动量转移到外包层中.可见,自转速率可能是决定一颗大质量恒星死亡时是否会产生伽玛暴的主要因素.Obegaulinger 等^[111]通过相对论磁流体力学模拟研究了不同质量、 Z 值、自转速率和磁场的前身星爆炸物理,以此探索形成长暴中心引擎的条件.

4 总结与展望

本文综述了 CCSNe 和伽玛暴的前身星的研究现

状,介绍了不同类型超新星可能的爆炸机制、前身星特征,以及质量损失和自转等因素在大质量恒星演化过程中的作用,最后讨论了伽玛暴的前身星特征,及磁陀星或黑洞超吸积的中心引擎对前身星角动量的要求.过去几十年里,超新星和伽玛暴的观测和理论研究取得了令人瞩目的成就,但仍有一系列基本问题亟待解决.未来的理论研究和数值模拟,与多波段多信使观测结合,或许能够完全揭开超新星和伽玛暴前身星的神秘面纱.

参考文献:

- [1] HEGER A, FRYER C L, WOOSLEY S E, et al. How massive single stars end their life[J]. *ApJ*, 2003, 591: 288-300.
- [2] BAADE W, ZWICKY F. Remarks on super-novae and cosmic rays[J]. *Physical Review*, 1934, 46: 76-77.
- [3] WOOSLEY S E, WEAVER T A. The evolution and explosion of massive stars. II. Explosive hydrodynamics and nucleosynthesis[J]. *ApJS*, 1995, 101: 181.
- [4] WOOSLEY S E, HEGER A, WEAVER T A. The evolution and explosion of massive stars[J]. *Reviews of Modern Physics*, 2002, 74: 1015-1071.
- [5] FILIPPENKO A V. Optical spectra of supernovae[J]. *Annual Review of Astronomy and Astrophysics*, 1997, 35: 309-355.
- [6] GALAMA T J, VREESWIJK P M, VAN PARADIJS J, et al. An unusual supernova in the error box of the γ -ray burst of 25 April 1998[J]. *Nature*, 1998, 395: 670-672.
- [7] PATAT F, BARBON R, CAPPELLARO E, et al. Light curves of type II supernovae. II. The analysis [J]. *Astronomy and Astrophysics*, 1994, 282: 731-741.
- [8] HAMUY M. Observed and physical properties of core-collapse supernovae[J]. *ApJ*, 2003, 582: 905-914.
- [9] GASKELL C M. Type II-L supernovae-standard bombs [J]. *ApJ*, 1992, 389: L17-L20.
- [10] SCHLEGEL E M. A new subclass of type II supernovae? [J]. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 1990, 244: 269-271.
- [11] WOOSLEY S E, EASTMAN R G, WEAVER T A, et al. SN 1993j: a type IIb supernova[J]. *ApJ*, 1994, 429: 300-318.
- [12] MAOZ D, MANNUCCI F, NELEMANS G. Observational clues to the progenitors of type Ia supernovae [J]. *Annual Review of Astronomy and Astrophysics*, 2014, 52: 107-170.
- [13] JANKA H T, LANGANKE K, MAREK A, et al. Theory of core-collapse supernovae[J]. *Physics Reports*, 2007, 442:

- 38-74.
- [14] MACFADYEN A I, WOOSLEY S E. Collapsars: Gamma-ray bursts and explosions in "failed supernovae" [J]. *ApJ*, 1999, 524: 262-289.
- [15] PIRAN T. The physics of gamma-ray bursts [J]. *Reviews of Modern Physics*, 2004, 76: 1143-1210.
- [16] WOOSLEY S E, BLOOM J S. The supernova-gamma-ray burst connection [J]. *Annual Review of Astronomy and Astrophysics*, 2006, 44: 507-556.
- [17] STANEK K Z, MATHESON T, GARNAVICH P M, et al. Spectroscopic discovery of the supernova 2003dh associated with GRB 030329 [J]. *ApJ*, 2003, 591: L17-L20.
- [18] JANKA H T. Explosion mechanisms of core-collapse supernovae [J]. *Annual Review of Nuclear and Particle Science*, 2012, 62: 407-451.
- [19] BETHE H A. Supernova mechanisms [J]. *Reviews of Modern Physics*, 1990, 62: 801-866.
- [20] WOOSLEY S E, WEAVER T A. The physics of supernova explosions [J]. *Annual Review of Astronomy and Astrophysics*, 1986, 24: 205-253.
- [21] HOYLE F, FOWLER W A. Nucleosynthesis in supernovae [J]. *ApJ*, 1960, 132: 565-590.
- [22] HILLEBRANDT W, NIEMEYER J C. Type Ia supernova explosion models [J]. *Annual Review of Astronomy and Astrophysics*, 2000, 38: 191-230.
- [23] LIVIO M, MAZZALI P. On the progenitors of type Ia supernovae [J]. *Physics Reports*, 2018, 736: 1-23.
- [24] WHELAN J, IBEN I, Jr. Binaries and supernovae of type I [J]. *ApJ*, 1973, 186: 1007-1014.
- [25] NOMOTO K. Accreting white dwarf models for type I supernovae. I-presupernova evolution and triggering mechanisms [J]. *ApJ*, 1982, 253: 798-810.
- [26] HACHISU I, KATO M, NOMOTO K. A new model for progenitor systems of type Ia supernovae [J]. *ApJ*, 1996, 470: L97-L100.
- [27] HAN Z, PODSIADLOWSKI P. The single-degenerate channel for the progenitors of type Ia supernovae [J]. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 2004, 350: 1301-1309.
- [28] WEBBINK R F. Double white dwarfs as progenitors of r coronae borealis stars and type I supernovae [J]. *ApJ*, 1984, 277: 355.
- [29] IBEN I, Jr, TUTUKOV A V. Supernovae of type I as end products of the evolution of binaries with components of moderate initial mass [J]. *ApJS*, 1984, 54: 335-372.
- [30] JHA S W, MAGUIRE K, SULLIVAN M. Observational properties of thermonuclear supernovae [J]. *Nature Astronomy*, 2019, 3(8): 706-716.
- [31] SMARTT S J. Progenitors of core-collapse supernovae [J]. *Annual Review of Astronomy and Astrophysics*, 2009, 47: 63-106.
- [32] BETHE H A, WILSON J R. Revival of a stalled supernova shock by neutrino heating [J]. *ApJ*, 1985, 295: 14-23.
- [33] BISNOVATYI-KOGAN G S, POPOV I P, SAMOKHIN A A. The magnetohydrodynamic rotational model of supernova explosion [J]. *Astrophysics and Space Science*, 1976, 41: 287-320.
- [34] MEIER D L, EPSTEIN R I, ARNETT W D, et al. Magnetohydrodynamic phenomena in collapsing stellar cores [J]. *ApJ*, 1976, 204: 869-878.
- [35] HEGER A, WOOSLEY S E. The nucleosynthetic signature of population III [J]. *ApJ*, 2002, 567: 532-543.
- [36] WOOSLEY S E, BLINNIKOV S, HEGER A. Pulsational pair instability as an explanation for the most luminous supernovae [J]. *Nature*, 2007, 450: 390-392.
- [37] WOOSLEY S E. Pulsational pair-instability supernovae [J]. *The Astrophysical Journal*, 2017, 836: 244.
- [38] GAL-YAM A, MAZZALI P, OFEK E O, et al. Supernova 2007bi as a pair-instability explosion [J]. *Nature*, 2009, 462(7273): 624-627.
- [39] SMITH N, LI W, FOLEY R J, et al. SN 2006gy: discovery of the most luminous supernova ever recorded, powered by the death of an extremely massive star like eta carinae [J]. *ApJ*, 2007, 666(2): 1116-1128.
- [40] WOOSLEY S E, LANGER N, WEAVER T A. The evolution of massive stars including mass-loss-presupernova models and explosion [J]. *ApJ*, 1993, 411(2): 823-839.
- [41] YOON S C, LANGER N. Evolution of rapidly rotating metal-poor massive stars towards gamma-ray bursts [J]. *Astronomy & Astrophysics*, 2005, 443(2): 643-648.
- [42] WOOSLEY S E, HEGER A. The progenitor stars of gamma-ray bursts [J]. *ApJ*, 2006, 637(2): 914-921.
- [43] PODSIADLOWSKI P, JOSS P C, HSU J J L. Presupernova evolution in massive interacting binaries [J]. *ApJ*, 1992, 391: 246.
- [44] YOON S C, DESSART L, CLOCCHIATTI A. Type Ib and IIb supernova progenitors in interacting binary systems [J]. *ApJ*, 2017, 840: 10-23.
- [45] YOON S C, WOOSLEY S E, LANGER N. Type Ib/c supernovae in binary systems. I. Evolution and properties of the progenitor stars [J]. *ApJ*, 2010, 725: 940-954.
- [46] SMITH N. Mass loss: its effect on the evolution and fate

- of high-mass stars[J]. *Annual Review of Astronomy and Astrophysics*, 2014, 52: 487-528.
- [47] LYMAN J D, BERSIER D, JAMES P A, et al. Bolometric light curves and explosion parameters of 38 stripped-envelope core-collapse supernovae[J]. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 2016, 457: 328-350.
- [48] PRENTICE S J, ASHALL C, JAMES P A, et al. Investigating the properties of stripped-envelope supernovae; what are the implications for their progenitors? [J]. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 2019, 485: 1559-1578.
- [49] DROUT M R, MILISAVLJEVIC D, PARRENT J, et al. The double-peaked SN 2013ge; a type Ib/c sn with an asymmetric mass ejection or an extended progenitor envelope[J]. *ApJ*, 2016, 821: 57-80.
- [50] WELLONS S, SODERBERG A M, CHEVALIER R A. Radio observations reveal unusual circumstellar environments for some type Ibc supernova progenitors [J]. *ApJ*, 2012, 752: 17-39.
- [51] ARNETT W D. Type I supernovae. I-analytic solutions for the early part of the light curve[J]. *ApJ*, 1982, 253: 785.
- [52] PEJCHA O, THOMPSON T A. The landscape of the neutrino mechanism of core-collapse supernovae; neutron star and black hole mass functions, explosion energies, and nickel yields[J]. *ApJ*, 2015, 801: 90-118.
- [53] THIELEMANN F K, NOMOTO K I, HASHIMOTO M A. Core-collapse supernovae and their ejecta[J]. *ApJ*, 1996, 460: 408-436.
- [54] UGLIANO M, JANKA H T, MAREK A, et al. Progenitor-explosion connection and remnant birth masses for neutrino-driven supernovae of iron-core progenitors[J]. *ApJ*, 2012, 757: 69-78.
- [55] ANDERSON J P. A meta-analysis of core-collapse supernova ^{56}Ni masses [J]. *Astronomy and Astrophysics*, 2019, 628: A7.
- [56] CANO Z. A new method for estimating the bolometric properties of Ibc supernovae[J]. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 2013, 434: 1098-1116.
- [57] CANO Z. The nature of gamma ray burst supernovae [J]. *Physics*, 2012, 740(1): 1441-1458.
- [58] ALDERING G, HUMPHREYS R M, RICHMOND M. SN 1993j; the optical properties of its progenitor[J]. *The Astronomical Journal*, 1994, 107: 662-672.
- [59] MAUND J R, SMARTT S J, KUDRITZKI R P, et al. The massive binary companion star to the progenitor of supernova 1993j[J]. *Nature*, 2004, 427: 129-131.
- [60] MAUND J R, FRASER M, ERGON M, et al. The yellow supergiant progenitor of the type II supernova 2011dh in M51[J]. *ApJ*, 2011, 739: L37-L41.
- [61] CHEVALIER R A, SODERBERG A M. Type IIb supernovae with compact and extended progenitors[J]. *ApJ*, 2010, 711: L40-L43.
- [62] ARCAVI I, GAL-YAM A, YARON O, et al. SN 2011dh: discovery of a type IIb supernova from a compact progenitor in the nearby galaxy M51[J]. *ApJ*, 2011, 742: L18-L24.
- [63] ARCAVI I, HOSSEINZADEH G, BROWN P J, et al. Constraints on the progenitor of SN 2016gkg from its shock-cooling light curve[J]. *ApJ*, 2017, 837: L2-L7.
- [64] TARTAGLIA L, FRASER M, SAND D J, et al. The progenitor and early evolution of the type IIb SN 2016gkg[J]. *ApJ*, 2017, 836: L12-L18.
- [65] SMARTT S J, ELDRIDGE J J, CROCKETT R M, et al. The death of massive stars- I. Observational constraints on the progenitors of type II-p supernovae[J]. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 2009, 395: 1409-1437.
- [66] DAVIES B, BEASOR E R. The initial masses of the red supergiant progenitors to type II supernovae [J]. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 2018, 474: 2116-2128.
- [67] VAN DYK S D, ZHENG W, BRINK T G, et al. SN 2017ein and the possible first identification of a type Ic supernova progenitor[J]. *ApJ*, 2018, 860: 90-107.
- [68] CAO Y, KASLIWAL M M, ARCAVI I, et al. Discovery, progenitor and early evolution of a stripped envelope supernova iptf13bvn[J]. *ApJ*, 2013, 775: L7-L13.
- [69] FREMLING C, SOLLERMAN J, TADDIA F, et al. Ptf12os and iptf13bvn. Two stripped-envelope supernovae from low-mass progenitors in ngc 5806[J]. *Astronomy and Astrophysics*, 2016, 593: A68.
- [70] BERSTEN M C, BENVENUTO O G, FOLATELLI G, et al. Iptf13bvn: the first evidence of a binary progenitor for a type Ib supernova[J]. *ApJ*, 2014, 148: 68-73.
- [71] FOX O D, AZALEE B K, VAN DYK S D, et al. Uncovering the putative B-star binary companion of the SN 1993j progenitor[J]. *ApJ*, 2014, 790: 17-29.
- [72] VAN DYK S D, LI W, CENKO S B, et al. The progenitor of supernova 2011dh/ptf11eon in Messier 51 [J]. *ApJ*, 2011, 741: L28-L32.
- [73] NUGIS T, LAMERS H J G L M. Mass-loss rates of wolf-rayet stars as a function of stellar parameters[J]. *Astronomy and Astrophysics*, 2000, 360: 227-244.
- [74] VINK J S, DE KOTER A. On the metallicity dependence of wolf-rayet winds[J]. *Astronomy and Astrophysics*,

- 2005,442:587-596.
- [75] VINK J S, DE KOTER A, LAMERS H J G L M. Mass-loss predictions for O and B stars as a function of metallicity[J]. *Astronomy and Astrophysics*, 2001, 369: 574-588.
- [76] MOKIEM M R, DE KOTER A, VINK J S, et al. The empirical metallicity dependence of the mass-loss rate of O- and early B-type stars[J]. *Astronomy and Astrophysics*, 2007, 473: 603-614.
- [77] MEYNET G, MAEDER A. Stellar evolution with rotation. V. Changes in all the outputs of massive star models [J]. *Astronomy and Astrophysics*, 2000, 361: 101-120.
- [78] EKSTRÖM S, GEORGY C, EGGENBERGER P, et al. Grids of stellar models with rotation. I. Models from 0.8 to 120 $M_{\odot}$ at solar metallicity ($Z = 0.014$) [J]. *Astronomy and Astrophysics*, 2012, 537: A146-A163.
- [79] HEGER A, LANGER N. Presupernova evolution of rotating massive stars. II. Evolution of the surface properties[J]. *ApJ*, 2000, 544: 1016-1035.
- [80] MEYNET G, MAEDER A. Stellar evolution with rotation. VIII. Models at $Z = 10^{-5} Z_{\odot}$ and CNO yields for early galactic evolution[J]. *Astronomy and Astrophysics*, 2002, 390: 561.
- [81] MAEDER A. Physics, formation and evolution of rotating stars[M]. Berlin: Springer, 2009.
- [82] AKIYAMA S, WHEELER J C, MEIER D L, et al. The magnetorotational instability in core-collapse supernova explosions[J]. *ApJ*, 2003, 584: 954-970.
- [83] OBERGAULINGER M, ALOY M A, MÜLLER E. Axisymmetric simulations of magneto-rotational core collapse: dynamics and gravitational wave signal [J]. *Astronomy and Astrophysics*, 2006, 450: 1107-1134.
- [84] GREINER J, MAZZALI P A, KANN D A, et al. A very luminous magnetar-powered supernova associated with an ultra-long γ -ray burst[J]. *Nature*, 2015, 523: 189-192.
- [85] GEORGY C, EKSTRÖM S, EGGENBERGER P, et al. Grids of stellar models with rotation. III. Models from 0.8 to 120 $M_{\odot}$ at a metallicity $Z = 0.002$ [J]. *Astronomy and Astrophysics*, 2013, 558: A103-A119.
- [86] GROH J H, EKSTRÖM S, GEORGY C, et al. Grids of stellar models with rotation. IV. Models from 1.7 to 120 $M_{\odot}$ at a metallicity $Z = 0.0004$ [J]. *Astronomy and Astrophysics*, 2019, 627: A24-A42.
- [87] WOOSLEY S E. Gamma-ray bursts from stellar mass accretion disks around black holes[J]. *ApJ*, 1993, 405: 273.
- [88] CANTIELLO M, YOON S C, LANGER N, et al. Binary star progenitors of long gamma-ray bursts [J]. *Astronomy and Astrophysics*, 2007, 465: L29.
- [89] FRYER C L, HEGER A. Binary merger progenitors for gamma-ray bursts and hypernovae[J]. *ApJ*, 2005, 623: 302-313.
- [90] HJORTH J, SOLLERMAN J, MØLLER P, et al. A very energetic supernova associated with the γ -ray burst of 29 March 2003[J]. *Nature*, 2003, 423: 847-850.
- [91] GEORGY C, MEYNET G, WALDER R, et al. The different progenitors of type Ib, Ic SNe, and of GRBs [J]. *Astronomy and Astrophysics*, 2009, 502: 611-622.
- [92] BISSALDI E, CALURA F, MATTEUCCI F, et al. The connection between gamma-ray bursts and supernovae Ib/c[J]. *Astronomy and Astrophysics*, 2007, 471: 585-597.
- [93] CHAKRABARTI S K, JIN L, ARNETT W D. Nucleosynthesis inside thick accretion disks around a black hole. I. Thermodynamic conditions and preliminary analysis[J]. *ApJ*, 1987, 313: 674.
- [94] SURMAN R, MCLAUGHLIN G C, RUFFERT M, et al. R-process nucleosynthesis in hot accretion disk flows from black hole-neutron star mergers[J]. *ApJ*, 2008, 679: L117-L120.
- [95] METZGER B D, FERNÁNDEZ R. Red or blue? A potential kilonova imprint of the delay until black hole formation following a neutron star merger[J]. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 2014, 441: 3444.
- [96] SONG C Y, LIU T. Black hole hyperaccretion inflow-outflow model. II. Long-duration gamma-ray bursts and supernova ^{56}Ni bumps[J]. *ApJ*, 2019, 871: 117-123.
- [97] LEE H K, WIJERS R A M J, BROWN G E. The Blandford-Znajek process as a central engine for a gamma-ray burst[J]. *Physics Reports*, 2000, 325: 83.
- [98] BLANDFORD R D, ZNAJEK R L. Electromagnetic extraction of energy from Kerr black holes[J]. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 1977, 179: 433.
- [99] NARAYAN R, IGUMENSHCHEV I V, ABRAMOWICZ M A. Self-similar accretion flows with convection[J]. *ApJ*, 2000, 539: 798.
- [100] LIU T, GU W M, ZHANG B. Neutrino-dominated accretion flows as the central engine of gamma-ray bursts[J]. *New Astronomy Reviews*, 2017, 79: 1.
- [101] POPHAM R, WOOSLEY S E, FRYER C. Hyperaccreting black holes and gamma-ray bursts[J]. *ApJ*, 1999, 518: 356.
- [102] DI MATTEO T, PERNA R, NARAYAN R. Neutrino trapping and accretion models for gamma-ray bursts

- [J]. *ApJ*, 2002, 579: 706.
- [103] USOV V V. Millisecond pulsars with extremely strong magnetic fields as a cosmological source of γ -ray bursts [J]. *Nature*, 1992, 357: 472.
- [104] ZHANG B, MÉSZÁROS P. Gamma-ray burst afterglow with continuous energy injection: signature of a highly magnetized millisecond pulsar [J]. *ApJ*, 2001, 552: L35.
- [105] METZGER B D, GIANNIOS D, THOMPSON T A, et al. The protomagnetar model for gamma-ray bursts [J]. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 2011, 413: 2031.
- [106] MAEDER A, MEYNET G. Rotating massive stars: from first stars to gamma ray bursts [J]. *Reviews of Modern Physics*, 2012, 84: 25.
- [107] YOON S C, LANGER N. Evolution of rapidly rotating metal-poor massive stars towards gamma-ray bursts [J]. *Astronomy and Astrophysics*, 2005, 443: 643.
- [108] BARDEEN J M. Kerr metric black holes [J]. *Nature*, 1970, 226: 64-65.
- [109] BARDEEN J M, PRESS W H, TEUKOLSKY S A. Rotating black holes: locally nonrotating frames, energy extraction, and scalar synchrotron radiation [J]. *ApJ*, 1972, 178: 347-370.
- [110] KUMAR P, ZHANG B. The physics of gamma-ray bursts & relativistic jets [J]. *Physics Reports*, 2015, 561: 1.
- [111] OBERGAULINGER M, ALOY M Á. Magnetorotational core collapse of possible GRB progenitors. III. Three-dimensional models [J]. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 2020, 503(4): 4942-4963.

A brief review on progenitors of core-collapse supernovae

SONG Cuiying^{1,2}, LIU Tong^{1*}

(1. College of Physical Science and Technology, Xiamen University, Xiamen 361005, China;

2. Tsung-Dao Lee Institute, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China)

Abstract: The death of massive stars ($>8 M_{\odot}$, $M_{\odot}$ is the mass of the sun) is accompanied by violent phenomena such as supernovae and gamma-ray bursts. In astrophysical research, supernova progenitors of different types have been emphatically studied. In this paper, we review the current status of observations and theoretical models on the progenitors of core-collapse supernovae and introduce effects of mass loss and rotation on stellar evolution.

Keywords: massive stars; stellar evolution; supernovae; gamma-ray burst

南强青年学者简介:

刘彤(1980—),理学博士,教授,博士生导师,国家优秀青年科学基金获得者,福建省高校新世纪优秀人才计划入选者,厦门大学南强青年拔尖人才(A类)入选者。曾获得卢嘉锡优秀导师奖(2019年)和美国天文学会和英国物理学会出版社联合授予的“高引作者奖(中国)”(2019年)。

致力于黑洞吸积与喷流,伽玛射线暴、快速射电暴、核心坍缩超新星等爆发天体,黑洞物理,引力波及其电磁对应体,天体核合成,高能辐射机制等方面的理论研究,在 *ApJ*、*ApJL*、*ApJS*、*MNRAS*、*A&A*、*PR* 系列等国际主流天文和物理期刊发表论文近 80 篇。获邀以个人工作为主体,为天文学权威综述期刊之一 *New Astronomy Reviews* 撰写关于中微子主导吸积流模型的综述,位列该杂志官方统计 2017 年以来高引排名首位。

