

On the detection of shock breakouts of core-collapse supernovae with the Einstein Probe satellite

邓劲松 and 王祥玉

Citation: *中国科学: 物理学 力学 天文学* **48**, 039506 (2018); doi: 10.1360/SSPMA2017-00250

View online: <http://engine.scichina.com/doi/10.1360/SSPMA2017-00250>

View Table of Contents: <http://engine.scichina.com/publisher/scp/journal/SSPMA/48/3>

Published by the *《中国科学》杂志社*

Articles you may be interested in

[PeV neutrinos from wind breakouts of type II supernovae](#)

SCIENCE CHINA Physics, Mechanics & Astronomy **62**, 959511 (2019);

[Detecting magnetars with Einstein Probe](#)

SCIENTIA SINICA Physica, Mechanica & Astronomica **48**, 039510 (2018);

[Einstein Probe: Application on the observation of cataclysmic variables](#)

SCIENTIA SINICA Physica, Mechanica & Astronomica **48**, 039511 (2018);

[Probing dark matter signals with Einstein Probe](#)

SCIENTIA SINICA Physica, Mechanica & Astronomica **48**, 039512 (2018);

[Experimental detection of the inner core translational triplet](#)

Chinese Science Bulletin **55**, 276 (2010);



爱因斯坦探针卫星的核塌缩超新星激波暴探测

邓劲松^{1,2*}, 王祥玉³

1. 中国科学院国家天文台空间科学与技术重点实验室, 北京 100012;

2. 中国科学院大学天文与空间科学学院, 北京 100049;

3. 南京大学天文与空间科学学院, 南京 210093

* 联系人, E-mail: jsdeng@nao.cas.cn

收稿日期: 2017-09-15; 接受日期: 2017-10-12; 网络出版日期: 2018-01-12

中国科学院战略性先导科技专项(编号: XDA15052100)资助

摘要 在核塌缩超新星爆发过程中, 当辐射主导的爆炸激波传播到前身星表面附近时, 高温辐射逃逸形成激波暴, 是超新星最早的电磁信号. 激波暴热辐射以紫外和软X射线光子为主, 持续时间短暂(~10–1000 s), 仅有几个疑似观测事例. 爱因斯坦探针卫星开展的大视场、高灵敏度的软X射线快速全天巡天, 预期每年将获得几十颗II-P型超新星的激波暴光变曲线, 对蓝超巨星爆发和Ib/Ic型超新星的激波暴合计也可能有一到数颗的年探测率, 有望用于限制前身星类型、爆前物质损失、超新星爆发机制等.

关键词 超新星, 激波, X射线源, X射线望远镜

PACS: 96.70.Bw, 47.40.Nm, 98.70.Qy, 95.55.Ka

1 核塌缩超新星爆发的基本图像

核塌缩超新星是大质量恒星演化到终点时的剧烈爆发现象, 观测上在光学波段表现为所在星系新出现一颗光度非常高的光变天体, 观测到的极大亮度往往可与整个星系相当, 后期光度缓慢衰减, 一般可持续观测几十天甚至一两年. 由于爆发事件的不可预测性, 现有观测少有发现尚处于光变极早期的超新星, 也基本无法确定其准确的爆发时间.

根据恒星演化理论, 主序阶段质量在约8–11 M_{\odot} (M_{\odot} 为太阳质量)和约25–30 M_{\odot} 之间的恒星, 随着内核区域

最后一个稳定核燃烧阶段的完成, 自身引力不再受到辐射压的平衡, 内核急剧塌缩, 因质量超过钱德拉塞卡极限而形成中子星, 而外部继续下落的物质将从难以压缩的中子星表面反弹, 特别是, 新生的高温中子星瞬间辐射出总能量约 10^{53} erg的中微子流, 其中约1%的能量被用来加热和加速下落物质, 最终使恒星解体, 除内核外的全部物质向外以高速抛出, 这就是核塌缩超新星爆发现象^[1].

在爆发后的极早期, 超新星整体光学厚, 可近似视为绝热膨胀, 少量能量以电磁辐射方式逃逸, 温度和光度快速衰减. 若前身星有大质量H包层, 当温度降低到

引用格式: 邓劲松, 王祥玉. 爱因斯坦探针卫星的核塌缩超新星激波暴探测. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2018, 48: 039506
Deng J S, Wang X Y. On the detection of shock breakouts of core-collapse supernovae with the Einstein Probe satellite (in Chinese). Sci Sin-Phys Mech Astron, 2018, 48: 039506, doi: [10.1360/SSPMA2017-00250](https://doi.org/10.1360/SSPMA2017-00250)

H离子与自由电子大量复合时,在持续膨胀的超新星中形成向内传播的H复合面,光球与之基本重合,其温度(约6000 K)和光度变化缓慢,光变曲线呈现平台期直至光球进入He包层,这是II-P型超新星.爆炸核合成还在超新星内区生成大量 ^{56}Ni ,放射性衰变 $^{56}\text{Ni}\rightarrow^{56}\text{Co}$ (半衰期约6.1 d)和 $^{56}\text{Co}\rightarrow^{56}\text{Fe}$ (半衰期约77.3 d)释放的 γ 射线也是驱动光变曲线的重要能源,随着高速膨胀下密度降低,能量转移到外区,导致Ib/Ic型超新星(前身星无H包层)早期光度再次上升,爆炸后约10–20 d到达峰值.而无论II-P型还是Ib/Ic型,放射性衰变能都主导着超新星晚期的光度衰减行为^[2].

核塌缩超新星爆发的基本物理图像虽然被广泛接受,但并未得到确证,仍面临大量待解难题.一方面,数值模拟一直未能在塌缩内核成功实现理论预言的中微子延缓爆炸机制,有可能源自核状态方程、中微子输运、数值流体力学等的复杂性,也可能意味着关键物理过程的缺失.另一方面,对大质量恒星晚期演化的理解也存在很多不确定因素,如关键核反应参数、高速自转和磁场、(特别是)星风损失和双星物质交换等.事实上,由于超新星的爆炸本质,星体在星际空间快速膨胀飞散,前身星的各种特征信息如半径和光度等被隐去,而爆炸产生的内部辐射和星体物质之间发生强烈耦合,当内部核区物理过程中产生的光子传播到星体表面时,经历了大量的辐射转移和光子转换过程,最初携带的一些与爆炸机制密切相关的信息已面目全非,难以从一般的光学观测数据中获取,而更直接的中微子观测、 γ 射线观测、前身星搜索等灵敏度还远不够^[3].

2 经典情形的超新星激波暴

在理论研究早期就已预言,超新星爆发最早能被观测到的电磁信号来自激波暴现象(Shock Breakout)^[4–6],或称为激波突围,仅稍晚于中微子暴.

首先,核塌缩超新星的星体爆炸是通过激波从内向外传播并加热加速恒星物质而得以实现的.对声速 $s = \sqrt{\gamma P / \rho} \sim \sqrt{\gamma GM_* / R_*}$ 和膨胀速度 $v \sim \sqrt{E / M_*}$ 作量级上的比较,不妨取绝热指数 $\gamma \sim \frac{3}{4}$ 、爆发能量 $E \sim 10^{51}$ erg、II-P型超新星的前身星质量 $M_* \sim 10 M_\odot$ 和半径 $R_* \sim 500 R_\odot$ (R_\odot 为太阳半径)等典型值,估算得到 $v/s \sim 30 \gg 1$,激波的形成不可避免.

核塌缩超新星的爆炸激波是辐射主导的激波(Radiation-dominated Shock),激波之后是高温的辐射场和气体,即为一“火球”.考察球对称的情形,当激波在前身星内传播到半径 R 处时,激波后温度 $T \sim [3E / (a \cdot 4\pi R^3)]^{1/4} \sim 10^8 \text{ K} \cdot E_{51}^{1/4} (R_\odot / R)^{3/4}$ (E_{51} 是以 10^{51} erg为单位的爆发能量):塌缩内核除外的最内区如 $R \sim R_\odot$ 处 $T \sim 10^8 \text{ K}$,而传播到前身星表面如 $R \sim 500 R_\odot$ 仍高达 $T \sim 10^5 \sim 10^6 \text{ K}$.同样,估算出辐射压与气体压之比 $\sim 10 (E_{51} R / R_\odot)^{3/4} M_\odot / M \gg 1$,即气体压相比于辐射压可忽略.

当激波仍在前身星内部传播时,激波后的高温辐射禁锢在光学厚的星体中,观测到的星体亮度应无变化.而随着激波传播到前身星表面附近(传播时标 $\sim 10^5 \text{ s} (R_* / 500 R_\odot) / \sqrt{E_{51} \cdot 10 M_\odot / M_*}$),因激波前的光深迅速减小,高温辐射向外逃逸,造成星体短时间增亮多个数量级,即可观测到激波暴.

辐射主导的激波并非严格的不连续面,在高温的激波后和低温的激波前之间存在过渡的“激波区”,厚度 Δ 满足扩散近似 $\Delta / v \sim \Delta^2 / (\lambda \cdot c / 3)$,即 $\Delta \sim \lambda \cdot c / 3v$ (式中 $\lambda = 1 / \rho \kappa$ 为平均自由程),对应的激波区光深 $\tau_\Delta = \Delta / \lambda \sim c / 3v$.恒星外层大气密度约以半径的幂律陡降,导致超新星激波在传播中加速,到达表面附近时 $v = 5000 \sim 10000 \text{ km/s}$,此时激波区光深 $\tau_\Delta \sim 10 \sim 20$,覆盖质量 $\Delta M \sim 4\pi R_*^2 \Delta \cdot \rho \sim 4\pi R \tau_\Delta / \kappa$,H包层的不透明度 κ 取自由电子散射值 $\sim 0.4 \text{ cm}^2/\text{g}$,若 $R_* \sim 500 R_\odot$ 则 $\Delta M \sim 10^{-4} M_\odot$,而对于超新星SN 1987A(前身星半径 $R_* \sim 30 \sim 50 R_\odot$)有 $\Delta M \sim 10^{-6} M_\odot$.

当激波前的前身星物质与激波区覆盖质量 ΔM 相当,或者说激波前光深 τ 开始小于激波区自身光深 $\tau_\Delta \sim 10 \sim 20$ 时,激波区的辐射“热舌”前端从前身星的“光球”($\tau \sim 1$)表面逃逸,激波暴发生,不过此时激波主体仍在光球面之下.而当激波主体传播到光球面附近时,激波暴辐射达到峰值,光度上升的时标可用扩散时标近似.峰值过后,超新星随即进入绝热膨胀冷却的光度下降期.

以上只是简单物理图像,激波暴过程中激波动力学与激波结构的演变、辐射与激波内外物质的相互作用等都需要复杂的数值计算,具体计算结果与以上估算值不尽相同^[7–9].还可能在对经典情形的偏离,如非球对称的超新星爆发、激波突围达到相对论性速度、激波暴发生在厚星风中而非前身星表面等.

3 核塌缩超新星激波暴的观测特性

核塌缩超新星的激波暴对应温度很高, 辐射以紫外和软X射线为主. 根据激波暴的近似解析解^[10,11], 对前身星为红超巨星的II-P型超新星, 激波后温度 $T \sim 5 \times 10^5 \text{ K} \cdot E_{51}^{1/5} (R_* / 500 M_\odot)^{-1/2}$, 而当前身星为体积更小的蓝超巨星时(如SN 1987A), $T \sim 1 \times 10^6 \text{ K} \cdot E_{51}^{1/5} (R_* / 50 M_\odot)^{-1/2}$. 注意激波暴辐射虽然是热辐射, 但计入辐射转移过程后光谱向高能端偏移: 取稀化黑体谱近似, 数值模拟发现色温 T_c 可为有效温度 T 的2–3倍^[8,12,13].

激波暴辐射的特征时标短暂, 与前身星的半径 R_* 最为密切相关. 首先考虑扩散时标 t_d , 将近似解析解^[10,11]作进一步近似, 对应红超巨星爆发(II-P型超新星)和蓝超巨星爆发(如SN 1987A)的情形, 分别有 $t_d \sim 1 \times 10^3 \text{ s} \cdot E_{51}^{-3/4} (M_* / 10 M_\odot)^{1/4} (R_* / 500 R_\odot)^2$ 和

$$t_d \sim 60 \text{ s} \cdot E_{51}^{-3/4} (M_* / 15 M_\odot)^{1/4} (R_* / 50 R_\odot)^2.$$

需要注意的是, 由于激波暴信号从星体表面的不同位置传播到观测者存在时间延迟, 实际观测到的激波暴光变曲线将在亮度峰值附近持续一段时间 $t_c \sim R_* / c \sim 1 \times 10^3 \text{ s} (R_* / 500 R_\odot)$, 形成一平台. 而激波暴辐射的方向性可能带来临边昏暗效应, “峰值”平台上观测亮度或缓慢下降.

特征时标 $t_s \sim \sqrt{t_d^2 + t_c^2}$ 内, 激波暴辐射的紫外和X射线能量对红超巨星和蓝超巨星情形^[10,11]分别为 $E_s \sim 2 \times 10^{48} \text{ erg} \cdot E_{51}^{3/5} (M_* / 10 M_\odot)^{-2/5} (R_* / 500 R_\odot)^{7/4}$ 和 $E_s \sim 7 \times 10^{46} \text{ erg} \cdot E_{51}^{3/5} (M_* / 15 M_\odot)^{-2/5} (R_* / 50 R_\odot)^{7/4}$. 考虑II-P型超新星的典型参数($E_{51} \sim 1$, $M_* \sim 10 M_\odot$, $R_* \sim 500 R_\odot$), 可估算出激波暴的峰值光度约为 $L \sim 1 \times 10^{45} \text{ erg/s}$, 而蓝超巨星爆发如SN 1987A与之接近, 约 $L \sim 6 \times 10^{44} \text{ erg/s}$.

Ib/Ic型超新星同样会产生激波暴, 它们的沃尔夫-拉叶型前身星半径很小($< 10 R_\odot$), 若取参数 $E_{51} \sim 1$, $M_* \sim 4 M_\odot$ (已扣除塌缩所成的中子星), $R_* \sim 5 R_\odot$, 大致可估算出激波暴温度 $T \sim 4 \times 10^6 \text{ K}$ 、峰值持续时间 $\sim 10 \text{ s}$ 、峰值光度 $L \sim 10^{44} \text{ erg/s}$ 等.

4 激波暴的疑似探测事例

激波暴因持续时间短暂很难被观测到, 即使是观测最好的超新星SN 1987A, 其极早期数据也错失最初

的激波暴信号^[14]. 近十年来, 随着几个候选探测事例的出现, 激波暴研究重新获得重视.

低光度伽马暴GRB 060218与大爆发能量的Ic型超新星SN 2006aj成协^[15], 瞬态辐射中可解析出持续千秒的X射线热成分, 或可解释为准相对论性激波从前身星的超厚星风中突围形成的激波暴^[16]. Wang等人^[17]指出, 准相对论性激波暴中部分热光子可被反复散射回激波区并提升能量(体康普顿化过程), 所产生非热的伽马射线和X射线是低光度伽马暴的可能机制, 该假说已为更多理论研究支持^[18,19]. 事实上, 超新星激波暴最早即是作为预言伽马暴的理论模型提出的^[4]. GRB 060218激波暴模型的主要问题是, 所需沃尔夫-拉叶型前身星在临爆前的超厚星风尚待恒星晚期演化理论的合理解释.

当Swift卫星的窄视场X射线望远镜(XRT)在按计划观测一个星系时, 意外地发现了一个Ib型超新星(SN 2008D)的X射线瞬变源, 它被认为是迄今为止最可能的激波暴探测事例^[20]: 在0.3–10 keV波段探测到的辐射总能量约 $2 \times 10^{46} \text{ erg}$, 峰值光度约 $6 \times 10^{43} \text{ erg/s}$, 到峰值的上升时间约60 s, 光度下降的特征时标约130 s, 能谱可用 $kT_c \sim 0.7 \text{ keV}$ 的黑体谱或一段幂律谱拟合. 事件的峰值光度和能谱温度与Ib/Ic型超新星激波暴的理论预言值相当, 但持续时间过长(即使取较大的沃尔夫-拉叶型前身星半径如 $R_* \sim 9 R_\odot$ 理论预言也仅 $\sim 20 \text{ s}$), 为此同样需要引入厚星风假设, 虽然不如GRB 060218/SN 2006aj的情形那么极端^[21]. 竞争性的理论解释主要有极弱的伽马暴^[22,23], 而考虑到前述低光度伽马暴的激波暴假说^[17–19], 二者在某种程度上或是相通的.

在GALAX卫星的紫外巡天数据中搜索到两个星系(红移 $z \sim 0.2–0.3$)的紫外快速增亮, 与地面光学望远镜随后发现的II-P型超新星相关联, 可解释为时标约2000 s的经典激波暴^[24,25]. 还有两个上升时标长达1到数天的超新星对应GALAX事例, 或为II-P型和IIIn型超新星的厚星风激波暴^[26,27], Subaru望远镜发现的两个较高红移的光学暂现源也采用此解释^[28].

5 爱因斯坦探针卫星的激波暴探测意义

激波暴对于深入理解核塌缩超新星的爆发具有重要意义, 能够提供用其他观测数据难以确定的一些物理性质. 比如, 由于超新星的偶发性和爆发前后的

巨大亮度差, 前身星的直接探测十分困难^[29], 而激波暴过后的星体爆炸又将迅速抹去像半径等一些前身星重要信息. 而激波暴的持续时间、辐射温度和观测流量等都与前身星半径密切相关, 后者可用来直接限制前身星所对应的晚期大质量恒星类型, 在恒星演化模型和超新星爆发机制间建立具体联系. 前身星最外层大气及最紧邻星周环境的物质分布也对激波暴的物理过程、光谱和光变行为有重要影响, 通过激波暴观测数据的揭示, 可帮助理解质量损失这一大质量恒星晚期演化理论的主要不确定因素. 又如, 数值理论研究倾向于认为, 核塌缩超新星的爆发机制要得以成功实现, 很可能要求爆发具有显著的不对称性, 后者也将反映在激波暴的行为上^[30,31]. 而结合下一代中微子探测器, 用激波暴和中微子暴的时间差也能推算出前身星的半径和类型^[32]. 此外, 激波暴还有可能伴随甚高能伽马射线和高能宇宙中微子的辐射, 对它们的探测也将有利于限制前身星和星周环境的性质^[33-36].

超新星激波暴的候选探测事例很少, 难以对理论模型做出有效限制, 而且它们或存在竞争性解释(如SN 2008D), 或观测数据点过少(如GALEX探测), 尚无一例能公认是确信无疑的激波暴事件. 虽然软X射线是核塌缩超新星激波暴的主要辐射波段, 但一般X射线天文卫星受限于视场太小, 如早期的HEAO-1就未能如当时的预期^[12]探测到激波暴. 国际上也曾有过用宽视场的龙虾眼X射线望远镜开展高灵敏度全体巡天的空间项目提案, 激波暴是其主要探测对象之一^[11,37]. 而最近几年新提议的激波暴探测卫星方案ULTRASAT, 则是选择紫外这一激波暴的另一重要辐射波段^[38].

爱因斯坦探针卫星采用的龙虾眼X射线望远镜WXT拥有3600平方度超大视场, 1000 s积分探测灵敏度达到 10^{-11} – 10^{-12} erg cm⁻² s⁻¹(具体数值取决于目标能谱), 一天能数次覆盖全夜空, 非常有利于核塌缩超新星激波暴的探测, 有望系统性发现一批激波暴事件. WXT与灵敏度更高的快速后随观测望远镜FXT相结合, 能对激波暴期及紧随的早期绝热冷却期提供很好的光变曲线采样, 还能在一定程度上测量能谱及其演化, 将为激波暴的深入研究奠定坚实的观测基础. 激波暴是超新星最早的电磁信号, 爱因斯坦探针卫星一旦探测到激波暴, 将实时发布预警来触发其他的地面或空间天文设备, 有望在多波段实现超新星从极早期

开始的完整监测, 从而对核塌缩超新星的爆发模型、物理过程、前身星演化等做出全面限制.

6 爱因斯坦探针卫星的激波暴探测率

根据目前的设计, 爱因斯坦探针卫星计划采用对3600平方度单一天区凝视观测 Δ ~600 s再转向下一天区的巡天方案, 故3600平方度即为激波暴探测的有效瞬时视场. 暂不考虑可能由前身星厚星风导致的超长激波暴, 600 s凝视观测时间足以覆盖蓝超巨星爆发(如SN 1987A)和Ib/Ic型超新星的激波暴, 但比II-P型超新星的典型激波暴稍短.

将激波暴光变曲线近似为持续 t_s 的平台, 对于给定采样积分时间 δ ~600 s下的WXT探测灵敏度, 可推算出典型峰值光度对应的最大探测距离, 结合有效瞬时视场, 对应宇宙体积内的超新星爆发率即可视为爱因斯坦探针卫星的激波暴探测率. 严格计算需考虑激波暴的光度函数、光变曲线和能谱, 但光度函数目前无从计算, 光变曲线依赖于不同模型的物理假设和参数^[39,40], 简单估算予以忽略. 考虑恒星质量函数, 对任一类型超新星, 取低质量端的激波暴结果为典型参数. 能谱取稀化黑体谱近似, 色温 T_c 设为有效温度 T 的2.5倍, 再考虑星际吸收获得观测能谱. 有效探测能段内(~0.5–4 keV), WXT依据其响应函数对不同能谱的探测灵敏度有所不同.

为了能够获得对激波暴光变的有效探测, 采样积分时间 δ 最长可取为 t_s 或 Δ 的几分之一(以下估算均取1/3). 激波暴的起始发生时刻可能在 Δ 时间段内, 也可能在之前 t_s 时间内, 因此需对 δ 所对应的探测宇宙体积乘改正因子 α . 考虑到在1000 s以下, WXT探测灵敏度与积分时间近似成反比, 可简单算出 $\alpha = (\Delta + t_s - 1.2\delta) / (t_s + \Delta)$.

首先考虑II-P型超新星, 对应红超巨星爆发, 激波暴的典型持续时间 t_s ~1000 s, 典型能谱温度 kT_c ~0.1 keV, 典型峰值光度 L ~ 1×10^{45} erg/s中仅约8%落在0.5–4 keV能段. 取最大采样积分时间为200 s, 假设较弱星际吸收的情形 $N_H = 1 \times 10^{21}$ cm²(常用取值, 接近银河系中性氢柱密度分布的几何平均值 5×10^{20} cm²^[41], 并加上宿主星系同等假设值的贡献), 典型能谱下的WXT流量探测灵敏度~ 1.4×10^{-11} erg cm⁻² s⁻¹, 由此推算出最大探测距离~220 Mpc. 考虑到由近邻超新星巡天数据统计得出的II-P型超新星产率为~ 3.2×10^{-5} Mpc⁻³ a⁻¹^[41], 计入3600

表 1 不同类型核塌缩超新星的激波暴预计的爱因斯坦探针卫星年探测数

Table 1 Predicted detection numbers per year of the Einstein Probe satellite of shock breakouts for various core-collapse supernovae types

超新星类型	$N_H=10^{21} \text{ cm}^2$	$N_H=10^{21.7} \text{ cm}^2$
II-P	~100	~7-50
87A 型	≤ 4	≤ 0.7
Ib/Ic	≤ 0.03	
08D 型	≤ 1	≤ 0.6

平方度瞬时视场和改正因子 $\alpha \sim 0.85$, 估算出II-P超新星激波暴的有效探测率为~100颗/a.

星际吸收也可能更强, 若假设 $N_H=5 \times 10^{21} \text{ cm}^2$ (由超新星光学巡天的星际消光数据估算的中性氢柱密度范围的几何平均值^[41], 包括银河系和宿主星系的共同贡献), 由于II-P型超新星激波暴的温度较低, 占主导地位的低能X射线光子被吸收殆尽. 此时, $kT_c \sim 0.1 \text{ keV}$ 能谱的200 s积分WXT探测灵敏度 $\sim 8 \times 10^{-11} \text{ erg cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$, 最大探测距离~90 Mpc, 有效探测率降到~7颗/a.

WXT在0.1-0.5 keV能段也存在一定响应, 若将探测能段扩展到0.1-5 keV, 由于 $kT_c \sim 0.1 \text{ keV}$ 能谱很软, 总光度进入WXT能段的比例提升到30%, 而 $N_H=5 \times 10^{21} \text{ cm}^2$ 时探测灵敏度基本不变, 或可将该情形下II-P超新星激波暴的探测率提高到~50颗/a.

对于类似SN 1987A的蓝超巨星爆发, 激波暴的典型持续时间 $t_s \sim 60 \text{ s}$, 典型能谱温度 $kT_c \sim 0.2 \text{ keV}$, 典型峰值光度 $L \sim 6 \times 10^{44} \text{ erg/s}$ 中约25%落在0.5-4 keV能段. 取最大采样积分时间为20 s, 则 $\alpha \sim 1$. 若 $N_H=1 \times 10^{21} \text{ cm}^2$, 探测灵敏度 $\sim 1.2 \times 10^{-10} \text{ erg cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$, 最大探测距离~100 Mpc; 若 $N_H=5 \times 10^{21} \text{ cm}^2$, 流量探测灵敏度 $\sim 3.6 \times 10^{-10} \text{ erg cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$, 最大探测距离~60 Mpc. 蓝超巨星的爆发相对罕见, 可能不到核塌缩超新星总产率^[41]的3%^[29]即 $\sim 2 \times 10^{-6} \text{ Mpc}^{-3} \text{ a}^{-1}$, 故两种情形下探测率分别为~0.7颗/a和~0.15颗/a. 将探测能段扩展到0.1-5 keV对结果影响很小.

若单纯只考虑蓝超巨星爆发的激波暴能被探测到而不管采样质量, 不妨取60 s为最大积分时间60 s ($\alpha \sim 0.9$). 若 $N_H=1 \times 10^{21} \text{ cm}^2$, 最大探测距离~180 Mpc, 探测率提高到~4颗/a; 若 $N_H=5 \times 10^{21} \text{ cm}^2$, 最大探测距离~100 Mpc, 探测率~0.7颗/a.

再看Ib/Ic型超新星的激波暴, 对应沃尔夫-拉叶型星的爆发, 激波暴的典型持续时间很短 $t_s \sim 10 \text{ s}$, 典型能谱温度 $kT_c \sim 0.9 \text{ keV}$, 典型峰值光度较小 $L \sim 10^{44} \text{ erg/s}$,

其中约20%落在0.5-4 keV能段. 单纯只考虑探测到而不管采样质量, 取10 s为最大积分时间($\alpha \sim 1$), 即使是星际吸收较弱的情形 $N_H=1 \times 10^{21} \text{ cm}^2$, 探测灵敏度 $\sim 7.6 \times 10^{-10} \text{ erg cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$, 最大探测距离仅~15 Mpc. 计入Ib/Ic型超新星的产率 $\sim 2.6 \times 10^{-5} \text{ Mpc}^{-3} \text{ a}^{-1}$ ^[41], 激波暴探测率仅~0.03颗/a.

另一方面, 若假设Ib/Ic型超新星普遍存在邻近前身星的厚星风, 取SN 2008D的观测结果为激波暴的典型值, 即持续时间 $t_s \sim 100 \text{ s}$, 能谱温度 $kT_c \sim 0.7 \text{ keV}$, 峰值光度 $L \sim 6 \times 10^{43} \text{ erg/s}$, 其中约30%落在0.5-4 keV能段. 并且单纯只考虑探测到而不管采样质量, 取最大积分时间为100 s ($\alpha \sim 0.8$). 若 $N_H=1 \times 10^{21} \text{ cm}^2$, 探测灵敏度 $\sim 6 \times 10^{-11} \text{ erg cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$, 最大探测距离~50 Mpc, 探测率~1颗/a; 若 $N_H=5 \times 10^{21} \text{ cm}^2$, 流量探测灵敏度 $\sim 1 \times 10^{-10} \text{ erg cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$, 最大探测距离~40 Mpc, 探测率~0.6颗/a.

至于SN 2006aj/GRB 060218这样的极端非经典情形, 一方面它们很可能是以低光度伽马暴的形式被爱因斯坦探针卫星探测到, 另一方面, 此类事件在理论上同时需要很高爆发能量的Ib/Ic型超新星即极超新星(以产生准相对论性的膨胀速度)和超厚的前身星星风, 产率应当非常低, 本文不予讨论.

7 结论

爱因斯坦探针卫星预期每年能获得几十颗核塌缩超新星激波暴的光变曲线, 见表1, 主要为对应红超巨星爆发的II-P型超新星, 从而彻底改变该领域目前只有寥寥几个疑似观测事例的局面, 有望对已发展近50年的超新星激波理论做出期盼已久的直接观测限制, 将能直接确定核塌缩超新星的前身星类型, 在解决超新星爆发的物理机制之谜和理解大质量恒星晚期演化的质量损失难题方面做出重要贡献.

致谢 感谢中国科学院国家天文台赵冬华博士和刘柱博士提供WXT能谱响应函数.

参考文献

- 1 Woosley S E, Heger A, Weaver T A. The evolution and explosion of massive stars. *Rev Mod Phys*, 2002, 74: 1015–1071
- 2 Arnett D. *Supernova and Nucleosynthesis*. Princeton: Princeton University Press, 1996
- 3 Deng J S. Supernova explosions of massive stars (in Chinese). In: 10000 Selected Problems in Sciences: Astronomy. Beijing: Science Press, 2010. 311–314 [邓劲松. 大质量恒星的超新星爆发. 见: 10000个科学难题: 天文学卷. 北京: 科学出版社, 2010. 311–314]
- 4 Colgate S A. Prompt gamma rays and X rays from supernovae. *Can J Phys*, 1968, 46: S476–S480
- 5 Grassberg E K, Imshennik V S, Nadyozhin D K. On the theory of the light curves of supernovae. *Astrophys Space Sci*, 1971, 10: 28–51
- 6 Arnett W D. Supernova light curves and presupernova models. *Astrophys J*, 1971, 163: 11–16
- 7 Falk S W, Arnett W D. Radiation dynamics, envelope ejection, and supernova light curves. *Astrophys J Suppl Ser*, 1977, 33: 515–562
- 8 Ensmann L, Burrows A. Shock breakout in SN 1987A. *Astrophys J*, 1987, 393: 742–755
- 9 Tolstov A G, Blinnikov S I, Nadyozhin D K. Coupling of matter and radiation at supernova shock breakout. *Mon Not R Astron Soc*, 2013, 429: 3181–3199, arXiv: [1212.3662](https://arxiv.org/abs/1212.3662)
- 10 Matzner C D, McKee C F. The expulsion of stellar envelopes in core-collapse supernovae. *Astrophys J*, 1999, 510: 379–403
- 11 Calzavara A J, Matzner C D. Supernova properties from shock breakout X-rays. *Mon Not R Astron Soc*, 2004, 351: 694–706
- 12 Klein R I, Chevalier R A. X-ray bursts from Type II supernovae. *Astrophys J*, 1978, 223: L109–L112
- 13 Falk S W. Shock steepening and prompt thermal emission in supernovae. *Astrophys J*, 1978, 225: L133–L136
- 14 Blinnikov S, Lundqvist P, Bartunov O, et al. Radiation hydrodynamics of SN 1987A. I. Global analysis of the light curve for the first 4 months. *Astrophys J*, 2000, 532: 1132–1149
- 15 Mazzali P A, Deng J, Nomoto K, et al. A neutron-star-driven X-ray flash associated with supernova SN 2006aj. *Nature*, 2006, 442: 1018–1020
- 16 Campana S, Mangano V, Blustin A J, et al. The association of GRB 060218 with a supernova and the evolution of the shock wave. *Nature*, 2006, 442: 1008–1010
- 17 Wang X Y, Li Z, Waxman E, et al. Nonthermal gamma-ray/X-ray flashes from shock breakout in gamma-ray burst-associated supernovae. *Astrophys J*, 2007, 664: 1026–1032
- 18 Katz B, Budnik R, Waxman E. Fast radiation mediated shocks and supernova shock breakouts. *Astrophys J*, 2010, 716: 781–791, arXiv: [0902.4708](https://arxiv.org/abs/0902.4708)
- 19 Nakar E, Sari R. Relativistic shock breakouts—A variety of gamma-ray flares: From low-luminosity gamma-ray bursts to type Ia supernovae. *Astrophys J*, 2012, 747: 88, arXiv: [1106.2556](https://arxiv.org/abs/1106.2556)
- 20 Soderberg A M, Berger E, Page K L, et al. An extremely luminous X-ray outburst at the birth of a supernova. *Nature*, 2008, 453: 469–474, arXiv: [0802.1712](https://arxiv.org/abs/0802.1712)
- 21 Chevalier R A, Fransson C. Shock breakout emission from a Type Ib/c supernova: XRT 080109/SN 2008D. *Astrophys J*, 2008, 683: L135–L138, arXiv: [0806.0371](https://arxiv.org/abs/0806.0371)
- 22 Mazzali P A, Valenti S, Della V M, et al. The metamorphosis of supernova SN 2008D/XRF 080109: A link between supernovae and GRBs/hypernovae. *Science*, 2008, 321: 1185–1188, arXiv: [0807.1695](https://arxiv.org/abs/0807.1695)
- 23 Li L X. The X-ray transient 080109 in NGC 2770: An X-ray flash associated with a normal core-collapse supernova. *Mon Not R Astron Soc*, 2008, 388: 603–610, arXiv: [0803.0079](https://arxiv.org/abs/0803.0079)
- 24 Schawinski K, Justham S, Wolf C, et al. Supernova shock breakout from a red supergiant. *Science*, 2008, 321: 223–226, arXiv: [0803.3596](https://arxiv.org/abs/0803.3596)
- 25 Gezari S, Dessart L, Basa S, et al. Probing shock breakout with serendipitous *GALEX* detections of two SNLS Type II-P supernovae. *Astrophys J*, 2008, 683: L131–L134, arXiv: [0804.1123](https://arxiv.org/abs/0804.1123)
- 26 Ofek E O, Rabinak I, Neill J D, et al. Supernova PTF 09UJ: A possible shock breakout from a dense circumstellar wind. *Astrophys J*, 2010, 724: 1396–1401, arXiv: [1009.5378](https://arxiv.org/abs/1009.5378)
- 27 Gezari S, Jones D O, Sanders N E, et al. *GALEX* detection of shock breakout in type IIP supernova PS1-13arp: Implications for the progenitor star wind. *Astrophys J*, 2015, 804: 28, arXiv: [1502.06964](https://arxiv.org/abs/1502.06964)
- 28 Tanaka M, Tominaga N, Morokuma T, et al. Rapidly rising transients from the Subaru Hyper Suprime-Cam transient survey. *Astrophys J*, 2016, 819: 5, arXiv: [1601.03261](https://arxiv.org/abs/1601.03261)
- 29 Smartt S J. Progenitors of core-collapse supernovae. *Annu Rev Astron Astrophys*, 2009, 47: 63–106, arXiv: [0908.0700](https://arxiv.org/abs/0908.0700)
- 30 Suzuki A, Shigeyama T. Probing explosion geometry of core-collapse supernovae with light curves of the shock breakout. *Astrophys J*, 2010, 717: L154–L158, arXiv: [1006.1705](https://arxiv.org/abs/1006.1705)
- 31 Suzuki A, Maeda K, Shigeyama T. 2D radiation-hydrodynamic simulations of supernova shock breakout in bipolar explosions of a blue supergiant progenitor. *Astrophys J*, 2016, 825: 92, arXiv: [1605.08250](https://arxiv.org/abs/1605.08250)

- 32 Kistler M D, Haxton W C, Yüksel H. Tomography of massive stars from core collapse to supernova shock breakout. *Astrophys J*, 2013, 778: 81, arXiv: [1211.6770](#)
- 33 Waxman E, Loeb A. TeV neutrinos and GeV photons from shock breakout in supernovae. *Phys Rev Lett*, 2001, 87: 071101
- 34 Wang X Y, Mészáros P. GeV photons from the upscattering of supernova shock breakout X-rays by an outside gamma-ray burst jet. *Astrophys J*, 2006, 643: L95–L98
- 35 Kashiyama K, Murase K, Horiuchi S, et al. High-energy neutrino and gamma-ray transients from trans-relativistic supernova shock breakouts. *Astrophys J*, 2013, 769: L6, arXiv: [1210.8147](#)
- 36 Giacinti G, Bell A R. Collisionless shocks and TeV neutrinos before Supernova shock breakout from an optically thick wind. *Mon Not R Astron Soc*, 2015, 449: 3693–3699, arXiv: [1503.04170](#)
- 37 Priedhorsky W C, Peele A G, Nugent K A. An X-ray all-sky monitor with extraordinary sensitivity. *Mon Not R Astron Soc*, 1996, 279: 733–750
- 38 Sagiv I, Gal-Yam A, Ofek E O, et al. Science with a wide-field UV transient explorer. *Astron J*, 2014, 147: 79, arXiv: [1303.6194](#)
- 39 Nakar E, Sari R. Early supernovae light curves following the shock breakout. *Astrophys J*, 2010, 725: 904–921, arXiv: [1004.2496](#)
- 40 Sapir N, Katz B, Waxman E. Non-relativistic radiation mediated shock breakouts. iii. spectral properties of supernova shock breakout. *Astrophys J*, 2013, 774: 79, arXiv: [1304.6428](#)
- 41 Li W, Chornock R, Leaman J, et al. Nearby supernova rates from the Lick Observatory Supernova Search—III. The rate-size relation, and the rates as a function of galaxy Hubble type and colour. *Mon Not R Astron Soc*, 2011, 412: 1473–1507, arXiv: [1006.4613](#)

On the detection of shock breakouts of core-collapse supernovae with the Einstein Probe satellite

DENG JinSong^{1,2*} & WANG XiangYu³

¹ CAS Key Laboratory of Space Astronomy and Technology, National Astronomical Observatories, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100012, China;

² School of Astronomy and Space Science, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

³ School of Astronomy and Space Science, Nanjing University, Nanjing 210093, China

The shock breakout process and its characteristics for various core-collapse supernovae types are described, after a brief introduction of main observational facts and theoretical hypotheses of core-collapse supernovae. A radiation-dominated shock is formed and transports outwards inside the progenitor star during a core-collapse-induced explosion, while the high-temperature radiation field is trapped behind the shock front that has a finite width corresponding to an optical depth of about 10–20. When the shock reaches close to the progenitor surface, the trapped radiation begins to leak out, mainly in the form of ultraviolet and soft X-ray photons, giving rise to a sudden huge brightening of the star which must be the first electromagnetic signal of a core-collapse supernova. The duration of a shock breakout is very short, ranging from about 10 s for the explosion of a compact Wolf-Rayet star to about 1000 s for that of an extended red supergiant. Because of this, only few questionable candidates have been discovered so far including a serendipitous detection of SN 2008D with an X-ray telescope onboard the Swift satellite. The Einstein Probe satellite will run an all-sky survey of high sensitivity and high cadence in the soft X-ray band with its wide-field telescope of a Lobster-eye type, which is very suitable for the detection of ephemeral supernova shock breakouts. Using some typical theoretical values of shock breakouts, including durations, spectrum temperatures, and peak luminosities, it is predicted that each year the satellite will be able to routinely obtain dozens of light curves of shock breakouts for type II-P supernovae, i.e., explosions of red supergiants. But the rate drops to less than few detections per year for the explosions of blue supergiants and those of Wolf-Rayet stars in total due to compactness of such stars. The shock breakout sample to be built by the Einstein Probe satellite can be used to constrain the progenitors, in particular their radii, pre-explosion mass losses, and explosion mechanisms of core-collapse supernovae.

supernovae, shock waves, X-ray sources, X-ray telescopes

PACS: 96.70.Bw, 47.40.Nm, 98.70.Qy, 95.55.Ka

doi: [10.1360/SSPMA2017-00250](https://doi.org/10.1360/SSPMA2017-00250)