

超亮超新星光变特征和供能机制的统计分析*

董晓菲^{1,2)} 刘良端^{3,4)} 高鹤^{1,2)†}

(1)北京师范大学天文与天体物理前沿科学研究所,北京;
2)北京师范大学天文系,北京; 3)华中师范大学天体物理研究所,湖北武汉;
4)夸克与轻子物理教育部重点实验室(华中师范大学),湖北武汉)

摘要 统计了 91 颗贫氢超亮超新星光变特征,并结合 3 种供能模型进行了蒙特卡罗模拟,以探究实际观测对其能源机制的约束.结果显示:这些超亮超新星在 g 波段的平均峰值绝对星等为 (-21.34 ± 0.8) ,上升和下降时标分别分布在 7~79 和 14~114 d,并呈现显著正相关;模拟结果表明磁星和相互作用机制都可能为大部分超亮超新星供能,在相互作用模型中,基于壳层分布假设的模拟结果与观测符合得更好.国内各大巡天项目(如 CSST、司天工程)未来将探测到更多高红移超亮超新星,以期对相关科研人员深入了解宇宙中的恒星演化和爆炸过程提供重要数据.

关键词 超新星;光变曲线;毫秒磁星;马尔可夫链蒙特卡罗

中图分类号 P145.3

DOI: 10.12202/j.0476-0301.2023051

0 引言

作为恒星演化末期的剧烈爆发现象,超新星涉及众多复杂的物理过程,是天文学家研究的一个热门领域.在过去几十年的研究中,科学家们已经对大质量核坍缩超新星建立了较为统一的爆发和供能模型.可是近 20 年,一类特别明亮的超新星——超亮超新星(super luminous supernovae, SLS)打破了人们对恒星爆发的传统认知.它们有极高的峰值光度($10^{36}\sim 10^{37}\text{ J}\cdot\text{s}^{-1}$),比普通核坍缩型超新星亮度高几十甚至上百倍,因此可以在更远的宇宙中被观测到.目前已探测到的最远的超亮超新星红移达到 3.9^[1],这表明 SLS 在高红移宇宙有一定的爆发率,因此是研究早期宇宙和星系形成的重要探针.此外,Perley 等^[2]发现, SLS 的宿主星系大部分为贫金属、高恒星形成率的矮星系,这使它们成为研究宇宙早期恒星的理想候选体.

与普通超新星类似, SLS 根据其峰值光谱是否具有氢特征被分为 I 型(贫氢, SLS-I)和 II 型(富氢, SLS-II),观测所发现的 SLS-I 约占总数的 2/3^[3].由于 SLS-II 数量较少,而且光变形态更加多样,相关研究还有所欠缺,它们通常被认为由超新星抛射物与富氢的星周介质(CSM)发生的剧烈相互作用供能,但由于相关特征易被致密的星周云遮蔽,因此具体爆发机制仍不清楚^[4].

通过对 SLS 的观测,发现它们的总辐射能可以达到 10^{44} J ,如果仅靠传统的⁵⁶Ni 元素衰变供能,则需要比抛射物质量更多的⁵⁶Ni,但这是不现实的^[5].Gal-Yam^[6]等发现,对不稳定超新星模型(PIS)^[7]可以用来拟合一颗慢演化的 SLSSN 2007bi;但 Nicholl^[8]等认为,此模型并不能解释其他慢演化源在前期光度的快速上升,因此⁵⁶Ni 衰变模型也不能作为 SLS 的主要供能机制,这意味着如果要解释 SLS 的高光度特征,还需要考虑其他的供能机制.

目前,有中心引擎的持续供能和超新星抛射物与致密贫氢星周介质的相互作用供能 2 种主流模型可解释 SLS-I 的能量来源.在中心引擎供能的框架下:Woosley^[9]、Kasen 等^[10]提出,毫秒磁星自转减速所产生的磁偶极辐射可以为 SLS 供能;Dexter 等^[11]认为,中心致密天体在回落吸积过程中产生的能量也足以供能.在相互作用框架下,Smith 等^[12]提出,若 SLS 爆发前周围分布着足够致密的 CSM,那么抛射物便会与其发生相互作用,将动能转化为抛射物的热力学能,从而产生明亮的光学辐射.

研究 SLS 光变曲线在持续时间和峰值光度等可观测量的相空间分布,有助于掌握其整体演化特征,为未来巡天观测参数的设定提供参考.同时,对比实际观测和物理模型对可观测量分布的模拟,也能对其背后的能源机制做出一定限制.许多学者已经针对

* 国家自然科学基金资助项目(12021003)

† 通信作者:高鹤(1984—),男,教授,博士,博士生导师.研究方向:高能天体物理. E-mail: gaoh@bnu.edu.cn

收稿日期:2023-04-06

SLS-I 的光变特征进行了分析: Nicholl 等^[13] 分析了 24 颗 SLS-I 的峰值星等和特征时标, 提出磁星更有可能作为它们的能量来源; Villar 等^[14] 从物理模型入手, 对包含 SLS 在内的不同种光学暂现源进行了光变曲线模拟, 并探究了它们在相空间的主要占位, 认为磁星供能模型与 CSM 相互作用模型均可以解释 SLS 的可观测量分布, 但是受到样本数量的限制, 他们的统计结果具有一定局限性. 最近, 各大巡天项目也都开展了针对 SLS-I 的统计工作, 如暗能量巡天 (DES)^[15]、Pan-STARRS1 中深视场巡天 (PS1)^[16]、Palomar 瞬变源巡天 (PTF)^[17], 以及 Zwicky 瞬变源巡天 (ZTF)^[18] 等. 这些研究主要关注于单个巡天项目所观测的 SLS 的光变特征, 利用模型对单一光变曲线进行拟合, 并没有从物理模型的角度进一步探讨光变特征的分布.

随着 SLS 的数目增多, 有很多工作尝试将 SLS 用于限制宇宙学参数, 探索其在宇宙学中的应用. Quimby 等^[19] 对 11 颗 SLS-I 的光变曲线进行了分析, 发现它们在峰值处 (约 -21.7 等) 具有较小的弥散 (0.4 等), 第 1 次提出 SLS-I 具有做宇宙标准烛光的可能; Inserra 等^[20] 利用 16 颗 SLS-I, 探究了其作为标准烛光的可行性, 发现它们的峰值星等和峰值后 20 d 的星等下降率之间呈现强相关关系, 具有被标准化的可能, 但 De Cia 等^[17] 在 26 颗 PTF 的样本中并没有发现类似的相关性; 在扩大样本量至 20 颗后, Inserra 等^[21] 首次利用 SLS-I 对宇宙学参数进行了限制, 在 Λ CDM 模型下得到 $\Omega_m = 0.38_{-0.19}^{+0.24}$, 且相对于 Ia 型超新星, SLS-I 能在更高红移处 ($z > 1$) 提供独立的宇宙学检验. 尽管目前对 SLS 是否能够做宇宙标准烛光依然存在争议, 但随着样本量的增加, 对 SLS-I 的光变特征 (如峰值星等、下降率等) 及相应弥散进行统计, 既能在更大样本的基础上反映该类超新星的性质, 也能对其是否能应用于宇宙学有一定的指导作用. 同时, 如果光变特征统计能对 SLS-I 的爆发和能源机制有一定约束, 也有利于探究其内禀的峰值光度分布, 将超新星宇宙学拓展至更远的宇宙. 故此, 本研究收集了具有良好采样的 SLS-I 的公开数据, 从光变曲线中提取的典型可观测 (峰值光度、特征时标) 出发, 通过增大研究样本量, 对 SLS-I 进行了系统性的统计分析; 选用放射性元素衰变、磁星供能, 以及相互作用 3 种供能模型, 对 SLS 光变曲线进行了模拟, 并提取光变特征; 通过模拟和观测分布的重合情况, 对 SLS-I 能源机制进行限制.

1 样本描述及光变特征获取

1.1 样本与数据 本研究收集了目前已公开的、来

自各大巡天项目的相关文献, 以及 open astronomy 星表 (数据来源网址: <https://github.com/astrocatalogs/OACAPI>) 和 bright transient survey explore 星表 (数据来源网址: <https://sites.astro.caltech.edu/ztf/bts/explorer.php>) 的 SLS-I 样本. 对于这些样本, 首先按照如下 2 个标准进行了初步筛选:

1) 光谱分类为 SLS-I, 且具有公开的光变曲线数据;

2) 具有已测量红移.

满足这 2 个条件的样本共有 171 颗, 其中 21 颗来自 DES, 17 颗来自 PS1, 26 颗来自 PTF, 82 颗来自 ZTF, 25 颗来自已发表的文献. 这些源的红移分布如图 1 所示.

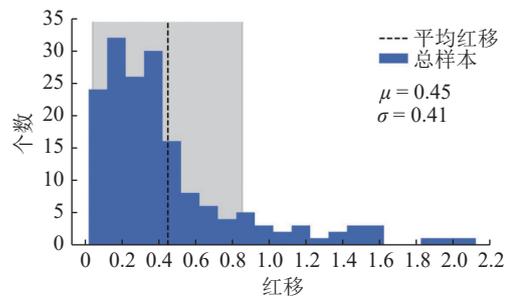


图 1 SLS-I 的红移分布

由图 1 可见: 目前已探测到的 SLS-I 样本的红移主要分布在 0.01~0.80, 平均值为 0.45, 在 >0.80~1.60 的范围内均有分布, 有少量的目标源红移达到了 2.00; 高红移样本的数量较少, 主要原因是受限于现有观测设备的灵敏度; SLS 在较高红移 ($z \geq 1$) 的范围具有比普通超新星 ($z = 1$) 更高的探测率.

在光变曲线分析阶段, 样本光变曲线需要具有良好的采样才能获取可靠的特征时标和峰值星等. 本文进一步对研究样本进行筛选. 以峰值作为零点, 要求在至少 1 个波段, 光变曲线上升 (-30~0 d) 及下降 (0~40 d) 段都至少具有 3 个观测点, 使得其峰值时间和星等可以较好地估计. 同时, 本文不考虑光变曲线具有较强奇异特征 (如后期波动) 的源. 经过筛选, 最终有 91 颗源满足要求. 依据光变曲线观测品质的好坏, 本文将样本分为 3 类, 以方便后文的光变特征分析.

1) 金样本 (50 颗). 要求样本在静止系 g 波段所对应的观测波段有观测, 且光变曲线在峰值前 20 d 到峰值后 30 d 均有连续观测.

2) 银样本 (31 颗). 要求样本在静止系 g 波段所对应的观测波段有观测, 且光变曲线在峰值前 10~20 d 到峰值后 10~30 d 均有连续观测, 但受限于观测覆盖时间, 部分源的特征时标需要通过外部插值来获取.

此样本同时包含光变曲线具有观测间断但观测覆盖时间足够长的目标源。

3) 铜样本 (10 颗), 要求样本在静止系 g 波段所对应的观测波段或邻近波段有观测, 且光变曲线具有明显的上升下降趋势, 可以对峰值星等和峰值时间作出估计, 但由于观测覆盖时间不足, 只能依赖外部插值获取特征时标。

ZTF 样本数据来自 ZTF forced photometry services^[22]. 本研究采用基于 Python 的软件包 HAFNET^[23] 对光变曲线进行流量基线定标和消光改正; 使用的数据主要来自于 PS1、DES、ZTF、PTF 等大型巡天项目数据, 不同巡天项目会带来一定的系统误差, 由于所采用的数据均已转化至 AB 星等系统, 因此系统误差主要集中在对 SLS 的认证和 0 点 (zero point) 的选取 2 个方面. 虽然不同项目对于 SLS 的选取标准有一定差异, 但是本研究选用的样本均通过光谱认证, 因此在此不考虑相关的系统误差. 相对于不同视场或波段来说, 0 点选取所产生的误差通常为 $10^{-3} \sim 10^{-2}$ 星等的量级 (如 PS1^[24]、ZTF^[18]), 相对于观测误差 (约为 10^{-1} 等) 较小. 故在后文分析中主要考虑观测误差带来的影响。

1.2 光变特征的获取

1.2.1 绝对星等 为了对来自不同巡天项目的样本进行统一分析, 本研究将光变曲线转化到同一静止系波段 (g 波段), 以方便进行对比, 相应的绝对星等为

$$M_g = m_{\text{obs}} - A_{\text{obs}} - \mu - K_{\text{obs} \rightarrow g}, \quad (1)$$

式中: M_g 代表 g 波段的绝对星等; m_{obs} 为对应观测波段的 AB 星等; A_{obs} 为银河系消光; μ 为目标源的距离模数; $K_{\text{obs} \rightarrow g}$ 为观测者系到静止系的 K 改正. 银河系红化值 $E(B-V)$ 由 Schlafly^[25] 等提供的银河系尘埃消光图给出, 不同观测波段的消光改正采用 Fitzpatrick 等^[26] 提出的经验公式计算得到, 其中 $R_V = 3.1$. 由于 SLS-I 的宿主星系大部分为贫金属矮星系^[2], 本研究暂时忽略了宿主星系的消光影响. 距离模数

$$\mu = 25 + 5 \lg d_L, \quad (2)$$

式中 d_L 为光度距离, 单位为 Mpc, 基于 Λ CDM 模型并通过红移计算得到, 使用的宇宙学参数为 $H_0 = 70 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{Mpc}^{-1}$ 、 $\Omega_m = 0.3$, 以及 $\Omega_\Lambda = 0.7$. 对于红移 > 0.2 的目标源, 需要计算跨波段的 K 改正, 对应观测波段的中心波长为 $W_{\text{obs}} = W_g (1+z)$, 本研究统一采用 K 改正因子 $-2.5 \lg (1+z)$ ^[27] 对实际数值进行近似. 最后在考虑了时间的膨胀效应后, 得到样本在静止系 g 波段下的光变曲线。

1.2.2 特征参数获取 本研究涉及的光变特征主要有峰值绝对星等、上升时标和下降时标. 为了提取这些光变特征, 需要对样本光变曲线进行一定程度的拟合和插值. 由于已有研究所采取的多项式拟合会引入一定的系统误差, 且误差无法估计, 本研究采取了一种机器学习算法——高斯过程回归方法, 对光变曲线进行插值和平滑^[28]. 峰值时刻和峰值绝对星等均可通过直接插值和拟合获得。

为计算每条光变曲线的特征时标, 本研究以比峰值星等暗 1 个星等处作为界限, 将该界限与光变曲线上上升段和下降段的交点提取出来, 以交点时刻与峰值时刻的差值作为典型的上升和下降时标, 相应误差由高斯过程插值得到的 1σ 误差给出. 由于部分目标源的时标要通过对光变曲线外部插值得到, 为了保证特征值的可靠性, 本研究仅选取包含外插时间 $< 5 \text{ d}$ 的样本。

2 光变特征的统计分析

2.1 观测特征分布 SLS 作为一种极端的大质量核坍缩型超新星, 具有比普通超新星更高的峰值光度, 光变曲线的持续时间也比普通超新星更长. 对于 SLS 峰值光度和特征时标的分析, 有助于更好地把握它们的典型光变特征, 也能从观测角度给出这类暂现源在光度和持续时间参数空间的所处位置。

2.1.1 峰值星等分布 经过最终筛选, 91 个 SLS-I 的 g 波段峰值绝对星等分布如图 2 所示。

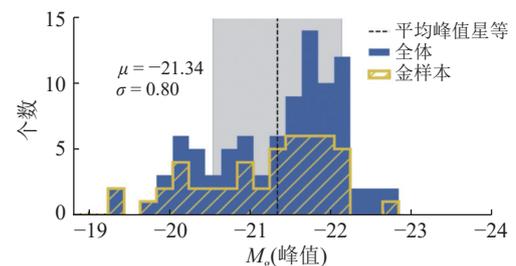


图 2 SLS-I 的 g 波段峰值绝对星等分布

由图 2 可见: 平均值 (竖直虚线) 和 1σ 误差 (阴影区域) 均为整体样本的结果; 金样本和整体样本的峰值星等分布范围并没有明显的差别; SLS-I 具有很高的峰值光度, 平均绝对星等为 (-21.34 ± 0.8) , 比普通超新星约大 2 个星等; 它们的峰值星等分布较广, 约为 $-19.37 \sim -22.84$, 最暗的源只有 -19.37 , 已经达到普通超新星的光度, 这意味着 SLS 虽然整体更亮, 但和普通超新星之间没有明显的光度截断, 这个结论和 De Cia 等^[17] 的研究结果基本吻合。

2.1.2 时标分布 鉴于部分目标源仅能拟合一个典型时标(上升或下降时标),因此本研究对二者分别进

行了统计,最终分别得到 80 颗源的上升时标数据与 82 颗源的下降时标数据,相应的时标分布如图 3 所示。

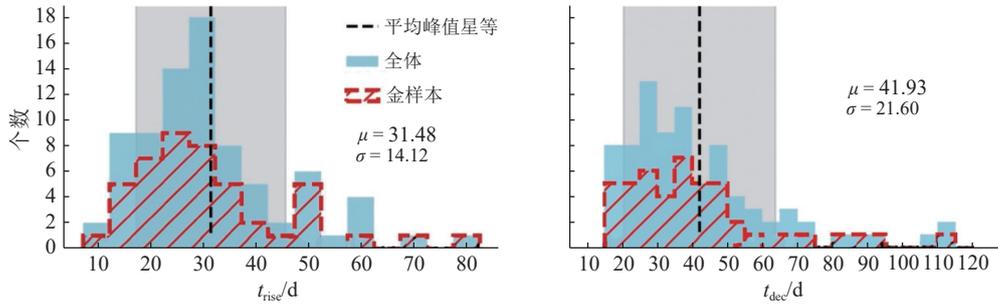


图 3 上升和下降时标分布

图 3 中的阴影区域表示 1σ 误差。

由图 3 可见, SLS-I 的平均上升和下降时标分别在 31.5 和 41.9 d. 时标分布范围很广,在平均值后又有较长的延伸,其中既存在演化非常慢的目标源(如 PS1-14bj, 上升和下降时标分别达到 77.9 和 114 d),也存在演化很快的源(如 SN 2018bgv, 上升及下降时标仅有 7.3 和 18.9 d),这种明显的差异说明 SLS-I 光变曲线的形态呈现多样化特征. 短时标样本的出现也表明 SLS 可能与快蓝暂现源有联系. Gal-Yam^[29] 曾提出“快演化”(I-Fast)和“慢演化”(I-Slow/I-R) 2 种亚型分类来区分具有不同光变演化速度的 SLS-I. 本研究的样本虽然时标分布较广,但整体分布并没有呈现明显的双峰特征,因此并不能提供关于“快演化”和“慢演化”亚型分类的佐证。

本研究进一步给出了时标随红移的分布,如图 4 所示。

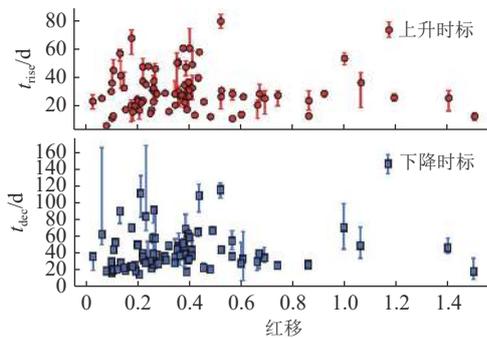


图 4 上升与下降时标随红移的分布

由图 4 可见, SLS-I 在光度演化方面并没有随红移演化的明显趋势,高红移样本数量较少可能是其中一个影响因素。

2.2 上升与下降时标的相关性分析 SLS-I 上升和下降时标的分布以及二者的相关关系如图 5-a~c 所示,其中不同符号代表不同的样本. 金、银样本的最佳拟合函数基于 Python 的线性拟合函数 Polyfit 给出,

本研究采用样本的误差作为权重进行一次线性拟合,通过拟合得到的协方差矩阵计算拟合误差,并确认了 2σ 的误差范围(阴影区域). 从图 5 可以看到, SLS-I 的上升和下降时标呈显著正相关,说明上升越快的光变曲线下降也越快. 利用金、银样本给出的最好线性拟合结果为 $t_{\text{dec}} = 1.12t_{\text{rise}} + 6.96$ d, 其中 t_{rise} 和 t_{dec} 分别代表上升时标和下降时标. 对应的皮尔逊相关系数 (Pearson correlation coefficient) 和斯皮尔曼秩相关系数 (Spearman rank correlation coefficient) 分别为 0.75 和 0.71, 图 5-a 中右下角标出了皮尔逊相关系数 r 和相应的显著因子 p . SLS 上升与下降时标的相关性在此前研究中也多次提及^[17], Nicholl 等^[13] 发现这种相关关系可以通过磁星供能模型的模拟重现,且光子的扩散时标主导了现有上升和下降时标的多样性,虽然相互作用模型也可以重现类似的关系,但是会对星周介质的质量提出非常严格的限制,因此相对于相互作用模型,磁星供能模型具有更大的参数空间。

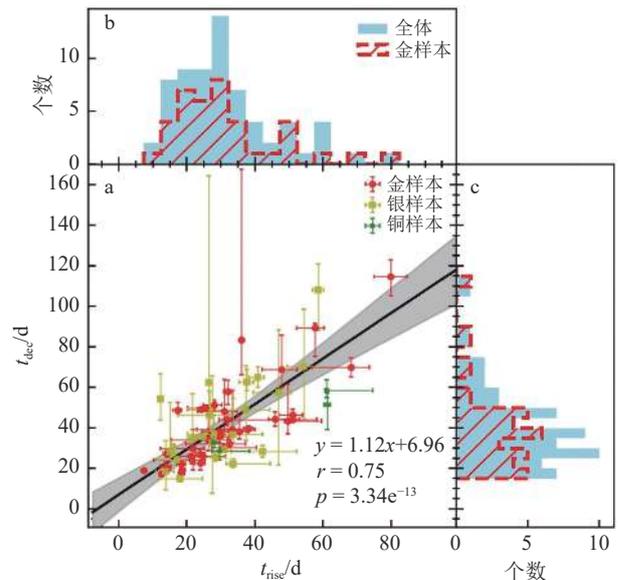


图 5 SLS-I 上升和下降时标的相关关系(a)和分布(b)、(c)

3 供能模型及光变特征模拟

基于前文的观测特征, 本章主要对 3 种可能的能源模型进行模拟, 并从模拟光变曲线中获取光变持续时标 $t_{\text{dura}} = t_{\text{rise}} + t_{\text{dec}}$ 和峰值绝对星等 M_g 这 2 个最基本的可观测量. 旨在通过 SLS-I 实际观测和理论模拟分布的重合程度来对供能机制做出约束.

3.1 放射性元素衰变模型 放射性元素 ^{56}Ni 的衰变是普通超新星的主要供能机制. 超新星爆发时在通过核合成过程产生大量 ^{56}Ni , 并通过 $^{56}\text{Ni} \rightarrow ^{56}\text{Co} \rightarrow ^{56}\text{Fe}$ 的衰变过程释放能量^[30-32], ^{56}Ni 和 ^{56}Co 衰变的特征时标分别为 8.8 和 111.3 d. 通过此过程注入的光度可以表示为

$$L_{\text{in}}(t) = M(\text{Ni})(\varepsilon(\text{Co})e^{-t/\tau_{\text{Co}}} + (\varepsilon(\text{Ni}) - \varepsilon(\text{Co}))e^{-t/\tau(\text{Ni})}) \quad (3)$$

式中: $M(\text{Ni}) = M_{\text{ej}}f(\text{Ni})$, 是 ^{56}Ni 的初始质量, 它的大小取决于抛射物质量 M_{ej} 和 ^{56}Ni 元素在抛射物中的质量占比 $f(\text{Ni})$; $\varepsilon(\text{Co})$ 和 $\varepsilon(\text{Ni})$ 是放射性元素的能量产生率; $\tau(\text{Co})$ 和 $\tau(\text{Ni})$ 代表元素衰变的特征时标, 四者均为已知常数. 为了给 SLS 提供足够的能量, 需要考虑对不稳定超新星情形 (PIS), 大质量恒星的内核在达到一定的高温后会产生正负电子对, 进而导致热核逃逸和超新星爆发. 因为此过程需要很大的抛射物质量和动能, 这种供能方式会倾向于产生具有长持续时标的光变曲线. 在此情形下, 各参数的初始范围设定为 M_{ej} 为 $(50 \sim 250)M_{\odot}$, E_k 为 $(10 \sim 100) \times 10^{44}\text{J}$, $f(\text{Ni})$ 为 $0.01 \sim 0.30$.

3.2 磁星供能模型 磁星供能模型被用来解释多种高能瞬变源的光变 (如伽马射线暴^[33-34]), 其中便包括 SLS-I^[35-36].

一般而言, 快速旋转的毫秒磁星通过磁偶极辐射释放转动动能, 这个过程产生的光度为

$$L_{\text{in}}(t) = L_{\text{ini}} \left(1 + \frac{t}{t_p} \right)^{-2}, \quad (4)$$

式中: 初始光度 $L_{\text{ini}} \approx 10^{40} \text{J} \cdot \text{s}^{-1} P_{i-3}^{-4} B_{p,14}^2$; 磁星旋转减速的典型时标 $t_p \approx 2 \times 10^5 \text{s} P_{i-3}^{-4} B_{p,14}^2$; P_{i-3} 是以 10^{-3}s 为单位的初始周期, $B_{p,14}$ 是以 10^{14}Gs 为单位的磁感应强度. 磁星产生的辐射会驱动一团相对论性的正负电子对向外运动, 在与抛射物的碰撞过程中将能量注入抛射物, 从而使观测到的超新星更为明亮.

需要注意的是, 若磁星转动周期太大 ($\geq 10 \text{ms}$) 或磁感应太小 ($\leq 10^{13} \text{Gs}$), 磁偶极辐射产生的能量与放射性元素衰变产能相比将不占主导. 结合已有研究^[14], 要想产生 SLS 的特征光度和持续时标, 磁星供能模型的参数范围大概 M_{ej} 为 $(1.0 \sim 10.0)M_{\odot}$, E_k 为 $(1.0 \sim 10.0) \times 10^{44} \text{J}$,

P 为 $(1.0 \sim 10.0) \text{ms}$, B 为 $(0.1 \sim 10.0) \times 10^{14} \text{Gs}$.

3.3 相互作用模型 抛射物与星周介质的相互作用模型也被用来解释一些特殊的光学暂现源, 如 IIIn 型超新星. 这种供能机制会在超新星的光谱中产生一些明显的观测证据, 比如窄氢线或金属发射线. 超新星爆发后, 抛射物与介质的相互作用过程会导致正反激波的产生, 激波的动能会转化为辐射能, 从而为 SLS 供能.

基于 Chatzopoulos 等^[37] 提出的相互作用模型, 产能公式可以表示为

$$L_{\text{in}}(t) = \varepsilon(\rho_{\text{CSM}} R_0^s)^{\frac{n-5}{n-s}} t^{\frac{2n+6s-n-15}{n-s}} (C_1 \theta(t_{\text{FS}} - t) + C_2 \theta(t_{\text{RS}} - t)), \quad (5)$$

式中: s , C_1 , C_2 为星周介质的几何参数; $\theta(t_{\text{FS}} - t)$ 和 $\theta(t_{\text{RS}} - t)$ 分别是正向激波和反向激波注入时间的控制函数; ρ_{CSM} 为介质密度; R_0 为初始半径; ε 为能量转化因子. 本研究主要考虑 2 种状态下的星周介质: 一种以致密壳层的形式存在 ($s = 0$), 在这种情况下, 当正向激波穿过壳层时, 辐射注入会被打断, 导致光变曲线在峰值后出现迅速下降; 另一种以星风形式存在 ($s = 2$), 此时介质密度以 $\rho_{\text{CSM}} \propto r^{-2}$ 的形式连续分布, 产生的光变曲线会更加平滑. 对于典型的 IIIn 型超新星来说, 相互作用供能参数的分布范围 M_{ej} 为 $(1.0 \sim 10.0)M_{\odot}$, E_k 为 $(1.0 \sim 10.0) \times 10^{44} \text{J}$, M_{CSM} 为 $(0.1 \sim 10.0)M_{\odot}$. 在此基础上, SLS 产生的抛射物以及所需星周介质质量可能更大, 因此本研究将 SLS 的抛射物以及星周介质的质量范围 M_{ej} 扩大为 $(1.0 \sim 30.0)M_{\odot}$, M_{CSM} 扩大为 $(1.0 \sim 30.0)M_{\odot}$.

3.4 结果分析 根据前文所给定的初始参数范围, 本研究利用基于 Python 语言的 emcee 程序包, 对每一个模型进行 5 000 次蒙特卡罗模拟, 最终得到了模拟光变曲线, 并提取出了相应的特征时标和 g 波段峰值星等. 不同模型的预测与实际观测的持续时标和峰值星等在参数空间的分布, 如图 6 所示.

图 6 中: 实心圆点为模拟光变曲线的特征值分布, 等高线代表模拟数据 $(1 \sim 2)\sigma$ 的轮廓范围; 实心圆形、正方形和星形符号分别代表金、银、铜样本的实际分布; 上方和右侧的直方图为横、纵坐标的一维分布图, 其中斜线直方图为样本分布, 实线是样本分布的核密度估计, 蓝色直方图为模型模拟值的分布.

图 6-a 展示的是放射性元素衰变的模拟结果, 放射性元素衰变 (PIS 情形) 产生的光变曲线持续时间较长, 主要分布在 $100 \sim 350 \text{d}$, 峰值光度较暗, 普遍低于 -21 等, 和整体 SLS 样本有较大偏离, 这表明 ^{56}Ni 的衰变并不能解释大部分 SLS 的光变曲线. 图 6-b 展示

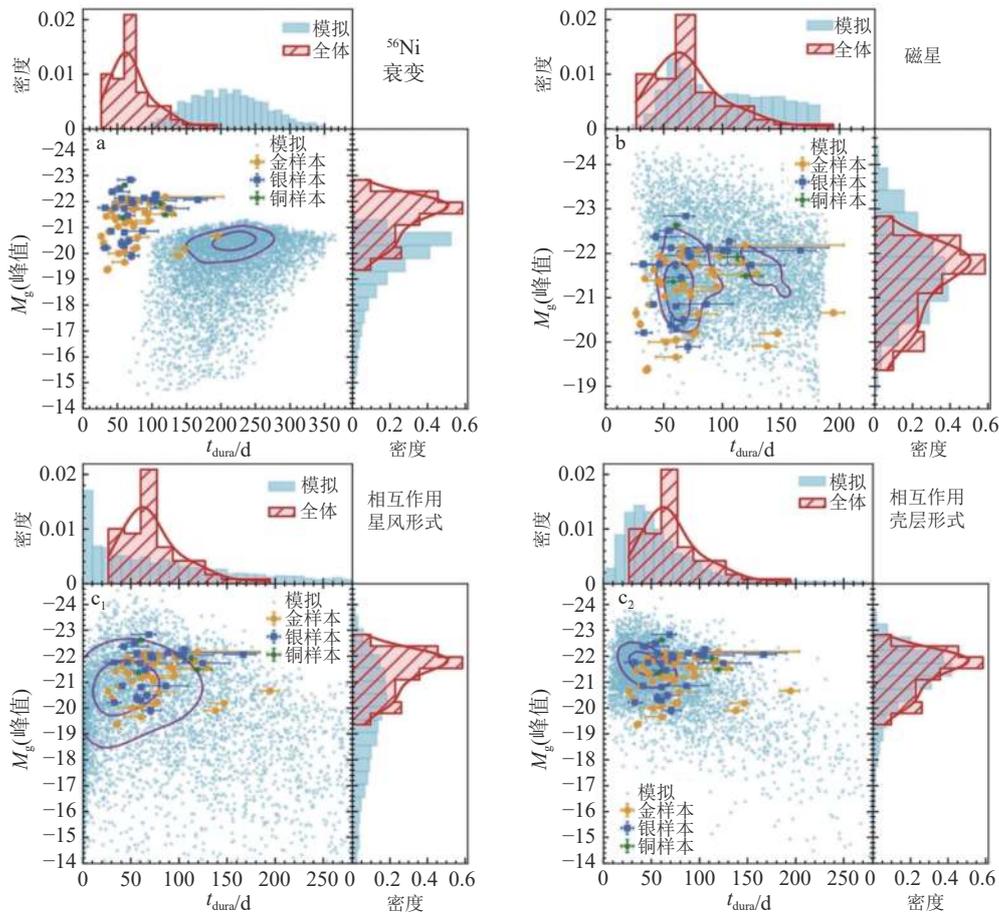


图 6 放射性元素衰变模型(a)、磁星供能模型(b)、相互作用模型星风形式(c₁), 以及相互作用模型壳层形式(c₂)

的是磁星供能模型的模拟结果, 其中磁星模拟的特征值分布也较为弥散, 峰值星等的平均值较样本来讲稍暗, 但整体分布范围大致相同. 持续时间的整体分布和样本较为吻合, 但值得注意的是, 磁星供能模型较难重现位于短时标、暗峰值区域的样本, 这与 Villar 等^[14]得到的结果类似. 在磁星框架下, 对特征时标较短且峰值星等分布在 $-19 \sim -20$ 范围的瞬变源来说, 光度的上下限取决于磁场下限和抛射物质量上限, 因此峰值低于这一区域的源都会具有较低的磁感应强度, 由 3.2 节的讨论可知, 磁感应强度太低会导致磁星失去供能的主导地位, 而图 6 中位于该区域的样本依然存在, 因此这一区域的样本缺失可能是磁星供能模型所面临的主要问题.

在相互作用模型中, 星风形式和壳层形式对应的模拟结果如图 6-c₁、6-c₂ 所示. 可见星风形式所对应的模拟参数分布非常弥散, 峰值星等平均值(约为 -21)低于观测值. 相对而言, 壳层形式下的模拟结果更为集中, 平均峰值光度更高(约 -21.5), 与实际观测重合得更好, 也能更自然地产生星等分布在 $-19 \sim -20$ 且光变时标较短的源. 导致这个差别的原因, 在于 2 种形式的注入光度随时间具有不同形式的演化,

即在式(5)中 $n=12$ 的情况下, 壳层形式($s=0$)对应的注入光度为 $L_m = t^{0.7}$, 星风形式($s=2$)对应的注入光度为 $L_m = t^{-0.3}$. 对壳层形式来说, 光度会随时间增加, 而星风形式则相反, 因此壳层形式更容易产生较亮的源^[14]. 轮廓图显示, 不论是星风形式还是壳层形式, 都更倾向于产生短时标的光变曲线, 这是因为相互作用模型产生的光变曲线 I 往往具有快速下降的特点, 但相比之下壳层形式依然更符合实际观测. 整体来看, 磁星供能模型和壳层假设下的相互作用模型, 均能解释大部分 SLS 的典型光变特征.

4 结束语

本研究利用 SLS-I 的光变曲线进行了大样本的统计研究, 得到了 SLS-I 光变特征在相空间的主要分布区域及基于 3 种可能的能源机制; 利用蒙特卡罗方法对特征分布进行了理论模拟, 结合实际观测对能源机制进行了约束.

从模型模拟的角度来看, 放射性元素衰变模型所预测的光变持续时间过长, 产生的光度只能解释部分偏暗的源, 无法解释大部分 SLS 的观测, 因此并不能作为 SLS-I 的主要供能机制. 相比之下, 磁星供能模

型和相互作用模型(壳层形式)能够较好地重现实际观测的峰值分布,但磁星供能模型难以解释较暗且时标较短的源,而相互作用模型(壳层形式)会倾向于产生更短时标的光变曲线.在相互作用模型的框架下,星周介质以壳层形式分布的模拟结果与观测符合得更好.

总体上,随着观测数目增加,SLS-I的峰值星等分布和时标分布都更加弥散,暗源的出现也提出了新的问题.本研究的结果显示,大部分样本落在磁星和相互作用模型模拟的范围之内,这有2种可能:1)仅靠峰值光度和特征时标并不足以鉴别这2种能源机制,需要更多光变和光谱信息来进行研究;2)2种机制均为SLS的内禀供能机制,但需要更多观测信息来进行佐证和区分.随着SLS的光变曲线呈现出更多样化的特征(如早期鼓包和后期波动),对其能源机制的研究和与其他暂现源的联系的讨论也将具备更多的方向.

致谢 本研究工作和文章撰写得到北京师范大学彭宗开博士后的帮助,在此表示衷心感谢.

5 参考文献

- [1] COOKE J, SULLIVAN M, GAL-YAM A, et al. Superluminous supernovae at redshifts of 2.05 and 3.90[J]. *Nature*, 2012, 491(7423): 228
- [2] PERLEY D A, QUIMBY R M, YAN L, et al. Host-galaxy properties of 32 low-redshift superluminous supernovae from the palomar transient factory[J]. *The Astrophysical Journal Letters*, 2016, 830(1): 13
- [3] GAL-YAM A. The most luminous supernovae[J]. *Annual Review of Astronomy and Astrophysics*, 2019, 57: 305
- [4] CHEVALIER R A, IRWIN C M. Shock breakout in dense mass loss: luminous supernovae[J]. *The Astrophysical Journal Letters*, 2011, 729(1): L6
- [5] UMEDA H, NOMOTO K. How Much ^{56}Ni can be produced in core-collapse supernovae? evolution and explosions of 30–100 M_{\odot} Stars[J]. *The Astrophysical Journal Letters*, 2008, 673(2): 1014
- [6] GAL-YAM A, MAZZALI P, OFEK E O, et al. Supernova 2007bi as a pair-instability explosion[J]. *Nature*, 2009, 462(7273): 624
- [7] BARKAT Z, RAKAVY G, SACK N. Dynamics of supernova explosion resulting from pair formation[J]. *Physical Review Letters*, 1967, 18(10): 379
- [8] NICHOLL M, SMARTT S J, JERKSTRAND A, et al. Slowly fading super-luminous supernovae that are not pair-instability explosions[J]. *Nature*, 2013, 502(7471): 346
- [9] WOOSLEY S E. Bright supernovae from magnetar birth[J]. *The Astrophysical Journal Letters*, 2010, 719(2): L204
- [10] KASEN D, BILDSTEN L. Supernova light curves powered by young magnetars[J]. *The Astrophysical Journal Letters*, 2010, 717(1): 245
- [11] DEXTER J, KASEN D. Supernova light curves powered by fallback accretion[J]. *The Astrophysical Journal Letters*, 2013, 772(1): 30
- [12] SMITH N, MCCRAY R. Shell-shocked diffusion model for the light curve of SN 2006gy[J]. *The Astrophysical Journal Letters*, 2007, 671(1): L17
- [13] NICHOLL M, SMARTT S J, JERKSTRAND A, et al. On the diversity of superluminous supernovae: ejected mass as the dominant factor[J]. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 2015, 452(4): 3869
- [14] VILLAR V A, BERGER E, METZGER B D, et al. Theoretical models of optical transients. I. A broad exploration of the duration-luminosity phase space[J]. *The Astrophysical Journal Letters*, 2017, 849(1): 70
- [15] ANGUS C R, SMITH M, SULLIVAN M, et al. Superluminous supernovae from the dark energy survey[J]. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 2019, 487(2): 2215
- [16] LUNNAN R, CHORNOCK R, BERGER E, et al. Hydrogen-poor superluminous supernovae from the Pan-STARRS1 medium deep survey[J]. *The Astrophysical Journal Letters*, 2018, 852(2): 81
- [17] DE CIA A, GAL-YAM A, RUBIN A, et al. Light curves of hydrogen-poor superluminous supernovae from the palomar transient factory[J]. *The Astrophysical Journal Letters*, 2018, 860(2): 100
- [18] CHEN Z H, YAN L, KANGAS T, et al. The hydrogen-poor superluminous supernovae from the Zwicky transient facility phase I survey: I. light curves and measurements[J]. *The Astrophysical Journal Letters*, 2023, 943(1): 41
- [19] QUIMBY R M, YUAN F, AKERLOF C, et al. Rates of superluminous supernovae at $z \sim 0.2$ [J]. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 2013, 431(1): 912
- [20] INSERRA C, SMARTT S J. Superluminous supernovae as standardizable candles and high-redshift distance probes[J]. *The Astrophysical Journal*, 2014, 796(2): 87
- [21] INSERRA C, SULLIVAN M, ANGUS C R, et al. The first Hubble diagram and cosmological constraints using superluminous supernovae[J]. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 2021, 504(2): 2535
- [22] MASCI F J, LAHER R R, RUSHOLME B, et al. The Zwicky transient facility: data processing, products, and archive[J]. *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, 2019, 131(995): 018003

- [23] YANG S, SOLLERMAN J. HAFET: hybrid analytic flux FittEr for transients[EB/OL]. [2023-03-31]. <https://arxiv.org/abs/2302.02082>
- [24] TONRY J L, STUBBS C W, LYKKE K R, et al. The Pan-STARRS1 photometric system[EB/OL]. [2023-04-02]. <https://arxiv.org/abs/1203.0297>
- [25] SCHLAFLY E F, FINKBEINER D P. Measuring reddening with Sloan digital sky survey stellar spectra and recalibrating sfid[J]. *The Astrophysical Journal Letters*, 2011, 737(2): 103
- [26] FITZPATRICK E L, MASSA D. An analysis of the shapes of interstellar extinction curves: V. the IR-through-UV curve morphology[J]. *The Astrophysical Journal Letters*, 2007, 663(1): 320
- [27] BLANTON M R, ROWEIS S. K-corrections and filter transformations in the ultraviolet, optical, and near-infrared[J]. *The Astronomical Journal*, 2007, 133(2): 734
- [28] AMBIKASARAN S, FOREMAN-MACKEY D, GREENGARD L, et al. Fast direct methods for Gaussian processes[J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2016, 38(2): 252
- [29] GAL-YAM A. Luminous supernovae[J]. *Science*, 2012, 337(6097): 927
- [30] ARNETT E M, JORIS L, MITCHELL E, et al. Hydrogen-bonded complex formation. III. Thermodynamics of complexing by infrared spectroscopy and calorimetry[J]. *Journal of the American Chemical Society*, 1970, 92(8): 2365
- [31] ARNETT W D. On the theory of type I supernovae[J]. *The Astrophysical Journal Letters*, 1979, 230: L37
- [32] ARNETT W D. Type I supernovae: I - Analytic solutions for the early part of the light curve[J]. *The Astrophysical Journal Letters*, 1982, 253: 785
- [33] ZHANG B, MÉSZÁROS P. Gamma-ray burst afterglow with continuous energy injection: signature of a highly magnetized millisecond pulsar[J]. *The Astrophysical Journal Letters*, 2001, 552(1): L35
- [34] KANEKO Y, BOSTANCI Z F, GÖĞÜŞ E, et al. Short gamma-ray bursts with extended emission observed with Swift/BAT and Fermi/GBM[J]. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 2015, 452(1): 824
- [35] NICHOLL M, SMARTT S J, JERKSTRAND A, et al. LSQ14bdq: a type Ic super-luminous supernova with a double-peaked light curve[EB/OL]. (2015-06-09)[2023-03-10]. <https://arxiv.org/abs/1505.01078v2>
- [36] NICHOLL M, GUILLOCHON J, BERGER E. The magnetar model for type I superluminous supernovae: I. Bayesian analysis of the full multicolor light-curve sample with MOSFiT[J]. *The Astrophysical Journal Letters*, 2017, 850(1): 55
- [37] CHATZOPOULOS E, CRAIG WHEELER J, VINKO J. Generalized semi-analytical models of supernova light curves[J]. *The Astrophysical Journal Letters*, 2012, 746(2): 121

Light curve characteristics and energy sources of super-luminous supernovae: a statistical analysis

DONG Xiaofei^{1, 2)} LIU Liangduan^{3, 4)} GAO He^{1, 2)}

(1)Institute for Frontier in Astronomy and Astrophysics, Beijing Normal University, Beijing, China;
 2)Department of Astronomy, Beijing Normal University, Beijing, China; 3)Institute of Astrophysics,
 Central China Normal University, Wuhan, Hubei, China; 4)Key Laboratory of Quark and Lepton Physics
 Ministry of Education, Central China Normal University, Wuhan, Hubei, China)

Abstract Super-luminous supernovae have been studied intensively for nearly two decades. The high luminosity makes them of great significance for studying first-generation stars and early universe. However, the underlying energy mechanism remains unclear. In this study, 91 hydrogen-poor super-luminous supernovae with well-sampled light curves were examined to extract their characteristics for statistical analysis. Markov Chain Monte Carlo simulations were carried out to reproduce these observables considering three power mechanisms. The constraints combining observations on their energy mechanism were systematically explored. The average peak absolute magnitude at g band was found to be (-21.34 ± 0.8) mag, the rising and declining time scales were distributed in 7~79 and 14~114 d, where a strong correlation existed. Simulations indicated that both the magnetar and the interaction mechanism power. Under the interaction framework, the shell-like scenario is preferred based on

comparison with observations. In the future, domestic telescopes and all-sky surveys (such as CSST and SiTian) will detect more super-luminous supernovae with high red shift, providing important information for a more comprehensive understanding of massive star evolution and explosions.

Keywords Supernovae; light curves; magnetars; Markov Chain Monte Carlo

【责任编辑: 陆有忠】