

超亮超新星ASASSN-15lh爆炸过程 所需 ^{56}Ni 的估算*

冯丹丹^{1†} 刘门全¹ 罗 夏² 罗志全^{1‡} 冯中文¹ 唐德林¹

(1 西华师范大学天文系 南充 637002)

(2 北京师范大学天文系 北京 100875)

摘要 超新星ASASSN-15lh是近期发现的一颗光变曲线类似于Ia型超新星(SN Ia)的超亮超新星(Super Luminous SuperNovae, SLSNe). ^{56}Ni 的衰变状况与SN Ia爆炸过程中的光度直接相关, 考虑生成核的退激发能, 详细计算了超新星ASASSN-15lh爆炸环境中 ^{56}Ni 衰变产生的热量, 估算出所需的 ^{56}Ni 的质量为 $31.32 M_{\odot}$, 与观测所得的光变曲线给出的ASASSN-15lh所需 $^{56}\text{Ni} \geq 30 M_{\odot}$ 的估计相符. 超新星ASASSN-15lh的爆发机制至今还在争论之中, 计算结果为进一步研究该超新星的前身星和爆发机制提供参考.

关键词 超新星: 普通, 超新星: 个别: ASASSN-15lh, 核反应, 恒星: 演化

中图分类号: P145; **文献标识码:** A

1 引言

超亮超新星(Super Luminous SuperNovae, SLSNe)的光度极高, 它的发光机制可能与之前所发现的超新星不同, 甚至挑战之前所建立的超新星模型. ASASSN-15lh是至今为止发现的一颗最亮的超新星, 其光变曲线的成因至今还在讨论之中. 2016年Dong等人指出, 若光变曲线是由 ^{56}Ni 造成的, 那么所需的 $^{56}\text{Ni} \geq 30 M_{\odot}$ ^[1]; 同年, Dai等人也对超亮超新星ASASSN-15lh所需的 ^{56}Ni 的质量进行了估算, 结果约为 $260 M_{\odot}$, 这个质量远大于已知恒星爆炸时 ^{56}Ni 的产量, 因此他们认为其光度不是由 ^{56}Ni 的衰变造成的, 并且认为若ASASSN-15lh的能量来源是磁星模型, 那么它可能是一颗奇异的夸克星^[2-6]; Woosley等人2016年在关于最亮超新星的文章中认为ASASSN-15lh是I型超亮超新星(SLSNe-I), 符合磁星模型^[7]; Chatzopoulos等人2016年提出它是由一个 $40 M_{\odot}$ 的中心坍缩的年轻恒星与 $20 M_{\odot}$ 的贫氢壳层组成的混合模型, 此模型能克服单一成分模型供能不足的缺点, 能很好地解释ASASSN-15lh的超亮度^[8]. 而Leloudas等人提出ASASSN-15lh的光度可能起源于黑洞潮汐瓦解恒星的事件而非超新星爆发^[9-11]. 对于之前发现的正常的SN Ia, 几乎都可用 ^{56}Ni 来解释, 而ASASSN-15lh的光变曲线类似

2016-12-12收到原稿, 2017-02-16收到修改稿

*国家自然科学基金项目(U1331121)资助

[†]ncddfeng@163.com

[‡]nczqluo@126.com

于SN Ia, 因此研究人员首先想到的是用 ^{56}Ni 来解释其光变曲线的成因. 但是 ^{56}Ni 衰变所放出的能量与反应前后核的能级结构密切相关, 通常的估算忽略了子核能级跃迁, 只考虑了母核基态跃迁到子核基态的质量亏损放出的能量. 因此本文在超新星爆发环境下考虑原子核的能级, 并结合ASASSN-15lh的光变曲线进行计算. 若 ^{56}Ni 是影响ASASSN-15lh光变曲线的主因, 其辐射能量主要来源于 ^{56}Ni 的衰变能量. 根据弱相互作用理论, 我们首先计算出该超新星遗迹中一个 ^{56}Ni 的衰变能量, 然后与观测数据中ASASSN-15lh辐射的总能量相对比, 即可得到所需的 ^{56}Ni 质量. 由于还有其他的供能机制^[2-6], 因此该质量即是生成 ^{56}Ni 的质量上限.

在本文中, 第2部分给出了计算方法, 第3部分是计算结果与结果分析, 第4部分是关于结果的讨论.

2 方法

2.1 ASASSN-15lh辐射能的计算

根据Dong等^[1]的光变曲线, 我们以时间为变量对其进行积分, 得出ASASSN-15lh辐射的总能量 $Q_{\text{Tot}} = 8.09 \times 10^{51} \text{ erg}$. 辐射总能量包括来自超新星爆炸时从中心携带的黑体辐射能量与 ^{56}Ni 衰变放出的能量. 由于 ^{56}Ni 的半衰期大约是7 d, 因此ASASSN-15lh被发现初期(对应于ASASSN-15lh峰值前22 d)的能量是来自超新星爆炸中心的黑体辐射能量. 设ASASSN-15lh超新星遗迹是球对称的, 其黑体辐射总能量为 Q_{BB} , 计算公式如下:

$$Q_{\text{BB}} = \frac{4}{3} \pi R_{\text{BB}}^3 \rho_{\text{BB}}(T), \quad (1)$$

$$\rho_{\text{BB}}(T) = a T_{\text{BB}}^4, \quad (2)$$

其中 $\rho_{\text{BB}}(T)$ 为黑体辐射密度, $a = 7.57 \times 10^{15} \text{ erg} \cdot \text{cm}^{-3} \cdot \text{K}^{-4}$ 为黑体辐射常数, T_{BB} 为黑体辐射温度, R_{BB} 为黑体辐射半径. 由Dong等^[1]的图3可知: $T_{\text{BB}} = 2.75 \times 10^4 \text{ K}$, $R_{\text{BB}} = 2.16 \times 10^{15} \text{ cm}$, 则 $Q_{\text{BB}} = 1.82 \times 10^{50} \text{ erg}$. 因此, 由 ^{56}Ni 衰变放出的能量为 Q :

$$Q = Q_{\text{Tot}} - Q_{\text{BB}} = 7.91 \times 10^{51} \text{ erg}. \quad (3)$$

2.2 ^{56}Ni 衰变能的计算

超新星爆发期间会产生大量的放射性元素 ^{56}Ni . ^{56}Ni 通过电子俘获生成 ^{56}Co , ^{56}Co 不稳定, 随后衰变成 ^{56}Fe , 形成一条 $^{56}\text{Ni} \rightarrow ^{56}\text{Co} \rightarrow ^{56}\text{Fe}$ 的衰变链^[12]. 衰变过程中有大量的 γ 射线产生, 这些 γ 射线最终会变为热能和转化为光学辐射.

根据Suzuki等^[13]与Zhang^[14]的结果, 考虑子核退激发能后的计算电子俘获反应的放热公式如下:

$$\overline{E_x} = \sum_i \sum_j \frac{\ln 2 (2J_j + 1) e^{-E_i / (k_B T_{\text{BB}})} M \varphi_{ij}(\rho_{\text{BB}}, T_{\text{BB}}, Y_e, Q_{ij})}{G(Z, A, T_{\text{BB}}) \lambda} \Delta E_{ij}, \quad (4)$$

$$M = |M_{\text{GT}}|_{ij}^2 / 10^{3.59} + |M_{\text{F}}|_{ij}^2 / 10^{3.79}, \quad (5)$$

$$\varphi_{ij}(\rho_{\text{BB}}, T_{\text{BB}}, Y_e, Q_{ij}) = \int_l^\infty w^2 (Q_{ij} + w)^2 G(Z, w) f_e dw, \quad (6)$$

$$\lambda = \ln 2 \sum_i \frac{(2J_i + 1) e^{-E_i/(k_B T_{\text{BB}})}}{G(Z, A, T_{\text{BB}})} \sum_j \left(\frac{|M_{\text{GT}}|_{ij}^2}{10^{3.59}} + \frac{|M_{\text{F}}|_{ij}^2}{10^{3.79}} \right) \varphi_{ij}(\rho_{\text{BB}}, T_{\text{BB}}, Y_e, Q_{ij}), \quad (7)$$

$$Q_{ij} = (m_p - m_d) c^2 + E_i - E_j, \quad (8)$$

$$f_e = \{1 + \exp[(w - \mu_e)/(k_B T_{\text{BB}})]\}^{-1}, \quad (9)$$

其中, $\overline{E_x}$ 是一个原子核的平均退激发能, E_{ij} 是从母核激发态到子核基态的退激发能, w 是电子总的能量(含静止质量), $G(Z, w)$ 是库伦波改正因子, m_p 和 m_d 分别是母核和子核的质量, E_i 为能级能量, J_i 为角动量, E_f 是子核的激发能, $G(Z, A, T)$ 是核配分函数, $|M_{\text{GT}}|_{ij}^2$ 和 $|M_{\text{F}}|_{ij}^2$ 分别是 GT 跃迁矩阵元和费米跃迁矩阵元, φ_{ij} 是相空间积分, Y_e 是电子的摩尔数, λ 表示电子俘获率. 当 $Q_{ij} \geq -1$ 时, $l = 1$; 当 $Q_{ij} < -1$ 时, $l = |Q_{ij}|$. f_e 是电子的费米狄拉克分布方程, 这里采用罗志全等人文章中的表达式^[15], μ_e 是电子的化学势, k_B 是玻尔兹曼常数, 其中化学势 μ_e 决定于超新星遗迹的密度 ρ .

我们采用 Nabi 等人公布的 ^{56}Ni 与 ^{56}Co 的 GT (Gamow-Teller) 强度分布数据^[16], 由 NNDC (National Nuclear Data Center) 的实验数据得到母核的能级分布^[12], 如表 1 所示.

表 1 ^{56}Ni 、 ^{56}Co 和 ^{56}Fe 的能级分布^[12]
Table 1 The energy level distribution of ^{56}Ni , ^{56}Co , and ^{56}Fe ^[12]

Element		Energy and angular momentum							
^{56}Ni	E_i/MeV	0	2.7	3.925	4.935	5.481	5.988	6.431	6.588
	J_i	0	2	4	3	4	3	4	3
^{56}Co	E_i/MeV	0	0.158	0.576	0.970	1.72			
	J_i	4	3	5	2	1			
	E_i/MeV	2.058	2.959	3.122	3.370	3.445	3.856	4.4048	4.100
^{56}Fe	J_i	8.62	9.97	7.642	10.1	6.974	6.692	7.057	6.446
	E_i/MeV	4.119	4.298	4.394	4.447	4.458			
	J_i	6.443	6.495	7.285	8.146	6.864			

2.3 超新星遗迹的密度 ρ

我们首先估计一下超新星遗迹的平均密度, 根据密度与质量的关系:

$$\rho = \frac{M}{V}, \quad (10)$$

$$V = \frac{4}{3} \pi R_{\text{BB}}^3, \quad (11)$$

这里 M 是超新星 ASASSN-15lh 的质量. Chatzopoulos 等人在 2016 年提出的超新星 ASASSN-15lh 的混合模型, 指出该超新星的总质量可能是 $60 M_\odot$, 即 $M = 60 M_\odot$ ^[8].

则 $\rho = 2.8 \times 10^{-12} \text{ g/cm}^3$. 由于超新星爆炸后, 随着时间推移, 超新星遗迹密度逐渐降低, 因此此时计算出的密度为超新星遗迹密度的上限. Fuller 等人在文献[17]中的图1给出在密度很低的情况下, $\mu_e = 0$. 需要说明的是只要密度小于 10^4 g/cm^3 , 就有 $\mu_e \approx 0$. 因此初始密度对我们的计算结果几乎是没有影响的.

3 结果与分析

ASASSN-15lh 超亮超新星的总辐射能量为 $Q_{\text{Tot}} = 8.09 \times 10^{51} \text{ erg}$, 黑体辐射能量为 $Q_{\text{BB}} = 1.82 \times 10^{50} \text{ erg}$, 那么 ^{56}Ni 衰变放出的能量 $Q = Q_{\text{Tot}} - Q_{\text{BB}} = 7.91 \times 10^{51} \text{ erg}$. 在表2中, 我们列出了考虑电子俘获过程造成中微子能量损失与退激发能的计算结果, 以及不考虑退激发能与中微子能量损失的质量亏损能量^[18-19]. 对于一个 ^{56}Ni : $^{56}\text{Ni} \rightarrow ^{56}\text{Co}$ 退激发能量 $E_1 = 3.35 \text{ MeV}$, 对比于 $^{56}\text{Ni} \rightarrow ^{56}\text{Co}$ 的质量亏损(即由一个 ^{56}Ni 的基态跃迁到 ^{56}Co 的基态所释放的能量)为 1.62 MeV , 这里 1.62 MeV 没有考虑中微子能量损失, 因此这是质量亏损放能的上限, 但是我们的计算结果远大于质量亏损, 这是因为在此超新星环境下, 生成的 ^{56}Co 处于激发态的数量较多, 因此考虑退激发能是有必要的. $^{56}\text{Co} \rightarrow ^{56}\text{Fe}$ 衰变能量 $E_2 = 4.03 \text{ MeV}$, 而其质量亏损为 4.05 MeV , 比计算结果大, 说明在此环境下生成的 ^{56}Fe 基本都处于基态. 根据能量守恒, 我们估算了 ^{56}Ni 经过一次完整的衰变链后, 中微子带走的平均能量约为 2 MeV . 由于 ^{56}Ni 所处的密度远低于中微子的囚禁密度, 因此物质对中微子几乎是透明的, 此反应中的中微子对辐射能没有贡献.

表 2 退激发能的计算结果与质量亏损
Table 2 The result of the de-excitation energy and the loss of mass

Nuclear reaction	Mass loss/MeV	Real released energy/MeV
	(without de-excitation energy and neutrino energy loss)	(with back excitation energy and neutrino energy loss)
$^{56}\text{Ni} \rightarrow ^{56}\text{Co}$	1.62	3.35
$^{56}\text{Co} \rightarrow ^{56}\text{Fe}$	4.05	4.03

由以上结果可知, 经过一次完整的衰变链, 释放的总能量为 $E = E_1 + E_2 = 7.38 \text{ MeV}$. 那么所需的 ^{56}Ni 的个数 $n = \frac{Q \times 10^{-7} \text{ J}}{E \times 1.6 \times 10^{-13} \text{ J}} = 6.70 \times 10^{56}$, 则所需 ^{56}Ni 的质量 $m = 6.23 \times 10^{31} \text{ kg}$, 即 $m = 31.32 M_{\odot}$.

采用 Seitenzahl 等人的方法^[20], 画出 $m = 31.32 M_{\odot}$ 的 ^{56}Ni 的放能曲线, 并与 Dong 等^[1]的光变曲线比较, 如图1所示.

从图1中可以看出: 在峰值前15 d, 计算出的能量比观测到的能量高, 在此之后, 计算出的能量比观测的能量低, 这是由于我们没有考虑超新星内部的辐射输运过程. 而在峰值后60 d, 两者基本一致, 且计算出的总能量与观测得到的总能量相等.

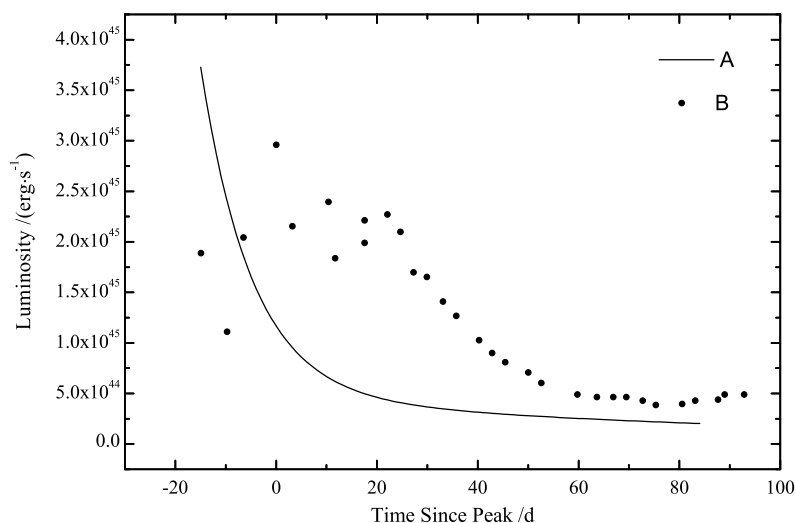


图 1 ^{56}Ni 衰变放能曲线与观测数据的比较. A为 $31.32 M_{\odot}$ 的 ^{56}Ni 的放能曲线, B为Dong等人的观测数据^[1].

Fig. 1 The comparison of the ^{56}Ni decay light curve and the observed data. A is the energy release by $31.32 M_{\odot}$ ^{56}Ni , B is the observed data of Dong et al^[1].

在超新星爆炸的整个过程中, 都有原初黑体辐射能量的影响. 而本文只扣除了 ^{56}Ni 衰变之前的原初黑体辐射能量, 这就导致了计算的 ^{56}Ni 含量偏大. 由于原初黑体辐射能量很小(比总能量小一个量级), 所以这种偏差对计算结果的影响可以忽略.

Dong等^[1]给出ASASSN-15lh的辐射能量为 $(1.1 \pm 0.2) \times 10^{52}$ erg, 若ASASSN-15lh光变曲线是由 ^{56}Ni 造成的, 那么所需的 ^{56}Ni 的质量 $\geq 30 M_{\odot}$, 而本文通过对Dong等人给出的光变曲线^[1]积分得出辐射能量为 8.09×10^{51} erg; 由弱相互作用得出 ^{56}Ni 的衰变能量, 从而求出所需的 ^{56}Ni 的质量约为 $31.32 M_{\odot}$, 与Dong等^[1]估计的值相符, 远远小于Dai等^[2]所估算的 $260 M_{\odot}$. Dai等^[2]引用了Sutherland等^[21]的结果. 原来的结果忽略了退激发能. 由于我们考虑了反应链中每个重核的激发态(比如超新星爆炸合成的 ^{56}Ni 大多处于激发态), 导致我们计算的每个 ^{56}Ni 的发热能量比较高, 相应的 ^{56}Ni 的需求量较少.

4 结论

超亮超新星极端高光度的物理起源是当前研究的热点之一. ASASSN-15lh属于超亮超新星, 且是至今为止发现的一颗最亮的超新星. Dai等人认为ASASSN-15lh的光度需要 $260 M_{\odot}$ 的 ^{56}Ni 衰变, 因此Dai等人完全排除了 ^{56}Ni 作为其能量来源的可能^[2]. 而本文的计算结果是 $31.32 M_{\odot}$ 的 ^{56}Ni , 与Dong等^[1]基本相符, 这说明在计算中考虑退激发能是尤为重要的.

对于超新星而言, 至今所发现的供能机制主要有: ^{56}Ni 的衰变供能、磁星模型、夸克星以及Chatzopoulos等人提出的混合模型^[8]. 超新星ASASSN-15lh及其他超亮超新星光变曲线的成因和爆发机制都需要进一步研究. ^{56}Ni 可以作为SN Ia的能量来源, 因此研究 ^{56}Ni 的实际放能对解释SN Ia或类似于SN Ia光变曲线的成因是有意义的.

参 考 文 献

- [1] Dong S B, Shappee B J, Prieto J L, et al. *Science*, 2016, 351: 257
- [2] Dai Z G, Wang S Q, Wang J S, et al. *ApJ*, 2016, 817: 132
- [3] 王善钦, 戴子高, 吴雪峰. *天文学进展*, 2015, 33: 205
- [4] Wang S Q, Dai Z G, Wu X F. *ChA&A*, 2016, 40: 141
- [5] 王善钦, 戴子高, 吴雪峰. *天文学进展*, 2015, 33: 319
- [6] Wang S Q, Dai Z G, Wu X F. *ChA&A*, 2016, 40: 439
- [7] Sukhbold T, Woosley S. *ApJ*, 2016, 820: L38
- [8] Chatzopoulos E, Wheeler J C, Vinko J, et al. *ApJ*, 2016, 828: 94
- [9] Leloudas G, Fraser M, Stone N C, et al. *NatAs*, 2016, 1: 2
- [10] Feng Z W, Li H L, Zu X T, et al. *EPJC*, 2016, 76: 212
- [11] Feng Z W, Yang S Z, Li H L, et al. *PhLB*, 2017, 768: 81
- [12] 冯丹丹, 刘门全, 罗志全. *西华师范大学学报: 自然科学版*, 2016, 37: 425
- [13] Suzuki T, Honma M, Mao H, et al. *PhRvC*, 2011, 83: 1887
- [14] Zhang J. *RAA*, 2015, 15: 1483
- [15] 罗志全, 彭秋和. *中国科学A辑*, 1996, 26: 665
- [16] Nabi J U, Rahman M U, Sajjad M. *AcPPB*, 2008, 39: 651
- [17] Fuller G M, Fowler W A, Newman M J. *ApJS*, 1980, 42: 447
- [18] 廖道兵, 张妙静, 李彦, 等. *天文学报*, 2014, 55: 370
- [19] Liao D B, Zhang M J, Li Y, et al. *ChA&A*, 2015, 39: 177
- [20] Seitenzahl I R, Timmes F X, Magkotsios G. *ApJ*, 2014, 792: 10
- [21] Sutherland P G, Wheeler J C. *ApJ*, 1984, 280: 282

Estimation of ^{56}Ni Needed in the Explosion Process of the Super Luminous Supernova ASASSN-15lh

FENG Dan-dan¹ LIU Men-quan¹ LUO Xia² LUO Zhi-quan¹ FENG Zhong-wen¹
TANG De-lin¹

(1 Department of Astronomy, China West Normal University, Nanchong 637002)

(2 Department of Astronomy, Beijing Normal University, Beijing 100875)

ABSTRACT ASASSN-15lh is a super luminous supernova, whose light curve is similar to the type Ia supernova (SN Ia). Since the luminosity of SN Ia is directly related to the decay of ^{56}Ni , in this paper, we consider the de-excitation energy of the new nuclei and calculate the energy generated by the decay of ^{56}Ni in the explosive environment of ASASSN-15lh. The calculated ^{56}Ni mass needed by the ASASSN-15lh explosion is $31.32 M_{\odot}$. This result agrees with the estimation of the mass of $^{56}\text{Ni} \geq 30 M_{\odot}$ derived from the observed light curve of ASASSN-15lh. No agreement has reached for the explosion mechanism of supernova ASASSN-15lh so far. The calculation in this paper provides a reference for the further study on the progenitor and the mechanism of the supernova ASASSN-15lh.

Key words supernovae: general, supernovae: individual: ASASSN-15lh, nuclear reactions, stars: evolution