

doi: 10.3969/j.issn.1000-8349.2013.04.02

# Ia 型超新星的诞生率以及光度与 寄主星系的统计关系

梁文科<sup>1,2,3</sup>, 王建成<sup>1,2</sup>

(1. 中国科学院 国家天文台/云南天文台, 昆明 650011; 2. 中国科学院 天体结构与演化重点实验室, 昆明 650011; 3. 中国科学院大学, 北京 100049)

**摘要:** 当前的研究表明, 在小质量星系或者恒星形成率高的星系中, Ia 型超新星有高的诞生率。没有经过光度经验校正, 在大质量、高金属丰度、年老的、早型演化的星系中的 Ia 型超新星更暗; 但是经过光度校正以后, 亮的超新星更倾向于出现在大质量、高金属丰度、年老的、早型演化的星系中。因为高金属丰度的前身星系统是富中子的, 使得在超新星爆发过程中物质更稳定地燃烧, 这样产生的  $^{56}\text{Ni}$  就很少, 而  $^{56}\text{Ni}$  提供的衰变能是 Ia 型超新星光度的重要来源, 会导致高金属丰度环境下的 Ia 型超新星光变曲线下下降更快而且也更暗; 但是经过光度校正以后, 高金属丰度环境下的 Ia 型超新星更亮。不同星系环境下的金属丰度不同, 因而 Ia 型超新星  $^{56}\text{Ni}$  产生率不同, 这可能是对超新星光度与星系统计关系的最合理解释。综述了 Ia 型超新星的诞生率以及光度与寄主星系的统计关系。

**关键词:** 超新星; 诞生率; 光度; 寄主星系

**中图分类号:** P145.3      **文献标识码:** A

## 1 引 言

十几年前, Perlmutter 和 Riess 等人分别利用 Ia 型超新星作为标准烛光来估计宇宙学距离, 发现了宇宙加速膨胀和暗能量的存在<sup>[1,2]</sup>。最近几年, 几个团组利用更大的样本和更精准的数据进一步验证了这一发现<sup>[3-6]</sup>, 并且拓展到更高红移<sup>[7-12]</sup>。如今, Ia 型超新星已经成为现代宇宙学的基石, 被用来测量众多宇宙学常数和检验各种暗能量模型。

Ia 型超新星是由一颗 C+O 白矮星吸积一颗伴星, 达到钱德拉塞卡质量后导致的热核爆炸现象<sup>[13-17]</sup>。然而, 在细节上还存在很大的争议, 比如爆炸机制、吸积过程、前身系统伴星的构成等<sup>[18]</sup>。测量延迟时标 (Ia 型超新星从前身星系统形成到演化最终爆发的时间) 能够限制双

收稿日期: 2013-03-13; 修回日期: 2013-06-13

资助项目: 973 项目 (2009CB824800); 国家自然科学基金 (11133006, 11163006, 11173054); 中科院政策研究项目 (KJCX2-YW-T24)

星系统的可能性质<sup>[19]</sup>。延迟时标的分布能够通过比较不同恒星形成历史的星系中 Ia 型超新星的诞生率来获得,所以研究寄主星系中 Ia 型超新星的诞生率有重要意义<sup>[20]</sup>。Ia 型超新星峰值光度如果不经校正,会有很大弥散,无法作为精确宇宙学的标准烛光。使用 Phillips 关系<sup>[21]</sup>和颜色-光度关系<sup>[22]</sup>进行校正,可以使超新星的峰值光度弥散小到 0.15 mag;而研究超新星光度与其寄主星系的关系,有助于研究这种弥散的起源,并且进一步减小峰值光度的弥散<sup>[23-25]</sup>,所以研究 Ia 型超新星光度与寄主星系的统计关系有非常重要的意义。

Ia 型超新星的诞生率与寄主星系有很大的相关性。Ia 型超新星诞生率在晚型星系中要高于早型星系<sup>[26, 27]</sup>; Ia 型超新星在高恒星形成率星系中有高的诞生率<sup>[26, 28, 29]</sup>;小质量星系中也有高的 Ia 型超新星的诞生率<sup>[29, 30]</sup>。

通常认为 Ia 型超新星光度与寄主星系星族特性的物理参数相关。光变曲线经过光度归一化校正以后,在约为  $2\sigma$  置信水平上, Ia 型超新星在早型星系中比在晚型星系中更亮<sup>[31-33]</sup>; Ia 型超新星在年老星系中更亮<sup>[34]</sup>; Ia 型超新星在低恒星形成率星系中更亮<sup>[35]</sup>; Ia 型超新星在高金属丰度星系中更亮<sup>[36]</sup>。特别是经过校正的 Ia 型超新星峰值光度与寄主星系质量显著相关,在超过  $3\sigma$  置信水平上, Ia 型超新星在大质量星系中更亮<sup>[35-37]</sup>。

Ia 型超新星光度与其寄主星系的相关性,是与寄主星系本身的环境密切相关。超新星前身星系统周围的金属丰度高低会影响爆炸产生超新星光度强弱,不同寄主星系的尘埃消光差异也会对超新星的观测光度造成很大影响。

第 2 章将阐述和讨论 Ia 型超新星诞生率与寄主星系的相关关系;第 3 章将展示和分析 Ia 型超新星光度与寄主星系的相关关系;最后,本文总结 Ia 型超新星与其寄主星系的统计关系,并讨论和展望未来的研究动向。

## 2 Ia 型超新星诞生率

Ia 型超新星是研究宇宙形成与演化最有力的工具,但是其前身星系统的构成成分的验证还存在很多不确定性<sup>[17]</sup>。而超新星的典型爆炸时标可对理解前身星系统的构成成分提供有力的帮助。这种时标,即延迟时标,是指超新星的前身星从零龄主序阶段开始,演化到发生超新星爆发所需要的时间。延迟时标主要有短延迟时标 ( $t < 420$  Ma) 和长延迟时标 ( $t > 2.4$  Ga)。短延迟时标被认为与寄主星系恒星形成率相关,长延迟时标则被认为与星系的恒星总质量(或年老的星族)相关。为了验证这一理论是否正确,观测上就要靠研究 Ia 型超新星诞生率与寄主星系的关系来确认。如果是长延迟时标,也就是说 Ia 型超新星仅仅是年老星族形成的产物(低质量恒星系统的产物),那么其诞生率应该明显依赖恒星质量,而独立于恒星形成率;如果是短延迟时标,那么其诞生率应该明显依赖于恒星形成率。当前的研究主要从两方面入手:一是直接研究 Ia 型超新星诞生率与寄主星系的星系类型、恒星形成率以及星系质量的关系;另一方面是研究不同红移下的 Ia 型超新星诞生率与宇宙恒星形成历史的关系,主要针对星系团进行研究。

## 2.1 与寄主星系的相关性

2005 年, Mannucci 等人<sup>[26]</sup>通过 2MASS 巡天的低红移样本发现, 在 0.99 的置信水平上, Ia 型超新星诞生率在晚型星系中要比在 E/S0 星系高 20 倍, 并且在  $B - K < 2.6$  mag 蓝星系中的超新星诞生率比  $B - K > 4.1$  mag 星系中高 30 倍; 他们认为 Ia 型超新星诞生率在晚型/不规则星系中高的原因是这些星系中有相当部分的 Ia 超新星源于年轻的恒星成分。他们的发现表明, 在低红移处, 超新星的诞生率非常依赖于星系恒星形成率, 也可以说短延迟时标依赖于恒星形成率, 而在 E/S0 星系中也有超新星的诞生, 表明长延迟时标的存在。

2006 年, Sullivan 等人<sup>[28]</sup>用  $0.2 < z < 0.75$  的 SNLS 样本发现, Ia 型超新星诞生率依赖于星系质量和星系比恒星形成率 (单位恒星质量的恒星形成率, specific star formation rates, sSFR)。其线性关系是:  $SNR(t) = AM(t) + b\dot{M}(t)$ , 其中  $A = (5.3 \pm 1.1) \times 10^{-14} (H/70)^2 \text{SNe} M_{\odot}^{-1} \cdot \text{a}^{-1}$ ,  $B = (3.9 \pm 0.7) \times 10^{-4} (H/70)^2 \text{SNe} (M_{\odot}^{-1} \cdot \text{a}^{-1})^{-1} \cdot \text{a}^{-1}$ ,  $M(t)$  为  $t$  时间的寄主星系质量,  $\dot{M}$  为最近 0.5 Ga 的平均 sSFR。2011 年, Smith 等人<sup>[29]</sup>用 SDSS 光谱数据认证的  $0.05 < z < 0.25$  的 342 颗 Ia 型超新星, 发现恒星形成不活跃星系 (即 passive galaxy, 其恒星形成率非常低) 中的 Ia 型超新星诞生率满足  $SNR \propto M^{0.67}$ , 而恒星形成星系中的 Ia 型超新星诞生率满足  $SNR \propto M^{0.94}$ 。他们也发现单位质量的 Ia 型超新星诞生率是恒星形成率的强相关函数, 相对于恒星形成不活跃星系, Ia 型超新星更多地出现在恒星形成星系和星爆星系中。图 1 是 Smith 等人的结果。

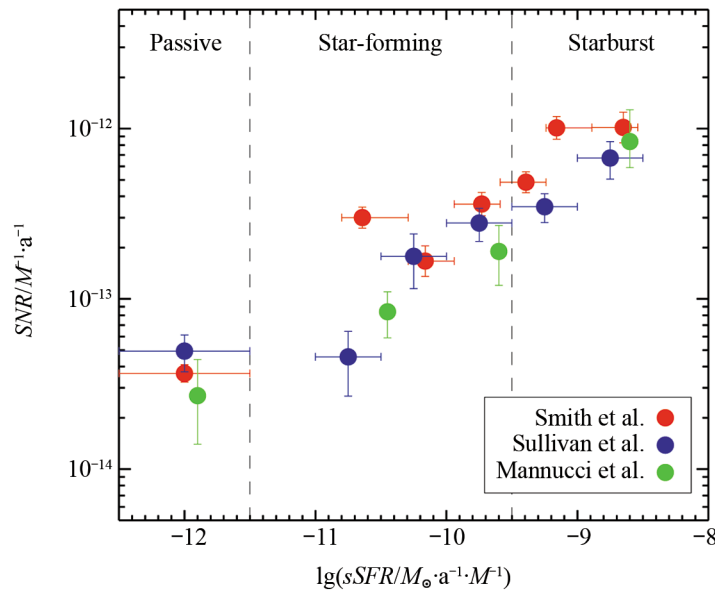


图 1 Ia 型超新星诞生率与寄主星系恒星形成率的函数<sup>[29]</sup>

红色的圆是 Smith 等人<sup>[29]</sup>用 SDSS 做的结果, 蓝色的圆是 Sullivan 等人<sup>[28]</sup>依据 SNLS 做的数据, 绿色的圆是 Mannucci 等人<sup>[26]</sup>在低红移做的测量。

2011 年, Li 等人<sup>[38]</sup>利用 LOSS 样本发现 “rate-size” 关系, 即在大质量星系中, Ia 型超新星有较低的诞生率。2012 年, Graur 等人<sup>[39]</sup>从 SDSS 释放的第 7 期数据里 70 000 多星系光谱,

认证了 90 多个  $z \approx 0.1$  的 Ia 型超新星, 他们进一步证实了 Li 等人的“rate-size”关系。

这些结果表明 Ia 型超新星的诞生率由短延迟时标 (与星系恒星形成率有关) 和长延迟时标 (与星系质量有关) 共同决定。Ia 型超新星的诞生率在恒星形成率高的星系较高, 在小质量星系中更高, 而且这些关系不受红移演化的影响, 暗示两种时标并存, 这一观点也被其他大量类似工作所支持<sup>[40, 41]</sup>。

超新星延迟时标的分布是指 Ia 型超新星的诞生率与延迟时标的函数, 即超新星诞生率与延迟时标从演化到发生超新星爆发所需要时间的关系。Mannucci 等人<sup>[26, 42]</sup>用诞生率与延迟时标  $\approx t^{-1}$  的幂律谱, 能很好地拟合 Ia 型超新星诞生率在蓝星系的增长; Li 等人<sup>[38]</sup>在 2011 年发现“rate-size”的关系, 也可以用  $\approx t^{-1}$  的幂律谱来很好地解释。这表明 Ia 型超新星的诞生率与超新星的延长时标负相关, 即延长时标越长, Ia 型超新星的诞生率越低。

## 2.2 与星系团的相关性

研究星系团能为研究超新星延迟时标的分布提供唯一的环境。星系团里的星族主要由年老的早型星系主导, 特别是在星系团核区有非常少的恒星形成。因为星系团里几乎没有恒星形成, 其恒星形成历史比场星系更为简单, 所以研究延迟时标的分布将少受恒星形成历史的影响, 而且研究星系团里的 Ia 型超新星对于理解星云物质的金属丰度演化和恒星形成历史也有重要意义。

2007 年, Sharon 等人<sup>[43]</sup>通过研究 100 多个 Abell 星系团, 发现 6 个新的 Ia 型超新星, 他们认为发现了星系团中较低的 Ia 型超新星诞生率同邻近椭圆星系中的 Ia 型超新星诞生率类似。然而, 2008 年, Mannucci 等人<sup>[44]</sup>发现, 在 0.98 的置信水平上, 星系团里早型星系中 Ia 型超新星诞生率要比场星系早型星系中的高 3 倍, 这可能是因为早型团星系之间的相互碰撞会导致形成新的大质量恒星以及改变双星演化的特性。2008 年, Garlberg 等人<sup>[45]</sup>对 SNLS 样本做了 Ia 型超新星星系团寄主星系相对于 Ia 型超新星场星系的角度交叉相关函数的研究, 结果表明 Ia 型超新星与星系团的相关性要大于与场星系的相关性。2010 年, Han 等人<sup>[46]</sup>利用邻近 Abell 星系团, 研究星系团对 Ia 型超新星寄主星系环境的影响, 他们通过研究最近邻星系的距离分布, 发现 Ia 型超新星最可能存在于没有近邻星系的孤立星系中, 而且超新星更可能存在于离大质量星系团比离主星系更近的区域。Garlberg 和 Han 等人的结果进一步支持 Mannucci 等人的结果, 表明超新星的寄主星系位于星系团的可能性要大于场星系的可能性。此外, Dilday 等人<sup>[47]</sup>对超新星在星系团中早型星系与早型场星系中的径向分布进行比较, 发现超新星在星系团核区早型星系中的诞生率更高。

Dilday 等人<sup>[47]</sup>使用  $0.5 \leq z \leq 0.9$  的 SDSSII 数据进行研究, 也得到超新星的诞生率与前人 (不同红移处) 一致的结果。2010 年 Sharon 等人<sup>[48]</sup>用  $0.5 < z < 0.9$  的超新星数据研究星系团中的超新星, 发现高红移处超新星的诞生率与低红移处一致。这些结果表明超新星在星系团中的诞生率不随红移演化。另外, 星系团中 Ia 型超新星诞生率作为时间延迟时标的分布也为幂律谱的形式<sup>[49, 50]</sup>。

### 3 Ia 型超新星光度与寄主星系的相关性

#### 3.1 Ia 型超新星的峰值光度校正

因为正常 Ia 型超新星的峰值光度有较小的相对弥散, 约 0.3 mag, 所以可以作为较精确的宇宙学距离指示器, 即标准烛光。宇宙学测距要求更高的精度, 就必须减小峰值光度的弥散, 这就需要对峰值光度按照一定的归一化方式处理, 建立某些与距离无关的可观测量之间的联系<sup>[51]</sup>。

在实际的超新星宇宙学观测处理过程中, 人们一般采用经验关系进行光度归一化校正。一般使用两种经验关系修正: (1) Phillips 关系<sup>[21, 52, 53]</sup>, 即光度极大后绝对星等与光变曲线下降率  $\Delta m_{15}$  有正相关, 其中,  $\Delta m_{15}$  是峰值绝对星等与从光度极大到之后 15 d 时的星等差。光变曲线下降率越大, 峰值绝对星等也越大, 换句话说曲线越宽, 对应的峰值绝对星等也越大。(2) 颜色-光度关系<sup>[22, 54, 55]</sup>, 即峰值绝对星等与峰值阶段色余  $E(B - V)$  有线性关系。峰值阶段曲线颜色越蓝, 峰值绝对星等越大。

应用这两种经验关系进行校正称为光度归一化校正, 它可以使峰值光度的弥散小于 0.15 mag; 实际上随着精细测距宇宙学要求的提高, 需要进一步减小这一弥散, 发现其他与距离无关的可观测量之间的联系。人们发现 Ia 型超新星的峰值光度与寄主星系性质有比较好的相关性。寄主星系的恒星形成率、质量等参数可以用来校正峰值光度, 所以研究 Ia 型超新星光度与寄主星系的统计关系就有更重要的意义。

在研究 Ia 型超新星光度与寄主星系相关关系时, 需要定义哈勃残差 (Hubble residuals):

$$HR = \mu_B - \mu_Z, \quad (1)$$

$\mu_B$  为拟合得到的每个超新星的距离模数,  $\mu_Z$  为红移  $z$  处用最优宇宙学模型得到的距离模数。经过光度归一化校正以后, 越亮的超新星有越小的残差, 而越暗的超新星有越大的残差。

#### 3.2 与星系类型的相关性

星系形态学分类主要是把星系按照传统的演化观点分为早型星系 (E/S0 星系) 和晚型星系 (Sa—Sd/Irr 星系)。高红移的星系很难用目视分类, 只能借助其他分类方法, 即模型化分类和非模型化分类, 而目视分类通常对低红移寄主星系开展研究。

研究发现, 没有经过光度校正的 Ia 型超新星在早型星系中有更窄的光变曲线宽度, 光度经过最大值以后更快地下降<sup>[56, 57]</sup>。

早期研究的样本都很小, 小于 50 个 Ia 型超新星, 没有足够的证据显示经过光变曲线归一化校正的光度随寄主星系变化<sup>[58]</sup>。最近, 利用更大的、观测精度更高的样本, 显示了光度随寄主星系的变化。经过光度校正的 Ia 型超新星在早型星系中反而更亮。2009 年, Hicken 等人<sup>[33]</sup> 选用更大的低红移样本, 他们把寄主星系分为 3 类: E/S0、Sa—Sc、Scd/Sd/Irr, 发现经过光度校正以后, Ia 型超新星在 Scd/Sd/Irr 星系中要比在 E/S0 星系中暗 ( $2\sigma$  的置信水平)。2012 年, Galbany 等人<sup>[59]</sup> 选取 SDSS 内中红移寄主星系样本, 用模型化分类方法和聚集度指数方法, 将寄主星系分为 E/S0 星系和晚型星系。他们发现 Ia 型超新星在 E/S0 星系有更低的尘埃

消光,而且比在晚型星系中有更小的哈勃残差,即经过光度校正后更亮。2012年, Meyers 等人<sup>[60]</sup>用哈勃望远镜研究高红移 Ia 型超新星与其寄主星系的关系。他们用基尼系数和非对称指数等参数方法区分椭圆星系和晚型星系;首次在红移  $z > 0.9$  处,发现经过光度校正后的椭圆星系比晚型星系更亮,并且发现位于星系团里的椭圆寄主星系几乎没有尘埃,从而暗示早型场星系几乎不受尘埃红化的影响。以上三种不同红移处的研究也同时发现, Ia 型超新星进行最优化宇宙学  $\chi^2$  拟合,在早型星系中比在晚型星系中有更小的弥散。这暗示着未来可以研究早型星系中 Ia 型超新星的光度,有可能进一步提高宇宙学测距精度。

### 3.3 与星系恒星形成率的相关性

Ia 型超新星光度与寄主星系的尘埃有关,而寄主星系恒星形成率的高低与尘埃含量相关(恒星形成率高的星系尘埃较多,而恒星形成率低的星系尘埃较少),这样寄主星系的恒星形成率高低就会对 Ia 型超新星光度产生重要影响。寄主星系的恒星形成率一般是通过 spectral energy distribution (SED) 能谱拟合获得的。SED 能谱拟合是指对每个星系的宽波段流量做一个标准的光谱能量分布拟合,然后根据拟合的最好结果,对星系的恒星形成率和质量进行合理的估算。

没有经过光度校正的 Ia 型超新星在高恒星形成率星系中有更宽的光变曲线宽度,本征光度更亮,光度经过最大值以后更慢地下降。2009年, Neil 等人<sup>[61]</sup>选取 168 个近邻 Ia 型超新星的样本,发现高恒星形成率的寄主星系中 Ia 型超新星有更宽的光变曲线,峰值光度下降得更慢。2010年, Lampeitl 等人<sup>[35]</sup>用 SDSSII 数据得到 361 个 Ia 型超新星的样本,在更高的置信水平上发现寄主星系恒星形成率高低与超新星光变曲线宽度相关,在恒星形成不活跃星系中, Ia 型超新星更暗、曲线下降趋势更快;而在恒星形成活跃星系中(高恒星形成率),它们更亮,曲线下降趋势更慢。

经过光度校正的 Ia 型超新星在低恒星形成率星系要比在高恒星形成率星系中的亮 ( $2\sigma$  的置信水平)。2010年, Lampeitl 等人<sup>[35]</sup>证实,经过光度校正以后,在大于  $2\sigma$  的置信水平上, Ia 型超新星在恒星形成不活跃星系中要比恒星形成活跃星系中亮 0.1 mag。2010年, Sullivan 等人<sup>[36]</sup>用中高红移的 SNLS 样本,发现经过光度校正以后,在  $2.6\sigma$  的置信水平上,低恒星形成率的样本要比高恒星形成率的更亮。2011年, Andrea 等人<sup>[62]</sup>用 SDSSII 样本发现,在大于  $3\sigma$  的置信水平上,在低恒星形成率星系中的 Ia 型超新星要比高恒星形成率星系中的亮 0.1 mag,如图 2 所示。

### 3.4 与星系年龄的相关性

寄主星系的年龄可能是影响 Ia 型超新星的另一个重要因素。早在 2005年, Gallagher 等人<sup>[57]</sup>就从很多证据中发现,星系年龄能够影响 Ia 型超新星峰值光度。

没有光度校正的 Ia 型超新星在年老星系中有更窄的光变曲线宽度,本征光度更暗,光度经过最大值以后下降得更快<sup>[45,57]</sup>。

经过光度校正的 Ia 型超新星,在较年老的星系中的要比在较年轻星系中的亮。2009年, Neil 等人<sup>[61]</sup>选取 168 个低红移样本,选用可见光和 UV 波段,沿用和 Gallagher 等人采用光度权重的方法计算寄主星系年龄。他们发现由 22 个低消光的寄主星系组成的次样本,

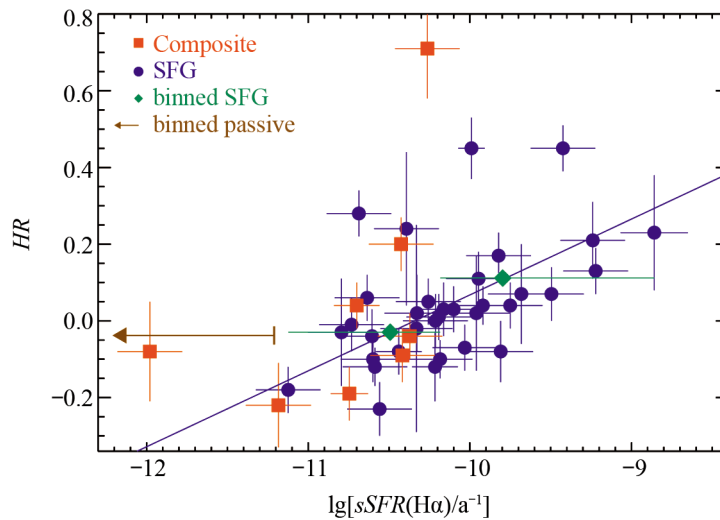


图 2 哈勃残差作为单位寄主星系质量恒星形成率的函数<sup>[62]</sup>

横坐标表示单位星系质量恒星形成率, 纵坐标表示哈勃残差。经过归一化光度校正之后的 Ia 型超新星有更负的哈勃残差。蓝色圆表示恒星形成星系, 红色方块表示复合星系, 绿色方块标注的截断代表一定年龄范围内的恒星形成星系的平均残差, 虚线代表恒星形成星系最好的拟合曲线。

在  $2.1\sigma$  的置信水平上, 年龄越老的寄主星系中, 经过光度校正的 Ia 型超新星越亮。2011 年, Gupta 等人<sup>[34]</sup>研究 SDSSII 获取的 206 个 Ia 型超新星的中红移样本 ( $0.01 < z < 0.42$ ), 他们利用 SED 能谱拟合获取寄主星系质量, 然后根据质量权重获取寄主星系平均年龄。他们的结果显示, 在  $1.9\sigma$  的置信水平上, 经过光度校正后, 较亮的 Ia 型超新星趋向于在更年老的寄主星系中出现, 如图 3 所示。

### 3.5 与星系质量的相关性

最近的研究显示寄主星系质量与 Ia 型超新星光度有很强的相关性。这一关系可能是由质量-金属丰度关系引起的。寄主星系质量一般采用 SED 能谱拟合寄主星系光度的光学积分来推算。

在大质量星系中, 没有经过光度校正的 Ia 型超新星有更窄的光变曲线宽度, 本征光度更暗, 光度经过最大值以后下降得更快<sup>[35, 37]</sup>。

对于经过光度校正后的 Ia 型超新星, 在大质量星系中要比在小质量星系中的亮 ( $3\sigma$  的置信水平)。2010 年, Kelly 等人<sup>[37]</sup>用 70 个低红移 ( $0.015 < z < 0.08$ ) 的 Ia 型超新星样本进行研究, 发现在  $2.5\sigma$  的置信水平, 经过光度校正后的哈勃残差和寄主星系质量相关, 在大质量的寄主星系中要比小质量星系的亮 10%。2010 年, Lampeitl 等人<sup>[35]</sup>用 SDSSII 的 361 个中低红移 ( $z < 0.21$ ) 的 Ia 型超新星样本进一步证实了 Kelly 等人的结果, 他们发现在大于  $4\sigma$  的置信水平, 经过校正的哈勃残差与寄主星系质量相关。图 4 展示了这一结果, 超新星寄主星系的质量越大, 其哈勃残差越小。2011 年, Gupta 等人<sup>[34]</sup>使用 206 个 SDSSII 的 Ia 型超新星巡天数据, 进一步验证了以上结论。在高红移处, Sullivan 等人<sup>[36]</sup>得到了与上述中低红移样本一致

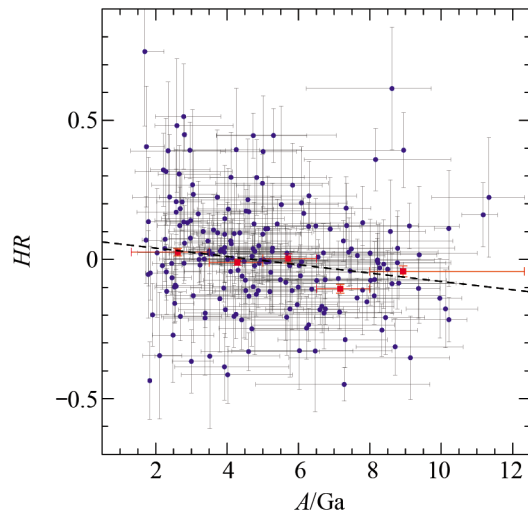


图3 哈勃残差作为寄主星系年龄的函数<sup>[34]</sup>

横坐标表示寄主星系质量权重所计算的寄主星系平均年龄，纵坐标表示哈勃残差。红色方块标注的截断代表一定年龄范围内的平均残差，虚线代表最好的拟合曲线。

的结果，他们采用 SNLS3 中 195 个高红移样本以及低红移的 110 个 Ia 型超新星样本，得出结论：在约为  $4\sigma$  的置信水平，经过光变曲线校正的 Ia 型超新星，在大质量寄主星系中的要比在小质量寄主星系中的亮 0.08 mag。

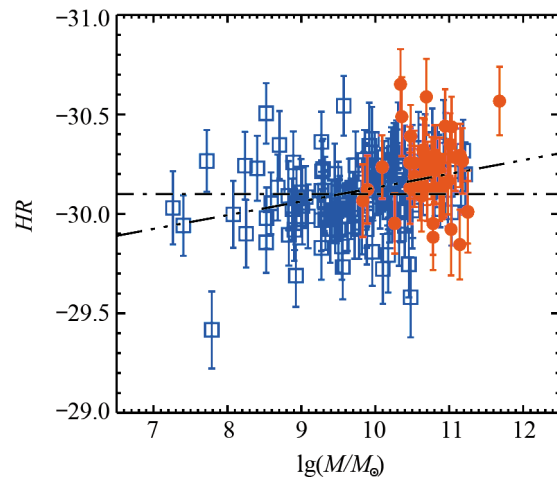


图4 哈勃残差作为寄主星系质量的函数<sup>[35]</sup>

横坐标表示寄主星系质量对数值，纵坐标表示哈勃残差。红色实心圆表示恒星形成不活跃星系，蓝色的空心方块表示恒星形成星系，虚线代表最好的拟合曲线。倾斜的点虚线是对最好的宇宙学拟合结果得到各个超新星的残差关于星系质量的线性拟合结果，而水平的点虚线表示最优宇宙学拟合得到的整个样本的归一化绝对星等（是一个相对值），与星系质量无关。



### 3.6 与星系金属丰度的相关性

Ia 型超新星的爆发由  $^{56}\text{Ni}$  的衰变提供能量, 本征光变和下降率最主要由爆发阶段合成的  $^{56}\text{Ni}$  质量决定。研究 Ia 型超新星周围环境的金属丰度对其光度的影响更为关键。

在高金属丰度星系中, 未经归一化光度校正的 Ia 型超新星有更窄的光变曲线宽度, 本征光度更暗, 光度经过最大值以后下降得更快<sup>[45, 61]</sup>。

然而, 2010 年, Sullivan 等人<sup>[36]</sup>分别使用低红移和中高红移的 SNLS3 样本, 沿用 Howell 等人于 2009 采取的质量金属丰度关系估计气相金属 O/H 丰度, 结果发现在大于  $3\sigma$  的置信水平上, 经过标准光度校正以后的 Ia 型超新星, 在高金属丰度星系中的比在低金属丰度星系中的更亮。图 5 显示了金属丰度越高的星系, 其残差值越小。其他作者在中低红移星系中也得到了同样的结果<sup>[30, 62]</sup>。2011 年, Konishi 等人<sup>[30]</sup>选取 SDSSII 样本中经过光谱认证的 118 颗 Ia 型超新星, 用流量率  $R = [\text{N}_{\text{II}}]\lambda 6585 / [\text{O}_{\text{II}}]\lambda 3727$  来估算气相金属 O/H 丰度, 结果表明, 经过标准光度校正以后, 在  $1.8\sigma$  的置信水平上, 在富金属星系 ( $\lg(\text{O}/\text{H})+12 > 9$ ) 中的 Ia 型超新星要比贫金属星系中的亮 0.13 mag。2011 年, Andrea 等人<sup>[62]</sup>也选用 SDSSII 样本, 但是他们最小化其样本偏差, 使用流量率  $R = [\text{N}_{\text{II}}]\lambda 6585 / [\text{O}_{\text{II}}]\lambda 3727$  估算金属丰度, 从最终的 40 个发射线星系样本得出结论, 在大于  $3\sigma$  的置信水平上, 高金属丰度星系中经过标准光度校正以后的 Ia 型超新星更亮。

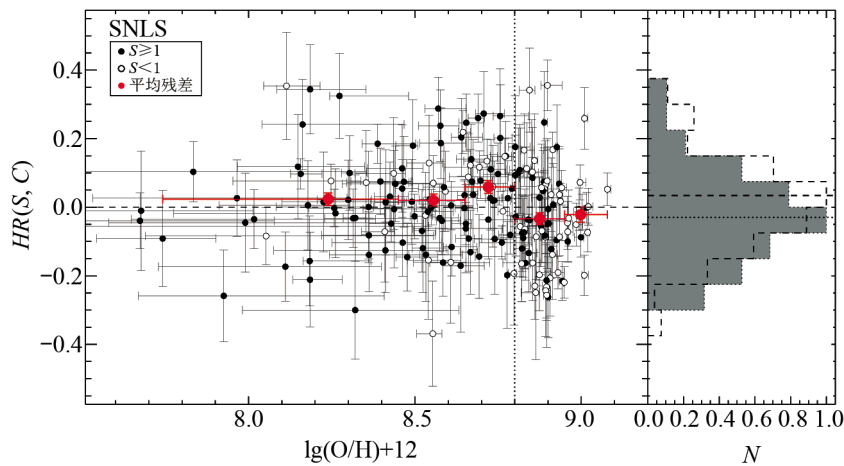


图 5 哈勃残差作为寄主星系金属丰度的函数<sup>[36]</sup>

左侧图横坐标表示寄主星系气相金属丰度, 纵坐标表示哈勃残差。红色圆标注的截断代表的一定金属丰度范围内的平均残差。右侧柱状图灰色部分显示 Ia 型超新星分别在低金属丰度和高金属丰度星系的总的残差, 右侧柱状图白色部分显示 Ia 型超新星分别在高金属丰度和高金属丰度星系的总的残差分布。图中  $S$  和  $C$  为计算残差所使用的程序参数。  $S$  表征光变曲线的形状, 越大的  $S$  表示超新星光变曲线有慢的下降率, 而  $C$  描述超新星的峰值阶段的色余量。

### 3.7 Ia 型超新星光度与寄主星系相关的原因分析

随着宇宙学年龄的增长, 或者说随着宇宙学红移演化, 由于星系并合, 星系的质量会不断增大; 由于化学演化不断增加同时损失率降低, 所以星系的金属丰度也随之增大; 而随着金属丰度的不断增加, 相应气体尘埃不断减少, 导致恒星形成率不断降低; 由于星系并合过

程以及其他作用,星系的哈勃形态也不断演化,低红移处早型星系比例大于高红移处。所以,星系的各种特性是相联系的,整体趋势是:如果星系的金属丰度比较高,那么星系的恒星形成率一般也比较低,而且年龄、质量也会比较大,反过来也是一样。

因为 Ia 型超新星的爆发是由  $^{56}\text{Ni}$  的衰变提供能量,所以其前身星系统如果有更高的  $^{56}\text{Ni}$  质量,那么超新星就会有更高的光度,并且光变曲线会有更慢的下降率。因为高金属丰度的前身星系统一般是富中子的,能制造更多充分燃烧的产物,这样产生的  $^{56}\text{Ni}$  就很少(因为在没有充分燃烧的情况下才会有大量的  $^{56}\text{Ni}$  产生)。Timmes 等人<sup>[63]</sup> 2003 年的理论得出高金属丰度前身星系统制造更少的  $^{56}\text{Ni}$  质量这一结论。Howell 等人<sup>[64]</sup> 在 2009 年拓展和检验了这一模型。Howell 等人用中红移 ( $0.2 < z < 0.75$ ) 的超过 100 个 Ia 型超新星样本,采用 SED 能谱拟合来推测样本的寄主星系质量;根据寄主星系质量-金属丰度关系(越高的寄主星系质量有越高的金属丰度<sup>[65]</sup>)来推断寄主星系气相金属 O/H 丰度。根据 Ia 型超新星峰值光度和上升时间推断  $^{56}\text{Ni}$  质量,最终计算寄主星系金属丰度和  $^{56}\text{Ni}$  质量的相关关系。他们的研究表明,更大质量、更高金属丰度、更年老的寄主星系有低的  $^{56}\text{Ni}$  质量,从而有更暗、更快下降的 Ia 型超新星光变曲线(未经标准光度校正)。图 6 展示寄主星系金属丰度与经过颜色关系校正得到的  $^{56}\text{Ni}$  质量的关系。2009 年,Neil 等人<sup>[61]</sup> 使用近邻宇宙的 Ia 型超新星样本,同样采用质量-金属丰度关系,推断寄主星系气相金属 O/H 丰度,结论与 Howell, Timmes 等人的一致。

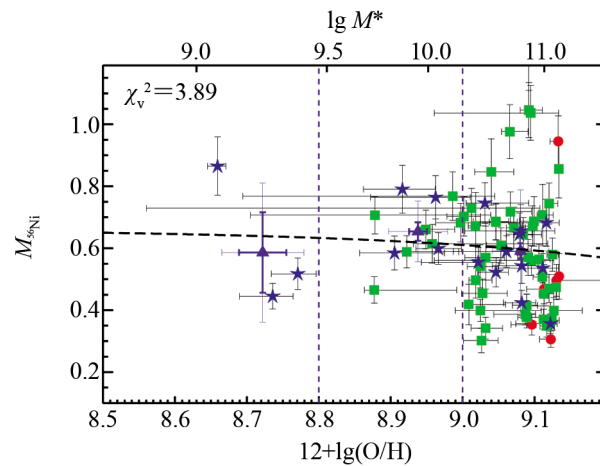


图 6 经过颜色关系校正得到的  $^{56}\text{Ni}$  质量作为寄主星系金属丰度的函数<sup>[61]</sup>

红色的实心圆代表恒星形成不活跃星系,蓝色的实心五角星表示恒星形成率极高的星系,绿色的实心方块代表有适中的恒星形成率的星系。

图 7 为 Kasen 等人<sup>[66]</sup> 所做的理论模型展示的两种不同金属丰度取值的影响,其中红色的实心点取 3 倍的太阳金属丰度值,而蓝色的实心点取 0.3 倍的太阳金属丰度值,由黑色实线连接的是不同金属丰度取值但其他条件相同的爆炸模型。可以看到,由同一实线连接的红色点和蓝色点,蓝色点代表的模型总是比红色点代表的有更慢的下降率和更高的峰值光度,因此,高金属丰度的前身星系统确实会制造更窄更暗的光变曲线。图 7 中,红色的实线描述的是 3 倍的太阳金属丰度值环境下的 Phillips 关系,而蓝色的实线描述的是 0.3 倍的太阳金属

丰度值环境下的 Phillips 关系, 当  $\Delta m_{15} < 1.5$  时, 红色的实线总在蓝色的实线的上方, 所以, 固定  $\Delta m_{15}$  取值时, 金属丰度越高的模型制造出更亮的绝对星等; 这意味着, 经过光度校正以后 (应用 Phillips 关系, 校正两种不同金属丰度模型下的  $\Delta m_{15}$  取相同的值), 更高金属丰度的超新星反而会有更高的光度。因此, 金属丰度可能是影响 Ia 型超新星光度的本质原因。寄主星系恒星形成率越低, 其年龄、质量也越大, 而且金属丰度就也会更高, 这样  $^{56}\text{Ni}$  量就较少, 所以有更暗、下降更快的 Ia 型超新星光变曲线 (未经光度校正); 但是经过光度校正以后, 由 Kasen 所模拟的结果可知, 更高金属丰度的超新星更亮。

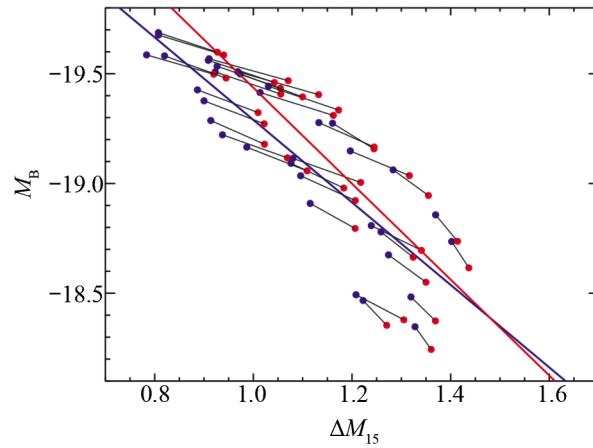


图 7 Ia 型超新星金属丰度对 Phillips 关系的影响<sup>[66]</sup>

图中横坐标表示 B 波段的光变曲线下落率  $\Delta m_{15}$ , 纵坐标表示 B 波段绝对星等。

## 4 总 结

综上所述, Ia 型超新星诞生率和光度特性与寄主星系的性质密切相关。质量较大的寄主星系有较低的 Ia 型超新星诞生率, 高恒星形成率的寄主星系有更高的 Ia 型超新星诞生率。Ia 型超新星的诞生率可以由短延迟时标和长延迟时标共同来决定; 在场星系和星系团中, Ia 型超新星的诞生率与超新星的延长时标负相关, 具有越长的延长时标, Ia 型超新星的诞生率越低。没有经过光度经验校正, 在大质量、高金属丰度、年老的、早型演化的星系中的 Ia 型超新星更暗; 然而光变曲线经过光度归一化校正以后, 较亮的超新星倾向出现在大质量、高金属丰度、年老、早型演化的星系中。不同星系环境下的金属丰度差异可能是影响 Ia 型超新星光度的本质原因。

Ia 型超新星诞生率与寄主星系的相关性是否取决于寄主星系的金属丰度, 观测上还没有定论。Cooper 等人<sup>[67]</sup>得到 Ia 型超新星更倾向形成于低密度区域的结果, 暗示 Ia 型超新星更倾向于出现在贫金属系统中。Ia 型超新星光度与寄主星系的相关性, 不同星系环境下  $^{56}\text{Ni}$  的含量高低可能是影响超新星光度的最本质原因。

当前研究把星系的金属丰度作为 Ia 型超新星的金属丰度, 是否前身星系统的金属丰度与寄主星系的金属丰度存在较大差异呢? 星系从中心向外, 径向金属丰度不断降低, 理论上在寄主星系的不同径向处, Ia 型超新星有不同的金属丰度, 测量 Ia 型超新星在寄主星系的径向位置, 比较 Ia 型超新星的诞生率或者光度与寄主星系径向位置的相关性, 得到的结果可能会很有研究价值。而且, 由于 Ia 型超新星光度与其星系环境密切相关, 可以把星系的质量或者恒星形成率作为除了 Phillips 关系和颜色-光度关系以外的第 3 个参数, 来校正超新星光度, 能更好地减小超新星峰值光度的弥散。

国内学者近年来对 Ia 型超新星与爆发环境的关系做了很多研究。王博等人<sup>[68]</sup>经研究发现, 未经光度归一化校正, 含有高质量的  $^{56}\text{Ni}$  超新星更亮, 而且本征更亮的超新星更趋向诞生于晚型星系; 王博等人<sup>[69]</sup>也对超新星诞生率进行了研究, CO 白矮星吸积正常核星的前身星模型能够制造短延迟时标的超新星; 王博和韩占文<sup>[70]</sup>也发现在这种前身星模型下, 高金属丰度环境下的超新星有更高的诞生率。2013 年, 王晓峰等人<sup>[71]</sup>发现超新星光谱差异与诞生环境有非常大的关系, 这一成果发表在 *Science* 上, 他们发现, 高速超新星比正常速度的超新星更倾向于出现在星系中更靠近内部和更亮的区域, 而且高速超新星也更倾向于存在于更大、更亮的寄主星系中。

## 致谢

作者感谢审稿老师的认真审阅以及提出的宝贵意见, 感谢期刊编辑认真细致的文字校正工作。感谢秦龙华和袁尊理对文章提出的修改意见。

## 参考文献:

- [1] Riess A G, Filippenko A V, Challis P, et al. *ApJ*, 1998, 116: 1009
- [2] Perlmutter S, Aldering G, Goldhaber G, et al. *ApJ*, 1999, 517: 565
- [3] Astier P, Guy J, Regnault N, et al. *A&A*, 2006, 447: 31
- [4] Wood-Vasey W M, Miknaitis G, Stubbs C W, et al. *ApJ*, 2007, 666: 694
- [5] Kessler R, Becker A C, Cinabro D, et al. *ApJS*, 2009, 185: 32
- [6] Conley A J, Guy J, Sullivan M, et al. *ApJS*, 2011, 192: 1
- [7] Knop R A, Aldering G, Amanullah R, et al. *ApJ*, 2003, 598: 102
- [8] Tonry J L, Schmidt B P, Barris B, et al. *ApJ*, 2003, 594: 1
- [9] Riess A G, Strolger L G, Tonry J, et al. *ApJ*, 2004, 600: L163
- [10] Barris B J, Tonry J L. *ApJ*, 2004, 613: L21
- [11] Amanullah R, Lidman C, Rubin D, et al. *ApJ*, 2010, 716: 712
- [12] Suzuki N, Rubin D, Lidman C, et al. *APJ*, 2012, 746: 85S
- [13] Hoyle F, Fowler W A. *ApJ*, 1960, 132: 565
- [14] Whelan J, Iben I J. *ApJ*, 1973, 186: 1007
- [15] Branch D, Livio M, Yungelson L R, et al. *PASP*, 1995, 107: 1019
- [16] Yungelson L, Livio M. *ApJ*, 1998, 497: 168
- [17] Hillebrandt W, Niemeyer J C. *ARA&A*, 2000, 38: 191
- [18] Alloin D M, Gieren W. *Stellar Candles for the Extragalactic Distance Scale*. Berlin: Springer, 2003: 203
- [19] Greggio L. *A&A*, 2005, 441: 1055

- [20] Gal-Yam A, Maoz D. *MNRAS*, 2004, 347: 942
- [21] Phillips M M. *ApJ*, 1993, 413: L105
- [22] Riess A G, Press W H, Kirshner R P. *ApJ*, 1996, 473: 88
- [23] Guy J, Astier P, Baumont S, et al. *A&A*, 2007, 466: 11
- [24] Jha S, Riess A G, Kirshner R P. *ApJ*, 2007, 659: 122
- [25] Conley A, et al. *ApJ*, 2008, 681: 482
- [26] Mannucci F, et al. *A&A*, 2005, 433: 807
- [27] Yasuda N, Fukugita M. *ApJ*, 2010, 139: 39
- [28] Sullivan M, et al. *ApJ*, 2006, 648: 868
- [29] Smith M, Nichol R C, Dilday B, et al. *ApJ*, 2012, 755: 61
- [30] Konishi K, David C, Peter M, et al. <http://arxiv.org/abs/1101.4269>, astro-ph/11014269, 2011
- [31] Ivanov V D, Hamuy M, Pinto P A. *ApJ*, 2000, 542: 588
- [32] Jha S, Branch D, Chornock R, et al. *AJ*, 2006, 132: 189
- [33] Hicken M, Wood-Vasey W M, Blondin S, et al. *ApJ*, 2009, 700: 1097
- [34] Gupta R R, D'Andrea C B, Sako M, et al. *ApJ*, 2011, 740: 92
- [35] Lampeitl H, Smith M, Nichol R C, et al. *ApJ*, 2010, 722: 566
- [36] Sullivan M, Conley A, Howell D A, et al. *MNRAS*, 2010, 406: 782
- [37] Kelly P L, Hicken M, Burke D L, et al. *ApJ*, 2010, 715: 743
- [38] Li W, Chornock R, Leaman J, et al. *MNRAS*, 2011b, 412: 1473
- [39] Graur O, Maoz D. *MNRAS*, 2013, 435: 689
- [40] Maoz D, Mannucci F, Li W, et al. *MNRAS*, 2011, 412: 1508
- [41] Li W, Leaman J, Chornock R, et al. *MNRAS*, 2011, 412: 1441
- [42] Mannucci F, Della Valle M, Panagia N. *MNRAS*, 2006, 370: 773
- [43] Sharon K, Gal-Yam A, Maoz D, et al. *ApJ*, 2007, 660: 1165
- [44] Mannucci F, Maoz D, Sharon K, et al. *MNRAS*, 2008, 383: 1121
- [45] Gallagher J S. *ApJ*, 2008, 685: 752
- [46] Han D-H, Park C, Choi Y-Y, et al. *ApJ*, 2010, 724: 502
- [47] Dahlen T, Strolger L-G, Riess A G. *ApJ*, 2008, 681: 462
- [48] Sharon K, Gal-Yam A, Maoz D, et al. *ApJ*, 2010, 718: 876
- [49] Maoz D, Sharon K, Gal-Yam A. *ApJ*, 2010, 722: 1879
- [50] Barbary K, Aldering G, Amanullah R, et al. *ApJ*, 2012b, 745: 32
- [51] 李宗伟, 王晓峰. *物理学进展*, 2010, 30: 3
- [52] Phillips M M, Lira P, Suntzeff N B, et al. *AJ*, 1999, 118: 1766
- [53] Howell D A, Sullivan M, Conley A, et al. *ApJ*, 2007, 667: L37
- [54] Tripp R. *A&A*, 1998, 331: 815
- [55] Wang L. *ApJ*, 2005, 635: L33
- [56] Hamuy M, Trager S C, Pinto P A, et al. *AJ*, 2000, 120: 1479
- [57] Gallagher J S, Garnavich P M, Berlind P, et al. *ApJ*, 2005, 634: 210
- [58] Sullivan M, Ellis R S, Aldering G, et al. *MNRAS*, 2003, 340: 1057
- [59] Galbany L, Miquel R, Ösman L, et al. *ApJ*, 2012, 755: 125G
- [60] Meyers J, Aldering G, Barbary K, et al. *ApJ*, 2012, 750: 1M
- [61] Neill J D, Sullivan M, Howell D A, et al. *ApJ*, 2009, 707: 1449N
- [62] D'Andrea C B, Gupta R R, Sako M, et al. *ApJ*, 2011, 743: 172D
- [63] Timmes F X, Brown E F, Truran J W. *ApJ*, 2003, 590: L83
- [64] Howell D A, Sullivan M, Brown E F, et al. *ApJ*, 2009, 691: 661
- [65] Tremonti C A, Heckman T M, Kauffmann G, et al. *ApJ*, 2004, 613: 898
- [66] Kasen D, Röpke F K, Woosley S E. *Nature*, 2009, 460: 869
- [67] Cooper M C, Newman J A, Yan R. *ApJ*, 2009, 704: 687
- [68] Wang B. *RAA*, 2008, 1: 71

- [69] Wang B, Chen X, Meng X, et al. *ApJ*, 2009, 701: 1540  
[70] Wang B, Han Z. *A&A*, 2010, 515: A88  
[71] Wang X, Wang L, Filippenko A V, et al. *Science*, 2013, 340: 170

## Dependence of SNe Ia Rates and Luminosities on Host Galaxies

LIANG Wen-ke<sup>1,2,3</sup>, WANG Jian-cheng<sup>1,2</sup>

(1. National Astronomical Observatories, Yunnan Observatory, Chinese Academy of Sciences, Kunming 650011, China; 2. Key Laboratory for the Structure and Evolution of Celestial Objects, Chinese Academy of Sciences, Kunming 650011, China; 3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing, China)

**Abstract:** We mainly present the dependence of SNe Ia rate and luminosity on their host galaxies. Firstly, we show that the host galaxy mass is lower or host star-formation rate is higher, SNe Ia rate will be larger. Secondly, we show that before light-curve correction, dimmer SNe Ia fluently occur in higher mass, higher star-formation rate, higher metal abundance, or older stellar galaxy system. However, after light-curve correction, brighter SNe Ia fluently occur in higher mass, higher star-formation rate, higher metal abundance, or older stellar galaxy system. Higher-metallicity progenitors are more neutron rich, producing more stable burning products relative to radioactive  $^{56}\text{Ni}$ . Since SNe Ia explosions are powered by the radioactive decay  $^{56}\text{Ni}$ , it is widely accepted that the intrinsic variation in SNe Ia brightness and decline rate is primarily driven by the amount of  $^{56}\text{Ni}$  present in SNe explosion, where more luminous and much slowly declining explosions are powered by more  $^{56}\text{Ni}$ , hence, under higher-metallicity circumstances, SNe Ia are dimmer. Whereas, after light-curve correction, SNe Ia in higher-metallicity progenitors are brighter. Therefore, the metallicity diversity is responsible for the dependence of SNe Ia luminosities on host galaxies.

**Key words:** supernova; rate; luminosity; host galaxy