

doi: 10.3969/j.issn.1000-8349.2013.01.03

超新星宇宙学的观测与研究进展

吴 潮¹, 张天萌¹, 王晓峰², 裘予雷¹

(1. 中国科学院 国家天文台, 北京 100012; 2. 清华大学, 北京 100084)

摘要: 超新星在宇宙学研究中起着重要的作用, 2011 年的诺贝尔物理学奖就颁给了利用 Ia 型超新星为探针发现宇宙加速膨胀的天文学家。首先, 通过详细介绍超新星宇宙学研究的物理原理和发现宇宙加速膨胀的观测与研究, 讨论了宇宙加速膨胀发现过程给予当前研究工作的启示。然后, 回顾超新星宇宙学研究在近 10 多年来的进展和主要成果, 分析了当前所面临的主要问题与挑战。最后, 对国内外超新星宇宙学研究中超新星观测研究的大型项目情况进行了全面回顾与介绍, 讨论和展望了超新星宇宙学研究工作的方向。

关 键 词: 宇宙学; 超新星; 宇宙加速膨胀

中图分类号: P145.3 **文献标识码:** A

1 引 言

利用超新星的观测来开展现代宇宙学的研究, 成为国际天文界越来越关注的一个前沿课题。国际上, 最引人注目的两个关于超新星宇宙学研究的小组分别为: Saul Perlmutter 领导的“超新星宇宙学计划”(Supernova Cosmology Project) 小组和 Brian Schmidt 领导的“高红移超新星研究组”(High- z Supernova Search Team)(Adam Riess 就是这一小组的关键人员)。Saul Perlmutter, Brian Schmidt 和 Adam Riess 三人正因为超新星宇宙学上的出色贡献——1998 年最先发现宇宙的加速膨胀^[1, 2], 共同获得 2011 年度诺贝尔物理学奖^[3]。宇宙加速膨胀的发现可以间接地证明暗能量的存在, 因此, 这也是首次从观测上表明暗能量的存在。这一发现也极大地推动了现代宇宙学的发展, 尤其是在观测宇宙学方面。

超新星作为现代宇宙学的重要探针之一, 利用其中 Ia 型超新星的“标准烛光”特性, 从而成为一把“量天尺”, 而 Ia 型超新星的高光度特性(亮度与整个星系相比)又使得这把“量天尺”能测到更远的距离, 即为宇宙学尺度上的测量提供观测基础。

收稿日期: 2012-06-29; 修回日期: 2012-09-25

资助项目: 国家自然科学基金(10903010, 11203040)

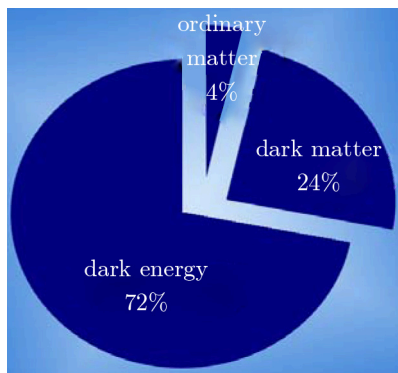


图 1 宇宙物质组成图^[4]

将超新星的测量结果结合宇宙微波背景辐射, 以及新技术支持下的弱引力透镜 (weak lensing) 和重子声学振荡 (baryon acoustic oscillation) 等观测手段, 现代宇宙学的研究表明宇宙的组成为: 常规物质占 4%, 暗物质占 24%, 暗能量占 72% (如图 1 所示^[4])。宇宙中最大的组成成分为暗能量, 虽然有许多理论试图来解释暗能量, 但目前仍然不清楚暗能量的确切形式。自从以超新星为探针首次发现暗能量存在至今的 10 多年来, 国内外出现了许多利用超新星观测来研究宇宙学的大型设备和团组, Ia 型超新星宇宙学观测和研究取得了飞速的发展。

观测方面的主要进展可以归纳为两个方面: 一是观测红移更高的超新星, 即获得更暗的超新星, 从而研究更大尺度上暗能量的分布情况; 二是扩大超新星的观测样本和数据的测量精度, 通过更大的高质量超新星样本来减少统计误差, 提高宇宙学参数的测量精度。

本文将对超新星宇宙学研究的原理和观测研究的进展进行介绍与回顾, 并对将来的工作进行讨论与展望。首先, 通过阐述 Ia 型超新星在研究宇宙学方面的基本理论和观测方法, 介绍 Ia 型超新星的标准烛光特性和宇宙加速膨胀的测量等方面的内容。其次, 详细介绍 2011 年度诺贝尔物理学奖获得者 Saul Perlmutter, Brian Schmidt 和 Adam Riess 等人的开创性工作, 并讨论其对将来工作的启示。然后, 回顾当前超新星宇宙学研究的最新进展, 并着重介绍最新的 Union2.1 样本及其测量宇宙学参数结果; 同时, 对当前研究中存在的问题进行讨论。最后, 介绍当前国际上主要超新星观测研究团队, 国内超新星宇宙学观测的历史和当前开展研究的情况。通过分析超新星与宇宙学研究中存在的主要问题, 讨论和展望将来超新星宇宙学研究的观测方向。

2 宇宙的加速膨胀

2.1 宇宙学基础

现代宇宙学的理论基础是爱因斯坦广义相对论的引力场方程, 如下式^[5]所示:

$$R_{\mu\nu} - \frac{1}{2}g_{\mu\nu}R = 8\pi GT_{\mu\nu} - \Lambda g_{\mu\nu} \quad (1)$$

上式的左边是与空间的弯曲状态相关的量, 而式的右边则同能量的状态相关; 其中 $\Lambda g_{\mu\nu}$ 为宇宙学常数项, Λ 即为宇宙学常数。爱因斯坦最初引入宇宙学常数是为了使方程有一个静态宇宙的解 (主要基于爱因斯坦个人的信仰), 但在哈勃通过星系的红移发现膨胀宇宙的观测结果后, 爱因斯坦放弃了宇宙学常数, 并认为是他“一生中最大的错误”。随着观测和研究的深入, 按现代的量子场论理解 Λ 与真空能密度 ($\rho_{\text{vac}} = \frac{\Lambda}{8\pi G}$) 相关, 现代宇宙学许多有趣的发现都与这一数学项密切相关。

引力场方程式 (1) 在宇宙学上的应用主要是基于 RW (Robertson-Walker) 度规下的解。所谓 RW 度规也就是基于宇宙学原理的时空度规, 所谓宇宙学原理即基本假设宇宙在大尺度上物质是均匀和各向同性的。RW 度规可表达成如下形式:

$$ds^2 = dt^2 - a^2(t) \left[\frac{dr^2}{(1 - kr^2)} + r^2(d\theta^2 + \sin^2\theta d\phi^2) \right] , \quad (2)$$

公式假设光速 $c = 1$, 度规中的 t 是时间坐标, r, θ, ϕ 为固定在介质质元上的坐标, 即共动坐标。 $a(t)$ 表示尺度因子, 其整体地描述宇宙的运动, 如果 $a(t)$ 增大表示宇宙膨胀, 反之则是宇宙在缩小。 $a(t)$ 具有长度量纲, 而 r, θ, ϕ 都是无量纲的量。式中的 k 表示空间弯曲的量度, $k = 0$ 时, 三维空间是平坦的; $k = 1$ 和 $k = -1$ 分别表示空间是弯曲封闭的和弯曲开放的。

在 RW 度规下, 可以得到式 (1) 的两个关于动态宇宙的基本方程, 如下式^[6]:

$$H^2 \equiv \left(\frac{\dot{a}}{a}\right)^2 = \frac{8\pi G\rho}{3} - \frac{k}{a^2} + \frac{\Lambda}{3} , \quad (3)$$

$$\frac{\ddot{a}}{a} = -\frac{4\pi G}{3}(\rho + 3p) + \frac{\Lambda}{3} . \quad (4)$$

习惯上, 式 (4) 又被称为 Friedmann 方程。由以上两式可以推导出与热力学第一定律相似的守恒方程^[7]。方程如下式:

$$\dot{\rho} = -3H(\rho + p) = -3H\rho(1 + w) , \quad (5)$$

式 (5) 反应了宇宙能量密度随时间的演化, 其中对于不同物质成分, 可表述为式 $w_i = \frac{p_i}{\rho_i}$ 。

以上公式 (3), (4), (5) 是在超新星宇宙学研究中需要用到的最基本的宇宙学物理公式。但在利用 Ia 型超新星做宇宙学研究时, 还需要推导几个与观测相关的公式。首先我们需要知道宇宙学红移, 所谓宇宙学红移是指光在 RW 时空度规中传播, 能量发生变化, 从而等效于光子频率发生变化。其公式如下所示:

$$\frac{1}{1+z} \equiv a(t) . \quad (6)$$

如果定义 $\rho_c \equiv \frac{3H^2}{8\pi G}$, 则 Friedmann 方程可以改写为:

$$\Omega_0 = \Omega_r + \Omega_m + \Omega_x = \frac{k}{H_0^2} + 1 , \quad (7)$$

其中 $\Omega_i = \frac{\rho_i}{\rho_c}$, 代表不同的物质组成密度参数, Ω_r 表示辐射成分, Ω_m 表示重子与暗物质, Ω_x 表示暗能量 (未知物质)。同时, 还需要减速因子的公式:

$$q_0 \equiv -\frac{\ddot{a}}{a_0 H_0^2} = \frac{1}{2} \sum_i \Omega_{0i}(1 + 3w_i) = \Omega_r + \frac{\Omega_m}{2} + \frac{\Omega_x}{2}(1 + 3w_x) . \quad (8)$$

另外, 还需要引入两个宇宙学距离, 即固有距离和光度距离。所谓固有距离是指在 RW 度规下同一时间发生两个事件之间的径向距离, 其中的数学条件为 $dt = d\theta = d\phi$ 。因此, 在 RW 度规下固有距离 d_p :

$$d_p = \frac{1}{H_0 \sqrt{|\Omega_k|}} \chi[\sqrt{|\Omega_k|} \int_0^z Z(z') dz'] \quad , \quad (9)$$

其中,

$$\Omega_k = \Omega_0 - 1 \quad ,$$

$$\chi(x) = \begin{cases} \sin x & k > 0 \\ x & k = 0 \\ \sin hx & k < 0 \end{cases} \quad ,$$

$$Z(z') = [\Omega_r(1+z')^4 + \Omega_m(1+z')^3 + \Omega_x(1+z')^{3(1+w_x)} + \Omega_k(1+z')^2]^{-\frac{1}{2}} \quad .$$

而光度距离的定义则由下式得出: $f = \frac{L}{4\pi d_L^2}$, 其中, d_L 即为光度距离, L 和 f 分别为内禀光度和观测接收到的光子流量。由于宇宙学红移, 观测端会有一个 $(1+z)^2$ 的衰减。因此 d_L 与 d_p 有如下关系:

$$d_L = d_p(1+z) \quad . \quad (10)$$

结合距离模数的定义, 可得距离模数:

$$\mu = m - M = 5 \lg\left(\frac{d_L}{10}\right) = 5 \lg[d_p(1+z)] - 5 \quad . \quad (11)$$

在观测宇宙学研究中, 将距离模数 μ 和红移 z 两个观测量画在同一比较图上, 这样的图被称为哈勃图, 从式 (11) 可知, 哈勃图反映各宇宙学参数的表达。哈勃图是超新星观测宇宙学研究的重要手段和途径。

2.2 超新星的标准烛光

超新星是某些恒星在演化接近末期时经历的一种剧烈爆炸。这种爆炸所产生的光度极其明亮, 能够照亮其所在的整个星系, 并且这一过程可持续几周至几个月, 然后逐渐衰减变为不可见^[8]。目前利用超新星研究宇宙学主要是利用 Ia 型超新星的标准烛光特性^[9]。在物理上, 虽然关于 Ia 型超新星前身星起源问题仍然没有完全解决, 存在许多争论, 但是基本的共识是 Ia 型超新星起源于双星系统中具有高度简并电子的碳氧白矮星的热核爆炸。碳氧白矮星吸积伴星物质, 质量增加到钱德拉塞卡质量极限附近时, 电子简并压力不能支撑引力平衡, 而导致白矮星中心激发不稳定的热核燃烧, 热核燃烧所产生的巨大能量将炸碎整个白矮星, 并产生大量的放射性元素镍, 镍及其放射性子核的放射性衰变所产生的能量注入到抛射物质中将其加热, 从而产生 Ia 型超新星很高的辐射光度^[10]。

由于 Ia 型超新星的爆炸质量大致相同, 从而决定了 Ia 型超新星在峰值光度的“标准烛光”特性。宇宙学研究正是利用了 Ia 型超新星的“标准烛光”特性和高光度特性。实际观测结果表明, Ia 型超新星在极大光度时的绝对星等存在大约 M_B 为 0.38 mag 和 M_V 为

0.26 mag 的弥散^[11](见图 2)。这表明, Ia 型超新星并非绝对的“标准烛光”, 在实际使用中需要进行“标准烛光”化的修正(即减少光度弥散修正)。理论上认为, 这种弥散与超新星爆发时镍(⁵⁶Ni)元素量的多少有密切关系, 在实际的超新星宇宙学观测处理过程中一般采用经验的方法来进行光度的“标准烛光”化修正。常用的经验修正方法有测光和光谱两大类。

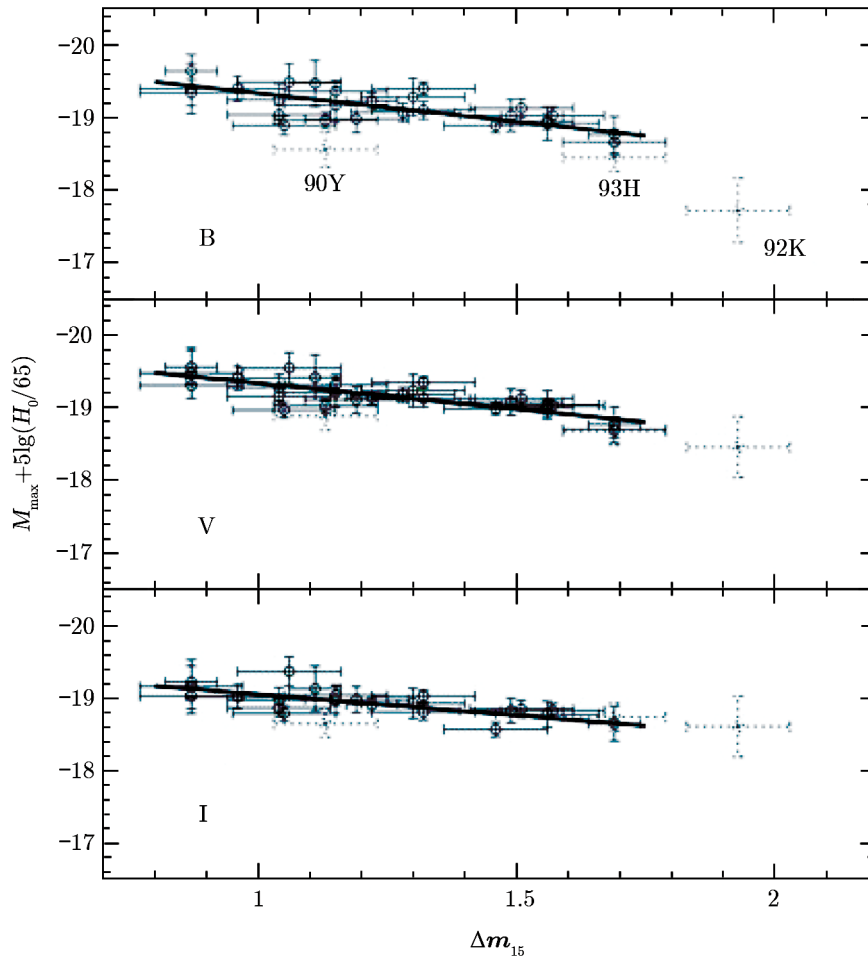


图 2 超新星极大光度时的绝对星等与 Δm_{15} 的关系图^[11]

通过测光方法得到的光变曲线进行修正的方法有: (1) Δm_{15} 方法(亦称为 Philips 方法^[12]), 该方法利用极大光度与光变曲线下降率 Δm_{15} 的相关性来修正, 其中, Δm_{15} 指的是极大光度后 15 天时的星等与极大光度时的星等差。(2) MLCS 方法^[14]和 stretch(拉伸因子)方法^[15], 该方法主要是利用光变曲线的形状和极大光度的相关性来修正极大光度的弥散, 这种相关性主要来自于光变曲线形状模板库的统计分析。图 3 和图 4 为拉伸因子方法的修正示意图, 其中图 3 为未经修正的不同 Ia 型超新星光变曲线图, 图 4 为经过拉伸因子修正后光变曲线图。(3) MLCS2k2 方法^[16]和 SALT(SALT2)方法^[17], 主要是利用光变曲线的形状和颜色

参数修正光度的弥散。(4) ΔC_{12} 方法^[18]，该方法是在 Δm_{15} 方法的基础上引入 $(B - V)$ 颜色项来修正光度弥散。

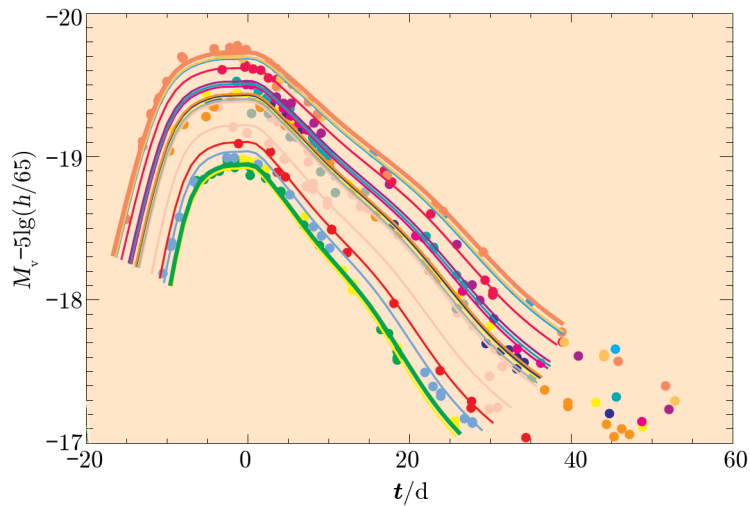


图 3 不同 Ia 型超新星的光变曲线^[13]

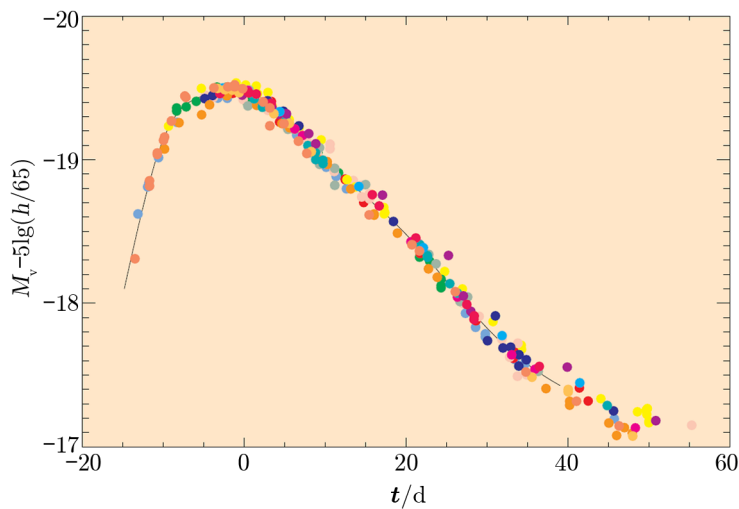


图 4 经 stretch 改正后的 Ia 型超新星光变曲线图^[13]

以上这些通过测光得到的光变曲线修正“标准烛光”的方法各有特色，其中 Δm_{15} 方法最经典，但是该方法要求有良好的观测光变曲线覆盖，并且不含颜色相关项；而 ΔC_{12} 则包含了颜色项，很好地弥补了 Δm_{15} 方法的不足。MLCS 方法和拉伸因子方法则在发现宇宙加速膨胀的工作中获得很好的应用，但其处理过程相对简单并且还不十分完善。现在较为成熟的方法为 MLCS2k2 方法和 SALT(SALT2) 方法，这两种方法的效果基本相同，是现在较为

主流的 Ia 型超新星“标准烛光”修正的方法。

通过光谱进行修正的方法有: (1) $R(\text{SiII})$ 和 $R(\text{CaII})$ 方法^[19]。 $R(\text{SiII})$ 方法是通过测量极大光度附近光谱的谱线 SiII 5800Å 和 6150Å 的线强比; $R(\text{CaII})$ 方法是测量 CaII H 和 K 的吸收线区域, 计算两翼的红和蓝的流量比。利用指数 $R(\text{SiII})$ 和 $R(\text{CaII})$ 与极大光度的相关性来修正 Ia 型超新星的标准光度。(2) $R(\text{SiS})$ 方法^[20], 主要是指测量 SiII 在 6355 Å 附近的线强与元素 S 在 5600 ~ 5700Å 区域的线强比, 再利用这一比率与极大光度的相关性来进行光度的修正。(3) $R(\text{SiSS})$ 和 $R(\text{CaS})$ 方法^[20], 这两个指数定义为: $R_{\text{SiSS}} = \frac{\int_{5500}^{5700} F_{\lambda} d\lambda}{\int_{6450}^{6200} F_{\lambda} d\lambda}$ 和

$R_{\text{CaS}} = \frac{\int_{3887}^{4012} F_{\lambda} d\lambda}{\int_{3716}^{3620} F_{\lambda} d\lambda}$, 主要是对极窄波长处进行谱测光, 获得流量的积分指数, 再根据指数的相关性来修正标准烛光。这种方法较前几种方法在实现数据的自动处理上有优势。(4) 等值宽度方法。等值宽度定义为: $EW = \frac{\int(\text{continuum} - \text{flux})}{\int(\text{continuum})}$, 主要的测量谱线有 SiII 5972 Å^[21],

与 CaII H 和 K 线来定红化和内禀光度^[22]。(5) $R_{642/443}$ 方法^[23], 即利用谱线 642nm 与 443nm 的流量比来做标准烛光的修正。这种方法首先通过对光学波段所有谱线比率进行计算, 然后筛选出最强的相关关系谱线比率指数, 即 $R_{642/443}$ 比率指数; 虽然这种修正指数是完全通过统计的方法得出, 但这一方法仍是目前光谱指数修正“标准烛光”方法中最为有效的一种方法。

使用 Ia 型超新星作为“标准烛光”, 除了需要考虑 Ia 型超新星的“标准烛光”化修正问题外, 实际使用时还要考虑的另一个问题是, 对于特殊的 Ia 型超新星需要分类剔除。按当前的认识, 特殊 Ia 型超新星是不能作为标准烛光来研究宇宙学的, 因为这些特殊超新星的光度难以用上面的方法进行修正到标准烛光。这些特殊的 Ia 型超新星主要分为二类, 即低光度 (SN1991bg 为代表) 和高光度 (SN1991T 为代表)。低光度 Ia 型超新星, 从观测上有较红的颜色和较低的光度 (比正常 Ia 型暗 1 ~ 2 mag); R 和 I 波段的光变曲线缺少第二峰值; 光谱的特征是在 4000 Å 附近有明显的深槽, 主要由低激发态的 TiII 产生。高光度 Ia 型超新星, 观测上光变曲线类似于正常的 Ia 型超新星; 光谱的特征是在光极大前及附近的光谱中没有 Ia 型超新星典型的 SiII 吸收线, 在 CaII 吸收线区呈明显的 Fe III 的高激发态谱线。如何更精确地获取 Ia 型超新星作为标准烛光的特性, 以及如何使用 Ia 型超新星作为标准烛光, 在实际使用过程中必须仔细地分析^[24]。

2.3 宇宙加速膨胀的测量

发现宇宙加速膨胀最为经典的工作主要参见 Perlmutter 等人^[1]1999 年发表于 ApJ 上的文章和 Riess 等人^[2]1998 年发表于 AJ 上的文章。Perlmutter 等人^[1]和 Riess 等人^[2]的工作分别属于两个独立研究团组: 即“超新星宇宙学计划”和“高红移超新星搜索团组”, 他们研究的高红移数据分别来自于他们各自团组的独立观测结果, 但测量的原理和得出的结论基本相同。Saul Perlmutter, Brian Schmidt 和 Adam Riess 三人正因为发现宇宙加速膨胀的研究中做出杰出贡献而获得 2011 年度诺贝尔物理学奖。

这两个团组测量宇宙学参数 (加速膨胀) 的基本方法相同: 通过 Ia 型超新星修正后的

标准烛光, 利用其特性, 得到视星等与红移的关系, 即哈勃图; 再通过参数拟合, 测定出宇宙学基本参数 Ω_M 和 Ω_Λ 。减速因子的详细计算需要参见式 (8), 但这里取了一个近似式 $q_0 = \left(\frac{\Omega_M}{2}\right) - \Omega_\Lambda$ 来估算; 通过 $\Omega_M - \Omega_\Lambda$ 图估算出减速因子, $q_0 < 0$ 即为加速膨胀。同时, 还要求用于测量宇宙减速因子的超新星样本红移须高达 1 左右^[28]。因此, 为了测量减速因子, 这两个研究团组需要观测高红移的超新星样本。

Perlmutter 等人^[1]的主要工作: (1) 数据。42 颗高红移超新星 ($0.18 < z < 0.83$) 来自于“超新星宇宙学计划”自身观测的数据, 18 颗低红移超新星 ($0.01 < z < 0.1$) 来自于 Calan/Tololo 观测样本^[25, 27]。(2) 设备。高红移超新星搜索设备为 La Palma 的 Isaac Newton 2.5 m 望远镜和基特峰 (Kitt Peak) 4 m 望远镜; 后继光谱和测光观测望远镜主要为 William Herschel 4 m 望远镜, Kitt Peak 2.3 m, Nordic Optical 2.5 m, Siding Springs 2.3 m, 以及 Keck 10 m 望远镜; 主要测光为 Kron-Cousins 的 R 和 I 测光。(3) 数据定标。“K 修正”是利用近邻 Ia 型超新星光谱模板得出; “标准烛光”修正是利用拉伸因子 (Strech) 方法; 银河系消光改正使用 Schlegel 等人^[28]的方法。(4) 宇宙学参数测定基于主要的物理公式为 $m_B^{\text{effective}} = m_R + \alpha(s - 1) - K_{BR} - A_R = M_B + 5 \lg D_L(z; \Omega_M, \Omega_\Lambda)$, 其中, K_{BR} 为 K 修正星等, $D_L(z, \Omega_M, \Omega_\Lambda)$ 表示光度距离, s 是拉伸因子, α 为相关参数 (这里取 $\alpha = 0.6$, $\alpha(s - 1)$ 为光度修正项), A_R 为消光修正项 $A_R = \frac{\mathfrak{R}_R}{E(B - V)}$, \mathfrak{R}_R 与红移相关, 这里的 $E(B - V)$ 由文献 [28] 给出, 同时还与由文献 [29] 给出的方法相比较。(5) 主要结论。 $\Omega_M^{\text{flat}} = 0.28_{-0.08}^{+0.09}$, $P(\Lambda > 0) = 99\%$, 宇宙年龄, $t_0^{\text{flat}} = 14.9_{-1.1}^{+1.4} (0.63/h) \times 10^9$ a。观测得到的哈勃图见图 5。

Riess 等人^[2]的主要工作: (1) 数据。16 颗“高红移超新星搜索小组”观测的高红移超新星 ($0.16 < z < 0.97$), 34 颗近邻 Ia 型超新星 ($z < 0.15$) 来自于 Calan/Tololo 和 CfA 样本。(2) 设备。超新星搜索用的是智利的 CTIO 4 m Blanco 望远镜, 2000 × 2000 CCD, 视场大小为 0.06 平方度; 后继的光谱和测光观测是利用 Keck 望远镜, MMT 望远镜和 ESO 的 3.6 m 望远镜; 测光使用专门设计的滤光片 B35, V35, B45, V45 (使得红移 $z = 0.35$ 和 $z = 0.45$ 时的测光与静止波长时的 B, V 测光相匹配)。(3) 数据定标。“K 修正”是利用 SN Ia 光谱模板构造转换关系, 通过对待测星测出颜色和时序 (光极大前后多少天) 即可获得星等转换值; “标准烛光”修正利用 MLCS (多色光变曲线形状) 方法和 Δm_{15} 方法修正标准烛光来比较。(4) 参数测量方法通过其哈勃图得出。(5) 主要结论。宇宙学参数 $\Omega_M \approx 0.2$, $\Omega_\Lambda > 0$ (置信度大于 99.7%); 减速因子 $q_0 < 0$, 即宇宙加速膨胀 (置信度大于 99.5%)。哈勃图见图 6 所示。

Perlmutter 等人^[1]和 Riess 等人^[2]利用各自独立观测的高红移 Ia 型超新星数据样本, 得出了极为相似的结果, 这进一步交叉验证了结果的正确性。宇宙加速膨胀的发现极大地改变了人们的宇宙观, 引导人们对于以往宇宙认识的重新审视和将来对于宇宙探索方向的思考。

回顾发现宇宙加速膨胀的研究工作, 可以获得以下两点重要的启示。第一, 观测手段和数据处理方法的重要性。基于当时 (1998 年前后) 的认识, 已具备通过观测进行宇宙学参数测量的物理知识基础。这些认识包括: 利用哈勃图能测定出宇宙学基本参数^[30]和 Ia 型超新星

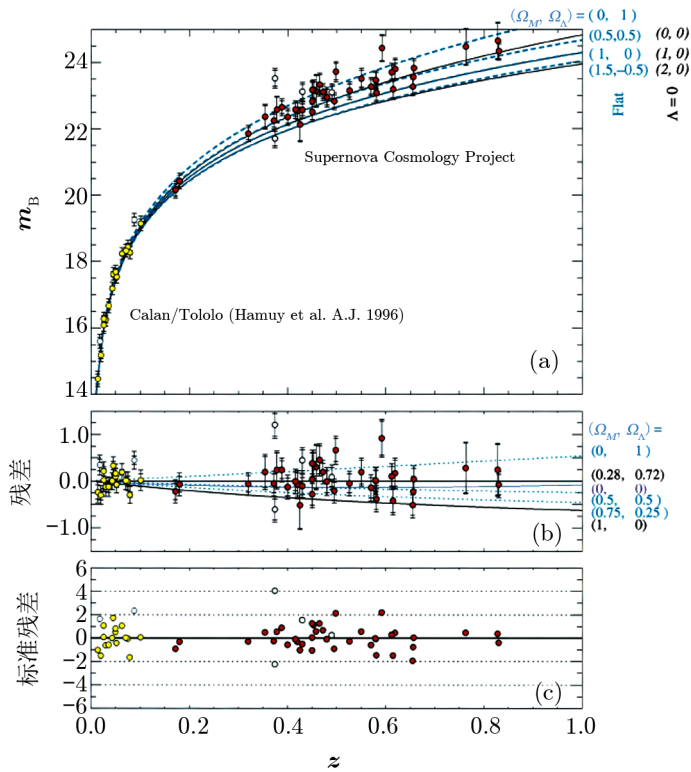


图 5 Perlmutter 等人观测得到的哈勃图^[1]

具有标准烛光特性^[31], 并且知道利用最高红移接近于 1 的一批 Ia 型超新星样本能测定出宇宙减速因子^[25]。当时存在的主要问题是, 高红移超新星的巡天 (搜索) 问题, 超新星是偶发现象, 发现和后继观测都非常困难: 当时丹麦的超新星团组用了 2 年时间仅找到 1 颗高红移超新星; Ia 型超新星的“标准烛光”定标与修正的问题, 因为根据当时的观测研究成果表明 Ia 型超新星在峰值光度约有 $0.4 \sim 0.6$ mag 的弥散^[32]。Perlmutter 等人^[1]和 Riess 等人^[2]都采用了当时最为先进的观测手段和高超的数据处理技巧, 他们最先解决了以上存在的问题。在超新星的巡天上, 他们都利用了 4 m 级的望远镜, 先进的 2000×2000 CCD 相机进行超新星巡天; 在超新星后继观测上都使用了世界上最先进的 Keck 望远镜和哈勃望远镜, 并有专门设计的适合高红移超新星观测的滤光片。在数据处理手段上, 他们开创性地开发了“标准烛光”修正的 MLCS 方法和拉伸因子 (Stretch) 方法, 基于近邻超新星光谱模板进行“K 修正”的方法, 以及利用单个历元光谱和测光观测 (即 1 个观测点) 的数据得出 Ia 型超新星的绝对光度的 snapshot 方法^[33]。

第二, 正确的数据分析的重要性。“超新星宇宙学计划”和“高红移超新星搜索团组”被称为两个有着激烈竞争性的团组, 这是因为他们的观测水平和资源基本位于同一水平, 他们发表成果也几乎是前后出现。但我们注意到, Saul Perlmutter 代表“超新星宇宙学计划”于 1997 年在 ApJ 发表一篇名为“Measurements of the cosmological parameters Ω and Λ

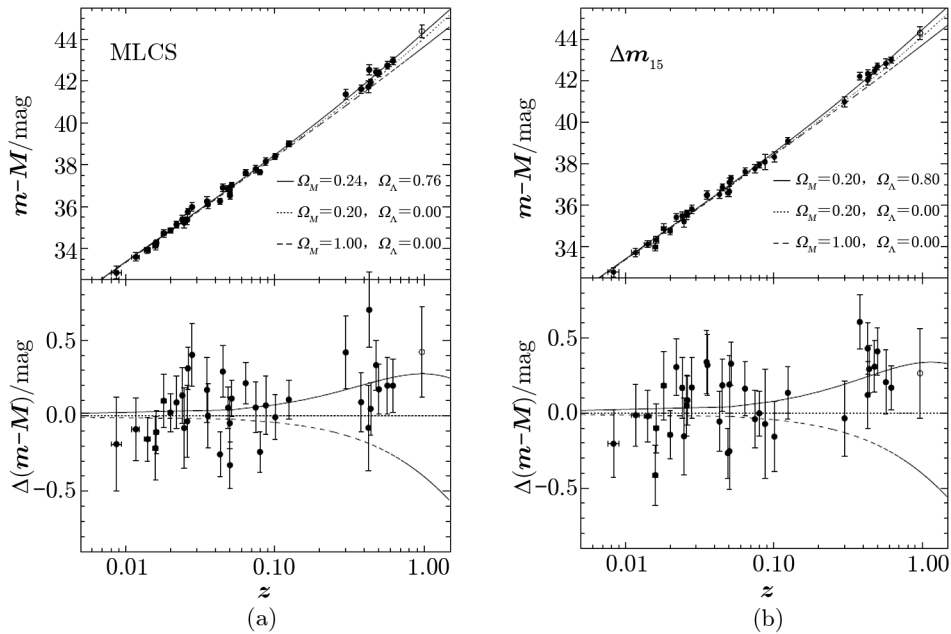


图 6 Riess 等人观测得到的哈勃图^[2]

(a) 为用 MLCS 方法修正的结果, (b) 为用 Δm_{15} 方法修正的结果

from the first seven supernova at $z \geq 0.35$ ”的文章^[15], 其测量结果为 $\Omega_M = 0.88^{+0.69}_{-0.60}$ ($\Lambda \equiv 0$ 时), $\Omega_\Lambda = 0.06^{+0.28}_{-0.34}$ (平坦宇宙); 1998 年 Saul Perlmutter 将新发现的一颗高红移超新星 SN1997ap ($z = 0.83$) 加入到数据分析样本后, 得出结果^[34] $\Omega_M = 0.2 \pm 0.4$ ($\Omega_\Lambda \equiv 0$ 时) 或 $\Omega_M = 0.6 \pm 0.2$ (平坦宇宙)。很显然 1998 年的结果更接近于现在较为准确的测量值。随后在同一年, Adam Riess 和 Brian Schmidt 等人^[2] 给出了更为明确直接的结果: $\Omega_M \approx 0.2$, 减速因子 $q_0 < 0$, 即宇宙加速膨胀; 并且详细分析了消光、样本选择效应、近邻缺失效应、演化效应、微引力透镜效应、样本污染等对结果可能产生的影响。过了一年, 即 1999 年 Saul Perlmutter 等人在 ApJ 上发表了上面提到的文献 [1], 通过更大的样本给出更为准确和完整的结果: $\Omega_M^{\text{flat}} = 0.28^{+0.09}_{-0.08}$, $P(\Lambda > 0) = 99\%$, 从而进一步确认了宇宙是加速膨胀的。从这一研究过程可以看出, 正确的数据分析的重要性, 尤其是在数据质量不太好的情况下更是如此。这对于今后的研究工作具有很大的启发性。

3 当前超新星宇宙学研究的进展

3.1 科学研究的进展

随着天文技术的发展和数据分析手段的提高, 从发现宇宙加速膨胀到现在, 10 多年来超新星宇宙学的研究取得了长足的进步, 出现了许多运行有效的巡天项目, 这些项目使得数据

样本从低红移到高红移覆盖跨度增大, 样本数目显著增高。其中最主要的项目有: ESENCE 巡天与 CFHT 巡天, 它们分别观测了大约 200 颗和 500 颗经光谱认证的, 红移在 0.4 到 1.0 之间的 Ia 型超新星; 哈勃望远镜巡天观测了约 30 颗红移大于 1 的高红移 Ia 型超新星; SDSS-II 超新星巡天项目共观测了约 500 颗经光谱认证过的中红移段 Ia 型超新星; 还有如 CfA 和 SNFactory 的近邻 Ia 型超新星的观测 (这些项目的回顾见 3.2 节)。

利用 Ia 型超新星做宇宙学参数测量时, 为减少统计误差, 须整合所有巡天项目的数据, 使得这些数据样本具有大范围的红移覆盖和样本数量。同时, 为减少系统误差, 需要对不同的观测数据进行统一的定标处理。根据实际测量的需要, 不同的研究者会通过各自的处理方法和筛选标准对当时所观测到的所有 Ia 型超新星数据进行处理和筛选, 最后汇总成一个分析样本。目前主要的分析样本, 按时间顺序有: (1) 2007 年 Riess 等人处理整合的“Gold”样本^[35], 这批样本包括从低红移 (视向速度 $cz > 7000$ km/s) 到高红移 (红移大于 1 的哈勃望远镜观测数据) 的 182 颗 Ia 型超新星; (2) 2008 年的“Union”样本^[36], 包含 307 颗从低红移 ($z \approx 0.02$) 到高红移 ($z > 1$) 的 Ia 型超新星; (3) 2009 年的“Constitution”样本, 主要是在“Union”样本基础上加入 90 颗 CfA3 数据而构成的^[37]; (4) 2011 年 Conley 等人的分析样本^[38], 以 SNLS 的巡天数据为主, 整合其它超新星项目的数据, 从低红移到高红移共 472 颗 Ia 型超新星。随着观测的深入和观测数据的增加, “Union”样本经过了多次版本更新, 从“Union2”^[39] (2010 年) 到最新的“Union2.1”^[40] (2012 年)。“Union2.1”样本是到目前为止, 样本数量最大和最新的一个观测分析样本, 以下将主要介绍这一样本的主要数据来源及其所测得的宇宙学参数结果。

Union2.1 样本^①是 Suzuki 等人在 2012 年的整合样本, Ia 型超新星总数已扩展到 580 颗^[40], 红移覆盖从 0.015 到 1.414。这些样本几乎综合了所有地面巡天望远镜的观测数据, 同时还包括来自哈勃空间望远镜星系团超新星巡天的高红移 Ia 型超新星数据 (其中红移大于 1 的有 29 颗)。Suzuki 等人^[40] 利用统一的数据定标方法加上严格的筛选标准, 最后得到的这 580 颗符合宇宙学统计要求的数据样本。大致的数据定标与处理方法: (1) 光变曲线的拟合采用 SALT2 方法^[17]; (2) 银河系的消光, 采用 Schlegel 等人的修正图^[27]; (3) 星系际消光修正主要考虑了星系际尘埃^[41]和星系晕的消光^[42]; (4) 寄主星系的消光修正, 主要利用 SALT2 的拟合参数, 通过红移分组来区分不同样本的消光修正量; (5) 寄主星系质量与光度相关性的修正^[43]。最后得到的哈勃图如图 7 所示。通过综合 WMAP 的结果^[44], BAO 测量的结果和用造父变星测得的哈勃常数的结果^[45], 最后得到的宇宙学参数如表 1 所示, 这里主要基于 Λ CDM, $o\Lambda$ CDM, w CDM, ow CDM, w_z CDM, ow_z CDM 等几种宇宙学模型。其中, Λ CDM 和 $o\Lambda$ CDM 模型表示状态方程参数 $w = -1$ 不随时间变化的宇宙学模型, Λ CDM 表示平坦宇宙 (固定 $\Omega_k = 0$), 而 $o\Lambda$ CDM 则表示弯曲宇宙 ($\Omega_k \neq 0$); w CDM 和 ow CDM 则表示状态方程参数不随时间变化, 但值并不固定等于 -1 的宇宙学模型, w CDM 表示平坦宇宙 (固定 $\Omega_k = 0$), 而 ow CDM 则表示弯曲宇宙 ($\Omega_k \neq 0$); w_z CDM 和 ow_z CDM 表示状态方程参数随时间变化的宇宙学模型, 前者表示平坦宇宙 (固定 $\Omega_k = 0$), 而后者则为弯曲

^①Union2.1 数据样本可以通过链接 <http://supernova.lbl.gov/Union> 下载

宇宙 ($\Omega_k \neq 0$)。另外, 随时间变化的状态方程参数可表示为: $w(a) = w_0 + w_a(1 + a)$, 其中 $a = \frac{1}{(1+z)}$ 。表 1 除了给出不同宇宙学模型下的宇宙学参数, 同时还给出了单独利用 Ia 型超新星为探针的结果和综合利用了其它探针的结果。其它探针的结果来自于重子声学振荡 (BAO)、宇宙微波背景辐射 (CMB) 和造父变星测得的哈勃常数 (H_0)。表 1 的第一列表示各探针的使用情况。Union2.1 样本测量到的宇宙学参数的主要结果为: 在 68% 的置信度下, $\Omega_\Lambda = 0.729^{+0.014}_{-0.014}$ (Λ CDM 模型) 和 $w = -1.013^{+0.068}_{-0.073}$ (w CDM 模型); 宇宙的弯曲率约为 0.7% (ow CDM 模型) 和 2% (ow_z CDM 模型)。

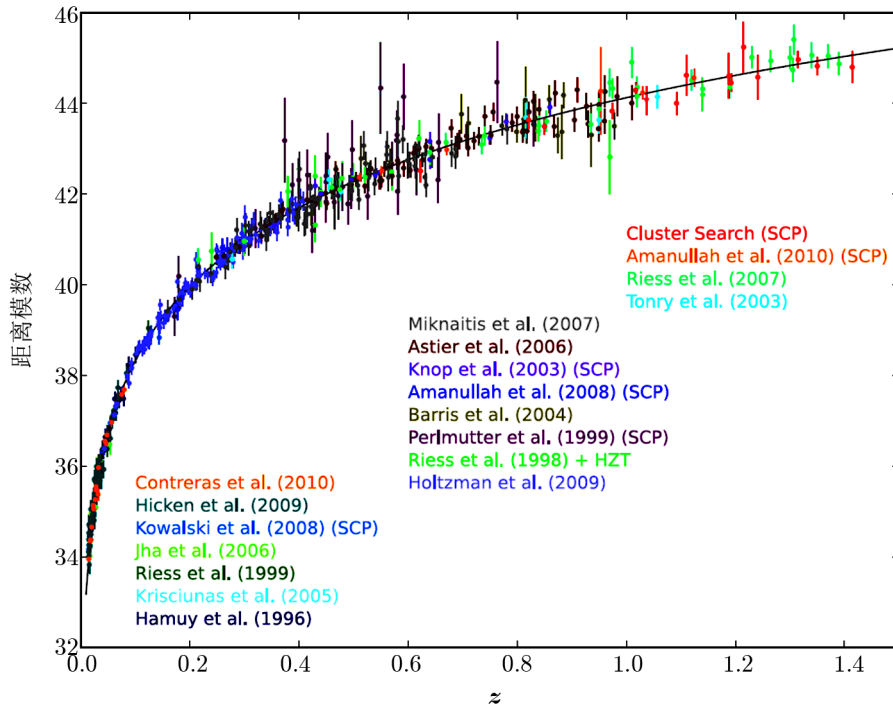


图 7 利用 Union2.1 样本得到的哈勃图^[40]

从 Union2.1 样本的数据分析和结果可以得出以下启示: (1) 高红移超新星对于暗能量参数 w 的测量有着重要的意义, 红移大于 0.5 的样本能对 w 参数进行约束, 而红移大于 1 的样本则对随时间变化的 w 参数有约束作用。同时, 更多的高红移超新星样本可以更好地得出 Ia 型超新星绝对光度与寄主星系的相关关系。虽然, 中近红移的样本研究已表明 Ia 型超新星绝对光度与寄主星系之间存在着较强的相关关系, 但对于高红移样本, 是否存在同样的相关关系需要更大的样本观测才能得出。(2) 当前超新星宇宙学测量的系统误差大于或者接近统计误差。而系统误差的不确定性主要来自于数据定标, 数据的定标误差则主要受标准星的测量误差、望远镜系统的零点以及波长透过率的误差所影响。今后, 减少系统误差的主要方法是建立一个标准星定标系统, 使不同的数据能在同一个标准星系统下进行定标。

表 1 宇宙学参数 Ω_m , Ω_k , w_0 和 w_a 对于不同宇宙学模型的拟合结果表^[40]

Fit	Ω_m	Ω_m w/ Sys	Ω_k	Ω_k w/ Sys	w_0	w_0 w/ Sys	w_a	w_a w/ Sys
Λ CDM	SNe	$0.277^{+0.022}_{-0.021}$	$0.295^{+0.043}_{-0.040}$	0 (fixed)	0 (fixed)	-1 (fixed)	0 (fixed)	0 (fixed)
	SNe+BAO+CMB	$0.278^{+0.013}_{-0.012}$	$0.282^{+0.016}_{-0.014}$	0 (fixed)	0 (fixed)	-1 (fixed)	0 (fixed)	0 (fixed)
	SNe+BAO+CMB+ H_0	$0.271^{+0.012}_{-0.012}$	$0.271^{+0.014}_{-0.014}$	0 (fixed)	0 (fixed)	-1 (fixed)	0 (fixed)	0 (fixed)
o Λ CDM	SNe+BAO+CMB	$0.282^{+0.015}_{-0.014}$	$0.286^{+0.018}_{-0.017}$	$-0.004^{+0.006}_{-0.006}$	-1 (fixed)	-1 (fixed)	0 (fixed)	0 (fixed)
	SNe+BAO+CMB+ H_0	$0.271^{+0.013}_{-0.012}$	$0.272^{+0.014}_{-0.014}$	$0.002^{+0.005}_{-0.005}$	-1 (fixed)	-1 (fixed)	0 (fixed)	0 (fixed)
w CDM	SNe	$0.281^{+0.067}_{-0.092}$	$0.296^{+0.102}_{-0.180}$	0 (fixed)	-1.011 ^{+0.208} _{-0.231}	-1.001 ^{+0.348} _{-0.398}	0 (fixed)	0 (fixed)
	SNe+BAO+ H_0	$0.309^{+0.029}_{-0.028}$	$0.320^{+0.035}_{-0.033}$	0 (fixed)	-1.097 ^{+0.091} _{-0.106}	-1.076 ^{+0.117} _{-0.133}	0 (fixed)	0 (fixed)
	SNe+CMB	$0.271^{+0.018}_{-0.017}$	$0.279^{+0.025}_{-0.023}$	0 (fixed)	-0.983 ^{+0.051} _{-0.056}	-0.955 ^{+0.075} _{-0.079}	0 (fixed)	0 (fixed)
o w CDM	SNe+BAO+CMB	$0.278^{+0.014}_{-0.014}$	$0.285^{+0.017}_{-0.017}$	0 (fixed)	-0.993 ^{+0.052} _{-0.052}	-0.951 ^{+0.085} _{-0.085}	0 (fixed)	0 (fixed)
	SNe+BAO+CMB+ H_0	$0.272^{+0.013}_{-0.013}$	$0.271^{+0.014}_{-0.014}$	0 (fixed)	-1.008 ^{+0.050} _{-0.054}	-1.013 ^{+0.068} _{-0.073}	0 (fixed)	0 (fixed)
	SNe+CMB	$0.281^{+0.069}_{-0.087}$	$0.295^{+0.109}_{-0.161}$	$-0.003^{+0.034}_{-0.027}$	-1.007 ^{+0.179} _{-0.194}	-0.993 ^{+0.299} _{-0.331}	0 (fixed)	0 (fixed)
w_2 CDM	SNe+BAO+CMB	$0.283^{+0.016}_{-0.015}$	$0.287^{+0.018}_{-0.017}$	$-0.004^{+0.007}_{-0.007}$	-1.012 ^{+0.058} _{-0.062}	-0.975 ^{+0.094} _{-0.098}	0 (fixed)	0 (fixed)
	SNe+BAO+CMB+ H_0	$0.272^{+0.013}_{-0.013}$	$0.272^{+0.015}_{-0.014}$	$0.002^{+0.006}_{-0.006}$	-1.006 ^{+0.056} _{-0.060}	-1.003 ^{+0.091} _{-0.095}	0 (fixed)	0 (fixed)
	SNe+CMB	$0.273^{+0.022}_{-0.020}$	$0.281^{+0.043}_{-0.028}$	0 (fixed)	-1.006 ^{+0.165} _{-0.182}	-0.993 ^{+0.263} _{-0.307}	$0.11^{+0.75}_{-0.77}$	$0.17^{+1.08}_{-1.19}$
o w_2 CDM	SNe+BAO+CMB	$0.278^{+0.014}_{-0.014}$	$0.284^{+0.018}_{-0.017}$	0 (fixed)	-1.052 ^{+0.126} _{-0.120}	-1.013 ^{+0.183} _{-0.173}	$0.30^{+0.48}_{-0.62}$	$0.26^{+0.57}_{-0.74}$
	SNe+BAO+CMB+ H_0	$0.271^{+0.013}_{-0.013}$	$0.270^{+0.015}_{-0.014}$	0 (fixed)	-1.021 ^{+0.142} _{-0.117}	-1.046 ^{+0.170} _{-0.170}	$0.07^{+0.60}_{-0.60}$	$0.14^{+0.70}_{-0.76}$
	SNe+CMB	$0.177^{+0.086}_{-0.093}$	$0.190^{+0.208}_{-0.154}$	$0.075^{+0.065}_{-0.128}$	$0.073^{+0.115}_{-0.141}$	-0.988 ^{+0.176} _{-0.202}	-0.969 ^{+0.284} _{-0.345}	$0.89^{+0.43}_{-5.25}$
o w_2 CDM	SNe+BAO+CMB	$0.283^{+0.019}_{-0.017}$	$0.286^{+0.022}_{-0.023}$	$-0.004^{+0.017}_{-0.010}$	-1.010 ^{+0.169} _{-0.178}	-0.997 ^{+0.266} _{-0.293}	$-0.01^{+1.04}_{-1.05}$	$0.13^{+1.16}_{-1.57}$
	SNe+BAO+CMB+ H_0	$0.270^{+0.014}_{-0.013}$	$0.274^{+0.016}_{-0.015}$	$0.025^{+0.008}_{-0.008}$	-1.218 ^{+0.069} _{-0.072}	-1.198 ^{+0.100} _{-0.112}	$1.21^{+0.10}_{-1.14}$	$1.19^{+0.13}_{-0.13}$
	SNe+BAO+CMB+ H_0	$0.270^{+0.029}_{-0.026}$	$0.274^{+0.032}_{-0.029}$	$0.025^{+0.016}_{-0.035}$	$0.027^{+0.026}_{-0.036}$	-1.218 ^{+0.425} _{-0.447}	-1.198 ^{+0.293} _{-0.327}	$1.19^{+0.27}_{-2.49}$

 $(\Delta\chi^2 = 4.0)$

3.2 国际上大型超新星研究的项目

国际上超新星研究项目按红移在哈勃图上的分布如图 8 所示^[47]，主要的项目有 CfA、SNF、PTF、PanStarrs、SDSS、Essence、SNLS、HST。以下将分别介绍这些项目的主要研究情况。

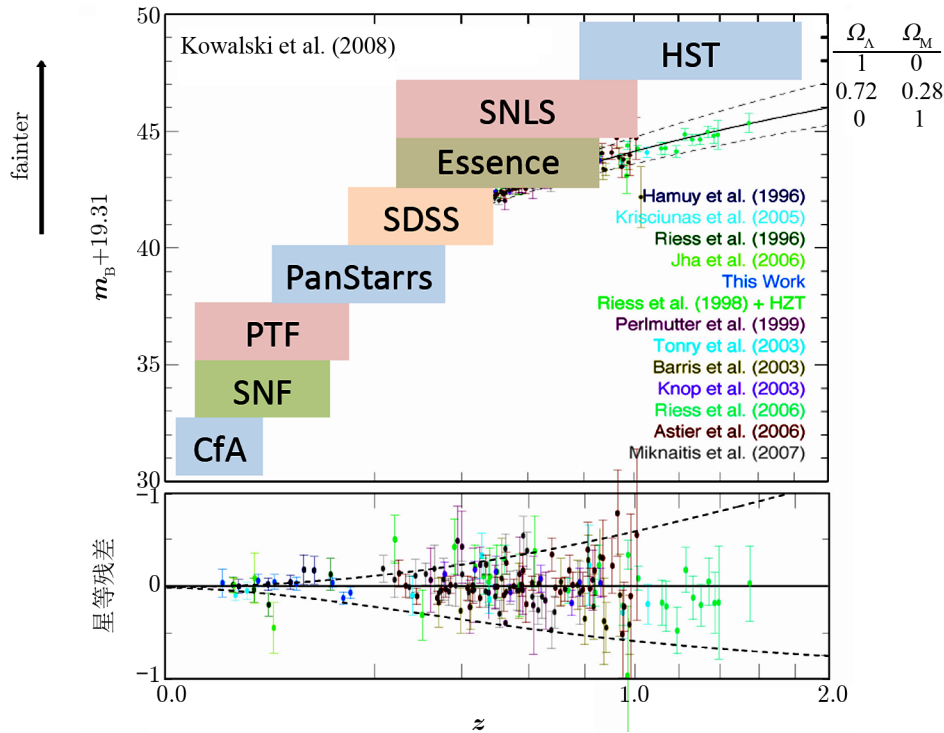


图 8 国际上相关超新星项目对哈勃图的贡献^[47]

CfA 超新星项目是利用 Whipple 天文台的 1.2 m 望远镜^①进行近邻 Ia 型超新星的观测，主要测光观测的波段在 BVRI 和 $r' i'$ ，IAU 报告发现的超新星是 CfA 的输入星表。其中，KAIT/LOSS 巡天^②发现的超新星 (KAIT/LOSS 巡天是一个运行十分高效的近邻超新星巡天项目^[48])，约占它们观测样本输入来源的一半。最新的 CfA 释放数据版本为 CfA3^[37]，红移覆盖在 $0.02 < z < 0.04$ 。

SNF (SNFactory 超新星工厂) 项目主要利用夏威夷大学配备有积分场光谱仪 (SNIFS) 的 UH - 88(2.2 m) 望远镜来证认和后续观测近邻 Ia 型超新星，红移的覆盖范围为 0.03 到 0.08。该项目从 2004 年开始试观测至今，共观测和证认了近 700 多颗超新星，其中 450 多颗为 Ia 型超新星，符合红移判据 ($0.03 < z < 0.08$) 的近邻 Ia 型超新星近 200 颗^[49]。

^①<http://www.sao.arizona.edu/FLWO/48/48.html>

^②http://astro.berkeley.edu/bait/public_html/kait.html

PTF (The Palomar Transient Factory) 项目^⑤的主要科学目标是探索空间瞬变源 (当然也包括超新星这样的瞬变源), 它是至今运行十分高效的一个超新星巡天项目。该项目主要利用 Palomar 天文台重新改装的 1.2 m Oschin 望远镜, 配备 12000×8000 的 CCD, 具有 7.8 平方度的视场覆盖。另外, 还使用 Palomar 1.5 m 望远镜进行测光的后继观测。超新星搜索的巡天频度为 5 天一次。整个项目计划运行时间为 5 年, 至今共发现 1538 颗超新星, 其中 1046 颗为 Ia 型超新星, 现在该项目仍在高效运行中。

Pan-STARRS 项目是一个雄心勃勃的巡天项目^⑥, 计划建成的望远镜由 4 个直径为 1.8 m 的望远镜组成, 4 个镜子指向同一天区, 每个镜子的视场大小为 3 度, 每晚巡天能力达 6000 平方度。现在该项目正处于迅速推进与建设之中。原理样机 PS1(仅 1 个 1.8 m 的镜子), 已于 2009 年 3 月建成投入运行; 而原理样机 PS2 也将在 2013 年投入运行, 届时 PS2 和 PS1 将实现同一天区的观测。项目的主要科学目标为监视太阳系内的危险天体, 由于大视场和较深的巡天深度, 对于超新星的巡天也是一个很好的设备。

SDSS 的超新星巡天项目^⑦是作为 SDSS II 期项目的一个部分, 主要利用 SLOAN 的 2.5 m 望远镜, 探索红移从 0.05 到 0.4 的 Ia 型超新星, 在项目运行期间 (2005 年—2008 年) 共发现并经过光谱证认的 Ia 型超新星约 500 颗。

ESSENCE (Equation of State: SupErNovae trace Cosmic Expansion) 超新星巡天项目^[50]是通过高红移超新星的观测来探索宇宙的暗能量, 所用的设备为 Blanco 4 m 望远镜, 观测超新星的红移在 0.15 到 0.75 之间。主要测光波段在 V、R、I、z、J, 光谱观测则主要利用 Keck, MMT, Magellan, Gemini 和 VLT 望远镜。

SNLS (Supernova Legacy Survey) 项目主要利用夏威夷口径为 3.6 m 的 CFHT^⑧望远镜进行宽场巡天, 主要目标为探索红移大于 0.3 的 Ia 型超新星, 并进行测光和光谱的后继观测。至今已获取大约 1000 多颗超新星的测光数据和约 500 多颗超新星的光谱数据^[51]。

HST 的超新星项目是利用哈勃望远镜配备的 ACS 相机, 对选定红移范围为 $0.9 < z < 1.5$ 的 25 个星系团星场进行深度巡天^[52], 共发现 39 颗超新星候选体, 在 Union2.1 中使用其中的 Ia 型超新星样本 29 颗。

3.3 国内超新星宇宙学研究的开展情况

国内最早开展超新星观测巡天研究的是利用兴隆基地 60 cm 望远镜的超新星巡天项目 (BAOSS)^[53, 54], 当时的 60 cm 望远镜经过改造后配备先进的电子相机 CCD 探测器。整个项目无论是巡天策略还是发现的超新星数量上, 在当时的近邻超新星巡天领域中处于较高水平。后来, 国际上其他大型超新星巡天项目不断出现, 而 BOASS 项目的设备日益老化, 发现效率相比而言也较为低下, 于是 2001 年结束了超新星巡天。从 1995 年开始巡天到 2001 年结束, BOASS 项目共运行了 6 年。

^⑤<http://www.astro.caltech.edu/ptf/>

^⑥<http://pan-starrs.ifa.hawaii.edu/public/>

^⑦<http://www.sdss.org/supernova/aboutsupernova.html>

^⑧<http://www.cfht.hawaii.edu/en/about/>

最近几年,我国也在积极开展超新星的观测研究。本文作者结合我国实际情况,利用我国兴隆的 TNT(80 cm 望远镜、2.16 m 望远镜),威海的 1 m 望远镜和云南丽江的 2.4 m 望远镜,进行近邻超新星的测光和光谱观测,获得了较为可观的高质量观测数据样本。同时,山东大学威海校区的 1 m 望远镜,正在积极开展近邻超新星的巡天项目;还有清华大学牵头的利用盱眙大视场望远镜和 BATC 的大视场施密特望远镜的近邻超新星巡天合作项目也在积极开展之中。

理论研究方面,云南天文台开展的 Ia 型超新星前身星系统的研究取得了卓有成效的成果。他们提出的 Ia 型超新星氦双星前身星模型,成功地解释了短延迟时标 Ia 型超新星形成的物理过程^[55];白矮星非球对称星风吸积对共生星系统的影响模型,很好地解释了部分长延迟时标的 Ia 型超新星的形成^[56]。

我国利用大型设备开展超新星观测与研究的项目有:利用郭守敬望远镜(LAMOST)的大样本光谱巡天数据寻找新爆发的超新星,LAMOST 小组的成员已完成这方面的前期方法研究^[57];同时,还可利用郭守敬望远镜进行 Ia 型超新星的前身星系统和残留伴星的搜寻^[10]。我国在南极冰穹 A(DOME A, 南极最高的平原)也积极开展超新星的观测与研究,主要计划分为两步^[58]:首先在南极冰穹 A 安装 AST3(0.5 m)和 1 m “pathfinder”望远镜进行红移小于 0.08 的测光巡天;然后安装口径为 4 m 级的望远镜,观测的超新星红移可以达到 3,并且能在超新星爆发极短时间内即被发现。南极的超新星观测计划将提高 Ia 型超新星的测量精度,扩大红移覆盖范围,增加观测样本和减少系统误差,从而必将对超新星宇宙学的研究做出重要贡献。

另外,在国际合作方面,我国还积极参与国际合作项目 SNFactory 近邻超新星的研究。

4 问题的讨论与展望

至今为止,Ia 型超新星仍然是宇宙学研究的重要探针。从利用 Ia 型超新星发现宇宙加速膨胀到最近的结果,数据样本的数量和质量都有了巨大的提高。现在需要解决的问题以及今后的方向主要是:减少样本数据的测量误差和提高样本的探测深度,从而进一步提高宇宙学参数的测量精度。

这里误差主要包含统计误差和系统误差两类。当前的数据样本下,超新星宇宙学研究的统计误差在 5% 以内,而系统误差则在 7% 以内^⑨。系统误差在总误差中起着主导作用。随着样本数目的增加,如样本增至 1000 颗左右,统计误差很容易被控制在 0.01 mag 以内。而减少系统误差则复杂得多,因为系统误差的来源是多方面的,主要为流量定标、尘埃的消光、可能的红移演化效应、引力透镜效应的污染、非 Ia 型超新星的污染、特殊 Ia 型的污染。其中流量定标引起的误差又是当前观测中的主要误差^[38],SNLS 项目正在采用特殊的利用 LED 照明定标的仪器 SNDICE^[59]进行流量定标,期望最后的系统误差能减少 1%~2%。另外,可通过增强近邻 Ia 型超新星的观测来提高对 Ia 型超新星基本物理性质的理解,从而减少系统

^⑨摘自 Reynald Pain 2012 年 6 月在国家天文台的报告

误差, Kessler 等人^[60]发现, 利用 MLCS2k2 和 SALT2 光变曲线拟合方法对于宇宙学参数 w 的测量存在约 0.2 的差异, 研究表明这种差异是由于使用了不同的 UV 光度校正模型。这说明了对于 Ia 型超新星基本物理性质的理解及近邻 Ia 型超新星的观测意义。而提高样本的观测深度则主要是指通过对更高红移超新星的观测和研究, 增加样本在更高红移范围的覆盖, 从而能够较好地测出宇宙膨胀率与时间的关系, 增加对于暗能量的理解。

红外波段观测将是 Ia 型超新星观测的良好窗口。最新的研究表明^[61, 62], Ia 型超新星在红外波段 H(1.5 ~ 1.7 μm) 处的光度峰值弥散仅 0.1 mag, 相比光学波段经过改正后的弥散 0.12 mag, 无疑具有很强的观测优势, 并且红外光度峰值弥散独立于光变曲线的形状。同时, 对于消光所带来的影响, 红外 H 波段观测仅是光学 V 波段观测的 1/6^[61], 这为今后的超新星宇宙学研究提供了一个良好的观测窗口。而将来的大型红外空间项目, 如 WFIRST^[63], 必将为超新星宇宙学研究打开一个全新的窗口。

同时, 正在建设中的地面大型项目 DES^[64] 和 LSST^[65], 每年将会观测到数以千计的超新星样本, 如此巨大的超新星观测样本, 将会带来一个超新星宇宙学研究的新时代。

致谢

作者感谢审稿人严谨细致的审阅和建议, 感谢期刊编辑认真细致的文字校正工作, 感谢与国家天文台陈大明老师的积极和有益的讨论。

参考文献:

- [1] Perlmutter S, Aldering G, Goldhaber G, et al. ApJ, 1999, 517: 565
- [2] Riess A, Filippenko V. Alexei, Challis Peter, et al. AJ, 1998, 116: 1009
- [3] http://www.nobelprize.org/nobel_prizes/physics/laureates/2011/
- [4] <http://newscenter.lbl.gov/feature-stories/2009/10/27/evolving-dark-energy/>
- [5] Einstein A. Sitzungsberichter der Königlich Preußischen Akademie der Wissenschaften, Berlin: Seite, 1917, 142: 152
- [6] Rui D A. SILVA PEREIRA, Dissertation, Paris: Paris University, 2008: 8
- [7] 俞允强, 物理宇宙学讲义, 北京: 北京大学出版社, 2002: 104
- [8] 李宗伟, 王晓峰, 物理学进展, 2010, 30: 3
- [9] 王晓峰, 李宗伟, 天文学进展, 2000, 18: 1
- [10] 王博, 张江, 王晓峰, 韩占文, (中国) 自然杂志, 2011, 33: 6
- [11] Hamuy M, Phillips M M, Suntzeff Nicholas B, et al. AJ, 1996, 112: 2391
- [12] Phillips M, Iwamoto K, Nomoto K. ApJ, 1993, 413: L105
- [13] Perlmutter S, Aldering G, Deustua S, et al. 1997, (astro-ph/9812473)
- [14] Riess A G, Press W H, Kirshner R P, et al. ApJ, 1996, 473: 88
- [15] Perlmutter S, Gabi S, Goldhaber G, et al. ApJ, 1997, 483: 565
- [16] Jha S, Riess Adam G, Kirshner, Robert P. ApJ, 2007, 659: 122
- [17] Guy J, Astier P, Baumont S, et al. A&A, 2007, 466: 11
- [18] Wang X, Wang Lifan, Zhou Xu, et al. ApJ, 2005, 620: L87
- [19] Nugent P, Phillips M, Baron E, et al. ApJ, 1995, 455: 147
- [20] Bongard S, Baron E, Smadja G et al. 2006, ApJ, 647: 513

- [21] Hachinger S, Mazzali P A, Benetti S. *MNRAS*, 2006, 370: 299
- [22] Chotard N, et al. *A&A*, 2011, 529: L4
- [23] Bailey S, Aldering G, Antilogus P, et al. *A&A*, 2009, 500, L17
- [24] Branch D, Dang L C, Hall N, et al. *PASP*, 2006, 118: 560
- [25] Colgate S. *ApJ*, 1979, 232: 404
- [26] Hamuy M, Phillips M M, Maza J, et al. *AJ*, 1995, 109: 1
- [27] Hamuy M, Phillips M M, Suntzef N B, et al. *AJ*, 1996, 112: 2391
- [28] Schlegel D, Finkbeiner D, Davis M. *ApJ*, 1998, 500: 525
- [29] Burstein D, Heiles C. *AJ*, 1982, 87: 1165
- [30] Kowal C T. *AJ*, 1968, 73: 1021
- [31] Colgate S, McKee C. *ApJ*, 1969, 157: 623
- [32] Sandage A, Saha A, Tammann G A, et al. *ApJ*, 1994, 423: L13
- [33] Riess A G, Nugent P E, Filippenko A V, et al. *ApJ*, 1998, 504: 935
- [34] Perlmutter S, Aldering G, Valle D M, et al. *Nature*, 1998, 391: 51
- [35] Riess A G, Strolger L-G, Casertano S, et al. *ApJ*, 2007, 659: 98
- [36] Kowalski M, Rubin D, Aldering G, et al. *ApJ*, 2008, 686: 749
- [37] Hicken M, Challis P, Jha S, et al. *ApJ*, 2009, 700: 331
- [38] Conley A, Guy J, Sullivan M, et al. *ApJS*, 2011, 192: 1
- [39] Amanullah R, Lidman C, Rubin D, et al. *ApJ*, 2010, 716: 712
- [40] Suzuki N, Rubin D, Lidman C, et al. *ApJ*, 2012, 746: 85
- [41] Aguirre A. *ApJ*, 1999, 525: 583
- [42] Menard B, Scranton R, Fukugita M, et al. 2009, astro-ph/0902.4240
- [43] Sullivan M, Conley A, Howell D A, et al. *MNRAS*, 2010, 406: 782
- [44] Komatsu E, Smit K M, Dunkley J, et al. *ApJs*, 2011, 192: 18
- [45] Percival W J, Reid Beth A, Eisenstein D J, et al. *MNRAS*, 2010, 401: 2148
- [46] Wood-Vasey W M, Miknaitis G, Stubbs C W, et al. *ApJ*, 2007, 666: 694
- [47] Kowalski M. *Supernova Cosmology today & yesterday*, <http://astroparticle.physik.uni-bonn.de/~kowalski/talks/heidelberg2011.pdf>, 2011
- [48] Li W D, Filippenko A V, Treffers R R, et al. <http://arxiv.org/pdf/astro-ph/9912336>, 2000, preprint (arXiv:astro-ph/9912336)
- [49] Aldering G, Antilogus P, Bailey S, et al. *ApJ*, 2006, 650: 510
- [50] Miknaitis G, Pignata G, Rest A, et al. *ApJ*, 2007, 666: 674
- [51] Astier P, Guy J, Regnault N, et al. *A&A*, 2006, 447: 31
- [52] Dawson K S, Aldering G, Amanullah R, et al. *AJ*, 2009, 138:1271
- [53] Qiu Y L, Li W D, Zhao Z W, et al. *Science in China*, 1999, 42: 2
- [54] Li W D, Qiu Y L, Qiao Q Y, et al. *Science in China*, 1999, 42: 10
- [55] Wang B, Meng X, Chen X, et al. *MNRAS*, 2009, 395: 847
- [56] Lü Guoliang, Zhu Chunhua, Wang Zhaojun, et al. *MNRAS*, 2009, 396: 1086
- [57] Tu L P, Lou A L, Wu F C, et al. *RAA*, 2009, 9: 653
- [58] Kim A, Bonissent A, Christiansen J L, et al. *Aph*, 2010, 33: 248
- [59] Barrelet E, Juramy C. http://hal.in2p3.fr/docs/00/18/86/40/PDF/SNDICE_method.pdf, 2007
- [60] Kessler R, Becker Andrew C, Cinabro David, et al. *ApJS*, 2009, 185: 32
- [61] Mandel K S, Wood-Vasey W Michael, Friedman Andrew S, et al. *ApJ*, 2009, 704: 629
- [62] Mandel K S, Narayan Gautham, Kirshner Robert P. *ApJ*, 2011, 731: 120
- [63] <http://wfirst.gsfc.nasa.gov/>
- [64] http://en.wikipedia.org/wiki/Dark_Energy_Survey
- [65] <http://www.lsst.org/lsst/>

Supernova Cosmology: Observations and Progress

WU Chao¹, ZHANG Tian-meng¹, WANG Xiao-feng², QIU Yu-lei¹

(1. *National Astronomical Observatories, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100012, China;* 2. *Tsinghua University, Beijing 100084, China*)

Abstract: Supernova Ia serving as a standard candle, plays an important role in the cosmological probes. Along this line, the pioneer studies which discovered the accelerating expansion of the Universe, won the 2011 Nobel Prize in Physics. In this paper, we give a detailed review on this topic including the histories, recent progresses and future prospects as well as the related studies in China.

We first present the cosmological principles that are related to the expansion of the Universe and the role of Supernova Ia as a standard candle in probing this expansion. The pioneer observational studies carried out by the Supernova Cosmology Project and High- z Supernova Search Team, which won the Nobel Prize are then reviewed in detail.

After these, we outline the recent progresses, especially the various supernova search projects from local universe to high redshift, such as the CfA, SNFactory, PTF, panStarrs, SDSS, Essence, SNLS and HST. These projects reveal similar conclusions about the accelerating expansion of the Universe, while as expected with higher precisions. The up-to-dated sample of Union 2.1 is introduced and the related constraints are discussed as well.

Apart from these, we also give a brief introduction to the related investigations and projects being or to be carried out in China. And finally short discussions about the future prospects about the supernova cosmology are presented.

Key words: Supernovae; cosmology; accelerating expansion of universe