

Ia 超新星在宇宙学中的应用

王 晓 峰 李 宗 伟

(北京师范大学天文系 北京 100875)

摘 要

对 Ia 超新星在宇宙学中的应用作了述评。蓝 Ia 超新星具有相对均匀的光谱、光变曲线及峰值光度, 是较好的相对距离指示器。利用峰值光度同光变曲线形状或其它与距离无关的可观测量的关系可进一步将 Ia 超新星校准成精确的距离指示器。一旦它们的绝对光度得到标定, 就可以定出哈勃常数 H_0 。基于对邻近星系 Ia 超新星的理解, 高红移 Ia 超新星的数据可对宇宙密度参数 Ω_M 、 Ω_Λ 及减速因子 q_0 作出限制, 并对膨胀宇宙的最终命运作出判定。

关键词 Ia 超新星: 蓝 Ia 超新星 — 宇宙学: 宇宙学参数 — 距离尺度

分类号: P159

1 引 言

人们很早就认识到 Ia 超新星可用于宇宙学参数的确定^[1,2], 因为 Ia 超新星非常亮而且均匀。一颗典型的 Ia 超新星爆发时产生的光度通常可达到星系的量级, 是造父变星的 10^6 倍。如此激烈的事件在宇宙年龄一半处 ($z \approx 1$) 也可被观测到。并且作为单个星体爆发, 它们较星系更容易理解。对星系而言, 观测量随红移的变化主要由本身的演化而非宇宙学效应引起。因此, Ia 超新星作为河外距离指示器要优于星系。实际上 Ia 超新星爆发并不完全一样: 其 B 波段的绝对星等可相差约 2mag, V 波段可相差约 1mag。这可能表明 Ia 超新星具有不同的前身星系统, 其距离指示器的作用也一度受到怀疑。进入 20 世纪 90 年代, 一系列光谱、光变曲线数据以及新的分析方法使得我们认识到这些超新星的光度差异有规律可寻: Ia 超新星的峰值光度同光变曲线形状相关^[3~5]。通过相应的校正可导出超新星的本征峰值光度, 其误差在 11% 以内。在过去的 10 年中, 对邻近 Ia 超新星的详尽研究使得这些超新星成为天文学家迄今知道的校准得最好的标准烛光, 其在宇宙学研究方面也相应取得了很大进展。

$0.01 < z < 0.1$ 的哈勃流 Ia 超新星结合经造父变星标定的 Ia 超新星可确定当前的哈勃参数值。在这样一个范围内, 星系的本动同哈勃流相比是可以忽略的, 并且 q_0 的影响不用考虑。 $z \approx 0.5$ 处, 光度弥散为 0.11mag 的 Ia 超新星可得到 q_0 值的不确定度为 $0.20(\delta q_0 \approx 0.9\delta m/z)$,

国家自然科学基金重点项目 (19733002)

1999-11-17 收到

可在 2.5σ 的置信度上对空宇宙 ($q_0 = 0$) 和平直宇宙 ($q_0 = 0.5$) 作出区分。因而足够多的高红移样本就能给出准确的 q_0 值 ($\delta q_0 \leq 0.1$)。另一方面, 不同红移处 (如 0.5 和 1.0) 的 Ia 超新星的峰值光度轮廓在 $\Omega_M - \Omega_\Lambda$ 平面上有不同的斜率, 因此研究轮廓线相交区域可对宇宙密度参数作出限制。此外, 利用 Ia 超新星可进行星系本动的研究^[6]; 高红移 Ia 超新星的光变曲线还可用来检验膨胀宇宙假设^[7]。

2 Ia 超新星的观测特性

Filippenko 在其评述中详细阐述了当前超新星的一些观测特性^[8]。尽管现在的理论认为 Ia 超新星由 C+O(碳氧) 白矮星的热核爆炸产生, 构成了一类相当均匀的 I 型超新星, 但其测光及光谱分光性质存在的重要差异是不可否认的。

2.1 光谱

正常的 Ia 超新星存在有特征的光谱演化, 在光极大前及随后显示出 Si II, Ca II, S II, O I 及 Mg II 的天鹅座 P 型线, 此后演变为 Fe II 的天鹅座 P 型混合线, 并最终在晚期星云相演变为铁及钴禁线的混合线。典型的例子有 SNe 1937C, 1972E, 1981B, 1989B, 1994D。光谱分光及测光特殊的事例也不断被发现, 最有名的两个事例是 SNe 1991bg, 1991T^[9,10]。同正常的 Ia 超新星相比, SN 1991bg 在 B, V 波段要分别暗 2.5 及 1.6mag, 光极大附近其光谱在 4200Å 附近有一个深槽, 由低激发态的 Ti II 产生。而 SN 1991T 表

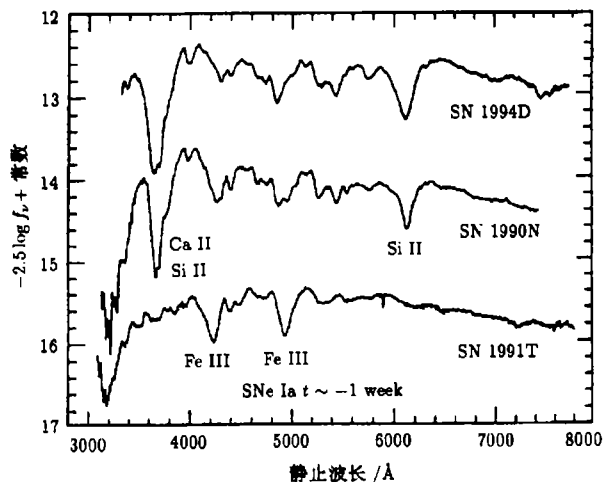


图 1 极大前约一星期时 Ia 超新星的光谱^[8]

现的要比一般的 Ia 超新星亮, 在光极大前及附近没有 Si II、Ca II 的吸收线, 却呈现明显的 Fe III 的高激发态谱线 (见图 1)。

不同的吸收特征谱线可用于标定 Ia 超新星光谱的差异, 它们的多普勒位移反映了光球的膨胀速度。不同特征谱线对应的速度不同, 在光极大时 Si II 为 $10000 \sim 12000 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$, Ca II H 和 K 为 $13000 \sim 15000 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$ 。特征谱线对应的速度值与寄主星系的颜色有关^[11]。在晚型颜色偏蓝的旋涡星系中, 这一速度值弥散较小; 最大和最小的速度值均出现在颜色较红的椭圆星系中。这一分光差异表明 Ia 超新星之间存在真实的物理差异; 不同的物质抛射速度不可能是由于从不同角度观测非对称爆炸所造成的结果。

基于光谱给出的一些表现信息将 Ia 超新星划分为光谱正常及光谱特殊的超新星并非没有道理^[12]。光谱正常的 Ia 超新星由钱氏质量碳氧白矮星爆发产生, 爆发时合成的 ^{56}Ni 的质量的细小差别仍会造成彼此间的差异。光谱特殊的 Ia 超新星由亚钱氏质量或超钱氏质量的碳氧白矮星爆发产生。

2.2 光变曲线

Ia 超新星的光变曲线代表了其光度演化的历史。Ia 超新星在爆发后大约经过 3 个星期上升到光极大, 其后光变曲线表现为几个月的指数衰减(由 ^{56}Ni — ^{56}Co — ^{56}Fe 供能)。早些时候人们认为不同 Ia 超新星的光变曲线非常均匀, 但随着测光精度的提高及数据的积累, 光变曲线形状差别被逐渐认识到(见图 2)。Pskovskii 最早进行了这方面的研究^[14], 他将光变曲线形状同超新星的光度联系起来。Phillips 利用一个描述光变曲线形状的参数 $\Delta m_{15}(B)$ (即 B 波段极大后 15d 的星等下降值) 首先将这一关系定量化($M = a + b\Delta m_{15}(B)$)^[3]。随后其他作者也相继提出了类似的参数(如延伸因子 s , 它反映了光变曲线的宽窄^[5])。一般说来, 固有光度较高的 Ia 超新星的光变曲线比较宽, 其上升及下降比光度较低的慢。Ia 超新星的峰值光度同光变曲线的这一关系可用于 Ia 超新星的光度修正, 从而减少哈勃图的弥散, 提高其作为距离指示器的精度(详见第 3 节)。

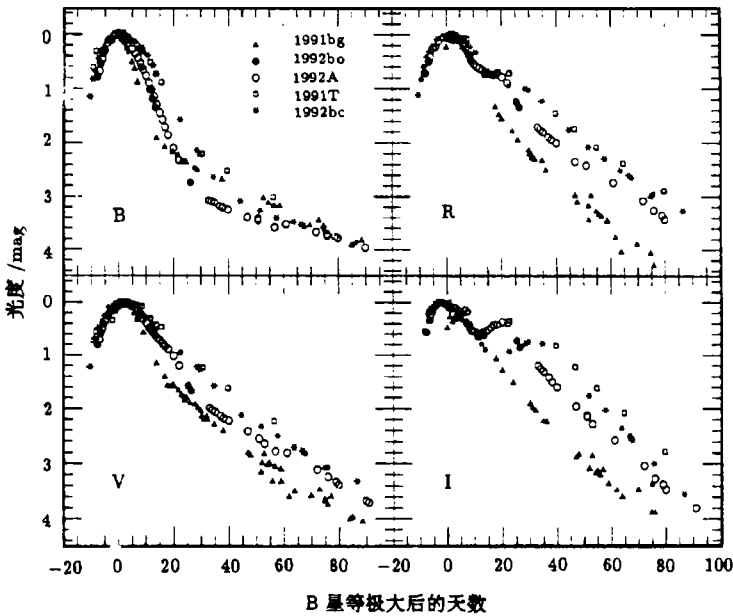


图 2 Ia 超新星 BV(左图) 及 IR(右图) 波段的光度演化^[13]

高红移 Ia 超新星的光变曲线可用于检验宇宙膨胀理论^[7]。我们可以预计由于宇宙膨胀而引起的时间膨胀效应将会表现在高红移超新星光变曲线上。观测数据表明红移 z 处的 Ia 超新星光变曲线宽度为 $z=0$ 处的 $(1+z)$ 倍, 这有力地证明了当前的膨胀宇宙理论。

2.3 颜色

大量的观测数据显示光极大时 Ia 超新星的颜色(例如用 $B_{\max} - V_{\max}$ 表示)也存在一定的范围。原则上, 颜色的差别可能由现有的 Ia 超新星本身固有的或者是由于主星系的吸收导致的。Riess, Press, Kirshner^[15] 以及 Phillips 等人^[16] 认为吸收是主要原因。而 Saha 等人则提供了确凿证据证实大多数 Ia 超新星的色彩差别实际上是固有的^[17], 他得出当 $(B_{\max} - V_{\max})$ 变得越红时(即相对 V 波段极大视星等值而言, B 波段的数值更大), Ia 超新星在 I 波段变

得更亮(即能量更多),并且当 $(V_{\max} - I_{\max})$ 变得更红时,在V和I波段变得更亮。此外,Hatano等人认为多数Ia超新星不应受到主星系的严重消光^[18]。这个问题也可以通过研究椭圆星系以及旋涡星系中Ia超新星样本的峰值光度同 $(B_{\max} - V_{\max})$ 之间的相关加以解决。因为假如 $(B_{\max} - V_{\max})$ 中消光因素(即 $E(B - V)$)占主导地位,两样本导出的消光系数会有很大差别。

Vaughan等人^[19]提出当用一个简单的 $(B_{\max} - V_{\max}) < 0.20\text{mag}$ 色标准时,可以排除在观测角度上呈现红色的Ia超新星(不论是固有的或是由于尘埃吸收造成的),剩下的颜色较蓝的Ia超新星则构成了相对均匀的超新星样本,近年来这已为许多研究所证实^[20,21]。

3 用邻近星系的Ia超新星测 H_0

尽管我们对有关Ia超新星前身星双星系统的性质及爆发机制的细节仍有争议,但其用作良好的河外距离指示器却是不容怀疑的。目前用低红移的Ia超新星来确定哈勃常数的方法已发展得相当成熟。

3.1 标准烛光

20世纪60年代,Kowal利用测光并不精确的I型超新星得到首幅超新星的哈勃图^[1],星等弥散约为0.6mag(照相星等),当时Ia并没有从I型超新星中分离出来。80年代中后期,由于观测手段和技术的提高(如CCD相机的使用),Ia超新星作为一类高光度且较均匀的I型次型被提出来,由它们构成的哈勃图星等弥散为0.3~0.5mag。进入90年代,两个极端事件SNe 1991T, 1991bg被探测到,Ia超新星作为标准烛光受到质疑。而此后越来越多的观测证据(光谱,光变曲线及光极大颜色)表明Ia超新星的峰值光度存在一定的范围。Ia超新星具多样性:从高激发态光谱,高蓝移特征谱,宽光变曲线,以及高光度到那些低激发态谱,低蓝移特征谱,窄光变曲线及低光度构成了近似一维的Ia超新星序列。Ia超新星整体作为“标准烛光”不再标准,但并不表明它们就不能用作距离指示器。进一步的研究表明,在这样的一维Ia超新星序列中,两端的成员少,大多堆积在中间。需要用一个标准来定义一个相对均匀的Ia超新星子样本。从光谱角度来判定比较合理,并且谱线的强度和蓝移不受消光或距离的影响。但有一点必须指出:当前我们能获得的Ia超新星样本多数是在光极大之后观测到的,而多数光谱特殊的Ia超新星在光极大之前才表现得比较明显。而另一方面运用一个简单的色标准 $(B_{\max} - V_{\max}) < 0.20\text{mag}$ 能获得一个几乎是标准烛光的样本——蓝Ia超新星。

用蓝Ia超新星构筑哈勃图,其弥散仍可达到0.3mag。为进一步减少哈勃图的弥散,有必要将Ia超新星的峰值光度按一定的方式进行归一化处理,这要借助于极大光度同某些与距离无关的可观测量之间的关系。这一想法类似用周光关系对造父变星进行光度定标。事实上现在已建立起超新星极大光度同光变曲线下降率 $\Delta m_{15}(B)$ (或其它描述光变曲线形状的参数)、超新星光极大颜色、主星系哈勃型(或颜色)的经验关系。Hamuy等人用 $\Delta m_{15}(B)$ 对26颗蓝Ia超新星的峰值光度进行改正使得B, V, I波段的弥散分别从0.24, 0.22, 0.19mag下降到0.17, 0.14, 0.13mag^[20]。Riess, Press, Kirshner发展了一种多色光变曲线形状方法来拟合估计消光、相对光度及相对距离(利用B, V, R, I, 波段的光变曲线形状及色曲线演化,简称MLCS)^[22]。他们得出20颗哈勃流Ia超新星的距离模数弥散仅为0.12mag。该方法的优点是能得出正式的误差估计,不足之处是用于构成模板的9颗Ia超新星的距离模数并不那

么可靠(由 SBF 及 Tully-Fisher 方法测定)。最近 Tripp 和 Branch 用两个独立参数($\Delta m_{15}(B)$ 及 $(B_{\max} - V_{\max})$) 对近距离的造父定标 Ia 超新星以及 29 颗哈勃流样本(CTIO)同时归一化光度,即将 Ia 超新星的绝对光度看作 $\Delta m_{15}(B)$ 及 $(B_{\max} - V_{\max})$ 的函数。他们用 χ^2 最小方法拟合,同时得出 $\Delta m_{15}(B)$ 及 $B_{\max} - V_{\max}$ 前面的改正系数,得到的光度弥散几乎可认为是由观测误差造成的^[23]。以上经验的光度改正关系可将 Ia 超新星校准成非常好的标准烛光,但我们并不清楚这种经验关系的物理机制。

一些类似 ^{56}Ni 质量、光球温度、膨胀速度、特征谱线等更具物理意义的参数同 Ia 超新星的光度之间的相关也可以建立起来。例如, Fisher 等人发现光极大后约 60 天 CaII H+K 红端吸收线有与 Ia 超新星峰值光度相关的趋势^[24]。但目前这方面的数据太少,还不能将这种关系定量化。如果能够找到两个以上的独立方法,用它们获得的光度改正值相同,那么我们对 Ia 超新星用作归一化的标准烛光的信心将会更强。这将是今后 Ia 超新星研究的一个重要方向。

3.2 Ia 超新星的绝对光度定标

经光度改正的蓝 Ia 超新星是精确的河外距离指示器,但它仍属于二级距离指示器,其绝对光度需要通过其它方式加以标定。造父变星的周光关系在小尺度上测量河外距离是最可靠的。周光关系的零点及斜率取自大麦哲伦云(LMC)中的造父变星值, $(m - M)_{\text{LMC}} = 18.50$ ^[25]。最近有关造父变星周光关系的可靠性引起了许多争论。争论的焦点是这种关系有无依赖金属丰度的可能性。Beaulieu 认为造父变星金属丰度的变化将会引起造父距离模数的修正^[26],对于较高的金属丰度得到的距离模数要相应增加,反之亦然。Saio 和 Gautschy^[27]及 Baraffe 等人^[28]对造父变星通过不稳定带不同截面的演化进行了研究,得出的结论是任何周光关系对金属丰度的依赖都是可忽略的。这个问题的研究还有待进一步深入,这里不作过多的论述。

哈勃望远镜(HST)对 Ia 超新星光度定标计划目前已为我们提供了 6 个星系的造父距离,这 6 个星系共爆发了 7 颗 Ia 超新星。它们分别是: SNe 1895B, 1972E (NGC 5253); SN 1937C (IC 4182); SN 1981B (NGC 4536); SN1960F (NGC 4496); SN 1990N (NGC 4639); SN 1989B (NGC 3627)。另有两颗 Ia 超新星的造父距离也可获得。一颗是 SN 1998bu, 其精确的测光数据已由 Suntzeff 提供^[29],它在 NGC3368 中爆发,而该星系的造父距离是已知的^[30]。另一颗是 SN1974G,在 NGC4414 中爆发,Turner 等人得出了该星系的造父距离^[31]。有关这 9 颗具有造父定标的 Ia 超新星相关的参数已由 Parodi 给出^[32]。由以上定标器给出的 Ia 超新星在 B, V 波段的极大绝对星等值分别为 -19.55 ± 0.07 , -19.53 ± 0.07 ^[33]。应指出的是 SN 1895B 的数据并没有包括在内,原因是其 V 波段星等值不详。Gibson 等人^[34]对上述 Ia 超新星的造父距离进行了重新分析,他们得出的平均光度要比上述值分别暗 0.05 及 0.07mag。经验的光度定标同当前的理论模型计算结果吻合得非常好。Höflich 和 Khokhlov 拟合了 16 颗蓝 Ia 超新星的光变曲线及光谱,其 B、V 波段的光度仅比经验值暗 0.05mag^[35]。Branch 在其最近的评述文章中指出当前蓝 Ia 超新星的光度 $M_B \approx M_V$, 为 -19.4 到 -19.5mag ^[36]。

有些作者在用造父变星对 Ia 超新星进行光度定标时将 SNe 1980N, 1992A 列入,从而使定标值偏低^[37,38]。SNe 1980N, 1992A 爆发在 Fornax 团的椭圆星系 NGC1316 及 NGC1380 中,其造父距离不能直接获得。它们的距离能否用旋涡星系 NGC1365 的距离(其造父距离已知)来替代是值得商榷的: NGC1316 及 NGC1380 位于团的中央,而 NGC1365 很可能处于 Fornax 团的前方,星系团的深度效应不应被忽略。

3.3 H_0 值

将经过定标的 Ia 超新星匹配到哈勃流样本中就可定出哈勃常数。近几年不同作者用 Ia 超新星方法定出的 H_0 值的范围大约在 47 到 $79 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{Mpc}^{-1}$ 之间 (含 1 倍误差棒), 用贝叶斯方法对这些结果进行统计分析表明这一值应在 $62 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{Mpc}^{-1}$ 附近^[39] (见图 3)。Branch 亦得出当前 H_0 值的合理范围应在 $(60 \pm 10) \text{ km} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{Mpc}^{-1}$ ^[36]。总的来说, 与其它同样基于造父定标的经验方法相比, 由 Ia 超新星方法定出的 H_0 值偏低, 即支持长距离尺度。而表面亮度起伏方法 (SBF)、Tully-Fisher 关系、基本平面方法 ($D_n - \sigma$) 则支持短距离尺度 (高 H_0 值)。在这四个经验方法中, Ia 超新星的光度弥散引起的距离不确定度仅为 6%, Tully-Fisher 关系为 15%, $D_n - \sigma$ 方法为 (10~20)%, SBF 为 8%。并且 Ia 超新星作为距离指示器延伸得最远 (v 约为 $30000 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$), 特殊运动 ($300 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$) 引起的 H_0 的不确定度低于 1%。值得一提的是, 由 Ia 超新星方法得到关于 H_0 的概率密度曲线与物理方法 (例如引力透镜方法, S-Z 效应) 测量结果很接近^[39]。这从另一个方面说明了 Ia 超新星用作河外距离指示器的有效性。

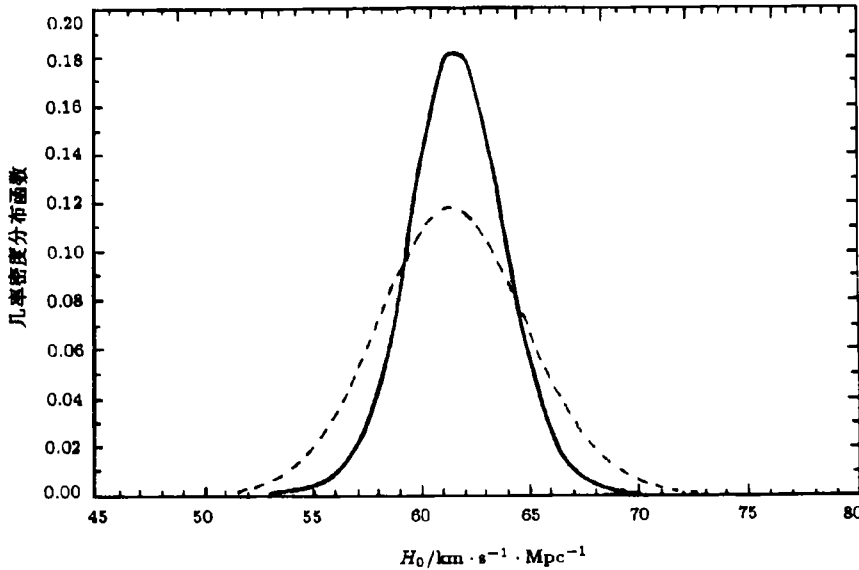


图 3 实线是由 Ia 超新星方法给出的 H_0 的几率密度分布, 虚线为用物理方法得到的结果^[39]

尽管用 Ia 超新星定出的 H_0 值与其它经验方法相比要稳定得多, 但不同的作者得出的结果差异还是比较显著的。 H_0 值及 δH_0 受以下几个因素的影响: (1) 造父定标器。用于 Ia 超新星光度定标的造父定标器的选择差异导致最后的 Ia 超新星绝对光度不同。有些作者基于某些原因剔除了我们上面提到 8 颗定标器中的某些而加进了非直接方法得到的造父距离; 即使在定标器选择完全一致的情况下, 不同作者对其赋予的权重也不尽相同。另外, 当前所有的 Ia 定标器都是在旋涡星系中发现的, 而远处哈勃流样本既有来自旋涡星系的, 也有产于椭圆星系的。统计研究表明旋涡星系中 Ia 超新星平均要比椭圆星系中的亮 $0.2 \sim 0.3 \text{ mag}$, 这就使得当前的 Ia 超新星光度定标存在系统偏差。解决的方法是将经造父标定的 Ia 超新星只匹配

到旋涡星系的 Ia 哈勃流样本中,但这可能会引起误解:旋涡星系中的 Ia 超新星相对椭圆星系而言是更好的距离指示器。(2)哈勃流 Ia 超新星样本。用于构筑哈勃图的哈勃流 Ia 超新星的样本数量和质量有差别:数量多则有 50 多颗,少则几颗;而测光数据既有用照相方法得到的,也有用 CCD 得到的精确结果。位于智利的美洲天文台(CTIO)自 1990 年开始了超新星的系统巡天历时 3yr 共发现了 27 颗 Ia 超新星并对它们分别进行了高密度的精确测光^[40],现在这批样本的使用率很高。但是 CTIO 巡天得到的超新星不是在远离探测器探测极限处出现峰值,表明存在选择效应。如果 CTIO 天体是来自非红化的 Ia 超新星的亮端,那么由它们得到的哈勃流 Ia 超新星的峰值光度弥散过低,任何弥散的降低都会在一定程度上降低我们由此获得的 H_0 值。(3)光度修正的经验方法。目前对 Ia 超星光度进行修正有不同的方法。Hamuy 等人用的是 $\Delta m_{15}(B)$ 改正, Riess 等人用的是多色光变曲线形状方法, Perlmutter 等人用的是延伸因子 s 改正, Tripp 等人则用了 $\Delta m_{15}(B)$ 及 $(B_{\max} - V_{\max})$ 同时进行改正。总的来说, Tripp 等人提出的两参数方法考虑了多种因素应赋予相对较大的权重。

HST Ia 超星光度定标计划仍将继续下去。目前 NGC4527(SN 1991T 的主星系), NGC3982(SN1998aq 的主星系)的造父变星观测正在进行。造父定标的 Ia 超新星数目的增加将进一步提高其绝对光度的准确度。随着众多望远镜加入到超新星的巡天工作中, Ia 超新星样本的数量和质量将得到改善(例如用 CCD 样本代替 CTIO 样本)。此外,经验的光度改正方法的研究也在不断深入。可以预计未来一段时间内, Ia 超新星方法将是提供 H_0 信息的主要经验方法: δH_0 主要由造父距离的不确定度决定, Ia 超新星方法本身带来的误差几乎可忽略不计。

4 高红移 Ia 超新星

4.1 背景

自 20 世纪 30 年代 Robertson 及 Walker 对于均匀各向同性的宇宙建立度规以来^[41,42],测定宇宙整体几何形状就成为天文学上的一个基本问题。解决这一问题常用两种方法:研究光度距离与红移的关系(通过标准烛光实现);测量标准尺的角大小随红移的变化。早期人们用亮星系团作为标准烛光,测量 $0.01 < z < 0.5$ 范围内星系的光度随空间距离延伸的变化,但后来理论及观测均证明遥远星系的固有亮度可能同近星系的完全不同。70 年代,一些人试图用类星体来作为遥远时空的路标,而最终的结果表明类星体比起星系来还要多样化,用处不大。Kellerman 用甚长基线干涉仪分辨出了红移到 3 的大量致密射电源^[43],但这些射电源的大小的固有分布是未知的^[44]。另外,通过测量星系的数目作为星等的函数来表示空间体积随红移的变化也是一种方法^[45]。但以上方法在实施过程中要受到用作标准烛光或标准尺的天体在不同尺度上性质差异的影响。很难把天体演化造成的观测量变化同宇宙膨胀效应区分开来,因而寻找一类本身光度被掌握得很好的天体作为距离指示器已成为迫切需要。Ia 超新星(尤其是蓝 Ia 超新星)因具有高光度且比较均匀的性质而受到极大关注。作为单个星体爆发,它不会受到星系那样大的演化效应污染。早在 1979 年 Colgate 就提出随着空间望远镜的使用,对 $z \approx 1$ 处 Ia 超新星进行观测可测定减速因子 q_0 ^[2]。Goobar 和 Perlmutter 进一步探讨了用 Ia 超新星测定宇宙密度参数的可行性^[46]。

4.2 发现

高红移超新星的寻找工作始于丹麦的一个研究组。Hansen, Jorgensen 和 Norgnard-Nielsen 历时两年发现了第一颗高红移 Ia 超新星 (SN 1988U, 其红移为 0.3)^[47]。然而大量成批发现高红移超新星则是近几年的事情。目前有两个独立的研究团组从事这方面的工作。一个是“超新星宇宙学项目”(Supernova Cosmology Project—SCP), 于 1989 年启动, 其负责人是劳伦斯伯克利实验室的 Saul Perlmutter。另一个是与之相竞争的“高红移超新星巡天组”(High- z Supernova Search Team—HZSST), 位于澳大利亚斯特罗姆山天文台及塞丁泉天文台, 组织者为 Brian Schmidt, 在 1995 年发现了他们的一颗高红移超新星。这两个组采用了类似的巡天技术, 都使用了位于智利的美洲天文台 4m 的 Blanco 望远镜进行巡天, 配有 30' × 30' 视场的大透光率照相机 (BTC), 10min 的曝光可产生一幅包含 5 000 个星系的图像。将得到的图像与上一次 (一般是 20d 拍一次) 拍得的同一天区的图像严格对齐并相减, 绝大多数的星系像将会消失, 在剔除小行星、活动星系核、类星体、宇宙线及其它的背景源后, 如果还出现显著偏零的情况, 就初步得到超新星的候选体。随后用目前世界上最好的地面望远镜 (Keck I, II) 及空间望远镜 (HST) 对最后确认的候选体进行光谱证认工作。在确信其是 Ia 超新星后, 一系列的后随测光工作利用遍布全世界的 2m 到 4m 的望远镜展开。

到 2000 年初, 两个研究组共发现近 200 颗高红移超新星, 其中经过光谱证认为 Ia 超新星的有 100 多颗, 最远的一颗 $z \approx 1.32$ ^[48]。具有测光数据的 Ia 超新星近 60 颗, 这些高红移超新星已成为研究宇宙学的重要资料。具体的测光数据处理技术 (如“K 改正”及时间膨胀改正) 可参见 Perlmutter 等人及 Riess 等人的讨论 (以后简称为 P99, R98)^[49,50], 他们还提供了光变曲线拟合技术。

4.3 密度参数及减速因子的测定

在第 3 节中我们提到了用一些经验的光度改正方法可以有效提高 Ia 超新星作为距离指示器的精度, 将这一峰值光度同光变曲线的关系用于高红移 Ia 超新星可有效地提高其分辨不同宇宙模型 ($\Omega_M - \Omega_\Lambda$) 的能力。 Ω_M 指物质密度参数, Ω_Λ 指归一化的宇宙学常数 ($\Omega_\Lambda = \Lambda/3H_0^2$)。

基于 Ia 超新星光变曲线得到的距离可由欧氏空间的光度距离公式导出:

$$d_L = \left(\frac{L}{4\pi l} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (1)$$

L 是 Ia 超新星的绝对光度, l 是观测到的能流。采用通用的 Friedmann-Robertson-Walker (FRW) 标准宇宙学模型, 在给定红移 z 处的光度距离是 z 及模型参数的函数^[51]:

$$D_L = d_L H_0 = \frac{c(1+z)}{\sqrt{|k|}} S \left\{ \sqrt{|k|} \int_0^z [(1+z')^2(1+\Omega_M z') - z(2+z')\Omega_\Lambda]^{\frac{1}{2}} dz' \right\} \quad (2)$$

式中的 H_0 指当前的哈勃参数值, $k = 1 - \Omega_M - \Omega_\Lambda$ 。S 表示正弦或双曲正弦函数; 当 $\Omega_{\text{total}} = \Omega_M + \Omega_\Lambda \geq 1$ 时, S 为 sin; 当 $\Omega_{\text{total}} = \Omega_M + \Omega_\Lambda \leq 1$ 时, S 为 sh。

星等红移关系为

$$m = \mathcal{M} + 5 \log D_L(z, \Omega_M, \Omega_\Lambda) + 25 \quad (3)$$

$\mathcal{M} \equiv M - 5 \log H_0 = m - 5 \log(cz)$ 为绝对星等零点, 由低红移样本的视星等及红移测得 (注意 \mathcal{M} 依赖于光变曲线形状), 与哈勃常数取值无关。由 (2) 式可得到在给定宇宙模型参数条件下的距离模数值, 将之同实测得到的距离模数 (3) 式比较, 并调整 Ω_M , Ω_Λ 值使得两者间的差别最小, 从而达到确定密度参数的目的。两个研究组用各自的高红移 Ia 超新星巡天数

据得出一个共同的结论: 遥远的 Ia 超新星比预期的结果要暗 20% 左右 (对 $\Omega_{\text{total}} = 1, \Lambda = 0$ 的宇宙模型而言), 这使得传统的宇宙是平坦的且不存在宇宙学常数的观点受到质疑。R98 分别利用 MLCS, $\Delta m_{15}(B)$ 两种方法对 27 颗 CTIO 低红移 Ia 超新星及 15 颗高红移样本进行光度改正, 结果表明 15 颗 HZSST 高红移样本的平均峰值光度分别比预期的暗 0.25mag、0.28mag。P99 用延伸因子方法对 18 颗 CTIO 样本及 42 颗 SCP 高红移样本进行光度改正, 其结果也显示远处的 Ia 要比近处的暗 0.18mag(见图 4)。

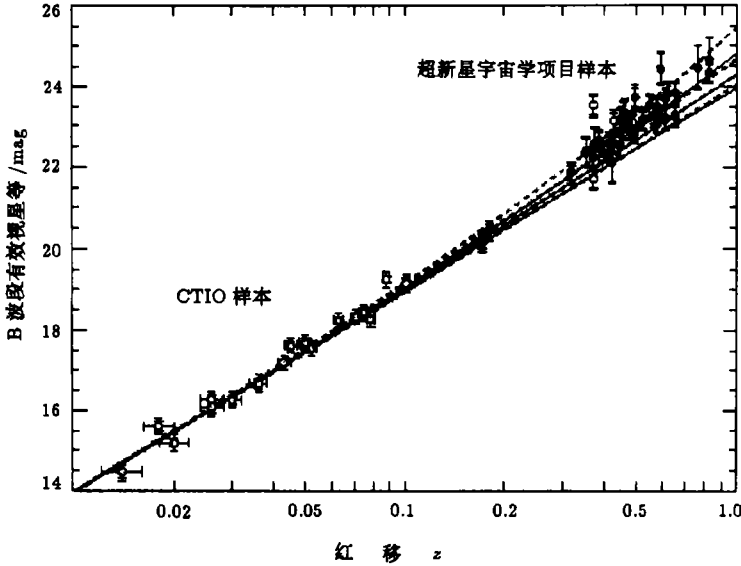


图 4 Ia 超新星的哈勃图^[50]

实线对应 $\Lambda = 0$ 的宇宙模型; 虚线表示平坦宇宙模型

排除可能的系统效应(在 4.4 节讨论), 并认为高红移 Ia 超新星的峰值光度同低红移样本一致, 那么能解释这一表现现象的只能是宇宙的几何结构, 可以有两种解释^[52]: (1) 我们的宇宙具有负的空间曲率。由于很远处的 Ia 超新星的辐射球面表面积比近处的球面(几何平坦的空间球面)的大, 因而使得远处的 Ia 超新星显得比近处的暗。(2) 远处 Ia 超新星的距离要比其红移提示值更远, 即远处的红移量减少了。这表明宇宙过去膨胀得必定比预期的慢, 从而使宇宙以及在宇宙中传播的光的延伸量减少。而以物质为主的宇宙膨胀速度只能是愈来愈慢, 所以有理由认为现今的宇宙具有较低的物质密度。根据广义相对论曲率与减速这两种因素是相关的, 较低的物质密度对应着负曲率, 也就意味着膨胀放慢的速度较低。对于暴胀宇宙模型($\Omega_{\text{total}} = 1$), R98 两种方法测定 Ω_M 的值分别为 0.28 ± 0.10 、 0.17 ± 0.09 ; P99 的测定结果为 0.29 ± 0.09 。这表明我们的宇宙所拥有的物质质量仅为使宇宙平坦所需要质量的 20%~30%, 这一结果支持基于星系团的宇宙物质密度测定结果^[53]。

目前具有精确测光数据的高红移 Ia 超新星数目并不很多, 而 $z > 0.85$ 的样本更少, 还无法对 Ω_M , Ω_Λ 分别作出有意义的限制, 但可以对 $\Omega_M - \Omega_\Lambda$ 作出限制(见图 5)。假设 $\Omega_\Lambda = 0$, 超新星数据给出的物质密度是负数, 这是没有物理意义的; 如限定 $\Omega_M = 0.2$, MLCS

及 $\Delta m_{15}(B)$ 两种方法给出的 Ω_A 值分别为 0.65 ± 0.22 , 0.84 ± 0.18 。R98 及 P99 用贝叶斯方法得到了 Ω_A 、 q_0 的概率密度分布。他们在 $> 3.0\sigma$ 的置信水平上给出了 $\Omega_A > 0$ 的结果；R98 用 MLCS, 模板拟合方法分别在 2.8σ , 3.9σ 的置信水平上作出 $q_0 < 0$ 的判定。利用 Ia 超新星

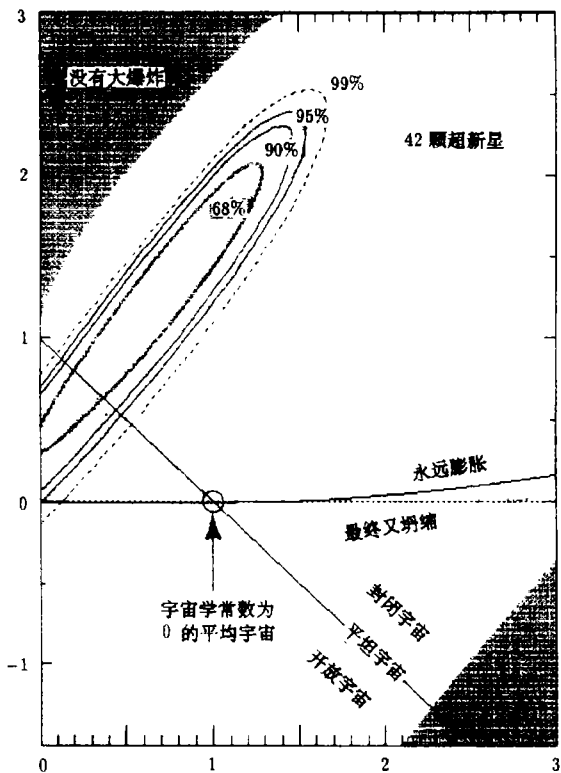


图 5 由 Ia 超新星数据给出的在 $\Omega_M - \Omega_A$ 平面的置信区域 [50]

最近 Howell、Wang 和 Wheeler [55] 发现由于 Shaw 效应 [56] 造成了在星系中心附近约 60% 的 Ia 超新星在照相巡天中丢失 (同 CCD 巡天相比)。这就给用 Ia 超新星测定宇宙学参数带来潜在的问题, 因为 CTIO 样本是照相巡天得到的, 而高红移的巡天使用的都是 CCD。这会造成近 Ia 超新星的平均光度比远处的样本均匀且暗, 但这一选择效应在何种程度上影响 4.3 节的结论目前尚不清楚。

演化效应是研究最多的系统效应之一。高红移处, 恒星主要为年轻的质量较大的低金属丰度星, 这会改变有质量交流的双星系统特征 (低金属丰度意味较多的大碳氧核的致密星) 以及碳氧核内的 C/O 比。根据 Dominguez 的计算 [57], 高红移的 Ia 超新星的峰值光度可能被低估了约 0.2mag。尽管这一值很小, 但它与用于区分不同宇宙模型的 0.25mag 的高红移暗淡值属同一量级。Riess 等人 [58] 研究了 Ia 超新星的光变曲线上升时间, 发现近处 Ia 超新星的上升时间要比远处的长 2.5d, 这可能预示着演化效应的存在。此外, 星际介质的性质也会随红移变化。LMC 及 SMC 的消光定律同银河系就有严重差别 [59], 因此远处星系的消光定律可能有别于银河系 [60]。

的数据首次从数学角度排除了宇宙学常数 ≤ 0 的可能性。而另一方面, 由宇宙微波背景辐射 (CMBR) 的第一个多普勒峰角尺度测量给出的 $\Omega_M - \Omega_A$ 置信轮廓几乎与 Ia 超新星的垂直 [54], 因而这两种方法得到的结果是互补的。下一代测量 CMBR 的卫星 (MAP, Planck) 上天将会给出 $\Omega_M - \Omega_A$ 的更窄的误差范围。结合 Ia 超新星的结果, 对 Ω_M , Ω_A 分别作出精确的限制是可能的。

4.4 系统效应

利用高红移 Ia 超新星结合低红移样本得出了现今的宇宙是一个低物质密度宇宙并且具有正的宇宙学常数的结论。要使得这一结论具有说服力, 需澄清一个问题: 系统效应对远处 Ia 超新星的暗淡效应影响到底有多大。可能存在的系统效应包括消光改正、选择效应、弱引力透镜效应、超新星演化以及局部物质空虚效应。尽管 R98, P99 讨论了这些效应的可能影响, 并都认为所有这些系统效应目前都不能很好地解释远处 Ia 超新星的暗淡效应, 但并不能完全排除来自系统效应的可能影响。

Λ 效应或是系统效应引起远处 Ia 超新星的暗淡, 目前看来界限并不特别明显。 $z \geq 0.85$ 的 Ia 超新星样本将可得出具有说服力的结论: 如果远处 Ia 超新星的暗淡效应是由宇宙学常数造成的, 那么这种效应在 $z \geq 0.85$ 处会减弱; 反之若是由系统效应(如超新星的演化、非标准消光或是引力透镜)引起, 那么将能看到这种暗淡效应会变强。但目前 $z \geq 0.85$ 的数据太少, 还不足以给出判定。

5 结论与展望

对近处的 Ia 超新星人们已经进行了很好的研究。不同阶段的光谱观测及分析能让我们准确地证认它们; 理论模型也能够相当好的程度上拟合光谱及光变曲线。Ia 超新星作为一个整体具有多样性, 但蓝 Ia 超新星却具有相对均匀的性质。通过超新星峰值光度与光变曲线的关系, 可以进一步减小蓝 Ia 超新星的峰值光度弥散。经造父定标得到 Ia 超新星的绝对光度为 -19.55mag (B 波段), 与理论模型给出的结果一致。不同作者采用不同的造父定标器、不同经验改正方法及不同红移 Ia 超新星样本得出的 H_0 值不同, 但多数结果集中在 $62\text{km}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{Mpc}^{-1}$ 附近。

基于对邻近 Ia 超新星的理解, 我们可以用高红移的样本研究宇宙的几何形状。SCP 及 HZSST 发现了大量高红移 Ia 超新星, 使得这种可能成为现实。当前的 Ia 超新星数据(高红移结合低红移)表明了我们的宇宙是一个低物质密度的, 具有正的宇宙学常数, 并且在加速膨胀的宇宙。但要说明的是系统效应的影响并没有被有效地排除, 我们需要更多的高红移样本, 尤其是 $z > 0.85$ 的样本, 来区分 Λ 效应及系统效应。另外, 更多数量(200~1000)的高红移 Ia 超新星的精确测光数据可以用来做“大质量致密晕天体”(MACHO)实验^[61]。由于中间物质的存在, 多数 Ia 超新星发出的光会被减弱, 而有些则会被放大^[62,63]。通过研究放大因子的分布可以确定散布在整个宇宙中的暗物质的类型。

Ia 超新星与宇宙学研究的结合使得国际上正在掀起一股超新星研究热, 我国的超新星研究也正迎头赶上。自 1996 年, 北京天文台利用 60cm 望远镜(配有 CCD)开始进行近距离星系的超新星巡天, 其取得的成绩是有目共睹的。在 1998 年, 他们发现的超新星数目处于世界前列。而且他们发现的大多数是处于上升至光极大阶段的超新星, 对于研究超新星光极大前光度演化有特殊意义。当然, 与国际先进水平相比我们还有较大的差距, 主要表现在超新星爆发的理论模型研究方面(国际上已有人可以计算爆发的三维模型)。此外, 高红移超新星研究刚刚起步, 而观测则处于空白阶段。结合目前国内现有的条件, 超新星研究的方向还应定在近距离星系中的超新星。我们没有 4m 级的光学望远镜可进行高红移超新星巡天, 也没有超级计算机计算超新星爆发的多维模型。因此我们应集中有限力量对邻近超新星作详尽的研究以期获得超新星爆发的一些细节信息, 为彻底弄清超新星的爆发机制奠定基础。

参 考 文 献

- 1 Kowal C T. A. J., 1968, 73: 1021
- 2 Colgate S. Ap. J., 1979, 232: 404
- 3 Phillips M M. Ap. J., 1993, 413: L105
- 4 Riess A G, Press W H, Kirshner R P. Ap. J., 1995, 438: L17
- 5 Perlmutter S. Ap. J., 1997, 483: 565

- 6 Zehavi I, Riess A G, Kirshner R P. *Ap. J.*, 1998, 503: 483
- 7 Riess A G *et al.* *A. J.*, 1997, 114: 722
- 8 Filippenko A V. *Annu. Rev. Astron. Astrophys.*, 1997, 35: 309
- 9 Phillips M M, Wells L A, Suntzeff N B *et al.* *A. J.*, 1992, 103: 1632
- 10 Filippenko A V, Richmond M W, Branch D *et al.* *A. J.*, 1992, 104: 1543
- 11 Branch D, Romanishin W, Baron E. *Ap. J.*, 1996, 465: 73
- 12 Branch D, fisher A, Nugent P. A. J., 1993, 106: 2383
- 13 Suntzeff, N B. In: Mc Cray, Wang Z R. eds. *Supernovae and Supernova Remnants*. Cambridge: Cambridge University Press, 1996: 41
- 14 Pskovskii Y P. *Sov. Astron.*, 1977, 21: 675
- 15 Riess A G, Press W H, Kirshner R P. *Ap. J.*, 1996, 473: 388
- 16 Phillips M M, Lira P, Suntzeff N B *et al.* *A.J.*, 1999, 118: 1766
- 17 Saha A *et al.* *Ap. J.*, 1999, 522: 802
- 18 Hatano K, Branch D, Deaton J. *Ap. J.*, 1998, 502: 177
- 19 Vaughan T E, Branch D, Miller D L *et al.* *Ap. J.*, 1995, 439: 558
- 20 Hamuy M *et al.* *A. J.*, 1996, 112: 2398
- 21 Tammann G A , Reindl B. *astro-ph/9903220* (In the proceedings of the "Supernova workshop", Assergi, 1998)
- 22 Riess A G, Press W H, Kirshner R P. *Ap. J.*, 1996, 473: 88
- 23 Tripp R, Branch D. *Ap. J.*, 1999, 525: 209
- 24 Fisher A *et al.* *Ap. J.*, 1995, 447: L73
- 25 Madore B F, Freedman W L. *Publ. Astron. Soc. Pac.* , 1991, 103: 933
- 26 Beaulieu J P *et al.* *Astron. Astrophys.*, 1997, 318: L47
- 27 Saio H, Gautschy A. *Ap. J.*, 1998, 498: 360
- 28 Baraffe I *et al.* *Ap. J.*, 1998, 499: L205
- 29 Suntzeff N B *et al.* *A. J.*, 1999, 117: 1175
- 30 Tanvir N R, Shanks T, Fergwon H C *et al.* *Nature*, 1995, 377: 27
- 31 Turner A *et al.* *Ap. J.*, 1998, 50: 5207
- 32 Parodi B R, Saha A, Sandage A *et al.* *astro-ph/0004063*
- 33 Tammann G A, Parodi B R, Reindl B. *astro-ph/9911296* (In: Szabadas L, Kurtz D eds. *The Impact of Large-Scale Surveys on Pulsating Star Research*, Proceeding of the IAU Coll. 176, Budapest)
- 34 Gibson B K *et al.* *Ap. J.*, 1999, 512: 48
- 35 Höflich P, Khokhlov A. *Ap. J.*, 1996, 457: 500
- 36 Branch D. *Annu. Rev. Astron. Astrophys.*, 1998, 36: 17
- 37 Kennicutt R C, Mould R J, Freedmann W L. 1998, preprint
- 38 Sunzeff N B *et al.* *A.J.*, 1999, 117: 1175
- 39 Wang X F , Chen L, Li Z W. *Chinese. Physics Letter*, 2000, submitted
- 40 Hamuy M *et al.* *A. J.*, 1996, 112: 2408
- 41 Robertson H P. *Ap. J.*, 1936, 83: 187
- 42 Walker A G. *Proc. London Math. Soc.*, 1936, 42: 90
- 43 Kellerman K I. *Nature*, 1993, 361: 134
- 44 Stephans P G, Saha P. *M.N.R.A.S.*, 1995, 272: L13
- 45 Shanks T *et al.* *M.N.R.A.S.*, 1984, 206: 767
- 46 Goobar A, Perlmutter S. *Ap. J.*, 1995, 450: 14
- 47 Hansen L, Jorgensen H E , Nielsen H U. *Messenger*, 1987, 47: 46
- 48 Gilliland R L, Nugent P E, Phillips M M. *Ap. J.*, 1999, 521: 30
- 49 Perlmutter S *et al.* *Ap. J.*, 1999, 517: 565 (P99)
- 50 Riess A G *et al.* *A. J.*, 1998, 116: 1009 (R98)
- 51 Carroll S M, Press W H, Turner E L. *Annu. Rev. Astron. Astrophys.*, 1992, 30: 499
- 52 Hogan C J, Kirshner R P, Suntzeff N B. *科学 (重庆出版)* , 1998, 4: 8

- 53 Bahcall N A, Fan X H, Cen R Y. *Ap. J.*, 1997, 485: L53
54 Eisenstein D J, Hu W, Tegmark M. *Ap. J.*, 1998, 504: L57
55 Howell D A, Wang L, Wheeler J C. *astro-ph/9908127* (*Ap. J.*, 2000, accepted)
56 Shaw R L. *Astron. Astrophys.*, 1979, 76: 188
57 Dominguez I *et al.* *astro-ph/9905047* (In: *Future Directions of Supernovae Research: Progenitors to Remnants*)
58 Riess A G, Filippenko A V, Li W D *et al.* *astro-ph/9907038* (*A. J.*, 2000, in press.)
59 Bouchet P *et al.* *Astron. Astrophys.*, 1985, 49: 330
60 Aguirre A N. *Ap. J.*, 1999, 525: 583
61 Filippenko A V, Riess A G. *astro-ph/9905049* (In: Niemeyen J, Truran J eds. *Type Ia Supernovae: Theory and Cosmology*)
62 Holz D E. *Ap. J.*, 1998, 506: L1
63 Kantowski R. *Ap. J.*, 1998, 507: 483

Application of Type Ia Supernovae to Cosmology

Wang Xiaofeng Li Zongwei

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

Abstract

The application of Type Ia supernovae to cosmology has been briefly reviewed. Blue SNe Ia are better distance indicators, with relatively uniform spectra, light curves, and peak luminosity. The dispersion of SN Ia's peak luminosity could be further reduced via an empirical correlation of the peak luminosity with the light curve shapes. Once the absolute luminosity of SNe Ia is determined, we can get the value of the Hubble parameter. The data of high-redshift SNe Ia could make constraints on the cosmic density parameters Ω_M , Ω_Λ as well as the deceleration factor q_0 , and hence determining the ultimate fate of our universe.

Key words SNe Ia: blue SNe Ia—cosmology: cosmological parameters—distance scale