

宇宙的灯塔：Ia 型超新星

——漫谈 2011 年诺贝尔物理学奖

陈 佳 王晓锋

2011 年 10 月 4 日，瑞典皇家科学院将本年度诺贝尔物理学奖授予三位天体物理学家——索尔·珀尔马特 (Saul Perlmutter)、布赖恩·施密特 (Brian P. Schmidt) 和亚当·里斯 (Adam G. Riess)，以表彰他们通过观测遥远的超新星 (代表了恒星演化到晚期的一种爆炸事件) 而发现了宇宙在加速膨胀的这一卓越成果。他们的研究成果在 1998 年发表，他们总共探测和研究了 50 多颗处于宇宙年龄一半处爆炸的 Ia 型超新星 (源于白矮星的热核爆炸)，并发现这些超新星比 $\Omega_M = 1$, $\Omega_\Lambda = 0$ 的宇宙模型预言的结果要暗 20% 左右，这使得传统的宇宙平坦且不存在宇宙学常数的观点受到质疑。这表明宇宙的膨胀并没有在引力拉拽的作用下减速，与此相反我们的宇宙正在一种神秘的推力下加速膨胀。这一结果是令人吃惊的，也是震撼性的，宇宙的加速膨胀可能揭示了神秘能量 (暗能量) 的存在。理解暗能量的起因和性质则对当前天体物理学以及物理学研究提出了巨大挑战。

关于三位获奖者

珀尔马特 1959 年生于美国伊利诺伊州厄本那的一个犹太人家庭。1981 年珀尔马特从哈佛大学毕业，1986 年在加州大学伯克利分校获博士学位。珀尔马特自 1988 年开始领导美国劳伦斯伯克利国家实验室超新星宇宙学研究项目 (SCP, Supernova Cosmology Project)，致力于寻找宇宙早期爆发的超新星，目前在加州大学伯克利分校任教授。本文作者之一王晓锋在伯克利工作期间与珀尔马特相识，两次受邀到伯克利国家实验室 SCP 组介绍超新星研究进展，并就超新星宇宙学研究的系统误差问题进行了颇有意义的讨论。

施密特是澳大利亚国立大学天文学教授，拥有美国和澳大利亚双重国籍，1967 年生于美国蒙大拿州密苏拉市。1989 年施密特以物理学和天文学双学士学位身份从美国亚利桑那大学毕业，并于 1993 年在美国哈佛大学获得博士学位。他于 1994 年底开始组建并领导高红移超新星搜寻项目组 (HZSST, High-z

人类赖以生存的自然环境造成了严重的破坏。能源和环境问题是目前全世界各国都广泛关注的问题。新能源的开发和提高化石燃料的利用率是解决能源和环境问题有效的途径。随着纳米技术的不断发展，越来越多的科学家开始意识到纳米技术在解决能源和环境问题方面具有独特的作用。

太阳能被称为是取之不尽的绿色能源，而将太阳能转换成人类可以直接利用的能源的方式相当的多。在众多的转换手段中，太阳能电池是其中最为有效的手段之一。在太阳能电池中，纳米掺杂扮演了十分重要的角色。为了提高太阳能电池对太阳光的利用率，通常在电池板的表面涂覆一层纳米涂层，减少太阳光的反射，使更多的阳光进入电池材料，同时也对电池板进行保护。德国的科学家把多种纳米复合材料组装成纳米复合

薄膜。该薄膜不仅保持着太阳能的吸收充分，而且把转化率提高到了 41.4%。同时，具有特定结构的纳米材料在氢能源的利用中有很大的潜力。由于碳纳米管和石墨烯材料具有极大的比表面积，再加上其特殊的碳六元环结构，氢分子很容易吸附到碳纳米管和石墨烯的表面，从而被有效地储存在碳纳米管和石墨烯中。

虽然纳米技术从问世到现在才短短的几十年时间，但是纳米科技就已经以迅猛的势头快速发展，而且愈来愈渗透到各个学科、研究领域，以及人们的日常生活当中。正如诺贝尔物理学奖获得者罗雷尔曾经预言：20 世纪重视微米技术的国家如今都成为了发达国家，现在重视纳米技术的国家很可能成为下一世纪的先进国家。

(中国科学院高能物理研究所 100049)

Supernova Search Team) 从事超新星观测研究。除了在天体物理学上的成就外,施密特同时还是一位出色的葡萄酒酿酒师。

里斯 1969 年生于美国首都华盛顿,也来自于一个犹太家庭。1992 年里斯毕业于麻省理工学院,1996 年在哈佛大学获博士学位。目前是美国约翰·霍普金斯大学教授,并在美国太空探测科学研究所任职,他是施密特的高红移超新星搜寻团队重要成员。里斯利用哈勃空间望远镜探测和研究了更遥远的超新星爆炸,改变了人们对宇宙膨胀历史的认识。里斯也曾是本文作者之一王晓锋在美国的合作导师 A. 菲利彭科的博士后,并在那期间完成了由超新星得到宇宙加速膨胀的著名研究论文。菲利彭科和里斯在 2009 年同时当选为美国科学院院士,而 2011 年里斯又获得诺贝尔物理学奖。让人不禁感慨,如此年轻的学者就获得了这么大的成就,人类的才能真是不可限量啊。

认识宇宙

在认识宇宙之前,我们先来说说“红移”的概念。红移(redshift)是指物体的电磁辐射由于某种原因波长增加的现象,在可见光波段,表现为光谱的谱线朝红端移动了一段距离,即波长变长、频率降低。在天体物理学中,红移有三种:多普勒红移、引力红移和宇宙学红移。当光源远离观测者运动时,观测者观察到的电磁波谱会发生红移,这类似于声波因为多普勒效应造成的频率变化,因而称这种红移为多普勒红移。根据爱因斯坦的广义相对论,光从重力场中发射出来时也会发生红移的现象,这称为引力红移:这是因为处于重力场中的发光源,由于它的时系比较慢,故它发出来的光频,本来就会比较低。宇宙学红移通常指从遥远的星系光谱中观察到的红移现象。星系发出的光在到达观测者的过程中,由于时空膨胀,会发生红移。红移增加的比例与距离成正比。如同一个正在膨胀的气球,固定于气球表面的点之间距离会越来越远。天文上观测到河外星系光谱的红移现象也证明了我们的宇宙确实是在膨胀。

对星系光谱红移的观测最早要追溯到 1912 年,天文学家斯里弗(Vesto M. Slipher)首次发现星系光谱存在红移现象。此后,美国天文学家哈勃利用当时世界上最大的望远镜——位于威尔逊山上的口径 100 英寸的胡克望远镜对几十个河外星系的距离与

红移进行了观测。结合斯里弗的数据,哈勃在 1929 年发表了著名的哈勃定律:天体退行速度(或红移) v 与它们离观测者的距离 D 成正比: $v = H_0 D$ (H_0 为哈勃常数)。即距离我们越远的星系,它们以更快的速度远离我们。这个关系通常用天体的视亮度(对于固有光度不变的天体而言,其观测到的视亮度或者视星等是距离的另一种表述)与红移的关系来表示,在天文学上这称为星等-红移关系,即哈勃图。然而因为星系之间原本就存在相当大的光度差异,并不能作为标准烛光,所以哈勃做出的图弥散很大,但他还是抓住了问题的本质,指出速度和距离成正比这一结论。当时估计的哈勃常数为 $500 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{Mpc}^{-1}$,取倒数反推宇宙的年龄竟比地球年龄还小,这显然是不合理的;不过今天我们最新计算出的哈勃常数约 $72 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{Mpc}^{-1}$,就不存在这个矛盾。哈勃最初的发现提供了宇宙膨胀的证据,揭开了大爆炸宇宙理论的帷幕。

我们用广义相对论来刻画标准的宇宙学模型。根据广义相对论,有著名的爱因斯坦场方程

$$G_{\mu\nu} + \Lambda g_{\mu\nu} = \kappa T_{\mu\nu}。 \quad (1)$$

方程左边的 $G_{\mu\nu}$ 称为爱因斯坦张量,是时空度规张量 $g_{\mu\nu}$ 的函数;右边的 $T_{\mu\nu}$ 则代表物质的能量动量张量。左边第二项的 Λ 叫做宇宙学常数,是爱因斯坦最初为了得到静态的宇宙学模型而引入的。不难想象,一个物质为主的宇宙是不可能稳定的,万有引力必然导致体系的减速膨胀,甚至收缩。但 1929 年哈勃关于宇宙膨胀的发现,使得爱因斯坦相信其实不必拘泥于静态宇宙,也放弃了宇宙学常数,并将此归为他一生中“最大的错误”。(不过 20 世纪末宇宙加速膨胀的发现开始呼吁宇宙学常数的回归,并赋予其更深层的意义。)

受哈勃观测成果的影响,1931 年,一个叫勒梅特(G. Lemaitre)的比利时教父首次提出了宇宙起源于一个放射性原子裂变的思想。20 世纪 40 年代之后,俄国物理学家伽莫夫(G. Gamow)等人基于广义相对论以及核物理的知识将这一想法发展成为宇宙起源的火球模型(当时它被反对者讥讽为“大爆炸模型”),并进行了严格定量描述。大爆炸模型认为:宇宙是在过去有限的时间(约 133 亿年至 139 亿年)之前,由一个密度极大温度极高的太初状态演变而来的,经过不断的膨胀到达今天的

状态。

爱因斯坦场方程是二阶非线性偏微分方程组。在宇宙学原理（假定在宇观尺度上空间物质呈均匀各向同性分布）的基础上，广义相对论场方程可以简化为宇宙演化的动力学方程——弗里德曼（Friedmann）方程：

$$d_L = \frac{c(1+z)}{H_0} \times \int_0^z \left\{ (1+z')^3 \Omega_M + \Omega_\Lambda \exp \left[3 \int_0^z \frac{1+w(z')}{1+z'} dz' \right] \right\}^{-1/2} dz' \quad (2)$$

式中的 H_0 指当前的哈勃参数值， Ω_M 指宇宙物质组分的相对密度， Ω_Λ 指起排斥作用的神秘暗能量的相对密度（对应宇宙学常数项）， d_L 代表我们离“标准烛光”的距离（值得注意的是，早在 1922 年，弗里德曼首次提出动态宇宙学模型的方程时，是没有包含宇宙学常数项的）。

另有星等红移关系：

$$m = M + 5 \log d_L(z, \Omega_M, \Omega_\Lambda) + 5 \log H_0, \quad (3)$$

其中 $M \equiv M - 5 \log H_0 + 25$ 为星等零点，可由低红移样本的视星等及红移测得。由(2)，(3) 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相比，通过调整 Ω_M 、 Ω_Λ 值使得两者间的差别最小，就可以确定宇宙各个组分的比例。但进行该项探索的前提是我们要找到一类具有均匀光度并且足够亮的天体，而 Ia 型超新星正是满足这一条件的天体。

超新星

超新星是大质量恒星演化到终期时毁灭自己的一种方式，是宇宙中较稀有的极高能爆发天象（释放的总能量约 $10^{51} \sim 10^{53}$ 尔格）。在一个典型星系中，大约要几百年才会有 一颗超新星爆发。所以，对这种天体物理现象进行更广泛的研究需要我们大范围地扫描多个星系，这就是巡天。随着观测水平的不断提高，发现的超新星越来越多，现在每年都会有好几百颗超新星爆发被发现，平均每天都会有一到两颗。若我们能有望远镜一般的“视力”，会看到就像夜空中不断点燃的焰火。银河系在过去的 1 千年中记录了 4 颗超新星爆发，分别是 1006、1054、1572 以及 1604 超新星。前两颗超新星在我国宋朝时期爆发，具体爆发的位置以及亮度信息在宋史上

有非常详细的记载，因而又称为“中国超新星”。1572 超新星又叫第谷超新星，而 1604 超新星则称为开普勒超新星。银河系爆发的超新星通常非常亮，肉眼甚至在白天也可见，爆发后形成的遗迹称作超新星遗迹（图 1）。第一颗记录到的河外超新星是 1885 年在仙女座大星云中爆发的超新星 SN1885A。自那以来迄今共记录了约 6000 颗河外超新星的爆发。

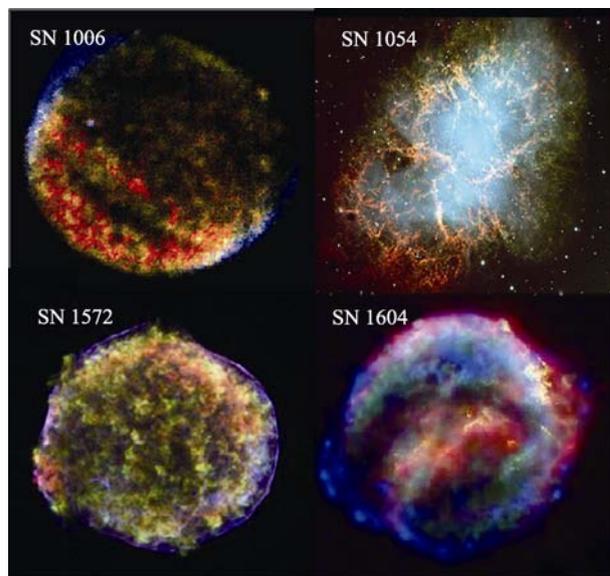


图 1 银河系在过去的 1000 年中爆发的超新星产生的遗迹

超新星的命名规则如下：前缀 SN 或 sn（supernova），紧随其后是超新星发现的年份，最后附字母表示是当年发现的第几颗超新星，字母顺序是 A, B, ..., Z; aa, ab, ..., az; ba, bb, ..., bz, ... 例如 SN2011fe 这颗超新星，它表示的是 2011 年发现的第 161 颗超新星。依据光学光谱的特征，超新星可分为 I 型和 II 型：I 型光谱中不含氢的巴耳末线，而 II 型光谱中含有氢线（见图 2）。I 型超新星又可分为 Ia, Ib 和 Ic 次型。物理上 Ia 型超新星（在 615nm 附近有深的 Si II 的吸收槽）普遍被认为是由白矮星通过吸积伴星的物质达到钱德拉塞卡（Chandrasekhar）质量极限（约 $1.4M_{\text{sun}}$ ）而爆炸产生的；Ib 型超新星（光谱中有显著的 He 线）和 Ic 型超新星（光谱中没有 He 线）则是通过星风或者物质交流而丢失外部 H/He 的大质量恒星的核心塌缩而成的。II 型超新星（SN II）则来自于初始质量大于 $8 \sim 10M_{\text{sun}}$ 恒星的中心铁核塌缩，并伴随着外部壳层物质的抛射。II 型超新星依据光变曲线的形状以及光谱特征可进一步细分。因为超新星爆发

是高速的物质膨胀抛射过程，其光谱中的吸收线往往会有系统的蓝移，据此可以测量膨胀速度。

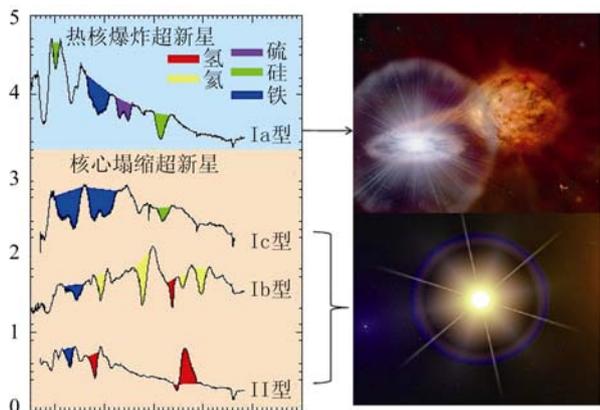


图 2 左：超新星的光谱分类简图，
右：超新星爆发前身星模型示意图

下面来详细描述下两种类型的超新星爆发机制——热核爆炸和星核塌缩。一般认为 Ia 超新星起源于双星系统中吸积白矮星的热核爆炸。对于单简并情况（一颗白矮星+一颗主序伴星/巨星），白矮星通过洛希瓣吸积其伴星的物质使得质量不断增长。当白矮星质量增长至钱德拉塞卡极限（对于非转动白矮星，这个质量极限为约 1.4 倍的太阳质量）时，电子简并压不足以抵抗自身引力，白矮星开始塌缩。引力能转变为热能导致温度升高，而简并物质并不会通过膨胀向外做功，高温导致中心碳以及氧点火并导致不稳定的热核燃烧。核反应释放能量又使得温度进一步升高。对一般的碳氧白矮星而言，引力能不足以束缚燃烧产物，必将导致整个星体爆炸。这种热核爆炸释放出的能量可以将整个碳氧白矮星炸碎，并合成大量的放射性元素镍（Ni），镍衰变产生的能量又将抛射物质加热（ $^{56}\text{Ni} \rightarrow ^{56}\text{Co} \rightarrow ^{56}\text{Fe}$ ），从而使 Ia 型超新星看起来非常明亮。另一种超新星爆发机制是大质量恒星演化至晚期时，星核的引力塌缩所致。大质量恒星在演化过程中会形成所谓的“洋葱结构”——由外向内，元素的原子序数逐渐增加的结构。具有热的核心被稍冷的外壳包围着。核反应产生能量，首先氢反应形成氦，然后氦聚合成碳……接近终点，星核由硫和硅组成，这些元素进一步反应形成铁。众所周知， ^{56}Fe 是最强的束缚核，因此没有提供能量的进一步核反应。铁核继续增长，由电子简并压加以支持。但有一个极限：当星核增长到钱氏质量，引力超过电子简并压，星核

便塌缩。下落的物质碰到铁核产生反弹激波将恒星物质向外推出最终导致超新星爆发。Ia 型超新星爆发的结果是恒星彻底瓦解，物质完全抛散，成为超新星遗迹；而核心塌缩超新星爆发则可能抛射掉大部分物质，在中心留下致密的中子星或黑洞。

超新星在天体物理许多领域中都扮演着重要角色。首先，超新星可作为极端物理的实验室，在爆发过程中人们可以探测到许多复杂的物理过程。例如中微子和引力波辐射，热核燃烧传播以及爆炸核合成，放射性元素衰变，辐射转移以及激波同星周物质的相互作用等。其次，超新星作为恒星演化的终点之一与许多重要的天体物理问题紧密相关，如恒星形成和演化、宇宙金属增丰、星系的化学演化以及伽玛射线暴等。最后，超新星(尤其是 Ia 型超新星) 在过去的十多年中在观测宇宙学中起到了至关重要的作用。它们是发现加速膨胀宇宙的基础，同时也是准确测定我们今天宇宙膨胀速率（哈勃常数）的最强有力的工具。超新星在现代宇宙学中的地位可由自 2000 年设立的格鲁伯宇宙学奖（Gruber Prize），于 2000 年，2007 年和 2009 年分别三次授予用超新星研究宇宙的天文学家的事实而彰显出来。

Ia 超新星作为宇宙的灯塔

如前所述，若 Ia 超新星源于 1.4 个太阳质量的白矮星热核爆炸，那么它的爆炸能量大致就是一个定值，内禀光度应该也大致是一个定值。同时，Ia 超新星爆炸非常亮，释放能量达 10^{53}erg 量级，即使在宇宙深处（红移 $z>1$ ）也能被探测到。这使得 Ia 超新星可成为非常好的“标准烛光”，可以被用来确定距离。简单描述一下：一个内禀亮度固定的蜡烛，离我们越远，看起来就会越暗，因为我们接收到的光子流量变小了。流量 f 、距离 D 和光度 L 三者之间关系为： $f = \frac{L}{4\pi D^2}$ 。所以，假设我们已知 Ia 超新星爆炸的绝对光度，通过测定视亮度就可以定出距离了。另一方面，通过爆炸超新星寄主星光谱谱线的红移，我们可以计算其退行速度。当然，对于高红移天体，这主要反映的是一种时空膨胀效应，星系内部局域的本动与之相比则可忽略不计（因为此处宇宙膨胀得太快了）。鉴于前述 Ia 超新星作为标准烛光的优越性，Ia 超新星的哈勃图——星等-红移关系，现在已成为研究宇宙学最有力的工具之

一：其线性部分可用于确定哈勃常数（这是由于一些近邻星系中爆发的 Ia 型超新星的绝对光度可以通过观测超新星寄主星系中造父变星的周期-光度关系来独立测定。因而通过测量 Ia 超新星哈勃图的线性部分我们可以精确测定哈勃常数。目前 Ia 超新星也是当前测量哈勃常数最精确的工具，可以使 H_0 的测量精度可以达到 3%~5%）；而弯曲部分可以测定宇宙密度参数，研究宇宙的膨胀历史。

利用超新星来测量宇宙参数始于 1968 年，科瓦尔（Kowal）做出了第一幅 I 型超新星的哈勃图，星等弥散约为 0.6mag。这一是因为科瓦尔并没有将 Ia 超新星从 I 型超新星中分离出来，二是受制于当时的观测设备，采用照相方法，得到的星等很不准确。后来观测技术和手段不断改善，望远镜上开始使用 CCD 相机进行观测。并且 Ia 型超新星作为一类均匀且高亮度的 I 型次型被提出来，由它们构成的哈勃

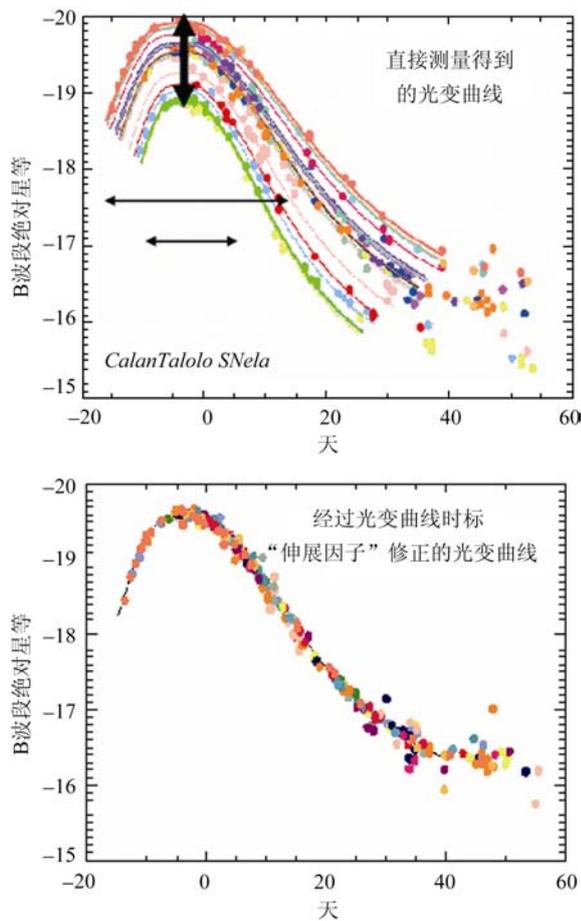


图 3 上：不同 Ia 型超新星光变曲线（超新星光度随时间的演化）。亮的超新星具有更宽的光变曲线峰，反之亦然。下：经过光变曲线形状矫正后的不同超新星光变曲线，峰值光度弥散在 20% 以内

图星等弥散在 0.3~0.5mag 之间。而现在，通过对 Ia 型超新星峰值光度进行光变曲线形状参数及主星系消光修正（图 3、图 4），它们哈勃图弥散可以控制在 0.16~0.20mag，这相当于 8%~10% 的距离测量的误差。

下面简述一下 Ia 型超新星峰值光度的标准化过程。首先，人们发现 Ia 型超新星的内禀峰值亮度与光变曲线的形状有关。如图 3 所示，光极大时越亮的 Ia 超新星，光变曲线越宽（光变时标越长）。天文学家菲利普斯（M.M. Phillips）首先将 Ia 超新星峰值光度与光变曲线形状的关系进行量化，这一关系也因此被称作“菲利普斯关系”，此后被用作校准 Ia 超新星的峰值光度。

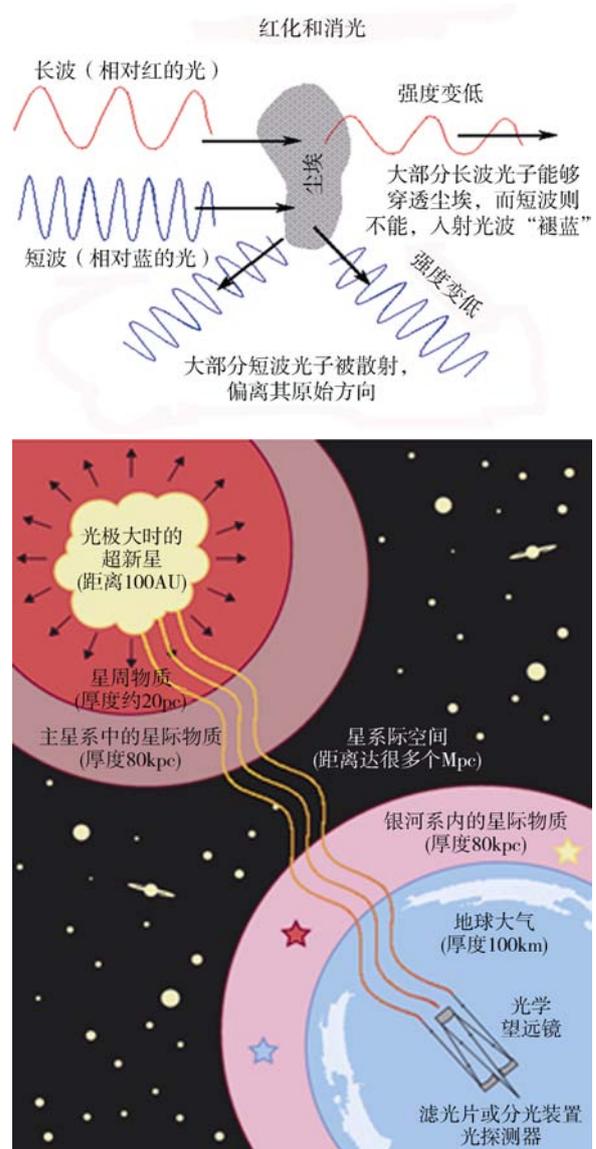


图 4 主星系尘埃对超新星光度的影响

此外,在经过上述改正之后,还发现 Ia 超新星峰值光度与其在光极大时的颜色、主星系消光等仍然存在很强的相关。主星系中的尘埃物质对超新星发出的光会存在吸收和散射,而在短波段尤为强烈,这就导致我们看到的超新星比其本征颜色偏红,这种现象叫主星系的红化或者消光(图 4)。所以我们需要使用一些方法去除这种影响。在经过这些改正之后,最终可以将 Ia 超新星的峰值光度弥散哈勃图的弥散降至 20%以下。

超新星巡天历史

自 20 世纪 30 年代罗伯逊(Robertson)及沃克(Walker)对于均匀各向同性的宇宙建立度规以来,测定宇宙整体几何形状就成为天文学上的一个基本问题。既然 Ia 型超新星可以校准成较好的标准烛光,那我们通过探测宇宙早期爆发的 Ia 超新星,可以研究他们的光度与红移的关系,就可以对宇宙膨胀的历史做出限制。

对高红移超新星的寻找可以追溯到 1988 年,一个丹麦的研究组经过两年的搜寻发现了一颗红移 0.3 的 Ia 型超新星,这是历史上第一颗高红移超新星。20 世纪 90 年代后期,本文介绍的三位诺贝尔奖获得者参与的两个研究团队——“超新星宇宙学项目(SCP)”和“高红移超新星巡天组(HZSST)”,独立地进行高红移超新星的搜寻工作。SCP 由劳伦斯伯克利实验室的珀尔马特带领,1989 年便已启动;而位于澳大利亚斯特罗姆山天文台及塞丁泉天文台的 HZSST 在施密特的带领下,于 1995 年发现了他们的第一颗超新星。两个团队采用了类似的搜寻技术。首先,他们都使用了位于智利的美洲天文台口径 4 米的 Blanco 望远镜进行巡天。配备 30' × 30' 视场的大透光率照相机,曝光十分钟便产生一幅包含约 5000 个星系的图像。将同一天区不同时刻(一般相隔 20 天)拍到的图像严格对齐并相减,得到一个包含绝大多数变源的图像,排除小行星、活动星系核、类星体、宇宙线等之后,如果还出现显著偏零的情况,就认为是超新星的初步候选体。随后用当时世界上最好的地面望远镜(Keck I, II)及哈勃空间望远镜(HST)对候选体进行光谱证认工作。在证认为 Ia 型超新星后,一系列的测光工作便在全世界范围内的大望远镜展开。

两个研究组早期共发表了近 60 颗高红移 Ia 超新星的数据成。珀尔马特等人原本是想证实宇宙在

减速膨胀。可以想象,一个由万有引力主导的宇宙系统,膨胀必然是减速的。但是,测到的结果却让所有人都震惊了,两个研究团组均发现高红移处的 Ia 型超新星比模型预期的更暗。这表明宇宙的膨胀是在加速而不是减速。经过反复检查,排除可能的系统误差后,两个小组在 1998 年 2 月举行的“暗物质 1998”国际会议上公布了各自的观测结果。SCP 和 HZSST 两个小组分别观测了 42 和 16 颗高红移 Ia 超新星,他们都得出了 $\Omega_M = 0.3$, $\Omega_\Lambda = 0.7$ 的宇宙学模型与观测结果符合最好的结论。将其代入减速因子计算式 $q_0 = \frac{\Omega_M}{2} - \Omega_\Lambda$ 可以得到宇宙减速因子 $q_0 < 0$, 这说明我们今天的宇宙是在加速膨胀而非减速。

宇宙加速膨胀这一重要结论一经发表,就被美国《科学》杂志评选为当年最具突破性的科学发现。鉴于珀尔马特、施密特以及里斯等人对人类认识宇宙的贡献,他们于 2006 年分享了著名的香港邵逸夫天文学奖,并在 2007 年获得宇宙学最高奖项——格鲁伯宇宙学奖。

作为上述两个项目的延续,“超新星遗产巡天”项目(SNLS)和“超新星追踪宇宙膨胀和状态方程”项目(ESSENCE) 分别利用夏威夷的 3.6 米望远镜和位于智利的 4 米望远镜进一步开展了高红移超新星的巡天。他们在 21 世纪发现并观测了大量红移 0.3~1.0 的超新星。里斯等则利用哈勃空间望远镜(HST)开展了更高红移的超新星巡天,发现若干红移大于 1.2 的 Ia 超新星并得到了其光变曲线。斯隆数字巡天项目(SDSS)也于近年加入了超新星巡天队伍,他们观测了上百颗红移在 0.1~0.5 的中等红移超新星。这极大地丰富了 Ia 超新星在较高红移及中红移处的数据采样(图 5),对完善和提高宇宙学参数测量精度有重要意义(图 6)。

加速膨胀的宇宙与暗能量

对于宇宙加速膨胀现象,现在存在三种可能解释:(1)起源于宇宙学常数;(2)未知的动力学暗能量(75%);(3)广义相对论在宇观尺度上失效。

关于是什么驱动了宇宙的加速膨胀,宇宙学常数是首要的候选者,爱因斯坦曾将其引入场方程作为抵抗万有引力产生静态宇宙的原因。值得指出,在如今的宇宙学研究中,宇宙学常数又有了深一层的意义,它包含真空能。按照量子场论,真空是所有量子场的基态,而每个量子场的基态都是具有零

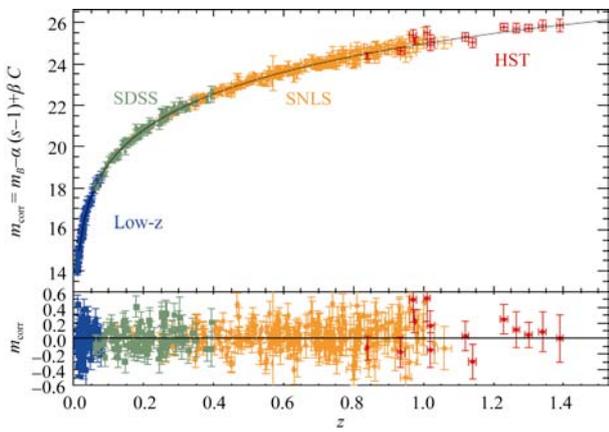


图5 Ia 超新星的哈勃图。实线代表最佳拟合模型 $\Omega_M=0.27$, $\Omega_\Lambda=0.73$ (物质密度占 27%, 暗能量密度占 73%)

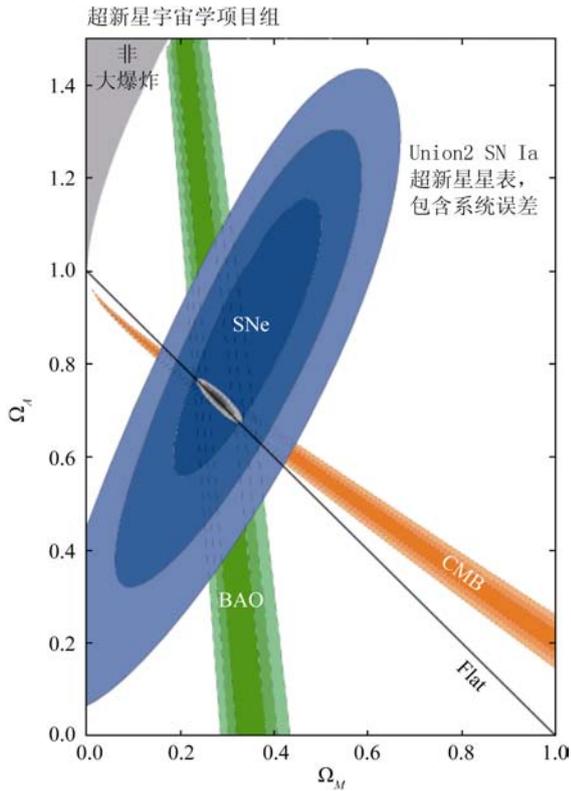


图6 利用当今最大的 Ia 超新星样本对宇宙密度参数所作的限制 (图片来自 <http://supernova.lbl.gov/>)

点能的, 即真空能量密度非零。广义相对论认为时空弯曲(引力)源于质量-能量的存在, 故真空能必存在引力效应。在原来的场方程中加上真空能项, 并与宇宙学常数项合并, 我们可以定义一个新的“有效宇宙学常数”。

但是对于真空能, 目前量子场论的理论预言值远远大于实际观测值, 由广义相对论和粒子物理标准模型计算的理论值约为实测值的 10^{120} 倍。另外,

若将宇宙学常数看作不随宇宙演化的常数, 难以解释宇宙中的一些巧合现象, 如宇宙学常数恰好与今天的物质密度差不多大(演化的物质密度和一个“常数”差不多大)。但如果假定驱动宇宙加速膨胀的神秘能力是随宇宙演化的, 结果可能就不一样了。因此宇宙学家们构造出了各种动力学能量场来解释宇宙的加速膨胀及上述巧合现象, 这些动力学能量场, 也就是暗能量。

暗能量一词是美国芝加哥大学天体物理学家特纳 (Michael Turner) 引入的。1998 年, HZSST 和 SCP 通过对 Ia 型超新星的观测, 发现今天的宇宙正在加速膨胀, 而暗能量可能是驱动这种加速膨胀的内在因素。

在标准的弗里德曼-罗伯逊-沃克 (FRW) 宇宙学的框架下, 通过爱因斯坦场方程得到宇宙演化的纯时间分量方程:

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

其中 a 是宇宙尺度因子, G 为万有引力常数, P 和 ρ 分别为宇宙中各种成分的总压强和总能量密度。要使宇宙加速膨胀 $\ddot{a} > 0$, 必须要求宇宙中各种成分的总压强为负: 即 $p < -\rho/3$ 。然而, 通常的辐射、重子物质和冷暗物质, 所有当时已知成分的压强都是非负的; 观测数据需要一种具有负压性质的物质来推动宇宙的加速膨胀, 并将它命名为暗能量。现在根据宇宙微波背景辐射 (CMB)、Ia 型超新星等观测数据进行拟合, 得出的最新结果是: 宇宙中大约 75% 是这种未知暗能量, 此外有 21% 左右的冷暗物质, 而我们熟知的普通物质大概仅占 4%。

暗能量在宇宙空间中几乎均匀分布, 不参加电磁作用, 对光来说是透明的, 这不由得使我们想起了曾经的风靡一时的“以太”。而暗能量最终能不能够得到证实, 以及其更多的性质是什么, 尚需要时间的检验。暗能量的基本特征就是负压强, 这不同于我们熟知的辐射、重子物质甚至是同样神秘莫测的冷暗物质。这实在很难理解。目前科学家们提出刻画暗能量的状态方程, 通过调整状态方程的参量刻画不同物理性质的暗能量。暗能量的负压特性使得它不显示“万有引力”, 而是表现“万有斥力”, 它引起的时空弯曲是一种排斥效应, 会促使宇宙的膨胀加速而非减速。

展望和结语

尽管目前 Ia 超新星的热核爆炸模型已得到广

泛认可，但其中更加具体的物理还不得而知。比如 Ia 超新星到底是起源于白矮星吸积伴星还是双白矮星合并导致的热核爆炸？爆炸传播中的爆燃和爆轰问题，点火位置、爆炸对称性问题等都还需要更详尽、更强有力的证据和研究。

我们建立标准烛光，需对 Ia 超新星进行光度修正；然而要使得哈勃图的弥散最小，Ia 超新星主星系的 V 波段消光系数 R_V 需取 1.8 左右，这与银河系的 $R_V=3.1$ 大相径庭。究竟是河外星系尘埃组成不同于银河系呢，还是我们对超新星主星系红化的估计存在问题？另外，近几年观测技术不断提高，数据不断积累，发现即使同为 Ia 超新星，其光谱及光变曲线仍然存在不小的差异。将 Ia 超新星进一步细分提取更均匀样本用于宇宙学研究也是一个值得考虑的方面。

尽管有很多观测证据证实了宇宙在加速膨胀，但驱动宇宙加速膨胀的暗能量究竟是什么？它到底只是一个常数，还是会随着时间演变？除了负压特征，它还有哪些性质？要对暗能量进行更加细致准确的限制，超新星的观测和研究面对着更大的挑战，例如要想将宇宙状态参数的误差控制在 2%~3%，我们需要将 Ia 超新星的测距精度提高到 1% 左右，而当前的测量精度仅在 6%~9%。

要使超新星成为更加优秀的“标准烛光”，研究其爆炸本身的多样性就是根本。低红移超新星由于易于观测和进行细致研究近年来成为热点。例如，目前美国帕洛玛山正在进行的光学变源巡天（The Palomar Transient Factory, PTF），就发现了大量低红移超新星。近年来，由法国和美国科学家组成的“邻近超新星工厂（SNFactory）”利用高度自动化的巡天观测系统，集中致力于低红移（0.03~0.08）Ia 超新星的观测。还有，我国首台南极巡天望远镜（AST3），即将开展高时间分辨率的大视场滚动巡天观测，这将发现大量红移 $z < 0.1$ 并处于爆发极早期的年轻超新星，这有助于了解超新星爆发瞬间的物理状态，进而使其更好地服务于

宇宙学研究。

当然，作为研究宇宙参数最重要的手段之一，国际上对高红移超新星观测和研究热情依然未减。美国下一个 10 年天文计划中排在首位的空间大型项目——大视场红外巡天望远镜（WFIRST）以及地面的大型全景巡天望远镜（LSST）都将观测和研究超新星放在非常显著的地位。它们将大大扩充高红移超新星的样本容量，并计划利用 Ia 型超新星来测量暗能量状态方程的时间演化。另外，我国南极天文台计划建造的 2.5 米级光学望远镜也将探测高红移超新星作为科学重点之一。

鉴于超新星爆炸中涉及的诸多物理问题，以及其在追踪宇宙演化中扮演的重要角色，作为天体物理和宇宙学的研究热点之一，可以说在未来几十年里都丝毫不会褪色。

最后，以一个古老的寓言作结：宇宙规律隐藏于茫茫黑暗之中，上帝说：要有光。于是牛顿诞生了。而如今，闪耀宇宙的超新星，不也是照耀我们求知道路的一盏盏明灯？

（清华大学物理系 100083）

