

超新星与宇宙未来

李 良

(北京天文馆 100044)

超新星是一些质量较大的恒星演化到晚期发生爆炸所产生的天体。它们在短时间内很明亮，一颗超新星的亮度可以相当于整个星系。超新星中有一类被称作 Ia 型超新星，天文学家认为它的亮度是基本稳定的，可以当作“标准烛光”来使用。也就是说，它距离地球越远，人们看到它就越暗，因此在天文学中可以用它们来测定宇宙学距离，从而探索宇宙的演化。

从爱因斯坦到哈勃

早在 17 世纪时，伟大的科学家牛顿在宇宙学研究中把空间、时间和物质割裂开来，分别加以研究，他认为三者是各自独立的或者说是绝对的。在这种时空观和万有引力理论的基础上，牛顿建立一种宇宙总体是稳定的、无限的宇宙模型，其局部区域可以因不稳定性而形成天体。但这种模型无法解释后来的德国学者奥尔伯斯提出的“夜空为什么是黑的”问题，即著名的“奥尔伯斯佯谬”（无限的宇宙布满无数恒星，

夜空必然是亮的而不是黑的）。20 世纪初，科学大师爱因斯坦先后创立狭义相对论和广义相对论，提出时间和空间不是各自独立的，而都是跟物质和运动密切联系在一起的物质时空。根据现代宇宙学理论，我们的宇宙演化遵从广义相对论场方程。

1917 年，爱因斯坦根据广义相对论，得到宇宙不是膨胀就是坍缩的结论。为了得到一个静态的宇宙模型，爱因斯坦引入了宇宙学常数项（用希腊字母 Λ 表示）。加入该常数项之后，引力场方程就同时包含了引力和斥力，能够让宇宙达到一种平衡状态，可让宇宙稳定下来。由此，爱因斯坦得到了一个静态的宇宙学模型。

所谓造父变星属于恒星中一类高光度周期性脉动变星，即它的亮度随时间呈周期性变化。因其典型星是仙王座 δ 星而得名。仙王座 δ 星最亮时为 3.7 星等，最暗时只有 4.4 星等，这种变化很有规律，周期为 5 天 8 小时 47 分 28 秒，这称作光变周期。这类星的光变周期有长有短，但大多在 1 至 50 天之间，而且以 5 至 6 天为最多。由于我国古代将仙王座 δ 星称作“造父一”，所以天文学家便把此类脉动变星统称为造父变星。美国女天文学家勒维特，在 20 世纪初研究了上千颗造父变星，结果发现了一种测量遥远恒星距离的方法。

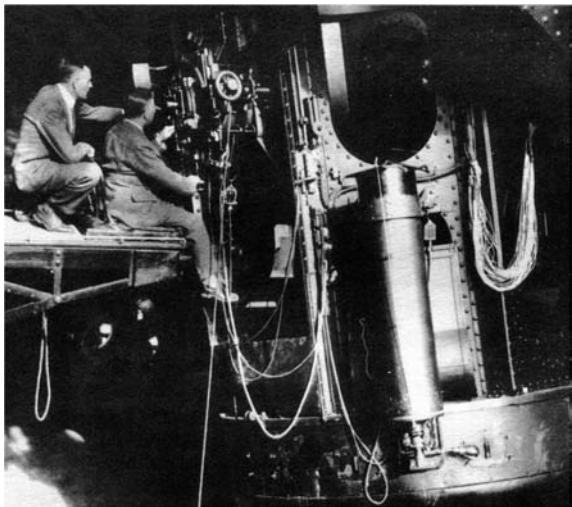
勒维特在研究中发现，越明亮的造父变星，脉动的周期也越长；而且这些脉动变星的亮度变化与它们变化的周期存在着一种确定的关系，光变周期越长，亮度变化越大。利用观测到的恒星信息，勒维特能够计算出造父变星自身的亮度。考虑到只要有一颗造父变星的距离是已知的，其他造父变星的距离就可以推算出来——恒星的光显得越暗，它的距离就越远。一种最初的、而且可靠的标准烛光就这样诞生了。人们后来把这个发现叫做周光关系，并得到了周光关系曲线。以后在测量不知距离的星团、星系时，只要能观



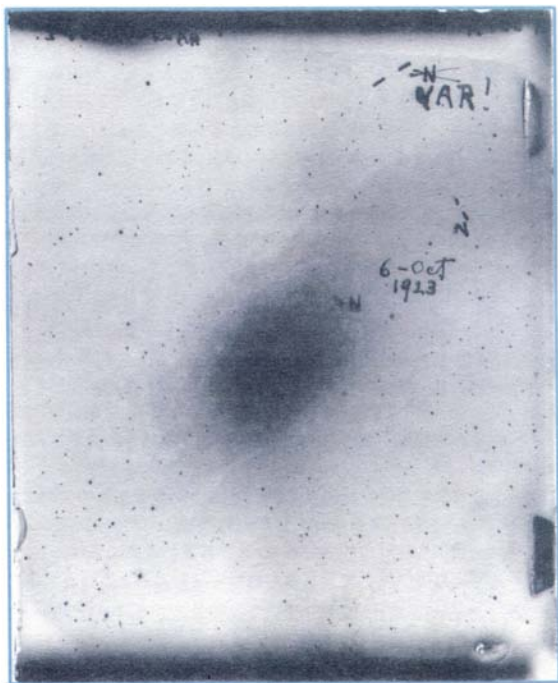
著名的美国天文学家哈勃

测到其中的造父变星，利用周光关系就可以将星团、星系的距离确定出来。因此，造父变星被人们誉为“量天尺”。利用这些造父变星，天文学家后来就得出结论：银河系只是宇宙中许许多多的星系之一。

著名的美国天文学家埃德温·哈勃在 1929 年发



美国天文学家哈勃和著名英国科学家詹姆斯·金斯坐在威尔逊山天文台口径 2.5 米的胡克望远镜的观测室里。伴随天体照像技术的进步，天文学家可揭示肉眼无法看到的暗弱天体，通过延长曝光时间可显现出越来越多的天体



哈勃用胡克望远镜拍摄了这张仙女座星系（M31）的底片。在此底片上，哈勃首次在旋涡星云中发现了造父变星。它最初在右上角标注了一个“N”，表示新星，后来他意识到这是一颗“变星”，于是又标注了“VAR”

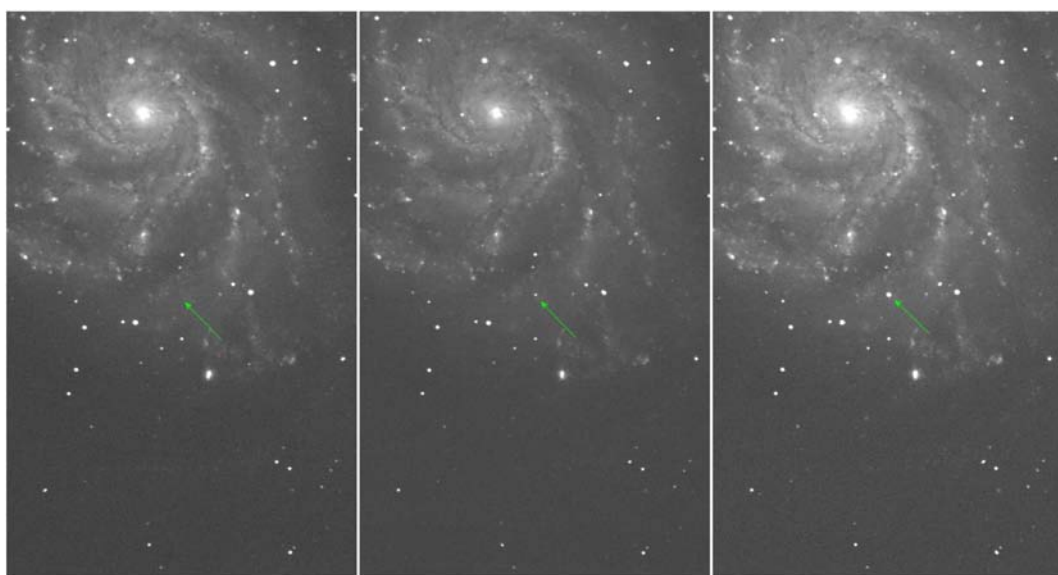
现遥远的河外星系的谱线均有红移，而且距离越远的星系红移越大，于是得出一个重要结论：星系看起来都在远离我们而去，距离越远的星系远离我们的速度越快。哈勃的这一发现提供了宇宙膨胀的证据，揭开了大爆炸宇宙理论的序幕。

其实，早在 20 世纪初，美国天文学家斯莱弗就观测发现，一些旋涡星云有光谱红移现象（多普勒效应引起远离我们而去的恒星发出光线的光谱将向红端移动）。虽然他的观测证实了大多数旋涡星云正在远离地球，不过他并没有因此联想到这对宇宙意味着什么，也不认为发现的星云其实是银河系外的其他星系。哈勃正是在斯莱弗的基础上，对遥远星系的距离与红移开展了大量扎实的观测，终于在 1929 年得出了突破性的伟大天文发现。后来，爱因斯坦在获悉哈勃发现宇宙膨胀之后，放弃了他以前的观点，并认为加入宇宙学常数项是他一生中最大的错误。

从 SN 2011fe 超新星说起

2011 年 8 月 24 日，美国加利福尼亚州劳伦斯伯克利国家实验室的天文学家在 M101 星系中发现了一颗明亮的 Ia 型超新星，其正式编号为 SN 2011fe。这颗超新星是利用帕洛玛天文台口径 1.2 米施密特望远镜发现的，该天文望远镜的极限星等约 20.6 等，近年来积极投入亮度变化快速的瞬变事件（Transient Event）搜寻工作，即所谓的 Palomar Transient Facility，简称 PTF 搜寻。PTF 于 8 月 23 日晚间观测影像中尚未见到 M101 中有任何超新星，却在隔天 24 日晚间的观测图像中出现，因此推测这颗超新星是在 23 日望远镜收工后几个小时内就开始爆发，原始编号为 PTF11 kly，位在 M101 星系中心以西 59 角秒、以南 271 角秒之处。最初观测到的亮度约为 17.2 等，但这颗超新星亮度变化相当快速，在 8 月 25 日达 13.8 等，27 日达 12.4 等，30 日达 11.5 等，到了 31 日已达 10.8 等。

根据后续光谱观测结果，SN 2011fe 光谱中的谱线很宽，且有蓝移现象，从钙离子和硅离子谱线的宽度，推测爆发后的物质正以每秒 14500 ~ 16500 千米的速度向外膨胀着，但这颗超新星光谱中没有氢谱线。这是 Ia 型超新星的光谱特征。美国加利福尼亚州劳伦斯伯克利国家实验室的研究人员纽金特说：“我们



M101 中的超新星 (SN 2011fe) 爆发前后对比以及彩色特写照片 (图中箭头指处)

观测到这颗超新星仅爆炸后 11 小时的情景，因此我们能够 在 20 分钟之内精确计算出超新星的爆炸时间。”超新星拥有较多的构成地球和其他恒星的元素，例如：超新星是宇宙中铁元素的主要来源，因此地球的形成需要大量的超新星爆炸残骸物质。SN 2011fe 爆炸的光谱向人们透漏其中包含着碳和氧，因此可以掌握 Ia 类型超新星以碳氧白矮星开始爆炸的第一直接证据。

Ia 型超新星原是双星系统，其中一颗为白矮星，

当主要成分为碳和氧的白矮星不断吸取伴星物质，并会形成一个盘状螺旋，最后导致一场猛烈的超新星爆发，即当它的总质量超过 1.4 倍太阳质量（钱德拉塞卡极限）时会引起恒星瓦解性大爆炸。爆炸时的亮度比 10 亿颗太阳还亮。

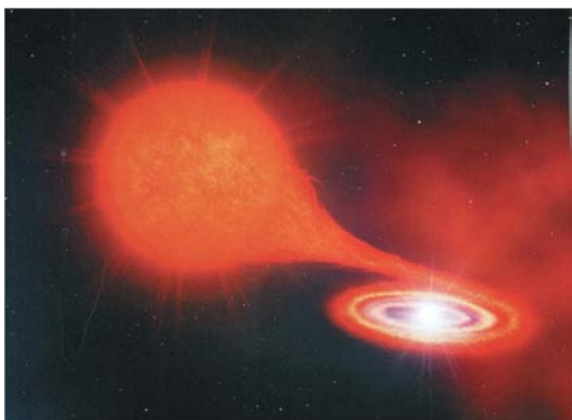
对天文学家而言，从未见过像 SN 2011fe 这样在爆发极早的增亮时期就观测到，且如此明亮的 Ia 型超新星，因此意义相当重大。这项研究报告发表在 2011 年 12 月 15 日出版的《自然》杂志上。

事实上，Ia 型超新星早在 20 世纪末就已引起天文学家的高度重视了。1998 年以前，天体物理学界一直认为宇宙在减速膨胀，直到美国天文学家珀尔马特等人对 Ia 型超新星的观测研究才取得突破性进展。2011 年 10 月 4 日，瑞典皇家科学院将 2011 年诺贝尔物理学奖授予美国科学家索尔·珀尔马特 (Saul Perlmutter)、拥有美国和澳大利亚双重国籍的科学家布赖恩·施密特 (Brian P.Schmidt) 以及美国科学家亚当·里斯 (Adam G.Riess)，以表彰他们在天体物理学方面的卓越研究成果。

Ia 型超新星

说起来，“超新星”概念是 1934 年美国天文学家兹维基和巴德提出来的。他们研究认为，当一些恒星寿命结束时将会塌缩，然后发生爆炸，其亮度可达到十亿甚至百亿个太阳的亮度，巴德和兹维基生前观测到了一些超新星。

天文学家们后来认识到，其实有两种不同的超新星，一种是兹维基最早提出的核塌缩超新星，另一种其爆炸机理不同，现在一般认为是白矮星（质量比较低的恒星比如太阳在燃尽核燃料后就会变成白矮星）



Ia型超新星模型示意图，白矮星吸取其伴星的物质时会形成一个螺旋，随着该白矮星的质量达到一个极限（即超过1.4倍太阳质量），最后导致恒星瓦解性爆炸——即猛烈的超新星爆发

从其伴星中吸积物质，到一定程度后发生核爆炸。这里涉及关于恒星演化的著名的赫茨普龙-罗素图，简称赫-罗图，它是丹麦天文学家赫茨普龙及由美国天文学家罗素分别于1911年和1913年各自独立提出的。赫-罗图是研究恒星演化的重要工具。该图绘出了恒星的表面温度与亮度的关系，即不同类型（由恒星的光谱型来划分）的恒星表面温度差别很大。

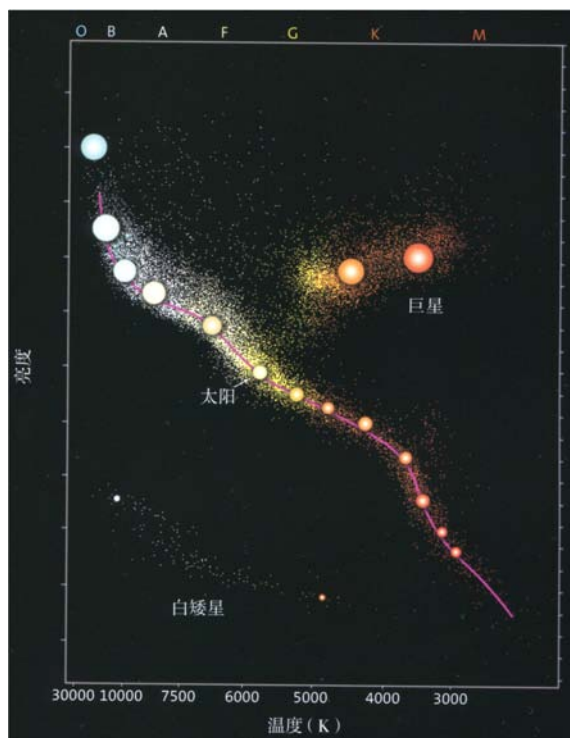
一般来说，恒星的大小变化很大，从300倍于太阳的超级巨星到比地球还小的白矮星或直径只有20千米左右的中子星；有些恒星的年龄只有几百万年，有的却和宇宙一样古老。天文学家可通过赫-罗图对恒星进行分类。银河系中，大多数恒星在赫-罗图上密集于由左上方（高温、强光度）至右下方（低温、弱光度）沿对角线的狭窄带内，形成一个明显的序列，这个序列叫作主星序，又叫矮星序。位于主星序内的恒星叫主序星，因其光度比巨星和亚巨星小，所以又叫矮星。主序星的光谱类型范围很广，从O型到M型。太阳是G2型的主序星。主序星的光度随着表面温度的增高而增大。主序星的质量从约百分之几到约60倍太阳质量，光度从约十万分之一到10万倍太阳光度，半径从比太阳小一个数量级到太阳的20倍左右。主序星的能量来源于内部氢燃烧变为氦的热核反应。进行热核反应的阶段正是恒星演化的中期阶段，恒星在这个阶段停留的时间最长，占其寿命中90%的时间。

从表中可见，不同类型的恒星表面温度差别很大。

恒星在赫-罗图上的位置可提供该星体所处演化

从O型到M型的恒星表面温度列表

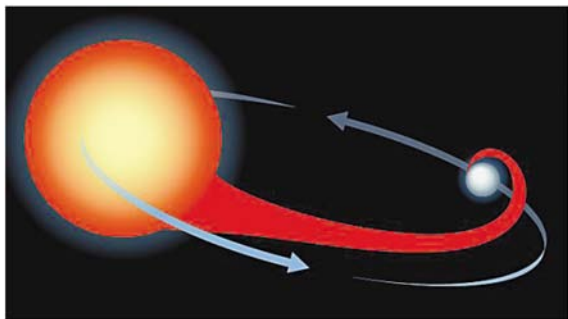
| 类型 | 温度 (C) |
|----|---------------|
| O型 | 40000 ~ 29000 |
| B型 | 28000 ~ 97000 |
| A型 | 9600 ~ 7200 |
| F型 | 7100 ~ 5800 |
| G型 | 5700 ~ 4700 |
| K型 | 4600 ~ 3300 |
| M型 | 3200 ~ 2100 |



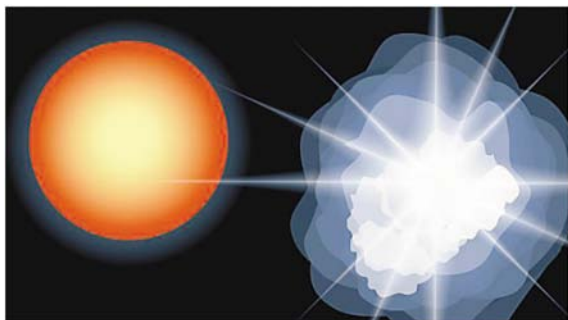
赫茨普龙-罗素图。图中绘出了恒星的温度与亮度的关系。处于对角线上的恒星都处于将氢转变为氦的演化阶段，或称为主序星阶段。当恒星的热核反应无法持续的时候，它将最终演变为白矮星，或者以超新星的形式发生大爆炸。恒星演化的最终结果主要取决于它的质量以及它是否存在于双星体系之中。图的顶部标示了从O到M的字母，表示恒星的光谱类型

阶段和质量的重要信息；处于对角线上的恒星都处于将氢转变为氦的演化阶段，或称为主序星阶段。当恒星的热核反应无法持续的时候，它将最终演变为白矮星，或者以超新星的形式发生大爆炸。白矮星是一种低光度、高密度、高温度的恒星。它的颜色呈白色、体积比较矮小，亮度低，但质量大、密度极高，著名的天狼星伴星是最早被发现的白矮星。一般认为，白矮星是在红巨星的中心形成的。白矮星体积和地球相当，但质量却和太阳差不多，它的密度在1000万吨/立方米左右。

白矮星形成于主序星演化结束的阶段，在漫长的恒星生命期间，它也许已经远离了最初诞生的地区。在成为 Ia 超新星之前，一对靠近的双星系统可能耗费了数百万年的时间进行质量的传输（可能形成持续性的新星爆发）。Ia 型超新星属于变星分类中的一种，系由白矮星产生剧烈爆炸结果的激变变星。不同于其他类型的超新星，Ia 超新星普遍出现在包括椭圆星



Ia 型超新星图示之一：白矮星会通过引力，从它的伴星身上窃取气体



Ia 型超新星图示，当白矮星超过 1.4 倍太阳质量，它就会爆炸，变成一颗超新星

白矮星演变成成为超新星有一个特殊的条件限制——其质量相当于太阳质量的 1.4 倍，这就是天文学上著名的“钱德拉塞卡质量极限”，由印裔美国天文学家钱德拉塞卡最早提出的。钱德拉塞卡 19 岁那年，他因成绩优异获得政府奖学金，从印度只身乘船前往英国剑桥求学。在长达十几天的航行中，他苦心钻研恒星演化，结果奇迹般地初步计算出一个结果。那时的天文学家几乎都认为白矮星阶段是一切恒星演化过程的最终阶段，白矮星会一直冷却和衰落下去，直至熄灭；但是钱德拉塞卡的计算表明，当白矮星接近 1.4 倍太阳质量这个质量限制时，其状况将符合白矮星在热核爆炸中引爆条件，这种核灾变会使白矮星彻底瓦解，爆发时物质大约以每秒上万千米的速度喷出来，

在很多年后形成我们今天看到的超新星遗迹。

发现宇宙在加速膨胀

2011 年诺贝尔物理学奖授予三位在发现宇宙加速膨胀的研究中作出杰出贡献的学者：美国的珀尔马特、里斯和施密特。

珀尔马特领导的超新星宇宙学计划（SCP）小组一开始对于超新星观测研究中的许多困难并不完全了解，随着他们逐渐接近成功，天文学家们也开始看到前途并准备参加竞争。澳大利亚国立大学的施密特和美国约翰·霍普金斯大学的里斯等人也欲进行超新星观测。施密特 1967 年出生于美国，他在哈佛大学读博期间的工作便是与著名天文学家罗伯特·科什纳（Robert Kirshner）一起用超新星测距。里斯 1969 年出生于华盛顿，同样师从科什那，同样做的是用超新星测距的工作。

搜寻超新星所面对的问题是，SCP 小组曾花费几年时间才研制出自动化超新星搜寻软件。能否在短期内研制出这样的软件呢？如果没有，要进行竞争显然是困难的。结果施密特仅用了一个月就开发出了这样一套软件，他没有像 SCP 小组那样完全新做一套软件，而是通过组合一些现成的天文软件并实现了预期的目的。这样，高红移（High-z）超新星观测小组就以出人意料的高速、高效率加入了竞争者的行列。

大约在 138 亿年前，我们的宇宙在一次大爆炸中诞生，然后一直膨胀到今天。对于宇宙的未来，科学家们一般认为有三种可能性：一是膨胀会慢慢停止，然后整个宇宙再缩回去；二是宇宙会加速膨胀下去，变得越来越大，越来越冷，越来越空；最多的人认为，膨胀会减速，但介于以上二者之间。珀尔马特、施密特和里斯当时也是这样认为的。

据说 SCP 和 High-z 这两个小组的竞争非常激烈。这两个研究团队通过寻找遥远空间中爆发的超新星，展开了绘制我们的宇宙“地图”的竞赛。通过确定这些超新星的距离和它们远离我们而去的速度，科学家希望能够揭开宇宙的最终命运。最初，珀尔马特和施密特各自领导的研究小组也以为会发现宇宙膨胀正在减速的迹象，这种减速将决定宇宙会终结于烈火还是寒冰。但到了 1997 年下半年，这两个相互竞争的研

究小组均发现：高红移的超新星比他们原来预期的要暗。如果宇宙膨胀越来越慢的话，超新星应该显得更亮才对。根据哈勃图，这表明宇宙的膨胀是在加速而不是减速。观测结果完全出乎他们的意料，连他们自己一开始都怀疑自己收集的数据。

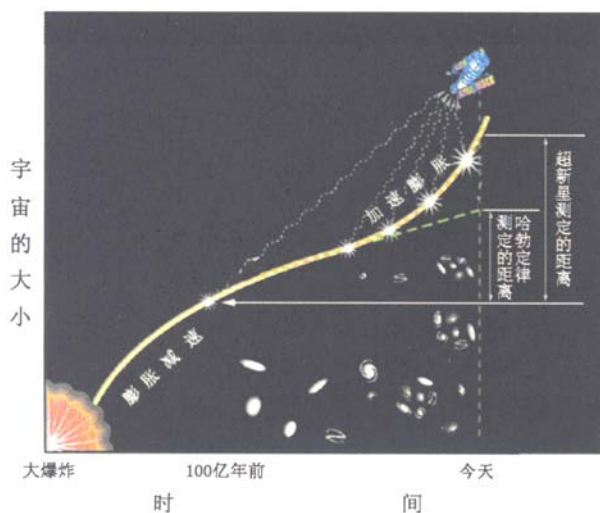
在科学上，有比较才有鉴别。经过反复检查，1998年1月，两个小组几乎同时公布了自己的观测结果，珀尔马特等人发现了42颗高红移量的Ia型超新星，而施密特等人只观测到16颗，但每颗Ia型超新星的误差要小一些。最终，他们一致得出结论：那些远的Ia型超新星的亮度比按宇宙减速膨胀预期的要暗（即更远），这意味着遥远超新星所在的星系正在以越来越快的速度远离我们，也就是说，宇宙不是在减速膨胀，而是在加速膨胀！

当时担任约翰斯·霍普金斯大学教授的亚当·里斯与此次共同获奖的澳大利亚国立大学教授布赖恩·施密特属于另一研究团队，他们独立得出了与珀尔马特团队相同的结论；他们在1998年3月的一篇论文中，收集了16颗高红移和34颗低红移Ia型超新星的数据，得出宇宙加速膨胀的结论。

那时这两个组竞争很激烈。里斯从哈佛毕业后，曾经差一点去了珀尔马特的团队做博士后。里斯对媒体说：“这项发现涉及宇宙在加速膨胀，并暗示暗能量存在。我参与到其中，是一场令人难以置信的探险。能够在卓越的研究机构与优秀的同事合作，我感到非常幸运。”布赖恩·施密特生于美国，现居住在澳大利亚堪培拉，在澳大利亚国立大学主持超新星搜寻小组。他承认，知道获诺贝尔奖消息最初半个小时，自己“确实激动，两腿膝盖发软，一定程度上因为这种（获奖）情形而吃惊。”施密特说他是当晚8时之后才知道消息，电话那头传来的瑞典口音十分真诚。“有点像我第一个孩子出生时的感觉，是一种生命改变的体验。”施密特在接受媒体采访时表示，宇宙加速膨胀的理论一开始受到了不少谨慎的怀疑。“（大家都觉得）引力会减缓宇宙的膨胀，当我们发现相反的事情正在发生时，那真是令人大吃一惊。但是我们越是观察，现象就越明显。”

宇宙加速膨胀这一重要结论一经发表就被美国

Science 杂志评选为当年最具突破性的科学发现，很快轰动了科学界！这项成果揭示了暗能量的存在，动摇了宇宙学理论的根基，为人类从整体上研究宇宙提供了新视角，堪称宇宙探索道路上的里程碑。科学家们认为，这是现代宇宙学研究的一项重大突破，甚至由此导致物理学家重新审视物理学的基本概念和原理。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年分享了具有“东方诺贝尔奖”美誉的香港邵逸夫天文学奖；四年后，瑞典皇家科学院将2011年诺贝尔物理学奖授予了他们这三位发现宇宙加速膨胀的学者。



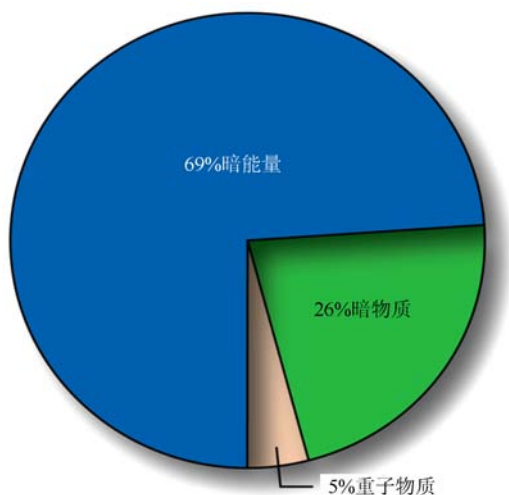
由超新星的观测发现我们的宇宙在加速膨胀示意图。观测发现那些Ia型超新星的亮度比按宇宙减速膨胀预期的要暗（即更远），这意味着遥远的超新星所在星系正在以越来越快的速度远离我们，也就是说，宇宙是在加速膨胀

宇宙加速膨胀与暗能量

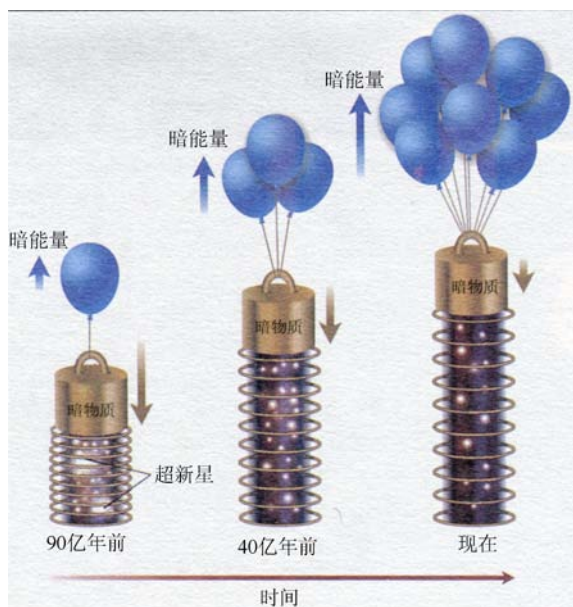
我们的宇宙在加速膨胀，这是一个令科学界震惊的发现。按照广义相对论理论，如果宇宙由一般的“物质”（包括所谓暗物质）组成，其膨胀会逐渐减速，这是万有引力的作用。但如何解释观测到的宇宙膨胀加速呢？如果只考虑引力，不可能观察到宇宙加速膨胀的现象。科学家认为，宇宙中应存在一种人们现在还不清楚物质形态，这种物质形态具有负的压强，这种负压强的物质形态能解释我们观测到的这一类超新星以越来越快的速度在远离我们，这种物质形态被称之为暗能量。

暗能量一词据说是美国宇宙学家迈克-特纳引入的。它实际上也是物质的一种形式，但具有很奇特的

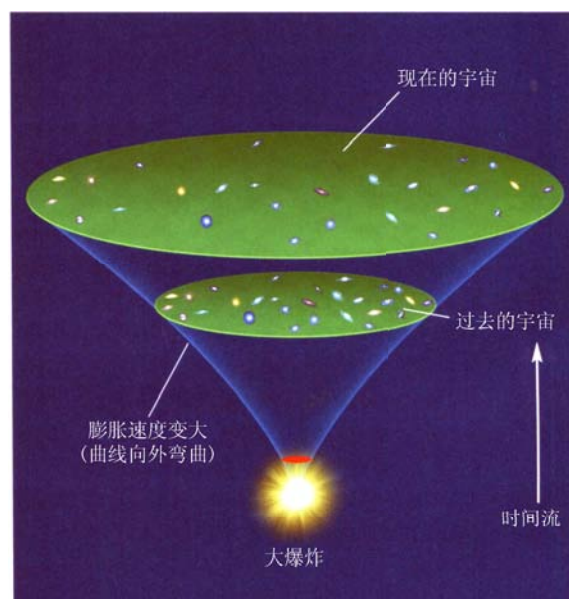
性质。比如，它的有效“压强”小于零，这些压强项使时空的弯曲与一般物质造成的时空弯曲相反，因此可以理解成是与万有引力相对的“斥力”，可以导致宇宙加速膨胀。根据对宇宙微波背景辐射以及超新星等实验数据的拟合表明，宇宙中大约 69% 左右是暗能量，此外还有 26% 左右是不发光的暗物质，而人们熟



宇宙中的暗能量与暗物质的比例示意图。今天的宇宙由 69% 的暗能量、26% 的暗物质和 5% 的普通物质组成；我们的身体、我们所用到的一切，我们看到的天上所有的星星，都只属于那 5% 的宇宙



近年曾有科学家提出理论认为，由河外星系超新星观测推测，暗能量的拉力与暗物质的推力之间的竞争始于 90 亿年前，最终，暗能量逐渐占上风并促使宇宙加速膨胀



宇宙在加速膨胀示意图

悉的普通物质仅占 5%。由此可见宇宙学未来研究的重点是目前未知的暗能量和暗物质。就这样，科学家推论出暗能量应当存在。这不仅是天文学，而且是物理学的一个新突破！

宇宙的膨胀始于 138 亿年前的大爆炸，但在最初的几十亿年里，宇宙膨胀的速度越来越慢，即减速膨胀。此后，它开始加速膨胀。这种加速被认为是由暗能量驱动的，暗能量起初只占宇宙的一小部分。但是，随着物质在宇宙的膨胀过程中逐渐稀释，暗能量变得越来越显著。宇宙的组成成分，除了暗能量以及人类所处地球这样普通物质以外，还有一个组成部分是暗物质。暗物质是宇宙中另一个迄今未解的谜题。与暗能量一样，暗物质也是不可见的。对于这两种物质，我们只知道它们所发挥的作用（一个是“推”，另一个是“拉”）。名字前面的“暗”字，是它们唯一的共同特征。

暗能量是近年宇宙学研究的一个里程碑性的重大成果。目前支持暗能量的主要证据有两个。一个就是上述的对遥远的超新星所进行的大量观测表明宇宙在加速膨胀，即星系膨胀的速度并非像哈勃定律描述的那样恒定，而是在不断加速。按照爱因斯坦引力场方程，加速膨胀的现象推论出宇宙中存在着压强为负的“暗能量”。另一个证据来自于近年对（下转 38 页）