

泛星計畫

文/ 陳婷琬
審稿/ 陳英同

核塌縮超新星與其前身星之研究

前言

「宇宙，人類最後的疆界」，在美國知名科幻影集《星艦奇航記—銀河飛龍》(Star Trek—The Next Generation)中，星艦企業號上面載著已經發展出可以在星系中旅行的下一代人類，為了探索未知、發現新事物的夢想，人類不惜賭上性命。而這股好奇心與無盡的追尋，自古皆然，想知道我們從哪裡來？想知道我們未來會去哪裡？想知道一切的起源。而解開這亙古之謎的鑰匙，就在我們頂上的穹蒼。

從臺灣超新星巡天到泛星計畫

我們可以把宇宙想成是一個非常巨大的動物園，動物園裡面有大象、獅子...等，除了體型有大有小，生活習性也非常不一樣：像是臺灣獼猴喜歡在白天活動，而眼鏡猴則喜歡在夜間出沒。對於不同習性的動物，飼養員會予以不同的食物與生活環境，當遊客想要在日間觀看夜行性動物的生態時，可以到設計成顛倒作息的夜行館。但是對天文學家而



言，我們無法改變天體的規律，所以，對於不同的天體，我們必須以不同的方法進行觀測，並拼湊出其本質。

對瞭解「超新星」(supernova)的本質研究來說，我們利用巡天觀測，以及單一目標後續深入觀測兩種不同方法來進行。在國立中央大學葉永烜教授的主持下，利用中央大學鹿林一米望遠鏡，針對一千多個南天區域的鄰近螺旋星系，定期進行監測，並利用影像對減的方式，將超新星候選者挑選出來。一旦找到候選者，經確認過後即通報國際天文聯合會(IAU)，讓更多天文學家對這顆超新星進行後續的觀測，以光譜辨別出超新星之類型，以及光度變化情況，來瞭解超新星的本身特性與其周圍環境。從2004年到2008年，臺灣超新星巡天計畫共成功通報了十五顆超新星。不過，有鑑於新一代大型巡天計畫—泛星計畫(Pan-STARRS)上線，歷時五年的臺灣超新星巡天計畫宣告結束，將人力轉投至泛星計畫。(請參見臺北星空第39期，陳英同與筆者所介紹之「臺灣超新星巡天計畫」)

參觀動物園要記得買門票，泛星計畫的可見光學望遠鏡，就是讓我們走進宇宙動物園的一組珍貴套票，售價全部約一億美金。在這麼龐大的資金需求下，單一研究機構不太可能可以單獨勝任，所以跨國合作更顯其必要性。除了美國空軍的資助，目前參與泛星計

畫的國家，有臺灣、美國、德國、英國…等，共十多個研究單位。泛星計畫的原型望遠鏡（Pan-STARRS1）已經於2010年5月上線運作，為一座口徑1.8公尺的超廣角望遠鏡，搭配14億像素的CCD照相機，總共要建立4座這樣的望遠鏡。不僅可以監測全天達3/4的區域，極限星等約22.5，對於特殊天區還可得到深度曝光至24星等的影像，並以每4到7天的頻率，重複觀測夏威夷可見天區，對於尋找位置或是亮度有變化的天體，堪稱一大利器。在天空中位置會改變的星體，像是小行星、古柏帶天體…等，尤以對地球威脅最大的近地小行星，更是泛星計畫的首要科學目標，（詳細內容請參閱臺北星空第42期，周翊教授所著之「望向大宇宙（一）/Pan-STARRS—泛星計畫」一文）。至於超新星則屬於亮度會改變的天體，在短期內重複搜尋同一天區的策略下，讓我們有機會偵測到超新星的極早期光變，並準確測量峰值的亮度，藉以得到完整的光度（能量）變化曲線。

泛星計畫之 超新星與前身星研究

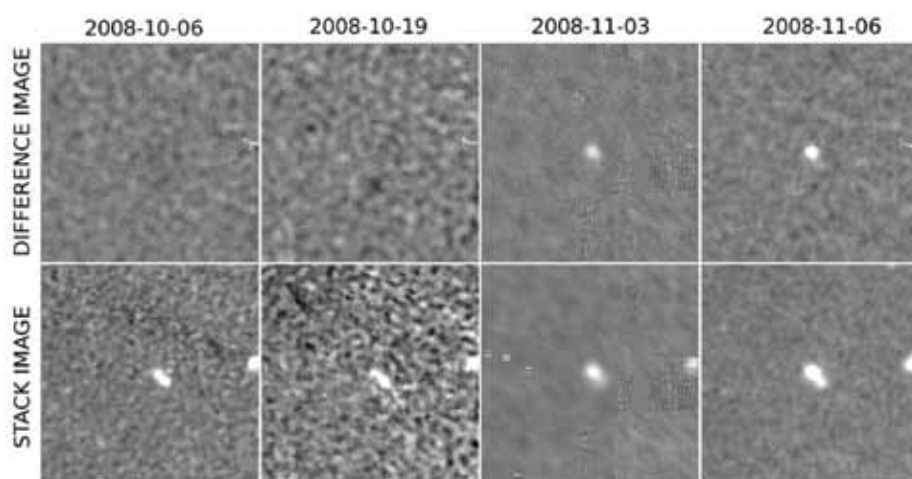
在泛星計畫眾多的科學目標中，關於巨質量恆星與超新星前身星的研究，原本規劃有：低紅移（距離較近）核塌縮超新星巡天、核塌縮超新星之前身星與所在環境、鄰近星系的藍超巨星普查、與Ia型超新星之前身星這四大主題。前兩者由英國Belfast女王大學Smartt教授主導，而後兩者則由美國夏威夷大學的Bresolin教授與美國哈佛大

學的Wood-Vasey教授所主導；臺灣中央大學與中央研究院的研究人員亦參與其中。筆者有機會於2008年到北愛爾蘭跟Smartt教授的團隊合作學習一個月，因此本文將專注於探討前面兩個主題。

低紅移核塌縮超新星巡天

所謂的低紅移指的是紅移值小於0.04，在這個距離以內所包含的體積範圍，因為較暗的核塌縮超新星—II-P型的絕對亮度約為-15星等，加上考慮消光的影響，因此設定此一範圍，讓泛星計畫能發現在這個有限體積範圍內所有的超新星。為了獲得全面性資料，泛星計畫在巡天上有著前所未有的優勢。多數的超新星巡天計畫，像是臺灣超新星巡天計畫、美國LOSS（Lick Observatory SN Search）計畫…等，選擇的巡天目標均為選定的特殊星系（集中在高恆星形成率的星系），他們通常含有高金屬豐度與高表面亮度的特性，因此，所發現的核塌縮超新星大都在金屬豐富的區域；對於低表面亮度的星系或是矮星系，則甚少對其監測。泛星計畫排除了選擇效應，並非針對目標星系逐一進行監測，而是全天區的巡天，並利用影像對減的方式，找到位置不會改變，但亮度改變的候選者，將其位置座標與資料庫中星系的座標進行比對，如果剛好在星系範圍內，則很有可能是超新星、活躍星系核、變星等天體，再經由後續觀測決定是否為超新星。

泛星計畫排除了選擇效應的影響，可以在紅移值小於0.04的距離範圍內，建立一個史上最完



（圖一）泛星計畫發現的第一顆超新星—SN 2008id，圖中最上方為觀測日期，上排為對減後的影像，下排為疊加數張相同天區的影像。可以清楚地看到，在十月的對減影像中，並沒有新的天體出現，但是在11月3日的對減影像中，則明顯看出有新的天體作為超新星候選者，並經後續觀測確定其為Ia型超新星。圖片來源：http://pan-starrs.ifa.hawaii.edu/public/project-status/supernova_discovery.html

整的超新星樣本資料庫；當然如果對於更亮的超新星，我們可以看的更遠，但會受到星等的觀測限制而無法做全面性的統計。Young等人於2008年的論文中預期，在紅移值小於0.6的距離範圍內，泛星計畫的原型望遠鏡每年可以找到24000顆超新星。因為找到超新星的數量龐大，因此後續的觀測更顯重要，臺灣有很好的地理位置，可以在泛星計畫發現超新星後，馬上接續觀測，研究超新星早期的光度變化；唯所發現的超新星，大部分皆暗於20星等，需要大口徑的望遠鏡進行觀測，我們知道口徑大一倍，能減少四倍的曝光時間，因此二米以上口徑等級望遠鏡興建，刻不容緩，需要全民的支持才能順利將鹿林二米望遠鏡完工，並發揮其最大的科研價值。

尋找超新星的前身星

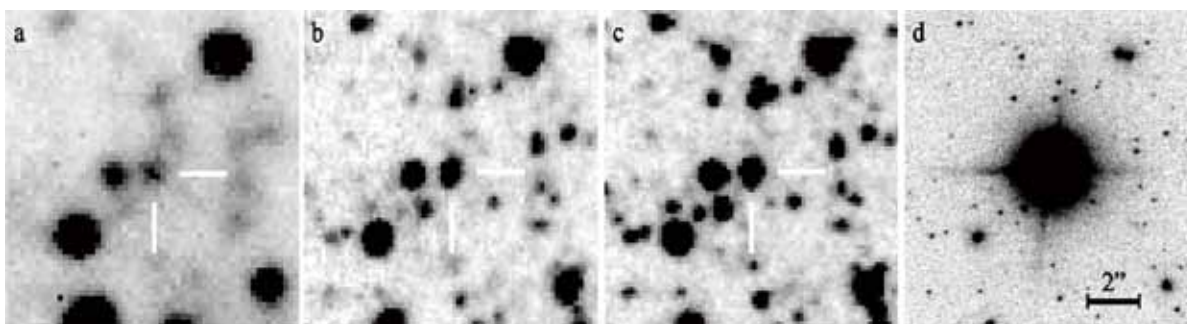
當我們在動物園裡面看到黃色毛茸茸的小雞，很難想像牠會長成咖啡色羽毛，頭頂與下巴垂著紅色肉冠的公雞。不過，如果我們知道一隻動物在幼時長什麼模樣，就可以知道牠將來長大後會變成什麼樣子的話，對我們有非常大的幫助，至少，你不會想養一隻雞叫你起床時卻不小心養到了鴨。對天文學家而言也是這樣，當我們看到有一個天體爆發，就很想知道是什麼東西爆炸了？它的「小時候」會是什麼樣子？培養它長大的「環境」對其有什麼影響？當我們知道，在爆炸前它是什麼樣的天體與周圍物質的狀態，我們就可以推測，它之後會是以什麼樣的形式結束其一生。

就超新星爆發機制上來說，我們可以將

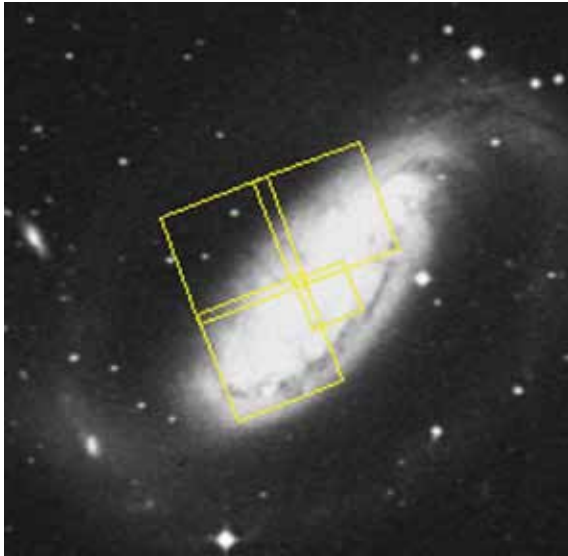
其分為兩大類：由巨質量恆星演化到末期爆發的現象，稱為核塌縮超新星（core-collapse supernova）；另外一種由白矮星－白矮星或是白矮星－紅巨星的雙星系統產生的爆發，則稱為熱核型超新星（thermonuclear supernova）。根據Smartt在2009年發表的論文，闡述了能夠產生核塌縮超新星爆發的星球，其初始質量的下限為 8 ± 1 倍太陽質量，這個數據來自於直接觀測到II-P型超新星之前身星的質量下限，與理論模型中白矮星的質量上限。

我們是怎樣觀測超新星的前身星的呢？答案是等超新星爆炸以後，再去對照爆發前的星系影像，找到相同位置的恆星，即懷疑它就是前身星。舉例來說（圖二），在Mattila等人於2008年論文，尋找II-P型超新星2008bk的前身星，利用不同波段的星等資料，我們可以畫出光譜能量分佈圖（spectral energy distribution），再配合恆星演化的模型，得到前身星是一顆紅超巨星，質量是 8.5 ± 1 倍太陽質量。

然而，尋找前身星是有難度的：人類自1885年發現銀河系外第一顆超新星開始，到2010年8月，找到超過5541顆超新星，但是確定找到前身星的數量卻低於30顆（ $<0.5\%$ ）。原因是我們需要高解析度的影像，才能分辨出一顆顆位於其他星系的恆星，近十多年，拜哈柏太空望遠鏡與地表大型光學望遠鏡的高解析度影像之賜，才讓我們有機會得以窺見鄰近（小於20Mpc）星系中，超新星前身星的蹤影。不過，並不是所有的超新星，都找得到爆發前該星場的高解析度影像（圖三）；或是曝光深度不夠，無法獲得前身星的星等資訊。因此，建立



（圖二）VLT（Very Large Telescope）所拍攝之SN 2008bk爆發前後的影像，a、b、c圖為不同波段爆發前的影像，d圖為爆發後的影像。圖片來源：Mattila等人2008年的論文。



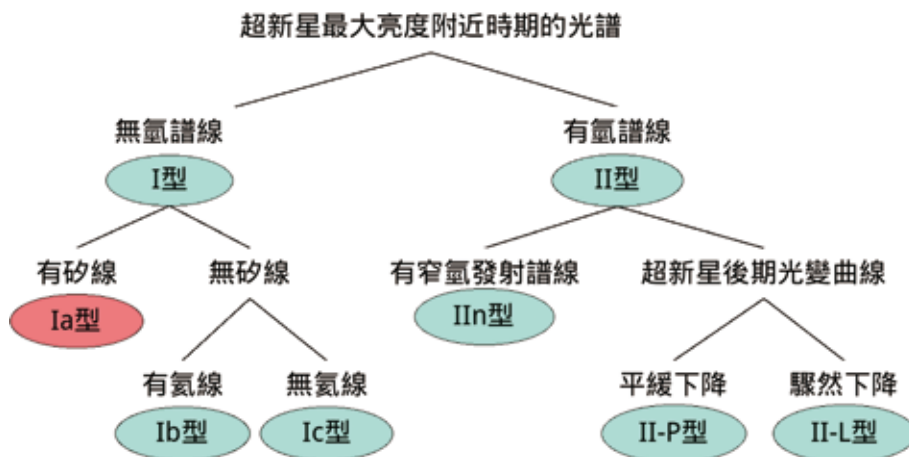
(圖三) 星系NGC1808的影像，黃色框為哈柏太空望遠鏡上面Wide Field Planetary Camera 2的視場大小，為5.345 平方角分。若超新星爆發在黃色框以外的範圍，我們就找不到爆發前的影像可以比對。泛星計畫的超廣角望遠鏡則可提供7平方度的視場大小，可輕鬆覆蓋住整個星系的範圍，使我們不會遺漏在此星系爆發的超新星前身星。
 圖片來源：<http://www-int.stsci.edu/~mutchler/n1808/>

一個廣視野、高解析度、與深度的星系影像資料庫，是一件很重要的工作。泛星計畫中，有個非常重要的子計畫：Deep Medium Survey，此子計畫是對幾個選定的天區加重複觀測，並且將巡天的影像疊加，得到長時間曝光的全天影像，藉以完成此全面性的星系影像資料庫。可惜大氣視相度不如預期，因此可能只有在少數極近的星系才有機會分辨出單一星球。

超新星類型與前身星的本質

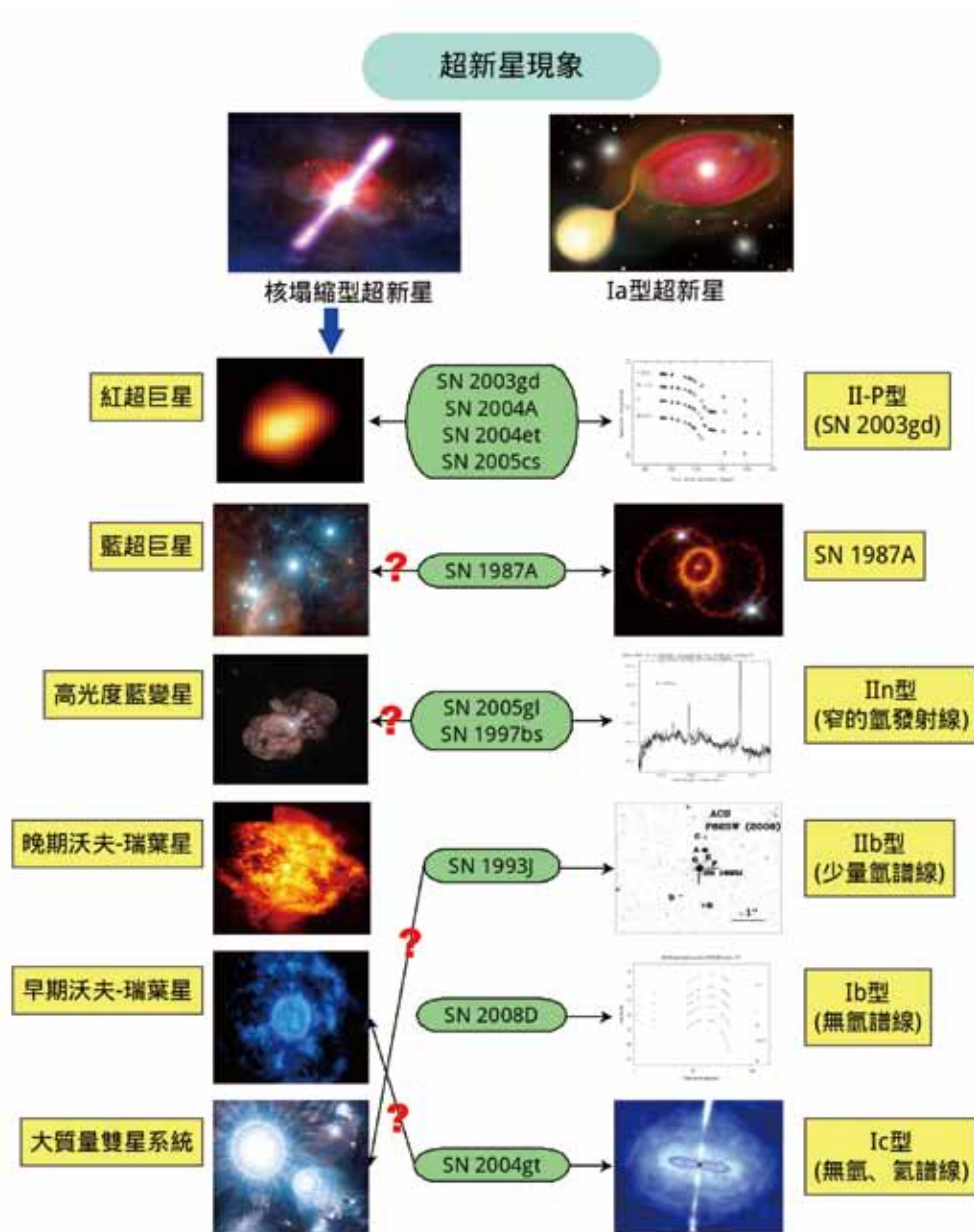
上文中所提到的Ia型超新星或是II-P型超新星是指什麼呢？這是超新星另外一種常見的光譜分類方式（圖四）：由超新星在最大亮度時期附近的譜線（吸收線或發射線）特徵為依據，沒有氫譜線特徵者稱做I型超新星，有氫譜線者為II型超新星（Minkowski, 1939、1940年）。I型超新星依照矽6150Å的譜線再細分，有矽線者為Ia型超新星，沒有矽線者又可再細分有氦線者為Ib型，無氦線者為Ic型（Filippenko, 1997年）。在這邊要注意的是，除了Ia型超新星是熱核型超新星之外，其餘的類別，則皆為核塌縮超新星。至於II型超新星，可以依據其從最大光度下降時的光變曲線細分為二：其一在光度下降時出現一段平緩期（plateau），此種稱為II-P型，另外一種光度直線（linear）下降，稱為II-L型（Barbon 等人, 1973年）。此外，根據光譜特徵，有窄（narrow）的氫發射譜線，稱為II_n型超新星（Schlegel, 1990年）。

以上只是粗略的分法，當我們對每一顆超新星研究的更加徹底，越發現每顆超新星都有其不同之處，像是爆發在大麥哲倫星系中的超新星1987A，因其明顯的氫譜線特徵被歸類在II型，但是其光度變化卻無法被歸類在II-P型或II-L型（da Silva, 1990年）。近期的研究（Smith等人, 2007年）有一些極亮（ultrabright）II型超新星，像是SN 2006gy，其積分亮度可以達到 10^{51} 耳格/秒，是一般核塌縮超新星的100倍。



(圖四) 超新星的分類示意圖

Gal-Yam等人 在2007年發表的論文中，將不同質量的前身星與不同類型的超新星做了一張關係圖，筆者借取相同概念將之重新製圖（圖五）。左邊前身星的部分，質量有越往下越大的趨勢，右邊是不同類型超新星，顯



(圖五) 超新星前身星與不同超新星類型的關係圖。圖片概念於Gal-Yam等人於2007年的論文，經筆者重新彙整，各小張圖片來源整理於文後。

示不同的前身星會造成不同類型的超新星爆發。其中比較肯定的結果，II-P型超新星的前身星為質量在8到15倍太陽質量的紅超巨星。超新星1987A則可被歸類在II型超新星，但是它的光度較暗且下降緩慢；它的前身星為藍超巨星，是人類第一次偵測到來自太陽以外的微中子，證實了超新星爆炸能產生大量微中子的理論。

請讀者要注意的是，其餘超新星類型的前身星本質，目前還沒有那麼確定。IIIn型超新星，目前相信在其前身星—藍超巨星的周圍，有濃密的物質圍繞，這些物質可能是藉由大量恆星風與

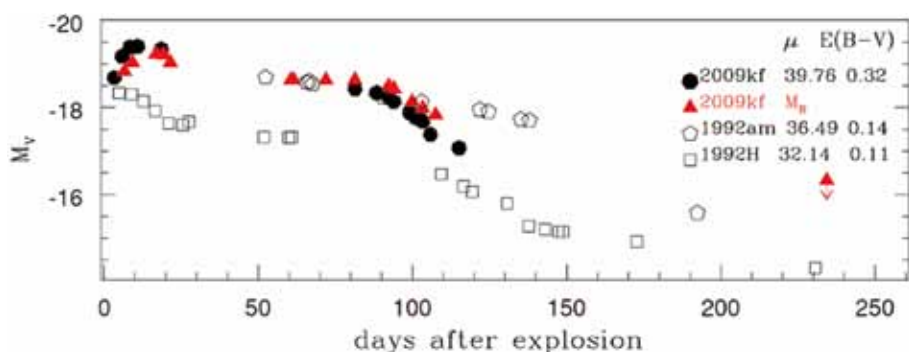
高光度藍變星 (luminous blue variable) 噴發，從藍超巨星表面所拋出去的，詳情可參閱本期臺北星空中，黃立晴著作的「IIIn型超新星的觀測」一文。至於Ib與Ic型超新星，其前身星可能為20倍太陽質量以上的沃夫—瑞葉星 (Wolf-Rayet stars)，兩者差別在於強烈的恆星風將外層大氣吹離，吹掉氫氣殼的為Ib型，連內層氫氣殼也吹掉的為Ic型 (Filippenko, 2005年)。另外一種非單星系統的前身星，像是超新星1993J，則被認為是位於巨質量雙星系統中的紅超巨星爆發，其大部分的氫殼層被鄰近的伴星吸走，因此光譜特徵呈現II到Ib型超新星之間的過渡型 (Maund等人, 2004年)。

在累積到越來越多觀測證據與搭配上理論模型的發展，對於前身星的本質，我們有更多與以往不同的看法。像是Smartt等人在2009年發表的論文中認為，似乎多數的Ib/c型超新星，是由中等質量的交互作用雙星所引起的，而更高能量的寬譜線（broad-lined）Ic型超新星，其前身星很可能才是大質量的沃夫-瑞葉星。超新星前身星的本質在近年中時有辯論，不僅挑戰既有的恆星演化模型，也帶給我們更多的未解之謎。期待泛星計畫可以提供更多的觀測證據，像是找到「失敗的」（failed）超新星，這些超過20倍太陽質量以上的巨質量恆星，演化到末期核心可能會塌縮成黑洞，但是其爆發的殘餘物質並沒有被偵測到。研究這些超新星的前身星，是我們用來瞭解巨質量恆星演化到最終狀態－黑洞的最根本關鍵。

泛星計畫的初步成果

在泛星計畫原型望遠鏡（Pan-STARRS1）發現第一顆超新星2008id之後，至今發現了75顆超新星，其中有一些有趣的成果：

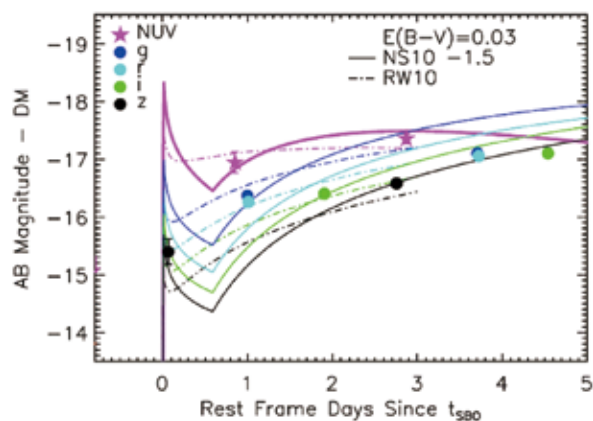
SN 2009kf－Botticella等人在2010年的論文提到，這是一顆非常明亮的II-P型超新星。Pan-STARRS1在超新星亮度達到峰值之前就發現到它，因此我們得到相當完整的光度變化曲線（圖六）。圖中的黑色實心圓點為SN 2009kf在V波段的絕對星等，跟另外兩顆II-P型超新星：SN 1992am以及SN 1992H的光度變化曲線做比較，可以發現在超新星爆發後約七十天的光度平緩期，其V波段的絕對星等達到-18.4，比II-P型的平均亮度-17還亮超過一個星等。而紅色實心三角形，則為SN 2009kf在R波段的絕對星等，也是非常明亮，推測其爆發能量比普通的II-P型超新星高5至



（圖六）SN 2009kf與其他兩顆II-P型超新星的光度變化曲線比較圖，絕對星等的數值已經做過本銀河系及宿主星系的消光修正。圖片來源：Botticella等人，2010。

10倍，或是其前身星半徑非常巨大，因此，就算其距離我們非常遙遠，紅移值高達約2.5，我們還是可以觀測到它。

SN 2010aq－Gezari等人於2010年送出的論文中提到，Pan-STARRS1與星系演化探測器（Galaxy Evolution Explorer, GALEX）在超新星2010aq爆發的第一天內就偵測到它，因此對於超新星的「shock breakout」現象，提供了一個很好的研究機會。所謂shock breakout理論，是由Colgate於1974年所提出，起源於超新星的前身星內層往內塌縮產生的震波反彈，向外撞擊到外層大氣（恆星表面），震波前沿的高溫會產生高能的伽瑪射線與X射線的輻射。換句話說，shock breakout就是超新星爆炸的瞬間所發生的現象。得到這個階段的光度變化曲線（圖七），我們可以藉由理論模型的擬合，推測超新星爆炸後一天的黑體輻射溫度為 $31,000 \pm 6,000\text{K}$ ，以及前身星－紅超巨星的大小為 700 ± 200 太陽半徑。



圖七）SN 2010aq的早期光度變化曲線與模型的擬合。橫軸為超新星shock breakout之後的天數；粉紅色星狀符號為GALEX所得到的近紫外波段星等，其他各色實心圓點為Pan-STARRS1在g、r、i、z波段得到的星等，實線與虛線則各自代表不同的模型。圖片來源：Gezari等人，2010。

未來展望

解密核塌縮超新星與長伽瑪射線爆之關連

伽瑪射線爆 (gamma ray burst) 是來自天空中某一區域的伽瑪射線突然增強的現象，依照它的爆發持續時間，以2秒鐘為界，分為長伽瑪射線爆 (long-duration gamma ray burst) 與短伽瑪射線爆 (short-duration gamma ray burst) 兩種。Woosley於1993年提出伽瑪射線爆的來源與旋轉的恆星級黑洞吸積盤有關，並在1999年與Macfadyen更進一步指出，這些黑洞來自於特殊的巨質量恆星塌縮，它們必須為已撥去外層氫殼的沃夫-瑞葉星，其核心質量要大到能塌縮產生黑洞，並且快速的轉動，產生吸積盤與筆直的相對論性噴流。這類型超新星的爆炸能量 (10^{52} 耳格/秒)，高於一般核塌縮超新星的10倍，Paczý' nski於1998年稱呼其為「超級超新星」(hypernova)，也就是寬譜線Ic型超新星。Staneke等人於2003年提出，Ic型超新星與長伽瑪射線爆的來源有關。但並非所有超級超新星爆炸都有伽瑪射線爆的現象 (Mazzali等人，2005年)，根據Modjaz等人於2008的論文，這些有伽瑪射線爆現象的超級超新星，偏向在低金屬豐度的星系中產生，因此泛星計畫可以提供我們更多在此種星系環境下產生的超新星樣本，幫助我們解開長伽瑪射線爆的來源之謎。

各類型超新星的相對產生機率

根據Smartt等人於2009年發表的論文，統計自1998到2008年之間，在約28Mpc體積範圍內所發現

的超新星，如表一。由核塌縮超新星的相對產生機率，我們可以發現，II-P型超新星佔核塌縮超新星的一半以上，至於II-L與IIIn型的超新星則是比較稀少的。我們習慣用Ib/c型與II型超新星的比率來描述前身星的星族特性，例如在近似太陽金屬豐度的星族，Ib/c比II約為 0.4 ± 0.1 ，跟此篇論文統計出來的數值類似；而金屬豐度越低的星族，這個比例越低。但是這個統計是有偏差的，因為我們無法發現被銀河系的塵埃遮蔽掉的超新星，以及爆發時跟太陽視線方向相同的超新星；另外就是前述傳統超新星巡天的選擇效應，沒有對低表面亮度的星系進行監測，或是沒有發現亮度微暗的超新星。因此，需要藉由泛星計畫提供本地超新星的全面性的資料，準確的訂出各類型超新星相對的產生機率，讓我們對前身星的特性有更正確的了解。

後語

泛星計畫對於偵測超新星...等天文瞬變 (transient) 現象，提供了大量的樣本，不僅讓我們了解鄰近超新星的特性與前身星的本質，挑戰我們既有的恆星演化模型之理論，更帶給我們許多研究未知的爆發現象的機會。聽完宇宙動物園的其中一個展示區的初步導覽，在這個沒有生命被禁錮的廣闊虛空中，不知道各位是否對這無盡的追尋有一點點的輪廓？讓我們一起期許，泛星計畫在屬於它自己的《銀河飛龍》中的旅程，跟星艦企業號有著一樣的任務：「繼續探索這全然未知的新世界，尋找新生命和新文明，勇敢地航向前人所未至的領域。」

超新星類型	數量	相對比例 (百分比)	核塌縮超新星 相對比例(百分比)
II-P	54	39.1	58.7
II-L	2.5	1.8	2.7
IIIn	3.5	2.5	3.8
IIb	5	3.6	5.4
Ib	9	6.5	9.8
Ic	18	13.0	19.6
Ia	37	26.8	-
LBVs	7	5.1	-
未分類	2	1.4	-
總計	138	100	100
核塌縮超新星總計	92	66	100

(表一) 近10.5年所發現的鄰近超新星，不同類型的相對產生機率，最後一欄排除掉熱核型超新星 (Ia型) 與高光度藍變星 (LBV)，為核塌縮超新星的相對產生機率。資料來源：Smartt等人，2009年。

圖表來源

圖片一 http://pan-starrs.ifa.hawaii.edu/public/project-status/supernova_discovery.html

圖片二 Mattila, S. et al., 2008, ApJ, 688, 91

圖片三 <http://www-int.stsci.edu/~mutchler/n1808/>

圖片四 陳婷琬，2008，碩士論文

圖片五：各小圖片來自於…

核塌縮超新星 <http://www.newscientist.com/article/dn12778>

紅超巨星 <http://www.astronet.ru/db/xware/msg/1210845>

藍超巨星 <http://antwrp.gsfc.nasa.gov/apod/ap051013.html>

高光度藍變星 <http://hubblesite.org/newscenter/archive/releases/1996/23>

晚期沃夫－瑞葉星 <http://hubblesite.org/gallery/album/nebula/pr1998038a/>

早期沃夫－瑞葉星 <http://en.wikipedia.org/wiki/File:Wolf-rayet.jpg>

大質量雙星系統 <http://www.stsci.edu/~inr/thisweek1/2008/thisweek280.html>

Ia型超新星 <http://www.lbl.gov/Science-Articles/Archive/sabl/2007/Nov/darkenergy2.html>

II-P型 Hendry, M. A. et al., 2005, MNRAS, 359, 906

SN 1987A <http://astroprofspage.com/archives/744>

II型 <http://www.cfa.harvard.edu/supernova/spectra/sn97bs.gif>

IIb型 Van Dyk, Schuyler D. et al., 2002, 114, 1322

Ib型 陳婷琬，2008，碩士論文

Ic型 <http://www.astronomy-education.com/index.php?page=2&year=2009&category=0>

圖片六 Botticella, M. T. et al., 2010, ApJ, 717, 52

圖片七 Gezari, S. et al., 2010, ApJ, 720, 77

表一 Smartt, S. J. et al., 2009, MNRAS, 395, 1409

參考文獻

泛星計畫網頁：<http://pan-starrs.ifa.hawaii.edu/public/>

黃崇源等人，2009，物理雙月刊，卅一卷三期，246

Young, D. R. et al., 2008, A&A, 489, 359

Smartt, S. J., 2009, ARA&A, 47, 63

Mattila, S. et al., 2008, ApJ, 688, 91

Minkowski, R., 1939, ApJ, 89, 156

Minkowski R., 1940, PASP, 52, 206

Filippenko, A. V., 1997, ARA&A, 35, 309

Barbon, R. et al., 1973, A&A, 29, 57

Schlegel, E. M., 1990, MNRAS, 244, 269

da Silva, L. A. L., 1990, RMxAA, 21, 471

Smith, N. et al., 2007, ApJ, 671, 17

Gal-Yam, A. et al., 2007, ApJ, 656, 372

Filippenko, A. V., 2005, ASPCS, 332, 34

Maud, J. R. et al., 2004, Natur, 427, 129

Botticella, M. T. et al., 2010, ApJ, 717, 52

Gezari, S. et al., 2010, ApJ, 720, 77

Stanek, K. Z. et al., 2003, ApJ, 591, 17

Woosley, S. E., 1993, ApJ, 405, 273

Macfadyen A. I. & Woosley, S. E., 1999, ApJ, 524, 262

Paczynski B., 1998, ApJ, 494, 45

Mazzali, P. A. et al, 2005, ASPCS, 342, 366

Modjaz, M. et al., 2008, AJ, 135, 1136

Smartt, S. J. et al., 2009, MNRAS, 395, 1409

陳婷琬：國立中央大學天文研究所碩士

陳英同：國立中央大學天文研究所博士候選人