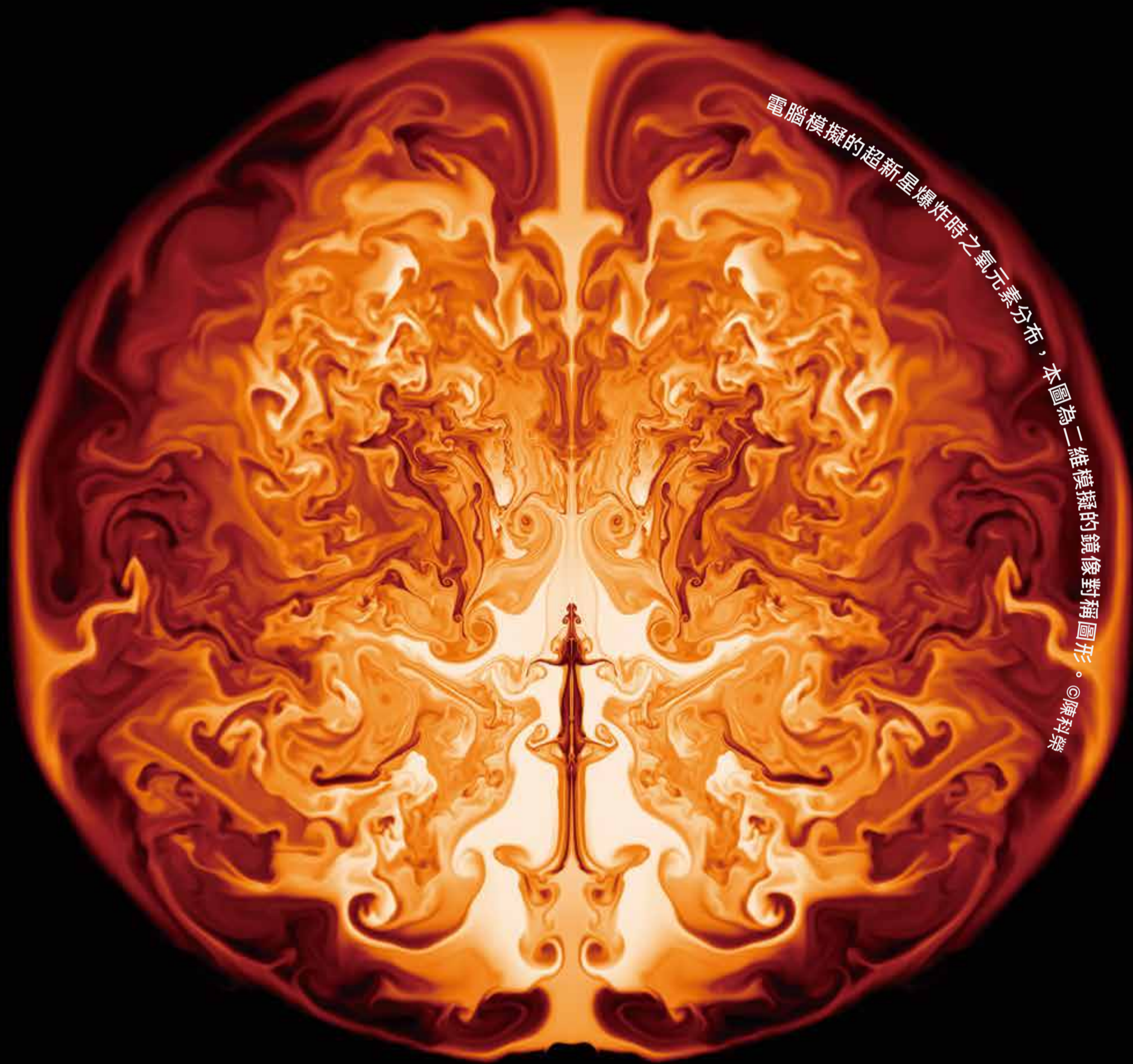


中華民國
107年
冬季號

天聞



中研院天文所季報
ASIAA Quarterly Press
<http://www.asiaa.sinica.edu.tw>



電腦模擬的超新星爆炸時之氧元素分布，本圖為二維模擬的鏡像對稱圖形。©陳科榮

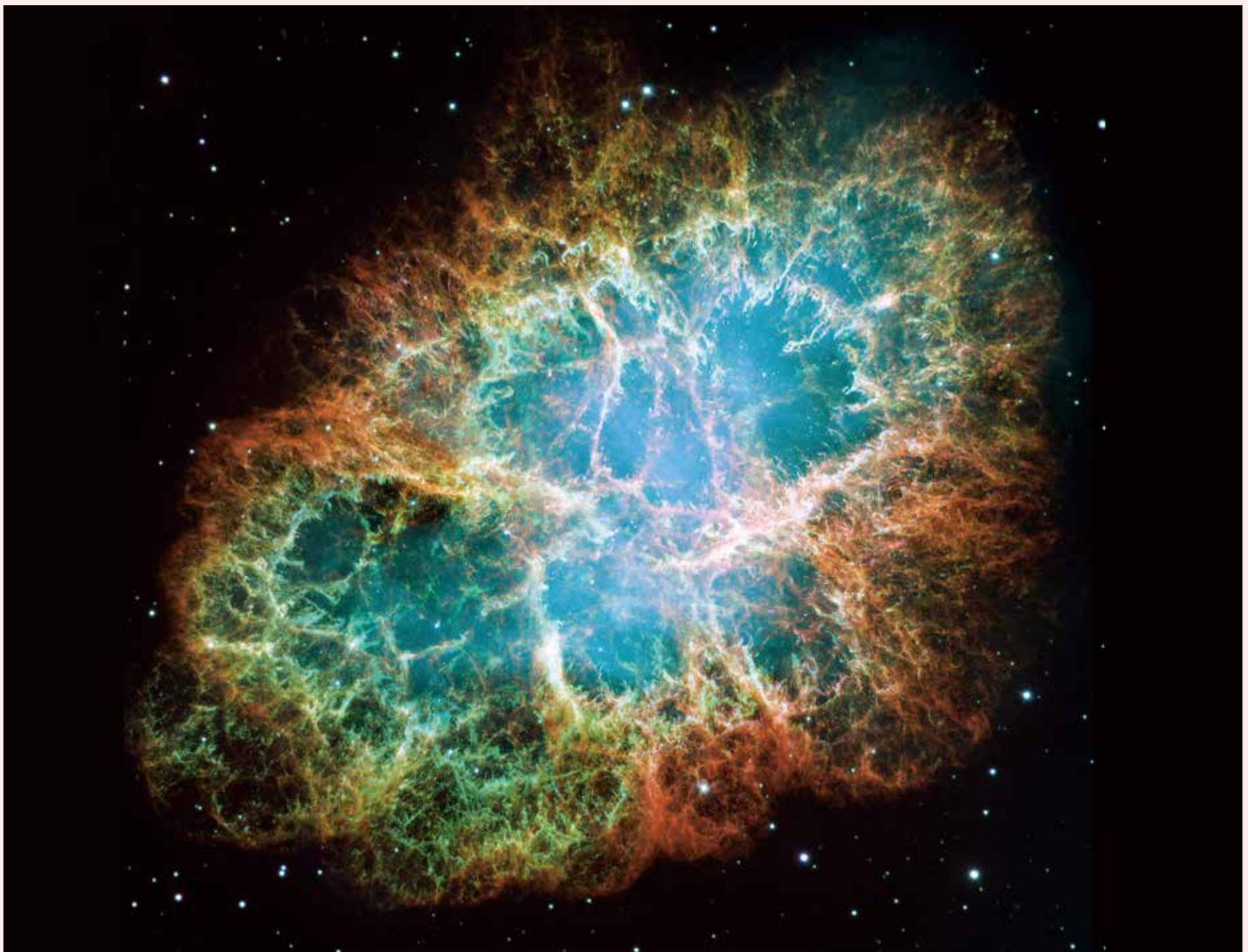
震撼宇宙的 超新星

超新星的前世今生



作者／歐柏昇、蔡松翰 審訂／陳科榮

北宋皇祐六年（西元 1054 年），天上忽然出現一顆無比明亮的星，甚至白天都可看得非常清楚，過了一年多才消失。中國古代的天文學家，將這種不速之客記錄為「客星」。到了二十世紀，科學家為研究美麗的蟹狀星雲，從東之高閣的古書中，翻出千年之前的紀錄，證實蟹狀星雲的前世就是 1054 年的客星，而且它就是一個「超新星」。



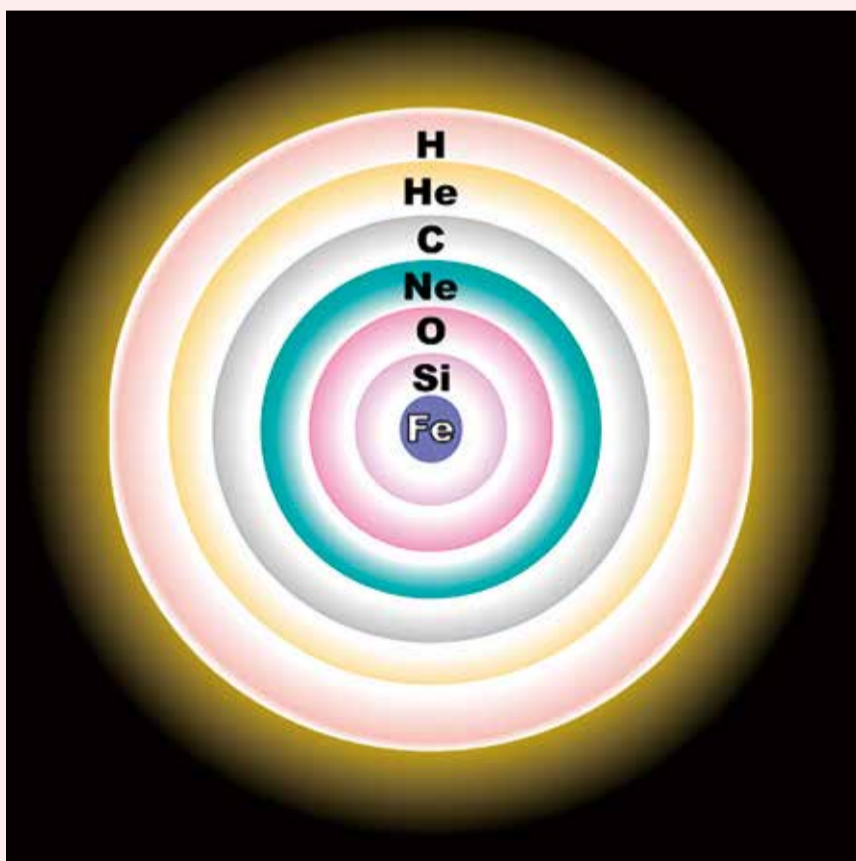
哈伯望遠鏡拍攝的蟹狀星雲。©NASA, ESA, J. Hester and A. Loll (Arizona State University)

爲什麼稱作「超」新星呢？早在 1930 年代，科學家就發現，在那些突然冒出來的新星（nova）當中，有幾顆比普通的新星還要亮一萬倍，於是冠上「Super」，也就稱爲超新星（supernova）了。後來，科學家才了解，超新星是恆星死亡時的爆炸現象。恆星都有生老病死，超新星是某些恆星最絢麗的告別秀。

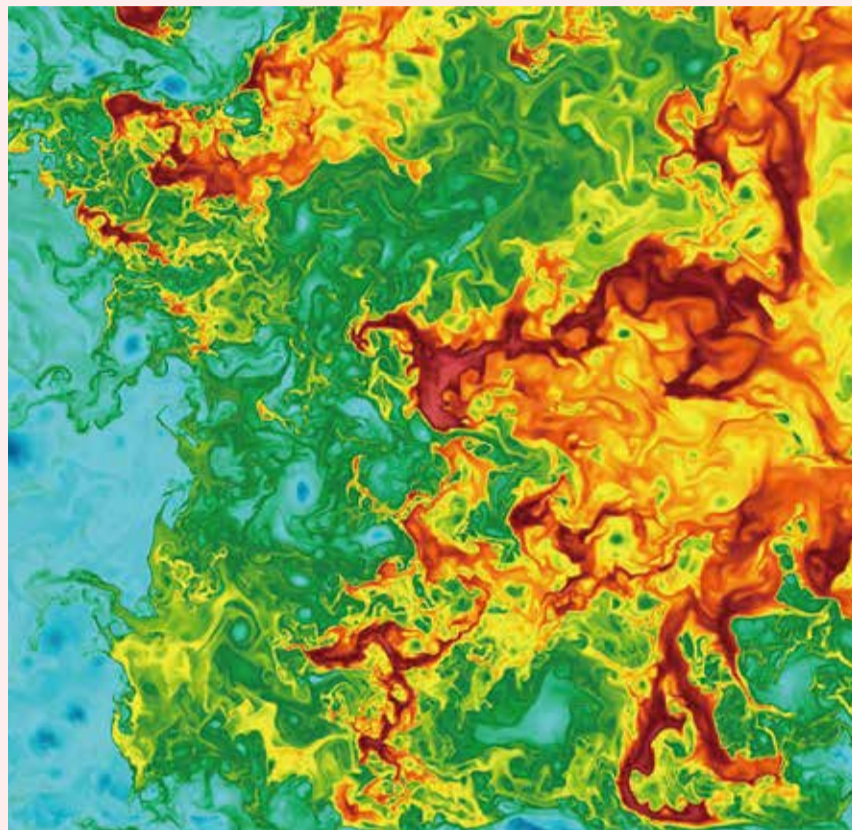
就像藝術家設計出多采多姿的煙火秀一般，超新星爆炸的演出也變化多端。爲了解各式各樣的超新星，天文學家根據超新星爆炸所產生的光譜與光變曲線進行分類。若光譜上有氫的譜線，即爲 II 型超新星；反之則爲 I 型超新星。I、II 型超新星皆可再細分，例如具有很強的鈉離子吸收線的 I 型超新星，則稱爲 Ia 型。

不同種類的超新星，各有不同的形成機制。一般認爲，Ia 型超新星源自白矮星的爆炸，不過科學家還在研究其詳細過程。有一種假說認爲，Ia 型超新星來自於其中一顆爲白矮星、另一顆爲巨星或是主序星的雙星系統中，白矮星從伴星吸積物質所致。當白矮星質量達到「錢卓極限」（約等於 1.4 倍太陽質量），則此時內部的溫度與壓力足以瞬間點燃大部分的碳和氧，進而形成更重的元素，並釋放出大量的能量，形成 Ia 型超新星。

由於 Ia 型超新星爆炸前的白矮星質量幾乎一致（1.4 倍太陽質量），因此產生相同的最大光度，被視爲「標準燭光」，常用來測量 Ia



核心塌縮的超新星爆炸前，母恆星內部各種元素的分布如「洋蔥狀構造」。©R.J.Hall



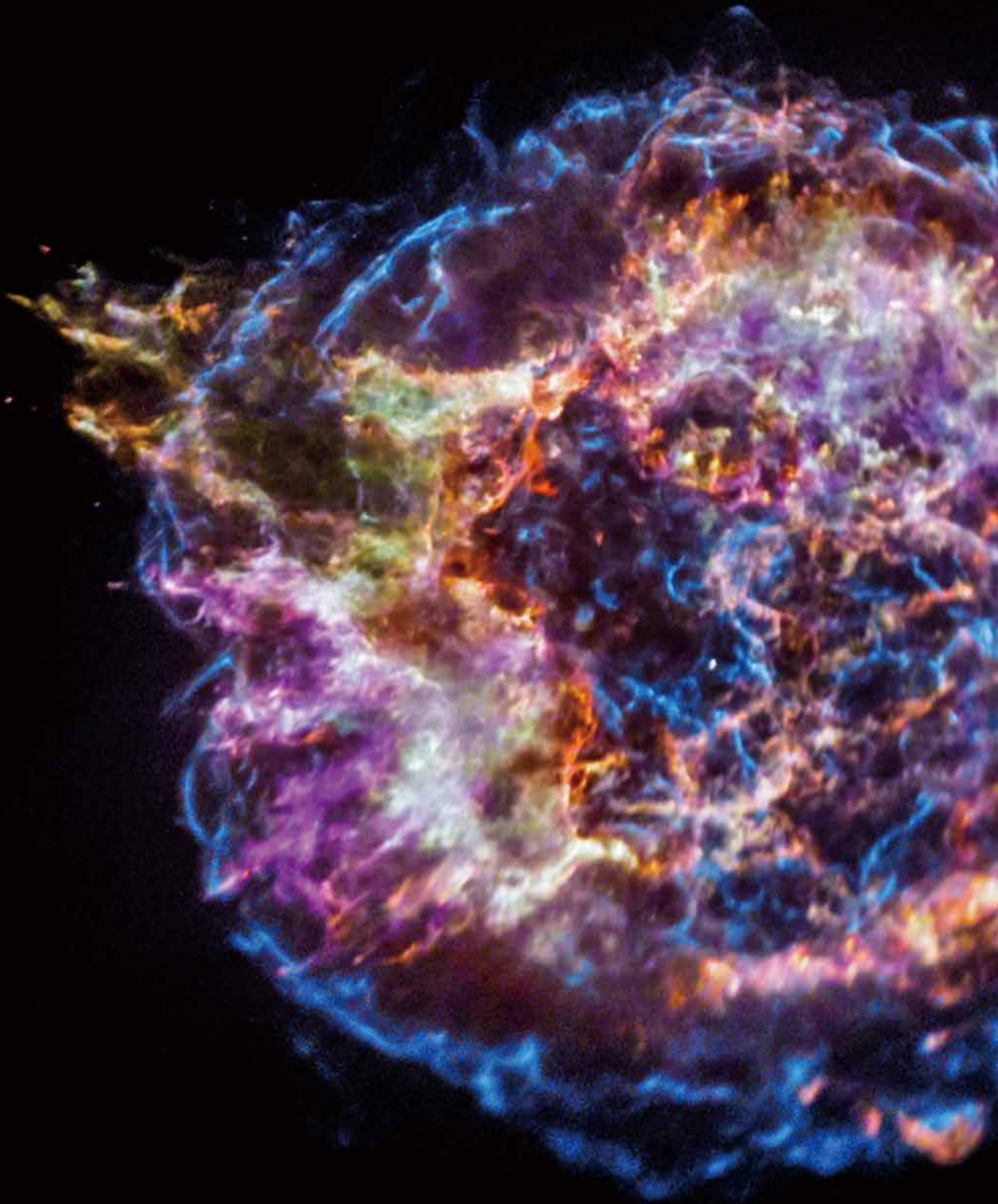
超級電腦模擬超新星爆炸中重元素擴散的微觀過程。紅色代表重元素含量較高，左下方藍色代表氫及氦元素。超新星爆炸點位於本圖外的右上方。© 陳科榮

型超新星宿主星系與我們的距離。獲頒 2011 年諾貝爾物理獎的「宇宙加速膨脹」重大發現，即是利用 Ia 型超新星的距離測定而得。

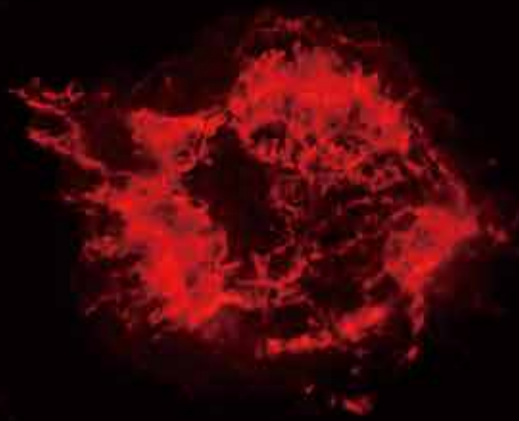
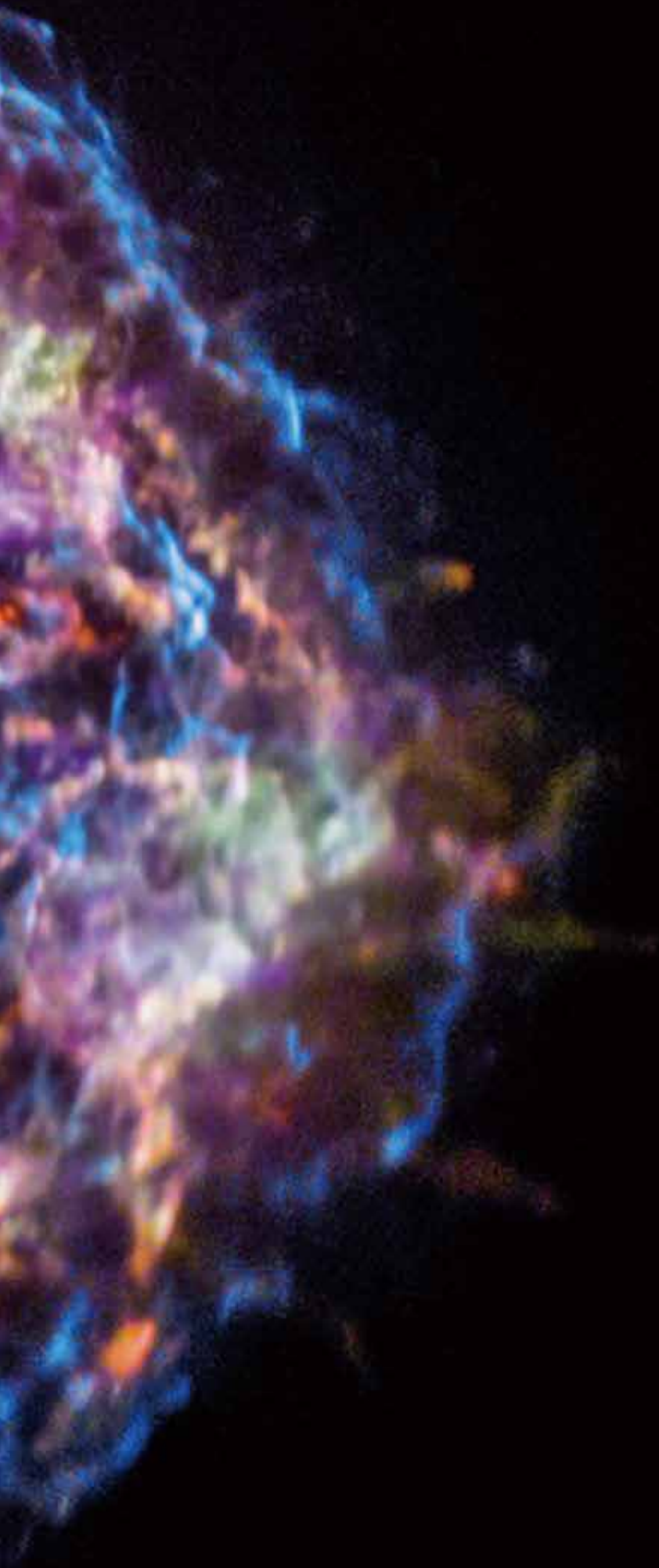
Ia 型以外其餘種類的超新星，成因皆爲大質量（超過 10 個太陽質量）恆星的核心塌縮。大質量恆星演化到最後，會出現像洋蔥般的層狀結構，最中心爲鐵核，越外圍燃燒越輕的元素。核心塌縮的其中一種機制如下：中心的鐵核由於沒有核融合反應，因此由電子簡併壓力抵抗重力，但當鐵核的大小成長到超過錢卓極限時，電子簡併壓力不足以抵抗重力，物質以大約四分之一光速的速度向內塌縮，進而變成超新星。

超新星爆炸之後會產生震波，炸出來的物質形成「超新星殘骸」。蟹狀星雲就是一個超新星殘骸，其內部還包裹著一顆快速旋轉的中子星。超新星殘骸會不斷膨脹，直到最後消散在星際物質之中。經震波打過的氣體，溫度非常高，通常會發出 X 射線，於是天文學家可利用 X 射線觀測來了解超新星殘骸的性質。有趣的是，利用 X 射線的光譜，可解析出不同元素的分布，於是我們可得知「洋蔥」的各層在爆炸後跑到哪兒去了。

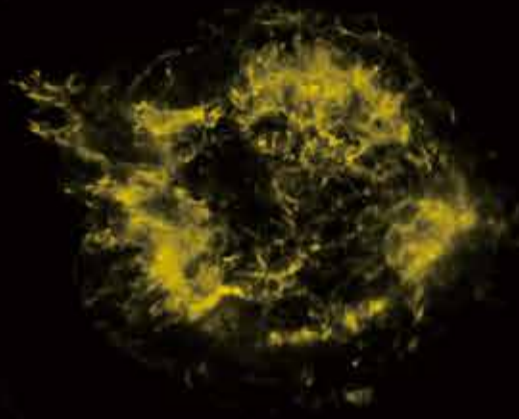
超新星爆炸不但把「洋蔥」各層的重元素釋放到星際之中，還在劇烈爆炸過程中產生更重的元素，爲宇宙增添多樣的原料。宇宙中重元素的含量雖然遠遠不及氫、氦，卻對星系、恆星的演化影響深遠。



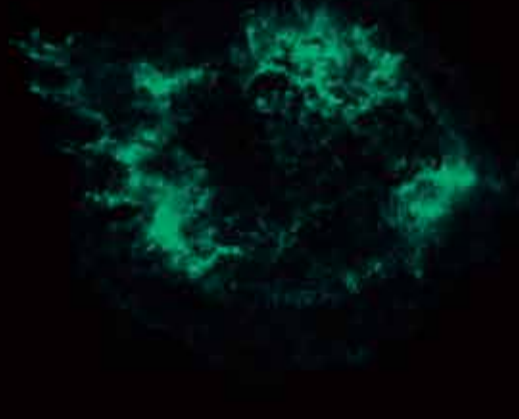
仙后座 A 超新星殘骸的 X 射線影像，可解析出不同元素的分布。©NASA/CXC/SAO



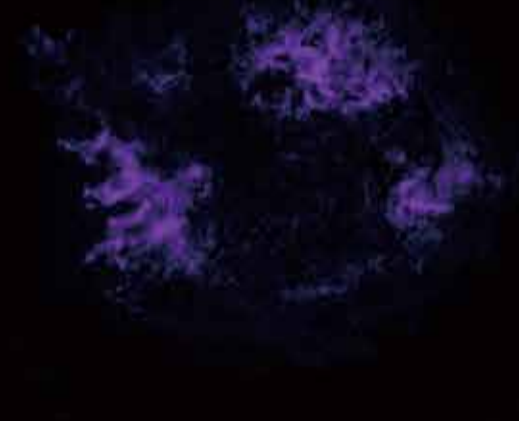
矽



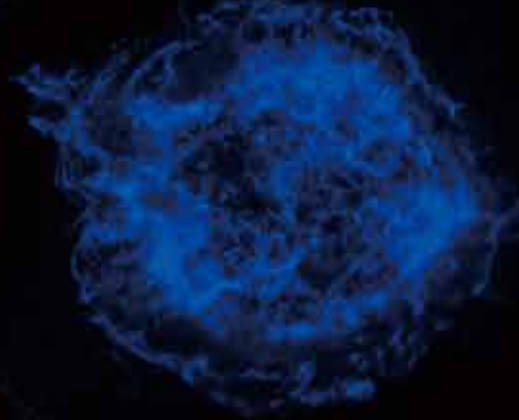
硫



碳



鐵



爆震波

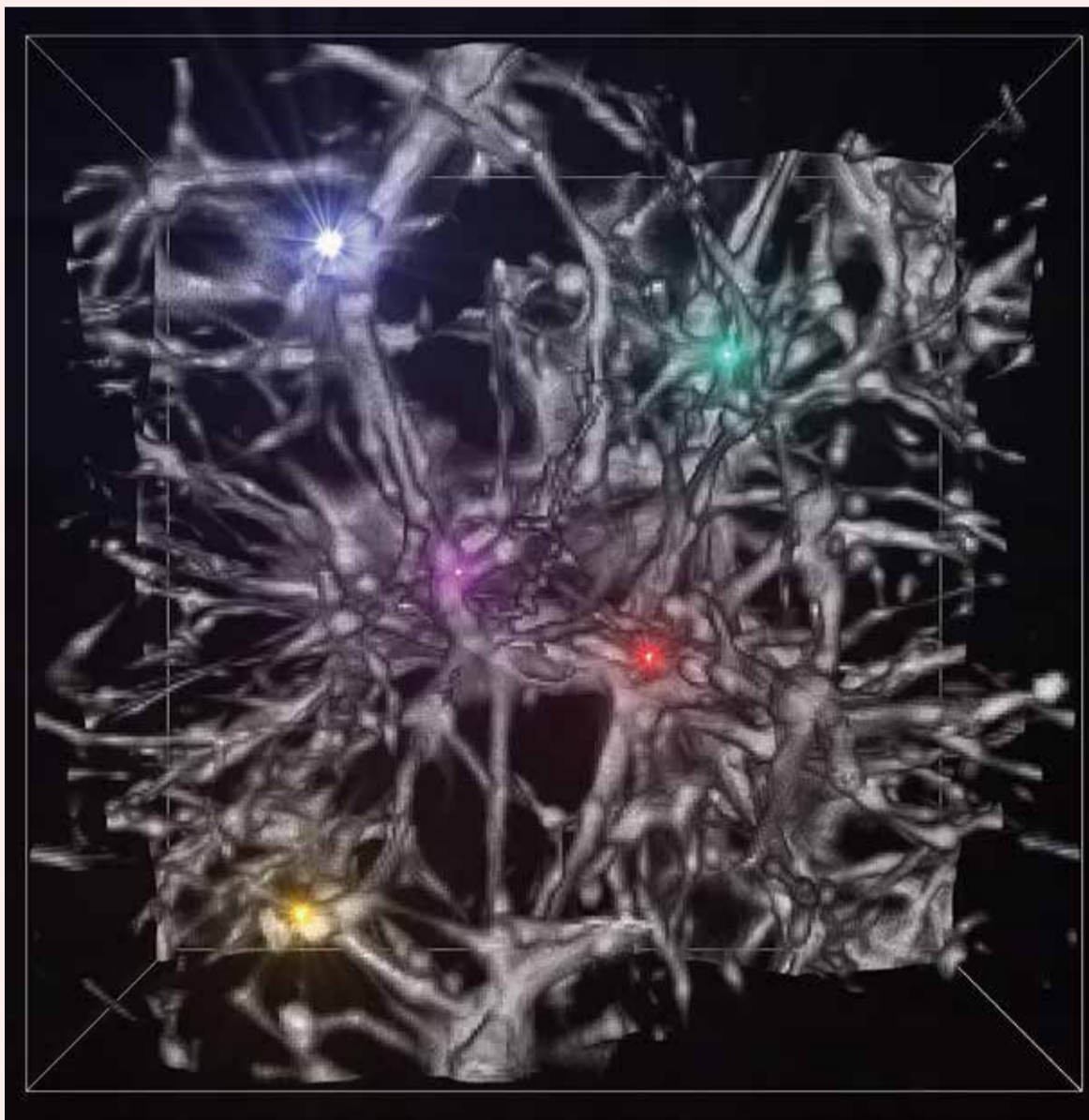
超新星如何震撼宇宙演化



作者／陳立馨、許家榮 審訂／陳科榮

元素週期表目前有 118 個元素，在宇宙最初，卻只有大量的氫及少量的氦元素存在，那其他的元素是怎麼來的呢？如果你對我們的太陽有些瞭解，那或許你會知道在太陽內部不斷的有核融合反應發生，核融合能夠製造出比氫、氦還要重的元素，例如地球上隨處可見的碳、氮、氧等等，但太陽的核融合無法製造出比鐵更重的元素。那麼，在週期表中比鐵重的元素又是怎麼來的呢？這時候，我們需要一項秘密武器，那就是——超新星爆炸。

超新星爆炸發生於恆星演化的末段，在恆星死亡之際，會在短時間內釋放出巨大的能量，甚至可以和恆星一生中透過核融合釋放的能量一樣多！一開始我們就提到了現在可見到的重元素，多是經由超新星爆炸而產生的，那這些重元素的出現，除了成為我們日常用品的原料以外，在整個宇宙中有什麼舉足輕重的地位嗎？在理解恆星的死亡之前，我們先來了解恆星是如何形成的。



宇宙第一代恆星的形成。其中絲狀結構是由暗物質構成，不同顏色的星點代表不同質量的恆星誕生。本圖的模擬尺度為五千萬秒差距（50 Mpc）。 © 陳科榮

在宇宙演化的過程中，有一件事讓天文學家們始終抱持著好奇：究竟從什麼時期開始有大量的恆星形成？宇宙從大霹靂以來不斷的降溫，這中間逐漸分離出四大基本作用力、物質出現，但即使物質已經存在了，並不代表我們今日可見的天體已經形成了。在這個階段，宇宙充滿了剛形成的氫與氦，以及暗物質形成的大尺度結構，但沒有任何發光的天體存在，我們稱這時為宇宙的黑暗時期。相較之下，現在的宇宙充滿著發光的天體，僅在我們所處的銀河系中便估計有一千億到四千億顆恆星，因此，這些發光天體在何時出現便成了一個重要的問題。

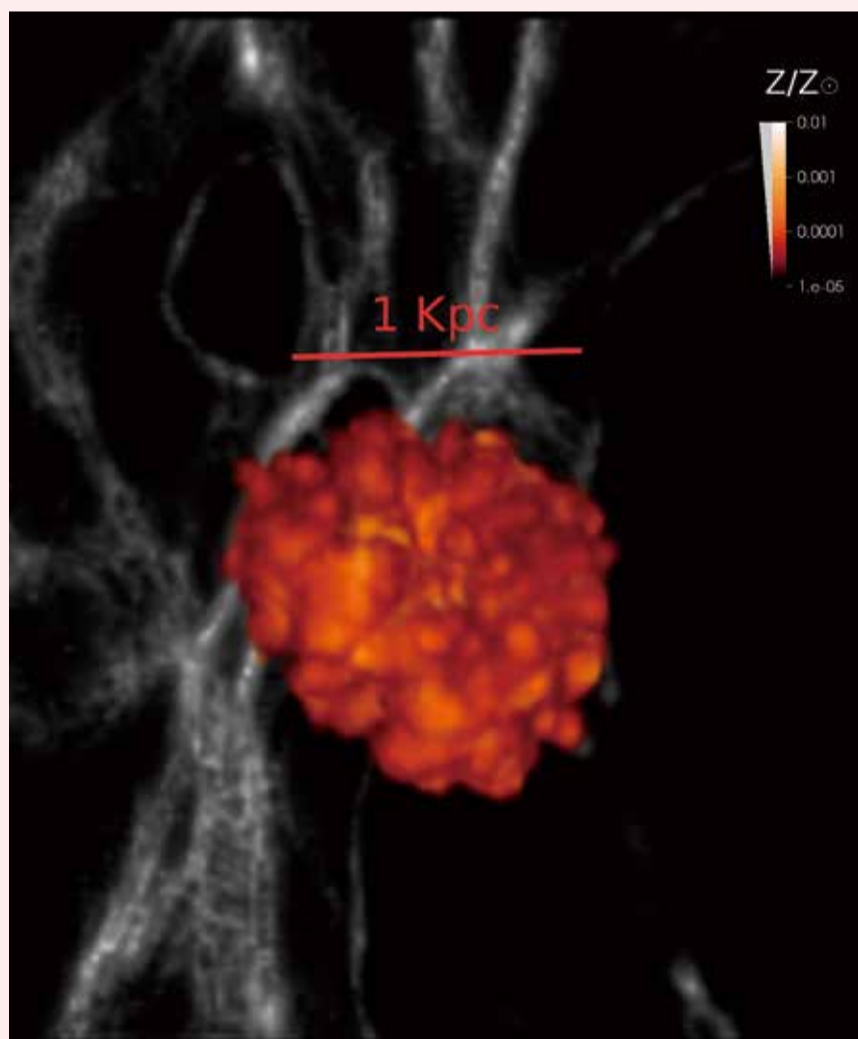
恆星初期的形成主要由兩個因素決定：重力與溫度。作為恆星前身的分子雲，會受到本身重力牽引而聚集壓縮，同時，由於自身的溫度會在內部產生一個向外的壓力，兩者會互相抵抗，就像我們拿著一個空的針筒擠壓時，受壓縮的空氣會反抗我

們施加的力，不同處在於這時氣體受到的是本身的重力，而在壓力無法抵抗重力時，分子雲便會塌縮成恆星。換言之，對於一個既存的分子雲，若自身溫度持續穩定的下降，則這分子雲會在溫度降到夠低時形成恆星，反之若溫度無法下降，便需要聚集更多的質量才能塌縮為恆星。

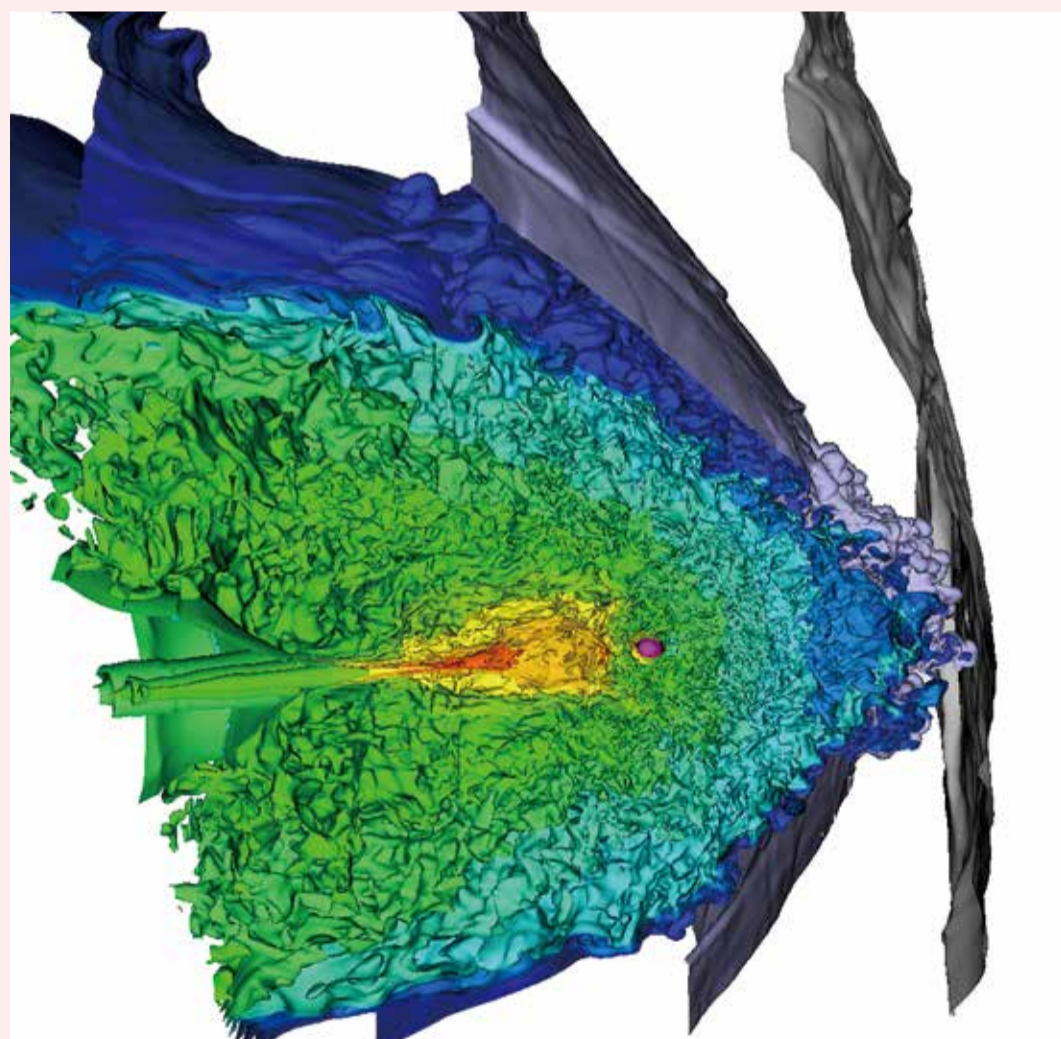
在宇宙早期，氣體的組成主要是大霹靂後產生的氫與氦，這兩種元素能夠產生的電子躍遷及其釋放的能量有限，因此氣體的溫度無法降至太低（約一萬 K），要形成恆星只能累積足夠多的氣體、達到較高的氣體密度，才有機會引發後續一連串的反应。所以，在早期宇宙形成的恆星大多質量較大（可超過一百個太陽質量），這些恆星因為質量大、核融合反應劇烈，因而壽命較短。當這些大質量恆星死亡時，也更容易形成超新星爆炸。如前段提及，超新星爆炸產生的能量十分巨大，爆炸的過程中會製造出許許多多比氫、氦還要重、甚至比鐵還要重的元素。這些天文學上的「重元素」，比起氫、氦擁有更多的能階

供電子躍遷，冷卻氣體的效率也因此更高，可將氣體降溫至數百至數十 K。相較只有氫跟氦的早期宇宙，這個階段的宇宙只需要較少的氣體聚集，就有機會形成恆星。這些恆星的質量較小、壽命也較長，在性質上更接近我們的太陽，在現在的宇宙中隨處可見。

這些大質量恆星隨著時間演化，經由內部的核融合反應，會依次的產生碳、氧……甚至是鐵這些重元素，到恆星演化的末期，超新星爆炸除了提供冷卻氣體的重元素以外，它攜帶的能量也會改變週遭環境。超新星爆炸的震波，可以摧毀原本附近氣體的結構，並將原本聚集在一起的氣體，推至更遠的地方，把重元素帶進宇宙中的不同角落，進而影響不同地方的恆星形成。這些重元素不只可以促進下一代的恆星生成，也是形成行星不可或缺的原由。超新星爆炸是恆星演化中的一環，在恆星整個壽命中只佔了一小部分，但若沒有這些超新星爆炸，人類也許不會存在呢！



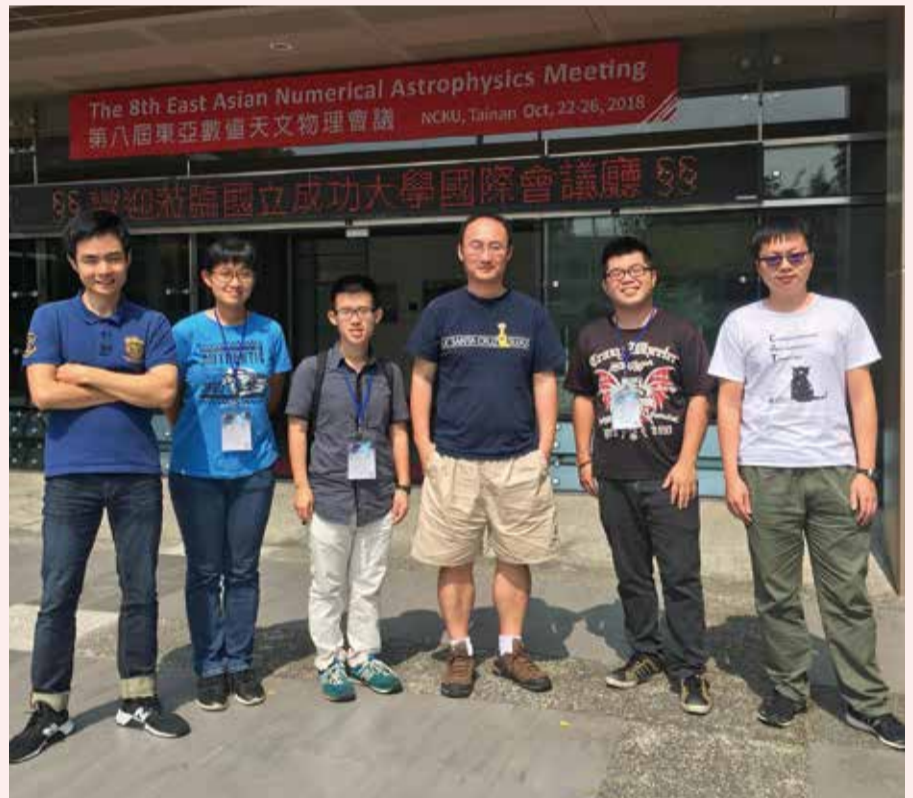
早期宇宙第一代恆星所產生的超新星殘骸之重元素分佈。 Z/Z_{\odot} 代表相對太陽的重金屬含量，顏色越亮代表重金屬含量越高。© 陳科榮



超新星爆炸衝擊恆星形成區，所激發出的大尺度星際紊流，超新星激發的震波由右向左傳遞。顏色代表氣體密度。紫紅色密度較高，藍黑色密度較低。© 陳科榮



本所譚遠培特聘研究員（左圖）及李太楓院士（右圖）於今年（2018年）榮退。



本所陳科榮博士領導的超新星研究學生團隊 — 爆炸小組。

天聞季報編輯群感謝各位閱讀本期內容。本季報由中央研究院天文所發行，旨在報導本所相關研究成果、天文動態及發表於國際的天文新知等，提供中學以上師生及一般民眾作為天文教學參考資源。歡迎各界來信提供您的迴響、讀後心得、天文問題或是建議指教。來信請寄至：「臺北市羅斯福路四段1號 中央研究院 / 臺灣大學天文數學館 11樓 中央研究院天文所天聞季報編輯小組收」。歡迎各級學校師生提供天文相關活動訊息，有機會在天聞季報上刊登喔！



發行人 | 朱有花 執行主編 | 周美吟 美術編輯 | 王韻青、楊翔伊 執行編輯 | 曾耀寰、劉君帆、蔣龍毅
 發行單位 | 中央研究院天文及天文物理研究所 天聞季報版權所有 | 中研院天文所 ISSN | 2311-7281 GPN | 2009905151
 地址 | 中央研究院 / 臺灣大學天文數學館 11樓 (臺北市羅斯福路四段1號) 電話 | (02) 2366-5415 電子信箱 | epo@asiaa.sinica.edu.tw