

## 隕石裡的秘密

球粒隕石是太陽系最古老的岩石，藉由顯微影像所揭露的細節，我們得以窺視行星形成前的太陽系。

撰文／魯賓（Alan E. Rubin）

翻譯／邱淑慧

### 重點提要

■球粒隕石的組成物質和形成行星、衛星、小行星和彗星的來源相同。每個類型的球粒隕石群組各有其獨特的質地，以及成份特徵。

■根據這些特性，作者和其他科學家大致推斷出各類球粒隕石的形成位置，以及在這些不同區域的相對塵埃豐度。

■塵埃的分佈情形，類似於許多金牛座 T 型星周遭所環繞著、由塵埃和氣體組成的原行星盤。這類恆星是年輕版的太陽，年齡約 100~200 萬歲。這樣的相似度說明了，我們可以藉由金牛座 T 型星的系統，來深入探究太陽系早期階段的太陽和盤面。

我同情天文學家。無論是藉由電腦螢幕上的影像，或是冷冰冰的光譜儀處理過的光波，都只能遠遠地觀察他們所熱愛的恆星、星系和類星體。而我們這些研究行星與小行星的，卻常常可以親手撫觸心愛的天體，探索它們最深層的秘密。大學時我主修天文學，曾經在許多個寒冷的夜晚，透過望遠鏡觀看星團和星雲，所以我可以作證：手上拿著小行星的碎片能在情感上獲得更大的慰藉，讓我們與看似遙遠抽象的一切有了真實的連結。

最吸引我的小行星碎片是球粒隕石，自太空墜落的隕石中有超過 80% 屬於此類，命名緣由是因為內部含有球粒，也就是曾經熔融的物質所形成的小珠，通常比米粒還小，這種隕石在太陽系早期、小行星成形前就已存在。在顯微鏡下觀察球粒隕石的薄片，看來是如此美麗，絲毫不遜色於康丁斯基（Wassily Kandinsky）等抽象藝術家的創作。

球粒隕石是科學家所碰觸過最古老的岩石。放射性定年結果可追溯超過 45 億年前，那時行星還未形成，太陽系還只是一團處處充滿擾動、由氣體與塵埃構成的旋轉圓盤，天文學家稱為太陽星雲。球粒隕石的年齡與成份顯示，它們與行星、衛星、小行星和彗星一樣，都形成自太陽系的初始物質。大多數研究人員相信，球粒的形成，是因為高能量使富含矽的塵埃團塊融化成許多液滴，這些液滴迅速凝固並且附著在塵埃、金屬與其他物質上，形成球粒，後來聚集形成小行星，小行星間的高速撞擊使它們碎裂，最後有些殘骸就掉到地球上成為隕石。這些隕石吸引我的並不只是美麗的外觀，而是它們可是太陽系誕生時所留下的化石，可提供探索地球形成時的狀態很重要的線索。

然而就如同人類學家所知，發現化石只是重建歷史的第一步，還必須把來龍去脈交代清楚。不過要推斷不同球粒隕石的來源和誕生環境是有困難的，因為對於這些岩石的詳細構造，我們所掌握的資料少得可憐。我在幾年前針對球粒隕石的物理性質做了一次有系統的全面檢視，填補了許多關鍵性的空缺。根據這些資料，我建立了一個大致的圖像，描述球粒隕石所源自的古老星雲構造。

雖然只是粗略的圖像，但值得注意的是，圖像中的塵埃分佈情形，與某些金牛座 T 型星（T Tauri）的恆星系統相似。金牛座 T 型星有不尋常的亮度變化，而且有厚重的大氣籠罩，因此被認為是年輕的恆星（或主序前星），多數有塵埃盤環繞。太陽星雲的塵埃圖像與許多金牛座 T 型星系統的構造吻合，這項結果支持一個說法，那就是太陽系這類行星系統的前身就是金牛座 T 型星系統。因此球粒隕石不但讓我們可以深入推測太陽系的過去，也提供了對銀河系其他年輕恆星系統的深入了解。同樣地，當科學家探究這些系統的物理性質時，也會對太陽系的小行星和行星的形成過程有更多了解。

## 球粒隕石的特性

想要分析球粒隕石來探索太陽系的原始樣貌，行星科學家首先得準確地衡量岩石的屬性。研究人員把球粒隕石分成 12 個基本類型，根據的特性有：整體的化學組成、混合的同位素（質子數相同但中子數不同的元素）、球粒的大小、數量及類型，以及緊密包覆著球粒與其他物質的塵埃基質多寡。因為每個類型的球粒隕石都有不同的物理、化學與同位素特性，因此一定是來自不同的小行星。為了解釋不同類型的球粒隕石最初是如何形成，研究人員發展出許多富有想像力的模型，其中牽涉到氣體擾動、磁場以及落入星雲中央盤面上的粒子速度等。然而，最後往往得到一個模糊的結論，就是各種球粒隕石是在「不同的情況」下形成的。

因為希望可以更確切掌握到底是什麼樣的不同情況，我從 2009 年開始埋首大量文獻資料，想要建立一個表格，列出球粒隕石主要類型的必要特性。一旦我手上有這樣的表格，就能找出每種特性之間的相關性，或許能揭示每個類型的歷史。但結果我所建立的表格中有超過一半是空格，看來有興趣蒐集這類資料的研究人員並不多。

於是唯一的選擇就是，我自己來。為了完成這個目標，我把自己定在顯微鏡前，檢視了分屬不同類型的 53 個球粒隕石、共 91 片的岩石薄片。厚度僅 30 微米的薄片，許多礦物變得能夠透光，於是我們得以研究它們的光學性質。從這些樣本我們看到，球粒有各式各樣的大小、形狀、質地和顏色。分析數千個球粒肯定是很繁瑣的工作，但是這個在「顯微天文學」上的堅持，讓我在短短幾個月內把表格填滿了。我的發現並不能完全解決「不同情況」的難題，但是這個結果確實能夠更廣泛、更完善地解釋，不同類型的球粒隕石是來自太陽星雲的何處，以及它們的局部環境如何。

首先來看看一種較少見的種類——頑火輝石球粒隕石，僅佔地球上發現的球粒隕石的 2%。這些岩石通常是根據含量最多的礦物：頑火輝石（ $MgSiO_3$ ）來命名的，而且該礦物有兩種型式，依據含鐵量的高低分別標示為 EH 和 EL。科學家發現，這些球粒隕石中含有豐富的氮、氧、鈦、鉻、鎳的特定同位素，和地球及火星相似，因此他們推論頑火輝石球粒隕石可能形成於火星軌道以內，與其他球粒隕石類型被推論出的生成地點比較起來，顯然比較靠近太陽。

第二種稱為普通球粒隕石，共有三個不同但密切相關的群組，依照鐵的含量和型式分別標示為 H、L 和 LL。「普通」指的是出現頻率，它們共佔所發現隕石的 74%。這三類隕石的數量之多，顯示它們在太陽系中的形成區域，受到的重力會傾向把隕石丟到地球上來。

美國加州大學洛杉磯分校的華生（John Wasson）曾經提出，普通球粒隕石是來自小行星帶（位在火星與木星軌道之間）中心朝向太陽的一側。小行星與太陽的距離約是地球與太陽距離的 2.5 倍，也就是 2.5 天文單位（AU），12 年會繞太陽公轉三圈，木星距離太陽 5.2 天文單位，12 年繞太陽公轉一圈。這樣的共振表示木星的巨大重力會經常拉扯這些小行星，把許多小行星給拉到內太陽系。瑞典的科學家發現，有數十個普通球粒隕石是存在於年齡 4 億 7000 萬年的岩石內，這個跡象顯示，在地球 46 億年的歷史中，有超過 1/10 的歲月承受著球粒隕石的攻擊。

第三種是極為罕見的魯木路提（Rumuruti）球粒隕石，或稱為 R 球粒隕石，目前只在肯亞的魯木路提發現過。這種隕石有許多化學性質與普通球粒隕石相似，但是含有較多的基質，而且氧 17 相對於氧 16 的比率明顯偏高。星雲的高溫有助於平衡同位素的豐度，因此當距離太陽越遠，同位素的不平衡就越容易保留下來。R 球粒隕石的同位素如此不平衡，可見其形成區域比普通球粒隕石距離太陽還遠。

另一方面，高溫也會破壞有機化合物，因此，比上述三種含有更多有機化合物的碳質球粒隕石，應該比 R 球粒隕石離太陽更遠。碳質球粒隕石又可分為六個主要類型，根據它們的化學、同位素和構造等特徵，各自可以具體分配到星雲的特定位置。

### 塵埃透露的訊息

除了化學組成之外，球粒隕石的內部結構也會顯示出形成時環境的塵埃量。在太陽系演化的每個過程中，塵埃一直都是關鍵。太陽與行星所源自的初始星雲剛開始收縮時，塵埃顆粒變得更能有效捕捉紅外輻射，使星雲中心溫度上升，後來促成原恆星的形成。接著，塵埃以及外圍的冰落入星雲的中央盤面，並且聚集成較大的團塊，最後形成多孔隙的物體，也就是微行星，大小從數公尺到數十公里都有。這些微行星中有些會熔化。而

行星就是由熔化與未熔化的微行星組合而成，彗星和小行星則比較可能是由未熔化的微行星吸積而成，因此組成成份較均勻。

有個線索可以知道特定類型的球粒隕石形成區的塵埃豐度，就是在球粒中有塵埃球殼包圍的矽質核心。例如在某些碳質球粒隕石的球粒中，通常會有一個核，或是「主要的」球粒，外圍包裹著成份類似但曾經熔融的物質球殼。通常這個第二層的殼層本身也被稱為火成環圈的第三層外殼包圍，第三層的礦物顆粒比中心核的礦物顆粒細小許多（參見左側下方的顯微影像）。

許多隕石研究人員認為，第二殼層的產生，是因為原本的球粒在最初的熔化後凝固，會產生一個多孔隙的塵埃殼層，在經歷第二次中等能量的事件時，外殼會熔化但內部的球粒不會。後來，陸續發生幾次能量較低或是持續時間較短的事件，就產生了火成環圈，這是很簡單的道理。但是，各種球粒隕石中含有許多這樣層層外殼球粒的，看起來是形成於多塵埃的環境中。

如果在多次熔化之間，球粒是沉浸在塵埃中，自然會產生大顆的球粒，有著厚厚的第二殼層和火成環圈。因此，這樣的特徵顯示球粒隕石形成時的環境有著大量的塵埃，包裹在塵埃中的球粒也會冷卻得比較慢，因為熱無法快速輻射出來，而冷卻速度較慢也會促使鈉和硫等易揮發元素揮發。雖然大多數的揮發物質已經凝固在鄰近的塵埃上（最後結合成球粒隕石），但還是會遺失一部份。球粒隕石若含有較大球粒且球粒被塵埃包圍，其內部鈉和硫的成份會比形成於缺乏塵埃環境的球粒隕石低。我發現事實的確是如此。

將此與其他有關母小行星預設位置的資訊結合，我發展出一個粗略的圖形，說明整個早期太陽系的塵埃豐度（參見 30 頁〈太陽系，在行星形成之前〉）。根據推測，頑火輝石球粒隕石是形成於火星軌道朝向太陽的區域，那裡一定是個缺乏塵埃的環境；球粒很少具有殼層或環圈，即使有環圈也很薄。普通球粒隕石和 R 球粒隕石，與太陽的距離遠於頑火輝石球粒隕石，呈現出較多有塵埃存在的特徵，例如，具有火成環圈的球粒比例，以及環圈的厚度，都比頑火輝石球粒隕石來得大。

有些碳質球粒隕石有著最大的球粒，且含有最多具第二殼層與火成環圈的球粒（分別是 CR、CV 和 CK 三類型），在它們所佔據的區域，塵埃濃度顯然達到最高，然後往另兩個距太陽較遠的類型（CM 和 CO）的位置慢慢減少，這些類型的隕石所含有的球粒小得多，含有第二殼層和火成環圈的比例也少很多。塵埃的總量繼續往最遙遠的碳質球粒隕石（CI）附近減少，這類隕石根本沒有球粒。（但它們還是球粒隕石，因為主要的分類標準是化學成份與太陽的非揮發性元素相似。）

這個星雲圖像中的塵埃分佈情形，令我推論，早期的太陽系可能與我們現在所觀測到的金牛座 T 型星類似，這類年輕恆星就像早期的太陽，還未進入穩定氫融合的主序階段。

塵埃圖樣跟許多已知環繞在金牛座 T 型星周圍的原行星盤很像。因為這些特定圓盤的質量（約是太陽質量的 2%），與太陽星雲盤面的推估質量接近，因此看來這些盤面提供了很好的模型，讓我們能了解星雲中形成球粒與組成球粒隕石的階段。

**【欲閱讀完整的豐富內容，請參閱科學人 2013 年第 133 期 3 月號】**