

知識天地

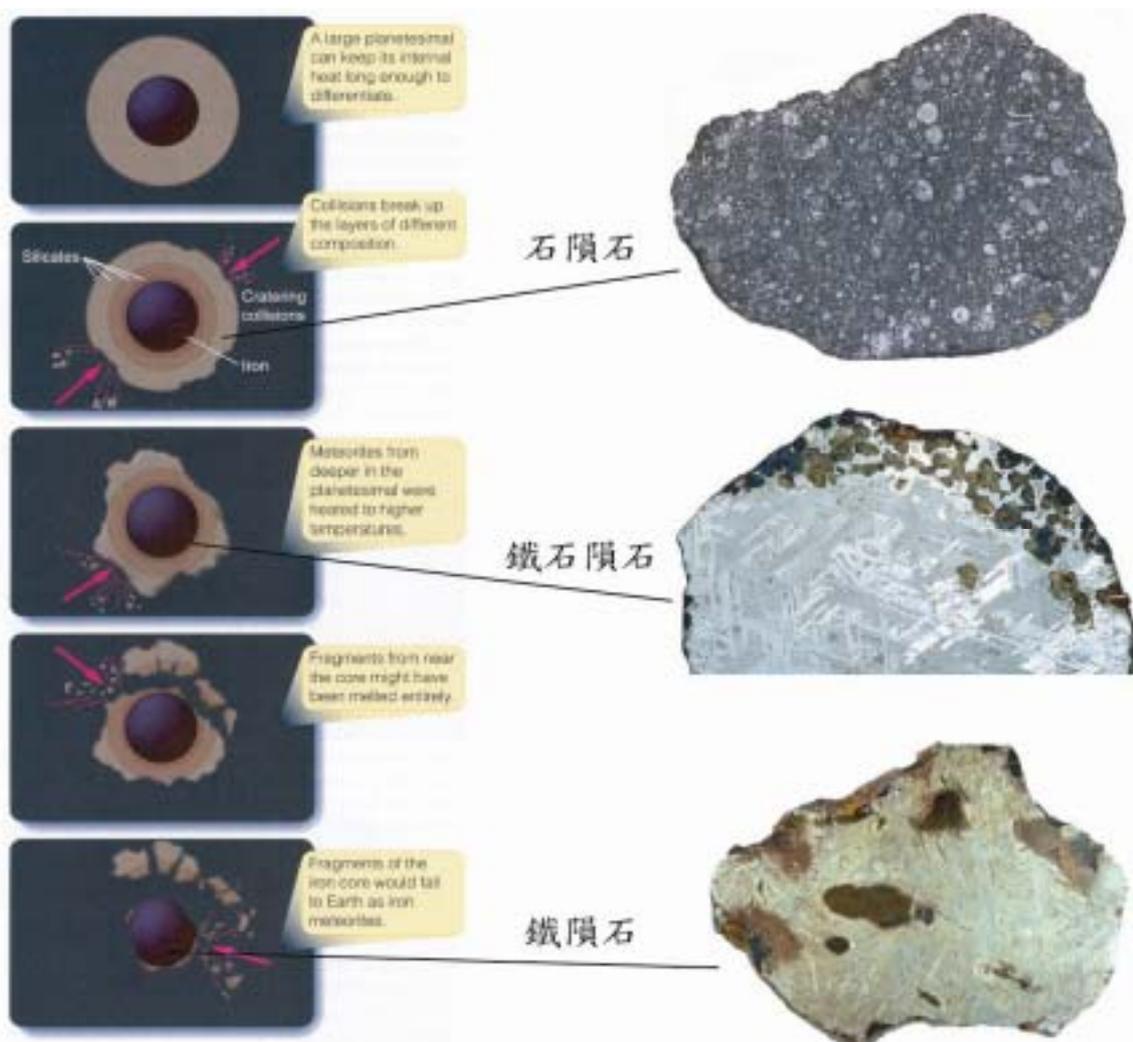
高精密度鎢同位素組成的分析與小行星之地心分化作用

李德春（地球所副研究員）

前言

科學家們相信太陽系中類地行星（包括金星、水星、地球和火星）是分三個階段形成的。首先，從微米至毫米的灰塵，經由低速度的碰撞而膠合，逐漸形成數十公里大小之小行星；然後，這些小行星經由重力的擾動而產生碰撞，逐漸形成約 1000 km 大小之子行星，最後的階段是由這些子行星之互相碰撞而形成類地行星。科學家們對於這個「行星形成」過程之物理與化學的性質與變化，已有相當的瞭解與共識[1]。但是對於各階段所需之時間，我們的瞭解還是相當地有限，而且理論與實驗的證據依然存有相當的歧見。

星體中由鐵鎳組成的地心與由矽酸鹽組成的地函，二者通常是分離的，而此分化作用正代表著此星體中最重要的一次化學分化作用。由於地球上板塊運動的結果，我們無法在地表上採得記錄到地球形成之初的歷史演化標本，更遑論得到地表下近 3000km 地心的標本。所幸我們有很多隕石標本，它們不但忠實地記錄太陽形成後約 45.6 億年的演化歷史，更提供了整個星體從地表一直到地心的標本（見圖一）。由於地球是由這些隕石的前身—小行星，經過多次的碰撞膠結長大形成，研究這些隕石之形成與演化，可更進一步瞭解地球，乃至於其它類地行星的形成與演化。



圖一 小行星經碰撞而分裂（圖片取自 Foundations of Astronomy, by M. A. Seeds），因此隕石提供了整個星體從地表到地心的標本。

要瞭解行星體中地心與地函分化的時間，與具體分化的模式，鐵隕石或許是最恰當的標本。這是因為它們本為小行星的鐵鎳核心，經過碰撞破裂再落到地球上。短半衰期同位素 ^{182}Hf (鈦) 蛻變為 ^{182}W (鎢) (半衰期為 8.9 百萬年) 或許是最直接及精確的工具[2]。當地心與地函分化時，因為其親鐵的性質，絕大部分的鎢會隨同鐵鎳進入地心；而因為親矽酸鹽的緣故，全部的鈦會留在地函中。如此一來，鐵鎳的地心其鎢同位素的組成，將因為不再有 182-鈦的蛻變為 182-鎢，與矽酸鹽的地函因有 182-鈦持續的蛻變為 182-鎢而大不相同。如果可以很準確地測量出這些隕石中鎢同位素組成的異常，由其 182-鎢異常之微小的差異，我們可進而得到這些鐵隕石 (或是小行星的地核) 形成的年齡。前人曾做過數次類似的研究[2-5]，但所得到的資料誤差都十分大，所以在對於不同小行星體中，地心形成的時間是否相類似之解釋有很大的疑問。

在對化學純化與特別是於分析技術上引用新一代的電漿離子源質譜儀 (圖二) 後，有了長足的改進，本實驗室重新分析來自 4 個不同小行星體鐵鎳核心的 12 個鐵隕石。藉由這個研究[6]，希望能證實各小行星體中，地心分化的時間確實不盡相同，並進而推導造成地心分化時間不同之原因，例如星體大小或是星體成長方式的不同等。而這些資料，將對太陽系早期各星體之演化的瞭解，佔非常重要的角色。



圖二 地球科學研究所購自 Nu-Plasma, UK, 之新一代的電漿離子源質譜儀。

結果

如前人研究所得的結果[2-5]，在與太陽系平均值相較下，這 12 個鐵隕石的 182-鎢，有很顯著約-200ppm 到 -100ppm 的短缺 (亦稱「負異常」)[6]。造成這些鐵隕石之 182-鎢負異常的原因，是各星體的地心在 182-鈦尚未完全蛻變完之前已與地函分離了。而 182-鎢短缺的量，則是與地心分化的時間先後成比例，負值越大，地心分化得越早。由於本實驗室結果之精確度，較前人的研究有很顯著的改進，從 $\pm 100\text{ppm}$ 減少到少於 $\pm 20\text{ppm}$ ，本實驗室首次能很肯定地證實：

各小行星體從太陽系中的微塵開始聚集，長大到數十甚至數百公里的大小，到它們的地心與地函分化完成，這整個過程所需的時間，不但十分地相似，而且非常地迅速，在太陽系形成後之 1 至 3 百萬年就完成了。

來自同一星體之鐵隕石，其 182-鎢的負異常亦有將近 100ppm 的變化。這代表著此星體之地心與地函之分化，花了近 9 百萬年才完成。

討論

由於鐵隕石不含 182-鉛，當任何星體之地心與地函分化後，以鐵鎳為主的地心，其 182-鎢將不再改變，除非新的物質帶有不同的 182-鎢異常熔入原始的地心，藉由：一、微量的粒子間的自然擴散作用；或是二、較大量的物質直接熔入的方式。

由於自然界的物質具有經由擴散作用來達到物理與化學平衡的趨勢，擴散作用可以在任何物相中發生，但其速率在固態中通常非常地低。即使在小行星的地心與地函之交界處的溫壓環境下，其擴散速率仍舊是很低。此外，在缺乏相關的物質相之擴散速率的資料下，現階段對擴散作用可能會產生的影響是無法加以評估的。

造成在鐵隕石中所發現的 182-鎢負異常的變化，最可能是由大量的物質混入原始的鐵鎳核心所形成的。這些物質可以是：(a)來自地函的矽酸鹽；(b)來自其他小行星的鐵鎳核心；或是(c)來自同一星體再次分化作用所產生的鐵鎳金屬。

(a). 鐵隕石中不時發現有矽酸鹽的存在，但是這些矽酸鹽的含量通常少於數個百分點。但是矽酸鹽不太可能與鐵鎳合金作有效的熔合，再加上發現 182-鎢之負異常有變化之鐵隕石中，並未含有過量的矽酸鹽礦物，此一假設之可能性應該不大。

(b). 如果此小行星與另一小行星互相碰撞，而由於碰撞所產生之巨大能量，可以將這二個小行星的鐵鎳核心很有效地結合成一個新的地心。可想而知的是，如果它們原始的鐵鎳核心之 182-鎢負異常是不盡相同的，而此熔合的過程並未達到完全的平衡，則很有可能造成來自同一星體之鐵隕石中 182-鎢負異常有變化的現象。這個“間歇性地心增長”的模式不但符合實驗的證據，亦吻合理論學家所提出之“行星形成”的模式。

(c). 除了熔合外來星體的鐵鎳核心之外，加入同一星體中經再次分化作用所產生之鐵鎳金屬，亦可解釋所觀測到之 182-鎢負異常的變化情形。這是因為同一星體中經過再次分化作用所產生的鐵鎳金屬，其 182-鎢之組成肯定會比原有的鐵鎳核心之 182-鎢負異常來得少。而最有可能造成一個星體再次發生分化作用之觸媒是與尚未分化之小行星的互相碰撞。當新物質加入另一個已產生分化作用之地函中時，由於碰撞時所產生之巨大能量，很有可能觸發再次的分化作用，使得多餘的鐵鎳熔入原有的地心。這個模式在根本上與在(b)中所敘述之間歇性地心增長的模式是相通的。唯一不同點是本模式於時間上，將新加入的鐵鎳金屬稍微往後延伸一些。由於多了一段時間的蛻變，新分化出來的鐵鎳，其 182-鎢之異常將大大的不同於原來的地心。

結論

小行星通常被認為是類地行星之前身，而類地行星的形成也是由小行星互相碰撞膠結而增長形成的。雖然對科學家們而言，要直接研究類地行星的分化作用是非常地困難，但是從研究小行星也可以間接地告訴我們有關於類地行星中地心分化的過程與所需的時間。地心與地函的分化作用似乎在小行星增長到一個臨界質量後會自然地發生，而隨著小行星的增長，它的鐵鎳核心也會以間歇性的方式增長。既然小行星是類地行星的前身，同樣的類地行星之鐵鎳核心必定也很早就形成了。這原始的鐵鎳核心將隨著星體的增長不斷地以間歇性的方式（加入其他小行星的鐵鎳核心，或是經過碰撞後引發的再次分化作用）來增長。可想而知的是，這個過程將持續至各個類地行星的成長完成，一般認為約需五千萬至一億年左右。這種間歇性地心增長的模式，對於研究行星之形成與演化，以及各星體中元素的含量與分布都有決定性的影響。

對科學家而言，選擇到適當的標本，加上細心與嚴謹的實驗，如此一來所得到的收獲，將是遠遠地超過整個過程所付出的精力與時間。隕石對地球化學家或是宇宙化學家們正如同是“天上落下來的寶貝”。它們不但忠實地記錄到太陽系形成以後 45.6 億年的歷史，某些特別的隕石，例如碳質球粒隕石，更保存形成太陽系的原始物質。而研究這些被稱為星塵的微小顆粒，更可幫助科學家們瞭解恆星從其出生、演化至死亡，其物理與化學特性的改變，進而對我們自己的太陽系之過去和將來有更深刻的認識。

參考文獻

- [1] G.W. Wetherill, 1990. Formation of the Earth, *Annu. Rev. Astron. Astrophys.* 18, 205-256.
- [2] D.-C. Lee, A.N. Halliday, 1996. Hf-W isotopic evidence for rapid accretion and differentiation in the early solar system, *Science* 274, 1876-1879.

- [3] C.L. Harper, S.B. Jacobson, 1996. Evidence for ^{182}Hf in the early solar system and constraints on the timescale of terrestrial accretion and core formation, *Geochim. Cosmochim. Acta* 60, 1131-1153.
- [4] M.F. Horan, M.I. Smoliar, R.J. Walker, 1998. ^{182}W and ^{187}Re - ^{187}Os systematics of iron meteorites: chronology for melting, differentiation, and crystallization in asteroids. *Geochim. Cosmochim. Acta* 62, 545-554.
- [5] Q.-Z. Yin, S. Jacobsen, 2003. The initial $^{182}\text{W}/^{183}\text{W}$ and $^{182}\text{Hf}/^{180}\text{Hf}$ of the solar system and a consistent chronology with Pb-Pb ages, *Lunar Planet. Sci.* XXXIV #1857.
- [6] D.-C. Lee, 2005. Protracted core formation in asteroids: evidence from high precision W isotopic data. *Earth Planet. Sci. Lett.* 237, 21-32.