

## [ 研究新領域報導 ]

## 地心之旅：探索地球深部礦物物理性質與複雜的熱化學結構

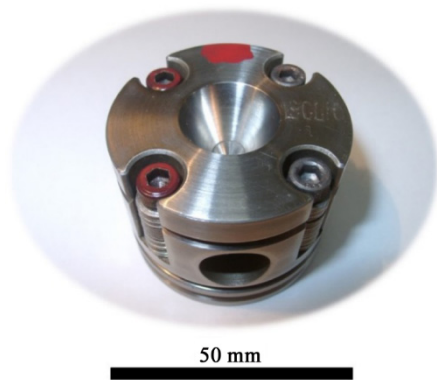
中央研究院地球科學研究所 謝文斌

我們每天在地球表面生活並享受美好、多變及動態的大自然，而地底下的世界卻看似無聲無息、靜悄悄地。其實不然，位於地底下超過 2900 公里深、溫度超過 4000 度 K 的地核為整個地球在過去數十億年中的熱演化過程扮演著發動機的角色，提供源源不絕的熱能以驅動許多地球內部的動力學過程，例如外地核及地幔 (mantle) 的流動，進一步帶動地殼與板塊的運動、隱沒，甚至引發地震等。研究地球內部構造與礦物組成等基本物理化學性質以及其極為複雜的熱化學結構將有助於我們進一步了解地底下美麗的世界以及她神祕的歷史。當然，最直接有效的方式就是帶著實驗儀器進行一趟地心之旅，到地底深處去一窺究竟。然而，現今的鑽井科技僅止於進入地下約十餘公里處，離真正的地球內部或者深部還有著非常大的差距。相較於現今上太空的技術日趨成熟，要進入地球內部其實比登天還難！也因為我們目前還沒有辦法到地球內部去採集岩石樣本，過去幾乎都是透過地震學觀測與計算以及地球化學等研究方式去了解地球內部構造、礦物組成以及地體動力學等地球物理及化學性質。

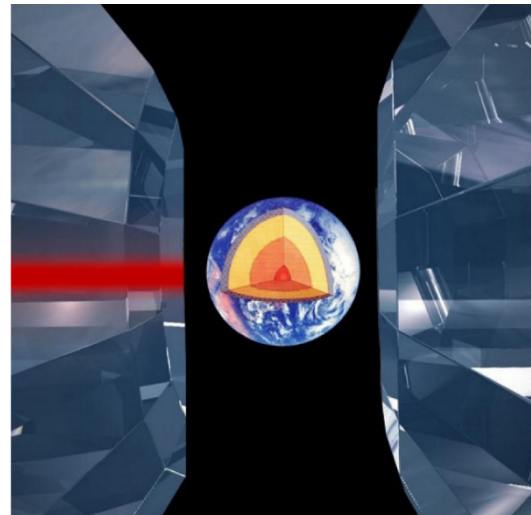
其實除了上述的研究方法之外，礦物物理學家們在實驗室裡藉由現代高壓科學的技術開闢了一條通往地心的道路：我們利用高壓鑽石砧 (high-pressure diamond anvil cell) 結合加熱技術來模擬地球內部高壓及高溫的狀態。當實驗的壓力及溫度持續增加時，其實就等同於一步一步地進到地球內部，再搭配新穎的光學探測方法就可讓我們一窺地球內部的面貌，探索地球組成礦物在地球深部極端條件下的物理及化學性質。更重要的是，高壓礦物物理在地球物理領域中扮演了不可或缺、相輔相成的角色：礦物物理性質的量測數據是驗證地震波觀測與計算結果的重要依據，對於地體動力學模擬中的各種參數更是提供

具體的數據資料讓模擬條件更符合地球內部實際的狀態。

最近我們在高壓礦物物理領域的研究著重在利用雷射及同步輻射光源去探究地球深部礦物於高溫高壓下的物理性質，例如熱傳導率、彈性與聲速、分子振動光譜 (拉曼與紅外光光譜)、聲子及電子等載子的超快動力學以及高壓下礦物結構、電性及電子自旋態的相變機制等。其中又以礦物熱傳導率的量測最為特別：前面提到地核提供了地球熱演化的重要熱源，當熱從地核不斷地傳出，經過核幔邊界 (core-mantle boundary)、下地幔、過渡帶 (transition zone)、上地幔及地殼等，各區域的組成礦物在地球內部各自高溫高壓狀態下的熱傳導率是決定其間溫度分佈、動力學及熱演化歷史的一個重要物理量。過去數十年間，量測材料在高壓下的熱傳導率主要都是以傳統連接導線的方式去量測熱流量與溫度梯度的關係。然而這種接觸式的量測方法在極高壓下即面臨很大的挑戰，例如在強大壓力擠壓之下導線是否與樣品維持良好接觸以及溫度量測準確度等關鍵議題都大幅降低了此實驗方法在極端高壓下的可信度。因此過去在高壓下材料的熱傳導率一直很難被精準量測，實驗數據非常稀少且差距甚大，只能用較低壓力的數據以外插方式估計，或是用現代理論計算方法去得到。然而這些數學方法可能會引進不小的誤差，造成各種方法所得出的結果不盡一致。最近幾年，超快雷射成功地應用在量測材料的熱傳導率 [1]，而因為他是一種非接觸式的量測方法，完全擺脫傳統技術的限制。在過去幾年的研究中，我們成功地將超快光學與高壓鑽石砧結合 (圖一及圖二)，讓我們在極高壓環境之下還是可以精準量測熱傳導率，突破了過去以接觸式量測法所能做到的壓力範圍限制 [2]。我們的地心之旅主要即是研究自上部地幔一直到地核範圍中主要地球材料的



圖一 高壓鑽石砧。我們將樣品放置於一對鑽石的尖端砧面之間並以力學方式將鑽石與樣品互相擠壓，以產生高達數十萬甚至百萬倍大氣壓的高壓環境。我們在實驗室裡用他來模擬地球內部的高壓狀態，搭配加熱技術，猶如進行一趟地心之旅。



圖二 高壓光學實驗示意圖。一對鑽石將地球深部材料加壓至極端高壓下並以雷射光（左方紅色光束）探究材料的物理性質。

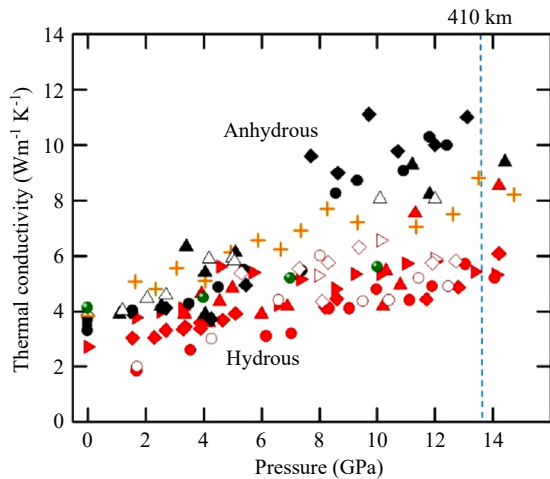
熱傳導率，例如含水橄欖石(hydrous olivine)及其高壓同質異相體(wadsleyite and ringwoodite)、矽酸鹽鈣鈦礦(bridgmanite)、鐵方鎂石(ferropericase)、鐵(iron)及鐵-輕元素(silicon, oxygen, carbon, sulfur)合金等。我們正在建立起整個地球深部熱傳導率沿著地溫梯度的剖面圖並且試圖了解水、鐵、鋁等重要「雜質」是如何影響上述礦物的物理性質以及地球內部許多化學組成不均勻區域的熱性質，例如隱沒帶(subduction zones)以及核幔邊界附近的熱化學(thermochemical)結構等，這些全新的實驗結果已逐漸為深部地球領域帶來非常重要的進展。同時我們也與地球所內「地球動力學計算小組」以及專長於地球物理方面的同事們密切合作，將實驗數據與動力學模擬及地震觀測做結合，共同探討這些新的實驗結果會如何影響地球深部動力學、熱化學結構演化的過程與深層地震的發震機制，例如超大剪力波低速帶(large low shear-wave velocity provinces)與超低速帶(ultra-low velocity zone)附近的熱構造與成因、核幔邊界的熱流量(CMB heat flux)以及隱沒板塊中礦物因為含水或是晶體軸向所造成的溫度異常(temperature anomaly)等，最終的目標是希望能對整個地球的熱演化歷史與許多在地震觀測上懸而未決的重要問題有更進一步的了解。最近的幾個研究主題及方向包括：

### 一、地球水循環對深部地球礦物的影響[3]

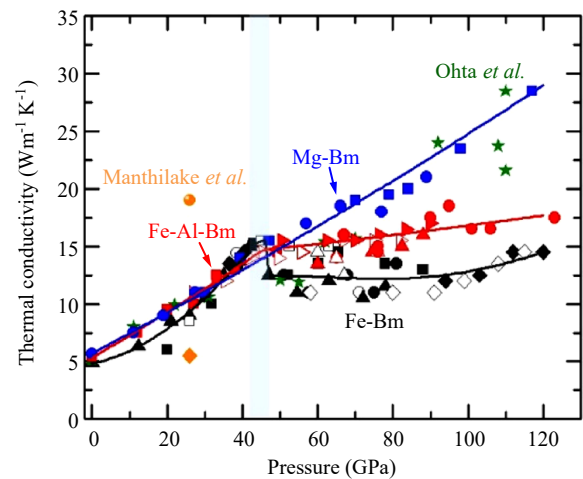
過去的研究顯示水循環對於地球內部的物理化學性質以及演化過程有著非常重要的影響。我們測量上地幔主要礦物橄欖石的熱傳導率，發現當橄欖石含有大量水(OH-)時，在約 410 公里深的上地幔過渡帶附近其熱傳導率僅為不含水時的一半（圖三）。透過與地球所譚諤博士合作，我們將此新的實驗數據加入動力學模擬中並分析隱沒板塊中心的溫度分佈，發現若海洋地殼中含大量的水，則會在隱沒板塊中心產生絕熱效果，使其溫度保持在相對低溫狀態，讓地幔中的亞穩態橄欖石得以被保存至較過去所認知還要更深的過渡帶，證實地球的水循環對深部礦物與溫度分佈有重要影響，有助於解決當前關於橄欖石是否能夠在過渡帶中存在的爭議，也對橄欖石相變作為過渡帶中引發地震的可能機制提供證據。

### 二、鐵對於下地幔與核幔邊界熱流及演化的影響[4, 5]

我們最近也研究了地球下地幔兩個主要礦物—bridgmanite 及 ferropericase—的熱傳導率。發現含鐵的 bridgmanite 在約 45 GPa 壓力下會有「晶格扭曲」的類相變行為，其熱傳導率也因此突然減少約 20%；持續增加壓力到接近地幔底



圖三 含水與不含水橄欖石在高壓下之熱傳導率。在地幔過渡帶（410 公里）附近，含水橄欖石（紅色數據）的熱導率僅約為不含水橄欖石（黑色數據）的一半[3]。



圖四 不同化學組成之 bridgmanite 於地幔壓力下之熱傳導率。在地幔底部約 120 GPa 壓力下，含鐵之 bridgmanite, Fe-Bm（黑色數據）的熱傳導率僅約為純鎂 bridgmanite, Mg-Bm（藍色數據）之一半[4]。

部約 120 GPa 時，熱傳導率僅為純鎂 bridgmanite 之一半，證實了鐵對於此礦物之熱傳導性質於極端條件下有極大影響(圖四)。進一步與地球所 Frédéric Deschamps 博士合作將此重要數據結合動力學數值模擬，我們發現在地幔底部的超大剪力波低速帶因為富含鐵，其熱傳導率較周邊的地幔還低的許多，而此較緩慢的熱傳行為則會增強超大剪力波低速帶的內部熱流行為，甚至會使其自身溫度持續升高影響後續的動力學，例如熱柱 (thermal plume) 的產生與演變。另外我們也發現在核幔邊界附近因為礦物富含鐵而導致較低熱傳導率的性質，使其熱流量將比過去傳統所認知的還要低許多。

除了 bridgmanite，我們也首次觀察到鐵的電子自旋態會對 ferropericlase 之熱傳導有重要影響。我們發現高鐵含量的 ferropericlase 在約 40 至 60 GPa 壓力下，其熱傳導率會因為電子從高自旋態轉成低自旋態而大幅降低，導致在地幔底部其熱導率遠低於低鐵含量的 ferropericlase。結合 bridgmanite 及 ferropericlase 這些重要實驗數據做基礎，我們建立了整個下地幔熱傳導率隨著地球深度而演變的關係，為深部地球熱演化及動力學等性質提供了非常重要的資訊。例如在地幔底部的超低速帶 (ultra-low velocity zones) 因為高溫且富含鐵，其熱導率遠低於過去所認為的數值，因此會大幅延遲其冷卻的過程。

### 三、高壓同步輻射研究

除了在實驗室裡以新穎的光學方法研究礦物的物理性質之外，我們也使用美國、日本等地區先進的同步輻射 X 光光源，以 X 光繞射及 X 光光譜等技術更全面性地了解礦物的性質。而為了建立並發展台灣在高壓同步輻射科學領域的研究，經過許多學界同仁多年的努力，最近在中華民國地質學會之下成立了高壓科學研究會，除了將整合台灣在高壓科學的研究資源並促進各方合作之外，也將在新竹國家同步輻射研究中心剛啓用的台灣光子源 (Taiwan Photon Source) 新的光束線實驗站上建立起能夠從事高壓同步輻射研究的相關設施，進一步發展與推廣台灣的高壓研究，增進相關領域研究群的研究能量，也希望吸引更多國外頂尖的高壓實驗團隊到台灣光子源從事實驗與學術交流，提升台灣在國際高壓科學研究的能見度。

結合雷射、同步輻射光源與高壓鑽石砧等先進的高壓技術，這趟地心之旅讓我們一窺地球深處許多有趣的地球物理、化學及動力學現象，更逐步揭開地球熱演化歷史神秘的面紗。藉由結合高壓礦物物理、地球動力學模擬、觀測與計算地震學以及地球化學等多學門的互補，希望我們能夠對於地球的過去、現在與未來有更進一步的認識。

## 參考文獻

- [1] D. G. Cahill, W. K. Ford, K. E. Goodson, G. D. Mahan, A. Majumdar, H. J. Maris, R. Merlin and S. R. Phillpot, *J. Appl. Phys.* 93, 793 (2003).
- [2] W. -P. Hsieh, B. Chen, J. Li, P. Keblinski and D. G. Cahill, *Phys. Rev. B* 80, 180302 (2009).
- [3] Y. -Y. Chang, W. -P. Hsieh, E. Tan and J. Chen, *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* 114, 4078 (2017).
- [4] W. -P. Hsieh, F. Deschamps, T. Okuchi and J. -F. Lin, *J. Geophys. Res. Solid Earth* 122, 4900 (2017).
- [5] W. -P. Hsieh, F. Deschamps, T. Okuchi and J. -F. Lin, *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* 115, 4099 (2018).