地心之旅

謝文斌助研究員 (地球科學研究所)

在法國小說家Jules Gabriel Verne所著的《地心歷險記》(*Voyage au centre de la Terre*)以及電影《地心冒險》(*Journey to the Center of the Earth*)中，我們看到人類進入地球內部一窺地底的熔岩以及古生物等多采多姿的世界。然而現實生活中，以現今的科技，科學家目前僅能以鑽井的方式鑽至地下約十餘公里深處，離真正的地球內部或者深部地球還有一大段距離。因此，目前我們對於地球深部構造與礦物組成等地球物理及化學性質的認識，絕大多數都是透過地震波的觀測以及地球化學研究。

除此之外，難道我們就真的無法如小說及電影情節一般，到地球內部裡去看一看嗎？

前進地心：高壓高溫研究

其實透過其他實驗方法，也是可以一窺地球內部的面貌！我們以現代高壓礦物物理研究的方法，在實驗室裡就可以模擬地球內部極端高溫高壓的狀態。當我們將實驗的溫度與壓力不斷增加時，就如同一步一步地進到地球深部，去研究地球內部礦物在極端條件下的物理及化學性質。20世紀初期哈佛大學的Prof. Percy Bridgman是近代高壓研究的先驅。他改良了早期的高壓元件，將產生的壓力提升至約10 GPa (十萬倍大氣壓)。他也因為一系列開創性的高壓研究而獲得1946年的諾貝爾物理獎。後來1959年美國國家標準局(當時為National Bureau of Standards)的科學家們發明了最早期的高壓鑽石砧(diamond anvil cell)並且陸續進一步改良，為現代高壓鑽石砧研究奠定重要基礎。因為鑽石是目前最堅硬的材料，可以承受非常大的作用力，因此當施加極大的力在極小的截面積時，就可產生非常高的壓力。但由於當時實驗元件材料的限制與技術瓶頸，所能產生的最高壓力僅止於幾十個GPa。一直到1970-80年代，美國卡內基研究院(Carnegie Institution for Science)的科學家毛河光博士(本院及美國科學院院士)與其合作者，改良了高壓鑽石砧的設計，大幅提高一對鑽石於對壓過程中的穩定度，一舉突破了過往的最高壓力紀錄，首次成功地到達1 Mbar (即100 GPa、百萬倍大氣壓) [1,2]。自此，高壓研究進入了新的時代，研究人員可以進一步探索材料於超高壓力條件下的各種性質。目前使用高壓鑽石砧技術已可產生500 GPa以上的壓力，遠超過地球中心壓力(約360 GPa)。

高壓鑽石砧之所以成為目前高壓研究中最普遍的加壓技術 [3]，主因是他方便操作，且鑽石對於可見光以及X光來說是透明的(這些波段的電磁波被鑽石吸收的程度低)，可以很容易地從事高壓下非接觸式(non-contact)的物理化學性質探測。例如研究材料的(1)超快光譜(ultrafast spectroscopy)：了解材料中電子與聲子(phonon)的動態行為與交互作用以及相變的超快動力學機制; (2)拉曼散射(Raman scattering)：研究分子振動行為及頻率，從而得知物質的種類、分子結構，做材料的身份鑑定; (3)布里安散射(Brillouin scattering)：量測布里安散射頻移，進而得出材料聲學性質，如波速、彈性係數等; (4)X光繞射(X ray diffraction)、吸收及發射光譜(absorption and emission spectroscopy)、穿透成像(transmission X ray microscopy)等：研究材料的狀態方程式(equation of state)、高壓下原子間排列、氧化價數、鍵結方式、電性與磁性相變等。因為高壓鑽石砧體積並不算太大(圖一)，攜帶方便，可以帶到各地的實驗室以及同步輻射實驗站進行實驗。此外，也可以搭配外部加熱(external heating)或者雷射加熱(laser heating)的方式將實驗樣品處在等同於地球深部極高溫高壓的狀態，再進行上述各式各樣的物理化學性質研究。

除了在地球及行星科學上的研究之外，高壓技術也可應用在物理、化學、材料等領域。相較於溫度，高壓對於材料的影響常常是更大的。例如從一大氣壓到10 GPa，壓力的改變是五個數量級，巨大的壓力經常可引起新穎材料許多有趣的相變化。因此高壓提供了一個全新的維度，讓我們可以大範圍且有系統地調整材料的各種物理化學性質，例如縮短原子間距、增加電子間的作用力、增強分子鍵結強度、聲速、彈性係數、密度、改變電子及聲子的分散曲線(dispersion)以及態密度(density of states)，進而引起結構、電性、磁性的相變。而目前為止在銅氧化物 [4]以及氫化物 [5]超導體中所發現最高的超導臨界溫度都是在高壓下所量測到的。

地球所研究近況

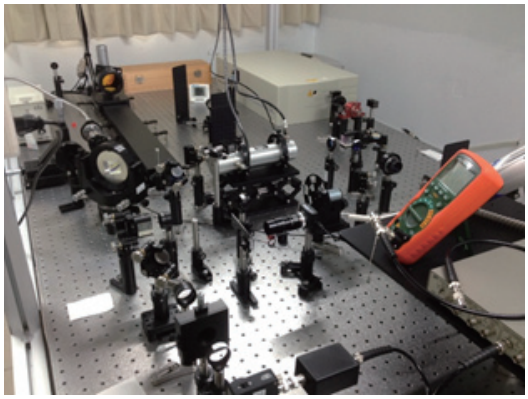
最近幾年地球所在高壓礦物物理的研究上主要著重在地球材料的熱傳導係數 [6,7]、聲速、分子振動光譜 [8]及高壓相變等物理性質的探討。其中比較特別的是材料熱傳導係數的量測。礦物於地球內部高溫高壓狀態下的

熱傳導係數是決定整個地球熱演化歷史以及地球內部溫度分布的重要參數。然而過去由於受限於實驗方法，在極高壓下材料的熱傳導係數一直很難被精準量測，因此只能用較低壓力的數據外插估計，或者以現代計算方法而得到。但這些方法常常會引進不小的誤差，且各種方式所得出之結果也不盡一致。而在最近幾年的研究中，我們結合超快光學(圖二)與高壓鑽石砧以發展出新的量測技術，使得在高壓下得以精準量得熱傳導係數，突破了傳統上以接觸式量測方法所能做到的壓力範圍限制並維持良好的實驗精準度。我們實驗組最新的研究已經可以量測到下部地函礦物在120 GPa的熱傳導係數，等同於礦物在地球內部約2700公里深處的D" 層，接近地核──地函交界(core-mantle boundary)。將來的目標是前往更高壓力的地核，了解鐵與硫、氫、矽等元素合金態之熱傳導性質。除了提供全新的實驗數據之外，我們實驗組更進一步與地球所內「地球動力學計算小組」密切合作，組成一個實驗與理論模擬相結合的團隊，共同探討這些新數據會如何影響地球深部熱演化以及動力學的過程，包括超低速帶(ultra-low velocity zone)附近的熱構造與成因、熱柱(hot plume)的形成與演化機制，最終希望進一步了解整個地球的演化歷史以及許多在地震波觀測上懸而未決的重要問題。此外，新竹國家同步輻射研究中心新建造的臺灣光子源(Taiwan Photon Source)即將於這一兩年陸續開放給學界同仁使用。臺灣光子源是目前世界上X光亮度最高的同步輻射光源之一，我們計畫在新的光束線實驗站上建立起專門從事高壓同步輻射研究的設施，進一步發展臺灣的高壓研究。

結語

利用現代高壓鑽石砧及雷射加熱的技術，我們正在通往地心的旅途上，欣賞地球深處許多有趣的地球物理及化學現象。儘管目前我們對於地球內部的構造、動力學與演化歷史所知還很有限，但希望透過高溫高壓礦物物理的實驗結果，結合地球動力學模擬、理論與觀測地震學及地球化學等多學門的互補，能夠對於我們地球的過去、現在與未來有更進一步的認識。

圖一：對稱式高壓鑽石砧。約為一個手掌可以握住的體積。原理為使一對鑽石的尖端砧面互相擠壓，以產生高達數十萬至百萬倍大氣壓的高壓環境。在實驗室裡我們用他來模擬地球內部的高壓狀態，再搭配加熱技術，如同進行一趟地心之旅，一窺材料在地球內部的性質。



圖二：地球所高壓實驗室的超快光學系統。我們用超快雷射去激發及探測材料的熱聲子超快動力學行為，以量測熱傳導係數、縱波波速以及奈米尺度下的熱傳行為等。礦物材料於極端條件下的熱傳導係數對於地球內部的溫度分布、熱演化及地體動力學等皆有重要的影響。

參考文獻

[1] H. K. Mao and P. M. Bell, Science **191**, 851 (1976).

[2] H. K. Mao and P. M. Bell, Science **200**, 1145 (1978).

[3] A. Jayaraman, Rev. Mod. Phys. **55**, 65 (1983).

[4] L. Gao, Y. Y. Xue, F. Chen, Q. Xiong, R. L. Meng, D. Ramirez, C. W. Chu, J. H. Eggert, and H. K. Mao, Phys. Rev. B **50**, 4260 (1994).

[5] A. P. Drozdov, M. I. Eremets, I. A. Troyan, V. Ksenofontov, and S. I. Shylin, Nature **525**, 73 (2015).

[6] W.-P. Hsieh and F. Deschamps, J. Geophys. Res. **120**, 1697 (2015).

[7] W.-P. Hsieh, J. Appl. Phys. **117**, 235901 (2015).

[8] W.-P. Hsieh and Y. H. Chien, Sci. Rep. **5**, 8532 (2015).