

# 礦石之美者：自然世界的原始呼喚

吳育雅

臺大兼任助理教授級專業技術人員

## 前言

你曾在海邊撿過貝殼或在河岸注視到令你怦然心動的石頭嗎？生物學家愛德華·威爾森 (Edward Wilson) 指出，人類有一種天生與自然界連結的本能。石頭的紋理、貝殼的幾何結構，對大腦來說是極佳的感官刺激。無論我們是在路邊撿起一顆閃亮的石頭時，或是凝視在博物館透亮櫥窗展示的美麗晶體，都會啟動大腦中遠古的「發現」獎勵，活化我們的感官與想像。

## 臺中科博館的大地瑰寶常設展

2025 年 9 月在臺中科學博物館的大地瑰寶常設展開幕，幾個月來已吸引了無數的觀眾。這是一場超越 40 年的蒐藏，將近 1,800 件的標本，規劃布展花了 20 餘年，從礦物演化的角度，依序呈現太陽系誕生到生命大爆發之後，礦物花樣百出的華麗舞台。在展場中形形色色的礦石標本，令人歎為觀止 (圖 1)！吸引參觀民眾的，不僅是色彩奪目，或是具有獨特外形的晶體，隨著展場中的解說引導，深化對礦物晶體的認識，在櫥窗邊的瀏覽在不經意間便能促發一次次的怦然心動！

圖 1

大地瑰寶展場琳瑯滿目美不勝收的礦物蒐藏



我的目光被一抹藍色吸引而停下——那不是溫和的藍，而是一種鮮明、近乎刺眼的色彩。一塊含有稀土元素的礦物閃耀著變幻的色彩，一簇簇水矽鈳鈣石 (cavansite) 點綴在淺色的片沸石 (stilbite) 之上 (圖 2)，強烈的對比彷彿經過精心安排。藍色來自晶體結構中的鈳 (V4+) 元素，它的內層電子與光線互動，留下這種鮮明的色澤。由放射狀晶體組成的水矽鈳鈣石藍色小球，讓你非得在玻璃展示櫃前停下腳步、微微靠近凝視，隨著腳步的移動，光線改變，晶體也隨之閃耀。

圖 2

艷藍的水矽鈳鈣石點綴在淺色的片沸石上



這塊標本源自印度，在霸王龍稱霸的末期，德干高原上大規模溢流的玄武岩冷卻，熔岩流留下了大大小小的孔洞，之後岩漿末期富含礦物的熱液溫度下降，多種金屬陽離子與大量水流過此地，慢條斯理在安靜的孔洞中緩慢結晶，無數細小的薄片細緻規律堆疊出了片沸石。在已經長好的片沸石晶體表面，點綴著呈放射狀小球的藍色水矽鈳鈣石。

這意味著水矽鈳鈣石是「後到者」，是在熱液活動的最後階段，片沸石鋪好了舞台，流過此地的水溶液變得非常純淨且鈳元素剛好達到飽和，水矽鈳鈣石出現了，也說明了當時晶洞內的氧化還原電位被精準地鎖定在一個極窄的區間內，因為 V4+ 是一種不穩定的狀態，如果環境氧氣太多，鈳會變成五價；如果氧氣太少，則可能變成三價。這樣歷經數百萬年成長出來的結晶，有如該地區環境變遷的時間膠囊，如今正優雅地被封存在科博館展示櫥窗之內。

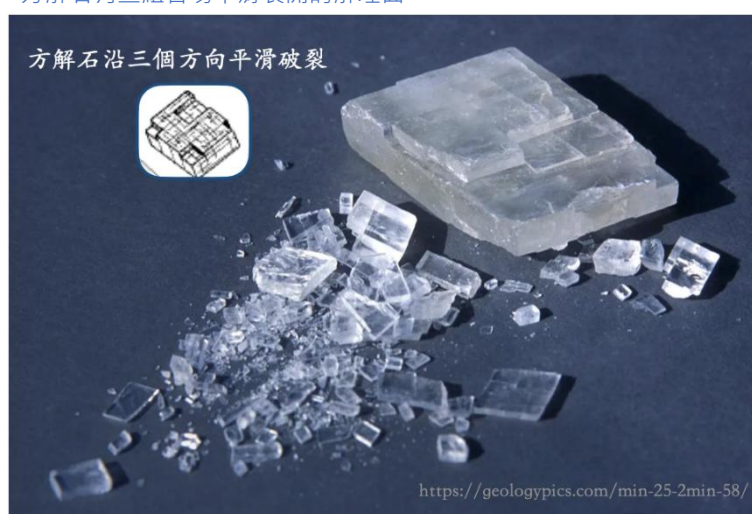
蒐藏自然珍奇在兩、三百年前歐洲的上流社會文化中，曾是一種高尚的流行。很多富商、銀行家熱衷於收集自然界中各種形色礦石，當時的啟蒙運動讓知識成為一種新的社會地位象徵。拉瓦節於 18 世紀末確立了現代化學命名的原則，19 世紀初礦物的分類便依據化學組成的陰離子 (或酸根) 區分為碳酸鹽、矽酸鹽類等。然而化學分類不足以解釋為何某些礦物總是能具有特殊結晶外形，也無法說明相同的化學成分，為何能有全

然不同的物理性質？正如遠古人類用來書寫的石墨既黑又軟滑，同是碳所構成的鑽石，卻是燦爛奪目且堅硬無比，石墨和鑽石組成相同，礦物外觀與物理特性卻有天壤之別？在沒有精密儀器看穿原子世界的時代，人類對礦物的認識是如何進展的呢？

## 發現礦物內在的獨特性

有一則傳聞是有關結晶學之父—法國神父阿維（René-Just Haüy）的意外，他在參觀朋友的收藏室時，不小心摔碎了一塊美麗的方解石。他驚訝地發現，碎掉的小石塊儘管變小了，但碎裂出的幾何形狀竟然和原本的大晶體一模一樣(圖 3)(Whitlock, 1918)。

圖 3  
方解石有三組容易平滑裂開的解理面



圖片來源：：  
<https://geologypics.com/min-25-2min-58/>

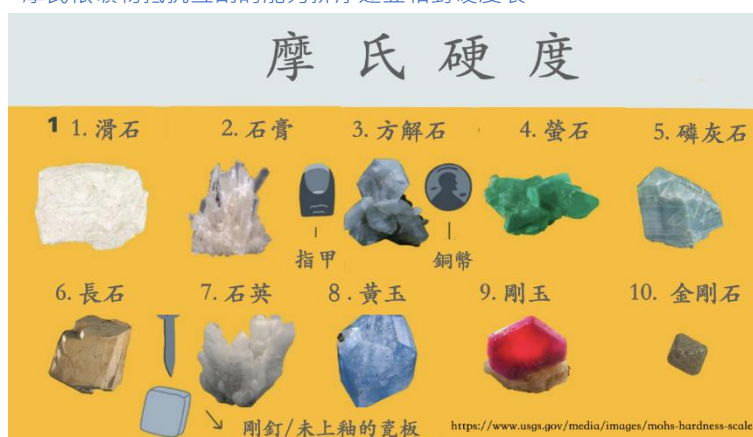
打碎方解石的神父並沒有讓自己停留在驚嘆或懊惱中，他開始了一系列的觀察，最終發現無論外觀多麼奇異，只要順著自然接合面（也就是解理面）切開，最後都會切成一個縮小的最基礎幾何形，「晶體是用一堆同樣大小的微小立方體來堆疊」是他用來解釋結晶很著名的類比。他在還沒有 X 射線、看不到原子的年代，就靠著邏輯推理預見了晶格 (lattice) 與 晶胞 (unit cell) 的存在。

礦物的硬度是一項重要的物理性質，這項發現的關鍵是從奧地利的一位銀行家雅各·范德努爾 (Jacob Friedrich van der Nüll) 的收藏開始，這些石頭來自世界各地，命名混亂。如果沒有專業人士鑑定，這些收藏只是一堆漂亮的石頭，因此他聘請了一位學術顧問弗里德里希·摩氏 (Friedrich Mohs) 來判斷礦物真偽、區分種類，甚至為蒐藏中新發現的礦物命名。

摩氏在德國大學有數理背景，又在弗萊貝格礦業學院師從「地質學之父」亞伯拉罕·

魏納 (Abraham Werner)，也曾擔任過採礦工程師。他不僅遵從雇主對蒐藏的整體要求，他個人堅信礦物也應該有一套像動植物一樣的「檢索表」，特別是他想到化學組成並不能說明這些礦物的行為，針對不同礦物抗拒外界力量的強度，他找來了當時已知的各種礦物，開始有系統進行成千上萬次的互刮測試，最終開發了一套連小學生都能操作的硬度計。他建立的原則是：如果 A 可以在 B 上留下刮痕，那麼 A 就比 B 硬。他挑選了 10 種在自然界中相對常見、性質穩定的礦物，將它們排列成從 1 到 10 的序列 (圖 4) (Oldroyd, 2002)。

圖 4  
摩氏依礦物抵抗互刮的能力排序建立相對硬度表



圖片來源：  
<https://www.usgs.gov/media/images/mohs-hardness-scale>

摩氏問：「為什麼這個礦物會被刮傷，那個不會？」這個故事告訴我們：偉大的科學發現往往不在於你看了多少新東西，而在於你是否能對習以為常的現象進行深度觀察。

## 工業革命與礦物的應用

19 世紀人類對礦物晶體有非常深刻的認識之後，礦物成了工業革命的推手。當時的海戰與測繪極度依賴望遠鏡，石英的化學成分是二氧化矽 ( $\text{SiO}_2$ )，不過天然砂子常含有微量鐵元素，如果鐵含量太高，玻璃會呈現深綠色或褐色，就像早期的啤酒瓶。為了消除雜質顏色，移除這些會吸收特定光波的金屬離子，石英砂變純才能讓玻璃變透明。

高品質的石英砂是製作高精密透鏡的關鍵，純石英砂的熔點高達  $1,713^\circ\text{C}$ ，百年前這是極難達成的高溫。為了降低熔點，工匠會加入蘇打  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  等助熔劑，打斷部分矽氧鍵結，讓熔點降到  $1,000^\circ\text{C}$  左右。如果冷卻速度夠快，溫度降到玻璃轉化溫度時黏滯力變得極大，原子動彈不得，就成為玻璃。雖然玻璃看起來是固體，但其內部原子排列依然保有液體的隨機性。這就是為什麼玻璃沒有固定的熔點，而是隨著加熱逐漸軟化，玻璃破碎時也沒有特定的解理面，而是呈現貝殼狀斷口。

進入 20 世紀，礦物應用的重心轉向了半導體。在量子力學出現前，人們很難解釋為什麼金屬礦物可以導電，而有的礦物如石英、雲母等是不導電的絕緣體。量子力學告訴我們，固體中的電子不是隨意運動的，它們只能待在特定的「能階」裡。礦物的導電性主要取決於其內部的化學鍵結方式，可類比為礦物內部的電子交通狀況：有的像高速公路（導體），有的則像佈滿路障的荒野高地（絕緣體）。絕緣體的電子能階差異太大，電子跳不過去。金屬的電子則像在空曠的「開放空間」，隨時都在跑來跑去，因而導電性極強。

半導體材料的性質是平時不導電，但只要給點能量（熱或光），電子就能跳過去。矽（silicon）在地殼中含量極多，要製成半導體，必須達到「九個九」（99.9999999%）的純度。在這樣的純度下，主動加入特定的原子（如磷或硼），亦即通常每一億個矽原子中，只加入一個雜質原子。將矽提煉到「極致的純」，才能確保隨後加入的那一點點「量子摻雜」，能精確地按照方程式計算出的結果來導電（Cahn, 2005）。在自然界，礦物原本多少含有其他雜質（元素），因此半導體被稱為人類「煉金術」的頂峰—創造出了自然界從未存在過的極致純淨。

## 稀土元素與傳奇的瑞典小鎮 Ytterby

到了二十一世紀，稀土元素成為國際博弈的關鍵，因為電動車、風力發電機和精準飛彈，都非要稀土不可。

釷（Yttrium, Y）、鉕（Terbium, Tb）、鉺（Erbium, Er）和鐿（Ytterbium, Yb）屬於稀土元素，這四個名字全都來自 Ytterby 這個字，一個瑞典小鎮的名字，這是個人口不到三千人的小鎮，名字卻永遠刻在週期表上。

故事始於 1787 年，一位名為阿倫尼烏斯（Carl Axel Arrhenius）的業餘礦物學家，在 Ytterby 的一座採石場發現了一種黑色、沉甸甸的奇怪石頭\*1。這種石頭後來被命名為「矽鉍釷礦」（gadolinite）。石頭長得一點都不起眼，看起來就像一塊焦黑的煤渣（圖 5）。在當時的分離技術不發達，最初在 1794 年只發現了「釷土」（Y）。科學家加多林（Johan Gadolin）第一次從礦石中分離出「釷土」時，他以為那是一種純物質（Kaczmarek, 1981）。直到 50 年之後，後輩科學家才發現「那裡面其實還有其他元素混在一起」：鉺（Er）和鉕（Tb），1878 年又分離出鐿（Yb）。因為這四個元素的離子半徑非常接近，它們很容易互相取代，一起擠進矽鉍釷礦的晶格位置裡。正因為它們性質太像了，人類花了近百年的時間才把它們徹底分清楚。

圖 5  
深邃漆黑墨綠色的矽鈹鈳礦



圖片來源：

<https://www.etsy.com/uk/listing/4431450451/>

稀土元素共有 17 種，除了釷 (Sc) 與 鈾 (Y)，在週期表上被稱為「鑷系」元素。它們的不可替代性源於它們獨特的電子層結構，稀土元素的電子填入的是內層 4f 軌域，最外層電子排列幾乎一樣，這使得它們擁有許多未成對電子。4f 電子是原子家族裡的孤僻怪咖，像是一群隱居在地下室的頂級科技宅，或是躲在深山裡的世外鬼才。表面上看來毫無動靜，可一旦被外界的能量喚醒，就能展現出點亮雷射、拉動巨磁的絕世武功。稀土被稱為「工業維他命」—只需加一點，就能讓產品變得輕、薄、短、小且高效能。如果沒有稀土電子一致的自旋方向，產生了極強的磁矩，馬達要達到同樣的功率，體積可能會大上好幾倍。

雖然它們被稱為「稀」土，但其實在地球並不稀少，真正的問題在於開採與提煉極其困難。在自然界中，這 17 種元素總是混居在同一塊礦石裡，就像 17 個長得一模一樣的孿生兄弟。因而要將它們一個個分開，必須經過數百次甚至數千次的溶劑萃取。鈳讓電視機顯示出鮮豔的紅色；鈹讓你的手機螢幕具備觸控感應與發光功能；鈳變成了海底電纜的雷射放大器，讓你現在能跨海連上網路。當時只是為了採集做瓷盤的長石，在這座採石場挖石頭，但因為有人多看了一眼那塊「黑色石」，人類才拿到了進入現代電子文明的鑰匙。

## 礦物演化論的新觀點

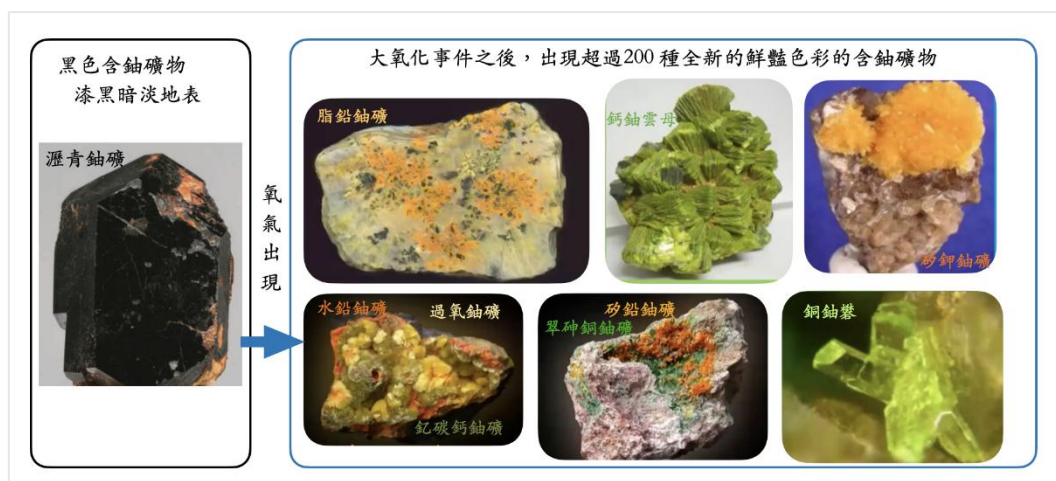
二十世紀的礦物學是根據化學組成分類，描述晶體結構的靜態科學。在這個知識架構中，礦物學與生物學、地質學相對脫節。然而礦物是地質幽冥歷史最忠實的紀錄者，每種自然礦物都標記了一個特定的時間點與成因。近年來羅伯特·海森 (Robert Hazen) 提出礦物演化的觀點，引入了生物學中的「多樣性」與「演化時間線」。他發現地球上目

前 6,000 多種礦物，並非一開始就存在，而是隨著行星演化分階段出現的。在這樣的系統思維下研究礦物，他指出 6,000 多種礦物中，有超過三分之二是直接或間接由生命活動（如大氧化事件）創造的。

海森是卡內基科學研究所 (Carnegie Institution for Science) 的高級研究員，受過哈佛大學與研究所地質學專業訓練，並在英國劍橋大學攻讀博士，專攻礦物物理學 (mineral physics)。2006 年他在一場聖誕派對上的閒聊，被一個問題問倒了。長期以來，黏土礦物一直被認為對早期微生物的有機分子很重要，那晚理論生物學家 哈羅德·莫羅維茨 (Harold Morowitz) 突然問他一個看似基礎卻從沒人問過的問題：「冥古宙 (40 億年前) 的地球上黏土礦物嗎？」(Mann, A., 2017)，海森當時愣住了。他意識到傳統礦物學只關心礦物的晶體結構，卻從未有人系統性地思考過礦物在時間長河中是如何出現與改變的。這次對話讓海森徹夜難眠，他開始意識到，如果生物會演化，那麼作為生命舞台的礦物，必然也有一套與行星共同進展的歷史。

舉例來說，瀝青鈾礦 (uraninite,  $UO_2$ ) 是最重要的鈾礦物，在地球的大氧化事件 (GOE, 25 億年) 之前，地球上的鈾主要以 ( $U^{4+}$ ) 的形式存在 (Hazen et al., 2009)，它非常「宅」，不喜歡水，極難溶解。它就一直待在原地，即使岩石風化了，也只是變成碎屑隨波逐流。當氧氣出現，鈾被氧化成 ( $U^{6+}$ )，它會與兩個氧原子結合形成鈾醯離子 ( $UO_2$ )  $^{2+}$ 。鈾醯離子非常「外向」，極易溶於水，當光合作用生物開始排放氧氣，地表水和地下水變成了氧化性流體。這些水流過含有瀝青鈾礦的岩石時，把固體的  $U^{4+}$  氧化成可溶的 ( $UO_2$ )  $^{2+}$  帶走，這意味著原本被鎖死的鈾，突然獲得了地表通行證，可以隨水流動。 $(UO_2)$   $^{2+}$  非常活潑，它能與磷酸根、砷酸根、釩酸根、碳酸根或硫酸根結合，因為這種強大的結合能力，一下子創造出了超過 200 種全新的礦物種類。這些礦物通常具有極其鮮豔的螢光黃、亮綠色或橙色，與早期地球暗淡的黑色、灰色礦物形成鮮明對比。可以說氧氣大量出現後，礦物的大爆發讓暗沈的地表塗抹上妝，變成了豔麗多彩的世界 (圖 6) ！

圖 6  
地球氧氣大量出現後，含鈾礦物的大爆發



圖片來源：

<https://www.youtube.com/watch?v=Lzv-NwF1DNE>

海森整合行星科學以及大氣與環境科學，將礦物學從單純的研究「它是什麼」轉向研究「它在行星演化中扮演什麼角色」。透過 21 世紀強大的計算機模擬與數據庫，拼湊出跨越 45 億年的礦物演化全景圖 (Hazen et al., 2022)。海森擁有長達 40 年的專業小號手生涯，這種對交響樂宏觀敘事的掌握，可能影響了他看待科學的方式—不把礦物視為孤立的標本，而是將其視為與生物、地質、大氣共同演奏的一場地球交響曲。

## 後記

礦物有耐人尋味的美，可以從晶體結構感受到極致的秩序感，晶體那橫平豎直、幾何對稱的線條，展現了一種永恆且不容懷疑的確定性。我們讚嘆礦物的色彩時，不妨感謝那群在微觀世界裡不斷跳躍的電子，他們藉能量轉換帶出華麗色彩！礦物也是地球的「記憶載體」，它在某個特定的地質年代結晶，便將那一刻的溫度、壓力、化學條件甚至是古氣候的線索，像拍照一樣永遠封存在晶格之中。地球物質不會真正消失，一切只是在不斷地轉換型態，並留下與地球環境變遷交會的可見形態。這些深刻的體會隨著櫥窗玻璃的反光閃爍，內心不免浮現一種靜謐而滿足的喜悅。當大地瑰寶閉館時間已到，終於必須轉身離去時，我忍不住告訴自己還會再來，期待開啟另一場與礦物無聲而理解的交會。

## 參考文獻

- Cahn, R. W. (2005). Silicon: A child of revolution. *The Electrochemical Society Interface*, 14(1), 15–16.
- Hazen, R. M., Ewing, R. C., & Sverjensky, D. A. (2009). Evolution of uranium and thorium minerals. *American Mineralogist*, 94(10), 1293–1311.  
<https://doi.org/10.2138/am.2009.3208>
- Hazen, R. M., Morrison, S. M., & Downs, R. T. (2022). On the paragenetic modes of minerals: A mineral evolution perspective. *American Mineralogist*, 107(7), 1262–1287. <https://doi.org/10.2138/am-2022-8099>
- Kaczmarek, J. (1981). Discovery and commercial separations. In K. A. Gschneidner Jr. (Ed.), *Industrial applications of rare earth elements* (pp. 135–165). American Chemical Society. <https://doi.org/10.1021/bk-1981-0164.ch008>
- Mann, A. (2017, October 31). *What mineral evolution tells us about life on Earth — and beyond*. Medium. <https://medium.com/@adammann930/what-mineral-evolution-tells-us-about-life-on-earth-and-beyond-7d9be193ea30>
- Oldroyd, D. (2002). Friedrich Mohs and the historical background of his hardness scale. *Earth Sciences History*, 21(2), 140–155.  
<https://doi.org/10.17704/eshi.21.2.v2427r761l885542>
- Whitlock, H. P. (1918). René-Just Haüy and his influence. *The American Mineralogist*, 3(6), 92–98. [https://msaweb.org/AmMin/AM3/AM3\\_92.pdf](https://msaweb.org/AmMin/AM3/AM3_92.pdf)

