

地球科學疑難問題討論

李春生 傅學海
國立臺灣師範大學地球科學系

省立新竹高中舉辦地球科學教學演示活動時，參加教師所提出的疑難問題如下：

1. 為何核融合至鐵後，即不再放熱而改為吸熱？

答：這與在所有元素當中，鐵之核反應，原子核單位有效截面積具有最大的束縛能有關（圖 1），束縛能指的是將原子核緊縮成一團所需的能量。從具束縛能低的元素藉核融合形成具束縛能高的重元素，譬如 ${}^2\text{H} \rightarrow {}^4\text{He}$ ，或 Mg 到 $\text{S} \rightarrow {}^{56}\text{Fe}$ 都會釋出能量，故為放熱。反之束縛能高的元素藉核融合形成具束縛能低的元素，不會釋出能量，且反而成為吸熱。鐵既是具束縛能最高的元素，所以即使再藉核融合形成比鐵重的元素，但後者之束縛能均比鐵低（圖 1），故在鐵之後都改為吸熱而非放熱。

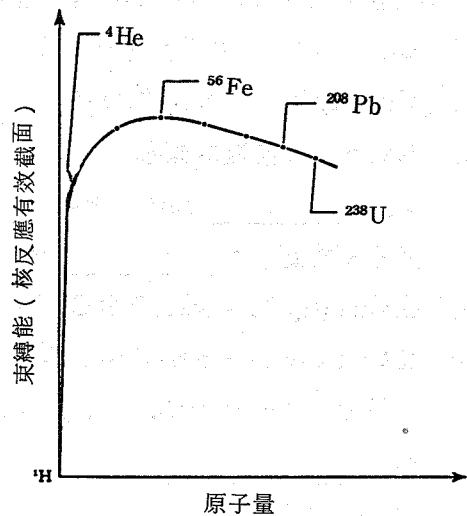


圖 1 各種元素原子核核反應有效截面束縛能分布曲線圖，其中鐵之束縛能為所有元素中之最高者， ${}^4\text{He}$ 之束縛能大約為鐵的 $7/8$ 。

當然用 $E = mc^2$ 的公式也可以解釋 ${}^2\text{H} \rightarrow {}^4\text{He}$ 為何放熱？

由於 4 個 H 原子核質量 = 6.696×10^{-24} 克

1 個 He 原子核質量 = 6.648×10^{-24} 克

所以經過一連串核反應後，耗掉四個氫原子核合成一個氦原子核，損失了 0.048×10^{-24} 克的質量，即一個氦原子核之質量比四個氫原子核少了千分之七，可以製造出 1×10^{-12} 爾格的能量。1 克的氫融合成氦，約產生有 1.5×10^{11} 卡的能量。

2. 一個輻射黑體如何判斷其發出之光線為反射之光線或本身輻射之光線？

答：黑體本身會發出輻射，但不反射光，即所有照射在黑體的光線都會被吸收，不會被反射，所以黑體所發出的光線就是它本身所發出的。

3. 紅巨星膨脹之原因為何？

答：恆星在演化末期時

- (1) 核心區收縮，將重力位能轉化為熱能，加上氫融合反應，較多的熱往外傳輸而膨脹成紅巨星。
- (2) 核心區溫度高達攝氏一億度時，產生氦融合反應（參考表 1）放出更多的光與熱，而膨脹成紅巨星。

表 1 各種核融合所需的點燃溫度

作用名稱	燃 料	產 物	所需點燃溫度*
氫融合	氫	氦	$10 \times 10^6 \text{ K}$
氦融合	氦	碳、氧	$100 \times 10^6 \text{ K}$
碳融合	碳	氧、氖、鈉、鎂	$800 \times 10^6 \text{ K}$
氖融合	氖	氧、鎂	$1500 \times 10^6 \text{ K}$
氧融合	氧	鎂至硫	$2500 \times 10^6 \text{ K}$
矽融合	鎂至硫	接近鐵的元素	$3000 \times 10^6 \text{ K}$

* 上述溫度指一般性的星體。但點燃溫度與密度有關，例如質量較重為 15 個太陽之星體，氫融合需 $60 \times 10^6 \text{ K}$ ，氦融合需 $200 \times 10^6 \text{ K}$ ，碳融合需 $800 \sim 1000 \times 10^6 \text{ K}$ ，其餘的融合則大致與一般的點燃溫度相近。

4. 宇宙膨脹時剛開始密度大，速度快，後來密度小，速度反而慢，是否有矛盾？

答：沒有矛盾。因為宇宙的總質量是固定的，體積小則密度大，宇宙膨脹體積增加，密度就減小。

宇宙在最初膨脹時，宇宙四種作用力：重力、電磁力、強作用力與弱作用力，彼此不分軒輊。宇宙膨脹 10^{-43} 秒後，重力才解脫出來單獨作用，這時重力才對膨脹的物質有所牽制，因此隨著宇宙膨脹，密度降低，膨脹速度也被重力牽引而變慢。

5. 星球真正之顏色與我們見到的顏色是否不同？可否證明？

答：星球的顏色與我們所見到的顏色均相同，可用光譜分析加以證明。

不過(一)由於天體雖然發光，仍然非常暗，人眼在光線不足條件下，只能分辨紅、橙、黃、藍等色，所以二者有出入。

此外(二)目前天文觀測常使用紫外線、紅外線、無線電波等非可見光波段，常用電腦軟體依強度來著色，新製造的顏色都是人爲的。

6. 在都卜勒效應的偏移量中，不同波長之差值皆不同，在計算時應以何種爲標準。

答：所有光譜線（不同波長）都須考慮，最後取其平均值。

$$\text{例如有兩波長 } \lambda_1 \text{ 與 } \lambda_2 \quad \frac{V}{C} = \frac{\Delta \lambda_1}{\lambda_1} = \frac{\Delta \lambda_2}{\lambda_2}$$

因其波長偏移量與對應波長的比值是定值。

7. 地磁爲何會倒轉？倒轉過程是漸進或直接變換而成？

答：目前理論爲發電機制理論（dynamo theory）來解釋地磁倒轉，（可參考1993年2月號科學月刊「變化萬千的太陽」一文），而倒轉過程是漸進的。同時你也可以參看高中地球科學教師手冊（2）第30-45頁。其中圖2-7之（C）的裝置，大家相信就可產生一個反向的磁場。

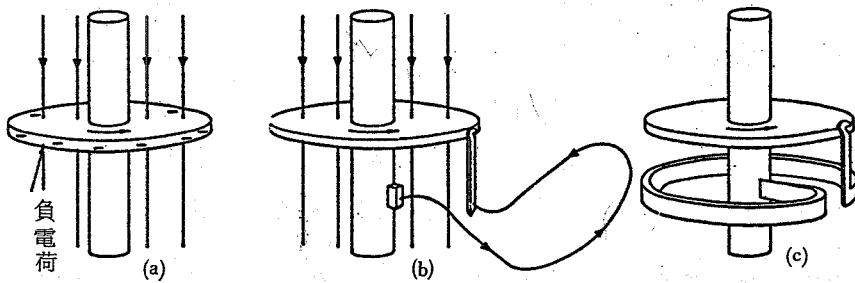


圖 2-7 (a) 圓盤在磁場中旋轉，沒有電流產生。
(b) 外部電路使電流得以流動。
(c) 電流產生一磁場且形成一個能自行維持之發磁機。

該教師手冊之 P.31-32，有關圖 2-7 之說明摘錄如下：

首先我們看一簡單的例子，圖 2-7 (a) 所示爲一圓盤在一垂直於其軸的磁場中旋轉，圓盤的每一半徑切過磁場，而在軸與圓盤邊緣間產生一電動勢。因沒有地方可讓電荷流動，故此電動勢無法產生電流，但它使得負電荷集中在圓盤邊緣。若如圖 2-7 (b) 所示，以電刷連接圓盤邊緣及轉軸，形成外電路，則有電流產生；此電流會在電路附近產生一磁場，這就是一個發磁機，它能產生電流及磁場，但它需要一外加磁場才能工作。若如圖 2-7 (c) 所示，在一弱磁場中，連接電刷的外電路是由一與旋轉軸同軸的線圈組成，則維持轉動圓盤電動勢所需的磁場可由發磁機自身供應，當圓盤轉動得夠快時，就能產生磁場，而成爲一個能自我維持的發磁機。若圓盤轉速太慢，則不能產生足夠的電流以維持磁場之存在，發磁機也就無法持續工作。反

之，若圓盤轉速太快，電流與磁場將無限制增加。在此兩者之間的某一臨界速度，可產生一穩定的電流與磁場。事實上，圓盤轉速太快而產生無限大電流的情形是不會發生的，因使圓盤轉動所需之力偶矩，亦隨著磁場的增加而無限的增加。

在圖 2-7 (c) 中，若電流與磁場同時反向，發磁機仍能照常工作；亦即一發磁機可在一方向產生一磁場，也可在相反方向產生一類似的磁場。但若速度方向相反（即轉動方向相反），則將產生一與原有磁場方向相反的磁場，致使發磁機不能繼續工作。因此，要發磁機能工作，圓盤的轉動方向必須正確，但它能在平行於轉軸兩方向中的任一方向產生磁場。以電腦分析證明兩個像這樣的發磁機若適當地耦合，則其產生的磁場可自然反向。

對於地磁倒轉過程是漸進的說明也可參考該教師手冊之第 41-45 頁。現僅摘錄有關的文字及圖 2-20 如下：

從圖 2-20 中我們立即可看出地磁場正反向週期的長短不一，短者僅約一萬年，長者可達數百萬年。若將此時間表延伸至古生代，則更增加其不規則性，例如已知在二疊紀內（Permian，涵蓋約五千萬年的時間），地磁場的方向未曾改變。

地磁場極性改變最短需要多少時間呢？有人估計僅在 2,000 年的短時間內，地磁場的方向就可完全反向。至於其改變的方式究竟是磁軸突然一下子旋轉 180° 或是磁場強度逐步衰減到零，然後又漸漸增強至相反方向的磁場呢？這個問題可自一系列含有反向磁場的岩石磁化強度測定而獲得解答。雖然在非洲、日本及其他地區熔岩流的古地磁測定，顯示地磁場強度並未減至零，但降至僅正常值的

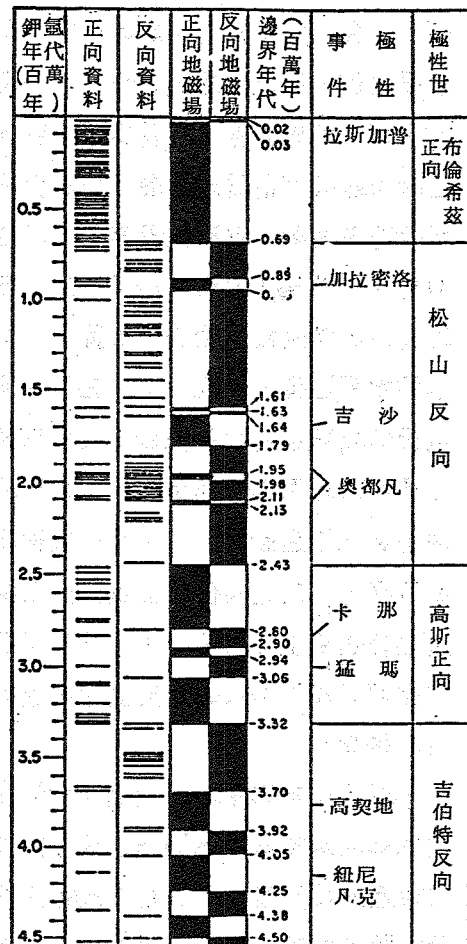


圖 2-20 過去 4.5m.y. 的古地磁性時間表，黑色表正向地磁場。

20~40%，但有人解釋此乃因在地磁場極性改變時，非偶極磁場部分並未消失，岩石乃在當地的非偶極磁場中磁化。故在地磁場變成相反方向前，偶極磁場部分仍舊會衰減到零；此即主張磁軸突然旋轉180°之說不成立。

8. 軟流圈與海溝間隔很遠，其熱對流如何循環？

答：不知你指的是海溝與軟流圈之垂直距離相隔很遠，或者是海溝處與中洋脊處二者之水平距離相隔很遠。只要相信有熱對流，那麼板塊像躺在熱對流驅動的輸送帶上，不管相距有多遠，都可以隨著輸送帶之運動而運動。一般認為輸送帶就座落在軟流圈上。有關熱對流之說法詳見以下之說明：

板塊構造學說的精義，可以簡單的分為二項：(1)地球表面具有由大（主要）、小（次要）板塊拼合而成的構造：傳統上固體地球的層圈狀構造除了可以從內至外分為地核、地函及地殼之外，在上部地函處，有些物質部份熔融，因此性質軟化，具有極佳的流動性，特稱為軟流圈。軟流圈之外的固體地球層圈，即包括最上部的地函和地殼則稱為岩石圈。岩石圈因具剛性，受力後易碎裂成大、小不等的板塊。(2)板塊會運動：軟流圈及其下方的地函物質受到地核的加熱後，各處的溫度無法維持均一，於是在溫度較冷的地方，密度較周圍大，會慢慢下沉；反之，在溫度較熱的地方因密度較周圍小，故獲得浮力，慢慢上升。一升一降的區域間，若配合上合適的水平運動，一在上，一在下，便可構成單一的熱對流循環圈。許多單一的熱對流循環圈經過巧妙的組合，便形成像圖2所示的地函熱循環現象。在熱循環中的上層水平運動軌跡，一般認為就落在軟流圈上。於是剛性的板塊頗像工廠內擺在輸送帶上的元件，可以自己不運動，但會順著輸送帶式的軟流圈運動之方向向前移動。

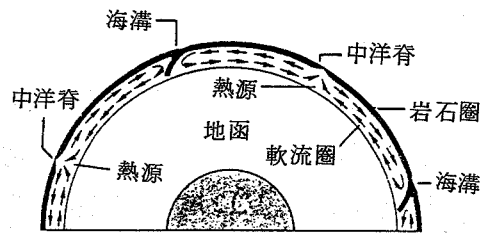


圖2 地函熱對流循環示意圖

以中洋脊為界的二板塊，受到底下兩相鄰地函熱對流圈均作上升運動和軟流圈輸送帶擴張式移動的影響，將產生張裂式相互分離的運動，於是洋底隨之擴張，位在板塊上層的大陸也會跟著漂流。同時分離所產生的裂隙很快的為湧出的地函熾熱熔融物質，即玄武岩質的岩漿填補。於是在中洋脊的斷裂口上有玄武岩的火山噴發活動，噴出的玄武岩熔岩流及底下的玄武岩質侵入火成岩體，一旦冷卻，就可形成新的海洋地殼。這可合理解釋(1)新洋底

爲何隨著擴張不斷生成，而(2)擴張運動爲何又常與包括火山噴發及岩漿侵入等各種火成活動共生。火山活動的結果，當然造成了洋底在中洋脊處存在著綿延幾萬公里的海底山脈。

因爲地球的岩石圈是一個封閉的層圈，所以二擴張的板塊不能無限制的擴張，當一個從中洋脊處起算，正擴張中的板塊，它遠離中洋脊的一端碰撞到另一板塊時，此時的板塊運動就轉換成聚合式的板塊碰撞運動了。具海洋地殼的板塊（俗稱海洋板塊）如果碰撞上具大陸地殼的板塊（俗稱大陸板塊），由於海洋板塊較大陸板塊重，所以海洋板塊會傾斜的沉入大陸板塊之下或地函之中，這個傾斜的界面稱隱沒帶。隱沒帶與洋底交界處即爲「海溝」所在。板塊隱沒進入地函內，受熱後，熔融形成岩漿。岩漿上升到地表外藉火山噴發活動可噴出熔岩，冷卻後形成火成岩；若在地下冷卻則形成深成岩。只是聚合式板塊處的火成岩，由於原本海洋地殼熔融後應該以玄武岩質爲主的岩漿，但在混合了許多大陸性的沉積物或大陸地殼物質後，將產生較富於矽質的安山岩質的岩漿，甚至更富矽質的花崗岩質的岩漿。安山岩質岩漿的不斷噴發，常造成弧狀火山列島，一般稱爲島弧，故構成島弧的火山岩以安山岩爲主。

9. 碎浪形成之原因爲何？

答：碎浪亦稱破浪。有關破浪之說明可參看何春蓀（民國78年）「普通地質學」第373-376頁，五南圖書公司出版，現摘錄該段內容，提供參考。

當波浪從遠洋推進到海濱的時候，因爲水的深度逐漸變淺，波底遇到海底的阻力而速度變慢，原來在波浪中呈圓周狀轉動的水分子慢慢變爲橢圓形，愈接近底部愈爲扁平，愈要和海底平行。

因爲接近海底有摩擦力拖拉，可以減低波能。這時波速開始降低，但是由海中接踵而來的快速波浪仍舊不斷向海岸推進，這樣就使波長減小。由於波長的縮短和波速的減低，乃形成波高的不斷增加。其後波浪愈變愈陡而逐漸出現不安定的現象，最後波浪的上端因爲變得太陡而且走得太快，同



圖 16-3 海水中的破浪 (Breaker) 和衝浪運動者。

時下面又缺少支持，使得波浪呈圓周狀轉動的波速超過了波浪本身的速度，波浪於是崩裂，波峯向前躍進而造成破浪（Breaker）（圖16-3）。在這個時候波浪的擺動波變為移動波（Waves of Translation），水就開始向海濱移進。在單純而均勻的波浪中，破浪呈一條線，但是通常都有相當的寬度而成為一條破浪帶。破浪帶的最外緣就是海濱帶和濱外帶的分界處，也是海濱的最外界線。

在破浪發生的時候，波浪中水的運動呈亂流狀的漩動，好像一般河流中的水流一樣，在破浪線以內以高速度向海岸衝進，這就是衝浪帶（Surf Zone），其中較靠近陸地的亦可稱為掃浪帶（Swash Zone），它們都成為海岸侵蝕和搬運作用的主要營力，見圖16-4，沿岸流（Longshore Current）亦發生在本帶之內。衝浪呈亂流狀沿著向海傾斜的海灘上衝，同時以懸浮或拖拉方式向前搬運沉積物，直到能量全部消耗時為止；於是上衝的水再流回海洋中去，造成底流（Undertow）。衝浪帶的寬度由海灘的坡度和潮汐來決定，坡度平緩而由細砂組成的海灘常常有比較寬廣的衝浪帶；坡度陡急而大部分由粗礫造成的海灘很少具有衝浪帶，這種海灘也無法從事衝浪運動。此外在高潮時，多半缺少衝浪帶；但是在低潮時，因為波浪多在平坦的海灘剖面上活動，常有比較發達的衝浪帶。

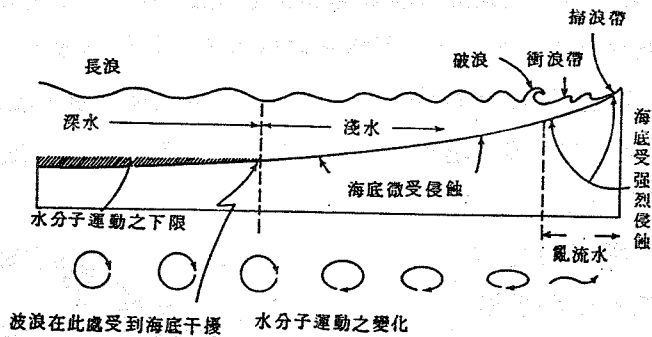


圖16-4 波浪所成的長浪、破浪、衝浪和掃浪。波浪的外形從深海進入淺海所發生的變形。

★