

穿越的地震波

怎麼會轉性了？

適用國中自然【八上】物質的基本結構

【穿越的地震波】 怎麼會轉性了？

最近在pansci天天問中看到一個提問：「科學家是如何測量S波在內地核的波速？」這個問題並不是我第一次聽到，而地球科學課本上會提供大家P波與S波波速的變化圖。只是就我們所知道，外地核是液態，S波無法穿透，而內地核又會有S波的波速，既然無法穿透，那為何又再度出現呢？的確，就文字邏輯上的判斷，是不容易理解的。身為一個鍵盤地球科學家，是有必要來認真回答一下。

其實，要認真的回答這個問題，我想最好先複習過往的國中理化，知道

【穿越的地震波】 怎麼會轉性了？

「波」的本質是什麼，就可以輕鬆的理解，為什麼S波會在內地核出現，而且還能知道S波傳遞的速度了。

猶記國中地科，我們學過兩種機械波的傳遞方式，那時是用聲音來舉例，分別為「縱波」與「橫波」，當時是以聲波作為縱波的例子，而橫波則用繩波來舉例。而有一點更重要的附註是「介質不隨波動傳播」，也就是不管波怎麼傳遞，往前跑的只有能量，沒有任何物質；我在這邊大喊，你在那邊接收到的只有我發出聲音的能量，並不是我這邊的空氣分子。同樣的道理，地震波在地球內部傳遞時亦同時有P波和S波兩種，P波的

【穿越的地震波】 怎麼會轉性了？

「波」的本質是什麼，就可以輕鬆的理解，為什麼S波會在內地核出現，而且還能知道S波傳遞的速度了。

猶記國中地科，我們學過兩種機械波的傳遞方式，那時是用聲音來舉例，分別為「縱波」與「橫波」，當時是以聲波作為縱波的例子，而橫波則用繩波來舉例。而有一點更重要的附註是「介質不隨波動傳播」，也就是不管波怎麼傳遞，往前跑的只有能量，沒有任何物質；我在這邊大喊，你在那邊接收到的只有我發出聲音的能量，並不是我這邊的空氣分子。

【穿越的地震波】 怎麼會轉性了？

同樣的道理，地震波在地球內部傳遞時亦同時有P波和S波兩種，P波的傳遞方式類似聲波，S波則有點像是繩波一般，介質的運動和行進方向相垂直，這裡說的「介質」，其實就是你我腳下的地殼、岩石。

好的，接下來國中生們會上到的就是光的折射與反射，在此，無論是P波與S波，很幸運的和光線一樣，遵循著「司乃爾定律(Snell's Law)」，入射角與折射角的關係，和介質的折射率有關，而對地殼中的岩石來說，岩石的種類就會影響波的速度，在界面上也會發生折

【穿越的地震波】 怎麼會轉性了？

射的現象。無論是P波和S波，從低速層到高速層時，就會偏離法線，反之則會偏向法線，從地殼到地核，除了軟流圈和外地核之外，大致上是越往內部密度越大，而波速也隨之增加，在經過地球剖面的各種地震波的波線，也是會呈現弧形的折射結果。

接下來我們要一口氣切入問題的核心，從地函到外地核，一直到內地核，地震波究竟是怎麼樣傳播與變化的呢？

首先是從地函到外地核，一般會認為外地核為液態的主要原因有二：

【穿越的地震波】 怎麼會轉性了？

其一是因為S波在地函—地核介面會完全反射，無法穿透。而另一個原因是因為P波經過外地核時，先偏向法線折射，因而造成在104度至140度間存在一個陰影區，記錄不到地震波。這是高中地科課本會寫到的內容，但課本上並未再深究另一個事實，也就是在在地核—內地核介面上發生的「波相轉變」，P波在遇上各種不同的介面都會有一部分轉成SV波，然而在外地核—內地核的邊界上，這個轉換波變的更加重要！

「等等，怎麼突然冒出什麼SV波的？」想必大家一定會這麼問，在P波

【穿越的地震波】 怎麼會轉性了？

遇上不同物質介面的時候，如果不是以90度角直射，多少在介面上的質點都會產生與S波相同的運動行為，而這樣的S波，又會依其與介面的關係，分成垂直於介面的SV波，和平行於介面的SH波，其中SH波的質點運動在通過介面後不會有任何的變化，但SV波則會和P波在介面上發生質點互換的行為，造成會有P波轉SV波、SV波轉P波的現象。因此「理論上」，P波在進入內地核後，會有一小部分轉為SV波，而通過內地核的SV波，想要再回到外地核，也無法直接出去，唯有部分由SV轉換成P的波動再度被傳出去，最後再回到地表的測站，這樣特殊的波傳路

【穿越的地震波】 怎麼會轉性了？

徑，學術上以PKJKP(註1)來命名其波相(註3)，然而從P轉SV再轉回P的能量衰減非常多，如何去量度與證明理論的正確性，仍然是地震學家們爭論的議題，從波動方程式與司乃爾定律上的推導，是可以證明這個波相存在，經由對大地震的分析，也有越來越多的資料能夠佐證(註2)。

最後，與大家再分享一個觀念，目前的鑽井技術，了不起10公里出頭而已，因此至今我們還沒有技術了解地底下數百至數千公里的實際狀況，僅能透過地震波來推測構造，以觀測到的隕石成份、實驗室裡進行高溫高壓的實驗來探討地球的內部情況，像是地核是鐵鎳等組成的也是經由

【穿越的地震波】 怎麼會轉性了？

對隕石分析、地球質量的估算、行星的成因、地球磁場的形成的眾多間接的證據拼湊而成，像最初提問「如何測出內地核中S波波速？」也是經過觀察波相、地震波的分析，並用已知的地球組成加以模擬，而得到的結果，這之中只要有一些新的研究出現，就有可能會改寫已知的教科書內容，相信許多編委教授前輩，或是在教學現場的老師們在編寫或設計課程也十分辛苦，要把以上這些知識加入高中地課的教材中，或許比在此撰寫這篇文章還要難的多！發揮最好 [網站](#) 遊戲。

【穿越的地震波】 怎麼會轉性了？

參考資料與延伸閱讀：

- 石油探採時的P波與P轉SV波的應用
- 美國地質調查所：地震儀
- 國立中正大學強地動實驗室：地震波概述
- 中央氣象局：地震百問

註1：早期對PKJKP的相關獻REVIEW

註2：PKJKP的觀察(by IRIS)

【穿越的地震波】 怎麼會轉性了？

註3：關於波相的命名(摘自「地球物理學概論」，中國地球物理學會編印，1998)：震體波的傳播路徑可經由波線的方式來表示。若我們將穿過地球的波線加以分類，並給予每個波線一個適當的代碼，對應於每一類波線的體波即稱為一個波相(Wave phase)，以該類對應之波線代碼命名。自震源往上傳遞的縱波和橫波，以 p, s 分別表示。在地函中往下而上傳遞的縱波和橫波分別以 P 和 S 表示；在外核中的縱波以 K 表示；在內核中的縱波和橫波分別以 I 和 J 來表示；在地函和外核之邊界上之反射點，以 c 表示；在內核和外核之邊界上之反射點，以 i 表示。