

以眼球追蹤法探究解決結構良好問題的認知歷程： 星體運動為例

陳怡君^{1、2、*} 楊芳瑩¹

¹國立臺灣師範大學 科學教育研究所

²國立臺灣大學 科技部人文社會科學研究中心

摘要

星體運動是天文教育的重要核心概念之一，但該概念複雜，學生常遭遇學習困難，教學上亦富有挑戰性。為此，本研究採用認知心理學中的專家生手典範，招募38位受過國民基本教育、擁有先備知識者為研究對象，以眼球追蹤技術輔以訪談，探究在解答「恆星與太陽視運動測驗」這類結構良好的問題時，高、低表現者的認知歷程差異，期許能對教學實務有所貢獻。研究發現：一、高表現者雖有展現向前思考的特徵，即會較費心地理解題幹敘述以形成問題表徵、較能確定正確答案，但也會彈性搭配「手段—目標分析」的廣泛型解題策略解題，以縮小目標範圍，更有效率地解答。二、在解答結構良好的單一選擇題時，高分組主要經歷「上而下」的認知歷程——能以所學知識辨識關鍵區域並解碼訊息，和激活解題所需的領域概念知識。因此，是由長期記憶知識結構的組織品質決定測驗表現，測驗表現與領域特定知識較有關。三、雖然在解題過程中，學生仍是以閱讀與理解文字為主，但相較於關鍵字詞、字句的資訊處理，高表現者在圖形關鍵區域的語義解碼需耗費較多心力，與花費較多凝視時間比例，這顯示圖片關鍵區域的概念理解較有難度。文末對未來相關研究提出建議，也討論了實務上包含教材設計與測驗評量等議題。

關鍵詞：天文教育、訊息處理理論、專家生手典範、眼動分析、結構良好的問題

壹、緒論

星體運動(celestial motion)無論在國內、外都是科學課程中的核心概念(big idea)之一(國家教育研究院, 2018; Plummer, 2014)，並且與晝夜、四季變化等重要的天文概念緊密相連(Lelliott & Rollnick, 2010; National Research Council, 2012)，彰顯了該主題的重

要性。但「星體的運動」非常複雜，因為它同時涉及空間思維(如心理旋轉、想像、不同視角之間的轉換——地球內部視角與宇宙觀看地球的視角)與許多的天文概念(如正午、夏至、仰角)。在實務上，其教學富有挑戰性，學生在學習上也常遭遇困難，並且即使在接受學校教育後，人們還是容易對相關概念抱持著誤解。基於「星體的運動」該主題的重

*通訊作者：陳怡君，chyichun@gmail.com

(投稿日期：民國109年2月29日，修訂日期：民國109年9月18日，接受日期：民國109年9月18日)

要性與教學難度頗高，本研究嘗試使用眼球追蹤法，以認知心理學中的專家生手典範，招募受過國民基本教育、擁有基本先備知識者為研究對象，探究在取材自歷屆基測與學測題庫的「恆星與太陽視運動測驗」中，高表現與低表現者之間的解題歷程差異，藉由比較不同表現者在解答這類結構良好問題時的認知歷程，輔以晤談資料，期許能提出以認知理論為基礎且有眼動實徵為證據的教學建議。依據研究目的，以下將以三個部分的文獻回顧，分別是「專家與生手差異」、「專家的訊息處理模式」與「運用眼球追蹤法探索認知歷程」介紹本研究的理論基礎與預期結果。

貳、文獻探討

一、專家與生手差異

比較專家與生手的差異，是認知心理學家在探討領域特定的問題解決時經常使用的一種方式，可以探討不同專業知能層級在問題解決方式上的不同，有助於研究者釐清問題解決的相關因素(Gagné, Yekovich, & Yekovich, 1993)。這類研究中，最為著名的是早期研究專家與生手棋手的研究，如Chase與Simon (1973)在研究中發現，當要求專家棋手記憶一盤沒有意義的棋局時，專家的記憶力並未比生手較佳，專家僅在記憶有意義的棋局時比生手優秀。後續持續針對棋手的研究或是在其他特定領域裡對專家、生手的比較，一再地顯示決定專家與生手的主要差異或是否成功解題的關鍵是在專業領域內的知識品質(Chi, Glaser, & Rees, 1982; Gobet & Simon, 1996; Vicente & de Groot, 1990)。Chi, Glaser與Farr (1988)在棋手的研究中發現，專家傾向在棋局中注意較為重要的勝棋關鍵，

而非其他不相干的細節(如棋子材質)，這證明了專業知識在問題解決中的主導作用。在問題解決歷程中，專家比生手花費更多時間在表徵問題上，以尋找問題中的關鍵訊息使之與自己長期記憶區的基模配合，進一步前向思考(thinking forward)地解決問題，生手雖未必被無關細節所吸引，但常以未知(如答案選項)、反向思考(thinking backward)的方式尋找可以利用的訊息(如題幹敘述) (Gagné et al.; Sternberg, 2009)。

綜合上述，專家與生手不同，專家會根據問題的結構而非表面的特徵或相似性發展問題表徵、花費較多時間在表徵問題、擁有豐富且組織良好的專業知識、傾向從已知訊息向前思考以尋求答案等。在專家與生手的研究中，對兩者的定義亦常採取「相對的觀點」：以一項特定領域知識測驗的作業表現來區分知識相對豐富、表現較佳者稱為(相對的)專家，而知識較缺乏、表現較差者為(相對的)生手(Chi, 2006)。本研究旨在比較在「恆星與太陽視運動測驗」這個領域特定問題中，高、低表現者的解題模式，因此預設高分組有上述這些專家的特徵。

二、專家的訊息處理模式

專家、生手之差異可由訊息處理理論(information processing theory)得到進一步解釋。訊息處理理論是認知心理學家在解讀人類認知行為時常仰賴的理論之一。在解決問題時，感官接收從外界刺激的訊息與從長期記憶提取有用的訊息，在工作記憶區有意識地處理後，將成果表現在認知作業上。由於專家在學習過程中已經將相關的知識組織(chunked)起來，成為品質良好的基模，供未來進一步提取(Anderson, 2009; Logan, 1988)，且相關技能業已自動化，因此相較於生手

能擁有較多的心智容量(或工作記憶空間)(Anderson)。

訊息處理的歷程可分為「上而下」(top-down)與「下而上」(bottom-up)兩種。人類的注意力天生傾向於受某些明顯的刺激(如突然的聲響、閃光或相對較鮮豔的顏色等)所影響，這類由外界事物的刺激吸引人類注意，並進而處理的歷程，稱為「下而上」的歷程。而「上而下」的歷程，意指人類主動從自己已知的知識系統判斷並選擇及處理外界的資訊(Gagné et al., 1993; Sternberg, 2009)。雖然人們對於事物的訊息處理不一定僅經歷其中一種歷程，而是可以二個歷程的交互作用(Sternberg)，但先前提到，專家因擁有組織良好的知識結構，於是在解決問題時，會較偏重「上而下」的歷程，傾向以「前向思考」的方式，提取儲存在長期記憶裡的知識的基模，加上問題本身提供的訊息建構問題表徵，繼而擴展問題解決路徑，最後透過適當且目標導向的策略選擇，進而有效地解決問題。於是，本研究假設高分組學生在解答結構完整、定義良好的領域特定問題時，是由「上而下」的認知歷程所主導，也就是說，解題會顯現「能注意與解讀與解決問題相關的關鍵訊息、能選擇性地注視與任務有關的關鍵資訊」的行為，且解題策略具「前向思考」與「目標導向」的特質，即經由已具備的知識來表徵問題以推得答案，而不是由選項提供的訊息逆推得答案。

三、運用眼球追蹤法探索認知歷程

傳統常用的探索認知歷程的方法為口語報告，以放聲思考法及回溯報告為例，前者的缺點是受試者必須在實驗進行過程，同時說出此時此刻正在想什麼，這會干擾受試者進行主要作業；而後者的缺點則是受試者

是事後回想的，即使是實驗的安排上已經儘量讓受試者立即報告以期許能有較小的遺忘程度，並同時呈現實驗當時的特定作業材料以供受試者集中注意力，但這樣的作法不完全等同是受試者在實驗當下時的認知歷程。採用「眼球追蹤技術」，能即時記錄受試者在進行某項作業時的視覺注意力，記錄的過程不會干擾到受試者，研究者可事後再藉由這些資料，推論受試者的認知過程(Rayner, 1998, 2009)。這項技術所記錄的眼動資料包含眼球掃視(saccade)狀況及凝視點(fixation)的位置與時間。凝視點指眼睛相對穩定地停留在某一個位置的狀態，而掃視則是指凝視點移動到下一個凝視點的快速眼球活動。根據心眼假設(eye-mind assumption)，凝視點代表正在處理該注視位置的訊息，而眼球在掃視(快速移動)的時候，則較少進行訊息的處理，主要是搜尋、選擇資訊位置(Just & Carpenter, 1980; Rayner)。

眼球追蹤技術除了廣泛地被應用在閱讀、場景的感知及視覺搜尋上(Rayner, 2009)，近年來，也逐漸被應用在各個不同的教育層面，如數位學習、程式理解、檢驗學科教材成效等(Alemdag & Cagiltay, 2018; Lai et al., 2013; Obaidallah, Al Haek, & Cheng, 2018)。也有相當多應用在問題解決的專家、生手差異之議題上，以驗證傳統口語方式(如放聲思考法)的研究成果(如Kaller, Rahm, Bolkenius, & Unterrainer, 2009; Kozhevnikov, Motes, & Hegarty, 2007)。這些研究發現成功與無法解決問題者；或專家與生手在眼球活動上的差異，證明的眼球活動與認知歷程有關。如Snow (1980)發現，成功解決摺紙問題者，眼球注視在題幹的時間比率較多，傾向直接選答，不再回頭看題幹，但失敗的受試者的注意力卻會在題幹與選項之間來回不停地對照，這與先前所述之專具有向前思

考的特徵相符。又例如，在專家棋手的眼動軌跡歷程上，研究發現專家棋手的視覺注視位置不在西洋棋的角色身上，而是角色與角色之間，這顯示專家棋手具有視覺跨度較大的特徵，並且對單一知覺訊息(一個凝視點)所提取的資訊較多、在有限區域裡的凝視點較少，以這些眼動上的證據推論專家的知識是組織過的(Reingold, Charness, Pomplun, & Stampe, 2001; Reingold, Charness, Schultetus, & Stampe, 2001)。另外，也有許多眼動研究證明，專家或成功解決問題者的視覺注意力傾向花費較多時間在注視與任務相關的資訊，並且閱讀與解題歷程較有邏輯性(如Grant & Spivey, 2002, 2003; Lin et al., 2016; Lowe, 1993, 1996; Tsai, Hou, Lai, Liu, & Yang, 2012; Yoon & Narayanan, 2004)。這些研究強調先備知識與長期記憶的知識品質會影響問題解決的歷程，並且能顯現在眼球活動的行為上。

由於科學概念常以圖片輔助說明，在探

討有圖片表徵的問題解決研究上，有些研究認為強調圖片中的視覺特徵，在影響眼球注視這些特徵後能增進受試者的問題解決成功率(Grant & Spivey, 2003; Groen & Noyes, 2010; Thomas & Lleras, 2007)，然而，也有研究證明領域特定知識才是在問題解決中引導眼球運動的主體(Canham & Hegarty, 2010; Hegarty, Canham, & Fabrikant, 2010)，並且證明，當問題很複雜的時候，僅僅強調圖片中的某些特徵無益受試者解決問題(Canham & Hegarty)。由於本研究所採用的測驗素材是較為複雜的領域特定問題，因此傾向支持「表現較佳者的解題歷程是上而下」是由儲存在長期記憶區已學習的知識驅動視覺注意力到與任務有關的訊息做資訊處理。

本研究所使用的眼動指標如表1所示，這將作為推論受試者認知歷程的依據。其中，「總凝視時間比例」為相對的指標。因為每個人作答速度不同，因此以「總凝視時

表1：眼動指標及相對應之認知行為

眼動指標(單位)	意義說明
第一次閱讀時間(秒)	眼球注意力第一次進入題幹區域至離開題幹之間的閱讀時間，顯示受試者初步理解題幹文意所需時間。
總凝視時間比例(%)	在整個任務所花費的時間裡，某區域所有「凝視時間總和」所占的比例。為「在某個區域中所有凝視時間的加總」除以「該題(頁面)所花費的所有時間(含非凝視時間)」，可顯示受試者在該區域「進行有意義的資訊處理」的時間比例。
凝視點個數(個)	(某區域內)凝視點個數的總和。個數越多代表越頻繁地檢視該區域的資訊，即該區域的資訊為問題解決所必須。
平均凝視時間(秒)	單一凝視點所停留的平均時間，為(某區域)中的「所有凝視時間總和」除以「所有凝視點個數」。能顯示解碼資訊時所耗費的心智努力。數值越大代表該區域需要耗費較多心力解讀，較為困難。
交互參照次數(次)	眼球注意力在不同區域之間交互對照的次數，顯示受試者在進行資訊的比較或整併。

資料來源：“A review of using eye-tracking technology in exploring learning from 2000 to 2012,” by M.-L. Lai, M.-J. Tsai, F.-Y. Yang, C.-Y. Hsu, T.-C. Liu, S. W.-Y. Lee, et al., 2013, *Educational Research Review*, 10, p. 93; “Eye movements in reading and information processing: 20 years of research,” by K. Rayner, 1998, *Psychological Bulletin*, 124(3), pp. 372-422; “The 35th Sir Frederick Bartlett Lecture: Eye movements and attention in reading, scene perception, and visual search,” by K. Rayner, 2009, *Quarterly Journal of Experimental Psychology*, 62(8), pp. 1457-1506.

間比例」——一個人在不同區域裡的眼球凝視總時間在整題(頁面)的比例——減少作答時間有個別差異的影響(Cohen, Cohen, West, & Aiken, 2003)，這也是眼動研究中常見的指標(Hegarty et al., 2010; Lai et al., 2013)。

參、研究問題與假設

研究素材取自歷屆基測與學測題庫的「恆星與太陽視運動測驗」，這類問題是結構完整、定義良好的領域特定問題。因此，根據上述文獻探討，本研究認為問題解決表現較佳者的解題行為主要是由「上而下」的認知歷程所主導，而非由知覺感官刺激所驅動。即是由儲存在長期記憶裡的既有知識導引視覺注意力選擇與任務有關的訊息，且解題策略是偏好「向前思考」——在表徵問題時花費較多時間，解題策略具目標導向，閱讀完題幹即能確定答案。研究將以眼球追蹤技術輔以訪談資料，來驗證這些假設。基於上述，提出3個研究問題與5個研究假設如下。

一、問題1：測驗解題表現與第一次閱讀題目的歷程有何關聯

高分組(測驗表現較佳者)因擁有組織良好的知識，在閱讀題目的過程中，應較能容易理解測驗問題，因此，假設1：解題表現與第一次閱讀(即初步處理資訊)的眼動指標有關，在時間上，高分組的第一次閱讀時間較低分組短。

二、問題2：測驗解題表現與解題認知歷程(就眼動型態而言)有何關聯

專家的解題特徵為：花費較多時間在表徵問題上、在使用解題策略上展現高正確性、傾向向前思考，因此，假設2a：高分組

會花費較多心力在題幹區域、在題幹區域的凝視點個數與總凝視時間及平均凝視時間較多、在題目敘述與選項之間的交互參照較少。假設2b：而在選項區域，高分組傾向在選擇答案之前已能決定唯一的正確答案，解題策略主要非以透過比較各個選項的差異來取得正確答案，因此，在選項區域的部分，相較於其他錯誤選項，高分組在正確答案的總凝視時間比例較高，且在正確答案的凝視點個數較多與平均凝視時間較長。

三、問題3：測驗解題表現與解題關鍵區域的判讀有何關聯

專家擁有豐富且組織良好的領域特定知識，在解答結構完整的領域特定問題時主要依賴上而下的思考歷程——能識別問題的內部結構，而非依據題目的表面特徵解題。因此，假設3a：在解題關鍵區域的辨識上，高分組較低分組能正確判讀並能清楚說明理由。假設3b：在解題關鍵區域的資訊處理方面，假設高分組會花費較多時間在這些關鍵區域。顯現在眼動的指標上，即在解題關鍵區域的總凝視時間較長且凝視點個數較多。

肆、研究方法

一、研究對象

眼動實驗在暑假中執行，透過網路徵求大學一年級的新鮮人、升二年級的學生，排除地球科學相關科系主修，力求文、理組(高中就讀的組別)且男、女各半。有效樣本為38人，受試者的性別與所屬類組分布狀況如表2所示。另外，邀請12位於公立高中任教地球科學的老師參與解題，晤談並分析教師的解題歷程後，其資料將用作確認試題的關鍵區域與關鍵區域解讀的正確答案標準(詳見「四、資料分析」小節)。

表2：受試者之性別及所屬類組分布表

性別	文組	理組	男、女性總數
男性	9	9	18
女性	10	10	20
文、理組總數	19	19	

註：n = 38。

二、研究工具

(一)恆星與太陽視運動測驗

「恆星視運動」指的是地球觀察者所觀察到的恆星運動。遙遠的恆星幾乎固定不動，在天球上有固定座標，但地球會自轉(周日運動)，於是地球上的觀察者可以觀察到恆星繞著天北極(或天南極)旋轉，該移動的路徑即稱為「恆星視軌跡」。不同緯度所觀察到的恆星仰角、升起及落下位置、與恆星視軌跡傾斜角度會有不同。而「太陽視運動」則較為複雜，還需要額外考慮太陽的位置每日會有不同，因為太陽離地球較近，在天球上的位置並非固定不動。地球繞著太陽公轉(周年運動)，但是地球的自轉軸並非與公轉軌道面(黃道面)垂直，而是與黃道面的垂直線夾23.5度，傾斜地繞著太陽公轉，於是太陽在天球中的位置一年中最北時在夏至(赤緯+23.5度)，最南時在冬至(赤緯-23.5度)。本研究的「恆星與太陽視運動測驗」取材於歷屆基測與學測題庫，共8題單選題，為標準化測驗(參見附錄)。測驗旨在測驗學生對恆星或太陽視運動的概念性理解。這類問題有明確的問題解決途徑，屬於結構性良好的問題(Sternberg, 2009)。

(二)眼動儀

研究使用faceLAB 5.0眼動儀。眼動儀的運作原理為以紅外線攝影的方式記錄眼球活動。此系統的採樣率為60赫茲，精確率小於0.5度。測驗材料的呈現及凝視點的定義是經

由GazeTracker 9.0軟體所執行。測驗素材每一題以一張圖片檔呈現在19吋的電腦螢幕上，解析度為1024 × 768。受試者一次作答一題並以電腦鍵盤選擇答案。依據Rayner (2009)，受試者在閱讀時的凝視點持續時間約在100毫秒與500毫秒之間，蔡介立、顏妙璇與汪勁安(2005)在中文閱讀者上亦發現類似結果，因此本研究採用100毫秒為一個凝視點的門檻。

(三)訪談

為瞭解受試者對解題關鍵區域的解讀，採取晤談法要求受試者描述在回答「恆星與太陽視運動測驗」時的解題歷程。問題如下：

- 1.針對這一題，請說出「從閱讀到選出答案」的所有流程是什麼？
- 2.文字或圖中解題的關鍵在哪裡？(若說不出來則指引先說文字，待受試者說完後再詢問圖片是否也有與解題有關的關鍵區域)
- 3.為什麼剛剛說的這些關鍵是解題的關鍵？它帶給你什麼資訊？跟你選擇的答案之間有什麼樣的連結？為什麼這些關鍵可以引導到你所選擇的答案？(可以畫圖輔助解釋)

三、實驗流程

每位學生需通過眼動儀器的校正後，才能開始進入眼動實驗。38位學生以小於1度的誤差通過FaceLAB 4.6眼動儀的校正後，在電腦上完成「恆星與太陽視運動測驗」，在此同時以眼動儀器記錄受試者的眼球軌跡。正式施測前，告訴每位受試者依自己的作答速度回答問題即可，每次回答1題，但一旦在鍵盤中輸出答案後就不能回頭更改，所以務必確認答案後再作答。測驗結束後進行訪談並以錄音筆記錄。所有流程包含眼動儀校正、測驗及訪談，依狀況不同，約耗時30分鐘至1個小時左右。

四、資料分析

(一)訪談資料分析

學生與教師樣本的訪談資料將依據「解題關鍵區域的辨識」與「該區域之所以為關鍵區域的理由」進行內容分析。首先分析教師樣本的資料，因為教師的分析結果將用作正確的判準，有以下2項用途：1.作為每項試題「解題關鍵區域判讀」的評分判準。2.作為測驗素材上劃分「解題關鍵區域」的依據，以供進一步分析眼動歷程與檢驗研究假設(細節詳見「(二)眼動資料分析」段落說明)。

「解題關鍵區域」被定義為「在解答出正確答案的過程『必須』注意到的區域」，換句話說，若沒有注視這些區域將無法正確解答。題幹的文字若僅是描述圖片的意義或解題的目的，即使這些文字在閱讀過程中很重要，有助於理解題意，但因為並非解題關鍵區域，將不被包括在內。由研究者(有國、高中地球科學任教經驗與教師證照)分析教師的口語資料，並與國、高中各1位正式地球科學教師討論後，在8個試題中，確定了解題關鍵區域共有13區。每題的關鍵區域及其之所以為關鍵區域的理由請參見附錄說明。這些經由教師回饋所制訂的關鍵區域劃分及其理由將作為正確答案的判準，每位學生的每一題解題過程的晤談資料將以此標準計分，以便將質性資料轉化為量化資料以利後續的統計分析，學生的回應必須與上述解題關鍵區域一致「且」能正確說明清楚理由者，才給予計分1分。未提及、部分一致，或未能說清楚者為0分，滿分13分。這項得分稱為「解題關鍵區域判讀表現」。

值得特別說明的是，在測驗第2題與第3題中，解題方式有2種，只要能正確辨識其中一種方式就算正確。類似地，第3題有2個解

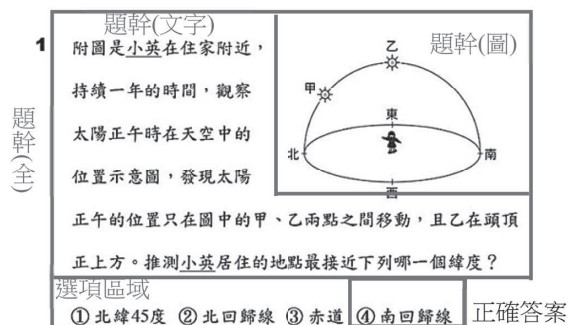
題關鍵區域分別屬於文字或圖片，但因所欲表達的資訊對等，只計算一次(參見附錄，即第3題的A、B區域，分別以文字敘述，或以圖片表徵「赤道上竿影最短」的語義，並隱含著「太陽此時直射赤道」的概念)。

(二)眼動資料分析

眼動資料龐大，在資料分析上，需依據研究問題將測驗素材劃分幾個與研究假設有關係的區域，稱作「感興趣區域」(Area of Interest, AOI)，以利分析該區域的眼動行為模式，並以此進一步推論不同學習表現者在解題時的認知過程與策略。每一題劃分的AOI區域有2類：「一般區域」與「特定區域」。如圖1所示，「一般區域」係根據單選題的題型架構所劃分，每題皆包含「題幹(全)」、「題幹(文字)」、「題幹(圖)」、「選項區域」與「正確答案」。而「特定區域」是依據分析教師晤談的資料所劃分，指的是「解題關鍵區域」。依據解題需求，「解題關鍵區域」每題各異，可能會在文字或圖片區，因此又可以進一步區分為「文字解題關鍵區」或「圖片解題關鍵區」兩種。

在「一般區域」的眼動資料分析上，所有數值皆是8題的平均數，舉例來說，「題幹的第一次閱讀時間」指的是受試者第一次閱讀8題題幹的平均，單位為秒。而在「特定區域」的眼動資料，則是指受試者「有注視該區域」(即有眼動資料)的平均數，是根據個別差異所計算。例如「解題關鍵區域的凝視點個數」指的是受試者有注視到的解題關鍵區域的凝視點個數平均。又因為第2題與第3題的解題方式有兩種，或有資訊對等的區域，在分析上是只取較大的數值(即注視較久或較多次檢視的區域)。隨後在研究結果與討論的呈現上，「一般區域」與「特定區域」將分開在不同節中報告。

一般區域AOI：「題幹(全)」、「題幹(文字)」、「題幹(圖)」、「選項區域」與「正確答案」



特定區域AOI：「解題關鍵區域」
(本題的解題關鍵區域只有在圖片區)

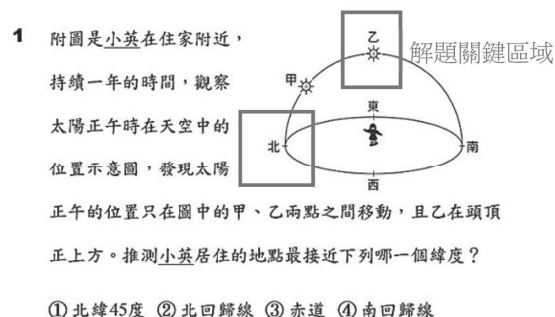


圖1：一般區域與特定區域「感興趣區域」(Area of Interest, AOI)的劃分：以測驗第1題為例

本研究採用SPSS 22.0統計軟體分析資料，以描述性統計呈現測驗表現，以獨立樣本 t 考驗比較高、低分組在關鍵區判讀與眼動各項指標上的差異，以推論關鍵區域判讀、眼動行為與測驗表現之間的關聯。

伍、結果與討論

一、「恆星與太陽視運動測驗」表現狀況

試題共8題，每題1分，總分8分。依據測驗平均成績將學生區分為高分組或低分組，以比較不同解題表現者的解題策略與注意力分布狀況。38位學生的平均成績為5.03分，標準差為1.99。高於平均成績，即得分在6分(含)以上者，為高分組，共16人。低分組為低於平均成績，5分以下者，共22人。各組的平均數及標準差請見表3。

二、早期閱讀歷程的眼動型態

假設1：高分組應能較快速理解題意，在早期閱讀歷程(即第一次閱讀)的相關眼動型態上會與低分組不同。 t 考驗分析結果顯示(參見表4)，雖然高分組第一次閱讀題幹時間的平

表3：在「恆星與太陽視運動測驗」表現中，高分組與低分組的人數、平均成績(標準差)

樣本(人數)	平均成績(標準差)
高分組(16人)	7.06 (0.68)
低分組(22人)	3.55 (1.10)

均值略小於低分組(7.75秒 < 8.80秒)，但二組未達顯著差異，這表示在解題時，高分組學生在第一次閱讀題幹的處理時間未必快速於低分組。

這項分析成果未與假設1符合，代表在這些已有基本先備知識的受試者中，在解題時的閱讀歷程很可能與一般文本閱讀不同。本研究的樣本為大學生，在解答這類選擇題測驗時，因有一定程度的閱讀能力，為求得唯一的正確答案，其主要任務並非理解題意，而是提取符合題目需求的所學知識後推理出答案。在所有測驗題目是「與視軌跡主題相關」的背景脈絡下，因為已知題目大約的用意，高分組未必在早期的閱讀時間上較短，其解題歷程並非由研究者先前預想的「先理解題意後再解題」這般有先後順序的過程，而很可能是在早期的閱讀歷程中已同步解題(一邊閱讀題幹、一邊解題)。

表4：高分組與低分組在「第一次閱讀歷程眼動指標」的平均數(標準差)、*t*考驗比較結果、效果量

眼動指標	高分組	低分組	<i>t</i>	Cohen's <i>d</i>
第一次閱讀時間(秒)	7.75 (3.25)	8.80 (6.07)	-0.63	N/A

註：N/A：不適用(Not Available)。

三、解題歷程的眼動型態

這部分的分析在回應問題2：「高分組應傾向『向前思考』——花費較多時間在處理問題表徵(即題幹)；較少時間在選項區域，相較於其他錯誤的答案，會在正確答案上停留較久」，因此，將分析題幹與選項的相關眼動指標，以檢驗假設2a與假設2b。首先，在整體的視覺注意力分布上，如表5所示，依據總凝視時間比例的數值可知，無論高分組或低分組，皆是題幹分配的時間多於選項。在題幹區域，則是在文字分配的時間比例多於圖片，顯示解題時的注意力分配仍是以文字區域的閱讀為主。第二，在高、低分組的比較上，在全部題幹區域與三項眼動指標中，只有平均凝視時間達顯著差異($p = .007$)，而與總凝視時間比例($p = .081$)與凝視點個數($p = .079$)僅達近似顯著差異。若進一步將題幹區分為圖片與文字區域，則亦只有平均凝視時間在高、低分組之間有顯著差異。以上分析顯示，高分組雖未必分配明顯較多的資訊處理時間比例(總凝視時間比例僅略高)與注意力在題幹區域(凝視點個數僅略多)，但會明顯地耗費較多心力(平均凝視時間較長)在解讀題幹，且無論是圖片或文字所提供的資訊上。第三，在整體選項區域，高分組僅在凝視點個數近似顯著高於低分組($p = .074$)，在總凝視時間比例($p = .289$)與平均凝視時間($p = .252$)則未達顯著差異。在正確答案的選項上，高分組在正確答案相對於所有選項的總凝視時間比例($p < .001$)、正確答案區域的平均凝視時間($p = .028$)與凝視點個數($p =$

.002)，皆顯著多於低分組。這表示，高分組雖未比低分組分配較多注意力時間比例，與未耗費較多心力在整體選項區域，但較會頻繁注視選項區域，尤其是在正確答案的選項上。相較於低分組，高分組能將注意力定錨在正確答案、較少猶豫其他錯誤答案，並會花費較多有意義的訊息處理時間與耗費較多的心力在正確答案上。至於在「題幹與選項交互參照次數」上，高、低組之間沒有顯著差異($p = .814$)，且高分組的平均值略大於低分組(13.18次 > 12.81次)，這與預期不同，代表無論測驗表現如何，學生的注意力皆會在題幹與選項間頻繁地轉移。

總結上述，整體而言學生解題時，在題幹，尤其是文字的區域分配最多時間。成績表現較佳者的解題歷程特徵為：會耗費較多心力在處理問題表徵上，藉以形成問題表徵，有利後續的選答。此外，在選答前即幾乎能確定答案，但也會藉由題幹與選項(尤其是正確答案的選項)之間來回比較的策略，來確認心中正確答案的適切性。

四、關鍵區域判讀

關於研究問題3，首先，在質性資料方面，如表6所示，高、低分組在「解題關鍵區域判讀」有顯著差異($p < .001$)。這表示，高分組顯著比低分組能正確辨識解題關鍵區域，與能解讀解題關鍵區域(在恆星與太陽視運動這主題上)所欲傳達的語義與其隱含的概念訊息。

表5：高分組與低分組在「一般區域眼動指標」的平均數(標準差)、*t*考驗比較結果、效果量

AOI	眼動指標	高分組	低分組	<i>t</i>	Cohen's <i>d</i>
題幹區域(全)	總凝視時間比例(%)	49.33 (5.66)	44.86 (9.63)	1.80	0.59
	平均凝視時間(秒)	0.222 (0.015)	0.208 (0.015)	2.85**	0.94
	凝視點個數(個)	173.86 (67.00)	139.73 (49.42)	1.81	0.59
題幹區域(圖)	總凝視時間比例(%)	15.05 (4.64)	13.07 (4.94)	1.25	N/A
	平均凝視時間(秒)	0.278 (0.042)	0.255 (0.037)	1.83	0.60
	凝視點個數(個)	43.82 (22.60)	34.75 (17.58)	1.39	N/A
題幹區域(文)	總凝視時間比例(%)	34.28 (6.52)	31.79 (7.41)	1.07	N/A
	平均凝視時間(秒)	0.205 (0.013)	0.194 (0.012)	2.79**	0.92
	凝視點個數(個)	99.52 (39.57)	82.95 (32.08)	1.43	N/A
選項區域(全)	總凝視時間比例(%)	13.48 (4.76)	11.97 (3.93)	1.08	N/A
	平均凝視時間(秒)	0.219 (0.021)	0.211 (0.023)	1.16	N/A
	凝視點個數(個)	33.96 (13.72)	26.54 (9.39)	1.87	0.61
選項區域(正確答案)	總凝視時間比例(%) (正確答案/所有選項)	30.06 (8.20)	21.37 (5.06)	4.04***	1.33
	平均凝視時間(秒)	0.208 (0.054)	0.172 (0.041)	2.30*	0.76
	凝視點個數(個)	11.32 (5.26)	6.20 (2.69)	3.57**	1.17
題幹與選項	交互參照次數(次)	13.18 (5.86)	12.81 (3.72)	0.24	N/A

註：1. AOI：感興趣區域(Area of Interest)；N/A：不適用(Not Available)。

2. * $p < .05$, ** $p < .01$, *** $p < .001$ 。

表6：高分組與低分組在「解題關鍵區域判讀」的平均數(標準差)、*t*考驗比較結果、效果量

評分判準	高分組	低分組	<i>t</i>	Cohen's <i>d</i>
解題關鍵區域判讀(13)	10.34 (2.63)	4.77 (2.72)	6.33*	2.08

註：* $p < .001$ 。

在眼動資料，如表7所示，高、低分組在全部與圖片關鍵區域的各項眼動指標皆達顯著差異($p < .05$)，但與文字的關鍵區域的眼動指標則皆未顯著($p > .10$)，表示高分組相較於低分組，尤其是在圖片的解題關鍵區域上，會分配較多的資訊處理時間比例(總凝視時間比例較多)與較多的注意力(較多的凝視點個數)。且因平均凝視時間亦顯著較長，這代表高分組在解題歷程上會較費心解碼(圖片)關鍵區域。在天文測驗的解題情境下，係指高分組會花費較多心力提取長期記憶區所學的相關領域特定知識，來解讀該區域所表徵的語義。

以上的分析結果與研究假設3a與假設3b相符，在解答標準化測驗的單一選擇題時，主要仰賴上而下的解題歷程，即解題者依據對「恆星與太陽視運動」該主題的瞭解，主動辨識與選擇性地注意解題關鍵區域，觸接長期記憶裡所習得的知識來解讀關鍵區域的語義，以利隨後整併題目所提供的訊息和提取與解題相關的領域特定概念知識來推論出解答。

五、一般討論

根據專家與生手的比較文獻，假設問題解決表現較佳者的解題策略是偏好「向前思

表7：高分組與低分組在「特定(解題關鍵)區域眼動指標」的平均數(標準差)、*t*考驗比較結果、效果量

解題關鍵區域	眼動指標	高分組	低分組	<i>t</i>	Cohen's <i>d</i>
全部關鍵區域	總凝視時間比例(%)	5.32 (1.10)	3.58 (1.28)	4.38***	1.44
	平均凝視時間(秒)	0.277 (0.035)	0.237 (0.052)	2.60*	0.85
	凝視點個數(個)	169.31 (77.77)	116.55 (50.87)	2.53*	0.83
圖片關鍵區域	總凝視時間比例(%)	3.30 (1.44)	1.80 (1.10)	3.65**	1.20
	平均凝視時間(秒)	0.271 (0.057)	0.222 (0.057)	2.63*	0.86
	凝視點個數(個)	93.69 (61.00)	51.45 (32.03)	2.53*	0.83
文字關鍵區域	總凝視時間比例(%)	2.01 (0.80)	1.78 (0.67)	0.98	N/A
	平均凝視時間(秒)	0.279 (0.056)	0.251 (0.065)	1.38	N/A
	凝視點個數(個)	75.63 (28.61)	65.09 (29.88)	1.09	N/A

註：1. AOI：感興趣區域(Area of Interest)；N/A：不適用(Not Available)。

2. * $p < .05$, ** $p < .01$, *** $p < .001$ 。

考」，且解題行為主要是以「上而下」的認知歷程所主導，以下將分開討論之。在「向前思考」的部分，研究結果顯示，高分組學生在題幹區域所分配的訊息處理時間比例與耗費的心力分別近似顯著與顯著高於低分組，這雖有顯現「向前思考」的特徵，但因為高分組在選項區域所分配的注意力時間比例、題幹與選項對照次數與低分組未有顯著差異，且在選項區域的凝視點個數反而較低分組多，這表示高分組在單選題的解題策略上，未必完全採用向前思考，而很可能會搭配向後思考(由目標選項中反推答案的方式解題)。以下將列舉幾則高分組學生的訪談口語資料(從訪談問題1所擷取)，以輔佐證明高分組學生使用這項策略的可能性極高(學生後面的數字代表流水編號)。

(一)測驗第1題：

學生21：「因為它(題目)是說，是一年……。然後，恩……如果它(太陽)會就是出現在頭頂的話表示就是……太陽就是直射他(觀察者)住的地方，所以應該是……欸……應該不會是北緯45度(刪除選項①)。」

教師：「為什麼？」

學生21：「因為太陽只會在南北緯23.5度，所以你在(北緯)45度的時候太陽不會(剛好)在頭頂，然後如果是赤道的話，它應該會就是……，南北兩邊都會跑來跑去(指太陽在頭頂的位置會偏北偏南都有，不會正好只在頭頂)，所以也不可能是赤道。所以應該是這個(選項②)或這個(選項④)。然後因為它(太陽)出現在北邊嘛，所以應該是……，應該是南回歸線……。」(訪談-編號21號學生回覆)

(二)測驗第2題：

學生21：「因為它(圖的)北極星是在北邊，所以就是……，因為之前高中是記說，它(圖的)北極星跟你人的那個夾角就是他(觀察者)的……，好像就是他(觀察者)的緯度(畫圖解釋)……，所以，不可能是赤道(以夾角等於緯度判斷)，然後就是……，可能是南回歸線或北回歸線，可能是這兩個地方(選項

②或③)，甲跟丁(選項①與④)比較不可能，因為它的角度(緯度)太大了，所以可能是乙或丙(選項②或③)，然後……，在南半球應該看不到北極星，所以選乙(選項②)。」
(訪談-編號21號學生回覆)

由以上的兩個例子可以看出，學生21這位隸屬高分組的學生在答題時會根據所學知識判斷，先將明顯不可能的選項刪除，再藉由觀察剩餘選項的差異(南、北半球與緯度的不同)，回到題幹尋找及對照另外的關鍵資訊後，再進一步確認候選的選項後選答。這是稱為「手段—目標分析」(means-ends analysis)的反向運作方法(Gagné et al., 1993)，該策略是一種有效率的廣泛型問題解決策略，當解題者無法立即看出解答時，會藉由觀察問題的目標狀態來分析問題，以縮小起始問題(即題幹)與目標狀態(即選項)之間的差距(Sternberg, 2009)。以下再提供其他3位高分組學生在解答第6題的口語資料。

測驗第6題：

學生3：「我是先判斷……，因為它(題目)是說夏至，所以夏至的太陽軌跡不會經過正東方這邊，所以我就把(選項)①跟③刪掉，然後接著，因為不能畫圖所以還蠻難做的，所以我是想說如果是，(以畫圖解釋)因為它(題目)已經給40.7度，我是在心裡想一個地球，就是正著地球看，然後夾一個40.7度出來，然後再把這個正的地球移過去，就是轉40.7度，可是我不確定我選的答案對不對。」(訪談-編號3號學生回覆)

學生20：「就先劃掉這兩個(選項

③與④)，因為也是畫自轉軸(在太陽視軌跡的垂直方向上畫一條輔助線，該線為地球與天球自轉軸)，所以要先找北半球的(由「地球與天球自轉軸在地平線上是指向北方」可以判斷，觀察者位於北半球)，所以是這兩個(選項①與②)。」

教師：「好，選項①與②要如何決定？」

學生20：「因為夏至，所以應該不是正東方升起，所以我就沒有選①。」

教師：「為什麼夏至不是正東方升起？」

學生20：「正東方(升起)是春秋分。我就選②。」(訪談-編號20號學生回覆)

學生28：「是因為夏至的太陽就是不會從正東或正西起落(刪除選項①與③)，所以一定是①與②這兩張圖，然後因為他(觀察者)是在北緯(40.7度)嘛，所以它繞的方法是繞著北極星轉，所以就是②。」(訪談-編號28號學生回覆)

以上三位學生的回應，亦顯現了高分組會使用「手段—目標分析」方法。「恆星與太陽視運動」是較複雜的問題，由於施測時需在電腦上作答，無提供紙筆及計算、繪圖的機會，因此，在作答時工作記憶運作的空間容易超載，彈性地使用這個策略解答複雜的問題可以更有效率。另一方面，測驗題目又是單一選擇題，僅需在有限選項中選出唯一正確答案即可。由於目標清楚可視，此時，高分組會搭配採用手段—目標分析的方

式，藉由刪除無關的選項以縮小目標可選擇的範圍來解題。以上結果和Chen與Yang (2014)的眼動研究相似，得分較佳者在解答複雜的三維空間旋轉測驗時，視覺注意力的回視次數未必較低分組少，是因為他們會採用垂直比較の後設策略解題。雖然本研究中，無論高、低分組皆會頻繁地在題幹與選項區域來回對照，但根據「高分組在選項區的注意力主要是聚焦在正確答案上」的眼動分析結果，可以得知高分組的對照方式與低分組並不相同，高分組是將視覺注意力定錨在正確答案，並與題幹來回比較與對照，用以確認與檢查正確答案的適切性。

在「上而下」認知歷程的部分，眼動資料顯示高分組能辨識且能正確判讀關鍵區域、花費較多有意義的訊息處理時間比例與耗費較多心思注視解題關鍵區域，這支持了高分組解題時是由「上而下」的認知歷程所主導。對已具有基礎先備知識的學生而言，必須能以所學知識辨識關鍵區域、能正確解碼這些關鍵區域的語義，並能進而觸發與解題相關的領域特定概念知識者，才能成功解題。如第7題，在「太陽視軌跡」這主題脈絡下，能正確解答者應能從關鍵字「日落」激發出「西方」的概念，並能再進一步觸發「右手是北方；左手是南方」，這兩個與解題相關的概念，因為視軌跡傾倒的方位對南半球或北半球的太陽視軌跡的辨識至關重要(北半球視軌跡向南方傾倒；南半球視軌跡向北傾倒)，而非僅僅是對「日落」的字詞理解或提取其他如太陽顏色特徵等與解題無關的資訊。

有趣的是，研究還發現，在一般區域的注意力分配上，雖然所有學生皆是在題幹區域的文字區域花費較多時間比例，顯示解題

時仍是以閱讀與理解文字的資訊為主，但在解題關鍵區域的注意力分配上，則是測驗表現較佳者會「花費較多心力(指平均而言，單一凝視點的停留時間較長)」與「花費較多有意義的資訊處理時間比例(指總凝視時間比例較多)」在圖片的關鍵區域上。這可能是科學圖片表徵所欲傳達的語義資訊較不明顯與直觀，解碼較困難，進而影響隨後在活化與解題相關的概念知識時會較耗費心力。科學圖片中各部分的組成、屬性與彼此間的關係相當複雜，並需遵守科學常規或領域特定法則(Chen, Yang, & Chang, 2020; Goldman & Bisanz, 2002; Hegarty, Carpenter, & Just, 1991; Perini, 2005)，因此能在測驗中得高分者，在科學圖形表徵的資訊處理並非僅是以視覺感知到圖形表徵的知覺層次或是辨認圖形(如形狀、線、角度)等的表層解碼，而是牽涉高階的認知——需涉及對圖形關鍵區域的語義(表達的概念)解碼，與激發及提取記憶中與解題相關的領域特定的概念性知識(Chen et al., 2020)。

陸、結論與建議

本研究旨在以眼球追蹤技術輔以訪談資料，探究與比較在「恆星與太陽視運動」測驗中的高分組與低分組學生在問題解決的認知歷程。研究有三項重要發現：首先，高表現者在解題時雖有展現向前思考的特徵：會較費心地理解題幹敘述以形成問題表徵，及傾向將注意力集中在正確答案上，但仍會彈性搭配手段一目標分析的廣泛型解題策略，以縮小目標範圍，更有效率地解答。第二，在解答這類結構完整的單一選擇題時，主要是經歷上而下的認知歷程：能以所學知識辨識關鍵區域並解碼訊息，是由長期記憶的知

識結構品質與豐富度決定測驗表現，測驗表現與領域特定知識較有關。第三，雖然解題時仍是以閱讀文字為主，但相較於關鍵字句的資訊處理，學生對圖形關鍵區域在概念層次的理解，較為困難。

在理論方面，除了採用眼動追蹤法，也搭配使用晤談法，前者提供視覺注意力的時間與位置的資訊，後者提供注視時腦中思考的內容，更能深度解釋解題時的認知歷程。再來，在眼動AOI區域的框定上，圖片通常比文字(常以字、詞)的劃分困難，本研究提供一個新方法：以教師的口語晤談資料當作依據，提供有特定內容意義的AOI區域劃分，供後續的研究參考。實務上，本研究指出在「以概念理解評估學習成效」為目的的情況下，學生在解決結構良好的問題時，領域特定知識仍是扮演較重要的角色。因此，在教材設計方面，若目的在知識傳授，則內容的呈現與表達仍是最需受到重視，以促成學習者連結概念與概念之間的關係，形成意義。尤其科學圖形所蘊含的語義與領域特定概念知識，倘若未清楚、明確地說明，則學生難以透過自學理解相關內容。學生的學習成效將由教師教學的品質、家長所能提供的教育資源(如聘請家教或購買參考書)所主導，容易有城鄉差異，這不能延伸到是學生一般認知能力(如閱讀能力)不佳的結論。另外，在測驗評量方面，教育者必須先釐清測驗與期望測出之能力間的關聯，以實踐於應用層面上，例如，應審慎思考評量的目的為何，以便選擇適當的測驗工具。傳統標準化測驗所評量到的是領域特定知識，若想要評量的是領域廣泛的探究、推理或問題解決能力等，則必須在一個學生較不熟悉或結構較不完整的問題情境中探索，而不是一個已經建構完備的科學理論或科學模型下探討，無視領域特

定知識的存在，宣稱測到的是一般能力的作用。

最後，對未來提出三項研究展望。首先，本研究的受試者具有基本知識，並且在時間上距離學測考試較近。因此在其他教育階段的學生上，例如領域特定知識較缺乏的受試者或是離學測時間較遠(例如研究所階段)的學生的解題及推理歷程是否類似，仍需要進一步探究。另一方面，本研究的高表現者並未完全符合文獻中向前思考的專家特徵，未來可嘗試招募領域特定知識更豐富與精緻者，如地球科學教師或取得天文領域專業學位者做比較與對照，應更能有助於釐清相關議題。第二，本研究雖在「科學圖片在解題上的功能」有初步發現，但未能深度探討。科學圖片的形式多樣，未來需要更多研究系統性地探討各類科學圖片在學習、教學與解題中的作用。第三，本研究雖發現測驗得分較高者，在單一選擇題的題型上，很可能會搭配使用「手段—目標分析」的廣泛性策略輔助解題，並且提出使用這項策略可能與題目的複雜度與受試者的工作記憶空間容量有關，但這各個因素之間的關聯仍需未來詳細探討。

誌謝

感謝二位專業與耐心的匿名審查者，與國立臺灣師範大學地球科學系的同儕(在公立高中任教的12位教師，含五位任教於第一志願高中與二位天文物理專長的教師)的熱情參與。作者特別感謝林佳旻(科學教育與資優教育專長)、林郁梅(任教臺北市立第一女子高級中學)、吳育倫(天文專長)三位老師協助確認、校正本文中與天文相關的字詞及語句敘述。

參考文獻

1. 國家教育研究院(2018年11月2日)。十二年國民基本教育課程綱要——國民中小學暨普通型高級中等學校：自然科學領域。查詢日期：2020年9月16日，檢自https://www.naer.edu.tw/ezfiles/0/1000/attach/63/pta_18538_240851_60502.pdf。
[National Academy for Educational Research. (2018, November 2). *Shiernian guomin jiben jiaoyu kecheng gangyao—Guomin zhongxiaoxue ji putongxing gaoji zhongdeng xuexiao: Ziran kexue lingyu*. Retrieved September 16, 2020, from https://www.naer.edu.tw/ezfiles/0/1000/attach/63/pta_18538_240851_60502.pdf]
2. 蔡介立、顏妙璇、汪勁安(2005)。眼球移動測量及在中文閱讀研究之應用。《應用心理研究》，28，91-104。
[Tsai, J.-L., Yen, M.-H., & Wang, C.-A. (2005). Recoding on eye movements and its application on Chinese reading. *Research in Applied Psychology*, 28, 91-104.]
3. Alemdag, E., & Cagiltay, K. (2018). A systematic review of eye tracking research on multimedia learning. *Computers & Education*, 125, 413-428. doi:10.1016/j.compedu.2018.06.023
4. Anderson, J. R. (2009). *Cognitive psychology and its implications* (7th ed.). New York, NY: Worth.
5. Canham, M., & Hegarty, M. (2010). Effects of knowledge and display design on comprehension of complex graphics. *Learning and Instruction*, 20(2), 155-166. doi:10.1016/j.learninstruc.2009.02.014
6. Chase, W. G., & Simon, H. A. (1973). The mind's eye in chess. In W. G. Chase (Ed.), *Visual information processing* (pp. 215-281). New York, NY: Academic Press. doi:10.1016/B978-0-12-170150-5.50011-1
7. Chen, Y.-C., & Yang, F.-Y. (2014). Probing the relationship between process of spatial problems solving and science learning: An eye tracking approach. *International Journal of Science and Mathematics Education*, 12(3), 579-603. doi:10.1007/s10763-013-9504-y
8. Chen, Y.-C., Yang, F.-Y., & Chang, C.-C. (2020). Conceptualizing spatial abilities and their relation to science learning from a cognitive perspective. *Journal of Baltic Science Education*, 19(1), 50-63. doi:10.33225/jbse/20.19.50
9. Chi, M. T. H. (2006). Two approaches to the study of experts' characteristics. In K. A. Ericsson, N. Charness, R. R. Hoffman, & P. J. Feltovich (Eds.), *The Cambridge handbook of expertise and expert performance* (pp. 21-30). New York, NY: Cambridge University Press.
10. Chi, M. T. H., Glaser, R., & Farr, M. J. (Eds.). (1988). *The nature of expertise*. Hillsdale, NJ: Erlbaum.
11. Chi, M. T. H., Glaser, R., & Rees, E. (1982). Expertise in problem solving. In R. J. Sternberg (Ed.), *Advances in the psychology of human intelligence* (Vol. 1, pp. 7-75). Hillsdale, NJ: Erlbaum.

12. Cohen, J., Cohen, P., West, S. G., & Aiken, L. S. (2003). *Applied multiple regression/correlation analysis for the behavioral sciences* (3rd ed.). Mahwah, NJ: Erlbaum.
13. Gagné, E. D., Yekovich, C. W., & Yekovich, F. R. (1993). *The cognitive psychology of school learning* (2nd ed.). New York, NY: HarperCollins.
14. Gobet, F., & Simon, H. A. (1996). Recall of random and distorted chess positions: Implications for the theory of expertise. *Memory & Cognition*, 24(4), 493-503. doi:10.3758/BF03200937
15. Goldman, S. R., & Bisanz, G. L. (2002). Toward a functional analysis of scientific genres: Implications for understanding and learning processes. In J. Otero, J. A. León, & A. C. Graesser (Eds.), *The psychology of science text comprehension* (pp. 19-50). London, UK: Erlbaum.
16. Grant, E. R., & Spivey, M. J. (2002). Guiding attention produces inferences in diagram-based problem solving. In M. Hegarty, B. Meyer, & N. H. Narayanan (Eds.), *Diagrammatic representation and inference* (pp. 236-248). Berlin, Germany: Springer. doi:10.1007/3-540-46037-3_24
17. Grant, E. R., & Spivey, M. J. (2003). Eye movements and problem solving: Guiding attention guides thought. *Psychological Science*, 14(5), 462-466. doi:10.1111/1467-9280.02454
18. Groen, M., & Noyes, J. (2010). Solving problems: How can guidance concerning task-relevancy be provided? *Computers in Human Behavior*, 26(6), 1318-1326. doi:10.1016/j.chb.2010.04.004
19. Hegarty, M., Canham, M. S., & Fabrikant, S. I. (2010). Thinking about the weather: How display salience and knowledge affect performance in a graphic inference task. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, 36(1), 37-53. doi:10.1037/a0017683
20. Hegarty, M., Carpenter, P. A., & Just, M. A. (1991). Diagrams in the comprehension of scientific texts. In R. Barr, M. L. Kamil, P. B. Mosenthal, & P. D. Pearson (Eds.), *Handbook of reading research* (Vol. 2, pp. 641-668). New York, NY: Longman.
21. Just, M. A., & Carpenter, P. A. (1980). A theory of reading: From eye fixations to comprehension. *Psychological Review*, 87(4), 329-354. doi:10.1037/0033-295X.87.4.329
22. Kaller, C. P., Rahm, B., Bolkenius, K., & Unterrainer, J. M. (2009). Eye movements and visuo-spatial problem solving: Identifying separable phases of complex cognition. *Psychophysiology*, 46(4), 818-830. doi:10.1111/j.1469-8986.2009.00821.x
23. Kozhevnikov, M., Motes, M. A., & Hegarty, M. (2007). Spatial visualization in physics problem solving. *Cognitive Science*, 31(4), 549-579. doi:10.1080/15326900701399897
24. Lai, M.-L., Tsai, M.-J., Yang, F.-Y., Hsu, C.-Y., Liu, T.-C., Lee, S. W.-Y., et al. (2013). A review of using eye-tracking technology in exploring learning from 2000 to 2012. *Educational Research Review*, 10, 90-115. doi:10.1016/j.edurev.2013.10.001
25. Lelliott, A., & Rollnick, M. (2010). Big ideas: A review of astronomy education re-

- search 1974–2008. *International Journal of Science Education*, 32(13), 1771-1799. doi:10.1080/09500690903214546
26. Lin, Y.-T., Wu, C.-C., Hou, T.-Y., Lin, Y.-C., Yang, F.-Y., & Chang, C.-H. (2016). Tracking students' cognitive processes during program debugging—An eye-movement approach. *IEEE Transactions on Education*, 59(3), 175-186. doi:10.1109/TE.2015.2487341
 27. Logan, G. D. (1988). Toward an instance theory of automatization. *Psychological Review*, 95(4), 492-527. doi:10.1037/0033-295X.95.4.492
 28. Lowe, R. K. (1993). Constructing a mental representation from an abstract technical diagram. *Learning and Instruction*, 3(3), 157-179. doi:10.1016/0959-4752(93)90002-H
 29. Lowe, R. K. (1996). Background knowledge and the construction of a situational representation from a diagram. *European Journal of Psychology of Education*, 11(4), 377-397. doi:10.1007/BF03173279
 30. National Research Council. (2012). *A framework for K-12 science education: Practices, crosscutting concepts, and core ideas*. Washington, DC: National Academies Press.
 31. Obaidallah, U., Al Haek, M., Cheng, P. C.-H. (2018). A survey on the usage of eye-tracking in computer programming. *ACM Computing Surveys*, 51(1), 1-61. doi:10.1145/3145904
 32. Perini, L. (2005). Convention, resemblance and isomorphism: Understanding scientific visual representations. *Studies in Multidisciplinarity*, 2, 37-47. doi:10.1016/s1571-0831(04)80031-5
 33. Plummer, J. D. (2014). Spatial thinking as the dimension of progress in an astronomy learning progression. *Studies in Science Education*, 50(1), 1-45. doi:10.1080/03057267.2013.869039
 34. Rayner, K. (1998). Eye movements in reading and information processing: 20 years of research. *Psychological Bulletin*, 124(3), 372-422. doi:10.1037/0033-2909.124.3.372
 35. Rayner, K. (2009). The 35th Sir Frederick Bartlett Lecture: Eye movements and attention in reading, scene perception, and visual search. *Quarterly Journal of Experimental Psychology*, 62(8), 1457-1506. doi:10.1080/17470210902816461
 36. Reingold, E. M., Charness, N., Pomplun, M., & Stampe, D. M. (2001). Visual span in expert chess players: Evidence from eye movements. *Psychological Science*, 12(1), 48-55. doi:10.1111/1467-9280.00309
 37. Reingold, E. M., Charness, N., Schultetus, R. S., & Stampe, D. M. (2001). Perceptual automaticity in expert chess players: Parallel encoding of chess relations. *Psychonomic Bulletin & Review*, 8(3), 504-510. doi:10.3758/BF03196185
 38. Snow, R. E. (1980). Aptitude processes. In R. E. Snow, P.-A. Federico, & W. E. Montague (Eds.), *Aptitude, learning, and instruction* (Vol. 1, pp. 27-63). Hillsdale, NJ: Erlbaum.
 39. Sternberg, R. J. (2009). *Cognitive psychology* (5th ed.). Belmont, CA: Wadsworth.
 40. Thomas, L. E., & Lleras, A. (2007). Moving eyes and moving thought: On the spatial compat-

- ibility between eye movements and cognition. *Psychonomic Bulletin & Review*, 14(4), 663-668. doi:10.3758/BF03196818
41. Tsai, M.-J., Hou, H.-T., Lai, M.-L., Liu, W.-Y., & Yang, F.-Y. (2012). Visual attention for solving multiple-choice science problem: An eye-tracking analysis. *Computers & Education*, 58(1), 375-385. doi:10.1016/j.compedu.2011.07.012
42. Vicente, K. J., & de Groot, A. D. (1990). The memory recall paradigm: Straightening out the historical record. *American Psychologist*, 45(2), 285-287. doi:10.1037/0003-066X.45.2.285
43. Yoon, D., & Narayanan, N. H. (2004). Predictors of success in diagrammatic problem solving. In A. F. Blackwell, K. Marriott, & A. Shimojima (Eds.), *Diagrammatic representation and inference: Third International Conference, Diagrams 2004, Cambridge, UK, March 22-24, 2004. Proceedings* (pp. 301-315). Berlin, Germany: Springer. doi:10.1007/978-3-540-25931-2_29

附錄：「恆星與太陽視運動測驗」內容與關鍵解題區域的劃分與說明

1 附圖是小英在住家附近，

持續一年的時間，觀察

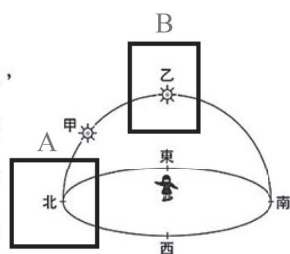
太陽正午時在天空中的

位置示意圖，發現太陽

正午的位置只在圖中的甲、乙兩點之間移動，且乙在頭頂

正上方。推測小英居住的地點最接近下列哪一個緯度？

- ① 北緯45度 ② 北回歸線 ③ 赤道 ④ 南回歸線



2 右圖為波波一年來持續在正午時間觀察

太陽在天空中位置的示意圖。他發現在

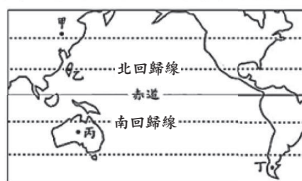
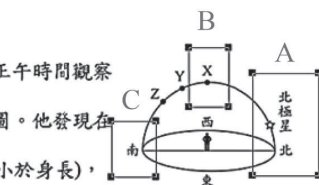
X點時身影長度最短(影長小於身長)，

在Y點時身影長度為身長的一半(影長等於1/2身長)，在Z點時

身影長度最長(影長大於身長)。請問下圖中的何處最可能為

波波居住的位置？

- ① 甲 ② 乙 ③ 丙 ④ 丁



3 某日正午，於相同經度但不同緯度的各

地區，分別垂直水平面立起等長的旗竿

，計算其竿影長度與緯度之間的關係，

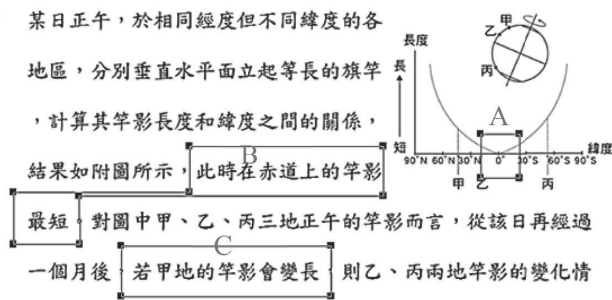
結果如附圖所示，此時在赤道上的竿影

最短。對圖中甲、乙、丙三地正午的竿影而言，從該日再經過

一個月後，若甲地的竿影會變長，則乙、丙兩地竿影的變化情

形應為下列何者？① 乙變短；丙變長 ② 乙變短；丙變短

- ③ 乙變長；丙變長 ④ 乙變長；丙變短



第1題：解題關鍵區域2個(A、B)

A：一年之間，北(南)半球的太陽正午位置的範圍偏南(北)。因圖中整體移動範圍偏北，故必在南半球。

B：一年之間，太陽移動的範圍只會在南北回歸線之間。圖中最南的位置是「乙」，且在觀察者正頭頂(代表直射)，故選擇南回歸線。

第2題：解題關鍵區域2個(A、B)或(C、B)

A：只有北半球能看見北極星、北極星位置代表觀察者緯度為北半球(緯度未能很確定)；

C：一年之間，北半球的太陽正午位置的範圍偏北，圖中整體移動範圍偏南，故必在北半球。

B：一年之間，太陽移動的範圍只會在南北回歸線之間。圖中最北的位置是「X」，且在觀察者正頭頂(代表直射)，故確定是北回歸線。

第3題：解題關鍵區域2個(A、C)或(B、C)

A或B：太陽此時(幾乎)直射赤道。

C：太陽將往南(半球)移動。故遠離乙，乙變長；靠近丙，丙變短。

- 4 住臺灣嘉義北緯 23.5° 的小明，某天夜晚在住家附近進行星象觀測。他看見X星與北極星在天空張開角度(即由上述兩星視線構成的夾角)屬於下列哪一種情形時，X星的周日運動永遠都在地平線上進行？

- ① 小於 23.5°
 ② 介於 23.6° 和 50°
 ③ 介於 51° 和 89°
 ④ 等於 90°

- 5 若小明改天至赤道進行星象觀測，他所見到眾多星星移動軌跡所構成的圓面，都與地平面夾有多少角度？

- ① 0° (與水平面平行)
 ② 23.6°
 ③ 66.5°
 ④ 90° (與水平面垂直)

- 6 雅婷到特洛伊城戰爭遺址一遊，發現遺址外有座仿當時戰爭所用的木馬，且在木馬一側的地面上有磁磚砌成的馬影子輪廓(示意如圖A此圖未表示出實際方位)。經查證，夏至中午時木馬的影子會落在磁磚砌成的輪廓內。已知特洛伊城位於北緯 40.7° 度



- 下列哪張示意圖中的虛線最能代表當地夏至的太陽軌跡？
- ① 40.7° ② 17.2° ③ 40.7° ④ 17.2°

第4題：解題關鍵區域1個(A)

A：北半球的緯度代表北極星(天北極)仰角的位置，因北極星位於北方仰角 23.5° 處，故X星繞著北極星行周日運動，因此夾角小於 23.5° 者都不會落下地平面。

第5題：解題關鍵區域1個(A)

A：恆星繞著天北極旋轉，而天北極的仰角等於當地緯度。在赤道的天北極仰角 $= 0$ (在水平面上)，故恆星一日視軌跡與水平面垂直。

第6題：解題關鍵區域2個(A、B)

A：夏至時，中午太陽直射北緯 23.5° 度。

B：北半球視軌跡往南傾倒，且依據A，在北緯 40.7° 度，正午太陽的位置在頭頂偏南($40.7 - 23.5 = 17.2^\circ$)，故選②。

- 7 柯南固定在某地觀察日落景象，每一次他都相繼多次曝光後，再將多幅影像疊加起來，形成一幅日落重複曝光圖。依上述拍攝手法，他在某天拍攝日落景象，經過一段時間後在原地又拍攝一次，將兩次的日落景象重疊如附圖所示，如果日落的軌跡僅向右方移動到照片所示的位置(右側)。依據此圖，判斷拍攝的地點為何？ ① 北半球 ② 赤道 ③ 南半球

A

B



第7題：解題關鍵區域2個(A、B)

A：日落的照片面向西方，面向照片，右手是北方；左手是南方。

B：太陽落下位置是西「斜向北方」，故位於北半球；視軌跡往南傾倒，故位於北半球；或垂直視軌跡畫一條線(此線為地球自轉軸)，地球自轉軸在地面上是往北方指，因此位於北半球。

- 8 承上題，柯南某天在某地點拍攝日落景象，經過一段時間後在原地又拍攝一次，將兩次的日落景象重疊如附圖所示，如果日落的軌跡僅向右方移動到照片所示的位置(右側)。依據此圖，判斷拍攝的時間為何？



A

第8題：解題關鍵區域1個(A)

A：往右方移動即往北移動。

太陽(一年移動的範圍)僅在南、北回歸線之間來回移動，即在「南回歸線(冬至)、赤道(春分秋分)、北回歸線(夏至)」來回移動。而只有③的時間範圍是往北移動，故選擇③。

- ① 夏至之後、秋分之前 ② 夏至之後、冬至之前
③ 冬至之後、夏至之前 ④ 秋分之後、冬至之前

Using Eye-Tracking Technology to Investigate the Cognitive Processes of Solving Well-Structured Problems on the Topic of Celestial Motion

Yi-Chun Chen^{1,2,*} and Fang-Ying Yang¹

¹Graduate Institute of Science Education, National Taiwan Normal University

²Research Institute for the Humanities and Social Sciences, Ministry of Science and Technology, National Taiwan University

Abstract

Based on the expert-novice paradigm, using eye-movement technology supplemented by interviews, this study investigated the cognitive processes of solving well-structured problems on the topic of celestial motion. By comparing the differences between high- and low-performing students' cognitive characteristics, it was hoped that this study could provide evidence-based contributions. Thirty-eight university students who were taking non-earth-science majors but who had taken introductory earth science lessons in high school were recruited. They were asked to answer eight multiple-choice questions which were selected from the entrance examination for high schools and colleges in Taiwan. The results showed that: (1) Although the high-performing students tended to think forward (making more mental efforts in the stem to determine how to represent a problem, and paying much attention to the only correct answer), they flexibly used the means-ends analysis to reduce cognitive overload to answer questions more efficiently. (2) Top-down effects were the dominant information processing, while high-performing students were solving well-structured problems. Top-down effects referred to using acquired knowledge to identify and decode the key areas providing critical information and activated the necessary domain-specific knowledge. Therefore, the students' achievements were mostly determined by the richness and quality of the domain-specific knowledge stored in students' long-term memory rather than their general abilities. (3) While solving the problems, students spent a much greater percentage of time reading the text than looking at the graphics. The high-performing students spent a greater percentage of time processing information and expended more mental efforts on the critical areas of the graphics than the critical areas of the text. This revealed that decoding semantic information of scientific visual representations was the most difficult for students. Both the theoretical and practical implications of the findings are discussed.

Key words: Astronomy Education, Information-Processing Theory, Expert-Novice Paradigm, Eye-Movement Analysis, Well-Structured Problems

* Corresponding author: Yi-Chun Chen, chyichun@gmail.com