

在《臺北星空116期》的天文展品導覽中，我們認識了19到20世紀初期的天文學家們，如何進行天上的「星口普查」，並產出了以圖像化方式呈現恆星特徵分布的赫羅圖（HR diagram）。然而，在赫羅圖上的點點繁星中誰是老人？誰是小孩？要回答這個問題，不可迴避地須要了解恆星到底是如何發光發熱的，因此這一期將帶大家跟著理論科學家的腳步，探尋星星們的生命軌跡。

現代恆星模型的基礎 氣體球理論

透過恆星吸收光譜的研究，天文學家在19世紀便意識到太陽與天上的恆星是同一類的天體。但太陽到底是什麼？如何產生光和熱？一開始有人認為太陽是燃燒中的固體，也有人認為是液體，直到科學家強納生·萊恩（Jonathan Homer Lane）才提出太陽是由氣體構成的想法。萊恩出生於美國的務農家庭，在耶魯大學畢業之後進入美國的專利局工作，之後便自立門戶協助發明家申請專利。不過在工作期間卻遇上美國南北戰爭，生意一落千丈之下萊恩只好回到兄弟經營的農莊生活。然而在這段期間，萊恩不但開發了用氣體膨脹裝置來冷卻的低溫設備，也投入了天文學的研究。

恆星內部構造與能量來源

星星的生命軌跡探尋

文/王彥翔

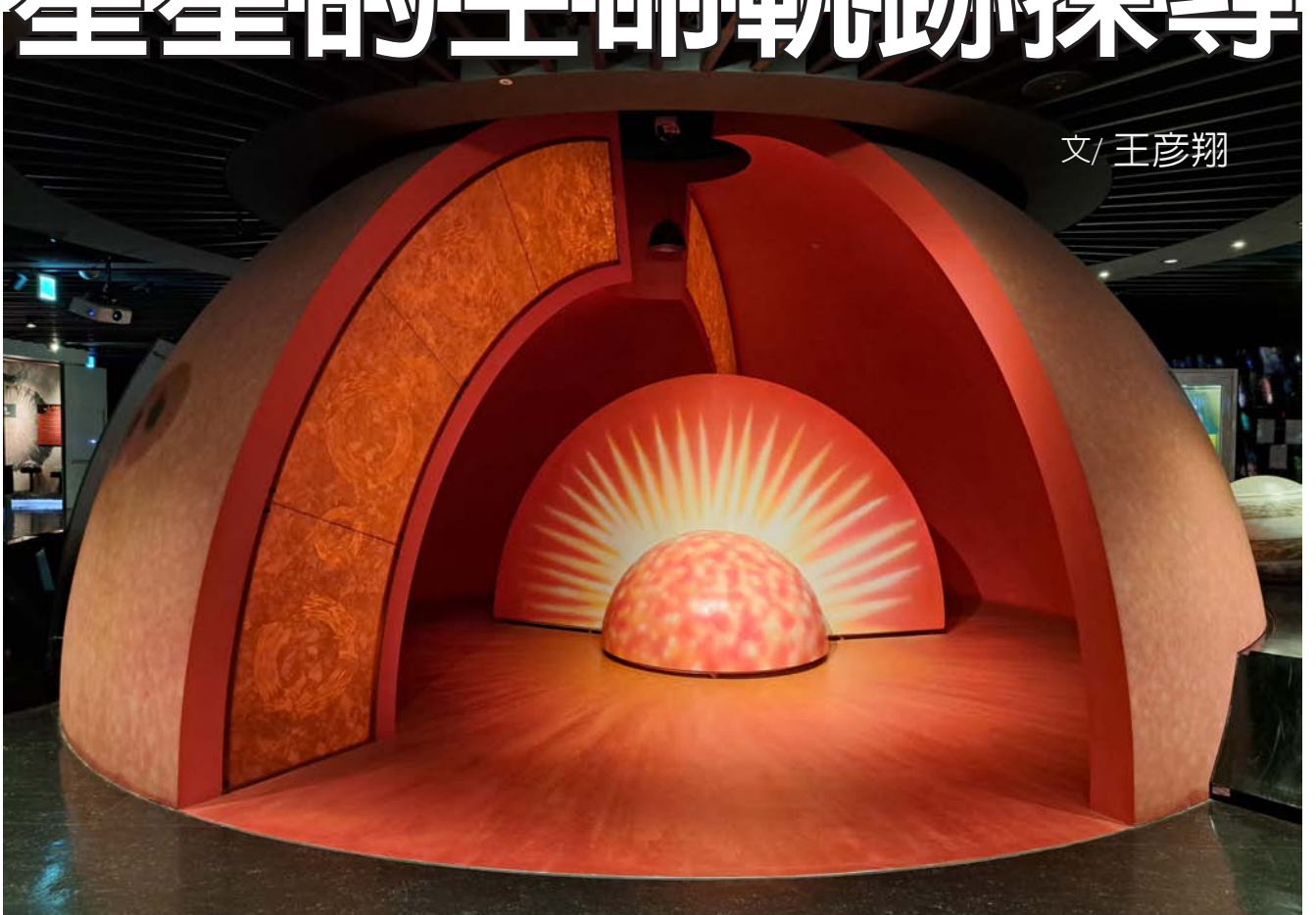


圖1. 展示場的大型太陽剖面由內向外依序是太陽的核心、輻射層、對流層，科學家經由近百年的知識累積，才終於能略知恆星內部的構造。

萊恩假定太陽是一個完全由氣體構成的星球，且遵守實驗室得出的氣體定律。在恆星內部除了氣體壓力會與本身的重力達成平衡之外，同時內部不斷產生熱能的氣體與外層的冷氣體也會產生對流平衡，兩個平衡成為支撐恆星結構的力量。萊恩的研究成果與後來同樣提出的氣體球理論的奧古斯都·里特爾（August Ritter）的研究，在瑞士天文學家羅伯特·埃姆登（Jacob Robert Emden）手上集大成，推導出可以預測恆星內部溫度與密度分布的萊恩-埃姆登方程式，成為後人探討恆星結構的基礎。

英國天文學家亞瑟·愛丁頓（Arthur Stanley Eddington）在1910年代於氣體球理論的基礎上再加入恆星內部的輻射壓力平衡機制。由於恆星內部的輻射壓力和恆星本身的質量大小有關，他認為大質量恆星會傾向於透過輻射壓力來與重力對抗，小質量恆星則主要以熱對流來抗衡重力。

此外，藉由雙星互繞的觀測結果，愛丁頓還發現了主序星的質量與光度具有正相關性，這個發現顯示巨星與矮星之間的質量差距過大，讓當時基於收縮說所推論出來的恆星演化路徑出現重大瑕疵，巨星和矮星很可能不是同一演化路徑上的星星。但不論恆星內部結構與演化路徑是如何，驅動這一切的關鍵還是內部不斷產生的熱能。那麼，恆星內部的熱源從何而來？

恆星的能量來源

過去科學家普遍認為恆星的能源是經由燃燒等化學作用產生，並從高溫慢慢降溫到低溫狀態。但在氣體球理論出現之後，收縮說逐漸成為20世紀初期的主流論述。收縮說認為恆星源於龐大且低溫的氣體球，當氣體球經由絕熱過程收縮時溫度便會跟著上升（和按壓打氣筒後內部溫度會升高是一樣的原理），之後氣體球隨著能量逐漸消耗，最後又回到低溫狀態。不過學界很快地注意到以收縮說估算出來的太陽年齡遠遠少於地質學估算出來的地球年齡，還一度引起天文與地質學者之間的論戰。然而，相對論當中的質能互換概念被提出之後，終讓恆星能源問題出現曙光。

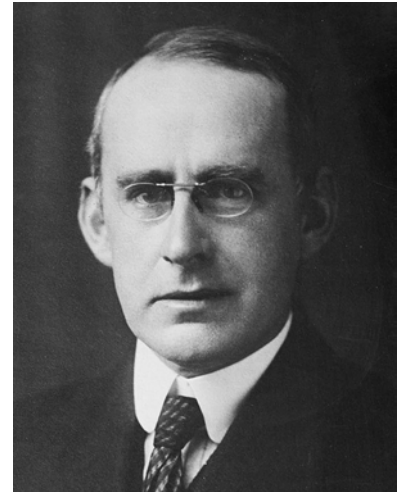


圖2. 亞瑟·愛丁頓（Arthur Stanley Eddington）肖像。圖片來源：維基百科



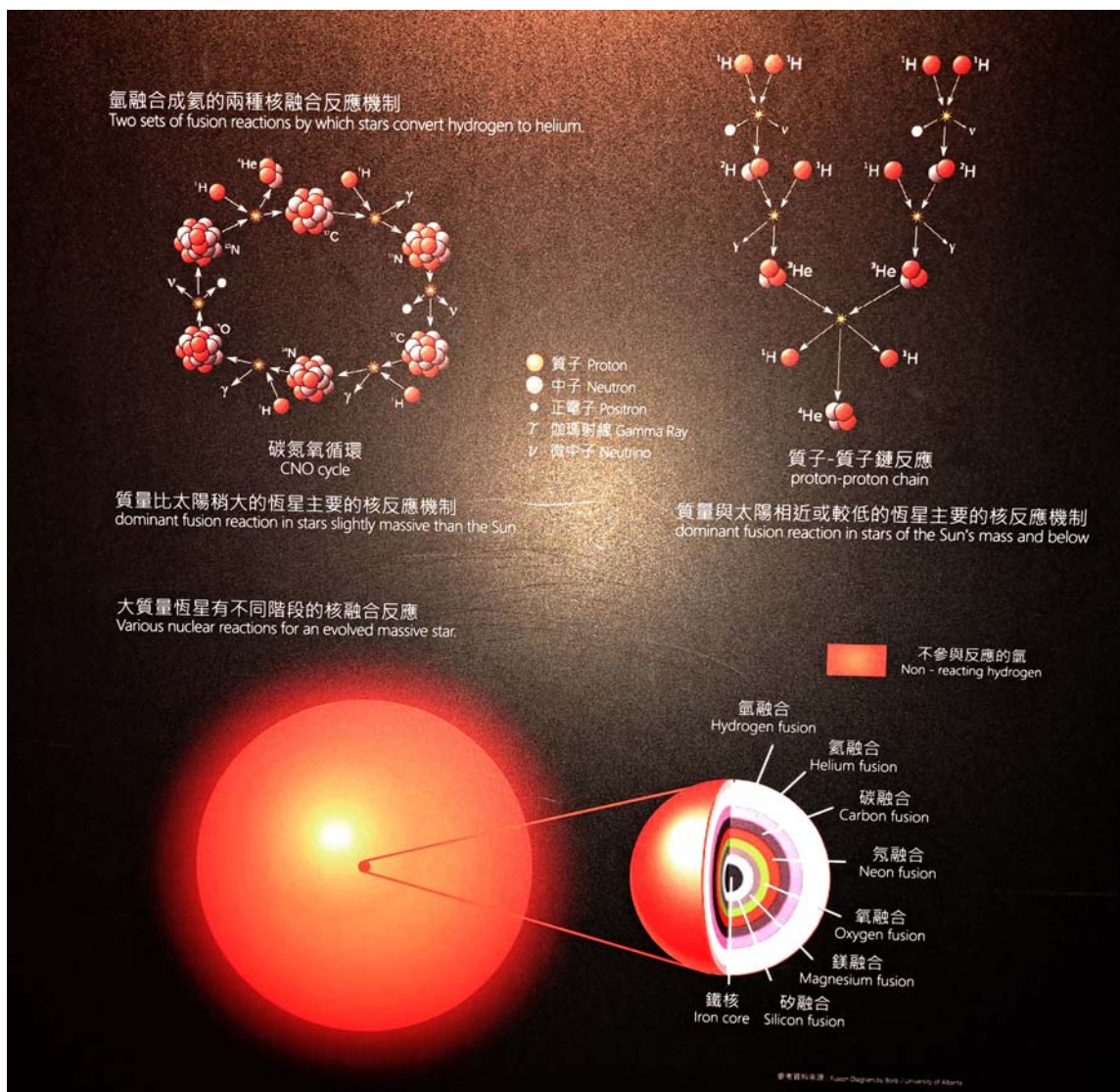
圖3. 不同大小的恆星由於內部的平衡狀態不同，在理論中呈現不同的結構分布。

物理學家們根據理論先後提出了由氫核融合成氦的元素轉換、陰陽粒子結合、放射性衰變等三種恆星內部可能的能量產生方式，但由於當時對於原子內的運作機制仍所知甚少，例如核融合過程導致恆星質量遞減的速率、帶有同樣電性的質子是如何克服排斥力而融合等問題，使得理論預測一直無法與觀測結果相符。幸好在量子力學學者發現了穿隧效應可以降低質子間排斥力的能量障壁後，核融合理論的進展終於在1930年代被漢斯·貝特（Hans Albrecht Bethe）突破。

漢斯·貝特出身於德國，他在1924年進入法蘭克福大學就讀，畢業後進入慕尼黑大學攻讀博士學位與工作，專攻於結晶物理學領域。然而由於貝特的母親擁有猶太人背景，讓他在納粹統治下的德國失去教職，因而輾轉在1935年來到美國康乃爾大學，但這段境遇卻為貝特開啓另一扇窗。當時美國的核物理研究如日中天，1938年喬治·伽莫夫（George



圖4. 漢斯·貝特（Hans Albrecht Bethe）肖像。圖片來源：維基百科



Gamow) 找來多名天文物理與核物理學家討論恆星的能源議題，受邀參與這次會議的貝特因此產生對恆星能源問題的興趣，並在隔年出版論文闡述了恆星核心核融合反應的兩條路徑。

第一種路徑被稱為「質子—質子鏈反應 (p-p chain)」，步驟一是由兩個氫原子融合成1個氦的同位素：氘，步驟二再由氘和氫結合為氦的同位素：氦-3。貝特認為步驟二反應產生的氦-3會再與氦-4結合狀態不穩定的鈹，鈹衰變成鋰，鋰再與氫結合形成2個氦-4，這段反應現今被稱為pp2分支，大約貢獻了太陽內14%的質子—質子鏈反應。另外佔太陽內近86%的pp1過程則是在步驟二之後，由2個氦-3融合成2個氫原子、1個氦-4。兩條分支最後的淨反應均為4個氫原子核可以融合成1個氦-4，現今理論估計約1,000-2,300萬度就能觸發反應。

第二種路徑則被稱為「碳氮氧循環 (CNO cycle)」，其過程簡單來說就是碳-12原子會與氫原子結合，依序形成的氮和氧經過衰變、與氫原子再結合等步驟，最後又回到碳-12，並產生1個氦-4，淨反應仍為4個氫原子核融合成1個氦-4。在高溫核心狀態下，碳氮氧循環的產能效率會高於質子—質子鏈反應，反之則是質子—質子鏈反應高於碳氮氧循環。貝特的理論解釋了赫羅圖上主序星們產生能量的重要過程，讓他成功在1967年獲得諾貝爾物理獎。不過，碳氮氧循環中比氦還重的元素從何而來，低溫的紅巨星是如何產生足夠的能量來支撐龐大的結構，貝特的理論並沒有給出答案。

恆星的非均質結構

恆星的能量來源與內部結構的力量平衡理論雖然在20世紀上半有快速的發展，足以說明主序星的內部正在發生什麼事情，但主序星和紅巨星之間的關係到底是什麼？在恆星演化路徑上的順序是誰先誰後？時間來到1952年，德裔美籍天文學家馬丁·史瓦西 (Martin Schwarzschild) 出版了兩篇論文說明了恆星的非均質結構模型，為糾纏超過近半世紀的主序星和紅巨星之間的關係提供了解答方向。

馬丁·史瓦西的父親卡爾·史瓦西是在學界相當有名的天文學家，過去曾經提拔共同列名赫羅圖的赫茨普龍。雖然卡爾·史瓦西在第一次世界大戰

的戰場上因病過世，當時才4歲的馬丁長大後仍繼承父親衣鉢成為天文學家。馬丁在論文中假設了恆星內部結構並非均質，也就是當核心的氫隨著核融合反應消耗的同時，外層的氫補充的速度無法趕上消耗的速度，因此恆星內部會形成貧氫和富氫層的殼層。當核心的氫漸漸枯竭，邊界殼層上的壓力和溫度上升，因而提供氦核融合的條件。由於進行核融合反應的熱源部位向外移動，導致恆星外層氣體受熱而膨脹，表面平均溫度下降，主序星因此成為紅巨星。非均質結構模型不僅清楚解釋了紅巨星的誕生，也為碳氮氧循環中比氦還重的元素的來源提供解答。

星團赫羅圖再驗證

在恆星模型建構的同時，讓我們把目光放回赫羅圖上。赫羅圖誕生之後，瑞士裔美籍天文學家羅伯特·朱利葉斯·特朗普 (Robert Julius Trumpler) 在1925年首先將這項工具應用在呈現疏散星團的「星口普查」上。之所以選擇星團是因為同一星團的成員與太陽系的距離幾乎可視為相同，那麼影響個別成員亮度與光譜型的關鍵就只有恆星自身的質量與年齡大小。星團中又以疏散星團相較於球狀星團有較多目標距離太陽系比較近，要針對星團進行個別成員的分光測量較為容易。

特朗普發現疏散星團成員星除了沿著赫羅圖從左上到右下的主序星帶分布外，部分星團的巨星在赫羅圖上的分布卻是從中間向右彎曲。他認為造成這些不同星團赫羅圖之間成員星分布差異的原因和成員星演化的階段有關。1940年代末，擔任愛德溫·哈伯助手的艾倫·桑德奇 (Allan Sandage) 利用帕洛瑪天文台剛落成不久的5.08公尺口徑反射式望遠鏡進行球狀星團赫羅圖的觀測，也發現成員星分布從主序星帶往右上紅巨星彎出的現象。

馬丁的非均質結構理論提出之後，桑德奇根據理論重新計算了氦核心的溫度等物理狀態，發現理論預測恆星演化路徑與星團赫羅圖的成員星分布高度吻合，觀測與理論終於在1950年代後半合流，紅巨星不是恆星誕生以來的模樣，也不是成為主序星前的狀態，而是恆星演化路徑上的晚期狀態。因此，我們可以推測一個星團的赫羅圖上紅巨星比例

越多，代表這個星團大多數成員都進入演化晚期。桑德奇便將星團赫羅圖上成員星分布從主序星帶往右上紅巨星轉彎的點（轉離點）作為判斷星團年齡的依據，轉離點越偏向右下方，代表星團的年齡越老。

在天文館展示場二樓的恆星區，觀眾可以看到太陽內部核心之外有輻射層與對流層，便是基於理論計算恆星內部能量傳遞、輻射壓與氣體壓力平衡所預測的結構。至今不斷照耀地球，給予我們光與熱的太陽則是透過核心不斷進行的質子—質子鏈反應產生能量。在過去一百多年以來無數天文學家們透過理論計算與恆星普查觀測接力之下，我們才能用遠比恆星還要短暫的生命拼湊出恆星從成熟到邁向老年的過程。有興趣的讀者，不妨來一趟天文館透過互動模型，重新認識這些科學家們留給後人的知識結晶。

王彥翔：臺北市立天文科學教育館

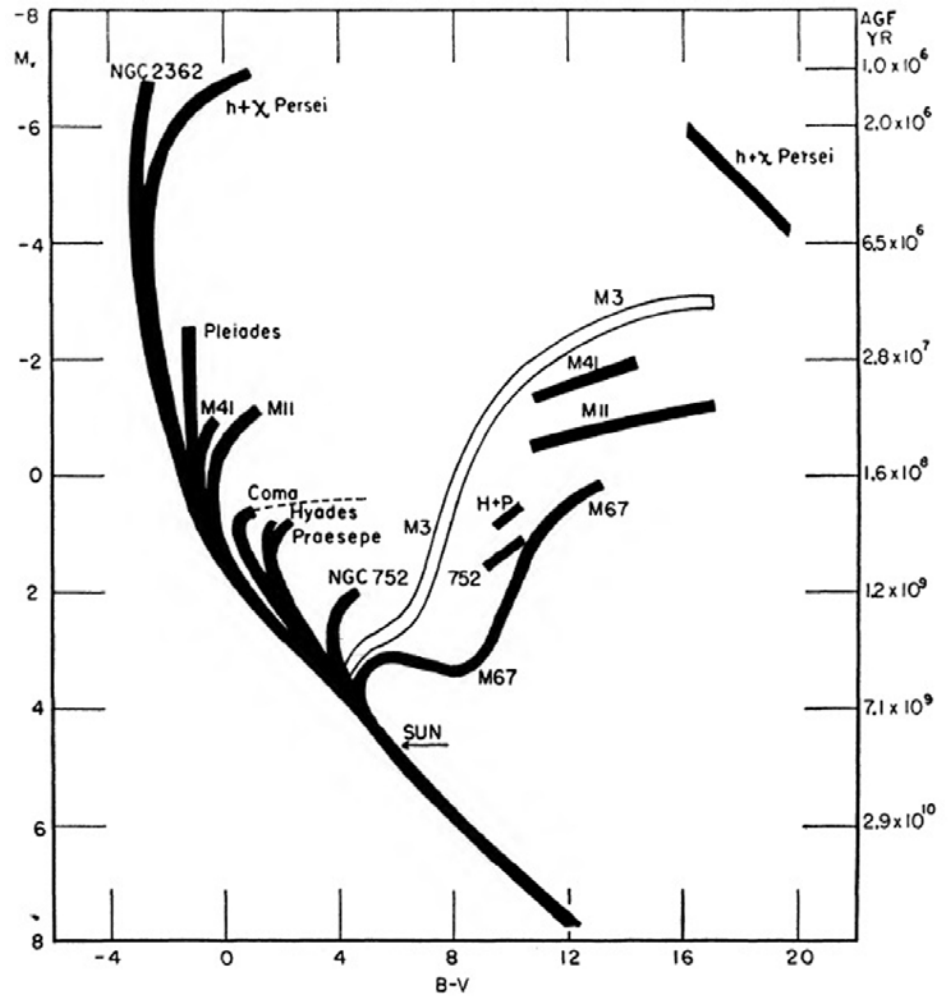


圖6. 圖中標示出了十個疏散星團與一個球狀星團的成員星在B-V色指數（橫軸）與絕對星等（左側縱軸）圖上的分布，轉離點越偏圖片上方的星團擁有較多的藍巨星、較少的紅巨星，越偏下方的星團則反過來。桑德奇利用轉離點的位置來推估星團的年齡，並標註在圖片右側縱軸上。圖片來源：Sandage, A. (1957)

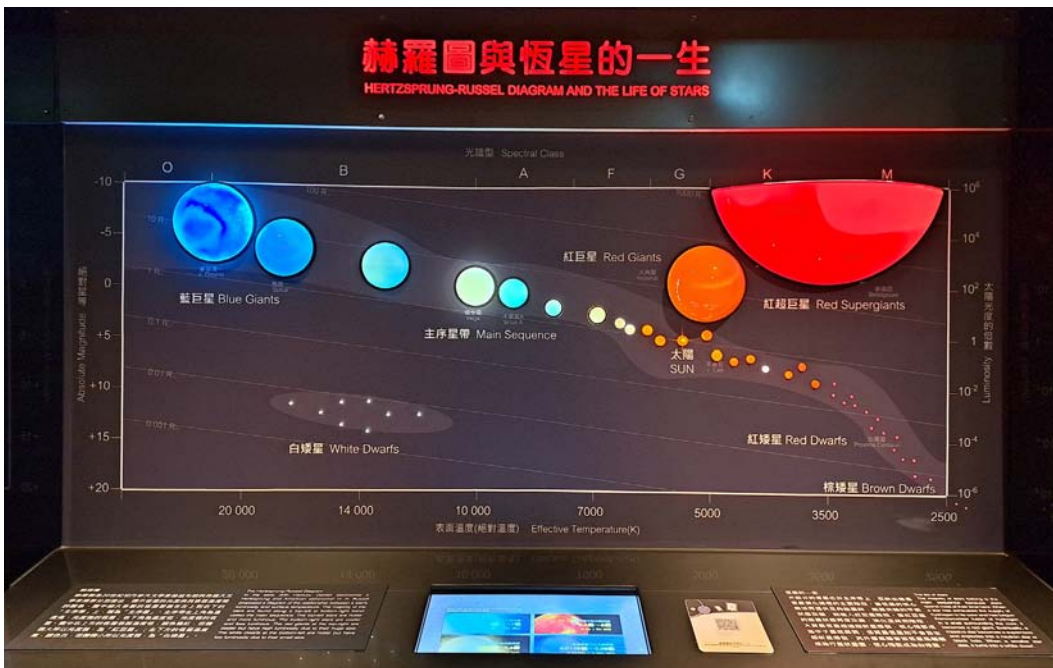


圖7. 觀眾可以利用本館展示場赫羅圖下方的觸控螢幕，認識圖上不同演化階段的恆星們。