

話說赫羅圖

赫羅圖是誰想出來的？

赫羅圖 (H-R diagram) 是「赫茲史普－羅素圖」的簡稱，主要由丹麥天文學家赫茲史普 (E. Hertzsprung) 與美國天文學家羅素 (H. N. Russell) 在 1910 年代分別發展出的圖衍生而來。最初赫茲史普想了解疏散星團中各個恆星的基本性質，例如表面溫度與亮度的關係，於是將星團中對應恆星表面溫度的光譜型為橫軸，恆星的視亮度為縱軸，做出單一星團的對應圖。羅素將這樣的方法擴展到不同的星團，並利用不同方法求得星團距離，得到絕對亮度與光譜型的關係圖。經過時代演進，成為現今得以顯示恆星基本性質與演化過程的赫羅圖。

赫羅圖怎麼看？

恆星的基本性質：如溫度、光度、半徑、質量、年齡，是恆星演化理論中最需要被確定的物理量。天上繁星，我們只能從地球上觀測他們的亮度與顏色。藉由顏色，我們得以推測恆星的溫度；藉由亮度，若有距離測量值，可以推論絕對光度；藉由兩者，我們得以在赫羅圖上標定他們的位置，進而推估恆星的半徑，再由理論恆星演化模型，推測恆星的質量與年齡。訂定恆星在赫羅圖上的正確位置，一直是恆星天文學中最重要的工作。

赫羅圖的橫軸在觀測上可以用顏色或光譜型標定，在理論上對應於恆星的表面溫度。恆星是溫度與密度很高的氣體球體，我們看到的光皆為從表面發出，在此情況下，我們可以假設恆星是一個「黑體」，而黑體的顏色只跟絕對溫度有關。溫度越高，輻射最強的波長就越短。例如太陽的輻射大致上近似一個表面溫度約凱氏溫度 5778 度的黑體，在此溫度的黑體顏色偏黃。而比太陽溫度低的恆星輻射時接近遠紅色，比太陽溫度高的恆星較接近藍白色。另一方面，二十世紀初，哈佛天文台利用恆星光譜中氫與氦的吸收強度訂定恆星的光譜型，最初依照氫的吸收強度由 A、B、C、D... 依序編號。由於氫的吸收強度大致在凱氏溫度 10000 度時達到頂峰，表面溫度為此的恆星的光譜型就被訂為 A 型，譬如織女星是一顆 A0 型恆星，而太陽是 G2 型恆星。後來發現表面溫度本身是一個更基本的性質，於是在赫羅圖上標記的光譜型就不是順著字母排序。現今大部分的赫羅圖，就如本期所示，橫軸由左至右，恆星顏色由藍白色轉黃至橘紅，對應的表面溫度「由高至低」(轉換方式請見此網站：<https://academo.org/demos/colour-temperature-relationship/>)，而光譜型也去除差異大小的類型，只留下幾種代表性的光譜型，依照表面溫度由高至低排列為「OBAFGKM」。

赫羅圖的縱軸是恆星的光度。由於赫羅圖被用於所有恆星，不同恆星之間因為距離造成的亮度差異需要被消除。由亮度求得光度，精準的距離測量就成為重要關鍵。目前本銀河系中的恆星可以經由視差法、移動星團法、或造父變星法等方法求得距離。我們常以太陽的光度為單位，如同本期赫羅圖所示。

得到恆星的表面溫度與光度，我們得以進一步推測恆星的大小。恆星的總光度隨表面積與表面溫度增高。藉由表面溫度、光度、與半徑的關係，我們發現赫羅圖中越往上方的恆星體積越大，稱為「巨星」，包括藍綠圖中右上角，代表中低質量恆星演化中期的「紅巨星」；而位居下方的恆星稱為「矮星」，包括比太陽低溫且暗淡，是目前搜尋系外行星熱門選擇的「紅矮星」，以及位於演化末期，溫度極高但體積極小的「白矮星」。本期赫羅圖中，各個恆星的相對大小，以對數方式呈現，即是利用此一方法推測。

赫羅圖上的分區

我們可以依照恆星在赫羅圖上的位置，大致分為數個區域，其位置被認為與恆星演化過程息息相關。本期赫羅圖，我們選擇一些較著名的恆星作為示意。除了一般的溫度/光譜型與光度軸線，我們以不同的演化階段作為第三條座標軸。以演化階段為軸，我們得以看出赫羅圖中不同分區的意義：

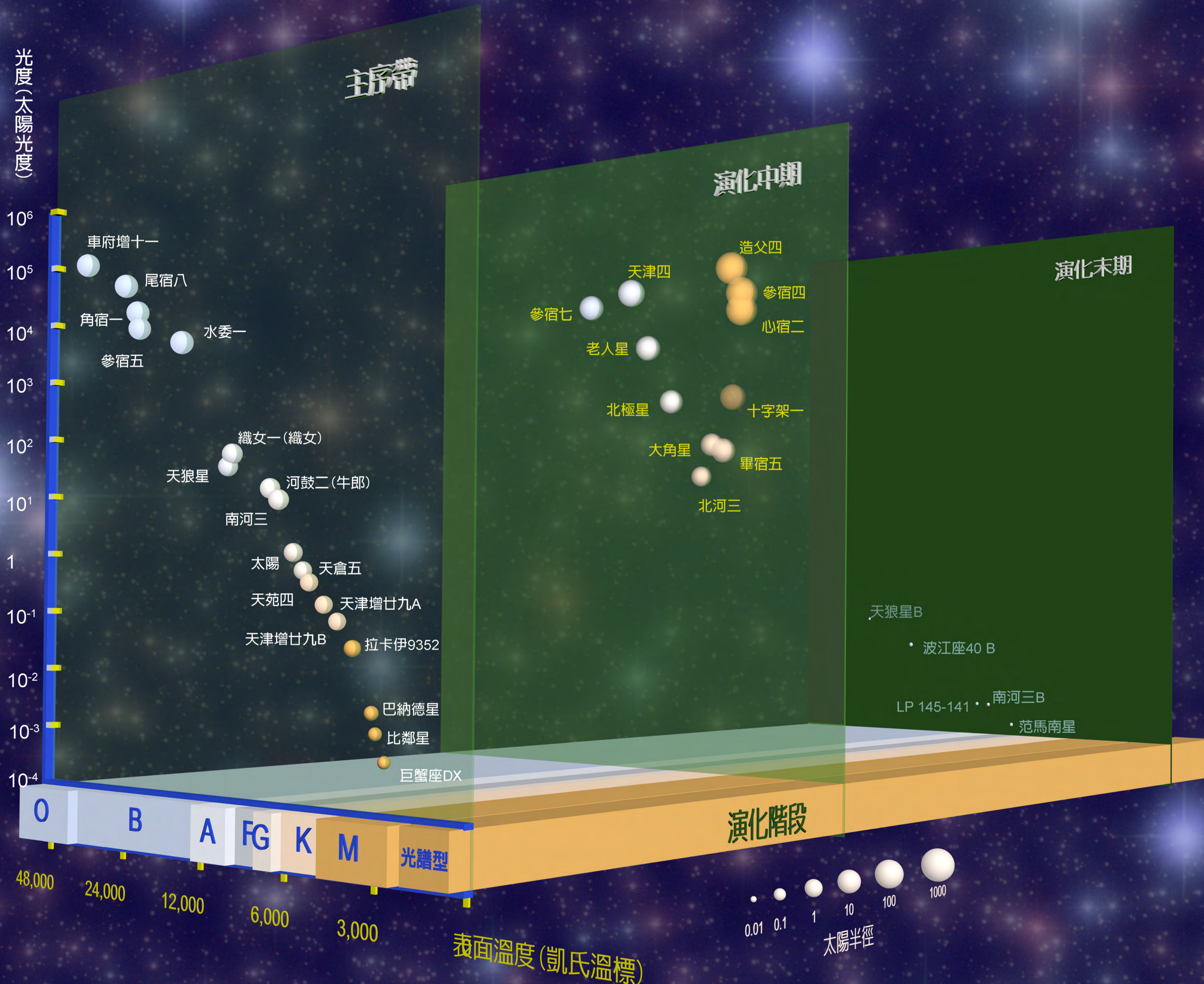
主序帶：當天文學家將眾多已知恆星放在赫羅圖上，最先被發現的現象就是圖上由左上至右下，有一條恆星連續聚集的區域。這些恆星，溫度越高的，光度越大，半徑也越大。主序帶上的恆星是演化中最穩定的過程，在此過程中氫進行核融合，轉換為較重元素，並產生熱能以抵抗自身重量。這些恆星密度接近，半徑越大者質量也越大，核融合速率越快，因此光度越大，壽命也越短。依照目前的演化模型，太陽大約可在主序帶上停留 100 億年，數十倍太陽質量的恆星在主序帶上只能停留數百萬年，而十分之一太陽質量的恆星則可能停留數兆年。夜空中許多明亮的恆星皆為主序帶恆星，包括牛郎、織女、天狼星等。

演化中期：當恆星核心中大部分的氫已經由核融合，產生其他元素時，恆星開始不穩定，而在赫羅圖中離開主序帶的位置。以質量與太陽不相上下的主序帶恆星為例，原本以氫為核心的核被氦取代；氫是氫融合的產物，繼續融合所需的溫度遠大於氫融合，於是核心暫時停止融合。失去核融合產生的熱壓力支撐，核心向內塌縮，同時釋放重力位能，讓核心外層的氫產生快速融合反應，光度遽增，同時使得恆星外圍氣體向外膨脹，降低表面溫度。反映在赫羅圖上即為向右上方的演化，成為紅巨星。著名的紅巨星包括金牛座的畢宿五與牧夫座的大角星。

演化末期：恆星演化末期，核心產生的重元素已無法繼續融合，以致無法承受自身重力而向中心塌縮。依照質量大小，恆星的末日也有不同可能。質量比太陽重十倍以上的恆星，核心塌縮的結果可能是絢麗的超新星爆炸，將鐵、鈷、鎳等元素釋放回星际物質中；最後的產物可能是中子星或黑洞，但難以在赫羅圖上決定他們的位置。質量略大於太陽的恆星，其核心塌縮的結果，是表面溫度可達上萬度的白矮星。例如天狼星的伴星，天狼星 B，因為影響天狼星的運行軌跡而被認為存在，卻因為在可見光觀測下亮度比天狼星暗近一萬倍，在假說提出二十年后才被觀測到。在 X 射線影像中，天狼星 B 反而比天狼星亮，證明他是顆表面溫度非常高的白矮星。天狼星 B 的體積只有地球大小，卻有近似太陽的質量，可以想像其密度多麼可觀。

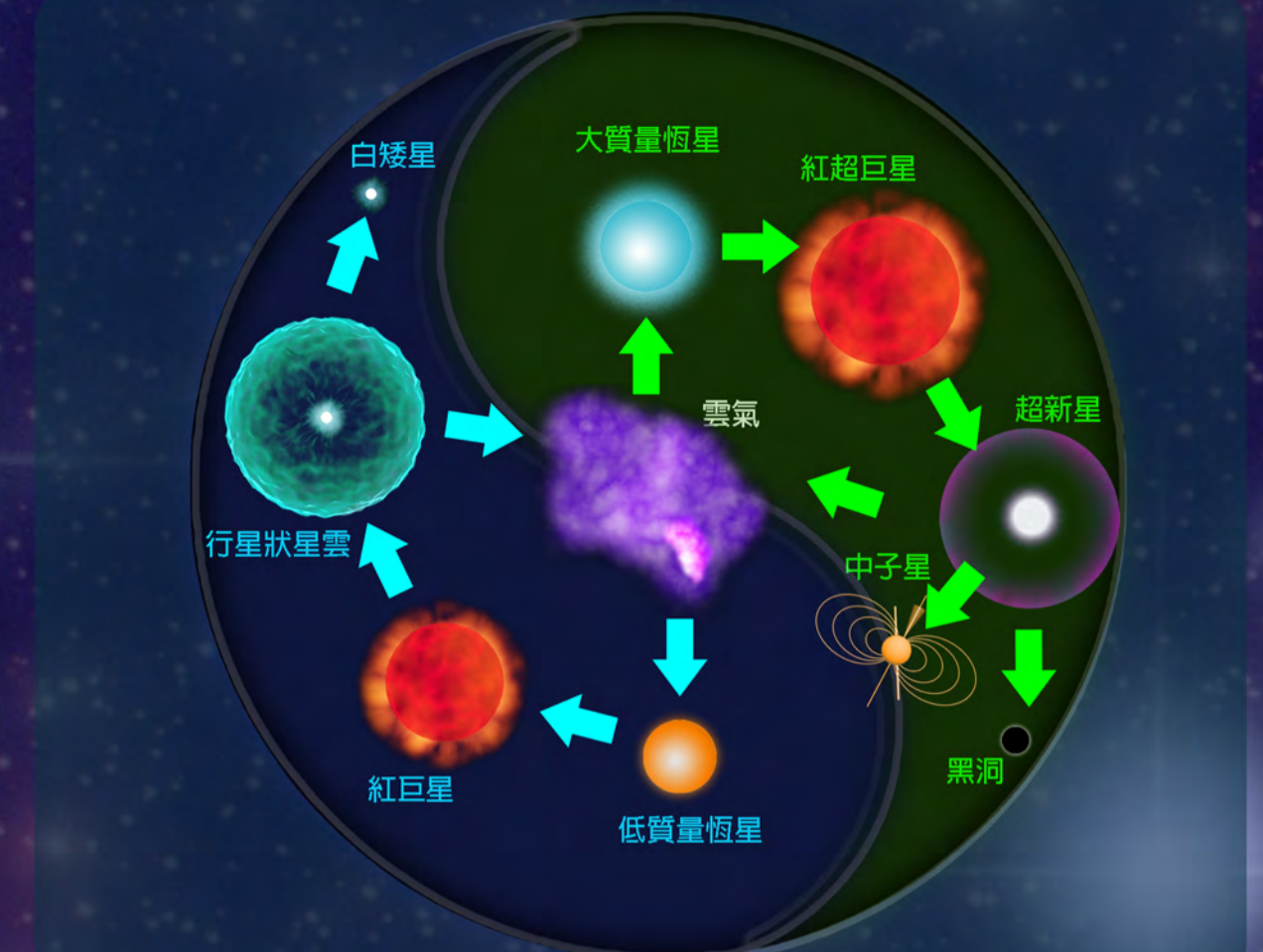
(作者 / 劉君帆)

恆星的生死簿——赫羅圖



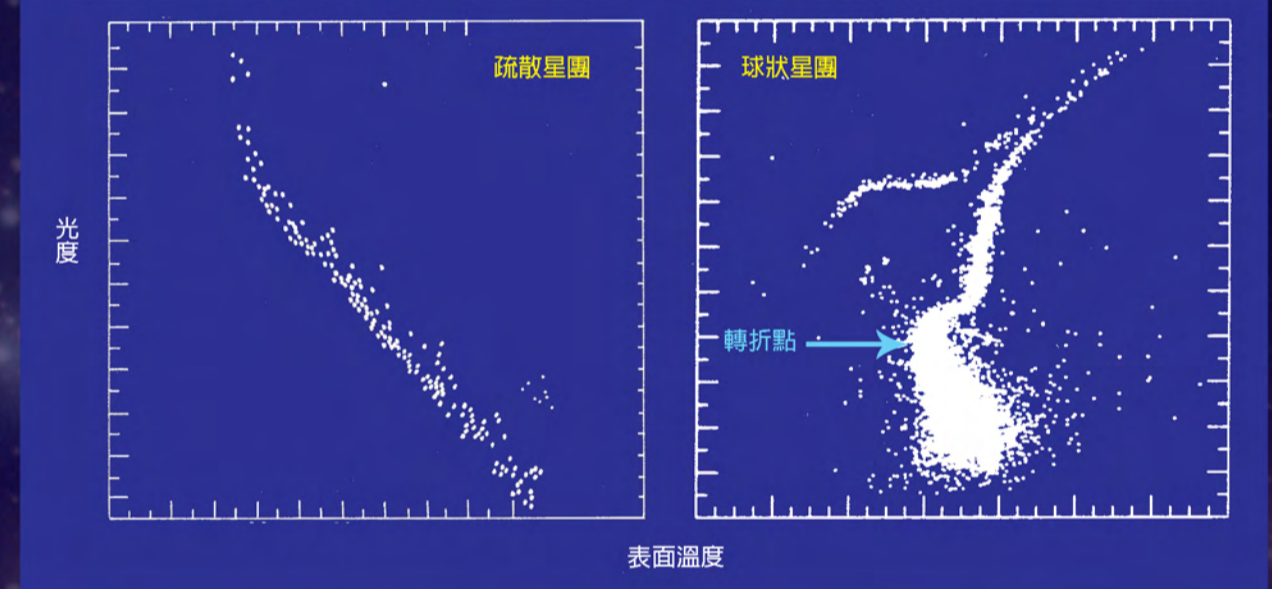
恆星形成與演化

恆星形成在一團雲氣當中，出生時的質量，會決定恆星的生命長度及演化過程。質量越大的恆星，產生能量的效率高，但也越快消耗完燃料，所以壽命短，甚至可能在一千萬年內就結束燦爛的一生；反之，質量跟太陽差不多的恆星，可以在主序帶持續發光一百億年哩！



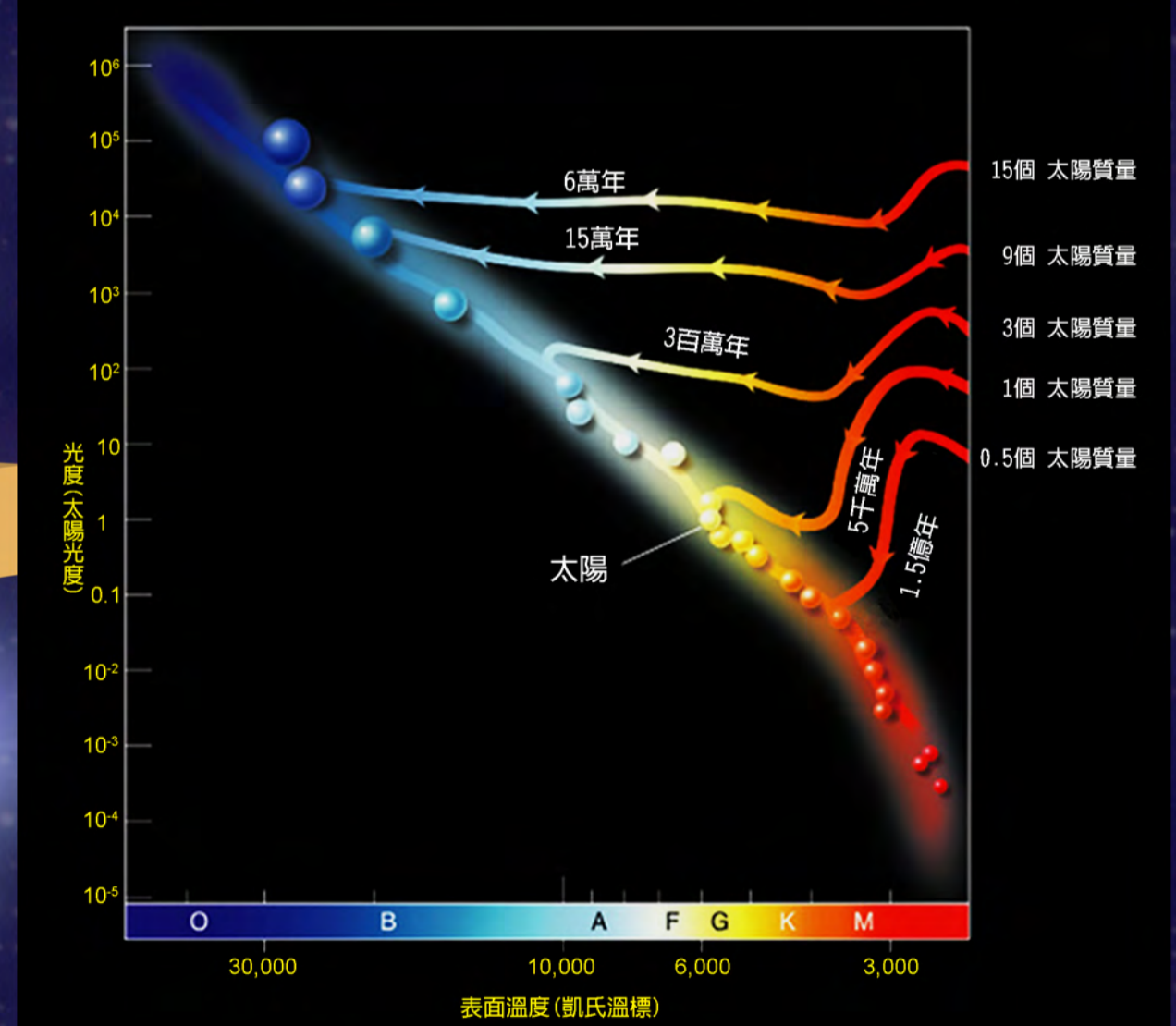
圖說：恆星都是誕生於氣體團中，大多數時間都在赫羅圖的主序帶上，靠著利用氫氣進行核融合反應來產生能量，等到消耗完核心的氫後就離開主序帶，變成紅巨星。大質量恆星最後會產生超新星爆炸，把大部分的物質拋回太空中，剩下的核心可能變成中子星甚至是黑洞。而低質量恆星則是把表面的物質拋出，變成行星狀星雲，而核心部分最後將變成暗淡的白矮星。這些被拋出的物質，將來有機會形成另一團雲氣，產生出新一代的恆星。© 中研院天文所

在同一個星團裡的恆星，理論上是幾乎同時誕生的，因此大家的年紀都差不多，但因為質量不同，而有不同的演化階段跟過程。所以如果觀察一個星團裡的個別恆星，畫出這個星團的赫羅圖，可以看出有些恆星還在主序帶上，有些質量比較大的恆星卻已經演化成紅巨星了！年紀比較大的古老星團，大多數的恆星都已經離開主序帶，演化成紅巨星，甚至走到生命的終點，變成白矮星、中子星或黑洞；反之，年輕的星團，大多數的星都還留在主序帶上。所以比較不同星團的赫羅圖，看看恆星開始離開主序帶的位置，也可以推測出星團的年紀。



圖說：左邊是年輕的疏散星團，右邊是古老的球狀星團。可以看出疏散星團大部分的恆星都還分布在主序帶上，而球狀星團已經有許多恆星離開主序帶，進入演化中期了。

那麼，在恆星內部開始點燃核融合前的「恆星質質」（又稱原恆星）階段，在赫羅圖上的分布又是如何呢？這個時期我們稱為「前主序星」，也就是恆星開始氫的核融合反應進入主序帶之前。原恆星的溫度較低，可見光很難觀測到，經由物質不斷往內部堆積加熱核心，使溫度提高到足以點燃核反應，進入了主序帶，才算真正形成恆星！



圖說：不同質量的恆星在前主序星階段如何演化進入到主序帶的示意圖。前主序星的物質持續往內塌縮，因此體積變小、亮度變暗，但溫度會因而升高，直到溫度高到足以產生氫的核融合，就算進入主序帶而成為恆星。圖中的軌跡表示從前主序星進入主序帶所需的時間。©Prof. Dale Gary of the New Jersey Institute of Technology

因此，赫羅圖可以讓我們看出恆星的一生演化，堪稱是恆星的生死簿啊！(作者 / 周美珍)



話說赫羅圖

赫羅圖是誰想出來的？

赫羅圖 (H-R diagram) 是「赫茲史普—羅素圖」的簡稱，主要由丹麥天文學家赫茲史普 (E. Hertzsprung) 與美國天文學家羅素 (H. N. Russell) 在 1910 年代分別發展出的圖衍生而來。最初赫茲史普想了解疏散星團中各個恆星的基本性質，例如表面溫度與亮度的關係，於是將星團中對應恆星表面溫度的光譜型為橫軸，恆星的視亮度為縱軸，做出單一星團的對應圖。羅素將這樣的方法擴展到不同的星團，並利用不同方法求得星團距離，得到絕對亮度與光譜型的關係圖。經過時代演進，成為現今得以顯示恆星基本性質與演化過程的赫羅圖。

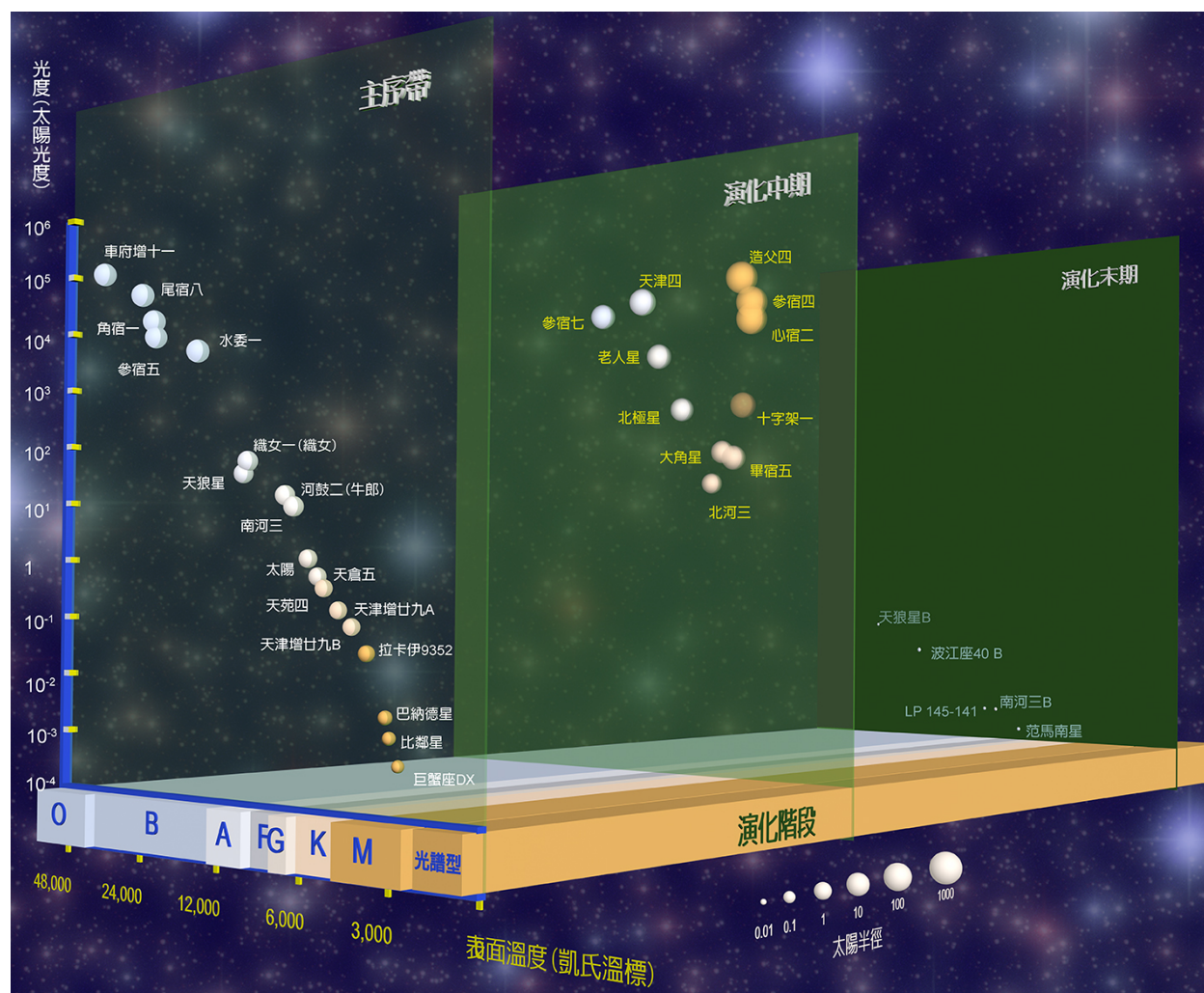
赫羅圖怎麼看？

恆星的基本性質：如溫度、光度、半徑、質量、年齡，是恆星演化理論中最需要被確定的物理量。天上繁星，我們只能從地球上觀測他們的亮度與顏色。藉由顏色，我們得以推測恆星的溫度；藉由亮度，若有距離測量值，可以推論絕對光度；藉由兩者，我們得以在赫羅圖上標定他們的位置，進而推估恆星的半徑，再由理論恆星演化模型，推測恆星的質量與年齡。訂定恆星在赫羅圖上的正確位置，一直是恆星天文學中最重要的工作。

赫羅圖的橫軸在觀測上可以用顏色或光譜型標定，在理論上對應於恆星的表面溫度。恆星是溫度與密度很高的氣態球體，我們看到的光皆為從表面發出，在此情況下，我們可以假設恆星是一個「黑體」，而黑體的顏色只跟絕對溫度有關。溫度越高，輻射最強的波長就越短。例如太陽的輻射大致上近似一個表面溫度約凱氏溫標 5778 度的黑體，在此溫度的黑體顏色偏黃。而比太陽溫度低的恆星觀測時接近橙紅色，比太陽溫度高的恆星較接近藍白色。另一方面，二十世紀初，哈佛天文台利用恆星光譜中氫與氦的吸收強度訂定恆星的光譜型，最初依照氫的吸收強度由 A、B、C、D... 依序編號。由於氫的吸收強度大致在凱氏溫標 10000 度時達到頂峰，表面溫度為此的恆星的光譜型就被訂為 A 型，譬如織女星是一顆 A0 型恆星，而太陽是 G2 型恆星。後來發現表面溫度本身是一個更基本的重要性質，於是在赫羅圖上標記的光譜型就不是順著字母排序。現今大部分的赫羅圖，就如本期所示，橫軸由左至右，恆星顏色由藍白色轉黃至橘紅，對應的表面溫度「由高至低」（轉換方式請見此網站：<https://academo.org/demos/colour-temperature-relationship/>），而光譜型也去除差異太小的類型，只留下幾種代表性的光譜型，依照表面溫度由高至低排列為「OBAFGKM」。

赫羅圖的縱軸是恆星的光度。由於赫羅圖被用於所有恆星，不同恆星之間因為距離造成的亮度差異需要被消除。由亮度求得光度，精準的距離測量就成為重要關鍵。目前本銀河系中的恆星可以經由視差法、移動星團法、或造父變星法等方法求得距離。我們常以太陽的光度為單位，如同本期赫羅圖所示。

得到恆星的表面溫度與光度，我們得以進一步推測恆星的大小。恆星的總光度隨表面積與表面溫度增高。藉由表面溫度、光度、與半徑的關係，我們發現赫羅圖中越往上方的恆星體積越大，稱為「巨星」，包括盤據圖中右上角，代表中低質量恆星演化中期的「紅巨星」；而位居下方的恆星稱為「矮星」，包括比太陽低溫且暗淡，是目前搜尋系外行星熱門選擇的「紅矮星」，以及位於演化末期，溫度極高但體積極小的「白矮星」。本期赫羅圖中，各個恆星的相對大小，以對數方式呈現，即是利用此一方法推測。



赫羅圖上的分區

我們可以依照恆星在赫羅圖上的位置，大致分為數個區域，其位置被認為與恆星演化過程息息相關。本期赫羅圖，我們選擇一些較著名的恆星作為示意。除了一般的溫度／光譜型與光度軸線，我們以不同的演化階段作為第三條座標軸。以演化階段為軸，我們得以看出赫羅圖中不同分區的意義：

主序帶：當天文學家將眾多已知恆星放在赫羅圖上，最先被發現的現象就是圖上由左上至右下，有一條恆星連續聚集的區域。這些恆星，溫度越高的，光度越大，半徑也越大。主序帶上的恆星是演化中最穩定的過程，在此過程中氫進行核融合，轉換為較重元素，並產生熱能以抵抗自身重量。這些恆星密度接近，半徑越大者質量也越大，核融合速率越快，因此光度越大，壽命也越短。依照目前的演化模型，太陽大約可在主序帶上停留 100 億年，數十倍太陽質量的恆星在主序帶上只能停留數百萬年，而十分之一太陽質量的恆星則可能停留數兆年。夜空中許多明亮的恆星皆為主序帶恆星，包括牛郎、織女、天狼星等。

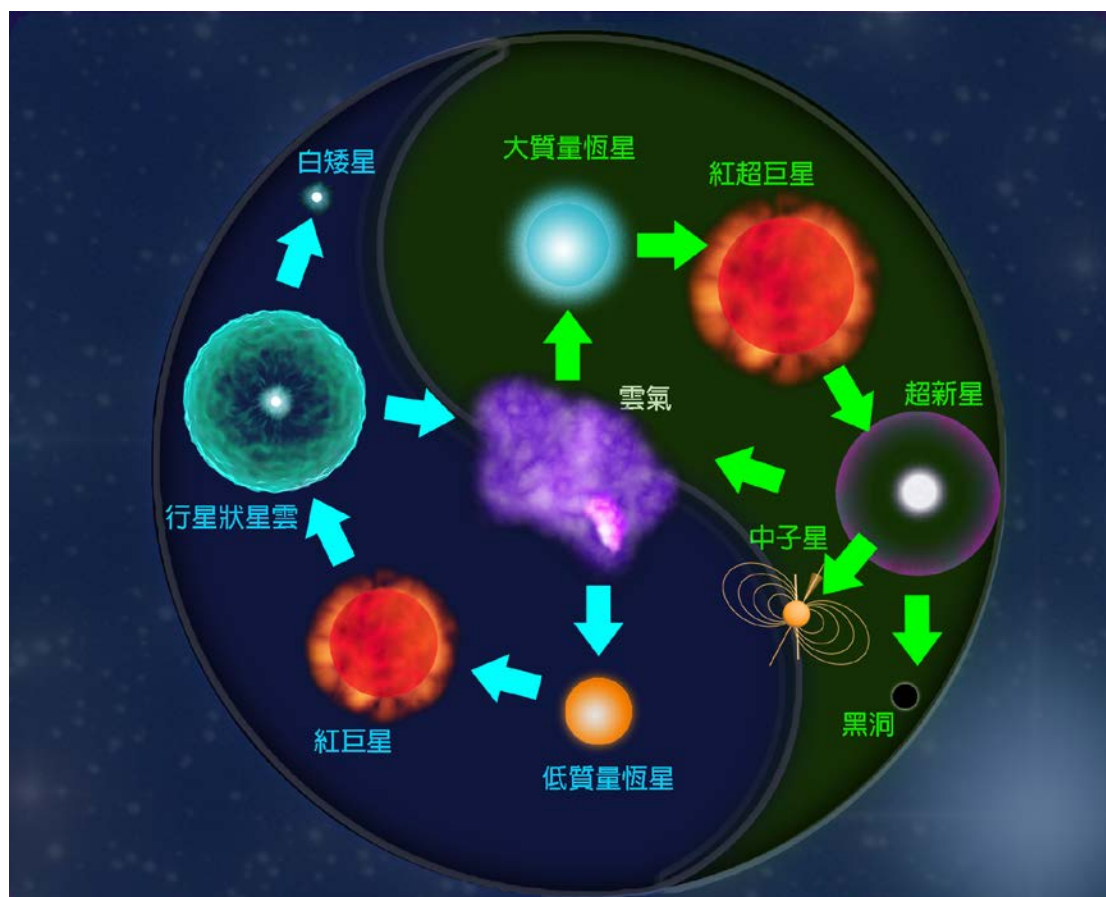
演化中期：當恆星核心中大部分的氫已經由核融合，產生其他元素時，恆星開始不穩定，而在赫羅圖中離開主序帶的位置。以質量與太陽不相上下的主序帶恆星為例，原本以氫為主的核被氦取代；氦是氫融合的產物，繼續融合所需的溫度遠大於氫融合，於是核心暫時停止融合。失去核融合產生的熱壓力支撐，核心向內塌縮，同時釋放重力位能，讓核心外層的氫產生快速融合反應，光度遽增，同時使得恆星外圍氣體向外膨脹，降低表面溫度。反映在赫羅圖上即為向右上方的演化，成為紅巨星。著名的紅巨星包括金牛座的畢宿五與牧夫座的大角星。

演化末期：恆星演化末期，核心產生的重元素已無法繼續融合，以致無法承受自身重力而向中心塌縮。依照質量大小，恆星的末日也有不同可能。質量比太陽重十倍以上的恆星，核心塌縮的結果可能是絢麗的超新星爆炸，將鐵、鈷、鎳等元素釋放回星際物質中；最後的產物可能是中子星或黑洞，但難以在赫羅圖上決定他們的位置。質量略大於太陽的恆星，其核心塌縮的結果，是表面溫度可達上萬度的白矮星。例如天狼星的伴星，天狼星 B，因為影響天狼星的運行軌跡而被認為存在，卻因為在可見光觀測下亮度比天狼星暗近一萬倍，在假說提出二十年後才被觀測到。在 X 射線影像中，天狼星 B 反而比天狼星亮，證明他是顆表面溫度非常高的白矮星。天狼星 B 的體積只有地球大小，卻有近似太陽的質量，可以想像其密度多麼可觀。

(作者/劉君帆)

恆星形成與演化

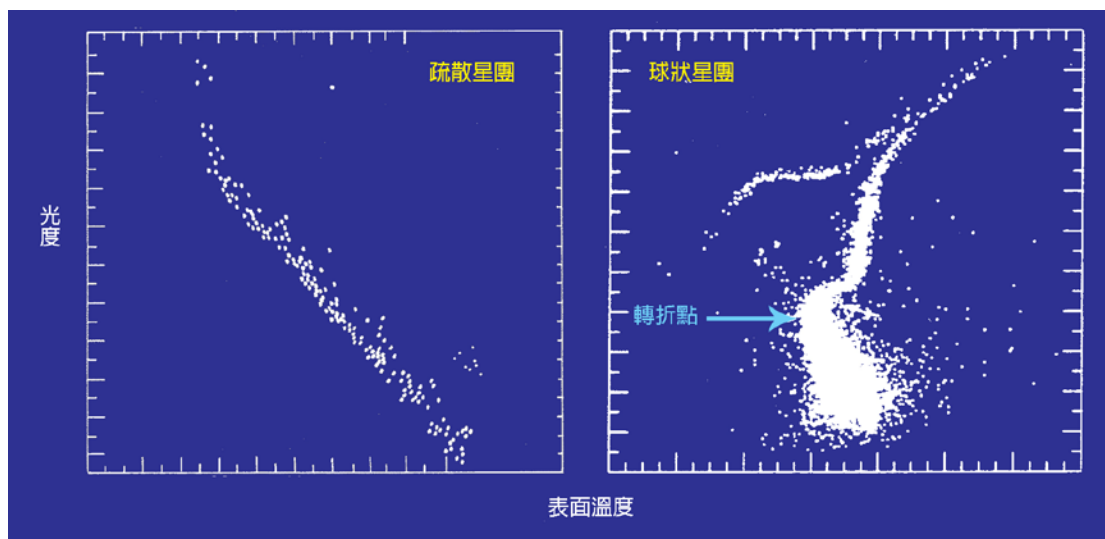
恆星形成在一團雲氣當中，出生時的質量，會決定恆星的生命長度及演化過程。質量越大的恆星，產生能量的效率高，但也越快消耗完燃料，所以壽命短，甚至可能在一千萬年內就結束燦爛的一生；反之，質量跟太陽差不多的恆星，可以在主序帶持續發光一百億年喔！



圖說：恆星都是誕生於氣體團中，大多數時間都在赫羅圖的主序帶上，靠著利用氫氣進行核融合反應來產生能量，等到消耗完核心的氫後就離開主序帶，變成紅巨星。大質量恆星最後會產生超新星爆炸，把大部分的物質拋回太空中，剩下的核心可能變成中子星甚至是黑洞。而低質量恆星則是把表面的物質拋出，變成行星狀星雲，而核心部分最後將變成暗淡的白矮星。這些被拋出的物質，將來有機會形成另一團雲氣，誕生出下一代的恆星。©中研院天文所

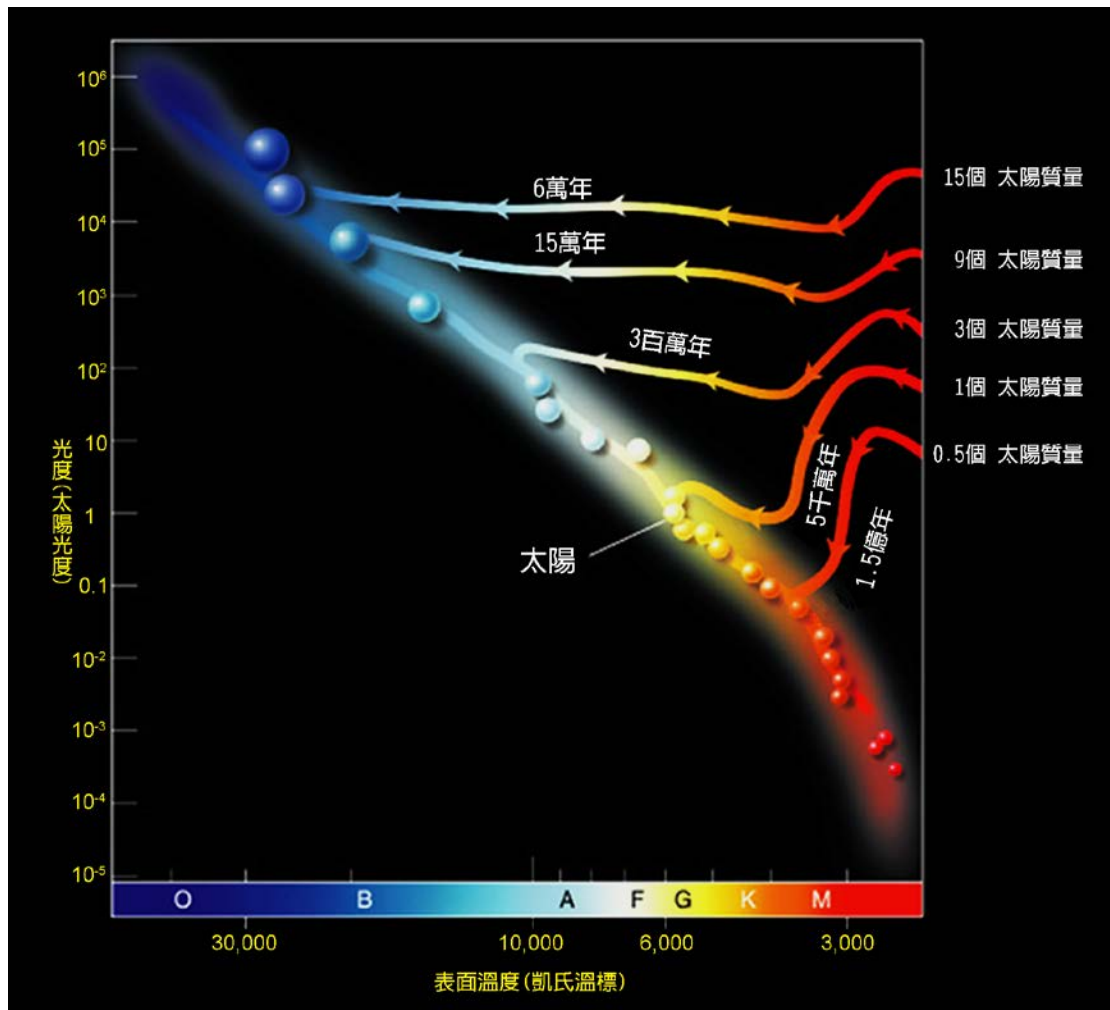
在同一個星團裡的恆星，理論上是幾乎同時誕生的，因此大家的年紀都差不多，但因為質量不同，而有不同的演化階段跟過程。所以如果觀察一個星團裡的個別恆星，畫出這個星團的赫羅圖，可以看出有些恆星還在主序帶上，有些質量比較大的恆星卻已經演化成紅巨星了！年紀比較大的古老星團，大多數的恆星都已經

離開主序帶，演化成紅巨星，甚至走到生命的終點，變成白矮星、中子星或黑洞：反之，年輕的星團，大多數的星星都還留在主序帶上。所以比較不同星團的赫羅圖，看看恆星開始離開主序帶的位置，也可以推測出星團的年紀。



圖說：左邊是年輕的疏散星團，右邊是古老的球狀星團。可以看出疏散星團大部分的恆星都還分布在主序帶上，而球狀星團已經有許多恆星離開主序帶、進入演化中期了。

那麼，在恆星內部開始點燃核融合前的「恆星寶寶」（又稱原恆星）階段，在赫羅圖上的分布又是如何呢？這個時期我們稱為「前主序星」，也就是恆星開始氫的核融合反應進入主序帶之前。原恆星的溫度較低，可見光很難觀測到，經由物質不斷往內部塌縮加熱核心，使溫度提高到足以點燃核反應，進入了主序帶，才算真正形成恆星！



圖說：不同質量的恆星在前主序星階段如何演化進入到主序帶的示意圖。前主序星的物質持續往內塌縮，因此體積變小、亮度變暗，但溫度會因而升高，直到溫度高到足以產生氫的核融合，就算進入主序帶而成為恆星，圖中的軌跡表示從前主序星進入主序帶所需的時間。©Prof. Dale Gary of the New Jersey Institute of Technology

因此，赫羅圖可以讓我們看出恆星的一生演化，堪稱是恆星的生死簿啊！
(作者/周美吟)

編輯資訊

發行人 | 朱有花。

執行主編 | 周美吟。

美術編輯 | 蔡殷智。

執行編輯 | 曾耀寰、劉君帆、蔣龍毅。

底圖版權聲明 | 人馬座內的群星，經影像處理而成。原圖版權©ESA/Hubble & NASA。

發行單位 | 中央研究院天文及天文物理研究所。

地址 | 中央研究院 / 臺灣大學天文數學館 11 樓。(臺北市羅斯福路四段 1 號)。

電話 | (02) 2366-5415。

電子信箱 | epo@asiaa.sinica.edu.tw。

天間季報版權所有 | 中研院天文所。

ISSN 2311-7281。

GPN 2009905151。

天間季報編輯群感謝各位閱讀本期內容。本季報由中央研究院天文所發行，旨在報導本所相關研究成果、天文動態及發表於國際的天文新知等，提供中學以上師生及一般民衆作為天文教學參考資源。歡迎各界來信提供您的迴響、讀後心得、天文問題或是建議指教。

來信請寄至：「臺北市羅斯福路四段 1 號 中央研究院/臺灣大學天文數學館 11 樓 中央研究院天文所天間季報編輯小組收」。

歡迎各級學校師生提供天文相關活動訊息，有機會在天間季報上刊登喔！