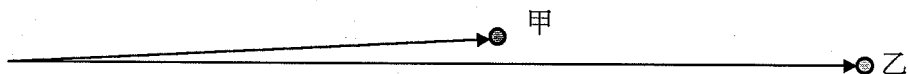


雙星漫談

傅學海
國立臺灣師範大學 地球科學系

星空中佈滿了恒星，常常會看到兩顆星星非常靠近，一般稱為雙星(double stars)，望遠鏡口徑愈大，解析力愈高，愈能將靠得很近的兩顆星星分開來。因此常常對小望遠鏡來說是單顆恒星，但對大望遠鏡來說卻是兩顆恒星或三顆恒星，甚至更多。雖然兩星靠得很近，但天文學家一直認為靠得很近的兩星彼此間並沒有關係，而是一近一遠，看過去剛好在同一視線上罷了(如圖一)。



(圖一) 甲星與乙星位於同一方向，因此看來彼此很接近

威廉·赫瑟爾(William Herschel)在 1776 年開始觀測雙星，他注意到有些雙星之間的相對位置改變了，尤其是北河二(Castor)的雙星與室女座 γ 雙星變化很明顯，而且是暗星圍繞著亮星運動，因而確定有兩星互繞的系統。為了區別這些受彼此重力影響的雙星，稱為物理雙星或簡稱雙星(binary stars，過去譯為連星)，而同方向一近一遠的雙星稱為幾何雙星。從此開展了雙星的觀測與研究。

由於習慣及為了方便，本文中之雙星是指物理雙星而非幾何雙星，慣例上雙星中的亮星稱為主星或 A 星，較暗的星則稱為伴星或 B 星。依據觀測的工具性質而將雙星分為下列幾種：

- 視雙星(visual binaries)：用望遠鏡可以看到互繞的兩星。
- 天文幾何雙星(astrometric binaries)：用望遠鏡祇能看到主星，而看不到伴星。但由主星的移動呈現波動，而知道有一顆看不見的伴星。
- 食雙星(eclipsing binaries)：由一顆星的亮度呈週期性變化，而又反映雙星互掩的性質，或稱為食變星。
- 光譜雙星：用望遠鏡祇能看到一顆星，也看不到主星的運行有何異常，但是它的光譜卻反映是雙星系統。恒星光譜的譜線由一條分裂成兩條，再復合成一條，如此週期性的分裂、復合、分裂、復合，表示兩星互繞使譜線產生這種互動，稱為「雙(譜)線光譜雙星」。而光譜的譜線只有一條，(即不會分成兩條)，但此譜線卻週期性的往左移，後再

右移、左移、右移、…如此左右幌動，因此確知定有一顆看不見的伴星繞著它轉，才會形成左右幌動的情形，因此稱為「單(譜)線光譜雙星」。

當然有些例子中，又是視雙星又是光譜雙星。但幾乎全部的光譜雙星都不是視雙星，因為要從恒星光譜譜線的偏移情形來推斷是不是雙星，必須兩星互繞的速度夠快，至少達每秒鐘一公里以上的速度(目前有些觀測精確度已提高，可以測知每秒數百公尺的譜線偏移量)，才能量出光譜譜線的偏移量，因此兩星要非常靠近才行。依據牛頓的重力理論，兩星相距愈近，互繞速度愈快，相距愈遠則互繞速度愈慢。而恒星運動速度愈快，譜線偏移愈大，便愈容易偵測。所以觀測到的光譜雙星週期大都是在數小時至數天的範圍，至多也不過數十天。

由於望遠鏡越來越精良，有些原來看不到的星星也可以被看到了，例如貝塞爾(Bessel)早在 1844 年便由天狼星的運動呈波動狀，而推斷它有一個看不見的伴星；到 1862 年望遠鏡製造商克拉克(Alvan Clark)在測試新架好的大型折射鏡時，將望遠鏡對準天狼星作為測試的對象，就看到它旁邊有一個 9.8 星等的暗星，就這樣天狼星由天文幾何雙星成為視雙星。這故事還有一個新發現，天狼 B 的表面溫度與天狼星相似，但卻比天狼星暗了一萬多倍，表示天狼 B 的體積很小，約與地球的體積差不多，密度是水的百萬倍，正是天文物理學家所預測的白矮星，天狼 B 因而成為第一個被發現的白矮星。

最近十多年來，由於天文光學干涉技術及調適光學(adaptive optics)的進展，突破了大氣擾動的限制，大大提高了雙星觀測的精確度，使得許多光譜雙星也成為視雙星，例如開陽。

雙星觀測有其重要性，因為恒星質量祇能由雙星觀測中得到，利用其他方法推得的恒星質量都屬概略值。恒星的質量在天文物理中非常重要，它關係著恒星的光度、演化過程、生命期的長短、…等等。

如果兩星球質量分別為 m 與 M ，而且 m 遠比 M 小很多時(如地球繞太陽的情形)，情況就比較簡單，如果小星球 m 是以圓形軌道繞大質量星球 M ，則是最簡單的例子了，具有高中甚至國中物理程度的人應該能了解下面的推論。

兩星球之間的重力為 GmM/r^2 ， r 是兩星球間的距離，而 G 是重力常數。小星球 m 繞大星球 M 的向心力為 mv^2/r ，其中 v 為小星球 m 繞大星球 M 的速度。兩星互相吸引的重力等於向心力，也就是說

$$\frac{GmM}{r^2} = \frac{mv^2}{r}$$

即

$$\frac{GM}{r} = v^2 \quad (1)$$

因爲小星球是以等速率繞大星球做圓周運動，所以圓運動的週期 T 可由下式得之。

$$T = \frac{\text{軌道圓周長度}}{\text{運動速率}} = \frac{2\pi r}{v}$$

$$\therefore v = \frac{2\pi r}{T}$$

將上式代入(1)式中，得

$$\frac{GM}{r} = \frac{4\pi^2 r^2}{T^2}$$

$$\frac{r^3}{T^2} = \frac{GM}{4\pi^2} = \text{定值}$$

這也就是著名的刻卜勒行星運動第三定律，表示「行星軌道半徑的立方」與其「週期的平方」成正比，將其換成兩恆星互繞的情形，依然適用。如果 m 與 M 的數值大小差不多，且軌道是橢圓形，則上式須修正爲

$$\frac{a^3}{T^2} = \frac{G}{4\pi^2} (m + M)$$

，其中 a 爲橢圓軌道半長軸。

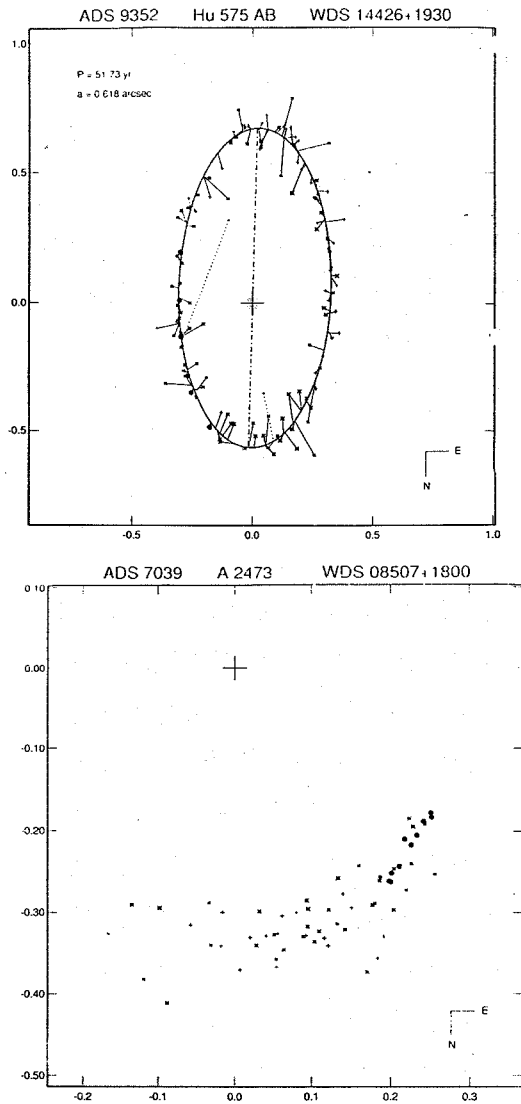
因此如果能觀測到雙星互繞的週期及其軌道半長軸，便能知道雙星系統的總質量($m + M$)。如果能配合其他觀測，獲得兩星質量的比值(即 m / M)的大小，就能分別算出兩星的質量。說來簡單，實際過程還挺複雜的，不過這些就交給專家去做好了。

其中，雙星系統互繞的週期與軌道半長軸可由觀測直接獲得。一般人會說，這還不容易，去看就是了，看雙星多久繞一圈，觀測伴星繞主星一圈的軌道，就大功告成了。

話是不錯，但麻煩的是使用傳統的光學觀測方法，受到大氣擾動的影響，只能觀測到兩星相隔約 $1''$ (一圓周是 360° ， $1^\circ = 60'$ ， $1' = 60''$) 以上的雙星系統，因此幾乎無法觀測兩星相距 $1''$ 以內的雙星系統。這也就是爲什麼以往只能觀測兩星分隔較遠的雙星系統，而兩星相距較遠，也就表示較長的週期。傳統光學觀測所得到的雙星週期大都在數百年至數千年間，而天文學家觀測雙星不過兩百多年，大量現代化的觀測也不到一百年，絕大多數的伴星到目前爲止只在整個軌道中運行了一小部份，只有那些分隔得較近且運行週期短於兩百年的雙星系統才能觀測到完整軌道，去推算出比較精確的恆星質量。法國的庫提(Couteau)是雙星觀測中的大師之一，在 1978 年出版的書中也祇列出 48 對雙星質量值得信賴的雙星系統。

直到 1970 年代以後，由於天文光學干涉技術的進展，突破了地球大氣擾動的限制，使望遠鏡能達到理論應有的解析度，例如口徑四公尺的望遠鏡應該可以解析相距 $0.03''$

的兩顆星，但由於地球大氣的擾動使星點幌動而呈現直徑約 1" 的盤面，只能看一大團圓盤而不能看出其中的細節。不同的天文光學干涉技術克服了這方面的困難，例如利用極短時間曝光、瞬間凍結影像之散斑干涉技術(圖二)，或採用相隔數十公尺的兩具望遠鏡同時觀測同一雙星系統(圖四)……等等。



圖二：(上)雙星系統 ADS 9352，已觀測足夠的數據，可以計算其伴星繞主星之週期為 51.73 年，軌道半長軸為 0.62"。

(下)雙星系統 ADS 7039，累積至 1994 年的觀測數據，仍不足以推算雙星的軌道與週期。

圖中黑色實心圓為天文散斑干涉技術所得到的結果，其餘為傳統光學方法所觀測的結果，清楚顯示散斑干涉技術大幅度提高了雙星觀測的精確度。

爲了發展星戰(Star War)武器，瞬間辨識並擊毀繞地球之殺手人造衛星，美國空軍在1980年代中期發展調適光學，結合快速運算的電腦、雷射、與可以調整起伏的鏡面，掃除了大氣的擾動，充分發揮望遠鏡應有的解析度。調適光學的基本原理是利用點光源(缺少點光源時，用雷射打到高空大氣創造點光源)偵測大氣狀況，伴隨大氣擾動的方位調整鏡面，將受到大氣擾動的星光路徑加以增減，彌補大氣的干擾，使受到大氣擾動得影像還原。由於天文光學干涉技術的進展，突破了地球大氣擾動的限制，使望遠鏡能達到理論應有的解析度。過程包括偵測大氣狀況到計算擾動的程度，再調整望遠鏡鏡面起伏而完成一幅影像，整個過程必須在百分之幾秒內完成，然後一幅幅累加，便得到清晰銳利的影像。

如此，突破大氣擾動的影響，可以精確觀測兩星間距小於1"的雙星系統，許多光譜雙星現在都成了視雙星，而且也新發現許多相距小於1"的雙星。使得軌道週期爲數十年至數百年的雙星數量快速增加，可靠的恆星質量數目也增加了許多。

經過統計太陽附近的恆星，發覺雙星系統的數量超過50%，甚至有些研究案例達80%，顯示雙星是普遍的現象，單顆恆星(例如我們的太陽)倒是屬於少數。因此雙星的形成與演化、雙星系統的穩定性、...等探討正蓬勃發展中。依據兩星彼此接近的程度區分爲三類：

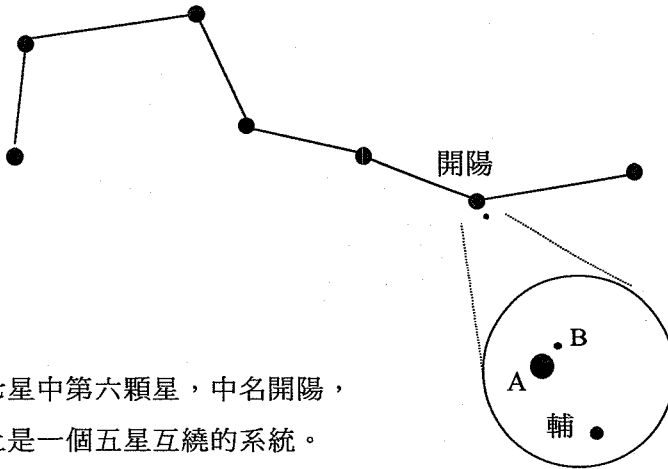
- (一)分離雙星：兩星相隔甚遠，彼此都是獨立的星體。
- (二)半接觸雙星：兩星相隔很近且雙星之一進入紅巨星階段，膨脹的紅巨星外層越過兩星間重力平衡的範圍，因此紅巨星的物質流入另一星中。
- (三)接觸雙星：兩星相距很近，而且兩星半徑都超過彼此的重力平衡範圍，因而彼此的物質相互交流，或像雙蛋黃一樣共用一個大氣。以往雙星觀測只能直接觀測到分離雙星，對於半接觸雙星與接觸雙星，是分析其光度曲線或光譜間接推論其狀態。但光學干涉陣列或調適光學已能提供直接觀測接觸雙星的可能性，將會對雙星間物質交流或恆星物質流失的情形有突破性的進展。

讓我們來看看具有代表性的雙星觀測實例：北斗七星中第六顆「開陽」(Mizar)、大陵五(Algol)與天琴座 β 星，藉著實例可以了解天文學家如何進行雙星觀測與研究，以及最近的進展。

開陽(Mizar)：大熊星座 ζ 星

開陽是北斗七星中的第六顆，中文名稱爲開陽，西文名稱爲米薩(Mizar)；Mizar源自阿拉伯字，是腰帶的意思。它旁邊有一顆名爲「輔」(西名Alcor)的暗星，常是觀星同

好測試眼力的對象，視力正常的人很容易看到暗淡的「輔」星，但是視力不好的人就無法看見了。即使透明度低的望遠鏡，也可以看到開陽附近還有一顆星等為4.0的伴星，這顆伴星比「輔」還近。開陽是第一個被發現的雙星，雷賽奧立(Riccioli)在1650年已經觀測到。此後，德國的克齊(G. Kirch)和他的妻子於1700年，英國的貝德雷(Badley)在1755年都分別觀測並留下紀錄。三百多年來，開陽成為最出名的雙星。開陽雙星不但是第一個被觀測到的雙星，也是第一對被攝影存證的雙星，是哈佛天文台的邦德(Bond)在1857年攝得的。兩星相距約為380 AU，也就是「太陽與地球之平均距離」的380倍。開陽本身的光譜類型為A2，表面溫度約為10000°C，光度約為太陽的七千倍，距離地球約88光年，以每秒88公里的速度接近我們。較暗的伴星光譜類型為A7。貝德雷在1755年測量開陽雙星，發現伴星(B)與主星(A)的連線與正北方的角度為143度，目前已變大成151度，也就是說伴星在過去200年間，繞主星轉了8度的角度，這樣推論，約需好幾千年才能繞完一周。



圖三：北斗七星中第六顆星，中名開陽，實際上是一個五星互繞的系統。

開陽本身也是第一個被偵測到的光譜雙星，皮克林(Pickering)在1889年發現開陽光譜的譜線會分裂成兩條、再復合，呈週期性的變化，顯示它本身是一對非常靠近的雙星，只是兩星太接近了，即使用世界上最大的望遠鏡也無法解析，祇能由光譜譜線的週期性變化判斷是雙星系統。由成對譜線的強度幾乎一樣，表示兩星有相同的光度，各別是太陽的35倍。兩星互繞的週期是20.5386天，因此可由此推算出兩星相距約三千萬公里，軌道離心率為0.53，表示是非常橢圓形的軌道。

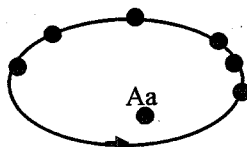
至於開陽雙星中的伴星B，後來發現也是光譜雙星，其視線速度早在1908年便被佛羅斯特(Frost)測出。這一對雙星互繞的週期是175.55天。但天文學家去測伴星相對於主星A的運動情形，發現伴星B有1350天週期性波動的情形，表示本身為光譜雙星系統的B星同時還有一個伴星開陽C。

總結來說，開陽是一個五星互繞的系統(見表一)。小望遠鏡可以同時看到開陽A與開陽B，開陽A本身是光譜雙星系統(週期為20.5386天)，而開陽B本身也是一對光譜雙星(週期為175.55天)，同時另有一顆看不到的開陽C以1350天的週期繞著開陽B，使得開陽B繞開陽A的軌跡呈波動狀。

開陽 (開陽A與開陽B相距380AU)				
開陽A (1889年發現是光譜雙星) (Aa與Ab互繞週期20.5386天)		開陽B (1908年發現是光譜雙星) (Ba與Bb互繞週期175.55天)		開陽C (繞開陽B轉，週期1350天)
開陽Aa	開陽Ab	開陽Ba	開陽Bb	

表一：開陽是一個五星互繞的系統

由於光學干涉技術日漸成熟，大大提高了觀測的解析度。美國海軍天文台與海軍研究實驗室在美國阿里桑那州設立了光學干涉儀，用來測量雙星，使一些過去無法直接以望遠鏡看到的光譜雙星一一顯現，將原是光譜雙星的開陽A顯形為兩星，而且能精確的追蹤其運行軌跡(如圖四)。



圖四：光學干涉技術將光譜雙星開陽A分解成視雙星Aa與Ab

大陵五食變星

食變星是兩顆恆星彼此互繞的雙星系統，當延著兩星互繞的軌道平面看過去時，有時一顆星會被另一顆星遮掩，這種情形發生時，總亮度便變暗了，直到彼此通過不再遮住對方為止。其中又依據光度變化的型態分為大陵五型、天琴座 β 型、大熊座W型、...

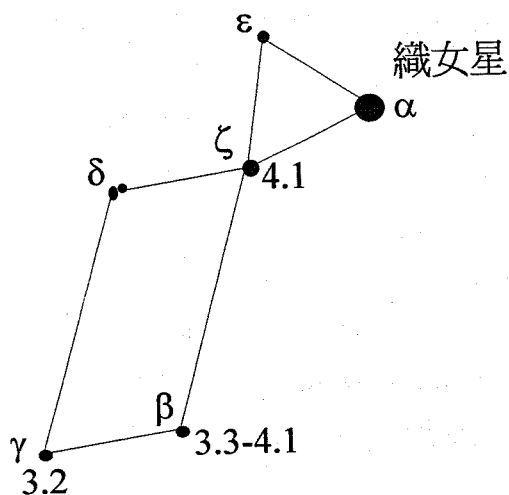
第一個被確認的食變星是英仙座的 β 星，中文名稱是大陵五。中世紀阿拉伯人稱它為「煞眼的惡魔」，在希臘神話中是蛇髮女妖的頭。蛇髮女妖的名字是阿古爾(Algol)，任何生物看到蛇髮女妖都會變成石頭，當時一位公主(即仙女星座)被網鎖在海邊要獻給海怪，就在千鈞一髮時，英仙趕到，拿著砍下的蛇髮女妖頭廬展現給海怪看，海怪一看之下立刻化成石頭，因此救了公主。

大陵五星等為2.1，最先在1669年被一位義大利數學教授蒙唐雷(Geminiano Montanari)看到光度變化，後來也有人證實它偶然會變暗，但是直到1783年，年輕的英國天文學家古德列克(John Goodricke)才確定它的光變週期為68.75小時，而且提供兩個解釋說明大陵五週期性的光度變化。一是恆星表面有黑斑隨恆星自轉而使亮度週期性變化，另一是有個較暗的伴星圍繞而週期性的遮掩它。1889年佛果(H. G. Vogel)藉著光譜觀測，發現譜線呈現週期性的偏移，證實大陵五是個食雙星。大陵五雙星互掩的週期為2.86739天，被食時會暗至3.4星等，整個食的過程約十小時，由大陵五的光變曲線來看，發覺兩星在沒有遮掩時的總亮度有輕微的起伏，表示兩星靠得太近，彼此的重力相互拉扯，使得相對的方向較為突出成蛋形。

大陵五雙星系統的質量分別是太陽的3.7倍的主序星與0.8倍的巨星。從恆星演化的觀點來看，質量較大的恆星很快進入演化末期而成為巨星，質量較小的恆星壽命較長而留在主序星的階段。大陵五剛好與理論相反，質量大的主星反倒在主序星，而質量小的伴星卻已演化成巨星，這種情形最使得早期研究大陵五的天文家非常困惑，稱為「大陵五矛盾」。現在使用雙星系統的演化過程來解套，如果雙星系統中的兩星靠得太近，則其中重質量恆星演化到末期時，體積膨脹成巨星，當巨星表面膨脹超過了兩星間的界限，巨星表面的物質便會流進質量較小的恆星，最後原來質量小的主序星吸附流進來的物質成為大質量的主序星，而原先是重質量的巨星因為流失質量而成為質量較小的巨星。

緊密雙星系統的分類與演化過程，是目前天文學的熱門題目之一，而大陵五(型)食變星只是其中比較單純的系統。

天琴座 β 星



天琴座 β 星是一個明亮而奇妙的食雙星，非常適合專家與業餘者觀測，因為它明亮到用肉眼便能直接觀測，而其行為又複雜到天文學家還不完全了解。英國的古德列克在1784年首先發現它是一個變星，此後它一直是被觀測的對象。

天琴座 β 星位於織女星附近，很容易找到，可以利用 γ 星與 ζ 星來估計 β 星的亮度，它最亮時的星等是3.2，幾乎與 γ 星一樣亮，最暗時又與4.1星等的 ζ 星差不多亮。它的光變週期在1784年古德列克觀測時是12.89天，目前約為12.94天。顯然的，此一雙星系統的軌道週期在緩慢的增加中，是因為天琴座 β 是一個彼此有交互

作用的半接觸雙星，其主星的物質不斷的傳輸到伴星中，使得兩星的質量配重稍有變化，而影響到繞動的週期。

在天琴座 β 的光譜上可以發現很強的發射譜線，表示有氣體環繞著恆星，其中矽(Si IV)、碳(C IV)、氮(N V)等高度游離的譜線表示其氣體游離的溫度比恆星的溫度高。另外由吸收譜線的偏移量，可以計算出物質以每秒200-400公里的速度離開此雙星系統。系統中較亮的主星光譜類型為B7或B8，質量大約是太陽的兩倍。伴星雖然看不到，但是它的質量卻可能是太陽的12倍。

天琴座 β 屬於彼此有交互作用的雙星系統，伴星周圍環繞著像甜甜圈一樣的星雲，因此無法直接觀測到被籠罩著的伴星。但是伴星發出的光，透過甜甜圈狀星雲空心區照射在瀰漫的雲氣上被反射出來，便可以藉著反射光間接研究伴星的各種性質。天文學家相信天琴座 β 系統持續下去，有一天會停止質量的傳輸而成為大陵五型變星。

每年的六月至九月是觀測天琴座 β 星的最好時段，目視觀測方法如下：以 γ 星與 ζ 星為參考星，用肉眼或雙筒望遠鏡觀測 β 星，將其亮度分為五等。

- (1) 亮度與 γ 星(3.2等星)一樣
- (2) 亮度比 γ 星暗一點

- (3) 亮度在 γ 星與 ζ 星之間
- (4) 亮度比 ζ 星亮一點
- (5) 亮度與 ζ 星(4.1等星)一樣

如此，星等的精確度約為0.2星等。也可以使用另一種方法，將 γ 星與 ζ 星兩參考星的亮度差分為9等分，再觀察 γ 星與 ζ 星亮度之比例，例如 $\gamma_3 : \zeta_6$ ， $\gamma_4 : \zeta_5$ ， $\gamma_1 : \zeta_8$ ，...。
 $\gamma_3 : \zeta_6$ 表示 β 星比 γ 星暗0.3星等，比 ζ 星亮0.6星等，所以 β 星為 $3.2 + 0.3 = 3.5$ 星等
 $\gamma_4 : \zeta_5$ 表示 β 星比 γ 星暗0.4星等，比 ζ 星亮0.5星等，所以 β 星為 $3.2 + 0.4 = 3.6$ 星等
 $\gamma_1 : \zeta_8$ 表示 β 星比 γ 星暗0.1星等，比 ζ 星亮0.8星等，所以 β 星為 $3.2 + 0.1 = 3.3$ 星等
等到有經驗以後，當可判斷至0.1星等的精確度。但是天琴座 ζ 實際上是兩顆星(ζ^1 為4.36等星、 ζ^2 為5.73為等星)，用眼睛直接觀測時無法分辨兩星，其綜合星等為4.1，但使用雙筒望遠鏡觀測時，把雙筒望遠鏡架穩，可以看到 ζ^1 與 ζ^2 兩顆星，要留意兩者的差異。在此呼籲各地有興趣的天文同好，如觀測到，請將觀測數據(含觀測日期與時刻，時刻要依據報時台校準)寄至

台北市郵政97-33號信箱 傅學海

待收集到足夠數據，分析後，結果將登錄在網路上，並寄給所有提供觀測數據者。

參考文獻：

- Paul Couteau, (1981), *Observing Visual Double Stars*, (英譯本, 譯者 Alan H. Batten), The MIT Press
- Robert Burnham Jr., (1978), *Burnham's Celestial Handbook: An Observer's Guide to the Universe Beyond the Solar System, Vol. 3*, Dover Publications, Inc., New York)
- Dorrit Hoffleit, (1982), *The BRIGHT STAR CATALOGUE*(fourth revised edition), Yale University Observatory
- Hummel, C. A.; et al.(1995) *Orbits of Small Angular Scale Binaries Resolved with the Mark III Interferometer* , *Astronomical Journal* v.110, p.376
- Icko Iben Jr. And Alexander V. Tutukov, (1998), *The Life of Binary Stars : From Birth to Death and Beyond (Part II)* , 1998年1月的*Sky & Telescope*雜誌
- Michael Seeds, (1994), *Foundation of Astronomy*, Wadsworth, Inc.
- 1993年6月與1994年6月的*Sky & Telescope*雜誌 (有關天琴座 β 星)
- WWW網址 <http://antwrp.gsfc.nasa.gov/apod/ap970219.html> (有關開陽雙星)