

從古希臘的依巴谷到近代的依巴羅斯天文衛星

傅學海
國立臺灣師範大學 地球科學系

科學家藉著分析天體所發出的光來了解宇宙的種種，如何觀察天體所發出的光呢？基本上是測量它們的位置、亮度與光譜。例如刻卜勒分析行星在不同時間的位置，歸納出行星運動的法則；哈伯分析星系的光譜而得到宇宙正在膨脹的結論。小至恒星的演化，大至宇宙的結構，都可以藉著觀測天體的位置、亮度與光譜來探討。其中測量天體位置與亮度的歷史，可是淵源流長，已有兩千多年的記錄。從古代的希臘、中國，一直到目前的哈伯太空望遠鏡、依巴羅斯軌道天文台，都進行這基本而重要的天文觀測。

依巴谷(Hipparchus)是西方天文史中第一位繪製星圖星表的人，而依巴羅斯(Hipparcos)天文衛星是歐洲太空總署在 1989 年發射昇空的軌道天文台，全名是高精度視差精準衛星(High Precision Parallax Collecting Satellite)，取其全名中部份字頭組成 Hipparcos，所以簡稱依巴羅斯。由於伊巴谷與依巴羅斯的發音相近，所以其中也有紀念依巴谷的意義。

依巴谷是西元前二世紀的數學家、哲學家與天文學家，他是希臘 Nicaea 地方的人，畢生從事天文觀測，獲得許多了不起的成果，此處列舉三項天文學方面的成就。

(一)精確測量回歸年的長度

回歸年是春夏秋冬循環的周期，從古便受到天文學家與朝廷的重視，如何精確測量回歸年的長度便成為古代天文測量的重心之一。依巴谷測得回歸年的長度為 $(365\frac{1}{4} - \frac{1}{500})$ 日=365.2477 日，相當接近目前的測量值 365.2422 日，誤差約 6 分鐘。在兩千多年前缺乏精密儀器的時代，真是難能可貴。

(二)繪製星圖，編製星表

西元前 34 年依巴谷觀察到在天蠍座的一顆星星，他認為是新生的星星，促使他測量天空中恒星的位置與亮度，留下了一份含有 1080 顆恒星的星表。他將恒星的亮度劃分為六個等級(class)，全天最亮的二十顆恒星為第一等級的「明星」，最暗的則屬第六等級。托勒密(Ptolemy)於西元 150 年左右出版之「天文學大成」(Almagest)中繼承了這個觀念，將全天可見的恒星之亮度分為六個星等(magnitude)，延用至今。

(三)發現歲差一歲自為歲，天自為天

依巴谷將自己測得的恆星位置，與亞里斯提(Aristille)及提摩伽略斯(Timocharis)在西元前三百年左右所測量的結果比較，發現了歲差的現象，並定出歲差的數值。天體座標有如地球表面的經緯度，地表經度起點是以通過英國格林威治天文台(現已遷離)的經度為零度。而天球座標的起點是春分點，這是黃道與天球赤道的交點。依巴谷發現春分點並不是固定的，而會移動，每年移動約 $51''$ ，這現象稱為歲差(Precession)。我國也在西元 330 年左右發現同樣的現象，東晉的虞喜測出當時冬至點與古籍所記載的不同。中國古代認為太陽在群星中沿著一定的軌跡(黃道)移動，一年繞天一周，而曆法上定義太陽從黃道上的冬至點繞行一圈又回到冬至點的時間長度稱為一歲。因此認為太陽運行一周天的時間與一歲的長度是相同的。但是虞喜卻發現冬至點並不是固定不動的，而是有些微的移動；也就是說，當太陽每天在群星間由西向東移動時，冬至點也正每天由東向西反向移動著(雖然移動量很微小)，所以太陽又回到冬至點時，並沒有回到原來的地方，而是差了一點點，因此虞喜得出「歲自為歲，天自為天」的結論，表明太陽從冬至點出發又回到冬至點的一歲(又稱為回歸年)，與太陽繞天一周不同，兩者差了一點點，這個「冬至所在，歲歲微差」的現象被稱為「歲差」，比依巴谷在西元二世紀時的發現晚了約四百多年。

歲差很重要，所有的天體座標換算至不同年代時，都必須進行歲差的修正，否則無法確定天體在不同年代的座標。牛頓力學興起後，了解地球像轉動中的陀螺一樣，自轉軸會繞著垂直軸線擺動(如圖一)，這種現象物理學稱為「進動」(Precession)，幾乎所有天體都有進動現象，地球的進動稱為「歲差」。由地軸每年移動約 $51''$ ，可知轉動一圈約 25800 年。既然歲差現象為地球自轉軸的擺動所產生，則可以利用地球自轉軸所指的方向，來做為考古的依據。地球自轉軸所指的方位稱為「天北極」，而最靠近天北極的亮星便稱為北極星。天北極在我國古時也稱為「北辰」。論語為政篇：「為政以德，譬如北辰居其所，眾星拱之」，便是藉用天象解說為政之道，以德率眾，就像天北極位處中心不動，而群星圍繞著它運行。檢驗古代星圖的天北極或北極星便能確定這份星圖製作的年代。埃及金字塔的中央是法老的陵寢，透過其中的管道可以看到當時的北極星，由於歲差現象，天北極已隨時日移轉，由陵寢管道望出去已看不到當時的北極星了，由偏差的程度可以推論金字搭建的大致年代。

依巴谷留下的星圖星表成為西方天文學的寶貴資產，以後許多天文學家更精確的測量恆星、行星及其他天體的位置。在望遠鏡發明以前，丹麥的第谷(Tycho Brache)辛勤觀測，留下當時最精確的恆星與行星位置。德國的刻卜勒(Kepler)便耗費十幾年分析第谷觀測行星的數據而得到著名的刻卜勒行星運動三定律。

望遠鏡發明後，天體位置的測量愈趨精確。哈雷證明彗星祇不過是繞太陽運行的天體，他在 1676 年只是 20 歲的青年，攜帶望遠鏡遠赴南半球的聖赫拿島進行恒星位置的觀測，到了 1678 年回英國後，提出 381 顆恒星位置的星表，使他在 22 歲時便名聞遐邇。到了 1717 年，哈雷將自己測定的恒星位置與托勒密「天文學大成」中的數據加以比較，發現許多恒星彼此間的相對位置有變化，其中天狼星、大角星與南河三的變化最明顯，因此確定恒星並不是固定不動的，而是各有自己本身的運動，稱為「自行」(proper motion)，這個名詞打破了兩千多年來的想法，並改變了恒星的原始定義。

恒星(Star)一詞來自古希臘，任何人祇要願意觀察夜空中的恒星，都很容易觀察到星星都繞著天北極作圓周運動，而且一天繞天一周，永不止息，這也便是易經上說的「天行健，君子以自強不息」，藉著天象鼓勵君子奮發，永不止息。星星雖然都繞著天北極作圓周運動，但是星星彼此間的相對位置並不改變。例如北斗七星雖然繞著天北極轉動，但北斗七星的形狀卻是不變的，就好像是嵌在傘面上的亮片，雖然傘面轉動，但嵌在其上的亮片本身並不會在傘面上移動，因為亮片是固定在傘面上的，因此亮片間的相對位置(亮片構成的圖案)並不會改變。古希臘人認為星星便是嵌在一個巨大而透明的天球上，天球轉動而帶動其上的星星跟著轉動，因此稱這些天空中發亮的小光點為「恒星」，表示「恒久不動」的意思，也就是說恒星彼此間沒有相對運動。我國也有類似的觀念，稱恒星為「經星」。

但是哈雷卻由今古星圖星表的比對中，確定所有的恒星都在運動著，祇是移動量太小，不容易觀察出來(註一)。目前天文學家已明白眼睛能看到的所有恒星都繞著銀河中心轉，這是恒星自行的基本運動。因此星座的形狀也會改變，祇是由於恒星自行量很小，通常要數萬年以上才能明顯看出變化。(圖二為北斗七星在十萬年前、目前、與十萬年後的形狀)。

由前所述，可見測量恒星位置的重要性。其中一項有關恒星相對位置的測量更是歷時兩千年之久，並且影響到伽利略等人的冤情，這便是恒星視差現象。早在兩千年前，亞里斯多德便提出，如果地球在動，應該可以觀察到恒星的視差現象。如圖三所示，當地球在位置甲時，看到 B 星在 A 星的右邊；當地球運行至乙處時，則可以看到 B 星在 A 星的左邊，這便稱為恒星的視差。

如果能觀察到恒星的視差現象，便能證明地球在動。但是一直無法觀測到恒星視差現象的情況下，亞里斯多德學派採取地球是靜止不動的觀點。到了歐洲文藝復興時期以後，歷經哥白尼、伽利略等人的推動，地球繞太陽運轉的觀念已是擋不住的潮流，許多天文

學家積極觀測恒星視差現象。此時恒星視差觀測並不是爲了要證明地球在動，而是藉著幾何三角，可以得出恒星的距離，因此常稱爲恒星三角視差，表示由幾何方法測得之恒星距離。但恒星實在太遠了，即使用地球公轉軌道直徑的兩端來觀測恒星的視差角(如圖四)也很困難。

望遠鏡發明兩百多年後，恒星三角視差的觀測技術已到了開花結果的時候，三位天文學家使用三種觀測技術，在不同地點、約在同一時期，分別測得織女星、天鵝座 61 星與毗鄰星的三角視差。

表 一

| 觀測者 | 觀測地點 | 觀測目標 | 三角視差值 | 今值* | 宣布年代 |
|-------------------|------|--------------------------|---------|---------|-----------------|
| (俄)司徒瓦(Sturve) | 普爾科夫 | 織女星 (天琴座 α 星) | 0.125 " | 0.133 " | 1837 年 1 月 13 日 |
| (德)貝塞爾(Bessel) | 普魯士 | 天鵝座 61 星 | 0.314 | 0.294 " | 1838 年 |
| (英)韓德遜(Henderson) | 好望角 | 毗鄰星 (半人馬座 α 星) | 1.6 " | 0.750 " | 1939 年 |

* 今值係依據 1982 年版之耶魯亮星星表

迄至目前，恒星三角視差仍是恒星距離測量中最精準而可依賴的，並由此來校準其他遙遠天體的距離測量，例如利用造父變星、星團光譜視差、超新星、…等方法測得的天體距離，都依據恒星三角視差的結果來校準零點。

綜合上述，可知恒星與天體的位置非常重要，關係著歲差、章動、恒星自行、雙星軌道、星系分布狀態、…等，因此一直有天文台或觀測計劃進行天體位置的天文幾何測量。同樣的，不論是恒星還是似星體，許多天體的亮度有所變化，可以透露恒星演化初期或末期的狀態、似星體的本質、…等重要的訊息，因此天體亮度觀測也是天文觀測的重心之一。

自從伽利略在 1609 年將望遠鏡用在天文觀測上後，天體的位置測量與亮度觀測在質與量上均有長足的進展，在依巴羅斯軌道天文台觀測結果公布之前，已有約一百多萬顆恒星定出恒星的位置、自行與亮度，其中約有八千多顆測定三角視差及約有三萬顆變星。但由於受到地球大氣擾動的影響，在地面上進行的天文觀測有其限度，精確度無法達到望遠鏡應有的水準。在位置精確度方面即使平均八至十年的影像與數據，也祇能達到 0.01"

左右($1^\circ = 60'$, $1' = 60''$), 在亮度方面除少數個案外, 一般為 0.01 星等, 但是無法觀測較暗的天體, 也無法觀測彼此很近之雙星的個別亮度。天文學家將望遠鏡送上太空觀測, 便可免除地球大氣的擾動, 達到望遠鏡應有的性能。以往送上軌道的都是 X 光、紫外線等天文衛星, 可見光波段的祇有美國航空太空總署的哈伯太空望遠鏡(Hubble Space Telescope, 簡稱 HST)與依巴羅斯軌道天文台。

哈伯太空望遠鏡的觀測任務是多重的, 對象從太陽系、恆星、星系到似星體, 五花八門, 由於畢宿星團的距離較近, 可以用三角視差法精確測定其距離, 所以畢宿星團也被天文學家用來校準其他星團距離的依據。哈伯太空望遠鏡其中一個任務, 便是精確測定畢宿星團中 15 個成員星的三角視差, 但由於種種因素, 祇進行其中 8 顆成員星的觀測。(註二)。

依巴羅斯天文衛星的任務比較單純, 專注於精確測量天體的位置與亮度。它也是第一具在太空中探測天體位置、距離與運動的人造衛星。從 1989 年 11 月起開始到 1993 年 3 月為止, 經過三年半的觀測, 依巴羅斯共測量了百萬顆恆星的三角視差與亮度。整個觀測計畫分為依巴羅斯與第谷(Tycho)兩部份, 其首要目標也稱為依巴羅斯目標, 是極精密測量由兩百多位科學家挑選的 118000 顆星, 這些星體含蓋了紅矮星、白矮星、巨星、電波星、X 光星、變星與雙星, 定出它們的距離、光度、質量、大小與年齡。更可以藉此探討星團動力學、恆星物理與星際介質。第二目標為測量一百萬顆恆星的位置與亮度, 兩目標的大致內容如表二所示。

表 二

| 目 標 | 依巴羅斯 | 第 谷 |
|---------|----------|-----------|
| 目 標 星 數 | 118,000 | 1,000,000 |
| 極 限 星 等 | 12.5 | 11.5 |
| 天文測量解析度 | 0.001'' | 0.025'' |
| 光度解析度 | 0.002 星等 | 0.06 星等 |

目前依巴羅斯衛星的觀測結果已集結成星表、星圖(註三)出版。依巴羅斯衛星的主要成就在三方面: 恆星三角視差、變星亮度與多星系統中各星之位置。恆星三角視差在地面上之觀測精度達 1% 的星數祇有數十顆, 而依巴羅斯衛星超過四百顆; 同樣, 地面上測量達 5% 以內的恆星數約有一百多顆, 依巴羅斯衛星卻超過七千顆。以往三角視差精度能達到的可靠距離約在 100 多光年, 現在可以推遠至 500 光年。這個遠比以往精密的數據將

會改寫恒星結構與演化、銀河系結構、動力與演化、以及宇宙距離尺度。

依巴羅斯衛星共觀測了 12000 個變星，其中 8200 顆是新發現的變星，而且共觀測到 2700 顆週期性變星。在多星系統方面，一共觀測 23900 個系統，其中 12200 個為三星以上的系統(約 3000 個是新發現的)，其中約 2900 個天文幾何雙星。如果雙星中的伴星太暗無法看到，但看得到的主星位置呈現周期性的波動，就表示它受到一個看不到的伴星重力牽扯而呈波動，這種因測量恒星呈波動現象的雙星系統便稱為天文幾何雙星，需要精確的位置測量才能發現它們，因此依巴羅斯觀測的 2900 個天文幾何雙星中，幾乎都是新發現的。

依巴羅斯衛星的任務已在 1993 年 8 月 15 日終止，歐洲太空總署已計畫接續的任務，稱為天文物理的全星空天文幾何干涉技術(Global Astrometric Interferometer for Astrophysics)衛星，簡稱蓋亞(Gaia，是希臘神話中之大地之母)，計畫測量五千萬個天體的三角視差，精確度在 0.01" 以上。隨著科技的進展，天文測量的質與量也日益精進，隨著這些觀測技術收集的資料與訊息的累積，人類對恒星、銀河系、星系與宇宙的認知，也將逐步逼進人類所能達到的極限。

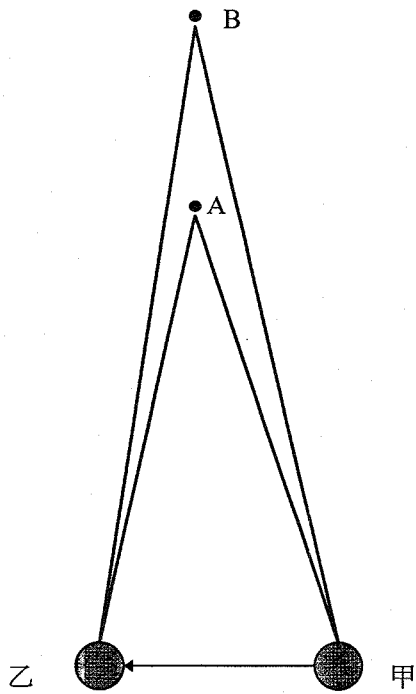
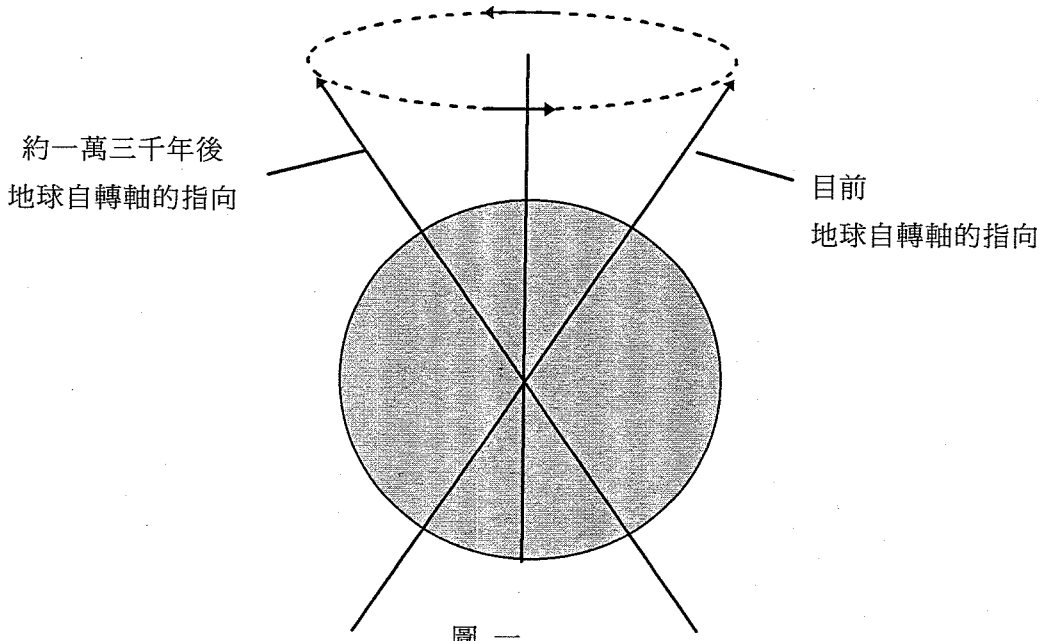
(註一)：祇要有天文望遠鏡，很容易量出一些自行量較大的恒星之自行。北一女學生在 1995 年 12 月利用自行拍攝之南河三照片與 SAO 星表比對，推算出南河三的自行。

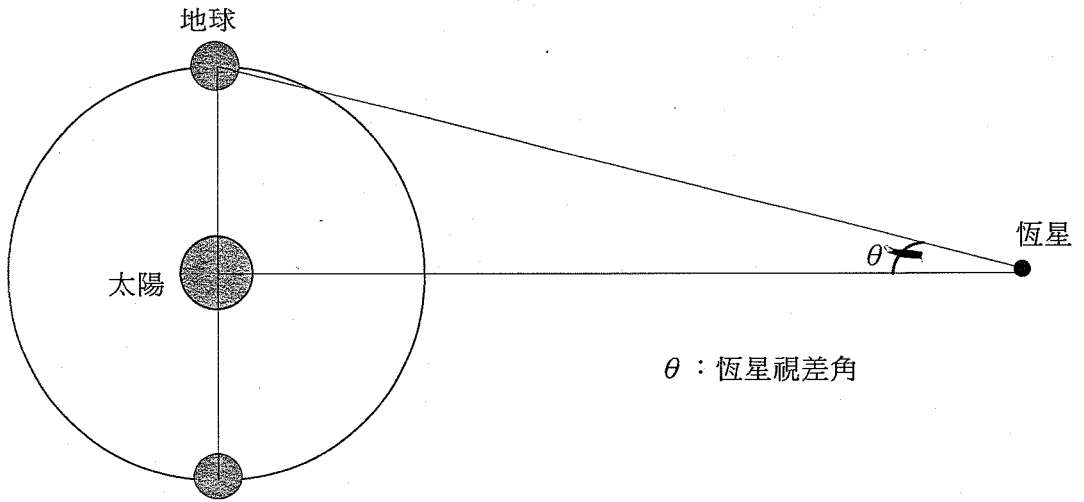
(註二)：此計劃由耶魯大學的 Dr. Van Altena 主持，任教於中央大學天文研究所之蔡文祥教授，曾在擔任 Dr. Van Altena 的助理期間，進行此方面的研究。最近的訊息是由蔡文祥教授告知。

(註三)：星表全名為 Hipparcos and Tycho Catalog，星圖名稱爲 Millennium Star Atlas。

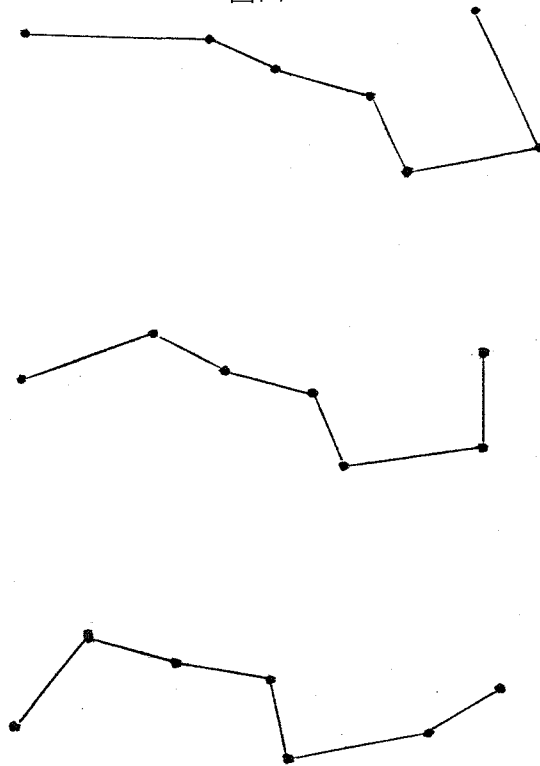
主要參考文獻：

1. From Hipparchus to Hipparcos, (Catherine Turon), Sky & Telescope magazine, July 1997.
2. 中國天文史話(1983), 明文書局.
3. 天文學史(宣煥編, 1992), 高等教育出版社(大陸).
4. Hipparcos and Tycho Catalog, 歐洲太空總署出版
5. The New Cosmos (Unsöld & Baschek, 英譯本, Brewer 譯, 1911) Springer-Verlag 出版
6. The Bright Star Catalogue (4th ed.), Hoffleit (1982), Yale University Observatory 出版.





圖四



圖二 北斗七星在十萬年前（上圖）、目前（中圖）、十萬年後（下圖）的形狀