

中華民國第四十四屆中小學科學展覽會

作者說明書

高中組地球科學科

040503

臺北市立第一女子高級中學

指導老師姓名

吳育雅

作者姓名

張雅欣

陳柏因

中華民國第 44 屆中小學科學展覽會  
作品說明書

科 別：地球科學

組 別：高中

作品名稱：不同形狀的行星狀星雲的分布

關 鍵 詞：行星狀星雲、光譜譜線強度、銀河座標緯度

編 號：

## 壹、摘要

行星狀星雲呈現多樣的外型，有的如星空中的魔戒，有的呈現美麗的雙極(蝴蝶)狀。什麼因素使得行星狀星雲的形狀不同？前人研究指出行星狀星雲的外形和中央星質量有關。本研究針對不同形狀的光譜譜線強度，配合其在本銀河系的緯度分布，探討行星狀星雲外形和質量的相關性。

一般而言，質量較大的恆星表面溫度較高，分布的位置集中在在本銀河系盤面上。本研究以[He II]、[Ca V]及[O III]三條譜線的強度做為中央星的溫度計，分析各行星狀星雲的光譜資料可得知其中央恆星溫度，進而推論其中央星質量大小的相對關係；而從其銀河緯度的座標可大略比較其到銀河盤面距離的大小。

本研究綜合以上兩方面所得的結果，發現譜線強度較高、中央星溫度高的行星狀星雲，代表其中央星質量大，這一類星雲較集中在低緯區，其外型多呈雙極狀及不規則狀；而譜線強度較弱、代表質量低、中央星表面溫度較冷的行星狀星雲，廣佈由高到低的不同緯度區域，其外型較多圓狀及橢圓狀的行星狀星雲。

## 貳、研究動機

太陽溫暖的光在生活中是不可或缺的要害，但我們的太陽，就如同其它的恆星一般，正在一天天的老去，最後，我們的太陽會變成如何呢？在教科書中，每每說到太陽晚年的光景，就會介紹關於恆星的一生。在恆星演化末期，部分的恆星都將擁有一個燦爛的舞台 - 行星狀星雲，本校 2001 年學姊的專題研究報告中也提出『行星狀星雲是大部份恆星演化的終點，我們的太陽總有一天也會步上這一條路』，不過近期的研究卻指出，行星狀星雲可能必須是雙星系統才能形成，到底這幾年來在行星狀星雲中有哪些新的發展？太陽的結局有沒有機會展露這麼華麗的光芒？

## 參、研究目的

探討形狀不同的行星狀星雲，分析表面溫度和銀河緯度位置，以推論其中央星質量的關係

## 肆、實驗器材

- 一、個人電腦
- 二、Word、Acrobat Readere、Excel 文書處理工具
- 三、Internet Explorer 網路、網頁導覽軟體

## 伍、研究過程與方法

### 一、文獻探討

#### (一) 早期對行星狀星雲的了解

行星狀星雲最早是由 Charles Messier 在狐狸座(Vulpecula)所觀測的啞鈴狀星雲。但一開始，行星狀星雲並不被科學家所了解，直到 20 世紀時，行星狀星雲的理論才逐漸開始發展，且配合望遠鏡和衛星的進步，才逐步解開行星狀星雲演化的鎖鑰。

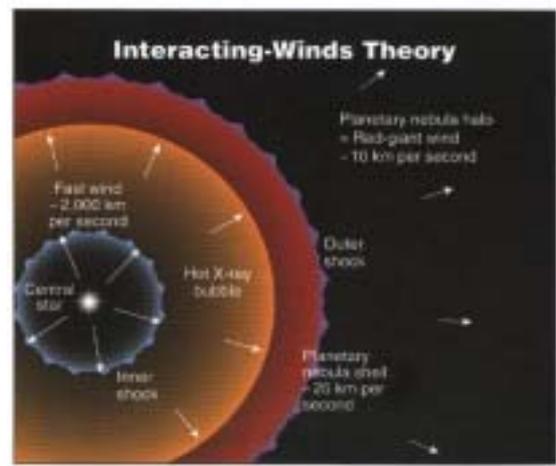
#### (二) 行星狀星雲在星球演化中的地位

在 1956 年 Josif S. Shklovsky 注意到行星狀星雲的中央星和白矮星似乎有關聯，因此他判定白矮星是星雲散失周圍物質後形成的，而行星狀星雲有可能是從大的恆星中噴發，那顆大恆星有可能就是紅巨星；在 1966 年，George Abell 和 Peter Goldreich 也注意到紅巨星物質逃脫的速度和行星狀星雲膨脹的速度相似；但在這之前，都沒有觀測到行星狀星雲和紅巨星有關聯的確切現象。1967 年，NGC7027 中觀測到具有碳氧化物（分子）的存在，推翻了科學家之前認為行星狀星雲是高溫、離子化的，因為分子必須在較低溫的環境下才有可能存在。

因此，可知行星狀星雲不只具有高溫離子化氣體的成分，也有較低溫的塵埃分子組成處，而這些塵埃分子可能為紅巨星階段時逃脫的物質，這項觀測讓 Sun Kwok, Chris R. Purton 和 M. Pim FitzGerald 加深了他們對行星狀星雲和紅巨星間有關聯的猜測。

#### (三) 恆星風作用模型」理論

Sun Kwok 等 (1978) 年提出了「恆星風作用模型」理論 (圖一) 在紅巨星的階段時，其中央星會吹出慢速的恆星風，在這個過程中，其中央高溫的核心將會暴露，而後來較快速的恆星風吹出，這個高速的恆星風會擠壓之前慢速恆星風，因而形成一圈密度較高的泡泡，此層泡泡因高溫而放射出 X 射線，在更外層的地方，將會形成一層暈圈，這是由慢恆星風吹出的物質，由於被擠壓的那層密度和溫度較高，所發出的光較亮，也就是行星狀星雲，而最外層的暈圈因為亮度暗以致不容易被觀測到。而行星狀星雲所放射出的顏色光譜，不同於太陽所放射出的是連續光譜，它的光譜是由不連續的原子譜線所組成，其中央星因塌縮而溫度漸漸升高、因而放出強烈的紫外線；而外層中其他的原子接收到中央星發出的紫外線能量而游離 - 電子在能階轉移，這些能量被吸收後，再以不同顏色的可見光放出，使得行星狀星雲便有了多種的顏色；而快速恆星風推擠的那一圈物質，密度增大，且被擠壓後溫度升高，因此發出 x 光；在更外層，還有較為稀薄的氣體，這裡的氣體因為距離中央星較遠，接收到的能量較低，所以僅發出紅外光後來，



圖一

衛星 IUE 觀測到恆星風的存在；有些天文學家利用 CCD 照相機拍攝到在行星狀星雲外層

淡淡的暈圈；此外德國 ROSAT X-射線太空望遠鏡以及美國的 Chandra X-Ray Observatory 中都發現了行星狀星雲的 X 射線，這些觀測，都支持著「恆星風作用模型」理論。

#### (四) 紅巨星和行星狀星雲光譜的差異

天文學家比對紅巨星和行星狀星雲的光譜，發現其中有一段差異，因此，科學家開始尋找介於紅巨星和行星狀星雲過程的天體來解釋此一差異。後來發現了許多蛋狀（一開始科學家發現這個星雲，將其取名為蛋狀）的星雲，其所發出的光譜波段符合紅巨星到行星狀星雲間缺少的一段，此外，也發現蛋狀行星狀星雲的形狀就是行星狀星雲的基本結構，因此，我們認定它為「原始行星狀星雲」(proto-planetary nebula)，如此一來，從紅巨星演化至行星狀星雲的大致階段都已被科學家們所知道，只待繼續的觀測以及在行星狀星雲形狀顏色機制的研究。不管如何，能夠確定的是，恆星風在這演化的過程中，具有相當重要的影響力。

#### (五) 「恆星風作用模型」理論的缺失

「恆星風作用模型」理論解釋了恆星從紅巨星演化成行星狀星雲的過程，也有觀測證實這理論，但這個理論有一個缺點，它無法解釋不對稱行星狀星雲的形成，主要是因為恆星風應該是從四面八方吹出，若沒有其他的因素影響，行星狀星雲的形狀應該呈現對稱的球狀，針對這點，許多科學家著手進行了許多研究，陸陸續續的有許多不同的分類，並想辦法找出這些分類中的關聯性；其中，在 1987 年 B Balick 將其分成圓狀、橢圓狀和蝴蝶狀，並提出了一個新的觀點，他認為行星狀星雲不同的形狀是其在演化上的不同階段所致。在這些研究中，大部分所取的行星狀星雲資料都沒有很完整，亦或沒有一定的標準，所做出的分析會有偏差，所以 Manchado (2000) 提出用一套完整的行星狀星雲資料來做統計分析，擬定一些條件作為選擇行星狀星雲資料的準則。

Manchado 認為形狀與質量的關聯選擇的條件為：1. 所有北天的行星狀星雲的偏角必須大於  $-11^\circ$  且所選擇的要在 Acker 的目錄上。2 所選擇的行星狀星雲必須大於 4 角秒。3. 行星狀星雲的圖像須能以狹帶的濾光鏡觀測到（如 H $\alpha$ ）經過徹底的分析這些篩選出來的資料，將他分為三個主要的類別：圓狀、橢圓狀、雙極狀，此外，下面還細分成「點對稱狀 (point-symmetric)」、「四極狀 (quadrupolar)」，而這些形狀的形成和原恆星的質量有關，大致是：橢圓狀行星狀星雲的原始質量是小於 1.0 太陽質量，雙極型是大於 1.5 太陽質量，而點對稱型行星狀星雲的原始質量是大於 1.2 太陽質量；另外利用這些資料，科學家發現圓狀、橢圓狀、雙極狀在一定的條件下，會有一定的比例關係，由這些比例關係就可以推知其原始質量的特徵。

## 二、研究方法

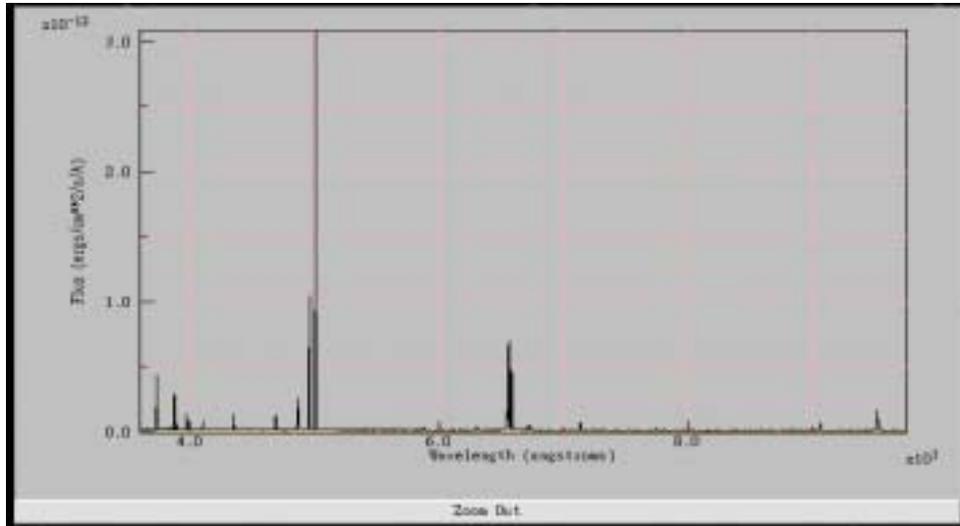
為了檢驗行星狀星雲與質量的關係，本研究進行以下兩方面的分析。首先，從各星雲觀測所得到的譜線強度比較中央星的表面溫度；其次，依據銀河系上大質量恆星比較集中於銀河盤面的關係，探討不同形狀的行星狀星雲是否集中出現在不同的銀河座標的緯度。

### (一) 行星狀星雲的分布

#### 1、譜線的選取

## 不同形狀的行星狀星雲的分布

由於行星狀星雲的中央星溫度越高者，其行星狀星雲的光譜因為原子或離子吸收中央星發出的紫外光能量，激發電子（能階轉移）再降回基態而放出可見光，不同離子電子的激發能會發出不同波長的光，從光譜的譜線中可得知每個行星狀星雲放出的各譜線強度，所以本研究根據 Gallery of Planetary Nebula Spectra 網站上提供的資料，讀取每個星雲的譜線強度（圖二）。



圖二 Gallery of Planetary Nebula Spectra 網站上提供的星雲光譜資料，本研究將波長所對應的譜線強度（單位： $\text{Flux}(\text{ergs}/\text{cm}^2/\text{s}/\text{a})$ ）讀取每條譜線的最大值，由於這個網站上提供放大的功能，所以可以得到較準確的數值。

### 2、分析譜線

本研究根據 Gallery of Planetary Nebula Spectra 網站上建議使用的譜線和提供的行星狀星雲的資料，以及請教伊利諾州立大學朱有花教授的結果，先試驗了四條譜線，分別是： $[\text{He II}]$ 、 $[\text{C a V}]$ 、 $[\text{N II}]$ 及 $[\text{O III}]$ ，將每個星雲的這四條譜線強度找出，先取  $\log$  值，然後將這四條譜線兩兩作圖對照比較。

### 3、光譜溫度計

依照前面所作出的分析，選取適當的三條譜線（ $[\text{He II}]$ 、 $[\text{C a V}]$ 及 $[\text{O III}]$ ）當作行星狀星雲的光譜溫度計，分別讀取不同行星狀星雲的三條譜線強度，由此找出符合三條譜線強度具有一致性的星雲樣本，進而推估這些不同行星狀星雲的形狀，與光譜溫度計所得到的強度兩者之間的關係。

### 4、行星狀星雲的銀河緯度座標分布

- (1) 從銀河系演化的理論中，知道質量較大的恆星聚集在本銀河盤面上，以此推論由星球演化至末期的行星狀星雲分布，和銀河演化的結果應該一致。本研究中將行星狀星雲的銀河緯度座標（出處：

<http://cf.williams.edu/public/nebulae/browse.cfm>），由最低緯度的行星狀星雲向高緯度排序，銀緯也代表行星狀星雲距離銀河盤面的遠近，藉以分析不同形狀的星雲在銀河空間上的分布情形。

- (2) 依據 Manchado (2000)，圓狀或橢圓狀行星狀星雲代表質量較小的恆星，而雙極狀星雲為質量較大的恆星。本研究分析銀緯位置分布，期能建立緯度與質量分布的關係：本研究欲檢視不規則和雙極狀的星雲是否多分布於大質量恆星聚

集的銀河盤面上，而呈現圓狀和橢圓狀的星雲位置可能較為分散，可出現在距盤面較遠處。

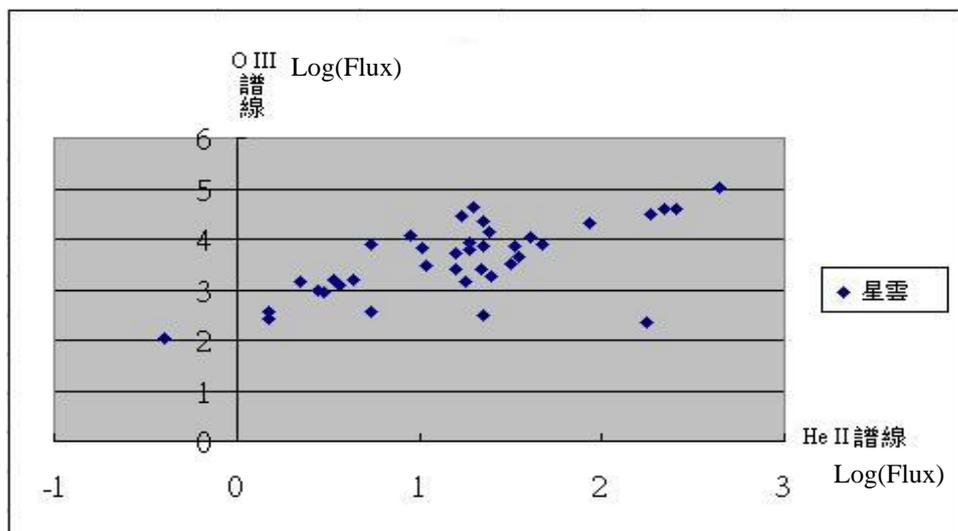
5、分別求出不同形狀行星狀星雲的光譜溫度和銀緯分布後，結合以上兩種方式做出來的結果，並和星雲的影像作對照，找出其關聯。

## 陸、研究結果

### 一、分析任兩條譜線的相關性

#### 1、HeII & CA V

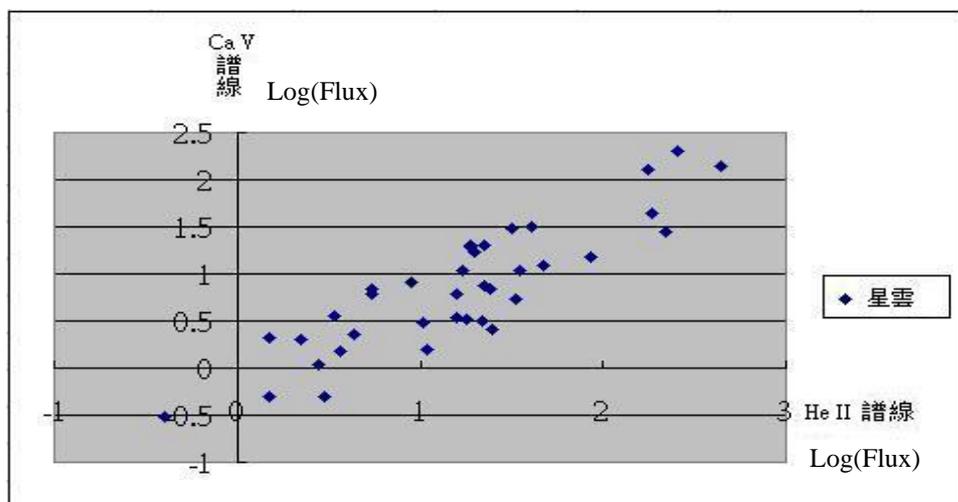
將 He II、Ca V 兩條譜線的強度(強度單位： $\text{Flux}(\text{ergs}/\text{cm}^2/\text{s}/\text{a})$ )取 log 值作圖，結果為圖三，由圖中的分布可分析出每個星雲 He II 強度大的，Ca V 強度也呈現較大的趨勢。



圖三

#### 2、He II & O III

He II、O III 譜線強度的分布作圖，結果為圖四，也可看出兩者具有不錯的正相關。

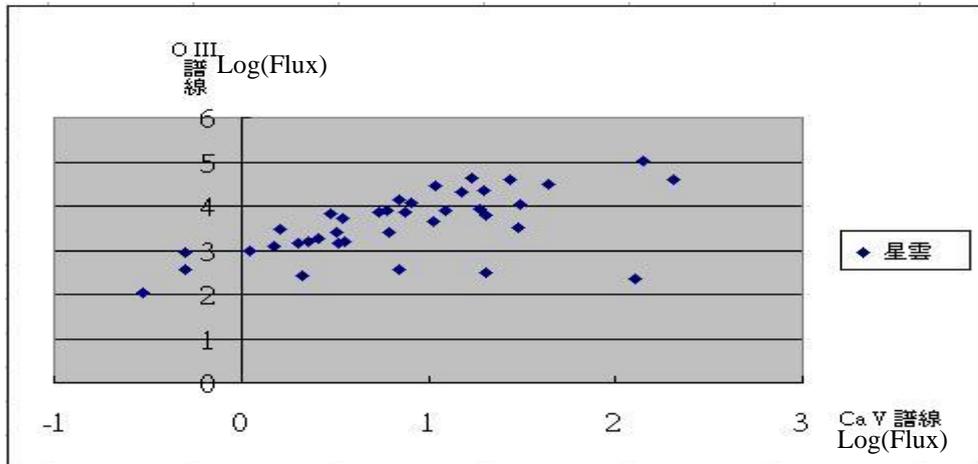


圖四

不同形狀的行星狀星雲的分布

### 3、Ca V & O III

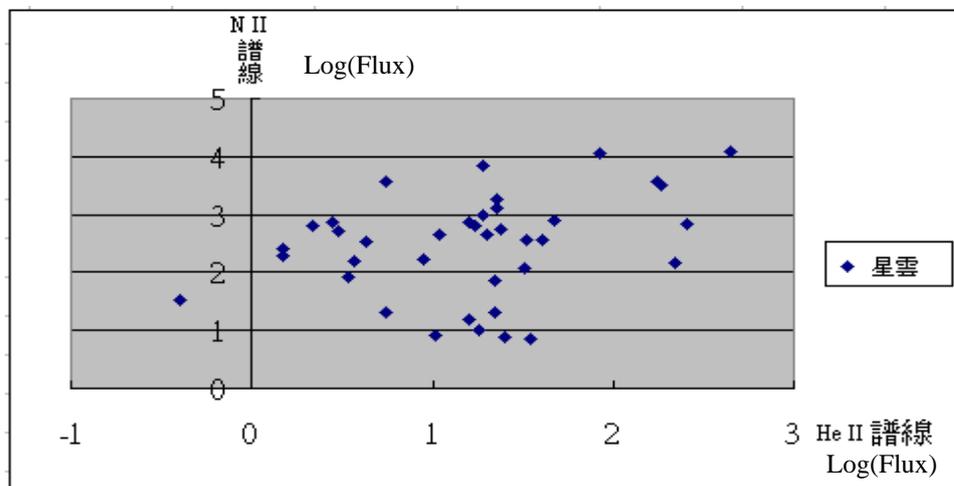
Ca V & O III 的譜線作圖如圖五，分布的趨勢也有相當的正相關性。



圖五

### 4、He II & N II

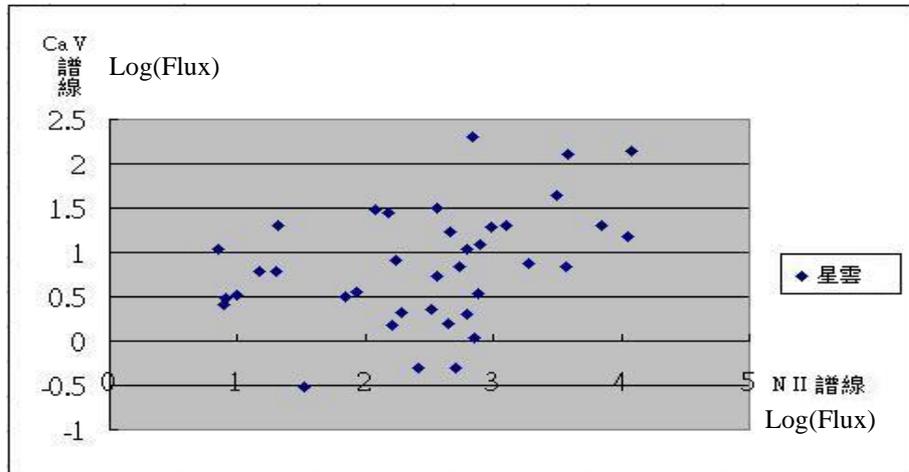
He II & N II 的譜線強度作圖，結果為圖六，由這張圖的結果看出，兩條譜線的關係與上兩張比較，相關性並不大，不如上者譜線强度高者皆高，低者皆低的分布關係。



圖六

### 5、Ca V & N II

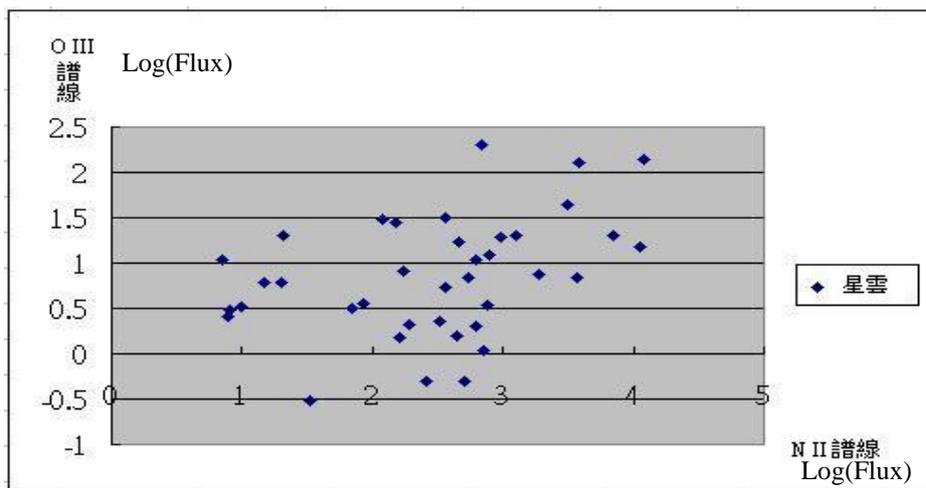
比較 Ca V & N II 兩條譜線的分布，結果如圖七，兩者看來並沒有很明顯的相關性。



圖七

### 6、O III & N II

O III & N II 作圖，由結果看來也不具有明顯相關性。



圖八

由圖三 圖八中可以看出[He II] [Ca V]及[O III]兩兩條譜線呈正相關，但 [N II]譜線的強度分布圖明顯與其它譜線的趨勢不一致，可能是此條譜線所需的能量與另外三條所需的能量相差甚遠，其所需能量比較低，導致其不一致。

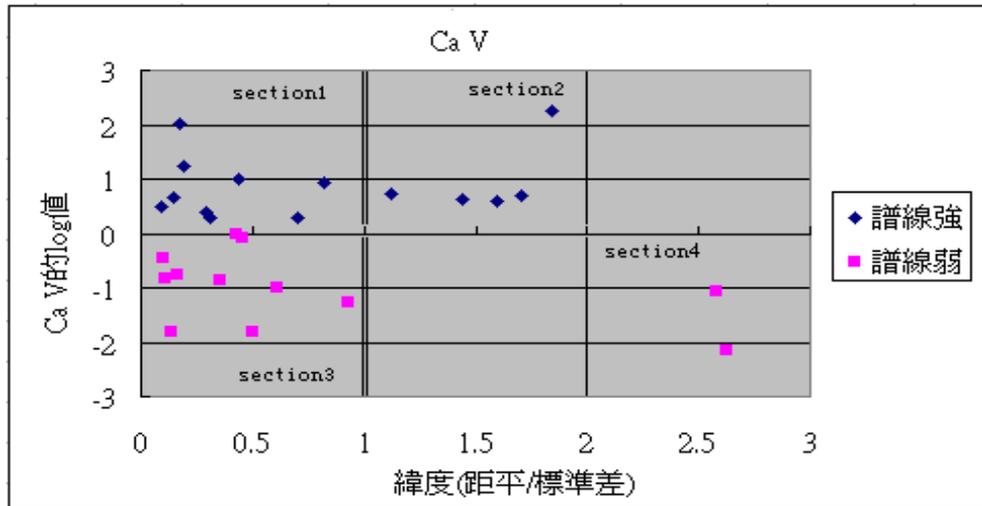
## 二、以光譜強度區分行星狀星雲

根據以上的結果，我們決定選用[He II]、 [Ca V]及[O III]三條譜線，以每個譜線的平均數當作參考值，區分出譜線強與譜線弱的行星狀星雲，其中，取三條譜線強度皆大於平均數的星雲歸為譜線較強的行星狀星雲，而三條譜線強度皆小於平均數的星雲歸為譜線強度較弱的行星狀星雲，將兩類（譜線強、弱）作為中央星溫度的指標，總共從 39 個星雲的資料中依照此種方法選出了 27 個行星狀星雲。

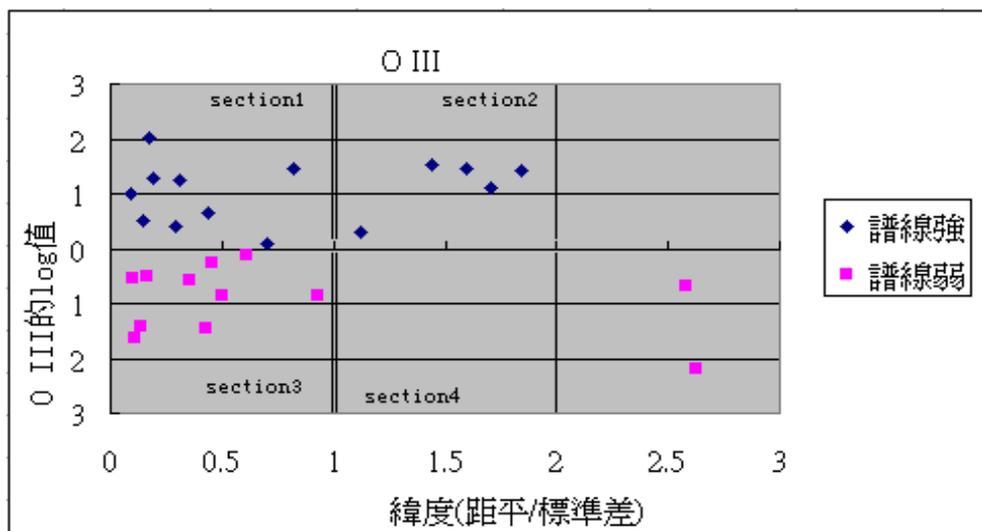
不同形狀的行星狀星雲的分布

### 三、行星狀星雲的光譜強度與緯度分布的關係

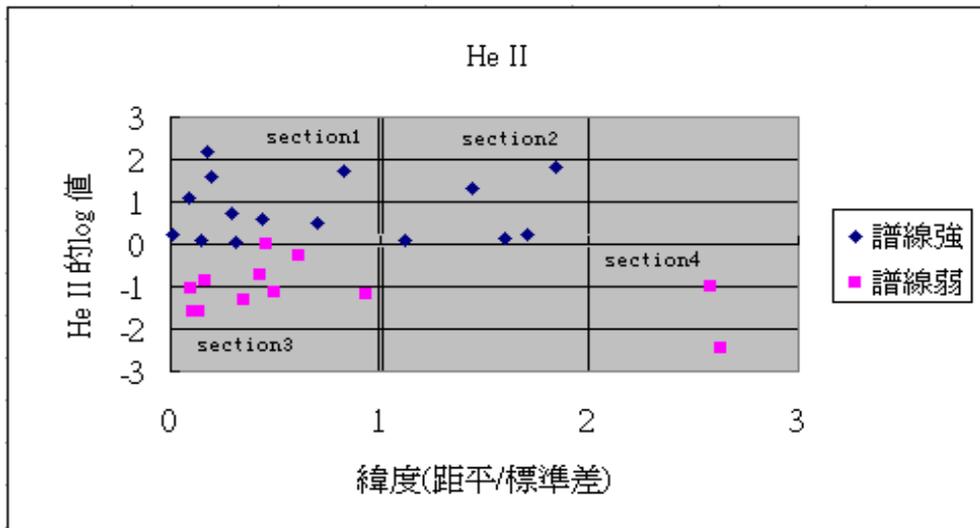
(一) 由上面所選出譜線強的星雲 15 個，譜線弱的星雲 12 個，將其與緯度的分布作圖，可得結果如圖九、圖十、圖十一：



圖九 行星狀星雲譜線 Ca V 強度和緯度分布的關係：由圖可看出行星狀星雲大致分布於低緯度的範圍，有幾個譜線強的星雲緯度有點高，但分布在最高緯度的星雲仍是譜線弱的星雲。



圖十 行星狀星雲譜線 O III 強度和緯度分布的關係，其結果與 Ca V 的結果類似。



圖十一 行星狀星雲譜線 He II 強度和緯度分布的關係，分布與上兩圖雷同。

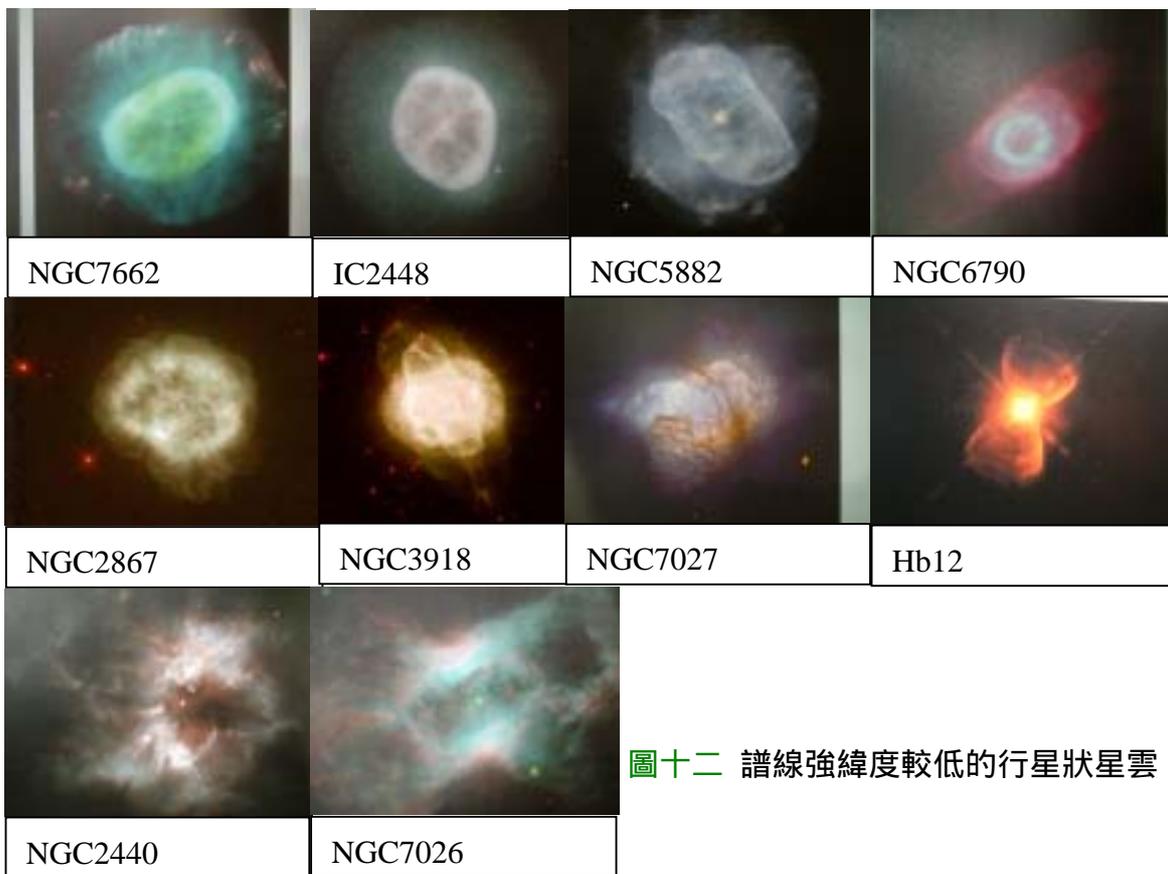
由圖中譜線強度與緯度的作圖，三張譜線作圖都大致可分為四區（表一），第一區為譜線強且緯度低的星雲（譜線以 0 為界，而緯度以 1 個標準差為界，原因如前所述），第二區為譜線強但緯度略高（緯度值介於 1~2 個標準差）的星雲，第三區則是譜線弱且緯度低（小於 1 個標準差）的星雲，而譜線弱，緯度高（大於 2 個標準差）的星雲則歸為第四區；其中，第一、三、四區的星雲是呈現譜線強的星雲分布在低緯，而譜線弱的星雲分布在高緯或低緯處，符合銀河系演化的過程中，質量較大的恆星聚集在本銀河盤面上，而盤面上也會有質量較小的恆星。

而第二區的五個星雲則無此趨勢，這五個分別是 IC4593、NGC6210、NGC7009、NGC3242 以及 IC418，將其與照片對照（參照圖十四），看出其中四個星雲具有 FLIERs 結構（所謂的 FLIERs 是在擴散星雲邊緣上的紅色亮點，它們比一般的雲氣的具有較快的擴散速率。節自：許瑞榮（2000/12/15）M57 的真正形狀是什麼？--行星狀星雲漫談）但其是否具有明顯的關係，本研究並沒有再加以深究。

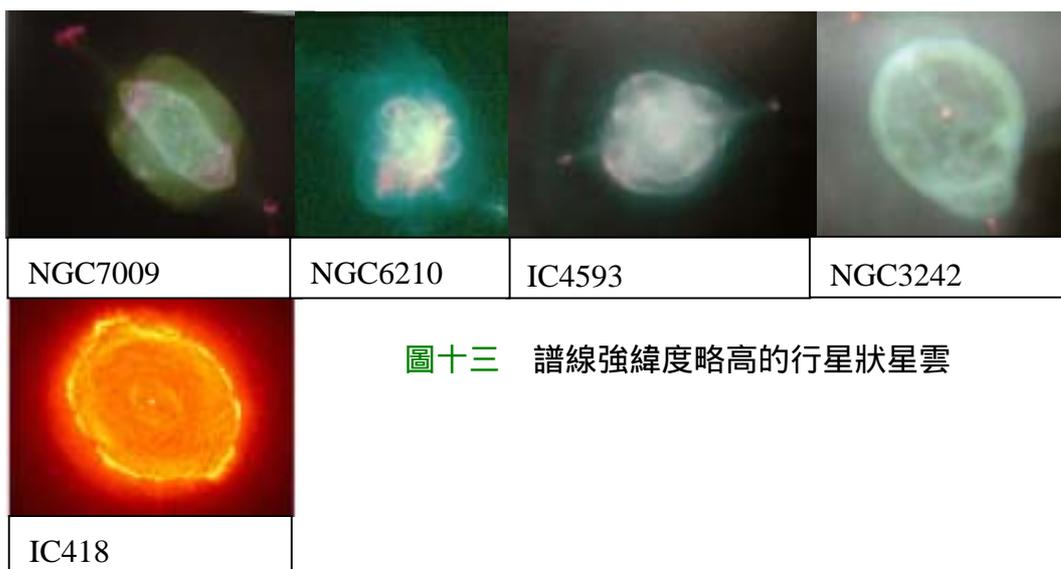
表一：星雲在四區內的分布個數		緯度（距平 / 標準差）		
		< 1	> 1	> 2
譜線強度 / 標準差	>0	10 個(圖十二)	5 個(圖十三)	
	<0	10 個(圖十四)		2 個(圖十五)

四、不同形狀的行星狀星雲分布

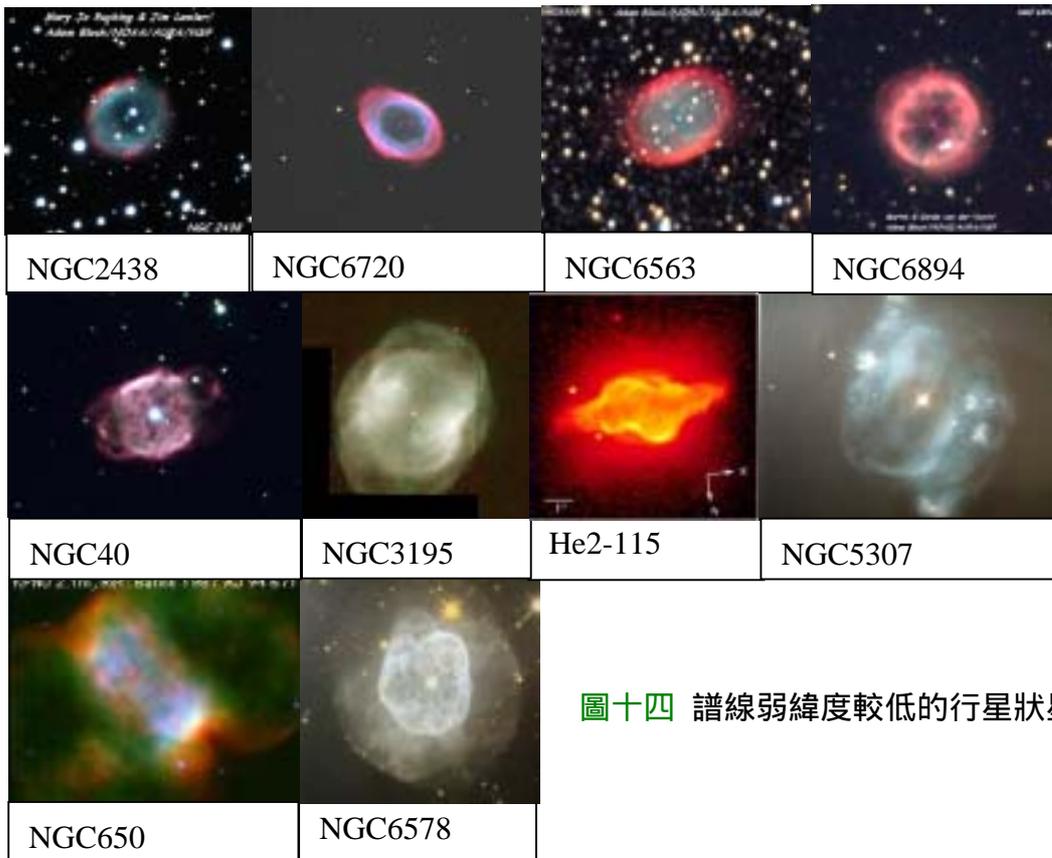
(一) 將所選出的兩類星雲與影像對照其形狀。



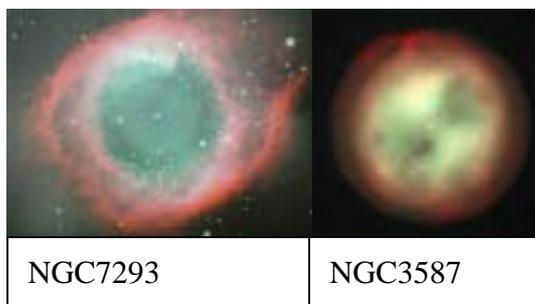
圖十二 譜線強緯度較低的行星狀星雲



圖十三 譜線強緯度略高的行星狀星雲



圖十四 譜線弱緯度較低的行星狀星雲



圖十五 譜線弱緯度高的行星狀星雲

由影像中可看出，譜線強的星雲呈現雙極或不規則狀；而譜線弱的星雲大致是圓或橢圓狀，但其中有幾個如 NGC650、He2-115 的形狀呈現非圓或橢圓狀，本研究推測這些形狀與星雲演化的階段可能有關，可能是演化末期的行星狀星雲，因為中央星的能量在演化中逐漸散失，溫度即會下降，導致譜線的強度減弱，但也可能是其它因素使得形狀的呈現不同，相關的因素將在討論中詳論之。

(二) 由以上的關係大致上可推知

- 1、譜線強度較高的星雲外型多呈現雙極或不規則狀，且分布集中在緯度低的範圍。
- 2、譜線強度較低的星雲多呈現圓或橢圓狀，緯度的分布也較雙極或不規則狀的星雲分散。

- 3、本研究另外也將譜線強和弱的星雲緯度求出標準差，譜線強的行星狀星雲緯度的標準差為 13.58，譜線弱的為 18.84，由此可知譜線弱的星雲在銀河分布的位置範圍較廣。

## 柒、討 論

### 一、行星狀星雲的形狀

行星狀星雲呈現的形狀，因為受限於僅能從地球上觀測它在天球上的投影，因此其外形是什麼樣子不單和質量有關係，從文獻中整理所得到的資料，發現影響行星狀星雲所呈現的形狀有以下三種可能性：

#### (一) 視角的不同

有一些天文學家認為，行星狀星雲之所以有這些不同形狀，是一個普適模型在各個視角上投影出的不同樣貌。其原本的形狀，有的科學家認為是雙極狀，推測其形成的過程，是因紅巨星在赤道上方物質的密度較兩極高，導致高速恆星風在兩極密度較小的區域，將物質吹出比較遠。如同吹氣球的時候，氣球開口處較厚，所以膨脹較小，薄的地方漲的比較大，因而形成了雙極，也就是蝴蝶形狀。

#### (二) 演化階段的不同

B.Balick 提出，在中央星附近有一些看不見的中性氣體，其中有一些會被聚集在中心附近形成環型體，另外有一些氣體會沿著環型體中空的方向，向外流動形成所謂的雙極（引自許瑞榮 2000）。依照以上這兩種形成機制，行星狀星雲形成的初期因恆星風向四面八方吹送會是圓狀，隨著演化雙極結構會越來越明顯，也就是說，圓狀的行星狀星雲較為早期，雙極狀行星狀星雲是較為晚期的行星狀星雲。

#### (三) 其他的原因

有一些天文學家認為在行星狀星雲形成的時候，有一些條件不同所以造成行星狀星雲形狀的不同，例如恆星自轉與否、磁場的影響、雙星系統(伴星的重力場) 等。絕大多數的行星狀星雲具有噴流的雙極結構，長久以來天文學家就懷疑這有可能是因為伴星的影響。De Marco 以 Kitt Peak 天文台 3.5 米的 WIYN 望遠鏡對 11 個行星狀星雲的中央星進行觀測，發現其中十個行星狀星雲的延徑速度有明顯的週期性變化，這極有可能導因於其伴星重力的影響。而以色列天文學家 Noam Soker 在 1990 年代提出一項理論，認為行星狀星雲的外形和其原始恆星的質量甚至是繞著此恆星運行的行星的質量也會造成影響(Sky & Telescope: November 1997, page 20, and August 2001, page 23)。

### 二、形狀和分佈的關係

本研究選取樣本母數計 39 個，分別搜尋出每個行星狀星雲三條譜線的強度，以及其在本銀河緯度的位置資料，再配合影像的資料。根據以上的分析，歸納出以下的關係：

- (一) 譜線強度較低的行星狀星雲，分布的區域包括比較廣大的緯度範圍，其中心恆星質量可能較小，其外型比較明顯呈現圓及橢圓狀。
- (二) 譜線強度較高，且分布距離銀河盤面較近的行星狀星雲，吻合這一類行星狀星雲的

質量較大的推論，其外型多呈現雙極狀或不規則狀。

- (三) 有幾個星雲呈現不同的形狀，進一步分析其原因，除了上述關於形狀的幾點討論，星雲所呈現出的形狀，也可能會因每個天文台望遠鏡使用的波長不同，而觀測到不同的形狀，未來還可以比較不同波長所呈現出的星雲形狀，是否具有某些的相關性。

## 捌、結 論

本研究的結果，大致可見呈現雙極狀或不規則的星雲，一般中央星溫度較高，其 [He II] 波長 5411Å (54.4 eV)、 [C a V] 波長 6087Å ( 67.1 eV ) [O III] 波長 5007Å ( 54.9 eV ) 等譜線強度較大，且多分布距離銀河盤面較近的區域。而圓狀和橢圓狀的行星狀星雲，其中央星溫度較低，其 [He II]、 [C a V]、 [O III] 等譜線強度均較弱，且其在銀河緯度的分布較分散，位置可出現在劇銀河盤面較遠的區域。

### 後續研究方向

造成行星狀星雲呈現的形狀，雖然機制至此已討論出很多因素，然而行星狀星雲也有數個演化階段，我們現今所看到的行星狀星雲可能正經歷不同演化過程，因此繼續探討行星狀星雲的演化過程，以了解在不同階段中外形所發生的改變是仍有尚待推敲之細節。

## 玖、參考資料及其他

- 一、郭新 星空蝴蝶 康樂及文化事務署出版(香港) (2002)
- 二、許瑞榮 ( 2000/12/15 ) M57 的真正形狀是什麼？--行星狀星雲漫談
- 三、L. Stanghellini, R. L. M. Corradi, and H. E. Schwarz, ( 1993 ) ”The correlations between planetary nebula morphology and central star evolution” *Astron. Astrophys.* 279, 521-528.
- 四、Sun kwok ( 1996 ) , 「 A modern view of planetary nebula 」 , *Sky&Telescope*, July 1996,p38-43
- 五、Sun Kwok ( 1998 ) , 「 Like butterflies from their cocoons, beautiful nebulae emerge from the dusty shrouds of aging stars 」 , *Sky&Telescope*, October 1998, p31-36
- 六、A. Manchado, E. Villaver, L. Stanghellini, and M. A. Guerrero, ( 2000 ) ”The Morphological and Structural Classification of Planetary Nebulae”, *astro-ph/0002073*.
- 七、[http://skyandtelescope.com/news/article\\_1169\\_1.asp](http://skyandtelescope.com/news/article_1169_1.asp)
- 八、<http://cf.williams.edu/public/nebulae/browse.cfm>
- 九、<http://www.blackskies.com/imageidx.htm>

## 評語

040503 高中組地球科學科 第二名

不同形狀的行星狀星雲的分布

對問題有深入瞭解，資料蒐集完整，分析條理分明，唯缺少

實際 自己 觀測的資料，對物理數據的認識仍有加強空間。