

行星狀星雲的多波段分析

學生：廖婉伶

指導：地球科學科 陳正元老師

摘要

行星狀星雲以多波段來觀測，會因其輻射機制不同，而有不同面貌，進而可分析。行星狀星雲在可見光波段的輻射來自中心星的紫外線打到外層大氣使其譜線躍遷輻射，而紅外線波段是由緊密環面(torus)溫度所發出的熱輻射(thermal radiation)，而無線電波則是吹出高速恆星風的帶電粒子和外層的星際介質產生作用所產生的無線電連續輻射(free-free emission)。我們的研究目的就是利用可見光、紅外線、無線電波三個波段於行星狀星雲不同的輻射機制來做比對和討論。

行星狀星雲研究中的一個問題就是它們的距離都未能精確的確定，距離最近的行星狀星雲可以測量它們膨脹視差來確定它們的距離，而另一個問題是星雲形狀多樣性的產生原因。所以本次的研究成果為

- 一、中心星溫度和行星狀星雲外層雲氣擴張速度成高度負相關，無線電觀測 GB6 視大小和可見光 DSS BLUE 視大小高度正相關，而行星狀星雲的可見光亮度減去其紅外線 WISE22 亮度和外層雲氣擴張速度高度負相關。
- 二、觀測結果可以用行星狀星雲的普適模型解釋，行星狀星雲年輕時，中心星的溫度可能較高。此時環面(torus)比較小，紅外線亮區小但強度強，因環面擋住使吹出的高速恆星風區域比較窄小，所以 DSS 可見光的亮區小，被紫外線輻射激發的雲氣少，可見光的強度可能不強，而高速恆星風帶電粒子和星際物質交互作用造成的無線電亮區也比較小。隨著年齡增加，上述現象會慢慢相反。
- 三、可利用行星狀星雲的可見光亮度去減其紅外線 WISE22 的強度，來求出行星狀星雲的擴張速度，是一個新的可以應用的方法。

而擴張速度與可見光 DSS BLUE 實際大小呈現正相關，利用擴張速度求得實際大小，再利用視直徑求出行星狀星雲的距離，但是求出距離的誤差都很大，此部分尚待研究。

壹、研究動機：

在十八世紀時，行星狀星雲(Planetary Nebula)這類的星雲在望遠鏡下都是像行星般狀有圓盤的影像。因此，威廉·赫歇爾(William Herschel)將其稱作行星狀星雲(Balick & Frank, 2004)。

1956年，Shklovsky 發現了行星狀星雲的中央皆有著一顆白矮星，因此他認為行星狀星雲是由紅巨星所噴發出來的，而最後在中央留下了白矮星。其後，Abell 與 Goldreich 測量到了行星狀星雲的膨脹速率與紅巨星表面的脫離速度十分相似，支持了 Shklovsky 的論點(許瑞榮，2000)。



圖一、作者社團所拍攝的行星狀星雲

行星狀星雲是由質量和太陽差不多的恆星所演變而來，質量超過 8 倍太陽質量（以下簡寫為 M_{\odot} ）會在激烈的超新星爆發中結束其生命；質量 8 至 $0.4M_{\odot}$ 的恆星則會產生行星狀星雲。恆星的一生中大部分時間都由核心裡將氫轉化成氦的核融合反應來進行發光。核融合反應會產生向外熱壓力，並與自身重力所導致的向內壓力互相平衡，處於此狀態的恆星被稱為主序星。中低質量的恆星其核心的氫在其成為主序星後的數千萬至數十億年內漸漸耗盡，少了核融合所產生的向外壓力，核心將因自身重力所產生的向內壓力壓縮，進而升溫，會使恆星的外層大幅膨脹，此時恆星變成紅巨星。核心將持續收縮與升溫，待其溫度上升至 10^8K 時，核心的氦開始核融合成碳與氧(Harpaz, 1994)。

氦核融合反應對溫度非常敏感，溫度上升可使反應速率成倍增長，這使恆星非常不穩定。如果氦核融合層因重力稍微收縮，使溫度微幅的上升，會導致反應速率大幅增加，使之放出大量能量，讓氦核融合層迅速膨脹，但因氦核融合層的膨脹使其冷卻，卻又使反應減速，熱壓力不足又讓重力稍微收縮，這會使恆星一直膨脹收縮，而隨著脈動幅度逐漸加劇，最終將恆星大氣拋入太空中(Renzini, 1989)。

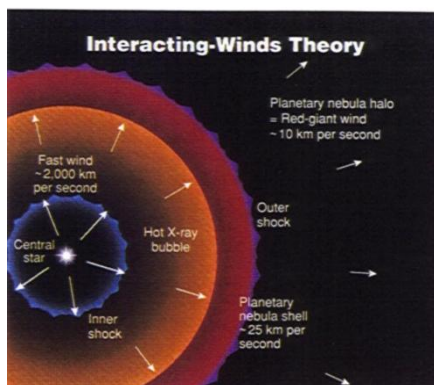
處於生命末期紅巨星階段的恆星，通過脈動和強大的恆星風將其表層拋射出去，拋出的氣體在裸露的核心周圍形成一層物質雲。隨著越來越多的大氣被拋出，熾熱、明亮的中心核心被暴露出來。而當核心外露的表面溫度達 30000K，發射出的紫外線輻射就足以使之前拋射出的大氣電離使其受到激發而發光，物質雲便形成了行星狀星雲(Harpaz, 1994)，行星狀星雲明亮的能量來自於它的中心星。

我們所看見行星狀星雲的可見光大部分是中心星的紫外線輻射打到外層的物質雲，物質雲電離使其受到激發而電子躍遷所釋放出的譜線，而大部分的行星狀星雲在可見光區的能量有 90~95%集中在〔OIII〕譜線上，又因為這些譜線的位置接近人類肉眼可辨最敏感的地方——550nm，所以很多這類較亮的行星狀星雲在可見光的觀察中呈現綠色或藍綠色的光(Wu, 2001)

行星狀星雲被認為是恆星演化的最後階段之一，光譜觀測表明所有的行星狀星雲都在膨脹中，這讓人們認識到行星狀星雲是因為恆星在生命末期將其外層結構拋射進太空而造成的。而散發出外面數層的氣體成為行星狀星雲後，留下的僅有核心部分，此殘骸將成為白矮星。白矮星內部不再有物質進行核融合反應，因此能量不再產生，亦不再由核融合的熱來抵抗重力崩潰，而隨著時間的過去，白矮星的溫度會逐漸下降，它由極端高密度的物質所產生的電子簡併壓力來支撐(Balick & Frank, 2004)。

1978 年，郭新教授及其他科學家聯合提出的「恆星風作用模型」(許瑞榮, 2000)，其認為行星狀星雲的形成所經的過程為：

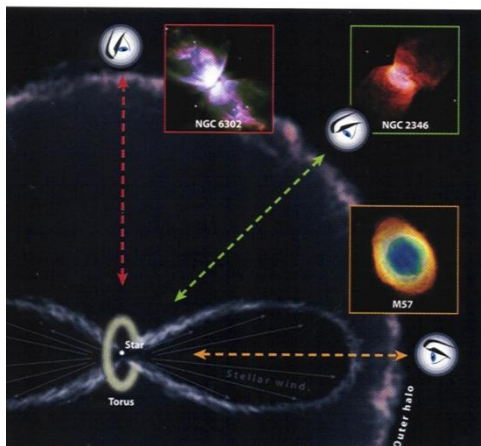
1. 紅巨星拋射出較慢的恆星風。
2. 紅巨星的核心耗盡了氫與氦之後，塌縮成高溫的中心星。
3. 高溫的中心星將產生更高速的恆星風。
4. 高速恆星風推擠慢速恆星風，行星狀星雲便產生了(Kwok, 2007)。



圖二、恆星風作用模型

當一個低質量的恆星 像是太陽將其核心的氫燃燒完畢，他會膨脹成紅巨星，並且緩慢的噴發出他所擁有的大氣。核心塌縮成高溫中心星，將然後從其核心處產生高速的恆星風。高速恆星風是稀薄高溫的發出一些 X 光的氣體，當它撞上了先前所緩慢噴發出的外層雲氣(Planetary nebula shell)，然後中心星的紫外線輻射可以打在外層雲氣時，外層雲氣產生電子躍遷發出可見光，行星狀星雲便產生了。1999 年，寇拉迪(Romano Corradi) 等人利用哈伯望遠鏡研究了南蟹星雲，發現了他的擴張速度，會隨著與恆星間的距離成比例的增加(Balick & Frank, 2004)。

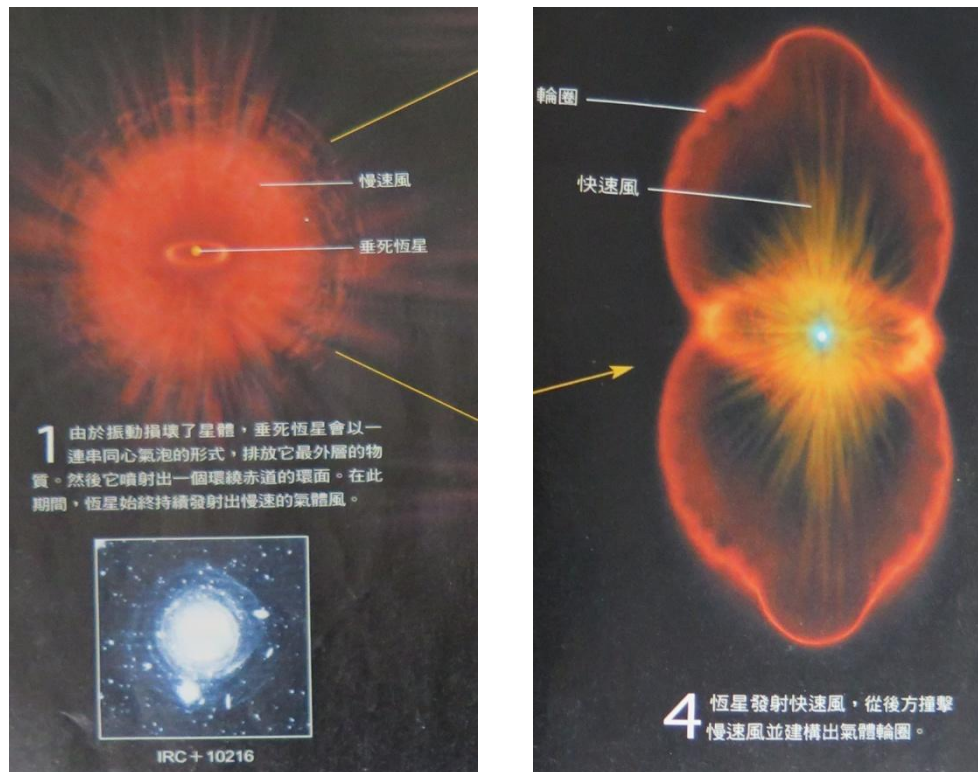
行星狀星雲大致可分為球形、橢球形和雙極三種。一種說法是：雙極星雲在星系盤最多，因此他們的前身通常為年輕的巨星恆星；相對來說，球形星雲則多由類似太陽的年老恆星所形成。另一種說法：而產生多樣化形狀的部分原因因為投影效應——同一星雲由不同角度觀察而有不同外觀。儘管如此，物理形態上的多樣化原因仍未得到完全的認識(Kwok, 2010)。



圖三、普遍的行星狀星雲模型，幾乎相同的形成機制，只是從不同的觀察角度造成外觀不同。

1980 年代，荷蘭萊登大學的艾克(Vincent Icke)與梅利瑪(Garrelt Mellema)，假設慢速恆星風先形成一個環繞恆星赤道的緊密環面(torus)，接著向外吹的高速恆星風受到這個環面阻擋而漸漸往極線方向偏折，形成橢圓狀星雲。這個環面的作用類似噴嘴，很像吹口哨的嘴形，將呼出的空氣聚攏，平行射出一道狹窄的噴射氣體，並使高速恆星風強力偏折，形成沙漏狀的氣流。(Balick & Frank, 2004)

另外，B. Balick 注意到了雙極型的行星狀星雲的特殊性，並提出一個想法來解釋其形成原因，他認為中心星附近有著看不見的中性氣體，一些集中在中心部分行成了環狀體，另一些則沿環形體中空方向往外流動(許瑞榮，2000)。



圖四 Balick & Frank(2004)提出的行星狀星雲模型

貳、 研究目的：

宇宙中的天體，從可見光以外的波段來觀測，會因其輻射機制不同，而有不同面貌，進而可分析這些天體。我們可以利用網路上許多天文學術觀測站台，所拍攝的影像資料作為學術研究。

行星狀星雲在可見光波段的輻射來自中心星的紫外線打到外層大氣使其譜線躍遷輻射，而紅外線波段是由緊密環面(torus)溫度所發出的熱輻射(thermal radiation) (Umana et al, 2008)，而無線電波則是吹出高速恆星風的帶電粒子和外層的星際介質產生作用所產生的無線電連續輻射(free-free emission)(Condon et al, 1999)。行星狀星雲研究中的一個問題就是它們的距離都未能精確的確定，距離最近的行星狀星雲可以測量它們膨脹視差確定它們的距離，而另一個問題是星雲形狀多樣性的產生原因。

我們的研究目的就是利用可見光、紅外線、無線電波三個波段於行星狀星雲不同的輻射機制來比對並討論，

1. 求出行星狀星雲三個波段的強度和空間分布，
2. 探討行星狀星雲的結構、性質，
3. 找出行星狀星雲距離的估算模式。

參、 研究設備與器材：

- 一、 個人電腦
- 二、 Excel 軟體
- 三、 Aladin Java Applet 影像分析軟體



Aladin 應用軟體中的觀測站台簡介：Sky View

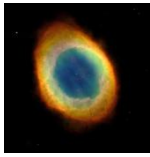

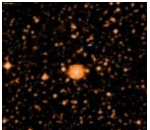









此為 NASA 開發維護的一個網上虛擬天文臺，可以產生從 γ 射線到無線電波段任何部分天區的圖像。對於普通天文愛好者，只要給出要顯示的天區位置或天體名稱，所要圖像的觀測波段，Sky View 就可以讓你看到所要天區或天體的圖像。





表一、本次研究波段簡介

波段名	電磁波譜	主要頻率	解析力	簡介
4850MHz z GB6	無線電波連續波段	4850 MHz	3.5 角分	此一波段為無線電的連續譜，可以測量出行星狀星雲的帶電粒子和周圍星際介質所作用的輻射範圍與強度。
WISE 22 μ m	紅外線波段	12-15 THz	12 角秒	紅外線波段主要測量的為雲氣溫度的熱輻射，因此行星狀星雲環面(torus)的溫度將能夠被測量出來。
DSS BLUE	可見光波段	637 THz	2 角秒	紫外線輻射打在外層雲氣上產生電子躍遷所產生的光，行星狀星雲主要的〔OIII〕譜線躍遷在此波段中。

表二、目標簡介

目標	圖像	視星等 (mag)	距離 (ly)	中心星溫度 (K)	擴張速度 (Km/s)	特性簡介
NGC7293		7.3	700[1]		36[2]	螺旋星雲 普適模型 0 度角
NGC3132		9.87	2000[3]	100000	24	南環狀星雲

目標	圖像	視星等 (mag)	距離 (ly)	中心星溫度 (K)	擴張速度 (Km/s)	特性簡介
M57		8.8	2300 [1]	125000	25	環狀星雲 普適模型 0 度角
M27		7.5	1360 [1]		31[2]	啞鈴星雲
NGC 6751		11.9	6500	140000		
NGC 40		11.4	3500	50000		蝴蝶結星雲
NGC 3242		8.6	1400[4]			木魂星雲
NGC6826		8.8	2000			眨眼星雲
NGC 2392			2900[2]			愛斯基摩星雲
NGC 6543		10.1	3300	80000		貓眼星雲 (Reed et al, 1999).
NGC 7027		10	3000[5]		17[8]	極為年輕
M76		10.1	2500[7]			小啞鈴星雲 普適模型 45 度角
M97		9.9	2030[6]	123000	33[10]	貓頭鷹星雲
NGC 2346		11.6	2000			普適模型 45 度角

目標	圖像	視星等 (mag)	距離 (ly)	中心星溫度 (K)	擴張速度 (Km/s)	特性簡介
NGC 2438		10.8	3000	75000		
NGC 3918		8.5	4900		24[9]	
NGC 6302				200000		蝴蝶星雲 普適模型 90 度角
NGC 7009		8	2000-4000	55000	45[11]	

[1] Harris, Hugh C.; Dahn, Conard C.; Canzian, Blaise; Guetter, Harry H. et al. (February 2007). "Trigonometric Parallaxes of Central Stars of Planetary Nebulae". *The Astronomical Journal* 133 (2): 631–638

[2] O'Dell, C. R.; Balick, B.; Hajian, A. R.; Henney, W. J. et al. (2002). "Knots in Nearby Planetary Nebulae". *The Astronomical Journal* 123 (6): 3329–3347.

[3] "Fast Facts – Planetary Nebula NGC 3132". Hubble Heritage Project. Space Telescope Science Institute. Retrieved 2007-10-06.

[4] "NGC 3242: The 'Ghost of Jupiter' Planetary Nebula". NASA Astro Pic of the Day. Retrieved 2010-12-03.

[5] "Staring into the Winds of Destruction: HST/NICMOS Images of the Planetary Nebula NGC 7027". Retrieved 2008-10-11.

[6] Stanghellini, Letizia et al. (December 2008), "The Magellanic Cloud Calibration of the Galactic Planetary Nebula Distance Scale", *The Astrophysical Journal* 689 (1): 194–202

[7] Philips, J.P. (2005). "The distances of highly evolved planetary nebulae". *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 357(2): 619–625.

[8] Masson, C. R. The structure of NGC 7027 and a determination of its distance by measurement of proper motions. *The Astrophysical Journal*. 1989/1, **336**: 294–303.

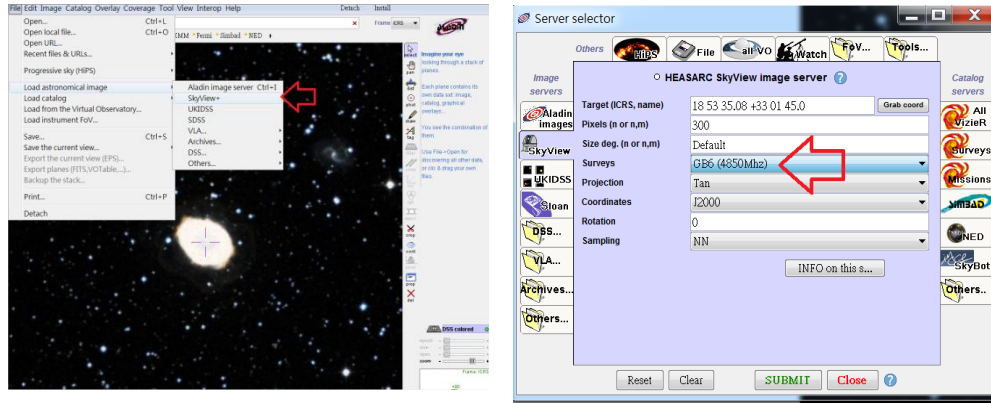
[9] Clegg, R.E.S.; Harrington, J. P.; Barlow, M. J.; Walsh, J. R. (15 March 1987). "The Planetary Nebula NGC 3918". *The Astrophysical Journal* (American Astronomical Society): 551–571.

[10] Cuesta, L.; Phillips, J. P. (November 2000), "Excitation and Density Mapping of NGC 3587", *The Astrophysical Journal* **120** (5): 2661–2669

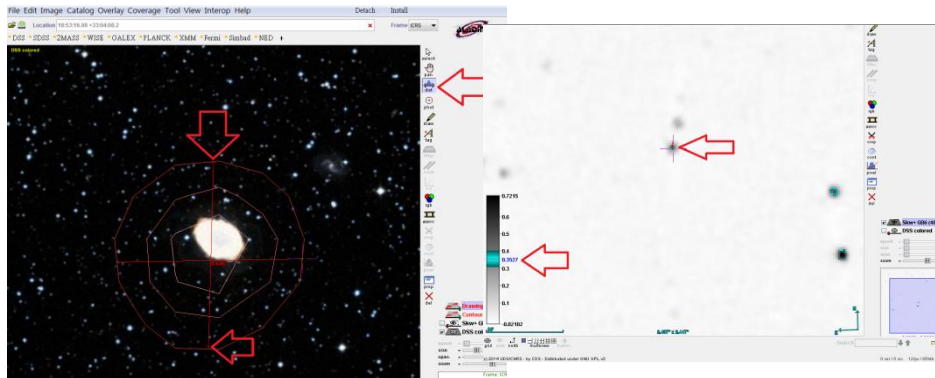
[11] Fernández, R., Monteiro, H., & Schwarz, H. E. (2004). Proper motion and kinematics of the ansae in NGC 7009. *The Astrophysical Journal*, 603(2), 595.

肆、 研究方法步驟：

- 一、選取以上表列目標作為研究對象。
- 二、利用 Aladin sky atlas 獲得 DSS BLUE、GB6(4850Mhz)、WISE(22 μ m)的影像。



- 三、將上述三波段訊號強度線繪出，並加以測量其大小範圍和其強度，進而分析。點選 cont 並點選 Get Countours，做出其訊號強度線。點選 dist，並點擊其欲選取範圍，以測量長度，將欲研究之所有訊號強度線疊合，以便分析。

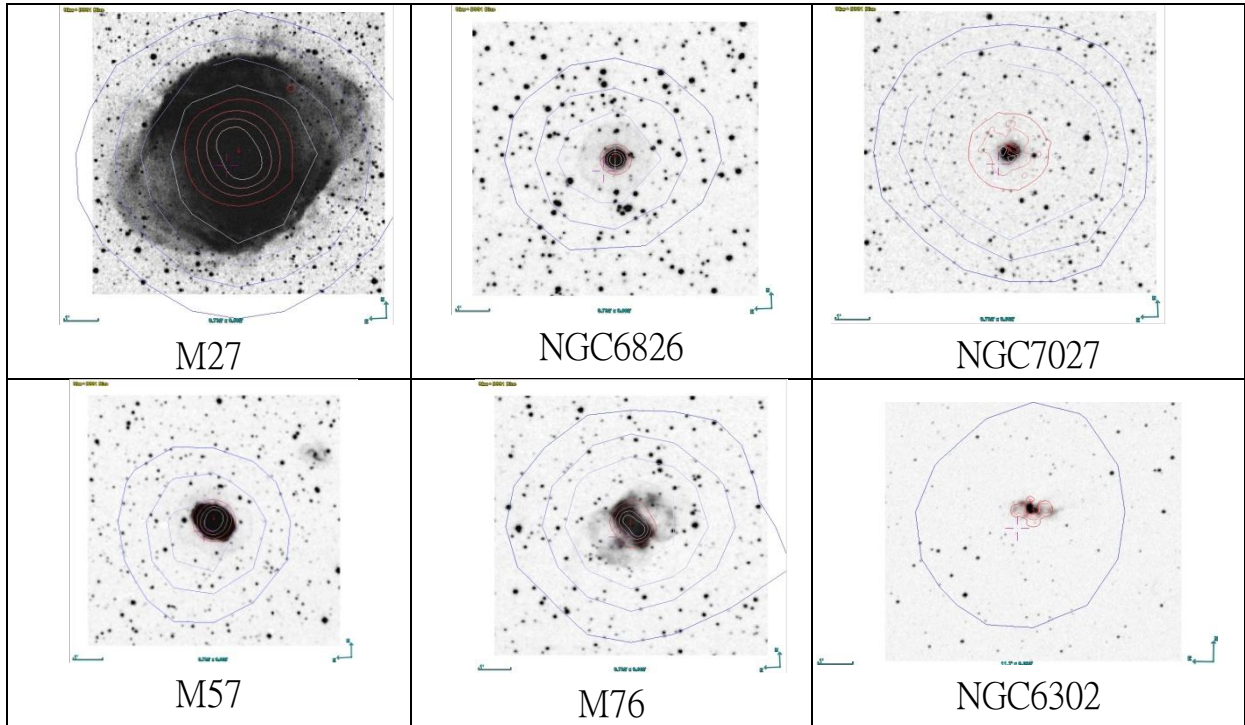


- 四、點選 pixel，選取 get all，並按下 CM on view，直至欲搜尋目標中央，即取得 GB6 的強度。另外 WISE(22 μ m)的強度，可由 IRSA 網站 (<http://irsa.ipac.caltech.edu/frontpage/>)查出。
- 五、將數據利用 Excel 軟體整理列表
- 六、將所欲分析的數據以 Excel 軟體裡的「資料分析」功能做出相關係數的表格
- 七、利用相關係數表格尋找出兩者存在高度相關的數據，進一步利用圖表呈現，再將高度相關的數據，做線性回歸，量化其關係而得到相關公式及 R 平方值。最後利用量測數據來推測行星狀星雲的距離，並做誤差分析。

伍、 研究結果：

一、圖形比較

一些代表性的行星狀星雲之三個波段之疊合影像:紅色為 WISE 紅外線波段等強線；藍色則是無線電連續波段等強線，為強調行星狀星雲的範圍，顏色越淺表示訊號越強。



圖五、各 PN 疊合影像

上圖為代表性的行星狀星雲之三個波段之疊合影像，可以討論一些地方。一、無線電的較強亮區都比可見光和紅外線的亮區大，二、紅外線的亮區都在中心附近，可能是中心附近的環面雲氣溫度和噴出來的高熱雲氣溫度造成的熱輻射。NGC7027 是個年輕的行星狀星雲，他的紅外線輻射很強，其亮區比可見光還大，其他的行星狀星雲可見光的亮區和紅外線差不多，甚至像 M27 可見光的亮區比紅外線大，可能是 M27 隨著時間過去熱量慢慢散失，紅外線強度會慢慢下降，代表 M27 可能是年紀比較老的行星狀星雲。

下面三個行星狀星雲代表普適模型的 0 度，45 度，90 度視角，M57 的紅外線亮區比較圓，隨著角度加大，像 45 度的 M76 紅外線的亮區就扁了一些，90 度視角的 NGC6302 的紅外線亮區更扁，這個紅外線亮區不同的原因，可能是從不同角度去看環面造成的。

假設行星狀星雲都是很類似的機制形成，隨著行星狀星雲的年紀越大，根據前面文獻所敘，可見光和無線電的亮區都會變大，擴張速度也會變快，紅外線強度會慢慢下降。我們可以用不同波段之間的差異，來研究和驗證行星狀星雲的理論。

二、數據量測

表三、本次研究的量測數據

目標	中心星溫度 (K)	擴張速度 (km/s)	GB6 (角分)	DSS BLUE (角分)	亮度 (mag)	WISE22 強度 (mag)	亮度-WISE22 強度 (mag)	GB6-DSS BLUE (角分)
NGC7293		36.00	19.03	13.55	7.6	5.15	2.45	5.49
NGC3132	100000	24.00	7.24	1.23	9.87	1.58	8.30	6.01
M57	125000	25.00	5.99	1.42	8.8	0.90	7.90	4.57
M27		31.00	9.48	6.81	7.5	3.26	4.24	2.67
NGC6751	140000			0.43	11.9	-1.09	12.99	
NGC40	50000		6.32	0.83	11.4	-2.16	13.56	5.49
NGC3242			9.49	0.92	8.6	-1.50	10.10	8.57
NGC6826			6.13	2.19	8.8	-0.55	9.35	3.94
NGC2392			6.53	0.94	10.1	0.77	9.33	5.60
NGC6543	80000		7.18	0.79	9.8	-3.00	12.80	6.39
NGC7027		17.00	7.94	0.80	10	-3.97	13.97	7.14
M76			7.79	1.67	10.1	2.69	7.41	6.12
M97	123000	33.00		3.44	9.9	6.30	3.60	
NGC2346			4.43	1.49	11.6	4.97	6.63	2.94
NGC2438	75000		6.12	1.05	7.1	3.73	3.38	5.07
NGC3918		24.00	9.05	0.67	8	-1.87	9.87	8.38
NGC6302	200000		8.02	0.79	10.8	-3.86	14.66	7.23
NGC7009	55000	45.00	7.96	0.64	8.5			7.32

我們將行星狀星雲的數據列出，因為亮區大小和亮度均會受到行星狀星雲的距離遠近影響，產生強度大小變化，和實際數值可能有差，一如一發光物體在遠方，我們看來呈現較暗淡，可是當其與我們拉近距離，光亮程度將會提高。所以我們把同一目標的可見光亮度去減 WISE22 強度(mag)，GB6 的視大小去減 DSS BLUE 的視大小(角分)，因為同一目標發出的可見光和紅外線距離地球差不多遠，將其相減得到兩者差值，可以使距離對數據強度變化的影響較小。接著再對這些數據做相關分析，結果如下

表四、上表數據的相關性比較

	中心星溫度(K)	擴張速度(km/s)	GB6(角分)
中心星溫度(K)	1.000		
擴張速度(km/s)	-0.777	1.000	
GB6(角分)	0.325	0.365	1.000
DSS BLUE(角分)	0.124	0.349	0.864
亮度(mag)	0.365	-0.424	-0.472
WISE22 強度(mag)	-0.188	0.935	0.240
亮度-WISE22 強度(mag)	0.238	-0.986	-0.375
GB6-DSS BLUE(角分)	0.212	-0.085	0.194

當兩個變數的線性關係增強時，相關係數趨於 1 或-1。當 $r>0$ 時，表示兩變數正相關， $r<0$ 時，兩變數為負相關。 $|r|$ 越接近 1，兩變數間線性關係越密切； $|r|$ 越接近於 0，表示兩變數的線性相關越弱。一般可按三級劃分： $|r|<0.4$ 為低度線性相關； $0.4\leq|r|<0.7$ 為中度相關； $0.7\leq|r|<1$ 為高度線性相關。

由上表可知，中心星溫度和行星狀星雲外層雲氣擴張速度成高度負相關，GB6 視大小和 DSS BLUE 視大小高度正相關，而(亮度-WISE22 強度)和外層雲氣擴張速度高度負相關。因此我們推論：當中心星溫度越高時，其擴張速度越慢，中心星溫度越低，擴張速度越快。而中心星溫度越高，代表著行星狀星雲的年齡越小，其擴張速度是越慢的；反之，年齡越大的行星狀星雲，其擴張速度越快。另外數據中，擴張速度越大，WISE 的波段強度呈現下降(mag 變大)，讓(亮度-WISE22 強度)的數值變小。

表五、用已有文獻距離的行星狀星雲，來做可見光實際大小的相關性分析

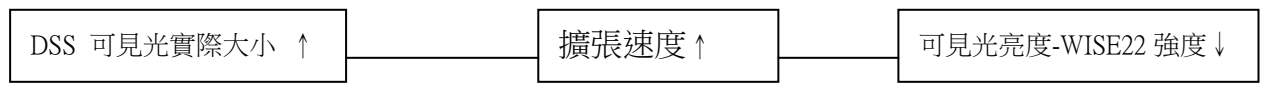
目標	距離 (ly)	中心星溫度 (K)	擴張速度 (km/s)	DSS BLUE 視角 (角分)	DSS BLUE 實際大小 (ly)
NGC7293	700		36.00	13.55	2.758
NGC3132	2000	100000	24.00	1.23	0.716
M57	2300	125000	25.00	1.42	0.947
M27	1360		31.00	6.81	2.695
NGC3242	1400			0.92	0.373
NGC6543	3300	80000		0.79	0.761
NGC7027	3000		17.00	0.80	0.698
M76	2500			1.67	1.217
M97	2030	123000	33.00	3.44	2.031

有些行星狀星雲利用膨脹視差把和地球距離量出，我們將已經可以確定距離的行星狀星雲列出如上表，將 DSS 的視大小(θ)乘上距離(R)就是實際大小(L)，而得到 DSS BLUE 實際大小(ly)，接著再對上列數據做相關係數。

表六、可見光實際大小的相關性

	中心星溫度(K)	擴張速度(km/s)
DSS BLUE 視角(角分)	0.673	0.795
DSS BLUE 實際大小(ly)	0.606	0.890

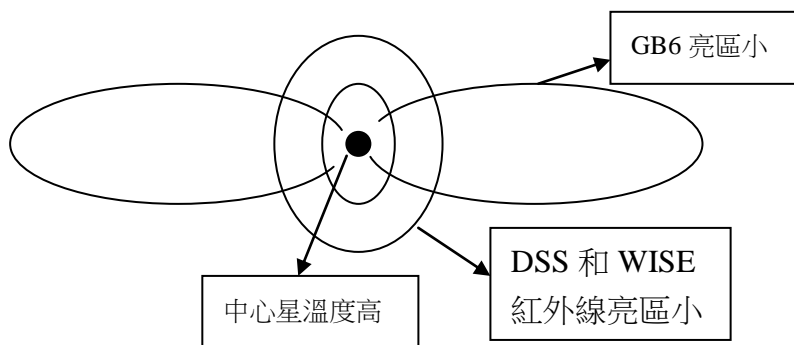
DSS BLUE 實際大小(ly)和擴張速度(km/s)成高度正相關，由這些數據關係，我們可以得到下圖



圖六、本次研究各項參數的相關圖

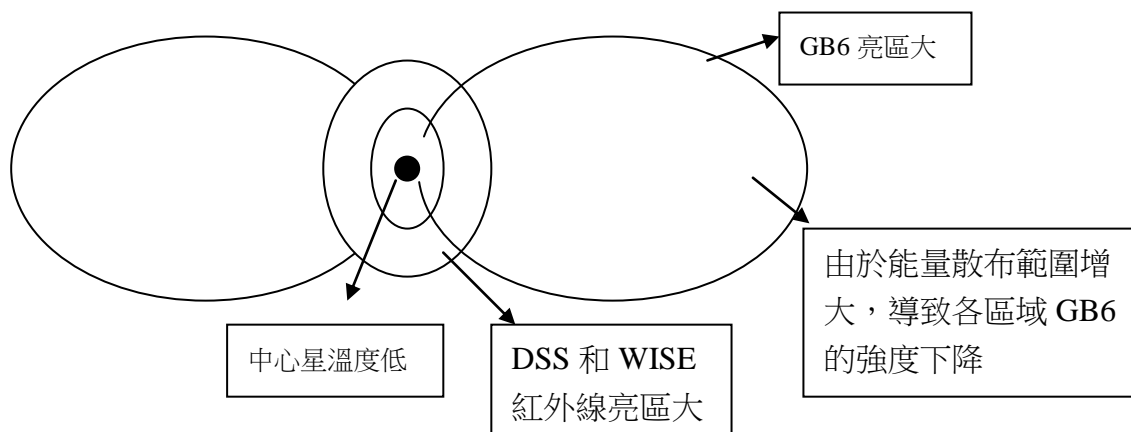
三、和理論模型的比較

我們可以利用普適的行星狀星雲的模型來解釋本次研究的量測數據，如下圖



圖七、年輕的行星狀星雲模型

當行星狀星雲年輕時，因為剛結束核融合反應，中心星的溫度可能較高。此時緊密環面(torus)比較小，WISE 紅外線亮區小但強度強，因緊密環面(torus)擋住使吹出的高速恆星風區域比較窄小，所以 DSS 可見光的亮區小，被紫外線輻射激發的雲氣少，所以可見光的強度可能不強，而高速恆星風帶電粒子和星際物質交互作用造成的無線電亮區也比較小。

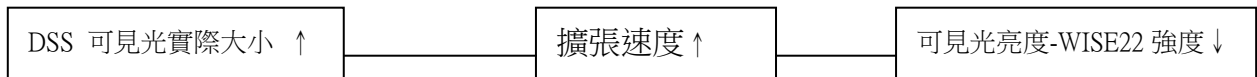


圖八、年老的行星狀星雲模型

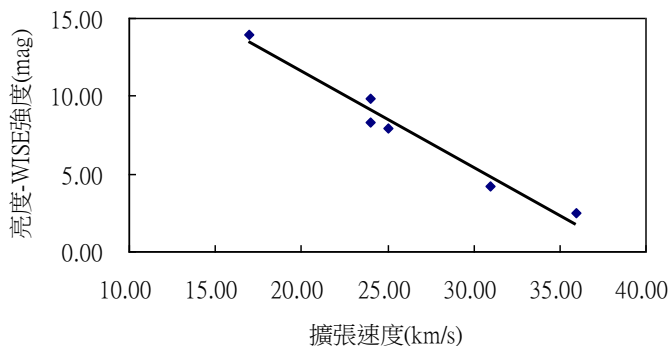
隨著行星狀星雲年齡增大，中心星的溫度可能下降。此時緊密環面(torus)已經擴張較大，所以 WISE 紅外線亮區大但強度弱，而因環面(torus)鬆開擋住區域，使吹出的高速恆星風區域比較大，所以 DSS 可見光的亮區變大，激發區域變多可能讓可見光變強，而高速恆星風帶電粒子和星際物質交互作用造成的無線電亮區也變大。

陸、 討論：

根據結果中討論出行星狀星雲的關係，我們找出一個可以估算距離的方法。首先假設行星狀星雲的形成機制大致相同，利用結果裡行星狀星雲的關係，如下圖。我們利用可以容易觀察的(可見光亮度-WISE22 強度)，來線性迴歸去推測星雲擴張速度和行星狀星雲的距離。



一、由(可見光亮度-WISE22 強度)來線性迴歸出星雲擴張速度



上圖為擴張速度與亮度-WISE22 強度相關係數做圖，並加上了趨勢線，求出兩者間的關係方程式，由趨勢線與 R^2 值可以看出兩者的相關性極高。線性迴歸的關係如下公式：

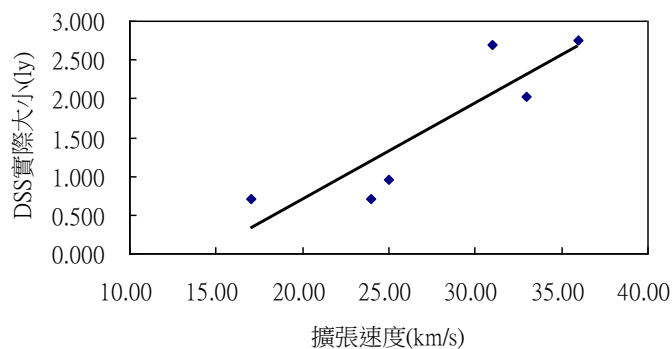
$$(O-W) = -0.6149V + 23.877 \quad R^2 = 0.9673$$

(O-W)是(可見光亮度-WISE22 強度)，而 V 代表星雲擴張速度。

目標	亮度-WISE22 強度(mag)	回歸式換算之擴張速度(km/s)	其他資料擴張速度(km/s)	相對誤差
NGC7293	2.45	34.85	36.00	-3.30%
NGC3132	8.30	25.34	24.00	5.29%
M57	7.90	25.98	25.00	3.77%
M27	4.24	31.94	31.00	2.94%
NGC6751	12.99	17.71		
NGC40	13.56	16.78		
NGC3242	10.10	22.41		
NGC6826	9.35	23.62		
NGC2392	9.33	23.65		
NGC6543	12.80	18.01		
NGC7027	13.97	16.11	17.00	-5.51%
M76	7.41	26.78		
M97	3.60	32.98	33.00	-0.07%
NGC2346	6.63	28.05		
NGC2438	3.38	33.34		
NGC3918	9.87	22.77	24.00	-5.38%
NGC6302	14.66	14.99		
NGC7009			45.00	

利用相對誤差來檢查線性迴歸求出的速度和查到的其他資料擴張速度，來做比較。(相對誤差指的是(求出的速度-其他資料擴張速度)/求出的速度)。由結果可以看出，利用(可見光亮度-WISE22 強度) 求出的速度和其他資料擴張速度幾乎相同，T-test 的 p 值為 0.9992，兩數列無顯著差異。

二、利用星雲擴張速度來線性迴歸出行星狀星雲的距離



上圖為擴張速度與 DSS 的實際大小相關作圖，並加上了趨勢線，求出兩者間的關係方程式，由趨勢線與 R² 值可以看出兩者的相關性很高。線性迴歸的關係如下公式：

$$L = 0.1241V - 1.7933 \quad R^2 = 0.7913$$

L 就是實際大小，V 代表星雲擴張速度，求出 DSS 的實際大小(L)後，再去除以 DSS 視大小(θ)，便是行星狀星雲的距離(R)。

目標	求出的實際大小(ly)	求出的距離(ly)	其他資料的距離(ly)	相對誤差
NGC7293	2.53	643	700	-8.94%
NGC3132	1.35	3777	2000	47.05%
M57	1.43	3474	2300	33.79%
M27	2.17	1095	1360	-24.18%
NGC6751	0.40	3215	6500	-102.18%
NGC40	0.29	1203	3500	-190.95%
NGC3242	0.99	3701	1400	62.17%
NGC6826	1.14	1784	2000	-12.12%
NGC2392	1.14	4195	2900	30.87%
NGC6543	0.44	1917	3300	-72.12%
NGC7027	0.21	886	3000	-238.66%
M76	1.53	3141	2500	20.41%
M97	2.30	2298	2030	11.64%
NGC2346	1.69	3897	2000	48.68%
NGC2438	2.34	7683	3000	60.95%
NGC3918	1.03	5324	4900	7.97%
NGC6302	0.07			
NGC7009				

兩數列的 T-test 的 p 值為 0.6064，無顯著差異，代表求出和查到距離的兩數列差不多。但是從相對誤差來看，距離的量測仍然不是很準，(此處相對誤差指求出的距離-其他資料距離)/ 求出的距離)，可以看出利用擴張速度來求距離誤差很大。

推測行星狀星雲的距離難以測量可能性，可能性一是現階段的觀測法量到的距離是有誤的，所以一開始做 DSS 實際大小和擴張速度的相關性時就有問題，因為這裡用了用膨脹視差法文獻量到的距離，所謂膨脹視差是用解析力高的望遠鏡，觀察一段時間膨脹的角度，得到視角膨脹速度，然後再和實際膨脹速度比較後得出行星狀星雲的距離 (Reed et al, 1999)。

可能性二是行星狀星雲的普適模型有錯，每個行星狀星雲的噴發過程均是有所差異，所以無法利用統計來得到其距離，例如 NGC7027 是一個剛剛形成的行星狀星雲，而 NGC40 是一個很老的行星狀星雲，它們的距離誤差都很大，再加上行星狀星雲和週遭星際介質也會有交互作用，導致發光範圍和強度均有變化。

可是在利用(可見光亮度-WISE22 強度)來求出的速度，又和其他資料擴張速度幾乎相同，似乎又說明了行星狀星雲仍有其共通性，仍有可能有一個普適模型。要繼續探討行星狀星雲的距離和模型問題，還需要更多觀測資料和研究。

柒、 結論

一、行星狀星雲的各波段圖像中，無線電的亮區都比可見光和紅外線的亮區大，紅外線的亮區都在中心附近，是環面雲氣和噴出來的雲氣溫度造成的熱輻射。

二、普適模型的 0 度，像 M57 的紅外線亮區比較圓，45 度的 M76 紅外線的亮區就扁了一些，90 度視角的 NGC6302 的紅外線亮區更扁，可能是從不同角度去看環面造成的。

三、中心星溫度和行星狀星雲外層雲氣擴張速度呈高度負相關；無線電觀測 GB6 視直徑和可見光 DSS BLUE 視直徑高度呈正相關；而可見光亮度減去紅外線 WISE22 強度和外層雲氣擴張速度呈高度負相關。

四、行星狀星雲年輕時，中心星的溫度可能較高。此時緊密環面(torus)比較小，WISE 紅外線亮區小但強度強，因緊密環面(torus)擋住使吹出的高速恆星風區域比較窄小，所以 DSS 可見光的亮區小，被紫外線輻射激發的雲氣少，所以可見光的強度可能不強，而高速恆星風帶電粒子和星際物質交互作用造成的無線電亮區也比較小。行星狀星雲年老時，上述狀況反之。

五、擴張速度與 DSS BLUE 實際大小呈現正相關。試利用擴張速度求得實際大小，再利用視大小求出行星狀星雲的距離，但與目前公認距離有很大的誤差。

六、利用行星狀星雲的可見光亮度去減紅外線 WISE22 強度來求出擴張速度，經過 T 檢定是個統計上可信的模式，是本次研究發現一個新的可以應用的方法。

捌、 參考資料：

- Bruce Balick & Adam Frank (2004)。天文學--恆星死亡紀事。科學人, 30 期,102-112 頁。
- Condon, J. J., Kaplan, D. L., & Terzian, Y. (1999). Infrared Planetary Nebulae in the NRAO VLA Sky Survey. *The Astrophysical Journal Supplement Series*, 123(1), 219.
- Harpaz, A. (1994). Stellar evolution. *Wellesley, Mass.: AK Peters, c1994.*, 1.
- Harris, H. C., Dahn, C. C., Canzian, B., Guetter, H. H., Leggett, S. K., Levine, S. E., ... & Walker, R. L. (2007). Trigonometric parallaxes of central stars of planetary nebulae. *The Astronomical Journal*, 133(2), 631.
- Kwok, S. (2007). *The origin and evolution of planetary nebulae*. Cambridge University Press.
- Kwok, S. (2010). Morphological Structures of Planetary Nebulae. *Publications of the Astronomical Society of Australia*, 27(02), 174-179.
- Reed, D. S., Balick, B., Hajian, A. R., Klayton, T. L., Giovanardi, S., Casertano, S., ... & Terzian, Y. (1999). Hubble space telescope measurements of the expansion of NGC 6543: parallax distance and nebular evolution. *The Astronomical Journal*, 118(5), 2430.
- Renzini, A. (1989). Thermal pulses and the formation of planetary nebula shells. In *Planetary Nebulae* (pp. 391-400). Springer Netherlands.
- Umana, G., Leto, P., Trigilio, C., Buemi, C. S., Manzitto, P., Toscano, S., ... & Cerrigone, L. (2008). Millimeter observations of planetary nebulae-A contribution to the Planck pre-launch catalogue. *Astronomy & Astrophysics*, 482(2), 529-534.
- Wu, C. H. (2001). Multi-wavelength Observations of Planetary Nebula.
- 許瑞榮(2000)。M57 的真正形狀是什麼?—行星狀星雲漫談。2000 年 12 月 15 日。取自 <http://resource.blsh.tp.edu.tw/taipei-earth/study/m57.htm>