

活躍星系核中心區域的幾何結構以及運動模式

鄭以文 孫維新
國立中央大學天文研究所

摘要

「活躍星系核」(Active Galactic Nuclei, 簡稱 AGNs) 的内部結構, 一直是天文學家很感興趣的課題。在此我們使用「國際活躍星系核聯測計劃」(International AGN Watch Program), 以及其他文獻所觀測過的數個賽佛特 I 型 (Seyfert I) 活躍星系核的資料, 進行光譜擬合與分析, 試圖了解 AGN 中心區域的幾何結構與氣體運動模式。

活躍星系核的特徵之一是「連續譜」與「發射線」都會有快速、且大幅度的光度變化, 而這兩者的光變曲線有很高的相關性 — 「發射線」的光變較「連續譜」的光變, 有數天到數週的時間延遲。且不同游離程度的譜線會有不同的時間延遲 — 高游離程度的譜線, 其時間延遲較短; 低游離程度的, 則時間延遲較長。

此外, 活躍星系核處在亮態 (high state) 或暗態 (low state) 時, 這些特徵也會有所變化; 亮態時發射線的時間延遲較長、連續譜的顏色有偏藍的現象, 並且寬 H β 發射線的紅位移會變小; 反之處於暗態時, 則發射線的時間延遲較短、連續譜的顏色偏紅, 寬 H β 發射線的紅位移會變大。在此篇論文裡, 我們發現寬 H β 發射線紅位移的變化, 與中心緻密天體的光度變化, 有很高的「逆相關性」存在, 紅位移的最大變化程度高達 0.004, 相當於 1200 公里/秒。我們認為當中心緻密天體變亮, 輻射壓會使周圍寬發射譜線區 (Broad Line Region) 產生向外的徑向運動。

我們也比較了在不同絕對星等 (absolute magnitude) 的活躍星系核, 其譜線光變時間延遲的差異, 較亮的活躍星系核, 時間延遲較長, 每增加一個星等, 時間延遲會變長約 4~10 天。這與個別活躍星系核, 如 NGC 5548, 從暗態變化到亮態, 時間延遲的增加量相符 (Peterson et al. 1998)。

關鍵詞：活躍星系核 (Active Galactic Nuclei)、國際活躍星系核聯測計劃 (International AGN Watch Program)、賽佛特星系 (Seyfert Galaxy)、寬發射譜線區 (Broad Line Region)、紅位移變化 (Redshift Variability)、時間延遲 (Time Lag)

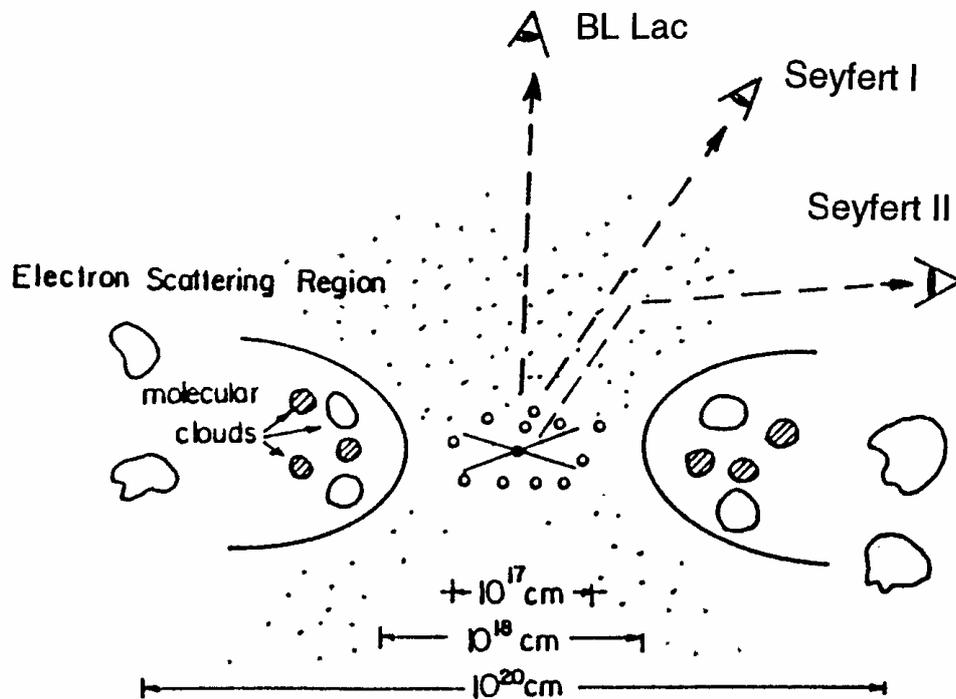
1. 簡介

1.1 活躍星系核的理論模型

解釋活躍星系核的理論模型很多，目前最為人普遍接受的「統一理論模型」(Unification Scheme)指出，在活躍星系核的中心有一個超大質量的黑洞，周圍的物質流入，形成吸積盤 (Accretion Disk)，吸積盤靠近中心部份是加瑪射線與 X 射線的來源，而吸積盤表面則是紫外線及可見光連續譜的來源，這些能量激發了周圍高速旋轉的氣體，造成寬譜線發射區 (Broad-Line Region, 簡稱為 BLR)，往外則是旋轉速度較慢的雲氣，也就是窄譜線區 (Narrow-Line Region, 簡稱為 NLR)，再往外有著一個形狀像甜甜圈的灰塵環 (Dust Torus)，會遮蔽由內部發出的光線，吸

積盤的法線方向兩端有噴流(Jet)噴出，通常必須在電波波段才能觀測到。

根據統一理論模型的觀點，我們所觀測到活躍星系核的分類雖然複雜，但其實只是觀測者由不同角度看到本質相同的活躍星系核(圖一)。如果是側向(edge-on)方向的觀測者，從與吸積盤盤面平行的方向觀測，因為灰塵環的遮蔽，我們只能看到外圍窄譜線區的窄發射線，所以看到的結果歸類為 Seyfert II 星系。如果是面向(face-on)的觀測者，從與吸積盤盤面垂直的方向觀測，只能看到不穩定的噴流，快速地朝我們而來，這就被歸類為 BL Lac 天體的來源。

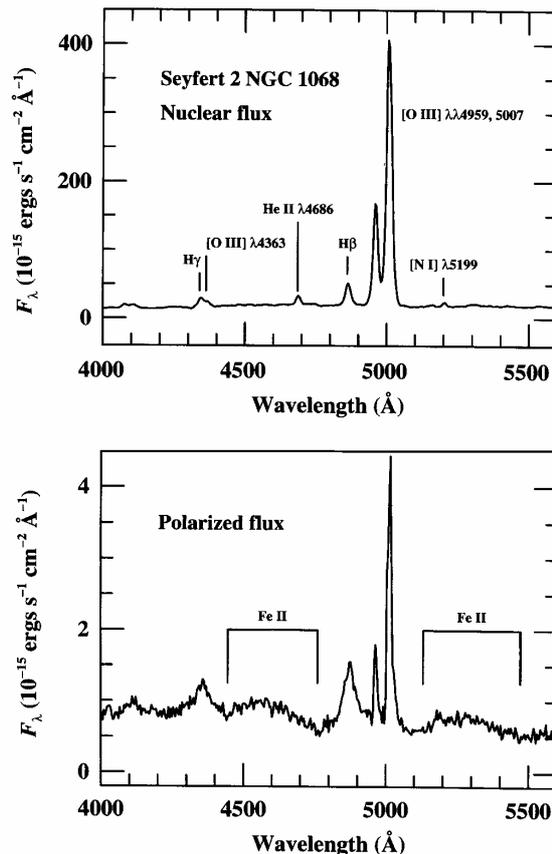


圖一：不同觀測角度，會看到不同的部分，因此有不同的分類。其中 Serfert II 中心高速運動氣體發射的寬譜線，經過散射產生偏振，再進入觀測者的視線，所以透過偏極化觀測，便可以量到原本很微弱、不易量到的寬譜線。(Blandford et al. 1990, 'Active Galactic Nuclei', p147)

如果是中等傾角的觀測者，寬、窄發射線都可以測量到，這種活躍星系核就被分類為 Seyfert I 星系，這篇論文討論的主要就是 Seyfert I 這類的天體。Seyfert I 星系的寬譜寬度可高達數千，甚至上萬公里／每秒，窄譜寬度通常只有數百公里／秒。支持統一理論模型的一個證據是 1985 年 Antonucci and Miller 所作的偏極化 (polarization) 觀測，透過偏振濾鏡，過濾掉不同偏振方向、只允許某特定散射角的光線通過，原本只看得到窄譜的 Seyfert II 星系，竟然得到如 Seyfert I 星系的寬譜(如圖二所示)，原因即是這些原本被灰塵環所遮蔽的光線，經過上層電子的折射，產生偏振，進入觀測者的視線。所以分

類繁多的活躍星系核，可能都擁有相同的本質。

我們在這篇論文中，研究活躍星系核最內部的結構—寬發射譜線區，與吸積盤之間的關係。一般來說，由於距離很遠，又加上觀測儀器的限制，我們無法用望遠鏡直接解析活躍星系核內部的結構，所以天文學家利用所謂的「反響描繪」(Reverberation Mapping)，間接地倒推其內部結構，因為我們相信在光游離模型 (Photoionization Model) 理論中，寬發射譜線的光變，是由中心連續譜所驅使，所以觀察兩者之間的時間延遲，可以讓我們獲得活躍星系核內部結構的資訊。



圖二：Seyfert II 星系 NGC 1068 的偏極化觀測，上欄是一般觀測所得到的光譜，下欄則是透過偏振濾鏡觀測的光譜，我們可以看到 H β 、H γ 等發射線的光譜由窄變寬。(Peterson, B. M. 1997, 'An Introduction to Active Galactic Nuclei', p115)

1.2 國際活躍星系核聯測計劃

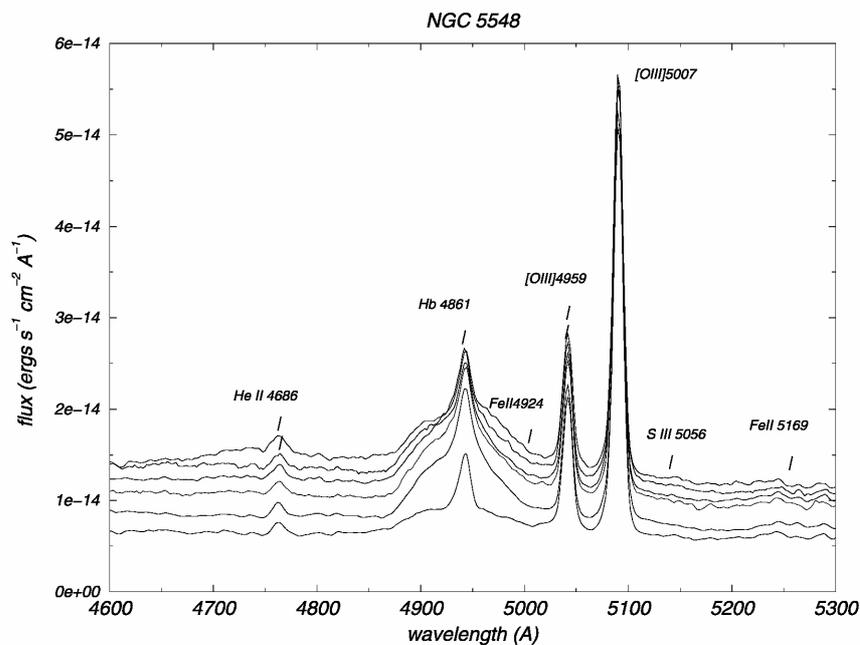
自 1988 年年底開始，為了能密集且連續的監測活躍星系核，數十位天文學家組織了「國際活躍星系核聯測計劃」(The International AGN Watch Program)，集合申請太空衛星(例如 HST、IUE)的大量觀測時間，加上世界各地的地面光學望遠鏡的觀測時間，共同觀測了第一個目標 - NGC 5548，取得了多波段的光譜、光度數據、以及極高時間分辨率的光變曲線。

例如 IUE 國際紫外線探測衛星(International Ultraviolet Explorer)，平均每 4 天便觀測一次 NGC 5548，並且連續監測了八個月；同時在地面也有多組望遠鏡，同步地進行密集的監測，再利用網路及計算機作統一的數據校正，便得到可進行互相比較、分析的紫外線和可見光波段光譜及光度資料。利用這些資料，天文學家得到幾個支持「光游離模型」(Photoionization Model)的重要證據，就是「發

射線」的光變是由「連續譜」所趨動的，而且

不同游離程度發射線的光變，隨連續譜的光變有不同的時間延遲，這些現象在第三章將有詳細的討論。

由於第一個目標-NGC 5548 觀測成果十分輝煌，取得許多有價值的科學結果，所以「國際活躍星系核聯測計劃」陸續又觀測了 6 個活躍星系核 (NGC3783、NGC4151、NGC7469、Fairall9、Mkn509，以及 3C390.3)。這個聯測計劃的主要機構之一，俄亥俄州大學天文系，建立了一個網站(<http://www.astronomy.ohio-state.edu/~agnwatch/>)，使天文學家或有興趣的使用者，可以在此取得聯測計劃的原始數據、相關發表論文之摘要，以及目前此計劃的最新動態等等資訊。這篇論文的所使用的數據，若無另外說明，主要就是來自這裡。



圖三：我們任意選取六幅亮度不同的光譜，說明連續譜與發射線的變化情形

2. 資料分析

我們使用「國際聯測計劃數據檔」中經過仔細校正的 247 幅 NGC 5548 光譜來作分析，它們是從 1988 年 12 月 14 日(JD2,447,509) ~ 1993 年 9 月 25 日(JD2,449,255)，這 5 年的觀測由 Wanders et al. 校正(Wanders, I. et al. 1996)，專門作為分析 H β 所用。我們任意選取了六幅從暗態變化到亮態的光譜(如圖三)，在此圖中，我們可以看到連續譜快速且大幅度地變亮，並且變得較藍，即短波增加的幅度較大。至於 H β 寬發射線，除了強度改變外，光譜形狀也明顯不同。本章節便是說明我們如何分析這些連續譜與發射線的變化。

2.1 光譜之絕對通量校正

長時間 AGN 監測光譜的絕對通量校正，是利用窄譜線在很短的時間尺度下，其光通量應為定值的假設，來進行校正。因為窄譜線發射區 (NLR) 雲氣的電子密度低，且距離中心遠，所以受中心激發所產生的光變時間尺度極長。在此我們按 AGN Watch Program 一向以來的作法，選擇強且窄的氧離子 [OIII] λ 5007 來作為校正譜線。假設 [OIII] λ 5007 在短時間尺度的強度固定，我們可以用 $F_{\lambda} / F([\text{OIII}]\lambda 5007)$ 及 $F(\text{H}\beta) / F([\text{OIII}]\lambda 5007)$ 來判斷連續譜及寬發射譜的光變。

但由 H β 光譜外型，明顯可以看出是由兩條、甚至兩條以上的譜線組成，一為寬譜（運動速度高，因為發射此寬譜的雲氣較靠近中心）、一為窄譜（運動速度慢，屬於外圍的發射雲氣）。我們希望能更準確的獲得 H β 的光變曲線，所以我們試著用兩組 Gaussian 曲線去擬合 H β 的寬譜與窄譜。

2.2 H β 寬譜線與窄譜線的擬合

我們利用電腦程式來進行光譜分析，其擬合的流程如下：

2.2.1 連續譜的選取

我們避開一些主要的發射線，如 Fe II、S III、He II，選取 4660 ~ 4720 埃及 5160 ~ 5220 埃，連接這兩段光譜的平均通量，作為稍後擬合 [O III] λ 4959 5007 以及 H β 窄譜與寬譜的連續譜。

2.2.2 窄發射譜線的擬合

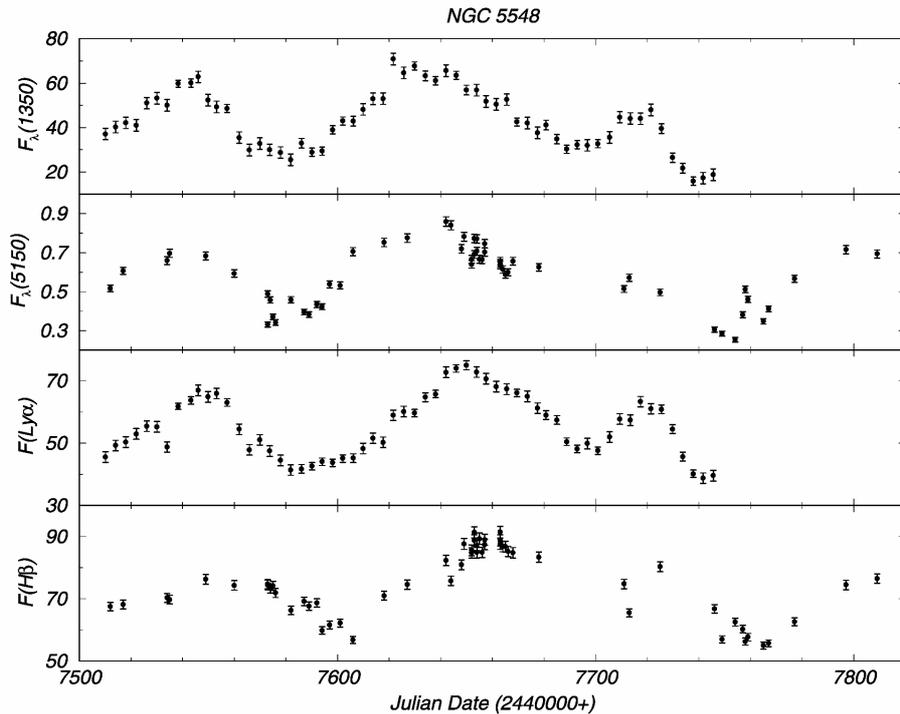
我們利用高斯曲線，分別去擬合 [O III] λ 4959 5007 以及 H β 窄譜線。其中可調整的參數有(i) 譜線的高度 h 、(ii) 寬窄 w 、(iii) 中心位置 λ_0 ，利用二分逼近法，尋找一組在譜線頂端 (peak) 區域的標準差最小的擬合值。

2.2.3 H β 寬發射譜線的擬合

我們將三條窄譜扣除後，利用兩翼的數據來進行擬合 H β 的寬譜部份，尋找一組在此區域標準差最小的擬合值。

結果發現三條窄譜的紅位移，並沒有太大的變動，這與一般模型理論相符。一般模型理論相信窄譜來自窄發射譜線區(NLR)，這個區域的雲氣密度稀薄、運動速度低、且距離中心發生光度變化的吸積盤遠，所以在我們進行監測的期間變化量很小。

但我們將分析所得 H β 寬譜的「紅位移」與時間作圖，並與可見光(5100 埃)連續譜的光變曲線作比較，發現有逆相關性的存在：當連續譜變亮時，紅位移變小，而連續譜變暗時，紅位移則有變大的趨勢。一般模型認為寬譜是來自寬發射譜線區(BLR)，此區雲氣圍繞著吸積盤高速旋轉，所以當吸積盤發生變化時，寬發射譜線區是最快受到影響的。所以我們認為當中心的緻密天體光度變大時，向外的輻射壓



圖四: 我們比較 AGN Watch Program 從 1988 年 12 月到 1989 年 10 月, 監測 NGC5548 在 $\lambda 1350$ 連續譜、 $\lambda 5150$ 連續譜、 $\text{Ly}\alpha$ 發射線和 $\text{H}\beta$ 發射線的光變曲線。

會大過向內的重力, 使得氣體有一個向外膨脹、朝著觀測者而來的運動速度, 因此譜線的紅位移變小。

2.3 光變曲線與時間分析

從圖四可以明顯的看出, 在「連續譜」與「發射線」之間的光變有時間延遲, 此圖中的第一、二欄為 $\lambda 1350$ 及 $\lambda 5150$ 「連續譜」的光變曲線, 第三、四欄為 $\text{Ly}\alpha$ 及 $\text{H}\beta$ 「發射線」的光變曲線, 可利用相關性分析 (Cross-Correlation Function) 來量化它們之間的時間延遲, 若就紫外線與可見光連續譜作相關性分析, 可見光連續譜落後紫外光連續譜約 2 天左右, 但由於這個數值小於觀測的時間解析 (3~4 天), 所以意義不大, 因為它們的來源很靠近 (都在吸積盤上)。但 $\text{H}\beta$ 發射線的時

間延遲則真的存在, 因此當中心吸積盤發生光度變化, 經過一、二十天的傳遞, 周圍的雲氣也接著發生光度變化。

3. 分析結果與討論

3.1 $\text{H}\beta$ 寬譜紅位移之變化

在上一章節中, 我們提到 $\text{H}\beta$ 寬譜的「紅位移」和連續譜與發射線的光變曲線有逆相關性, 其結果如圖五所示。三條窄譜 ($[\text{OIII}]\lambda 4959$ 、 5007 、及 $\text{H}\beta$ 窄譜) 的變化幅度很小, 約是千分之 6~8 左右, 但寬譜則很明顯有一高、低的變化。

在圖五下欄中是可見光波段 (5100 埃) 的「連續譜」與 $\text{H}\beta$ 「發射線」的光變曲線, 經過相關性分析, 此兩條光變曲線有 20 天左右

的時間延遲，這與目前的觀測結果相符。

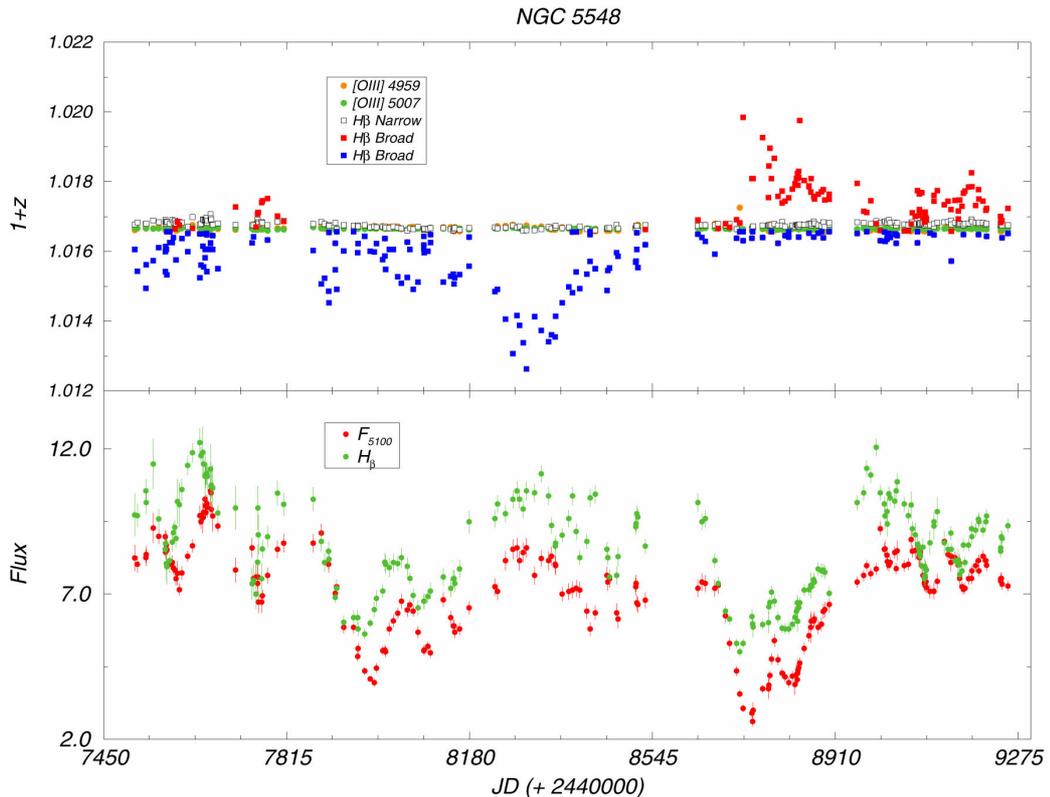
而 H β 寬譜「紅位移」的變化曲線，則和可見光「連續譜」與 H β 「發射線」有逆相關性存在，在儒略日(Julian day) 2,448,300 天左右，H β 寬譜的紅位移變得較小，而此時的連續譜正在變亮；而在儒略日 2,448,750 天左右，H β 寬譜的紅位移變得較大，而此時的連續譜正在變暗，H β 寬譜「紅位移」的變化曲線落後可見光「連續譜」10 天左右，而與 H β 「發射線」之間則沒有時間延遲存在。

我們推想，這是否意味著當活躍星系核的亮度發生變化時，會造成發射 H β 寬譜線的這些氣體，其運動模式也發生變化。因為紅位移

的改變來自徑向速度的改變，當周圍氣體膨脹或收縮，觀測者會量到遠離與接近的徑向速度。

我們利用圖五中 H β 寬譜紅位移($z \sim v/c$)的變化量估計，氣體運動的速度可以達到 $10^2 \sim 10^3$ km/s，(在圖五中紅位移最大的變化幅度約 0.004，相當於 1200 km/s)。而氣體會發生膨脹或收縮是由於向外的輻射壓，與向內的重力不平衡。我們以輻射壓大過重力造成氣體膨脹來作例子，多餘的光子輻射壓照射在周圍氣體上產生向外的力，假設一團大小為 1 光天的雲氣，距離中心約 20 光天，所得的氣體運動速度約為 0.1 km/s，這是一個光子作用

The Variability of Redshift



圖五：上欄分別是[OIII]4959、[OIII]5007 (橘色實心圓)、H β 窄 (白色空心方塊) 與 H β 寬 (紅色與藍色的實心方塊，紅色與藍色並不代表絕對的紅移或藍移，只是區別一群紅移較高，及一群較低)。下欄分別是可見光(5100 埃)連續譜(紅色實心圓)、H β 發射線的光變曲線(綠色實心圓)。

於一個氫原子所產生的速度，顯然地還有其它的機制使氣體能有更高的速度。

因此我們再從能量守恆的觀點出發，來估計氣體膨脹的運動速度。假設中心緻密天體在一天中釋放的能量為 $\Delta L \cdot t$ ，而通過這團 BLR 截面的能量為

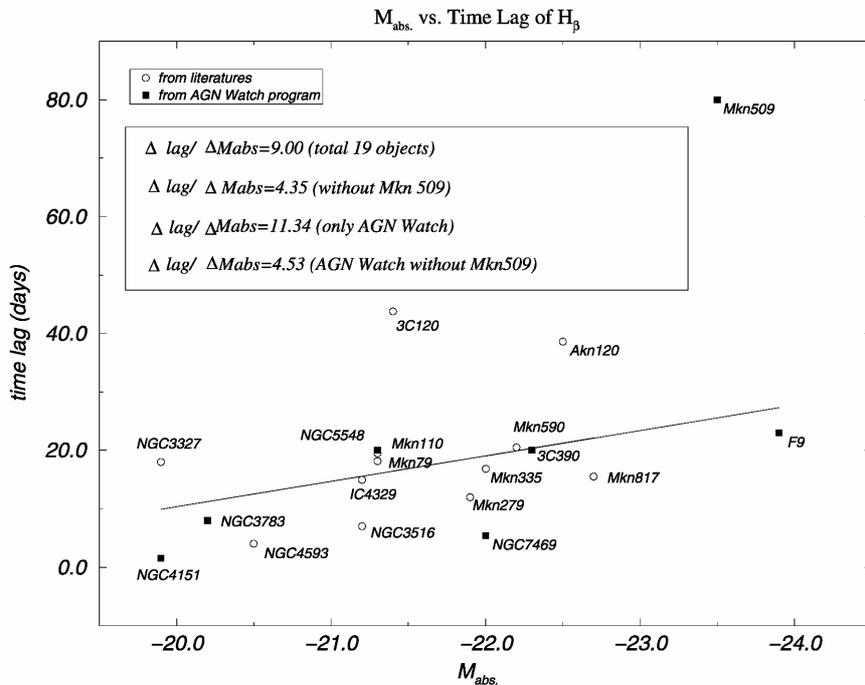
$$E = (\Delta L \cdot t) \cdot \frac{s^2}{4\pi r^2} = \frac{1}{2} m v^2 \quad (1)$$

其中，整團雲氣的質量 $m = V \cdot n \cdot m_p$ ，氣體體積 $V \sim 1$ 立方光天，密度 $n \sim 10^9 \text{ cm}^{-3}$ ，由上式我們可以得到 1000 公里/秒的膨脹速度，對應的紅位移 ~ 0.003 ，這與我們圖五中 $H\beta$ 寬譜紅位移是相符的。但是其中假設通過雲氣的能量會完全被吸收，如果只有 10% 的能量被吸收，那速度將減為原來的三分之一左右。

3.2 時間延遲與絕對星等之關係

我們把聯測計畫中所觀測的 7 個目標，與其他 12 個收集的天體數據，在 $H\beta$ 發射線和連續譜的「時間延遲」，與「絕對星等」作圖。從圖六我們發現有絕對星等越亮，則時間延遲越長的趨勢。大概是每增加一個星等，延遲的時間就增加 4 天左右，這與我們預期的結果相符，絕對星等越亮，發射譜線的雲氣距離中心越遠，所以譜線反應的時間自然需要比較久。

在圖裡我們比較了是否包含 Mkn509 參與斜率的計算，是因為 Mkn 509 的絕對星等很亮，而它的時間延遲也很久，所以如果它參與比較，這個「時間延遲會隨絕對星等變亮而變久」的效應會很明顯。但是因為 Mkn 509 的赤緯在南半球(-10 度左右)，而國際聯測計劃大部分的望遠鏡都在北半球，所以每年會有三個月左右沒有觀測點，造成光變曲線的不連續，誤差較大。



圖六：活躍星系核的絕對星等與 $H\beta$ 時間延遲的關係圖。實心方塊表示取自 AGN Watch Program 的數據，空心圓圈則是從不同文獻中取得的。

NGC 5548 在 AGN Watch Program 長期的監測下, Peterson 等人在 1998 年發表一個類似的現象: 當 NGC 5548 連續譜變得較亮時, 其發射譜線光變的時間延遲也會變得比較長 (Peterson et al. 1998)。如圖七所示, 第一欄為時間延遲, 第二欄為 $\lambda 5100$ 連續譜一年內的平均強度, 除了第三年(1990)外, 其餘八年(1988-1996)都很符合上述的現象, 這是否代表著寬發射譜線區與中心的距離, 會隨連續譜的強弱變化而有所改變; 或者是因為中心能量的強度變強, 所以它可以激發較大範圍的氣體, 使它們發射譜線, 所以感覺發射譜線區似忽變遠。以我們觀測到 H β 寬譜紅位移會大幅變化的結果, 是支持前者的。

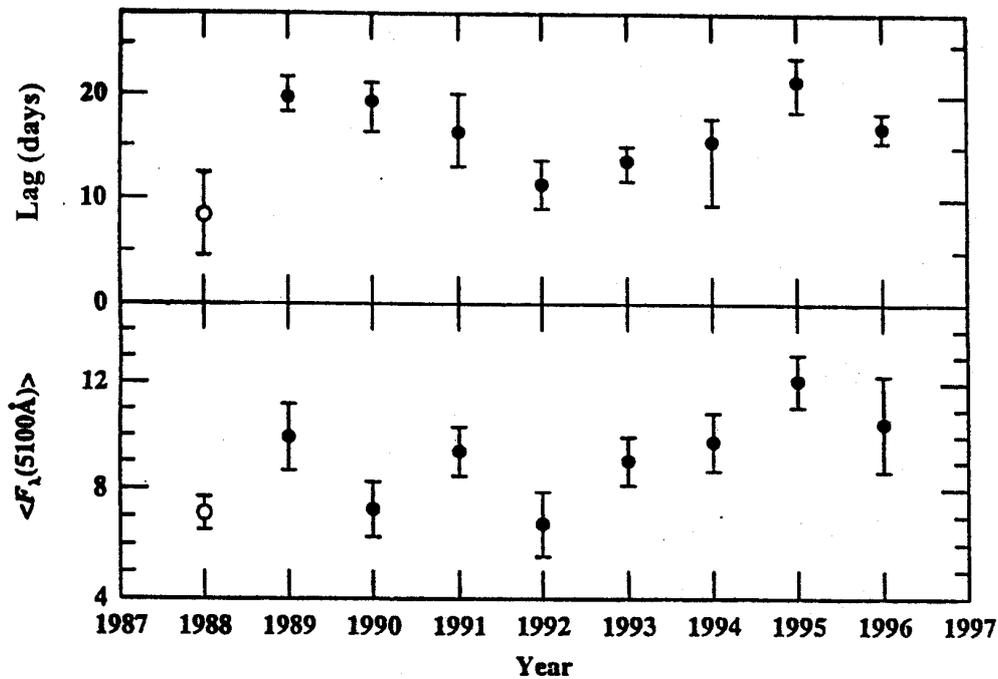
另外我們估計了從 1992 到 1995 年, NGC5548 的光通量增加了約 2 倍, 相當於 0.7 個星等, 而時間延遲增加了約 10 天, 這個時間延遲的斜率大約是每星等 13、14 天 (days

/mag)。反而與 Mkn509 把圖六裡的斜率, 加強為每星等 10 天左右較為符合。

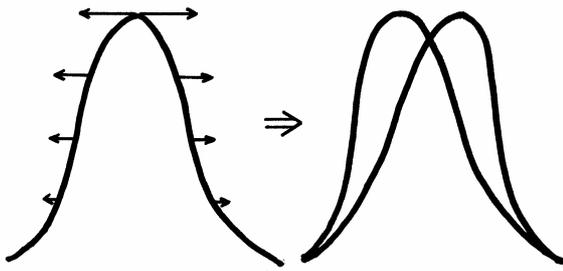
3.3 不同游離程度氣體時間延遲之比較

在 1991 Clavel et al. 發表 AGN Watch Program 系列的第一篇論文, 發現不同游離程度的離子「發射線」, 與中心「連續譜」 $\lambda 1350$ 光變的時間延遲會不一樣, 高游離程度的離子如 N V $\lambda 1240$ 、He II $\lambda 1640$ 發射線與連續譜的時間延遲短, 約 4 天左右, 而且發射線高低變化幅度和連續譜一樣較大, 大概在 4.5 倍上下; 中等游離程度的離子如 Ly α $\lambda 1216$ 、Si IV $\lambda 1402$ 、C IV $\lambda 1549$ 、C III] $\lambda 1909$ 、Si IV $\lambda 1402$ 等的時間延遲則較長, 約 8~26 天左右, 變化幅度大約是 2 倍; 低游離程度的離子如 Mg II $\lambda 2798$ 的時間延遲更長, 約 34~72 天左右, 變化幅度只有 1.3 倍左右(Clavel et al. 1991)。

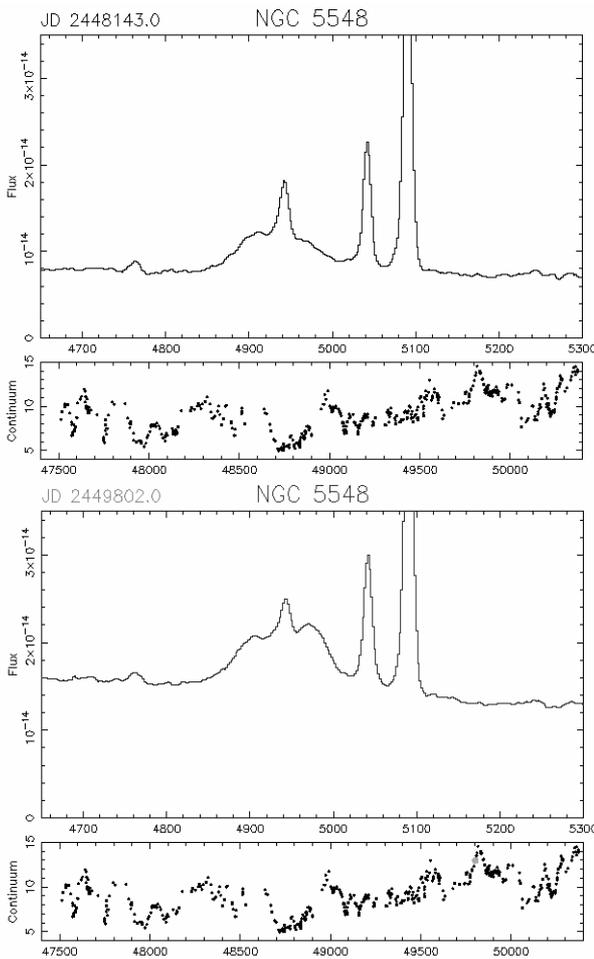
這個結果使我們更相信, 當中心光度變亮, 產生輻射壓將能量往外傳遞, 隨著能量的



圖七: 活躍星系核 NGC5548 在 AGN Watch Program 長時間的監測下, 時間延遲有隨連續譜變亮變暗而改變的趨勢(Peterson et al. 1998)。其中 1988 年空心圓則是取自 Wise 天文台的觀測資料(Netzer et al. 1990)。



圖八：氣體在膨脹或收縮時，會造成譜線產生雙頂峰的現象。



圖九：上圖是處於暗態的光譜，下圖則是處於亮態的。

耗損，越往外只能游離較弱的離子、變幅也小，因為距離遠了，時間延遲自然也較久。我們利用在 AGN Watch Program 網站取得的數據，以上一章使用的 DCF 相關性分析進行處理，結果大致上是相同的。

3.4 運動模式之分析

在 3.1 節中的討論中，我們利用吸積盤周圍寬發射譜線區(BLR)氣體的膨脹、收縮，來說明我們看到徑向速度的變化，因此造成 H β 寬譜紅位移的變動。

但是除此之外，不論是膨脹或收縮，以觀測者的角度來看，在遠端及近端分別會看到遠離或靠近的徑向速度(膨脹時，遠端遠離、近端靠近；收縮時相反)。所以會造成譜線產生雙頂峰(double peak) 的現象，如圖八所示。

我們從 AGN Watch Program 網站取得一個動畫影像檔，並選取其中兩幅有雙頂峰的光譜作例子，如圖九所示。但是並非所有的光譜都有雙頂峰的現象，相反的，有雙頂峰現象的光譜還是少數，我們利用這兩個頂峰的位移，估計氣體膨脹或收縮的速度，相當於 1800 公里/秒。

4. 結論

根據第 3 章的討論，我們提出以下幾個結論：

第一、不同絕對星等的活躍星系核，其中心緻密天體的質量及光度不同，因此輻射壓與重力的平衡位置，以及能量向外傳遞在空間上的分佈當然也就不一樣，所以我們看到 H β 寬譜的時間延遲，隨著絕對星等不同會有所變化；而在同一個活躍星系核本身，當向外的輻射壓發生變化，所造成的現象，也是相同的道理。不同游離程度的離子，因為所需游離能的不同，自然會在不同的空間中被觀測到，所以有

也不同的時間延遲及振盪幅度。

第二、我們有理由相信不論從觀測結果的分析，或者簡單的理論計算，寬發射譜線區(BLR)除了繞著中心緻密天體旋轉，當中心緻密天體發生光度變化而造成向外輻射壓改變，寬發射譜線區也會有膨脹或收縮的運動存在。希望此結果能對建構「活躍星系核中心區域的運動模式」的理論，有所貢獻，相信未來再配合上震盪方面的理論，我們能夠提供更完整的模型。

第三、如 3.4 節所述，我們必須改進我們的擬合程式，以分析所有的光譜，並解釋為什麼在前 6 年的數據中，未發生譜線有雙峰頂的現象。在此，我們簡單地從定性上描述幾個可能會把雙峰頂現象模糊掉的原因：(1) 寬發射譜線區(BLR)並不是如我們的假設，只是單一環狀的分佈，而是一層層、距離中心緻密天體不同的結構，所以旋轉速度不同，產生多組有雙峰頂的光譜，合在一起的結果就像一個較寬的光譜。(2) 寬發射譜線區是呈球殼分佈的，圍繞著中心緻密天體有不同方向的旋轉，所以投影的結果，我們也是看到多組雙峰頂的光譜，因此模糊了雙峰頂現象。

第四、從 AGN Watch 8 年來的平均光譜，我們可以看到不論有無明顯的「雙峰頂現象」，寬譜都有不對稱性：或許在紅端強度較強，或在藍端較強。這個不對稱性，與活躍星系核處於亮或暗態有無關連，也是未來模型要考慮的，是氣體密度上的分佈不均，或是來自寬發射譜線區(BLR)近端與遠端的強度會有所不同，例如遮蔽等因素。希望未來的模型在這些問題上能有所貢獻。

5. 參考資料

- Antonucci, R. R. and Miller, J. S., 1985, *ApJ*, 297,621.
- Blandford et al., 1990, 'Active Galactic Nuclei', Springer-Verlag Berlin Heidelberg.
- Clavel, J. et al., 1991, *ApJ*, 366, 64.
- Netzer, H. and Moaz, D., 1990, *ApJ*, 365, 5.
- Peterson, B. M., 1997, 'An Introduction to Active Galactic Nuclei', Cambridge University Press.
- Peterson, B. M. et al., 1998, *ApJ*, 501, 82.
- Wanders, I. et al., 1996, *ApJ*, 466,174.