

中華民國第 55 屆中小學科學展覽會  
作品說明書

---

高中組 地球科學科

第一名

040507

以 X 光與宿主星系探討遙遠中質量黑洞候選者  
之性質

學校名稱：臺北市立第一女子高級中學

作者： 高二 陳昱臻	指導老師： 楊善茜
---------------	--------------

關鍵詞：X 光、黑洞、中質量黑洞

# 得獎感言

## 在科展中汲取成長的養分

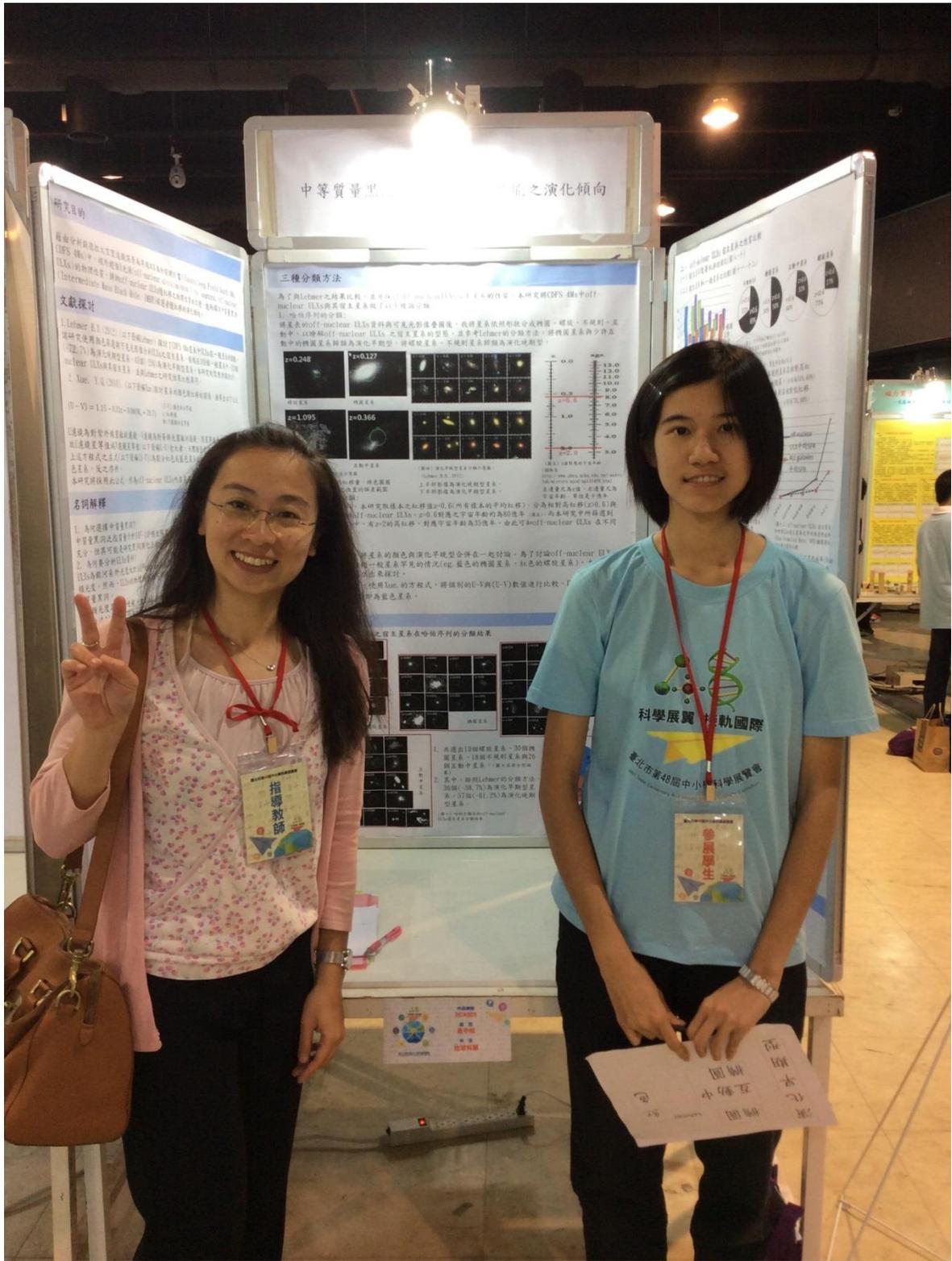
感謝一路上教授、老師們的幫助，讓我在準備科展的這一年裡，有著滿滿的收穫。

在這一年多的時間，我學到的不只是研究的內容，而是研究的方法和精神，小至看英文字的速度、資料的搜尋、作品說明書的排版，大至和評審老師的應對、口說的清晰度、海報的製作、溝通能力…等等。並且瞭解到不管任何時刻都要對自己充滿自信，對別人的提問要不畏懼的去理性回答。一開始想做科展的原因只是因為沒有做過、想試試看，也一路都懷疑自己不如別人，也曾因為沒有夥伴覺得孤單，但是經過這樣的洗禮之後，我對自己更加有自信，我想這就是我最大的收穫吧！

比賽固然會排名次，然而，整個賽程中最令我感到開心的並不是頒獎時，而是公開展覽時和大家互相討論、切磋意見的過程。在會場，幾個同樣做天文主題的人聚在一起，互相向對方解說自己的海報，因為彼此都有點背景知識所以比較容易理解，在偌大的空間中天文的主題寥寥無幾，竟有種惺惺相惜的感覺。於是大家切磋想法、互相提問互相解答、或提出質疑或發出讚嘆、最後甚至互留聯絡電話，自己的研究會在別人的質問下變得清晰，而因為自己做過海報，就更了解別人的海報有甚麼不足或可取之處、別人的口說方法有哪裡可以取經。這是我從來沒想過的經驗。我想也是舉辦科展的目的吧！

如果沒有老師們一再修改報告書、一再陪著我練習口說內容、教授即時的建議與提供研究方向，就無法撐起這項研究。當然，這只是我在偌大的科學之海中渺然的一小步。未來，我或許將在獨立的情況下面對種種困難，但我相信我能以科展中學習到的精神去面對它們。

再一次感謝北一女中、臺北市政府、國立科教館，提供了豐富的資源讓莘莘學子去探索。也期許未來有更多學子在科展中汲取成長的養分。



與指導老師的合照

# 摘要

中質量黑洞在研究超大質量黑洞的演化進程上扮演重要的角色，目前只能透過黑洞吸積過程中輻射出的光源來推測他們的存在。宇宙中有一些異常明亮的光源，稱為星系核外超強 X 光源(off-nuclear ULXs)，他們的亮度超過恆星質量黑洞等級的天體所能達到，即為中質量黑洞極佳的存在證據。

本研究使用了錢德拉深景南半球探測(Chandra Deep Field South Survey 4 Ms, CDFS 4Ms)資料，搭配可見光影像疊圖，篩選出符合條件的 X 光(off-nuclear ULXs)，探討這些 X 光與其宿主星系的性質。

在這些中質量黑洞候選者當中，有許多具有高紅移的特性，他們的特別之處在於能反映宇宙早期的情況。目前我發現可以透過宿主星系的型態推測得出數個中質量黑洞候選者的性質，即中質量黑洞候選者具有高恆星形成率與低硬度比的特性。

# 壹、研究動機

上高中之後，接觸了不同的課程，啟發了我對天文學的興趣。而經過老師們的引導，我對於緻密天體產生興趣，尤其是「黑洞」這個神祕而未知的龐然大物。

黑洞其實依照質量的不同，可以分成三種：恆星質量等級黑洞、中質量黑洞、超大質量黑洞。一般人常聽到的黑洞研究內容幾乎是關於恆星演化末期的恆星質量黑洞、或是位於星系中央的超大質量黑洞，其殘餘質量條件相差很懸殊。那麼，質量介於其間的黑洞又是如何呢？

經過一番資料查詢，發現中質量黑洞的本質在科學界仍有爭議。由基礎地球科學下冊第五章的星空單元課文得知，要觀測到不會輻射光源的黑洞，必須透過吸積過程中產生的高能量電磁波如 X 光間接得知；又因為觀測技術上的限制，導致發現中質量黑洞的候選天體數量極少，便產生了中質量黑洞存在與否的兩派說法。

然而，中質量黑洞的存在在黑洞演化上扮演重要的角色。人們想要了解維繫星系引力、位在星系核心的超大質量黑洞之相關性質，但單單透過由恆星塌縮而形成的恆星質量黑洞來討論，黑洞的質量範圍相差懸殊，很難推及到超大質量黑洞真正的演化進程。因此，相較於恆星質量黑洞，研究質量較大的中質量黑洞之性質，對於研究超大質量黑洞的形成與發展或許能有突破性的見解。在一些研究中指出，中質量黑洞形成於密集的星團，且可能因為引力進行合併而形成超大質量黑洞。(參考資料 1)

由於最新釋出的觀測資料(CDFS 4Ms)有較高的準確度，或許能打破之前觀測資料無法釐清的限制，因此我想利用這些資料，間接探討中質量黑洞候選者之性質，以期對中質量黑洞有更多的認識。

## 貳、研究目的

有鑑於過去的黑洞研究主要著墨於星系核中心的超大質量黑洞與單一恆星塌縮所形成的恆星質量黑洞，卻較缺乏中質量黑洞的探究，此次研究以中質量黑洞為主題，希望能透過對其候選者之分析，進一步了解中質量黑洞的宿主星系在顏色、星系型態、恆星形成率、X 光硬度比等等方面的性質。儘管這些資料都只是「候選者」，現存也沒有被完全公認的中質量黑洞，但本研究提供的分類、分析與討論，希望能對這些為數不多的天體有更多的認識，以提供未來研究聚焦與推廣的空間。

## 參、研究設備及器材

### 一、 SAOImage DS9



[http://ds9.si.edu/site/Home\\_files/sao.jpg](http://ds9.si.edu/site/Home_files/sao.jpg)(圖一)

為一自由軟體。可以進行天文資料的疊圖分析、載入星表、簡單的數據分析，並且和多家天文儀器合作，內建影像和資料庫。

### 二、 錢德拉深景南半球觀測(The Chandra Deep Field South Survey 4Ms , CDFS 4 Ms)

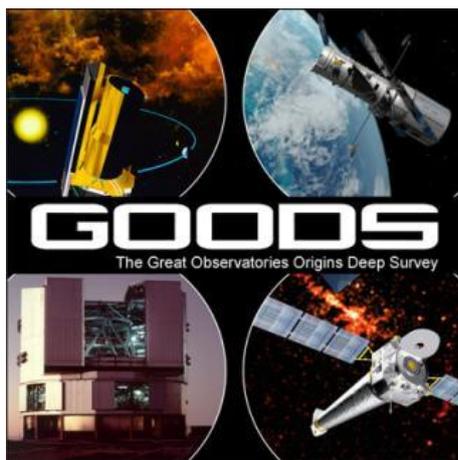
<http://heasarc.gsfc.nasa.gov/W3Browse/chandra/chandfs4ms.html>

為錢德拉太空望遠鏡最新釋出的一筆觀測資料，是目前錢德拉景深最深的探測。4Ms 代表 4 百萬秒(Mega Second, MS)的曝光時間。觀測波長以 X 光為主，依能量分佈分成三種型式：全譜線 0.5~8 keV(千電子伏特)、軟譜線 0.5~2 keV、硬譜線 2~8 keV。這批資料有 741 項，星表中先行以 X 光性質分析做了初步分析與簡單的分類：約有 75% 為活躍星系核(Active Galactic Nucleus ,AGN)，中央被認為有超大質量黑洞存在。避開了樣本混雜超大質量黑洞候選者之情形後，本研究所探討的對象是剩下 25% 的 169 個一般星系。

### 三、 Color-magnitude relations of active and non-active galaxies in the Chandra Deep Fields: high-redshift constraints and stellar-mass selection effects.

為 Xue.(2010) 整理出的星表(參考資料 2)。研究對象為錢德拉深景觀測北天球和南天球計劃(Chandra Deep Field South and North)中來自於星系的超強 X 光源(Ultraluminous X-ray sources, ULXs)，附有 UVB 不同濾鏡的絕對星等、紅移量值、星系亮度、恆星形成率(SFR)值等等。但因資料出自錢德拉 2Ms 計畫，其曝光時間較短、儀器靈敏度較差、觀測範圍較小，相較於 4Ms 資料的數量較少，故只有 70%能與前述 4Ms 星表對應。此星表主要提供 X 光源之宿主星系的資訊，可以將這些資訊與 CDFS 4Ms 所提供的 X 光資料進行比對，更加了解中質量黑洞之性質。

### 四、 The Great Observatories Origin Deep Survey(GOODS) Galaxy Evolution From Morphology And SEDs (GEMS)



<http://www.stsci.edu/science/goods/>(圖二)(圖三)

為兩個觀測計畫。提供與錢德拉觀測資料搭配的可見光影像，主要針對錢德拉、史匹哲、哈伯等望遠鏡觀測區域，拍攝高解析度的可見光影像。對於這次的研究主題，可配合星表檢驗強 X 光源的分布位置，以及 X 光和宿主星系在空間位置上的關係。

### 五、 Topcat

可載入星表，繪製直方圖、散布圖、關係圖等，作為天文學上分析數據的軟體工具。本研究使用 Topcat 來繪製圖表。

## 肆、研究過程及方法

### 一、 概述

本研究主要以星系核外超強 X 光和其宿主星系來探討中質量黑洞候選者，詳細的說明參見下方名詞解釋。

#### 1. X 光：

是指異常明亮的 X 光。天體的發光強度有一定的限制，和發光源天體的質量有關，因這些 X 光異常明亮，甚至超乎了恆星質量黑洞那樣的質量的天體所能達到的最大光度，因此其光源很可能是中質量黑洞。

#### 2. 宿主星系：

是指超強 X 光源所處的星系。能夠提供 X 光周邊環境的情況。

### 二、名詞介紹

#### (一) 中質量黑洞：

中質量黑洞泛指質量介於  $100\sim 10^6$  倍太陽質量的黑洞。相較於恆星質量黑洞(數十倍太陽質量)、超大質量黑洞( $>10^6$  太陽質量)，為質量範圍介於其中的黑洞。目前已知中質量黑洞的生成方式有三：

1. 恆星質量黑洞和其他緻密天體的吸積融合
2. 在密集星團中大質量星體的碰撞
3. 大霹靂時期的原生黑洞(理論)

黑洞無法輻射出電磁波，因此其觀測主要針對其周圍吸積過程中輻射出的高能量 X 光來探測，其光度皆超過中子星與恆星質量黑洞的愛丁頓光度極限。

而本研究所稱之「中質量黑洞候選者」則為 CDFS 4Ms 星表中的 X 光源篩選後的結果。

## (二) 愛丁頓極限

為吸積天體所能達到的理論最大光度值。天體內部萬有引力與表面熱運動達到平衡，因此其光度不能無限制增加，唯有超新星爆炸與伽馬射線爆能短暫超越其愛丁頓極限。

愛丁頓極限計算公式：

$$L_E = \frac{4\pi GMm_p}{\sigma_T} = 1.3 \times 10^{38} \left( \frac{M}{M_\odot} \right) \text{erg s}^{-1}$$

(式一)

$$\sigma_T = 6.65 \times 10^{-25} \text{cm}^2 \text{(湯木生電子散射截面)}$$

$m_p$  為質子的質量

$M_\odot$  為太陽質量

中質量黑洞的質量比恆星質量黑洞大，因此其愛丁頓極限亦比之大。若假設恆星質量黑洞之質量為 10 倍太陽質量，則光度大於  $1.3 \times 10^{39}$  erg/s 之 X 光源便可能是中質量黑洞吸積過程中輻射出的 X 光，即超強 X 光(Ultraluminous X-ray sources, ULXs)。

## (三) 超強 x 光(Ultraluminous X-ray sources, ULXs):

指的是銀河系外光度約超過  $10^{39}$  erg/s 的 X 光。為了排除超大質量黑洞，即 X 光位於星系核中心的情況，本研究特別挑選星系核外的 ULXs(off-nuclear ULXs)作為研究對象。星系核外 ULX 之光源可能來自超過愛丁頓光度的恆星質量黑洞、x 射線雙星、或是我們要研究的中等質量黑洞。

## (四) X 光硬度比(Hardness Ratio)

X 光可依波長的範圍畫分不同的軟硬程度。波長大於 0.5 nm 的被稱做軟 X 光(soft band)，對應的能量是 0.5~2 keV；波長短於 0.1 nm 的則被稱做硬 X 光(hard band)，對應

的能量是 2~8 keV。軟 X 光和硬 X 光合稱全譜線，也就是 0.5~8 keV。波長短，則對應的能量大，反之亦然。以下列方程式簡述之：

$$\lambda = \frac{c}{\nu}$$

$$E = h\nu$$

(式二)

( $\lambda$ 為波長， $c$ 為光速= $3 \times 10^8$  m/s， $\nu$ 為頻率， $h$ 為普朗克常數= $6.06 \times 10^{-34}$  J\*s)

在天文學上，會運用 X 光硬度比(以下簡稱硬度比)來描述天體發出 X 光的能量情況。

以下為計算硬度比的方程式：

$$\text{hard}_{hs} = \frac{F(h)}{F(s)}$$

(式三)

其中， $F(x)$ 代表  $x$  能量範圍的通量(flux)， $h$  代表硬 X 光， $s$  代表軟 X 光。

天體的硬度比愈小，即 X 光能量範圍愈接近軟 X 光，即輻射出的能量較小，表面溫度較低。因為黑洞不會輻射光源，因此在這裡我們所能討論到的 X 光都只可能是黑洞與鄰近物體吸積（即吸附物體並積累）的過程中所輻射出的光源，因此可以反映吸積盤面的表面溫度。

一般而言，吸積盤面的表面溫度可以反映黑洞的質量，質量愈大的黑洞其吸積盤面的表面溫度愈小。因此，偏軟的 X 光(即黑洞質量大)也可以是中質量黑洞存在的證據之一。(參考資料 3)

## (五) 星系的分類

本研究中主要有 2 種星系的分類方法：

### 1. 星系型態的分類

在本研究中，主要使用可見光影像與 X 光源位置疊圖來判斷，先確定 X 光源非為於星系中新，再藉由可見光影像判讀後，劃分成結構平滑的橢圓星系、有明顯旋臂的螺旋星系、以及結構不對稱的不規則星系。

## 2. 星系顏色的分類

星系亦可以顏色區分為偏紅星系、偏藍星系。

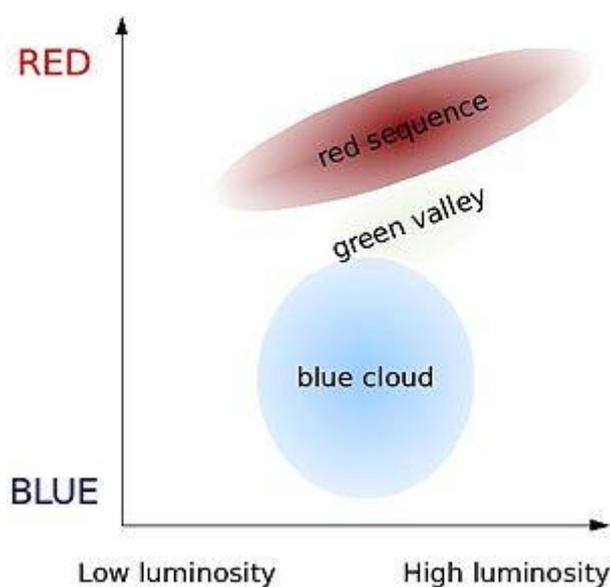
在本研究中，套入

$$(U - V) = 1.15 - 0.31z - 0.08(M_V + 20.7)$$

(式四)

來分類之。

其中，(U-V)代表色指數分界值，即區分星系偏紅與偏藍的量值，z 代表星體的紅移量值， $M_V$ 則代表 V 濾鏡的絕對星等。U 濾鏡接受波長約 360 nm 的光，即紫外線波段；V 濾鏡接受波長約 550 nm 的光，即黃綠色可見光波段。U 濾鏡絕對星等減掉 V 濾鏡絕對星等愈小(可以為負值)，則星系顏色愈藍。當 U 濾鏡絕對星等減掉 V 濾鏡絕對星等值(即色指數)大於分界值，則為偏紅星系；反之，即為偏藍星系。(參考資料 4)



(圖三) 偏紅、偏藍星系分類

### (六) 恆星形成率(Star Formation Rate, SFR)

描述星系一段時間內新生恆星的數量，即恆星形成的速率。單位為  $M_{\odot}/\text{yr}$ ，

$M_{\odot}$  為太陽質量，yr 為年。

中質量黑洞常產生於恆星形成率大的恆星暴增星系，因此在本研究中，探討星系中恆星形成率是尋找中質量黑洞候選者的依據之一。

## 三、文獻探討

### (一) The 4 Ms Chandra Deep Field South Number Counts Apportioned By Source Class: Pervasive Active Galactic Nuclei and The Ascent of Normal Galaxies

Lehmer(2012) 這份論文(參考資料 5)探討的對象與本研究相同，皆為 CDFS 4Ms 星表。該研究分別探討了星表中的活躍星系核、一般星系及恆星三類 X 光源的 X 光性質。因研究樣本的紅移平均值為 0.59，Lehmer 將 X 光源來自一般星系的 X 光依照紅移量值分為  $z>0.6$  與  $z<0.6$ 、根據 X 光譜線的不同分為 4 種(0.5~2 keV、2~8 keV、4~8 keV、0.5~8 keV)、依照一連串的流程包括色指數、可見光影像的驗證過程，將 X 光的宿主星系劃分為演化晚型星系(late-type galaxies)、演化早型星系(early-type galaxies)兩種。但此研究是針對星表中所有的 X 光，並無排除與可見光影像疊圖以後可見光不亮或位於星系核中心的 X 光，即可能是宇宙背景輻射或者是超大質量黑洞的情形。

而本研究僅在探討 X 光性質部分，仿作此論文的分析方法。

### (二) Nearly 5000 Distant Early-Type Galaxies in COMBO-17: A Red Sequence and its Evolution since $z\sim 1$

Bell(2004)的論文(參考資料 4)分析了巨量資料，推演出適合不同紅移量的色指數計算方式，提供一個演化早型的偏紅星系和演化晚型的偏藍星系的簡單區分方法。

本研究之宿主星系部分的分析將參考這個星表的作法。

(三) Lower Mass Black Holes in the Great Observatories Origins Deep Survey? Off-nuclear X-Ray Sources(AE Hornschemeier- 2004)

AE Hornschemeier(2004)的論文(參考資料 3)提出了 X 光的硬度比(hardness ratio)和中質量黑洞的存在之間的關係，認為硬度比愈小，即 X 光愈軟，則黑洞之表面溫度愈低，可以做為中質量黑洞存在的證據。

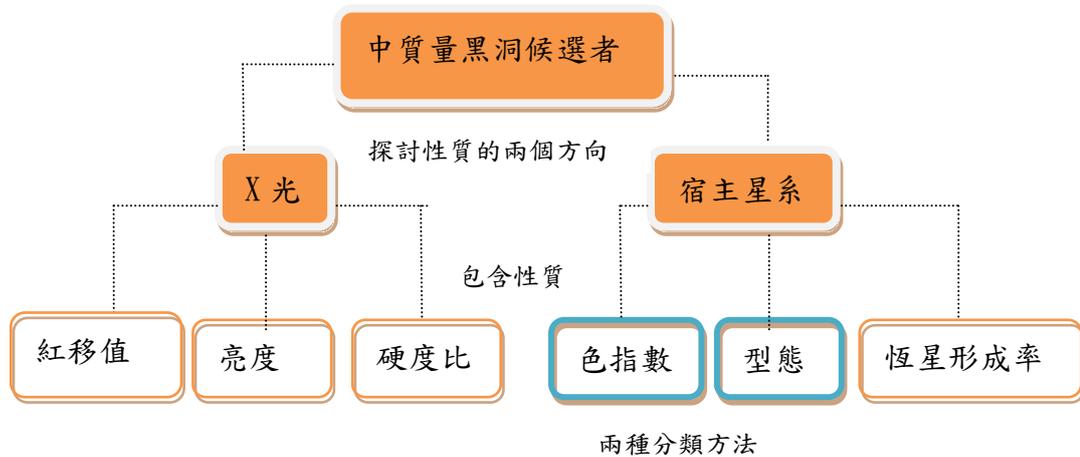
本研究關於硬度比的計算主要參考此論文的作法。

此外，此論文也採用了和本研究相同的 X 光和可見光影像疊圖手法，並且同樣探討星系核外超強 X 光(off-nuclear ULXs，詳見下方名詞解釋)。

因此，本研究之結果將與該論文作比較。

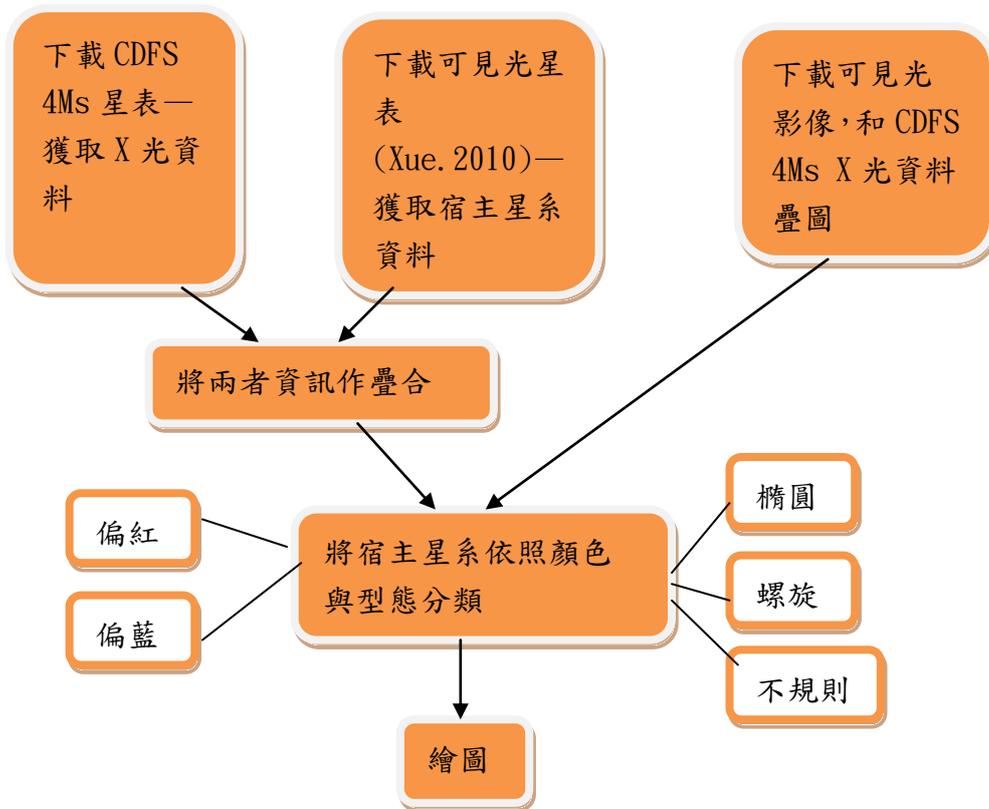
#### 四、實際操作

##### (一) 操作概念示意圖



(圖四)操作概念示意圖

(二) 操作流程示意圖 (圖五)

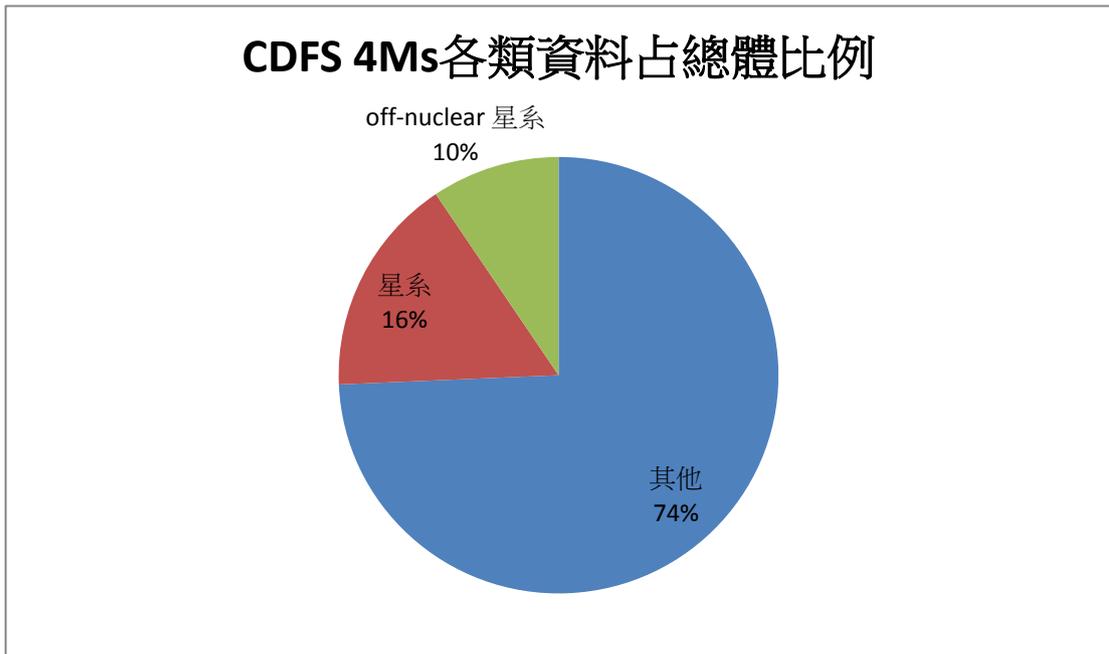


(圖五) 操作流程示意圖

## 伍、研究結果

### 一、 CDFS 之 X 光資料與可見光影像疊圖結果

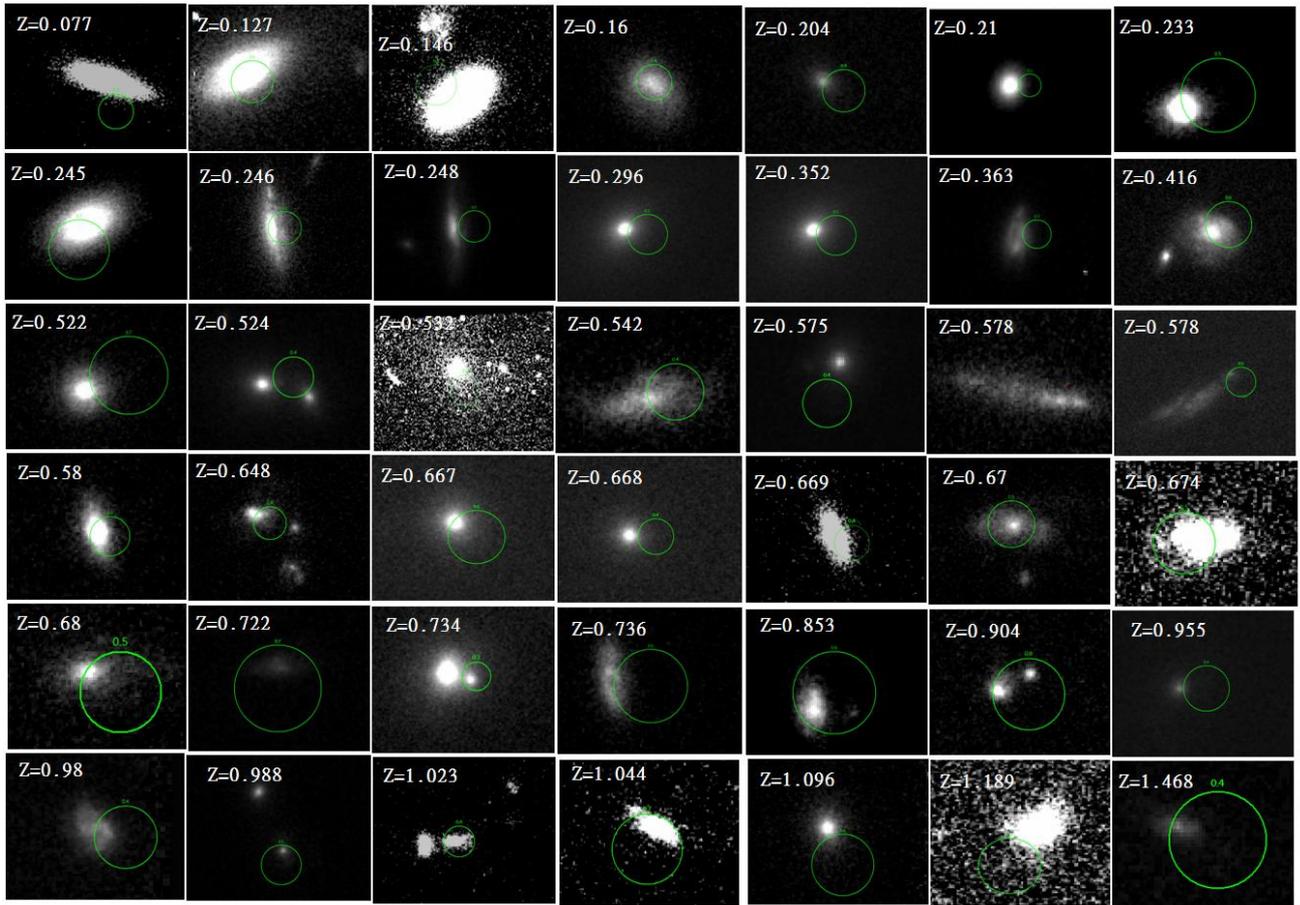
在 CDFS 總共 741 筆資料中，有 162 筆 X 光源為星系，約占總體 23%。而經過疊圖之後，篩選出宿主星系可見光影像亮的星系核外超強 X 光源(off-nuclear ULXs)，共有 92 個，僅占整個 CDFS 4Ms 資料中的 10%。



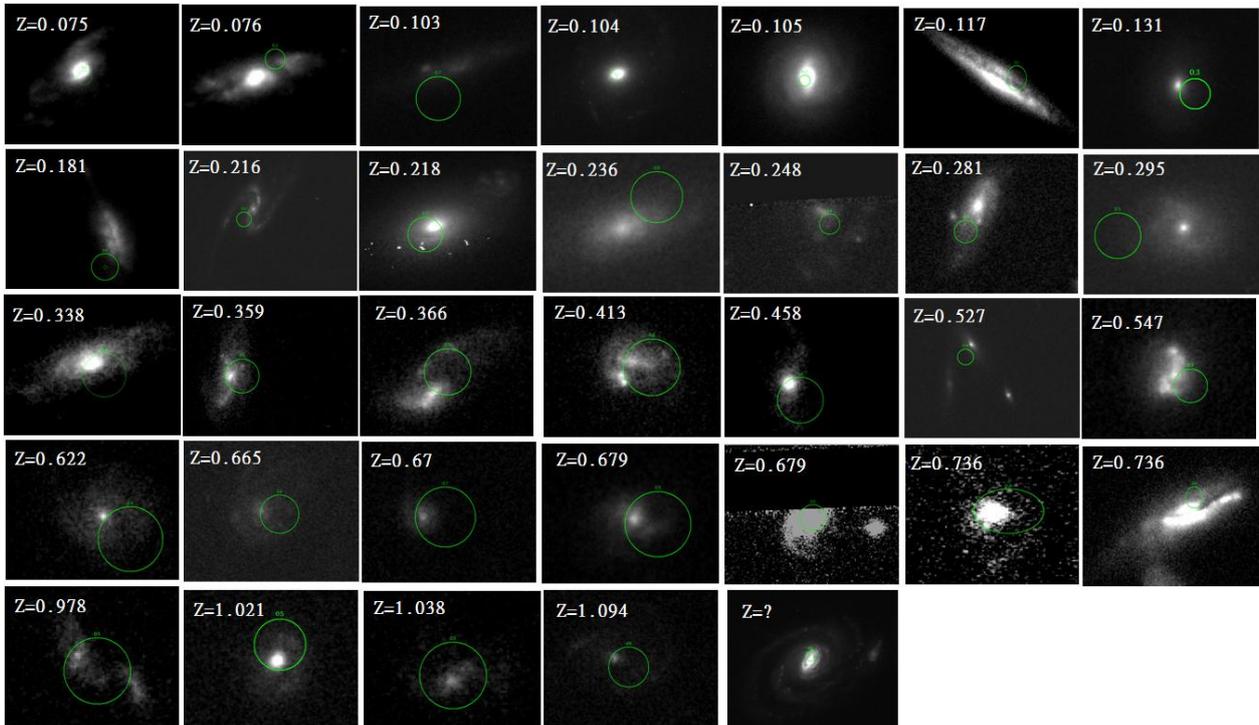
(圖六) X 光資料與可見光影像疊圖結果

將 CDFS 4Ms 的 X 光資料與可見光影像疊圖後，將 X 光源宿主星系按型態分類。其中，橢圓星系(如圖七)有 42 個，螺旋星系(如圖八)有 33 個，不規則星系(如圖九)有 17 個，共 92 個。研究結果如下方圖所示。

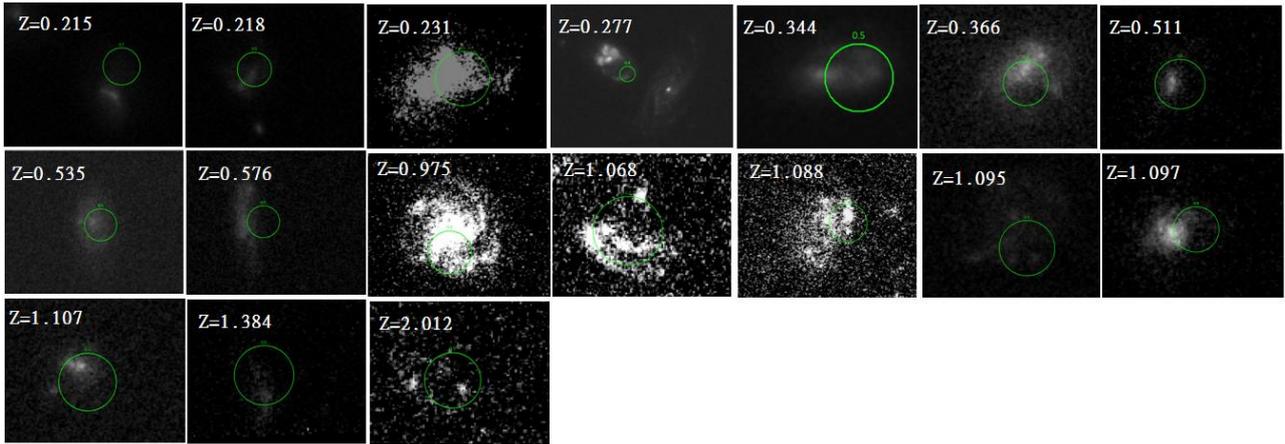
以下各圖的綠色圓圈為 X 光源位置誤差範圍，圖片左上角的  $z$  代表的是紅移量值。為清楚辨別星系形狀，部分影像使用不同的影像處理方式，如 `zscale`(將數據二值化而轉以黑白的方式呈現)，使影像更加顯著。



(圖七) 橢圓星系



(圖八) 螺旋星系



(圖九) 不規則星系

## 二、物理性質的分析

本研究分別由宿主星系型態與星系顏色作為分類依據，來探討星系核外超強 X 光源的各項特性。並且，因紅移值能反映距離即宇宙年齡，故首先以紅移進行討論：

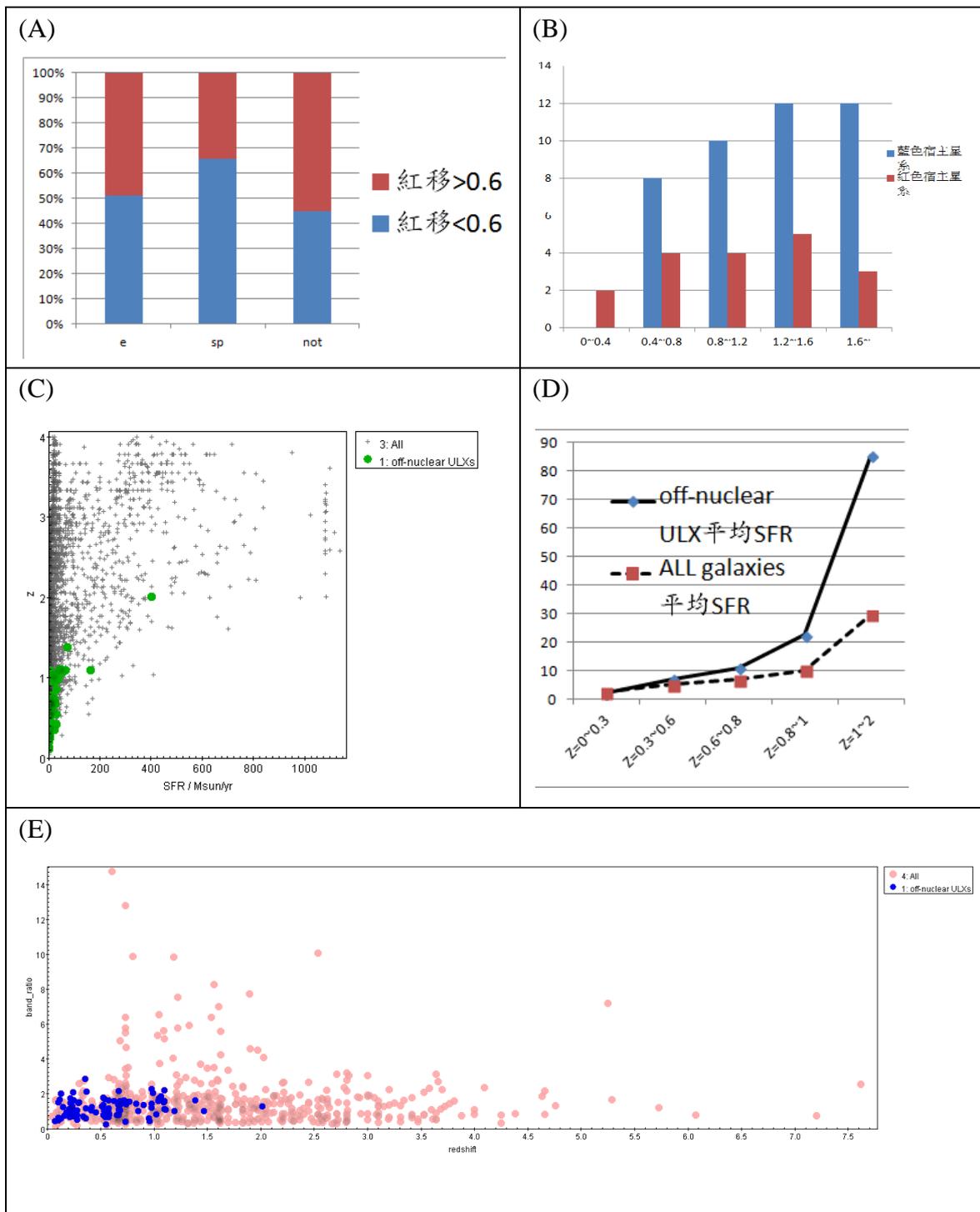
### (一) 以紅移值分析 (圖十)。

因宇宙正在膨脹，星系的遠離速率愈大則代表距離我們愈遠，也就是紅移愈大。又因為光速是有限的，因此影像上我們看到的光子可能在宇宙中旅行了幾十億年才來到我們的眼前，被望遠鏡捕捉到。紅移愈大，則與我們相距愈遠，因此我們看到的是愈久以前的光子，能反映愈久以前的宇宙。

1. 借由以下分析並且與研究數據比對後，由下圖(A)，討論星系型態與紅移的個數關係，發現紅移 $>0.6$ 者以不規則星系為多，且在本研究所採集的 19 個不規則星系樣本中，紅移值 $>1$ 的 15 個星系中，就有 7 個為不規則星系。
2. 由下圖(B)，討論星系顏色與紅移的關係。橫軸為紅移值，縱軸為個數，討論偏紅與偏藍宿主星系在不同紅移區間的個數，發現在本研究所採集的樣本中，以偏藍星系為多，且在各紅移區間的個數分布平均。
3. 進一步探討紅移和 SFR 的關係，由下圖(C)、(D)，分別為紅移和 SFR 的關係圖、不同紅移區間的平均 SFR 增加趨勢。

圖(C)的橫軸為 SFR，縱軸為紅移，數據來自 Xue.(2010)所提供的星表，綠點是本研究的樣本(因僅部分能與該星表對應，故為 60 筆)，灰點是該星表的所有資料。發現紅移與 SFR 呈現正相關，且本研究的樣本大致位於相對低紅移且低 SFR 的位置，唯有少數例外(SFR~200 與~400 的兩個資料點)。

4. 圖(D)橫軸為紅移，縱軸為平均 SFR。發現在每一個紅移區間，星系核外超強 X 光源的宿主星系之 SFR 皆大於所有星系。並且，紅移愈高，本研究所選樣本的 SFR 值增加愈劇。
5. 圖(E)討論的是紅移和硬度比的關係。橫軸為紅移，縱軸為硬度比，數據來源為 CDFS 4Ms 星表，藍色為本研究樣本(92 筆)，粉紅色為所有 X 光資訊(741 筆)。可知紅移和硬度比並無明顯關係，且本研究所採樣本之硬度比相較整體而言皆偏小，即吸積盤的溫度較低，黑洞的質量可能較大。



(圖十) 以紅移值分析

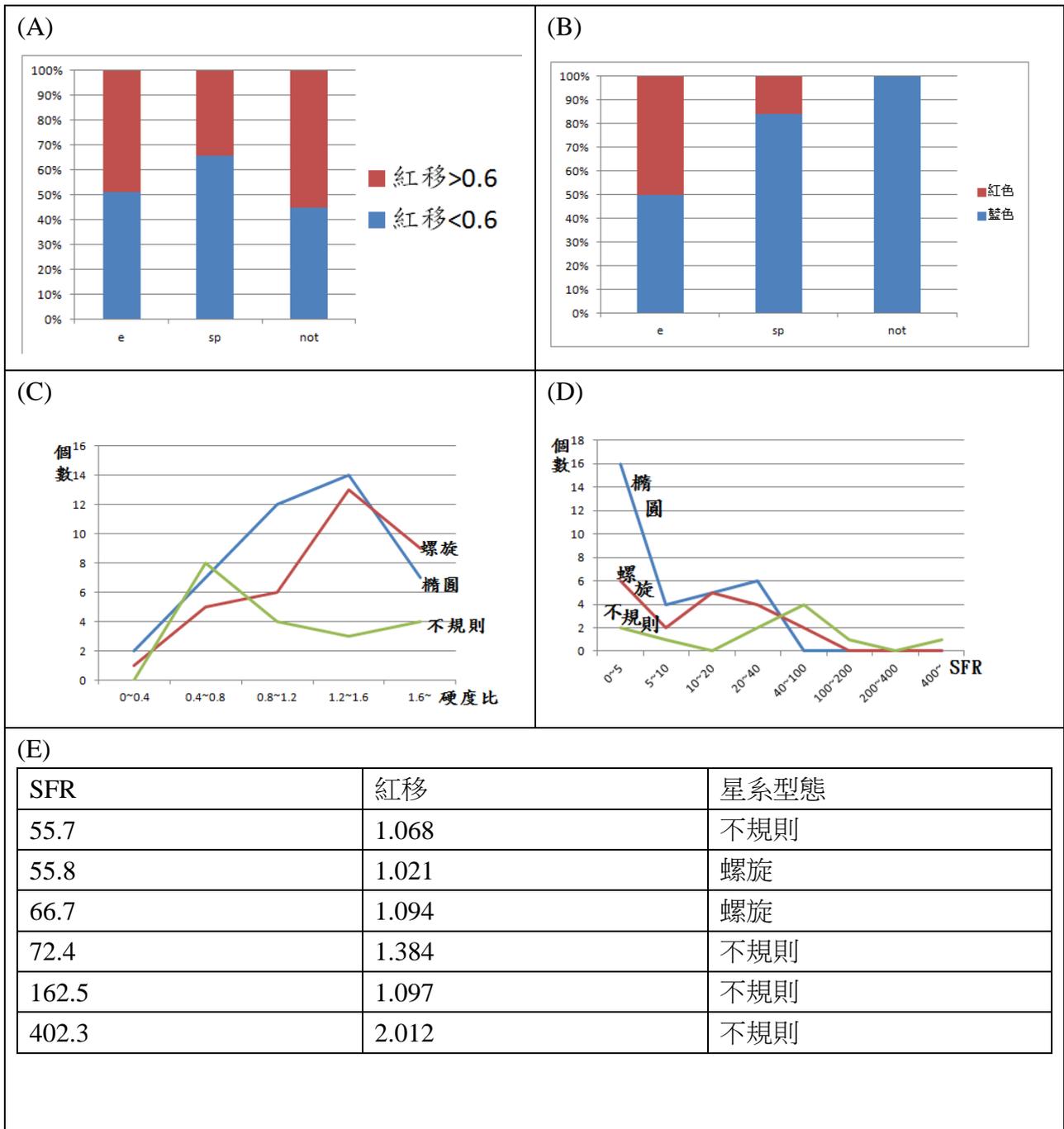
- (A) 星系型態與紅移的關係
- (B) 星系顏色與紅移的關係
- (C) 紅移和 SFR 的關係圖
- (D) 不同紅移區間的平均 SFR 增加趨勢
- (E) 紅移和硬度比的關係

## (二) 以星系型態作為分類的分析(圖十一)

本研究將 X 光與可見光影像疊圖後，依照 X 光的宿主星系疊圖結果外型的不同分成三種，分別為橢圓星系(代號 e)、螺旋星系(代號 s)、不規則星系(代號 not)。下圖探討星系型態在不同物理性質的差異。

1. 下圖(A)、(B)分別探討星系型態和紅移、星系型態和顏色之間的關係。橫軸皆為星系型態，依序為橢圓、螺旋、不規則星系，縱軸皆為個數所占百分比。發現紅移 $>0.6$ 者以不規則星系為多，且大多數宿主星系樣本為偏藍星系，其中不規則星系全數是偏藍星系。星系的偏紅與偏藍在物理上的意義將於下方結果中討論。
2. 進一步探討星系型態與硬度比的關係，如下圖(C)，可知硬度比在 0.8~1.6 較多，1.6 以上較少，橢圓與螺旋星系之硬度比較集中於 0.8~1.6，不規則星系之硬度比則較集中於 0.4~0.8，可推測宿主星系為不規則之黑洞吸積盤溫度低，黑洞質量較大。
3. 圖(D)討論星系型態與 SFR 的關係，發現橢圓星系集中在極低 SFR 的區間，約為 SFR=0~5，螺旋星系則以 SFR=5~100 為多，不規則星系則是在 SFR=40~200 之間有較多的個數。

表(E)提供更進一步的資訊，詳細討論高 SFR 宿主星系的特性。發現這些 SFR $>50$  的高恆星形成率星系中，有大部分為不規則星系，且全數為  $z>1$  的高紅移星系。反映早期宇宙的情況是 off-nuclear ULXs 較多出現在不規則星系，且不規則星系之恆星形成率較高。



(圖十一) 以星系型態作為分類的分析

- (A) 星系型態和紅移的個數關係
- (B) 星系型態和顏色的個數關係
- (C) 星系型態和硬度比的個數關係
- (D) 星系型態和 SFR 的個數關係
- (E) 詳列 SFR 高的星系資訊

### (三) 以星系顏色作為分類的分析(圖十二)

本研究綜合能夠與 CDFS 4Ms 星表資料(即 X 光資料)對應的 Xue.(2010)宿主星系資料，共有 60 筆。再套入 Bell(2004)之公式分類之：

$$(U - V) = 1.15 - 0.31z - 0.08(M_V + 20.7)$$

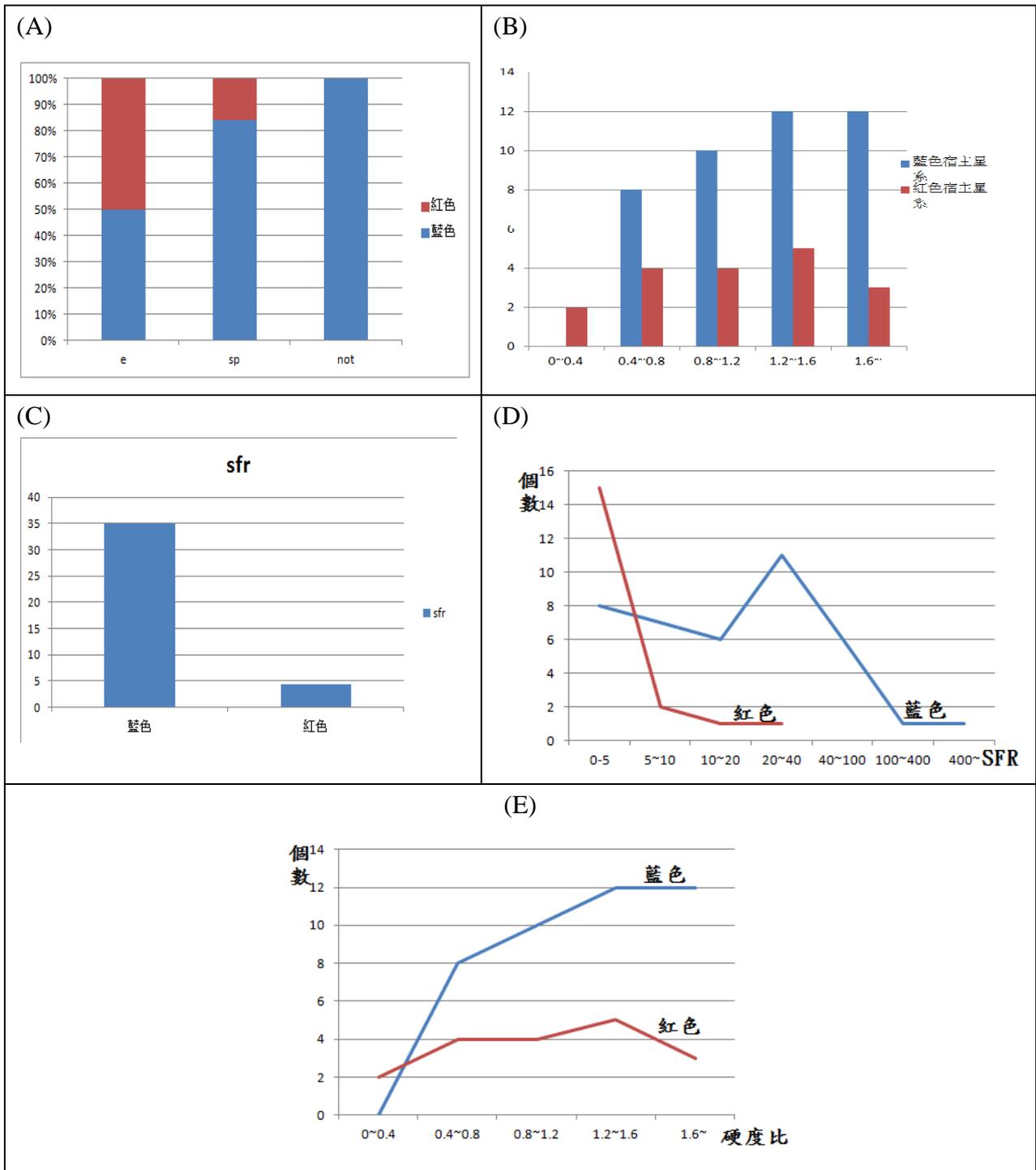
並比較個別的 (U-V) 色指數與分界值的大小。60 筆有效資料中，有 18 筆為紅星系，42 筆為藍星系。

1. 下圖(A)、(B)分別探討星系顏色與星系型態的關係、星系顏色與紅移的關係。發現偏紅星系多出現在橢圓星系中，而偏藍星系則是樣本中的大多數。
2. 進一步探討星系顏色分類的意義，由圖(C)、(D)，探討星系顏色與 SFR 值的關係。圖(C)為偏紅與偏藍星系之平均 SFR 之差異，左方圖形顯示偏藍星系的 SFR 平均值約 35，右方圖形顯示偏紅星系的 SFR 平均值約 5，可見相差懸殊。圖(D)則探討星系顏色在不同 SFR 區間之個數變化情形。可見偏紅星系之 SFR 集中於 0~5，且沒有>27 的資料；偏藍星系之 SFR 範圍廣，最大可達到 402.3。該資料是一個紅移 2.012 的不規則星系，其紅移值也是所有資料中最高，詳見上圖(E)。

因此，星系顏色偏藍，代表平均 SFR 高。為中質量黑洞之證據。

3. 圖(E)探討星系顏色與硬度比的關係。可知偏紅星系有硬度比很軟的資料(硬度比=0~0.4)，偏藍星系則無。偏紅星系在不同的硬度中，個數分布平均；偏藍星系的個數則隨著硬度比愈來愈大而上升。

硬度比可反映溫度，較軟的硬度代表較低的吸積盤溫度，即較高的黑洞質量，可以做為中質量黑洞存在的象徵。



(圖十二) 以星系顏色作為分類的分析

- (A) 星系顏色與星系型態的關係
- (B) 星系顏色與紅移的關係
- (C) 星系顏色與 SFR 值的關係
- (D) 偏紅與偏藍星系平均 SFR 之差異
- (E) 星系顏色與硬度比的關係

## 陸、討論

本研究以宿主星系型態與宿主星系顏色作為兩種分類依據，分別討論此兩種分類之下的宿主星系與星系核外超強 X 光性質。將結果整理如下表：

### 一、本研究之結果討論

#### 1. 以宿主星系之型態討論：

將 X 光源之宿主星系以型態分成橢圓、螺旋、不規則後，發現宿主星系隨著型態不同，其物理性質會有漸進的變化趨勢。由橢圓星系、螺旋星系、到不規則星系，紅移平均愈來愈大，顏色愈來愈藍。偏藍星系之 SFR 平均大，因此 SFR 之平均愈來愈大，即每年生成的恆星愈多，顯然有某種引力驅動著恆星的生成，為中質量黑洞的有力證據。X 光的硬度比愈來愈軟，即吸積盤的溫度愈來愈低，中質量黑洞後選者之質量愈來愈大，愈可能是中質量黑洞。

	橢圓	螺旋	不規則
紅移	紅移平均約 0.6	紅移平均小於 0.6，但有幾個紅移大於 1 且高 SFR 值的	紅移平均大於 0.6 且高紅移( $Z>1$ )多
色調	約 50% 偏藍	大於 80% 偏藍	全數偏藍
SFR	SFR 分布集中，於 0~5 之間	SFR 分布平均，於 5~40 之間	SFR 平均值較大，有大於 400 極端值
硬度比	硬度比 0.8~1.6 多	硬度比 1.2~1.6 多	硬度比 0.4~0.8 多，較軟

註：樣本(92 筆)平均紅移約 0.6

(表一) 以宿主星系之型態討論

#### 2. 以宿主星系之顏色討論

將 X 光源之宿主星系以(U-V)色指數劃分為偏紅與偏藍星系後，發現偏藍星系之硬度比較大，且硬度比大之星系數量愈多；偏藍星系之 SFR 亦較大，且有極端值，可以解

釋上述分類中，不規則星系(全數藍色)之平均 SFR 比其他兩種星系型態平均 SFR 來的大。

	偏藍	偏紅
硬度比	皆大於 0.4，且愈硬數量愈多	有小於 0.4 的，且分布平均
SFR	平均 SFR 約 35，分布範圍廣，且有極端值約 400	平均 SFR 約 5，集中於 0~5 之間

註：由(圖十-C)，宇宙愈早期，SFR 有愈大的傾向

(表二) 以宿主星系之顏色討論

綜合以上兩種分類結果的討論，發現不規則星系是本研究中一個特殊的群體。他們具有較高的紅移，即代表宇宙較早期的樣貌，且因為全數偏藍色，所以 SFR 普遍較高。然而，他們不僅有平均高 SFR，更有極端值(>400)；由上述討論 2 中得知，偏藍星系之硬度比相較偏紅星系來得大，且隨著紅移的增加，硬度比愈來愈高。然而，再依討論 1 中得知，不規則星系雖然位處高紅移且全數為藍色，其硬度比卻是上述三種星系型態分類中最低的。凸顯不規則星系和其他兩種星系型態分類的明顯不同，可以反映宇宙早期的特殊現象，也是最符合理論中的中質量黑洞具有高 SFR、低硬度比(大質量)、偏藍特徵的樣本群。大膽猜測宇宙早期充斥著不規則星系，也就是中質量黑洞的溫床。

## 二、與 AE Hornschemeier(2004)比較

AE Hornschemeier(2004)之研究方法與本研究相差不遠，唯其研究樣本數較少。下表為本研究與之比較，凸顯資料量的多寡在目前的中質量黑洞後選者的重要性。

AE Hornschemeier(2004)中的 10 個樣本皆為低紅移的偏藍螺旋星系，而本研究則是有 92 筆、三種星系分類型態，也才能進行更多的研究。

	本研究	AE Hornschemeier(2004)
資料個數(X 光)	92	約 10
資料紅移量	平均紅移約 0.6	紅移範圍 0.03~0.25
宿主星系	型態以橢圓和螺旋為主，顏色以偏藍為主	全數為偏藍的螺旋星系

(表三) 與前人結果比較

## 柒、結論

有關中質量黑洞候選者的幾項性質，本研究得出以下結論：

1. 中質量黑洞候選者之硬度比大約介於 0.4~2 之間，且與所有資料(741 筆)之平均相同，並無特別高的硬度
2. 可以由宿主星系之型態推估中質量黑洞候選者之性質：

在恆星形成率方面， $SFR_{\text{not}} > SFR_s > SFR_e$ ，即不規則星系平均恆星形成率最大，螺旋星系平均恆星形成率次之，而橢圓星系平均恆星形成率最小。

在硬度比方面， $h_{\text{not}} < h_s < h_e$ ，也就是不規則星系平均硬度比最小，螺旋星系平均硬度比次之，而橢圓星系平均硬度比最大。

3. 中質量黑洞候選者所在的星系與一般星系相比之下，普遍具有較大的恆星形成率。愈遙遠的中質量黑洞候選者，星系型態愈不規則，且  $SFR$  愈大。
4. 超強 X 光源之宿主星系為不規則時，其特性與其他兩種分類相異甚大。反映宇宙早期的情形是高  $SFR$ 、藍色、低硬度比，暗示這些星系可能是中質量黑洞的溫床。

藉由此研究，目前我們知道可以利用宿主星系的型態來推估恆星形成率與硬度比的大小，並且透過星系核外超強 X 光(off-nuclear ULXs)的分析，了解中質量黑洞具有普遍高恆星形成率與低硬度(質量大)的特性。

如何透過間接的方法得知真正的黑洞特性一直是我們想探究的課題。藉由這些候選者的性質，提供初步的篩選標準，我們能更加接近中質量黑洞真正的面貌，以期終有一日能完全了解其特性。對於星系核外超強 X 光源(off-nuclear ULXs)之中，有多少比例與中質量黑洞有關？怎麼樣量化的標準才是真正の中質量黑洞？我們永遠保持好奇。未來，隨著觀測資料的釋出，提升望遠鏡的觀測極限，可望會有更多的進展。

## 捌、參考文獻及其他

1. Yuan Yuan Intermediate Mass Black Holes near Galactic Center: Formation and Evolution
2. Xue. Y.Q.(2010). Color-Magnitude Relations of Active and Non-active Galaxies in the Chandra Deep Fields: High-Redshift Constraints and Stellar-Mass Selection Effects.
3. AE Hornschemeier et al(2004). Lower Mass Black Holes in the Great Observatories Origins Deep Survey- Off-nuclear X-Ray Sources
4. Bell Eric. F.(2004). Nearly 5000 Distant Early-Type Galaxies in COMBO-17: A Red Sequence and its Evolution since  $z \sim 1$
5. Lehmer B.D.(2012). The 4 Ms Chandra Deep Field South Number Counts Apportioned By Source Class: Pervasive Active Galactic Nuclei and The Ascent of Normal Galaxies

## 【評語】 040507

以 X 光強度、硬度及遠離星系核心時從選取中質量黑洞候選者，  
具學術價值，數據處理與課題背景之事俱佳。

建議深入探討分辨其他高能天體之方法，以獲得具體成果。