

中華民國第 60 屆中小學科學展覽會

作品說明書

高級中等學校組 物理與天文學科

第三名

051805

尋找 $z > 7$ 的超大質量黑洞

學校名稱：國立科學工業園區實驗高級中學

作者： 高二 古翊樺	指導老師： 陳其威
---------------	--------------

關鍵詞：超大質量黑洞、再電離時期、宇宙學紅移

摘要

尋找高紅移的超大質量黑洞，有助於天文學界了解宇宙再電離時期。雖然黑洞的數量稀少，但相較於星系，存在於某些星系中的超大質量黑洞較亮，且存在時間比伽瑪射線暴久，因此，它們的吸收光譜可以協助天文學家最有效率地探索星系間物質及再電離時期與光的反應。本報告交叉比對昴星團望遠鏡 (Subaru Telescope) 的 Hyper Suprime-Cam (HSC) 和廣域紅外線巡天探測衛星 (Wide-field Infrared Survey Explorer, WISE) 的觀測數據，以尋找可能的高紅移超大質量黑洞。本研究根據光度測定 (photometric observation) 和宇宙紅移 (cosmological redshift) 的原理，從雙色圖中較紅的區域挑選了 46 個候選星體，並逐一透過天文望遠鏡照攝的影像確認是否有可能是超大質量黑洞。最後，選出三個可能的高紅移超大質量黑洞，可用於向大型天文望遠鏡 (如昴星團望遠鏡 (Subaru Telescope)) 申請光譜分析。

壹、研究動機

去年天文學家第一次釋出黑洞的剪影，引起大眾對 M87 星系中心的「超大質量黑洞 (supermassive black hole)」的關注。然而，我很疑惑，黑洞不是應該吸收所有的光嗎？為什麼可以拍攝到它的影像呢？

聆聽相關的演講和查詢資料後，我才知道黑洞剪影中的光芒是從黑洞的吸積盤發射出來的。而在黑洞的影像釋出前，天文學家已經花了數十年的時間尋找遙遠的超大質量黑洞，期望可以藉由它們的光譜更了解宇宙的演化。我第一次知道，除了將黑洞作為研究廣義相對論的工具之外，也可以使用超大質量黑洞研究宇宙的演化。這件事引起了我的好奇，進一步閱讀相關資料，得知超大質量黑洞主要用於探究現今天文學界了解甚少的再電離時期。

大霹靂後，宇宙進入再復合時期，使宇宙充滿中性氫並進入黑暗時期。黑暗時期末期，最早形成星體的輻射使中性氫再電離，宇宙進入再電離時期。約在大霹靂後十億年， z (紅移值) = 6 時，再電離時期結束，宇宙再次「透光」，並逐漸演化成現今的樣貌。藉由宇宙微波輻射背景，科學家已經可以了解再復合時期的宇宙；藉由各波段的望遠鏡，也可以一窺現今透光宇宙的面貌。然而，再復合時期是如何演化到現今宇宙的，尚未有明確的解釋。

藉由超大質量黑洞吸收光譜的耿恩彼得森槽和萊曼 α 森林的分界，我們可以知道再電離時期結束的時間。因此，天文學家正嘗試尋找遙遠的超大質量黑洞，期望藉由它們的光譜進一步了解宇宙的演化。本研究以宇宙紅移的原理為基礎，分析天文資料，期望可以尋找到更多候選的高紅移超大質量黑洞，作為後續光譜分析的研究對象，幫助現今宇宙學的研究。

配合教學單元：

- 一、基礎物理一：八、量子現象--2. 原子光譜
- 二、基礎物理一：九、宇宙學簡介--1. 星體觀測及哈伯定律
- 三、基礎地球科學：八、地球環境的特徵--4. 燦爛的星空

貳、研究目的

本研究旨在尋找 y 濾鏡漏失中 $z>7$ 的超大質量黑洞，幫助未來宇宙學的研究。藉由昴星團望遠鏡的 HSC SSP Deep layer 和 UltraDeep layer 星表和 ALLWISE 星表 (詳見第參章)，本研究根據光度測定 (photometric observation) 和宇宙紅移 (cosmological redshift) 的原理尋找 z (紅移值) >7 的超大質量黑洞，有助於我們了解宇宙從 $z >7$ 到現在的演化過程。

參、研究設備及器材

一、星表來源：

本研究聚焦尋找先前相關研究未找尋到的 $z>7$ 超大質量黑洞。為了找到被遺漏的超大質量黑洞，本研究選用探測極限星等極高的 HSC SSP Deep layer 和 UltraDeep layer 星表，並與和 HSC SSP 有相同探測範圍的 WISE 計畫星表疊合比對。如此，我們可以找到其他觀測中 z 和 y 濾鏡遺漏的遙遠超大質量黑洞。

因 $z>7$ 的超大質量黑洞的紫外線光譜已紅移到近紅外線波段 ($0.8\sim 2.5\mu\text{m}$)，本研究選用以下星表：

- (一) Subaru 超廣角相機策略觀測計畫 (Hyper Suprime-Cam Subaru Strategic Program, HSC SSP) 深空 (Deep layer)、超深空 (UltraDeep layer) 觀測模式中的 z 和 y 濾鏡 (波長 0.8898 和 $0.9762\mu\text{m}$) 星表 (以下簡稱 HSC SSP DUD 星表)

「超廣角相機」是裝置在昴星團望遠鏡 (Subaru Telescope，圖一、觀測範圍見圖二) 中的相機之一。HSC SSP 包含三種觀測模式 (廣角 (Wide)、深空 (Deep)、超深空 (UltraDeep))、grizy 五個寬頻帶濾鏡和另外四個窄頻帶濾鏡。相較於其他近紅外線探測計畫 (如 UKIDSS-LAS、VIKING 和 Pan-STARRS1，相關比較見表一)，HSC SSP Deep layer 和 UltraDeep layer 星表的極限星等極高，可以探測更黯淡的星體，且角解析度最小，更可以分辨鄰近的星體，有助於本研究尋找先前研

究遺漏的超大質量黑洞。本研究使用近紅外線波段 z、y 濾鏡的星表，其中共有 6,908,601 個星體在之後的分析中與 WISE 的資料疊合比對。

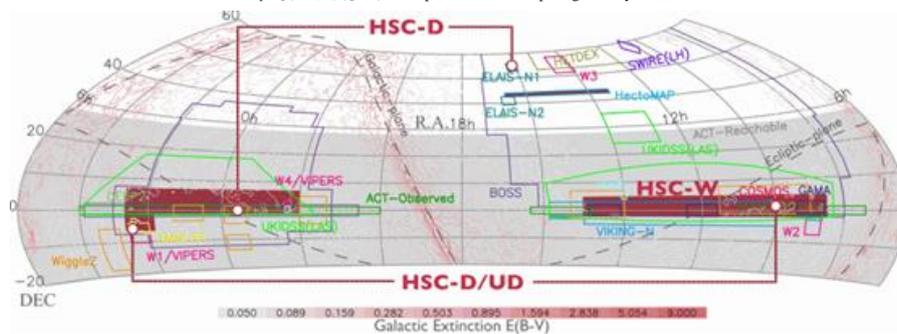
hscMap 是 HSC SSP 計畫建置的天文影像查詢系統，提供 HSC SSP 的觀測結果，使用者輸入星體的位置後，即可下載該星體由 HSC SSP 拍攝的天文影像。

hscMap: <http://hscmap.mtk.nao.ac.jp/hscMap4>



(圖一) 昴星團望遠鏡

Subaru Telescope [網站圖片]。取自 https://subarutelescope.org/Gallery/tele_dome.html。



(圖二) Subaru 超廣角相機策略觀測計畫的觀測範圍。本研究使用的觀測模式為深空及超深空模式，觀測範圍為標示 HSC-D 和 HSC-D/UD 的區域，HSC-W 則為廣角模式的觀測範圍。

Subaru Telescope's target fields along with the footprints of some of the major surveys to date [網站圖片]。取自 <https://hsc.mtk.nao.ac.jp/ssp/survey/>。

(二) 廣域紅外線巡天探測衛星 (Wide-field Infrared Survey Explorer, WISE，圖三) 的 W1 濾鏡 (波長 $3.4\mu\text{m}$) 星表

WISE 計畫的觀測範圍為整個天空，包含 W1 ($3.4\mu\text{m}$)、W2 ($4.6\mu\text{m}$)、W3 ($12\mu\text{m}$)、W4 ($22\mu\text{m}$) 四個濾鏡。其中，W1、W2 濾鏡可以偵測中紅外線 ($3\sim 8\mu\text{m}$) 波段，符合黑洞光譜紅移後的波段。望遠鏡口徑為 40 公分，並有四百萬個像素，使它的靈敏度高於其他紅外線探測計畫 (如 IRAS、DIRBE) (Wright et al., 2010)。本研究使用 WISE 資料庫中的 ALLWISE 星表，共含有超過七億個已偵測的星體，並根據近紅外線的波段範圍，使用其中的 106,731 個星體與 HSC SSP Deep layer 和 UltraDeep layer 星表疊合比對。

WISE Image Service 是 WISE 計畫建置的影像查詢系統，提供 WISE 望遠鏡拍攝的天文影像，可個別下載四個不同濾鏡的拍攝結果。

WISE Image Service: <https://irsa.ipac.caltech.edu/applications/wise/>



(圖三) 廣域紅外線巡天探測衛星

WISE [網站圖片]。取自 <https://photojournal.jpl.nasa.gov/catalog/PIA17254>。

(表一) HSC SSP 與其他可見光、近紅外線計畫探測面積範圍、濾鏡偵測極限星等、角解析度的比較。

探測計畫	探測面積範圍 (立體角 (deg ²))	探測極限星等 (AB mag)	角解析度 (角秒)
HSC SSP (Aihara et al., 2018)	Deep: 27 UltraDeep: 3.5 Wide: 1400	Deep: z~26.3, y~25.3 UltraDeep: z~26.8, y~26.3 Wide: z~25.1, y~24.4	z: 0.63 y: 0.64
WISE (Wright et al., 2010)	全天空	W1: 19.6	W1: 6.1
UKIDSS-LAS (Lawrence et al., 2007)	4000	y~20.3	1.2
VIKING (Sutherland et al., 2013)	1500	z~23.1, y~22.3	z: 1.0 y: 1.0
PAN-STARRS1 (Chambers et al., 2016)	7	z~22.3, y~21.4	z: 1.07 y: 1.02

二、使用軟體：

(一) Topcat

Topcat 是一款可以載入及分析星表、繪製圖表的天文專用軟體。本研究使用此軟體交叉比對 HSC SSP 和 WISE 的星表，並繪製雙色圖。

(二) SAOImage DS9

SAOImage DS9 是一款可以載入及分析星表，並以 FITS 檔案疊圖及分析天文影像的天文專用軟體。本研究使用此軟體，將 HSC SSP 和 WISE 的資料製作成天文影像。

三、確認候選超大質量黑洞是否為已知星體時使用的資料庫：

(一) NASA/IPAC Extragalactic Database, NED: <https://ned.ipac.caltech.edu/>

NED 彙整各研究、巡天計畫的不同波段觀測結果，提供銀河系外星體的資料。

(二) SIMBAD Astronomical Database - CDS (Strasbourg): <http://simbad.u-strasbg.fr/simbad/>

SIMBAD 彙整、提供各波段的觀測結果，並每天更新星體的資料。

肆、研究過程與方法

一、原理及名詞解釋

本研究使用的原理如下：

(一) 類星體 (quasar, QSO) 與超大質量黑洞 (supermassive black hole)

類星體是一種天空中的點光源，亮度僅次於超新星 (supernova) 和伽瑪射線爆 (gamma-ray bursts, GRB)，一般認為超大質量黑洞的吸積盤提供類星體發光所需能量。超大質量黑洞為十萬至十億太陽質量的黑洞，存在於許多大型星系中央，是最明亮的一種活躍星系核 (active galactic nucleus, AGN)。

相較於星系，類星體較亮，存在時間也比同樣高紅移的伽瑪射線爆久。因此，雖然類星體數量稀少，它們的吸收光譜最適合用來探測再電離時期。

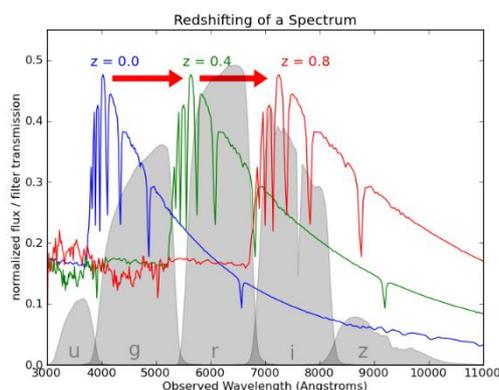
(二) 宇宙學紅移 (cosmological redshift)

隨著宇宙膨脹，穿越宇宙的光波波長會被拉長，稱為宇宙學紅移。紅移值越大，代表星體發出的光隨宇宙膨脹紅移的程度越大，光波被拉得越長。紅移值可對應到宇宙的年齡，紅移值越大，表示光波的紅移程度越大，光波來源存在於宇宙較古老的時期。天文學中以紅移值公式 (式一) 計算紅移值 z ：

$$\lambda_{obs} = \lambda_{rest} * (1 + z) \quad (\text{式一})$$

其中 z 表紅移值、 λ_{obs} 表觀察到的光波波長、 λ_{rest} 表原始的光波波長。

為了研究早期宇宙，選擇濾鏡時會挑選可偵測到紅移值 (z) 越大 (波長越長) 的濾鏡，以尋找越古老的黑洞。圖四以織女一恆星的光譜與史隆尋天計畫的 u 、 g 、 r 、 i 、 z 濾鏡為例，說明星體紅移值與濾鏡波長的關係。隨織女一恆星的紅移值增加，觀測到的恆星光波波長會越來越長，需要使用偵測波段波長越長的濾鏡才可以偵測得到。同理，在尋找高紅移的超大質量黑洞時，需要根據超大質量黑洞光譜的觀測波長範圍 (近至中紅外線波段)，挑選偵測波段波長較長的濾鏡，以尋找紅移程度更高的超大質量黑洞。



(圖四) 織女一恆星在 $z=0.0$ 、 $z=0.4$ 、 $z=0.8$ 時的光譜，灰色色塊表示史隆數位巡天計畫 (Sloan Digital Sky Survey, SDSS) 中 u 、 g 、 r 、 i 、 z 濾鏡的偵測波段。

The spectrum of the star Vega (α -Lyr) at three different redshifts. [網站圖片]。取自 <https://ogrisel.github.io/scikit-learn.org/sklearn-tutorial/tutorial/astrometry/regression.html>。

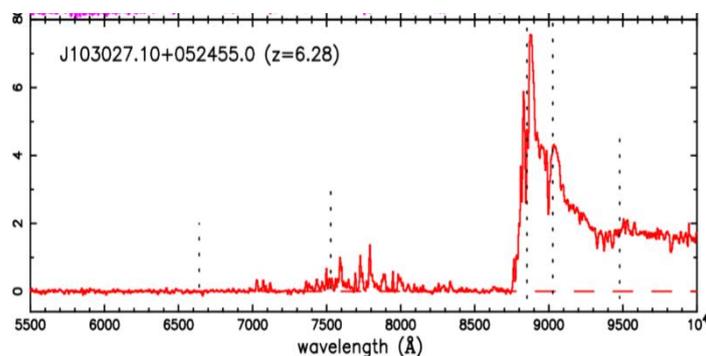
(三) 再電離時期 (the Epoch of Reionization) 與超大質量黑洞光譜的關係

由於宇宙中 75% 的已知物質是氫，星體的光穿越宇宙時光波會被中性氫吸收，在光譜上形成吸收譜線。氫原子的電子從 $n=2$ 的能階躍遷到 $n=1$ 時，會放射波長 1215.67 埃 (\AA) 的電磁波，稱為萊曼 α 射線 (Lyman-alpha emission)，屬於紫外線。宇宙中的中性氫吸收萊曼 α 射線、電子躍遷到 $n=2$ 後，電子會迅速回到基態並放出萊曼 α 射線。這些再次放射出的射線會向四面八方放射，只有少部分的射線會沿我們的視線射出，因此星體的光譜上仍然會有萊曼 α 射線的吸收譜線。

宇宙的再電離時期前是黑暗時期，這個時期的宇宙充滿了會吸收萊曼 α 射線的中性氫。最早形成星體的輻射使這些中性氫電離，開始了再電離時期，並在 $z \sim 6$ 時結束。中性氫電離後，光可以再次通過宇宙不被吸收，形成可見光、近和中紅外線天文望遠鏡可以觀測到的光譜。宇宙早期超大質量黑洞的光譜在紅移前是連續光譜，隨著宇宙膨脹紅移、經歷不同紅移的萊曼 α 吸收，逐漸變成吸收光譜。比萊曼 α 射線波長更長的光波無法紅移到萊曼 α 射線的波長，因此，該波段的光譜會保持為連續光譜。然而，隨著中性氫與觀測者之間的距離不同，比萊曼 α 射線波長更短的光波經過中性氫時被

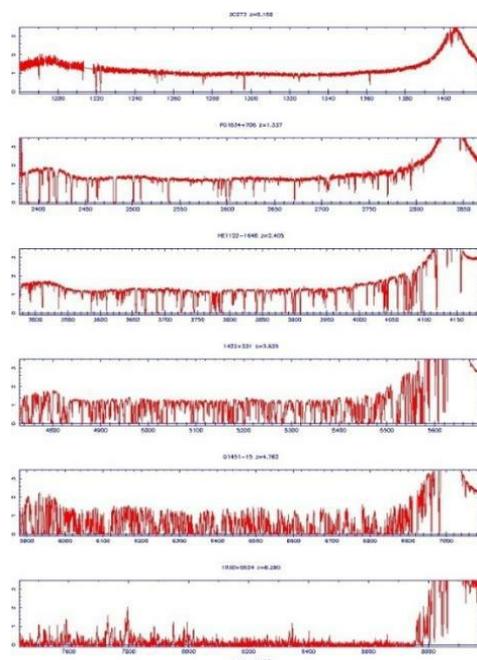
拉長的程度、紅移程度也不同，使得類星體的光陸續在不同時間、地點被中性氫吸收，在吸收光譜上形成萊曼 α 森林 (Lyman-alpha forest)。

除此之外，由於再電離初期的宇宙仍充滿中性氫，在這個時期形成的黑洞的光剛開始穿越宇宙時，大部分紅移到萊曼 α 射線波長的光波都會被吸收，在黑洞的吸收光譜上形成耿恩彼得森槽 (Gunn-Peterson Trough) (見圖五)。藉由這些光譜，我們可以了解最早形成星體的特性以及宇宙中的中性氫分布，也可以從萊曼 α 森林和耿恩彼得森槽的邊界得知再電離時期結束的時間 (約 $z=6$ 之時)。圖六展示了黑洞光譜的演變和萊曼 α 森林、耿恩彼得森槽的形成。



(圖五) 第一個被偵測到的耿恩彼得森槽。波長 8450\AA 至 8710\AA 之間偵測到的光波光通亮 (flux) 為 0，是為耿恩彼得森槽。

Becker, R. H. et al., (2001) Evidence for Reionization at $z=6$: Detection of a Gunn-Peterson Trough in a $z=6.28$ Quasar. *Astron. J.*, 122 (2001) 2850. doi: 10.1086/324231



(圖六) 黑洞光譜隨紅移值改變的演變。此一系列黑洞光譜的紅移值由上而下遞增，顯示萊曼 α 射線隨黑洞紅移值增加的演變。由此可見，紅移值越高的星體越容易有耿恩彼得森槽，可依此特性設計篩選超大質量黑洞的方法。

Bob Carswell, *The evolution of the universe*, <http://www.astro.cam.ac.uk/~rfc/>。

1. 光度測定與光譜學

光度測定 (photometric observation) 技術使用一系列不同觀測波段、已知探測極限星等的濾鏡觀測星體亮度。天體光譜學 (spectroscopic observation) 則是測量到星體的完整光譜，但需要很長的曝光時間，且一次可以觀測到的星體數量有限。相較於光譜學，光度測定可以更便捷、低廉、大量地取得星體的資訊。此外，使用光度測定也可以觀測到比光譜學更廣的波長範圍。因此，本研究使用光度測定篩選超大質量黑洞。

2. 色指數與漏失

光度測定中的兩個濾鏡偵測到的視星等相減，可以得到星體的色指數 (color index)，並得到一個星體的「顏色」：色指數越大，表示星體越紅。取三個濾鏡的視星等，兩兩相減後，分別以兩個色指數為縱、橫軸，做成雙色圖 (color-color diagram)，可以得知星體的顏色。

每一個光度測定的濾鏡只能偵測到一定波段的光，若一個物體發射出的光波波長不在 (或幾乎不在) 一個濾鏡的偵測範圍內，或亮度低於濾鏡的偵測極限，它就是這個濾鏡的「漏失」 (dropout)，而這個濾鏡的星表上可能就不會有這個星體的記錄，或是這個星體在這個波段偵測到的亮度會很低。

3. 角解析度

角解析度表示一個望遠鏡在空間上的測量誤差，以本研究使用的 HSC SSP 望遠鏡為例，z 和 y 濾鏡的角解析度分別為 0.63 角秒和 0.64 角秒，表示望遠鏡偵測到每一個星體的座標會有 0.63 角秒/0.64 角秒的誤差。本研究在疊合 HSC SSP DUD layer 星表和 ALLWISE 星表時，即根據 HSC SSP 望遠鏡的角解析度將疊合的最大誤差設定為 0.7 角秒，以確保 HSC SSP 偵測到的星體可以被確實疊合。

(五) 本研究使用 z、y 及 W1 濾鏡的原因

現今已觀測到 $z > 7$ 的類星體只有六個 (Inayoshi et al., 2019)。本研究根據紅移值 z 的計算公式 (式一) 估算候選超大質量黑洞的預期紅移值：當黑洞光譜中的耿恩彼得森槽位在 y 濾鏡的偵測波段 (9762Å) 時，紅移後的萊曼 α 射線波長 (λ_{obs}) 會大於 9762Å，再將萊曼 α 射線的靜止波長 (1215.67Å) 代入 λ_{rest} ，可以計算出，以 W1 濾鏡輔助時，

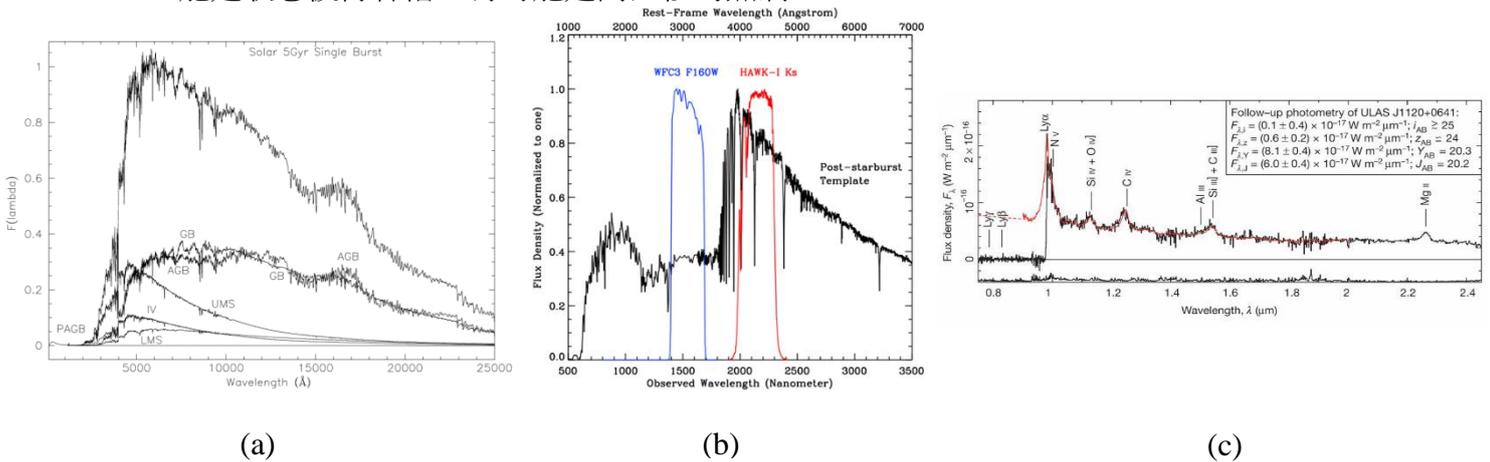
藉由 y 濾鏡漏失可能可以找到 $z > 7.03$ 的星體。因此，藉由 y 濾鏡漏失，我們可以找到紅移值更大的黑洞。

z 濾鏡則是用於排除受污染的資料與協助 y 濾鏡，功能如下：

1. 由於黑洞的光譜已經紅移到近外線波段，可見光濾鏡 z 、 y 偵測到的亮度應相當低。雖然本研究的主要目的為尋找 y 濾鏡的漏失，但 z 濾鏡可以再次確認偵測的星體在可見光波段亮度很低，提高挑選候選黑洞的成功率。
2. z 和 y 濾鏡偵測的波段相近，但是 z 濾鏡可以偵測的極限星等 (25.1mag) 比 y 濾鏡 (24.4mag) 大。當 y 濾鏡無法偵測到一星體的光波時，可以使用 z 濾鏡檢測該星體的可見光波段亮度是否夠低，可見光波段亮度夠低時，該星體才有可能有是黑洞。

由於恆星和低紅移星系的光譜主要集中在可見光波段 (見圖七 (a)、(b))，HSC SSP 的 z 和 y 濾鏡偵測到它們的亮度會較 WISE 天文望遠鏡的 W1 濾鏡偵測到的高。因此，雙色圖上較密集的資料點 (y -W1 較小的部分)，主要會是恆星和星系。

另一方面，黑洞的光譜已紅移到近紅外線波段(見圖七 (c))，因此，若星體的 y -W1 值較大，表示 y 濾鏡偵測到的亮度很低，該星體的吸收光譜在 y 濾鏡波段很有可能是耿恩彼得森槽，有可能是高紅移的黑洞。



(圖七) (a) 各種常見恆星、(b) 低紅移星系、(c) $z=7.085$ 的超大質量黑洞光譜的比較。恆星與星系的光譜主要集中在可見光波段 (4000Å~9000Å)，宇宙早期黑洞的光譜則已經紅移到近紅外線波段 (0.8μm~2.5μm)。

(a) Pickles et al. (2018)、(b) Almeida et al. (2012)、(c) Mortlock et al. (2011)

二、研究過程及方法

本研究首先疊合 HSC SSP DUD 星表和 ALLWISE 星表，再繪製成功疊合資料的雙色圖，並製作一系列圖表確認疊合結果的可信度。最後，從雙色圖中挑選候選星體，使用候選星體的影像確認它們的身分，挑選出候選的超大質量黑洞。

詳細研究步驟如下：

(一) 下載 HSC SSP DUD 星表及 ALLWISE 資料庫中含有 W1 濾鏡觀測資料的星表：

1. 下載 HSC SSP DUD 資料庫中含有 z 和 y 濾鏡偵測資料的星表 (下載資料的項目見附錄一)。
2. 下載 WISE 資料庫中含有 W1 濾鏡偵測資料的 ALLWISE 星表。由於 ALLWISE 的資料過大，無法一次下載，所以先用 Topcat 確認 HSC SSP DUD 星表的偵測範圍：
 - (1) $340 < RA < 36; -2 < DEC < 2$
 - (2) $230 < RA < 250; 52 < DEC < 58$
 - (3) $140 < RA < 160; -1 < DEC < 5$
 - (4) $30 < RA < 40; -7 < DEC < -2$

再配合這四個範圍分別下載 WISE 的星表並使用 Topcat 融合成一個檔案。

(二) 使用 Topcat 疊合：

1. 將 HSC SSP DUD 星表、ALLWISE 星表匯入 Topcat。
2. 選定疊合使用的演算法 (algorithm)：Sky (此模式可以利用星體的赤經、赤緯比較它們在天球上的位置)。
3. HSC SSP z 和 y 濾鏡的角解析度分別為 0.63 角秒和 0.64 角秒，因此將疊合時的最大誤差設定為 0.7 角秒。當 HSC SSP DUD 星表和 ALLWISE 星表偵測到的星體位置誤差在 0.7 角秒以內時，就將其視為同一星體。
4. 使用 Pair Match (用以疊合兩個不同星表的資料) 疊合兩星表。
5. 將疊合成功的資料匯出。

(三) 繪製成功疊合資料的雙色圖：

1. 在 Topcat 中，使用公式 $\text{mag} = -2.5 * \log(\text{flux}) + \text{zero point}$ 將 HSC SSP 星表偵測到的資料由 flux (光通量) 換算成 magnitude (視星等)，並使用公式 `parseDouble` 將資料型態從 string 轉換成 double。
2. 以 y-W1 星等為橫軸、z-y 星等為縱軸繪製雙色圖。

(四) 繪製圖表檢驗疊合的可信度：每個濾鏡都有觀測極限，繪製出的雙色圖資料點應集中在其中一區，但實際繪製出來卻很分散，因此繪製以下圖表檢驗：

1. z、y、W1 濾鏡偵測星體數量-星等直方圖：若數據下載成功、完整，濾鏡偵測到的星體數量會在各星等呈鐘形曲線分布。
2. $\Delta\text{DEC}-\Delta\text{RA}$ 圖：將兩星表的 RA (赤經)、DEC (赤緯) 相減，以檢驗一星體在兩個星表偵測到的位置差距。 ΔRA 和 ΔDEC 值越小，表示疊合的誤差越小。
3. ΔRA 直方圖和 ΔDEC 直方圖：將 $\Delta\text{DEC}-\Delta\text{RA}$ 圖的縱、橫軸數據分開，繪製成直方圖。若星表疊合成功，疊合誤差應以 0 為中心，向外呈鐘形曲線分布。
4. y-z 圖、W1-y 圖：分別以兩個不同濾鏡偵測到的星等為縱、橫軸，並藉由不同濾鏡的波段關係，檢驗偵測到的星等關係是否合理。若兩濾鏡偵測的波段越相近，偵測到同一物體的星等應越相近。

(五) 以 $y-W1 > 2\text{mag}$ 的標準挑選候選星體：

1. y-W1 標準設定：

當黑洞的紅移值為 $z=7.03$ 時，黑洞的觀測光譜中大部分在 y 濾鏡偵測波段的光波會被再電離時期初期的中性氫吸收，使得該波段出現耿恩彼得森槽。因此，y-W1 的值越大，有可能是星體光譜原有的特性，也有可能表示黑洞顏色越紅，表示 y 濾鏡偵測到的亮度越低，黑洞形成時宇宙有越多中性氫，是越早期的宇宙。

y 濾鏡測得的星體星等和 W1 濾鏡測得的星等相減並換算後，至少是 2mag ，又 y-W1 越大越有可能是高紅移的超大質量黑洞，所以將挑選黑洞的標準訂為 $y-W1 > 2\text{mag}$ 。因此，挑選候選星體時，本研究聚焦在雙色圖的右側，期望找到紅移值更大的超大質量黑洞。

2. 分區 (見表二) 挑選候選星體：

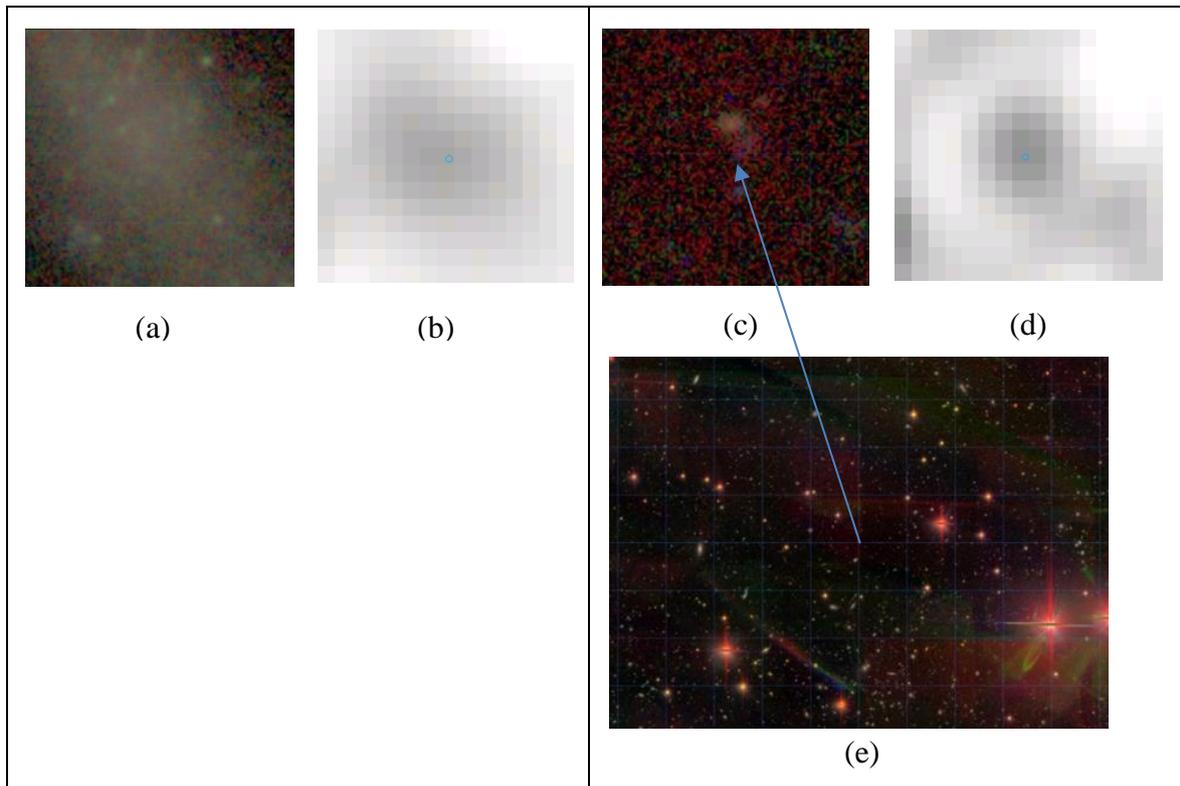
由於 z 和 y 濾鏡是可見光波段的濾鏡，高紅移的星體在這兩個濾鏡偵測到的亮度應當很暗或無法偵測。因此，雙色圖上的 $6\text{mag} < y - W1 < 10\text{mag}$ 、 $-2\text{mag} < z - y < 2\text{mag}$ 一區最有可能有候選超大質量黑洞。 $z - y$ 值更大的區域可能是較低紅移的高紅移類星體或星系，更小的區域紅移值會更低，但因本研究主要研究目的為尋找 y 濾鏡漏失中的超大質量黑洞，因此也將在 $y - W1 > 2\text{mag}$ 範圍內的 $0.75\text{mag} < y - W1 < 10\text{mag}$ 、 $2\text{mag} < z - y < 10\text{mag}$ 和 $2\text{mag} < y - W1 < 10\text{mag}$ 、 $-10\text{mag} < z - y < -2\text{mag}$ 兩區納入挑選候選星體的區域。

(表二) 雙色圖的分區

分區	$y - W1$ (mag)	$z - y$ (mag)
A	0.75 ~ 10	2 ~ 10
B	6 ~ 10	-2 ~ 2
C	2 ~ 10	-10 ~ -2

(六) 比較天文影像，挑選候選超大質量黑洞：

1. 在 hscMap (濾鏡顏色： i ：藍、 z ：綠、 y ：紅) 及 WISE Image Service 中輸入候選星體的座標。
2. 先將影像大小調整為 600 角秒平方 (arcsec^2)，觀察候選星體周圍是否有過亮星體發射出的光形成的雜訊，或是否被其他大型星體遮蓋，圖八展示了影像被污染的範例。
3. 若影像沒有雜訊、候選星體沒有被遮蓋，再將影像大小調整為 20 角秒平方確認候選星體影像是否被污染。
4. 由於黑洞的光譜不斷向紅外線波段紅移，逐漸遠離 z 和 y 濾鏡偵測的可見光波段，可能是黑洞的星體在 HSC 影像中顏色會較淡。相反地，黑洞的光譜不斷接近 WISE W1 濾鏡偵測的中紅外線波段，所以，可能是黑洞的星體在 WISE 影像中顏色會較深。因此，若候選星體在 HSC 影像中較淡，在 WISE 影像中較深，就可以被列為候選超大質量黑洞。



(圖八) 受污染影像舉例。左欄為被大型星體遮住的候選星體：(a) 為 HSC 影像，其中灰白色物體即為遮蓋住候選星體的大型星體；(b) 為同一候選星體的 WISE 影像，顯示遮蓋物下應仍有候選星體。右欄為含有過多雜音的影像：(e) 中有許多非常亮的星體，它們發出的光會在其他星體的背景中留下雜訊，例如 (c) 中的紅點 ((c) 和 (e) 為同一星體的影像，唯 (c) 的大小為 20 角秒平方，(e) 為 600 角秒平方)；(d) 為同一候選星體的 WISE 影像，顯示受鄰近光影響的影像中應仍有候選星體。

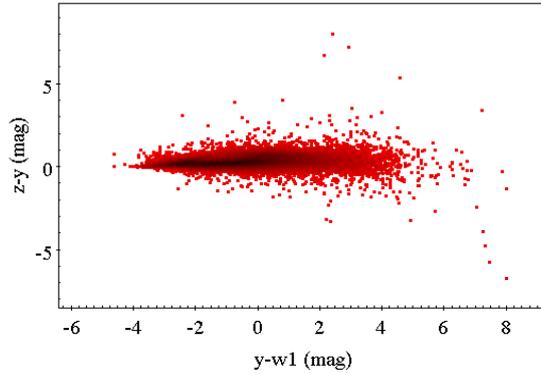
(七) 確認候選星體不是已知星體：

1. 在 NED 資料庫和 SIMBAD 資料庫中輸入候選超大質量黑洞的坐標。
2. 同疊合時最大誤差的設定，配合 HSC SSP 望遠鏡的角解析度，將搜尋範圍定為 0.7 角秒 (=0.01 角分)，確認資料庫中是否有這三個候選者的資料。

伍、研究結果

一、HSC SSP DUD 星表及 ALLWISE 星表疊合比對結果

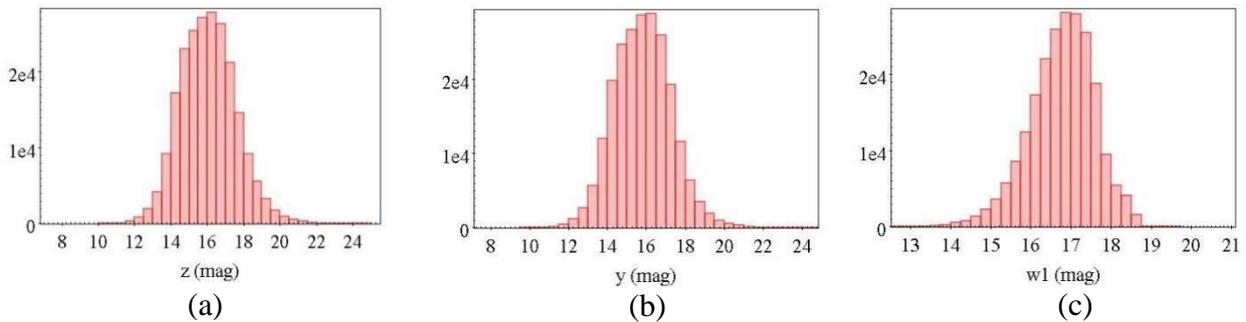
本研究使用來自 HSC SSP DUD 星表的 1,060,731 筆資料與來自 ALLWISE 星表的 6,908,601 筆資料疊合比對，共有 221,537 個成功疊合的結果 (見圖九)。



(圖九) HSC SSP DUD 星表及 ALLWISE 星表疊合資料的雙色圖。橫軸：y-W1 色指數；縱軸：z-y 色指數。

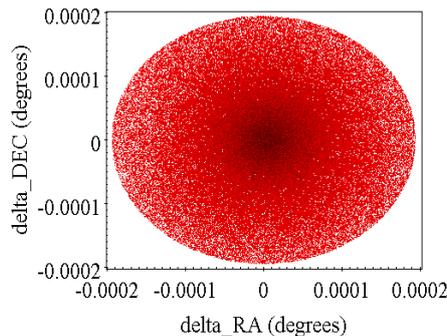
二、檢驗比對的可信度：為確保星表疊合比對的可信度，本研究繪製了以下圖表：

1. z、y、W1 濾鏡偵測星體數量直方圖 (圖十)：圖中顯示三個濾鏡偵測到的星體數皆符合鐘形曲線分布，表示星表下載完整。



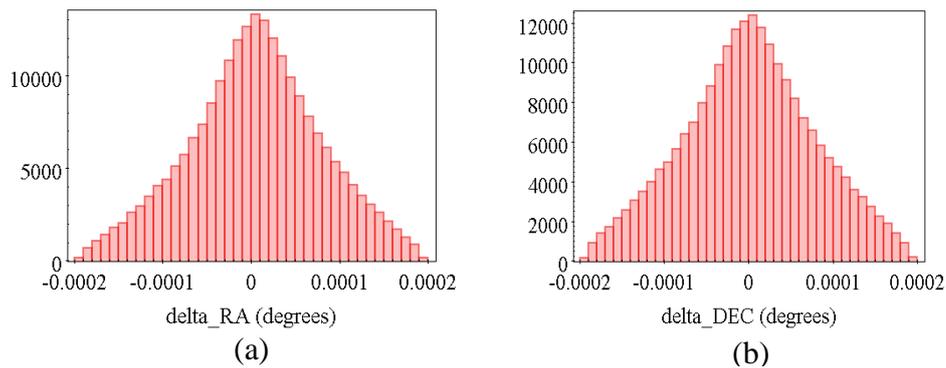
(圖十) (a) z 濾鏡、(b) y 濾鏡、(c) W1 濾鏡偵測星體數量直方圖。

2. $\Delta\text{DEC}-\Delta\text{RA}$ 圖 (圖十一)：資料點集中在 (0,0) 座標周圍，表示每一筆資料疊合時誤差很小。



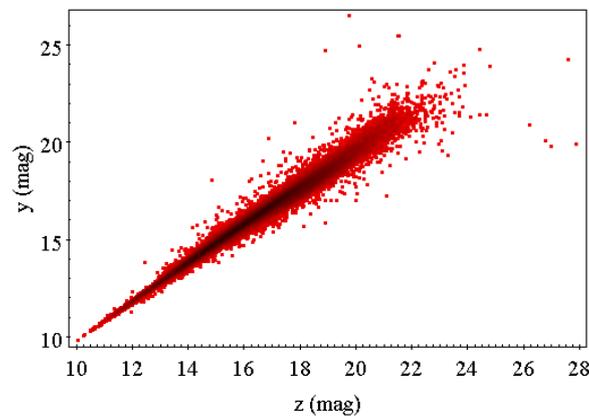
(圖十一) $\Delta\text{DEC}-\Delta\text{RA}$ 圖。

3. ΔRA 直方圖和 ΔDEC 直方圖 (圖十二)：資料比對的誤差以 0 為中心向外呈鐘形曲線分布，表示星表疊合成功。



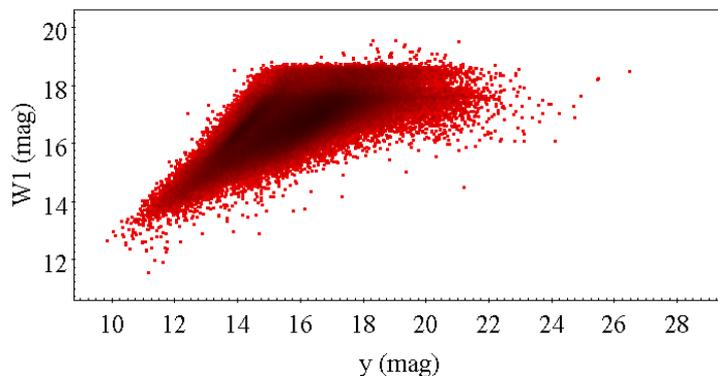
(圖十二) (a) ΔRA 直方圖和 (b) ΔDEC 直方圖。

4. $y-z$ 圖 (圖十三)： z 和 y 濾鏡的波段相差小，因此個別偵測到一星體的視星等相近，圖形成細長型分布。



(圖十三) $y-z$ 圖。

5. $W1-y$ 圖 (圖十四)：此圖斜率較大的一側較藍，可能是恆星、低紅移星系或低紅移超大質量黑洞；斜率較小的一側較紅，且越往圖表右上方越紅，可能是黑洞。

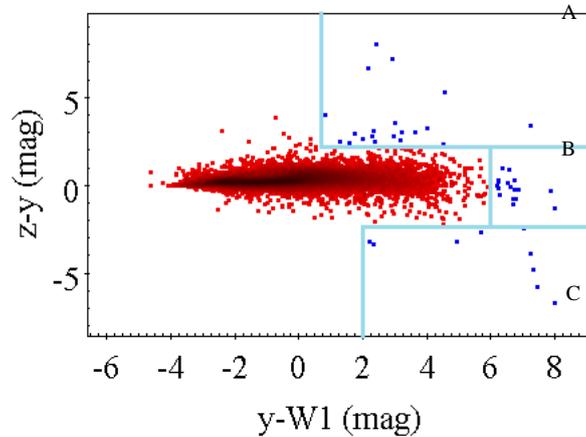


(圖十四) $W1-y$ 圖。

三、從雙色圖中挑選可能的候選者：

根據 $y-W1 > 2\text{mag}$ 的標準，本研究挑選 A、B、C 三區中 46 個分布較稀疏的資料點作為候選星體 (圖十五中藍色資料點)。

雙色圖四周分散的星體資料比較有可能是黑洞，中間區塊集中資料點的星體多半為恆星或星系。

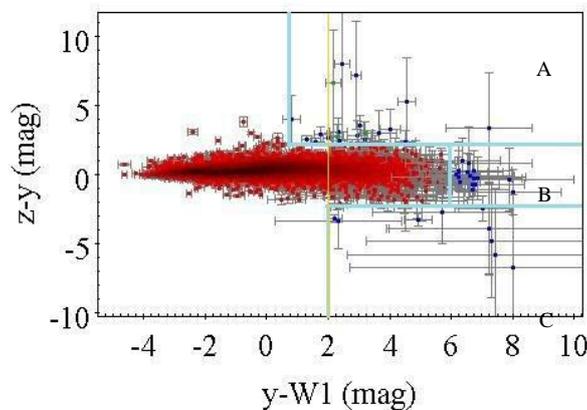


(圖十五) HSC SSP DUD 星表與 ALLWISE 星表疊合資料的雙色圖，含代表 46 個候選星體的藍色資料點。此圖展示疊合比對的結果與 46 個候選星體的色指數分布。其中，將 $y-W1 > 2\text{mag}$ 的區域分為 A、B、C 三區。

四、候選星體的天文影像：

編號候選星體，並在 hscMap 和 WISE Image Service 逐一輸入各候選星體的坐標，下載天文影像，排除被不明物體遮蔽或周圍有過亮星體發射出的光形成的雜訊的候選者。

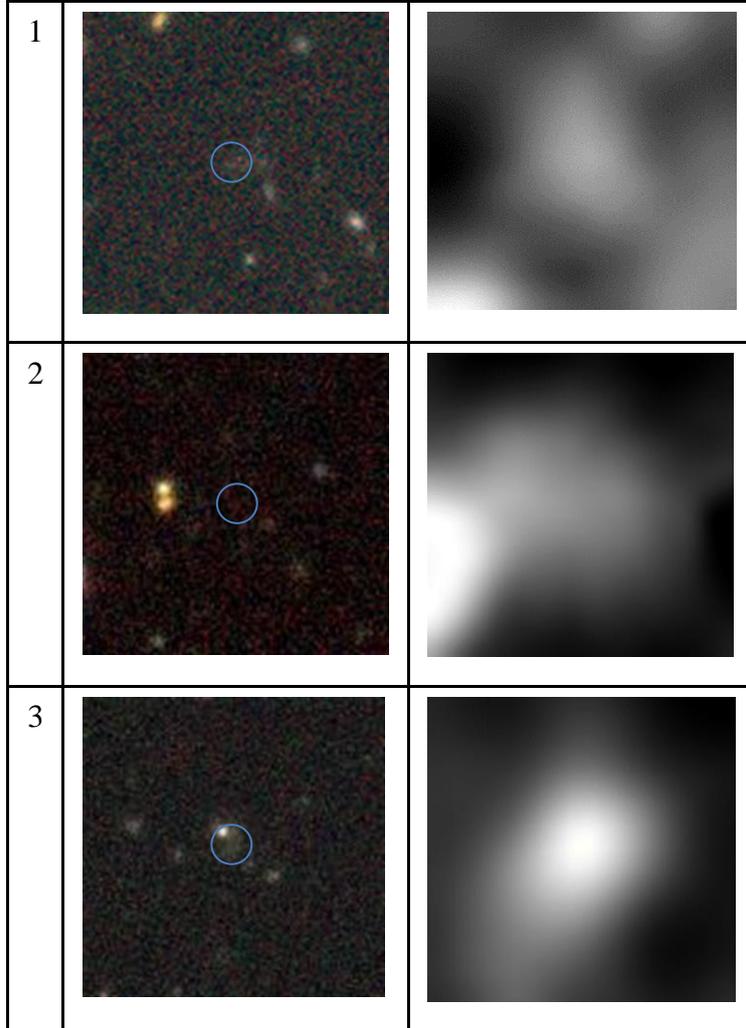
- (一) 46 個候選者的天文影像見附錄二。
- (二) 挑選出的候選超大質量黑洞 (圖十六)：最後，共挑選出三個候選超大質量黑洞 (表三、圖十七)，可以作為後續光譜分析的研究對象。



(圖十六) 疊合結果、候選星體與候選超大質量黑洞的雙色圖。紅點、藍點、綠點為 221,537 筆成功疊合的資料；藍點、綠點為 46 個候選星體；綠點為 3 個候選超大質量黑洞。

(表三) 三個候選超大質量黑洞在三個濾鏡的視星等及色指數

	z (mag)	y (mag)	W1 (mag)	z-y (mag)	y-W1 (mag)
1	26.8±3.8	20.1±0.1	17.9±0.2	6.7±3.9	2.2±3.3
2	23.4±0.8	20.5±0.2	17.3±0.1	3.0 ^{+0.9} _{-1.0}	3.2±0.3
3	22.2±0.9	19.5±0.1	17.2±0.1	2.8 ^{+0.9} _{-1.0}	2.3±0.2



(圖十七) 三個候選超大質量黑洞的天文影像 (影像大小：20 角秒平方)。左欄為使用藍色 i 濾鏡、綠色 y 濾鏡、紅色 z 濾鏡製作的 i-z-y HSC 影像。右欄為 WISE 影像。

五、確認候選星體不是已知星體：

經確認，在 NED 資料庫和 SIMBAD 資料庫中皆尚未有這三個候選超大質量黑洞的資料。

陸、討論

一、誤差討論：

(一) 雙色圖的誤差線分析 (見第五章圖十六)：

1. A 區：此區多為較低紅移的高紅移星系或類星體，因此在偵測時， z 和 y 濾鏡偵測到的亮度很低，逼近偵測極限，誤差會較大。然而，本研究的目的即是尋找在 z 、 y 濾鏡裡亮度低的星體，無可避免使用因亮度低而誤差較大的資料。不過，三個候選超大質量黑洞不論在考慮誤差與否的情況下皆在此區。使用光度測定只是初步找出候選超大質量黑洞，這些候選者在 z 、 y 波段的實際亮度必須透過長曝光時間的光譜觀測來測定。
2. B 區：此區的 y -W1 顏色越紅時， y 濾鏡偵測到的亮度很低，因此 y -W1 方向的誤差會較大。
3. C 區：此區的 z - y 已達負值，表示 y 濾鏡偵測到的亮度會比 z 濾鏡偵測到的低。然而， y 濾鏡的敏銳度不如 z 濾鏡，因此 z - y 方向的誤差會較大。如同 B 區，此區的 y -W1 顏色越紅時， y 濾鏡偵測到的亮度很低，因此 y -W1 方向的誤差會較大。

(二) 疊合誤差的影響：

相較於 WISE 計畫，HSC SSP 計畫的角解析度較小，因此，本研究根據 HSC SSP 計畫的角解析度設定疊合時的最大誤差，使疊合更精準。然而，由於疊合的最大誤差與 WISE 的角解析度相差太大，可能會導致疊合時遺漏潛在的候選黑洞。為解決這個問題，可以將疊合的最大誤差調大，減少最大誤差和 WISE 角解析度的差距。但介於 HSC SSP 計畫和 WISE 計畫角解析度的最大誤差，可能會造成疊合時一筆 WISE 資料對應到多筆 HSC SSP 資料的情形。因此，本研究仍使用 0.7 角秒作為疊合時的最大誤差。

Toba et al., 2015 使用 HSC SSP Wide layer 星表和 ALLWISE 星表為主要星表尋找塵埃遮蔽星系 (Dust Obscured Galaxies, DOGs) 時，為避免疊合時一筆 WISE 資料對應到多筆 HSC SSP 資料的情形，先將 HSC SSP Wide layer 星表與角解析度和 HSC SSP 計畫較近的 VIKING 計畫的星表疊合 (兩計畫的角解析度比較見第參章表一)，初步篩選出較有可能是塵埃遮蔽星系的星體，再使用介於 HSC SSP 計畫和 WISE 計畫角解析度的 3 角秒作為疊合最大誤差，與 ALLWISE 星表疊合，如此既能增加候選星體的可信度，也能降低因疊合誤差

設定度不足而遺漏候選星體的機率。

未來納入 Wide layer 星表研究，因 VIKING 計畫與 Wide layer 計畫的部分觀測範圍重疊，可以如 Toba et al., 2015 的研究方法，先將 HSC SSP Wide layer 星表與 VIKING 星表疊合，再與 ALLWISE 星表疊合，提高研究的精確度。

二、與相關的類星體巡天計畫比較：

(一) 暗能量巡天計畫

Yang et al., 2018 使用暗能量巡天 (The Dark Energy Survey, DES) 資料與 WISE 資料疊合比對，在初期篩選中尋找到六個紅移值大於 6.4 的類星體，其中一個類星體紅移值甚至高達 7.02。DES 計畫的 z 和 Y 濾鏡探測極限星等分別是 22.69 ABmag 和 21.44 ABmag，探測面積範圍是 5000 deg^2 ，本研究使用的 HSC SSP DUD layer 資料探測極限更高 (z : 26.8、 y : 26.3)，相較於 DES，利用 HSC SSP 的資料可以更精確、有效率地篩選出候選超大質量黑洞。可能可以偵測到更多先前研究遺漏的高紅移超大質量黑洞。此外，未來若使用觀測範圍與其他數個巡天計畫重疊的 HSC SSP Wide layer 星表篩選黑洞，因為一個星體可以同時有多個波段的濾鏡的資料，篩選結果的可信度也會較 DES 計畫高。

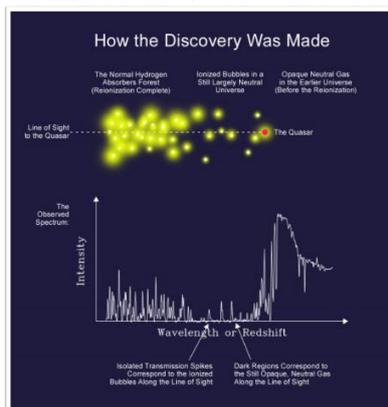
(二) SHELLQs 類星體計畫

SHELLQs (Subaru High- z Exploration of Low-Luminosity Quasars，昂星團望遠鏡高紅移低亮度的類星體探測計畫) 是一系列以 HSC SSP Wide layer 初期釋出的星表為主資料，並和 UKIDSS-LAS 星表和 VIKING 星表疊合尋找類星體的研究，篩選過程中使用了貝氏隨機化算法以排除恆星和矮恆星 (Matsuoka et al., 2016, 2019)。鑒於先前相關研究 (Bañados et al., 2018、Mortlock et al., 2011、Wang et al., 2018、Yang et al., 2019) 尋找到的四個 $z > 7$ 的類星體亮度受限於觀測極限都比較高，此研究借助 HSC SSP 的極深探測深度著重於尋找低亮度的類星體，使宇宙學研究更完整。

本研究為了找到先前研究遺漏的黑洞，使用探測極限深度比 Wide layer 更深的 HSC SSP Deep 和 UltraDeep layer 星表；為了排除恆星及星系，將 HSC SSP 星表與 ALLWISE 星表疊合。相較於屬於近紅外線探測計畫的 UKIDSS-LAS 和 VIKING，屬於中紅外線計畫的 WISE 偵測波長長度更長，未來納入 HSC SSP Wide layer 的星表研究，可望可以找到比 SHELLQ 類星體紅移更高的黑洞。此外，納入最近釋出的 Wide layer 星表後，因為探測的範圍增加，可能可以找到更多超大質量黑洞。

三、對天文學的幫助：

尋找到 $z>7$ 的超大質量黑洞，可以使用它們的吸收光譜更了解再電離時期的發展與宇宙中星系間介質的分布。如圖十八，即是用黑洞的光譜推衍出宇宙中中性氫的分布。目前宇宙裡中性氫分佈的研究受限於高紅移類星體的稀有性，只探索到紅移約為 6.5 的宇宙 (Eilers et al., 2018)。若這三個候選星體為 $z>7$ 的黑洞，將有助於天文學界探索在大霹靂後十億年的再電離時期末期($7>z>6.5$)。

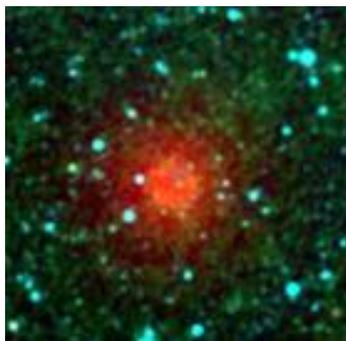


(圖十八) 超大質量黑洞光譜與宇宙中氫的分布。黃色的泡泡為已被再電離的氫，而光譜中亮度較低的地方可以對應到宇宙尚未再電離完成的時間。

S. G. Djorgovski, 2001

四、意外的發現：

在篩選候選星體時，本研究發現了一個在 WISE 四個濾鏡的合成影像中有向外擴張分布結構的星體 (圖十九)。該擴張分布結構相似於漸近巨星分支 (asymptotic giant branch, AGB) 的恆星外層會有的星周包層 (circumstellar envelope, CSE)，因此推測為漸近巨星分支的恆星。



(圖十九) 推測為漸進巨星分支恆星星體的 WISE 影像 (影像大小：600 角秒平方)。影像中有類似星周包層的結構，因此推測此星體為漸進巨星分支的恆星。

五、未來發展：

(一) HSC SSP 共有三個觀測模式，本研究使用觀測範圍較小但深度較深的 Deep layer 和 UltraDeep layer 觀測模式。另一個觀測模式——Wide layer，是相較於其他近紅外線觀測計畫 (如 UKIDSS-LAS、VIKING 和 Pan-STARRS1) 最可以

兼具探測面積範圍廣度、探測極限星等的計畫(見第參章表一)，此數據近期剛釋出，未來可使用此星表與 ALLWISE 星表疊合，尋找更多超大質量黑洞。

- (二) 未來的研究中，若使用 HSC SSP DUD layer 和 Wide layer 星表和 ALLWISE 星表疊合比對，將使用在 y 濾鏡沒有探測資料、在 W1 濾鏡有探測資料的星體進一步分析，可望可以尋找到紅移值更高的 y 漏失超大質量黑洞。
- (三) 本研究使用天文影像篩選候選黑洞時，是以人工方式篩選，標準較不固定。未來待機器視覺及機器學習技術發展成熟後，可以使用電腦程式篩選，設定更精細的篩選標準，誤差會大幅下降，也可以處理更大量的數據。
- (四) 未來亦可蒐集候選星體在更多不同濾鏡的資料，製作光譜能量分布 (spectral energy distribution, SED) 的圖表，分析該星體的特性，確認是否符合超大質量黑洞的特性。
- (五) 挑選出的候選超大質量黑洞未來可以向如昴星團望遠鏡等大型天文望遠鏡申請光譜分析，以確認篩選出的星體是否為高紅移的超大質量黑洞。

柒、結論

藉 HSC SSP Deep layer 和 UltraDeep layer 星表及 ALLWISE 星表，本研究得出以下結論：

- 一、疊合比對 HSC SSP DUD 星表及 ALLWISE 星表後，先製作 z 、 y 、W1 濾鏡偵測星體數量-星等直方圖、 $\Delta\text{DEC}-\Delta\text{RA}$ 圖、 ΔRA 和 ΔDEC 直方圖與 $y-z$ 圖、W1- y 圖，確認完整下載並疊合比對了所有在 HSC SSP DUD 與 WISE 偵測範圍交集天區的星體。
- 二、針對雙色圖較紅的一側挑選稀疏的資料點作為候選星體，可以挑選到吸收光譜中有耿恩彼得森槽的超大質量黑洞；這種黑洞存在於早期充滿中性氫的宇宙，可以用於探究再電離時期。
- 三、藉由疊合比對 HSC SSP DUD 星表及 ALLWISE 星表，本研究篩選出三個候選的 $z > 7$ 超大質量黑洞，這些星體並非被確認、分析過的已知星體。期望未來有機會可以

進一步光譜分析，確認這三個候選者的身分，以待未來研究再電離時期之用。

捌、參考資料

1. Aihara, H. et al. (2018) The Hyper Suprime-Cam SSP Survey: Overview and Survey Design. *Publ. Astron. Soc. Japan (2014) 00(0)*, 1–16. doi: 10.1093/pasj/xxx000
2. Becker, R. H. et al. (2001) Evidence for Reionization at $z \sim 6$: Detection of a Gunn-Peterson Trough in a $z=6.28$ Quasar. *Astron.J.*, 122 (2001) 2850. doi: 10.1086/324231
3. Eilers, A. et al. (2018) The Opacity of the Intergalactic Medium Measured Along Quasar Sightlines at $z \sim 6$. *The Astrophysical Journal*, 864, 1. doi: 10.3847/1538-4357/aad4fd
4. Epoch of Reionization. *MIT Haystack Observatory*. Retrieved from <https://www.haystack.mit.edu/ast/science/epoch/>
5. Inayoshi, K. et al. (2019) The Assembly of the First Massive Black Holes. *Annual Review of Astronomy and Astrophysics*. 2019. 58:1–79. doi: 10.1146/annurev-astro-120419-014455
6. Matsuoka, Y. et al. (2016) Subaru High- z Exploration of Low-Luminosity Quasars (SHELLQs). I. Discovery of 15 Quasars and Bright Galaxies at $5.7 < z < 6.9$. *The Astrophysical Journal*, 828:26 (14pp). doi:10.3847/0004-637X/828/1/26
7. Matsuoka, Y. et al. (2019) Discovery of The First Low-Luminosity Quasar at $z > 7$. *The Astrophysical Journal Letters*, 872:L2 (6pp). doi: 10.3847/2041-8213/ab0216
8. Matsuoka, Y. et al. (2019) Subaru High- z Exploration of Low-Luminosity Quasars (SHELLQs). X. Discovery of 35 Quasars and Luminous Galaxies at $5.7 \leq z \leq 7.0$. *The Astrophysical Journal*, 883:183 (15pp). doi: 10.3847/1538-4357/ab3c60
9. Toba, Y. et al. (2015) Hyper-luminous Dust Obscured Galaxies discovered by the Hyper Suprime-Cam on Subaru and WISE. *Publications of the Astronomical Society of Japan*, Volume 67, Issue 5, id.86 15 pp. doi: 10.1093/pasj/psv057
10. Wright, E. L. et al. (2010) The Wide-field Infrared Survey Explorer (WISE): Mission Description and Initial On-Orbit Performance. *The Astronomical Journal*, 140 1868. doi: 10.1088/0004-6256/140/6/1868
11. Yang, J. et al. (2018) Exploring Reionization-Era Quasars IV: Discovery of Six New $z \geq 6.5$ Quasars with DES, VHS and unWISE Photometry. doi: 10.3847/1538-3881/ab1be1

玖、附錄

一、HSC SSP Deep layer 和 UltraDeep layer 星表下載資料的標準：

```
SELECT                                AND NOT g_sdsscentroid_flag        -- LIMIT 10
                                        AND NOT r_sdsscentroid_flag        ;
object_id                              AND NOT i_sdsscentroid_flag
```

```

, ra
, dec
-- , g_cmodel_flux
-- , g_cmodel_fluxsigma
-- , r_cmodel_flux
-- , r_cmodel_fluxsigma
-- , i_cmodel_flux
-- , i_cmodel_fluxsigma
-- , z_cmodel_flux
-- , z_cmodel_fluxsigma
, y_cmodel_flux
, y_cmodel_fluxsigma
, g_psfflux_flux
, g_psfflux_fluxsigma
, r_psfflux_flux
, r_psfflux_fluxsigma
, i_psfflux_flux
, i_psfflux_fluxsigma
, z_psfflux_flux
, z_psfflux_fluxsigma
, y_psfflux_flux
, y_psfflux_fluxsigma
, i_extendedness_value
, a_g
, a_r
, a_i
, a_z
, a_y
FROM
    pdr2_dud.forced
    JOIN pdr2_dud.forced2 USING
(object_id)
WHERE
    isprimary
    AND NOT z_sdsscentroid_flag
    AND NOT y_sdsscentroid_flag
    AND NOT g_pixelflags_edge
    AND NOT r_pixelflags_edge
    AND NOT i_pixelflags_edge
    AND NOT z_pixelflags_edge
    AND NOT y_pixelflags_edge
    AND NOT g_pixelflags_interpolatedcenter
    AND NOT r_pixelflags_interpolatedcenter
    AND NOT i_pixelflags_interpolatedcenter
    AND NOT z_pixelflags_interpolatedcenter
    AND NOT y_pixelflags_interpolatedcenter
    AND NOT g_pixelflags_saturatedcenter
    AND NOT r_pixelflags_saturatedcenter
    AND NOT i_pixelflags_saturatedcenter
    AND NOT z_pixelflags_saturatedcenter
    AND NOT y_pixelflags_saturatedcenter
    AND NOT g_pixelflags_crcenter
    AND NOT r_pixelflags_crcenter
    AND NOT i_pixelflags_crcenter
    AND NOT z_pixelflags_crcenter
    AND NOT y_pixelflags_crcenter
    AND NOT g_pixelflags_bad
    AND NOT r_pixelflags_bad
    AND NOT i_pixelflags_bad
    AND NOT z_pixelflags_bad
    AND NOT y_pixelflags_bad
    AND NOT g_cmodel_flag
    AND NOT r_cmodel_flag
    AND NOT i_cmodel_flag
    AND NOT z_cmodel_flag
    AND NOT y_cmodel_flag
    AND y_psfflux_fluxsigma>3

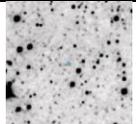
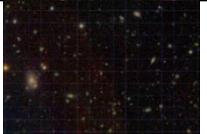
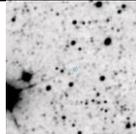
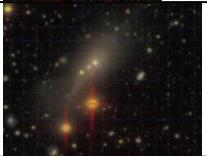
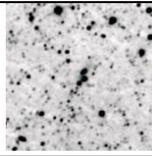
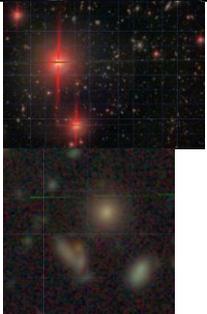
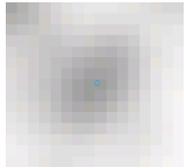
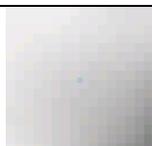
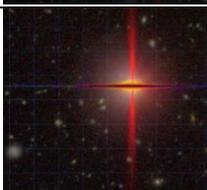
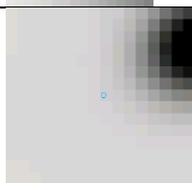
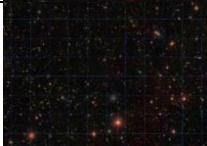
```

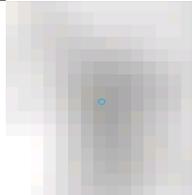
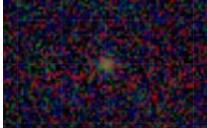
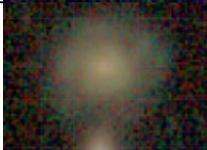
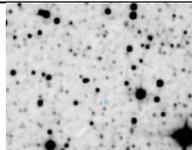
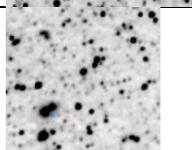
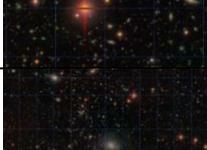
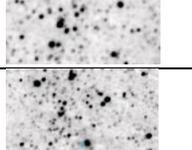
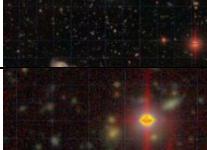
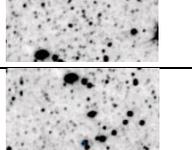
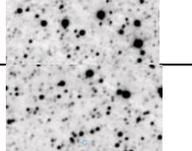
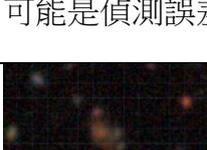
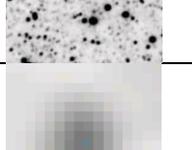
-- * Flags pixelflags_* vs. pixelflags_*center
-- "any" (without "center") flags are set when any of the pixels in the object's footprint is bad. The criteria "NOT pixelflags_*" are too strict. Since most of the object's flux comes from its center, it is usually safe to accept bad conditions in the outskirts of the object.
-- * Condition "isprimary" is true
-- - no children
-- - in the inner region of a coadd patch (detect_ispatchinner)
-- - in the inner region of a coadd tract (detect_istractinner)
-- - not "detected" in a pseudo-filter (see config.pseudoFilterList)

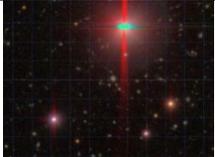
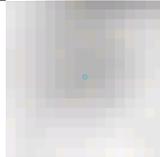
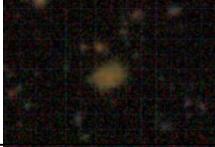
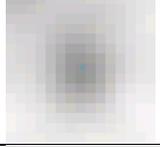
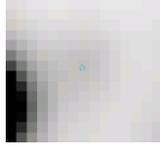
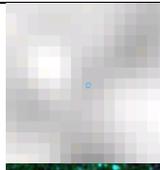
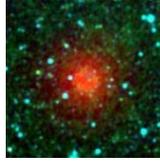
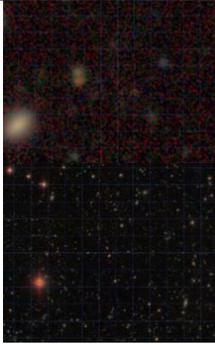
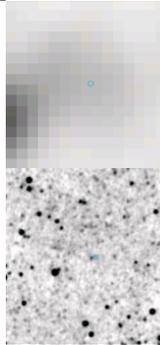
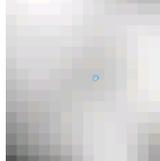
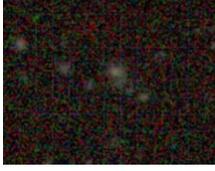
二、下表展示 46 個候選星體的天文影像，有橘色標記的三個星體為最後選出的三個候選超大質量黑洞。

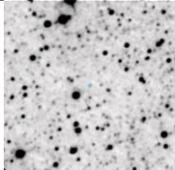
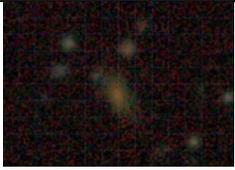
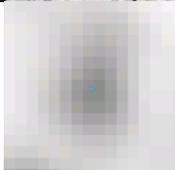
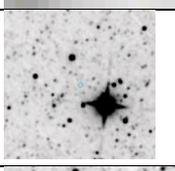
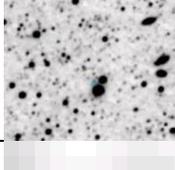
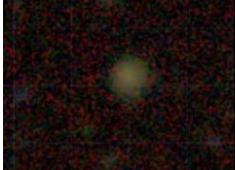
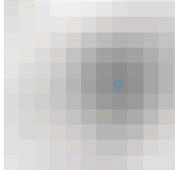
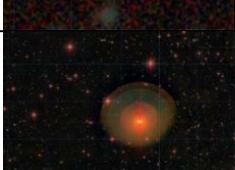
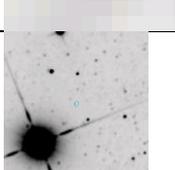
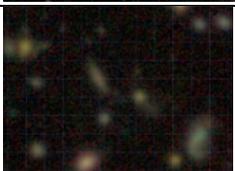
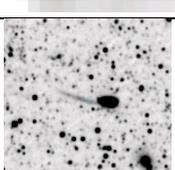
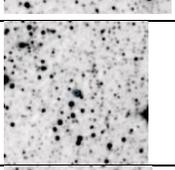
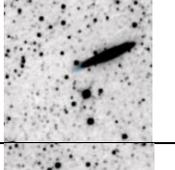
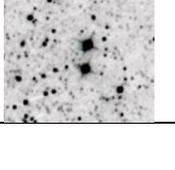
在從 hscMap 尋找候選星體的影像時，首先以 600 角秒平方的影像檢查候選星體的影像是否含有周圍過亮星體發出的光的雜訊，或候選星體是否被其他大型星體遮蓋。若無，再以 20 角秒平方的影像進一步檢查影像是否被污染。在篩選過程

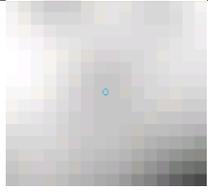
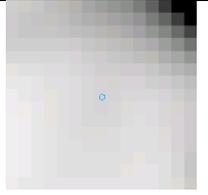
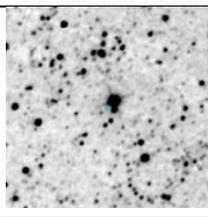
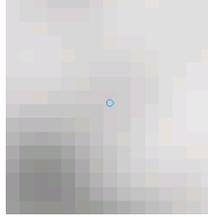
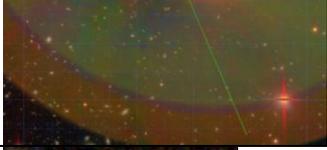
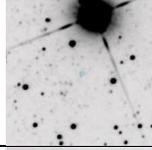
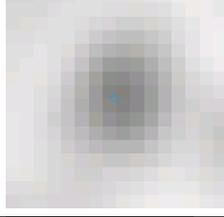
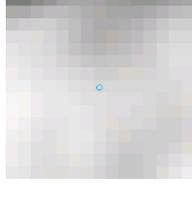
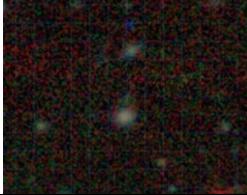
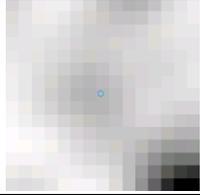
中，有一些候選星體的 600 角秒平方影像即有明顯汙染，檢視候選星體的影像時就不會再使用 20 角秒平方的影像再次檢查候選星體。因此，部分候選星體只有 600 角秒平方的影像，其他候選星體則有 600 角秒平方和 20 角秒平方的影像。

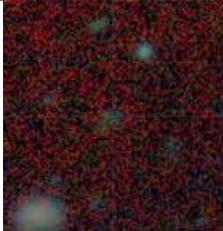
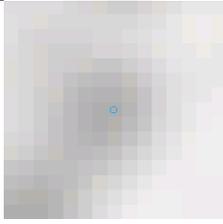
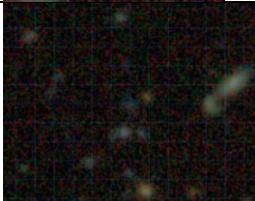
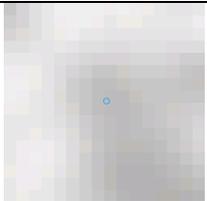
編號	RA	DEC	HSC 影像	WISE 影像 (W1)濾鏡	備註
1	148.4976	2.86877			被大型星體遮蓋
2	353.4466	-0.39066			同天區過亮的星體造成雜訊
3	351.55924	0.43503			同天區過亮的星體造成雜訊
4	34.38065	-4.94806			被大型星體遮蓋
5	151.20275	3.46971			同天區過亮的星體造成雜訊及鄰近星體汙染
6	150.13665	3.2089			被大型星體遮蓋
7	351.36735	0.29296			同天區過亮的星體造成雜訊
8	35.35979	-5.71376			同天區過亮的星體造成雜訊

						及鄰近星體汙染
9	37.49308	-4.4505				被大型星體遮蓋
10	240.03783	54.80436				被其他星體遮蓋
11	353.0753	-0.56016				被大型星體遮蓋
12	34.61259	-5.43743				
13	242.04463	56.81424				同天區過亮的星體造成雜訊
14	35.68494	-3.97451				被大型星體遮蓋
15	35.96652	-4.61811				被大型星體遮蓋
16	35.9982	-4.76486				同天區過亮的星體造成雜訊
17	241.82969	83.61683	無影像，在 hscMap 中顯示超過偵測範圍，可能是偵測誤差。			
18	34.9188	-4.7304				被鄰近星體汙染

19	151.16805	1.70872			同天區過亮的星體造成雜訊
20	351.25833	-0.94602			被大型星體遮蓋
21	245.02653	55.16463			被鄰近星體汙染
22	35.65572	-6.00159			同天區過亮的星體造成雜訊及鄰近星體汙染
23	35.30742	-4.28394		 	WISE 四個濾鏡的合成影像 (WISE 影像欄下圖) 中有向外擴張的特徵，推測為漸近巨星分支的恆星
24	36.91908	-4.46083			
25	244.05698	54.50575			同天區過亮的星體造成雜訊
26	353.03927	-1.36936			

					
27	35.82088	-3.83276			被鄰近星體汙染
28	240.60006	55.19739			同天區過亮的星體造成雜訊
29	36.99749	-3.75716			同天區過亮的星體造成雜訊
30	35.5053	-4.4873			同天區過亮的星體造成雜訊及被其他星體遮蓋
31	350.89814	-1.27328			同天區過亮的星體造成雜訊
32	149.19924	2.29038			被鄰近星體汙染
33	241.55173	55.42584			被大型星體遮蓋
34	240.75042	55.76216			被大型星體遮蓋
35	148.45434	1.56328			被大型星體遮蓋
36	151.1373	2.35727			同天區過亮的星體造成雜訊

37	242.27966	53.68955			同天區過亮的星體造成雜訊
38	352.37408	0.6317			同天區過亮的星體造成雜訊
39	245.01298	54.97453			同天區過亮的星體造成雜訊
40	149.40241	3.05427			被大型星體遮蓋
41	352.68276	0.81295			同天區過亮的星體造成雜訊
42	353.16274	-0.24613			被鄰近星體汙染
43	243.63828	55.3747			HSC 和 WISE 影像都沒有顯示任何星體，可能是因為紅移值太低，無法在中紅外線波段偵測到。
44	149.00319	2.17094			在 WISE 影像中太淡

45	36.48491	-3.73816			同天區過亮的星體造成雜訊
46	245.07351	55.12105			在 WISE 影像中太淡可能是因為紅移值太低，無法在中紅外線波段偵測到。

【評語】 051805

本作品交叉比對不同的巡天觀測數據，尋找可能的高紅移超大質量黑洞。經由色指數的考量，最後選出三個可能的高紅移超大質量黑洞，預計用於向大型天文望遠鏡申請光譜觀測時間。本作品顯示作者對相關主題有適切的了解，也展現作者對於天文數據資料的處理能力，堪稱優秀作品！

未來應設法進行後續觀測，確認這些天體的確是高紅移超大質量黑洞，並討論其於天文物理中的重要性。

摘要

高紅移超大質量黑洞的吸收光譜，可協助天文學家最有效率地探索星系間物質及其於再電離時期與光的反應。本報告交叉比對Subaru超廣角相機策略觀測計畫 (Hyper Suprime-Cam Subaru Strategic Program, HSC SSP) 和廣域紅外線巡天探測衛星 (Wide-field Infrared Survey Explorer, WISE) 的觀測數據，並根據光度測定和宇宙學紅移的原理，從雙色圖中較紅的區域挑選了46個候選星體，並選出三個可能的高紅移超大質量黑洞，可用於後續向如昴星團望遠鏡 (Subaru Telescope) 等大型天文望遠鏡申請光譜分析。

壹、研究動機

去年天文學家首次釋出黑洞的剪影，引起大眾對M87星系中心的「超大質量黑洞 (supermassive black hole)」(質量為太陽的十萬至十億倍) 的關注。查詢資料後，得知藉超大質量黑洞吸收光譜的耿恩彼得森槽和萊曼 α 森林的分界，可知道再電離時期結束的時間。本研究以宇宙學紅移原理為基礎分析天文資料，期望可以尋找到更多候選的高紅移超大質量黑洞，作為後續光譜分析的研究對象，幫助宇宙學的研究。

貳、研究目的

本研究旨在尋找y濾鏡漏失中 $z > 7$ 的超大質量黑洞，幫助未來宇宙學的研究。藉由昴星團望遠鏡的HSC SSP Deep layer 和 UltraDeep layer 星表和 WISE 計畫的 ALLWISE 星表，本研究根據光度測定和宇宙學紅移的原理尋找 z (紅移值) > 7 的超大質量黑洞，有助於天文學界了解宇宙從 $z > 7$ 到現在的演化過程。

參、研究設備及器材

- 使用軟體：Topcat、SAOImage DS9
- 星表來源：因 $z > 7$ 的超大質量黑洞的紫外線光譜已紅移到近紅外線波段 (0.8~2.5 μm)，選用以下星表：
 - 一、HSC SSP 計畫 Deep 和 UltraDeep Layer 星表
 - 二、WISE 計畫 ALLWISE 星表
- 高探測極限星等、角解析度高
- 和HSC SSP有相同探測範圍
- z 和 y 濾鏡 (波長0.8898和0.9762 μm)
- W1濾鏡 (波長3.4 μm)

肆、研究過程與方法

一、原理及名詞解釋

● 超大質量黑洞與類星體

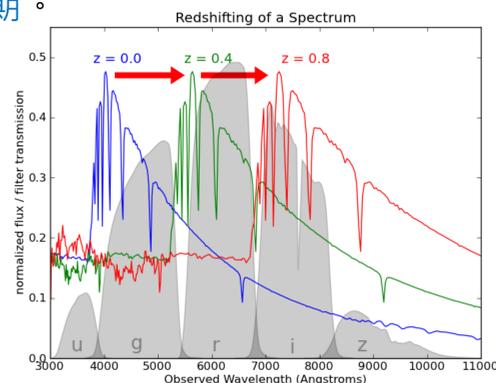
一般認為超大質量黑洞的吸積盤提供類星體發光所需能量。相較於星系，類星體比較亮，存在時間也比同紅移的伽瑪射線爆久。因此，它們的吸收光譜最適合用來探測再電離時期。

● 宇宙學紅移

隨宇宙膨脹，穿越宇宙的光波會被拉長。星體紅移前後發出光波的波長關係如下： $\lambda_{obs} = \lambda_{rest} * (1 + z)$ 。越早期宇宙星體發出的光，波長會被拉得越長，紅移值也越高，需要使用可偵測到紅移值 (z) 越大的濾鏡研究。

(圖一) 一恆星在不同紅移程度的光譜，灰色塊表不同波長濾鏡的偵測波段。紅移值越大，觀測到的光波波長越長，需使用偵測波段波長越長的濾鏡偵測，可依同理設計篩選黑洞的方法。

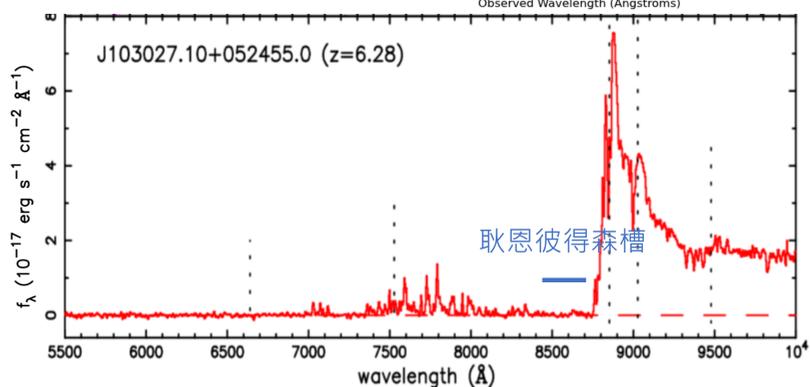
<https://ogrisel.github.io/sklearn-tutorial/tutorial/astronomy/regression.html>



● 再電離時期與超大質量黑洞光譜的關係

宇宙中 1215.67 \AA 的萊曼 α 射線會被中性氫吸收，並隨宇宙膨脹紅移在黑洞的光譜上形成萊曼 α 森林。在再電離時期初期 (中性氫含量較高)，紅移到萊曼 α 射線波長的光波大部分會被吸收，形成耿恩彼得森槽。

(圖二) 第一個被偵測到的耿恩彼得森槽。波長8450 \AA 至8710 \AA (約 $z = 5.95$ 至 6.16) 之間偵測到的光通量 (flux) 為0，為耿恩彼得森槽。Becker et al. (2001)



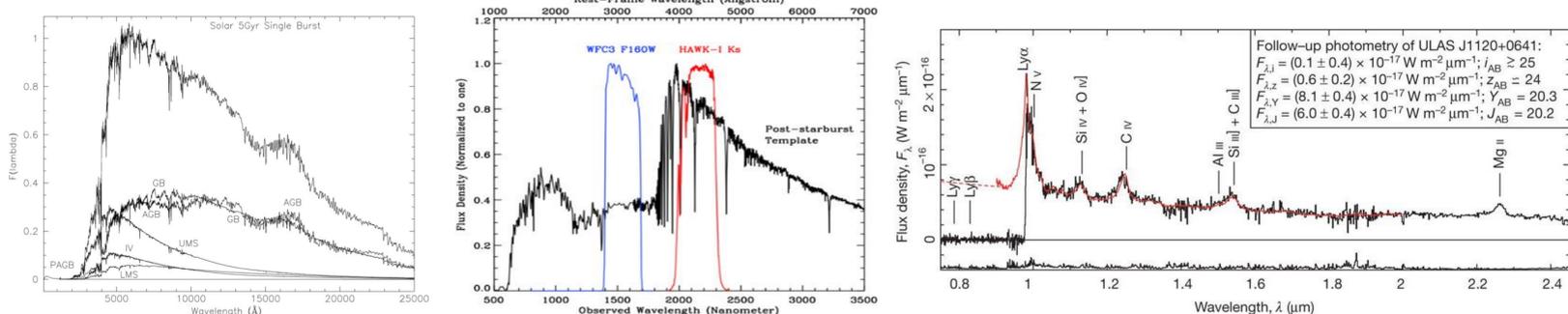
● 觀測天文學

光度測定使用一系列不同濾鏡觀測星體亮度，可以便捷、低廉、大量地取得資訊，並觀測到比光譜學更廣的波長範圍。將兩濾鏡的偵測視星等相減，可得星體的**色指數**，表示星體的「顏色」：色指數越大，星體越紅。取三濾鏡的視星等，兩兩相減，作成**雙色圖**，可知星體顏色。此外，若一個物體發射出的光波波長不在 (或幾乎不在) 一個濾鏡的偵測範圍內，或亮度低於濾鏡的偵測極限，它就是這個濾鏡的「漏失」。

角解析度表示一個望遠鏡在空間上的測量誤差。疊合星表時，根據 HSC SSP 望遠鏡的角解析度將疊合的最大誤差設定為 0.7 角秒，以確保 HSC SSP 偵測到的星體可以被確實疊合。

● 恆星、星系、超大質量黑洞光譜的比較

恆星及星系的光譜主要集中在可見光波段，因此雙色圖中密集的资料點 (y -W1值較小) 較有可能是恆星或星系。超大質量黑洞的光譜已紅移到近紅外線波段， y 濾鏡偵測到的亮度應很低， y -W1值較大。



(圖三) 由左至右分別為各種常見恆星、低紅移星系、 $z = 7.085$ 的超大質量黑洞光譜。恆星與星系的光譜主要集中在可見光波段，宇宙早期黑洞的光譜則已經紅移到近紅外線波段。Pickles et al. (2018)、Almeida et al. (2012)、Mortlock et al. (2011)

● 使用 z 、 y 、W1 濾鏡的原因

1. y 濾鏡及W1濾鏡：藉紅移值的計算公式可以得知，若超大質量黑洞的耿恩彼得森槽落於 y 濾鏡的偵測範圍，以W1濾鏡輔助可以偵測到 $z > 7.03$ 的超大質量黑洞。
2. z 濾鏡：感光度較 y 濾鏡高，可以確認星體的可見光波段亮度是否夠低 (是否可能有耿恩彼得森槽)。

肆、研究過程與方法

二、研究過程及方法

(一) 下載星表、(二) 使用Topcat疊合兩星表

(三) 繪製成功疊合資料的雙色圖

橫軸：y-W1星等、縱軸：z-y星等

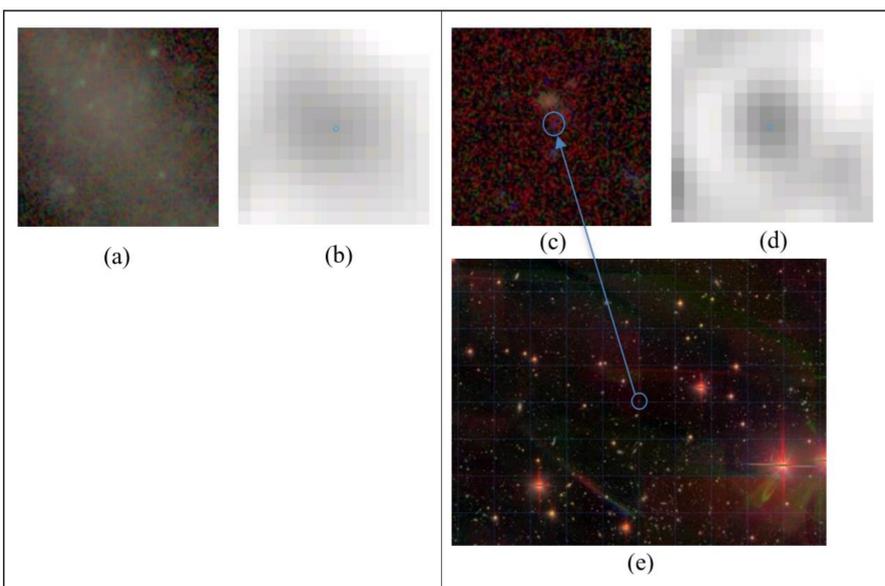
(四) 繪製圖表檢驗疊合的可信度

(五) 以 $y-W1 > 2\text{mag}$ 為標準分區挑選候選星體

分區	y-W1 (mag)	z-y (mag)
A	0.75~10	2~10
B	6~10	-2~2
C	2~10	-10~-2

(六) 比較天文影像，挑選候選超大質量黑洞

1. 輸入星體座標，在 hscMap 及 WISE Image Service 下載候選星體的天文影像。
2. 檢查候選星體是否被前景星體遮蓋 (如圖四 (a))，或周圍是否有過亮星體發射出的光形成的雜訊 (如圖四 (c))。
3. 由於黑洞光譜不斷向紅外線波段紅移，若候選星體在 HSC 影像中較黯淡、在 WISE 影像中較明顯，就可以被列為候選超大質量黑洞。



(圖四) 受污染影像舉例

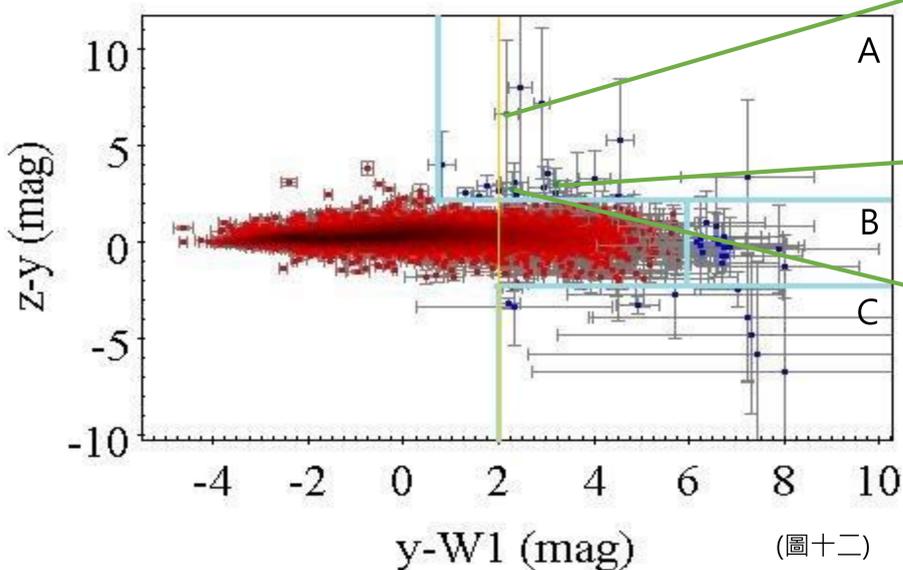
左欄為被前景星體遮住的候選星體：(a) 為 HSC 影像，其中灰白色物體即為遮蓋住候選星體的前景星體；(b) 為同一候選星體的 WISE 影像，可能照攝到前景星體或被遮蓋的候選星體。

右欄為含有過亮星體發射出的光形成的雜訊的影像：(e) 中有許多非常亮的星體，它們發出的光會在其他星體的背景中留下雜訊，例如 (c) 中的紅點 (c) 和 (e) 為同一星體的影像，唯 (c) 的大小為 20 角秒平方，(e) 為 600 角秒平方；(d) 為同一候選星體的 WISE 影像，顯示受鄰近光影響的影像應仍有候選星體。

(七) 確認候選星體不是已知星體

確認以下資料庫中是否有候選者的資料：

1. NASA/IPAC Extragalactic Database, NED
2. SIMBAD Astronomical Database - CDS (Strasbourg)

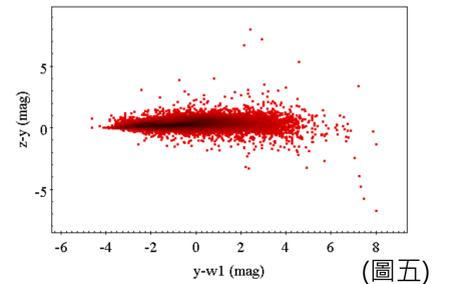


(圖十二)

伍、研究結果

一、星表疊合比對結果 (圖五)

- HSC SSP DUD 星表：1060731 筆資料
- ALLWISE 星表：6908601 筆資料
- 成功疊合：221537 筆資料



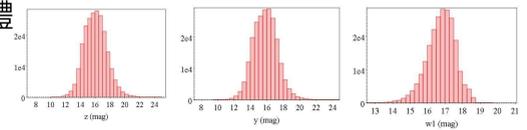
(圖五)

二、檢驗比對的可信度

1. z、y、W1 濾鏡偵測星體

數量直方圖 (圖六)：

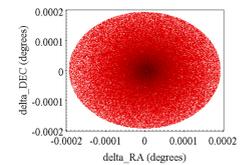
星表下載完整。



(圖六)

2. $\Delta\text{DEC}-\Delta\text{RA}$ 圖 (圖七)：

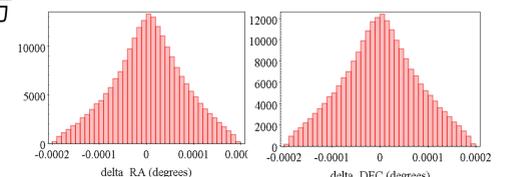
疊合時誤差很小。



(圖七)

3. ΔRA 直方圖和 ΔDEC 直方圖 (圖八)：

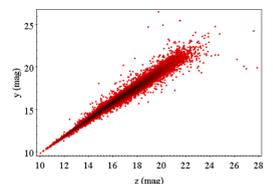
星表疊合誤差很小且誤差分布合理。



(圖八)

4. y-z 圖 (圖九)：

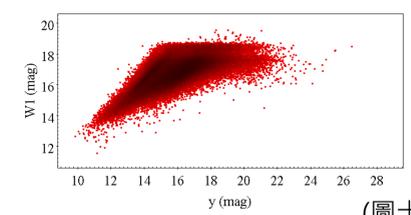
z 和 y 濾鏡的波段相差小，因此個別偵測到一星體的視星等相近，圖形成細長分布。



(圖九)

5. W1-y 圖 (圖十)：

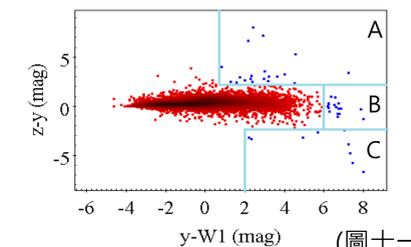
此圖表斜率較大的一側較藍，可能是恆星或低紅移星系、超大質量黑洞；斜率較小的一側較紅，且越往圖表右上方越紅，可能是黑洞。



(圖十)

三、從雙色圖挑選候選星體

由 A、B、C 三區挑選 46 個分布較稀疏的資料點為候選星體 (圖十一藍色資料點)。



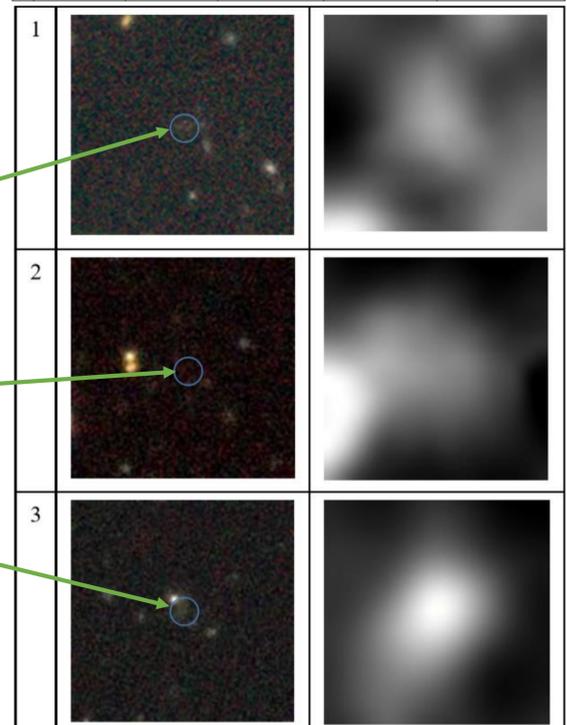
(圖十一)

四、候選星體的天文影像

由 hscMap 和 WISE Image Service 檢視天文影像，排除不良影像。最後，挑選出三個候選黑洞 (表一、圖十二綠色資料點、圖十三)。

(表一)

	z (mag)	y (mag)	W1 (mag)	z-y (mag)	y-W1 (mag)
1	26.8±3.8	20.1±0.1	17.9±0.2	6.7±3.9	2.2±3.3
2	23.4±0.8	20.5±0.2	17.3±0.1	3.0 ^{+0.9} _{-1.0}	3.2±0.3
3	22.2±0.9	19.5±0.1	17.2±0.1	2.8 ^{+0.9} _{-1.0}	2.3±0.2



(圖十三)

五、確認候選星體不是已知星體

NED 和 SIMBAD 兩資料庫皆尚未有這三個候選者的資料。

一、誤差討論

(一) 雙色圖的誤差線分析

1. A區：此區多為較低紅移的高紅移星系或類星體，因此在偵測時逼近z和y濾鏡偵測極限，誤差會較大。然而，本研究的目的即是尋找在z、y濾鏡裡低亮度的星體，無可避免使用因亮度低而誤差較大的資料。此外，這些候選者在z、y波段的實際亮度仍須透過長曝光時間的觀測來測定。
2. B區：此區的y-W1顏色越紅時，y濾鏡偵測到的亮度越低，逼近偵測極限，y-W1方向的誤差會較大。
3. C區：此區的z-y已達負值，表示y濾鏡偵測到的亮度會比z濾鏡偵測到的低。然而，y濾鏡的感光度不如z濾鏡，因此z-y方向的誤差會較大。另外，此區y-W1方向的誤差較大，原因同B區的誤差討論。

(二) 疊合誤差的影響：

相較於WISE計畫，HSC SSP計畫的角解析度較小，因此，本研究根據HSC SSP計畫的角解析度設定疊合時的最大誤差，使疊合更精準。此方法雖可能遺漏潛在的候選者，但可避免疊合時一筆WISE資料對應到多筆HSC SSP資料的情形。為解決同樣問題，Toba et al. (2015) 疊合HSC SSP Wide layer星表與ALLWISE星表以尋找塵埃遮蔽星系時，先將HSC SSP Wide layer星表與其角解析度相近且偵測波段介於HSC SSP和WISE的VIKING星表疊合，再使用介於HSC SSP計畫和WISE計畫角解析度的最大誤差疊合，增加候選星體的可信度並減少因星表角解析度相差過大遺漏的星體。本研究使用的DUD星表部分觀測範圍，並沒有和觀測波段介於HSC SSP和WISE的觀測計畫觀測範圍重疊，但未來若納入Wide layer星表研究，可如此法先將HSC SSP Wide layer星表與VIKING星表疊合，再與ALLWISE星表疊合，提高精確度。

二、與相關的類星體巡天計畫比較

(一) 暗能量巡天計畫 (The Dark Energy Survey, DES)

Yang et al. (2018) 將DES資料與WISE資料疊合，研究初期找到紅移值7.02的類星體。本次使用的HSC SSP DUD layer星表探測極限更高，可能可以偵測到更多先前研究遺漏的高紅移超大質量黑洞。未來若使用HSC SSP Wide layer星表，一個星體會同時有多個波段濾鏡的資料，篩選結果可信度也會更高。

(二) SHELLQs類星體計畫 (Subaru High-z Exploration of Low-Luminosity Quasars, SHELLQs)

Matsuoka et al. (2016, 2019) 將HSC SSP Wide layer、UKIDSS-LAS、VIKING星表疊合，尋找高紅移低亮度的類星體。相較屬近紅外線探測計畫的UKIDSS-LAS和VIKING，屬中紅外線計畫的WISE計畫偵測波長更長，未來納入HSC SSP Wide layer的星表研究，可望可以找到比SHELLQs類星體紅移更高的黑洞。此外，納入最近釋出的Wide layer星表後，因為探測的範圍增加，可能可以找到更多超大質量黑洞。

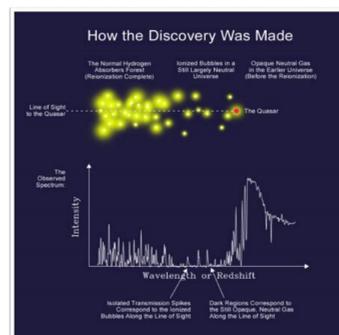
三、對天文學的幫助

找到 $z > 7$ 的超大質量黑洞，可使用它們的吸收光譜了解再電離時期的發展與宇宙中星系間介質分布。(圖十四) 超大質量黑洞光譜與宇宙中氫的分布。黃色的泡泡為已被再電離的氫，光譜低亮度的地方可對應到宇宙尚未再電離完成的時間。S. G. Djorgovski (2001)

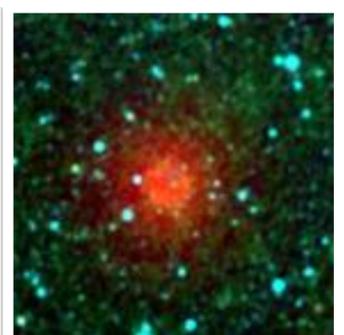
四、意外的發現

在篩選候選星體時，發現了一個在WISE影像中有向外擴張分布結構的星體，該結構相似於漸近巨星分支恆星外層的星周包層，因此推測為一漸近巨星分支的恆星。

(圖十五) 推測為漸進巨星分支恆星星體的WISE影像。



(圖十四)



(圖十五)

五、未來發展

- (一) 除此次使用的兩個觀測模式，HSC SSP的另一個觀測模式：Wide layer相較其他近紅外線觀測計畫，最可以兼具探測廣度和深度。此數據剛釋出，未來可與ALLWISE星表疊合，尋找更多超大質量黑洞。
- (二) 待機器視覺及機器學習發展成熟，未來可以使用電腦程式篩選黑洞，降低誤差並處理更大量的數據。
- (三) 蒐集候選星體在更多不同濾鏡的資料，製作光譜能量分布的圖表，確認候選星體的身分。
- (四) 挑選出的候選超大質量黑洞未來可向大型天文望遠鏡申請光譜分析，確認候選星體的身分。

柒、結論

藉HSC SSP Deep layer和UltraDeep layer星表及ALLWISE星表，本研究得出以下結論：

- 一、疊合比對HSC SSP Deep layer和UltraDeep layer星表及ALLWISE星表後，藉檢驗圖表，確認完整下載並疊合比對所有在HSC SSP Deep layer和UltraDeep layer與WISE偵測範圍交集天區的星體。
- 二、針對雙色圖較紅一側的稀疏資料點挑選出46個候選星體，可能為吸收光譜中有耿恩彼得森槽的超大質量黑洞；這種黑洞存在於早期充滿中性氫的宇宙，可以用於探究再電離時期。
- 三、藉由疊合比對HSC SSP Deep layer和UltraDeep layer星表及ALLWISE星表，本研究篩選出三個候選的 $z > 7$ 超大質量黑洞，這些星體並非被確認、分析過的已知星體。期望未來有機會可以光譜分析，確認這三個候選者的身分，以幫助再電離時期的研究。

捌、參考資料

1. Aihara, H. et al. (2018) The Hyper Suprime-Cam SSP Survey: Overview and Survey Design. *Publ. Astron. Soc. Japan* (2014) 00(0), 1–16. doi: 10.1093/pasj/xxx000
2. Becker, R. H. et al. (2001) Evidence for Reionization at $z \sim 6$: Detection of a Gunn-Peterson Trough in a $z = 6.28$ Quasar. *Astron. J.*, 122 (2001) 2850. doi: 10.1086/324231
3. Eilers, A. et al. (2018) The Opacity of the Intergalactic Medium Measured Along Quasar Sightlines at $z \sim 6$. *The Astrophysical Journal*, 864, 1. doi: 10.3847/1538-4357/aad4fd
4. Epoch of Reionization. *MIT Haystack Observatory*. Retrieved from <https://www.haystack.mit.edu/ast/science/epoch/>
5. Inayoshi, K. et al. (2019) The Assembly of the First Massive Black Holes. *Annual Review of Astronomy and Astrophysics*, 2019, 58:1–79. doi: 10.1146/annurev-astro-120419-014455
6. Matsuoka, Y. et al. (2016) Subaru High- z Exploration of Low-Luminosity Quasars (SHELLQs). I. Discovery of 15 Quasars and Bright Galaxies at $5.7 < z < 6.9$. *The Astrophysical Journal*, 828:26 (14pp). doi:10.3847/0004-637X/828/1/26
7. Matsuoka, Y. et al. (2019) Discovery of The First Low-Luminosity Quasar at $z > 7$. *The Astrophysical Journal Letters*, 872:L2 (6pp). doi: 10.3847/2041-8213/ab0216
8. Matsuoka, Y. et al. (2019) Subaru High- z Exploration of Low-Luminosity Quasars (SHELLQs). X. Discovery of 35 Quasars and Luminous Galaxies at $5.7 \leq z \leq 7.0$. *The Astrophysical Journal*, 883:183 (15pp). doi: 10.3847/1538-4357/ab3c60
9. Toba, Y. et al. (2015) Hyper-luminous Dust Obscured Galaxies discovered by the Hyper Suprime-Cam on Subaru and WISE. *Publications of the Astronomical Society of Japan*, Volume 67, Issue 5, id.86 15 pp. doi: 10.1093/pasj/psv057
10. Wright, E. L. et al. (2010) The Wide-field Infrared Survey Explorer (WISE): Mission Description and Initial On-Orbit Performance. *The Astronomical Journal*, 140 1868. doi: 10.1088/0004-6256/140/6/1868
11. Yang, J. et al. (2018) Exploring Reionization-Era Quasars IV: Discovery of Six New $z \geq 6.5$ Quasars with DES, VHS and unWISE Photometry. doi: 10.3847/1538-3881/ab1be1