



ASIAA Science Highlight

Subaru 超廣角相機宇宙普查第一年：更精確宇宙學約束值出爐

(發表日期：2018 年 9 月 26 日 台北時間上午 10 點)

中研院天文所參與研發建造的 Subaru 望遠鏡新一代超廣角相機(Hyper Suprime-Cam: HSC)今天發表宇宙巡天計劃重大成果：針對宇宙中物質的分佈，HSC 計畫已製作分析完成一張超廣角且超深空的三維圖像。本計畫團隊成員由日本、臺灣和普林斯頓大學的科學家組成。臺灣團隊包含中研院天文所謝寶慶博士、王祥宇研究員及其實驗室團隊。王祥宇研究員表示：「經過十年的持續努力，包含六年的儀器研發與四年的觀測與資料分析，HSC 終於達成原本預期的第一個重要成果，我們很高興台灣的研究團隊能在這計畫中做出貢獻。」謝寶慶博士表示：「我很高興能在此計畫中，利用機器學習得到精確的星系紅移分佈，提供弱重力透鏡分析使用。」HSC 團隊利用約一千萬個星系影像中的重力扭曲，精確測量宇宙中物質分佈的結塊性(lumpiness)，並且將 HSC 測量結果與歐洲航空局普朗克衛星對宇宙微波背景以及其他宇宙學實驗觀測結合，得以更進一步限制『暗能量』的物理性質。科學家相信，宇宙能量的密度是受此「暗能量」左右。

雖然暗物質不能被直接觀測到，但根據愛因斯坦廣義相對論預測，其重力效應可導致遙遠星系的形狀在光線穿梭宇宙過程中產生拉長或壓縮的現象。利用 Subaru 望遠鏡觀測，科學家可以直擊宇宙結構之演化(如圖一，左)。將這些資料善加運用，可望解答暗能量的奧秘。暗能量模型中最簡單的一種，是由愛因斯坦提出的「宇宙常數」。該暗能量模型可解釋目前現有的天文觀測結果，包括 HSC 團隊這次所發表的結果。

宇宙中因暗物質分佈造成的重力透鏡效應相當微弱，不過在 HSC 獲取的星系影像中，仍產生微小但可測量的形變。圖一這張貌似印象派「點畫」作品的圖像，包含宇宙特定距離範圍內多達數百萬個星系的形變圖像，也藉此描繪出宇宙中物質分佈的三維圖(參考圖一右與動畫一)。HSC 研究團隊已精確描繪暗物質分佈的「漲落」(fluctuation)或「結塊」(lumpiness)程度，並數十億年間這種結塊程度上的變化如何(若比擬於人類年歲，數十億年之於宇宙約相當於人從「青少年」到「中年」)。同時，這個結塊程度也是用來描述宇宙如何從最初大霹靂後的「平滑」分布，漸漸演化到今日宇宙中我們能觀測到的星系、恆星、行星等結構的關鍵參數。

使用精確度極高的 HSC 資料，本團隊對宇宙結塊性的量測誤差可以降低到 3.6% (參圖二)，這個準確度和其他重力透鏡調查的準確度很類似。這些重力透鏡調查，包括在

智利維克多布蘭科望遠鏡的「暗能量巡天普查」(Dark Energy Survey, 簡稱 DES), 其觀測對象是距離相對較近且較為明亮的星系。因此, 當觀測目標較遠較暗的 HSC 結果與該類調查結果趨於一致, 代表的意義是, 在宇宙不同時期(或「距離」)的結果彼此一致。這強化了 HSC 觀測結果的可信度。

HSC 測量結果提出的宇宙模型, 與普朗克衛星觀測所預期的宇宙早期漲落相比, 也是相當一致(見圖三)。我們現今宇宙的組成大部分是暗物質與暗能量, 而暗能量的性質則如同愛因斯坦所提出的宇宙常數(圖四)。

然而, 綜合了幾個弱透鏡巡天普查的結果, 得到的「結塊度」數值(即"S8", 見註)都比普朗克衛星所預測的略小(見圖五)。這有可能是因有限的觀測資料導致的統計值波動, 或者也可能暗示著以廣義相對論和宇宙常數為基礎的宇宙標準模型失效。

HSC 團隊使用位在海拔 4,200 公尺高的夏威夷毛納基峰上的日本國立天文臺 Subaru 望遠鏡進行 HSC 巡天觀測。毛納基峰以極佳的觀測條件而聞名於世。Subaru 望遠鏡不僅擁有口徑 8.2 米的大主鏡, 以及可涵蓋相當 9 個滿月面積的廣角相機, 且成像品質極高, 能獲得個別星系的銳利影像。種種條件使 Subaru 望遠鏡非常適合進行廣角且深空的影像巡天普查。目前這項計畫已使用 90 個夜晚的望遠鏡時間, 觀測 140 平方度的天空範圍(相當於 3000 個滿月面積)。

完成這項研究需要精確測量星系形狀。由於弱透鏡效應很小, HSC 團隊的挑戰之一是必須要控制會影響到星系形狀測量的各種問題, 例如由於大氣擾動和儀器本身造成的影像扭曲等。對此, HSC 團隊使用哈伯太空望遠鏡的影像對 HSC 觀測結果進行詳細的影像模擬, 克服此部分的問題。

在對於像弱重力透鏡等非常小的效應做精確測量時, 人們傾向認為當自己的結果和先前已知結果相符時, 就停止複雜的資料分析。為了排除這種「確認偏差」, HSC 團隊採用所謂的「盲分析」方法。為時一年多的期間中, 該團隊完全不知道他們分析得到的宇宙參數數值, 也不和其他觀測結果相比對, 只是對自己的觀測資料進行大量測試, 直到對自己的分析結果完全滿意為止, 才讓團隊成員探討所得的結果在宇宙學上之含義。目前 HSC 普查仍持續進行, 這次的最新結果只來自整個巡天計畫的前 1/10 的資料。當所有觀測完成時, 本計畫將能獲得對宇宙學參數更為準確的估計值, 那將意味著我們對宇宙有更深入的认识, 也進一步檢驗我們對暗物質和暗能量的了解。

研究論文已送交日本天文學會期刊(Publications of the Astronomical Society of Japan), 由學界同儕審閱。篇名: "Cosmology from cosmic shear power spectra with Subaru Hyper Suprime-Cam first-year data", 連結: <https://arxiv.org/pdf/1809.09148v1.pdf>.

註：**S8**，是宇宙參數，用來表示宇宙結構形成進程的物理量。例如，在**"S8"**較大的宇宙中，宇宙的結構進一步發展，意味著有更多星系。

相關詞彙參考解釋：

暗物質

一般認為宇宙中超過 **80%** 的物質是暗物質，是一種非由原子組成，狀態仍然神秘的物質。據信，暗物質可說是孕造宇宙天體之母：宇宙中的結構，如恆星，星系和星系團等，是暗物質建造而成。而像本次 **HSC** 這樣的弱重力透鏡測量，能揭露暗物質分佈，由此也能推導出究竟有多少結構受到建造。

弱重力透鏡效應

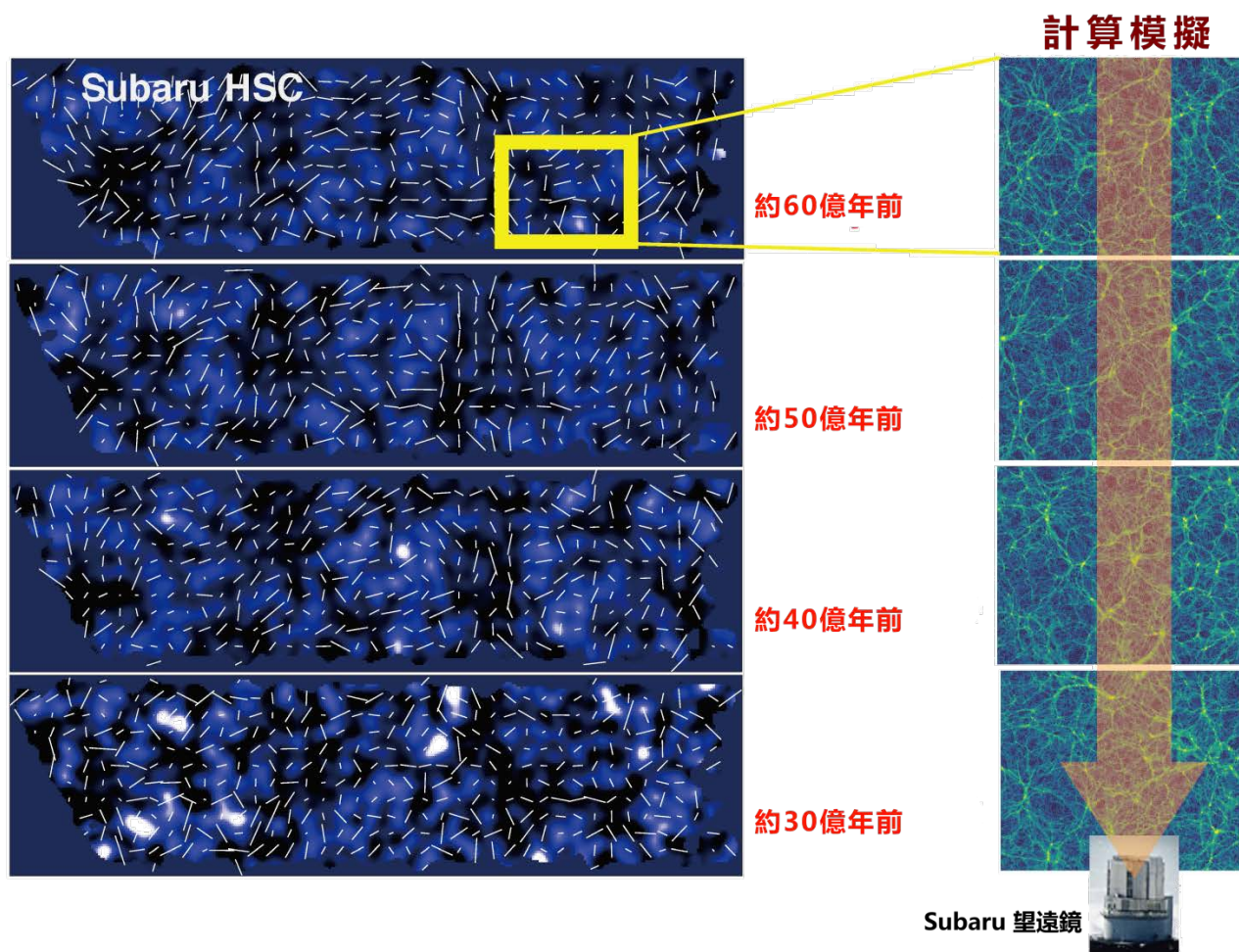
重力透鏡是暗物質引起的效應，由於暗物質的重力是拉力，那會使光線彎曲。因此，星系和星系團就像放大鏡，使遠處星系的圖像拉長和彎曲，這是一種稱為切變的效應。在 **HSC** 調查的絕大部分領域，透鏡效應很弱，那意味著切變僅只令星系形狀發生 **1%** 的變形。

暗能量

重力只內拉，不外推。在大霹靂使得一切向外瀰散之後，按預期，重力會制止星系運動，減緩宇宙的膨脹。然而，天文學家在 **1998** 年卻發現宇宙膨脹速度越來越快，從那開始，這種推動了宇宙擴張的神秘力量，就被我們稱之為暗能量。而如果暗能量獲得動力，擴張速度最終會成為無限快，使得宇宙結束於「大撕裂」。因此許多人認為宇宙終極命運是由暗能量掌握。

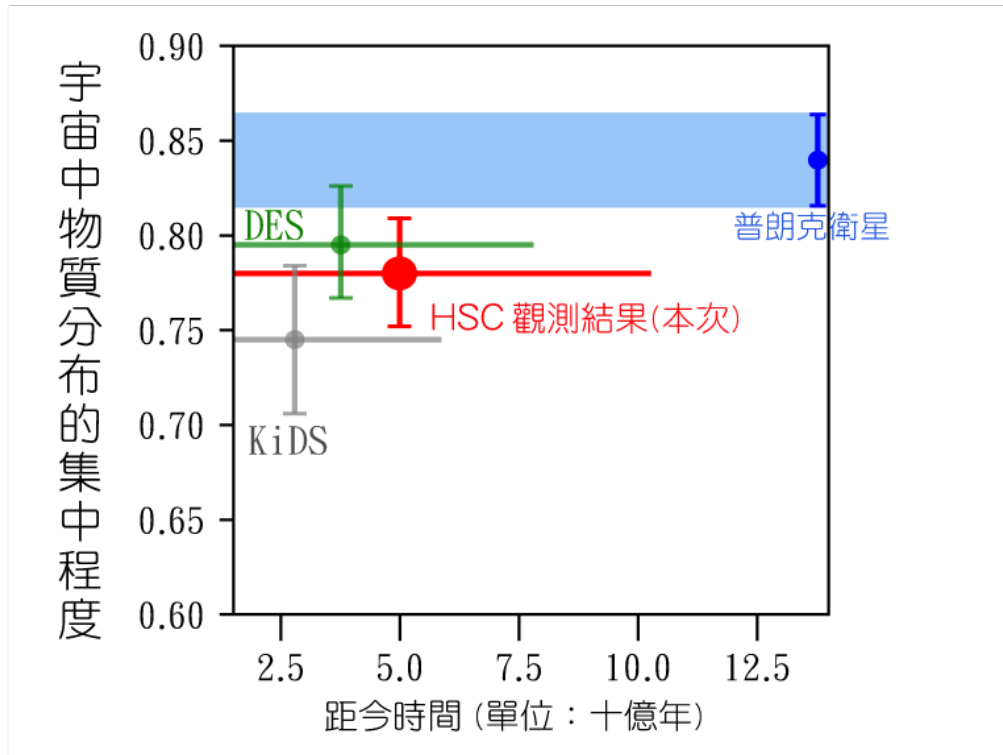
宇宙結構

COBE，**WMAP** 和普朗克衛星，一直在尋找「宇宙微波背景」這種宇宙中最早的光，這種光來自宇宙歷史大約只有 **38** 萬年的時後，當時溫度達攝氏 **3000** 度。這些研究的結果顯示當時的宇宙非常單調無聊，只有暗物質密度在大約十萬分之一的程度上有些微小變化。一般認為，暗物質的重力會將更多的暗物質拉入物質略微密集的区域，使密度更高，重力更大，然後又拉來更多暗物質.....依此演變；這就是恆星、星系、星系團等宇宙結構形成的方式。另一方面，暗能量加速膨脹，這會向外拉開結構，把暗物質內拉之力抵銷掉。因此，宇宙結構的增長取決於暗物質和暗能量間的競爭。宇宙結構的精確測量能為我們揭示這種作用，得知受暗物質建造的結構究竟有多少，被暗能量扯開的是有多少。

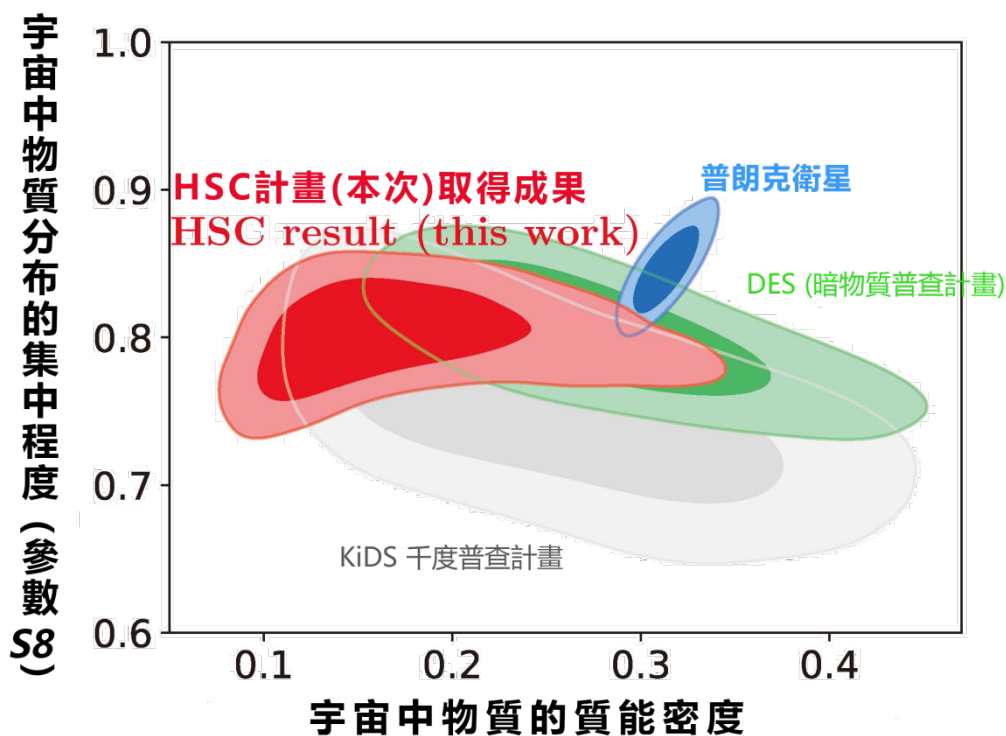


圖一，圖左來自 HSC 六個觀測區之一，是經推算而得的「宇宙暗物質三維分布圖」。藍色的明亮度有差異，較亮的部分顯示暗物質較多。白線則顯示 HSC 資料中星系形狀的扭曲程度，白線長度代表形變的「量」，線條角度則對應形變「方向」。圖右表示的是，星系的光穿梭宇宙中，途中在不同的時間受宇宙間不同質量分布的偏折，最後抵達 Subaru 望遠鏡並被測量。右上到下分別表示距今 60 億、50 億、40 億、30 億年的宇宙不同時期。

圖像版權：HSC 計畫/東京大學

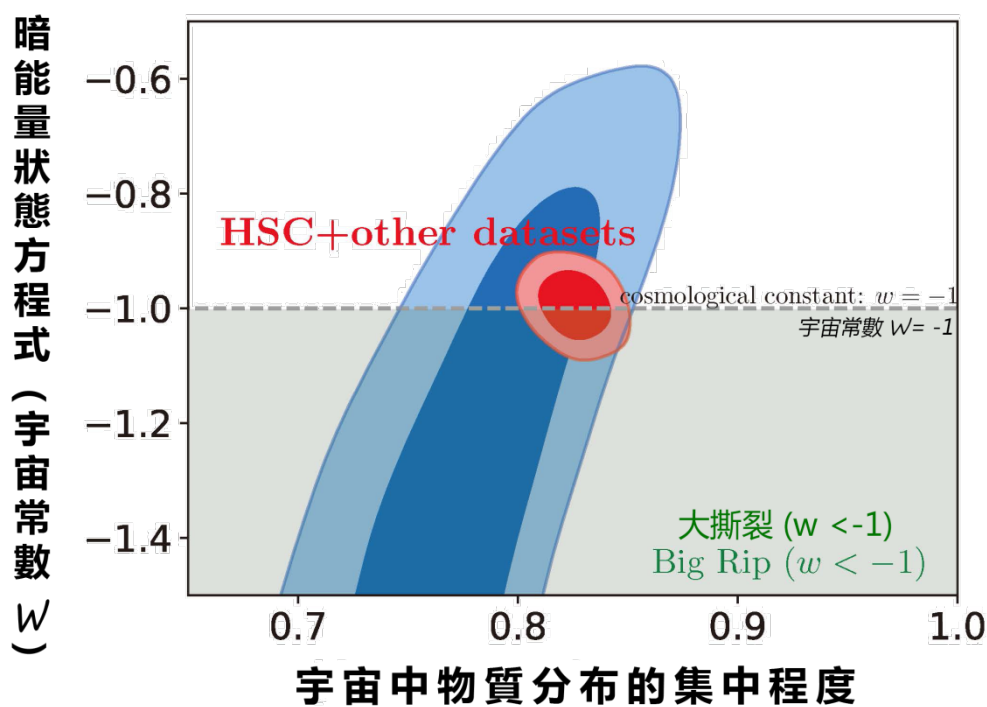


圖二：利用觀測到在宇宙不同時間的結果所推測的今日宇宙的團塊程度(宇宙學常數 S_8 , 註)推測範圍。HSC 測量結果在幾種運用弱重力透鏡方式的測量調查中，測量的距離是最遠的，圖中以紅色顯示。同時顯示普朗克觀測非常早期的宇宙微波背景，以及其他如 KiDS 和 DES 等在鄰近宇宙觀測得到的結果，與 HSC 結果作一對照。



圖像版權: HSC計畫

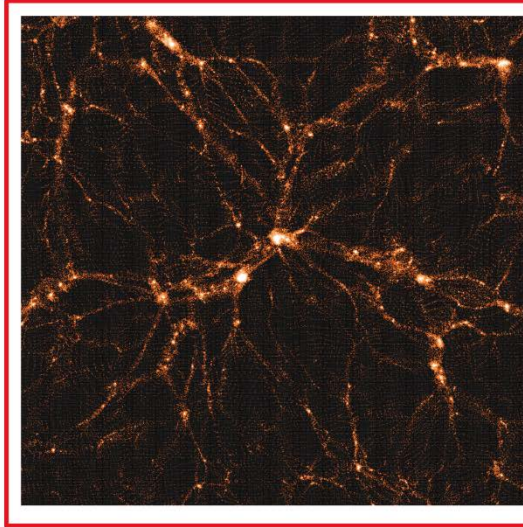
圖三：宇宙中物質與能量比例（除了物質以外其餘部分則是暗能量）和現今宇宙中物質分佈的結塊率（“S8”該值是經由對暗物質三維圖推斷分析而得）的可能常數範圍。HSC 利用弱重力透鏡觀測遙遠宇宙的結塊率的結果與其他類似觀測法（DES 和 KiDS）的結果一致。普朗克衛星獲得的宇宙微波背景觀測結果顯示為藍色。



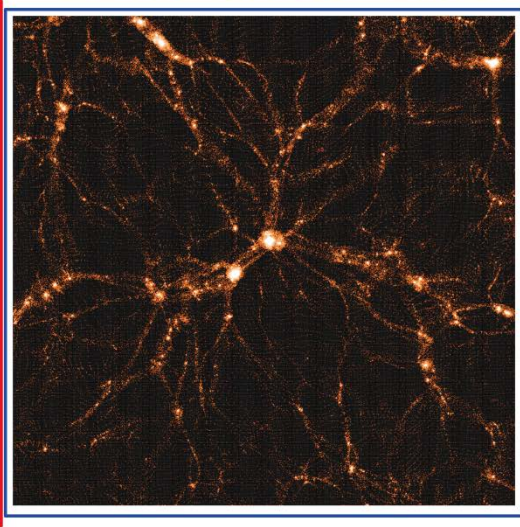
圖像版權: HSC計畫

圖四：暗能量狀態方程式的宇宙學常數可能範圍。藍色等高線是只有 HSC 取得的資料，紅色等高線則是將 HSC、普朗克衛星和當代其他宇宙測量如超新星和重子聲波振盪等方法結合後取得的約束值。

HSC 支持的宇宙模型



「普朗克」支持的宇宙模型



圖五：左圖是 HSC 等弱透鏡效應測量比較偏好的宇宙學模型，和右圖普朗克預測的相比，平滑度較高，「結塊度」較低。這兩張圖顯示了從大型電腦模擬運算中取得的細微但可辨識的差異。究竟這種差別僅只是統計波動嗎？有待世界各地天文學家收集更多資料來回答這個問題