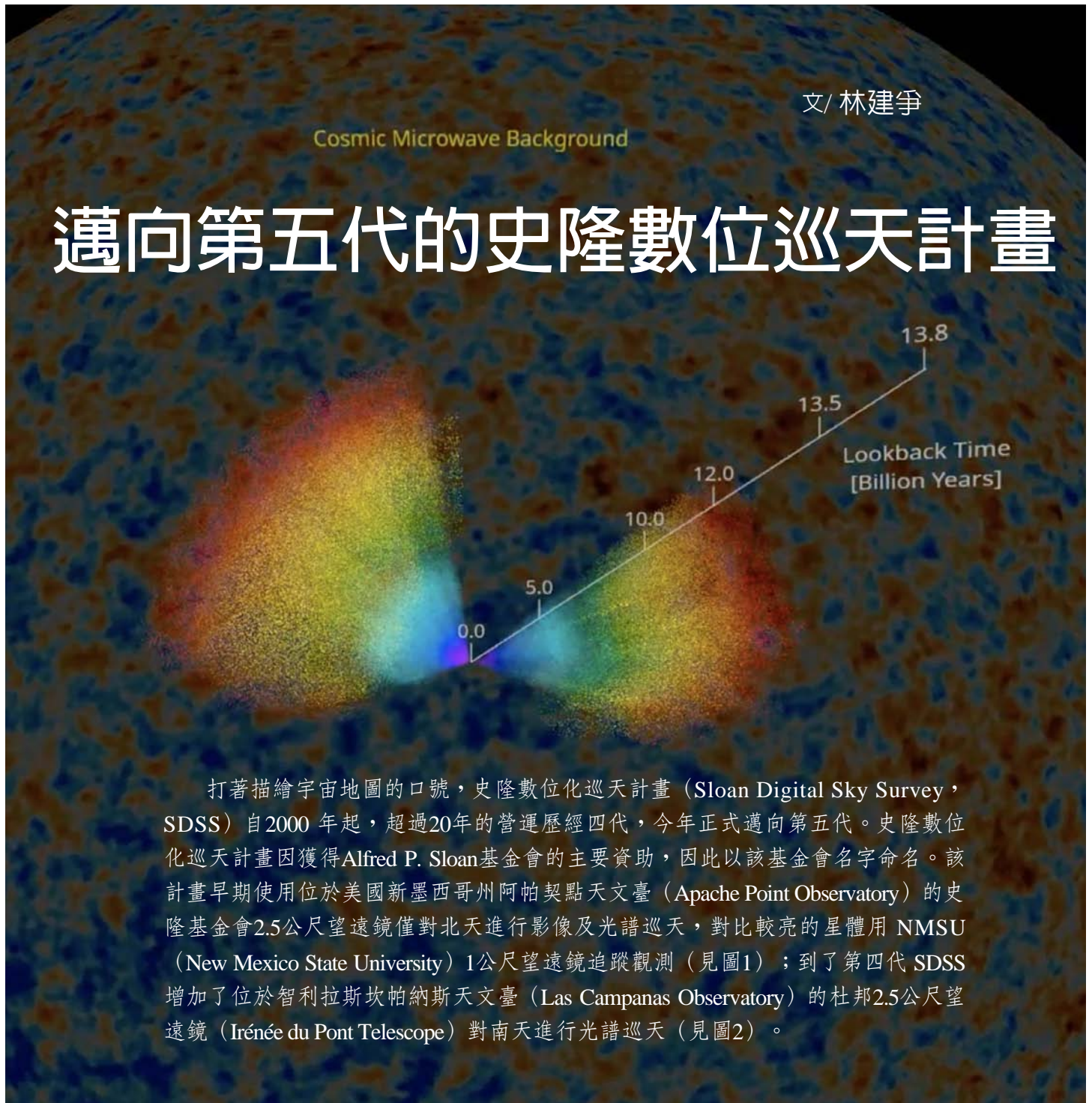


文/ 林建爭

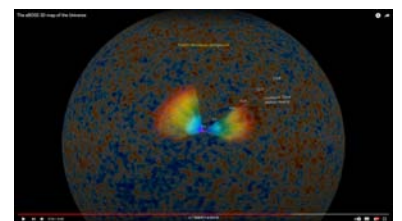
Cosmic Microwave Background

邁向第五代的史隆數位巡天計畫



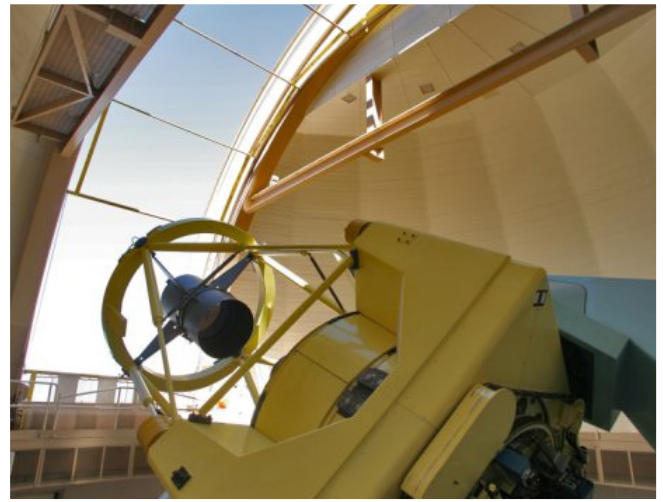
打著描繪宇宙地圖的口號，史隆數位化巡天計畫（Sloan Digital Sky Survey，SDSS）自2000年起，超過20年的營運歷經四代，今年正式邁向第五代。史隆數位化巡天計畫因獲得Alfred P. Sloan基金會的主要資助，因此以該基金會名字命名。該計畫早期使用位於美國新墨西哥州阿帕契點天文臺（Apache Point Observatory）的史隆基金會2.5公尺望遠鏡僅對北天進行影像及光譜巡天，對比較亮的星體用NMSU（New Mexico State University）1公尺望遠鏡追蹤觀測（見圖1）；到了第四代SDSS增加了位於智利拉斯坎帕納斯天文臺（Las Campanas Observatory）的杜邦2.5公尺望遠鏡（Irenée du Pont Telescope）對南天進行光譜巡天（見圖2）。

早期SDSS的影像巡天觀測使用五個濾鏡（u, g, r, i, z）從1998年9月19日拍攝了它的第一幅影像至2009年11月18日為止，主要覆蓋了北天約14,055平方度的天區（註：全天約41,252平方度）；2009年後SDSS完全以光譜模式進行巡天，而第五代主要使用兩種光譜儀，可見光光譜儀（BOSS spectrographs）及近紅外線光譜儀（APOGEE spectrographs）。其中可見光光譜儀解析度R約2,000，表示能在可見光波長6000埃處區分出波長3埃的差異，目前該儀器已經觀測約超過四百多萬個光譜，包括銀河系外和銀河系內星體的光譜；而近紅外線光譜儀是高解析度的光譜儀R約22,500，也就是該儀器能在近紅外波段約16,500埃處區分出波長0.73



The eBOSS 3D map of the Universe
<https://www.youtube.com/watch?v=KJJXbcf8kxA&t=106s>

↓圖1. 美國新墨西哥州阿帕契點天文臺，中間前方是 NMSU 1公尺望遠鏡圓頂，右後方是史隆基金會2.5公尺望遠鏡，在滿月時用近紅外光譜儀（APOGEE）觀測銀河中心部分的星體，遠方地平面的光害來自美國德州艾爾帕索市（El Paso）。圖片來源：S. R. Majewski/SDSS



↑圖2. 智利拉斯坎帕納斯天文臺，杜邦2.5公尺望遠鏡。圖片來源：SDSS

埃的差異，目前該儀器已經觀測了銀河系內約50萬顆恆星。

為什麼光譜觀測對天文學家這麼重要？英語有句諺語說一張圖勝過千言萬語，不過對天文學家來說一條光譜勝過千百張圖，例如星系的光譜可以告訴我們許多資訊，比如它有多遠，它的恆星形成多久，甚至這些恆星如何圍繞星系中心的超大質量黑洞。被黑洞吸入的氣體光譜可以用來估算黑洞有多大以及黑洞的增長速度有多快。如果是單顆恆星，一條光譜可以告訴我們它的溫度、構成它的化學元素豐度以及它朝向或遠離地球移動的速度，如果對同一顆恆星在不同時間觀測多次光譜，我們甚至可以用來檢測該星是否有行星或低質量伴星的存在。

幾個世紀以來，天文學家一



圖3. 觀測人員正在把光纖插入已經鑽好洞的鋁片，上面是光譜儀，待光纖安裝完畢，會將整個儀器倒置並安裝在望遠鏡焦平面的底部。圖片來源：SDSS

直在研究不同星體的光譜，但過去天文學家每一次的觀測只能將一個恆星或星系的光引導到光譜儀中，因此光譜觀測通常是一件曠時費力的過程。隨著天文學家研究的天區越來越大，想要收集越來越多的恆星及星系光譜，用傳統方法來觀測星體似乎變得不切實際。因此在1990年代末，當時SDSS的天文學家和工程師們

嘗試在鋁板上一次鑽數百個孔，每個孔的位置與特定天區的恆星或星系對齊；當該鋁板安裝在望遠鏡後，觀測人員再將一根一根的光纖，手動小心地插入每個孔上（見圖3），將來自恆星或星系的光傳送到光譜儀中。這樣的方式能夠同時收集數百條光譜，大大提高了觀測星體的速度。SDSS第四代計畫主持人Mike

Blanton進一步解釋：『事實上，我們在2000年初觀測的資料量幾乎和之前所做過的觀測資料一樣多，而這只是前一、兩個月的觀測資料而已！』

從SDSS計畫開始執行以來，已經由美國華盛頓大學（University of Washington）機械工程所製作出超過12,000片鋁板並鑽孔，接著由美國墨西哥州或智利天文臺人員手動插上光譜，然後再進行觀測。這些鋁板的總重量約12噸重（約十臺小客車）；對於天文學家來說，大約跟白矮星上葡萄差不多大小的物體一樣重（註：白矮星平均密度每立方公分約一噸重），這些鋁板甚至可以回收製出四百多萬個鋁罐。這些鋁板的外觀跟孔洞設計隨著計畫、光譜儀或是望遠鏡的不同而有所改變（見圖四），

這些鋁板有的有一千多個孔觀測恆星或星系，有的有幾十條光纖捆在一起同時觀測同一星系的孔。直至今日，已經鑽了超過五百多萬個孔，如果你一秒數一個孔，差不多要連續數兩個月才數得完。

那我們從穿過這些洞的星光學到了些什麼？截至目前，SDSS已經收集超過四百多萬個星系、類星體及恆星光譜，而天文學家分析這些光譜來測量宇宙的年齡、估算宇宙有多少暗物質、解釋宇宙如何加速膨脹，以及數十億個星系如何隨著時間形成和演化。隨著SDSS觀測更多銀河系內的恆星，我們越來越能夠了解銀河系裡恆星的誕生、演化及老死的故事。

SDSS不僅限天文學家使用，

一般人有興趣的話隨時隨地都可以到SDSS官方網站下載使用，使用SDSS資料的人來自世界各地，有時候不同領域的人也會想出當初設計觀測時沒有想到的資料分析方法。此外，SDSS也在教育方面做出不少貢獻，SDSS的教育計畫把觀測過的鋁板捐給世界各地的學校、博物館或是其他教育機構，此計畫也有教學材料，幫助各單位的教育工作者們如何認識他們手上的鋁板，並納入教學課程以教授更多天文物理的觀念。SDSS甚至也激起了藝術家們的創意（見圖5）。

西元2000年SDSS在光譜觀測上突破了限制，開啓了多目標光譜觀測的大航海時代，表一列出目前或未來規劃的光譜巡天計畫，其中中國的LAMOST巡天計畫利用機器手臂定位光纖，讓多

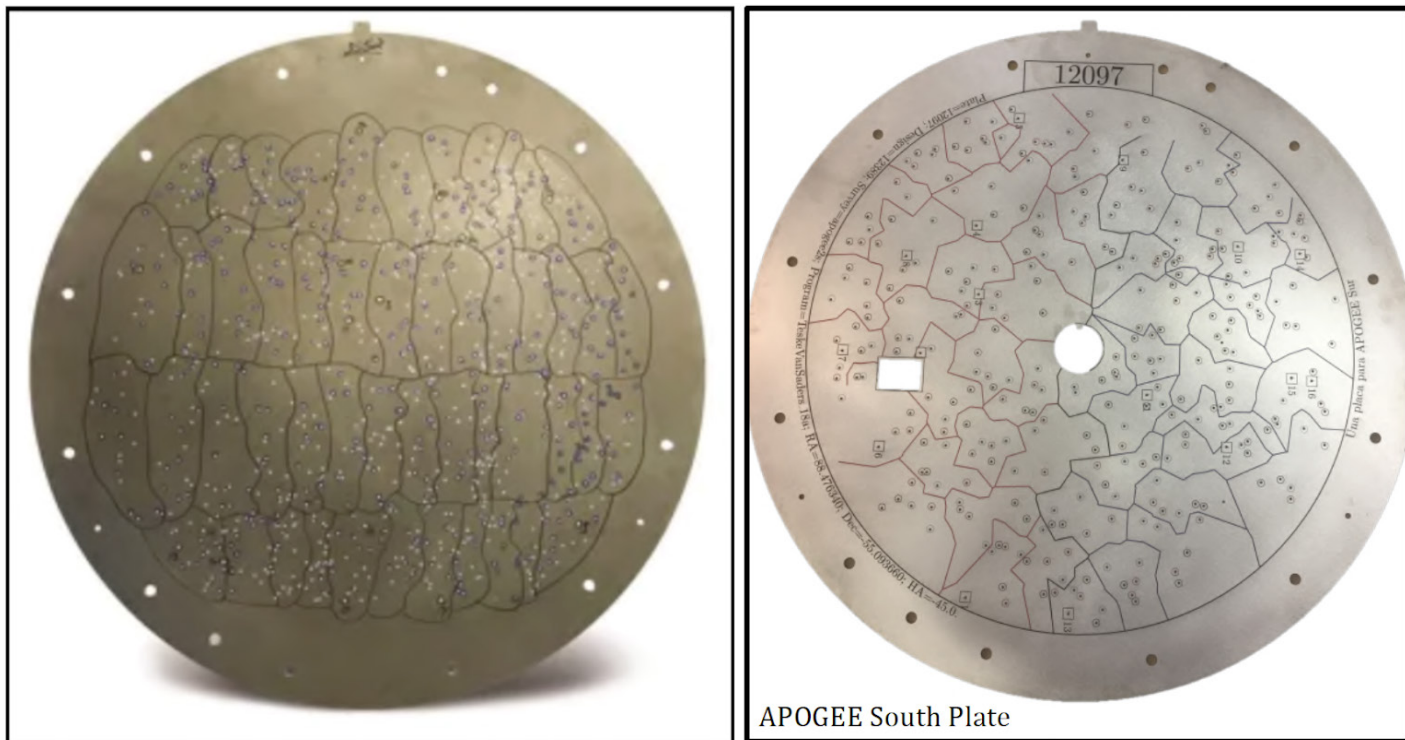


圖4. 左圖鋁板是設計給可見光光譜儀（BOSS spectrographs）專門觀測星系及測其紅移大小，用以研究星系的形成與演化及宇宙膨脹的歷史；右圖鋁板是設計給近紅外線光譜儀（APOGEE spectrographs）專門觀測恆星及測量其化學豐度、徑向速度，用以研究恆星的形成與演化以及在銀河系中的運動軌跡。圖片來源：SDSS。

目標光譜巡天的效率有效提升好幾倍。SDSS也即將進入機器手臂自動定位光纖的時代，自動化的改變讓SDSS在短時間內能最有效率地觀測更多的星體。SDSS第五代計畫主持人Juna Kollmeier認為：『藉由SDSS第五代儀器及其機器手臂的結合，我們將能夠更及時或重複地用光譜儀觀測整個天空，並將這些資料提供給全世界。未來累積更多不同時間的資料後，我們或許能製作出宇宙變化的電影。』

參考資料：

<https://www.sdss.org/>
<https://www.sdss.org/press-releases/serving-up-the-universe-on-a-plate/>
<https://www.sciencemag.org/news/2021/02/robots-are-speeding-most-boring-job-astronomy>

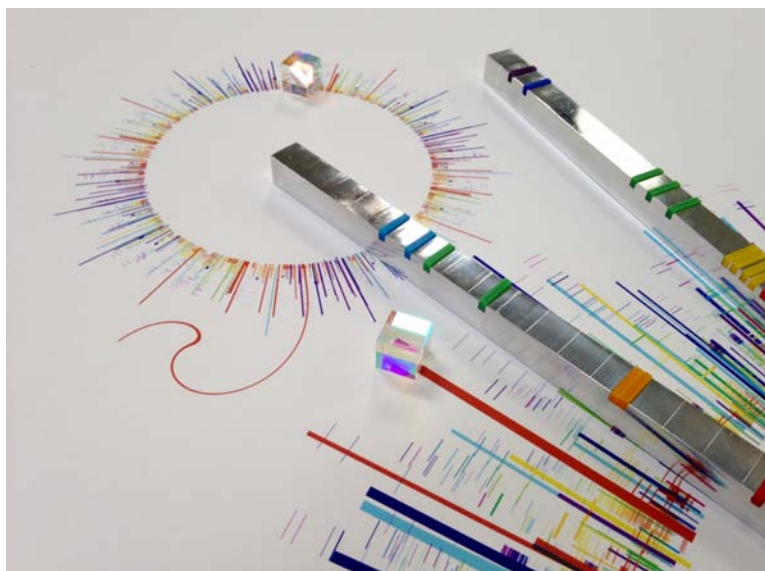


圖5. 藝術家展示 SDSS 的光譜意象圖。
 圖片來源：Tim Fitzpatrick/SDSS

林建爭：美國夏威夷大學天文研究所、泛星計畫博士後研究員

王品方校稿：美國夏威夷專案文物修復師

| 儀器 | 地點 | 望遠鏡口徑 | 光纖數目 | 觀測起始年份 |
|-------------|------------|----------|------|--------|
| LAMOST | 中國 | 4.9 公尺 | 4000 | 2008 |
| DESI | 美國亞利桑那州 | 4.0 公尺 | 5000 | 2019 |
| SDSS-V | 美國新墨西哥州、智利 | 2.5 公尺 | 1600 | 2021 |
| WHT/WEAVE | 西班牙 | 4.2 公尺 | 1000 | 2021 |
| Subaru/PFS | 美國夏威夷州 | 8.2 公尺 | 2400 | 2021 |
| VISTA/4MOST | 智利 | 4.1 公尺 | 2400 | 2023 |
| VLT/MOONS | 智利 | 8.2 公尺 | 1000 | 2023 |
| MSE | 美國夏威夷州 | 11.25 公尺 | 4000 | 2027 |

表一：目前或未來規劃的光譜巡天計畫。

YouTube相關影片：



SDSS 製作鋁板及鑽孔過程
<https://www.youtube.com/watch?v=iYyO7pGaJNw>



SDSS 觀測人員手動插光纖縮時
<https://www.youtube.com/watch?v=i6ZOUNDWRwtg>



SDSS 巡天介紹
<https://www.youtube.com/watch?v=n7vzVcKEqIU>