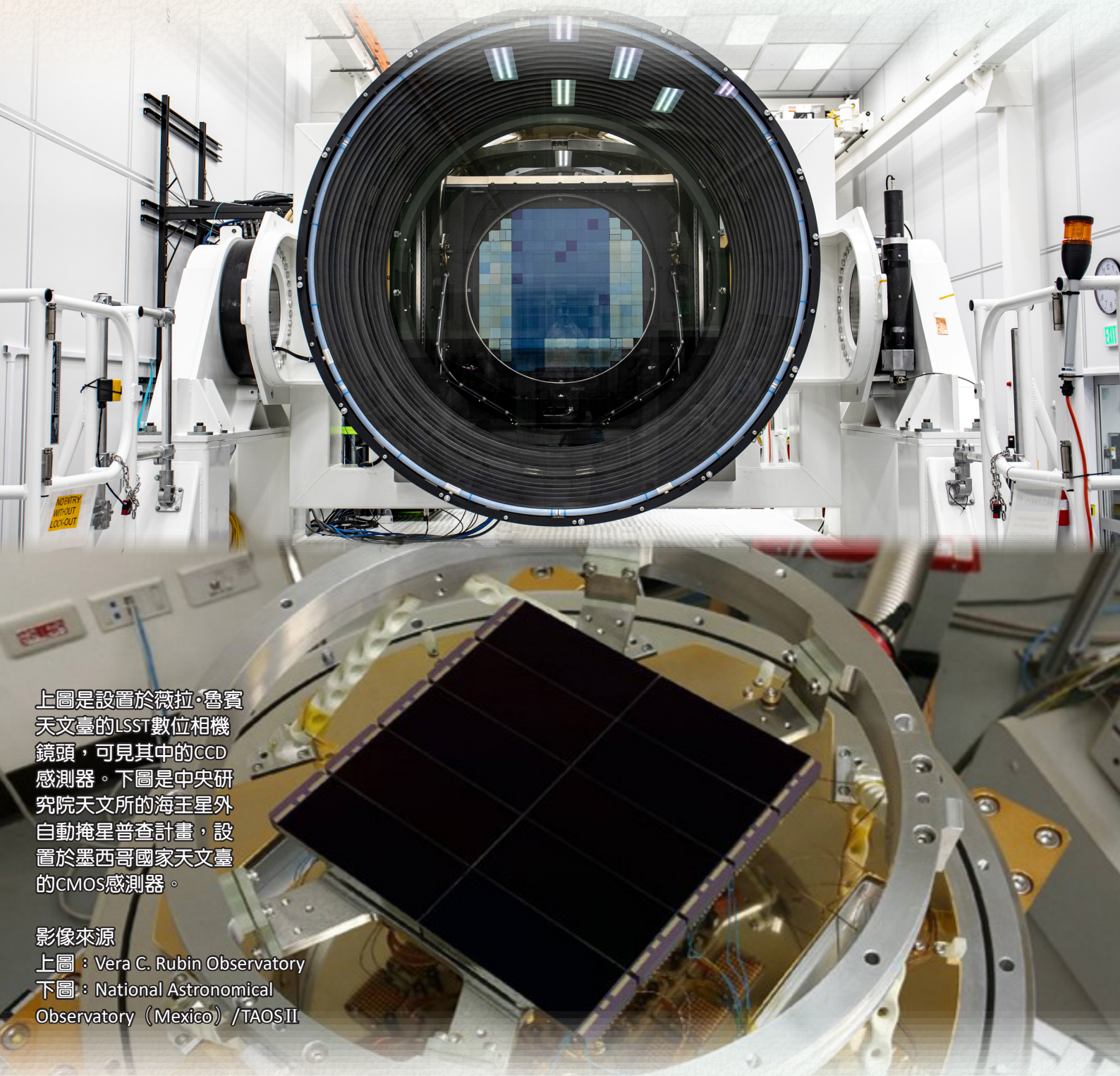


觀測裡的光電效應

CCD、CMOS的天文觀測發展史與未來展望

自古以來人類便對夜空充滿好奇，天文觀測技術的不斷發展一直在改變我們對宇宙的理解。從肉眼觀星到望遠鏡的發明，從照相底片到電子影像感測器的運用，其中電荷耦合元件（CCD）與互補性金屬氧化物半導體（CMOS）感測器更是在20世紀末徹底改變了天文觀測方式，將光（光子）轉換為電訊號（電子）再儲存成數位資訊，迎來了數位天文的新時代。

文／林宏欽



上圖是設置於薇拉·魯賓天文臺的LSST數位相機鏡頭，可見其中的CCD感測器。下圖是中央研究院天文所的海王星外自動掩星普查計畫，設置於墨西哥國家天文臺的CMOS感測器。

影像來源

上圖：Vera C. Rubin Observatory

下圖：National Astronomical Observatory (Mexico) /TAOS II

CCD與CMOS原理都是基於光電效應（photoelectric effect），即光照射到某些金屬表面激發出電子，愛因斯坦便是以光電效應獲得1921年諾貝爾物理學獎，而非著名的相對論！

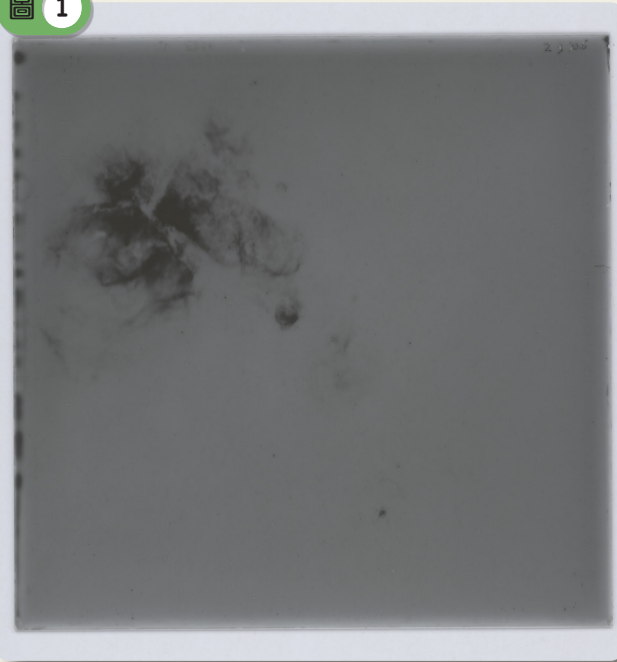
早期天文觀測

早期人類以裸眼觀測，使用繪圖、文字及簡單的觀測工具（如日晷、星盤）來記錄星象與曆法。1609年伽利略使用自製望遠鏡觀測月球、木星的衛星、金星的相位，開創現代天文學的先河。

19世紀中期，照相術出現，開展出天文攝影，照相底片能夠精確記錄天象，且長時間曝光使記錄暗弱天體成為可能。但仍有靈敏度低、反應慢、需化學顯影過程、無法即時分析等缺點。此外，底片的量化能力有限，影像動態範圍小，資料重複性差，使得科學分析受到限制，如圖1。

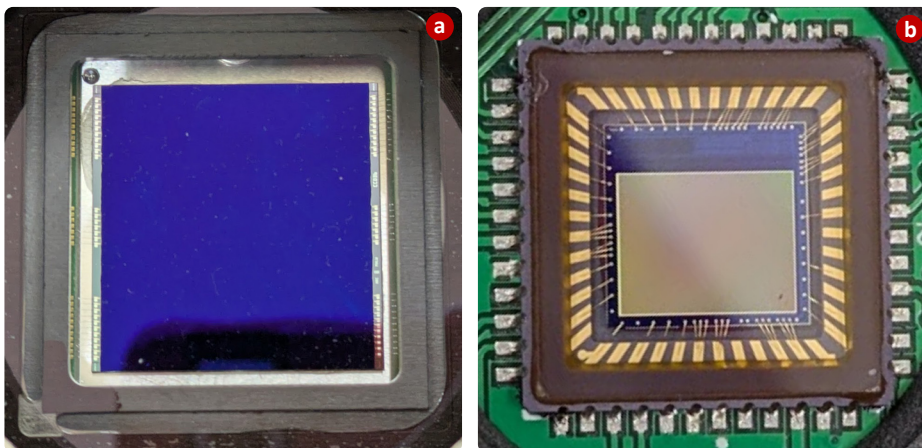
到了20世紀中期，隨著電子技術的進步，更為靈敏、可即時處理的CCD和CMOS感測器技術發展，取代了傳統底片，對攝影技術帶來革命，如圖2。數位形式的影像處理及傳播非常迅速便利，透過網絡可瞬間傳送全球，同時也帶動新的科學研究模式。

圖 1



照相術出現後，早期使用感光玻璃作為底片，亦為當時天文研究拍攝記錄所用。此張拍攝蜘蛛星雲的玻璃底片，由中央研究院天文研究所朱有花教授所提供。影像來源：朱有花 攝影

圖 2



a CCD和 **b** CMOS感測器外觀看起來十分類似，但技術架構完全不同。影像來源：林宏欽 攝影

CCD的誕生與崛起

CCD由Willard S. Boyle和George E. Smith於1969年發明，原本設計用途為記憶體，但很快便被發現具有優異的影像感測能力。兩位發明者也因此與光纖之父高錕共同獲得2009年諾貝爾物理獎。CCD利用光電效應，將進入感光元件的光子轉換為電子，並將每個像素的電子依序一一傳送到讀出端，進而轉為數位訊號，如圖3、圖4。其主要優點包括：

- ①**高靈敏度**：能捕捉極微弱的光源。
- ②**低雜訊**：適合長時間曝光與高精度測量。
- ③**良好的量子效率**：對不同波長的光都有很高的響應。
- ④**高動態範圍**：可記錄明暗差異大的天體。

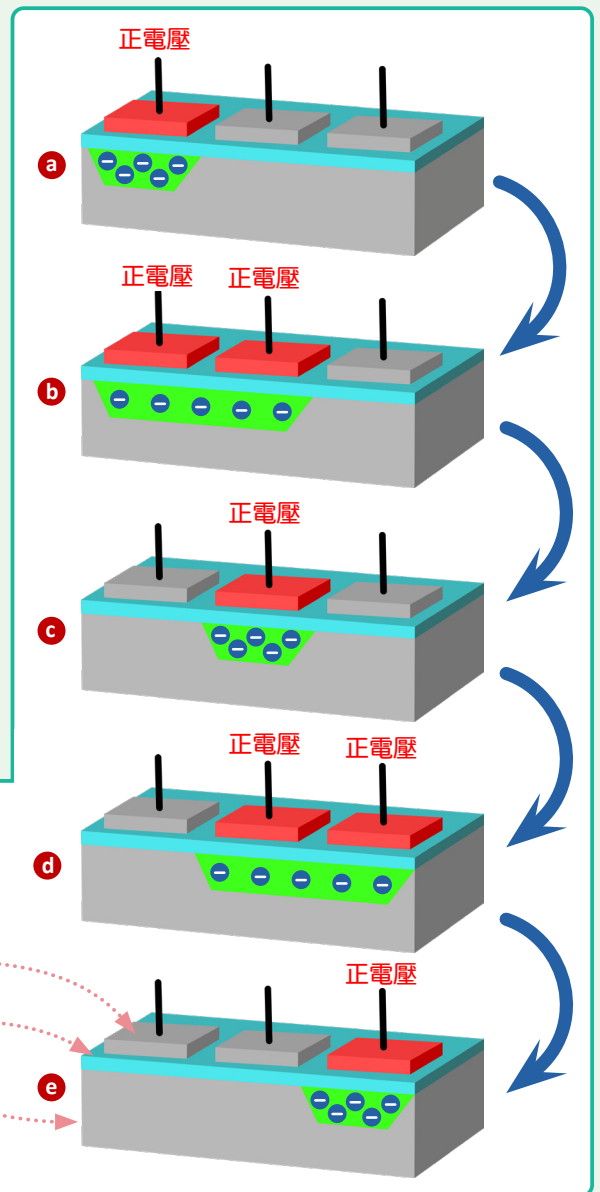


圖 3

CCD感測器的構造

CCD如何傳遞電子訊號的圖解

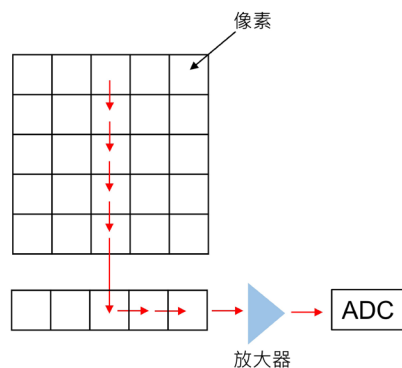
藉由圖3中 a 至 e 的運作方式，按照步驟在CCD元件上施予正電壓，讓下方綠色標示處所產生電位并移動，就能將每個元件所產生的電子訊號依序傳遞出去。圖片來源：編輯部繪製

圖 4

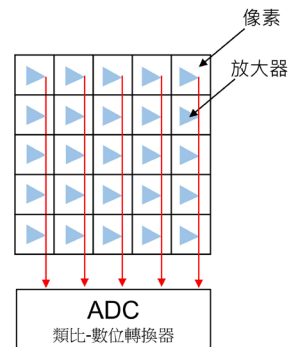
CCD與CMOS傳遞電子訊號方式的差異圖解

這兩種感光元件的主要區別在於其技術架構。在CCD感光元件中，電荷會在像素內逐行或逐列移動最後讀出；而CMOS感光元件則是直接讀出每一像素。圖片來源：作者提供

CCD



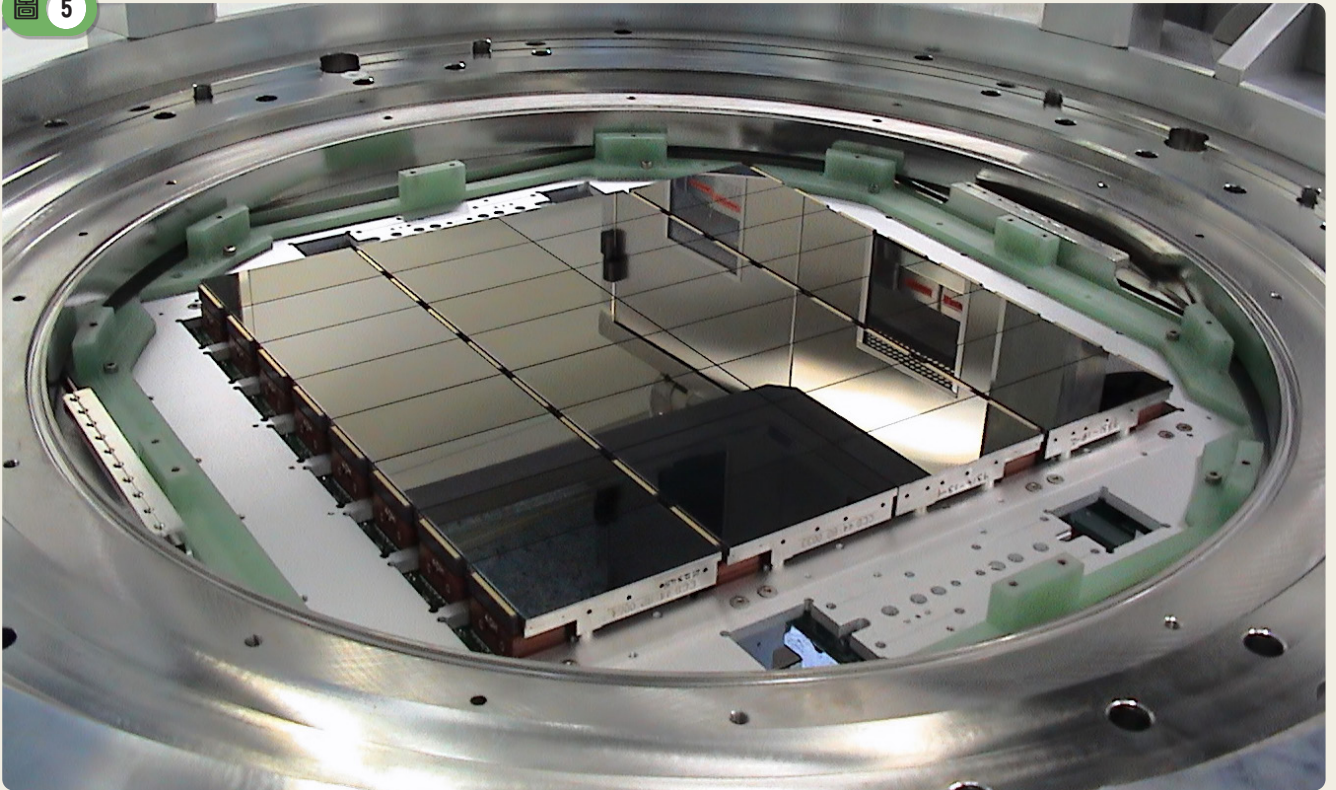
CMOS



自1970年代起，CCD迅速被應用於專業天文觀測，冷卻技術有效降低熱雜訊，使CCD在低光環境中能精確成像，顯示出遠高於底片的靈敏度與解析度。此後，全球各大天文臺陸續將CCD作為主力感測器。

隨著製程進步，CCD的像素數量與尺寸持續提升，背照式 (back-illuminated) CCD的發展提升了量子效率，除了在近紫外與可見光波段表現卓越，並進一步拓展到近紅外波段 (0.7至1.0 μm)，如圖5~圖6。

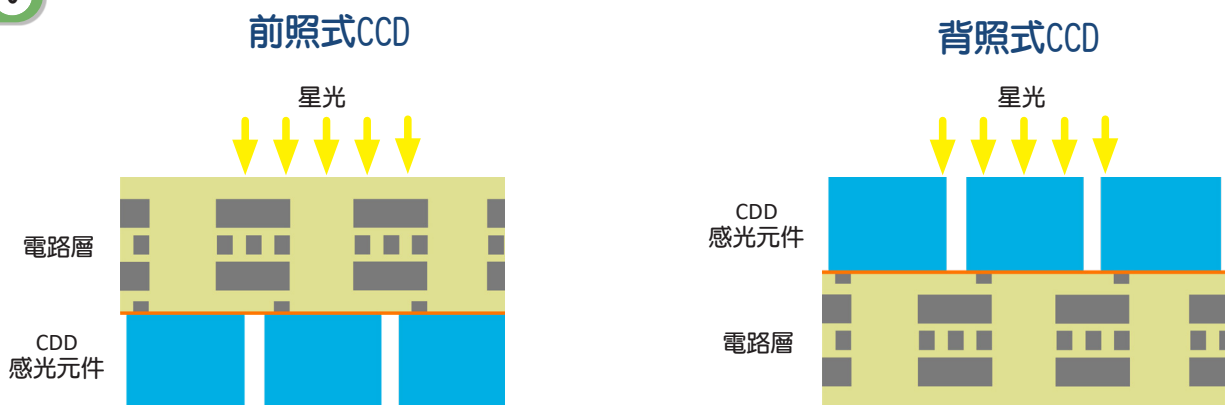
圖 5



帕瑞納天文臺 (Paranal Observatory) 的甚大巡天望遠鏡 (The VLT Survey Telescope)，配置了包含32個背照式CCD感測模組的數位感測器，能夠單次拍攝包含2.68億個像素的影像。OmegaCAM相機是由荷蘭、德國與義大利的聯合團隊設計與建造，歐洲南方天文臺 (ESO) 也作出了重要貢獻。影像來源：ESO/Paranal Observatory

前照式與背照式CCD的構造比較圖解

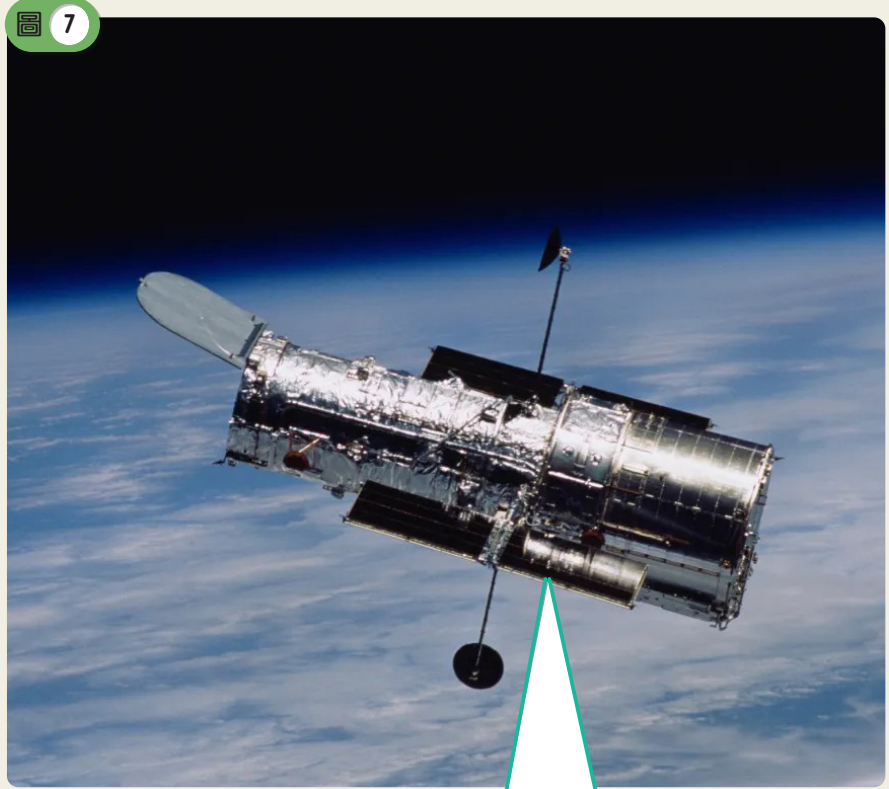
圖 6



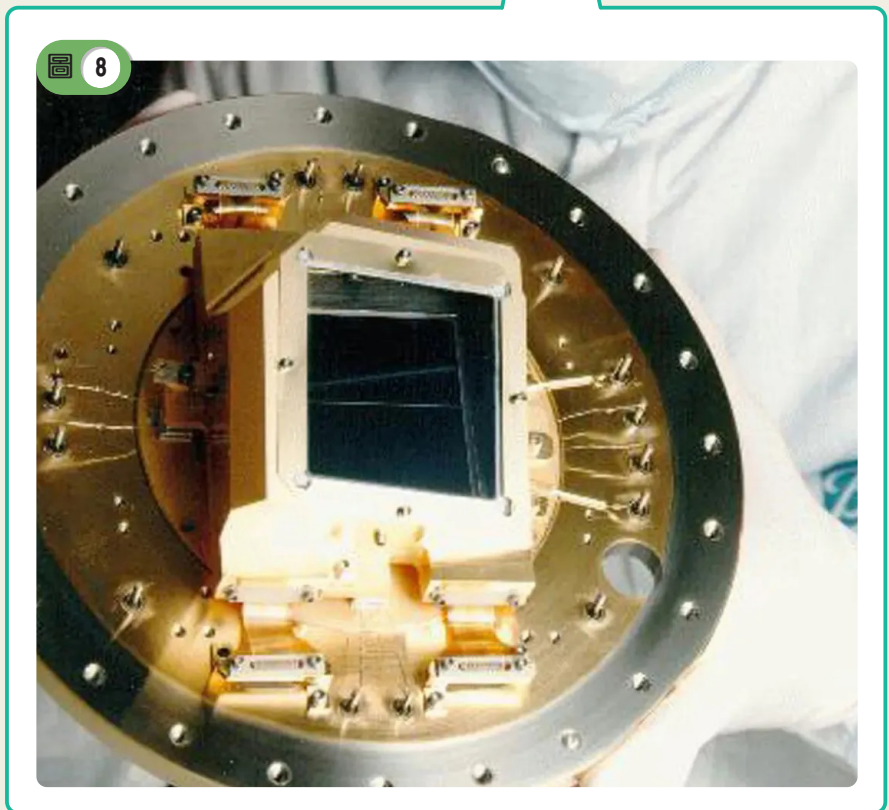
此示意圖說明，前照式CCD和背照式CCD構造上的差異。前照式因電路層中的電路遮擋星光，所以感光效率較低。背照式因電路在感光元件後面所以感光效率較高。圖片來源：編輯部繪製

對要求極端低雜訊、極高光度準確性，CCD仍在主相機與長時間深空觀測中保持主流地位。例如：

①哈伯太空望遠鏡 (Hubble Space Telescope)：如圖7，自1990年起搭載多代高解析CCD相機，如圖8，(如WFPC2、ACS、WFC3)，太空望遠鏡可避免地球大氣干擾，拍攝出無數前所未有震撼人心的宇宙圖像。



哈伯望遠鏡是人類首次將望遠鏡設置在太空的望遠鏡，也是首座採用CCD作為感光裝置的太空望遠鏡。影像來源：NASA



②薇拉·魯賓天文臺 (Vera C. Rubin Observatory) : 8.4米超廣角望遠鏡搭載世界最大的32億像素CCD相機，每幾晚就可掃描整個南半球天區。LSST計畫旨在研究暗能量和暗物質，以及太陽系天體、時域天文和銀河系等重要課題，如圖9、圖10。

③各類小行星與彗星發現：CCD的高靈敏度使得天文學家能夠發現更多暗弱天體，例如，鹿林天文臺在2003-2009年間發現800多顆小行星。

薇拉·魯賓天文臺配置了8.4米超廣角望遠鏡，搭配LSST相機，從鏡頭前方就可以直接看到CCD，共有32億像素，是目前全球最大，像素最多的天文專用數位相機。影像來源：圖9-陳文屏攝影、圖10-Vera C. Rubin Observatory

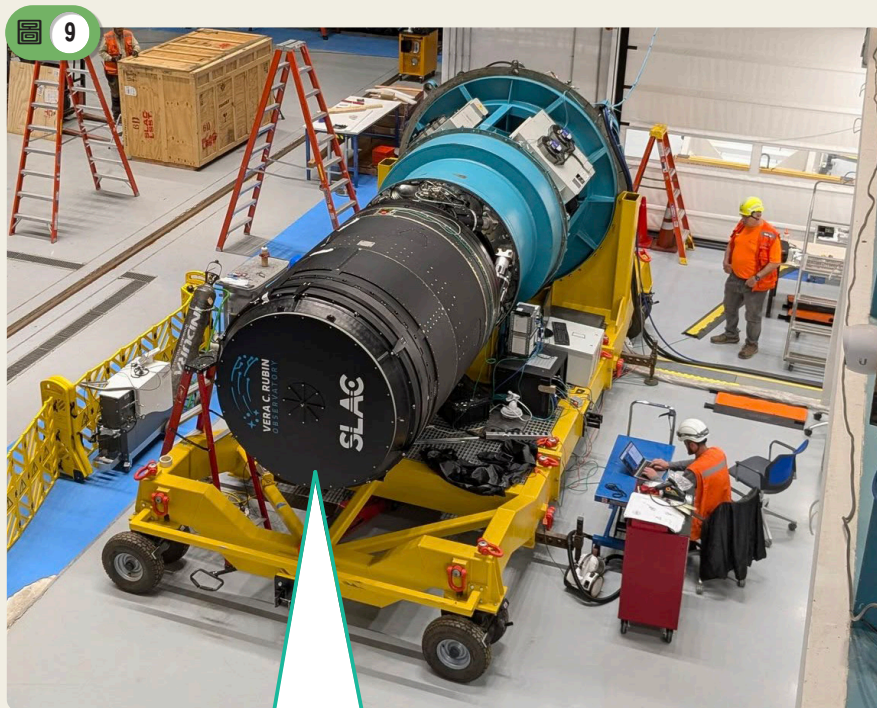
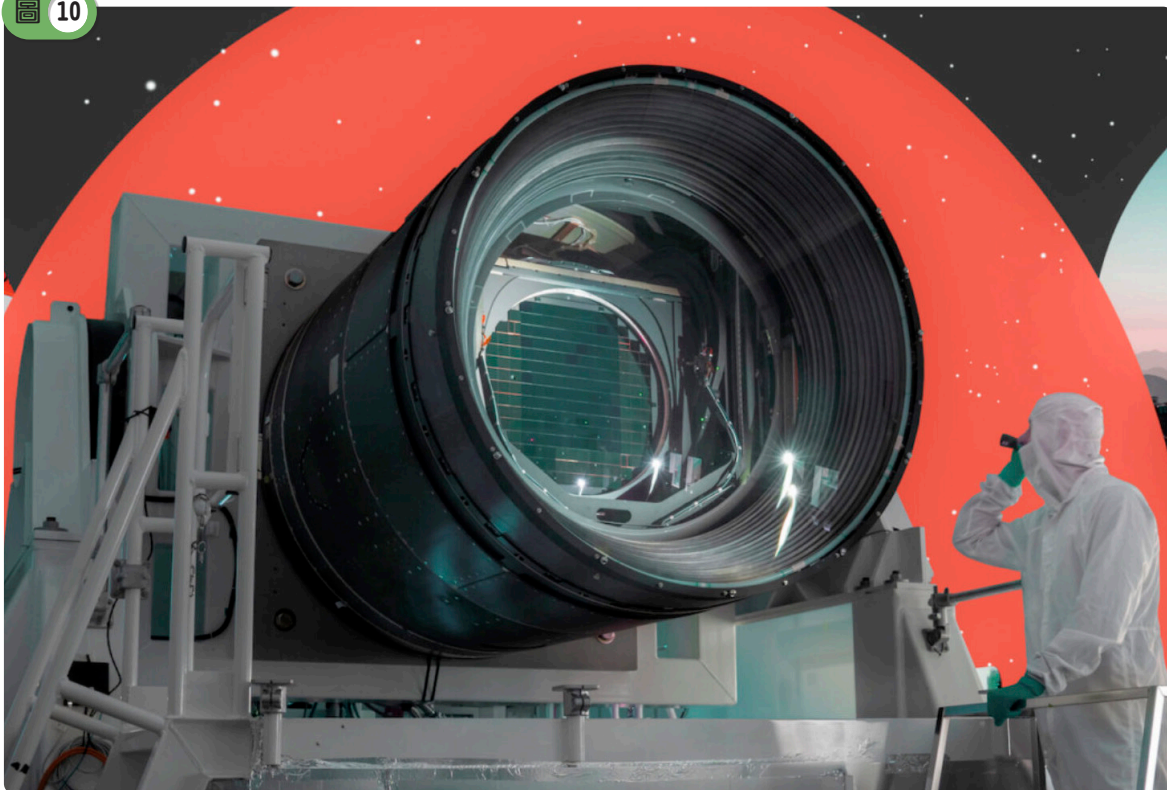


圖 10



CMOS的崛起

1963年快捷半導體的Frank Wanlass和C. T. Sah發明了互補式金屬氧化物半導體電路（CMOS）。由於CMOS每個像素皆具有自己的放大與讀出電路，因此可以進行高速讀取與即時影像顯示。早期CMOS存在雜訊大、靈敏度低的問題，現代CMOS技術已經大幅進化，提供成本優勢、低功耗和更快的信號處理能力，使其廣泛應用於數位攝影與影像設備，現在人手一機的手機和數位相機都是使用CMOS感測器。其主要優點包括：

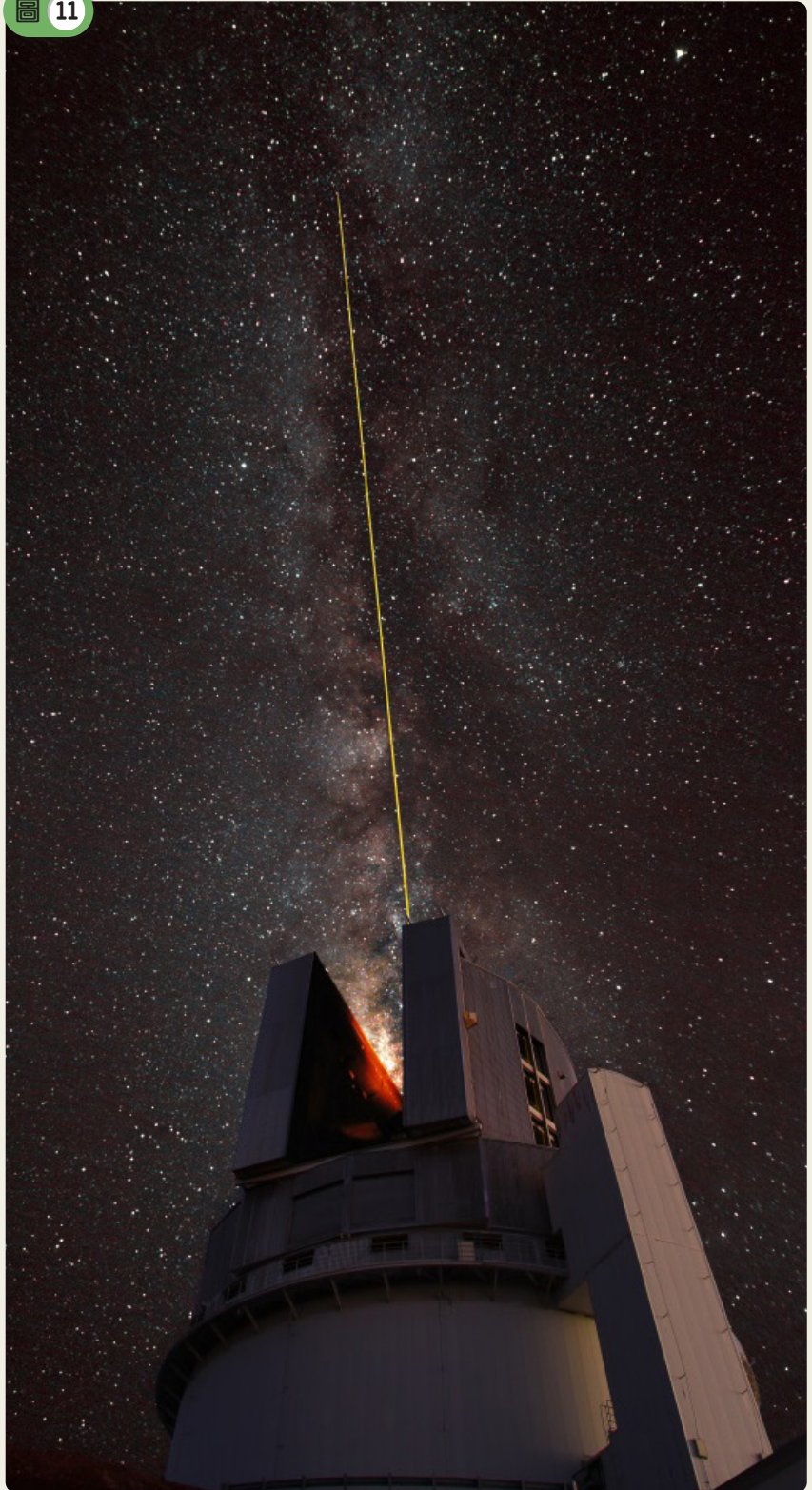
- ①**低功耗**：適合太空任務、手機等移動設備。
- ②**高速讀出**：可支援高幀率拍攝，有助於行星影像與快速事件捕捉。
- ③**低成本、大量製造**：有利於普及與應用推廣。
- ④**電子快門與HDR功能**：無須機械快門，可更好地捕捉高反差天體。

近十年來，CMOS感測器在設計與製造上有重大突破，在天文界逐步獲得重視，從業餘天文攝影開始，隨著CMOS成本下降與影像處理技術普及，業餘天文愛好者與教育機構將更容易取得高品質影像設備。這將促進更多公眾參與天文觀測與公民科學（Citizen Science）的發展，也可協助專業天文學家進行大規模資料收集與分析。

專業天文領域方面，隨著科技進步，科學級CMOS（sCMOS）的性能逐漸逼近，甚至在某些方面超

越CCD。儘管傳統大望遠鏡長期以使用CCD為主，越來越多新一代望遠鏡系統開始整合CMOS技術，尤其是在快速導星系統與自適應光學系統的波前感測器（Wavefront Sensors）等即時、機動觀測應用，如圖11。

圖 11

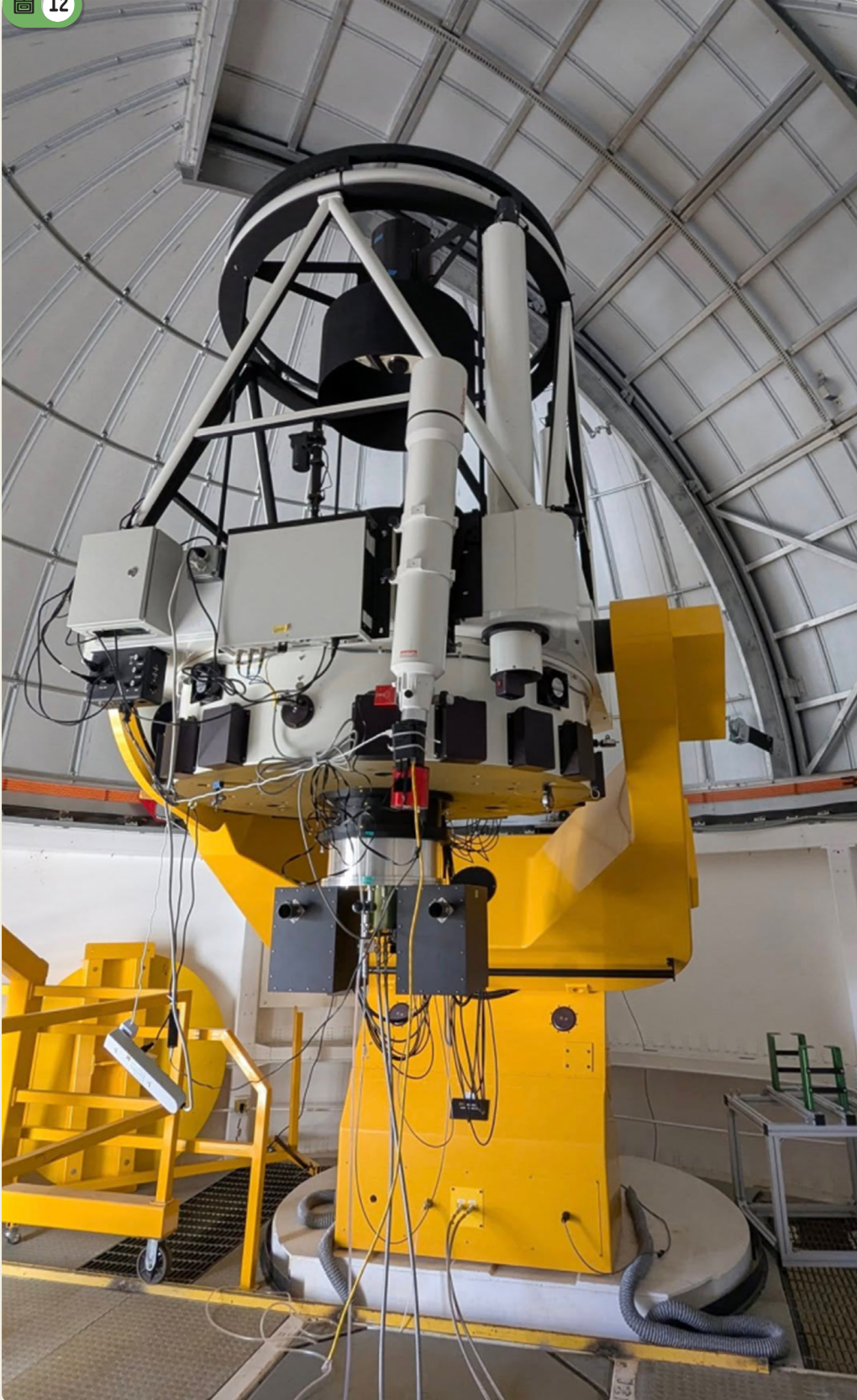


開啓自適應光學系統的昴星團望遠鏡，其中接受大氣反射雷射光的波前感測器，就是使用反應速度快的sCMOS作為感光元件。影像來源：日本國立天文臺（NAOJ）

值得一提的是中研院天文所的TAOS II海王星外自動掩星普查計劃（Transneptunian Automated Occultation Survey）使用三架口徑1.3公尺的全自動望遠鏡，主相

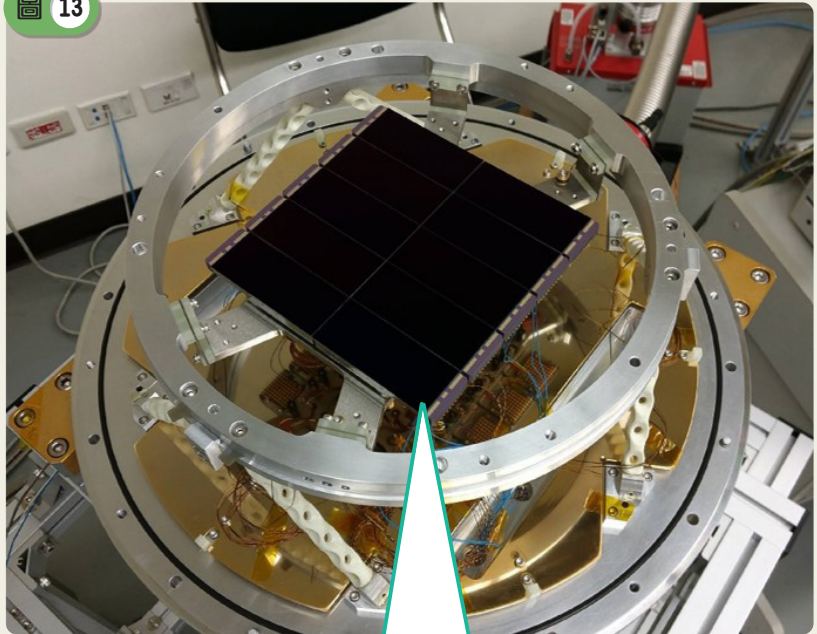
機配置高速連拍的CMOS，可偵測亮度微小、快速變化的掩星事件，來量測海王星外天體（Trans-Neptunian Objects）的大小分布，如圖12~14。

圖 12



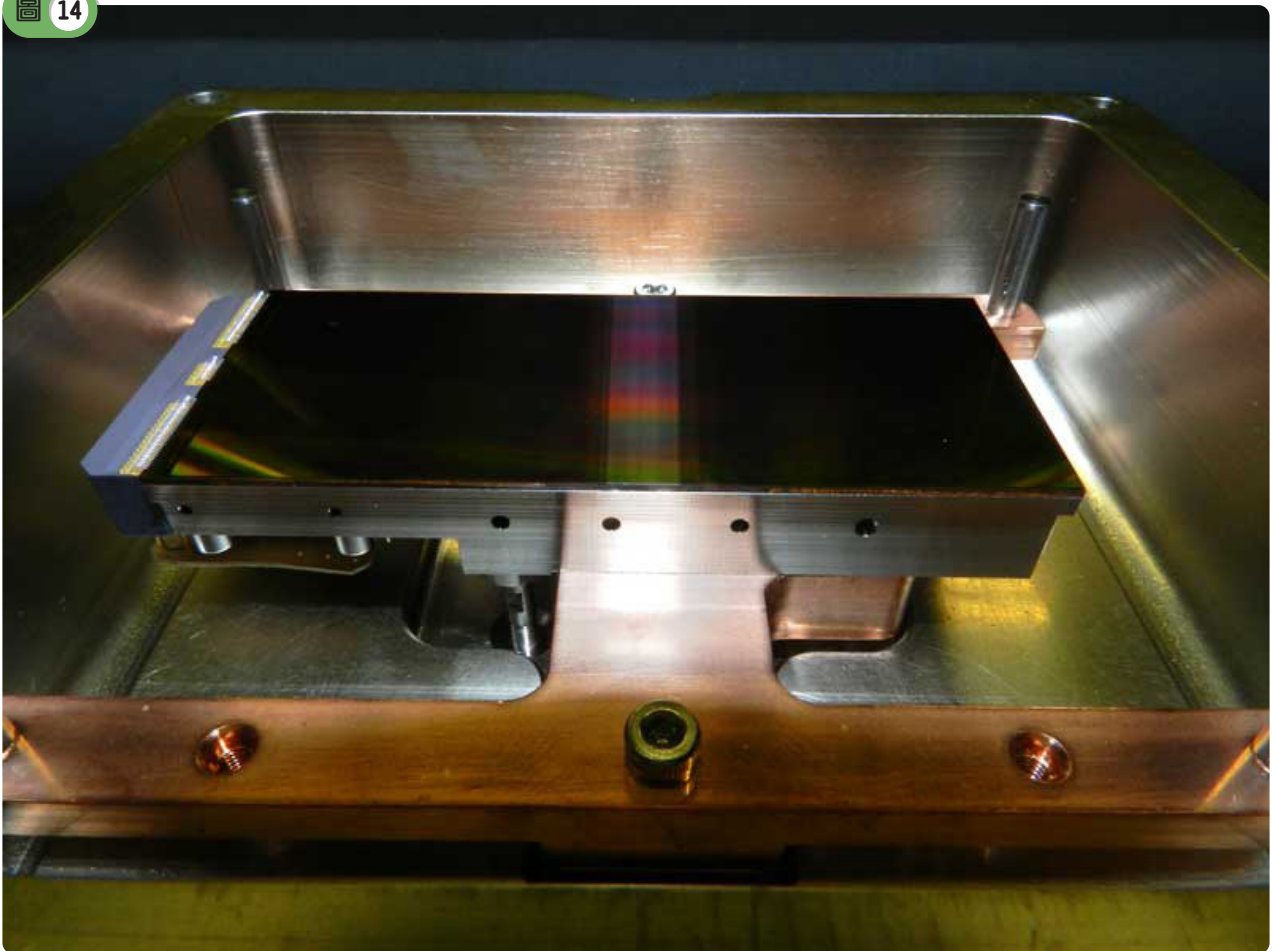
TAOS II的口徑1.3公尺望遠鏡，配置了能高速連拍的CMOS相機，在一秒內可取得20幅數位影像，每幅影像中包含了超過一萬個以上的星體。影像來源：陳文屏 攝影

圖 13



已安裝在攝影機中，由10個英國e2v公司CMOS感光模組所組成的感測器。影像來源：中央研究院天文研究所/TAOS II海王星外自動掩星普查計劃

圖 14



英國e2v公司的CMOS感光模組，長74公釐、寬31公釐，由8,847,360個像素所組成的陣列。影像來源：中央研究院天文研究所/TAOS II海王星外自動掩星普查計劃

CCD與CMOS的比較

早期CCD在高質量、低雜訊影像方面表現較優，而CMOS則擁有更高幀率、低功耗等優點。現代CMOS感測器技術的改進使其在影像質量上與CCD相媲美，在多數應用上已能與CCD匹敵甚至超越，特別是在高幀率與即時成像需求上，使其成為在成本/能源效率以及高速影像應用方面更好的選擇，如表1。

CMOS在技術日趨成熟下大幅普及，因具有強大性價比優勢，取代了大部分CCD，全球最大的影像晶片生產商SONY於2017年停止生產CCD後，CCD技術發展告一段落，現今多數CCD已停產。因CCD仍在極高靈敏度與高精度光度研究中保持主流地位，所以尚有少數特定用途的CCD（天文、生醫等）有量產。在同時要求「單光子靈敏度+絕對光度精度+超高動態範圍」等三個條件的場合，CCD目前仍不可取代。例如實驗/觀測設計要求系統性誤差到0.1%以下，或必須在-120°C長時間曝光，CCD依舊是唯一成熟且經過長年實戰驗證的方案，如圖15。

表 1 CCD與CMOS的性能比較表

項目	CCD	CMOS
靈敏度	較高	接近，部分甚至超越
雜訊	較低	高雜訊，已逐步改善
讀出速度	較慢	非常快
功耗	較高	較低
成本	昂貴	相對便宜
成像均勻性	高	接近，部分機型略差
可擴展性	限制	容易整合其他元件（如A/D轉換）

圖 15



此影像為克卜勒太空望遠鏡上配置的CCD陣列，CCD仍是目前經過長期實戰經驗，能在嚴苛的外在環境條件下，穩定保持極低誤差範圍且持續工作的最佳感測器。影像來源：NASA

未來展望

隨著AI與大數據分析的進入，未來的天文觀測將朝向自動化與智慧化邁進。大型望遠鏡巡天一天可產生數TB的影像資料，需靠自動化影像處理進行去除雜訊、分類，以AI演算法即時分析天象變化，快速偵測瞬變事件（如超新星、伽瑪射線暴等）。此外，望遠鏡與影像感測器的模組化將促使更多地面與太空觀測平臺部署高解析感測器，進行全天候與全波段監測。

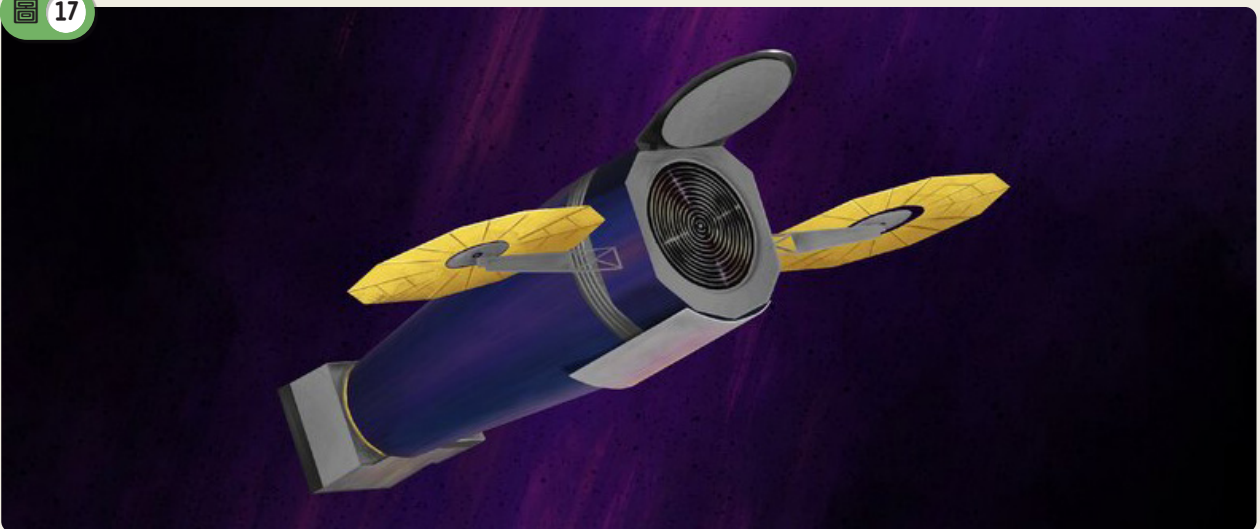
未來可能導入的更先進CMOS影像感測技術，如更高量子效率的背照式sCMOS（QE提高到95%以上），如圖16、更低讀出雜訊的CMOS或混合感測器（Hybrid CMOS-CCD），如圖17、突破冷卻限制的Cryo-CMOS技術、高能天文（X-ray、太陽物理）領域用途的抗輻射強化（Radiation-hardened）CMOS、AI-on-sensor實現「邊拍邊算」，特別適合全天候巡天任務。這些技術將使我們更深入觀察宇宙早期結構、暗能量、系外行星等。

圖 16

設置在美國夏威夷的井上建太陽望遠鏡（Daniel Ken Inouye Solar Telescope，簡稱DKIST），採用背照式sCMOS相機，主要用於太陽表面的磁場測繪，以及太陽閃焰的動態監測。影像來源：NASA



圖 17



尚在規劃階段的次世代太空望遠鏡：Lynx X-ray Observatory，未來或將搭載Hybrid CMOS-CCD相機。圖片來源：
<https://www.lynxobservatory.com/>

以量子效應為基礎的新型感測技術，例如量子點感測器、超導感測器（如MKID, Microwave Kinetic Inductance Detectors），這些裝置將突破傳統感測器的靈敏度與解析度極限。新材料（如石墨烯）也可能為未來感測器帶來革命性變化，例如提升紅外線波段感應能力、實現全光譜即時成像等。

從早期的底片時代到現今的數位感測時代，CCD與CMOS的發展大幅推進了天文學的觀測能力與研究深度。CCD以其高靈敏度奠定了數位天文觀測的基礎，而CMOS則以高速、低功耗與整合性展現強大接棒潛力。隨著科技的演進與跨領域融合，相信未來的天文觀測將更加即時、精確且深入。CCD與CMOS無疑將繼續扮演解開宇宙謎團的重要角色。

林宏欽：國立中央大學天文研究所 鹿林天文臺 臺長

參考資料：

1. Janesick, J. R. (2001). Scientific Charge-Coupled Devices. SPIE Press.
2. McLean, I. S. (2008). Electronic Imaging in Astronomy: Detectors and Instrumentation. Springer.
3. 薇拉·魯賓天文臺 (維基百科)
4. CCD vs CMOS：感測器技術評論 <https://www.csensor.com/ccd-vs-cmos?lang=zh>
5. TAOS II - The Transneptunian Automated Occultation Survey <https://taos2.asiaa.sinica.edu.tw/>