

文/ 陳婷琬

尋找重力波的電磁波對應體 千級新星與重元素起源

我想我們是幸運的，偵測到中子星合併的事件比我們預期的早。在天時、地利與人和之中完成了觀測任務。但我想也並不全然是運氣好，我們找尋重力波的光學對應體已經兩年了……

來自中子星合併的重力波通報

2017年8月17日13點8分17秒 (UT時間)

時為德國時間下午三點多，我坐在慕尼黑的辦公室裡看到電腦螢幕上跳出：「叮叮！您有新的郵件：GCN/LVC_INITIAL_SKYMAP」，偵測到新的重力波事件！該源於17日12:41:04 UT被美國的雷射干涉儀重力波天文台（Laser Interferometer Gravitational-Wave Observatory，簡稱LIGO）偵測到，原始代號為：G298048，之後經過謹慎地檢驗證實，才給與正式編號：GW170817。我揉一揉眼睛仔細看了這則通報：「PROB_NS:1.00」，由中子星造成的機率100%！有沒有看錯啊？先前重力波的通報都是黑洞相撞所以PROB_NS都是0。這次是來真的了嗎？中子星對撞！

沒想到更刺激的通報出現：GW170817與美國航太總署的費米伽瑪射線太空望遠鏡（Fermi Gamma-

ray Space Telescope）偵測到微弱的短伽瑪射線爆（short gamma-ray burst：GRB 170817A）很可能有高度相關！伽瑪射線爆根據爆發時間可以分為長於兩秒鐘的長伽瑪射線爆（long gamma-ray burst），是巨質量恆星塌縮成黑洞時產生的噴流，在鄰近事件中常觀測到伴隨著超新星對應體；以及短於兩秒鐘的短伽瑪射線爆，據信是由中子星跟中子星或是中子星跟黑洞相撞時所產生的，但至今沒有非常可靠的直接證據。GW170817與GRB 170817A的爆發時間差1.7秒，兩個源在天空中的位置有重疊！可惜不管是重力波源的可能天區33.6平方度（結合LIGO與Virgo的偵測）或是重疊費米後的11.6平方度（圖1），對一般望遠鏡的視野來講還是太廣闊了（例如鹿林一米望遠鏡的視野為11角分）。

2017年8月18日1點5分23秒 (UT時間)

雖然我隔天要飛美國看日全食，但還是整晚不敢睡，密切注意著郵件訊息。每兩三個小時就爬起

來查看：偵測到微中子（事後證實沒有相關）；位於可能天區中，在體積範圍（約50 Mpc，附註1）內所有的星系目錄；尋找X射線源…等。直到凌晨三點收到新的通報：GCN CIRCULAR #21529：Potential optical counterpart discovered by Swope telescope，找到可能的可見光對應體！目標：SSS17a，座標：13:09:48.089，-23:22:53.35，亮度17星等！

附註1：秒差距（parsec，縮寫pc）為天文學常用距離單位，1秒差距約為3.26光年，常用於銀河系內的短距離表述，銀河系的直徑約為3萬秒差距，而銀河系附近星系的距離習慣上用百萬秒差距（Mpc）描述。

我所領導的尋找重力波光學對應體的計畫，使用德國馬克斯普朗克研究所（Max Planck Institute）位於歐南天文台（European Southern Observatory；簡稱ESO）在智利La Silla的2.2公尺望遠鏡的伽瑪射線爆可見光紅外偵測器（Gamma-Ray Burst Optical/Near-

Infrared Detector，簡稱GROND）來進行光度觀測，該儀器同時可曝光七個波段，從可見光（griz四個波段）到近紅外光（JHK三個波段），一次獲得七張影像。可惜當我看到這則通報時，目標已經從La Silla落下。只能期待隔天再觀察。我先設定好GROND的觀測程式，交由博士班學弟Phil幫忙參加ePESSTO計畫（附註2）主持人Stephen Smartt的電話會議討論，然後我就去搭飛機了。

附註2：ePESSTO（extended Public ESO Spectroscopic Survey of Transient Objects），是公眾光譜瞬變天體巡天計畫的延伸（原計畫始於2012年）。我們一年有九十個觀測夜，使用位於La Silla天文台的3.58公尺的新科技望遠鏡（New Technology Telescope，簡稱NTT），對新發現的瞬變天體進行光譜分類，在觀測一天內就完成資料分析釋出與發布通報。目前已經分類了1179個新天體，並對其中290個目標進行後續觀測與研究。

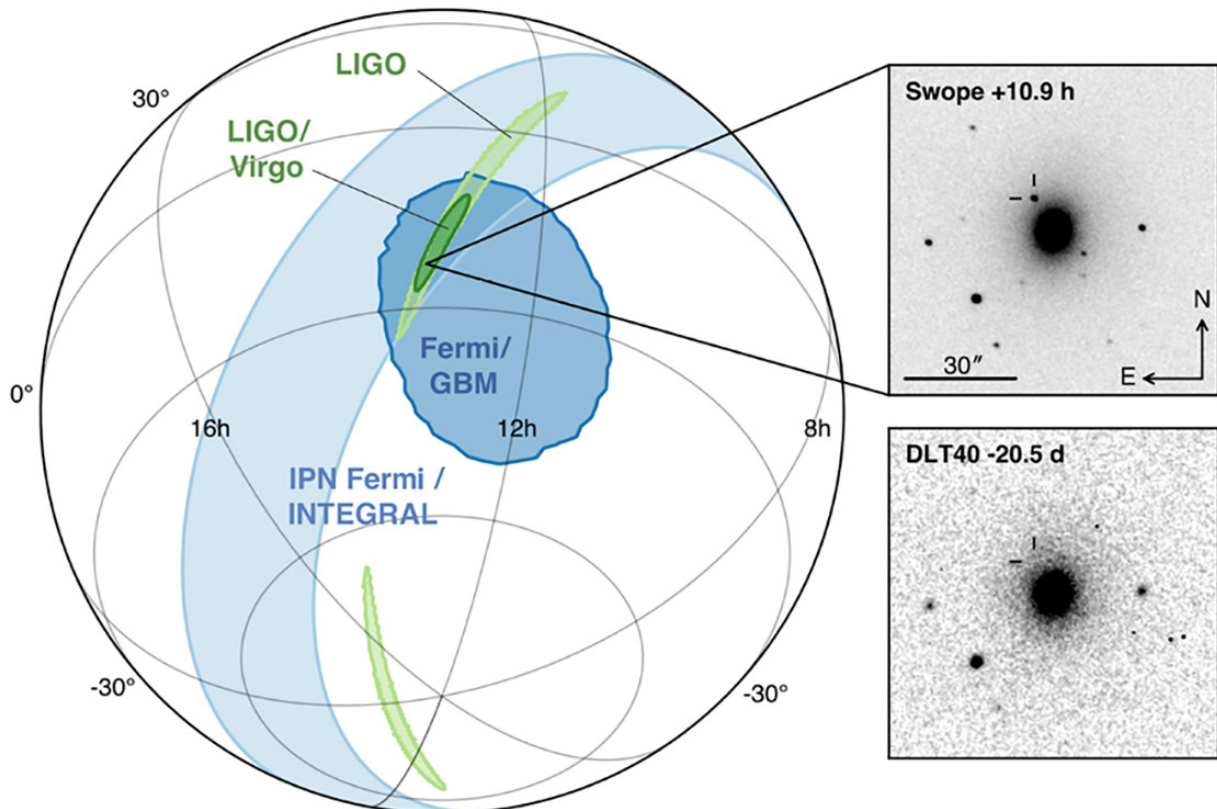


圖1. 多訊息（multi-messenger）觀測重疊下的重力波源位置。包含來自重力波GW170817的可能天區（淡綠色為LIGO、深綠色為結合LIGO與Virgo的偵測範圍），伽瑪射線爆 GRB 170817A的可能天區（深藍色為費米衛星伽瑪射線爆監視器（Gamma-ray Burst Monitor，簡稱GBM）偵測範圍、淡藍色則是根據費米衛星與歐洲太空總署的INTEGRAL（INTERNATIONAL Gamma Ray Astrophysics Laboratory）伽瑪射線觀測衛星接收到伽瑪射線爆的時間差），以及可見光學對應體SSS17a的位置（Swope一米望遠鏡在爆發後10.9小時率先發現，對照DLT40望遠鏡在重力波GW170817發生的前20.5天所拍攝的星系影像並無該天體存在）。（©. B. P. Abbott et al. 2017 ApJ, 848L, 12，我也是該篇論文3674位共同作者之一。）

全球觀測大作戰

2017年8月18日23點14分49秒 (UT時間)

經過八小時的飛行，班機剛抵達芝加哥，我便趕緊連上Wi-Fi，76封未讀郵件！全部跟重力波有關！全世界所有我可以唸得出名字的望遠鏡，只要可以看到該天區的全部都投入了觀測！從太空望遠鏡（HST、Swift…）到地面所有小型大型望遠鏡（DECam、DLT40、LCOGT、Pan-STARRS、SkyMapper、Gemini、Subaru…）；從各種波段，伽瑪射線（INTEGRAL…）到無線電波（VLA、ATCA…）；看光度的看光譜的，一些巡天望遠鏡回報爆發前影像極限星等的參考（ASAS-SN、ATLAS）。還有對宿主星系NGC 4993的星系特質描述，其為橢圓星系，距離我們40Mpc，恰符合GW170817的偵測距離。真的很興奮看到全世界的天文學家們，用盡可能的資源，將所有望遠鏡都指向同一個天體進行觀測。全人類一同為了一個共同的目標而打拼，真的讓人感動。

我們自然不能缺席

當天擬定的作戰計畫是，GROND進行可見光與近紅外光的影像觀測，由我跟Phil學弟在遠端負責跟GROND的支援天文學家Angela聯絡。而ePESSTO的觀測者Joe及Dave用NTT拍攝較藍的U波段並觀測光譜。同時回報結果給在北愛爾蘭熬夜遠端坐鎮的Stephen。

目標SSS17a在智利La Silla 天文台可以開始觀測的時間是23UT左右（德國時間半夜一點），而我在芝加哥，是當地晚上六點。當天早早吃了晚餐就先回旅館遠端遙控GROND。天氣不錯，我們也準時開工



影片：

ESO Zooming in on the kilonova in NGC 4993

https://www.youtube.com/timedtext_video?ref=player&v=nziW8fywmg

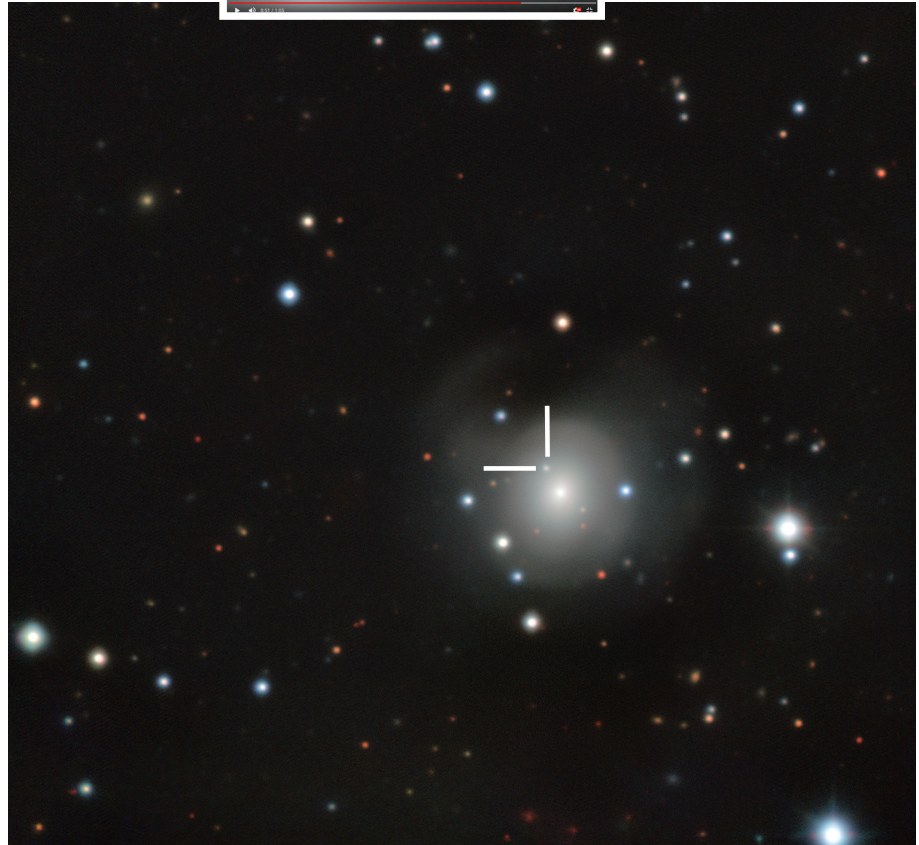


圖2. 我使用馬普所/歐南天文台2.2米望遠鏡的GROND儀器，觀測到的千級新星AT2017gfo 與宿主星系NGC4993的假色合成影像，圖片中北方為上，東方為左。AT2017gfo為靠近星系核心東北方的淡藍黃色亮點。（©. ESO/S.J. Smartt & T.-W. Chen）

觀測（圖2）。但是，即時處理影像的程式卻沒有運作成功（莫非定律），於是我趕緊將前兩筆觀測資料，從天文台傳回所上主機處理，才得到SSS17a的初步亮度。進一步減去銀河系消光，並假設其為黑體輻射，發現擬合的結果不錯，大約5300度。跟Stephen線上討論了一下，他也剛收到NTT觀測的光譜，得到擬合的黑體溫度約6000度。對這種擬合來講，兩個結果足夠接近，意味著兩邊的觀測跟資料處理都沒有明顯瑕疵。由ePESSTO發出SSS17a光譜通報（GCN CIRCULAR #21582），光譜看起來是偏藍沒有明顯特徵的連續譜，沒有超新星光譜中常見的氫（Balmer lines）、鈣（Ca II H&K）、或是矽（Si II）等譜線。我跟Phil則通報GROND的光度觀測結果（GCN CIRCULAR #21584），也就是把我們得到的訊息跟其他科學家分享：我們證實在可見光部分，尤其是g波

段光度下降得很快，但是紅外光部分則是緩慢變暗。

往後幾天都延續一樣的模式，我每天都跟GROND的支援天文學家聯絡，擬定觀測計畫以及發布觀測通報。因為該天體越來越早落下，所以我們在跟該天體可觀測的時間賽跑。

我們發現（見圖3），在可見光部分，SSS17a變暗得非常快，在g波段五天內掉了快四個星等（約為原亮度的40分之一！）。接下來兩天La Silla天氣不好沒有觀測，之後我們在可見光波段已無法偵測到它。隨著溫度下降，SSS17a變得越來越紅。八月二十八日則是GROND最後在K波段偵測到它。我們一直觀測到九月四日，直到該天體在天空上的位置太靠近太陽而無法觀測為止。

藍色的千級新星

在被觀測到以前，千級新星的的存在就已經被理論所預估。千級新星（kilonova）的名稱來自於Metzger等人2010年的論文，依據其光度大約為一千倍新星（nova）的光度而命名（據八卦消息，名稱“kilonova”是由該篇論文的審稿人所提議而命名）。也有Kulkarni等人於2005年的論文稱其為巨級新星（macronova），根據其光度高可以亮到跟超新星（supernova）一樣。千級新星是一種「現象」，其物理機制據信是中子星與中子星或是中子星與黑洞碰撞、合併後的噴射物所發出的熱輻射（Li & Paczynski, 1998）。超新星現象的光度是由爆發時產生的放射性鎳元素衰變所支持，而千級新星的光度則是由「快作用元素」衰變所支撐。在週期表上比鐵、鋇重的元素（質量數大於90），像是金跟銀、鐳系元素等（位於圖4週期表的第五到第七行）主要是由中子捕獲的機制生成。中子捕獲分為快中子捕獲（快作用）跟慢中子捕獲（慢作用），而使輕的元素轉變為重的元素，而中子星與中子星或是中子星與黑洞合併，則提供了高中子密度與高溫等產生快作用所需的物理環境，是宇宙中重元素相當重要的來源（Lattimer & Schramm 1974; Eichler 1989）。

我們收集到史上第一筆的千級新星觀測資料，當然要好好研究其物理意義。這顆千級新星SSS17a正式的國際天文聯合會編號為AT2017gfo（AT意指天文瞬變天體astronomical transients），下文將使用這

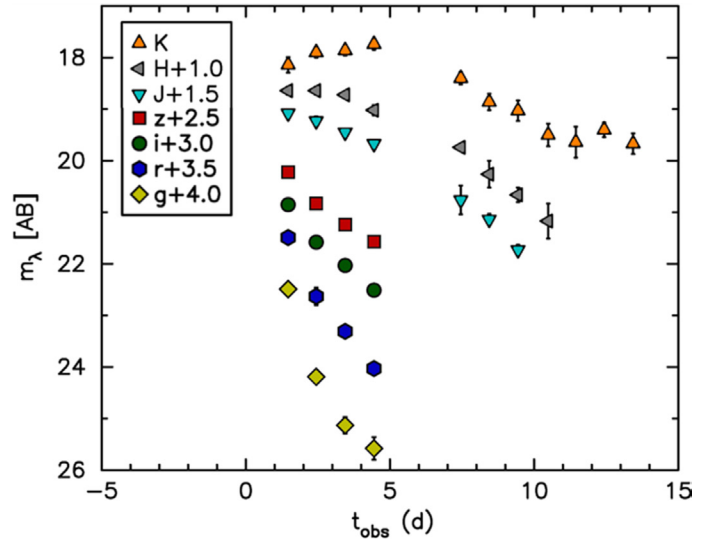


圖3. 我使用GROND儀器所紀錄到的千級新星亮度變化。橫軸零點為重力波爆發時間，以天計數；縱軸為視星等，數字越小越明亮。可見光（griz）變暗得很快，代表溫度下降，變得越來越紅，在近紅外（JHK）波段亮度維持較久。（圖片改編自：Smartt, Chen et al. 2017 Nature, 551, 75. 由Erkki Kankare博士減去宿主星系背景後，得到來自千級新星本身的光度變化曲線。）

個正式名稱。並聚焦在我們團隊的研究成果，論文於2017年發表在自然（nature）期刊第551期（Smartt, Chen et al.）。

第一步，先跟理論預測的模型做比較。我們將各波段所觀測到的星等，仔細減去背景星系的亮度，以及修正本銀河系的灰塵消光後，得到各波段的絕對星等。發現AT2017gfo的亮度變化情況符合Metzger在2017年所預測的理論模型，在早期藍色波段的光度比較亮。此模型獨特之處在於，一樣是快作用元素衰變，但是是由輕的快作用元素（原子量介於90到140之間的元素，例如原子序47的銀）所主導，不透明度（opacity）比較低，噴射速度較快，可在一天內抵達光度極大期，因此我們看到藍色的千級新星。反之如果噴射物是由重的快作用元素（原子量介於大於140的元素，例如原子序79的金、57到71的鐳系元素等）所組成，不透明度比較高，顏色較紅，為紅色的千級新星。

接下來，因為我們有多波段的觀測，得以建構全波（bolometric）光度變化曲線，再來擬合不同的物理參數（圖5）。根據從爆發一天到兩週的全波光變曲線顯示，在我們第一筆資料點時（0.6天）就達

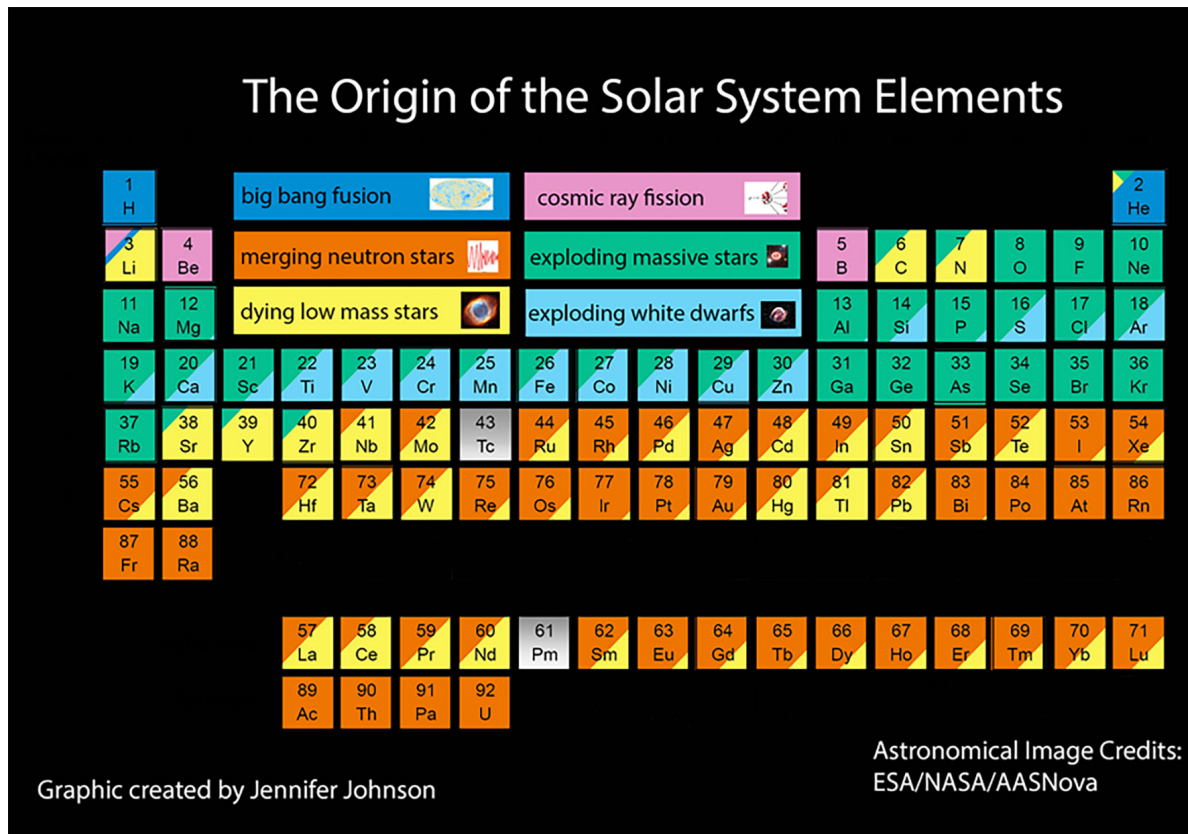


圖4. 元素週期表與其可能的來源。其中橘色色塊所標示的元素，可能來自於中子星合併。（©. <http://blog.sdss.org/2017/01/09/origin-of-the-elements-in-the-solar-system/>）

到光度極大期 ($10^{42.05}$ erg/s)，而整個曲線可以用藍色的干級新星來解釋。我們發現光度變化的趨勢符合快作用元素的衰變模型，最佳的擬合參數為：不透明度低 ($0.1 \text{ cm}^2/\text{g}$)，以0.2倍光速的速度噴射出約0.04倍太陽質量左右的物質。證實了長久以來的猜測：中子星合併，是宇宙中製造重元素重要的場所。

「看見」快作用元素

前文提到的計畫合作者Stephen也是8公尺超級大望遠鏡 (Very Large Telescope, VLT) X射手 (Xshooter) 光譜儀觀測重力波光學對應體的計畫主持人之一，所以我們還取得了從近紫外光、可見光、到近紅外光的光譜。光譜演變的速度很快，從圖六中可以看到從爆發後1.4天的藍色、沒有太多特徵的光譜，經過短短一天後，峰值移往紅端，並出現明顯的吸收譜線，非常特殊。

Stephen說：「我從來沒有見過這樣的光譜！」我們運用原子譜線的資料庫建立了模型，與觀察到的溫度、譜線速度等進行擬合，推測光譜中的吸收線可

能為原子序55的銫 (Cs) 與52的碲 (Te)。但是，對於這些快作用元素，我們的了解還太少，因此原子光譜的資料並不是那麼完整。所以從這些光譜中我們到底看到了什麼元素，還有待更進一步的確認。

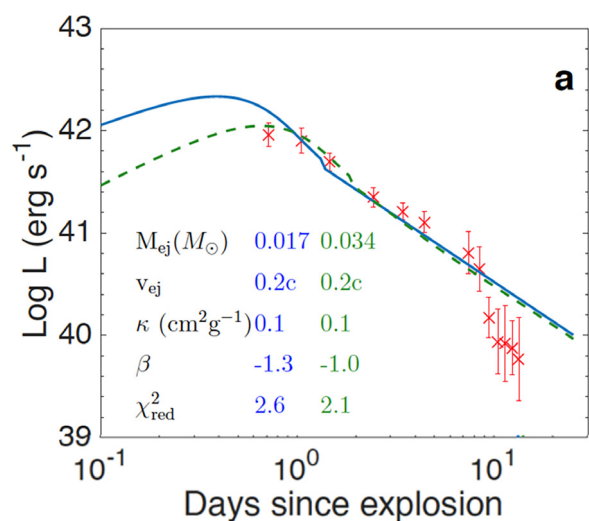


圖5. 模型擬合觀測。橫軸為爆發後的天數，縱軸為光度。紅色點為AT2017gfo的全波光度變化曲線，藍色的線是我們擬合出來的最佳解，綠色的線則加以考慮高能光子的逃逸（有些能量經由伽瑪射線輻射損失）。兩者都符合快作用元素的衰變模型。（©. Smartt, Chen et al. 2017 Nature, 551, 75.）

開啓了新的視窗

人類自古以來對天體的觀察都來自於光線，其中又以可見光為主。到近代才利用全電磁波段進行

觀測。而重力波的發現，開啓了全新的、不同於光的，認識與觀察宇宙的大門。在電影2001太空漫遊中，跟猿人已知使用工具一樣，是文明史上一大進展！可謂是現代天文的羅賽塔石。

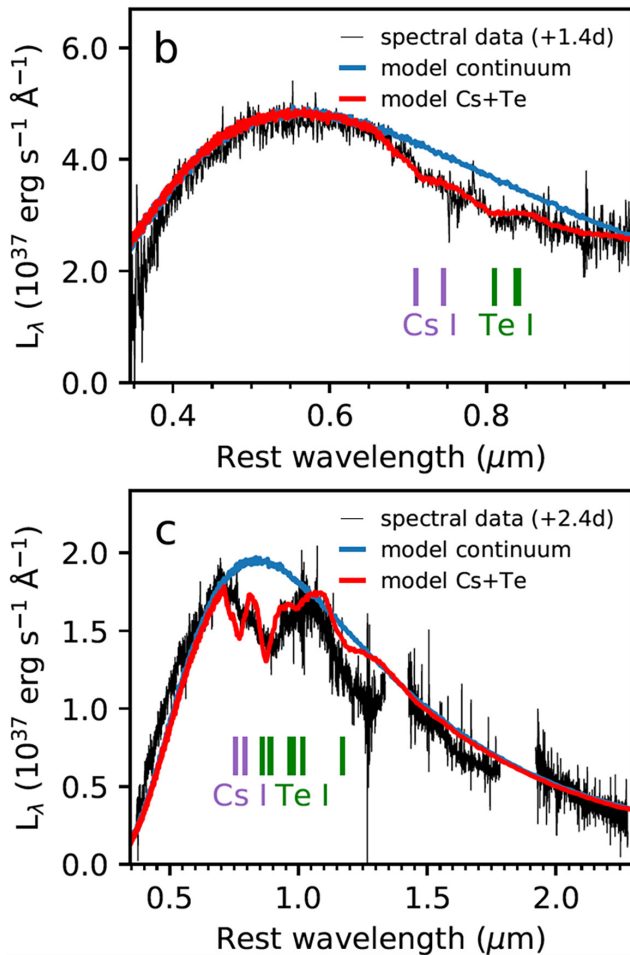


圖6. 千級新星AT2017gfo的光譜。上圖為NTT在爆發後1.4天所拍攝到的(黑線)，藍線為模型假設的連續譜，紅線為擬合出來的結果，跟銫(Cs)與碲(Te)的譜線位置相符。下圖則為Xshooter在爆發後2.4天所拍攝，可見跟銫與碲的吸收特徵更明顯了。(©. Smartt, Chen et al. 2017 Nature, 551, 75.)

我想我們是幸運的，偵測到 neutron star merger 的事件比我們預期的早。在天時(天氣好)地利(南半球天區)人和(支援天文學家熟稔儀器運作)之中完成了觀測任務。但我想也並不全然是運氣好，我們找尋重力波的光學對應體已經兩年了，從一開始很多人不看好，認為我們什麼都不會找到。到現在，變成人人搶著做的熱門課題。如果這個小小的故事有給我一點啟發，就是，機會是留給堅持住的人與準備好的人。我何其幸運生逢其時，又可躬逢其盛！僅以此篇文章記錄下這難得的經驗，並且感謝這一路上一直支持我的家人，師長與朋友們。

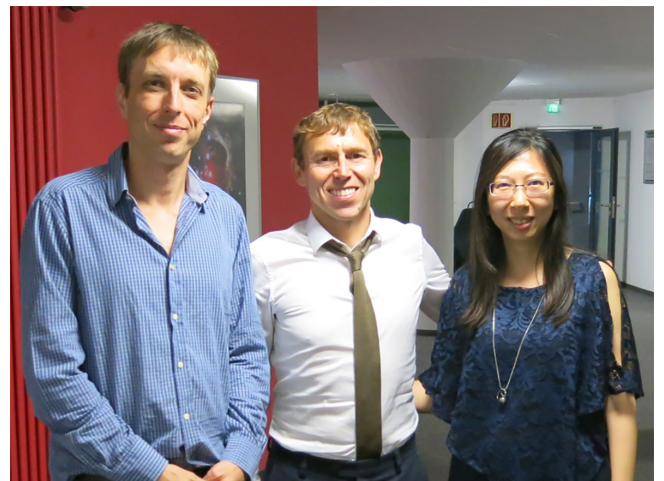
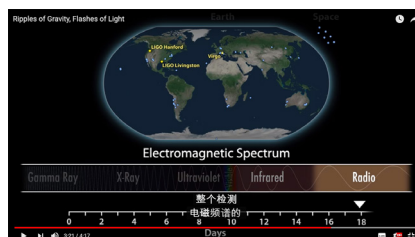


圖7. 該篇自然期刊論文的前三作者，左起為Anders Jerkstrand 博士、Stephen Smartt 教授與筆者，在歐南天文台記者會當天合影
陳婷琬：該篇自然期刊論文第二作者。德國洪堡獎金，馬克斯普朗克地球外物理研究所博士後研究員。

YouTube相關影片：



ESO Telescopes Observe First Light from Gravitational Wave Source
<https://www.youtube.com/watch?v=WucRHOPTpD4>



Ripples of Gravity, Flashes of Light
https://www.youtube.com/watch?v=EtIkOjQ0_50



Caltech-led GROWTH Strikes Gold
<https://www.youtube.com/watch?v=lvejpeC6z5I>