〔評論〕高能微中子天文學曙光乍現

金升光

微中子在所有已知的基本粒子中，可算是科學家最不了解的一種。粒子物理標準模型裡的微中子只透過弱交互作用和其他粒子起反應，和光子一樣沒有靜止質量。電子、緲子（muon）、陶子（tauon）和分別對應這不同三代的微中子以及它們的反粒子共同組成了輕子（lepton）家族。近年來，實驗證實了微中子振盪的存在（參閱 2015 年諾貝爾物理獎報導），電子微中子、緲子微中子、陶子微中子彼此之間可以相互轉換，顯示微中子靜止質量應該不等於零。然而，沒有人知道微中子的確切質量，也不確定微中子和它們的反粒子是否相同。另一方面，地球的大氣層持續受到高能量的宇宙射線轟擊，主要成份包含質子和其他更重的原子核，這些帶電粒子受到銀河系與地球磁場的影響，很難去追蹤它們的來源。微中子不帶電，不受磁場影響，還可以輕易穿透星球的核心，是電磁波、重力波之外，天文物理學家夢寐以求的第三隻眼。這些特性卻也是微中子偵測的困難處，必須透過 10 公尺以上甚至公里等級的大型裝置才能捕捉分析少數來自外太空的微中子。多年的研究只確認了太陽和超新星 1987A 發出的微中子，直到 2017 年 9 月，位在南極的「冰立方」（IceCube）微中子天文台偵測到一顆高能微中子 IceCube-170922A，才露出了一線曙光。

「冰立方」與高能微中子

基本粒子的質量和能量通常用電子伏特 eV 爲單位。電子質量約 0.5 MeV；質子質量約 938 MeV，接近 1 GeV；目前估計微中子的質量約在 eV 數量級以下。太陽微中子的能量大多處於 100 keV 至 1 MeV 量級之間；超新星微中子的能量能夠達到 10 MeV 的量級，爆發時的激震波或可產生 TeV（10^{12} eV）級的高能微中子。當年偵測到超新星的日本神岡偵測器像個寬、高約 16 公尺的大水箱；後續建造的超級神岡微中子偵測器（Super-Kamiokande）寬、高約 40 公尺。高速的微中子與水中的質子、電子等粒子碰撞產生高速的電子或正子。當帶電粒子運動速度超過水中的光速時，就像超音速戰機產生音爆，會發出契忍可夫輻射，由密布的光電管接收並偵測分析。「冰立方」使用南極的冰層代替神岡的純水。86 條垂直的洞穴深入冰層 2,450 公尺左右，每個洞穴最底端的 1 公里都布置了 60 個 10 吋大的光電裝置，含數位處理電腦，串成 1 串。相鄰洞穴間隔 125 公尺，總共 5,160 個光電裝置（digital optical modules）在地底形成了一個體積立方公里等級的 3 維陣列，是目前世界上最大的微中子偵測器之一。

神岡測得的信號多半來自電子微中子。高能緲子微中子產生高速的緲子放出契忍可夫輻射，會在光電裝置陣列中留下明顯的軌跡，是冰立方主要的偵測目標

之一。回溯分析緲子軌跡，可以反推微中子的入射方向，可達 0.3°的準確度。宇宙射線在大氣層中碰撞後產生的緲子或微中子數量可能是外太空信號的 10 萬倍或百萬倍，公里厚的岩層或冰層有助於降低雜訊。南極的偵測器對於來自北半球天空的信號比較靈敏。而且，大氣層產生的微中子有特定的能量分布，超過 100 TeV 或 1 PeV（= 10^{15} eV = 1000 TeV）大多來自外太空。IceCube-170922A 正是這樣的例子。分析冰立方所窺見的緲子能量（約 24 TeV），估計這顆從地平線下入射的緲子微中子能量約 290 TeV。不到 1 分鐘，2016 年 4 月才啓用的即時自動警報系統隨即向全球網路 GCN/AMON Notice[1]發出通告。

這並不是系統頭一次發出類似的微中子警報。觀測網上的成員包含位在地中海海底的微中子偵測器和地面或天上的望遠鏡照例要不是沒看到特定目標，就是無法從眾多目標中辨別出真正的來源。直到 6 天後 9 月 28 日，NASA 的費米太空望遠鏡團隊 Fermi-LAT 透過《天文電報》（Astronomer's Telegram）報告他們的分析，指出一顆已知的「耀變體」（blazar）TXS 0506+056 正處於活躍期（亮度增加 6 倍），和冰立方估計的方位相符。接續的多波段觀測進一步支持這個結論。由上千位共同作者的綜合研究報告和幾篇相關論文在 2018 年 7 月 13 日正式刊出。冰立方計畫的主要資助者美國國家科學基金會（NSF，National Science Foundation）照例先在華府召開記者會，此間各媒體多有轉述報導。依照 2004 年美國國家科學院報告中的估算，總建造經費含開辦費用應該超過兩億五千萬美元。

高能宇宙射線與「耀變體」

人造的加速器還沒有能力產生 PeV 甚至 EeV（10^{18} eV）的高能粒子束；宇宙射線卻可以。許多可能的天文物理機制和可疑的天體像是伽瑪射線爆（GRB）、超新星殘骸（SNR）、波霎、黑洞雙星、活躍星系核（AGN）等都是熱門的候選者。某些理論認爲，產生高能粒子的相同機制或相關環境也會伴隨產生能量等級相當的伽瑪射線。2008 年升空的費米太空望遠鏡觀測到的伽瑪射線源已經編成目錄定期追蹤。2015 年發表了第三版，通稱「3GFL」（the third Fermi Large Area Telescope source catalog），包含 3,033 個伽瑪射線源和它們逐月的亮度變化，其中超過半數是活躍星系核，以耀變體爲主。先前有研究將微中子信號和這些特定天體比對，不過都沒能成功確認微中子的來源。

粒子能量越高，受銀河系內磁場的偏轉影響越小。專門偵測高能宇宙線次級粒子射叢（shower，或稱「簇射」）的奧格天文台（Pierre Auger Observatory）團隊在 2017 年發表論文指出，能量超過 8 EeV 以上的超高能粒子應該是來自銀河

[1] GCN/AMON Notices, https://gcn.gsfc.nasa.gov/amon.html
GCN = GRB Coordinates Network
AMON = Astrophysical Multi-messenger Network Observatory

系以外。8 EeV 接近 1.3 焦耳。也就是說，單單這一顆粒子的動能就足以抬高 1 公斤的物體離地 13 公分！理論上，宇宙射線（例如質子）的能量如果太高，會和遍布的宇宙微波背景輻射光子產生反應，產生 GZK cutoff，這是以 1966 年論文中三位科學家 Greisen、Zatsepin、Kuzmin 命名的宇宙射線能譜截止點。如果宇宙射線粒子是鐵原子核，這截止能量還會再高一點。

TXS 0506+056 是 3GFL 目錄上亮度排名前 50 的耀變體，可見光星等約 15 等，不算是特別突出。耀變體是活躍星系核的一種，可參閱《科學月刊》527 期（2013 年 11 月）〈類星體 50 年〉一文的介紹。原文「blazar」一詞是在 1979 年所提出，將「蠍虎天體」（BL Lac objects）和部份有亮度劇烈變化的類星體合稱，並寫在 1980 年天文與天文物理年度評論裡而成爲正式名詞。在 TXS 0506+056 非熱輻射的連續光譜中幾乎看不出任何譜線，無法確認它的距離，也不能計算真正的光度。透過加納利群島上口徑 10.4 公尺的望遠鏡（Gran Telescopio Canarias，GTC），最近終於辨認出幾條微弱的譜線，紅移 0.3365，約相當於 57 億光年。這使得 TXS 0506+056 成爲在此方圓之內光度最強的耀變體之一。

高能微中子天文學

活躍星系核、黑洞或中子星系統中的高能噴流，甚至一般吸積盤噴流的組成、構造和起源向來都是理論和觀測研究的焦點之一。高能微中子的存在意味著強子（可能是質子）加速以及後續的碰撞與衰變過程，透露噴流的秘密。另一方面，縱使耀變體是高能微中子的來源，恐怕也只能解釋一部份偵測到的高能微中子。除了持續累積觀測數據，提升多元訊息天文學（multi-messenger astronomy）多波段聯合觀測的效率，新一代的微中子偵測器 KM3NeT、Hyper-Kamiokande、IceCube-Gen2 可望能將高能微中子天文學、乃至於宇宙線、暗物質與基本粒子研究推展到新的境界。

延伸閱讀

IceCube Collaboration *et al.*, *Science* 361, eaat1378 (2018)