第 2 單元：太陽風暴時間軸

「日冕物質拋射」(Coronal Mass Ejection，簡稱 CME) 是大量電漿伴隨磁場，從太陽大氣層向外拋射的劇烈現象，可視為最強烈的太陽風暴之一。當 CME 抵達地球時，會首先擾動地球磁場，引發磁暴，也就是一種全球性的地磁擾動，可能干擾衛星運作與地面電力系統。磁暴期間，產生的高能粒子會沿著地磁線進入極區大氣，與氣體分子碰撞並釋放能量，形成絢麗奪目的極光。

本單元將引導你透過三組太陽風暴事件的時間軸，認識太陽風暴從爆發到對地球及其他行星系統造成影響的完整過程。

題組一

太陽風暴事件時間軸：
星期二 下午 04:50：太陽表面發生氣體噴發，產生日冕物質拋射（CME）。
星期四 凌晨 03:36：電漿風暴抵達地球，開始擾動地磁場，引發磁暴。
星期四 凌晨 05:20：磁暴強度達到最高峰。
星期四 凌晨 05:35：極光亮度達到最強。
星期四 上午 11:29：極光活動明顯減弱。
星期四 下午 02:45：太空環境恢復正常，風暴影響結束。
根據以上太陽風暴事件時間軸回答下列問題：

問題 1：
從太陽氣體噴發到地球附近偵測到電漿風暴為止，經過了多少時間？

解答：
根據時間軸，太陽風暴於星期二 16:50 發生，並於星期四 03:36 抵達地球，總共經過約 34 小時 46 分鐘。

問題 2：
自電漿風暴抵達地球後，極光亮度在多久後達到最強？

解答：
電漿風暴於 03:36 抵達地球，極光最強出現在 05:35，兩者之間相隔 1 小時 59 分鐘。

問題 3：

從偵測到電漿風暴抵達地球起，到太空環境恢復正常為止，這場風暴在地球附近共持續了多久？

解答：

電漿風暴於 03:36 抵達地球，至 14:45 結束，共影響地球 11 小時 9 分鐘。

問題 4：

若地球與太陽的平均距離為 1.5 億公里，這場風暴從太陽傳送至地球的平均速度為何？若冥王星距離太陽約為地球的 40 倍，則風暴傳送至冥王星約需多久時間？

解答：

平均傳送時間為約 34.77 小時（即 34 小時 46 分鐘）。

平均速度為：1.5 億公里 ÷ 34.77 小時 ≈ 4,313,000 公里／小時。

冥王星距離太陽約為 60 億公里（即地球距離的 40 倍）。

若以平均傳送時間 34.77 小時（即 34 小時 46 分鐘）乘上 40 倍 計算，則約需 1,391 小時（約 58 天）。

或以距離換算：60 億公里 = 6,000 百萬公里，平均速度 4.313 百萬公里／小時，6,000 ÷ 4.313 ≈ 1,391 小時（約 58 天）。

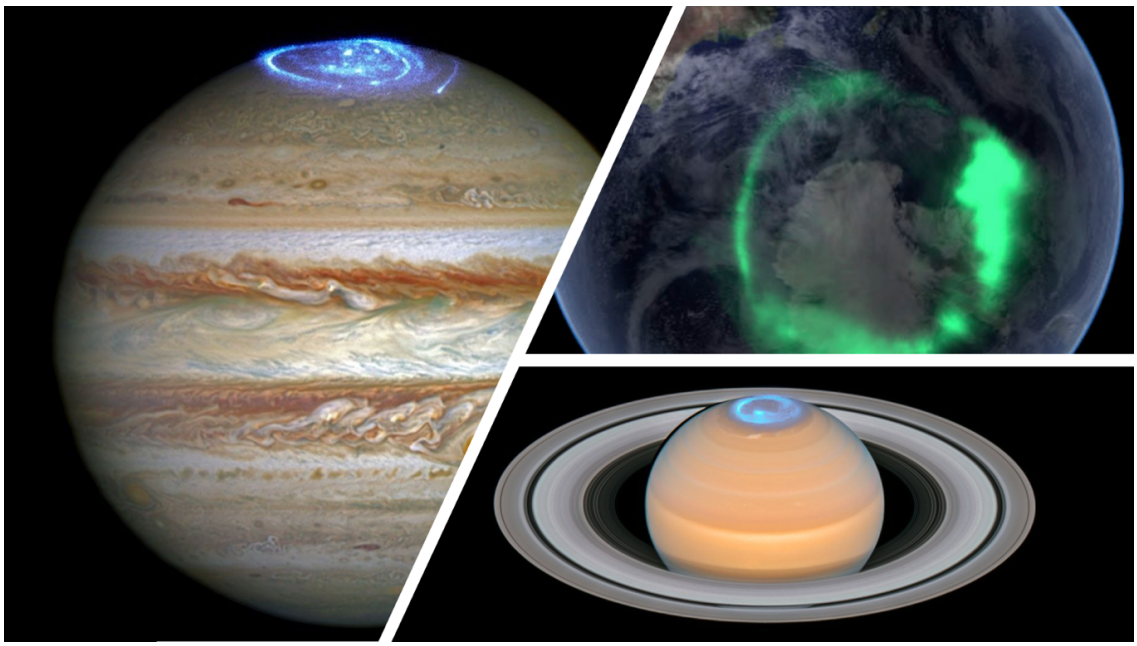
題組二

根據觀測資料，2000 年 11 月 8 日，太陽發生一次大規模日冕物質拋射（CME）事件。該 CME 於 11 月 12 日 抵達地球，並引發極光現象；而在 12 月 8 日，哈伯太空望遠鏡偵測到土星也出現極光，顯示這次 CME 的影響延伸至外太陽系。當時地球、木星與土星幾乎排列於太陽同一側且接近一直線，其與太陽的平均距離如下：

地球：1.5 億公里

木星：7.78 億公里

土星：14.3 億公里



圖說： 除了地球之外，當日冕物質拋射（CME）抵達木星或土星時，也可能在這些行星上引發極光現象。

根據以上太陽風暴事件回顧回答下列問題：

問題 5：

CME 抵達地球與土星分別花了幾天？

解答：

自 11 月 8 日至 11 月 12 日，CME 抵達地球共歷時 4 天。

自 11 月 8 日至 12 月 8 日，CME 抵達土星共歷時 30 天。

問題 6：
CME 從太陽傳至地球的平均速度為多少？（單位：百萬公里／小時）

解答：
距離為 1.5 億公里，時間為 4 天（即 96 小時）。
換算單位：1.5 億公里等於 150 百萬公里。
平均速度為 150÷96 ＝ 1.5625 百萬公里／小時（約 1.56 百萬公里／小時）。

問題 7：
CME 從地球到土星的平均速度為多少？（單位：百萬公里／小時）

解答：
土星與地球之間的距離為：
14.3 - 1.5 = 12.8 億公里 = 1,280 百萬公里
時間為：30 - 4 = 26 天 = 624 小時
平均速度為：1280 ÷ 624 ≈ 2.05 百萬公里／小時

問題 8：
CME 通過地球後，需多少時間才能到達木星？因此，木星上的極光預計在何時出現？

解答：
木星與地球之間的距離為：7.78 − 1.5 ＝ 6.28 億公里（即 628 百萬公里）。
假設其在地球之後仍維持 2.05 百萬公里／小時 的速度，則所需時間為：
628 ÷ 2.05 ≈ 306 小時（約 12.75 天）。
CME 抵達地球時間為 11 月 12 日，若再經約 12.75 天抵達木星，則木星上的極光預計出現在 11 月 24 日至 25 日左右。

問題 9：

CME 在從太陽到土星的旅程中，是加速還是減速？

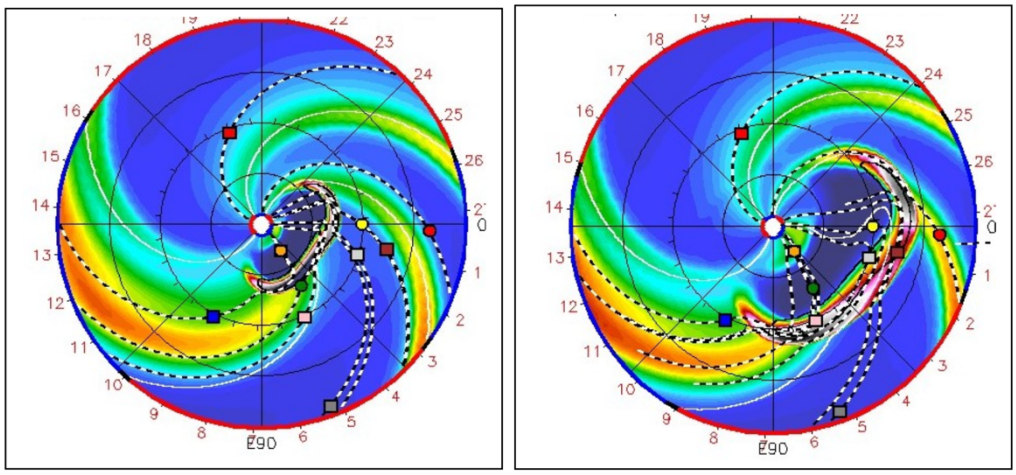
解答：

CME 從太陽到地球的平均速度約為 1.56 百萬公里／小時，而從地球到土星的平均速度約為 2.05 百萬公里／小時。由於後段傳輸速度明顯增加，因此可判定 CME 在從太陽傳送至土星的過程中呈現加速現象。

事實上，CME 的傳播速度並非固定不變，而是可能受到太陽風結構、行星間磁場環境及粒子推動機制影響而加速或減速。本案例中，CME 在穿越外太陽系時呈現加速現象，反映了太陽風背景速度變化或行星際空間動態交互作用的重要性。不同情況下，CME 也可能因遇到高密度的太陽風區而發生減速，顯示其行進特性具有高度變異性。

題組三

下圖為太陽風在火星軌道內形成的螺旋結構之模擬影像，用以呈現 2012 年 3 月 6 日太陽風暴發生後的太陽風分布狀況。本模擬由 NASA 製作，顯示日冕物質拋射（CME）從太陽向外擴散的過程，並描繪出日冕洞造成太陽風形成螺旋狀結構的現象。圖中所對應的模擬時間分別為 3 月 8 日（00:00）與 3 月 9 日（00:00）。



圖中各行星以圓形標示（黃色代表地球，紅色為火星，橙色為水星，綠色為金星），黑色同心圓則以每圈間隔 7,500 萬公里繪製。螺旋狀的結構為來自日冕洞所釋出的高速太陽風所造成；日冕洞為太陽大氣中磁場呈開放狀態的低密度區域，使得太陽風能高速逸出。而眉月形狀的雲團則代表此次太陽風暴所產生的日冕物質拋射（CME），該事件也在地球上引發壯觀的極光現象。根據模擬資料，這次 CME 在約 24 小時內橫跨 7,500 萬公里，朝向地球方向推進，顯示其極高的傳播速度與潛在影響範圍。

問題 10：

當日冕物質拋射（CME）抵達地球時，其速度約為多少公里／小時？

解答：

根據圖中的比例估算，在兩天之間，眉月狀的 CME 移動了約一格，也就是約 7,500 萬公里。這段距離耗時 1 天（24 小時），所以其速度約為 7,500 萬公里 ÷ 24 小時 = 約 300 萬公里／小時。

問題 11：

CME 後方的黑色空腔代表的是一個密度極低的空間區域。你認為這是如何形成的？原本填充該空腔的氣體去了哪裡？

解答：

CME 在前進過程中如同「鏟雪車」般，將前方的氣體掃至前方，因此原本在該區域的氣體被拋射推移而離開了空腔所在的位置。

問題 12：

若 CME 沒有減速，它會在何時抵達距太陽約 45 億公里遠的海王星？

解答：

CME 的速度約為 300 萬公里／小時，因此通過這段距離所需時間為 4500 ÷ 3 = 1500 小時，也就是 62.5 天。若從 3 月 6 日出發，約在 5 月 7 日抵達海王星。

參考資料：Space Math http://spacemath.gsfc.nasa.gov