

## 太空輻射對衛星任務影響及因應之道

黃楓台 國家太空中心正工程師

林俊良 國家太空中心主任

### 1. 前言

西元 1957 年蘇聯史波尼克(Spunik)衛星的發射開啟了人類的太空時代，人類透過衛星的發射，發現或證實過去在地球猜測的太空現象，最有名的一個例子就是范艾倫輻射帶(Van Allen radiation belt)。早在太空時代開始之前，約在 19 世紀末(1895 年)，挪威科學家克里斯蒂安·伯克蘭 (Kristian Birkeland) 等人，開始研究被捕獲帶電粒子的可能性。而後美國在 1958 年 1 月 31 日發射探索者一號(Explorer-1)衛星，其中攜帶蓋革計數器，在美國科學家范·艾倫教授的領導下，進行第一次宇宙射線實驗，最後，經由另外三個衛星任務，包括：探索者四號(Explorer-4)、先驅者一號(Pioneer-3)以及 Luna-3 號的實驗確定，有兩個輻射帶環繞地球<sup>1</sup>。太空輻射是人類進行太空活動一個必須克服的難題，本文將針對太空輻射對衛星任務的影響及其因應進行介紹。

全文共分成四節，第一節為前言，第二節介紹太空輻射的來源以及種類，第三節說明太空輻射對太空任務影響及其因應方式，另外也介紹台灣在太空輻射測試能量的整合，最後則是結論。

---

<sup>1</sup> Wikipedia, Van Allen Belt, [https://en.wikipedia.org/wiki/Van\\_Allen\\_radiation\\_belt](https://en.wikipedia.org/wiki/Van_Allen_radiation_belt)

## 2. 太空輻射的來源以及種類

太空與地面環境有很大不同，主要是真空(vacuum)、中性大氣(neutral)、電漿(plasma)、輻射(radiation)以及微流星體(micrometeoroid)與太空碎片(space debris)。這些太空環境會對衛星任務產生不同的影響，以下將探討太空輻射對衛星的衝擊。

### 2.1 輻射

輻射是能量的一種形式，它以射線、電磁波和/或粒子的形式發射或傳輸。在特定波長下，人類可以看到或感知到輻射的存在，例如：可見光或是紅外輻射，但是大多數的情形必須倚賴特殊儀器才能偵測到它們的存在，例如：X射線和 $\gamma$ 射線。輻射依據能量的大小，可以分成非游離輻射（低能量）或是游離輻射（高能量）。游離輻射是由具有足夠能量的粒子組成，這些粒子足以將電子由其軌道上完全去除，從而產生帶正電的原子。而對於能量較低的非游離輻射，則無法除去電子。

游離輻射，包括： $\alpha$ 粒子（以非常高的速度移動的氦原子核）、 $\beta$ 粒子（高速電子或正電子）、 $\gamma$ 射線、X射線以及來自銀河系的宇宙射線。非游離輻射則是包括：射頻、微波、紅外線、可見光和紫外線。

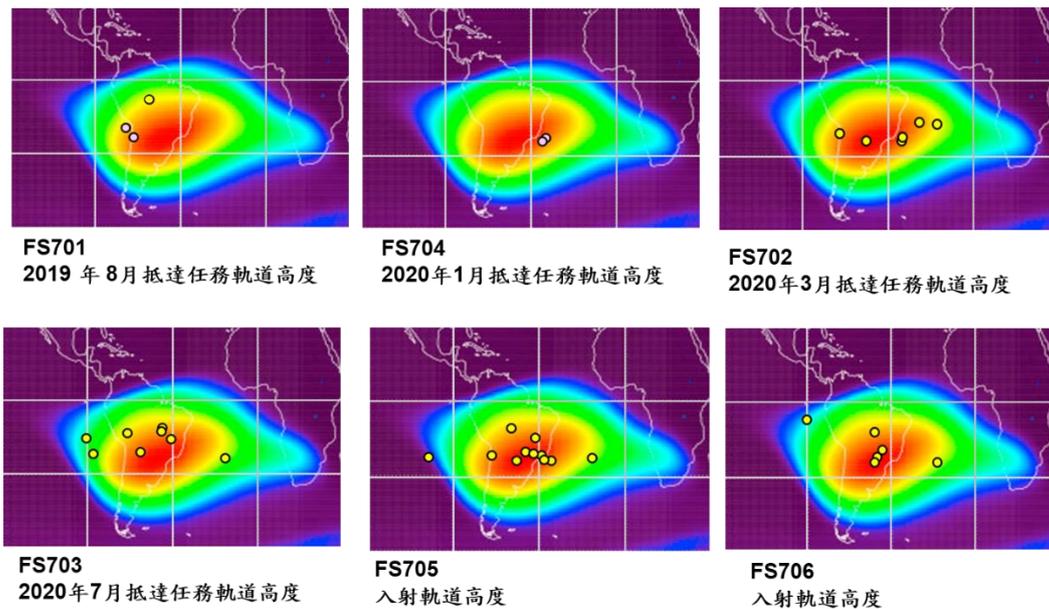
### 2.2 太空輻射

太空輻射與在地球上經歷的輻射種類是不同的。太空輻射是由原子組成的，隨著原子在太空中以接近光速的速度移動時，電子被剝離，僅原子的原子核保留

下來。太空輻射由三種輻射組成：(1)被困在地球磁場中的粒子；(2)太陽耀斑期間向太空發射的粒子；和(3)銀河宇宙射線，所有這些類型的太空輻射都屬於游離輻射。除了一些特定波長，例如可見光、無線電波、紫外線和某些高能游離輻射外，在地球上受到地球大氣以及磁場保護，大部分的輻射無法到達地球表面，使人類免受來自太空的輻射傷害。然而若是我們去登高山，或乘坐飛機，就會逐漸失去大氣層保護而受到輻射傷害，特別是上到國際太空站，甚至是登陸月球的太空人。以下進一步介紹太空輻射來源。

#### A. 地球輻射帶

地球輻射帶是指被地磁場所捕獲具備高能量的帶電粒子區域。當太陽和地磁相互作用時，一些高能粒子會被捕獲並集中在場線間，這個集中區域稱為范艾倫輻射帶。范艾倫輻射帶包括兩個區域，內輻射帶高度在地球上空 0.2 到 2 個地球半徑(註：地球半徑約 6378 公里)的範圍。由於地球及其磁偶極子的非同心性，在南大西洋異常區域(South Atlantic Anomaly, 簡稱 SAA)內，內輻射帶邊界可能會下降到距地球表面約 200 公里處，也因此我們也必須關注衛星通過該區域太空輻射對衛星的影響。以福衛七號衛星星系為例，福七衛星自 2019 年 6 月 25 日發射至 2020 年滿一年，6 顆衛星累計因經過 SAA 區域引發本體功能異常，而進入安全模式的狀況共計 37 次，如圖一所示。圖一中紅色標示範圍即為 SAA 區域，小圓點標示衛星於該處發生單事件翻轉(Single Event Upset, 簡稱 SEU, 有關 SEU 在第三節介紹)。



圖一：福衛七號衛星星系 2019 年發射滿一周年後於 SAA 發生 SEU 次數統計

內輻射帶包含高濃度電子，能量範圍在數百 keV 範圍內，以及能量超過 100 MeV 的質子。外輻射帶主要由地球磁層捕獲的高能 (0.1-10 MeV) 電子組成，由於此區域更容易受到太陽活動的影響，因此它比內輻射帶更具可變性。外輻射帶的形狀幾乎是環形的，範圍由從 3 個地球半徑延伸到 10 個地球半徑。

## B. 太陽宇宙射線

太陽宇宙射線是由太陽週期性地噴出巨大的能量。產生太陽耀斑期間，又稱為日冕物質拋射(coronal mass ejection)，太陽會產生大量以質子為主的帶電粒子流，通常稱其為太陽粒子事件(solar particle event)，太陽粒子事件多數情況下會持續幾天的時間，但是它們可能會在幾個小時內消退或延續幾個星期。

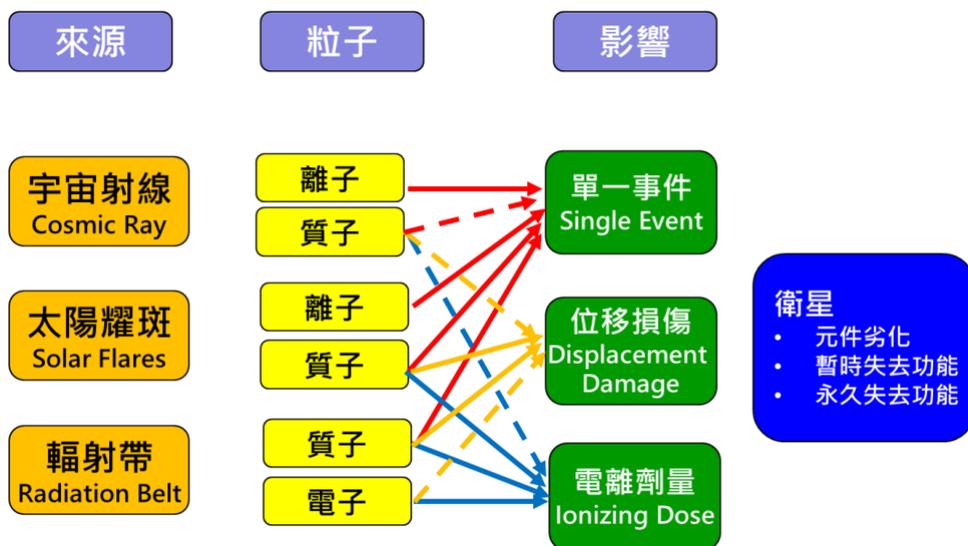
### C. 銀河宇宙射線

銀河宇宙射線來自於太陽系以外低通量(約 4 particles/cm<sup>2</sup> · s)但是高能量(約 10<sup>2</sup>MeV-10<sup>6</sup>GeV)的帶電粒子。銀河宇宙射線幾乎包含週期表上所有的元素，但主要成分是約 85%的氫(H)、14%的氦(He)以及 1%的重離子。銀河宇宙射線的通量與太陽週期有關，太陽活動大約以十一年為一個週期，當太陽活動處於低峰期，銀河宇宙射線能量高。反之，在太陽活動在高峰期時，銀河宇宙射線的能量降低。

## 3. 太空輻射對太空任務的影響及其減緩措施

### 3.1 對太空任務的影響

太空輻射會與衛星上的電子元件或材料相互作用，進而引發所謂「太空輻射效應」，太空輻射主要包括：總劑量效應與單事件效應。這些效應會對衛星產生重大不良的影響，如圖二所示。



圖二：太空輻射來源及其影響

## A. 總劑量效應(Total Dose Effect, 簡稱 TDE)

沉積在材料上的能量稱為輻射劑量。輻射劑量的多寡除了取決於材料本身外，也與輻射類型及其能量有關。總劑量效應包含以下：

a.總電離劑量 (Total Ionized Dose, 簡稱 TID)：當電子和質子在用於電子設備絕緣的介電層中產生過量電荷時，會引起總劑量效應。總劑量效應是累積性的，需要長期暴露於輻射環境下，而後設備會逐漸退化。因此，當衛星持續在輻射環境工作，其電子設備會隨時間的推移會累積總電離劑量損壞。但衛星故障歸究於這種現象在實務上並不易被判定。

b.位移損傷 (Displacement Damage, 簡稱 DD)：位移損壞是核子相互作用 (通常是散射) 的結果，核相互作用會導致晶格缺陷。位移損壞會降低少數載子壽命(Minority Carrier Lifetime)，典型的影響是電晶體的增益和洩漏電流降低<sup>2</sup>。

## B. 單事件效應 (Single Event Effects, 簡稱 SEE)

單事件效應是一種干擾電路正常運行的電子干擾，是由單個離子通過或靠近電路中的敏感節點而引起的。單事件效應可以分成非破壞性與破壞性兩類，最常見的是：

---

<sup>2</sup> 資料來源：<https://wpo-altertechnology.com/displacement-damage-testing/>

- a.單事件翻轉 (SEU): 當輻射感應電流導致記憶體自行更改內部狀態的一種現象。根據經驗，這是國內福衛系列衛星最常遭遇的情況。
- b.單事件閃鎖 (Single Event Latchup, 簡稱 SEL): 因單一高能粒子貫穿半導體結構, 使其寄生結構產生變異, 致功能永久喪失的一種現象。主要影響 CMOS 元件, 例如: 原是 PNP 四層結構的矽控整流器(SCR), 單一帶電粒子入射產生瞬態電流, 觸發矽結構使其導通, 拆解為一個互相堆疊的 PNP 電晶體和 NPN 電晶體。SEL 會對晶元造成不可修復的傷害。
- c.單事件瞬態 (Single Event Transient, 簡稱 SET): 由單一高能粒子撞擊引起的集成電路節點處的瞬時電壓偏移 (電壓尖峰) 的一種現象。
- d.單事件燒毀(Single Event Burnout, 簡稱 SEB): 因單一高能粒子撞擊設備, 引起局部大電流狀態, 導致災難性故障的現象。

上述單事件翻轉是非破壞性單事件效應, 又稱為軟錯誤(soft error), 而單事件閃鎖、單事件瞬態以及單事件燒毀為破壞性單事件效應, 又稱為硬錯誤(hard error)。

太空輻射對衛星各個次系統的影響，如表一所列。

表一：輻射環境度對衛星的影響

	姿控	航電	電力	推進	結構	通訊	熱控
總劑量 效應	星象儀 鏡頭或 姿控感 測器退 化	退化	太陽能 晶片轉 換效率 下降	-	-	性能退 化	$\frac{\alpha}{\epsilon}$ 改變
單事件	翻轉	翻轉 門鎖	雜訊	-	-		-

資料來源：Alan C. Tribble, The Space Environment Implication for Spacecraft Design, Princeton University Press, 2003

### 3.2 減緩措施

太空輻射對於衛星的損害無可避免，但是可以透過減緩措施降低傷害。首先在總劑量效應方面，可以藉由屏蔽、降額(derating)以及一些電路設計，將總劑量效應降至最低。對於單事件效應，屏蔽的效果是最小的，通常會結合錯誤檢測與糾正法 (Error Detection and Correction, 簡稱 EDAC)、異常檢測和重新啟動以及備品來減緩單事件效應。

為因應太空輻射環境對於衛星的影響，系統設計上可以考慮表二所列建議，以降低太空輻射衝擊。

表二：抗輻射設計指引

方式	說明
屏蔽	關鍵元件加金屬外殼或在敏感電子元件上加以遮罩，以最小化劑量和劑量率的影響
設計/零組件選擇	批次化採購商規或軍規零件。大量嚴格篩選關鍵零組件，挑出符合總劑量安全係數，並且具有防閃鎖和翻轉功能者。對於批次符合規格者列管庫存備用
備品 (redundancy)	涵蓋備份電路/零組件的電子系統與太陽能電池板等，並有可遙控切換組件的功能
回復演算法	設計能夠從閃鎖或故障中自動恢復(重置)系統的軟體
容錯設計	電路設計具有容錯功能，例如：具有投票機制(voting mechanism)或具有特定閃鎖功能的邏輯電路

### 3.3 台灣太空輻射驗測聯盟

有鑑於太空輻射測試對國內太空科技及其產業發展的重要性，國家太空中心與國內具備輻射測試與分析的產學研單位，包含林口長庚醫院、長庚大學放射醫學研究院、原委會核能研究所、中研院物理所、清大原科中心以及宜特科技股份有限公司，2020年7月21日共同簽署合作備忘錄，組成「台灣太空輻射環境驗測聯盟」，為完備我國太空環境檢測能量向前邁進一步。

如圖三所示的合作框架下，國家太空中心整合台灣輻射驗證與分析能量，以滿足國內廠商元件與電子零組件輻射驗證與測試需求，並由有經驗的資深工程師提供其測試結果與分析報告，協助國內廠家在元件與電子零組件抗輻射設計以及製程改善。

聯盟運作係由國家太空中心負責台灣太空電子零件驗證平台並規劃輻射驗證規範與測試程序，宜特科技負責商規電子零組件輻射測試以及輔助測試設備開

發，原委會核能研究所進行質子元件輻射劑量累積效應測試，長庚醫院負責 200 MeV 高能質子設備進行單一事件效應測試，清華大學原科中心負責高能 $\gamma$ 射線射源來模擬輻射環境測試，而中研院物理所與長庚大學則是負責測試資料分析。



圖三：台灣太空輻射環境驗測聯盟組成與分工

太空輻射環境，主要包含質子、電子與重離子。低地球軌道以質子為主，因此以國內所能提供的輻射測試能量而言，已可涵蓋質子對於電子零組件與元件影響的測試。此外近年來抗輻射電子市場快速的成長，其零組件/元件已經廣泛應用在太空、航空、軍事以及核能的設備上，根據美國 Verified 公司市場研究報告顯示抗輻射電子元件市場在 2019 年約有 10.5 億美元的營收，到了 2027 年預期可以達到 15.3 億美元的規模。希望透過聯盟的成立，整合台灣輻射測試能量，協助國內廠商抗輻射電子發展。

## 4. 結論

台灣有關太空輻射對於太空任務影響的基礎研究相當少，隨著第三期國家太空科技長程發展計畫開始執行，國家太空中心規劃 10 年內至少 10 顆自製衛星發射，為了提升國內衛星製造的能力，強化系統可靠度，國家太空中心目前與國內產學研界合作開發各種抗太空輻射的相關設計，希望以商用元件開發低成本高性能通用衛星平台以奠基台灣太空產業，協助國內廠商進軍深具潛力的國際太空產業市場。

## 參考資料

- [1] Alan C. Tribble, The Space Environment Implication for Spacecraft Design, Princeton University Express, 2003
- [2] NASA 網站: <https://www.nasa.gov/analogs/nsrl/why-space-radiation-matters>
- [3] Richard H. Maurer et.al., Harsh Environments: Space Radiation Environment, Effects, and Mitigation, Johns Hopkins APL Technical Digest, vol. 28, no. 1, 2008
- [4] 褚桂柏主編，航天技術概論，中國宇航出版社，2002