



發展太空級科學酬載 以先進電離層探測儀為例

趙吉光教授兼系主任

太空科學與工程學系 / 太空科學與科技研究中心

國立中央大學

低軌道衛星與無線通訊研討會、2022/1/27



內容



- 華衛一號－電離層電漿電動儀 (IPEI)
- 福衛五號－先進電離層探測儀 (AIP)
- 立方衛星－小型電離層探測儀 (CIP)





太空環境對衛星的影響

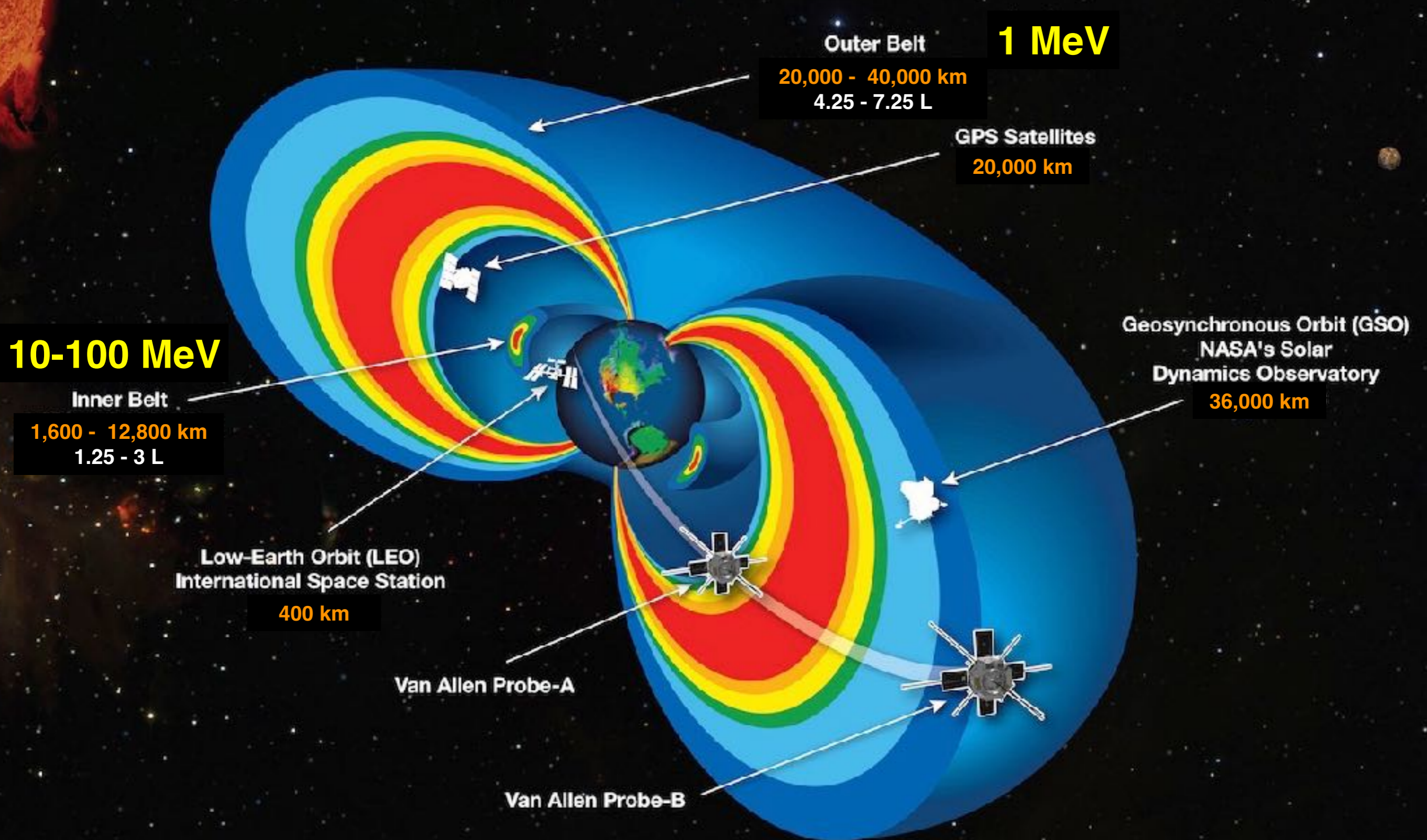


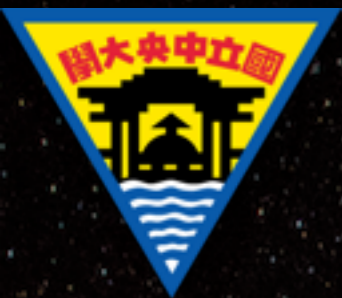
- **輻射**：非游離輻射的**溫度變化**（太陽照射與否）與**游離輻射**（極紫外光、X射線、 γ 射線等）的**累積效應**（Total Ionization Dose, TID）。
- **高能粒子**（電子、離子、宇宙射線）：**單粒子效應**（Single Event Effect, SEE）。
- **太空碎片**：撞擊（1公克物質可穿透 1 英吋鋁合金）。
- **振動、衝擊、音爆**：火箭運送。
- **真空**：逸氣與污染、無對流效應。
- **電磁相容**：衛星本體。
- **氧原子效應**。





范艾倫輻射帶

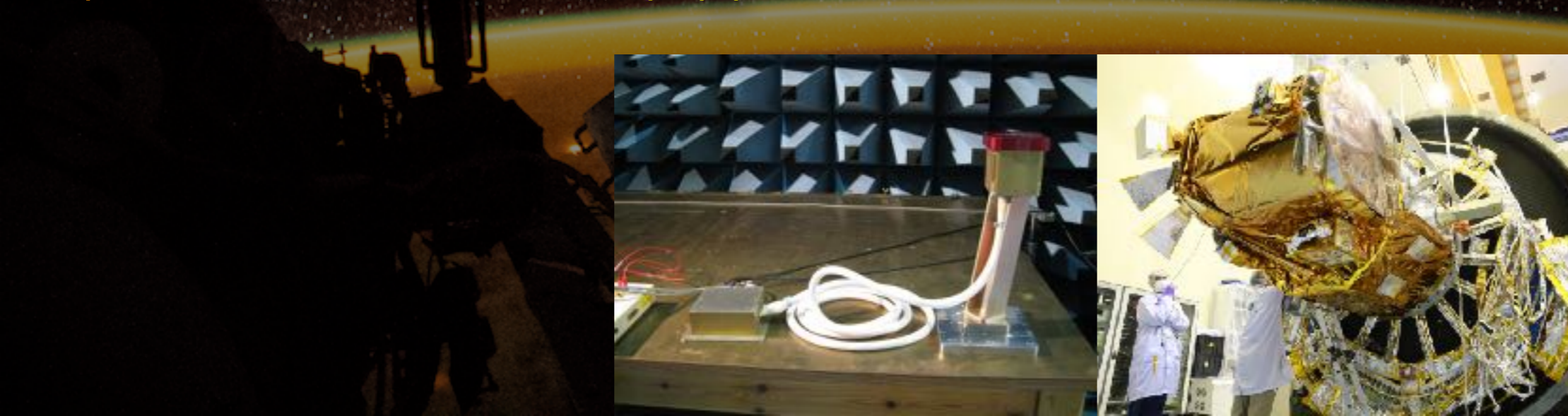




酬載 (Payload, P/L)



- 酬載是指飛行器或發射載具的運載能力，通常以重量來衡量。酬載可以是貨品、乘客、飛行員、彈藥、科學儀器 / 實驗、設備等（維基百科）。
- 運載火箭的酬載 → 衛星、太空船。
- 衛星或太空船的酬載 → 科學儀器、設備。
- 付錢運送的貨品或乘客。

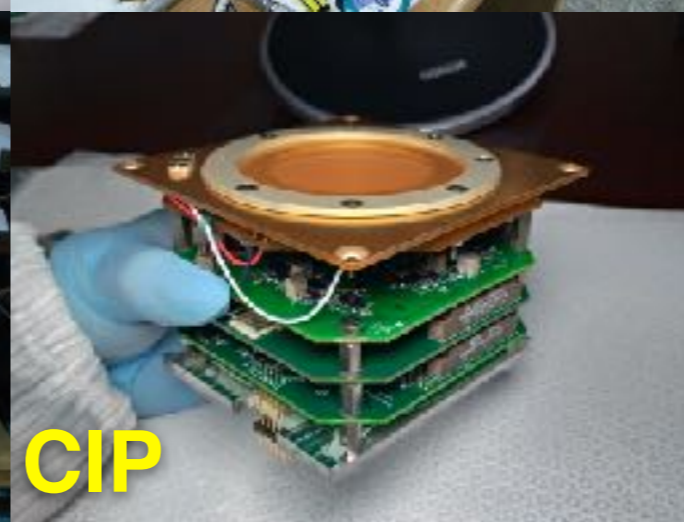
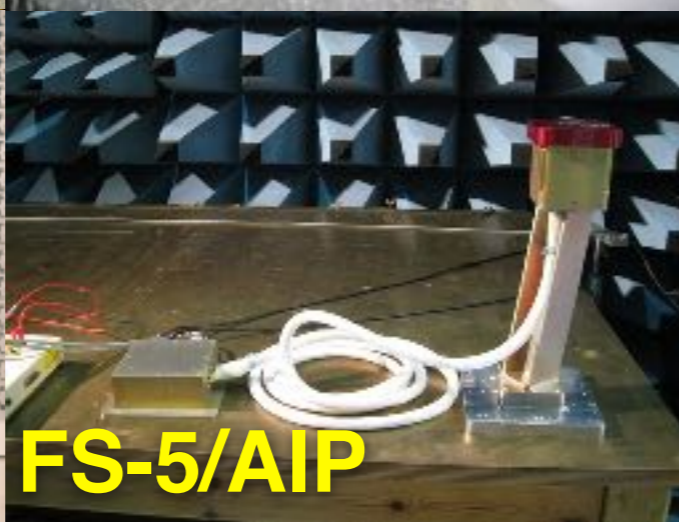




科學酬載研製



- 衛星資料分析（福衛一號） → 次軌道科學酬載（探空五號、探空七號、探空九號） → 衛星級科學酬載（福衛五號），逐步建立 AIP 完整飛行履歷，我國首次達到最高技術成熟度。

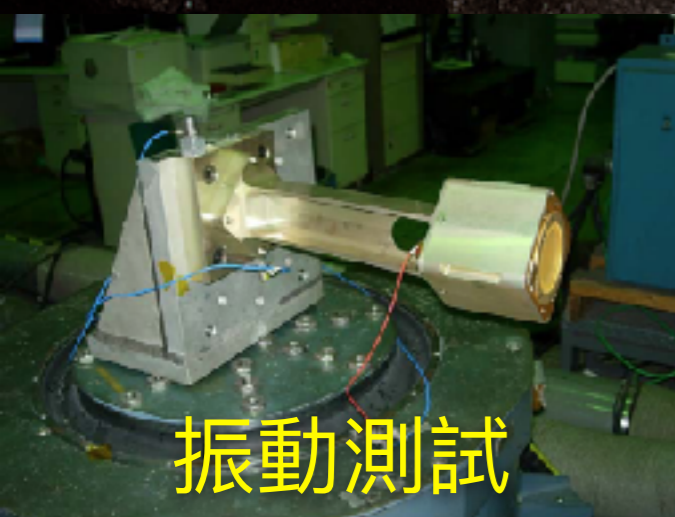




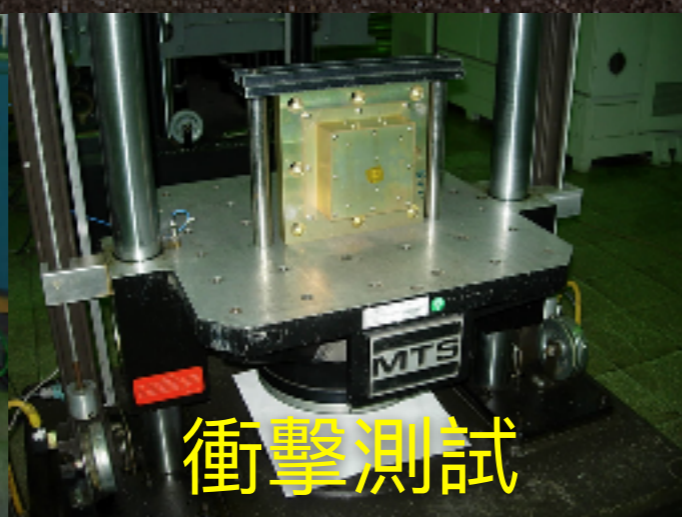
飛行履歷



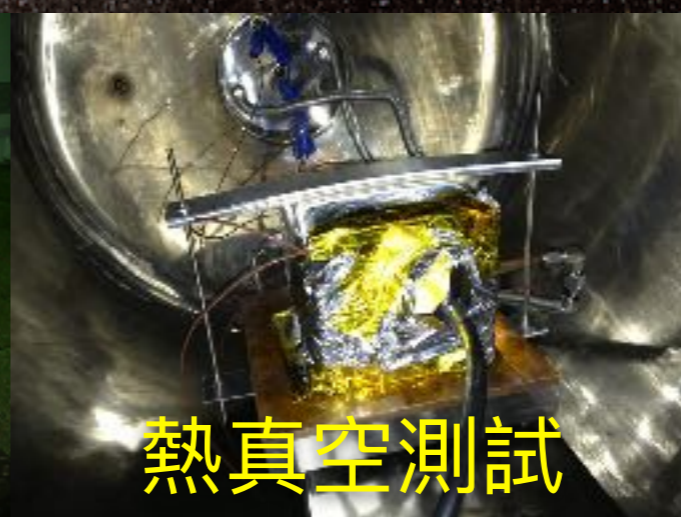
- AIP (設計壽命 **2年**) 長期執行任務超過 **4年** (2017/9/7 日首度在軌開機) , 資料可獲率 **> 93.6%** , 獲得科學資料超過 **148 GB** , 觀測時間超過 **14,650 小時** , 已上架 **NASA CDAWeb** 。



振動測試



衝擊測試



熱真空測試



傳導電磁相容



輻射電磁相容



遞交飛行體



發射活動



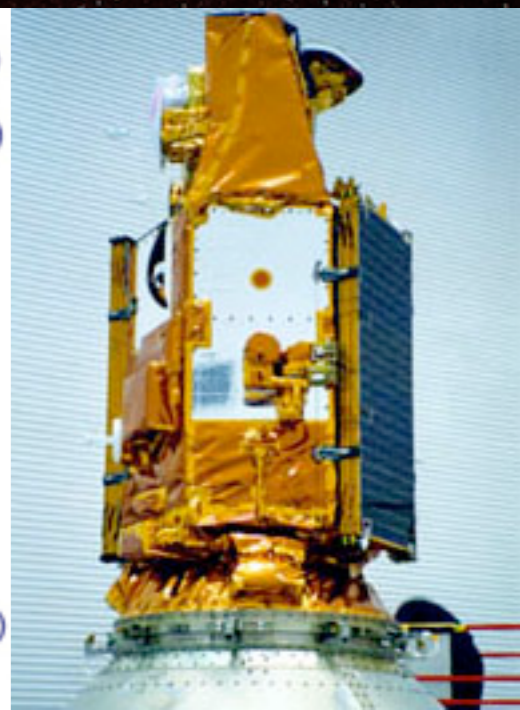
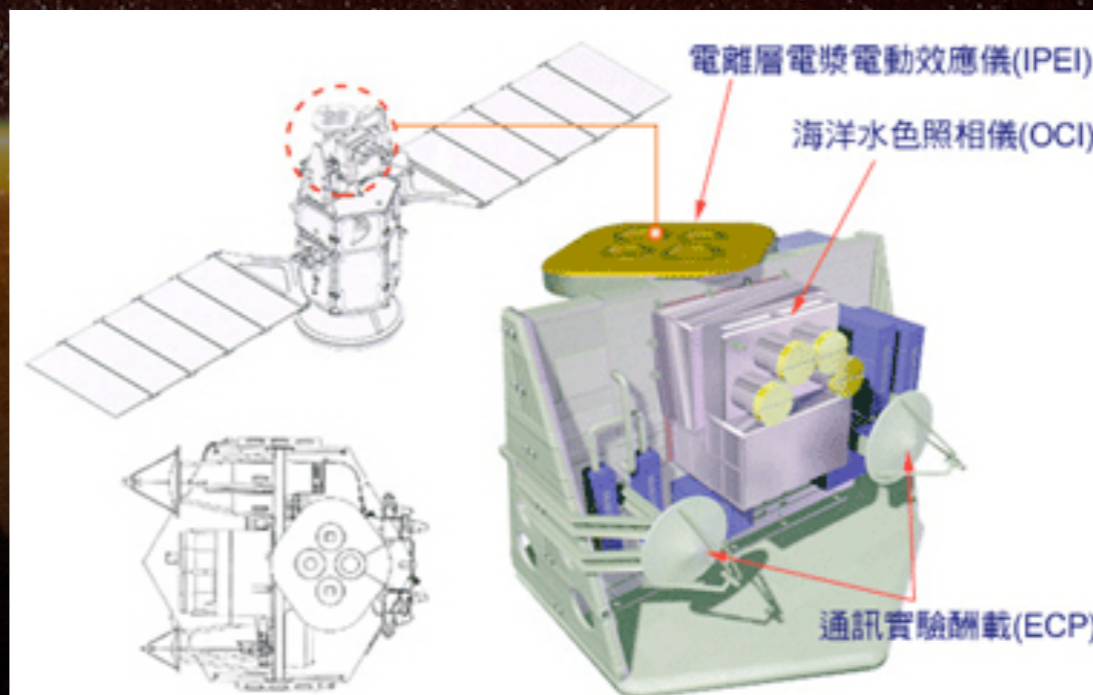
在軌測試



福爾摩沙衛星一號**科學實驗衛星**
重量：401 公斤。
形狀尺寸：六角柱形，高 2.1 m、寬 1.1 m、長 7.2 m（太陽能板）。
軌道：高度 600 公里，與赤道成 35 度傾斜角之圓形軌道。
繞行地球一周時間：約 96.7 分鐘。
設計壽命：4 年。
發射日期：1999/01/27。
功成身退：2004/06/17。

科學酬載

- 電離層電漿電動儀
- 海洋水色照相儀
- 通訊實驗酬載





離子捕獲儀

離子流向儀

離子流向儀

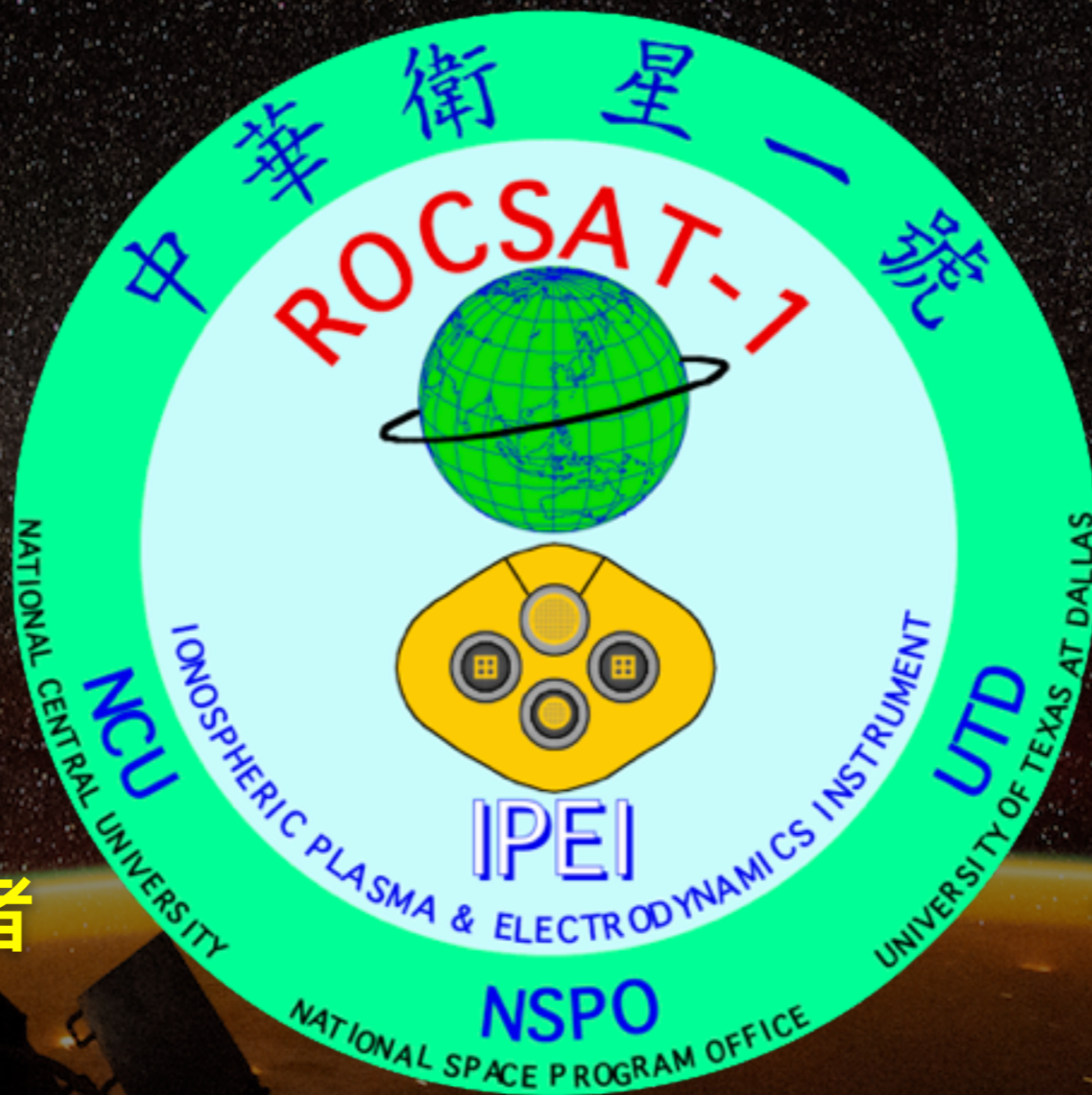
阻滯電位分析儀

電離層電漿電動儀 (IPEI)

Ionospheric Plasma and Electrodynamics Instrument



計畫分工



國立中央大學
太空科學研究所
資料中心 — **使用者**

美國德州大學
達拉斯分校
儀器製作 — **供應商**

國家太空中心 (國家太空計畫室)
計畫管理 — **金主**



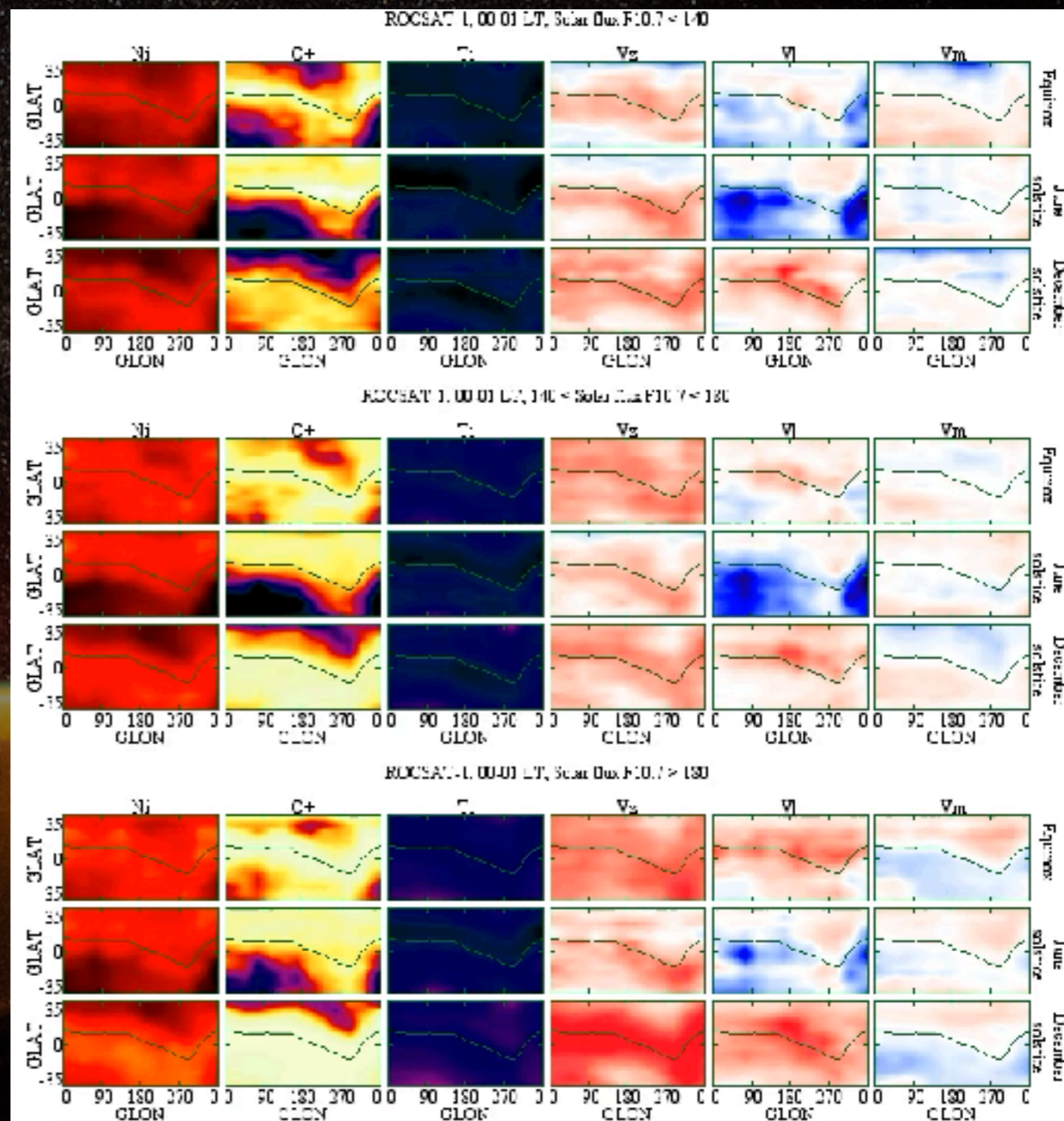
科學成果



科學研究豐碩：超過百篇 SCI 論文發表，奠定**國際學術地位**。

- 以高解析度資料研究電離層電漿不規則體與全球分布。
- 磁暴對電離層的影響。
- 電離層模式的建立。

缺乏酬載研製能力：要獲得卓越且獨特的科學成果，必須要有足夠的**技術能力**來實現。





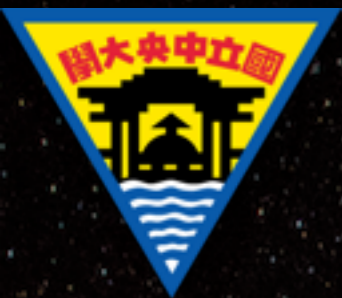
福爾摩沙衛星五號



我國全自製的遙測衛星，在台灣時間
2017年8月25日，由太空探索公司
(SpaceX) 獵鷹九號運載火箭發射升空。

- 任務酬載：光學遙測儀 (太空中心)
- 科學酬載：先進電離層探測儀 (中大)
- 飛行軌道：太陽同步圓形軌道。
- 高度：距地表 720 公里。
- 傾角： 98.28° 。
- 當地時間：1030/2230 LT。

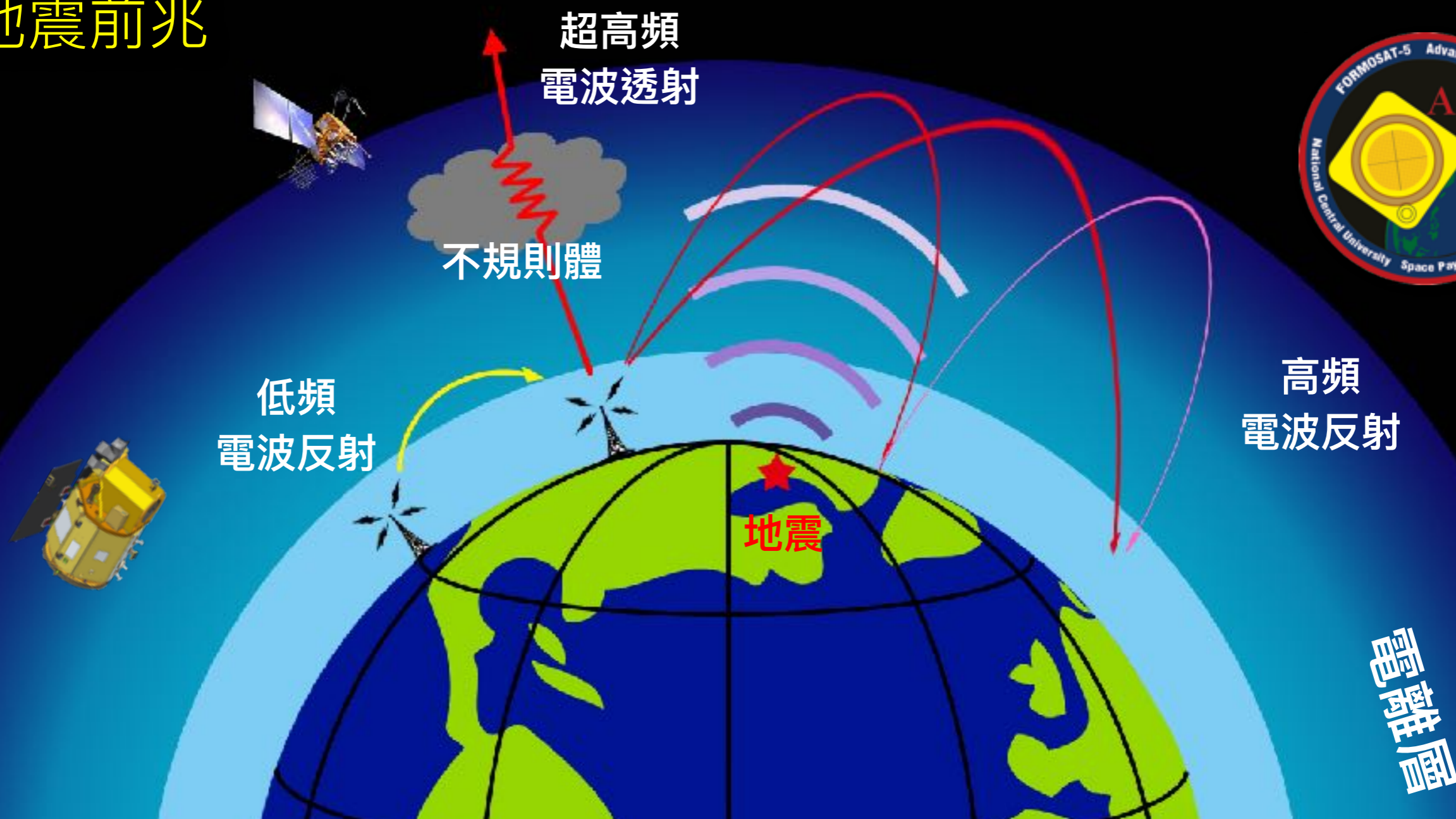




福衛五號科學任務



- 太空天氣
- 地震前兆





研製衛星級科學酬載



- 質量：小於 5 公斤。
- 用電：小於 5 瓦特（每軌平均）。
- 安裝 探測器必須安置在前板且與其熱隔絕。控制器必須安置在衛星本體與探測器相距 4 公尺（線束）。
- 期限：19 個月（飛行體），有罰則。
- 經費：NTD 30M（56 個月結案）。
- 人力：老師、研究生、專任助理（畢業學生自願留下幫忙）。
- 功能：量測完整電漿參數且要創新。

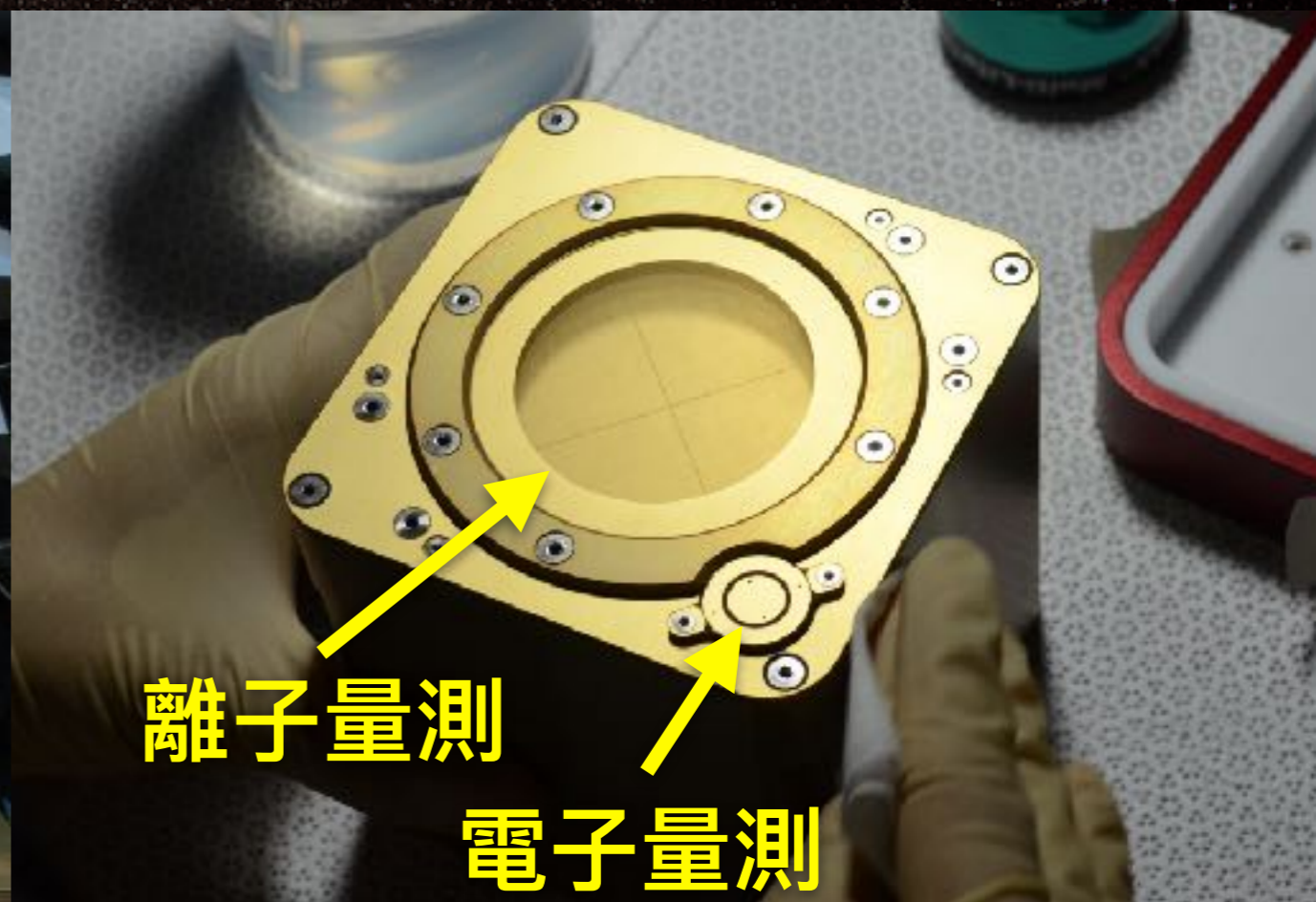
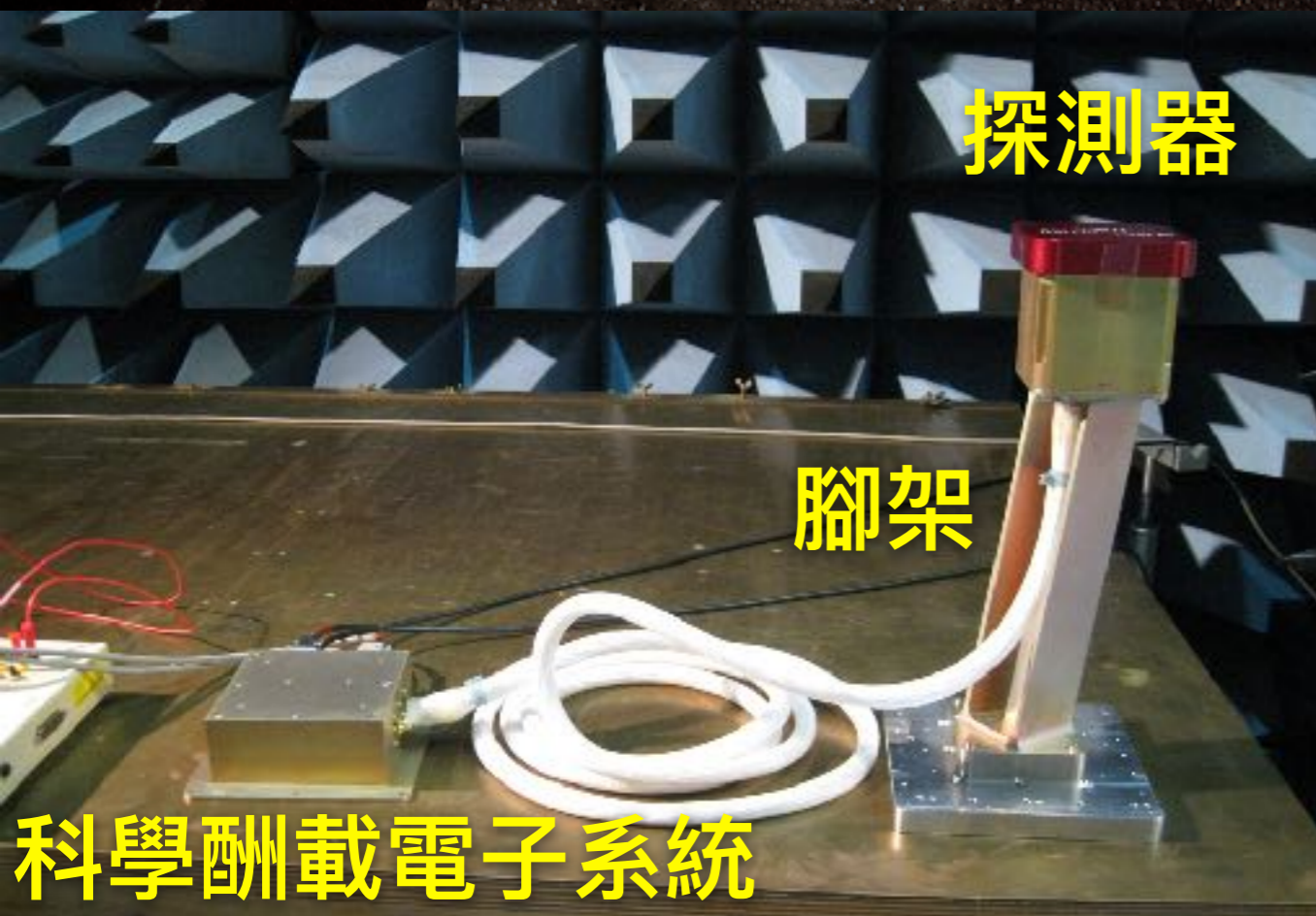




先進電離層探測儀 (AIP)

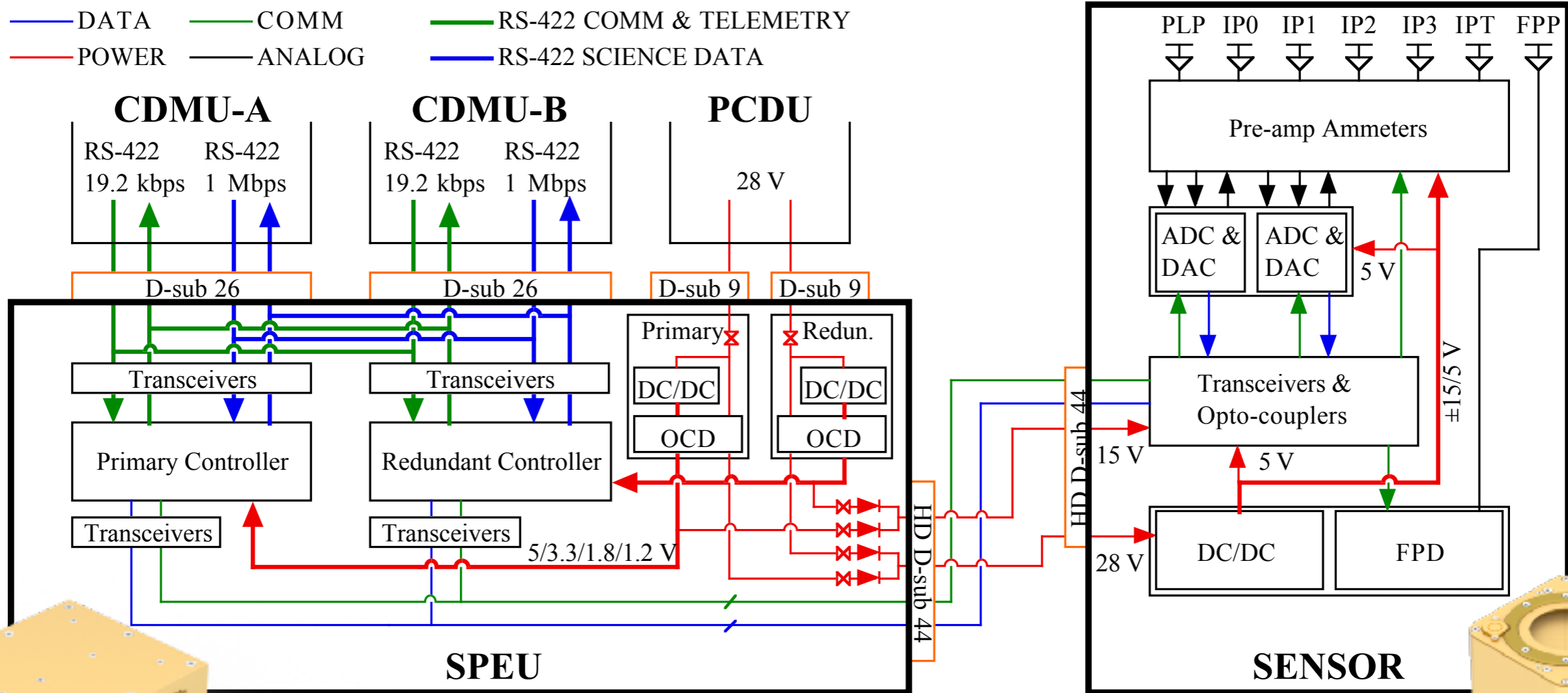


- 首創以**單一探測器**，達成量測多種電漿特性的儀器。
- 以**分時**方式，量測完整的電離層電漿特性（如**離子密度**、**離子速度**、**離子溫度**、**電子溫度**）。
- 可以最高取樣率（**8,192 Hz**）量測電漿不規則體細微結構。





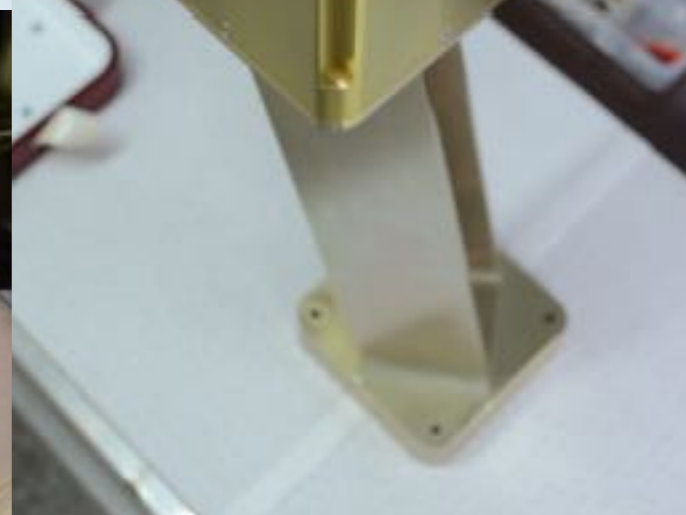
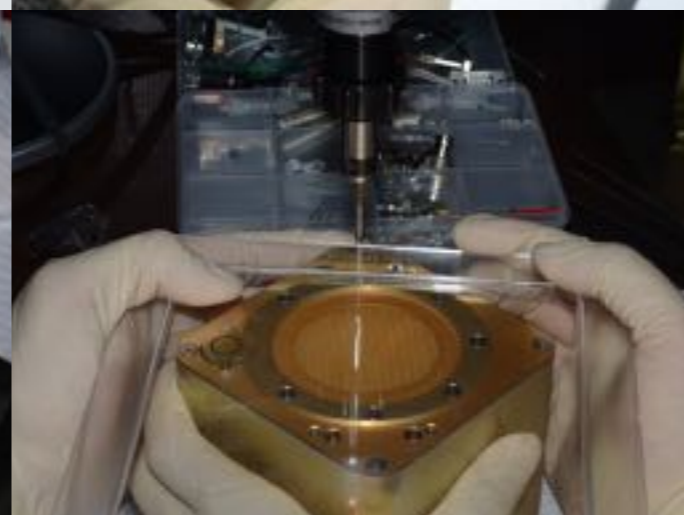
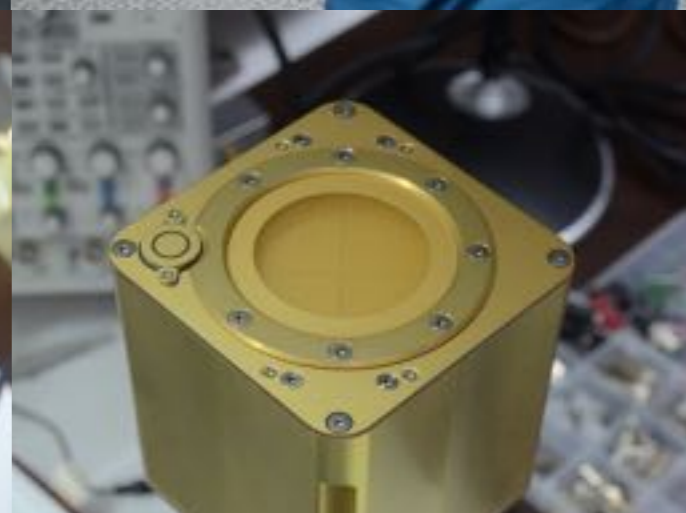
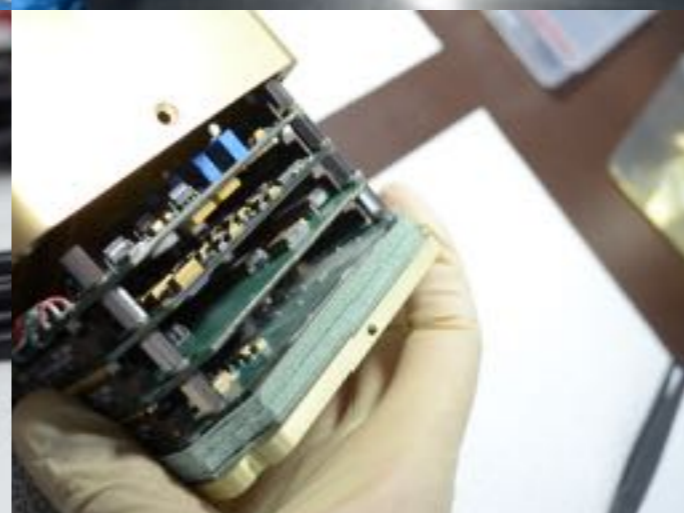
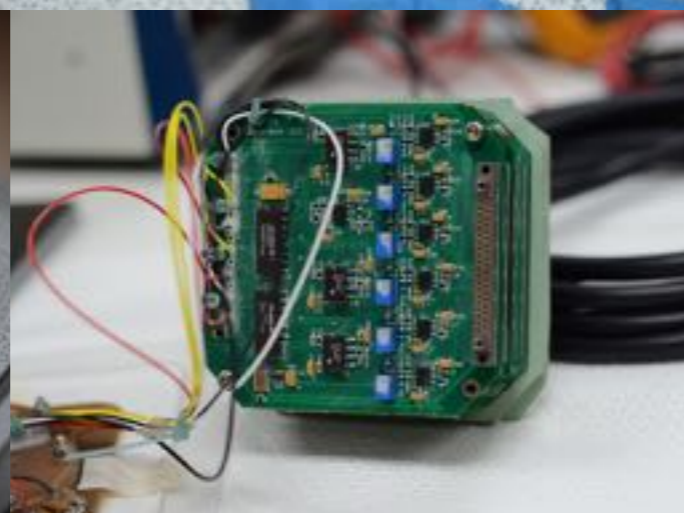
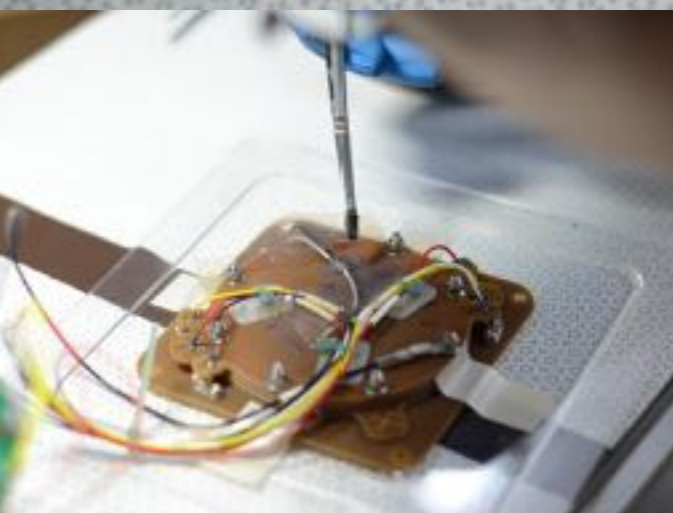
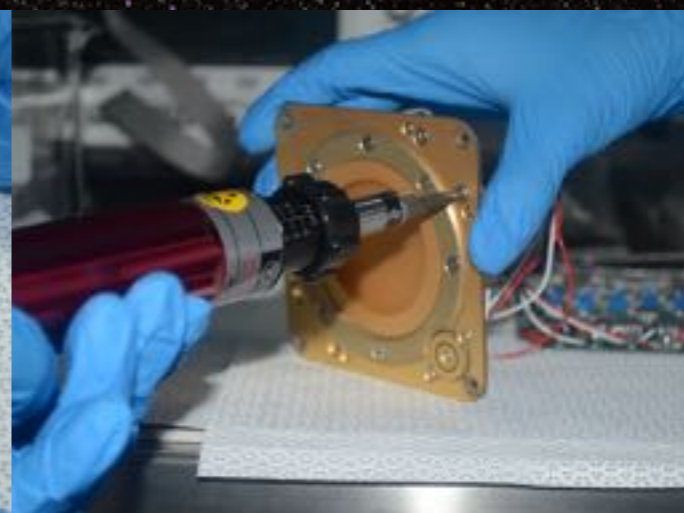
功能圖



控制器、收發器、電源供應、類比轉數位、數位轉類比、電流計等元件或模組，採用備援設計，增加存活率。

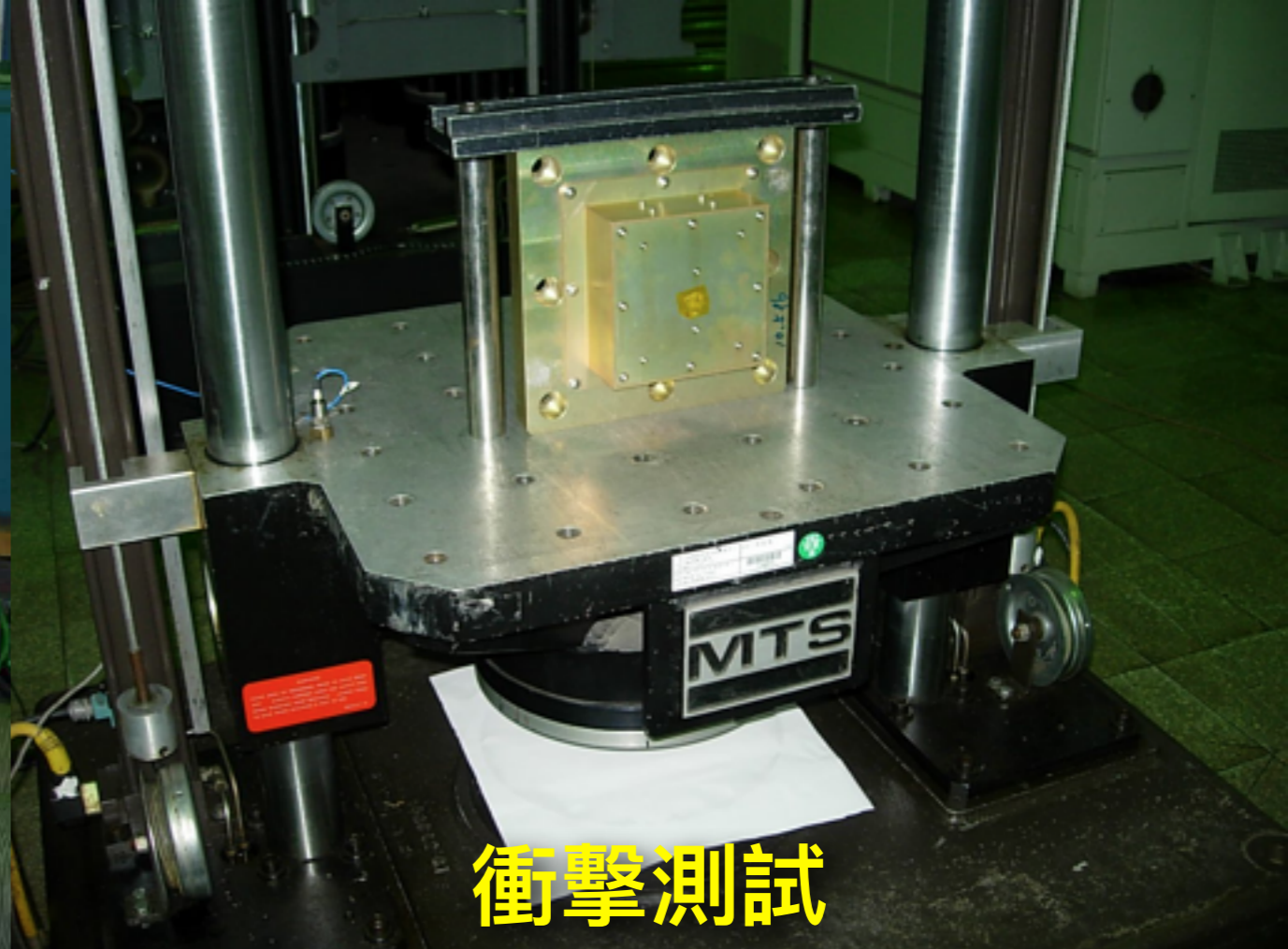


組裝探測器

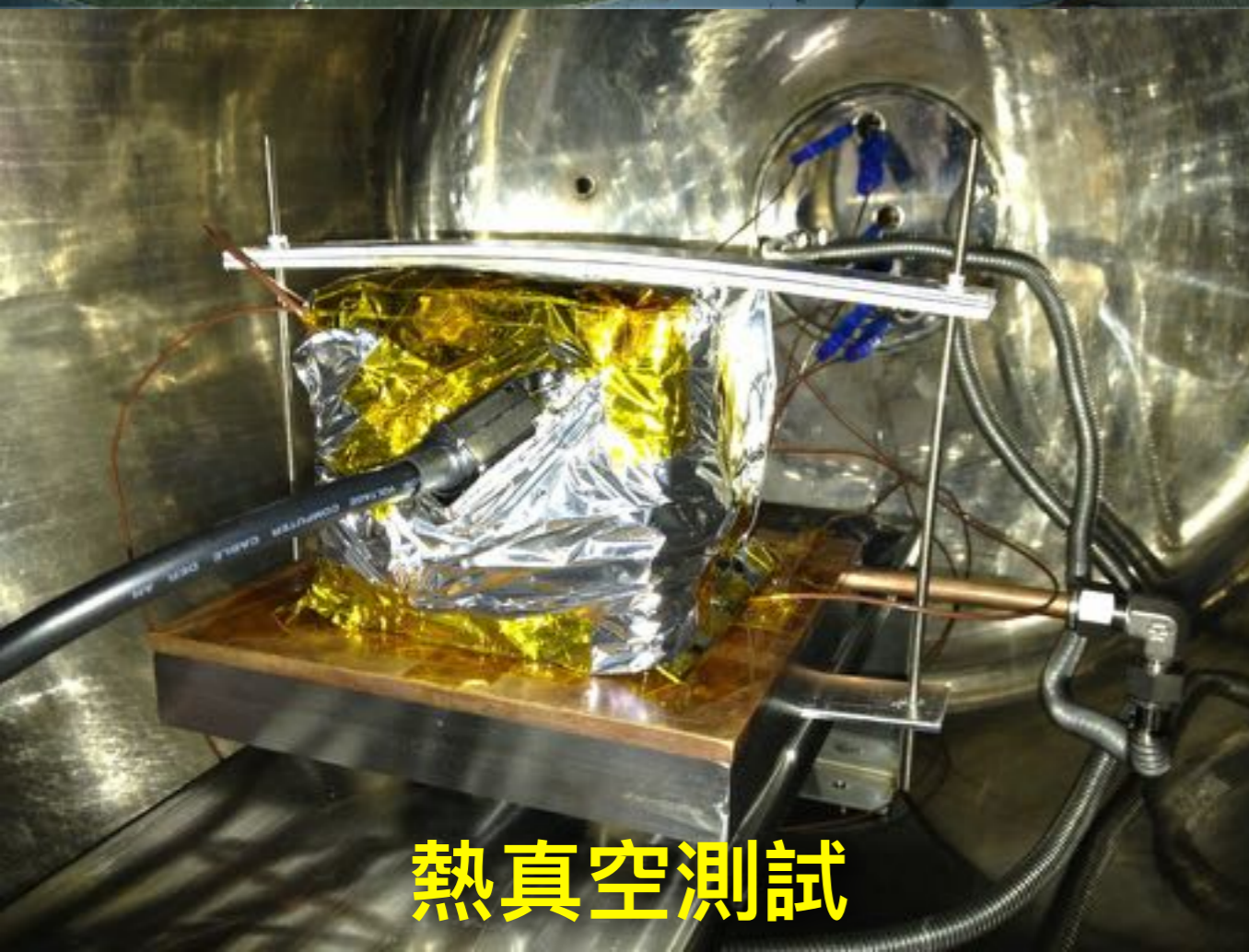




振動測試



衝擊測試



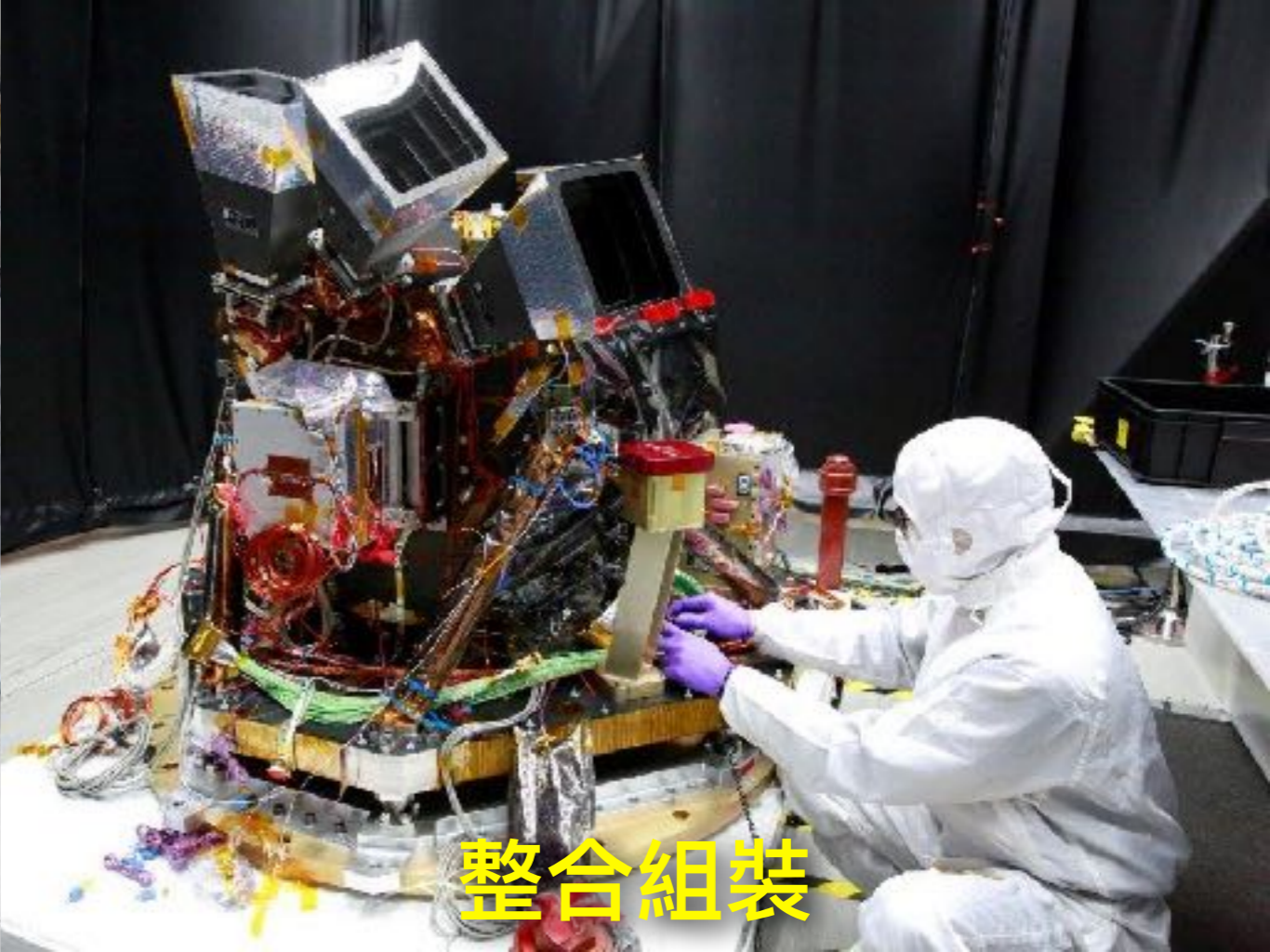
熱真空測試



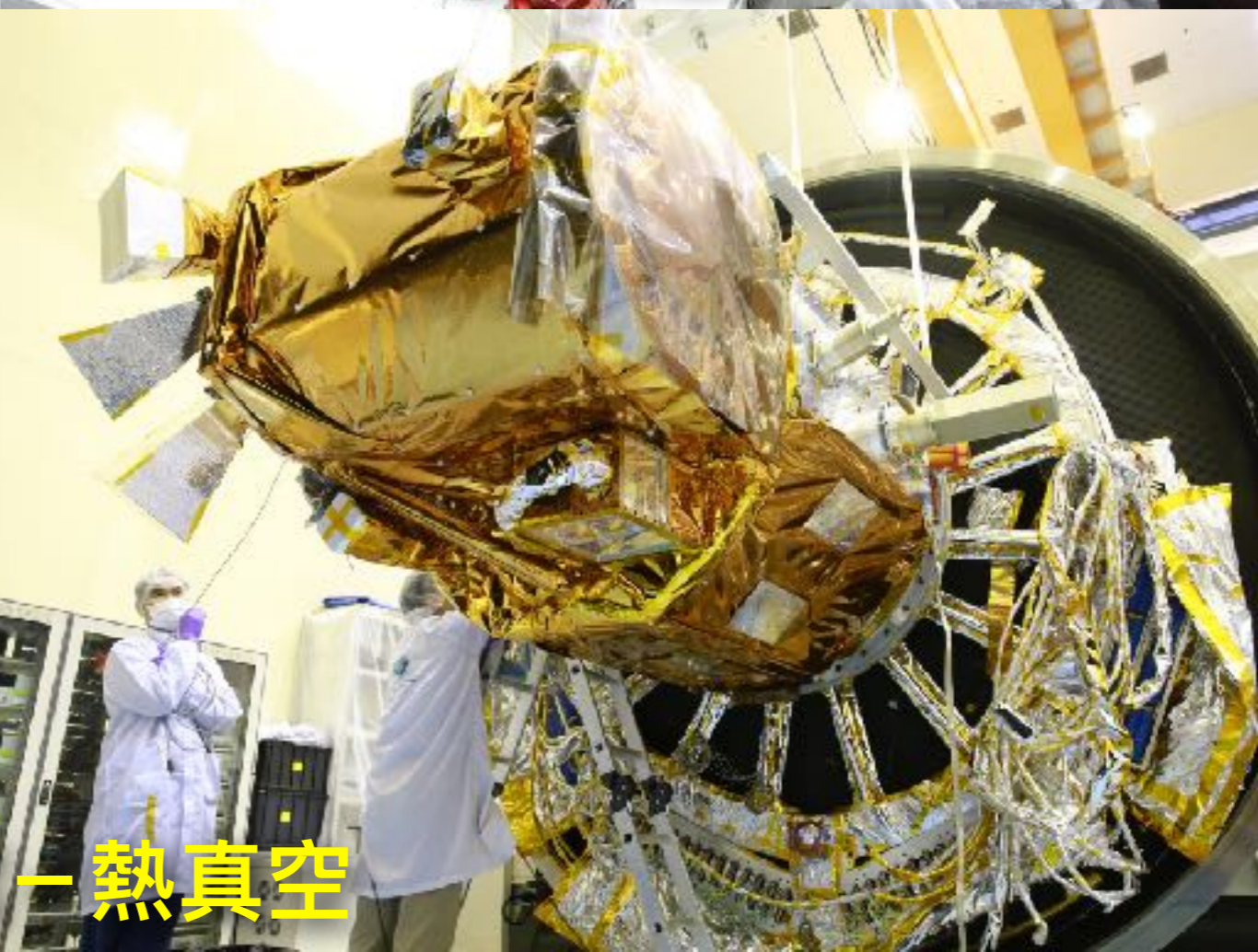
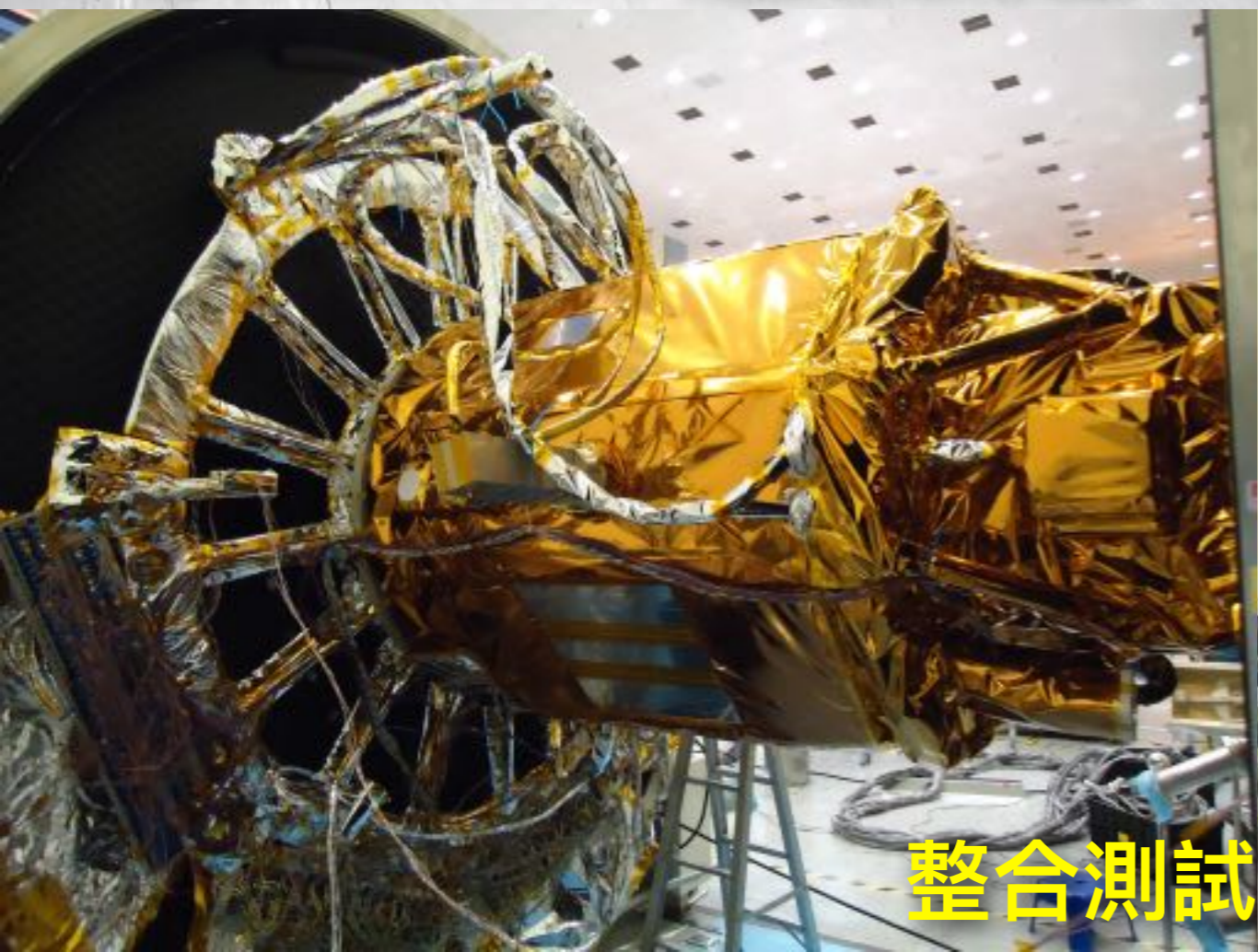
電磁相容測試



2012/01/13 開始研製
2013/10/08 遞交飛行體



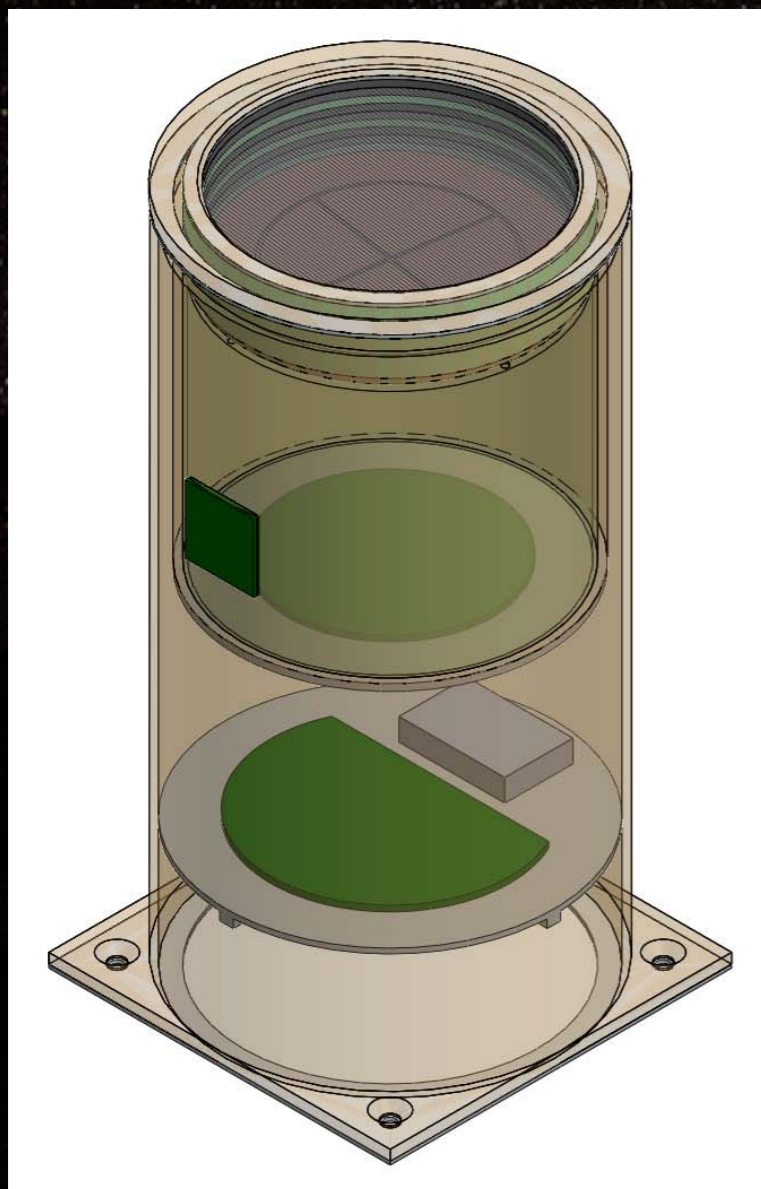
整合組裝



整合測試—熱真空

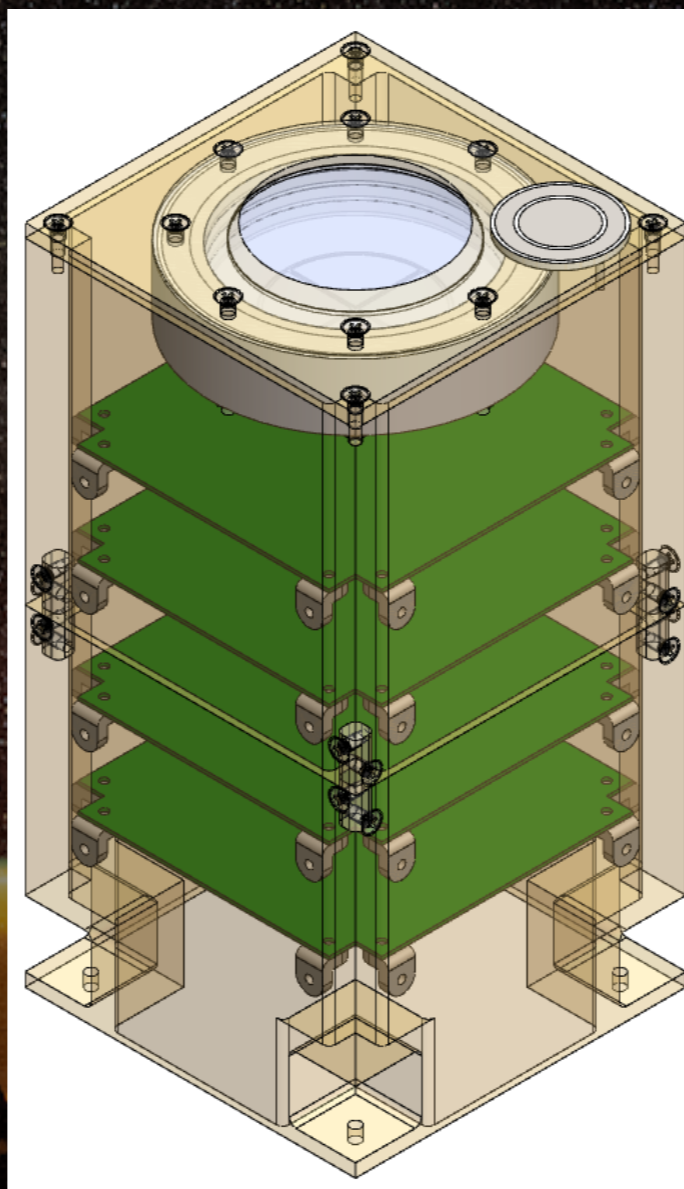


探測器構型



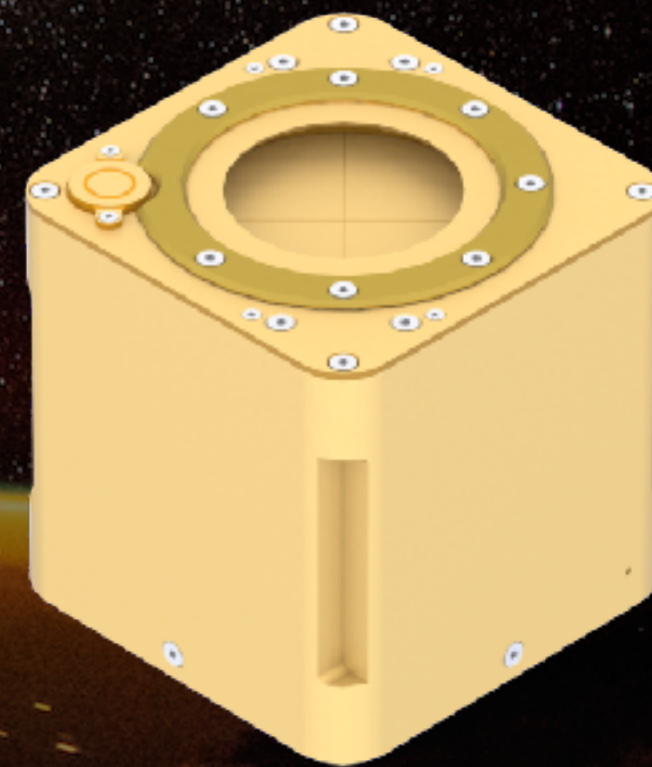
計畫書

(WSD + 0M)



任務定義/系統設計

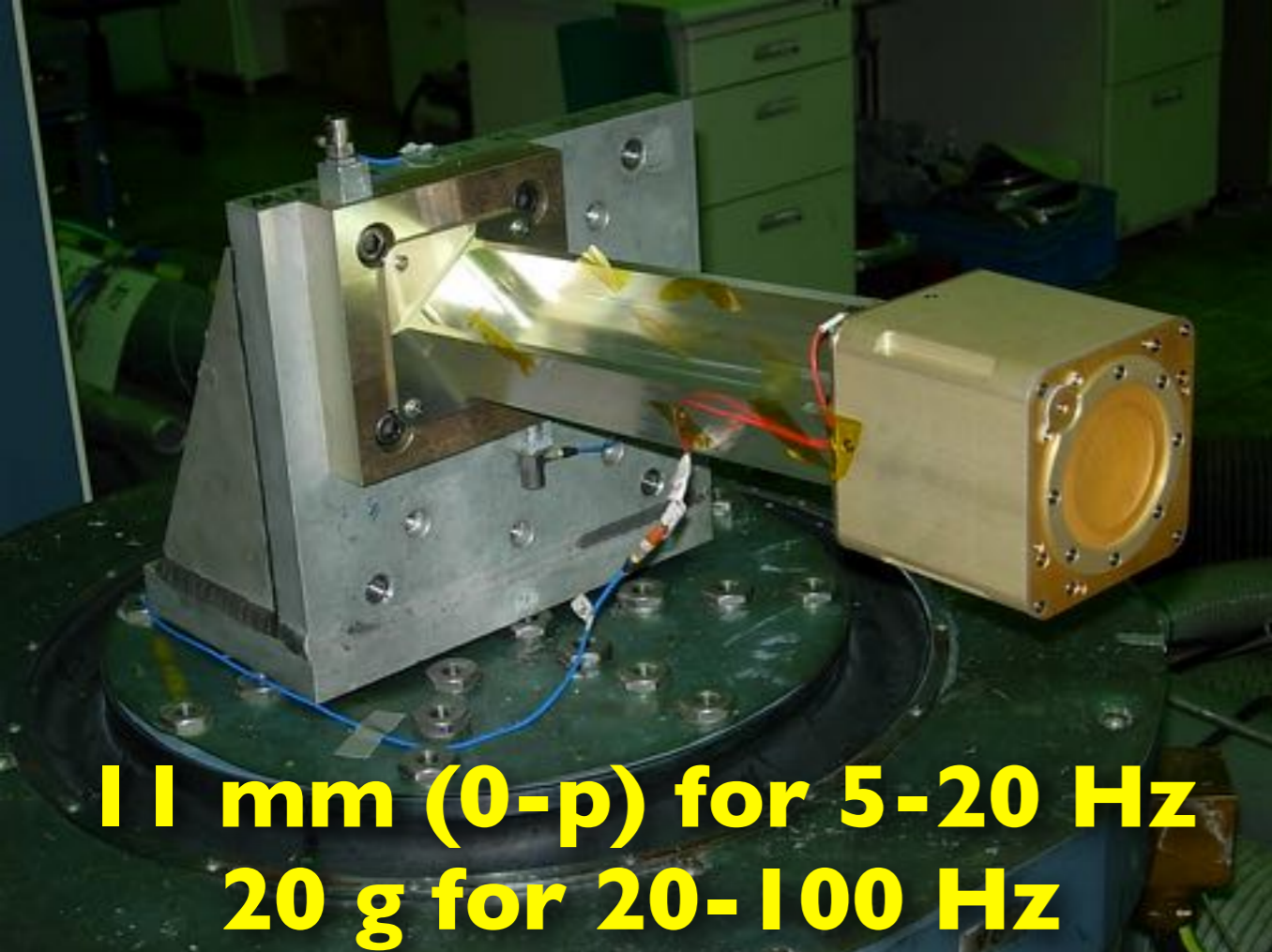
(WSD + 2M)



飛行體遞交

(WSD + 21M)

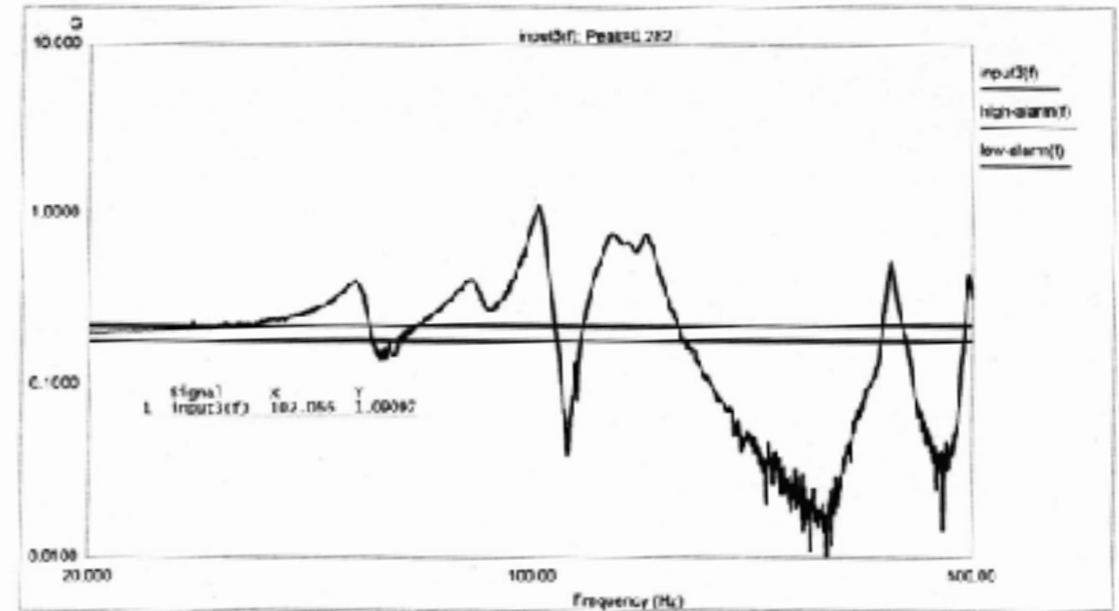
正弦振動測試前



11 mm (0-p) for 5-20 Hz
20 g for 20-100 Hz

AIP 振測器 NCU AIP Sensor 0001 X-AXIS (b)

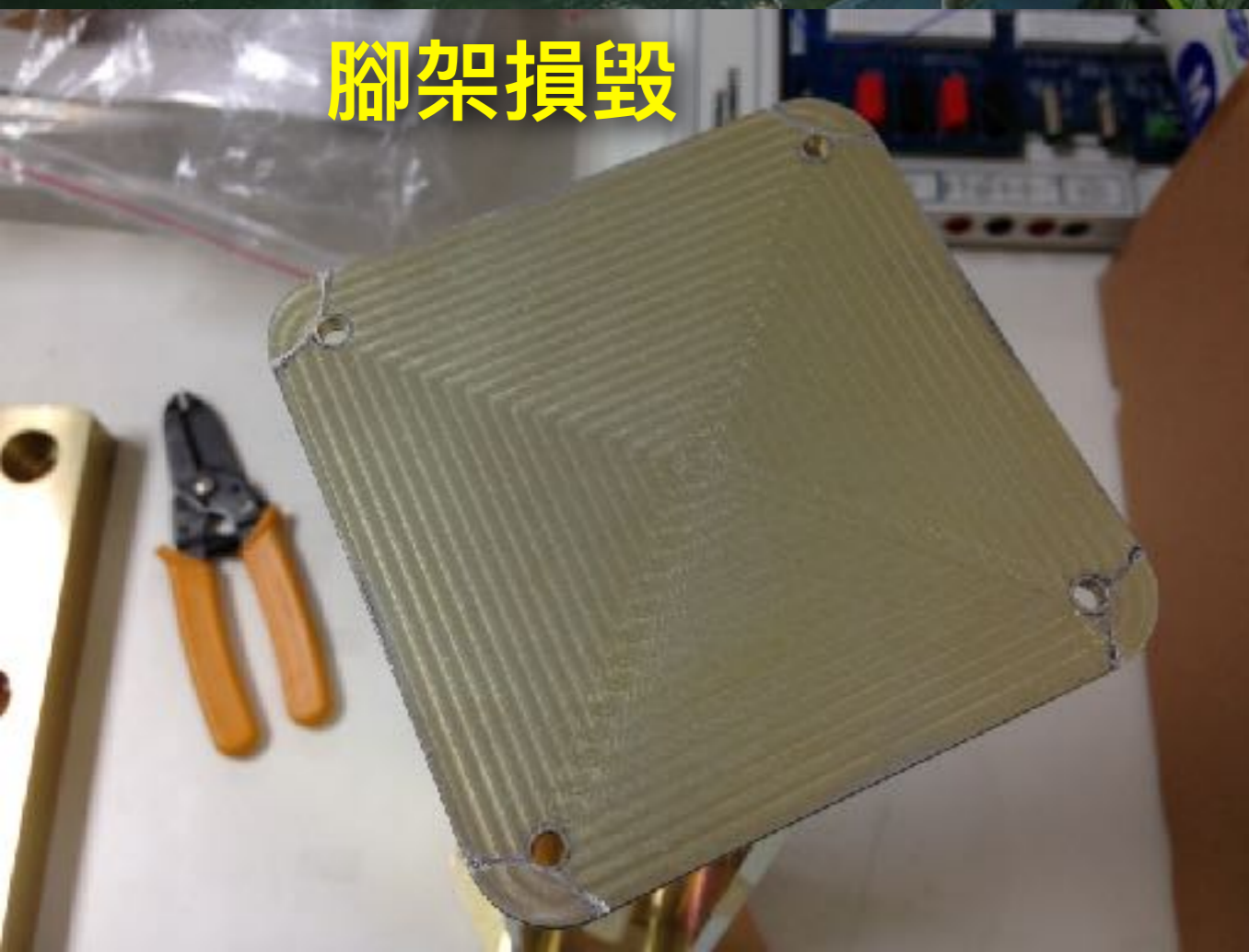
Project File Name: 結構振測.pj
Profile Name: Test Type: Swept Sine Run Folder: .RunDefault



Level: 100 % Control Peak: 0.126855 G Full Level Time: 00:02:19 Sweep Type: Logarithmic
Frequency: 495.972647 Hz Demand Peak: 0.200000 G Time Remaining: 00:00:00 Sweep Rate: 2 Oct/Min

Date saved at 05:32:41 AM, Thursday, August 08, 2013 Report created at 09:32:48 AM, Thursday, August 8, 2013

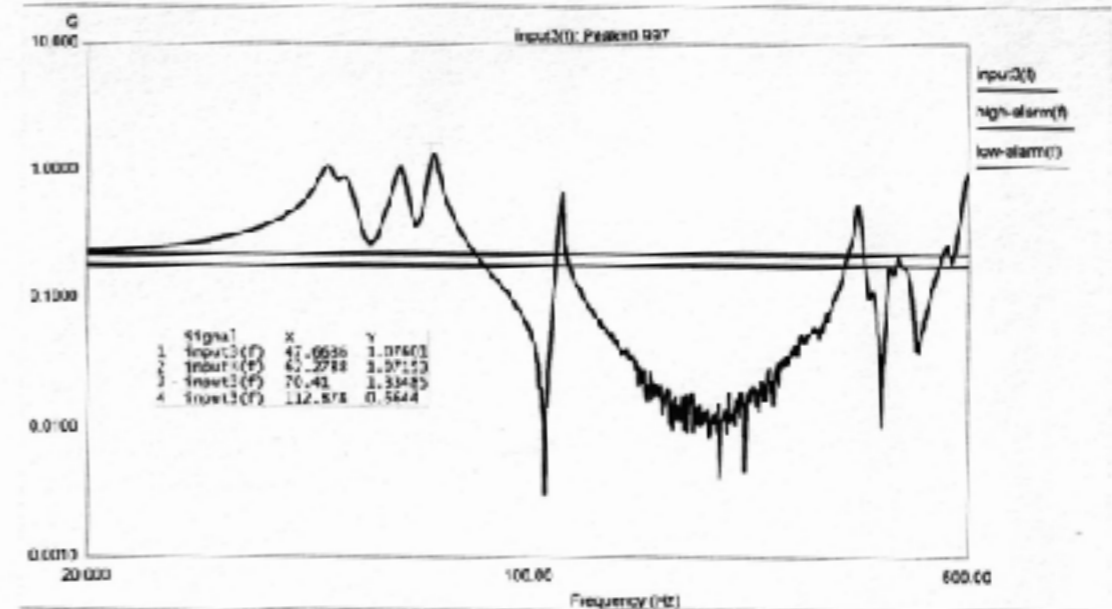
腳架損毀



正弦振動測試後

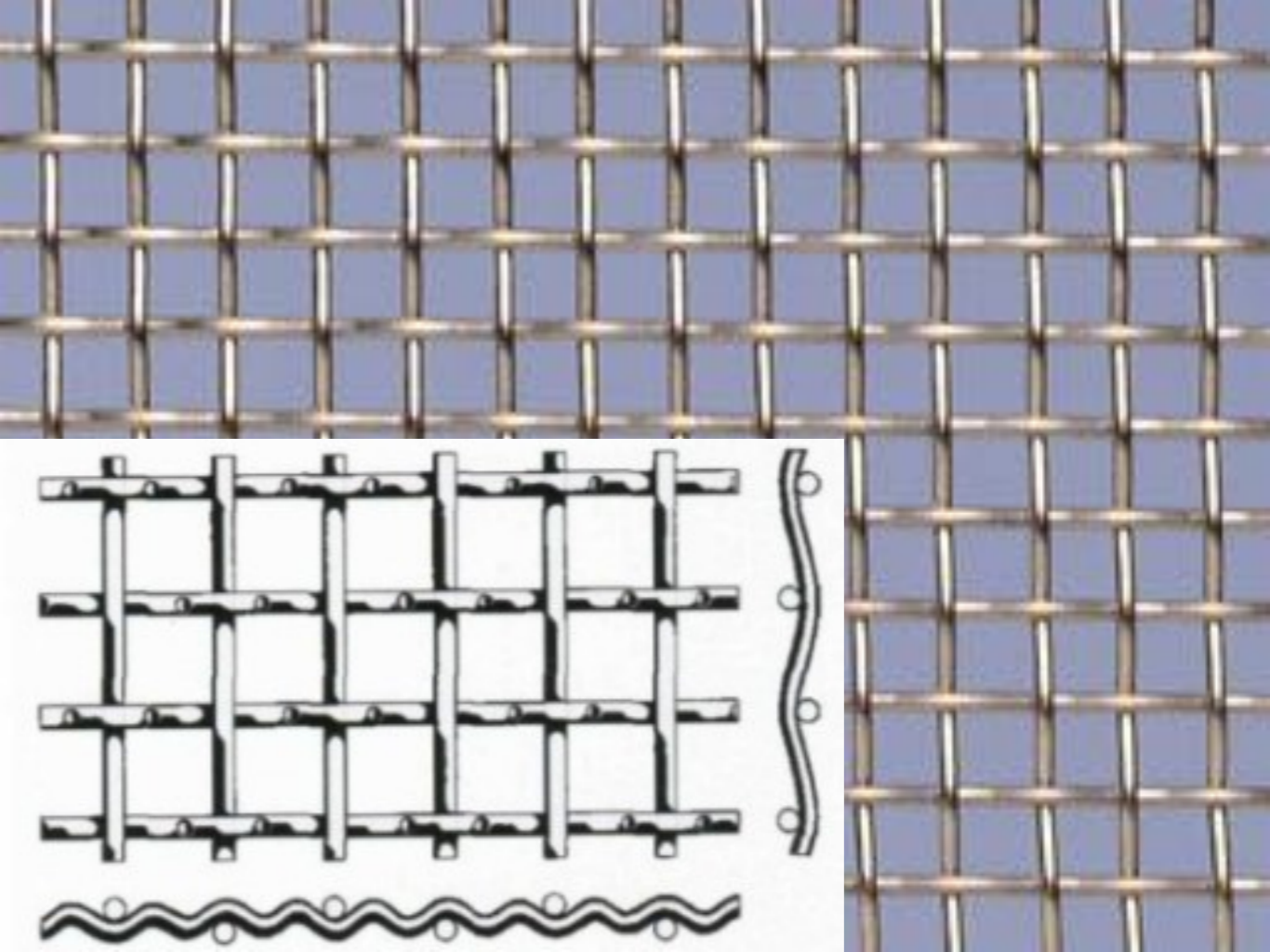
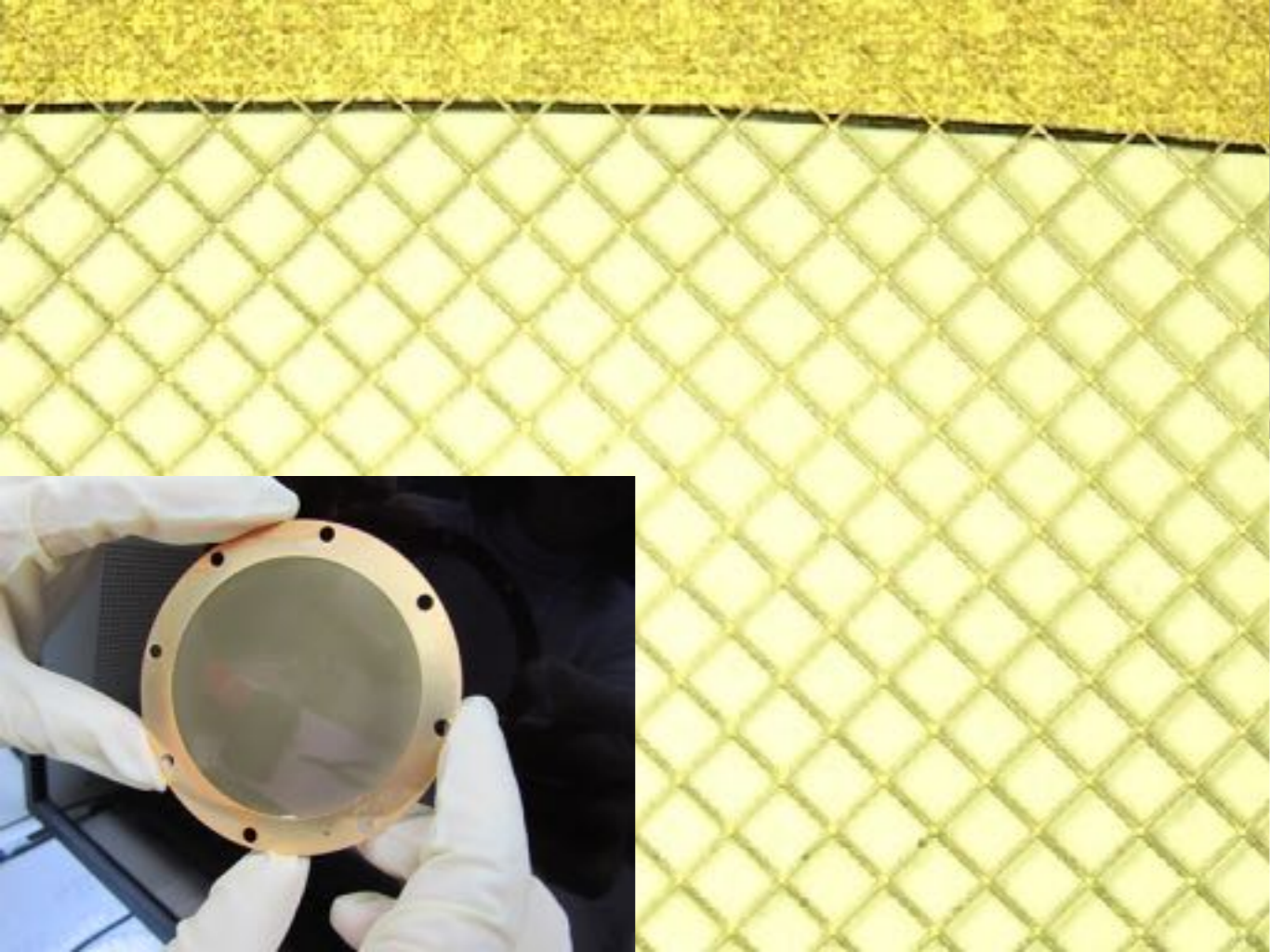
AIP 振測器 NCU AIP Sensor 0001 X-AXIS (A)

Project File Name: 結構振測.pj
Profile Name: Test Type: Swept Sine Run Folder: .RunDefault



Level: 100 % Control Peak: 0.151465 G Full Level Time: 00:02:19 Sweep Type: Logarithmic
Frequency: 495.972647 Hz Demand Peak: 0.200000 G Time Remaining: 00:00:00 Sweep Rate: 2 Oct/Min

Date saved at 11:11:12 AM, Thursday, August 08, 2013 Report created at 11:11:14 AM, Thursday, August 8, 2013



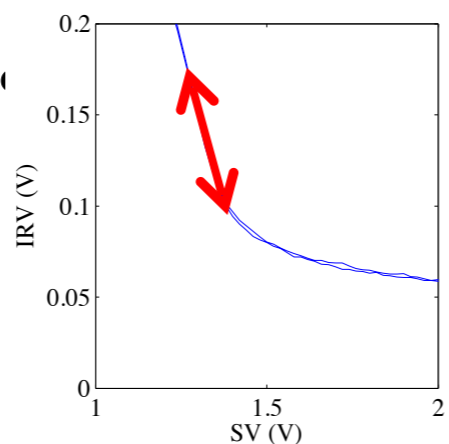
純金電鑄一體成型網 (AIP)

99.98% 純金，等電位面最佳、降低電極污染效應、缺乏彈性。

篩網密度：100 LPI

網線直徑：0.5 mil。

透明度：0.9025。



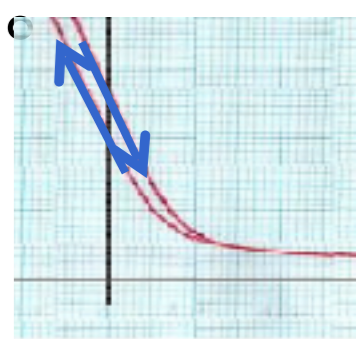
不鏽鋼鍍金編織網 (IPEI)

不鏽鋼鍍金，等電位面不佳、易有電極污染效應，較具彈性。

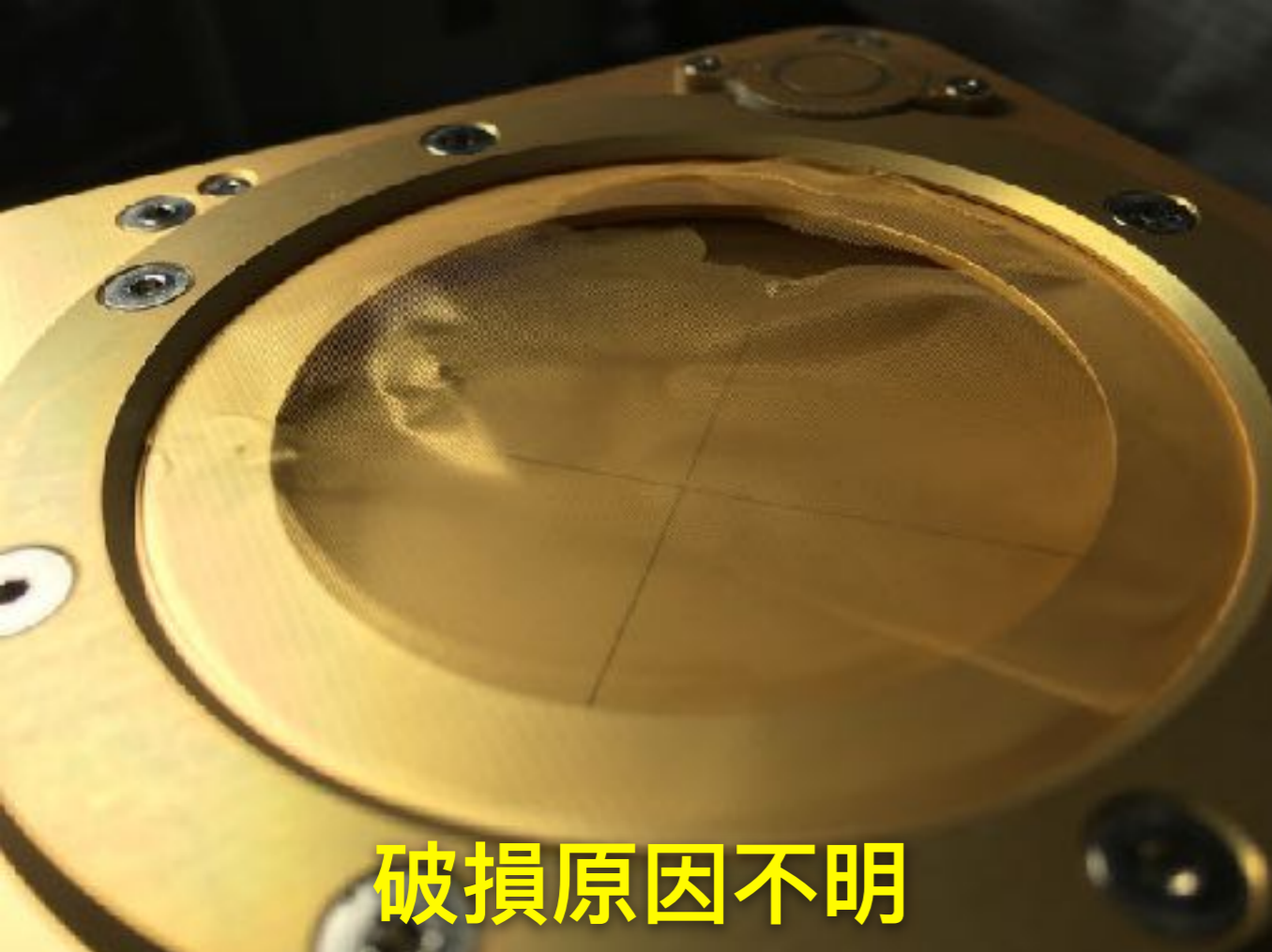
篩網密度：50/100 LPI

網線直徑：1 mil。

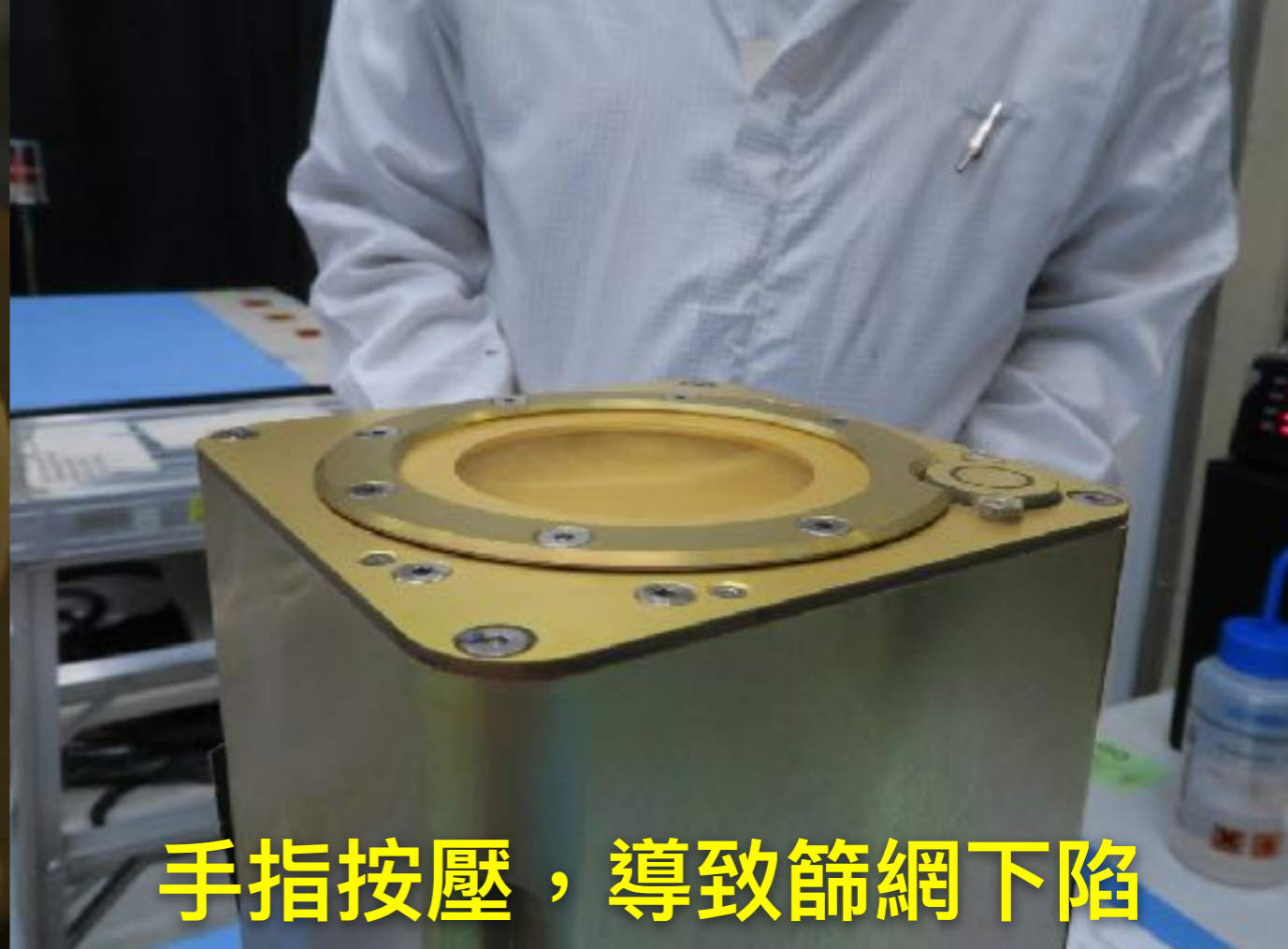
透明度：0.9025/0.81。



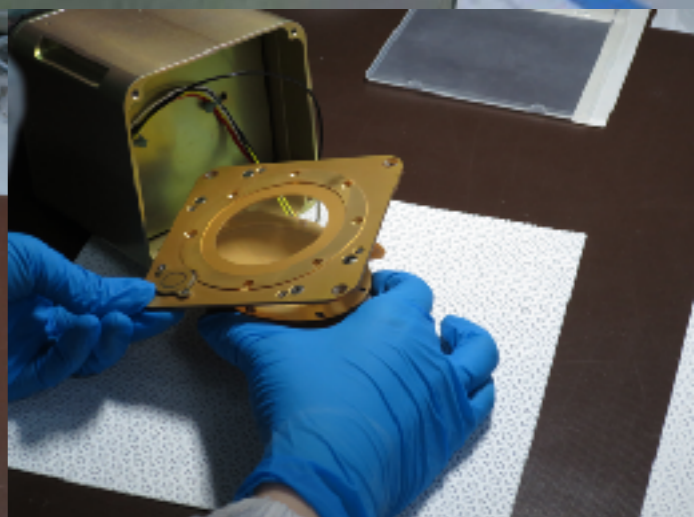
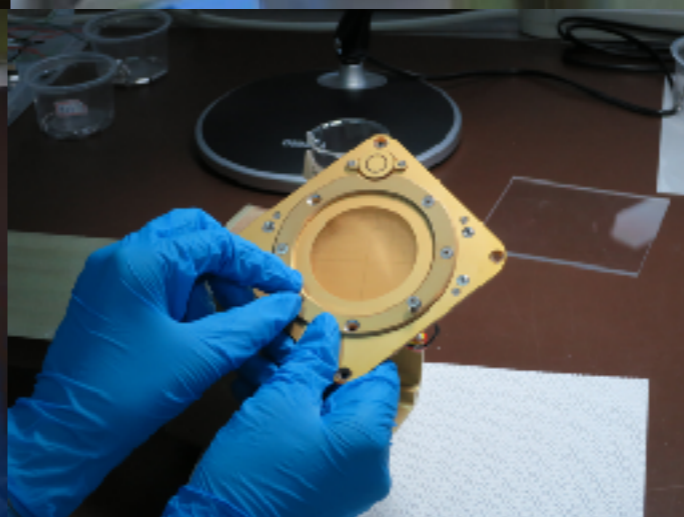
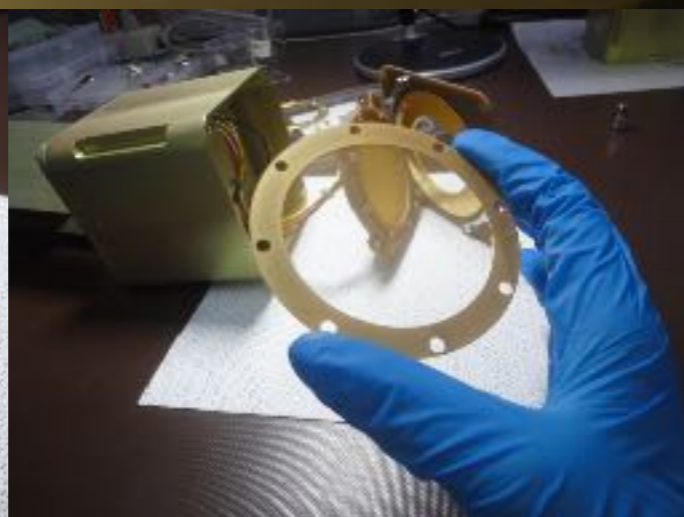
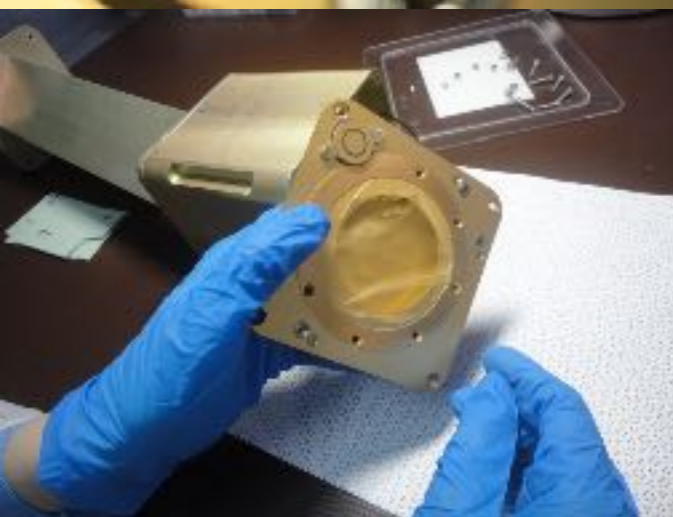
1 mil (千分之一吋 = 25.4 μm)，人類頭髮直徑約 75 μm ~ 3 mil.



破損原因不明



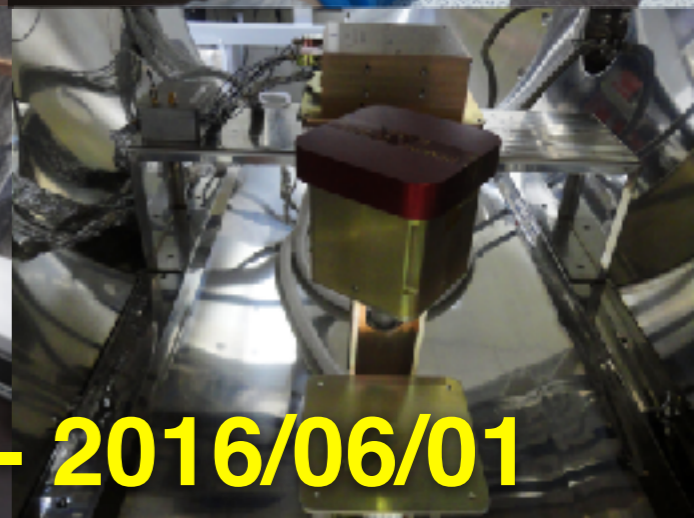
手指按壓，導致篩網下陷



2016/03/11 - 2016/04/29



2016/05/11 - 2016/06/01



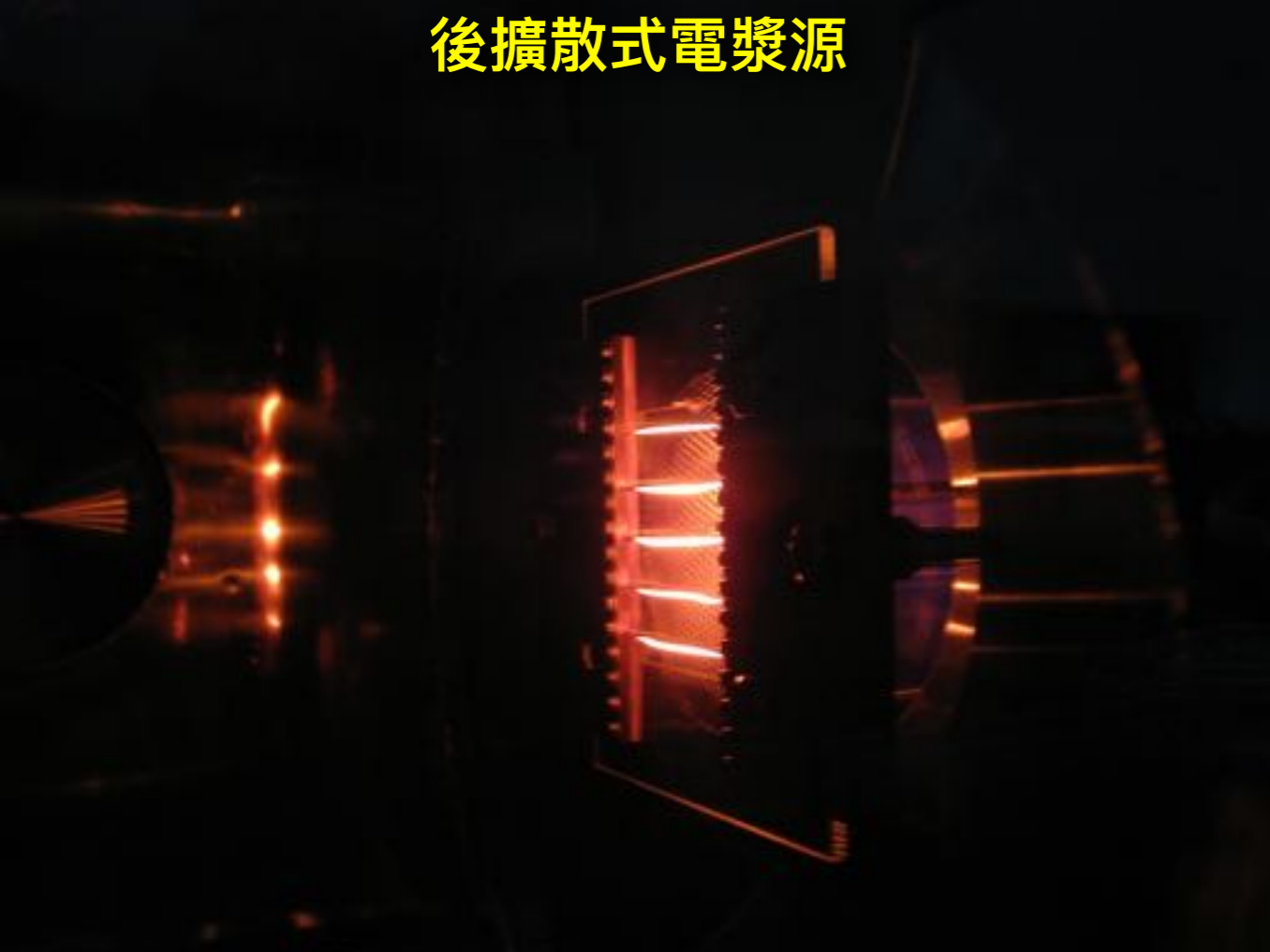
太空電漿模擬艙



太空電漿模擬艙

功能：提供太空電漿酬載測試與校正之用。
尺寸：內徑 70 公分，長 1.5 公尺。
壓力： 10^{-6} 托耳（最低）， 10^{-4} 托耳（操作）。
殘留氣體識別：1-100 amu。
流量控制：0 (min: 0.02)-10 sccm, $\pm 1.0\%$ 。
電漿物種：以施放氬氣與氮氣等惰性氣體為主。
電漿溫度：1,000-2,000 K。
電漿密度： 10^3 - 10^6 # cm^{-3} 。
電漿光譜識別：200-950 nm, < 2 nm FWHM。

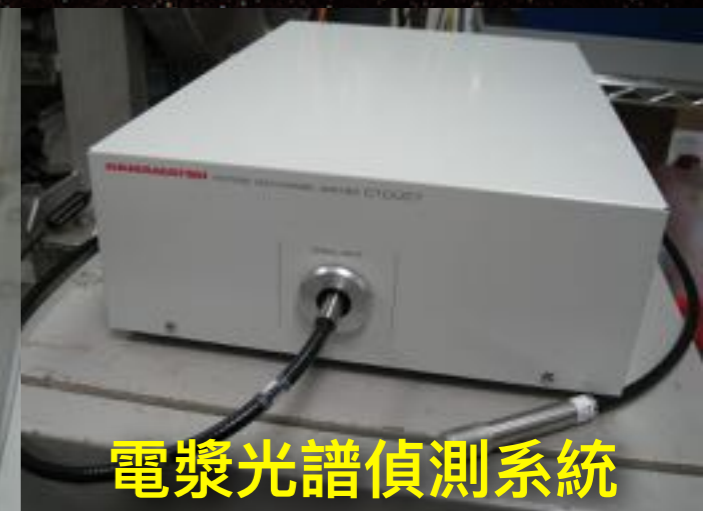
後擴散式電漿源



監控系統



電漿光譜偵測系統



紫外光電漿源



氣體流量控制器





熱真空艙

熱真空艙 (矽油閉路循環)

功能：測試太空酬載在真空與熱的複合環境。
尺寸：內徑 60 公分，長 1.0 公尺。
終極壓力： 6×10^{-4} Pa。
熱電偶數目：10 組 (= 3 x 2 組 + 1 x 4 組)。
熱交換板尺寸：400 mm x 500 mm。
熱交換板溫度範圍： -40°C to 80°C 。
熱交換板溫度均勻度： $\pm 3^{\circ}\text{C}$ 。
升溫速率 (常溫至 $+80^{\circ}\text{C}$)： $+3.31^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 。
降溫速率 ($+80^{\circ}\text{C}$ 至 -40°C)： $-4.15^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 。



振動產生器



抽氣機



控制顯示器



振動前級放大器

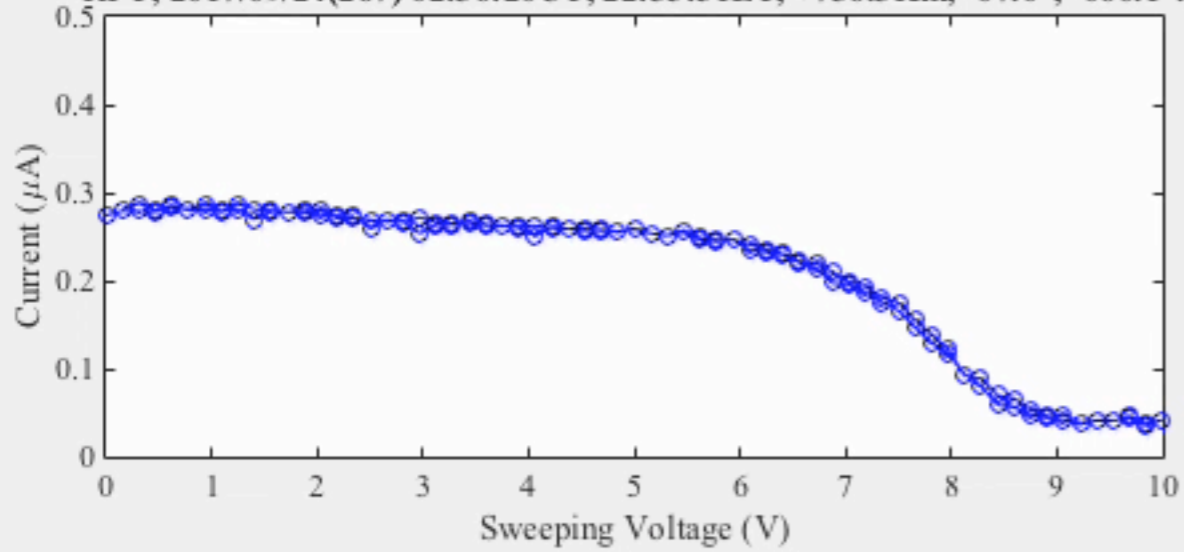


振動測試機台

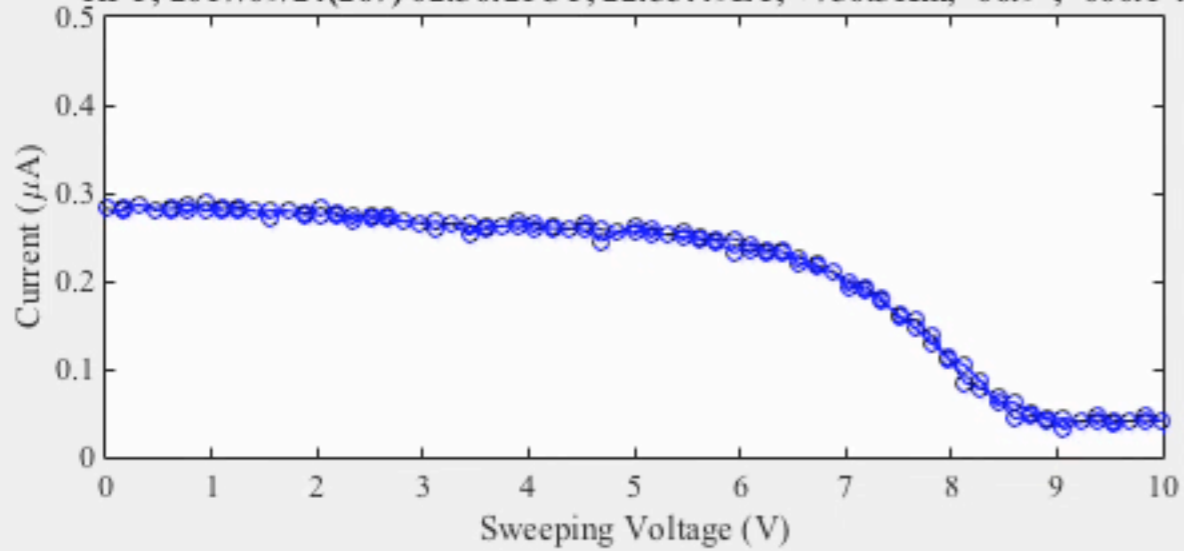


FS-5/AIP

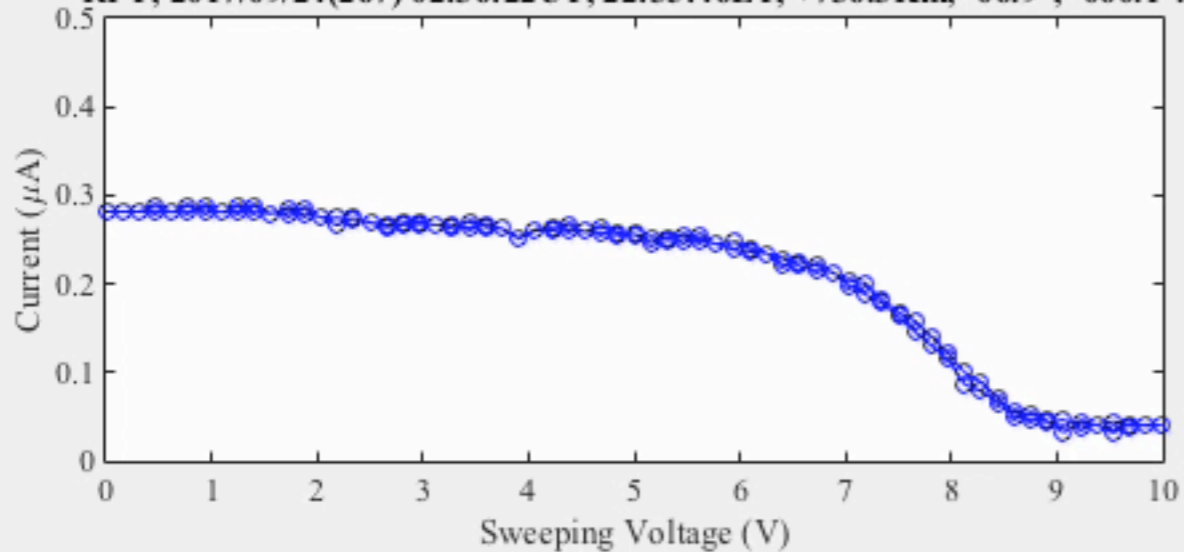
RPT, 2017/09/24(267) 02:36:20UT, 22:35:51LT, +736.3Km, -07.0°, -060.1°.



RPT, 2017/09/24(267) 02:36:21UT, 22:35:49LT, +736.3Km, -06.9°, -060.1°.

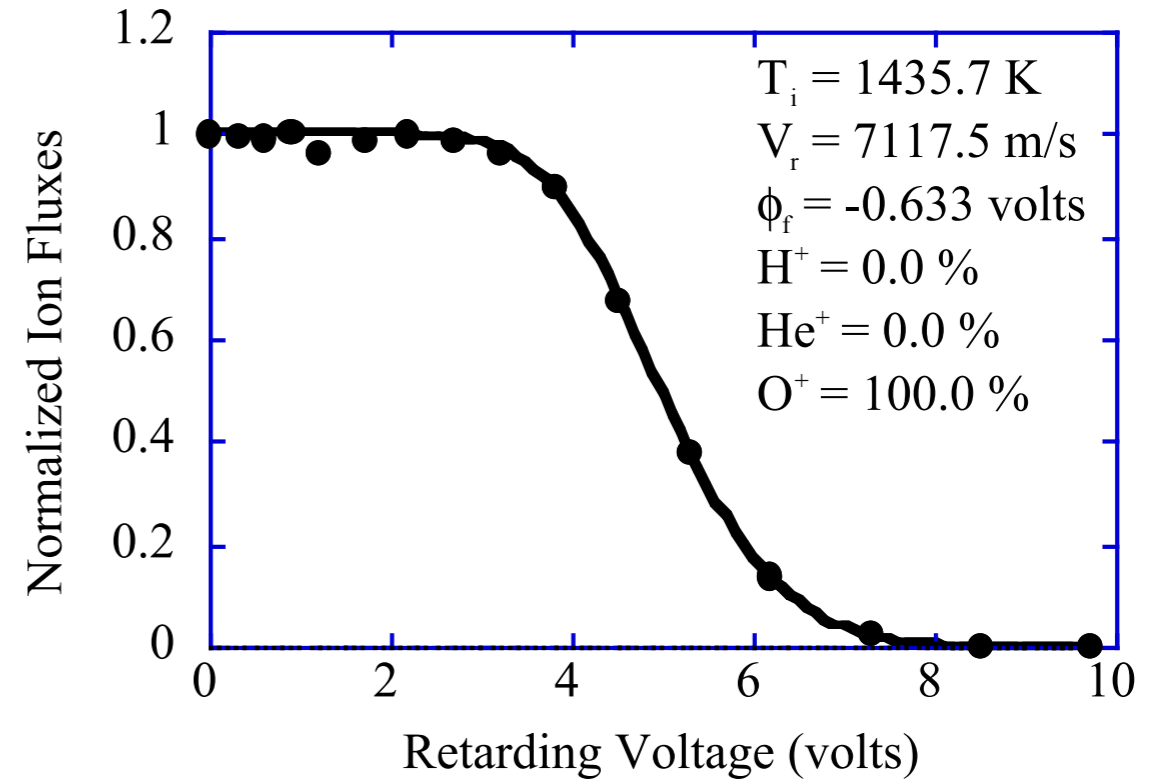


RPT, 2017/09/24(267) 02:36:22UT, 22:35:46LT, +736.3Km, -06.9°, -060.1°.



04/07/2000 01:56:30 UT 02:27:40 LT

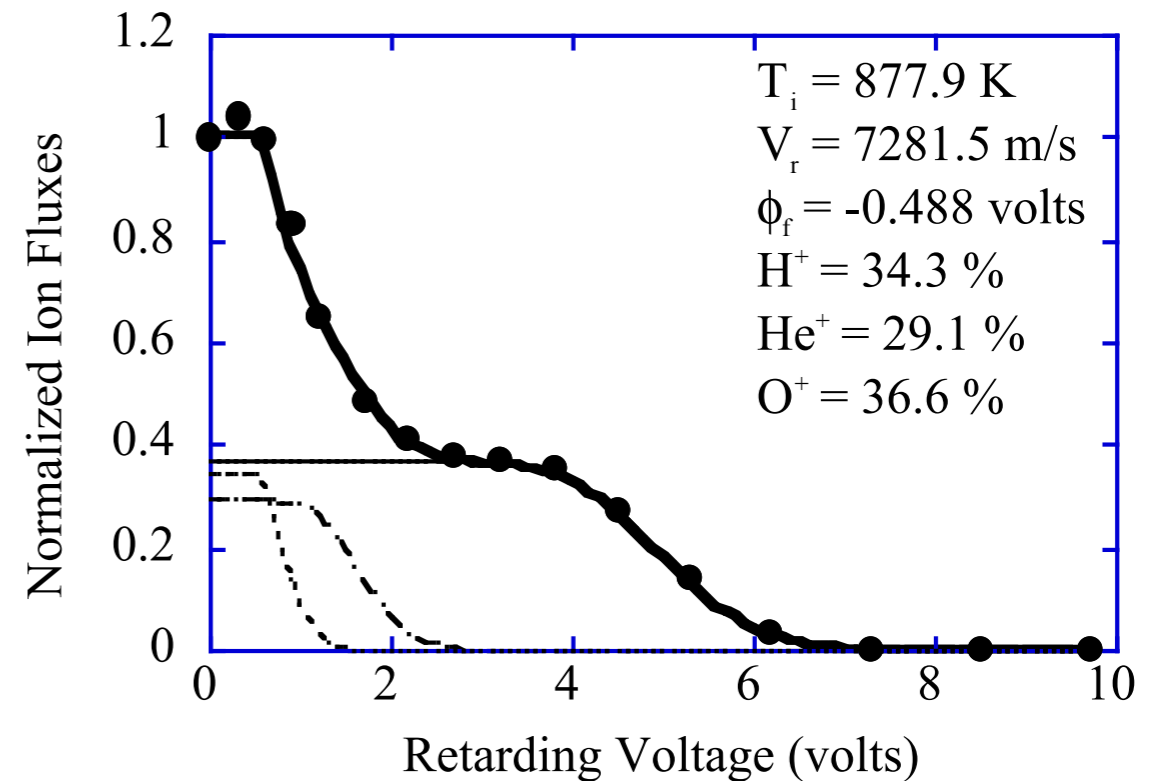
GLON = 7.79°, GLAT = -3.79°



RS-1/IPEI

03/28/1999 00:29:00 UT 00:30:08 LT

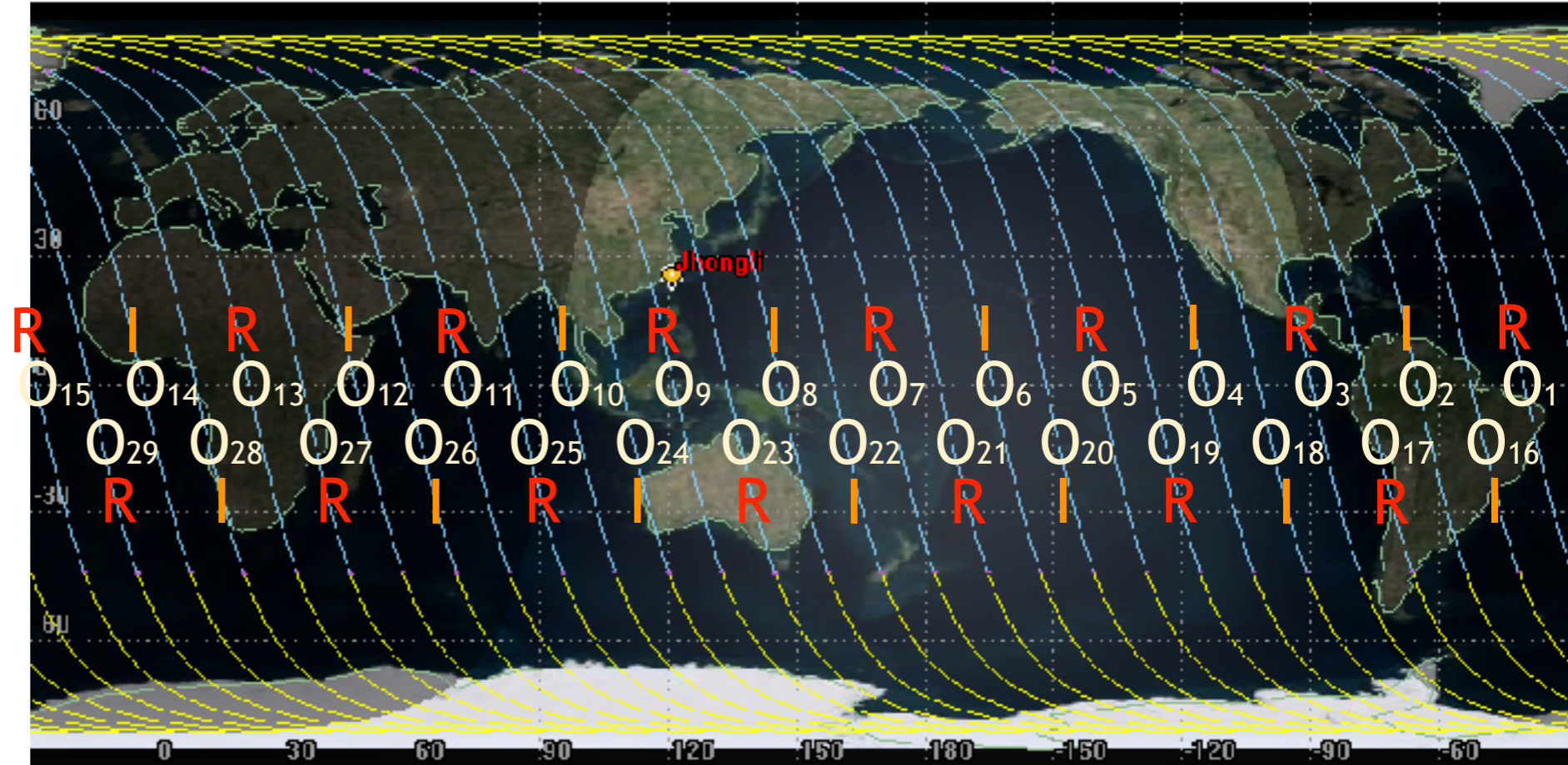
GLON = 0.29°, GLAT = -34.83°



第一天與第二天

福衛五號具有每兩天再返軌道。

AIP 以 RPA 與 IDM 模式交互以快速率 (1,024 Hz) 操作。

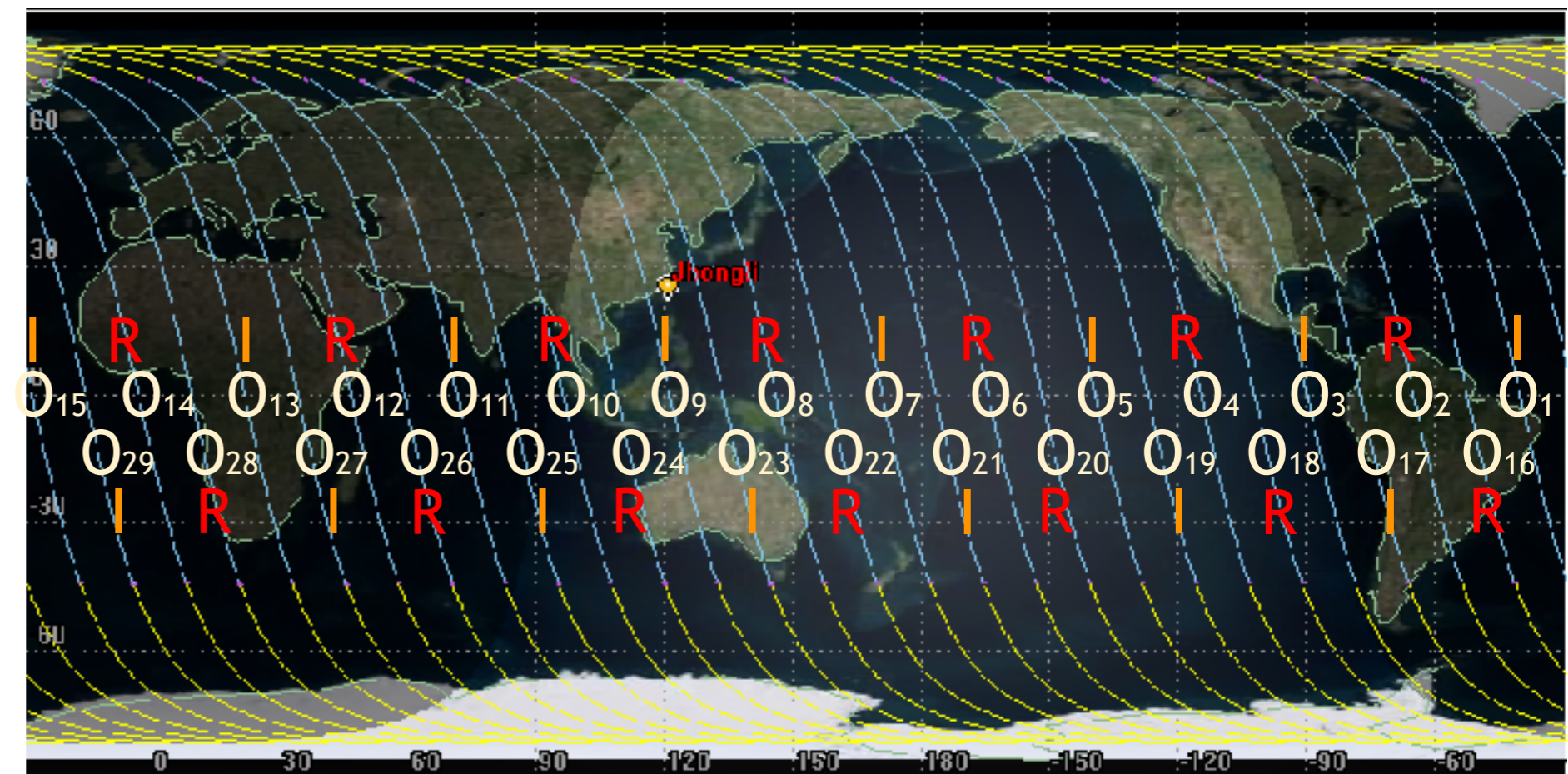


R: RPA and I: IDM

第三天與第四天

每 2 天獲得一張全球離子密度分布

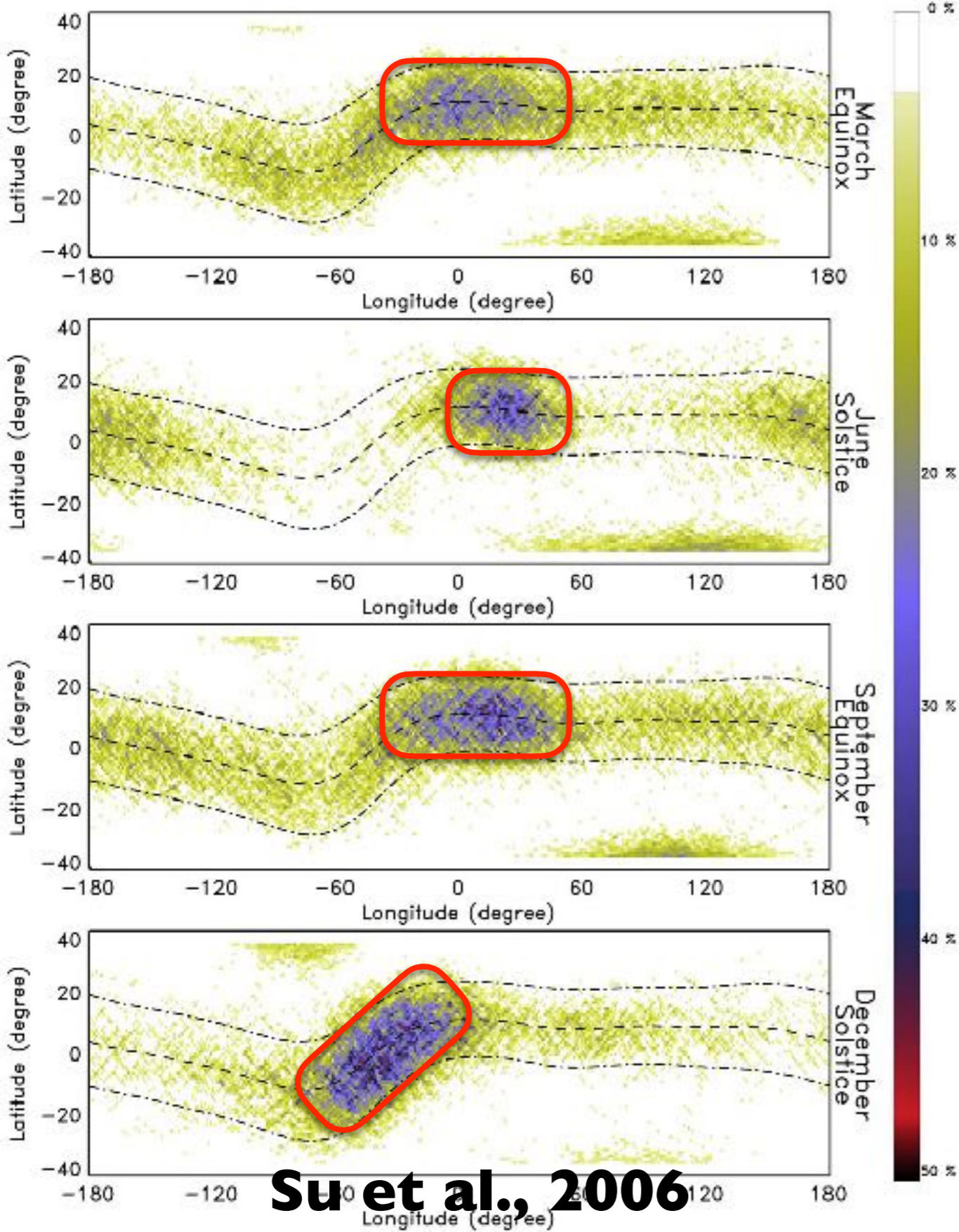
每 4 天獲得一張全球離子速度與離子溫度分布



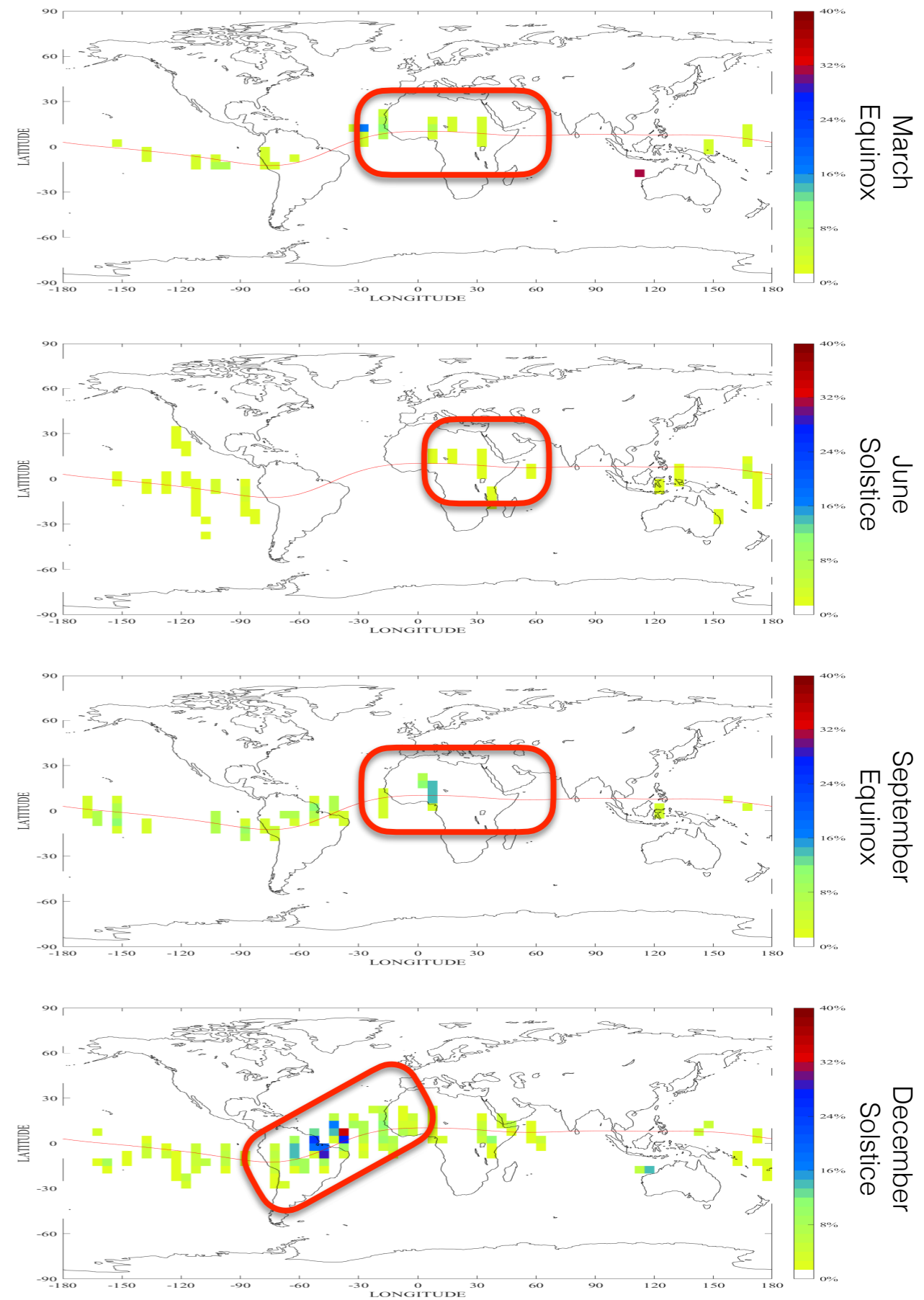
ROCSAT-1/IPEI

FORMOSAT-5/AIP

Occurrence Distribution of Density Irregularities
from Year 1999 to 2004



Su et al., 2006





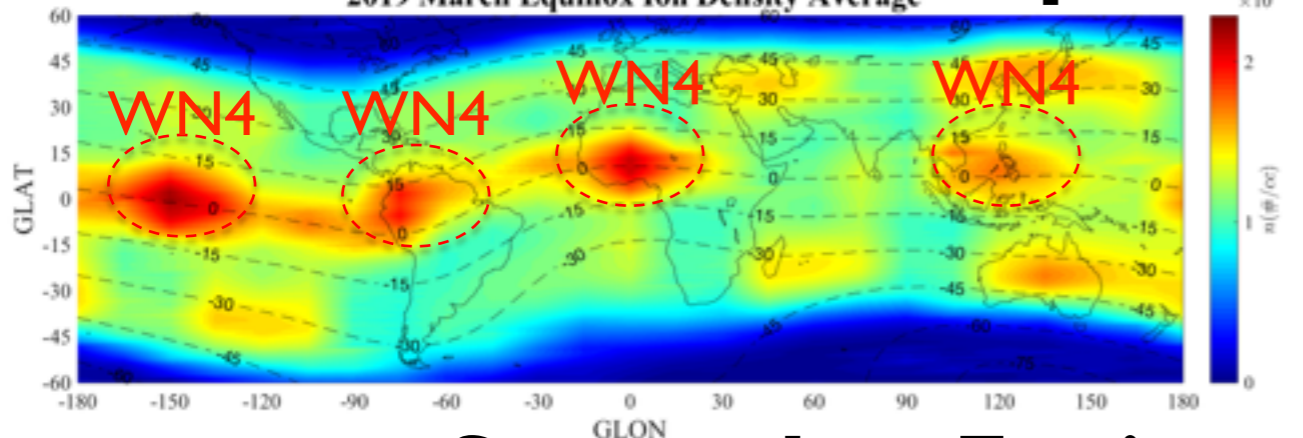
電離層電漿動力學



- 研究電漿密度空乏灣 PDB、大氣非遷移潮 WN4 密度分布、中緯度密度增強 MEDE 的物理機制，探討熱氣層與電離層交互作用對太空天氣與太空氣候的影響。

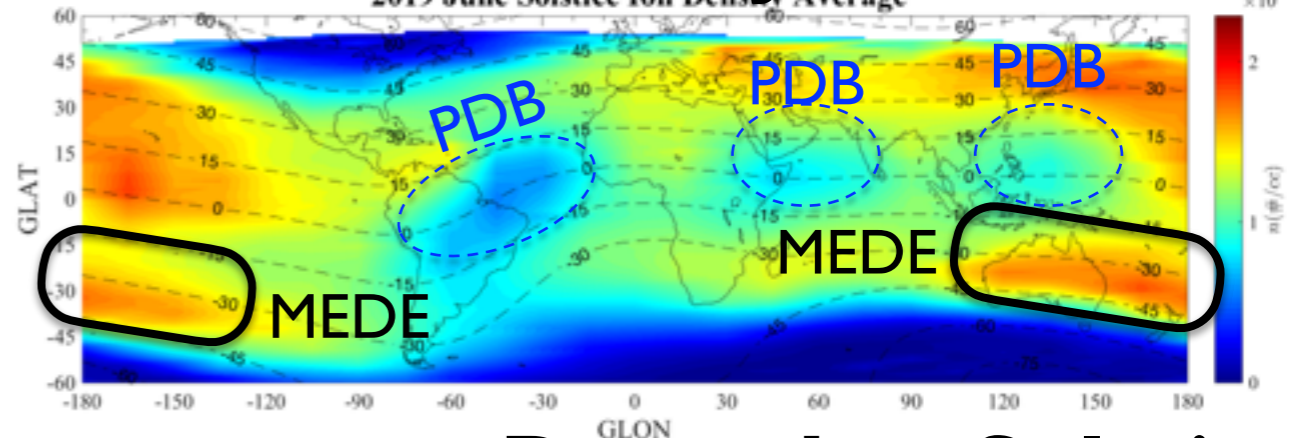
March Equinox

2019 March Equinox Ion Density Average



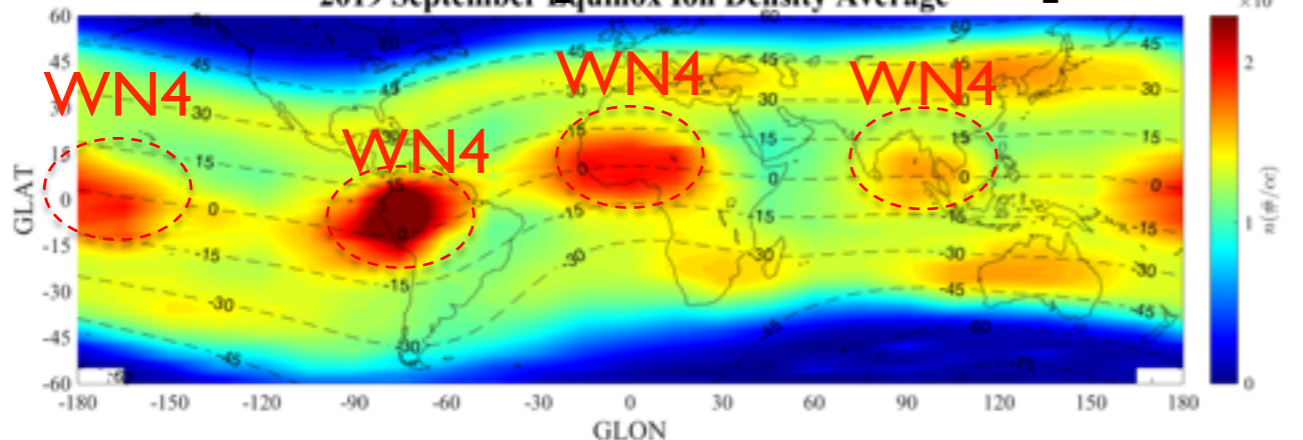
June Solstice

2019 June Solstice Ion Density Average



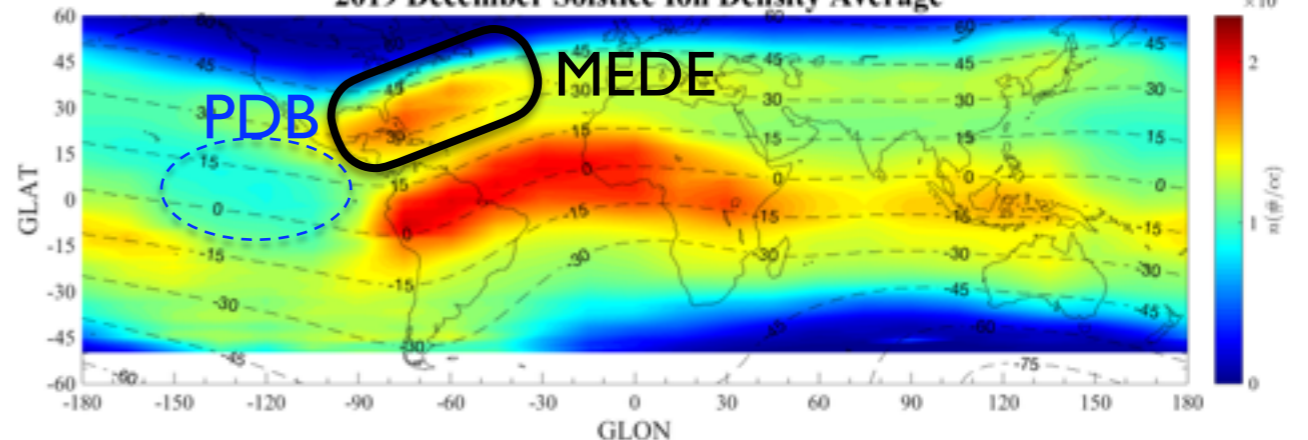
September Equinox

2019 September Equinox Ion Density Average



December Solstice

2019 December Solstice Ion Density Average





立方衛星

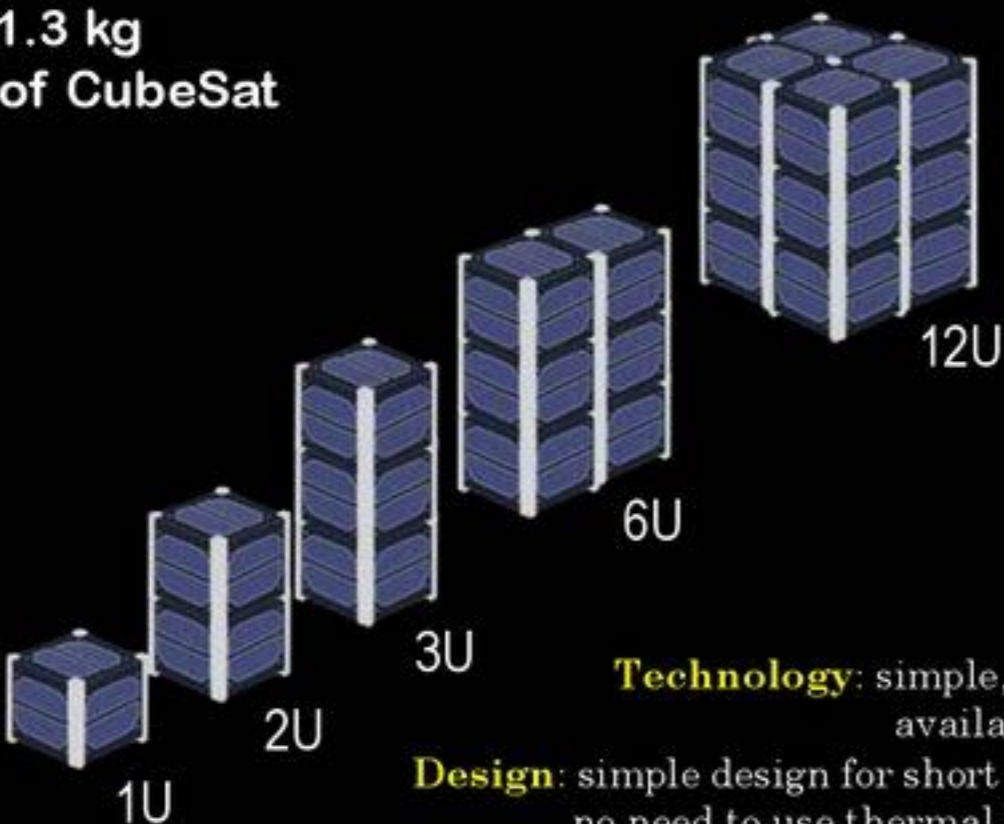


What is a CubeSat



10x10x10 cm
Dimensions of CubeSat

1.3 kg
Mass of CubeSat



Technology: simple, standard parts available off-the-shelf

Design: simple design for short mission; no need to use thermal blankets

Fast: can be built within two years

Cost: far less expensive than large satellites

SMALL SATELLITES

LARGE SATELLITE



RADARSAT-2



>1000 kg

MEDIUM SATELLITE



CASSIOPE



500-1000 kg

MINI SATELLITE



SCISAT



100-350 kg

MICRO SATELLITE



M3MSat



10-100 kg

NANO SATELLITE including CUBESAT



Ex-Altas 1



1-10 kg

1 kg per unit

Note: These weights are approximations.



科學酬載微型化



火箭酬載

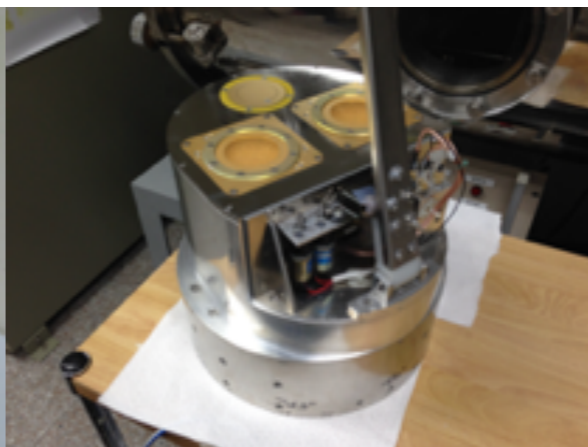
Ion Probe (IP)
onboard **Sounding Rocket V** (2006)
Sensor: 248 D x 95 H mm, 6.92 kg
Electronics: 200 D x 200 H mm, 6.67 kg



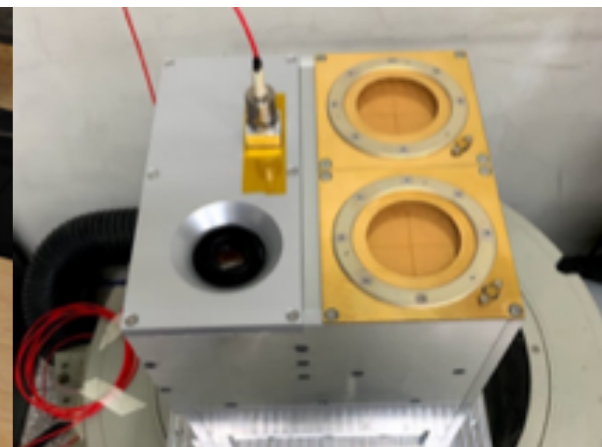
Plasma Probe (PP)
onboard **Sounding Rocket VII** (2010)
Sensor: 248/300 D x 195 H mm, 15 kg
Electronics: 300 D x 200 H mm, 4 kg



Space Plasma Sensor Package (SPSP)
onboard **Sounding Rocket IX** (2014)
Sensor: 248/300 D x 150 H mm, 14 kg
Electronics: 300 D x 100 H mm, 10 kg



Ionospheric Scintillation Package (ISP)
onboard **Hybrid Sounding Rocket**
200 L x 200 W x 202 H mm
8.1 kg

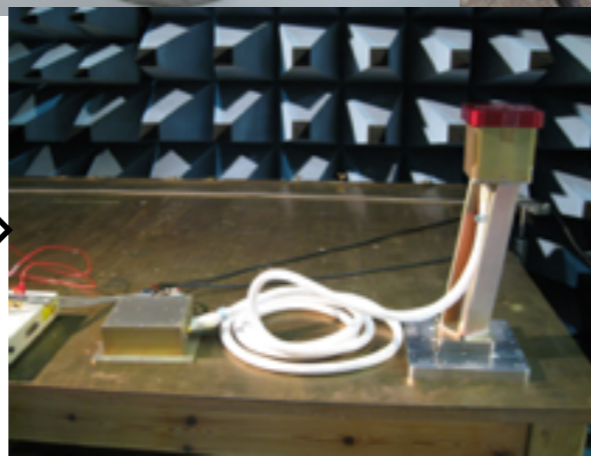


衛星酬載



Ionospheric Plasma and Electrodynamics Instrument (IPEI)
onboard **ROCSAT-1 Satellite** (1999-2004)
SEP: 295.9 L x 342.9 W x 163.3 H mm, 7.24 kg
MEP: 280 L x 128 H x 150 H mm, 3.20 kg
9.23W

多合一、全自製



Advanced Ionospheric Probe (AIP)
onboard **FORMOSAT-5 Satellite** (2017-)
Sensor: 100 L x 100 W x 100.6 H mm, 0.862 kg
SPEU: 180 L x 180 H x 60 H mm, 1.76 kg
11.9 W

立方衛星化



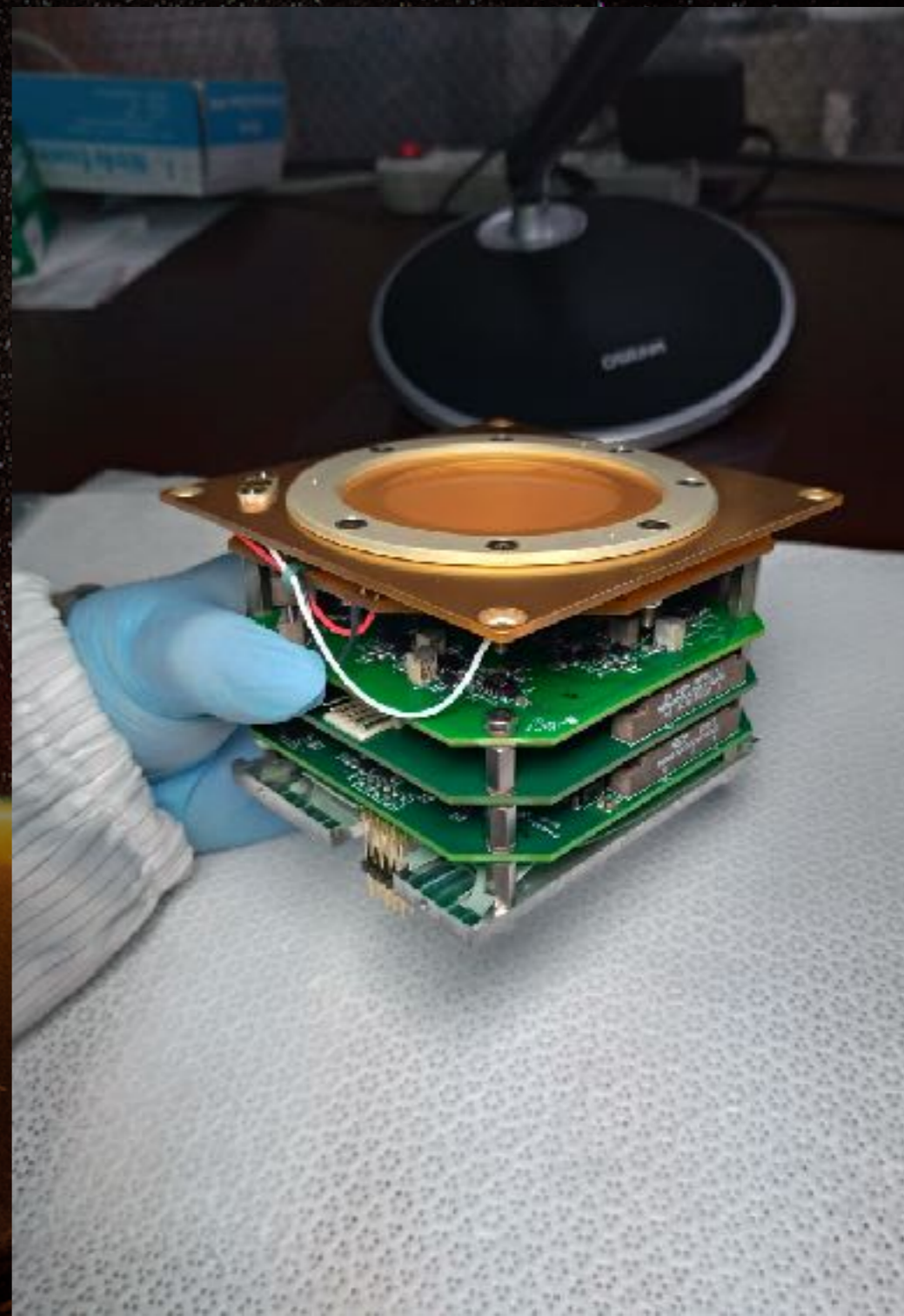
Compact Ionospheric and Probe (CIP)
onboard **INSPIRE-series CubeSats**
100 L x 100 W x 69.95 H mm
0.433 kg
3.48 W



小型電離層探測儀 CIP



- 福衛五號 AIP 縮小版，為安置在立方衛星而打造。
- 以單一探測器，用分時方式，量測完整的電離層電漿參數（離子密度、離子速度、離子溫度、電子溫度）。
- 以最高取樣率（1,024 Hz）量測電漿不規則體細微結構。
- 規格：433 g, 100 mm L x 100 mm W x 70 mm H, +12VDC, 3.48 W, LVTTTL RS-422。





導航安全



- **自駕車**（如 **Tesla, Google** 等，目前正衝擊汽車保險業的收益，減輕車輛擁有者的保險支出）與**自駕客機**（如 **Boeing, Airbus** 等，預計航空業每年可減少 350 億美元的支出）的發展孕育出**公分級的導航資訊**需求。現行民用 GNSS 接收機準確度已由 3-10 m 進步到 1-3 m（GPS III 衛星）。

自駕車

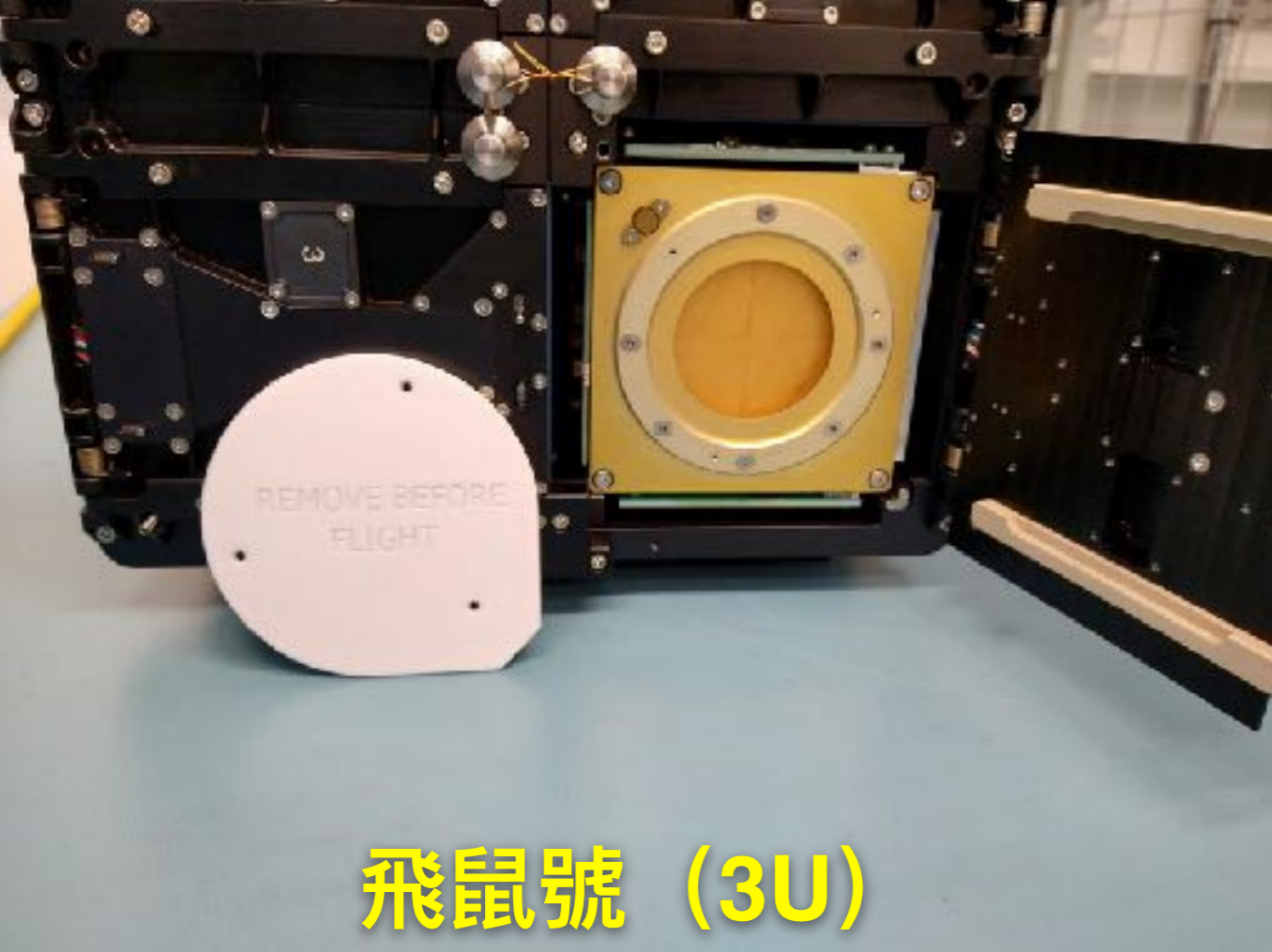


SAE J3016 Levels of Driving Automation

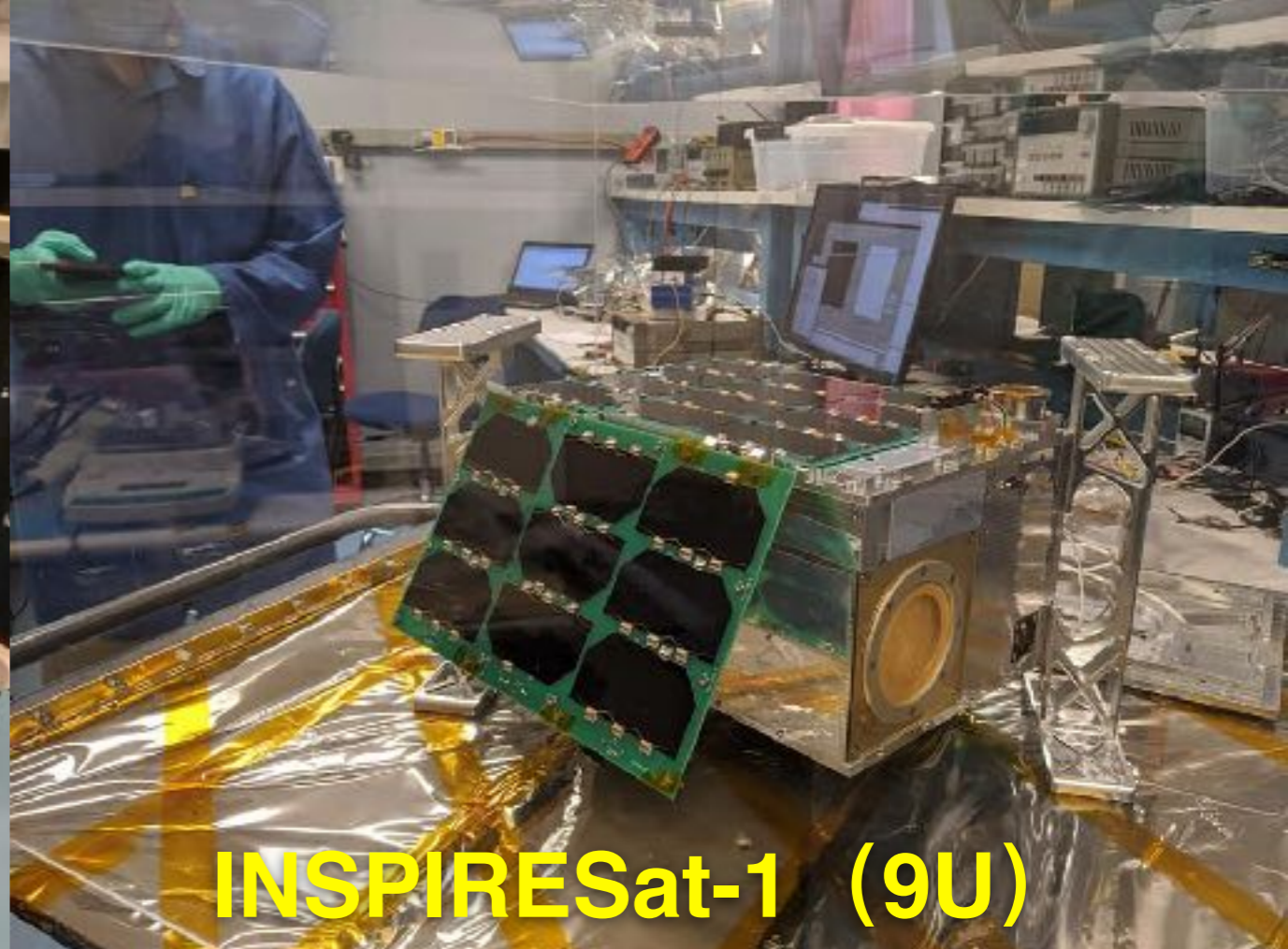
自駕客機



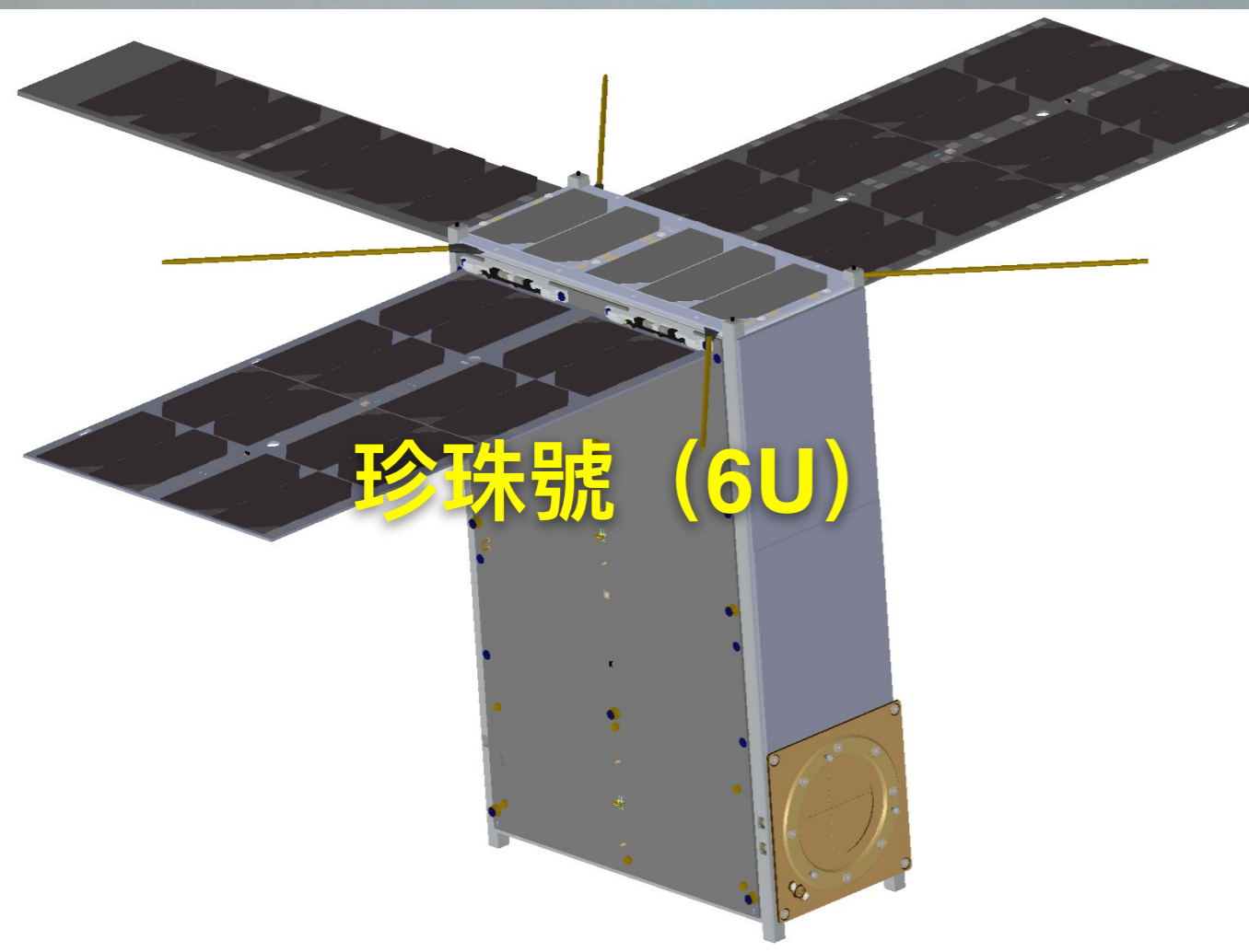
Credit: Airbus



飛鼠號 (3U)



INSPIRESat-1 (9U)



珍珠號 (6U)

12 orbital planes (35° inclination) of 12 satellites each.

