

第五章

航天器的组成及空间环境对航天器的影响

最高指示
别国有的，我们要有，别
国没有的，我们也要有。

关于带电粒子在介质中 输运的连续慢化近似方法

中国科学院高能研究所

最高指示
别国有的，我们要有，别
国没有的，我们也要有。

关于带电粒子在介质中输 运的模拟计算方法

中国科学院高能研究所

要斗私，批修。 六四三

最高指示

“抓革命，促生产，促工作，促战备”

中国人民解放第五〇一设计部： (69)五院学加字

你部设计的飞行器模拟计算方法，现已完成屏蔽计算
工作，现将计算资料、二式云图和计算方法报告呈请审阅。

附：1. 关于带电粒子在介质中输运的模拟计算方法三式

2. 关于带电粒子在介质中输运的连续慢化近似方法三式

3. 计算数据：

(1) 铅对质子的屏蔽

(2) 铅对电子的屏蔽

(3) 铅对铝板各种厚度的剂量率

北京401所生产办公室

1969.11.15

第 页

东方红一号卫星：1970年4月24日

航天器空间天气效应

	高层大气	原子氧	地磁场	银河宇宙线	太阳宇宙线	地球辐射带	电离层	磁层等离子体	流星体	空间碎片	太阳电磁辐射	地球反射	地气辐射	地球引力场
温度		★										★	★	★
通信测控								★						
计算机软错误					★	★	★							
充电					★	★	★		★			★		
化学损伤			★											
辐射损伤					★	★	★					★		
机械损伤										★	★			
姿态	★	★		★								★		
轨道	★	★							★			★		

空间环境对航天器的影响（都亨，低轨道航天器空间环境手册，1996）

与航天器设计有关的空间天气领域

空间天气区域	相关的参量	相关的问题
中性热层	大气密度、密度变化、大气成分风	制导、导航和控制系统设计；材料损伤，表面剥蚀（原子氧通量）；轨道变化和轨道寿命；传感器定向，实验设计；轨道定向误差
热环境	太阳辐射（反照率、发射的长波辐射），辐射输送，大气层透射率	被动和主动热控制系统设计；太阳能电池设计；材料选择
等离子体	电离层等离子体，极光等离子，磁层等离子体	电磁干扰，航天器表面充电与放电；材料选择
太阳表面	太阳电磁辐射和粒子辐射，磁暴，太阳/地磁指数	太阳预报，寿命/拽力评定，再入负载加热，意外事故处理
电离辐射	捕获质子/电子，银河宇宙线，太阳粒子事件	电子部件损伤，航天器内部充电，单粒子事件，材料损伤
磁场	地磁场	在大结构中的感应电流，南大西洋异常，辐射带位置
中间层	大气密度、密度变化；风	航天器再入，材料选择，系绳实验设计

环境参数	低轨道 (100-1000KM)	中轨道 (1000-10000km)	地球同步轨道 (36000km)	行星际飞行轨道
中性大气	阻力对轨道影响严重, 原子氧对表面腐蚀严重	没有影响	没有影响	没有影响
等离子体	影响通信, 电源泄露	影响微弱	充电问题严重	影响微弱
高能带电粒子	辐射带南大西洋异常区和高位地区宇宙线诱发单粒子事件	辐射带和宇宙线的计量效应及单粒子效应严重	宇宙线的计量效应和单粒子事件效应研究	宇宙线的计量效应和单粒子事件效应研究
磁场	磁力距对姿态有严重影响	磁力距对姿态有影响	影响微弱	没有影响
太阳电磁辐射	对表面材料有影响	对表面材料有影响	对表面材料有影响	对表面材料有影响
地球大气辐射	对航天器辐射收支有影响	影响微弱	没有影响	没有影响
流星体	有低碰撞概率	有低碰撞概率	有低碰撞概率	有低碰撞概率

1、航天器的组成



有效载荷分系统

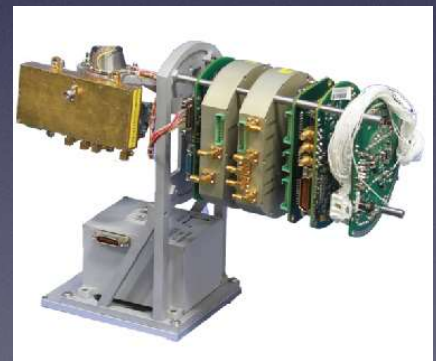
航天器上装载的执行特定航天任务的仪器、设备，有时还包括执行任务的航天员和各种实验生物

★ 信息获取类:用于对地观测的各类遥感器

- ▶ 可见光相机、多光谱相机、多谱段扫描仪、微波辐射计、合成孔径雷达、电视摄像机和无线电侦查接收机
- ▶ 用于气象卫星、地球资源卫星、海洋卫星和成像侦查卫星



多光谱相机



合成孔径雷达

★ **信息传输类：** 用于中继通信的仪器、设备和系统

- ▶ 主要包括各种通信转发器和通信天线
- ▶ 用于通信卫星和兼有通信功能的其他卫星

★ **信息基准类：** 用于提供空间基准信息和时间基准信息的各种仪器、设备和系统

- ▶ 主要包括无线电信标机、激光反射器、高稳定度振荡器和原子钟
- ▶ 用于导航卫星和测地卫星

★ **科学探测和实验类：**用于探测空间环境、观测天体、暗物质和空间科学实验的各种仪器、设备、系统以及实验生物、各种实验件等

- ▶ 电离层探针、粒子探测器、磁强计、质谱仪、红外天文望远镜、材料加工炉及微生物培养箱
- ▶ 各种科学卫星



科大有效载荷研制平台



磁强计

★ 航天员



结构与机构分系统

航天器结构：支撑航天器上有效载荷以及其他各分系统的骨架，用来支撑和固定航天器上的各种仪器设备，使他们构成一个整体，好比人体的骨骼

★按结构在承载中的作用

主结构：与运载火箭对接

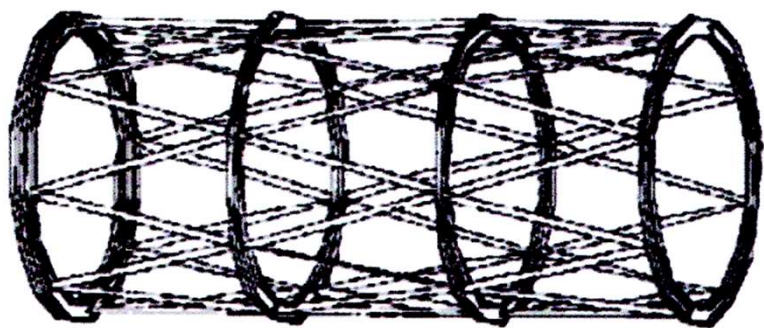
次结构：与主结构连接的各种结构

★根据航天器结构部件的形状

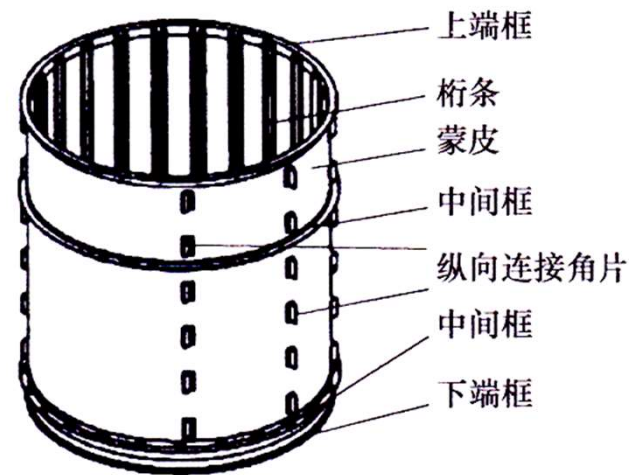
杆系结构

板式结构

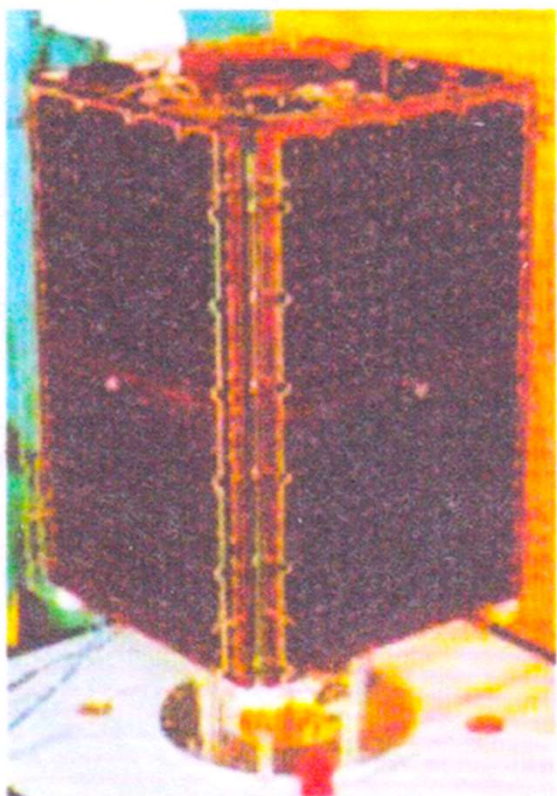
壳体结构



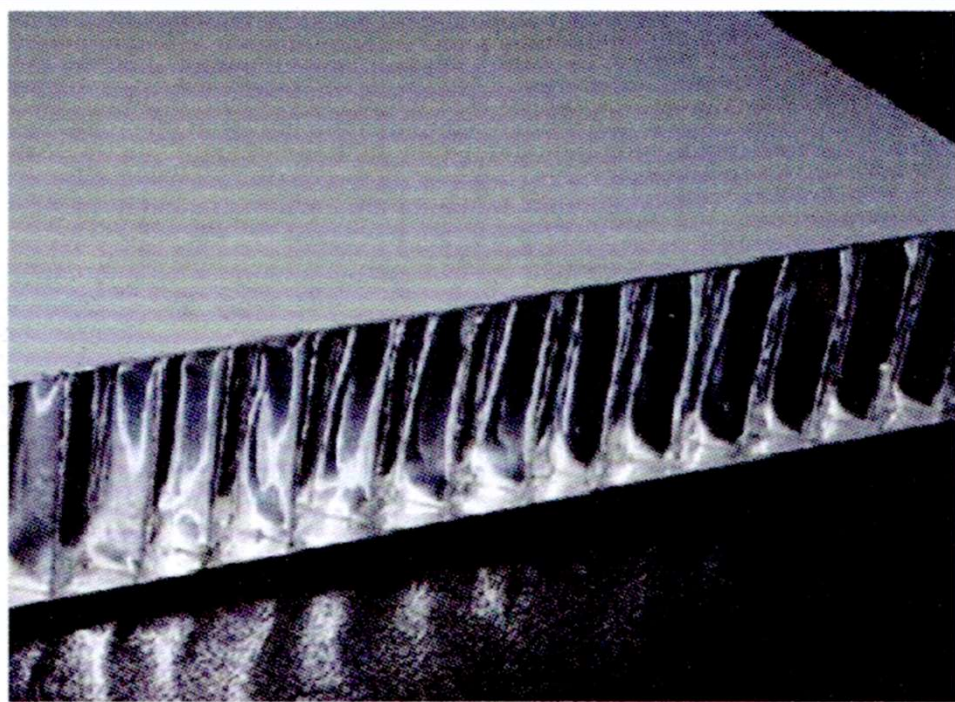
▲ 空间望远镜筒桁架结构



▲ 桁条加筋中心承力筒



▲ 卫星箱型板式结构



▲ 卫星舱板的铝蜂窝夹层板结构

结构与机构分系统

航天器机构：至少由一个运动部件和一个动力源组成

- ▶ **运动部件**：用于实现特定的动作，其形式根据机构的具体功能来确定
- ▶ **动力源**：用于使上述运动部件产生运动

常见的机构类型

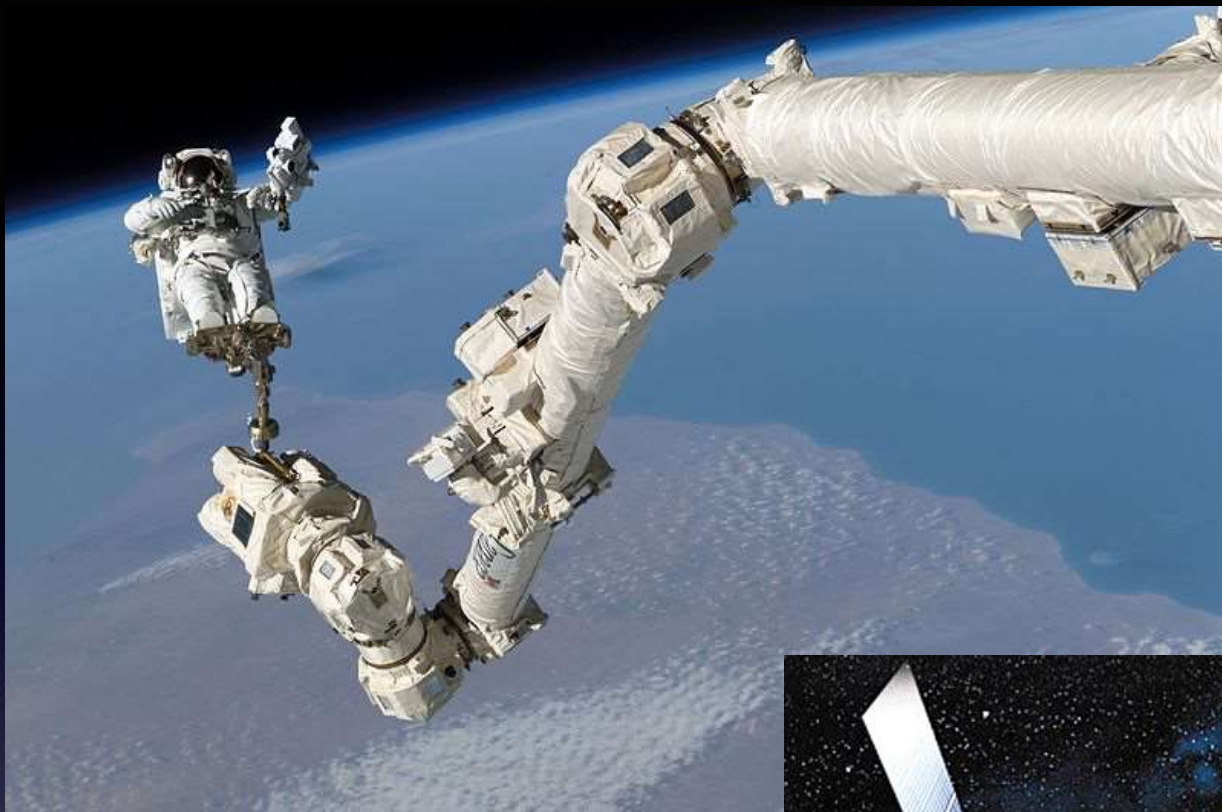
★压紧与释放机构

★连接与分离结构

★跟踪指向结构

★舱门机构

★对接机构



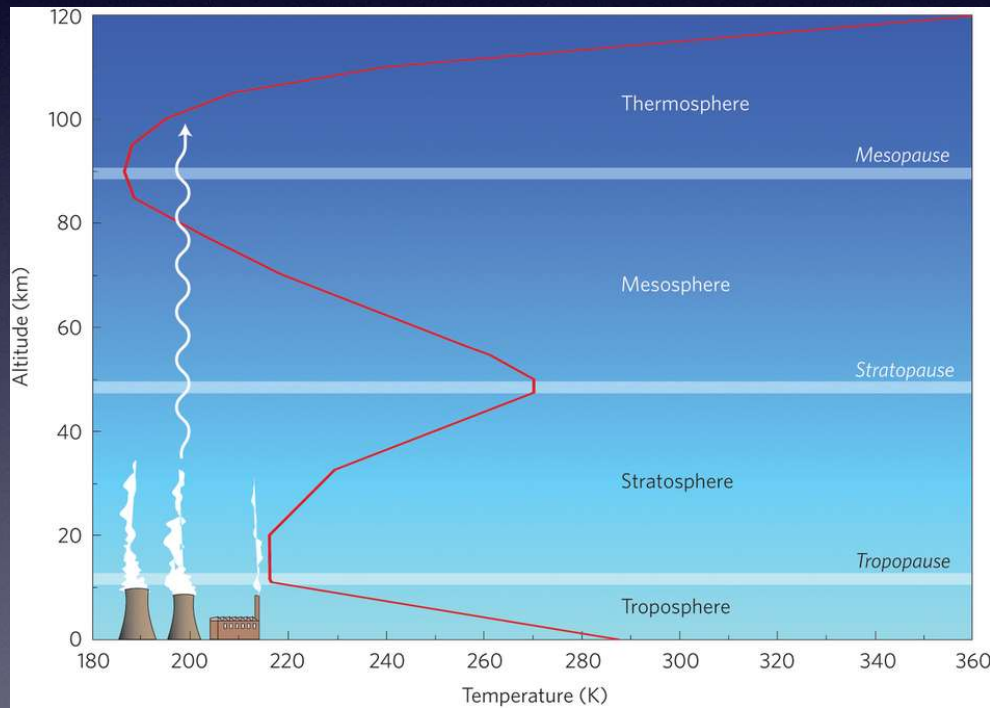
航天飞机机械臂



飞船对接

热控分系统

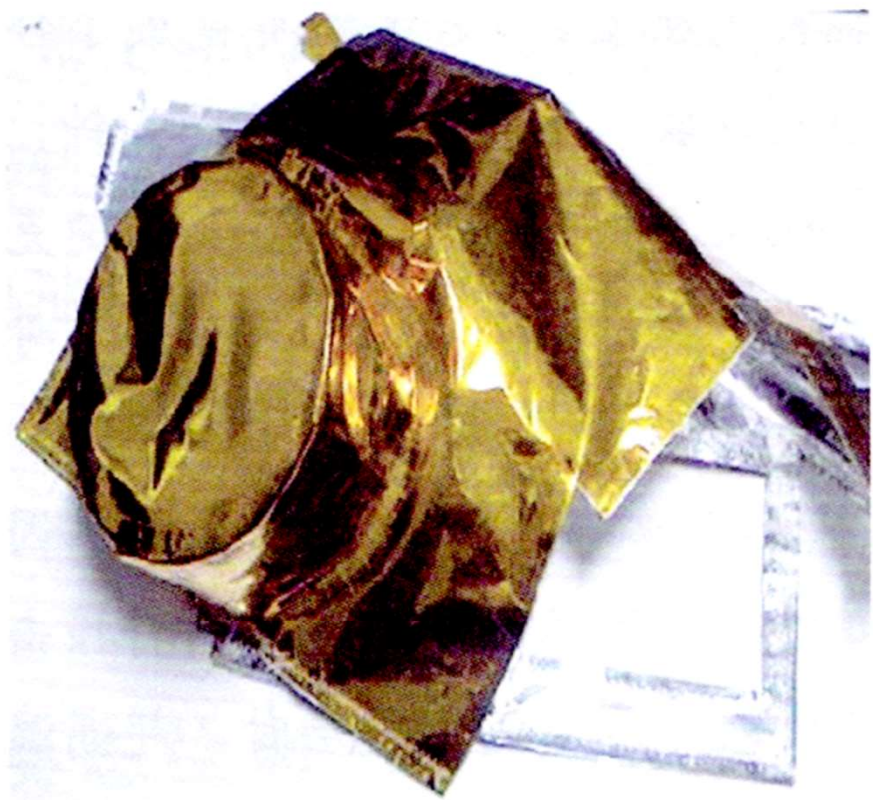
通过合理组织、控制航天器内部和外部的热交换过程，使各部位的温度处于要求的范围内，保证各仪器设备能够正常工作。



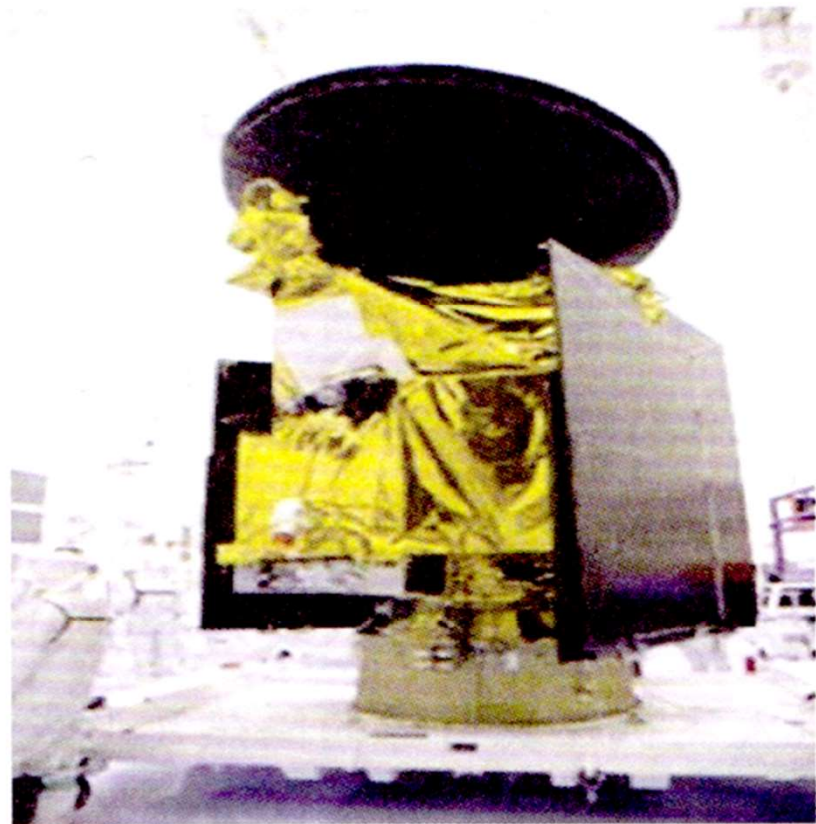
★ 被动热控技术

★ 主动热控技术

地球大气不同高度的温度



▲ 航天器表面多层隔热材料



▲ 被多层隔热材料包裹的航天器

姿态与轨道控制分系统

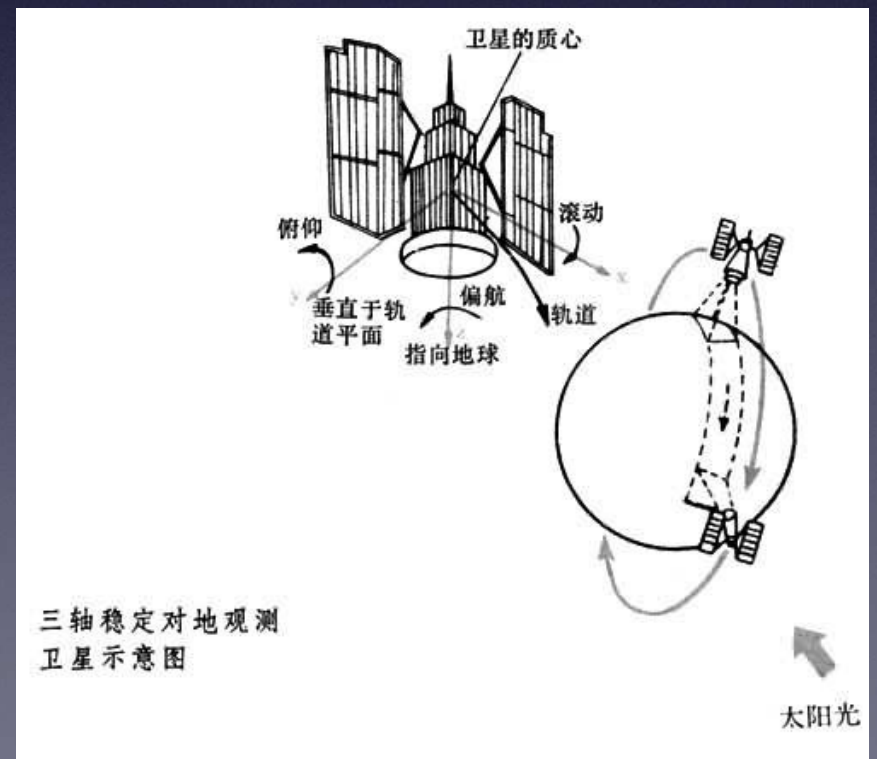
保证航天器以正确的姿态运行在正确的轨道上

姿态控制

- ★ 由姿态敏感器、姿态控制器和姿态控制执行机构组成
- ★ 分为主动控制和被动控制

轨道控制

- ★ 改变航天器飞行速度的大小和方向



推进分系统

产生喷气作用力从而改变航天器的姿态及轨道，是航天器的动力源

- ▶ 冷气推进
- ▶ 化学推进
- ▶ 电推进



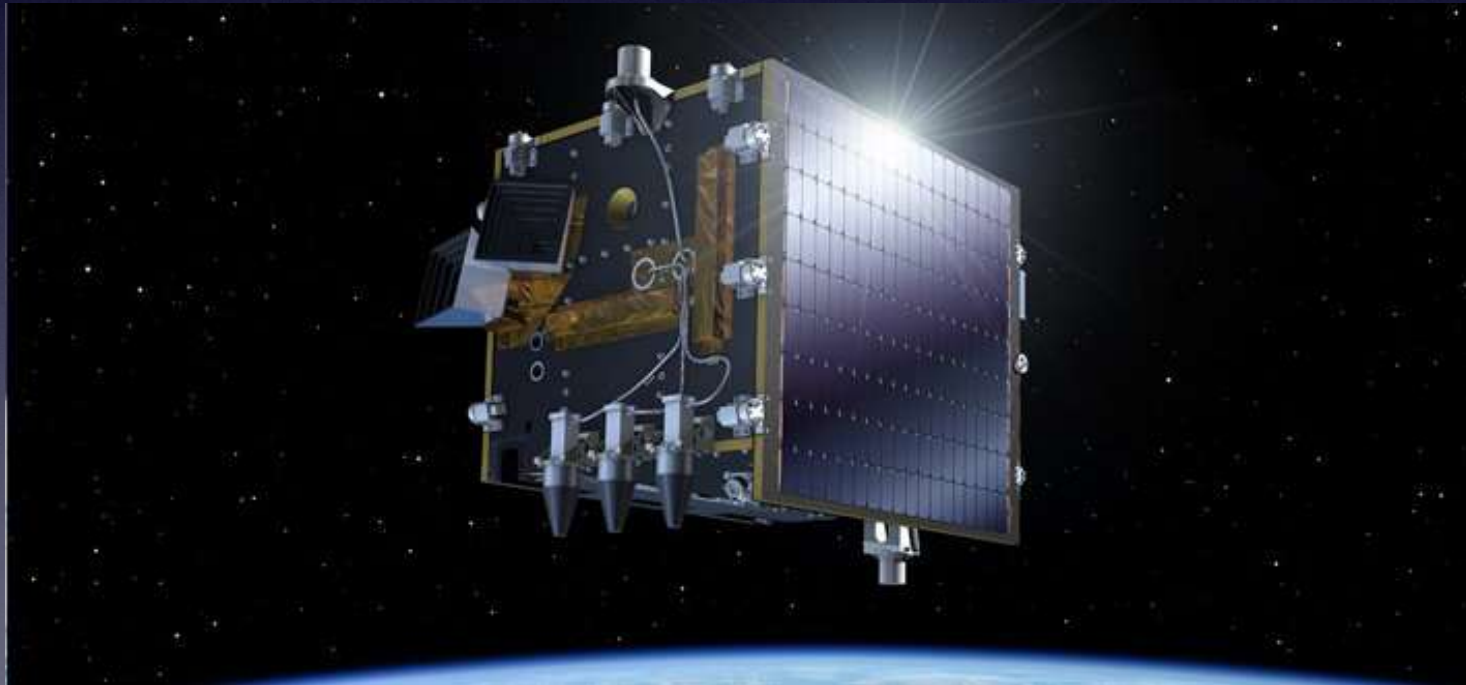
电源分系统

- ★ 负责在航天器各个飞行阶段为航天器上的仪器设备提供电能、直至寿命结束
- ★ 由发电装置、电能存储装置、电源控制装置等硬件和软件组成



数据管理分系统

控制、管理航天器上各种仪器设备的工作程序，协调他们之间的工作，统一管理航天器上各种输入和输出信息



测控分系统

通过发送和接收测控信息，来保持地面和在轨航天器之间的联系，使地面控制站能够测量出航天器的飞行轨道，知道航天器飞到了什么地方，还将飞过哪些地方，了解航天器各种仪器的健康状况，以及向航天器发送指令执行各种任务

- ★ 遥测
- ★ 遥控
- ★ 跟踪测轨



2、空间天气事件如何影响航天器

★ 8分钟：电磁辐射

大气密度增加、电离层骚扰

★ 几十分钟：高能带电粒子

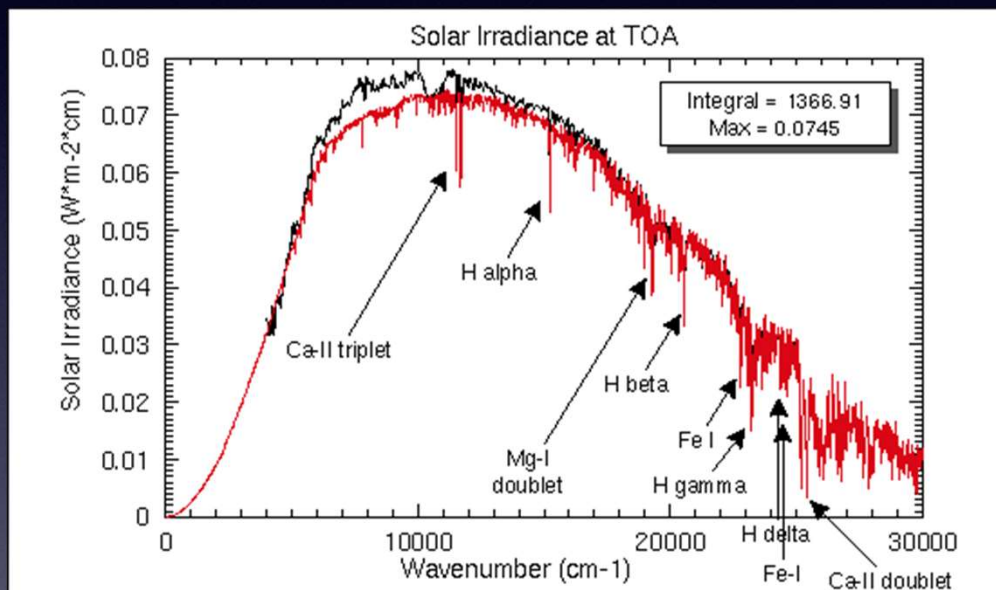
器件逻辑状态翻转、材料遭受损伤加重

★ 两三天后：等离子体云

大气密度增加、电离层爆、高能电子爆

太阳电磁辐射

太阳常数：在地球大气层外，太阳在单位时间内投射到距太阳平均日地距离处、垂直于射线方向的单位面积上的辐射总能量。



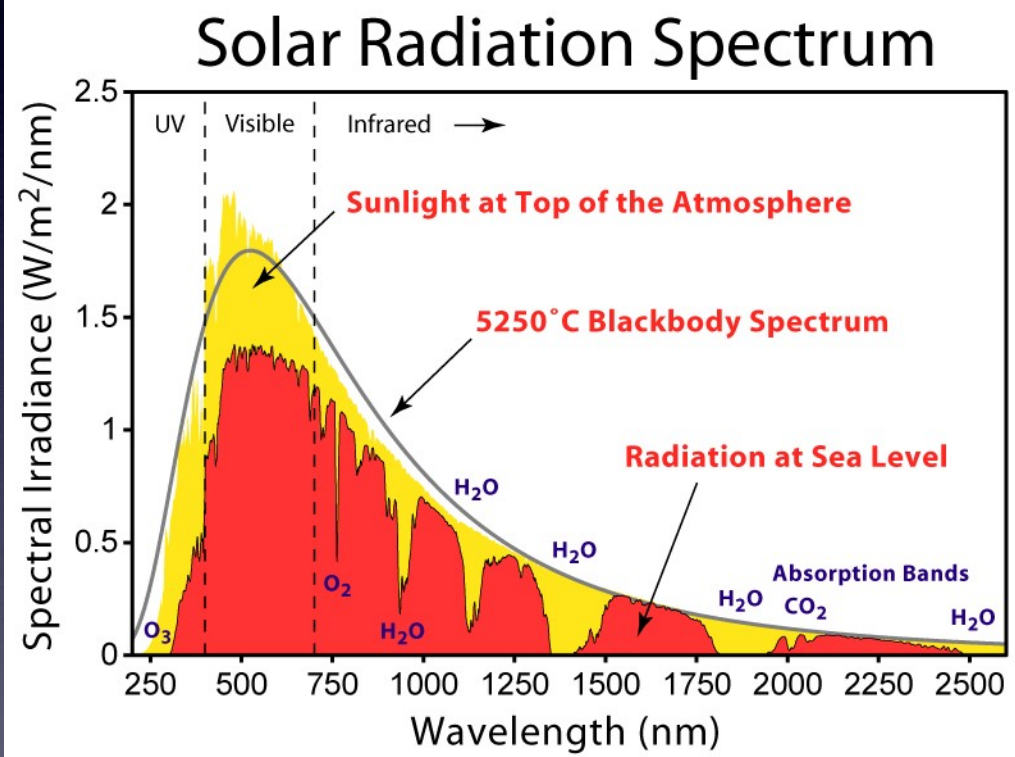
Ca-II triplet:	11545, 11707, 11767
H alpha:	15237
Mg-I doublet:	19292, 19332
H beta:	20571
Fe-I:	22812
H gamma:	23039
H delta:	24380
Fe-I:	24723
Ca-II doublet:	25202, 25426

Balmer Series, n = 2,3,4,5...

$$27427 * (1 - 4/n^2)$$

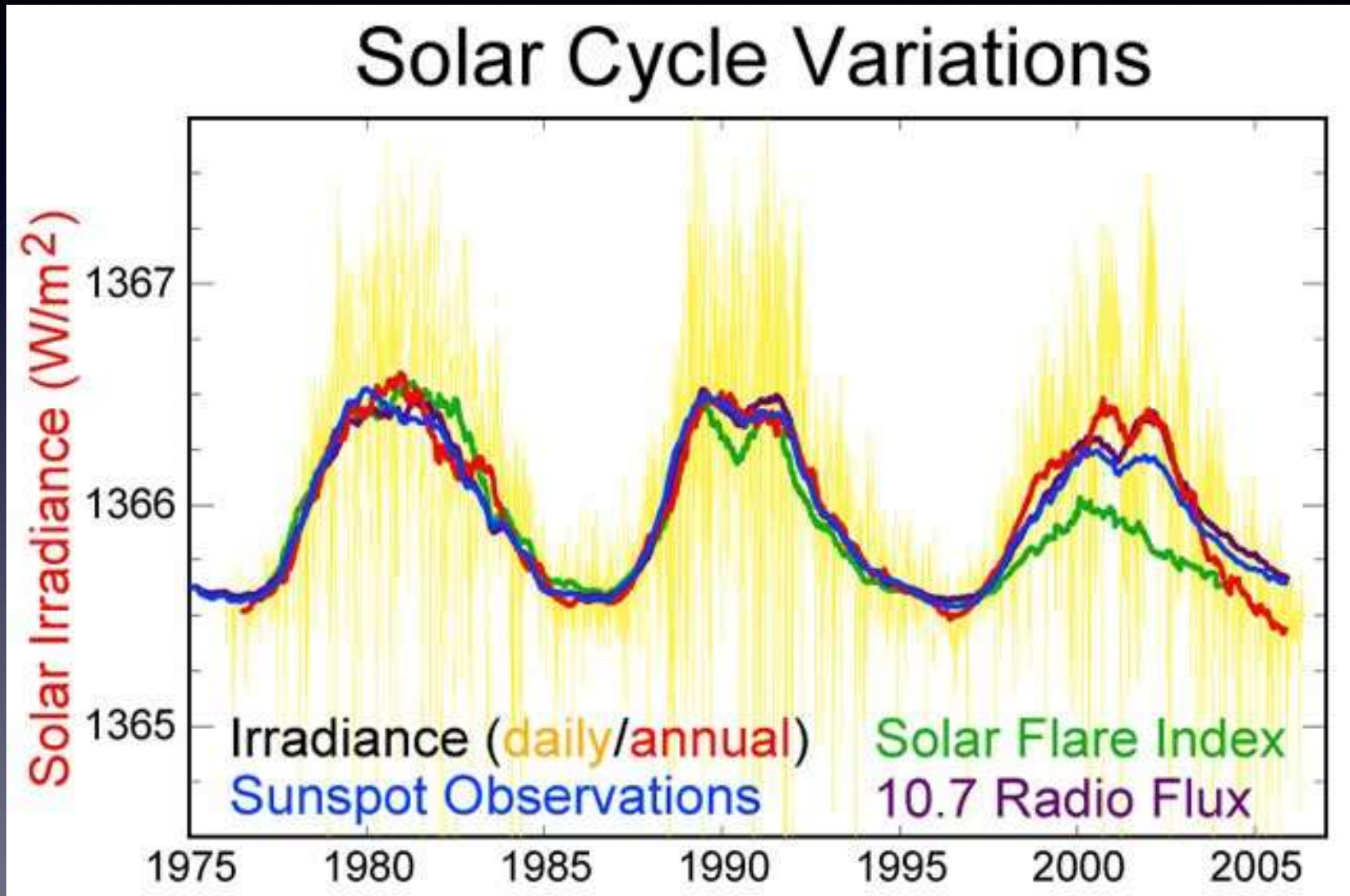
$$= 27430 * (5/9, 3/4, 21/25, 8/9)$$

$$= 15237, 20570, 23039, 24380$$

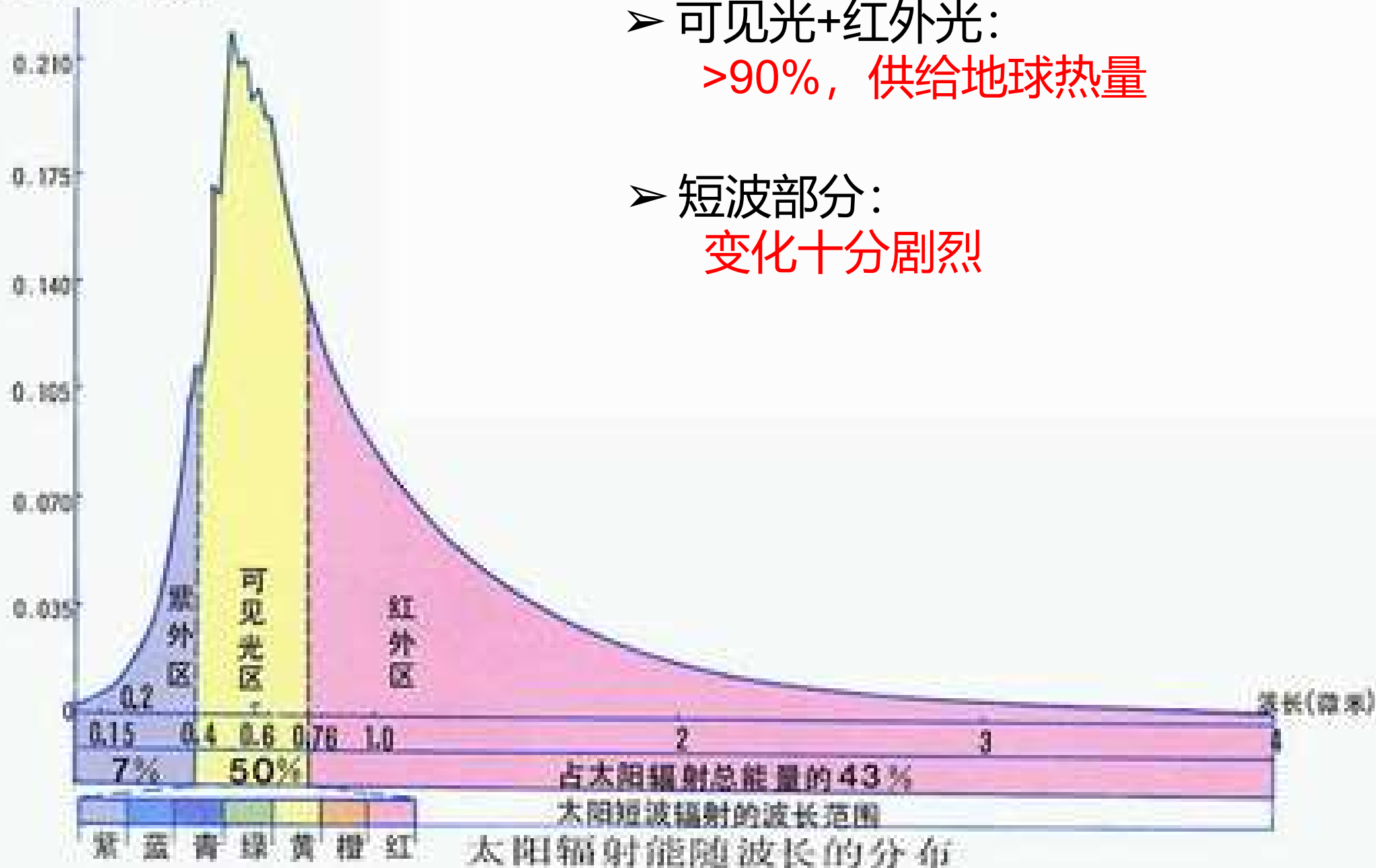


- 包括所有形式的辐射
- 约为 $1367W/m^2$
- 随太阳活动等发生变化

太阳常数的太阳周变化



辐射能力
(瓦耳·厘米·秒厘米)



➤ 可见光+红外光:
>90%, 供给地球热量

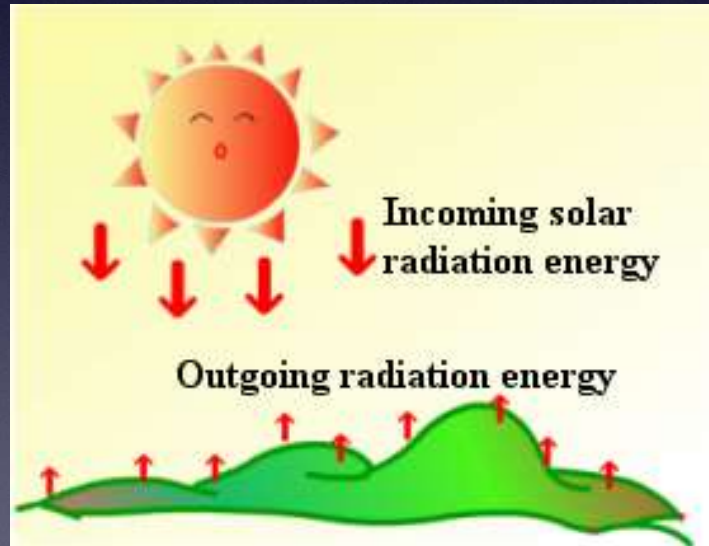
➤ 短波部分:
变化十分剧烈

电磁辐射对航天器的影响

电磁辐射



加热大气



大气密度
增加



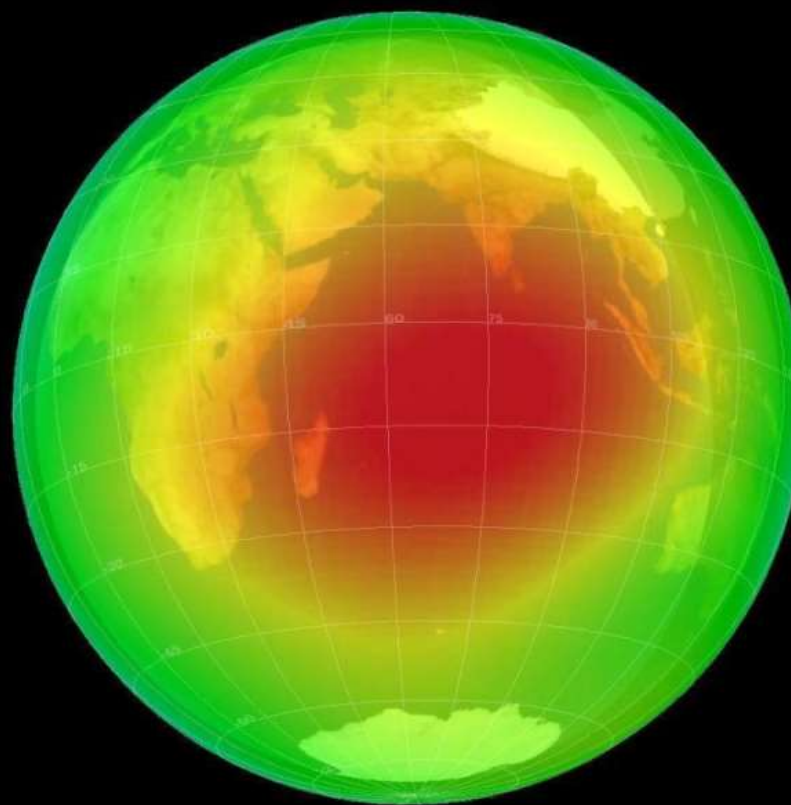
航天器轨道
阻力增加

大气密度在太阳爆发期间的剧烈变化



大气总质量密度 (kg/m^3)

0.0e+00 5.0e-13 1.0e-12 1.5e-12 2.0e-12 2.5e-12 3.0e-12



大气总质量密度 (kg/m^3)

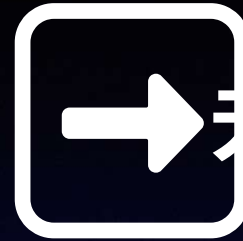
0.0e+00 5.0e-13 1.0e-12 1.5e-12 2.0e-12 2.5e-12 3.0e-12

电磁辐射对航天器的影响

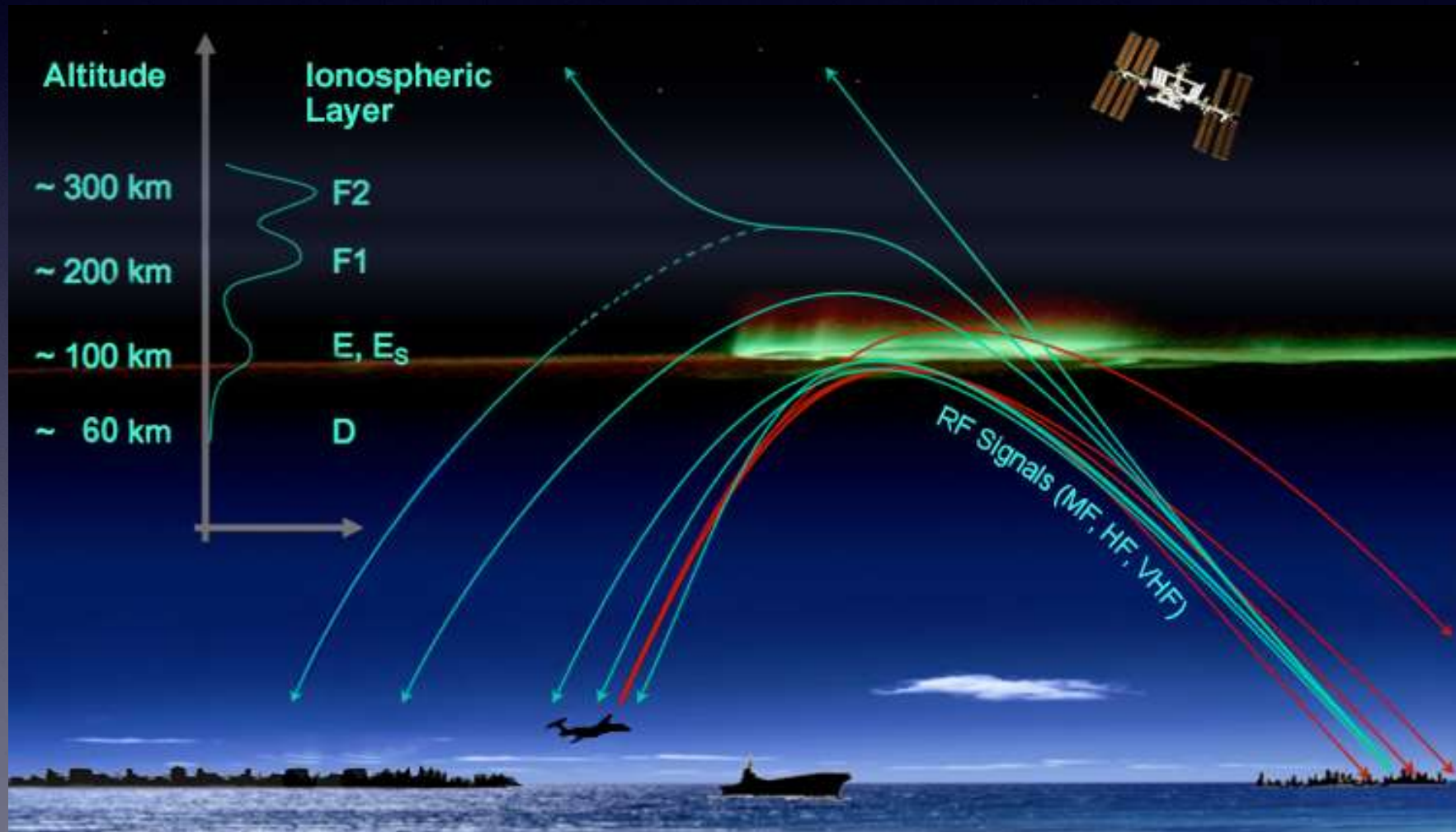
电磁辐射



电离层扰动

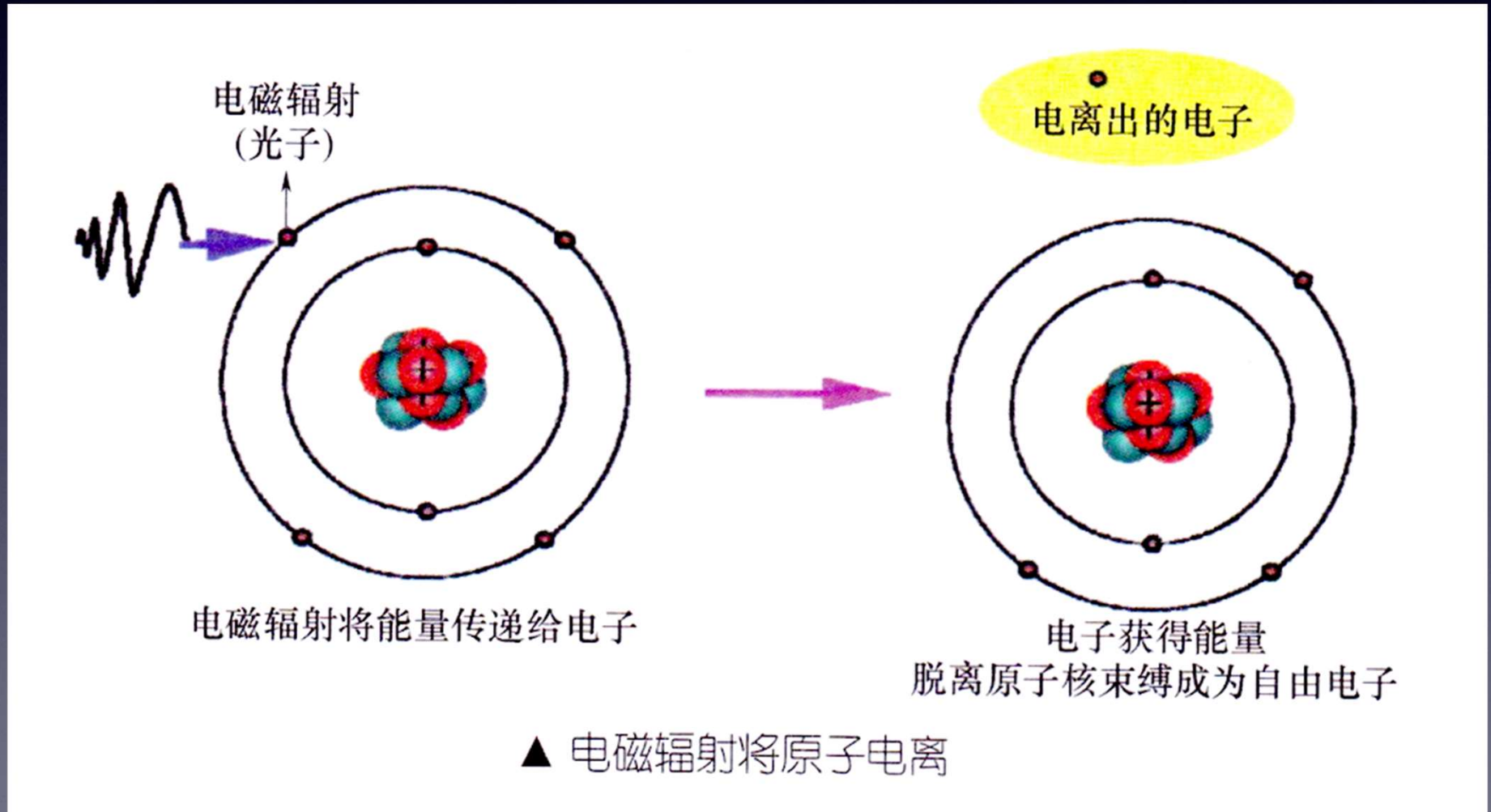


无线电波信号传输

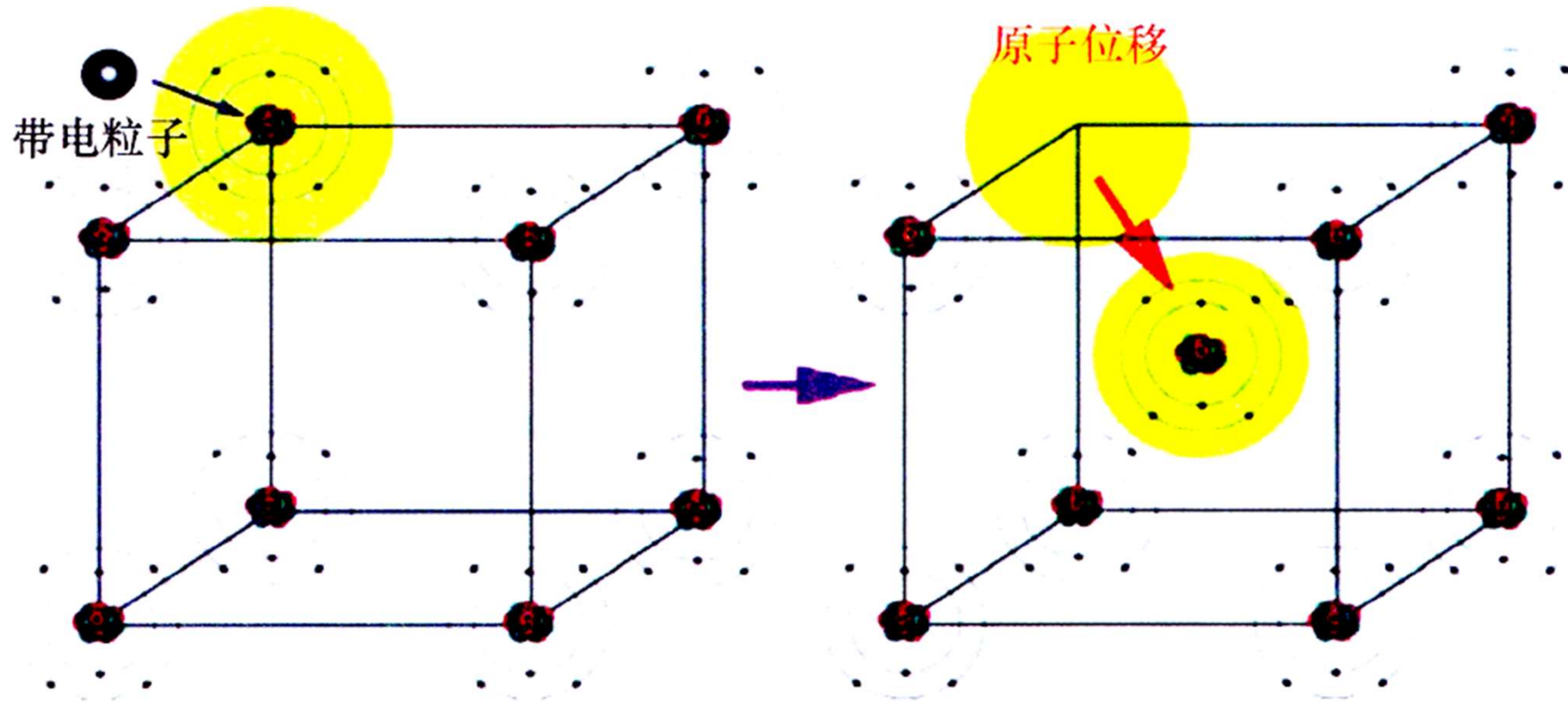


带电粒子与航天器的相互作用

带电粒子与原子的作用+带电粒子在航天器中的驻留



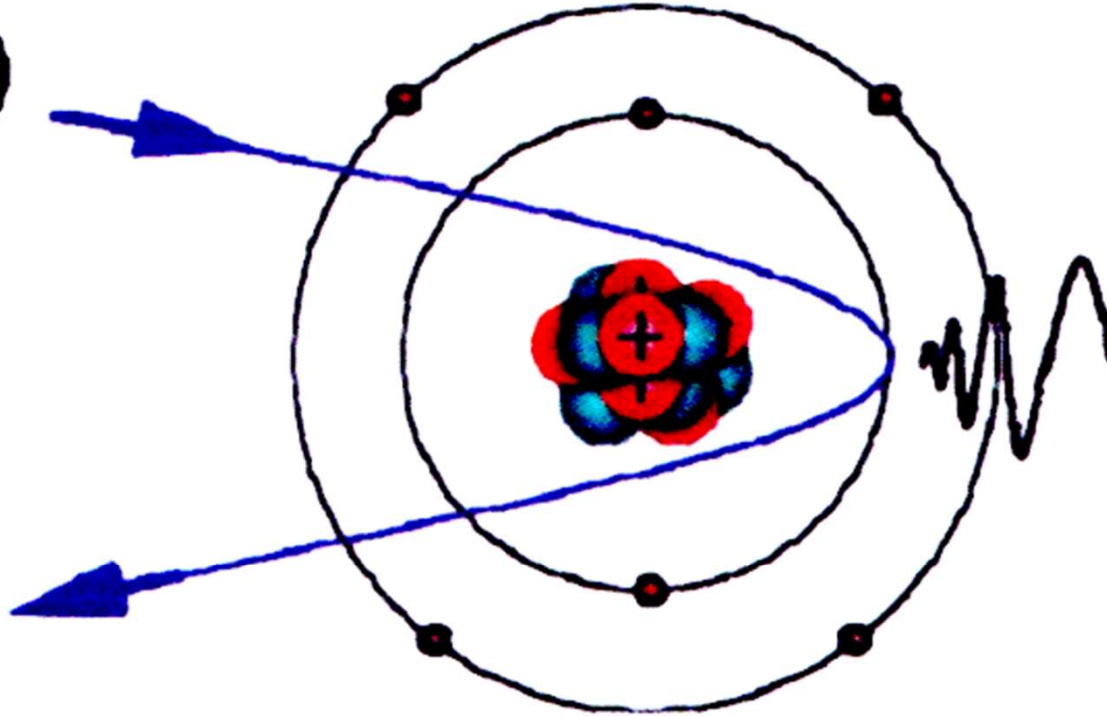
带电粒子与航天器的相互作用



▲ 带电粒子与原子发生碰撞产生原子位移

带电粒子与航天器的相互作用

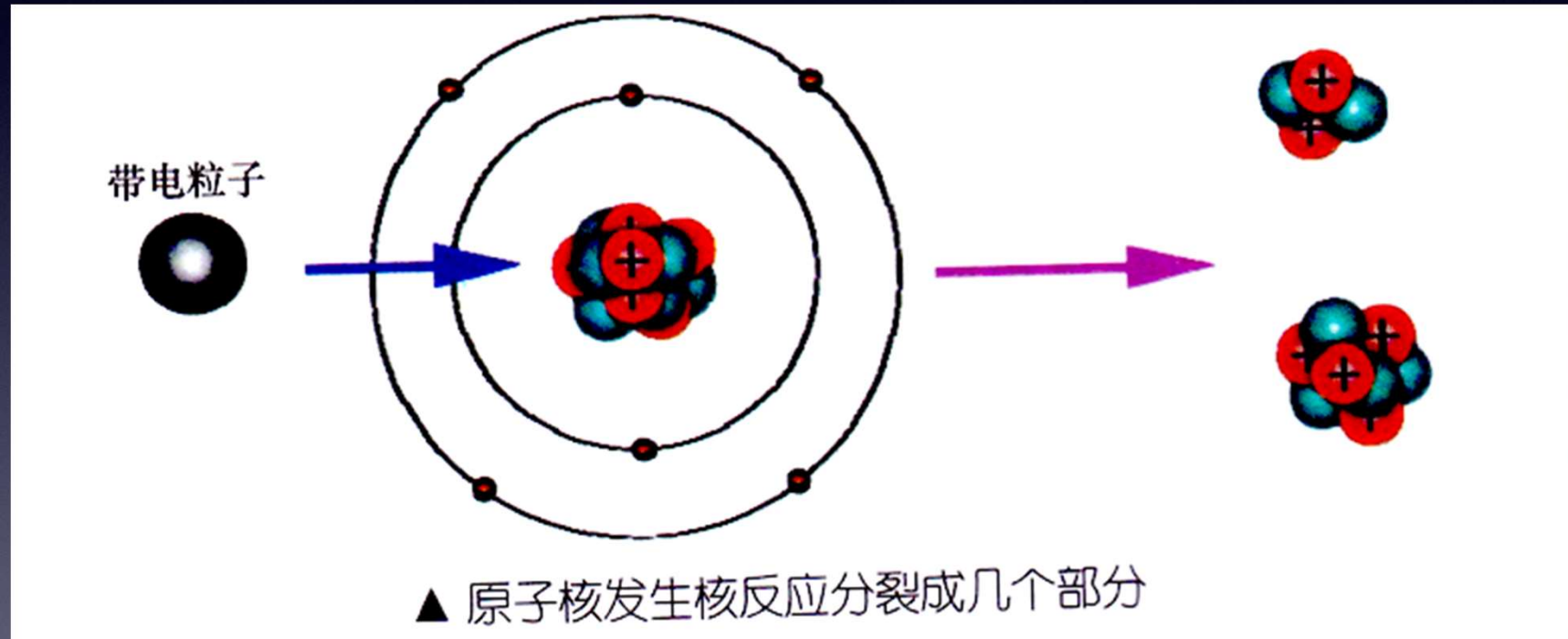
带电粒子



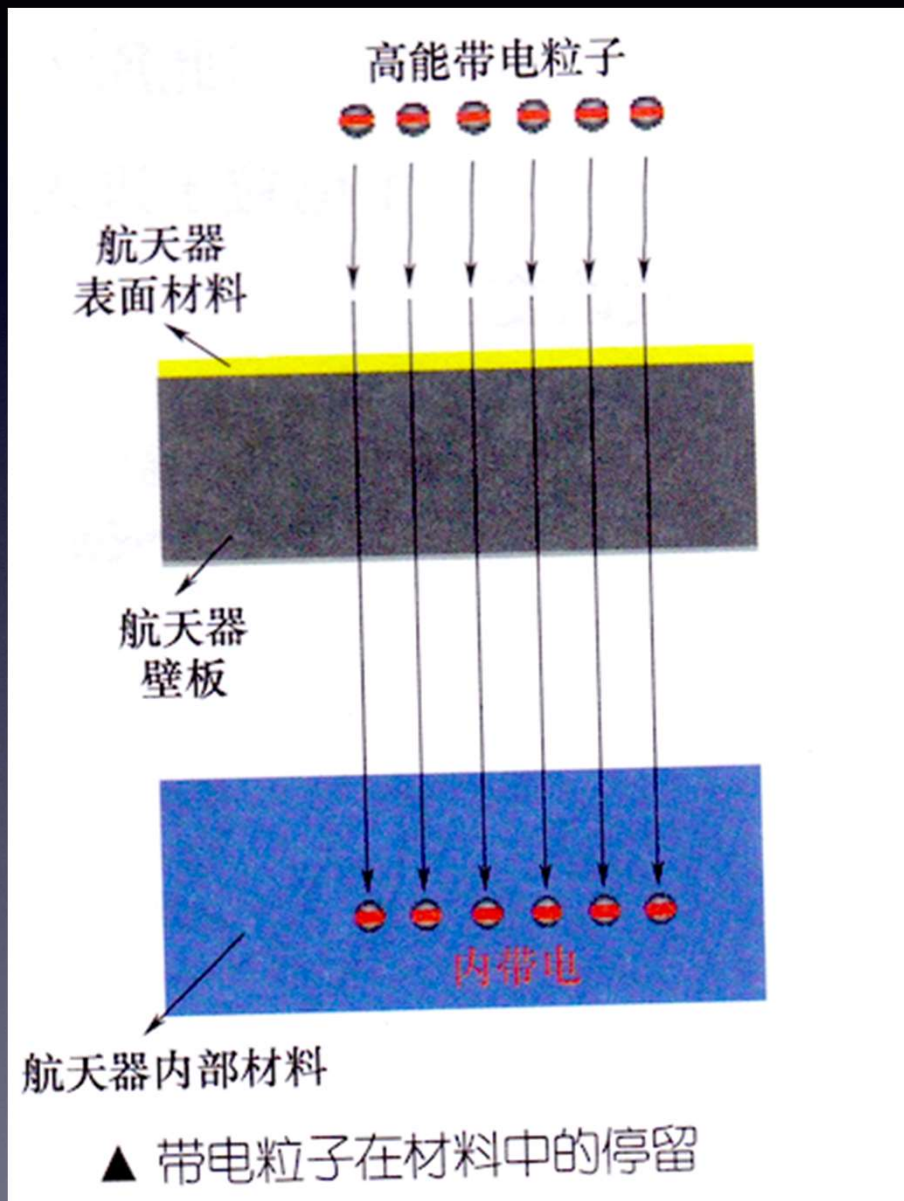
轫致辐射出的X射线

▲ 带电粒子在原子核电场中发出轫致辐射

带电粒子与航天器的相互作用



带电粒子与航天器的相互作用



带电粒子的停留



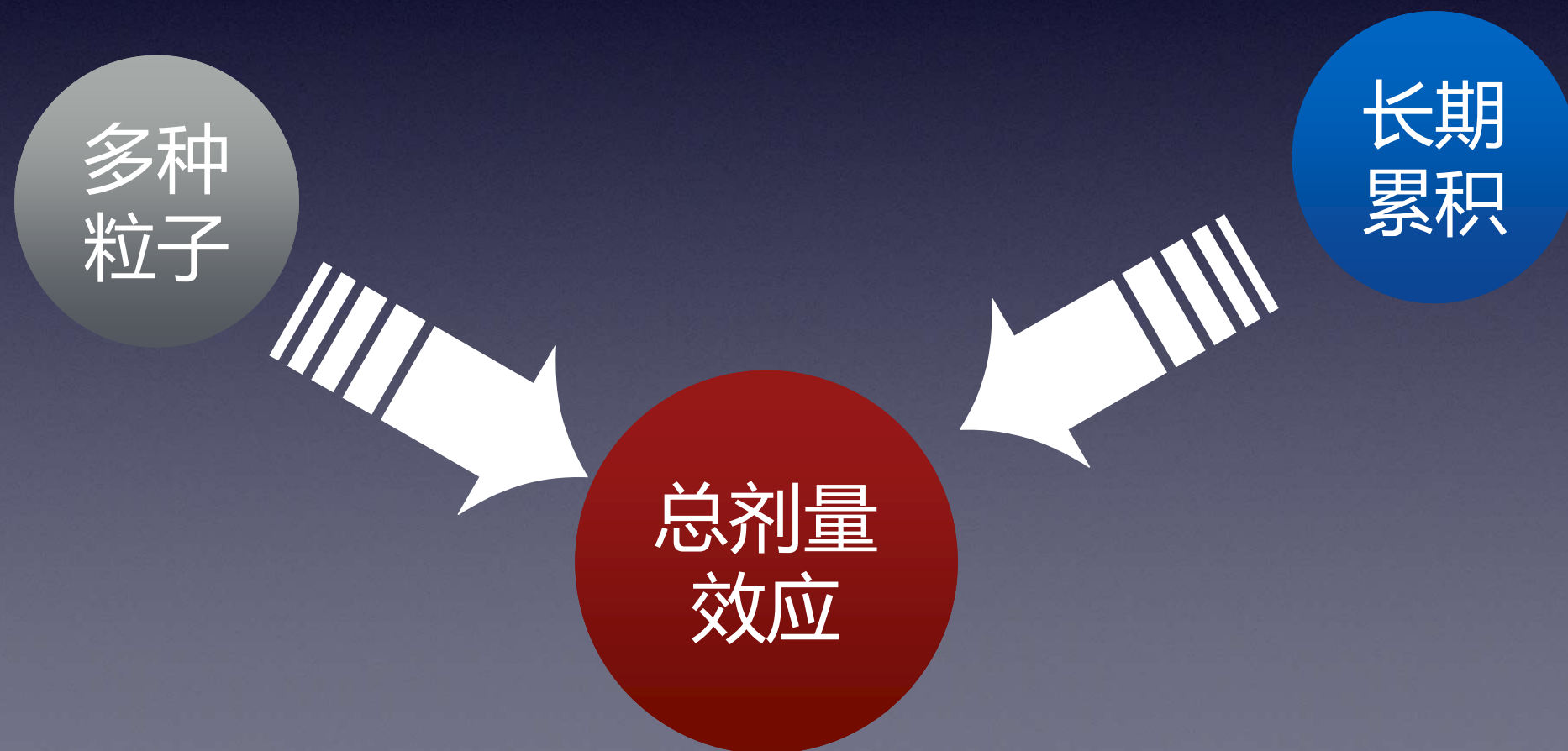
电荷累积



静电放电

电离总剂量效应—器件和材料性能的逐渐退化

电离总剂量效应：航天器元器件和材料处于空间辐射环境中，吸收电离作用传递的能量后，元器件和材料将会出现性能衰退、参数漂移等现象



电离总剂量效应：器件和材料性能的逐渐退化

$$\text{电离总剂量} = \frac{\text{各种能量空间粒子在物质中沉积能量总和 (焦耳)}}{\text{物质的质量(千克)}}$$

国际单位制： Gray (Gy, 戈瑞)

1戈瑞=1焦耳/千克

Rad (拉德) : 1Gray=100Rad

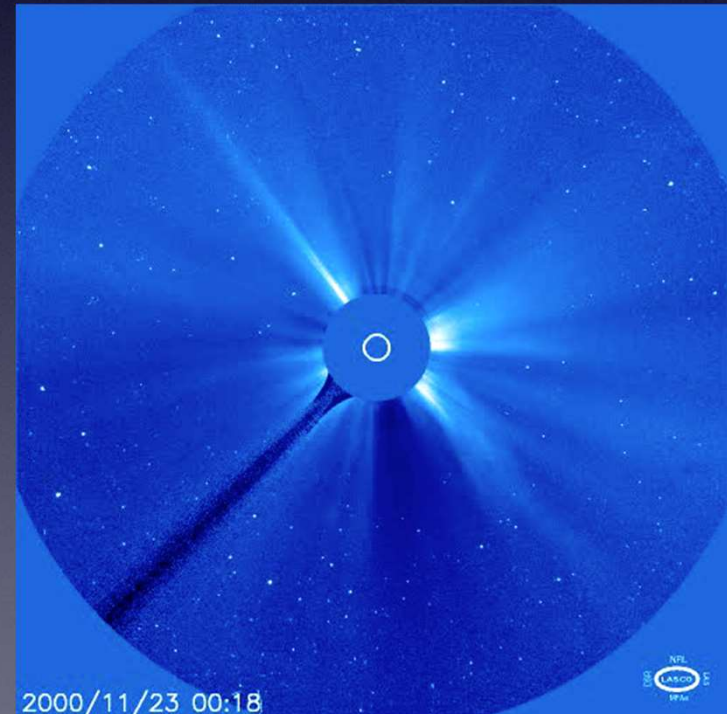
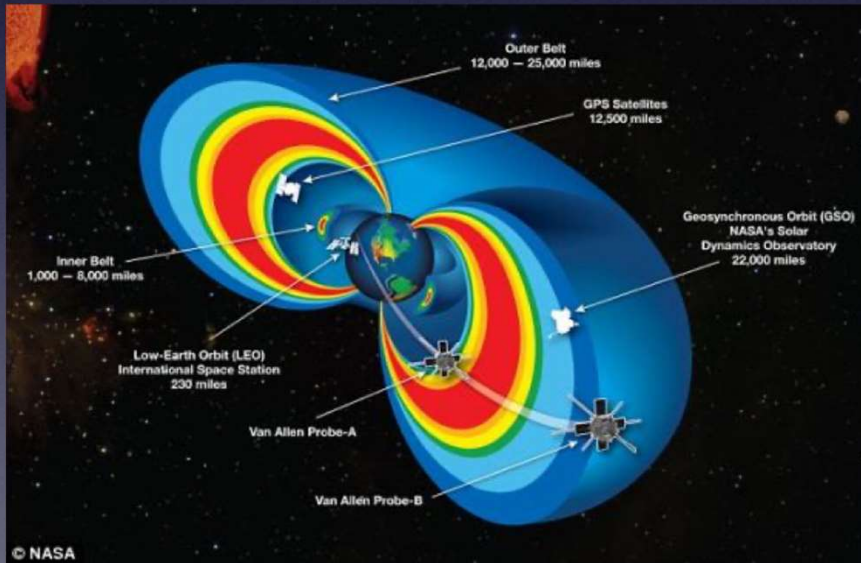
各种辐射剂量

辐射量	辐射量 SI单位	SI单位专名	专用单位
照射量	库伦·千克 ⁻¹ (C·kg ⁻¹)	未定	伦琴 (R) 1伦=2.58×10 ⁻⁴ 库伦·千克 ⁻¹ (1R=2.58×10 ⁻⁴ C·kg ⁻¹)
吸收剂量	焦耳·千克 ⁻¹ (J·kg ⁻¹)	戈瑞 (Gy) 1戈瑞=1焦耳·千克 ⁻¹ =100拉德 (1Gy=1J·kg ⁻¹ =100rad)	拉德 (rad) 1拉德=10 ⁻² 焦耳·千克 ⁻¹ =100尔格·克 ⁻¹ (1rad=10 ⁻² J·kg ⁻¹ =100erg·g ⁻¹)
当量剂量	焦耳·千克 ⁻¹ (J·kg ⁻¹)	希沃特 (Sv) 1希沃特=1焦耳·千克 ⁻¹ =10	雷姆 (rem) 1雷姆=10 ⁻² 焦耳·千克 ⁻¹ (1rem=10 ⁻² J·kg ⁻¹)
放射性活度	秒 ⁻¹ (s ⁻¹)	贝可勒尔 (Bq) 1贝可勒尔=1秒 ⁻¹ (1Bq=1s ⁻¹)	居里 (Ci) 1居里=3.7×10 ¹⁰ ·秒 ⁻¹ (1Ci=3.7×10 ¹⁰ s ⁻¹) 个人

电离总剂量效应的来源

地球辐射带：电子和能量在400MeV以下的质子

太阳宇宙线：包含较大通量的高能质子等



总剂量效应机理

高能带电粒子入射到半导体硅材料中



复杂的物理化学过程

内部荷电状态发生改变



改变器件性能 (漏电流增大、噪声信号增强)

总剂量效应带来的危害

- ▶ 双极晶体管电流放大系数降低、漏电流升高、反向击穿电压降低
- ▶ MOS器件跨导变低、阈电压漂移、漏电流升高
- ▶ 运算放大器输入失调变大、开环增益下降、共模抑制比变化
- ▶ 光电器件及其他半导体探测器暗电流增加、背景噪声增加
- ▶ 星上计算机CPU及其外围芯片等逻辑器件的电性能参数偏移，并最终导致器件的逻辑功能错误乃至丧失
- ▶ 玻璃材料在严重辐射后变暗变黑
- ▶ 导线、微波馈线、高分子材料等绝缘材料强度降低、开裂、粉碎
- ▶ 热控涂层开裂、脱落、热学参数衰退

辐射损伤

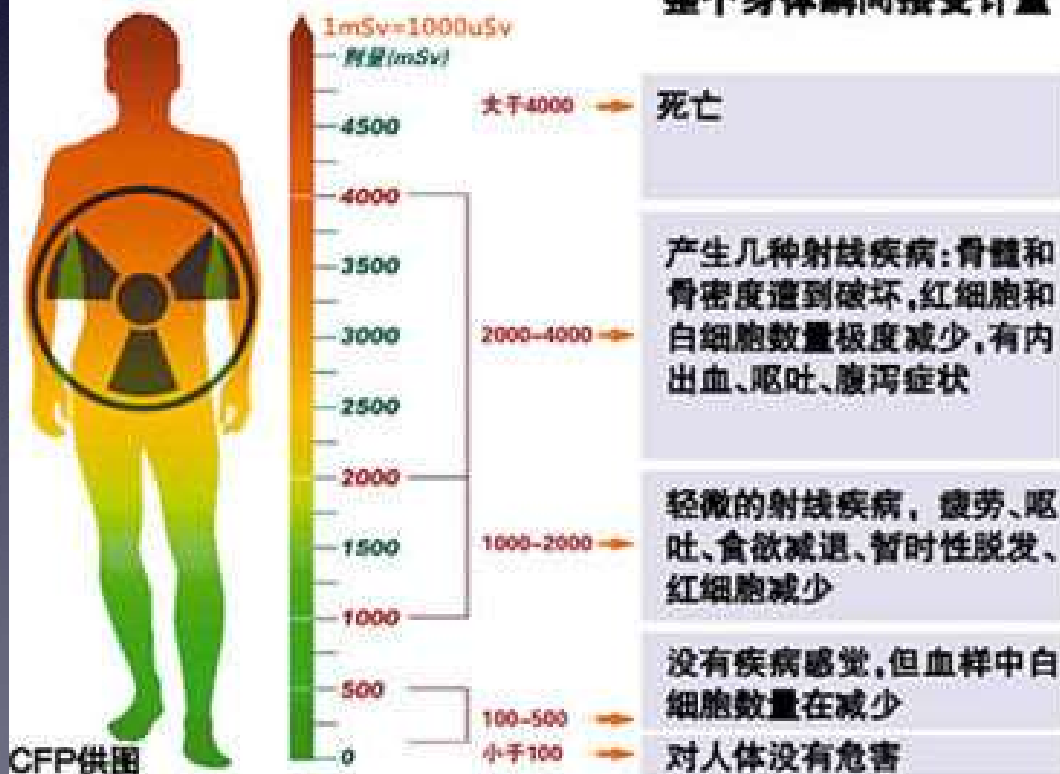
急性损伤

慢性损伤

有的可恢复，有的可导致死亡

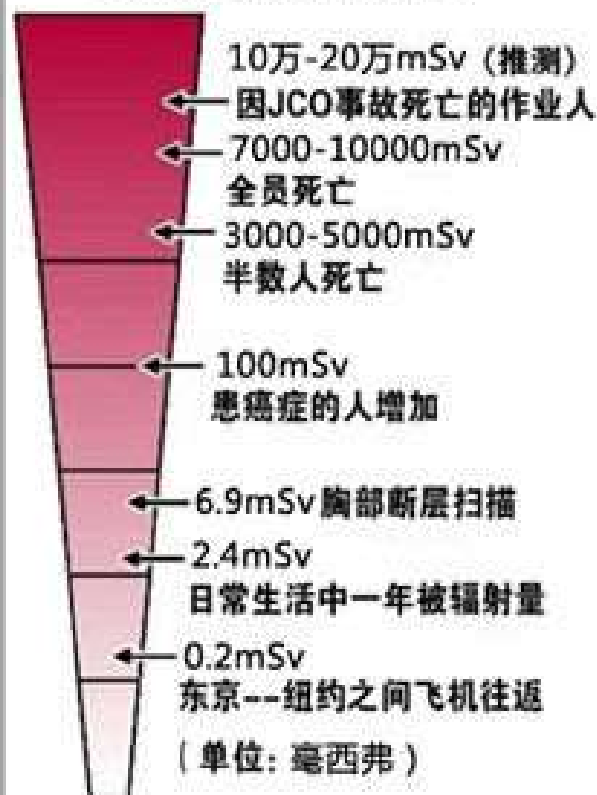
治疗或脱离辐射环境后可恢复

短时大剂量辐射的医疗反应

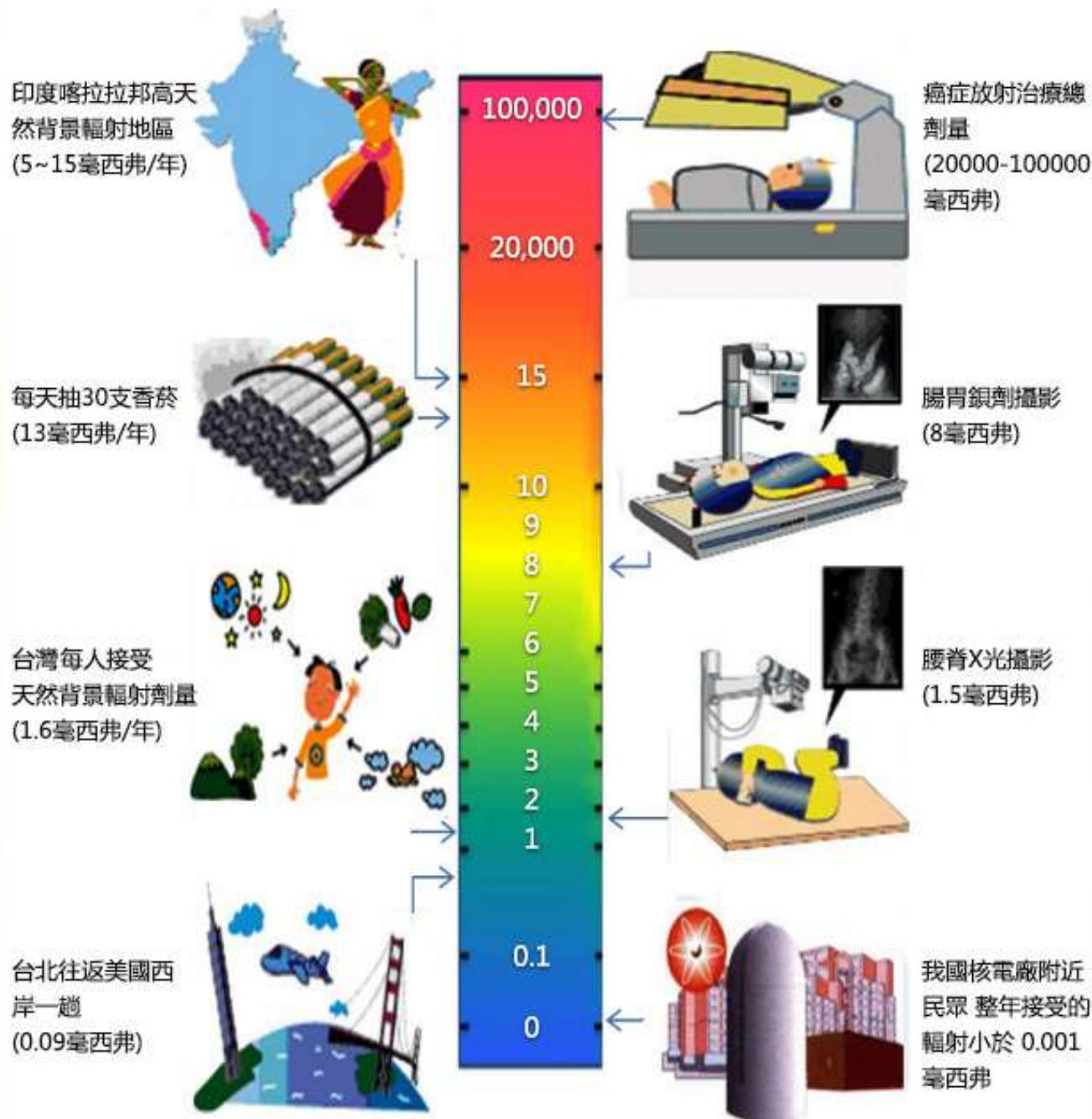


整个身体瞬间接受剂量

放射线辐射及对健康的影响



輻射劑量比較圖



印度喀拉拉邦高天然背景輻射地區 (5~15毫西弗/年)



每天抽30支香菸 (13毫西弗/年)



台灣每人接受天然背景輻射劑量 (1.6毫西弗/年)



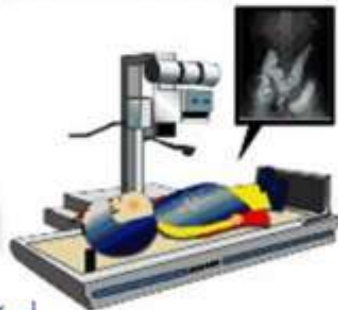
台北往返美國西岸一趟 (0.09毫西弗)



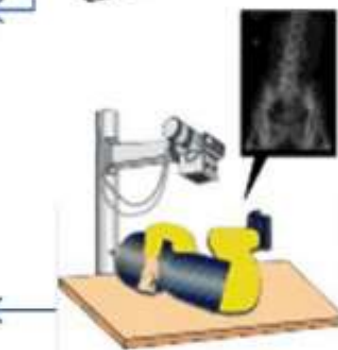
癌症放射治療總劑量 (20000-100000毫西弗)



腸胃鋇劑攝影 (8毫西弗)



腰脊X光攝影 (1.5毫西弗)



我國核電廠附近民眾 整年接受的輻射小於 0.001毫西弗



辐射对人体的影响

载人航天中，人体接受的辐射剂量与轨道高度、飞行器事件和舱壁屏蔽程度有关。

保护措施：

- 舱壁和航天服对空间粒子辐射有屏蔽作用
- 服用预防辐射病的药物
- 及时检测航天器的辐射剂量
- 入轨返回时避开地球辐射带
- 及时监视和预报太阳质子事件

位移效应—光电器件性能持续衰退

高能粒子入射到材料中



发生碰撞过程

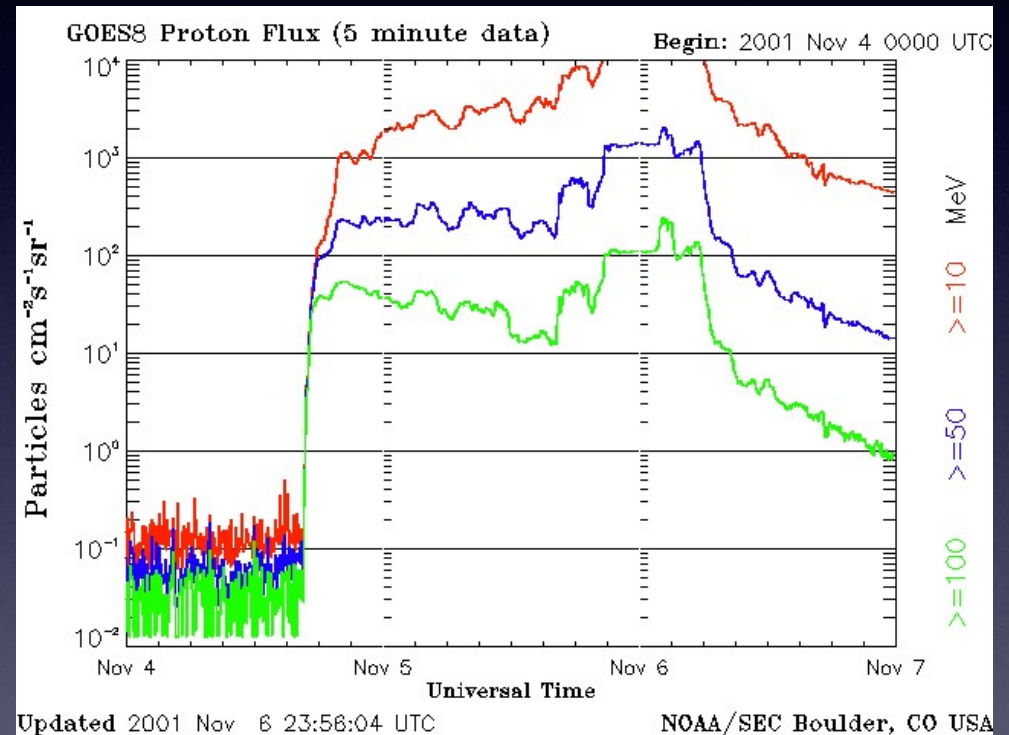
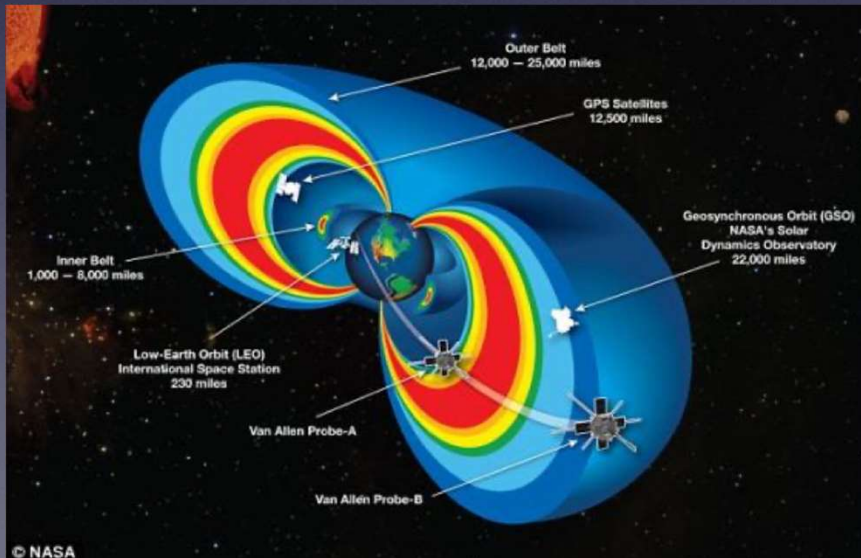
原子脱离开晶格的束缚而离开原来的位置



形成稳定的缺陷

太阳风暴引发的位移损伤

- ★ 空间质子
- ★ 地球辐射带捕获质子
- ★ 辐射带捕获电子



位移效应的危害

- ★ 稳定空位-间隙原子对，会在半导体材料的禁带中引入缺陷能级，这些缺陷能级将会作为复合中心影响半导体材料少数载流子的产生和寿命
- ★ 作为陷阱中心和散射中心的载流子运动，还可以产生载流子的补偿效应和去除效应

主要影响设备

CCD：出现斑点影响器件成像质量

太阳能电池：导致最大输出功率下降

单粒子效应

单粒子效应：单个高能粒子穿过微电子器件的灵敏区，沉积能量并产生足够数量的电子-空穴对，这些电子-空穴对被器件电极收集后，造成器件逻辑状态的非正常改变，甚至造成器件损毁。



单粒子效应

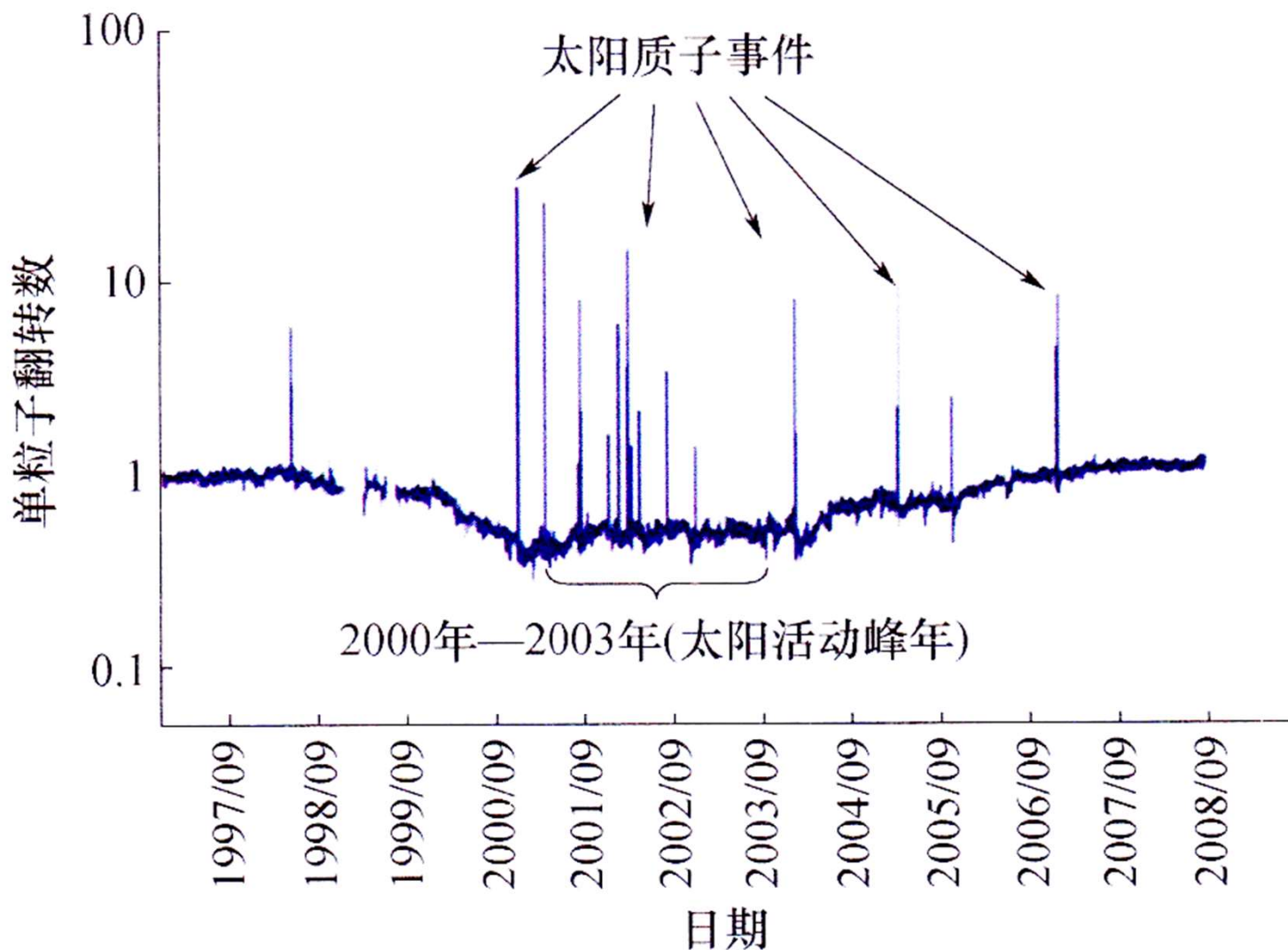


风云1B卫星：1990年9月3日发射

11月初第一次单粒子事件：通过程序即时修正

1991年2月：姿态完全失控，本来设计运行一年的卫星，不到半年就停止工作

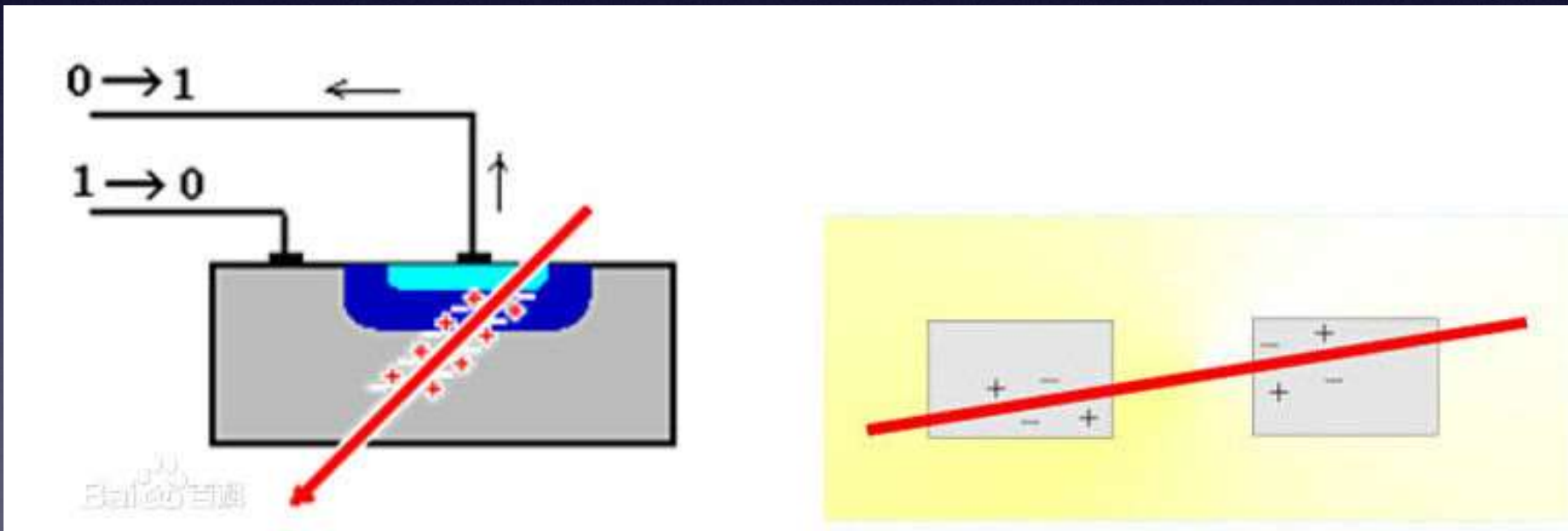
太阳风暴加剧单粒子效应



▲ 太阳质子事件引起SOHO卫星在轨单粒子翻转率显著增加

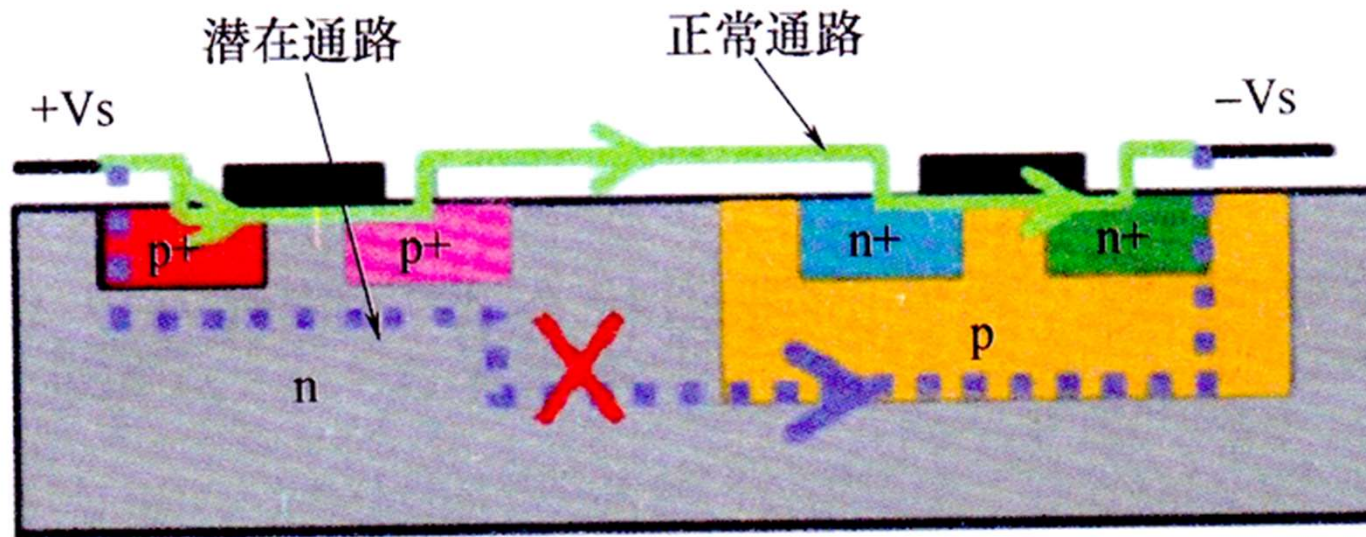
单粒子效应产生的机制

单粒子翻转(SEU): 发生在具有单稳态和双稳态的逻辑器件和逻辑电路的一种电离效应



单粒子效应产生的机制

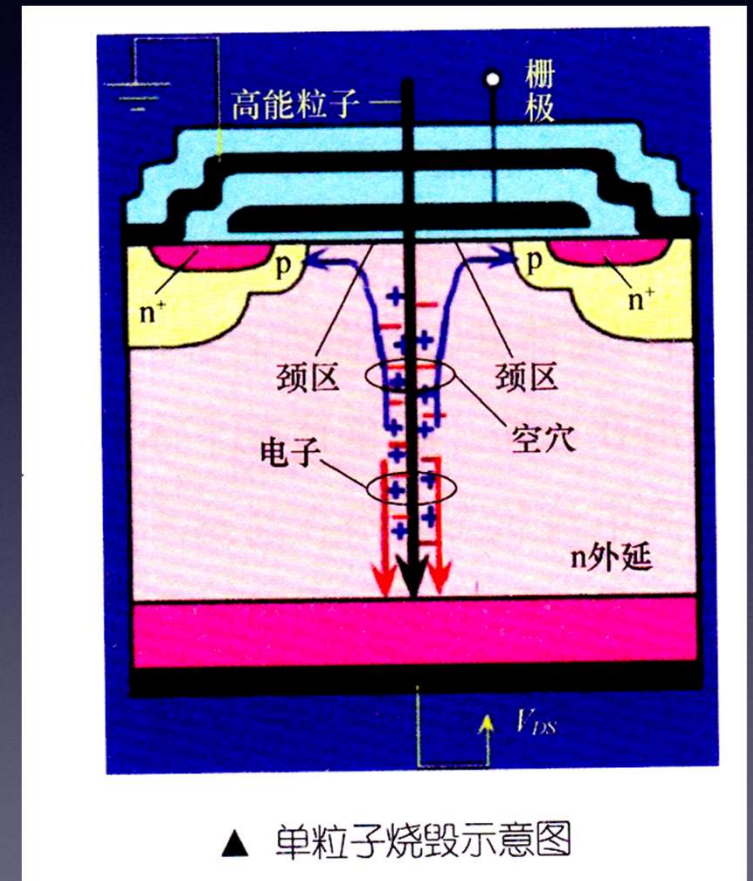
单粒子锁定(SEL): 单粒子锁定主要发生于CMOS器件中。CMOS器件的PN-PN四层结构形成了寄生可控硅结构，正常情况下，寄生的可控硅处于高阻关闭状态。单个带电粒子入射产生的瞬态电流触发可控硅结构使其导通，由于可控硅的正反馈特性使电流不断增大，进入大电流再生状态，即导致锁定。



▲ 体硅CMOS器件结构剖面图

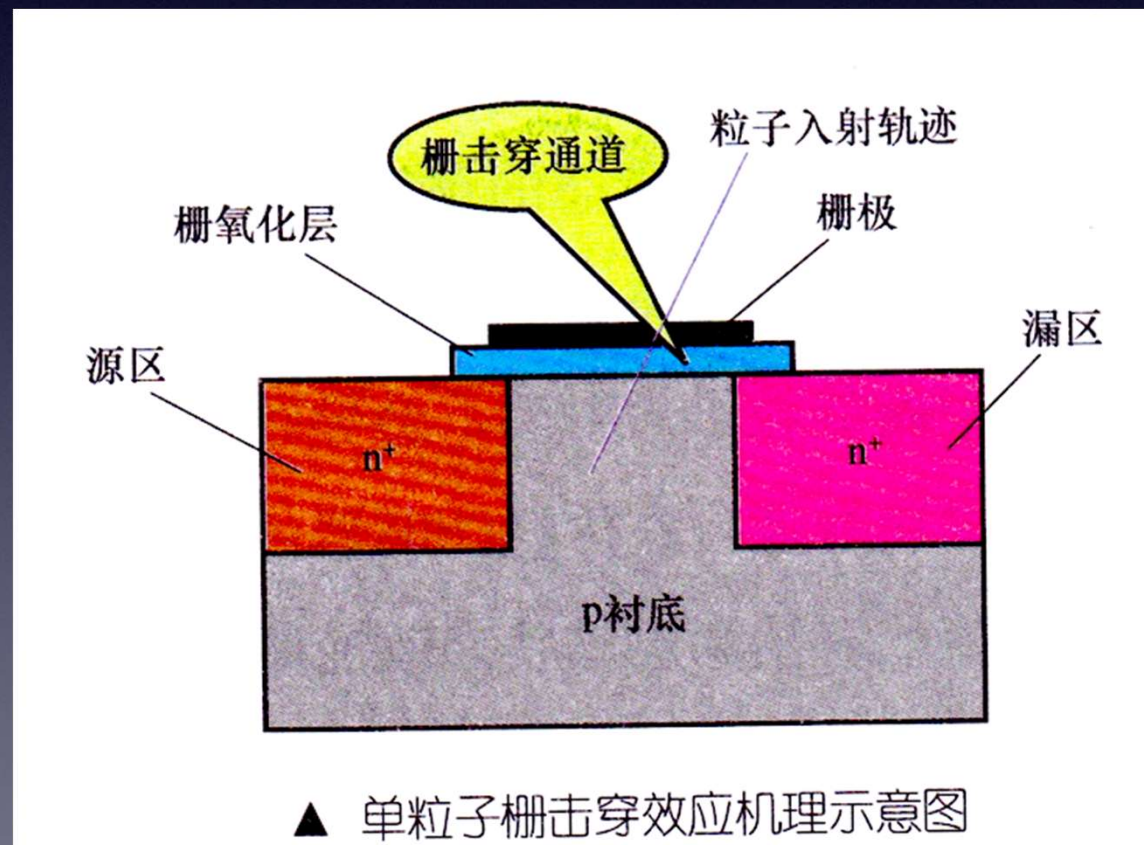
单粒子效应产生的机制

单粒子烧毁：场效应管漏极-源极局部烧毁，属于破坏性效应。入射粒子产生的瞬态电流导致敏感的寄生双极晶体管导通，双极晶体管的再生反馈机制造成收集电流不断增大，直至产生二次击穿，造成漏极-源极永久短路，直至电路烧毁，单粒子烧毁主要影响CMOS、power BJTs、MOSFETs等器件



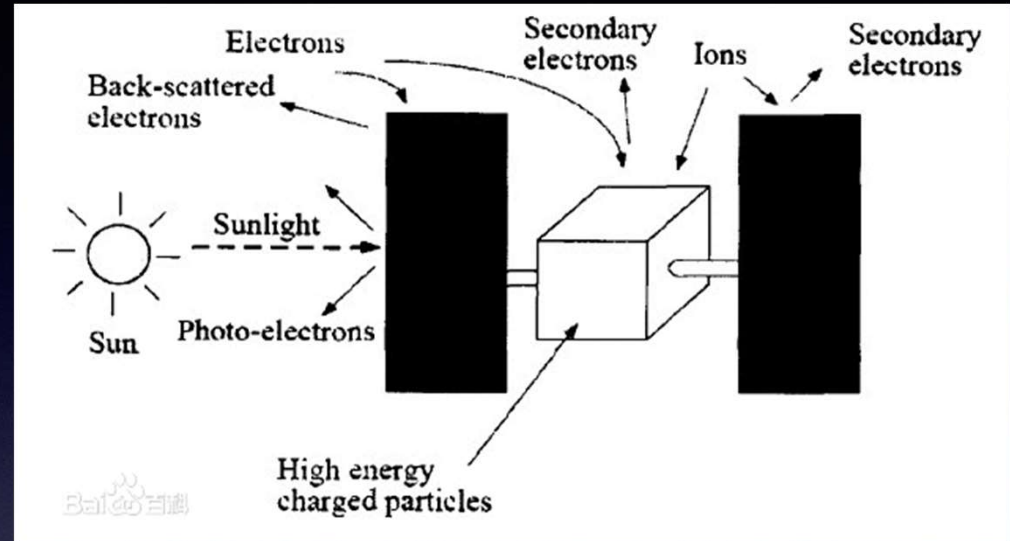
单粒子效应产生的机制

单粒子栅穿：指在功率MOSFETs器件中，单粒子导致在栅氧化物中形成导电路径的破坏性的烧毁



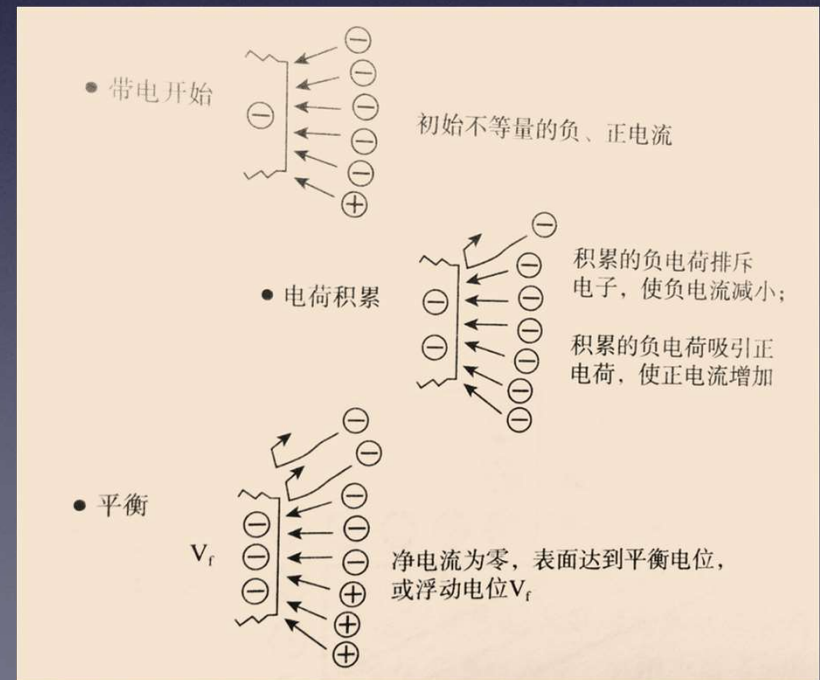
表面充放电效应

航天器暴露的外表面上的电荷累计称为航天器表面充电。



航天器表面充电机制

- 电子电流
- 粒子电流
- 光电电流
- 次级电流

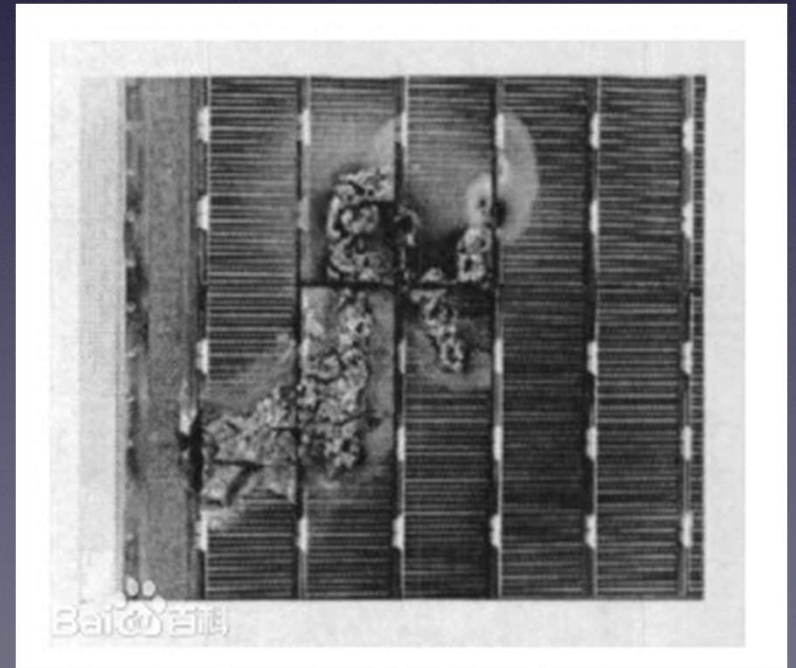
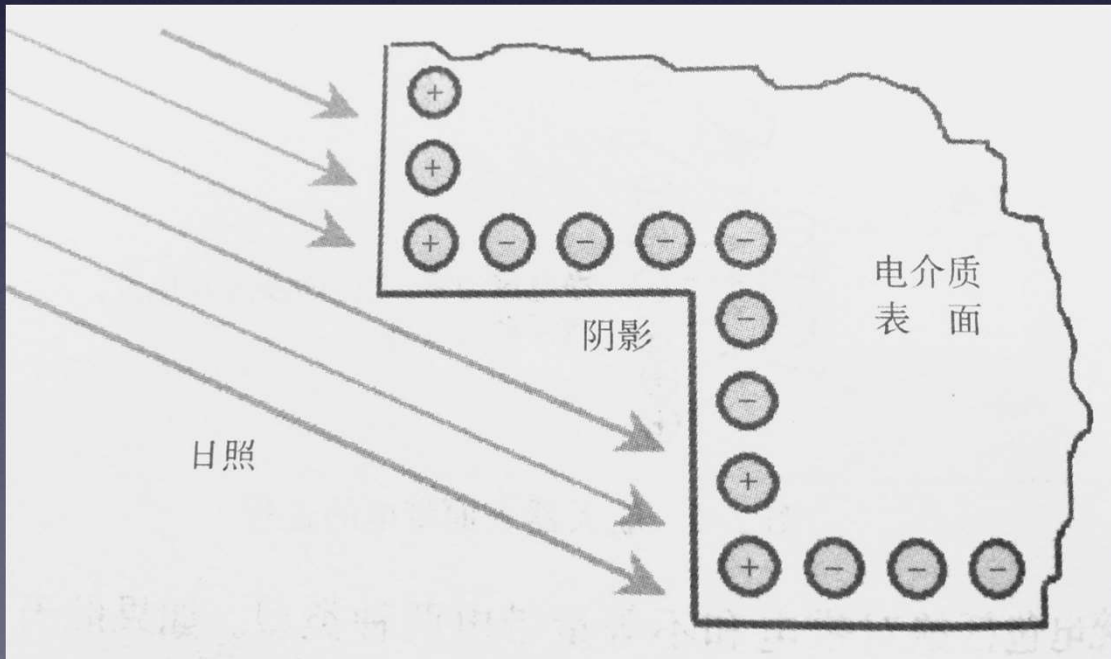


表面充电

绝对带电：金属表面

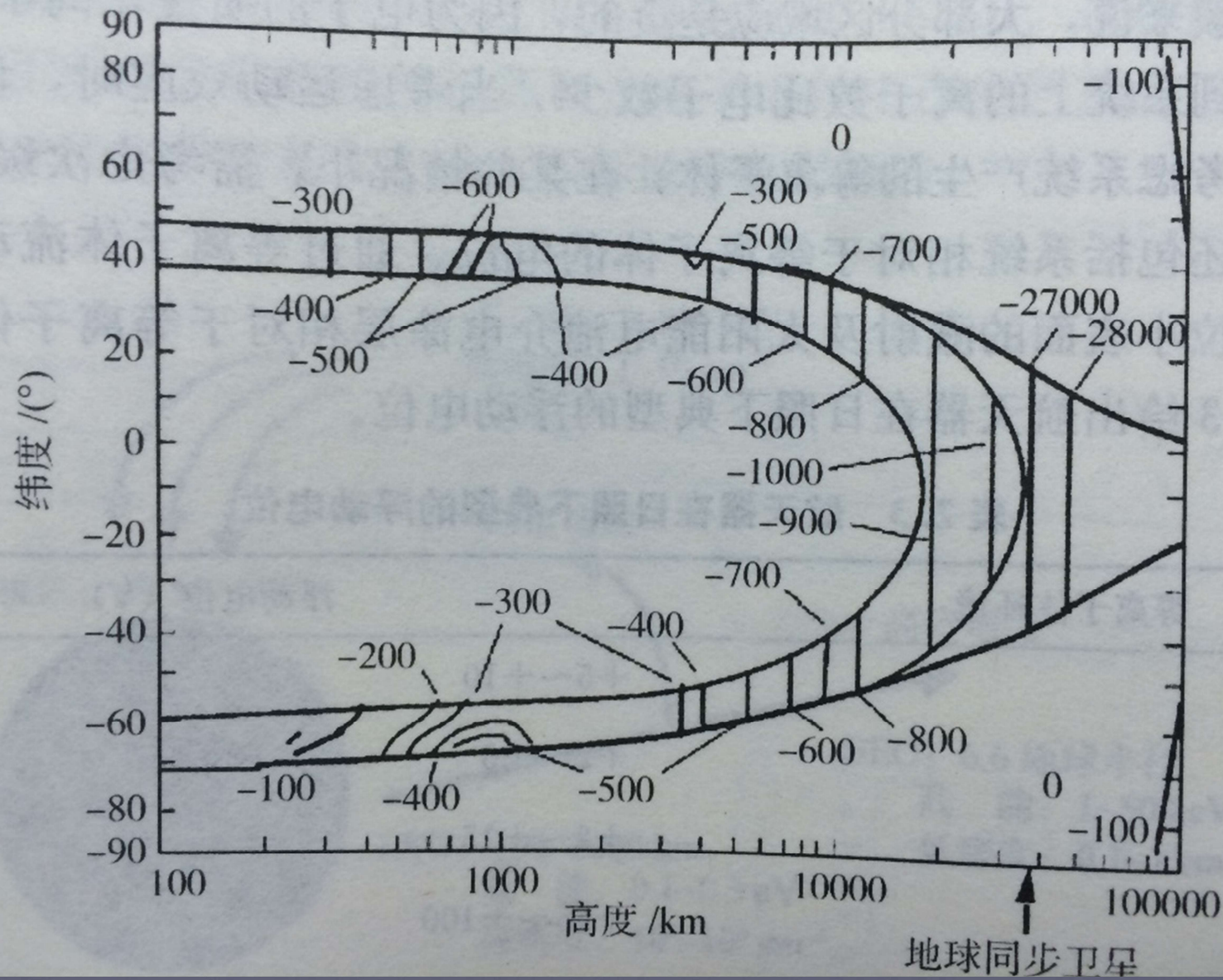
不等量带电：电介质材料

形成浮动电位差，导致弧光放电和静电放电。



等离子体环境	浮动电位(V)
太阳风	+5 ~ +10
磁鞘	+2 ~ +5
外磁层	+2 ~ +15
瓣	+15 ~ +100
等离子体片 (静日)	+10 ~ +20
等离子体片 (同步轨道、扰日)	-70
等离子体层	>-200(1976 AST-6) 0. ~ +1 (ISEE-1) -5.4 ~ 0 (1974,OGO 3)

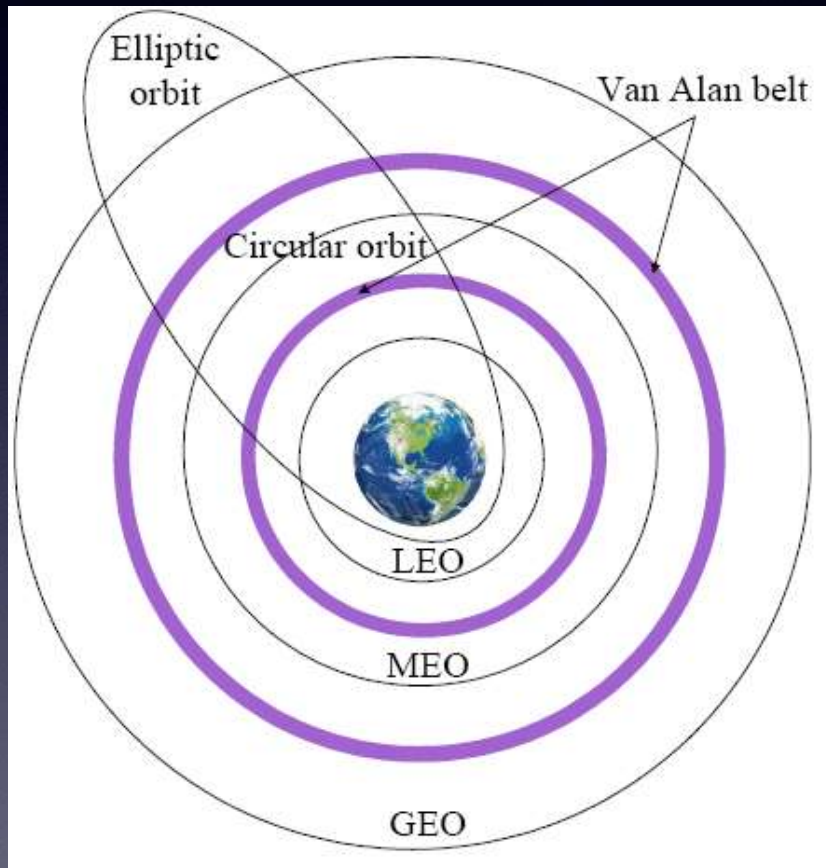
航天器在日照下的典型浮动电位



表面电位等值线图

LEO航天器表面充电

高度低于1000km的航天器轨道称为低地球轨道(LEO)。



- LEO**: Low Earth Orbit 低地球轨道
- MEO**: Middle Earth Orbit 中地球轨道
- GTO**: Geostationary Transfer Orbit 地球同步转移轨道 (椭圆轨道)
- GEO**: Geostationary Orbit 地球静止轨道 (正圆轨道)
- SSO**: Sun-synchronous Orbit 太阳同步轨道
- IGSO**: Inclined Geosynchronous Orbit 倾斜地球同步轨道

国际空间站轨道上的等离子体参数

名称	参数	最大	最小	平均
电子温度	T_e (K)	2530	770	1320
离子温度	T_i (K)	1430	550	990
电子热速度	V_{the} (m/s)	2.8×10^5	1.5×10^5	2.1×10^5
离子热速度	V_{thi} (m/s)	1.8×10^3	1.1×10^3	1.5×10^3
电子等离子体频率	ω_{pe} (Hz)	1.5×10^7	1.4×10^6	5.2×10^6
离子等离子体频率	ω_{pi} (Hz)	$12. \times 10^5$	1.1×10^4	4.3×10^4
电子回旋频率	Ω_e (Hz)	1.2×10^6	5.4×10^5	7.9×10^5
离子回旋频率	Ω_i (Hz)	8.5×10^1	3.6×10^1	5.4×10^1
电子回旋半径	ρ_e (m)	8.4×10^{-2}	2.0×10^{-2}	4.2×10^{-2}
粒子回旋半径	ρ_i (m)	7.7	2.1	4.3
德拜长度	λ_D (m)	2.3×10^{-2}	1.0×10^{-3}	4.0×10^{-3}
电子-电子碰撞频率	ν_{ee} (Hz)	7.8×10^3	1.1×10^1	4.0×10^2
粒子-粒子碰撞频率	ν_{ii} (Hz)	8.9×10^1	0.2	5.2

航天器在LEO轨道上(V_0)大约为8km/s,典型的尺寸(L_b)为几米到十几米,则等离子体与航天器的相互作用特征表现为:

名称	<p>➤ 中热, $V_{thi} \ll V_0 \ll V_{the}$, 即卫星的速度小于电子热速度, 高于离子热速度</p>			
电子温度				
离子温度	T_I (K)	1430	550	990
电子热速度	V_{the} (m/s)	2.8×10^5	1.5×10^5	2.1×10^5
离子热速度	V_{thi} (m/s)	1.8×10^3	1.1×10^3	1.5×10^3
电子等离子体频率	ω_{pe} (Hz)	1.5×10^7	1.4×10^6	5.2×10^6
离子等离子体频率	<p>➤ 电子式磁化的, 而离子是非磁化的, $\rho_e < L_b \leq \rho_i$</p>			
电子回旋频率				
离子回旋频率	Ω_i (Hz)	8.5×10^4	5.6×10^4	5.4×10^4
电子回旋半径	ρ_e (m)	8.4×10^{-2}	2.0×10^{-2}	4.2×10^{-2}
离子回旋半径	ρ_i (m)	7.7	2.1	4.3
德拜长度	λ_D (m)	2.3×10^{-2}	1.0×10^{-3}	4.0×10^{-3}
电子-电子碰撞频率	<p>➤ 在航天器尺度范围内是准中性的, $\lambda_D \ll L_b$</p>			
离子-离子碰撞频率				

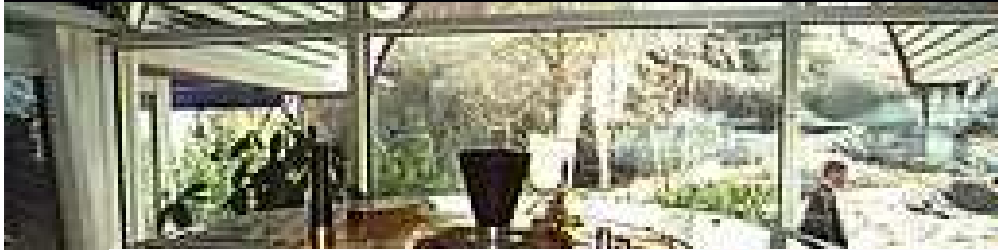
在航天器的锥区有一个压缩区，在航天器后面有尾流。

尾流特征如下：

- 在航天器后面，电子和粒子密度将比离子作为中性气体处理时高很多，电子密度远高于离子密度
- 在航天器后面将发生粒子汇聚
- 在某些条件下，在航天器后面的粒子汇聚可能超过周围的粒子密度
- 汇聚效应与航天器表面的电位以及电子温度和离子温度之比有密切关系
- 在远离航天器且稍微偏离轴线处可能出现两个汇聚区
- 在周围磁场的影响下，远场尾流的结构在 v_0/Ω_i 的距离的量级上被平滑掉了。

相互作用	效应	对大航天器系统的影响
在等离子体总的超声速运动	在锥部密度增加，尾部密度减小	扰动的空间范围增大，是航天器尺寸的许多倍
能量极光电子的收集	尾部带负电，引起不等量充电	绝对电位水平远比中小航天器高
双航天器方式	尾部充电	在次体的绝对电位水平也很高
中性大气	航天器表面污染	航天器表面污染增大，对周围环境的扰动也增大
在负表面电位时对离子的吸引	表面材料溅射	
磁场	通过抑制电子逃逸，影响充电水平	绝对电位水平远比中小航天器高
在磁场中的运动	产生电场梯度	绝对电位水平远比中小航天器高
太阳能电池收集电流	电源通过等离子体泄露，有产生弧光放电的危险	电源损失可能达到无法使用的程度
航天器电源泄露	产生一定频率范围的等离子体波	产生等离子体波的机制更多，波更强
在等离子体中发射粒子束	束-等离子体放电，激发粒子体波，航天器表面充电	增加了对环境的扰动，效应更强
电磁波耦合	在临界频率等离子体局地加热	增加了对环境的扰动，效应更强

LEO航天器表面充电的统计特征



Spacecraft properties

Manufacturer Swedish Space Corporation

Dry mass 214 kilograms (472 lb)

Payload mass 60 kilograms (130 lb)

Power 168 watts (nominal)
81 watts (payload)

Start of mission

Launch date October 6, 1992, 06:20:05 UTC

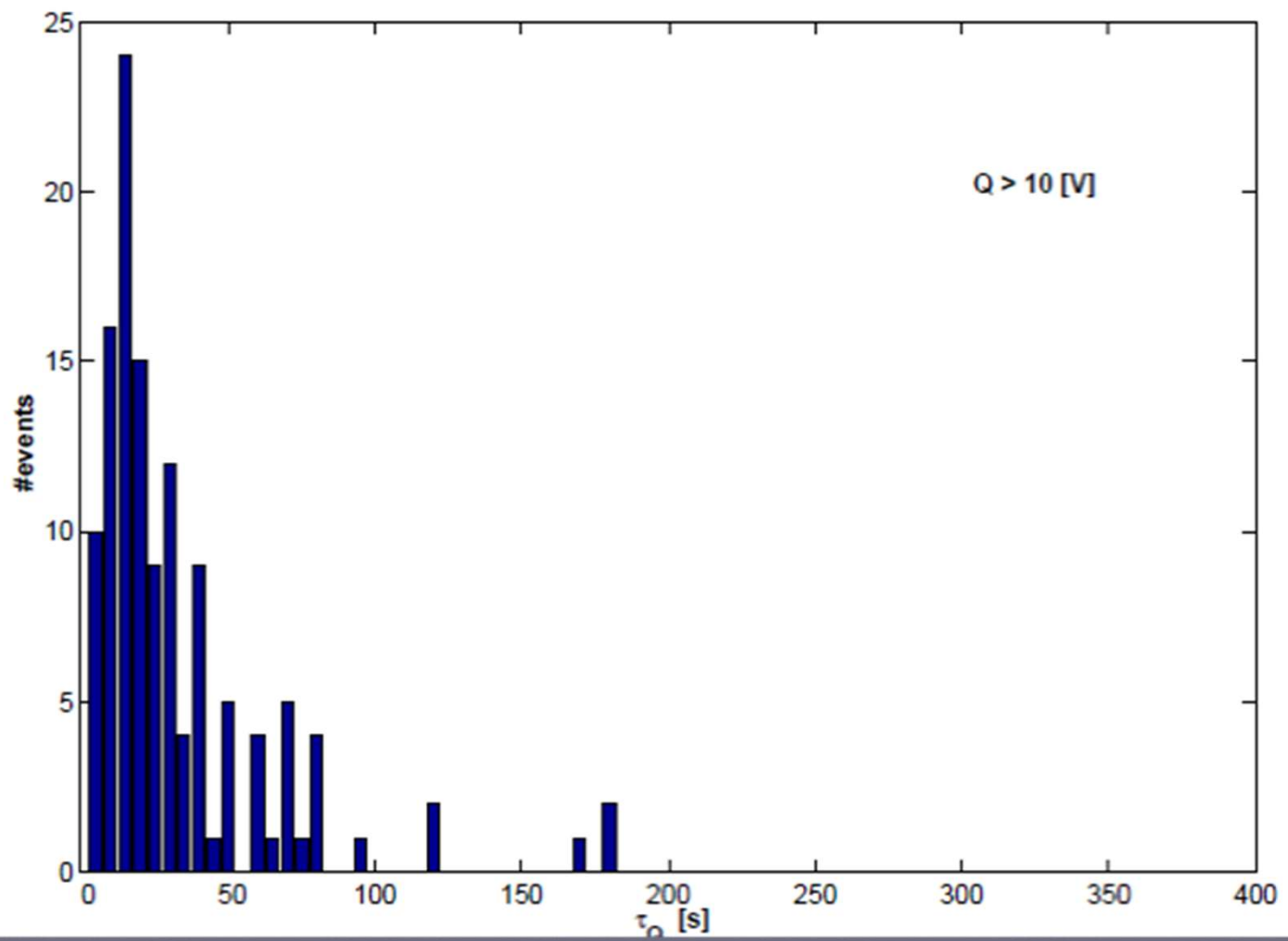
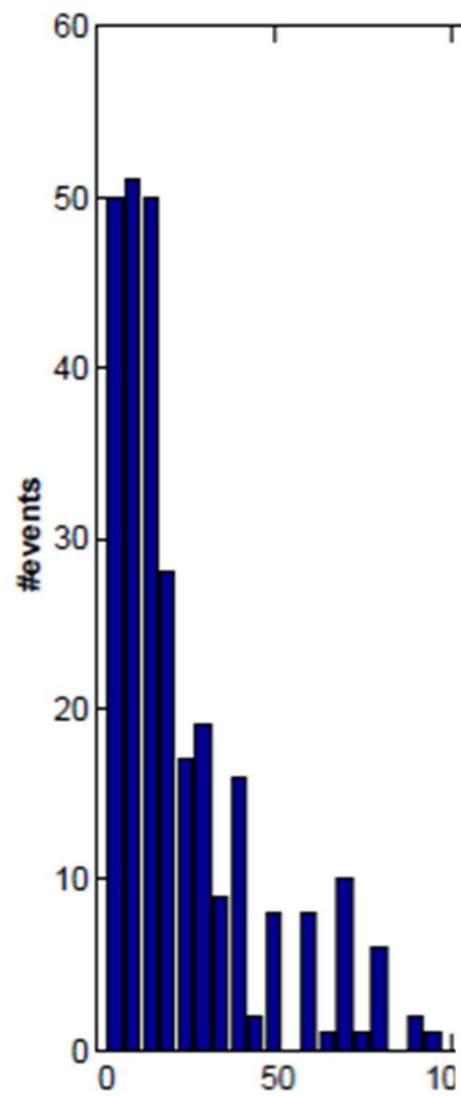
Rocket Chang Zheng 2C

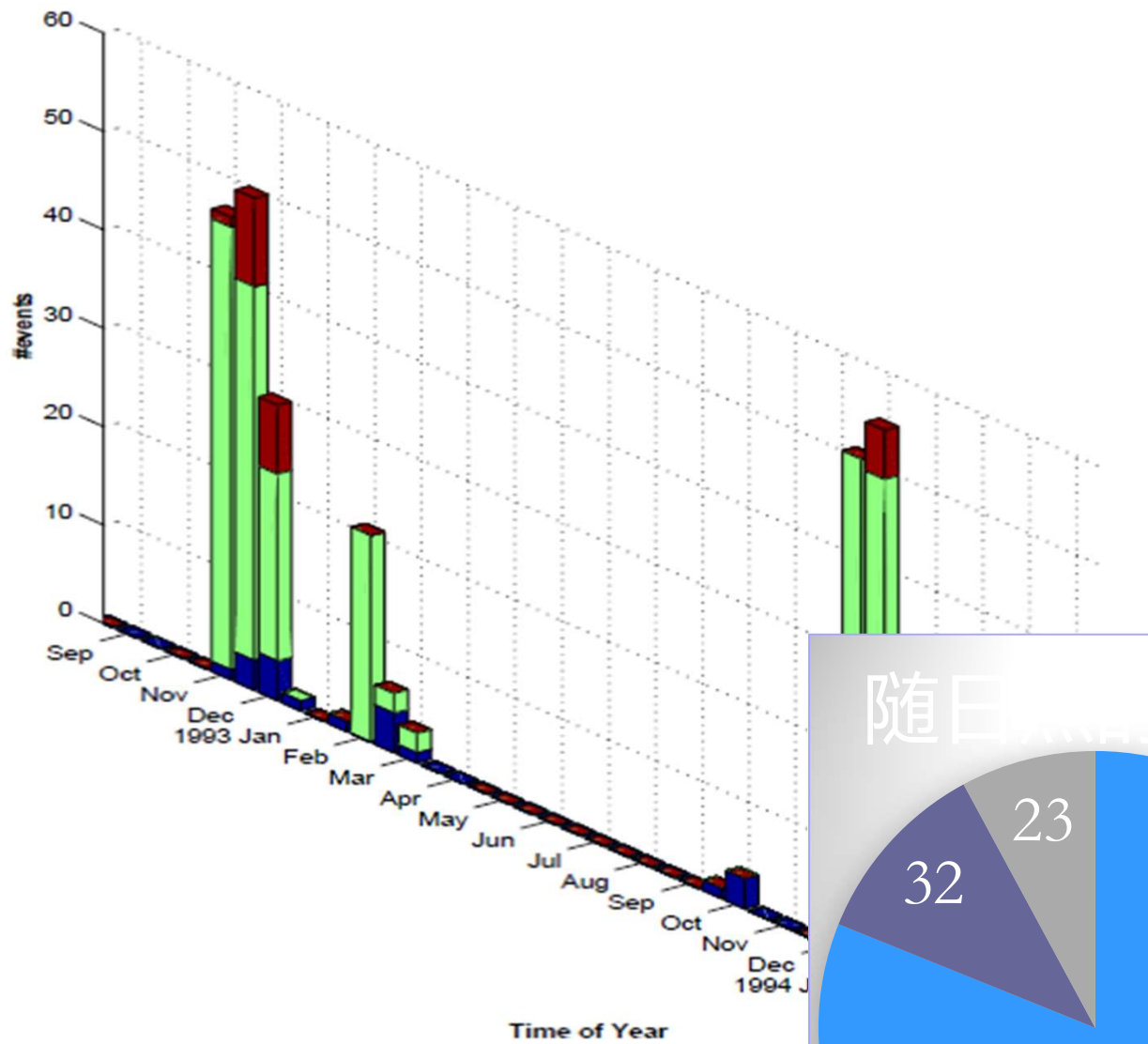
Launch site Jiuquan LA-2B

End of mission

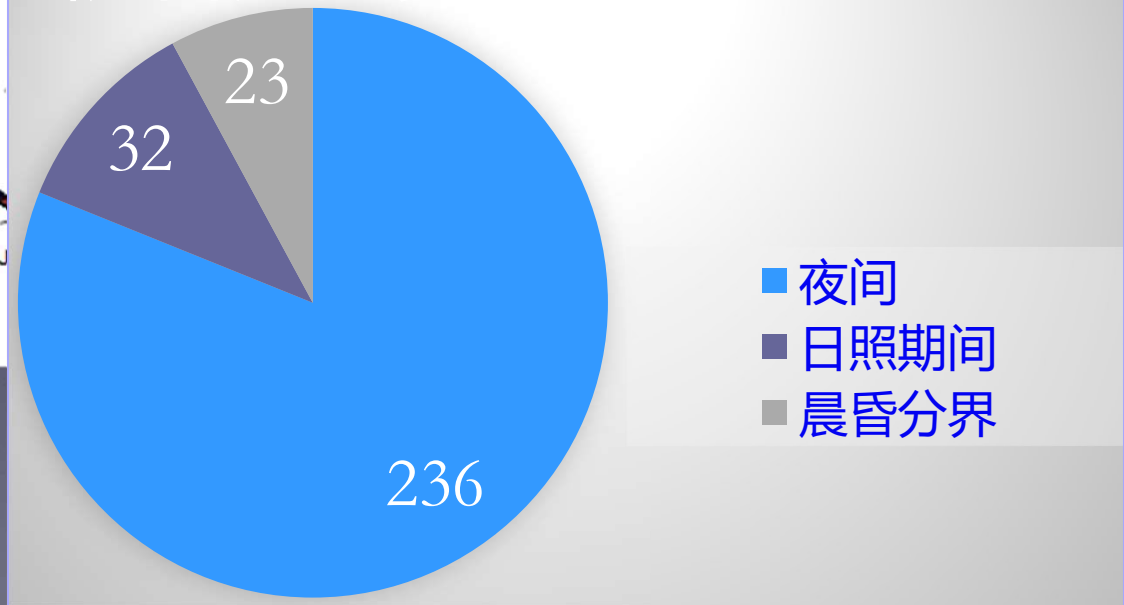
Last contact October 1996

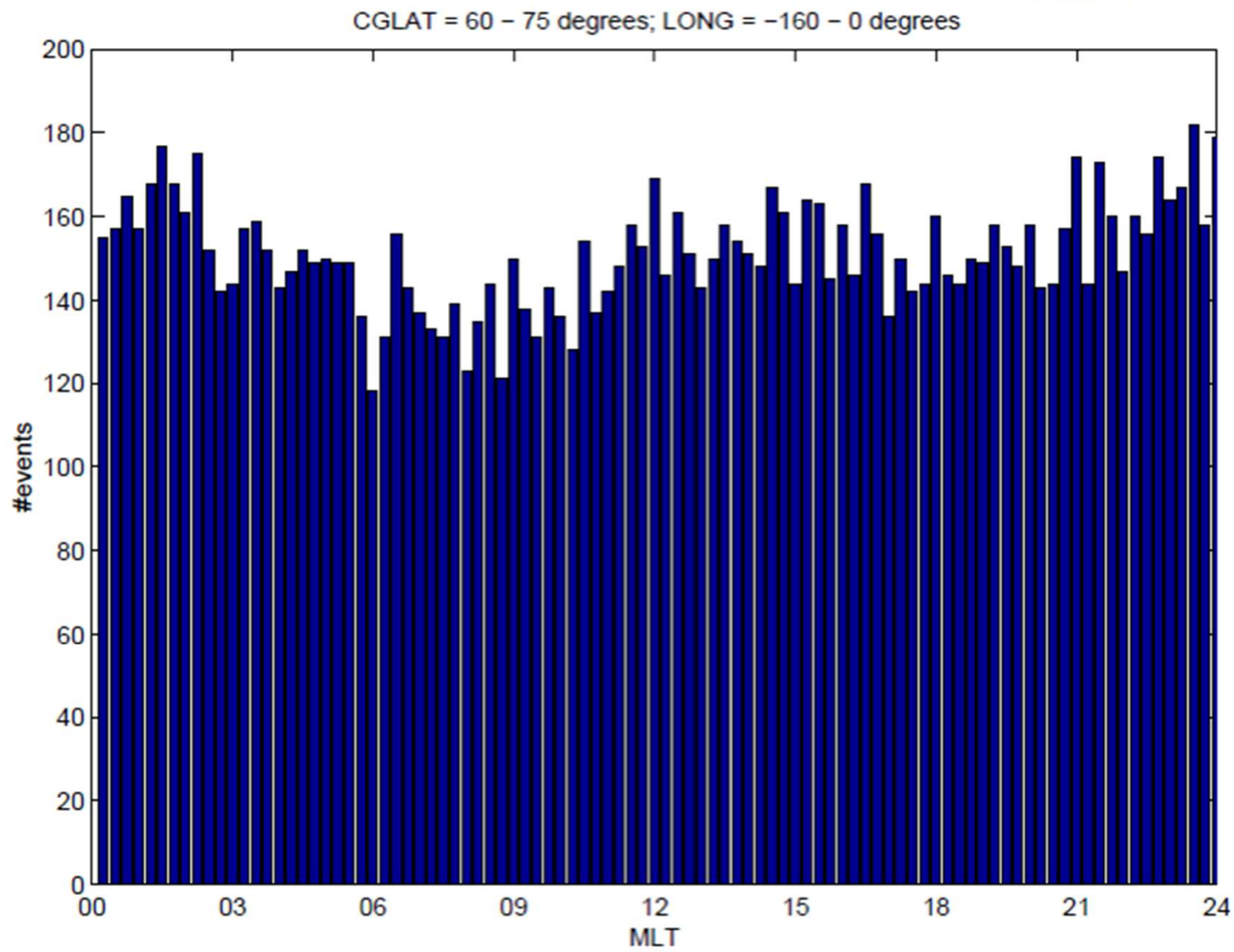
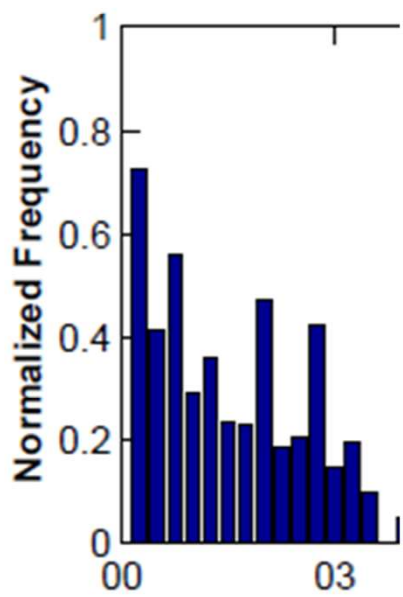
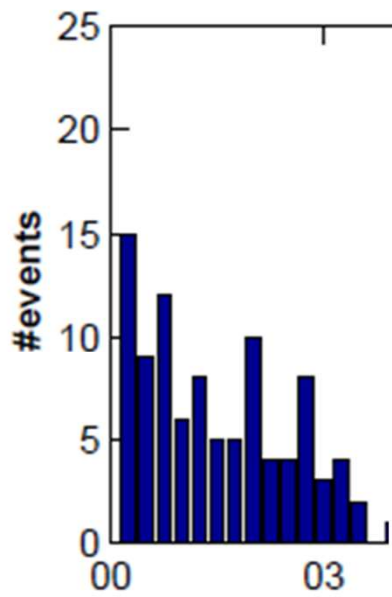
Mission type	Magnetospheric research
Operator	Swedish National Space Board
OSPAR ID	1992-064A
TCAT №	22161
Site	Freja at SCC
Mission duration	Primary: 2 years, 8 months, 24 days Total: 4 years

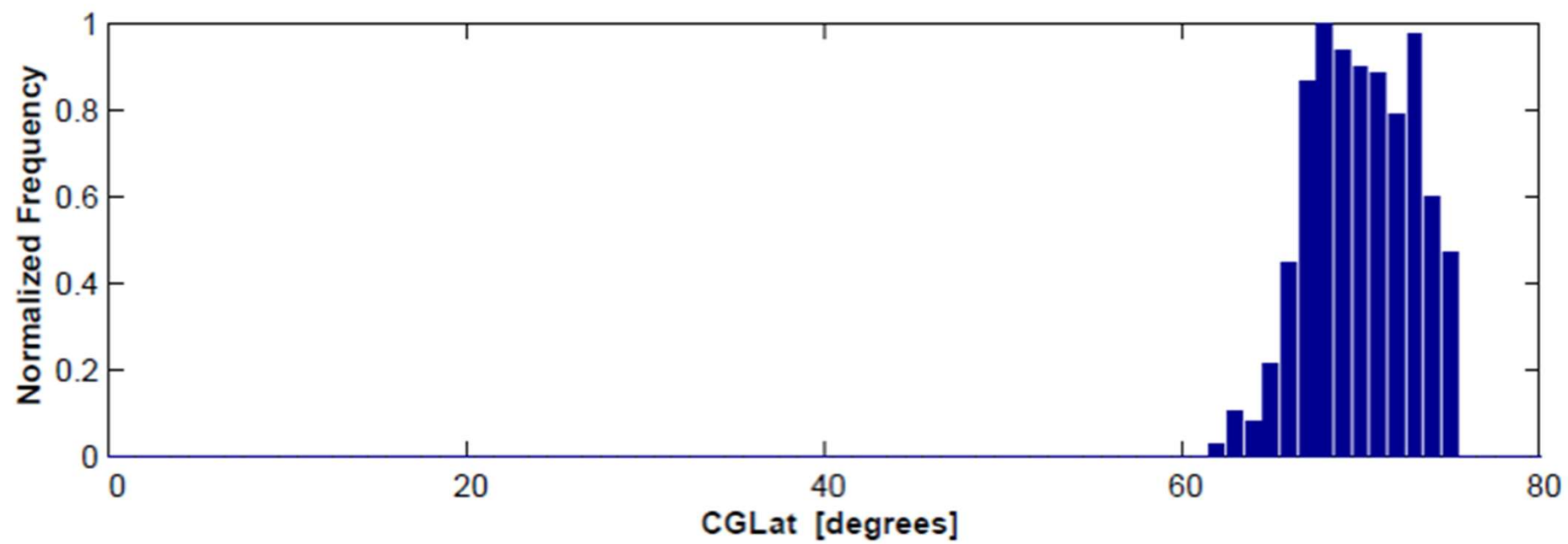
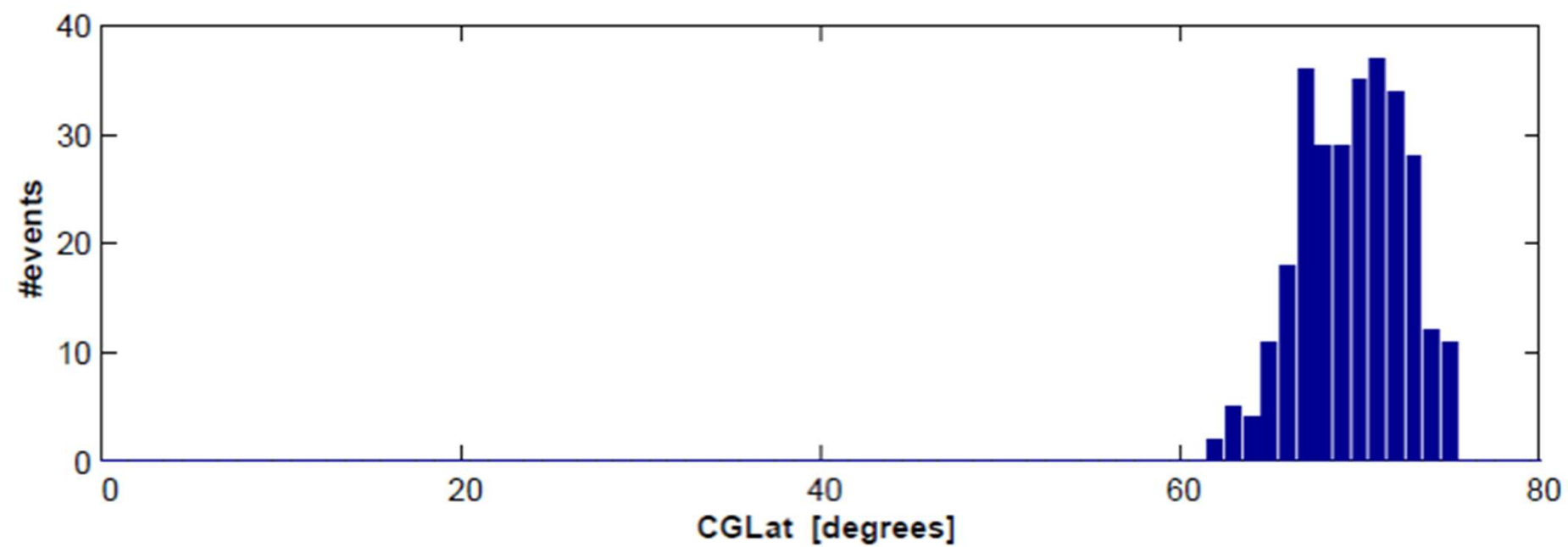




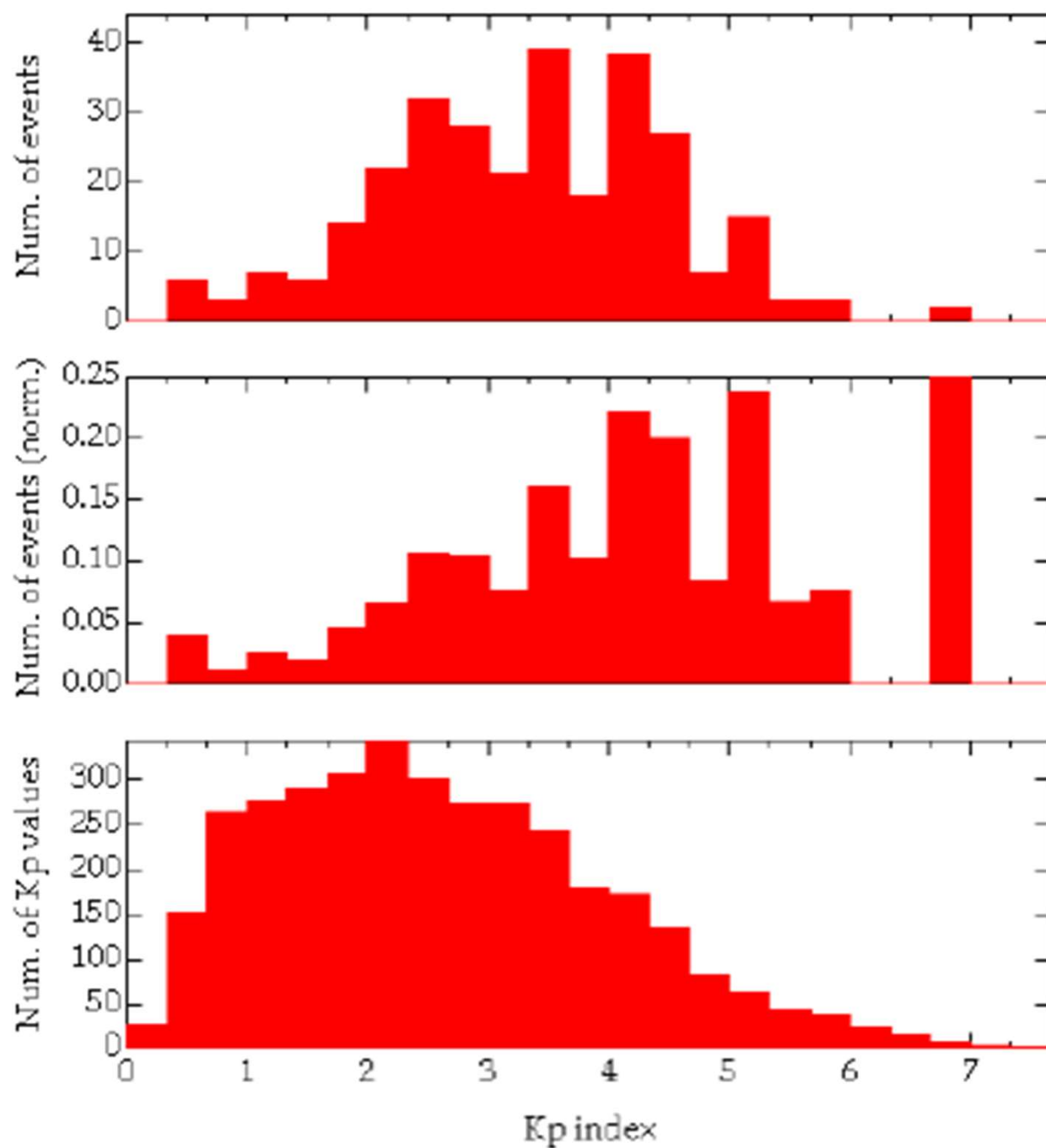
随日分析







Nov 3, 1992 – Apr 10, 1994 (Orbits 371 - 7279)

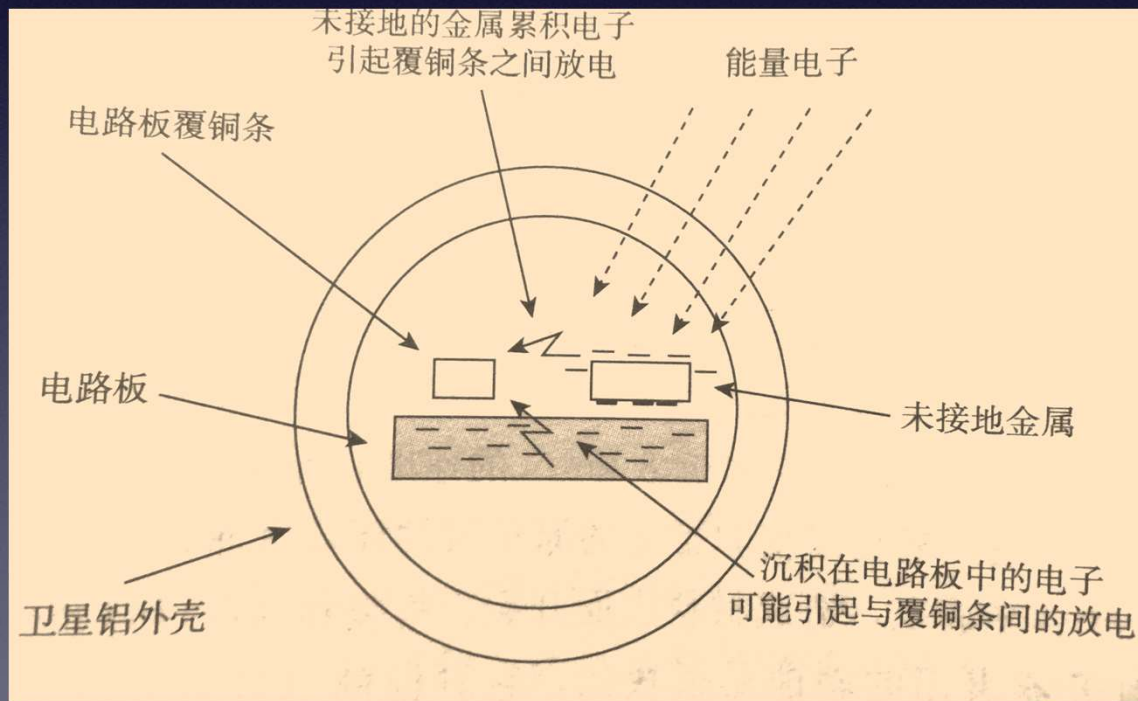


充电事件的特征

- ★ 大多数充电事件都没有达到10V的水平，仅有少量事件达到-2000V的水平
- ★ 充电事件的间隔大多短于1分钟，仅有少量事件持续几分钟。
- ★ 所有事件发生在磁尾60度以上，最大发生率位于极光区
- ★ 当 $K_p > 2$ 时才可能发生充电事件，发生率随 K_p 的增大而增大
- ★ 夏季没有观测到充电事件，最大事件率发生在冬季，这可能是由于遮日事件增多和低的热等离子体密度的组合效应
- ★ 大多数事件发生在18时到03时

航天器内部充电效应

航天器内部充电是由能量范围为0.1到10MeV的高能电子引起的。



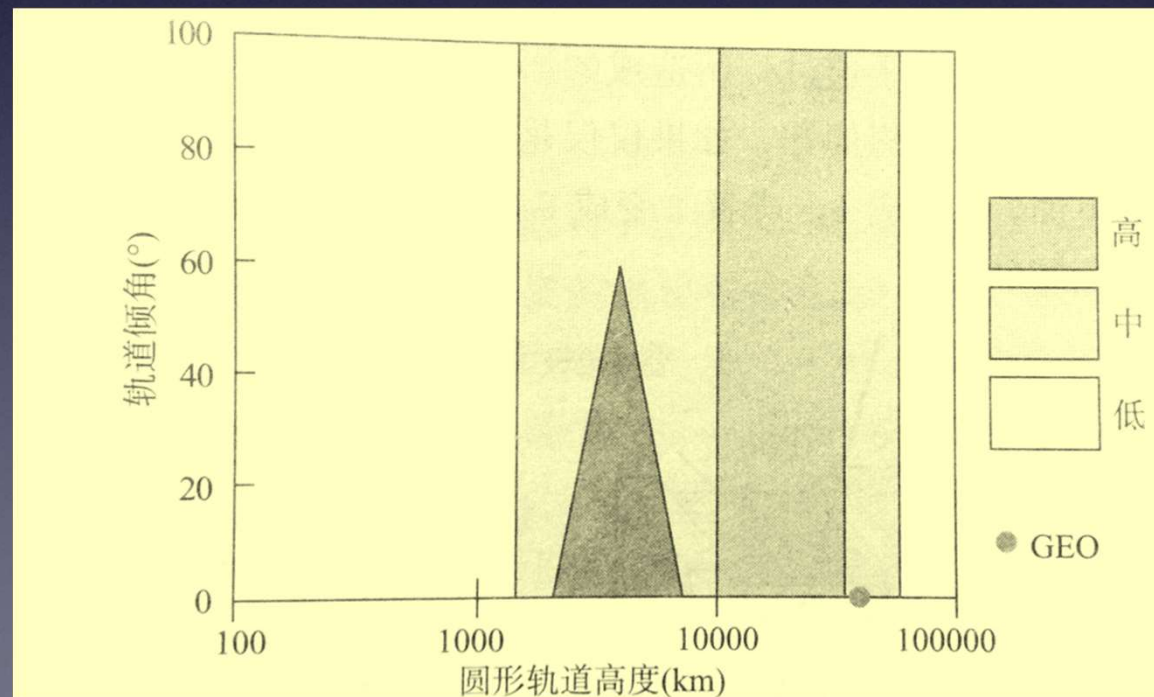
- 未接地的导体表面
- 印刷电路板的覆铜条
- 透电介质内

电荷的累积率高于电荷的泄漏率→静电放电

内部充电程度

电子环境：包括电子的通量和能谱。

- 电子通量越高，内部充电效应越严重。
- 与能谱的关系较复杂，并不是能量越高越严重。
- 与空间位置有关。

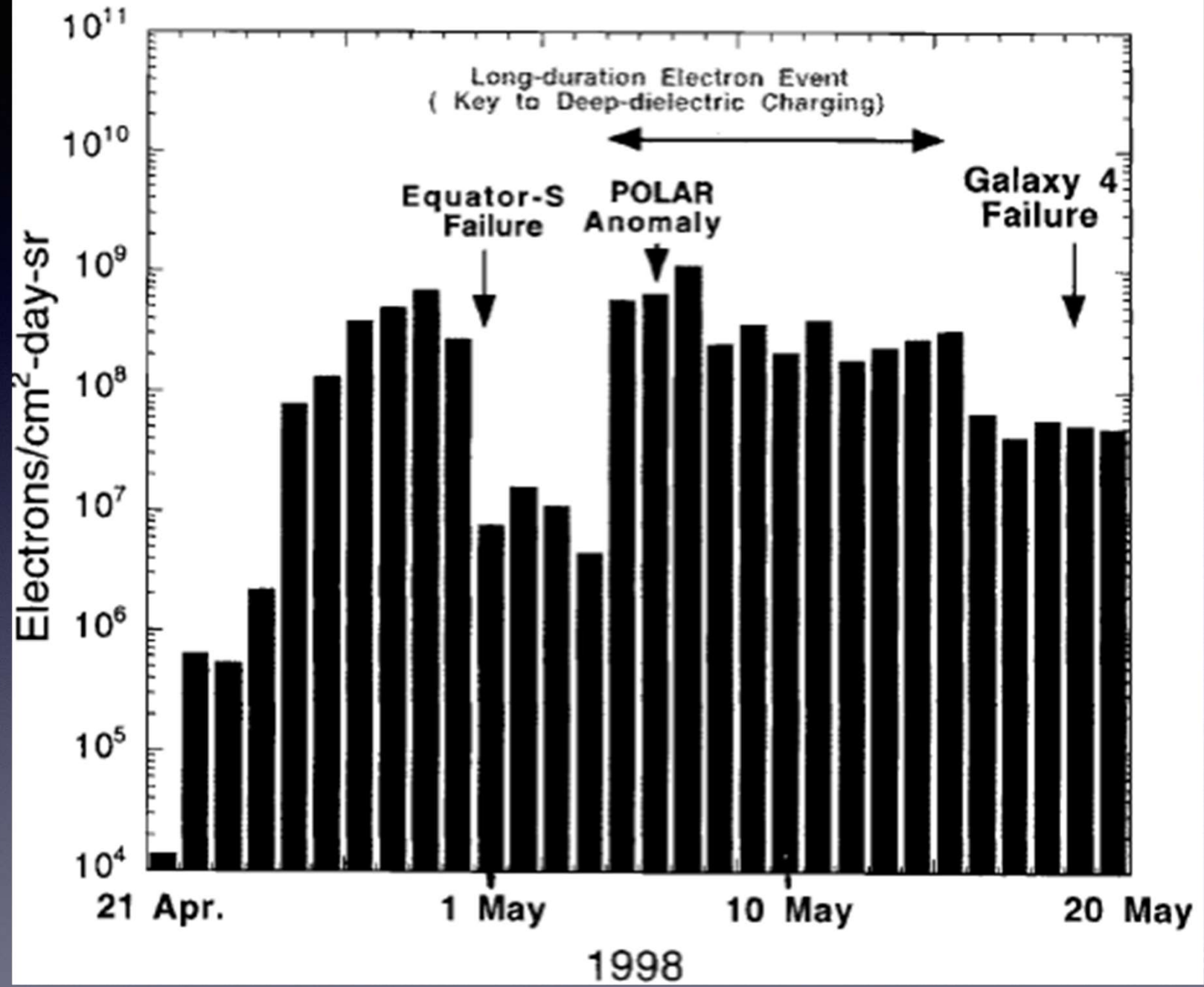


航天器内部充电的报道

- 20世纪90年代初期，加拿大两个卫星由于内部充电导致部分失效
- 1998年5月19日，美国Galaxy-4通讯卫星失效
- 我国双星设备出现异常
- 1989年3月7日至31日中间的46例卫星异常，大部分都是由于内部充放电引起



GOES Electrons E > 2 MeV



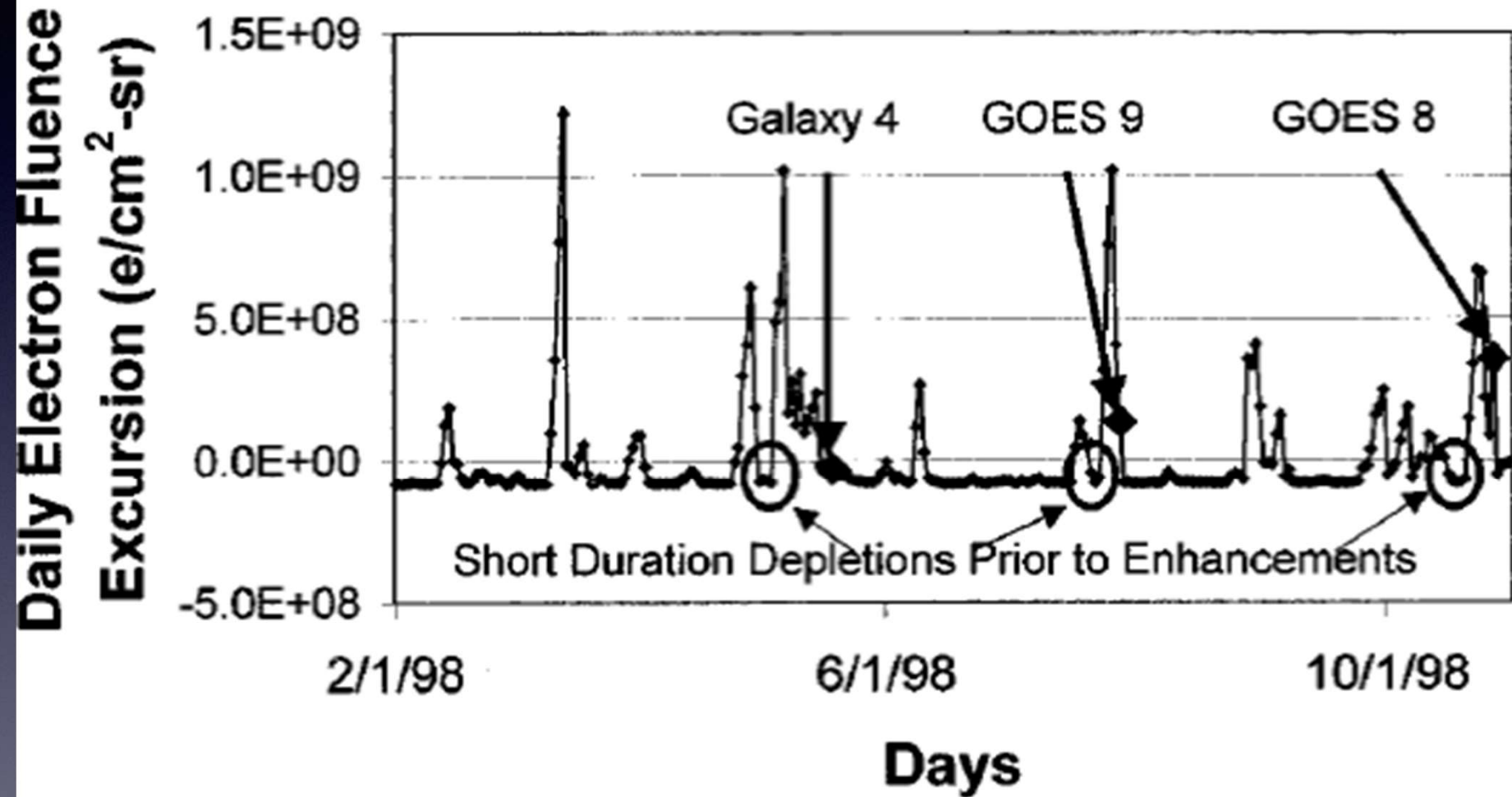
基线相： 异常发生前任选3个月电子日流量的平均值

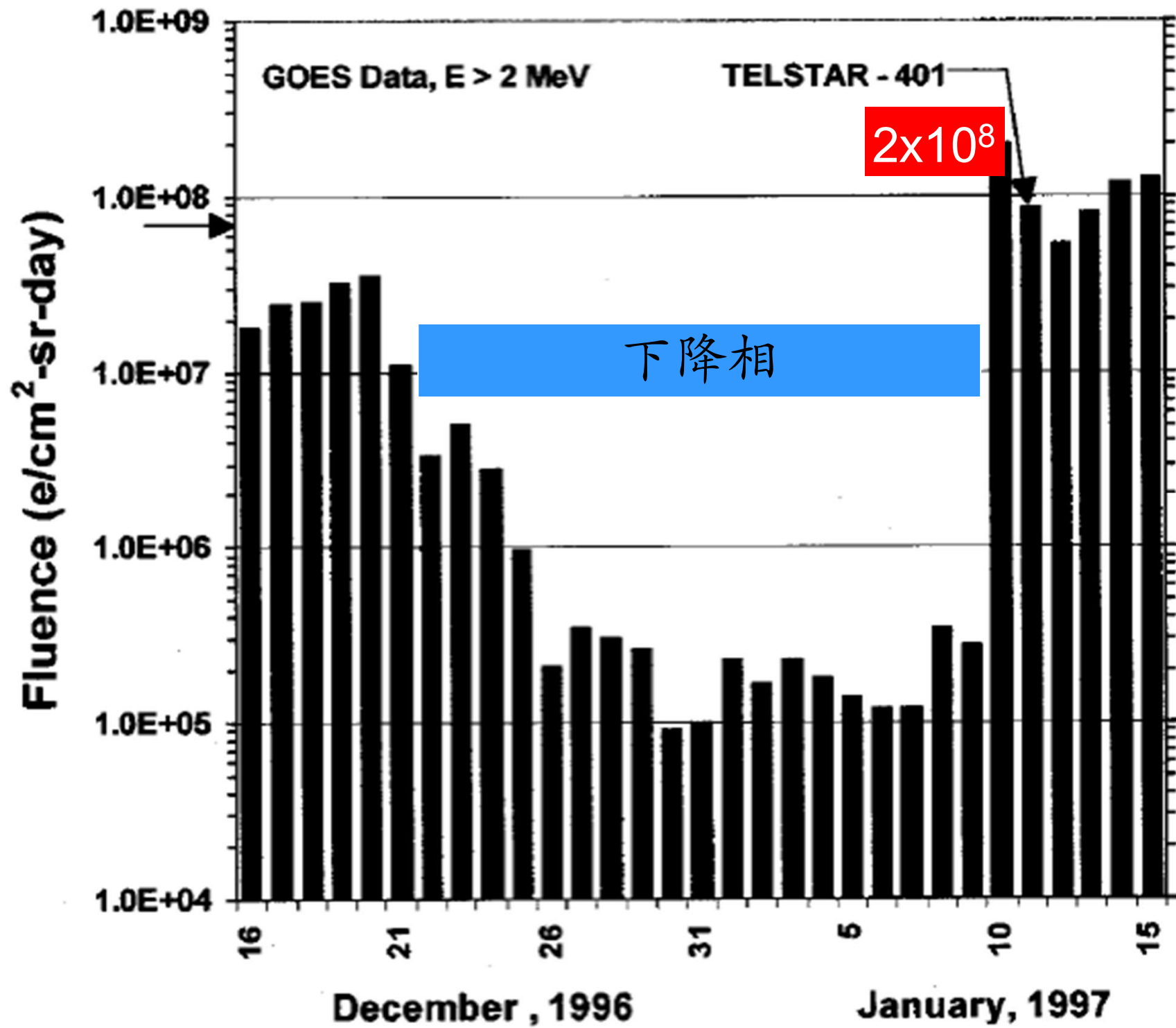
下降相： 流量明显比基线低，平均日流量低于基线相的4-380倍，时间间隔为3-15天

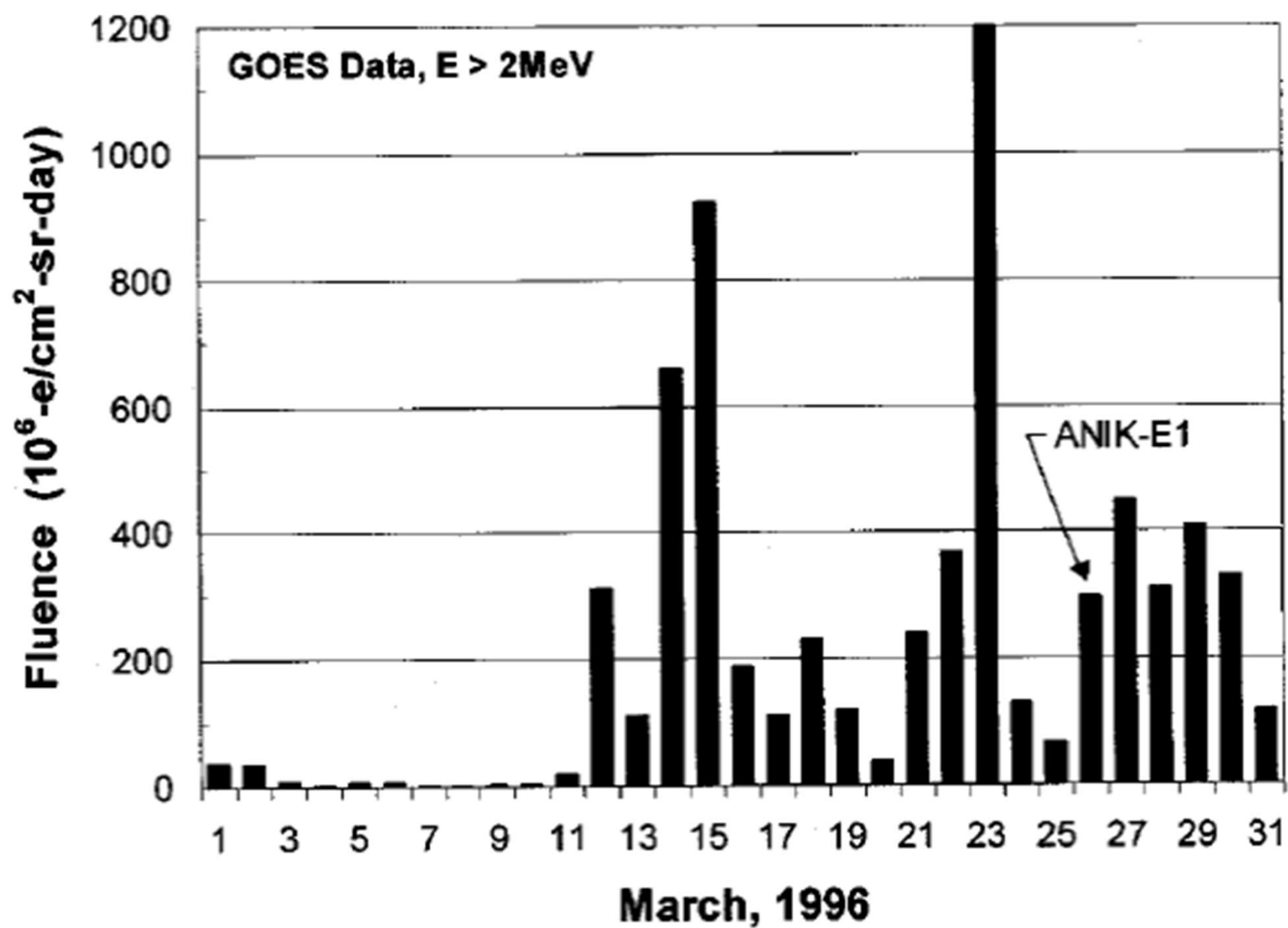
增长相： 下降相后紧跟着日流量显著增大，这个相的持续时间约为1-14天，平均日流量大于下降相的23-950倍，每日流量都大于 $2 \times 10^8 / \text{cm}^2 \cdot \text{sr}$

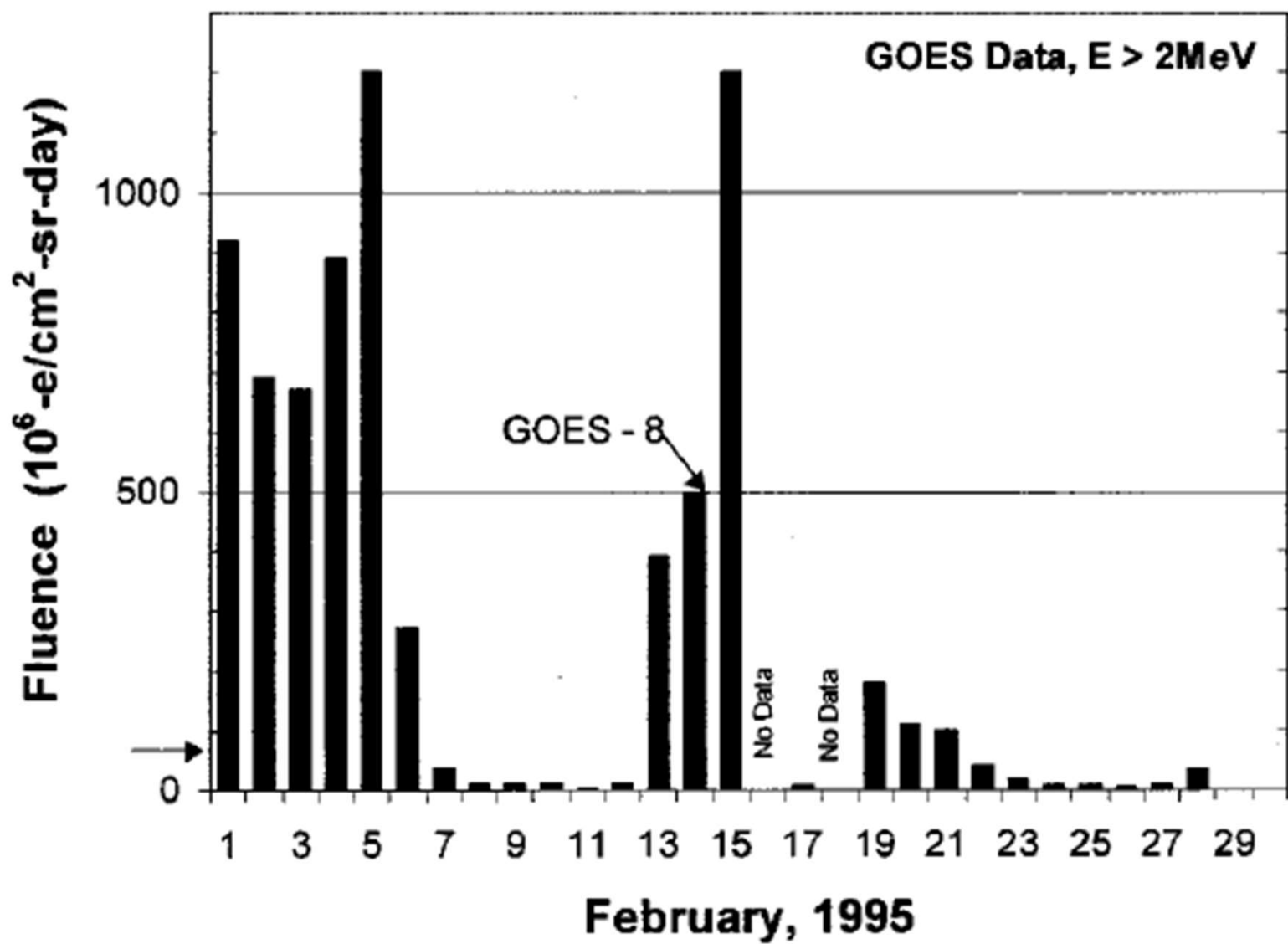
Temporal Sequence (Preceding 3 Calendar-month Baseline)→(3 to 15-day Depletion)→(<1 to 14-day Enhancement)→(Anomaly)						
Satellite	Baseline Fluence	Depletion Fluence (days)	Ratio Base/Depl	Enhancement Fluence (days)	Ratio Enh/Depl	Ratio Enh/(Base+SD)
TESLSTAR-401	8.0E7	2.1E5(15)	380	2.0E8(1)	950	0.83
ANIK-E1	2.4E7	6.0E6(9)	4	3.4E8(14)	56	5.0
GOES-8 (1995)	8.7E7	1.3E7(6)	7	3.9E8(1)	30	1.8
ANIK-E1 & E2	1.4E8	2.9E7(9)	5	2.8E8(8)	23	0.79
GALAXY-4	7.9E7	9.8E6(4)	8	3.4E8(14)	34	1.4
GOES-8 (1998)	8.2E7	1.2E7(5)	7	4.4E8(6)	38	2.9
GOES-9	9.4E7	2.1E7(3)	4	7.1E8(4)	34	2.8

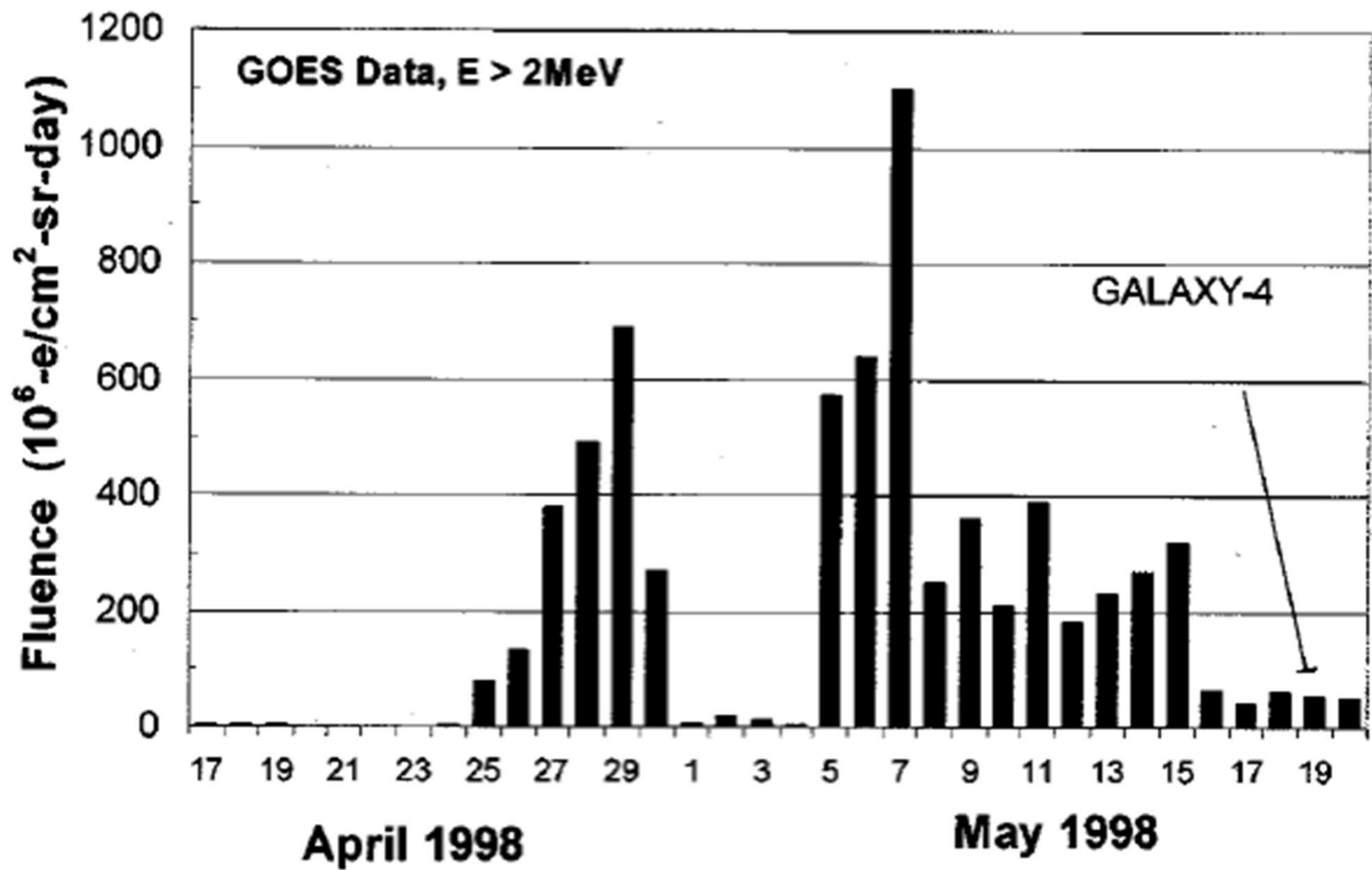
1 Feb 1998 - 31 Oct 1998

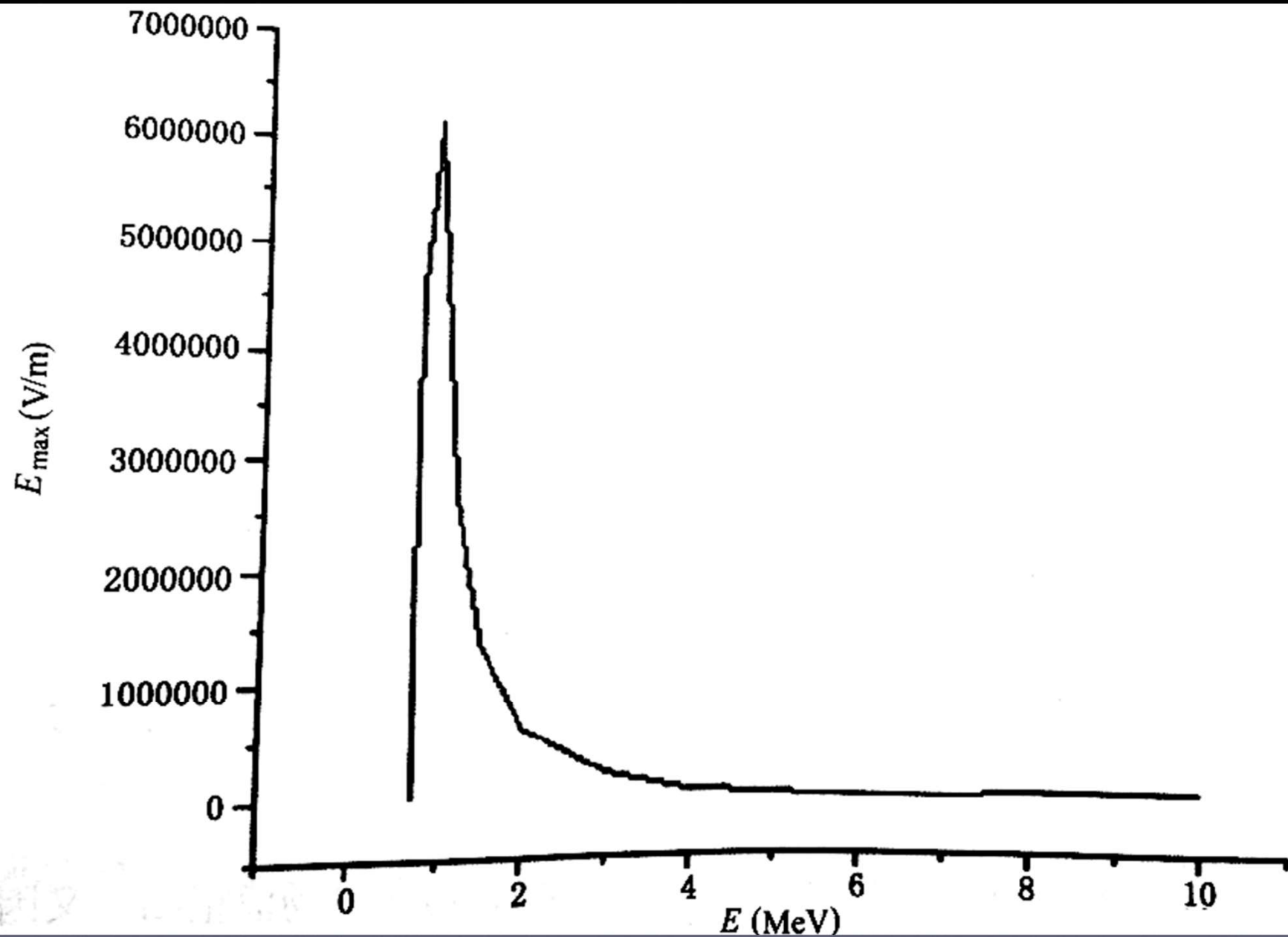




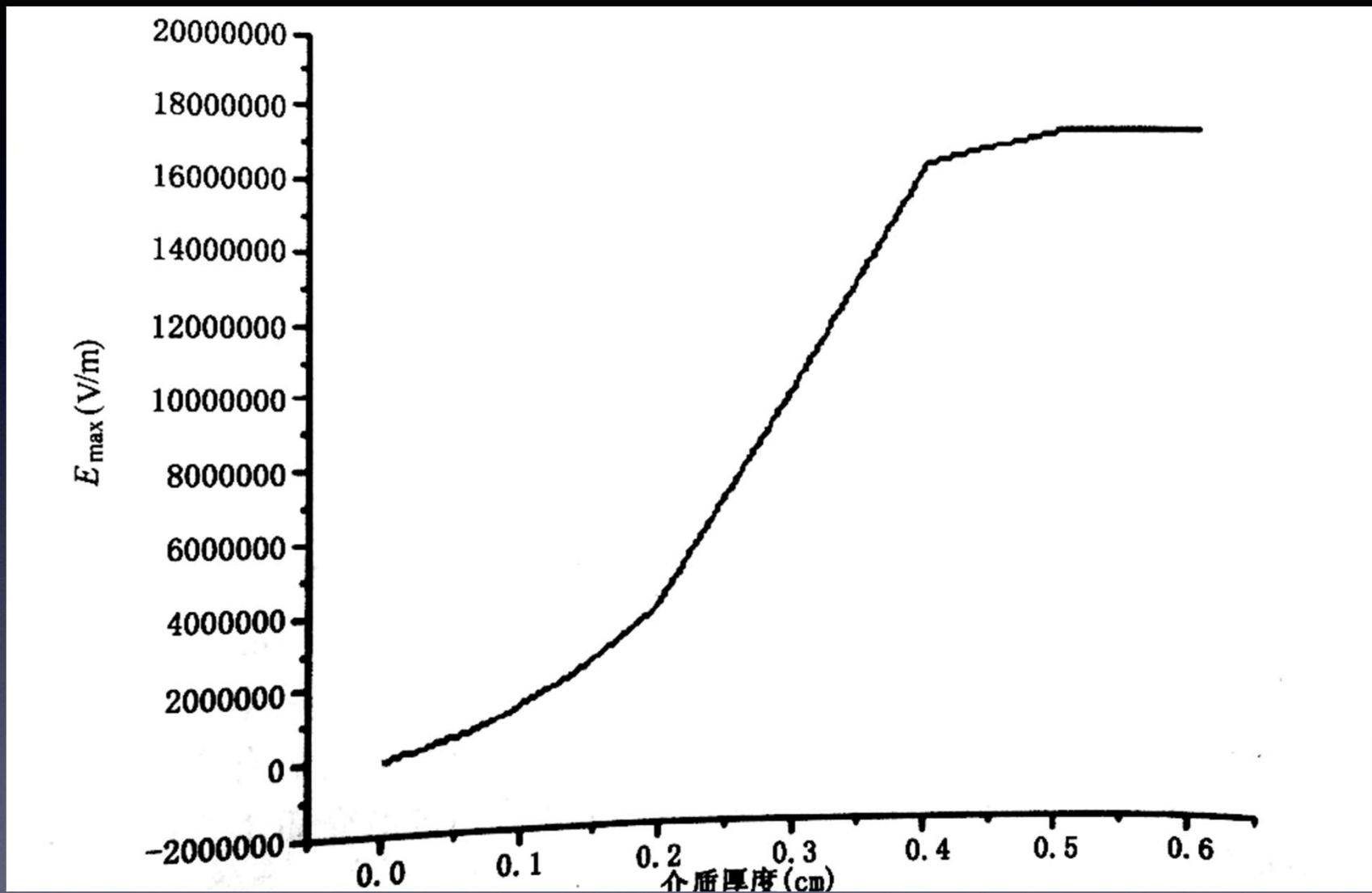




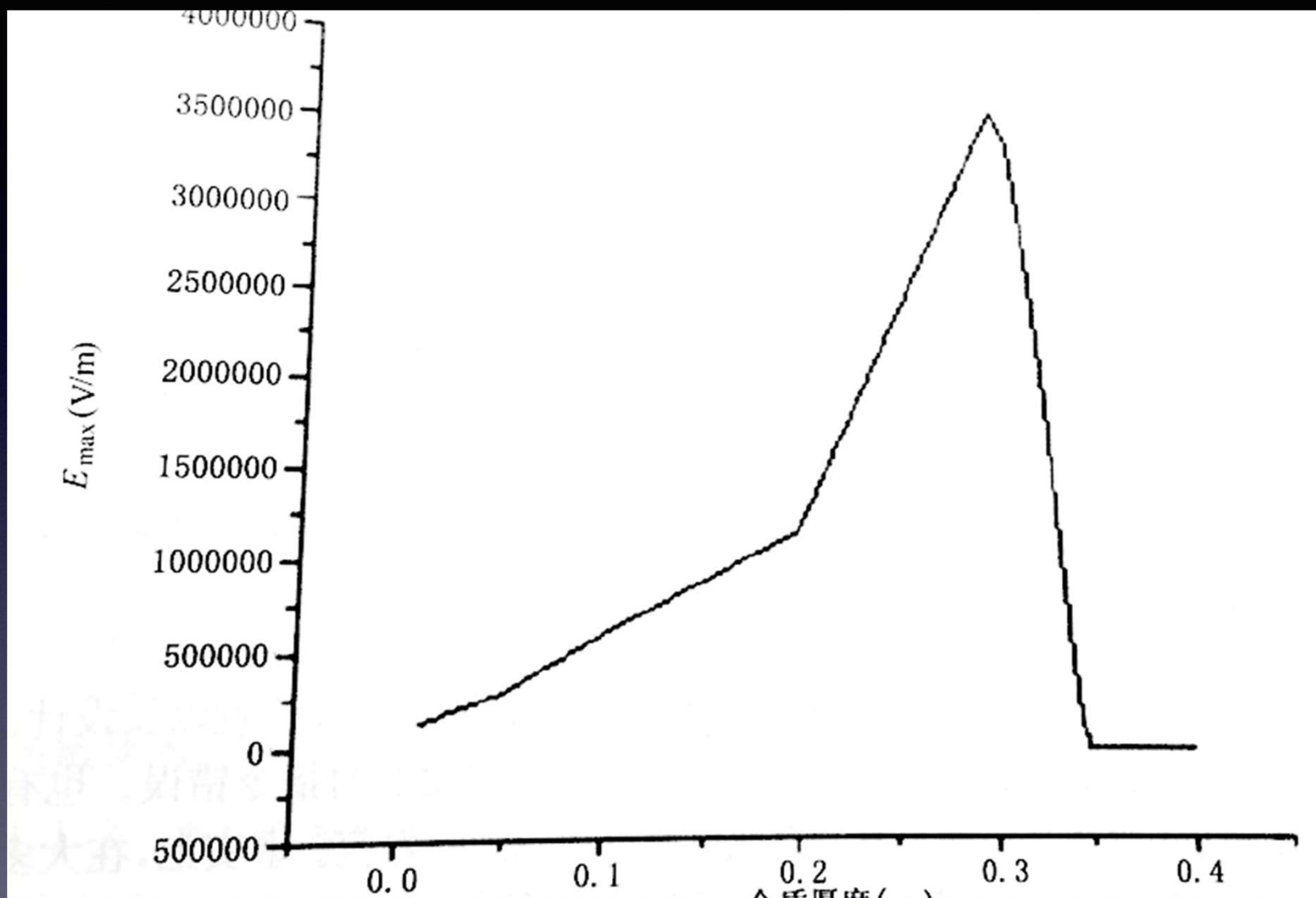




电介质内部最大场强与高能电子能谱的关系



电介质内部最大场强与电介质厚度的关系



最大场强与屏蔽厚度的关系

航天器内部充电特征

- 在高能电子作用下，介质内最大电场取决于材料性质、厚度以及电子的能谱。最大电场与高能粒子在一定时间内的流量有密切关系，而与入射电子的瞬时通量无关。
- 在考虑了辐射感应电导率的情况下，尽管电解质内部的最大电场值降低，但由于达到饱和电场所需的时间大大缩短，因此在空间天气中可以出现内部充电使介质电场超过击穿阈值的条件，典型的飞船异常伴随着持续时间一天或几天的电子通量增加
- 在卫星发生异常前，往往会出现电子流量的短暂减小。

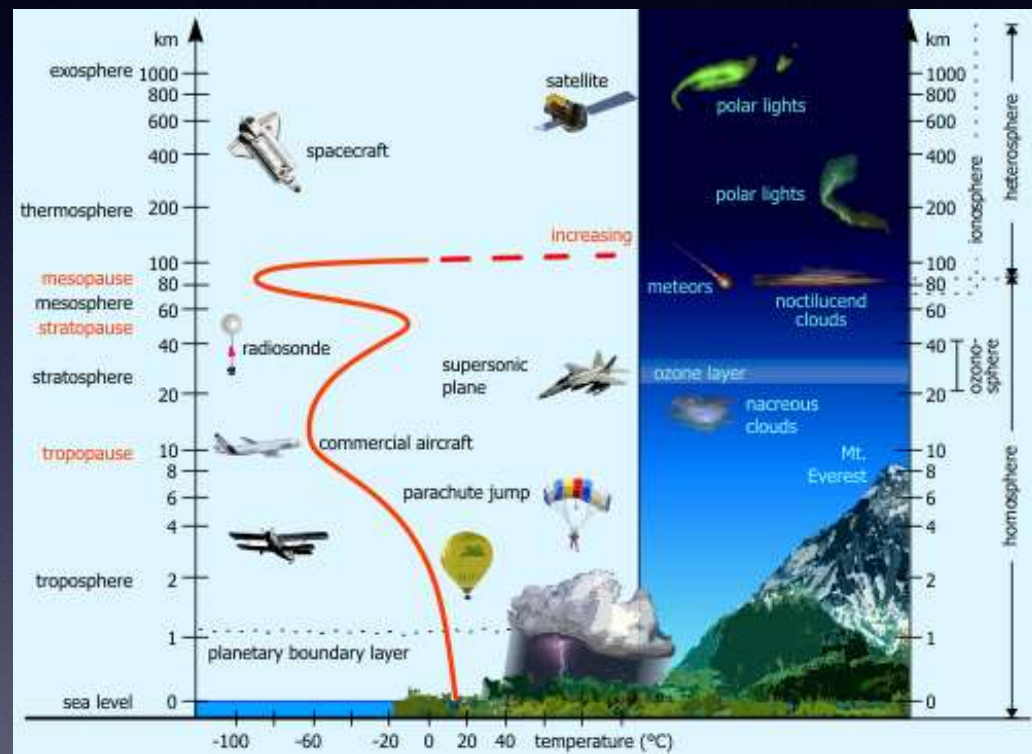
可采取的措施

- 在保证材料机械性能的基础上，电介质越薄越好
- 对于低能电子，使用一定厚度的屏蔽；而对于高能电子，屏蔽的厚度选择要根据材料性质、卫星运行过程可能经受大高能电子能谱等因素仔细研究确定，如果屏蔽厚度选择不当，反而会加剧内部充电。
- 在保证基本绝缘的前提下，尽量选用有较高电导率的介质，包括高暗电导率，高辐射感应电导率和高光电导率。

大气阻力效应—航天器轨道衰变

影响大气密度的主要因素

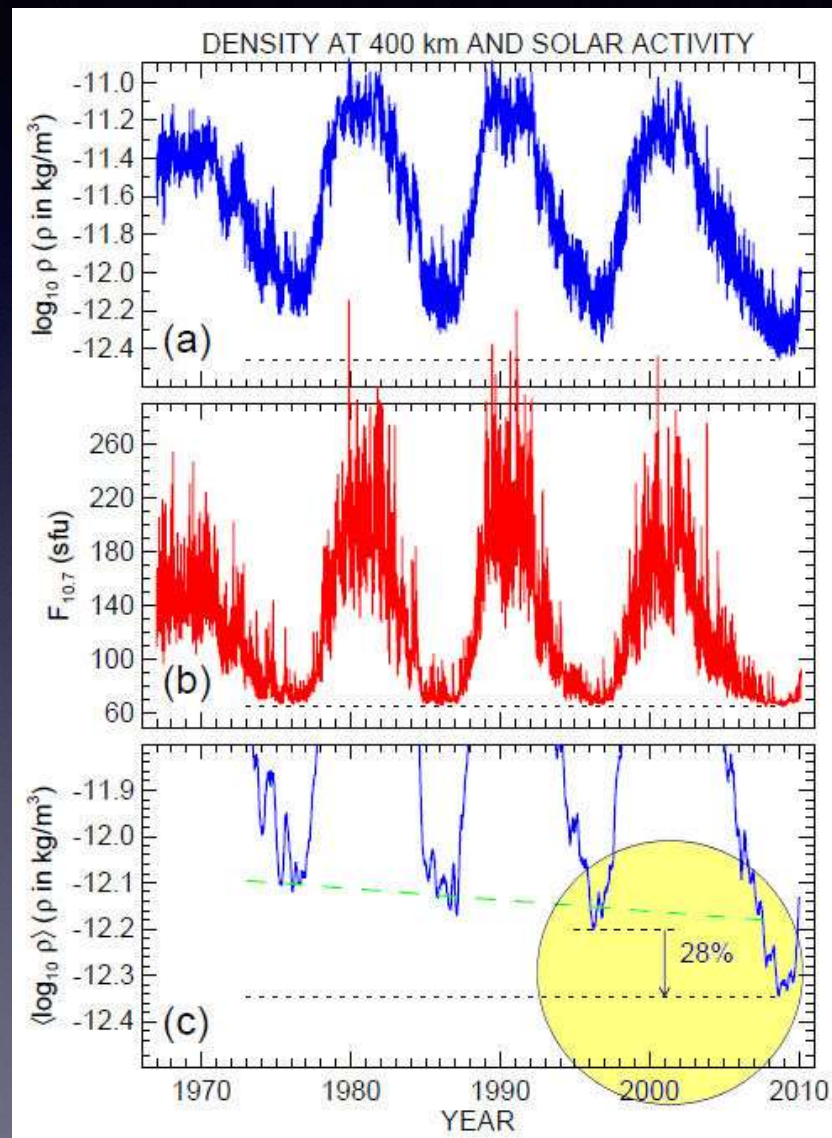
- ★ 太阳活动周变化
- ★ 季节变化
- ★ 昼夜交替
- ★ 太阳爆发活动



大气阻力效应—航天器轨道衰变

影响大气密度的主要因素

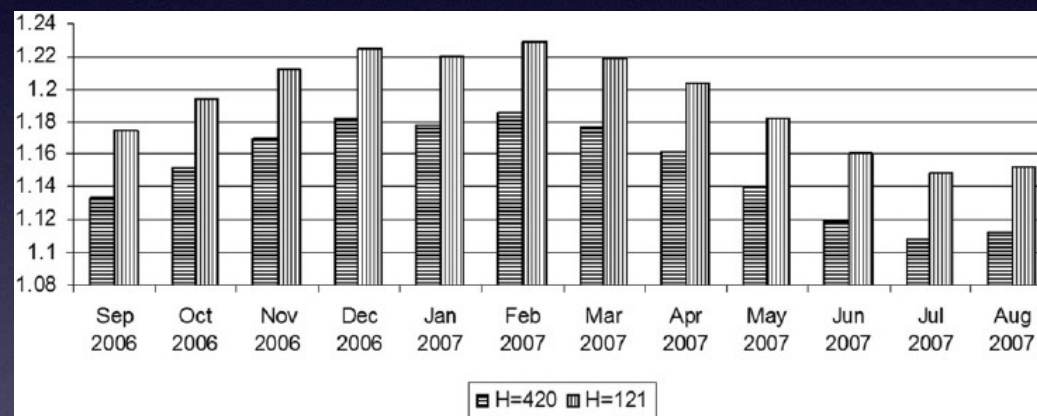
- ★ 太阳活动周变化
- ★ 季节变化
- ★ 昼夜交替
- ★ 太阳爆发活动



大气阻力效应—航天器轨道衰变

影响大气密度的主要因素

- ★ 太阳活动周变化
- ★ **季节变化**
- ★ 昼夜交替
- ★ 太阳爆发活动



大气阻力效应—航天器轨道衰变

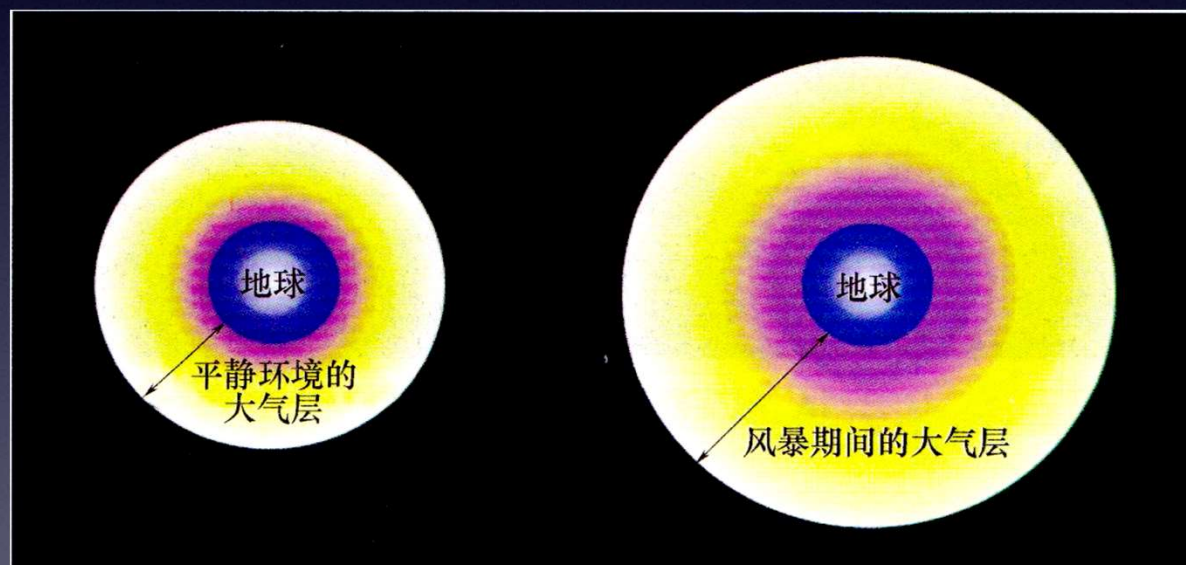
影响大气密度的主要因素

- ★ 太阳活动周变化
- ★ 季节变化
- ★ **昼夜交替**
- ★ 太阳爆发活动

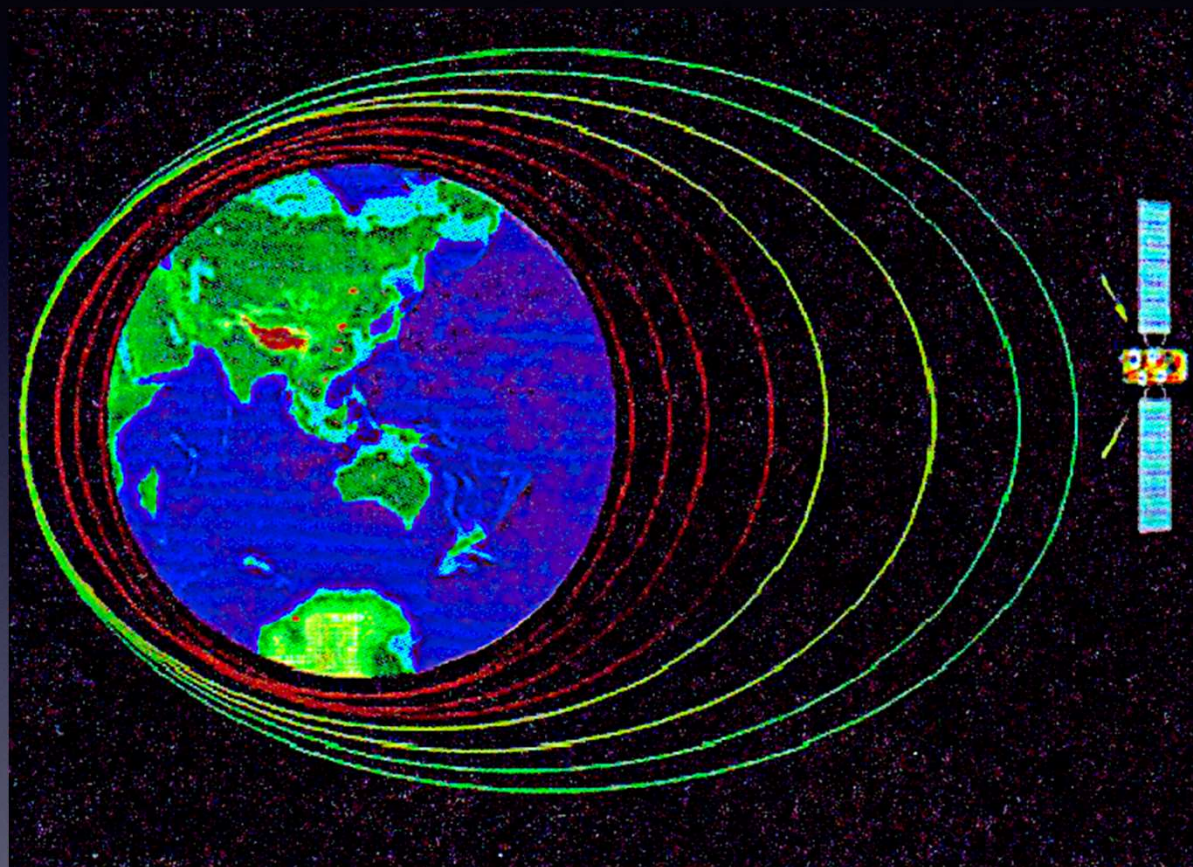
大气阻力效应—航天器轨道衰变

影响大气密度的主要因素

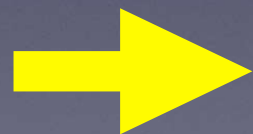
- ★ 太阳活动周变化
- ★ 季节变化
- ★ 昼夜交替
- ★ 太阳爆发活动



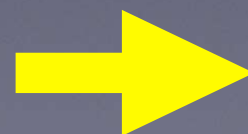
大气阻力对航天器的影响



近地点损失能量



远地点高度下降



逐渐趋于圆轨道

太阳风暴对卫星的影响



单粒子效应对卫星的影响

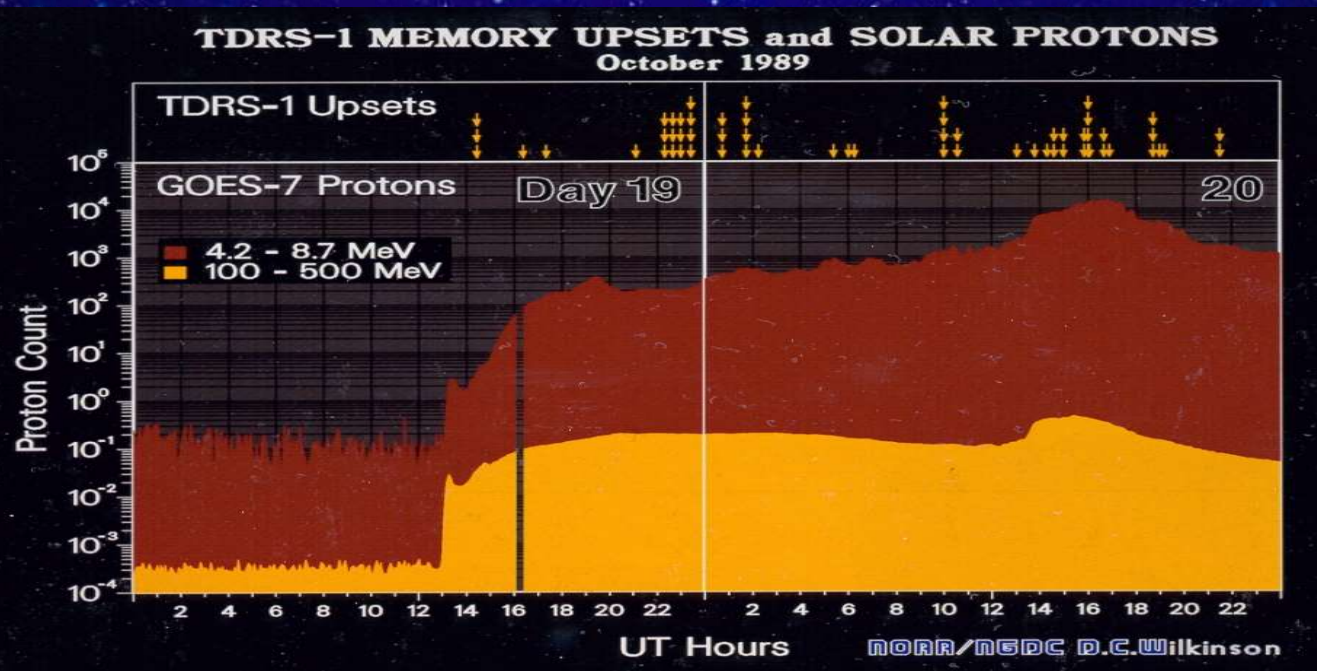
高能粒子

单粒子事件



- 单个高能质子或重离子进入微电子器件时导致的器件逻辑功能翻转或损坏，可以造成航天器发生异常或故障。
- 单粒子效应随着集成电路的发展，其危害日益严重。据美国的统计，与空间环境有关的卫星异常中单粒子效应造成的达39%。

单粒子效应



发生质子事件发生期间，轨道上的单粒子翻转概率也会大幅上升，有的轨道上甚至会上升2到3个数量级。