

太阳风暴对卫星的影响



单粒子效应对卫星的影响

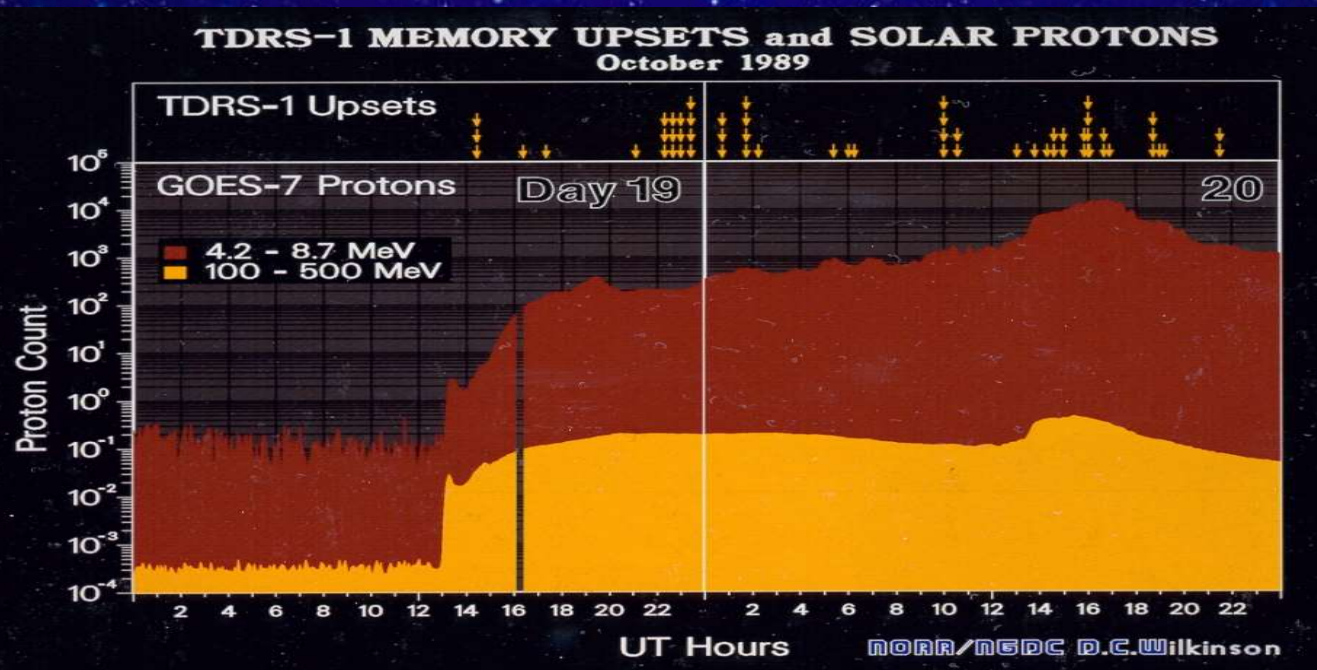
高能粒子

单粒子事件



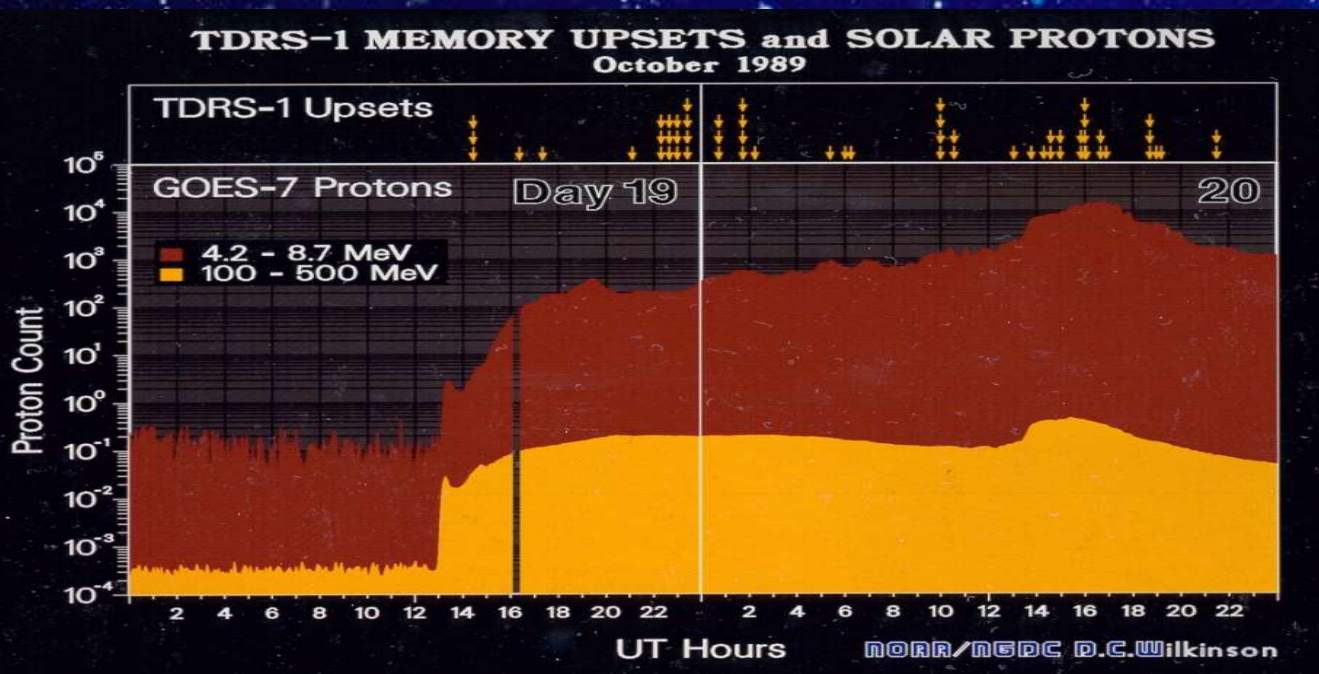
- 单个高能质子或重离子进入微电子器件时导致的器件逻辑功能翻转或损坏，可以造成航天器发生异常或故障。
- 单粒子效应随着集成电路的发展，其危害日益严重。据美国的统计，与空间环境有关的卫星异常中单粒子效应造成的达39%。

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。

质子事件对卫星的影响



1989年10月发生的太阳风暴中，GOES-5，-6卫星发生大量单粒子事件；在整个10月事件期间TDRS-1卫星发生239次单粒子事件，加固的TDRS-2和3仍有单粒子事件发生；极轨UOSAT-2有大量单粒子事件，出现多种软错误。

质子事件对卫星的影响



1991年初,我国“风云一号(B)”气象卫星,因单粒子事件使姿态出现故障,通过磁控将姿态恢复正常后,又由于5月19日质子事件,6月11日、6月17日和6月19日等后几次太阳质子事件,引发了主控计算机的多次翻转,最终导致“风云一号”卫星姿态完全失控,而结束使用寿命。;

高能粒子的辐射损伤位移

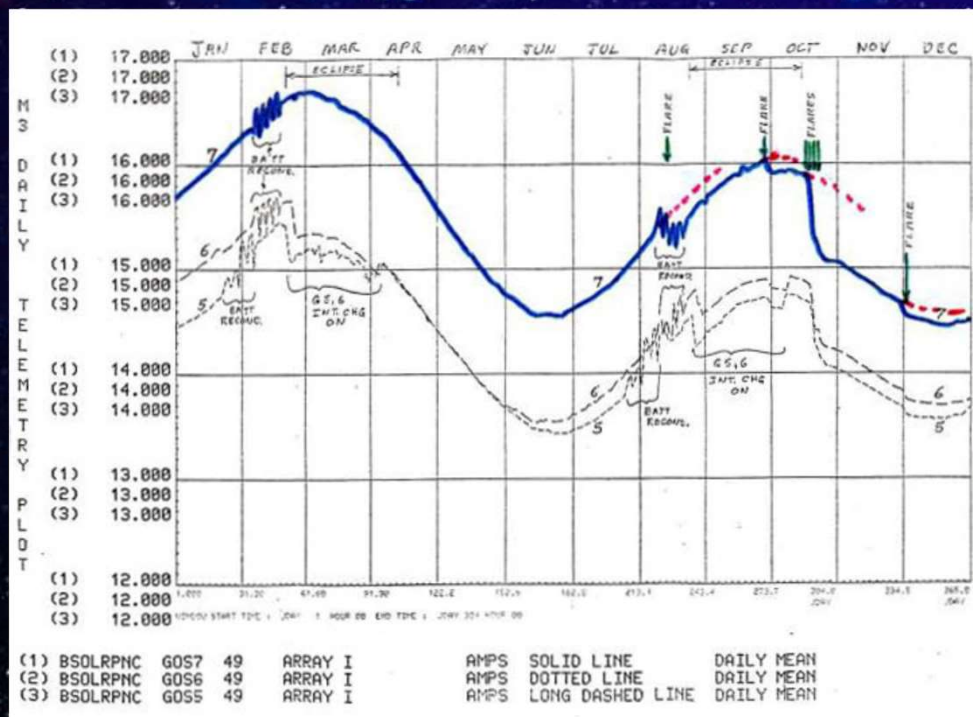
高能粒子

辐射损伤
(电离或原子位移)

材料、器件、太阳
电池
阵损伤/毁坏

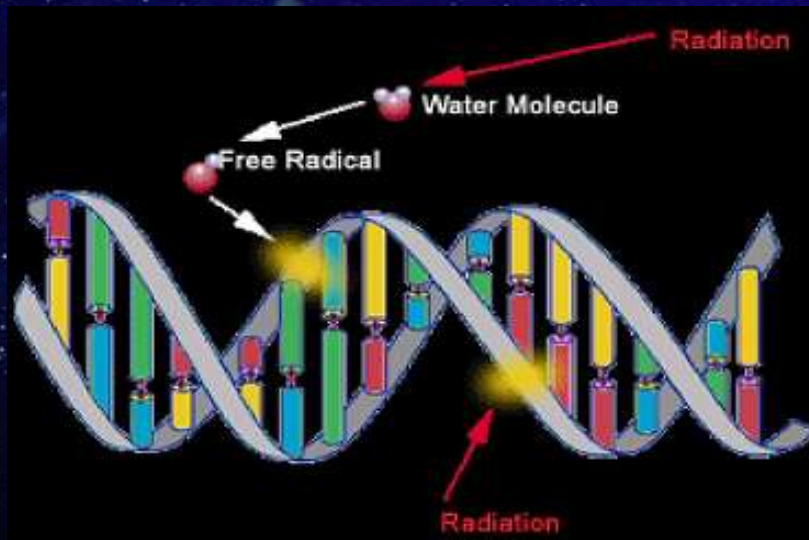
- 高能粒子通过电离作用和原子位移作用可以造成航天器材料和电子器件等的性能衰退或损坏。
- 具体表现有太阳电池输出降低，各种半导体器件性能衰退（增益降低，工作点漂移，甚至损坏）、玻璃材料的变黑、变暗。

高能粒子的辐射损伤位移

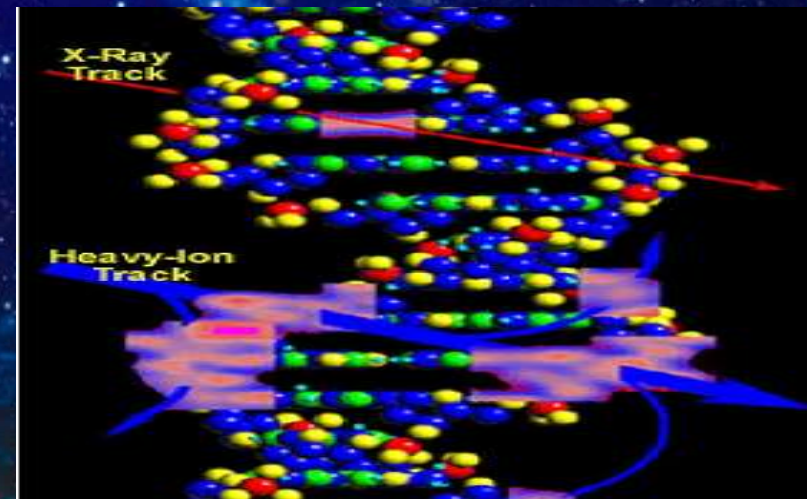


- 1989年9月—10月的多次太阳质子事件发生期间，地球同步轨道卫星GOES-5、-6、-7上的太阳能电池输出电流急剧下降；太阳能电池输出功率下降了5/6。
- 1989年10月19日的太阳质子事件导致GOES-5、-6、-7上的电能输出下降量相当于5年正常辐射老化所损失的电能。

质子事件对航天员的危害

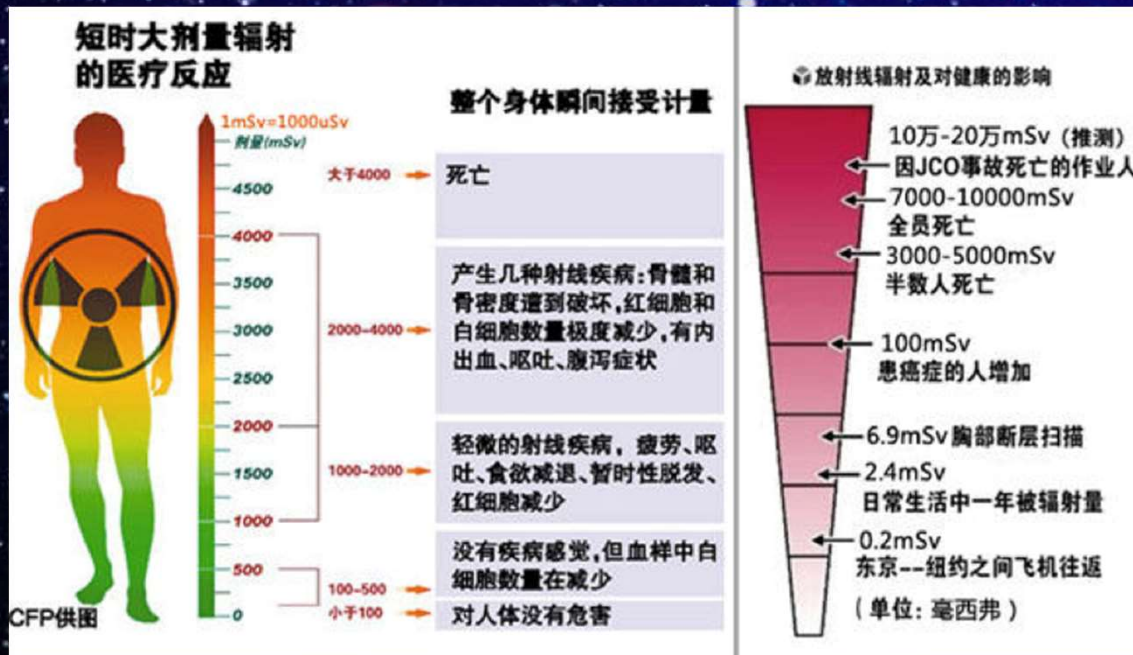


辐射形成的自由基对DNA的破坏



辐射造成DNA的断裂

质子事件对航天员的危害



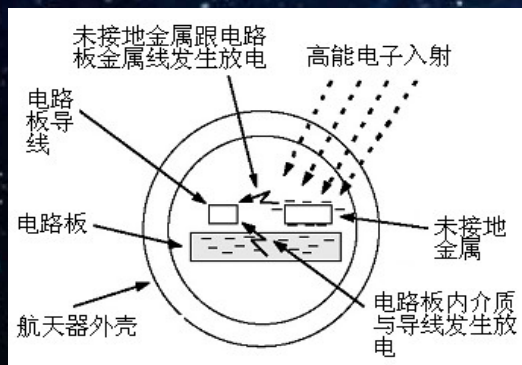
1972年8月4日的太阳风暴,高能质子峰值通量高达 $86000/\text{cm}^2\cdot\text{s}$,整个事件流量达 $1 \times 10^{10}/\text{cm}^2$,在 $1\text{g}/\text{cm}^2$ 物质(相当于3.7mm的铝)的屏蔽下剂量仍高达33.2Gy(人体致死的剂量上限为10Gy),如果登月飞行遭遇到这样事件,将严重影响航天员的生命安全。

高能电子暴对卫星的影响

高能电子(0.1~10MeV)

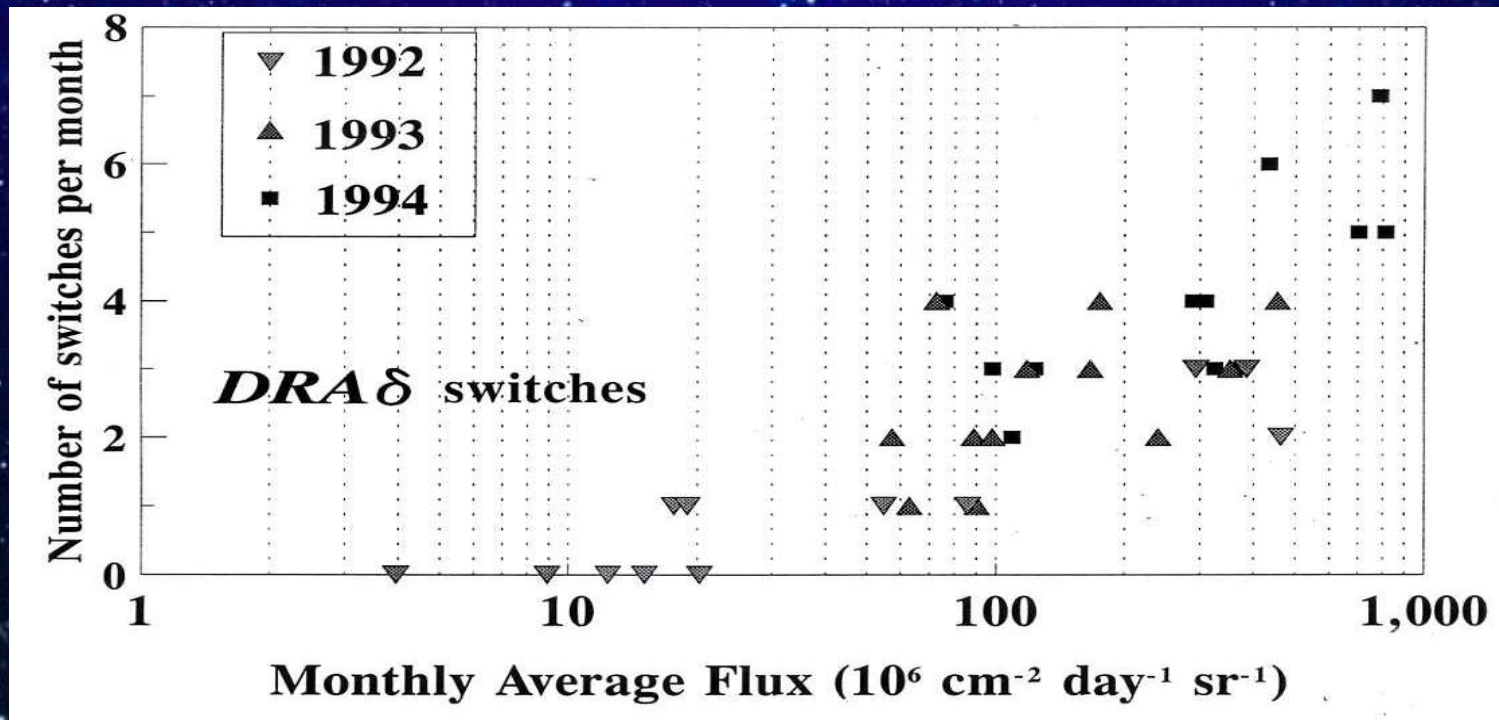
深层充电 (内部充电)

静电放电



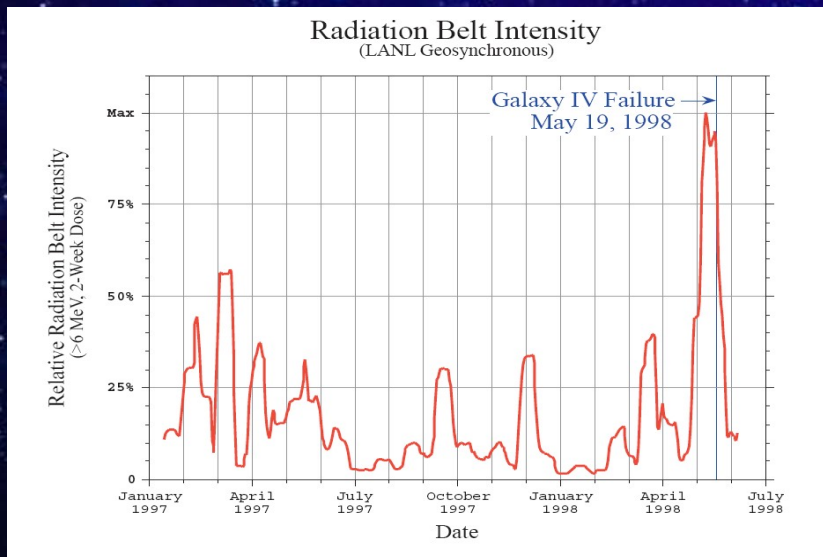
高能电子穿透航天器的表面屏蔽层，在航天器内部介质中沉积时，就会形成内部电场。当电荷所产生的内部电场超过介质的击穿阈值，将产生静电放电。静电放电的脉冲可以形成伪信号，使卫星错误动作，从而引起故障；更严重的放电可造成电路击穿，导致航天器失效。深层充电对导航卫星影响最大，其次是同步轨道卫星。

高能电子暴的影响：深层充电效应



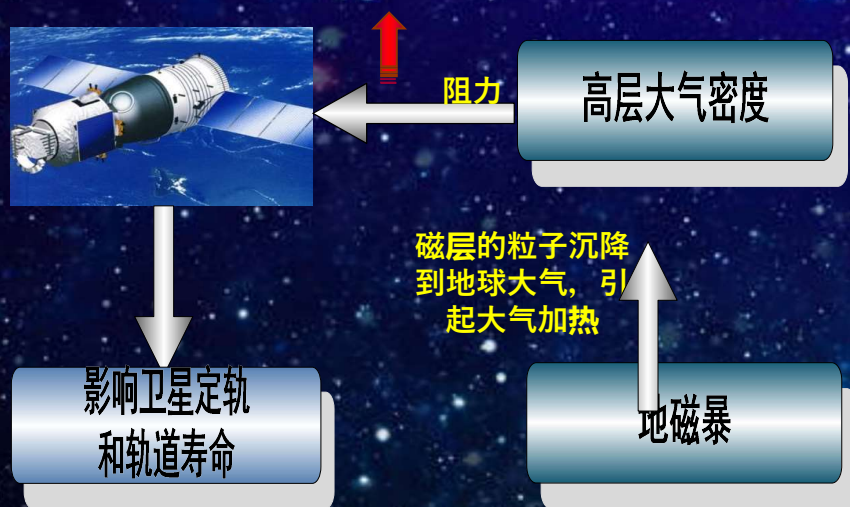
欧洲通讯卫星DRA-delta转发器异常和电子通量的关系

高能电子暴对卫星的影响



1998年5月19日，高能电子暴导致美国同步轨道GALAXY-4通讯卫星姿态控制系统的自动定向控制器发生故障，并且备份系统也出现故障，导致卫星不能维持对地稳定而失效，它造成4千5百万用户的电话呼叫服务中断，各种通讯业务中断，并使金融交易陷入混乱。

高层大气密度增加对卫星的影响



地磁暴会使磁层的粒子沉降到地球大气，引起大气加热，使高层大气密度急剧增加，增大卫星的大气阻力，影响卫星定轨和轨道寿命。

高层大气密度增加对卫星的影响



2000年7月巴士底事件，国际空间站轨道下降15公里。



2003年10月万圣节事件中，神舟五号飞船的轨道每天下降了2公里。

3、太阳风暴影响航天器实例

航天器在轨常见异常现象

- ★ 航天器“伪”指令
- ★ 星载计算机系统的单粒子翻转
- ★ 星载敏感器的噪声干扰
- ★ 太阳电池性能退化
- ★ 低轨航天器轨道衰减加剧

航天器伪指令

航天器伪指令：在轨航天器在没有指令的情况下，自动执行操作的现象

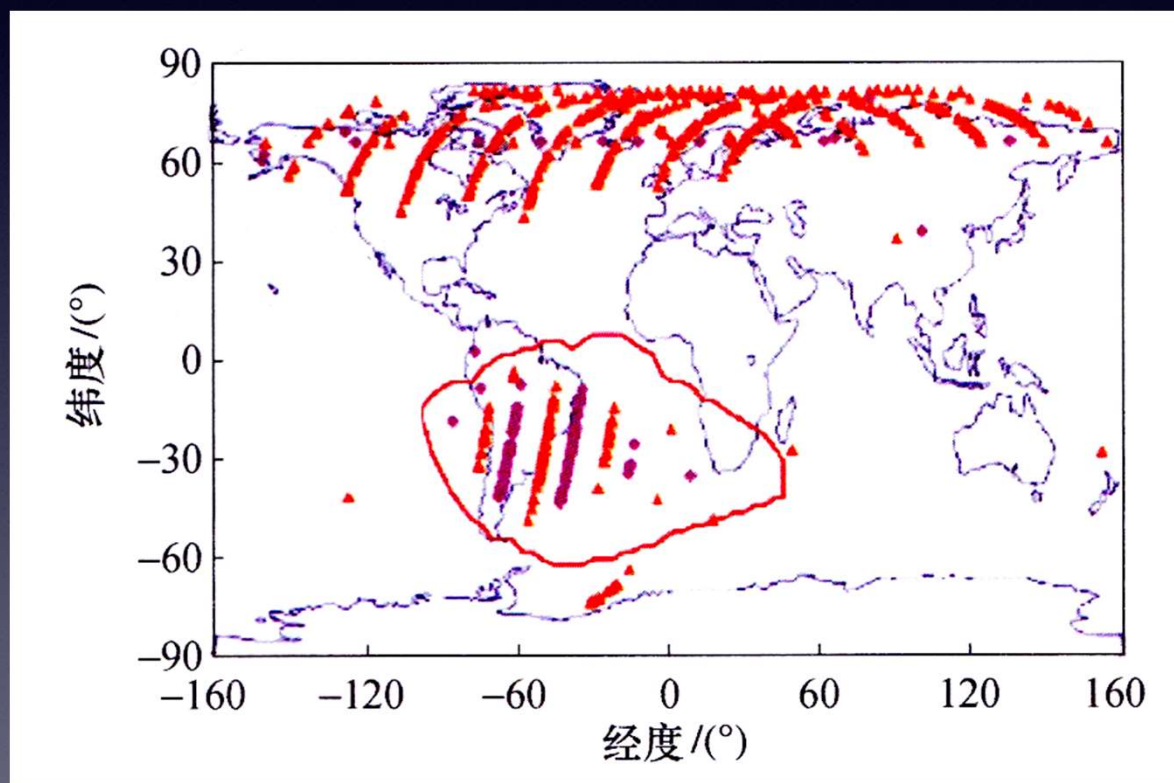
卫星表面充放电效应

Aink-A卫星	遥测解码器自主模式切换 11次
Aink-B卫星	地球敏感器模式切换
Aink-C1卫星	电路开关异常
Aink-C2卫星	电路开关异常
Aink-D1卫星	在没有遥控指令情况下自行切换模式
Aink-D3卫星	在没有遥控指令情况下自行切换模式
Aink-E卫星	大量伪指令

我国东方红平台卫星也多次发现过“伪”指令问题

星载计算机系统的单粒子翻转

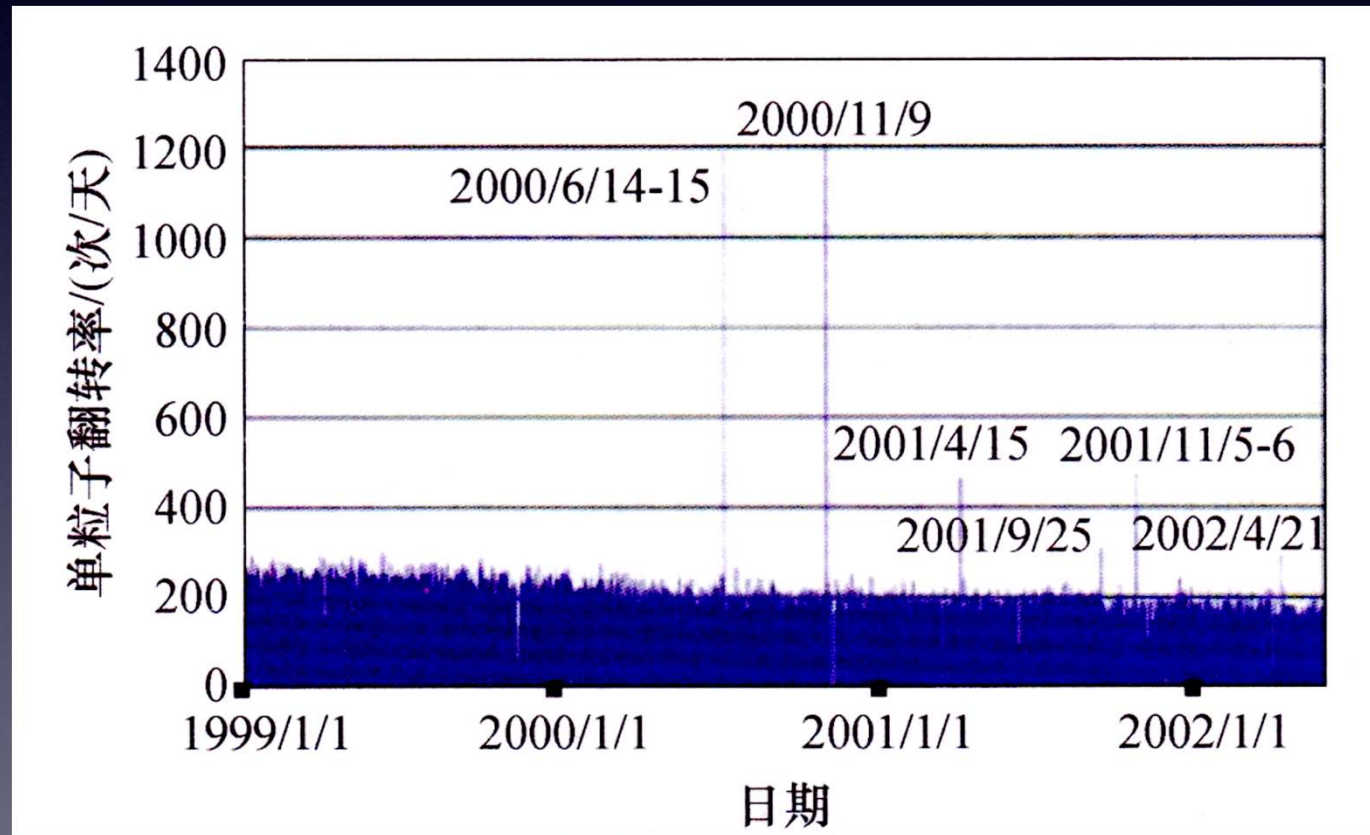
航天器的静态存储器(SRAM)单元在轨期间会发生**单粒子翻转**



2000年7月“巴士底”事件期间，美国seastar卫星静态存储器在轨单粒子翻转现象的统计分析

星载计算机系统的单粒子翻转

航天器的静态存储器(SRAM)单元在轨期间会发生**单粒子翻转**



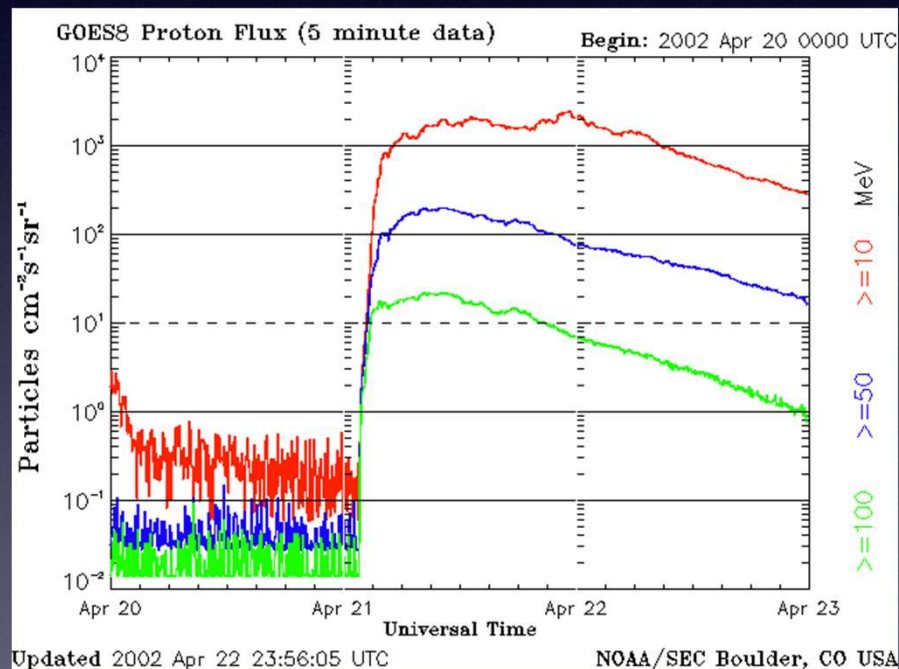
1999年1月至2002年6月期间Seastar卫星每天的单粒子翻转数

星敏感器的噪声干扰

星敏感器：以恒星作为姿态测量的参考源，可输出恒星在星敏感器坐标下的矢量方向，为航天器的姿态控制和天文导航提供高精度测量数据，对高能粒子干扰非常敏感。



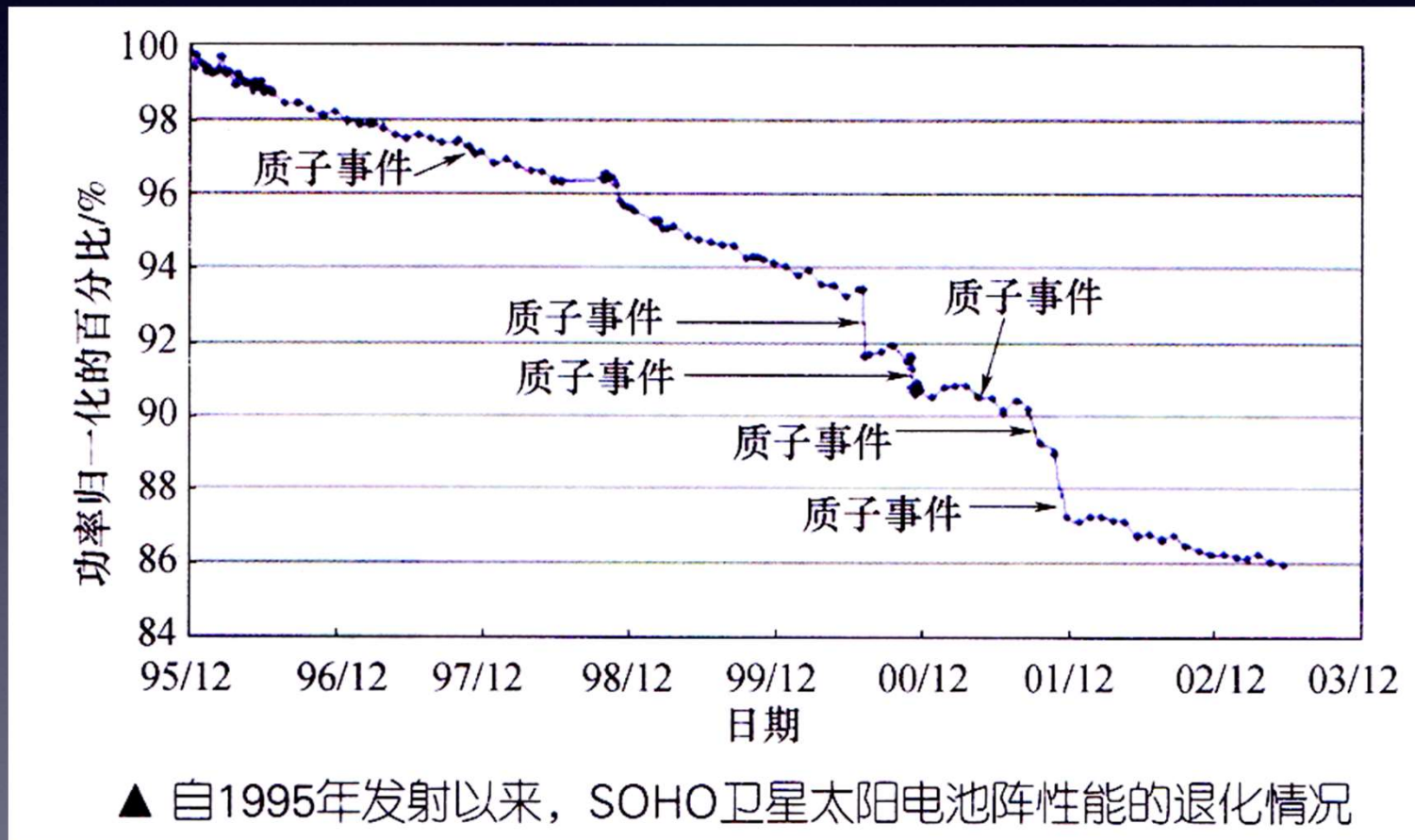
起源号探测器(Genesis)：美国，2001年发射，主要目的是搜集太阳风粒子，以解开有关太阳系的起源和演化等方面的问题，总投资约2.6亿美元。



2002年4月21日，美国起源号受到太阳高能粒子事件攻击，导致恒星跟踪仪4次失去目标。

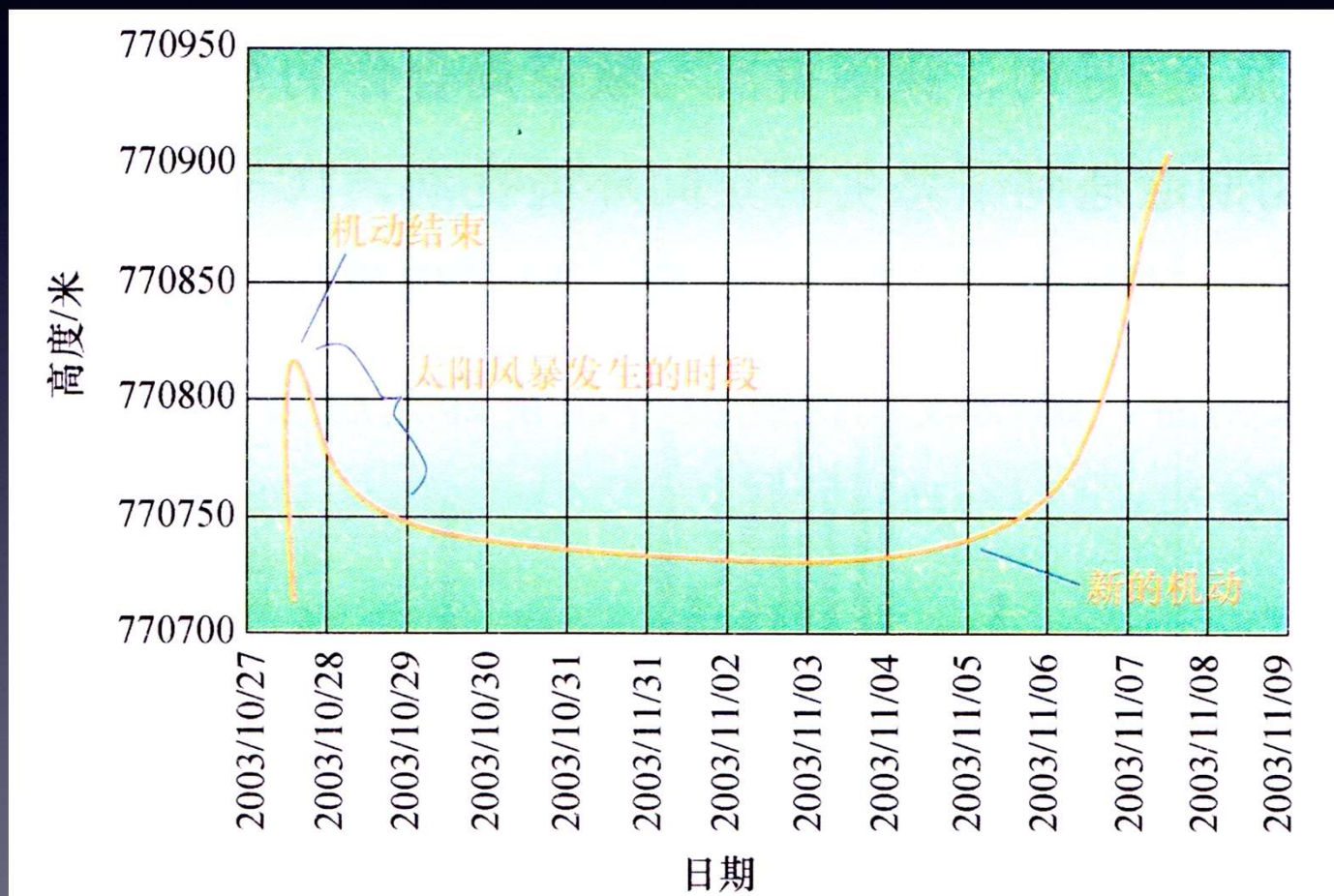
太阳电池性能退化

由于高能粒子和太阳电池晶格原子相互作用产生的缺陷，使得电子和空穴的复合机制增强，从而降低了太阳电池的输出电压和电流。



低轨道航天器轨道衰减加剧

当太阳活动剧烈时，高层大气的温度和密度也随之发生距离变化

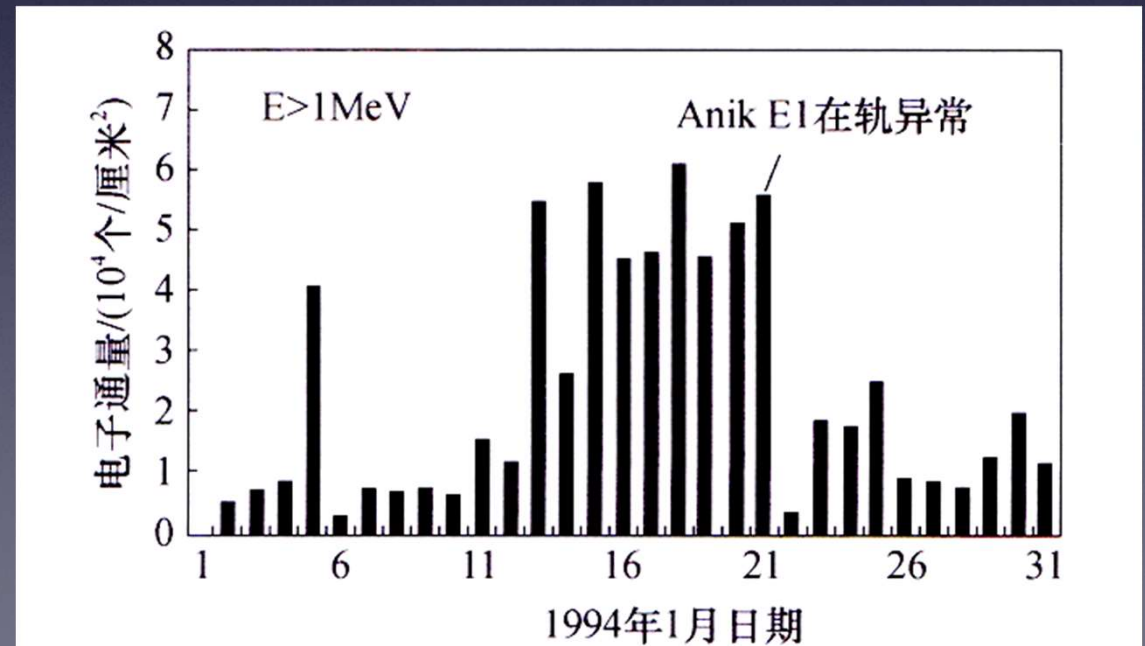


2003年10月太阳风暴期间“资源”一号02星轨道短时下降70米

姿轨控分系统故障

- ▶ 1994年1月20日世界时17:35分 Anik E1发生姿控系统故障
使用备份姿态控制系统修复
- ▶ 1994年1月21日世界时2点10分 Anik E2发生同样故障
姿态完全失控

- ★ 北美电视、广播等业务中断几小时到几天
- ★ 加拿大的新闻、气象和娱乐节目受到影响
- ★ Intelsat-K卫星进行了防静电干扰设计，很快修复



其他卫星姿态失控事例

1998年5月19日，Galaxy-4卫星姿控系统故障，失去指向地球的功能，由地球外辐射带中高能电子通量的持续增强造成。

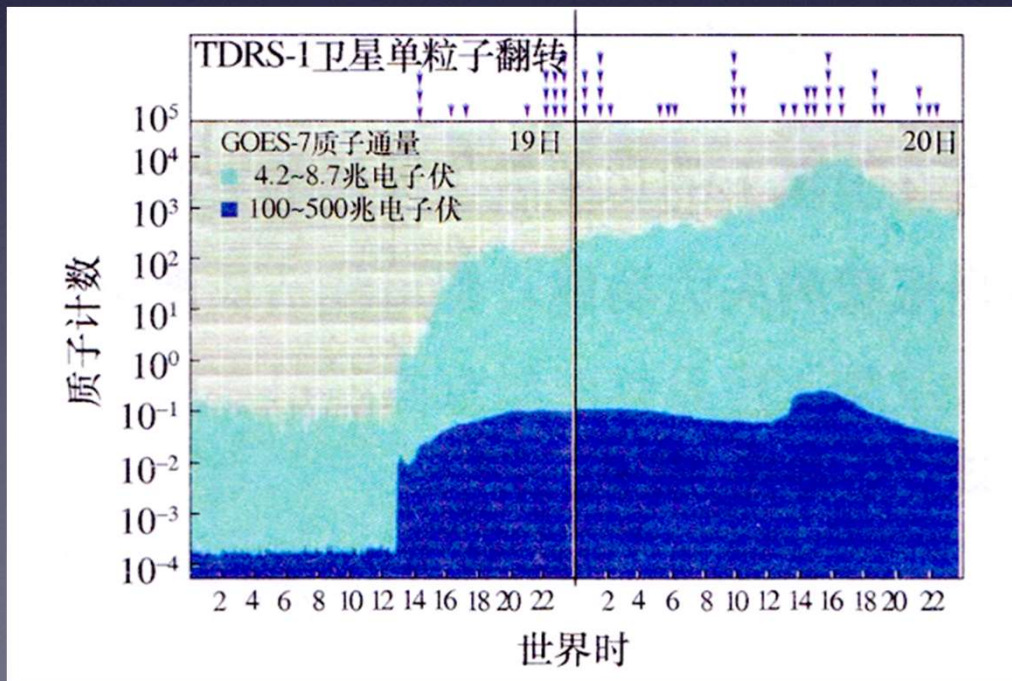


- ▶ 价值：2.5亿
- ▶ 目标：为北美地区用户提供通讯服务
- ▶ 发生故障后 4500万用户寻呼机服务中断，同时也使电话、广播、电视和其他信息传输中断
- ▶ 由于寻呼对象是急救人员和义务工作者，对医疗救助造成了很大的影响

其他卫星姿态失控事例

TDRS卫星姿态失控

1989年11月2日，TDRS-1中央处理器发生单粒子翻转(SEU)，引起卫星在短小时内姿态失控。



1989年10月TDRS-1卫星存储器单粒子效应与高能质子通量的关系

数据管理分系统故障

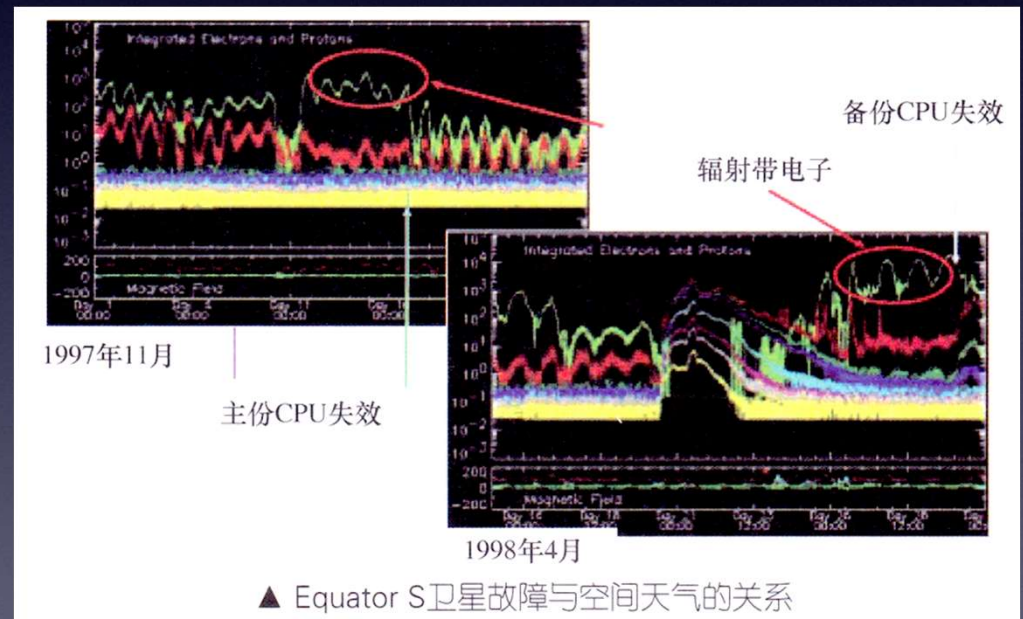
数据管理分系统在卫星上的功能就像人类的大脑，一旦其中的星载计算机出现故障，哪怕是短暂的失去功能，都可能造成严重的后果。



Equator S, 德国

- ▶ 价值1200万美元
- ▶ 1997年11月2日发射
- ▶ 1998年4月30日任务提前终结
- ▶ 故障原因：

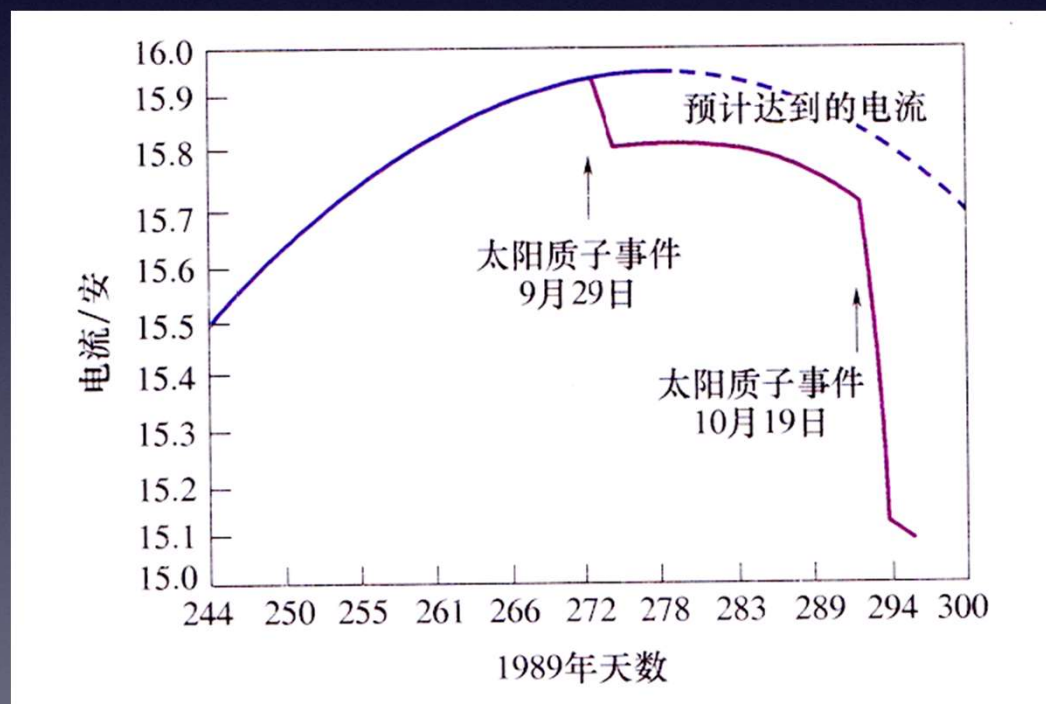
- ✓ 微处理器采用的存储器芯片发生了单粒子锁定现象
- ✓ 高能电子产生的深层截止带电



电源分系统故障

电源分系统是航天器最重要的分系统之一，它的作用是为卫星其它分系统提供所需要的能源，其重要性可与人体心脏相当。太阳风暴可能造成电源系统工作失效或功能的衰竭两种危害，其后果非常严重。

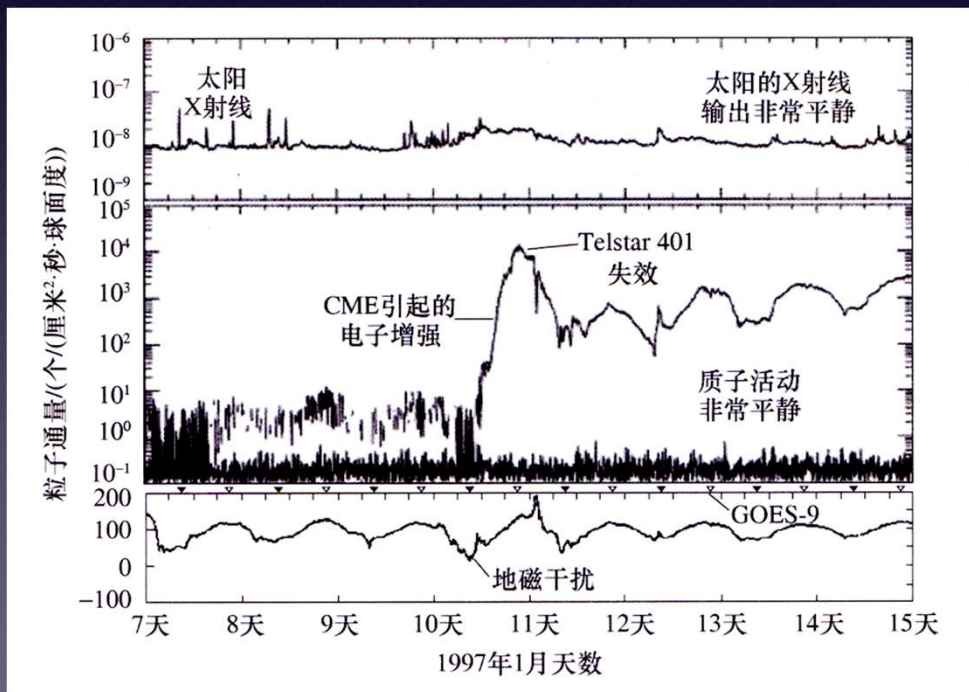
- ▶ 1989年8月、9月、10月期间特大太阳耀斑对美国的地球静止环境业务GOES-5,GOES-6和GOES-7卫星的太阳电池阵输出产生了较大影响
- ▶ 正常情况下太阳能电池每年衰退约0.1安



GOES-7卫星的太阳电池损伤

测控分系统故障

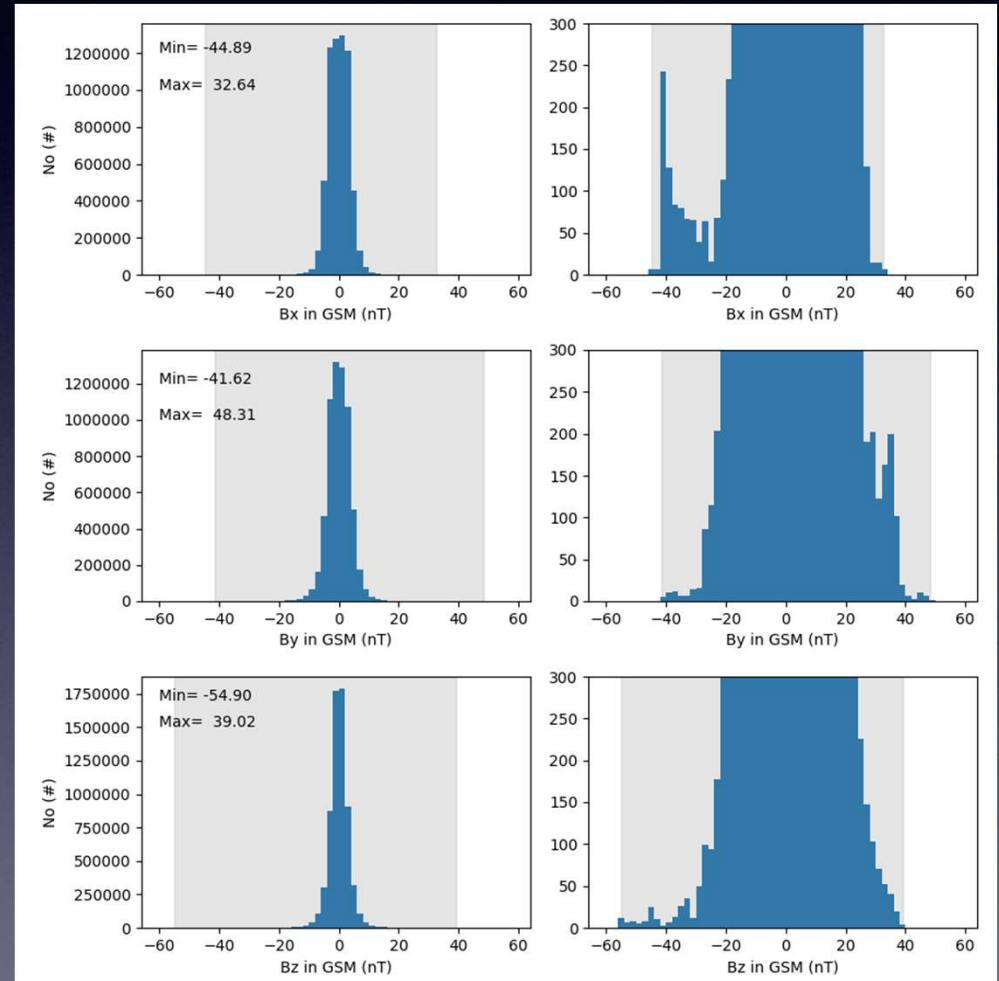
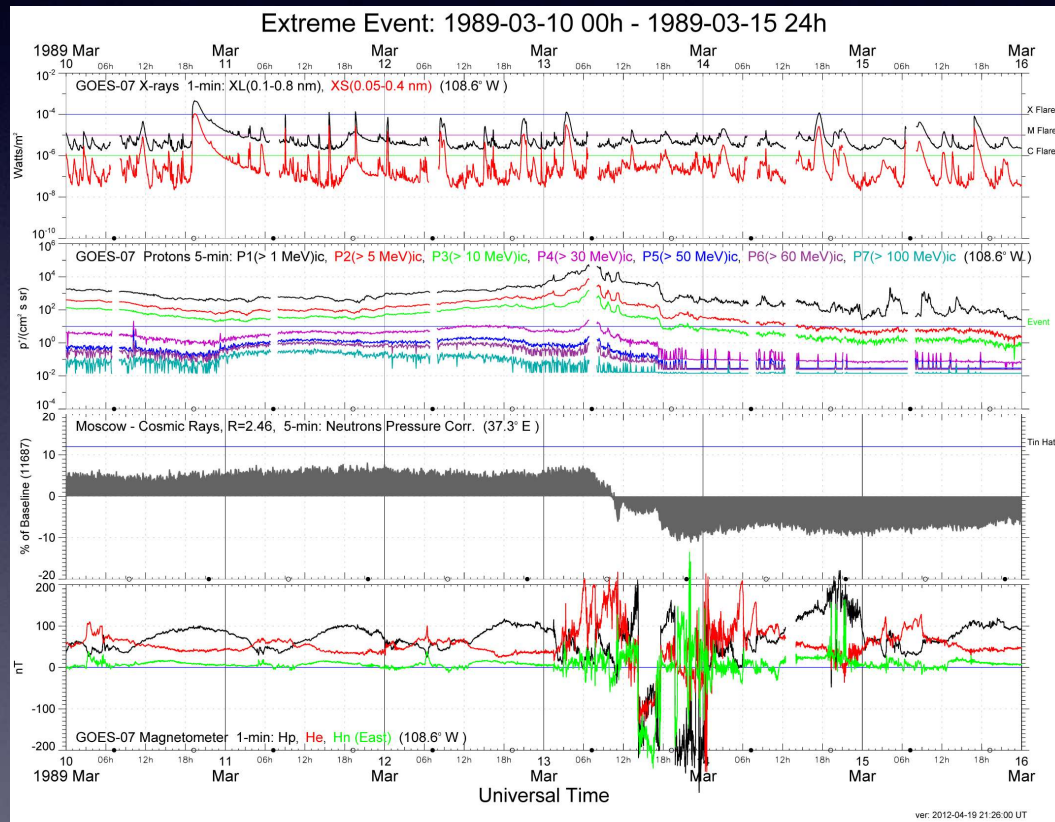
测控分系统的主要作用是保持地面和太空中分析的航天器之间的联系，是航天器上的仪器设备按照地面的命令来执行各种任务。一旦测控分系统出现故障，航天器就变成了聋子和哑巴，丧失执行正常功能的能力。



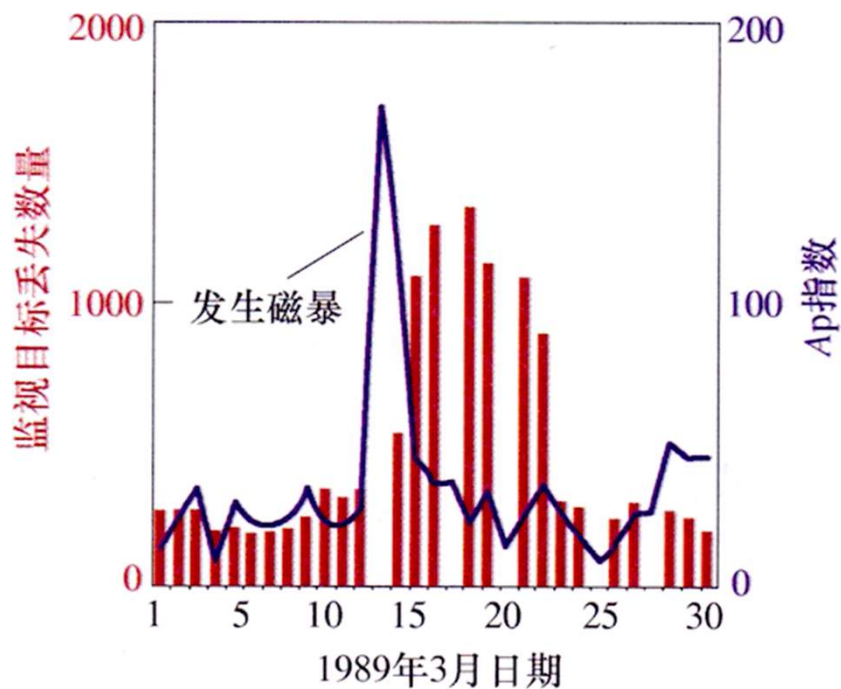
Telstar-401卫星：美国

- ▶ 1993年11月12日发射
- ▶ 1997年1月11日卫星失效
- ▶ 传输美国国家网节目，造成严重的商业后果
- ▶ 由1997年1月的一次大的日冕物质抛射产生的高能电子暴引起

常见的L1点的磁场强度分布对比



1989年3月6日-19日



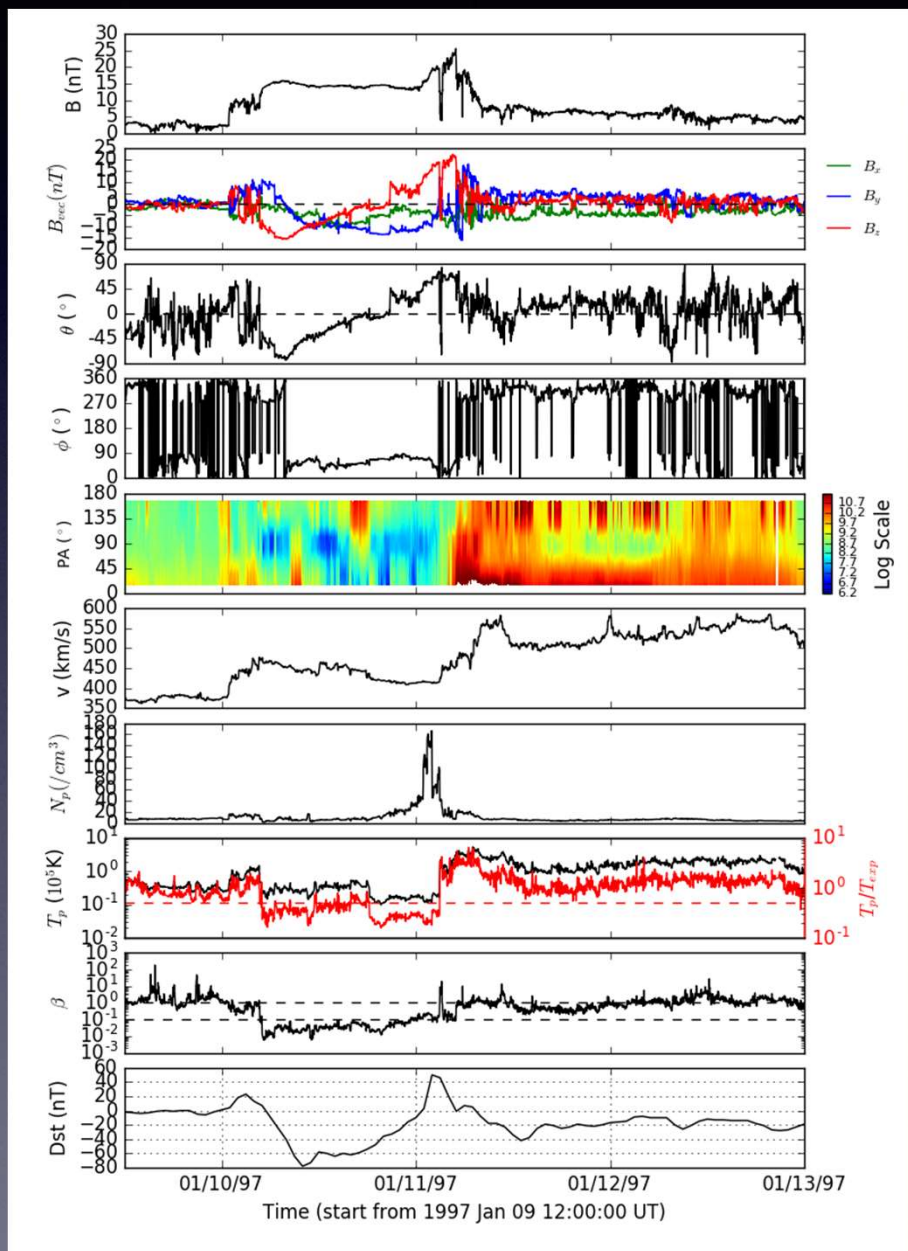
1989年3月地磁暴引发卫星轨道衰变加剧导致地面多个监测目标丢失

▲ 1989年太阳风暴事件导致的卫星故障统计表

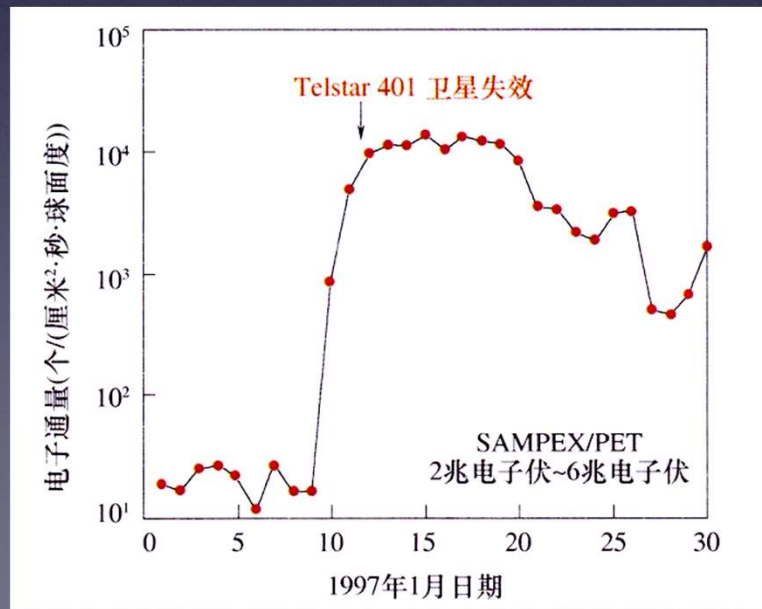
卫星名称	故障情况
GOES-7 (美国地球静止轨道业务环境卫星)	通信线路异常, 丢失气象图片
CS-3B (日本地球同步轨道卫星)	指令系统永久损伤, 启用备份系统
MARECS-1 (欧空局地球同步轨道卫星)	多次发生了“开关事件”
CMS-3B (日本地球同步轨道气象卫星)	世界时12点、14点, 遥测信号发生强烈扰动, 丢失1小时数据
TDRS-D (跟踪与数据中继卫星)	从“发现者”航天飞机上发射后, 在大椭圆轨道和在同步轨道运行的头几天内, 姿态控制遭遇了严重问题
DMSP/NOAA (美国极轨气象卫星)	因地球磁场发生了显著变化, 使力矩卸载发生困难
TIROS (美国极轨气象卫星)	强磁暴时, 姿控飞轮转速达到设计极限值, 紧急启用备用系统才把姿态控制住, 如果强暴再持续24小时, 姿态将失去控制
“东方红”平台通信卫星 (中国实用通信卫星)	A、B、C、D四路转发器增益挡同时跳挡, 由原-4分贝挡跳回-2分贝挡, 增益挡遥测值全为“0”
SMM (美国太阳峰年卫星)	轨道高度下降了4.83千米

1989年3月停电事件

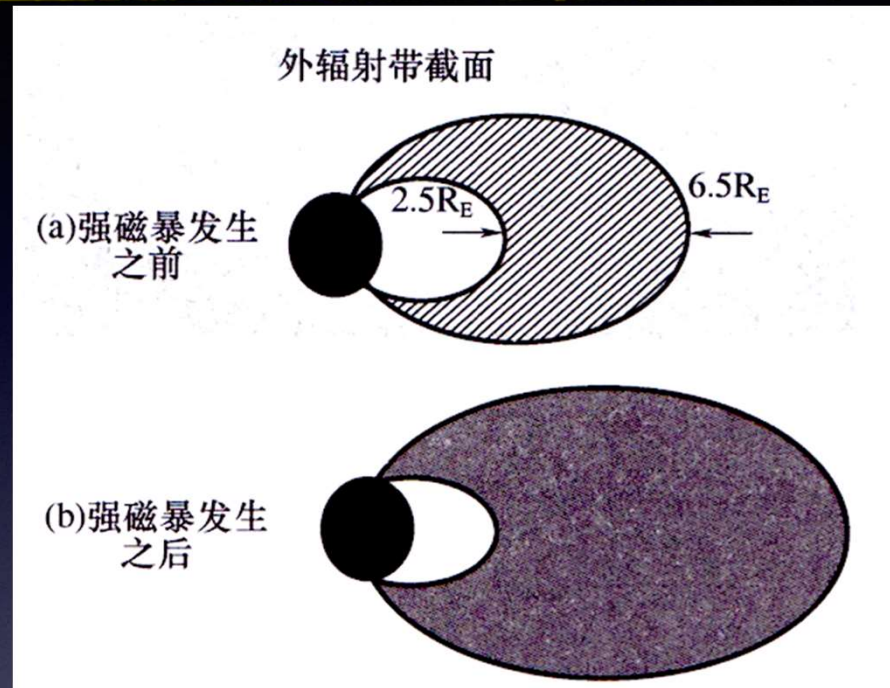
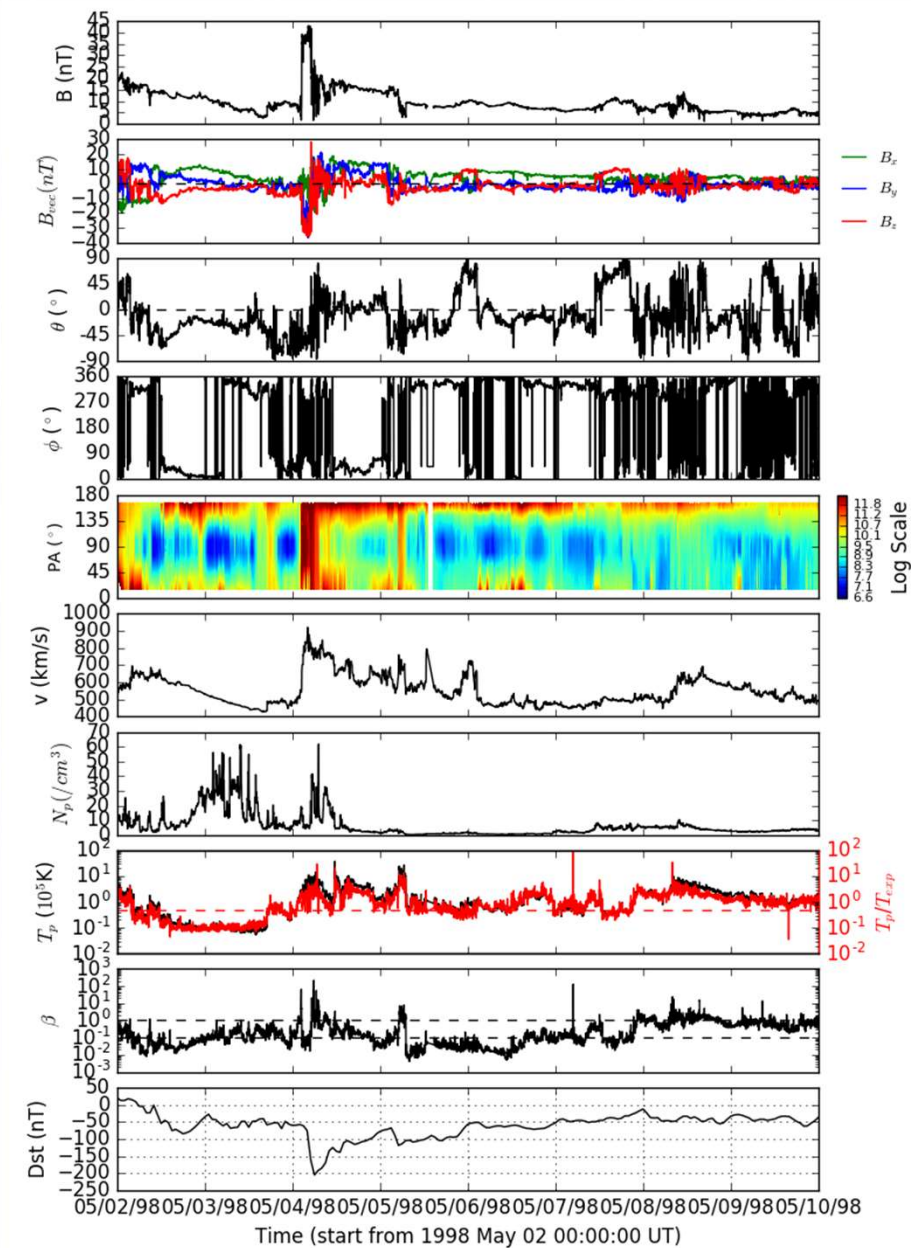
1997年1月地磁暴



- ▶ 1月6日CME爆发
- ▶ 1月10日到达地球
- ▶ 1月11日 AT&T公司一颗价值2亿美元 (Telstar 401), 设计寿命为12年的同步轨道通信卫星失效, 实际服役3年, AT&T损失了7.12亿

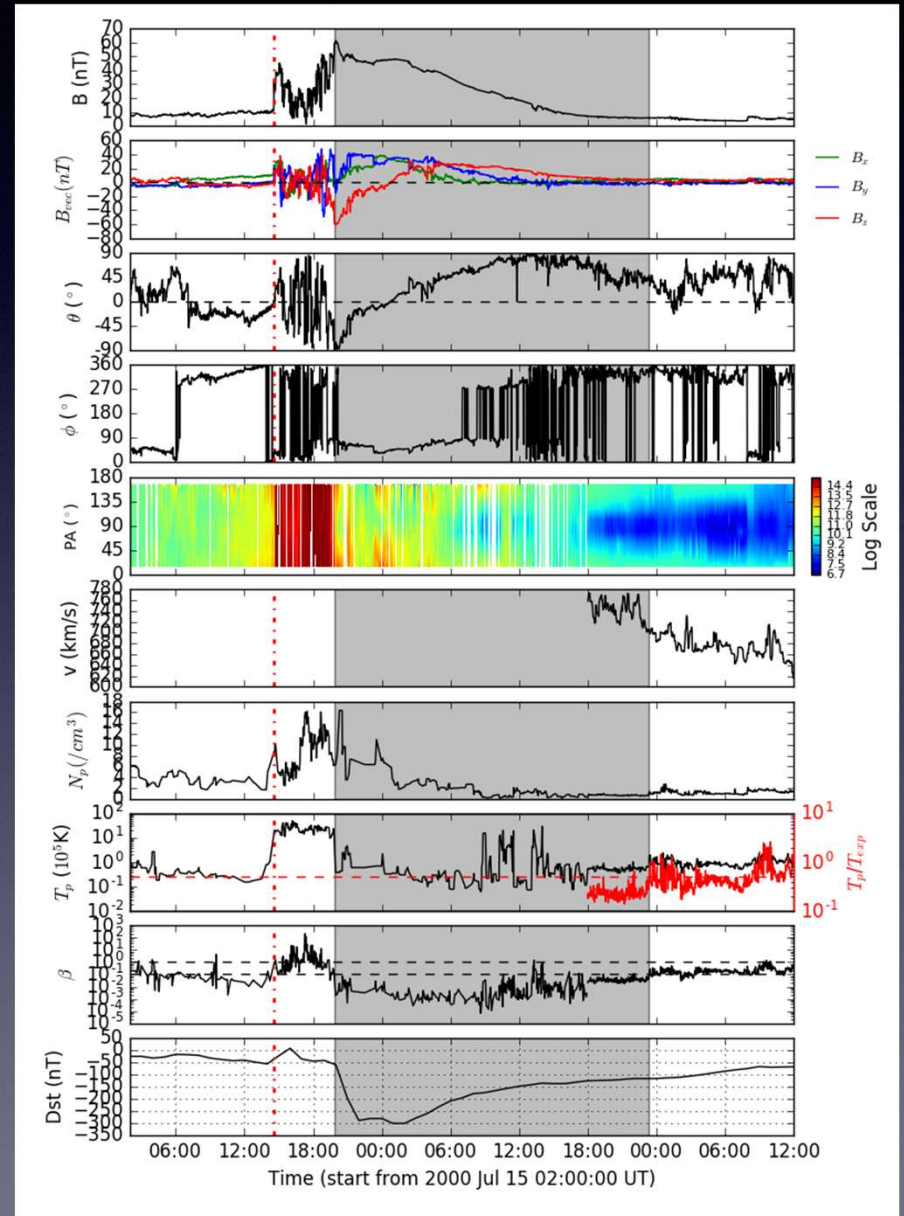
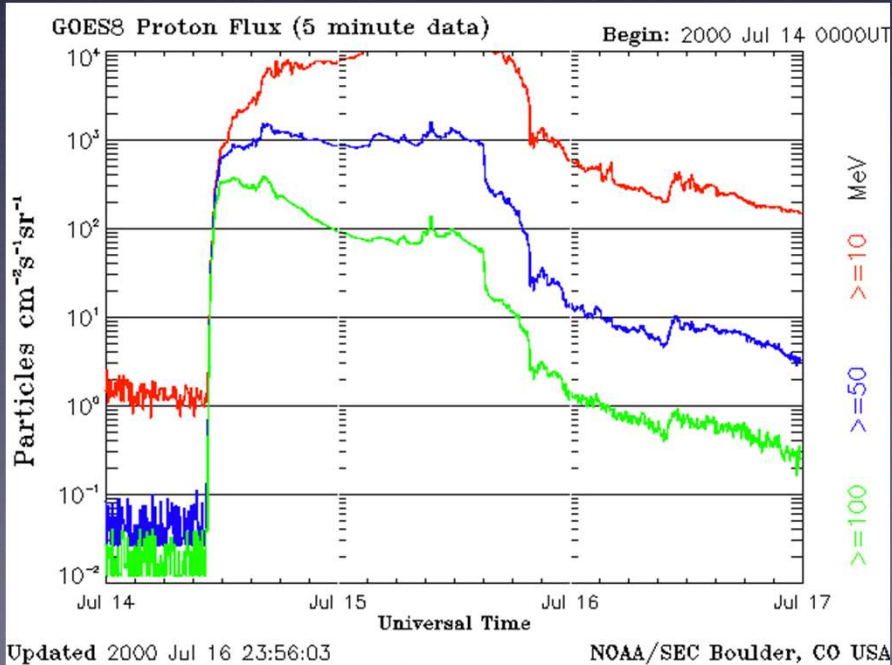
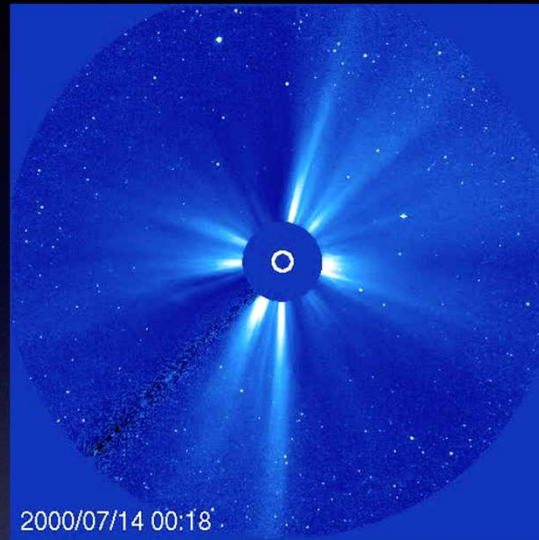
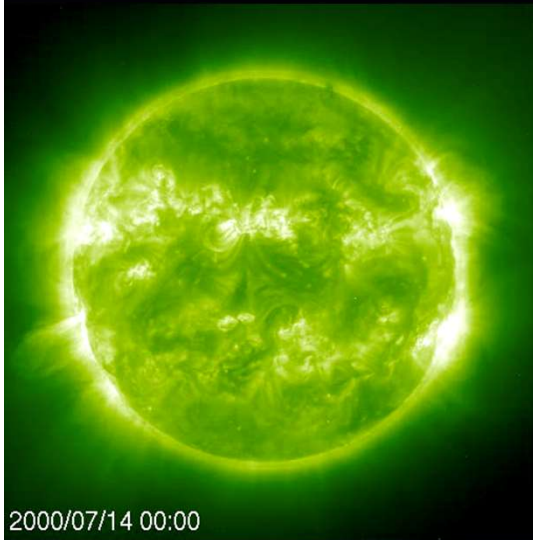


1998年5月高能电子暴事件



- ▶ 5月1日：Equator-S卫星中央处理器失效
- ▶ 5月6日：Polar卫星3小时数据损失
- ▶ 5月19日：“银河”IV号失效，造成美国80%的寻呼业务损失，造成大量的通讯中断、金融交易陷入混乱

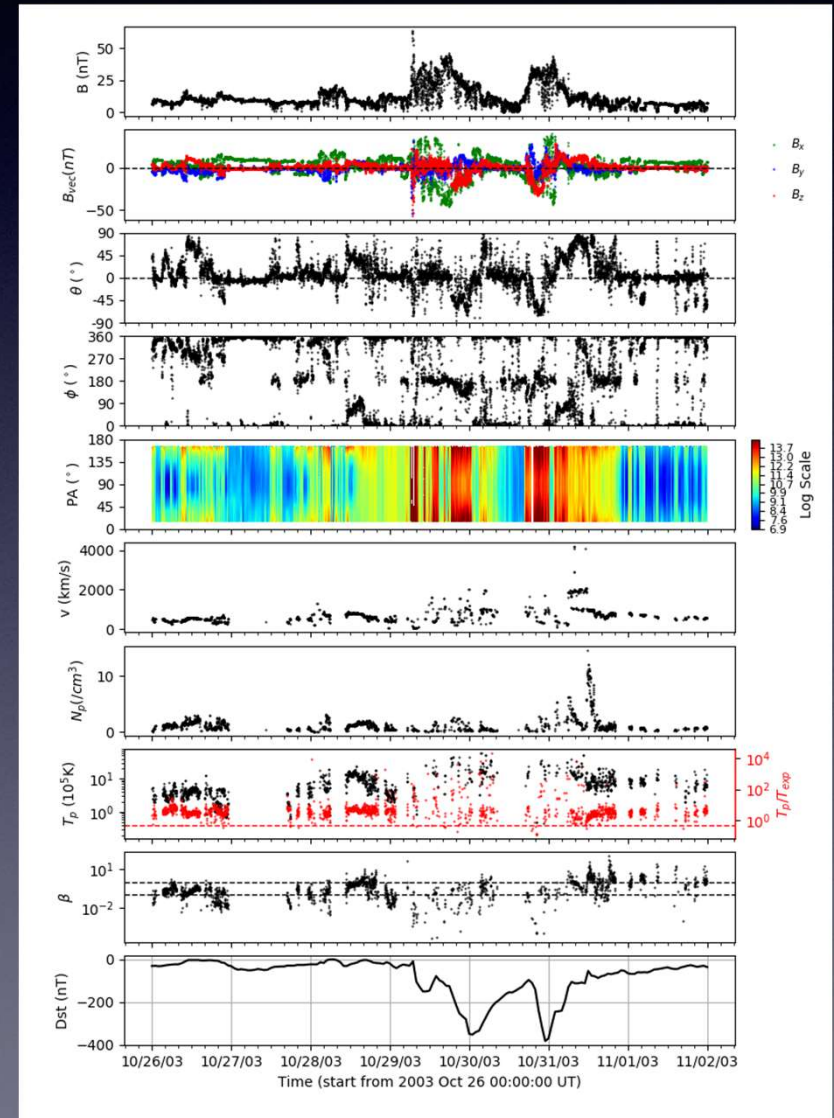
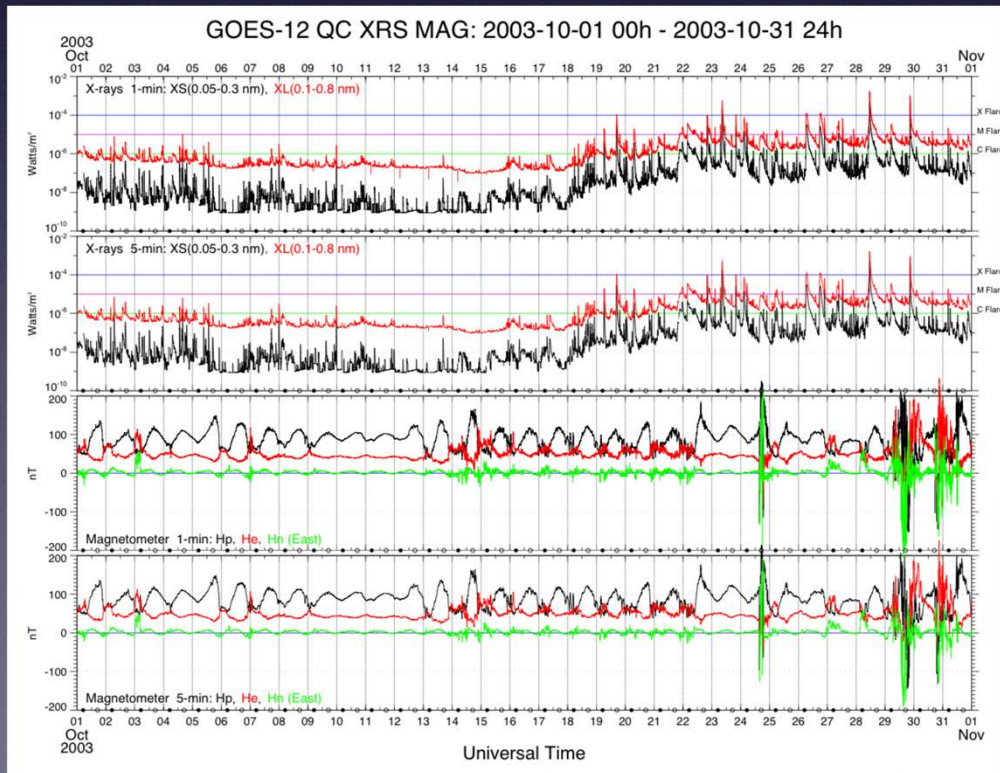
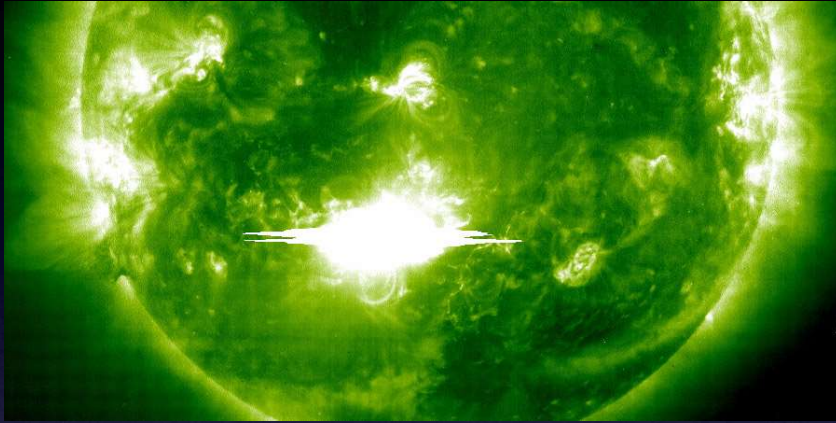
2000年7月“巴士底”强磁暴事件



▲ 2000年7月10日—15日“巴士底”事件引发的卫星异常

卫星名称	故障情况
ASCA (日本X射线天文卫星)	失去对姿态控制, 导致太阳电池阵指向异常, 发电量下降, 卫星失效
GOES-8卫星和GOES-10卫星 (美国地球静止轨道业务环境卫星)	卫星高能电子探测器故障, 丢失两天数据
Wind (美国空间科学卫星)	数传功率损失25%
ACE (美国先进成分探测器)	SWE等传感器发生故障, 后恢复
SOHO (欧洲/美国联合太阳和日球层观测台)	太阳能电池阵输出功率下降(相当于平时一年的退化), 部分载荷关机
SOHO卫星、YOHKOH日本太阳望远镜、TRACE美国转换区和日冕探测器	观测太阳卫星的成像仪受到质子污染
GEO通信卫星	多颗通信卫星出现指向控制问题
AKEBONO (日本科学卫星)	控制系统失灵
ISS (国际空间站)	轨道下降了15千米

2003年10月“万圣节”强磁暴事件



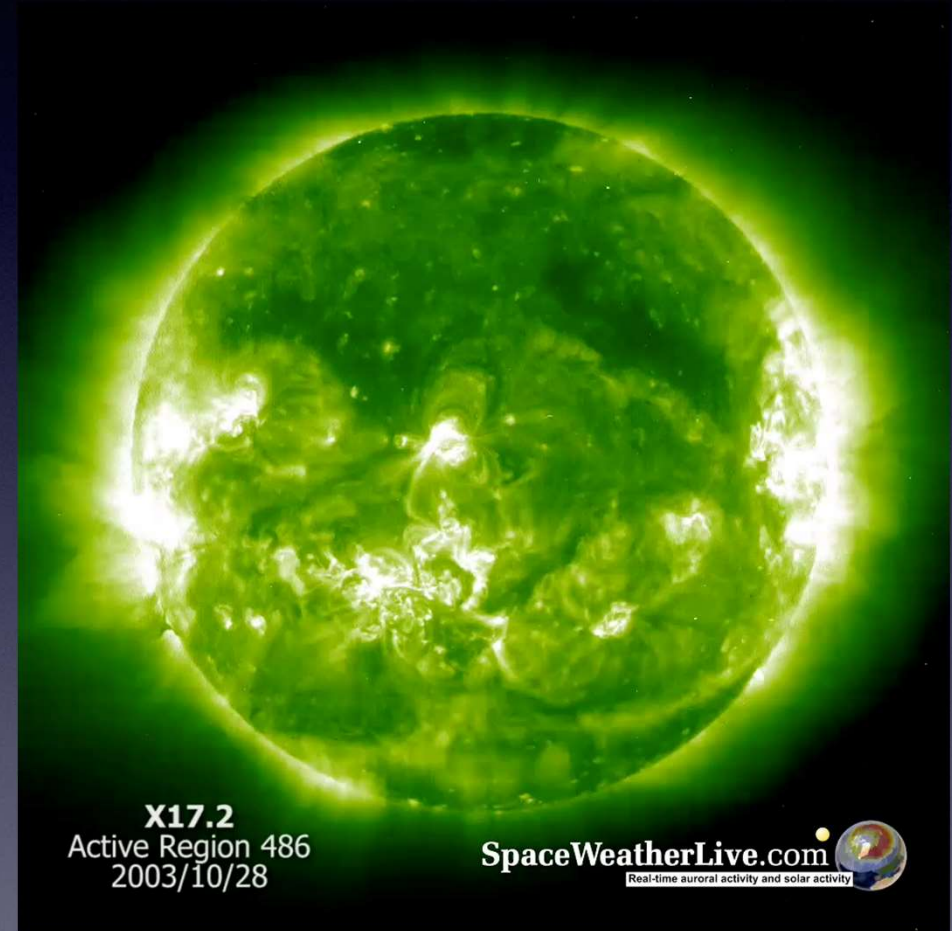
2003年10月“万圣节”强磁暴事件

Top 50 solar flares

On this page you will find an overview of the strongest solar flares since June 1996 together with links to more information in our archive and a video (if available) of the event. This page is updated daily.

Solar Cycle ▼ year ▼

			Region	Start	Maximum	End		
1	X28.0	2003/11/04	0486	19:29	19:53	20:06	Movie	View archive
2	X20.0	2001/04/02	9393	21:32	21:51	22:03	Movie	View archive
3	X17.2	2003/10/28	0486	09:51	11:10	11:24	Movie	View archive
4	X17.0	2005/09/07	0808	17:17	17:40	18:03	Movie	View archive
5	X14.4	2001/04/15	9415	13:19	13:50	13:55	Movie	View archive
6	X10.0	2003/10/29	0486	20:37	20:49	21:01	Movie	View archive
7	X9.4	1997/11/06	8100	11:49	11:55	12:01	Movie	View archive
8	X9.3	2017/09/06	2673	11:53	12:02	12:10		View archive
9	X9.0	2006/12/05	0930	10:18	10:35	10:45	Movie	View archive
10	X8.3	2003/11/02	0486	17:03	17:25	17:39	Movie	View archive
11	X8.2	2017/09/10	-	15:35	16:06	16:31		View archive
12	X7.1	2005/01/20	0720	06:36	07:01	07:26	Movie	View archive
13	X6.9	2011/08/09	1283	07:48	08:05	08:08	Movie	View archive
14	X6.5	2006/12/06	0930	18:29	18:47	19:00	Movie	View archive
15	X6.2	2005/09/09	0808	19:13	20:04	20:36	Movie	View archive



2003年11月“万圣节”强磁暴事件

- ▶ Odyssey火星探测器自动切换到安全模式
- ▶ SMART-1卫星在月球转移轨道上遭受较高的辐射剂量导致HAD系统自动关机，微波各项异性探测器星跟踪探测器重启
- ▶ 火星快车需要利用陀螺进行稳定
- ▶ 日本航空局的ADEOS-2卫星与地面控制中心失去了联系
- ▶ ACE卫星的低能磁谱仪损坏，不可修复
- ▶ GOES-9和GOES-10卫星发生高比特错误率
- ▶ GOES-12卫星磁力矩器失效

Godard飞行中心：59%的地球空间科学任务飞行器受到影响



4、航天器的太阳风暴防护

电离总剂量效应的防护设计

电离总剂量效应防护设计：目标是确保航天器在轨期间不因电离总剂量效应而造成在轨故障或失效，提高航天器对轨道空间环境的适应能力和生存能力。

- ★ **元器件及材料的选取**

- ★ **质量屏蔽**

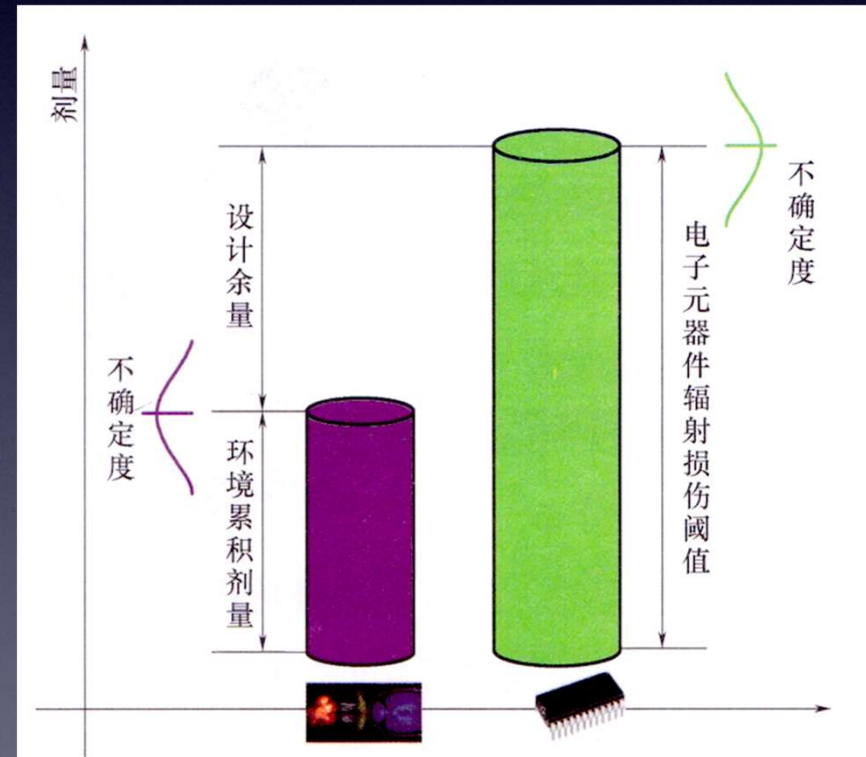
- ★ **辐射设计余量**

- ★ **总体优化布局 and 热冷备份等防护设计**

辐射设计余量设置

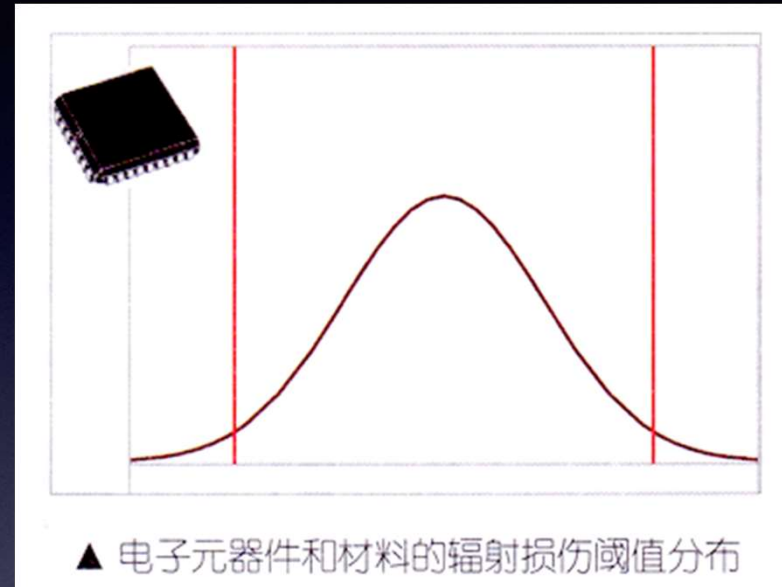
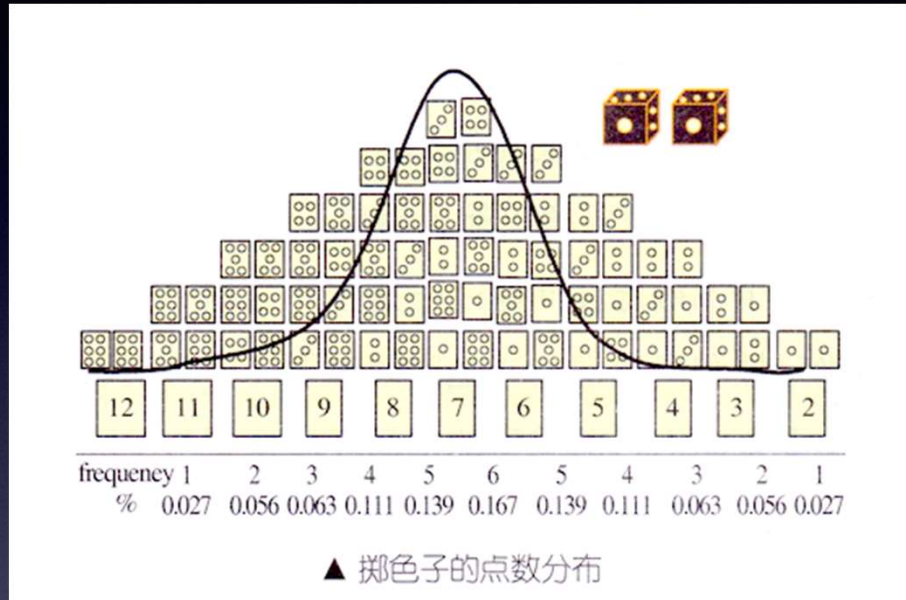
辐射设计余量：电子元器件和材料的辐射损伤阈值与元器件和材料空间位置处累积计量的比值，是判断能否承受在轨辐射剂量的重要参数

- ★ 生产过程中引入的元器件或材料辐射敏感度的不确定性和离散性
- ★ 空间辐射环境的不确定性，主要来源于空间环境模型与实际空间辐射环境之间的差异



电子元器件和材料辐射设计余量

元器件和材料选取



- ▶ 尽可能选取电离辐射能力较强的期间和材料
- ▶ 考虑生产工艺过程质量控制、工艺稳定性和一致性等

