

# Radiation Hardening

## Study of a special case: Ariane 5

---

By Thierry CARRIERE      EADS ST

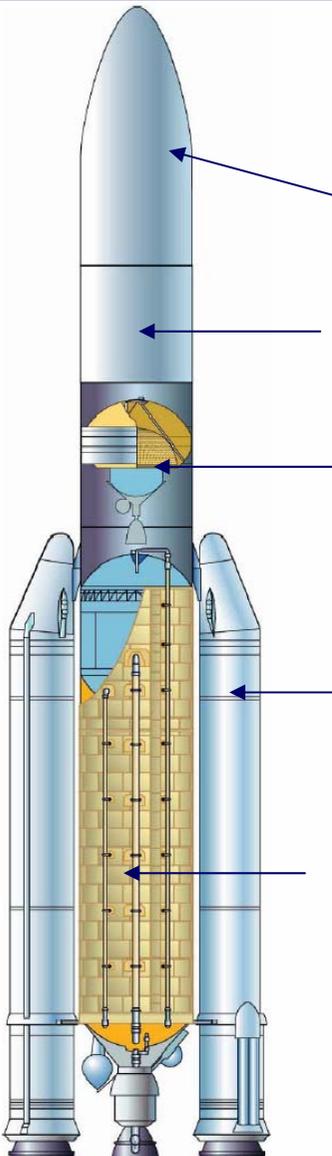


# Sommario

- Presentazione di A5 e degli obiettivi di affidabilità
- Ambienti di radiazione sulle traiettorie di A5
- Analisi delle radiazioni a livello dei componenti, delle apparecchiature e del sistema
- Le tecniche per aumentare la resistenza al danno delle radiazioni.
- Conclusione

# Descrizione di Ariane 5

**ARIANE 5 EN CHIFFRES**



**Coiffe (Oerlikon Contraves)**  
 Hauteur : 12,7 à 17 m –  
 Masse : de 2.027 à 2.800 kg  
 Diamètre utile : 4,9 m  
 Séparation : à environ 200 s et 110 km pour les missions GTO

**SPELTRA (EADS-ST)**  
 Hauteur : de 5,5 à 7 m  
 Adaptateur : + 1.340 m  
 Masse : de 704 à 820 kg

**Case à équipements (EADS-ST)**  
 Hauteur : 1,56 m  
 Diamètre : 5,4 m  
 Masse : 1,5 tonne

**ESC-A (EADS-ST)**  
 Hauteur : 7,446 m  
 Diamètre : 5,458 m  
 Masse sèche : 3,3 tonnes  
 Propergols : 12 tonnes de LOX; 2,6 tonnes de LH2  
 Moteur (SNECMA): **HM-7B**  
 Poussée : 65 kN  
 Durée de combustion : 970 s

**EAP (EADS-ST)**  
 Hauteur : 31,9 m  
 Diamètre : 3 m  
 Masse sèche : 38,4 tonnes chacun  
 Propergols : 240 tonnes chacun  
 (perchlorate d'ammonium + polybutadiène + aluminium)  
 Structure : Acier, trois segments  
 Moteur (**EUROPULSION**): MPS avec tuyère flexible  
 Poussée au décollage : 6800 kN (chacun)  
 Durée de combustion : 141 s  
 Altitude séparation : entre 55 & 70 km

**EPC (EADS-ST)**  
 Hauteur : 30,5 m  
 Diamètre : 5,458 m  
 Masse sèche : 14 tonnes  
 Propulseur : 148,77 tonnes de LOX; 24,67 tonnes LH2

Structure RIE (**Cryospace**): Aluminium 2219  
 Moteur (**SNECMA**): Vulcain MK2  
 Poussée : 1350 kN  
 Durée combustion : environ 530 s

**Description générale :**  
 - Hauteur totale : de 45 à 55,9 m  
 - Diamètre maximal : 12,2 m  
 - Masse au décollage : 710 tonnes  
 - Poussée au décollage : 10.600 kN



La maggior parte delle apparecchiature sensibili alle radiazioni è alloggiata nello stadio destinato alle apparecchiature

## La specificità di A5 (/ satellite)

- Comparato a un progetto di satellite, Ariane 5 ha un quadro molto specifico
  - Solamente SEE (nessuna total dose)
  - Nessun telecomando (eccetto la distruzione del lanciatore)
  - I flussi di particelle sono meno intensi sulle traiettorie dei lanciatori che sulle orbite dei satelliti
  - 1 SEP può condurre alla perdita della missione
  - Necessità di ridurre il costo di lanciatori ricorrenti
- Un tale quadro conduce ad un metodo molto specifico per gestire il problema delle radiazioni

# Ariane 5: Apparecchiature Principali del SEL

- SSTM (Sotto Sistema di telemisurazione)
  - UCTM (Unità Centrale di acquisizione delle telemisurazioni)
  - UCAT (Unità di Condizionamento e d'Acquisizione delle Telemisurazioni)
  - Sensori
- SSPE (Sotto Sistema di Potenza Elettrica)
  - BDP (Scatola di Distribuzione della Potenza)
  - Pila
  - Batteria
- SSSA (Sotto Sistema di Salvaguardia)
  - BCS (Scatola di Comando di Salvaguardia)

# Ariane 5: Apparecchiature Principali del SEL

- SSCV (Sotto Sistema di Controllo di Volo)
  - OBC: Computer di bordo : Trattamento e Comunicazione dei dati
  - SRI : Sistema di Riferimento Inerziale (giroscopio+accelerometro)
  - UCAF: Unità di Condizionamento e di acquisizione Funzionale, Misura pressione, velocità e T°
  - ES: Elettronica Sequenziale (Elettrovalvole + pirotecnicia)
  - EPH (o EPSM): Elettronica di Pilotaggio per martinetto Idraulico (Servomotore):

# Ariane 5: L'obiettivo RAMS

- RAMS (Reliability, Availability, Maintainability, Safety)
  - Sicurezza
    - Aggressione di popolazioni ( $<10^{-7}$ ) (BCS $<10^{-5}$ )
    - Aggressione dell'equipe tecnica ( $<10^{-6}$ )
    - Distruzione del sito di lancio ( $<10^{-4}$ )
  - Affidabilità
    - Perdita della missione ( $< 3.5 \cdot 10^{-2}$ ) = > Affidabilità  $> 0.965$
    - $10^{-3}$  per lo stadio di alloggiamento delle apparecchiature
  - Il pericolo di radiazioni appare oltre i 300km e influisce principalmente sull'affidabilità del lanciatore. Le eruzioni solari possono però influire anche sulla disponibilità (necessità di postporre il volo)

## Obiettivo di Affidabilità

- Il livello dell'affidabilità per il sistema elettrico globale può essere declinato per ogni apparecchiatura a seconda della sua complessità, la sua ridondanza e l'impatto del guasto sul successo della missione
  - Esempi
    - EPSM:  $<8 \cdot 10^{-5}$  (senza ridondanza)
    - BDP:  $<10^{-3}$  (ridondanza)
    - BCS:  $<10^{-5}$  (aggressione di popolazione)
- Il rischio più alto di guasti della maggior parte delle apparecchiature proviene dall' ambiente di radiazione naturale

# Processo di analisi delle radiazioni

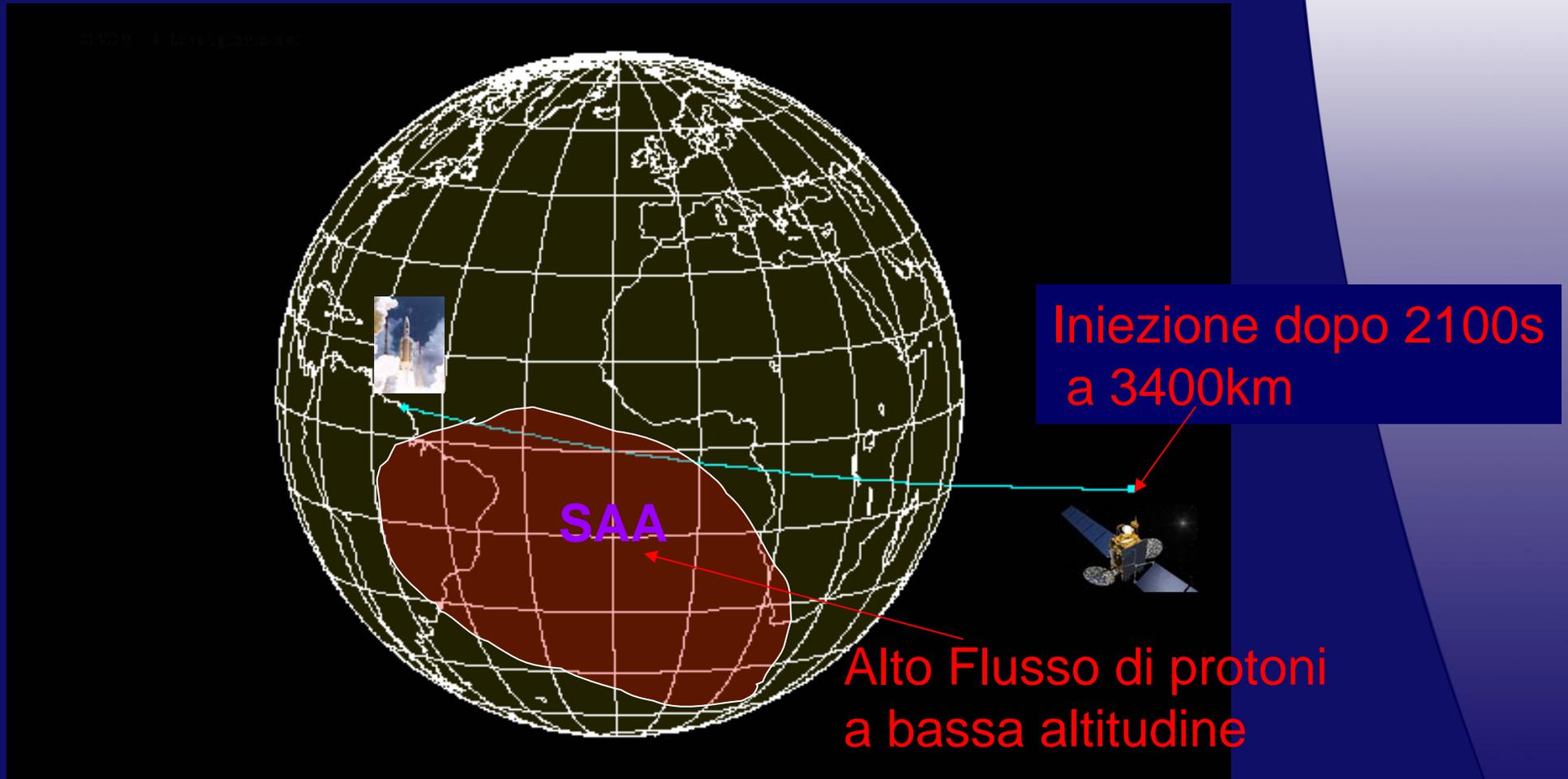
- 1/ Definizione dell'ambiente di radiazione e dei possibili effetti sui dispositivi elettronici: (specifica SG1X39)
- 2/ Determinazione della sensibilità dei componenti di ogni apparecchiatura
  - Stime delle sensibilità di ogni componente (database, l'analisi del “caso peggiore”, analisi di tecnologia, test)
  - Calcolo della probabilità di errori sulla traiettoria
- 3 / Analisi di affidabilità
  - Analisi dell'impatto di SEP sulla funzionalità di ogni apparecchiatura
  - Determinazione dell'affidabilità dell'intero sistema elettrico tenendo conto della ridondanza.
  - Determinazione dei componenti critici
  - Analisi più precisa su componenti critici (dati e fase della traiettoria)
- 4 / Hardening

## First step: Definizione dell'ambiente di radiazione

- L'ambiente di radiazione è direttamente correlato alla traiettoria del lanciatore
- La simulazione degli ambienti di radiazione sui lanciatori viene effettuata usando gli stessi software impiegati nel programma del satellite
  - CREME 98 per Galactic Cosmic Rays (GCR) ed eruzioni solari
  - Spacerad, Omere basati su AP8, AE8 per le fasce di radiazione
- Gli ambienti di radiazione più comuni sono descritti nella specifica di A5 relativa alle radiazioni. Riguarda le traiettorie GTO, SSO e GTO+

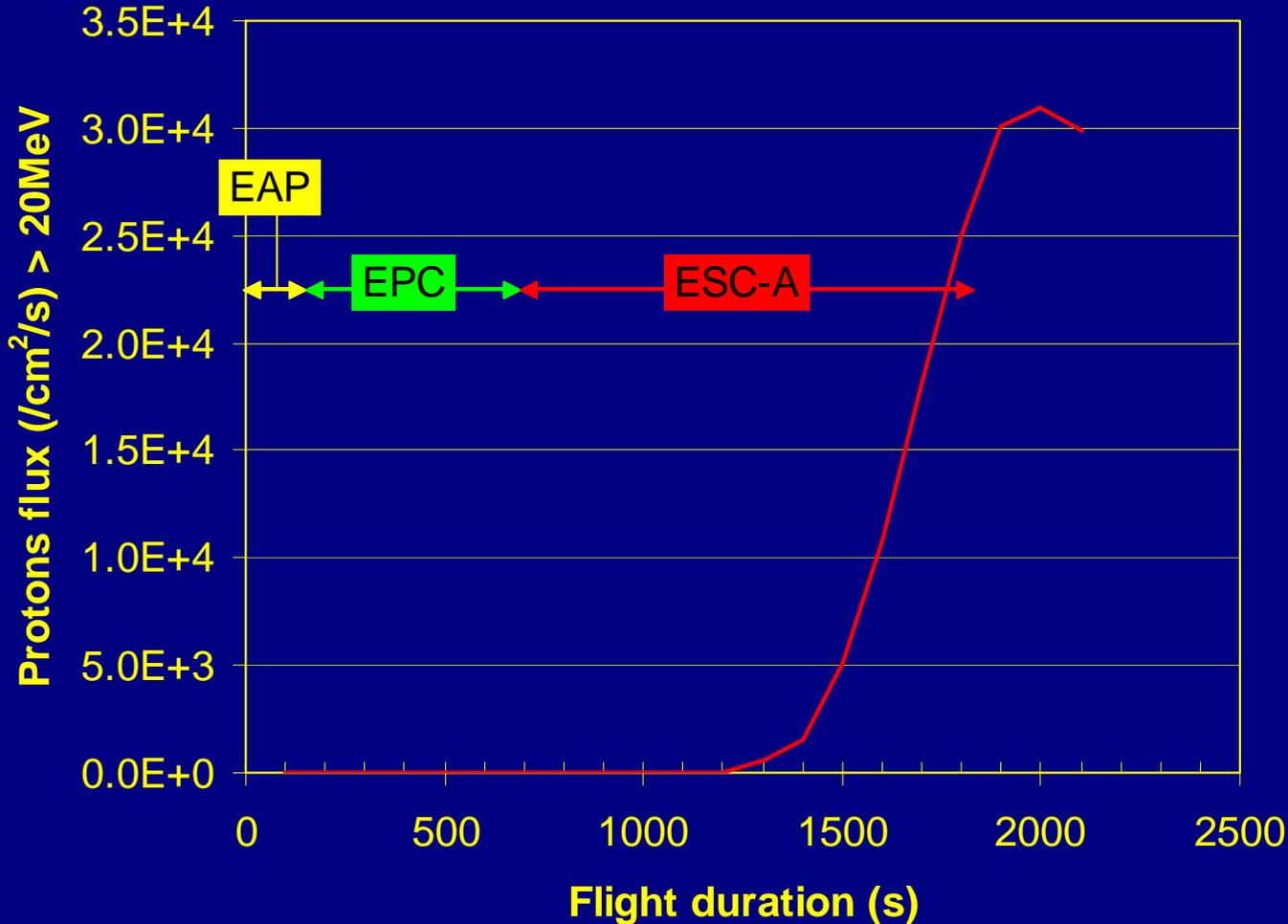
# GTO Analisi di traiettoria

- GTO (Orbita di Trasferimento Geostazionaria)



# GTO Ambiente di radiazione (protoni)

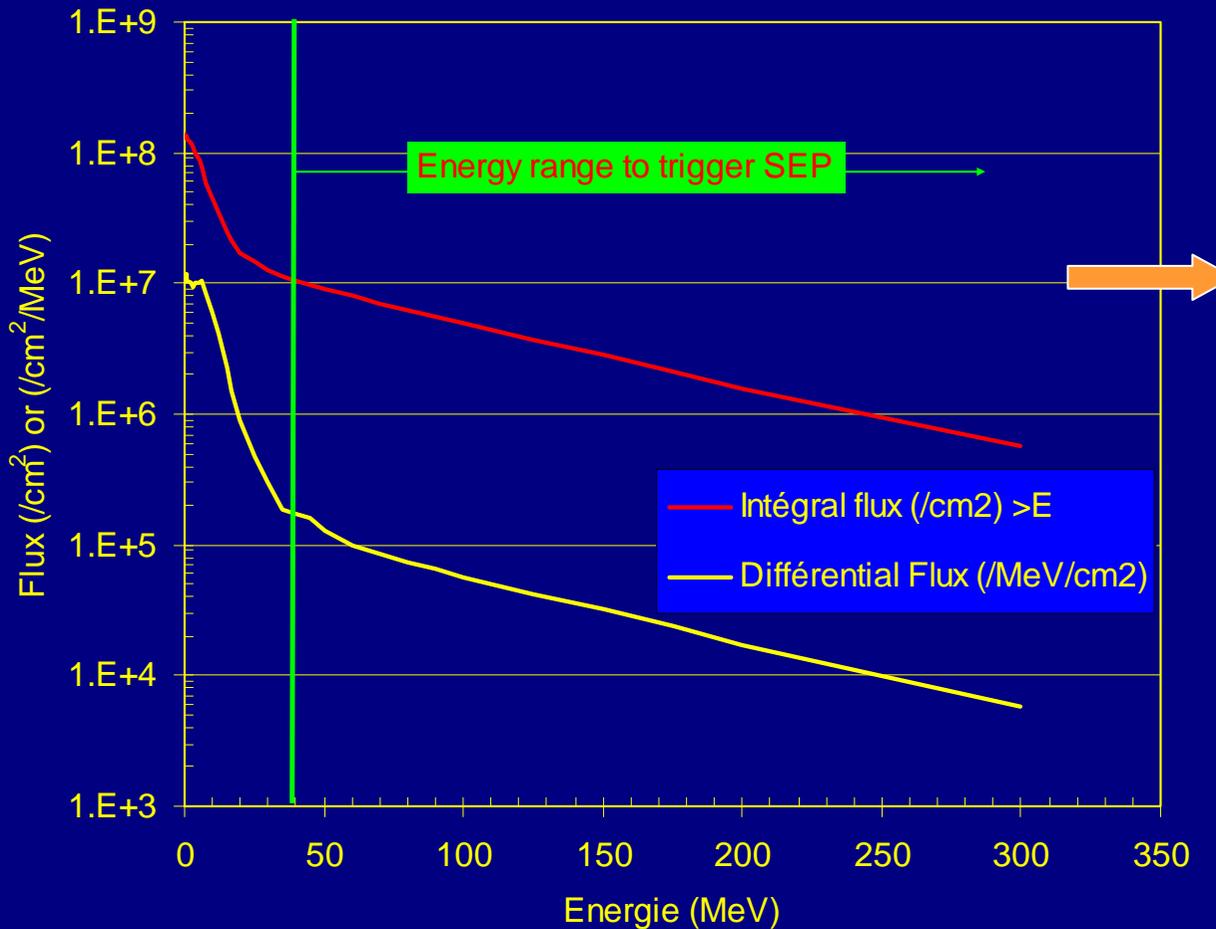
## GTO Mission



l'irraggiamento protonico si verifica principalmente durante la fase ESC A

# GTO Ambiente di radiazione (protoni)

Mission GTO std



10<sup>7</sup> protoni per cm<sup>2</sup>  
hanno abbastanza  
energia per  
provocare dei SEP  
sui componenti sensibili

# GTO Ambiente di radiazione (GCR)



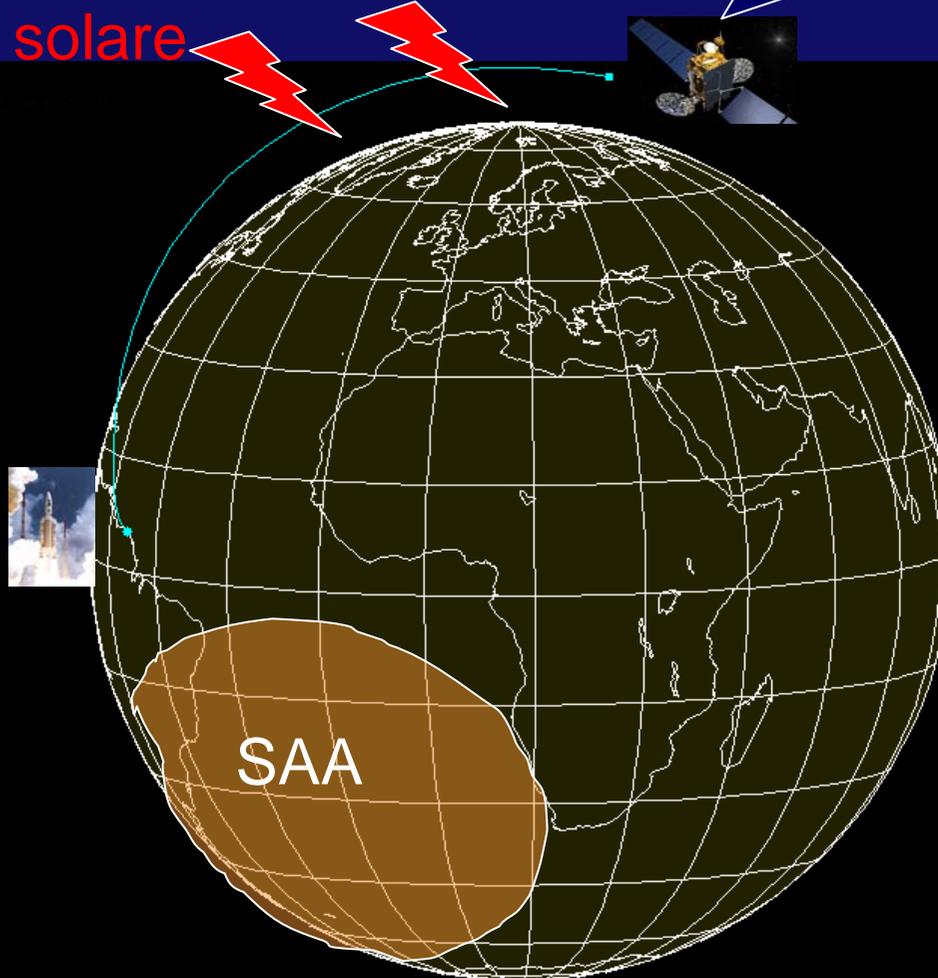
La traiettoria GTO è ben protetta dallo schermo geomagnetico

➔ basso flusso di GCR e di ioni pesanti da eruzione solare

# SSO Trajectory Analysis

GCR e eruzione  
solare

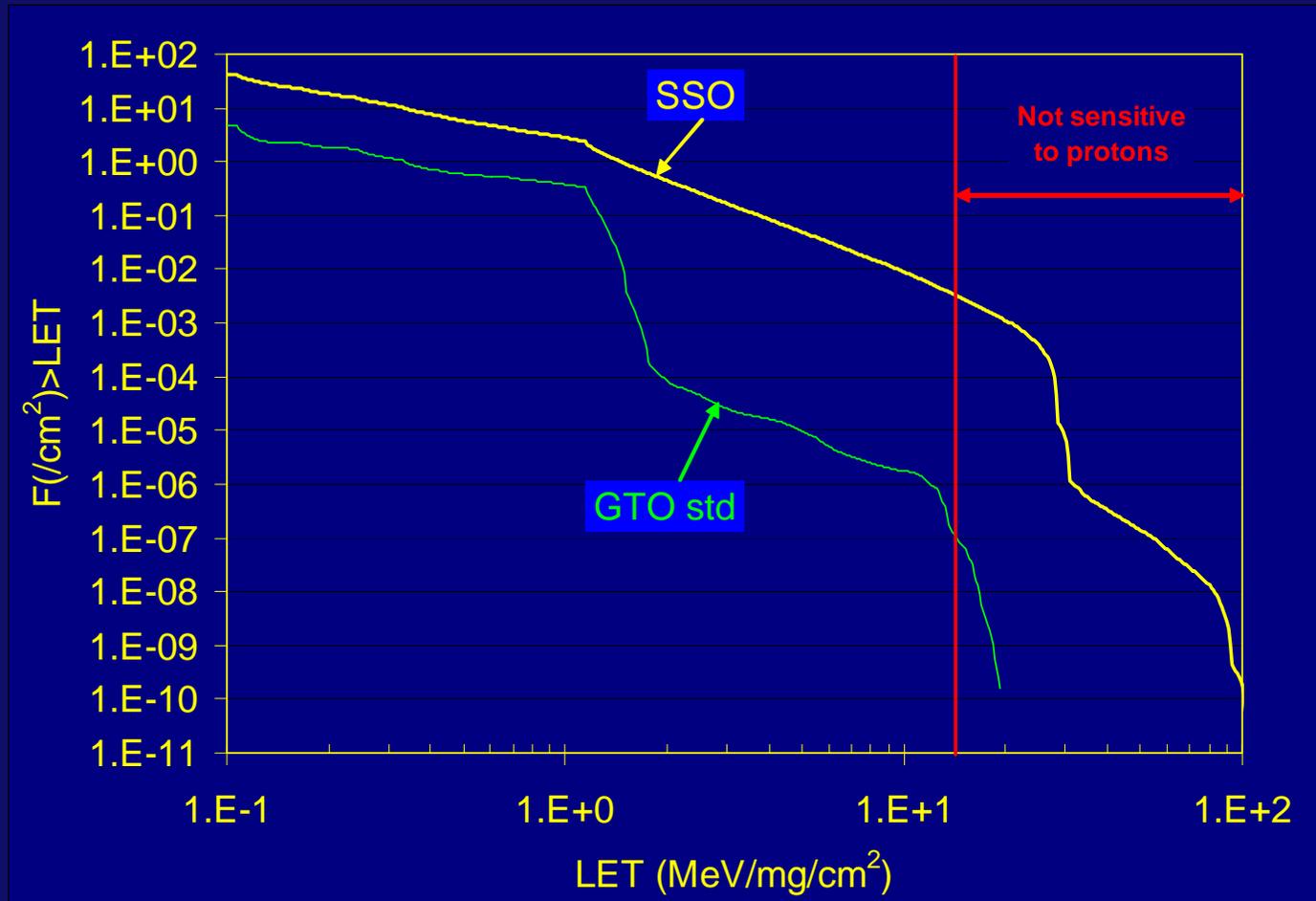
Iniezione dopo  
2000s a 800 km



Vicino al polo il  
lanciatore non è  
protetto dallo  
schermo geo-magnetico  
ed è esposto all'  
eruzione solare e al GCR

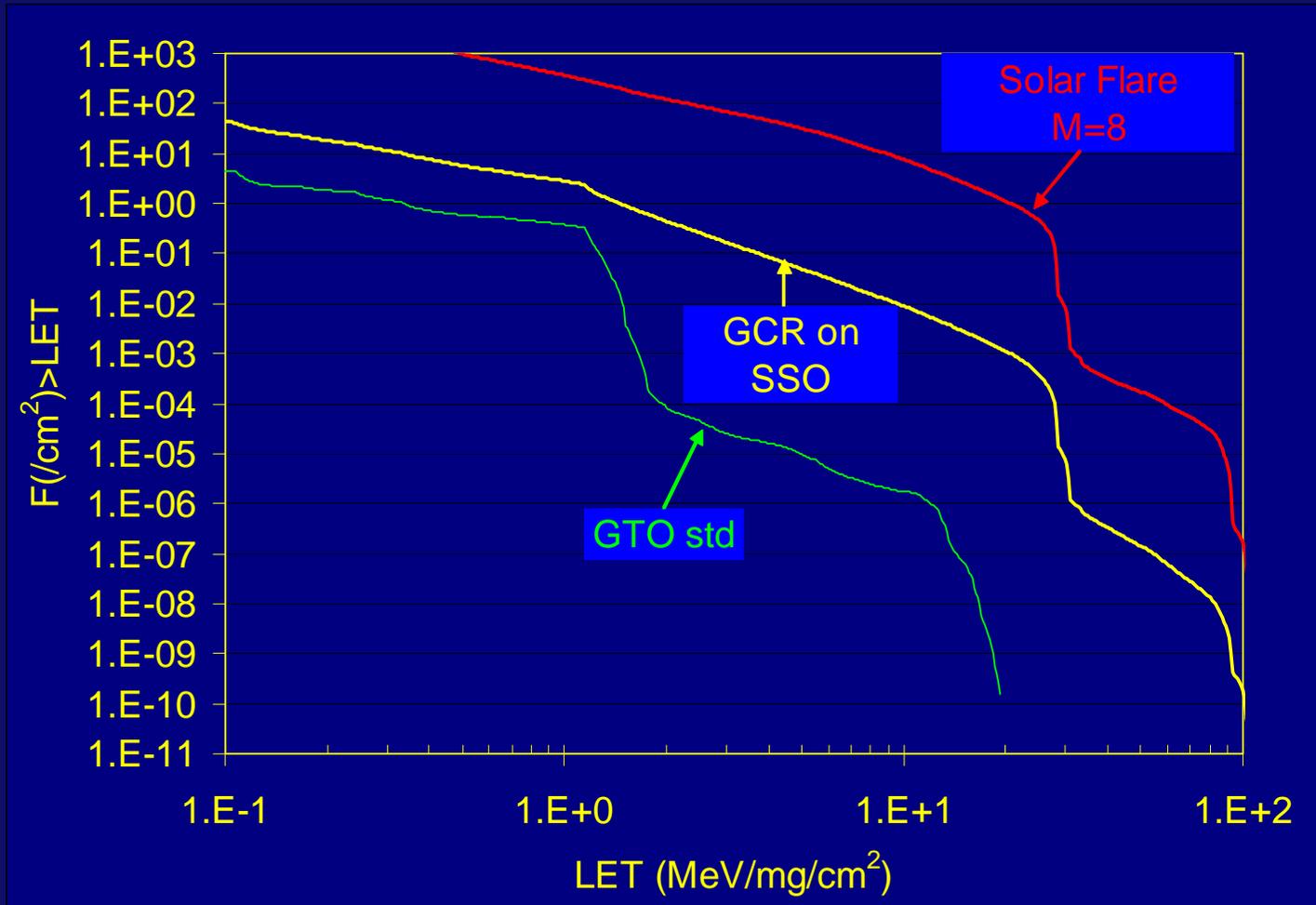
Il flusso di protoni  
intrappolati può essere  
ignorato sulla  
traiettoria SSO

# Ambiente di radiazione su SSO (GCR)



Il flusso GCR non può essere ignorato su una traiettoria SSO

# Ambiente di radiazione su SSO (Eruzione Solare)



ESA e EADS

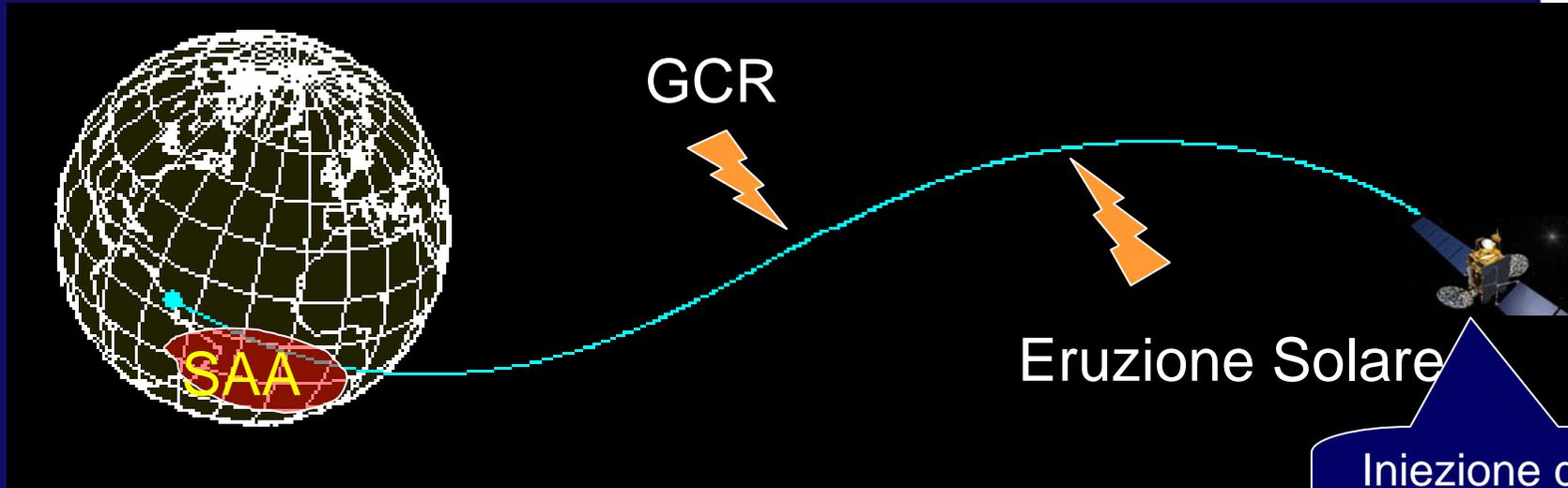


Nessun volo  
durante un'  
eruzione solare



Un'eruzione solare durante la traiettoria SSO può comportare un drastico aumento del flusso di ioni pesanti.

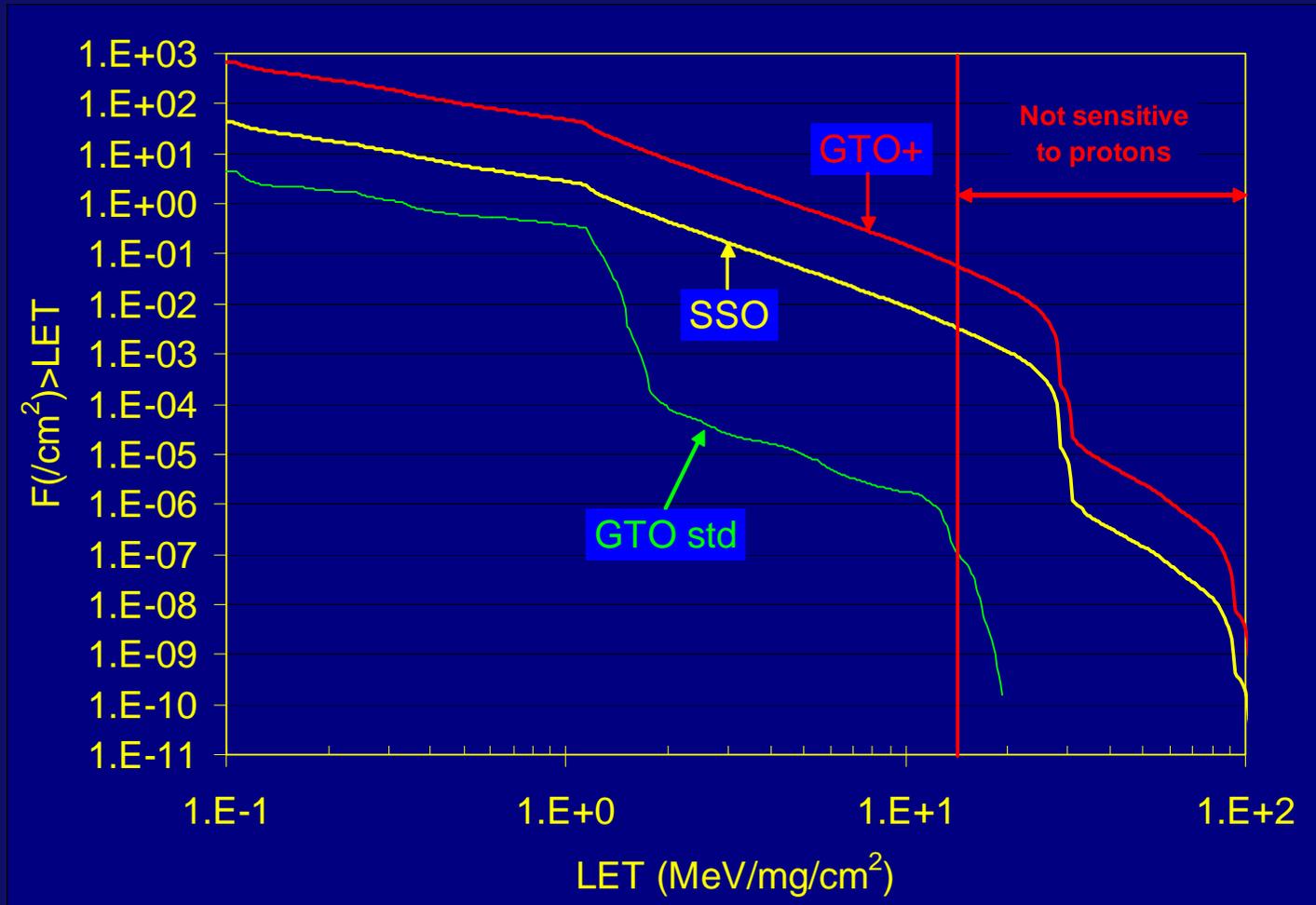
# Analisi della traiettoria GTO+



Missione “Worst case” a causa delle radiazioni con rischi cumulativi di :

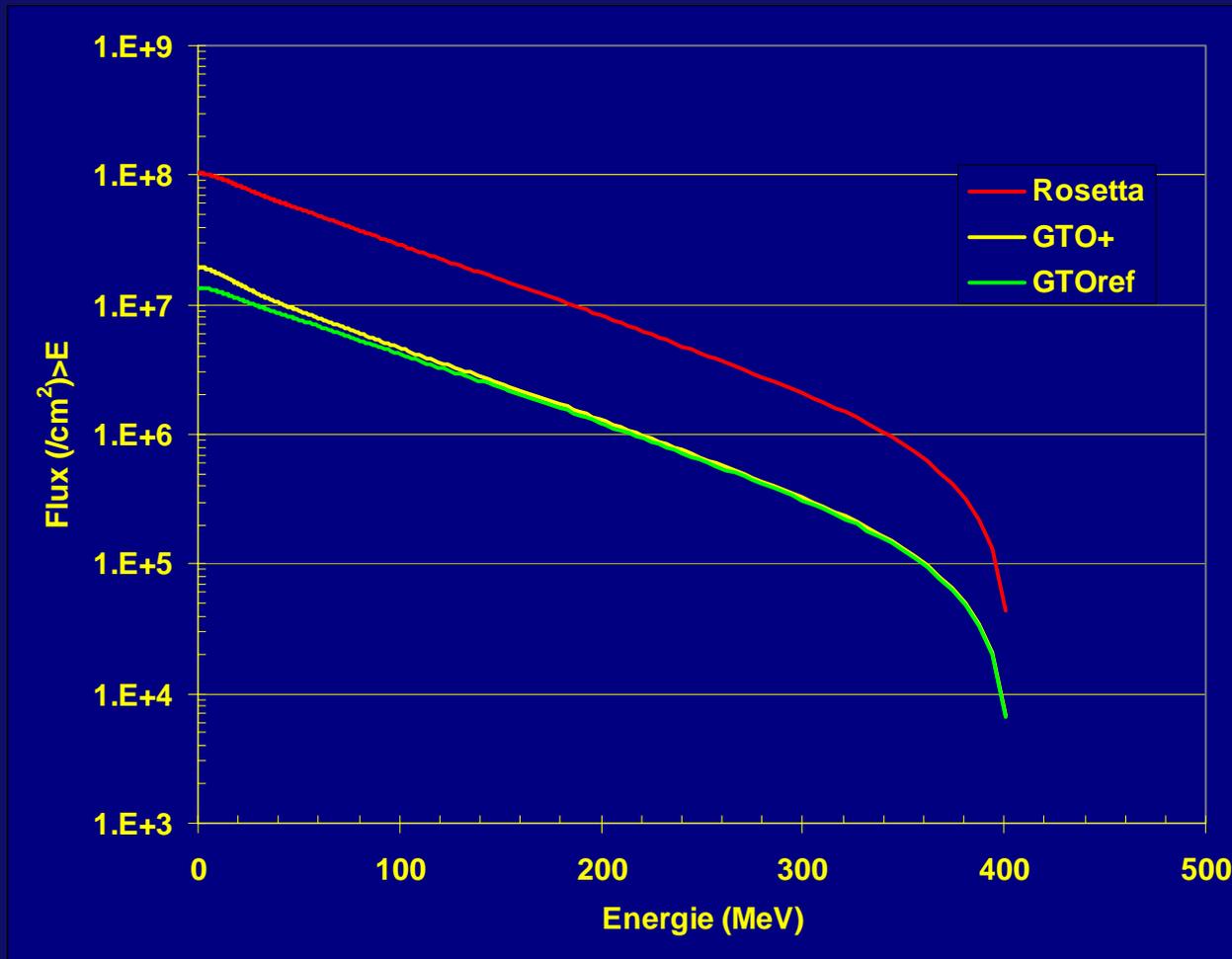
- Fascia protonica
- Raggi cosmici galattici(GCR)
- Eruzione solare

# Ambiente di radiazione di GTO+ (GCR)



Il flusso GCR è un problema grave su GTO+ (10 volte più alto che su SSO)

# GTO+ Ambiente di radiazione (Protoni Intrappolati)



Il flusso di protoni su GTO+ è paragonabile a quello su GTO  
Alcune missioni speciali possono portare ad un flusso di protoni più alto (Rosetta)

## Sintesi sull'ambiente di radiazione del lanciatore

- A causa della breve durata del lancio (<6h) paragonato alla vita del satellite (da 5 a 15 anni), l'effetto "total dose" (<10 rad) non riguarda il lanciatore.
- SEP è un problema grave per il lanciatore dal momento che un solo evento singolo può generare la perdita della missione (assenza di telecomando)
- L'ambiente di radiazione di un lanciatore deve essere definito per ogni singola specifica traiettoria:
  - Spettro di energia per i protoni intrappolati
  - Spettro di LET integrale per i GCR
- L'ESA e EADS hanno recentemente deciso di postporre il lancio in caso di eruzione solare

# Processo di analisi delle radiazioni

- 1 / Definizione dell'ambiente di radiazione ed i possibili effetti su apparecchiature elettroniche: (la specifica SG1X39)
- 2 / Determinazione della sensibilità dei componenti per apparecchiatura.
  - Stime delle sensibilità di ogni componente (database, l'analisi di caso peggiore, analisi di tecnologia, test)
  - Calcolo della probabilità degli errori sulla traiettoria
- 3 / Analisi di affidabilità
  - Analisi dell'impatto di SEP sulla funzionalità di ogni apparecchiatura
  - Determinazione dell'affidabilità del sistema elettrico completo che prenda in considerazione la ridondanza.
  - Determinazione dei componenti critici
  - Analisi più precisa su componenti critici (dati e fase di traiettoria)
- 4 / Hardening

## Principali tipi di SEP da considerare sul sistema elettrico di A5

- SEU (Single Event Upset): cambiamento dello stato di un registro indotto da uno ione pesante o da un protone
- MBU (Multiple Bit Upset): Una particella può indurre parecchi SEU. I correttori di errori (EDAC) non possono correggere i MBU.
- SEL (Single Event Latch up): Attivazione di un thyristor parassita delle strutture CMOS indotto da uno ione pesante o da un protone che porta ad un eccesso di consumo di corrente e alla distruzione del circuito.
- SEB (Single Event Burn out): Attivazione di un transistor bipolare parassita inerente a un transistor power mosfet che conduce alla distruzione del componente.
- SET (Single Event Transient): Perturbazione transitoria nell'output dei componenti lineari (di solito  $< 40$  ms)

# Analisi di radiazione a livello di componente (1)

- **Obiettivo:** definire la sensibilità ( $\sigma(\text{LET})$  e  $\sigma(E_p)$ ) di ogni componente che appartiene ad un'apparecchiatura (senza spendere troppi soldi per il test).
- **Origine principale dei dati di radiazione**
  - Database di JPL (accesso aperto)
  - Database di ESA: [escies.org](http://escies.org)
  - Database di CNES: Bianca (accesso limitato)
  - Multipartenariato (risultati di prova di azione industriali)
  - Fabbricante (limitato a quelli ancora interessati al piccolo mercato spaziale)
  - Pubblicazione (IEEE NSREC, Radecs)
- **Difficoltà**
  - Rapporto di test non disponibile
  - Molto spesso i risultati di test non sono completi (origine del componente?) o non validi (statistica insufficiente)

# Analisi di radiazione a livello di componente (analogia tecnologia)

- Principio: tentativo di generalizzare i risultati di test ottenuti su dei campioni alla tecnologia complessiva
- Esempi
  - a / la tecnologia bipolare non è sensibile a SEL
  - b / Power mosfet non sono sensibili a SEB finché  $V_{ds} < 50\%V_{ds\ max}$
  - c / HC/AC MOS non sono sensibile a SEL e poco sensibile a SEU
  - d / Tecnologia "Latch up free" garantito dal fabbricante
- Queste "leggi" così generali sono utili ma rischiose e hanno bisogno di essere regolarmente controllate dai test in acceleratore
  - a / a mia conoscenza è ancora valida
  - b / era vero fino alla terza generazione di power mosfet di IR
  - c / era vero ma un tipo della famiglia di HC è stato trovato sensibile a SEL
  - d / Generalmente vero ma con delle eccezioni (HM65609 da Atmel)

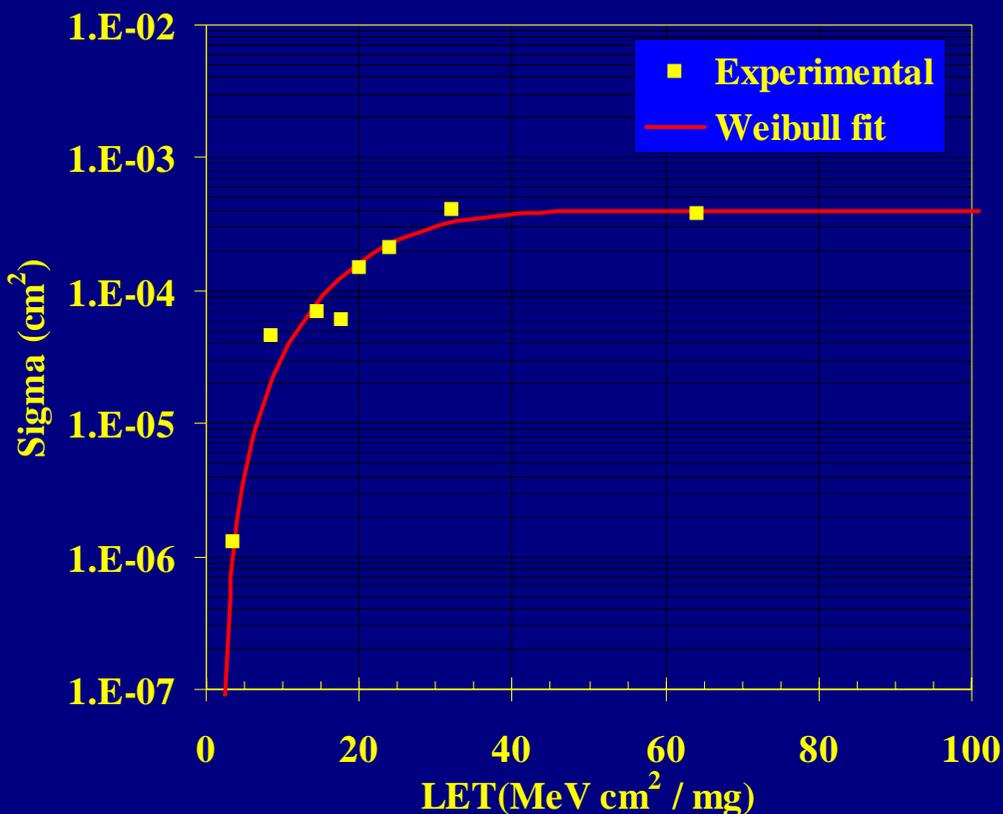
## Analisi di radiazione a livello di componente (Analisi del “caso peggiore”)

- Principio: quando la sensibilità di “caso peggiore” è accettabile, non è necessario eseguire dei test in acceleratore
- Esempi
  - La superficie intera di un componente è considerata sensibile a SEL o SEB con  $LET_{th} = 15 \text{ MeV cm}^2 / \text{mg}$ . Una tale condizione di caso peggiore è stata usata per definire la massima probabilità di SEB su traiettoria (flusso di ione pesante e basso) di GTO e ha condotto ad un livello di affidabilità accettabile per GTOstd (non per GTO+)
  - Transitorio della tecnologia bipolare lineare con una durata di caso peggiore di 40 us. Tale caso peggiore è usato (senza test) per analizzare l'impatto di SET sulla funzionalità di ogni apparecchiatura.
- Nondimeno è necessario controllare su una nuova tecnologia che il caso peggiore sia ancora applicabile

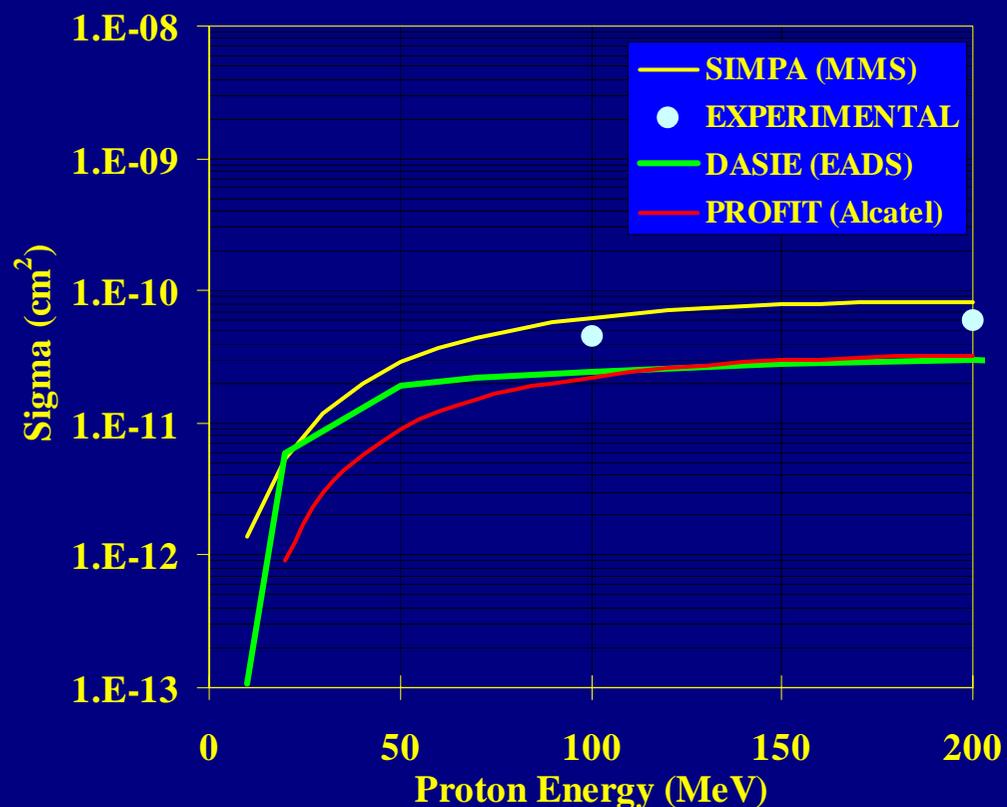
# Analisi di radiazione a livello di componente

- Simulazione
  - Esempio: dedurre la sensibilità al protone dai risultati di test per lo ione pesante

320C25 (HI test programme calcul)



320C25 (Protons sensitivity)



# Analisi di radiazione a livello di componente (laser testing)

## ➤ Laser characteristics :

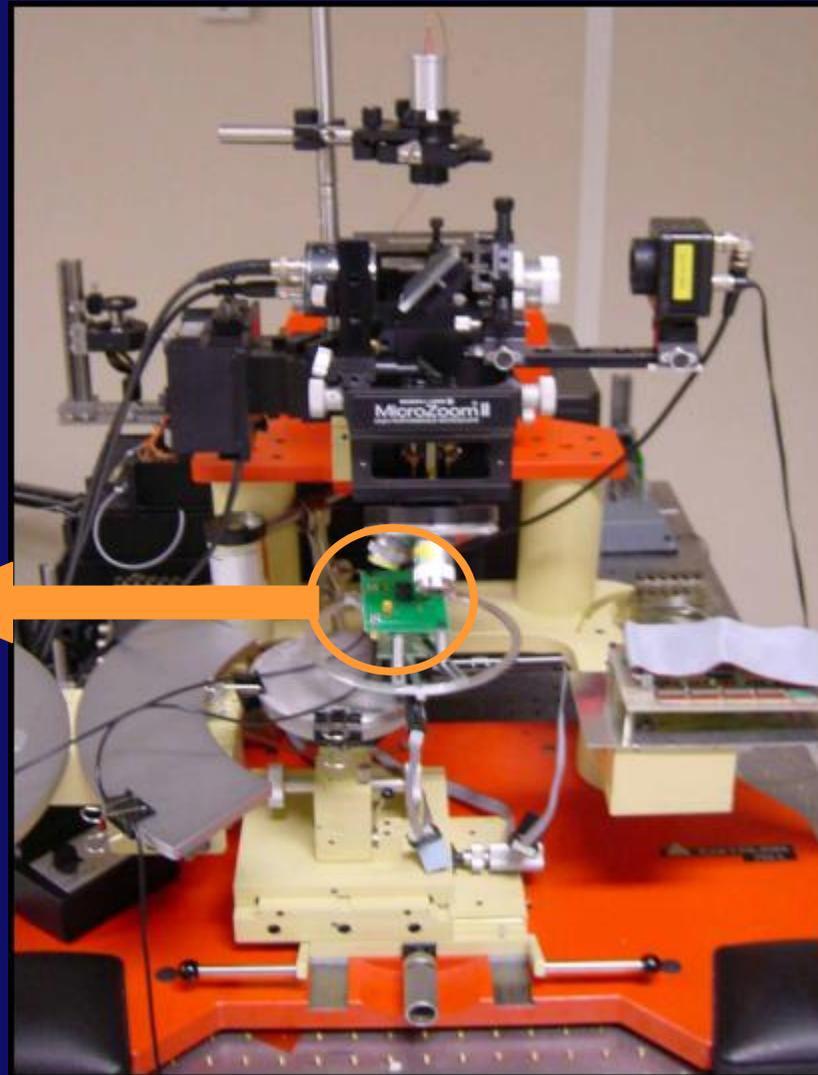
- $\lambda$  : 1064nm
- Pulse duration : 620ps
- $\varnothing$  : 2 $\mu$ m to 40 $\mu$ m



## ➤ DUT

- Same test circuit as for heavy ions
- Localized opening is performed

**No wafer thinning**



## ➤ **Compact**

## ➤ **CCD camera**

- Visualization of DUT and laser spot

## ➤ **Lens**

- Spot size

## ➤ **Motorized attenuator**

- Change laser energy

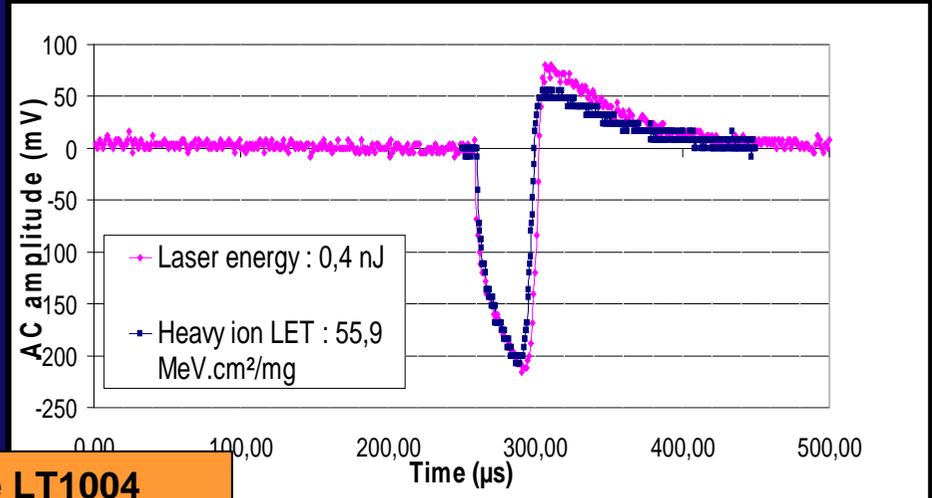
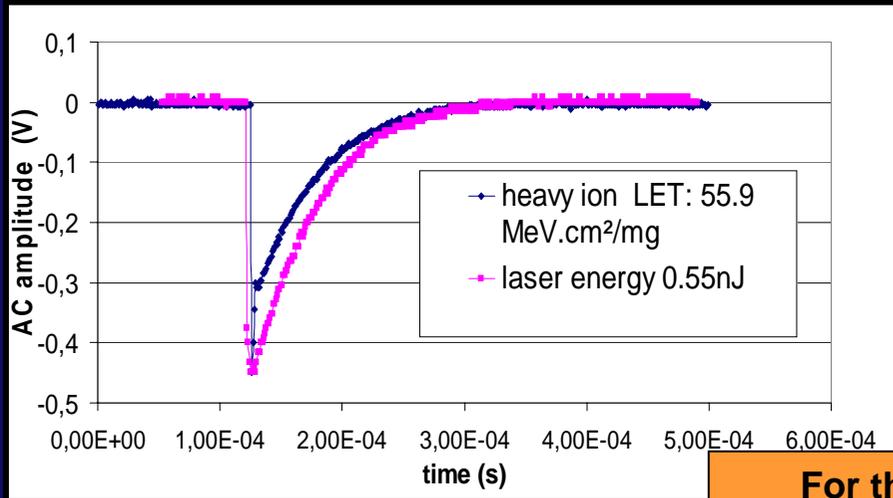
## ➤ **X,Y Motorized stage**

- Scan of the component

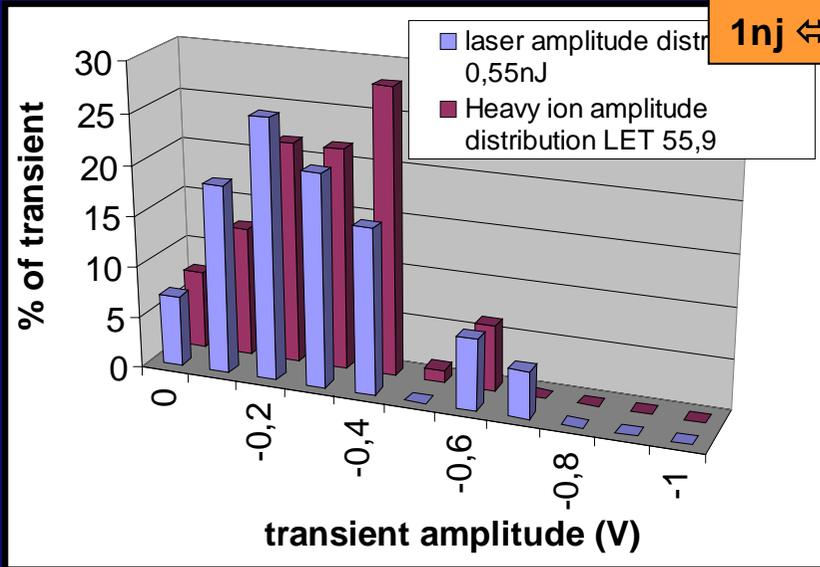
## ➤ **Computer interface**

- Automatic scan

# Analisi di radiazione a livello di componente (laser testing)

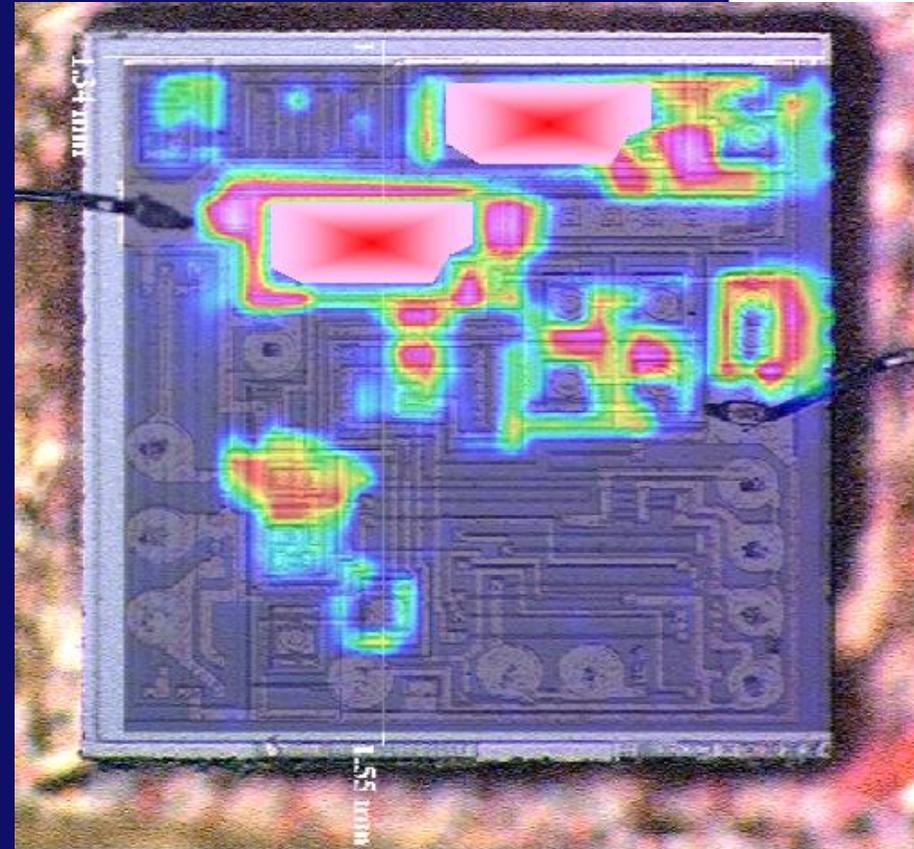
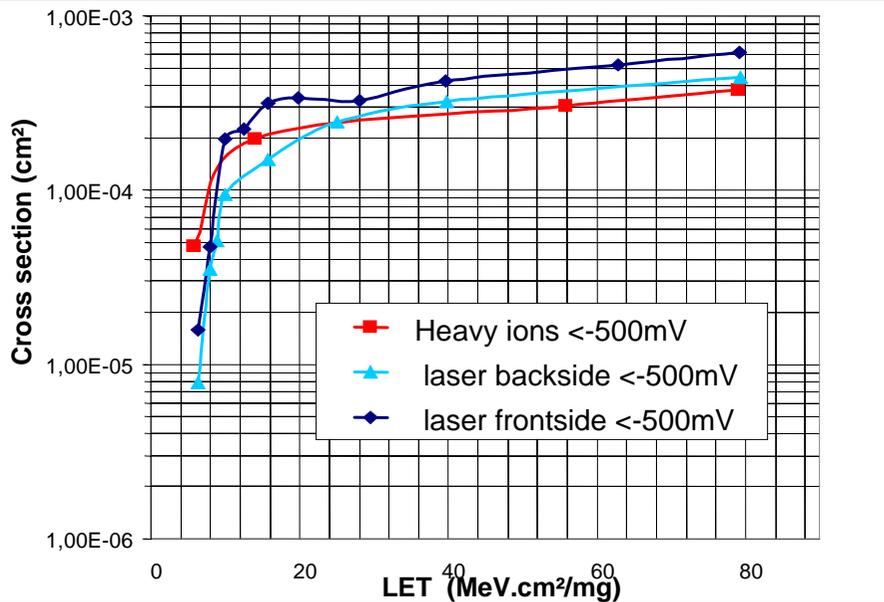


**For the LT1004**  
**1nj ⇔ 110MeV.cm² /mg**



**Il laser può indurre gli stessi avvenimenti transitori indotti dagli ioni pesanti in termini di:**

- forma
- distribuzione delle ampiezze.

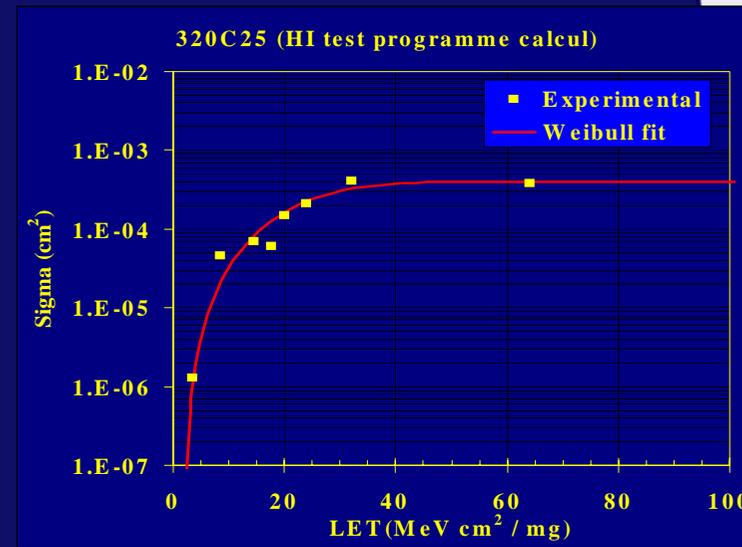
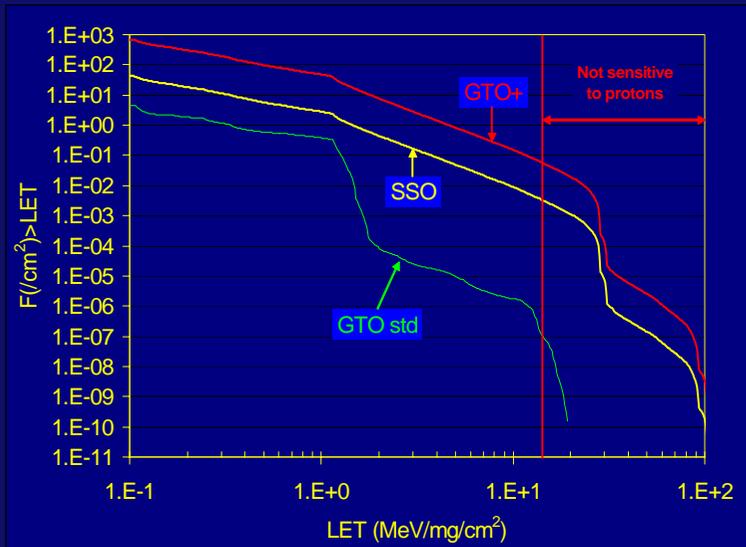


Buona correlazione tra laser e il test con ioni pesanti

Cartografia delle zone sensibili possibile soltanto con il laser

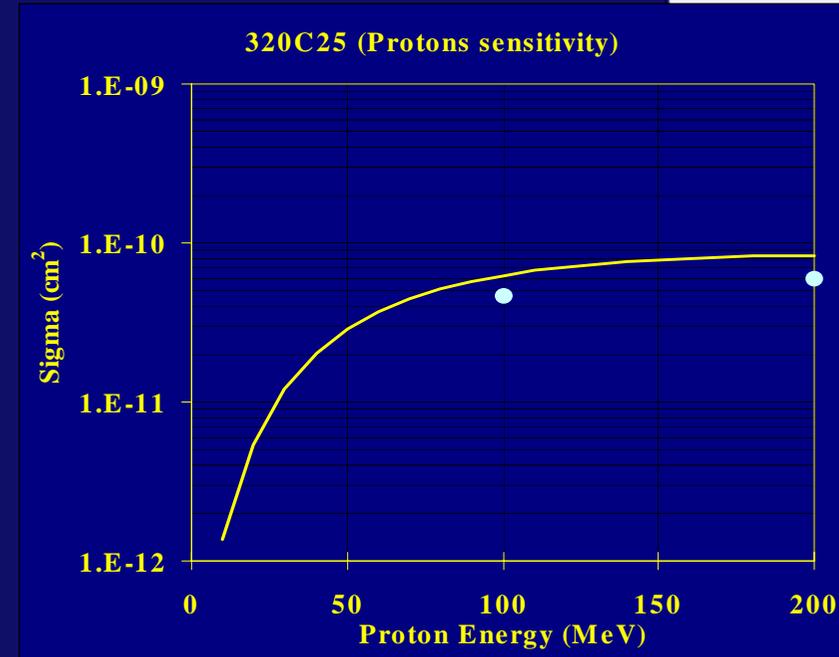
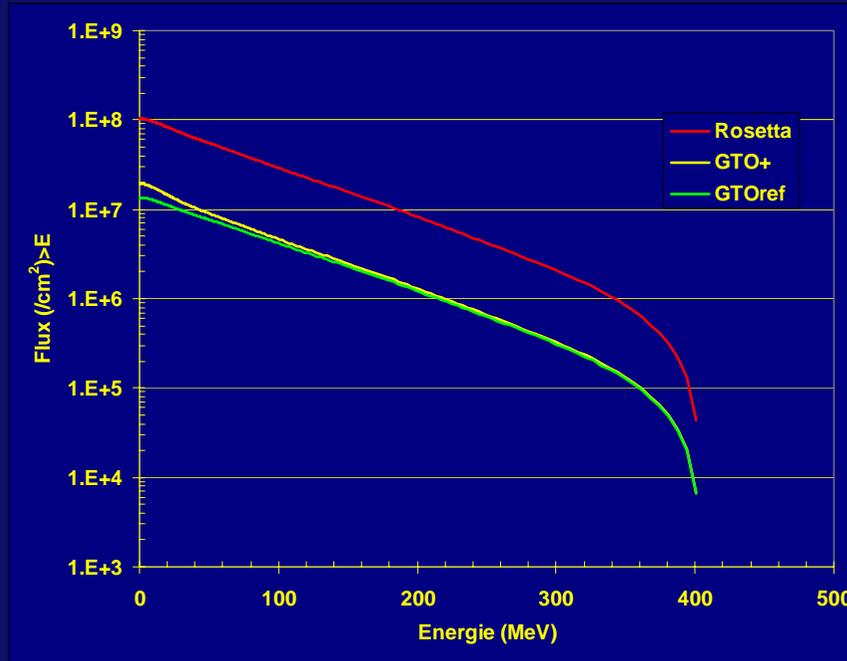
# Predizione di probabilità di errore a livello di componente

- Ioni Pesanti



# Predizione di probabilità di errore a livello di componente

- Protoni



Ambiente di radiazione :  
Num di protoni /  $\text{cm}^2$  / lancio

Stima della sensibilità di SEP  
Num eventi / proton (in  $\text{cm}^2$ )

Quantità di errore in volo  
indotta dai protoni  
(Nb eventi / lancio)

# Processo di analisi delle radiazioni

- 1 / Definizione dell'ambiente di radiazione ed i possibili effetti su apparecchiature elettroniche: (la specificazione SG1X39)
- 2 / Determinazione delle sensibilità di componenti per apparecchiatura.
  - Stime delle sensibilità di ogni componente (database, l'analisi di caso peggiore, analisi di tecnologia, test)
  - Calcolo della probabilità degli errori sulla traiettoria
- 3 / **Analisi di affidabilità**
  - **Analisi dell'impatto di SEP sulla funzionalità di ogni apparecchiatura**
  - **Determinazione dell'affidabilità del sistema elettrico completo che prende in considerazione la ridondanza.**
  - **Determinazione dei componenti critici**
  - **Analisi più precisa su componenti critici (dati e fase di traiettoria)**
- 4 / Hardening

# Analisi di radiazione a livello di apparecchiatura

- L'obiettivo è di definire l'impatto dei SEE sull'affidabilità di ogni funzione di un'apparecchiatura
- La conseguenza di ogni evento è analizzata al livello della apparecchiatura
- Richiede la conoscenza complessiva del sistema hardware e software
- L'obiettivo è di definire l'affidabilità per ogni funzione dell'apparecchiatura e di indicare i componenti principali che conducono a una affidabilità bassa (punto debole)

## Analisi di radiazione a livello di apparecchiatura (2)

- La conseguenza di SEP a livello di apparecchiatura può essere difficile da analizzare
- Esempio
  - SEU può avere un impatto su un  $\mu$ -microprocessore a vari livelli (dati, indirizzo, o controllo)
  - La proporzione di evento non rilevabile è cruciale per il successo della missione ma difficile da stimare (10% 68020 di OBC e SRI)
- La stima precisa dell'impatto di tali eventi sull'affidabilità richiede una conoscenza ai vari livelli (software e hardware) e spesso deve essere verificata in acceleratore con un test specifico (programma di volo)
- L'obiettivo di questa analisi è di definire la probabilità dei vari scenari, dalla perdita della missione all'assenza totale di conseguenze.

# Analisi di radiazione a livello di sistema

- L'obiettivo è di definire l'affidabilità delle funzioni del sistema elettrico totale del lanciatore prendendo in considerazione la ridondanza di apparecchiature e la propagazione di guasti (in ritardo o in anticipo)
- Il livello finale di affidabilità dipende, chiaramente, dalla traiettoria
  - Il livello di affidabilità può essere accettabile per una missione e non per un'altra
- L'ambiente di radiazione rimane la costrizione principale sull'affidabilità del sistema elettrico di un lanciatore. Rappresenta l'80% del rischio di fallimento
- L'affidabilità non è ancora accettabile per la traiettoria di GTO+

# Processo di analisi delle radiazioni

- 1 / Definizione dell'ambiente di radiazione ed i possibili effetti sulle apparecchiature elettroniche: (la specificazione SG1X39)
- 2 / Determinazione delle sensibilità di componenti per apparecchiatura.
  - Stime delle sensibilità di ogni componente (database, l'analisi di caso peggiore, analisi di tecnologia, test)
  - Calcolo della probabilità degli errori sulla traiettoria
- 3 / Analisi di affidabilità
  - Analisi dell'impatto di SEP sulla funzionalità di ogni apparecchiatura
  - Determinazione dell'affidabilità del sistema elettrico completo che prende in considerazione la ridondanza.
  - Determinazione dei componenti critici
  - Analisi più precisa su componenti critici (dati e fase di traiettoria)
- 4 / **Hardening**

# Tecniche tipiche per l'aumento della resistenza

- Per mantenere dei costi bassi, i componenti con aumentata resistenza non sono stati utilizzati su A5 (non molto efficace per SEP)
- Le tecniche per aumentare la resistenza del SEL di A5 sono state adattate per ogni caso prendendo in considerazione l'efficacia, l'affidabilità del sistema di protezione ed il costo.
- Esempi
  - **SEL:** se la probabilità di SEL non è accettabile, possiamo sostituire il componente sensibile con un altro o possiamo aggiungere un sistema anti latch up
  - **SET:** se il SET non è accettabile (raro) possiamo aggiungere un filtro RC, nessuna sostituzione perché la maggior parte dei componenti lineari può essere considerata sensibile ai SET)
  - **SEB:** se la probabilità di SEB non è accettabile, possiamo decrescere il Vds nella SOA o possiamo sostituire il componente con uno più tollerante.
  - **SEU / MBU:** se la probabilità di SEU non è accettabile possiamo aggiungere EDAC (solamente per SEU) o sostituire con un componente meno sensibile.

# Conclusioni

- Il quadro specifico di A5 ci ha condotto ad utilizzare dei metodi specifici per garantire l'affidabilità dei lanci (approccio top down)
- Questi metodi utilizzano per quanto possibile:
  - il profilo dell'ambiente naturale di radiazione sulla traiettoria
  - la conoscenza approfondita del sistema elettrico, hardware e software
  - le stime della sensibilità dei componenti ai SEP (WC, analogia, laser)
- L'analisi dettagliata degli effetti delle radiazioni sui componenti e le conseguenze sulla funzionalità del sistema ha permesso di identificare quei componenti critici sui quali concentrare i nostri sforzi per aumentarne la resistenza.
- Questo metodo ci ha permesso di utilizzare numerosi COTS conservando gli obiettivi di affidabilità e di ridurre i costi ricorrenti dei lanciatori