

Radiation Hardening

Study of a special case: Ariane 5

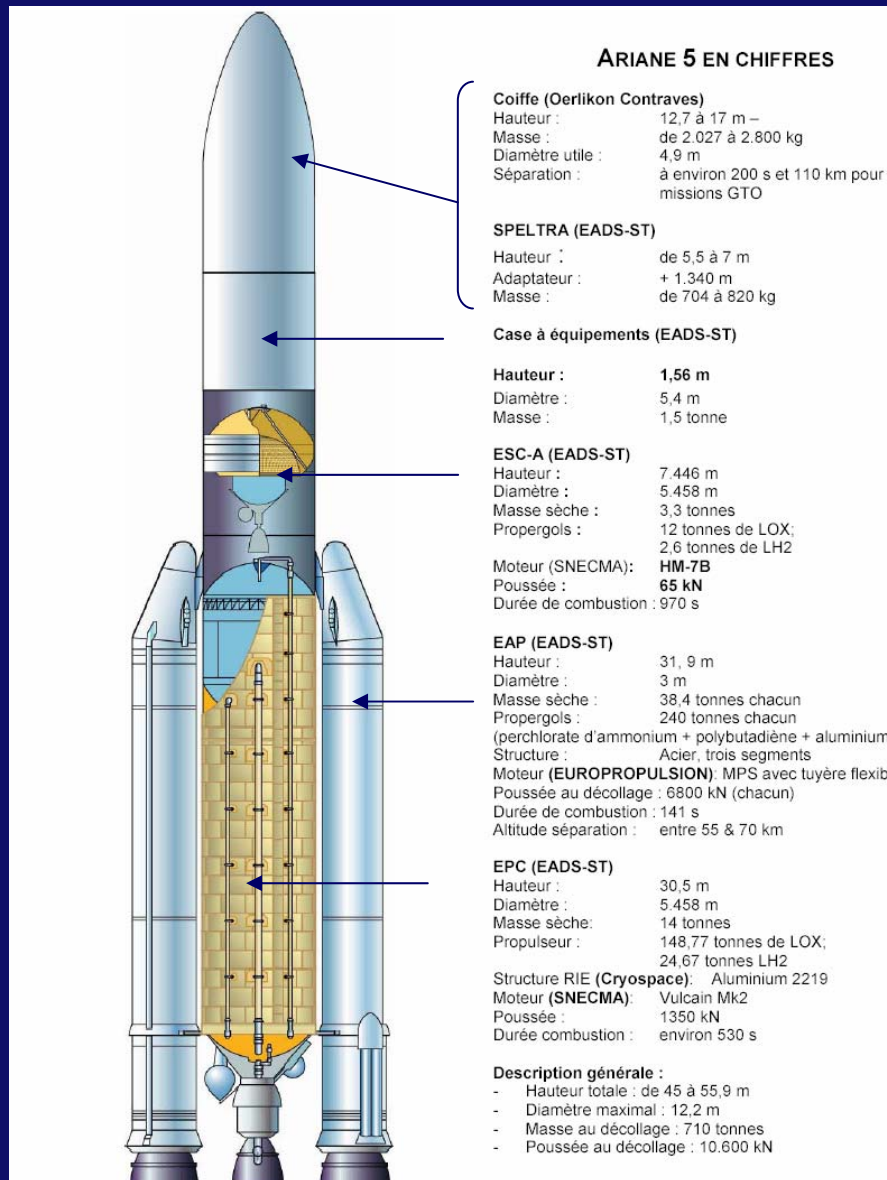
By Thierry CARRIERE EADS ST



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



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

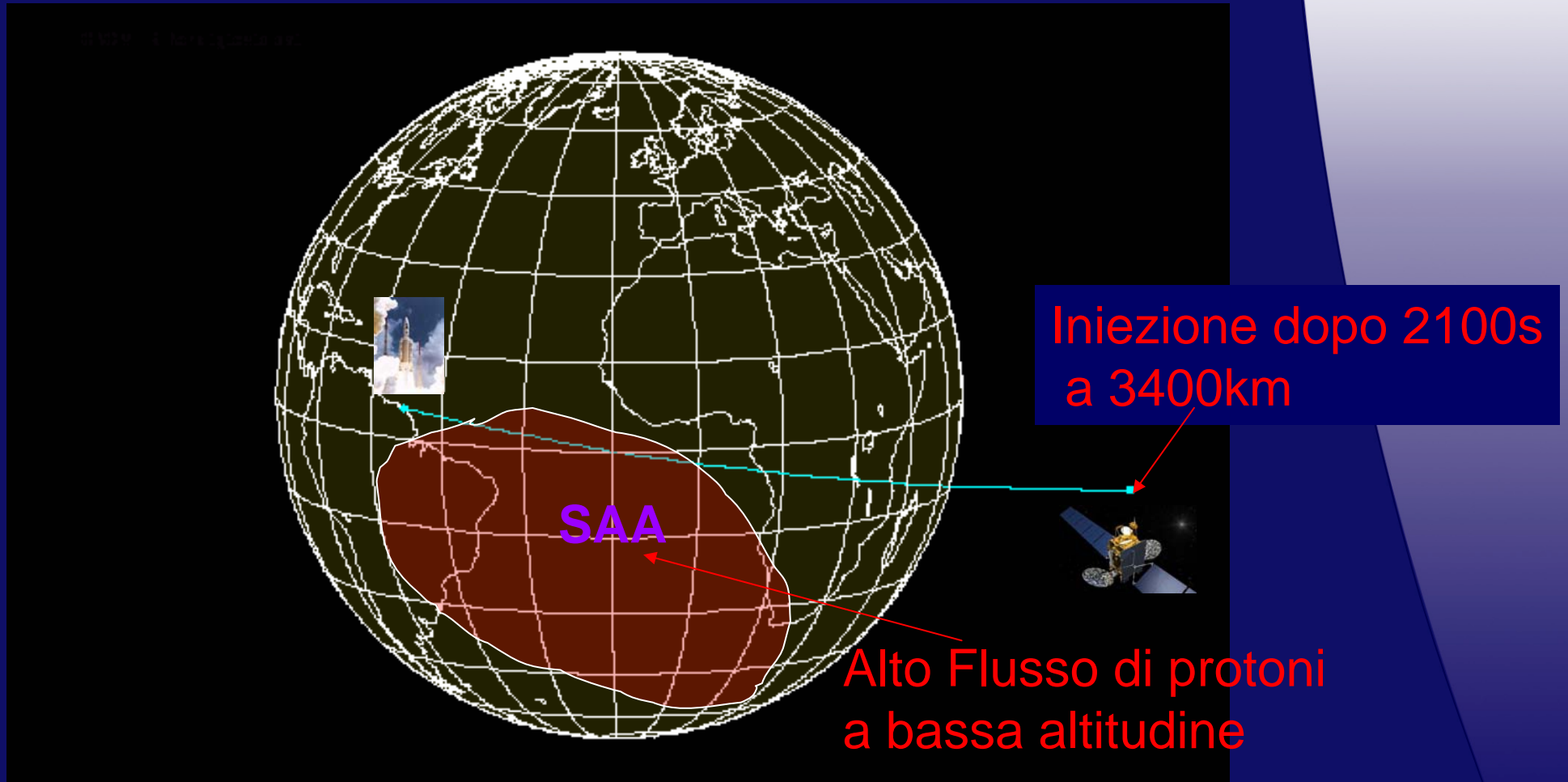
- 1/ Definizione dell'ambiente di radiazione e dei possibili effetti sui dispositivi elettronici: (specifica SG1X39)
- 2/ Determinazione della sensibilità dei componenti di ogni apparecchiatura
 - Stime delle sensibilità di ogni componente (database, l'analisi del "caso peggiore", analisi di tecnologia, 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+

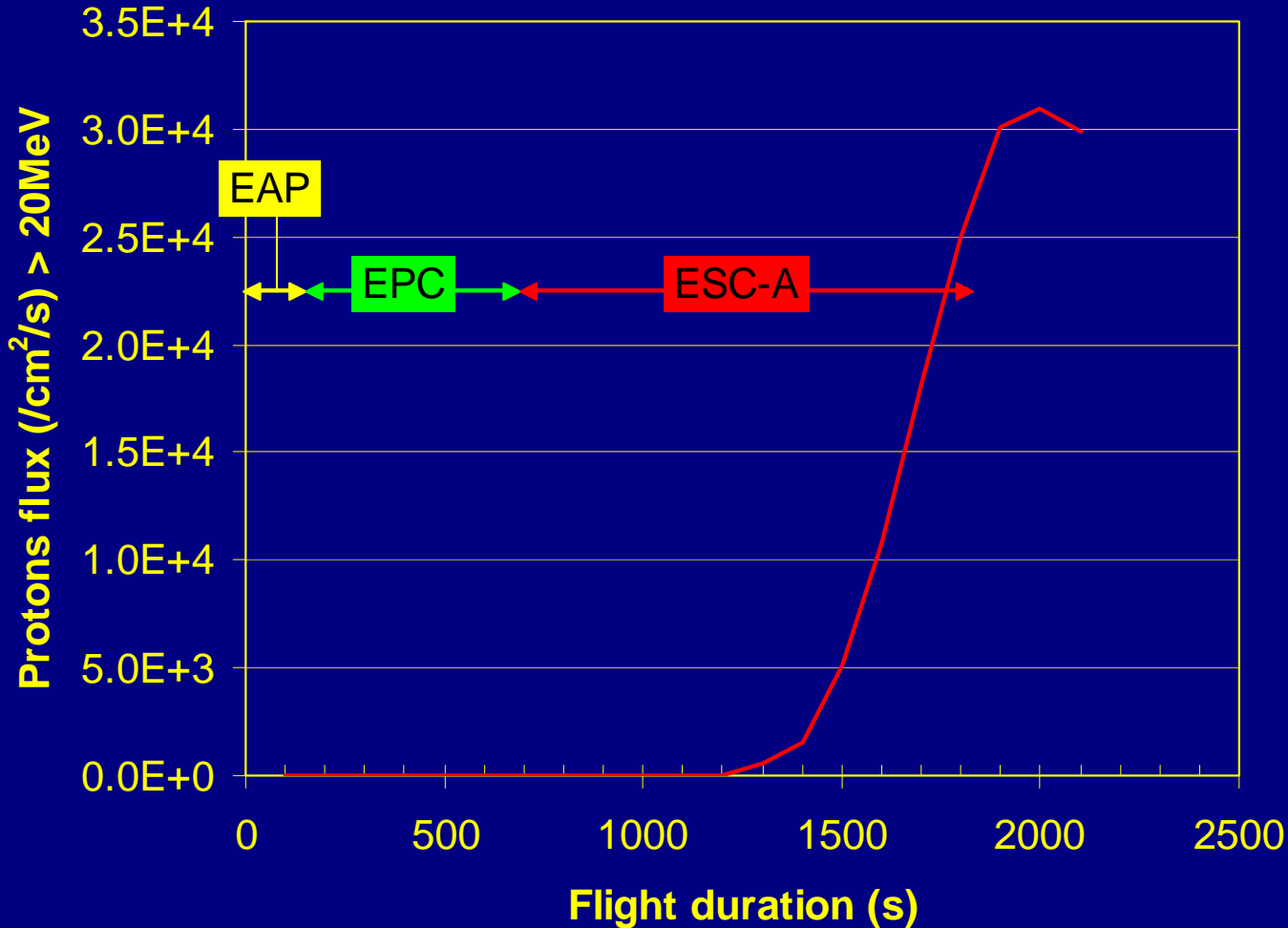
GTO Analisi di traiettoria

- GTO (Orbita di Trasferimento Geostazionaria)



GTO Ambiente di radiazione (protoni)

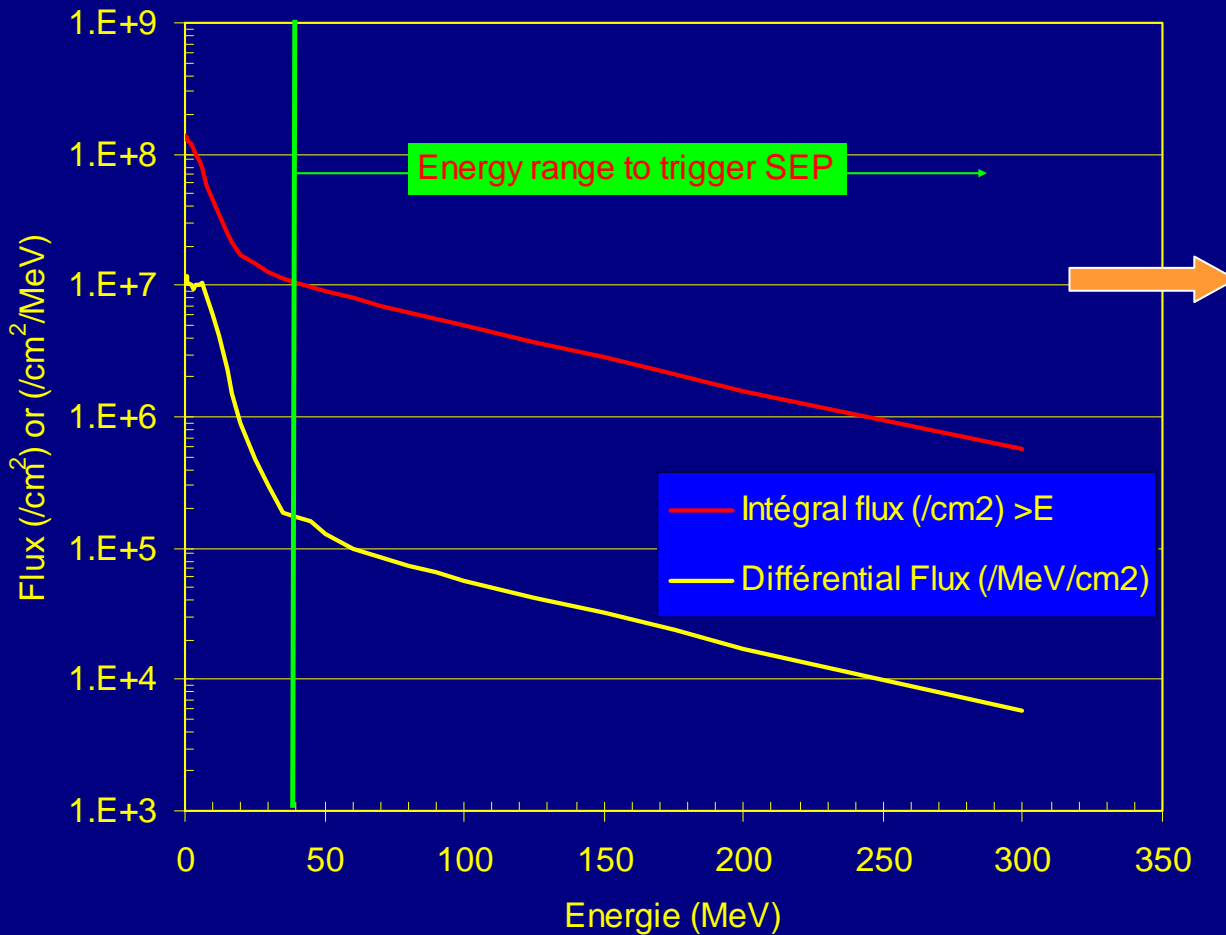
GTO Mission



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

GTO Ambiente di radiazione (protoni)

Mission GTO std



10⁷ protoni per cm²
hanno abbastanza
energia per
provocare dei SEP
sui componenti sensibili

GTO Ambiente di radiazione (GCR)



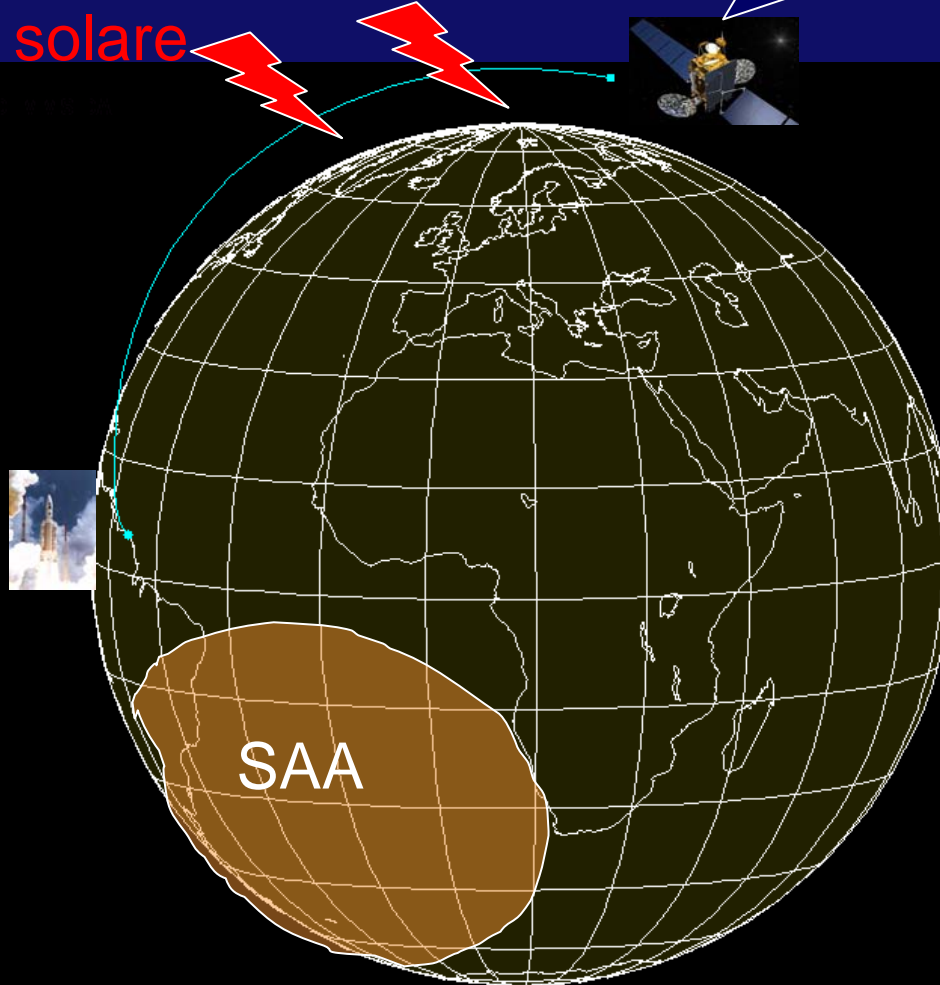
La traiettoria GTO è ben protetta dallo schermo geomagnetico

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

SSO Trajectory Analysis

GCR e eruzione
solare

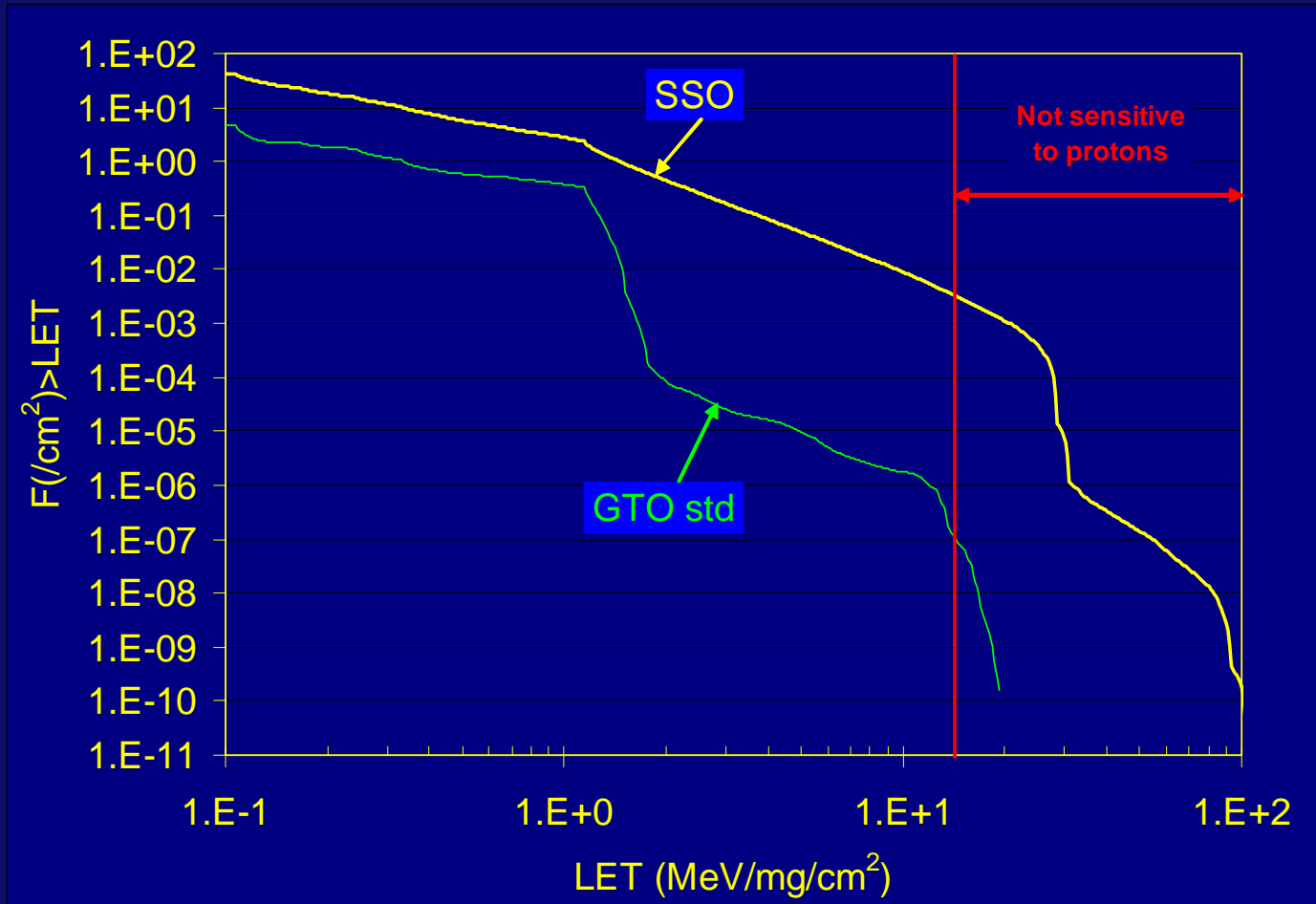
Iniezione dopo
2000s a 800 km



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

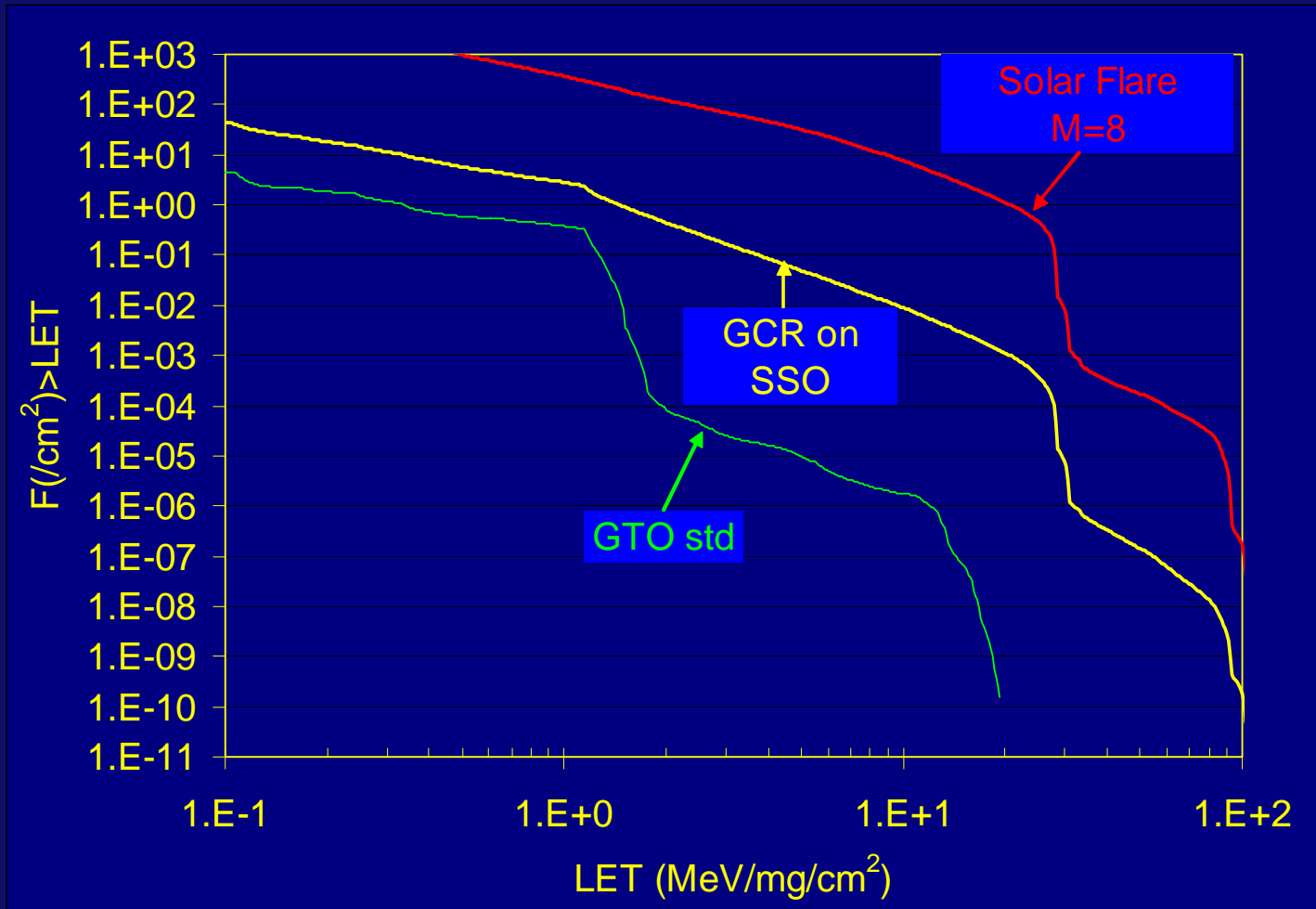
Il flusso di protoni
intrappolati può essere
ignorato sulla
traiettoria SSO

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

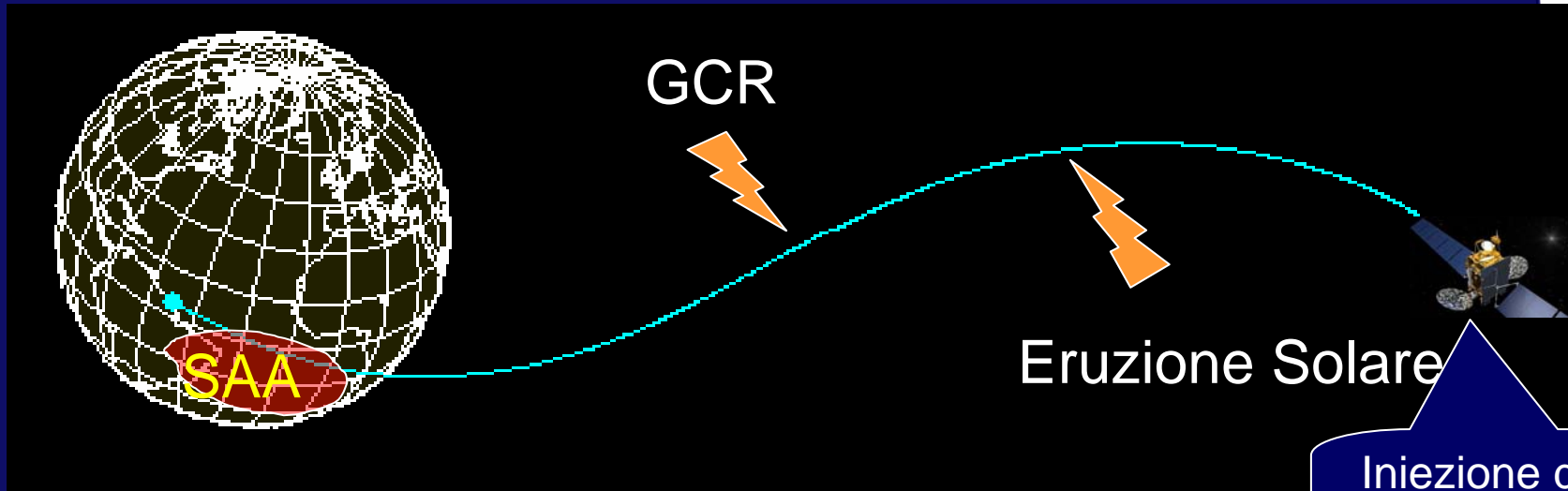


Nessun volo
durante un'
eruzione solare



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

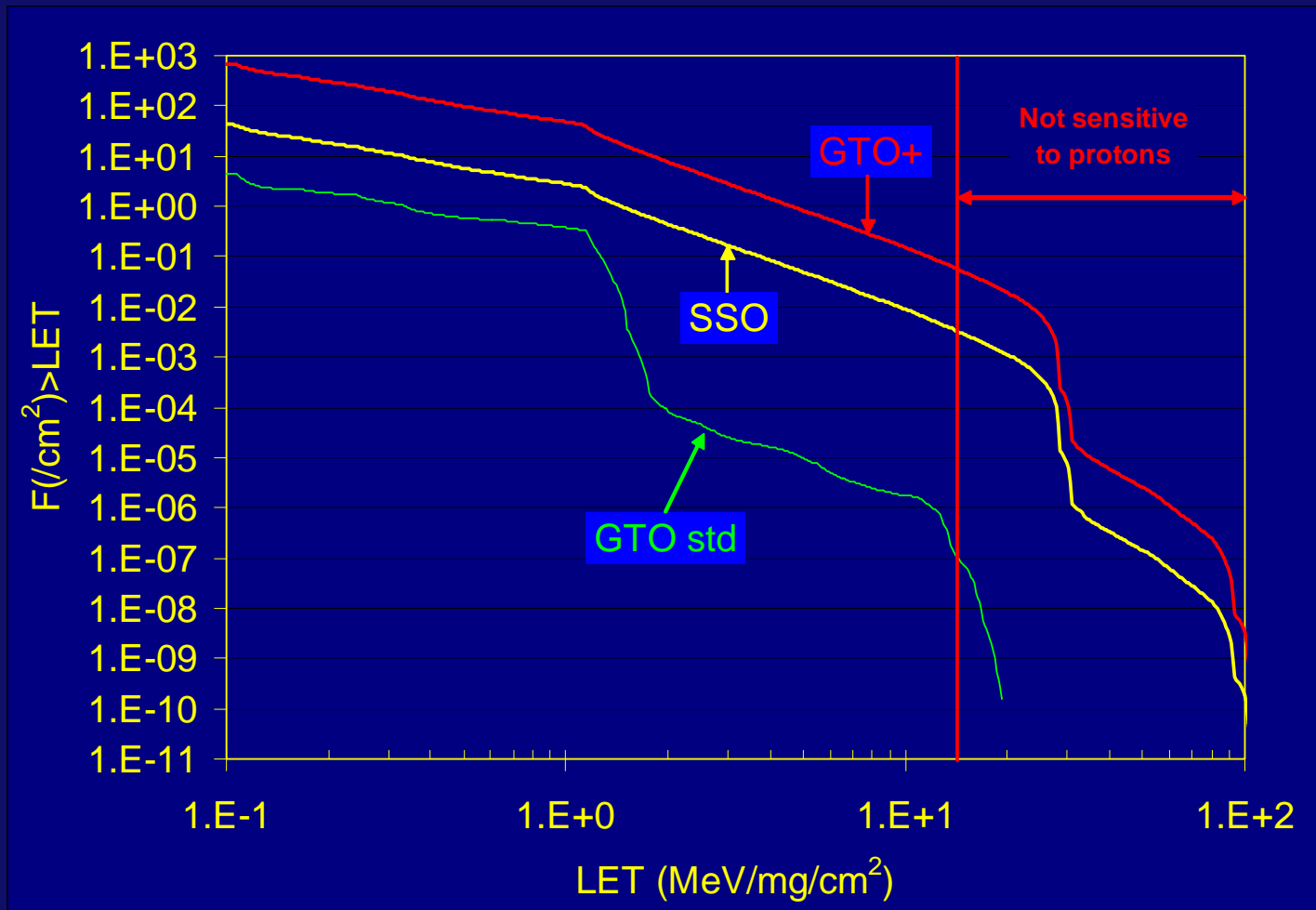
Analisi della traiettoria GTO+



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

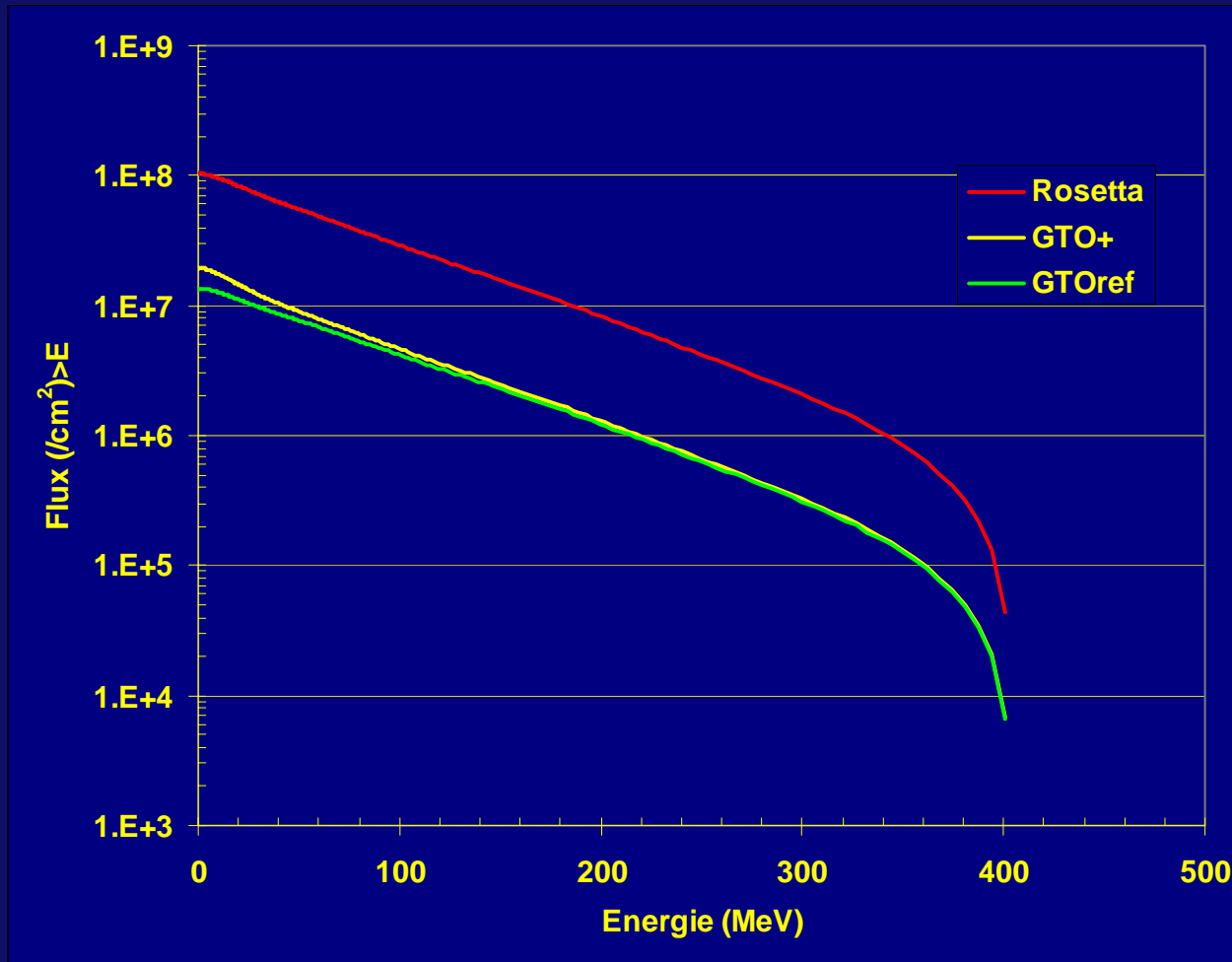
- Fascia protonica
- Raggi cosmici galattici(GCR)
- Eruzione solare

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
 - 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)

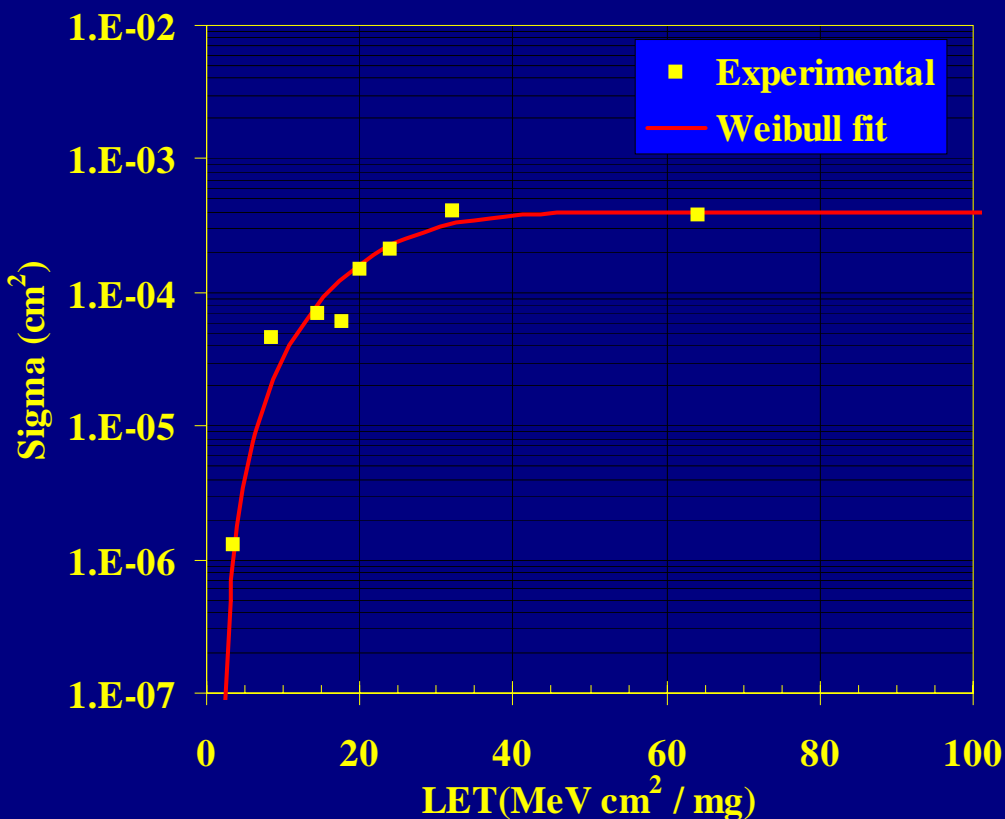
Analisi di radiazione a livello di componente (Analisi del “caso peggiore”)

- 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

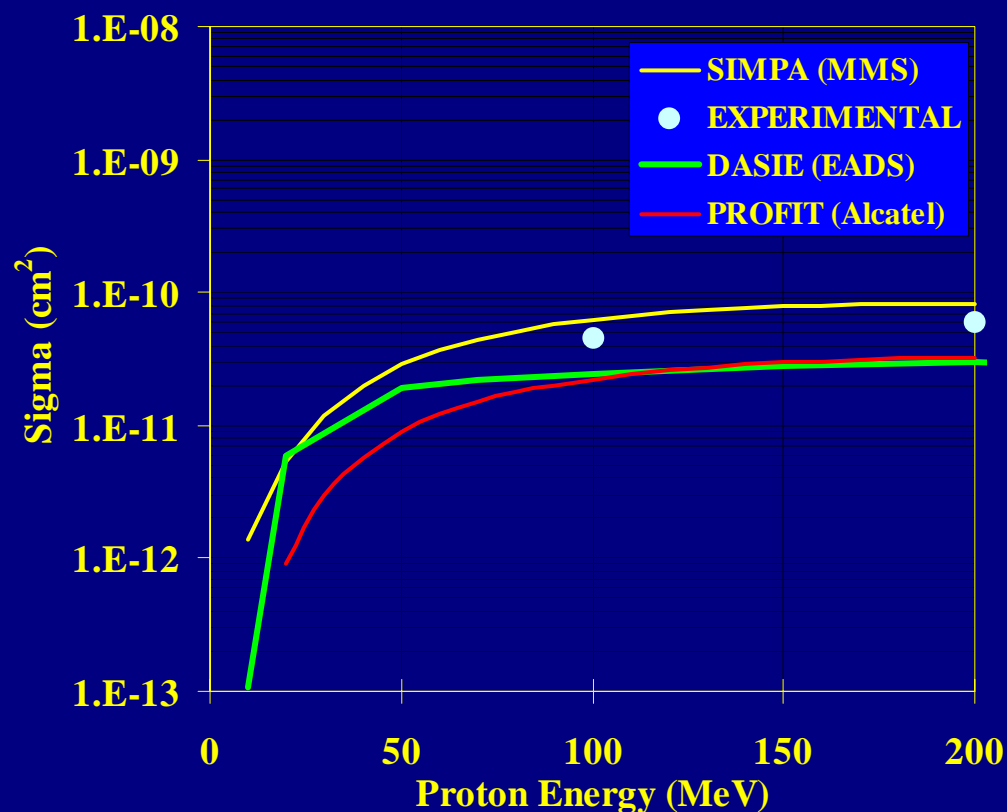
Analisi di radiazione a livello di componente

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

320C25 (HI test programme calcul)



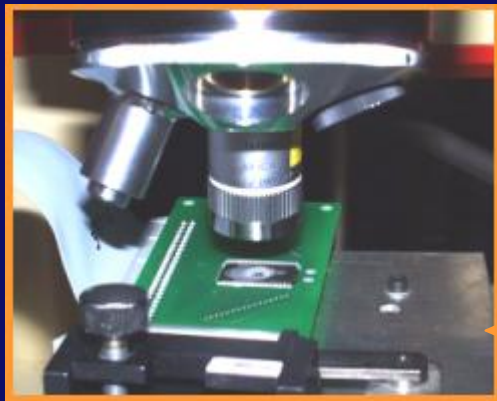
320C25 (Protons sensitivity)



Analisi di radiazione a livello di componente (laser testing)

➤ Laser characteristics :

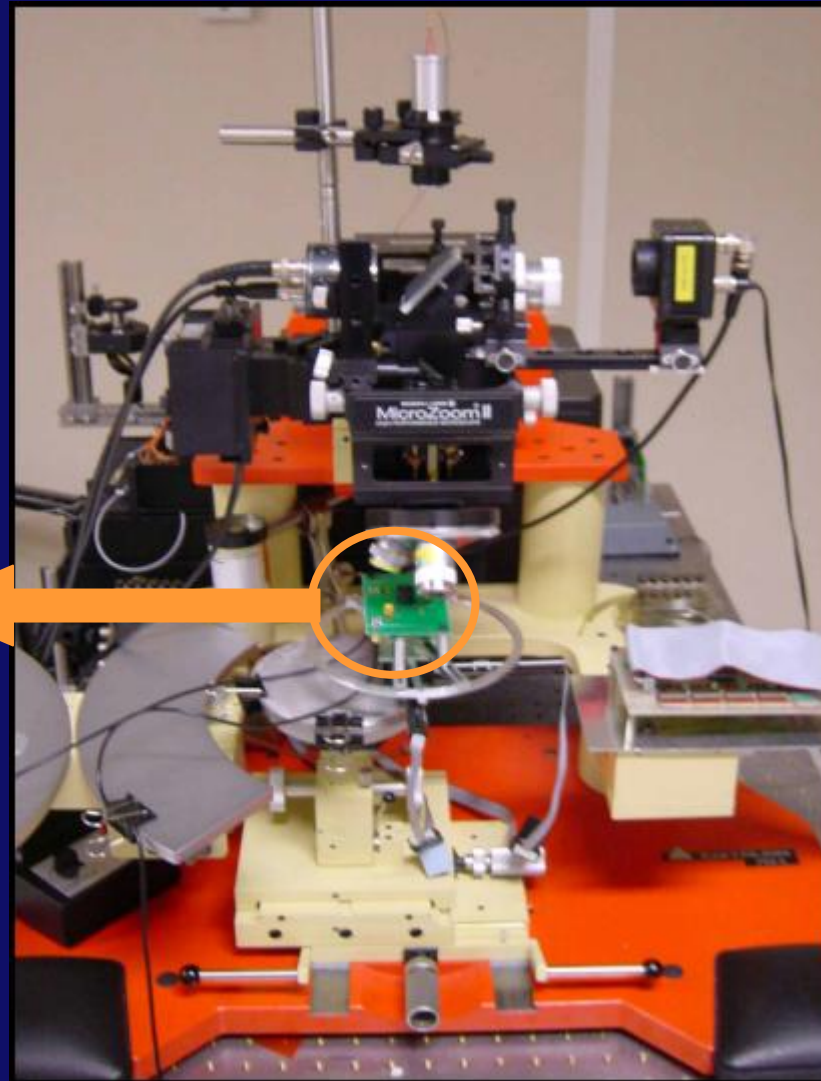
- λ : 1064nm
- Pulse duration : 620ps
- \varnothing : 2 μ m to 40 μ m



➤ 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

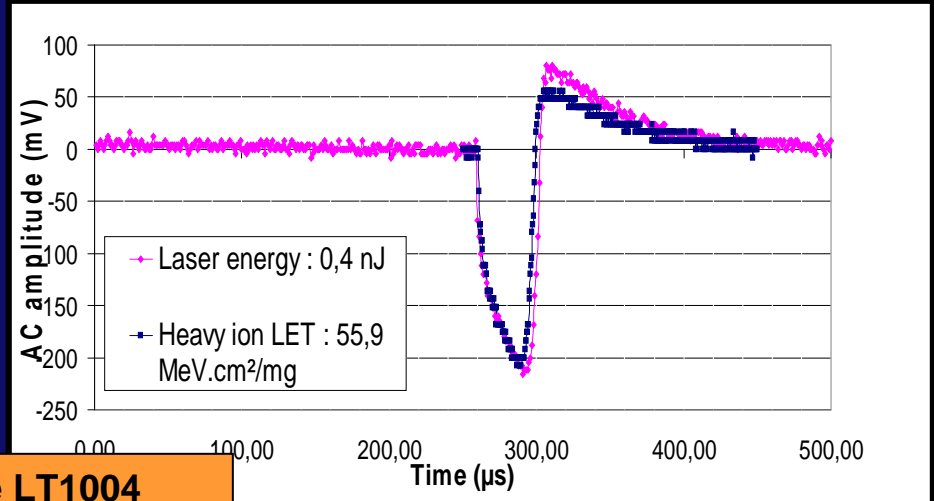
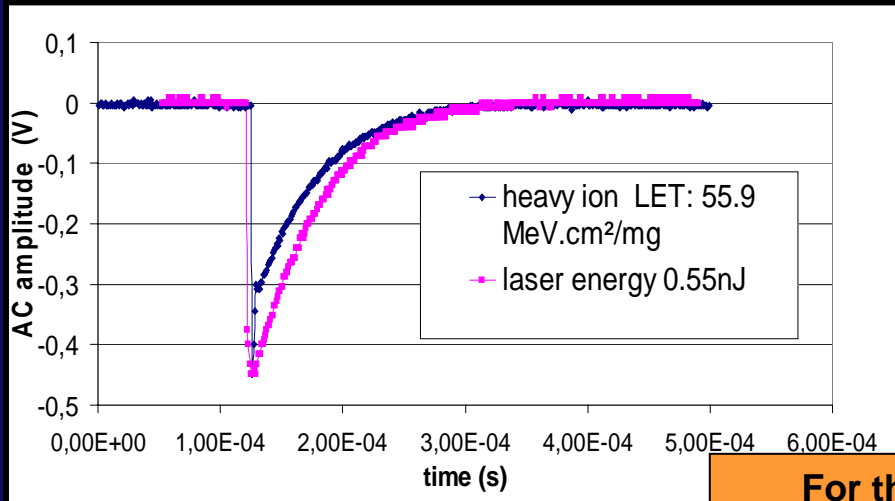
➤ **X,Y Motorized stage**

- Scan of the component

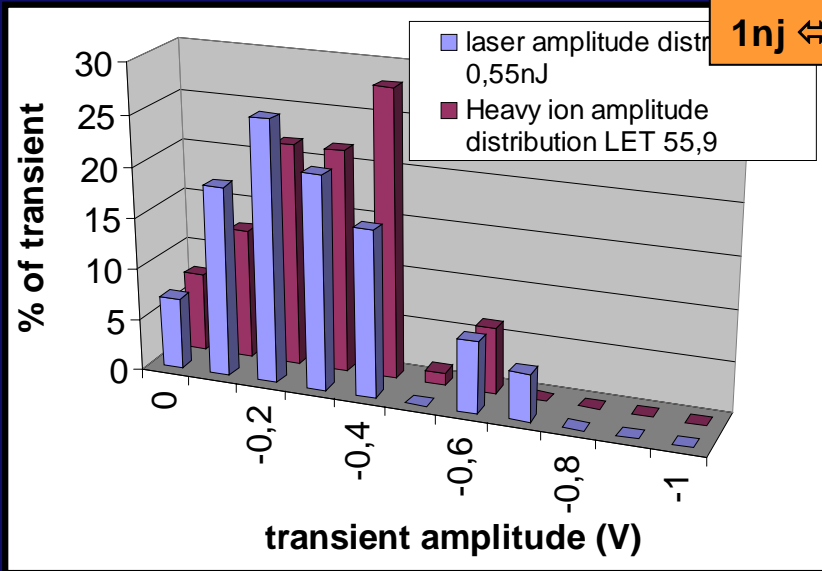
➤ **Computer interface**

- Automatic scan

Analisi di radiazione a livello di componente (laser testing)

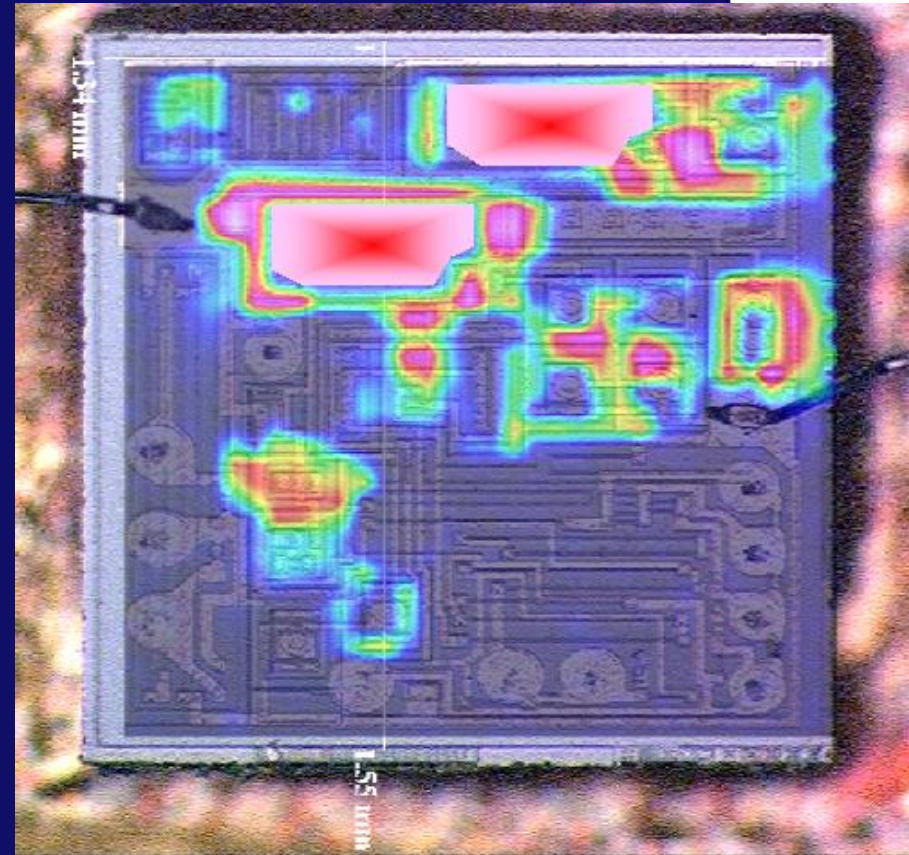
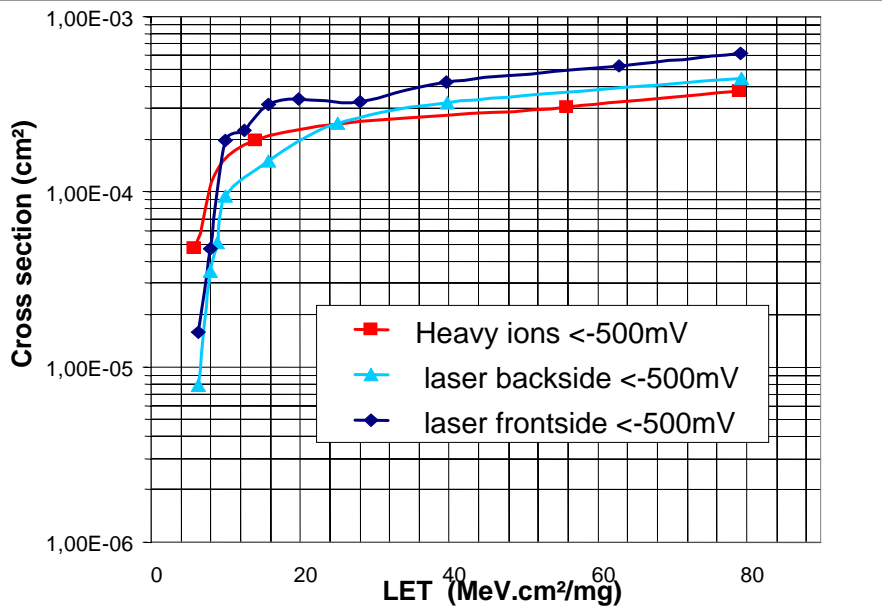


For the LT1004
1nj ⇔ 110MeV.cm² /mg



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

- forma
- distribuzione delle ampiezze.

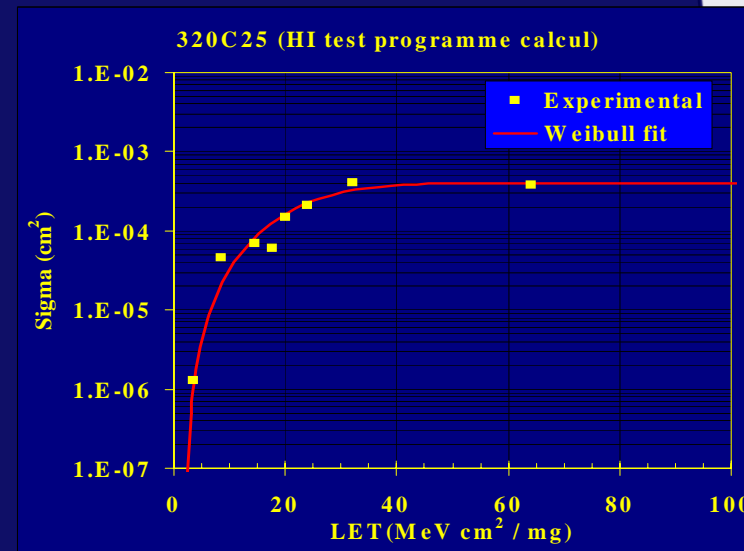
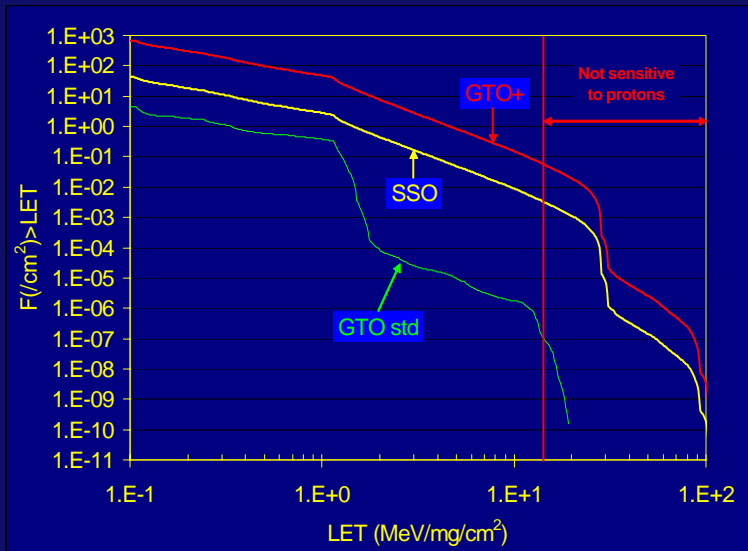


Buona correlazione tra laser e il test con ioni pesanti

Cartografia delle zone sensibili possibile soltanto con il laser

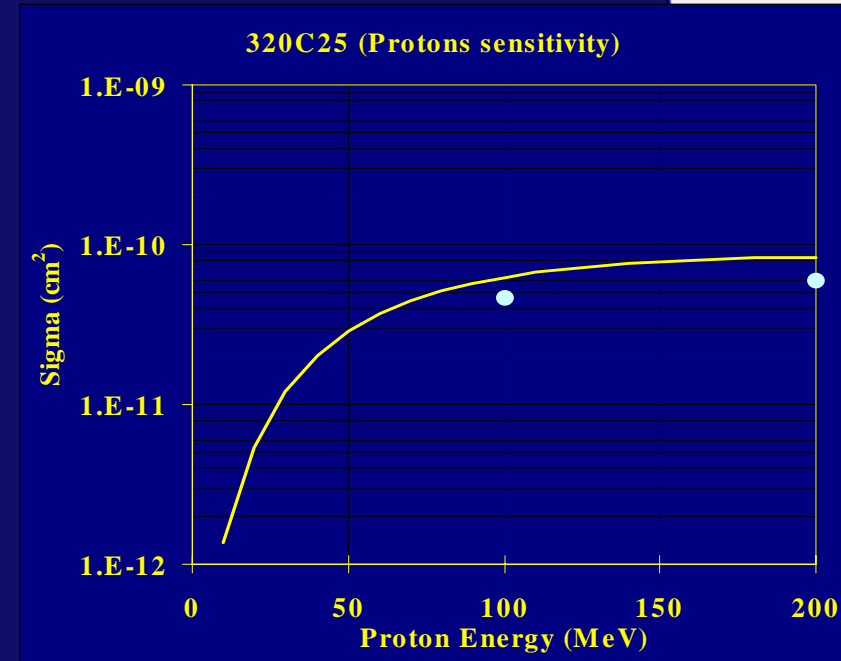
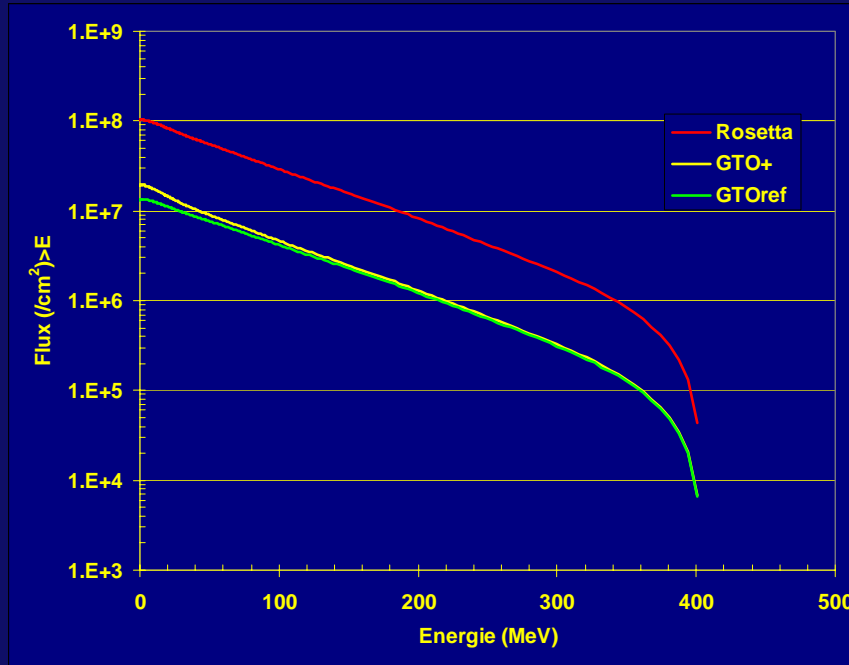
Predizione di probabilità di errore a livello di componente

- Ioni Pesanti



Predizione di probabilità di errore a livello di componente

- Protoni



Ambiente di radiazione :
Num di protoni / cm^2 / lancio



Stima della sensibilità di SEP
Num eventi / proton (in 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 μ -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