

*“La visione dell’industria sull’elettronica per applicazioni in ambiente spaziale: strategie di protezione alle radiazioni”.*

*Maria Sarno - Roberta Mancini*

WE LOOK AFTER THE EARTH BEAT

85230352-DOC-TAS-EN-002

CONTROLLATO NON CLASSIFICATO THALES ALENIA SPACE ITALIA

ThalesAlenia  
A Thales / Finmeccanica Company  
Space

# La visione dell'industria sull'elettronica per applicazioni in ambiente spaziale: strategie di protezione alle radiazioni

## INDICE

1. Introduzione
2. Ambiente Spaziale
3. Effetti dell'Ambiente Spaziale sui componenti Elettronici
4. Quantificazione degli Effetti
5. Politica di Radiation Assurance per Programmi Spaziali
6. Conclusioni

# La visione dell'industria sull'elettronica per applicazioni in ambiente spaziale: strategie di protezione alle radiazioni

## Introduzione (1/2)

L'ambiente spaziale ha una forte influenza sulle prestazioni di un Satellite. Le possibili degradazioni sono spesso dovute alle radiazioni che raggiungono i componenti elettronici.

Una buona valutazione dei potenziali effetti è una parte essenziale del processo d'ingegnerizzazione per la realizzazione di ogni elemento del satellite.

E' importante quindi che questa valutazione venga fatta nelle fasi iniziali della progettazione quando vengono definiti i budget di satellite e la selezione dei componenti.

# La visione dell'industria sull'elettronica per applicazioni in ambiente spaziale: strategie di protezione alle radiazioni

## Introduzione (2/2)

Le domande che generalmente si pone un progettista di apparati per satelliti sono:

- quale componente posso utilizzare
- dove posso posizionarlo
- per quanto tempo deve lavorare

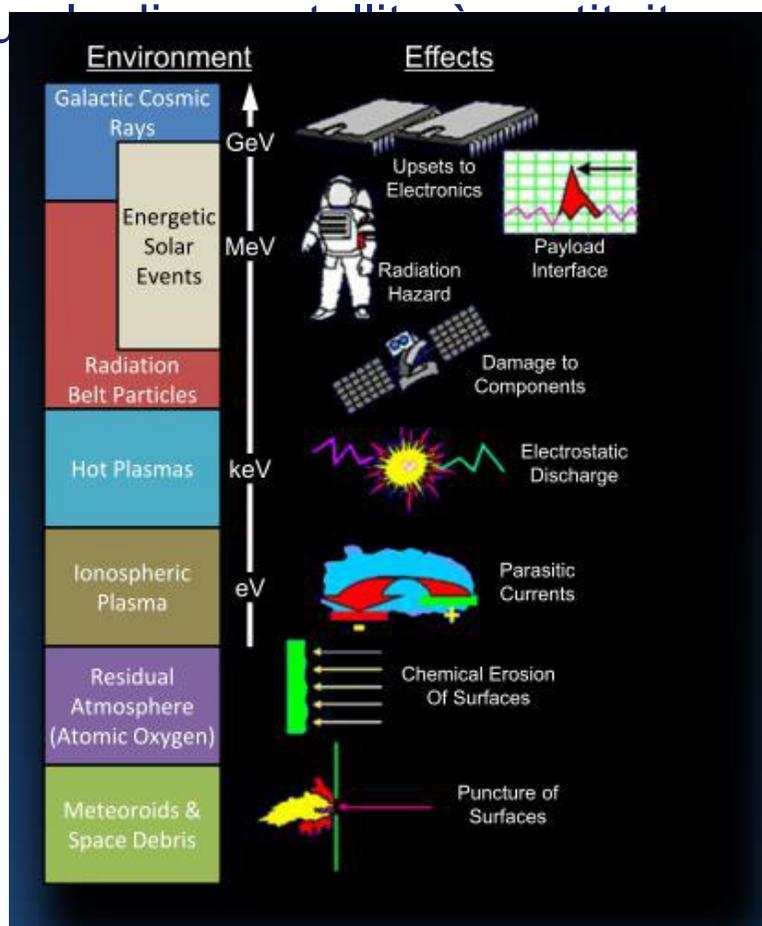
L'ambiente spaziale influenza fortemente la risposta a tutte queste domande.

Lo studio approfondito dell'ambiente mostra che un buon progetto bilanciato con una attenta scelta delle varie tecnologie può assicurare la sopravvivenza del satellite.

# La visione dell'industria sull'elettronica per applicazioni in ambiente spaziale: strategie di protezione alle radiazioni

## L'ambiente spaziale (1/3)

L'ambiente naturale di un sistema elettronico in orbita è principalmente da :

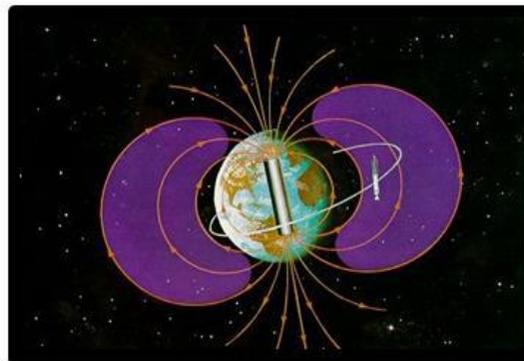
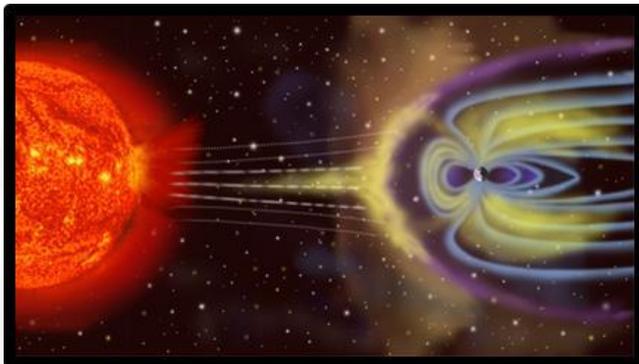
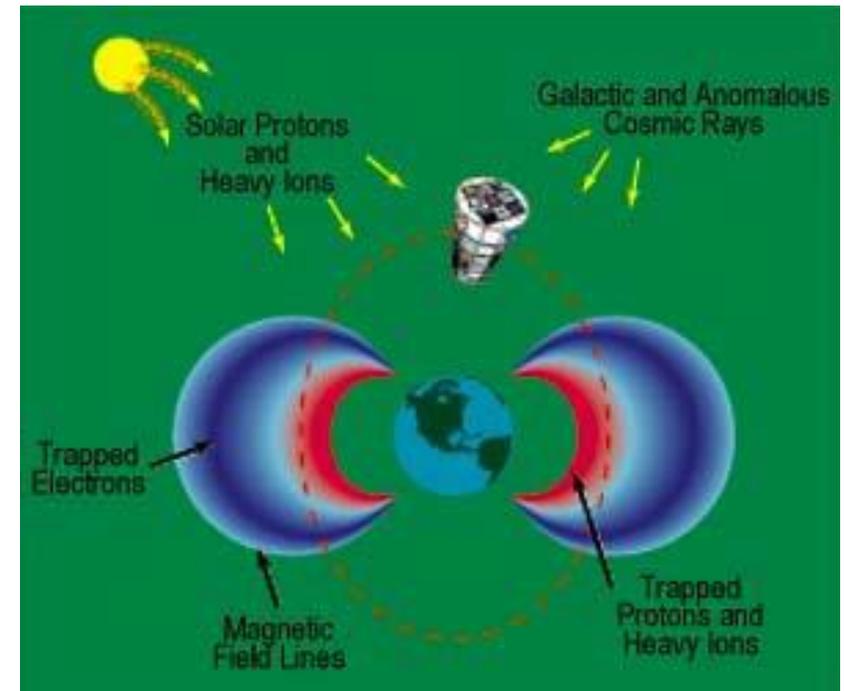


# La visione dell'industria sull'elettronica per applicazioni in ambiente spaziale: strategie di protezione alle radiazioni

## L'ambiente spaziale (2/3)

### Le principali sorgenti di particelle energetiche

- Protoni ed elettroni intrappolati nelle fasce di Van Allen
- Raggi cosmici e protoni con provenienza al di fuori del sistema Solare
- Ioni pesanti e protoni emessi dalle eruzioni solari
- Ioni pesanti intrappolati nella magnetosfera



# La visione dell'industria sull'elettronica per applicazioni in ambiente spaziale: strategie di protezione alle radiazioni

## L'ambiente spaziale (3/3)

Per ogni missione satellitare viene valutato l'ambiente poiché esso varia a causa della:

- orbita : altitudine ed inclinazione
- durata della missione.

# La visione dell'industria sull'elettronica per applicazioni in ambiente spaziale: strategie di protezione alle radiazioni

## Effetti dell'ambiente Spaziale sui componenti elettronici (1/3)

- Le particelle energetiche, particolarmente quelle delle fasce di Van Allen e degli eventi solari causano danneggiamenti sui componenti elettronici. Queste radiazioni possono penetrare le pareti del satellite e depositare una dose considerevole durante la missione.



### Valutazione della Dose Cumulata

- Gli ioni energetici, principalmente quelli derivanti dai Raggi cosmici e dagli eventi solari, perdono rapidamente energia nei materiali attraverso ionizzazione. Questa energia trasferita può corrompere o danneggiare elementi di memoria determinando SEU (Single Event Upset) del componente. SEU possono anche essere causati da interazione nucleare tra protoni intrappolati molto

# La visione dell'industria sull'elettronica per applicazioni in ambiente spaziale: strategie di protezione alle radiazioni

## Effetti dell'ambiente Spaziale sui componenti elettronici (2/3)

energetici e l'area sensibile del componente. Quindi il protone rompe il nucleo e i frammenti causano una alta ionizzazione locale



Valutazione dei Single Event Phenomena

- Elettroni energetici possono penetrare schermi e depositare cariche in materiali interni dielettrici come cavi o altri isolanti, e su parti metalliche non messe a massa. Queste possono successivamente creare una scarica generando interferenze elettromagnetiche e non degradazioni del componente.



Valutazione del Caricamento Superficiale

# La visione dell'industria sull'elettronica per applicazioni in ambiente spaziale: strategie di protezione alle radiazioni

## Effetti dell'ambiente Spaziale sui componenti elettronici (3/3)

- Oltre che per la dose ionizzante, le particelle possono perdere energia attraverso interazione non-ionizzante, “displacement damage” o danneggiamento del volume, dove gli atomi vengono spostati dalla loro posizione originale. Questo può alterare le proprietà elettriche, meccaniche o ottiche dei materiali ed è un importante meccanismo di danneggiamento per i componenti optoelettronici (celle solari, optocoupler, etc) o rivelatori come CCDs.



Valutazione del Displacement Damage

# La visione dell'industria sull'elettronica per applicazioni in ambiente spaziale: strategie di protezione alle radiazioni

## Quantificazione degli effetti da radiazione

### Parametro

- Dose Ionizzante assorbita (Krad)
- Spettro dell'energia trasferita dagli ioni nel componente (LET)
- Spettro dell'energia dei protoni ( MeV)
- Dose Non Ionizzante trasferita nel componente (NIEL, NonIonizing Energy Loss)

Gli effetti possono essere accumulati nella vita o transitori.

# La visione dell'industria sull'elettronica per applicazioni in ambiente spaziale: strategie di protezione alle radiazioni

## Ionizzazione

L'ambiente dovuto alla dose accumulata è rappresentato dalla Dose Depth Curve . Essa fornisce la dose totale in funzione dello spessore dello schermo normalmente rapportato alla densità dell'alluminio.

Buona parte delle radiazioni presenti nell'ambiente spaziale viene assorbita dagli schermi interposti tra lo spazio ed i componenti. Pertanto per valutare l'effettiva dose di radiazioni che incide sui componenti occorre esaminare gli effetti dello schermo.

Tutte le masse che circondano il componente possono essere una protezione.

Lo schermo ha un'efficacia che dipende dalla densità del materiale che lo costituisce, tanto più il materiale è denso, tanto più lo schermo è efficiente.

# La visione dell'industria sull'elettronica per applicazioni in ambiente spaziale: strategie di protezione alle radiazioni

## Regole di progettazione

- la predizione delle degradazioni deve essere calcolata in tempo per influenzare il progetto elettrico e meccanico (layout)
- la selezione dei componenti può aumentare la vita del satellite (p.e. non aumentare il peso degli schermi o la complessità )
  - Evitare di mettere componenti sensibili su carte che guardano l'esterno del satellite
  - Posizionare i componenti sensibili vicini tra loro per avere una mutua protezione e posizionare l'unità che li contiene vicino ad elementi strutturali
  - Il minimo peso di schermi è ottenuto da piccoli schermi locali con alta densità(per esempio angolo solido largo sotteso da una piccola superficie di massa ridotta)

# La visione dell'industria sull'elettronica per applicazioni in ambiente spaziale: strategie di protezione alle radiazioni

## Trade off fra peso dello schermo e livello di resistenza alle radiazioni (1/2)

Per missioni geostazionarie di vita in orbita, oggi tipicamente di 15 anni, il controllo del livello di tolleranza alle radiazioni dei componenti è molto critico

⇒ **Requisito : Livello minimo di resistenza alle radiazioni**

Per componenti con un livello di resistenza alle radiazioni minore ai 7 Krads è impossibile definire uno schermo sufficiente per permettergli di sopravvivere per la missione desiderata.

Anche con uno schermo spesso è difficile raggiungere livelli di dose accettabili. Un componente con un livello di resistenza alle radiazioni più elevato può sopravvivere nell'ambiente spaziale ed il suo maggior costo può essere bilanciato da quello dovuto alla riduzione del peso e/o quindi del raggiungimento della vita in orbita.

# La visione dell'industria sull'elettronica per applicazioni in ambiente spaziale: strategie di protezione alle radiazioni

## Trade off fra peso dello schermo e livello di resistenza alle radiazioni (2/2)

Le misure alternative che possono essere intraprese per permettere ai componenti elettronici di sopravvivere la missione in orbita sono:

- Posizionamento
- Schermo locale
- procurement

Quello che lascia la massima flessibilità nel progetto è ovviamente il 'procurement'. In questo caso la risoluzione del problema è delegata al componente stesso ma costringe spesso ad utilizzare un particolare costruttore limitando quindi la possibilità di comprare il componente nei tempi e nei costi richiesti.

La definizione del progetto è quindi basata sul trade-off delle tre possibili soluzioni, valutando gli impatti sui tempi, costi e prestazione.

# La visione dell'industria sull'elettronica per applicazioni in ambiente spaziale: strategie di protezione alle radiazioni

## Single Event Phenomena (1/2)

L'interazione degli ioni e/o dei protoni energetici con i componenti sensibili può causare diversi tipi di fenomeni. I principali sono:

- **SEU** = Disturbo che impatta una cella logica, la risposta può essere un soft error cioè un cambiamento di un bit ⇒ **effetto transitorio non distruttivo**
- **SEL** = fenomeno che avviene nei componenti CMOS BULK O EPI ( correnti elevate al di sopra della tolleranza del dispositivo) ⇒ **effetto distruttivo**
- **SEB** = fenomeno che avviene nei transistori Power MOSFET a canale N. Il transistor bipolare parassita NPN viene acceso inducendo un cortocircuito tra drain e source ⇒ **effetto distruttivo**
- **SEGR** = fenomeno che avviene nei transistori Power MOSFET quando  $V_{GS} < 0$  V per quelli a canale N e  $V_{GS} > 0$  V per quelli a canale P in condizione OFF. ⇒ **effetto distruttivo**
- **SET** = fenomeno che avviene nei circuiti integrati bipolari lineari ⇒ **effetto transitorio non distruttivo**

# La visione dell'industria sull'elettronica per applicazioni in ambiente spaziale: strategie di protezione alle radiazioni

## Single Event Phenomena (2/2)

- SEU/SET : non essendo un effetto distruttivo viene richiesto di analizzarne l'effetto e di calcolare la frequenza di occorrenza il cui impatto comunque deve essere valutato sulle prestazioni richieste all'unità.
- SEL : essendo un evento distruttivo i componenti utilizzati devono essere insensibili a questo evento almeno fino alla energia richiesta dai requisiti di programma.
- SEB : stesso requisito del SEL, in questo caso comunque applicare una condizione di polarizzazione adeguata ( $V_{ds} < 50\%$  del valore massimo) garantisce la non occorrenza del fenomeno.
- SEGR : stesso requisito del SEL, in questo caso comunque applicare una condizione di polarizzazione adeguata ( $V_{gs} \leq 0$  V per MOSFET canale P e  $V_g \geq 0$  per canale N) che garantisce la non occorrenza del fenomeno.

# La visione dell'industria sull'elettronica per applicazioni in ambiente spaziale: strategie di protezione alle radiazioni

## Displacement Damage

Un semiconduttore esposto a radiazioni è soggetto a danni dovuti a dislocazioni nel volume, legati al flusso sia di protoni che di elettroni. Quindi va valutato se i componenti sono in grado di sopravvivere al flusso delle particelle durante tutta la missione. I componenti sensibili sono essenzialmente i componenti Bipolari e Optoelettronici. Per i componenti MOS questo effetto può essere ignorato perché la soglia di sensibilità è molto alta. La degradazione dei parametri elettrici dovuti al Displacement viene quindi aggiunta alla degradazione dovuta alla Dose totale.

# La visione dell'industria sull'elettronica per applicazioni in ambiente spaziale: strategie di protezione alle radiazioni

## Politica di Radiation Assurance

THALES ALENIA SPACE attua la seguente politica di Radiation Assurance

1. Selezione e caratterizzazione dei componenti verso :
  - Total Dose
  - Displacement Damage
  - Single Event Phenomena
2. Calcolo della dose ionizzante e non ionizzante depositata e calcolo dei SEE rates
3. Verifica congruenza con livelli di resistenza alle radiazioni di programma
4. WCA a livello equipaggiamento
5. Azioni correttive

# La visione dell'industria sull'elettronica per applicazioni in ambiente spaziale: strategie di protezione alle radiazioni

## Valutazione dell'hardness alla dose ionizzante

### 1. Esame dei test disponibili

1. I test debbono essere fatti in accordo con le normative Europee ( Total Dose Steady State Irradiation Test method ESA-ESCC-no.22900) e USA ( MIL-HDBK-883F)
2. i componenti testati sono costruiti con la stessa tecnologia/maschera/wafer fab dei componenti utilizzati nelle unità flight
3. Le condizioni di test devono essere peggiori o uguali a quelle dell'applicazione
4. i componenti testati devono avere un date code o diffusion lot in accordo al criterio riportato nella tabella 1 definita in base alla sensibilità alle radiazioni della tipologia dei componenti ed alla variazione di risposta da un lotto ad un altro
5. Il test è eseguito almeno fino al livello della dose ricevuta all'interno del satellite nella posizione peggiore incluso il margine specifico del programma

# La visione dell'industria sull'elettronica per applicazioni in ambiente spaziale: strategie di protezione alle radiazioni

TABLE 1 : Device category with Test Criteria

| FAMILY                | MOS / BiCMOS  |              |             | BIPOLAR       |              |             | Sample Size |
|-----------------------|---------------|--------------|-------------|---------------|--------------|-------------|-------------|
|                       | Test Criteria | Test Method  | Dose Rate   | Test Criteria | Test Method  | Dose Rate   |             |
| Zener Diodes          |               |              |             | 10            | RD-1         | High or Low | 5           |
| Transistors           | All           | RD-1 or RD-3 | High or Low | 2             | RD-1 or RD-3 | Low         | 5           |
| Analog Ics            | All           | RD-1 or RD-3 | Low (1)     | All           | RD-3         | Low         | 5           |
| Logic Ics             | 1             | RD2 or RD3   | Low (1)     | 4             | RD3          | Low         | 5           |
| ASICs, FPGA           | All           | RD2 or RD3   | Low (1)     | All           | RD3          | Low         | 2-3         |
| RAM, PROM, Processors | 2             | RD2 or RD3   | Low (1)     | 6             | RD3          | Low         | 2           |
| Optoe., CCD,          | All           | RD2 or RD3   | Low (1)     | All           | RD3          | Low         | 5           |

[RD-1] : MIL-STD-883C, METHOD 1019.3

[RD-2] : MIL-STD-883D, METHOD 1019.5 & 1019.6

[RD-3] : « Total Dose Steady State Irradiation Test Method ESA/SCC Basic Specification N° 22900, issue 3, November 1993

# La visione dell'industria sull'elettronica per applicazioni in ambiente spaziale: strategie di protezione alle radiazioni

## Valutazione dell'effetto della dose assorbita

I componenti possono essere utilizzati dopo la verifica che la dose ricevuta incluso il margine di programma è inferiore a quella accettabile dall'applicazione circuitale.

L'analisi circuitale nelle condizioni peggiori (Worst Case Analysis) deve tener conto degli effetti dovuti alla degradazione dovuta alle radiazioni usando i drift misurati durante i test.

# La visione dell'industria sull'elettronica per applicazioni in ambiente spaziale: strategie di protezione alle radiazioni

## CALCOLO DOSE IONIZZANTE: DOSE –DEPTH CURVE

### Parametri di inputs:

orbita del satellite  
condition solari (solar min/max, flares)  
vita in orbita

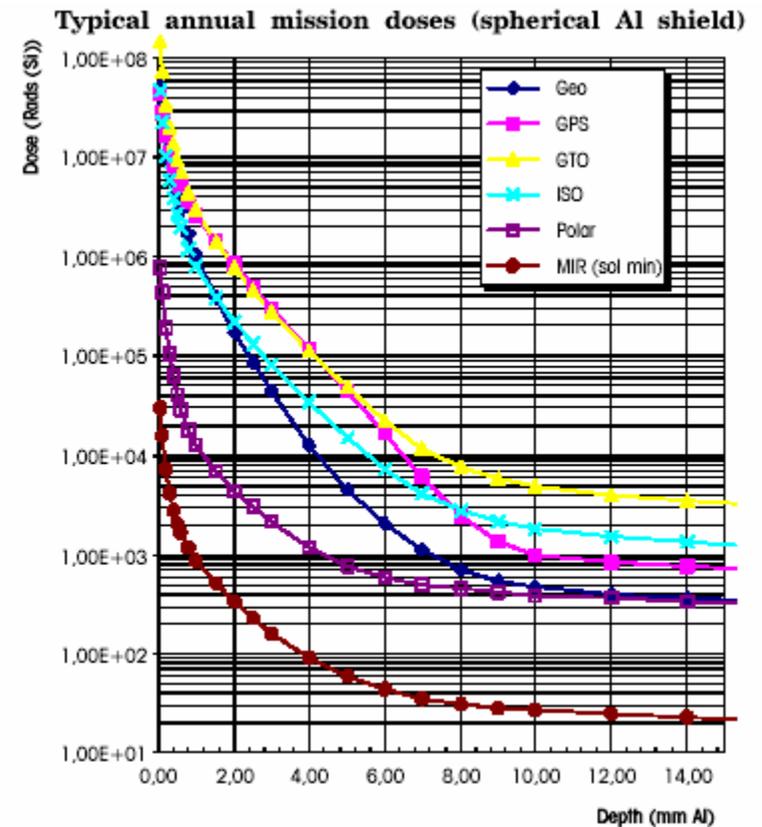
### Output:

Dose-depth curve: dose al centro di una sfera di Al di dato spessore

### Tool

Omere

Di solito la curva dose-depth è riportata nel documento di specifica ambientale



# La visione dell'industria sull'elettronica per applicazioni in ambiente spaziale: strategie di protezione alle radiazioni

## COMPUTO DOSE A LIVELLO COMPONENTE

### Parametri di inputs:

- dose depth curve
- schermo di satellite in Al equivalente
- geometria dell'equipaggiamento
- EEE part list
- densità materiali
- posizione reale dei componenti

### Output:

- Dose ricevuta a livello componente tramite metodo ray tracing
- Analisi più accurata può essere eseguita utilizzando il metodo Montecarlo.

### Tool

Fastrad

# La visione dell'industria sull'elettronica per applicazioni in ambiente spaziale: strategie di protezione alle radiazioni

## TID: AZIONI DI RECUPERO

hardness del componente < dose ricevuta?

### **Azioni di recupero**

modifica del componente/riallocazione sul PCB

shielding locale

incremento spessore pareti dell'equipaggiamento

test di radiazione

Il cliente può richiedere un margine da applicare alla dose ricevuta.

Fondamentale attivare il processo nella fase iniziale del progetto per:

- 1) evitare di riprogettare
- 2) procurare componenti appropriati
- 3) evitare di sovradimensionare l'equipaggiamento

# La visione dell'industria sull'elettronica per applicazioni in ambiente spaziale: strategie di protezione alle radiazioni

## Valutazione dell'hardness al Displacement Damage

### 1. Esame dei test disponibili

1. I test debbono essere fatti in accordo con le normative Europee ( Total Dose Steady State Irradiation Test method ESA-ESCC-no.22900) e USA ( MIL-HDBK-883F)
2. i componenti testati sono costruiti con la stessa tecnologia/mask/wafer fab dei componenti utilizzati nelle unità flight
3. Il test è eseguito almeno fino alla rottura del componente o al livello di fluenza ricevuta all'interno del satellite nella posizione peggiore.
4. Le condizioni di test devono essere peggiori o uguali a quelle dell'applicazione

# La visione dell'industria sull'elettronica per applicazioni in ambiente spaziale: strategie di protezione alle radiazioni

## Valutazione dell'effetto del Displacement Damage

I componenti possono essere utilizzati dopo la verifica che la degradazione dovuta alla dose non ionizzante, incluso il margine di programma, è inferiore a quella accettabile dall'applicazione circuitale.

L'analisi circuitale nelle condizioni peggiori (Worst Case Analysis) deve tener conto oltre che degli effetti dovuti alla degradazione di dose totale anche quella dovuta al displacement.

# La visione dell'industria sull'elettronica per applicazioni in ambiente spaziale: strategie di protezione alle radiazioni

## CALCOLO DOSE NON-IONIZZANTE: DISPLACEMENT CURVE

### Parametri di inputs:

orbita del satellite  
Condizioni solari (solarmin/max,flares)  
vita in orbita

### Output:

displacement curve: conversione del flusso di elettroni/  
protoni in un'unica fluena mono-energetica tipicamente  
1MeV Neutroni o 10MeV protoni

### Tool

OMERE

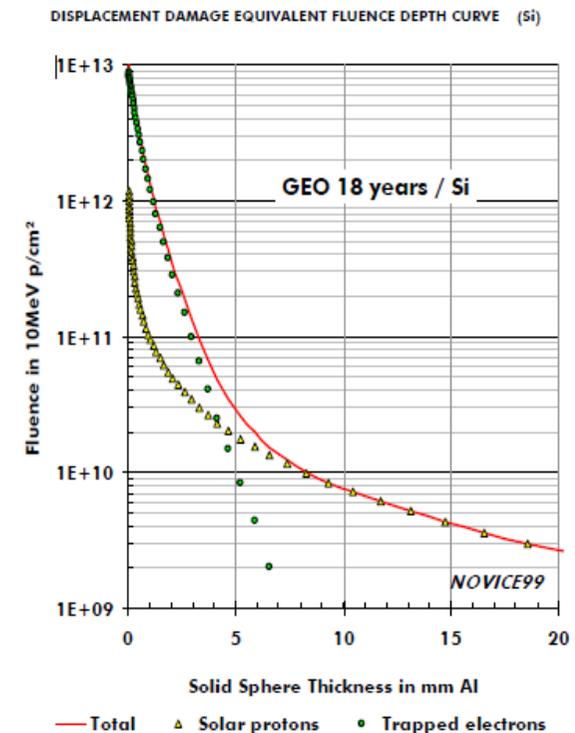


Figure 4.3.1 : Displacement Damage Equivalent Fluence Depth Curve for GEO

# La visione dell'industria sull'elettronica per applicazioni in ambiente spaziale: strategie di protezione alle radiazioni

## COMPUTO DISPLACEMENT A LIVELLO COMPONENTE

### Parametri di inputs:

- displacement curve
- geometria dell'equipaggiamento
- EEE part list
- posizione reale dei componenti

### Output

Dose-Non Ionizzante assorbita dal componente

### Tool

Fastrad

### DD: AZIONI DI RECUPERO

hardness del componente < fluenza ricevuta? → cambio componente

# La visione dell'industria sull'elettronica per applicazioni in ambiente spaziale: strategie di protezione alle radiazioni

## Valutazione dell'hardness al SEP

### 1. Esame dei test disponibili

1. I test debbono essere fatti in accordo con le normative Europee (Single Event Effects Test Method and Guidelines ESCC no 25100 ) o USA (EIA/JESD57)
2. I componenti testati sono costruiti con la stessa tecnologia/mask/wafer fab dei componenti utilizzati nelle unità flight
3. Le condizioni di test devono essere peggiori o uguali a quelle dell'applicazione
4. Il test è eseguito almeno fino alla rottura del componente o al verificarsi dell'evento da analizzare

# La visione dell'industria sull'elettronica per applicazioni in ambiente spaziale: strategie di protezione alle radiazioni

## Valutazione dell'effetto al SEP

I componenti possono essere utilizzati dopo la verifica dei criteri definiti per tipologia di fenomeno

# La visione dell'industria sull'elettronica per applicazioni in ambiente spaziale: strategie di protezione alle radiazioni

## SEE: REQUISITI SUI COMPONENTI

Tre classi principali sono identificate, secondo la seguente definizione:

### **LET<sub>th</sub> > 60 MeV·cm<sup>2</sup> / mg per SEU, SEL, SEB, SEGR, SEDR**

Le parti EEE sono considerate non sensibile ai fenomeni indotti dagli ioni pesanti / protoni.

### **15 MeV·cm<sup>2</sup> / mg < LET<sub>th</sub> < 60 MeV·cm<sup>2</sup> / mg per SEU, SEL, SEB, SEGR, SEDR**

Le parti EEE sono considerati sensibile ai fenomeni indotti dagli ioni pesanti, ma non indotti dai protoni. L'occorrenza degli eventi sui componenti deve essere calcolata in base al LET Spectrum ed i loro effetti sul circuito e sull'equipaggiamento devono essere valutati.

### **LET<sub>th</sub> < 15 MeV·cm<sup>2</sup> / mg**

Le parti EEE sono considerati sensibili ai fenomeni indotti dagli ioni pesanti e protoni. L'occorrenza degli eventi su componenti deve essere calcolato come la somma di quello indotto dagli ioni pesanti e di quello indotto da protoni (MeV). L'effetto SEP sul circuito e sull'equipaggiamento deve essere valutato.

# La visione dell'industria sull'elettronica per applicazioni in ambiente spaziale: strategie di protezione alle radiazioni

## CALCOLO SEE RATE – LET SPECTRUM

### Parametri di inputs

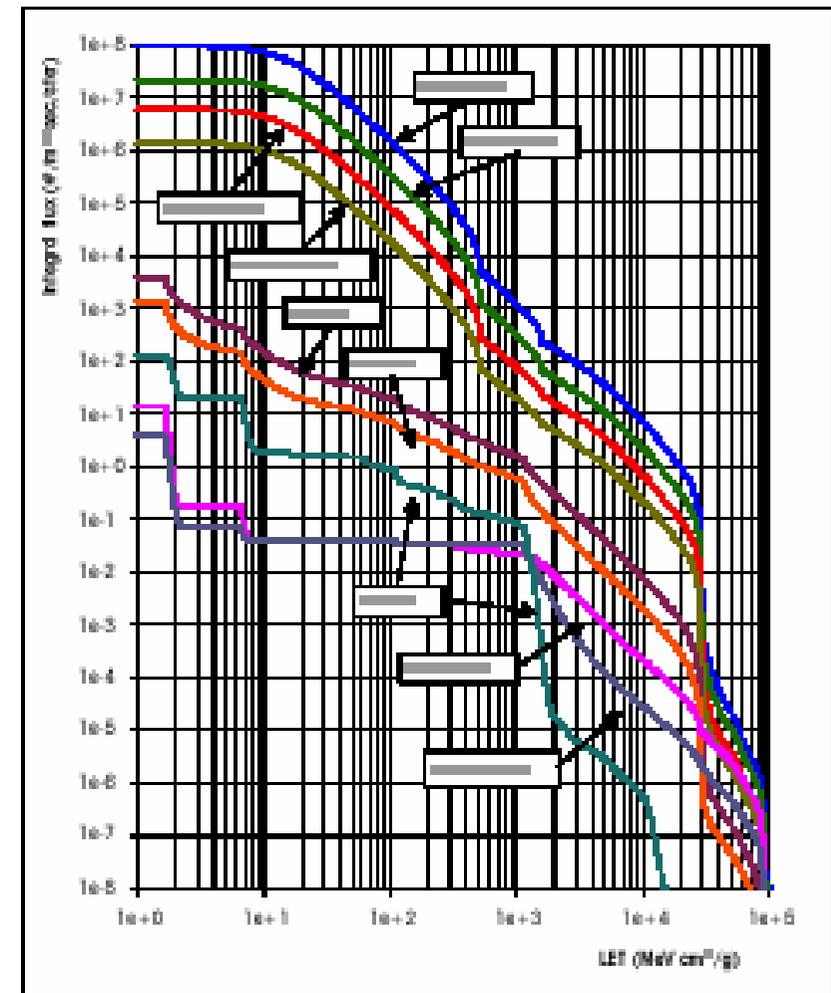
- orbita del satellite
- condizioni solari (solar min/max,...)
- schermo del satellite
- caratteristiche intrinseche dei componenti

### Output

- LET spectrum
- Computo SEE rate

### Tool

- OMERE



# La visione dell'industria sull'elettronica per applicazioni in ambiente spaziale: strategie di protezione alle radiazioni

## SEE: TECNICA DI MITAGAZIONE DEGLI EFFETTI

### Single Event Upset

TRM - Tripla Ridondanza  
Detezione dell'errore & codice di correzione  
Scrubbing

### Single Event Transient

Analisi circuitale per verificare l'impatto dell'evento transitorio sulla performance: filtro

### Single Event Latch-up

Protezione a livello circuito ( limitatore di corrente)  
Tecnologia Immune

### Single Event Burn-out / Gate Rupture

Regole di De-rating

# La visione dell'industria sull'elettronica per applicazioni in ambiente spaziale: strategie di protezione alle radiazioni

## Conclusione

E' stato presentato l'approccio definito da THALES ALENIA SPACE per consentire ai componenti elettronici per apparecchiature spaziali di sopravvivere all'ambiente spaziale.

A seguito della valutazione della fisica dei problemi dovuti alle particelle e l'analisi degli effetti indotti, è stata definita una politica di Radiation Assurance che fornisce sia requisiti quantitativi (livello minimo di resistenza ai fenomeni) che criteri di progettazione (protezioni meccaniche ed elettriche). Inoltre viene definito anche il processo di valutazione dell'ambiente spaziale per supportare la progettazione del satellite