



Galileo Avionica

Space & Electro-Optics Business Unit

**Effetti delle radiazioni su celle solari
per applicazioni spaziali**

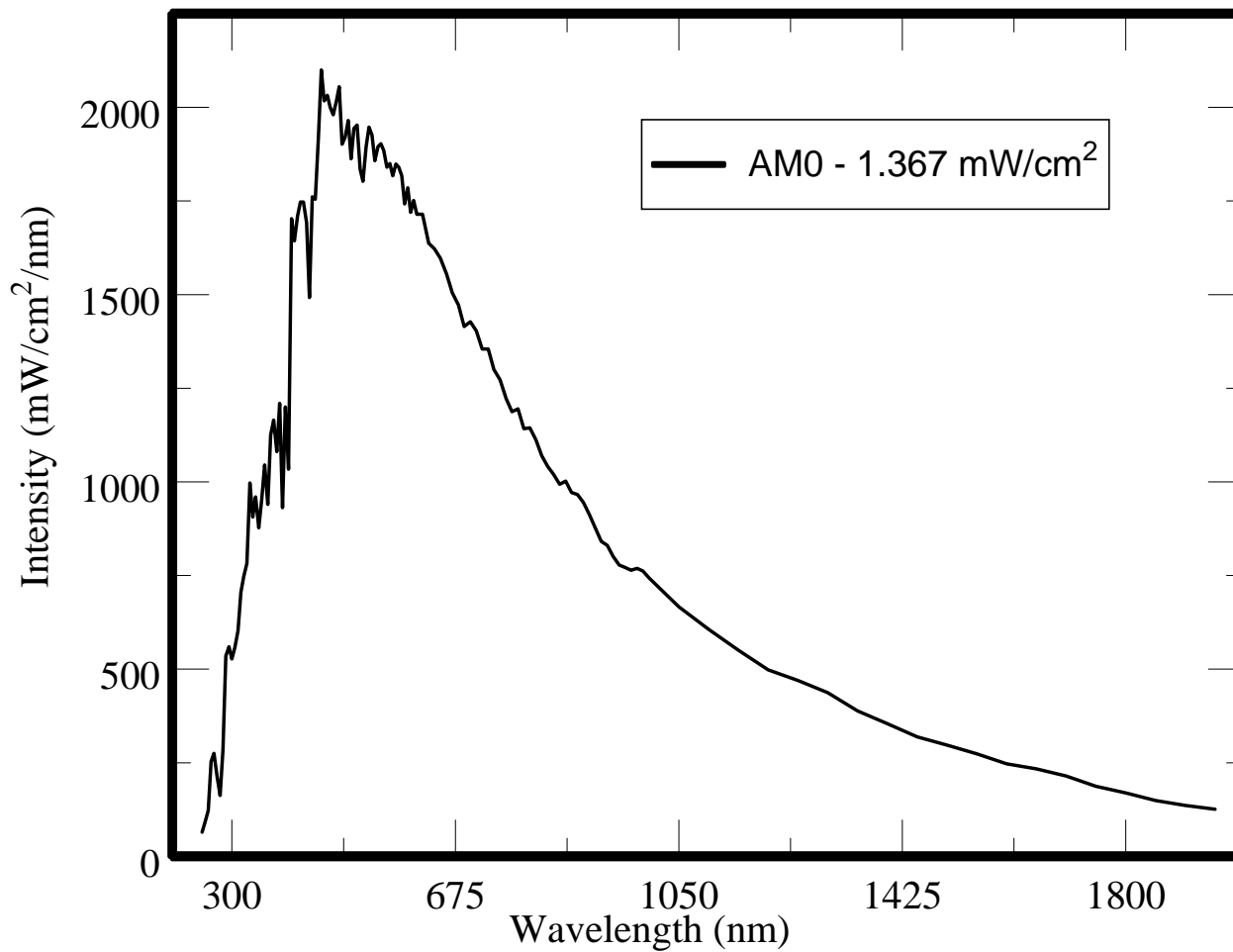
Padova 5-04-2005

A Finmeccanica Company

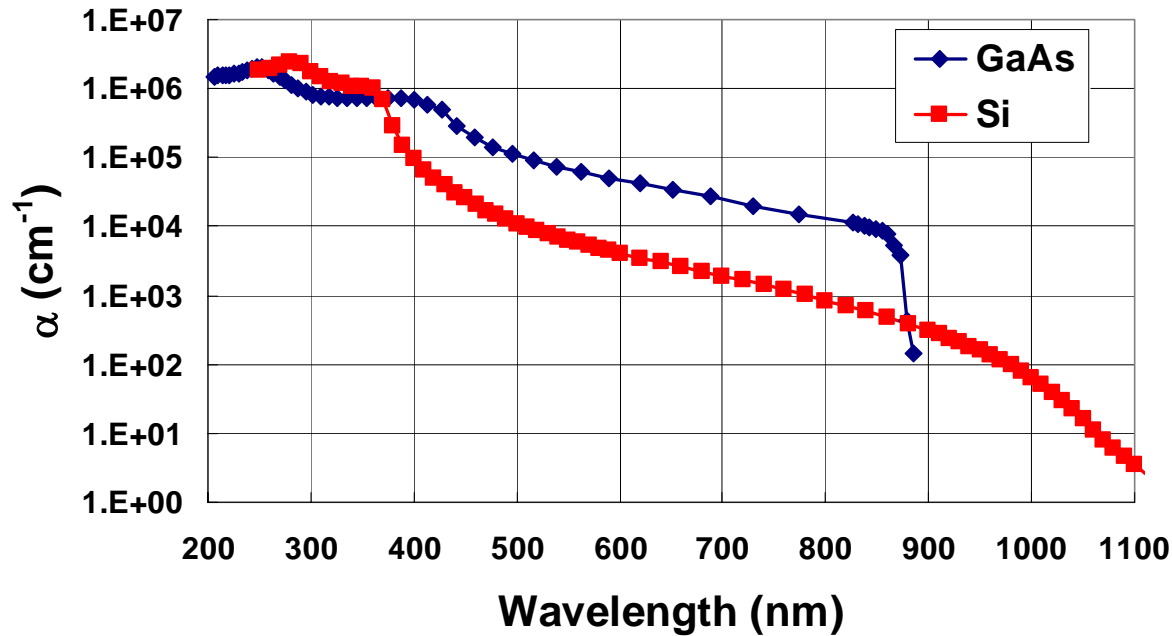
AGENDA

- Descrizione di un generatore solare per utilizzo spaziale
 - Fotogenerazione
 - Principali tipologie di celle solari
 - Esempi di generatori solari – Galileo Avionica heritage
- Descrizione dell'ambiente operativo
- Meccanismi di degrado
- Modelli per la previsione delle caratteristiche “fine vita”
 - JPL
 - NRL
- Test di caratterizzazione a terra
- Ringraziamenti

Spettro solare

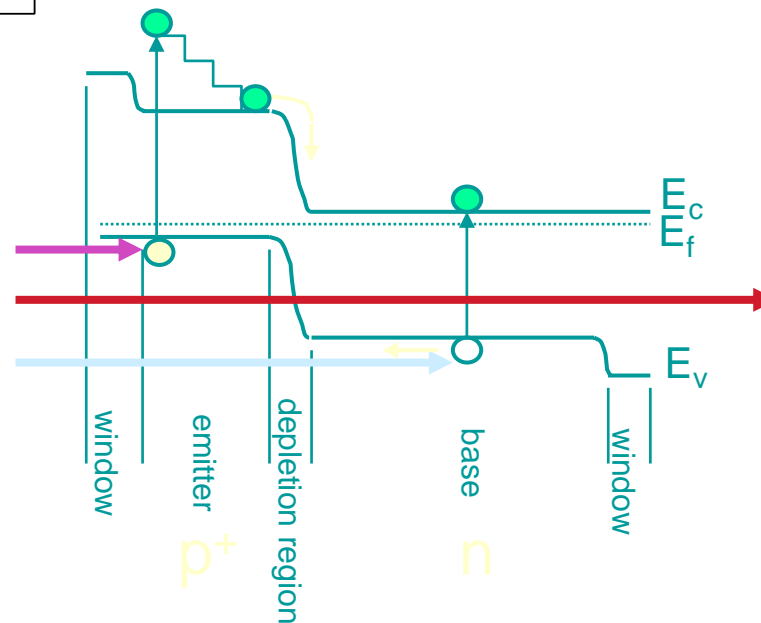
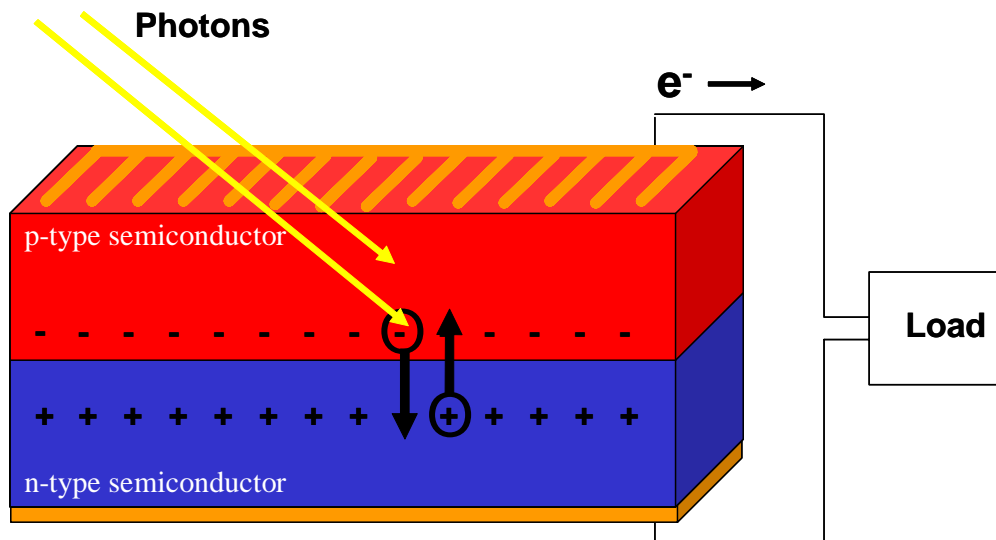


Spettri d'assorbimento di Si e GaAs



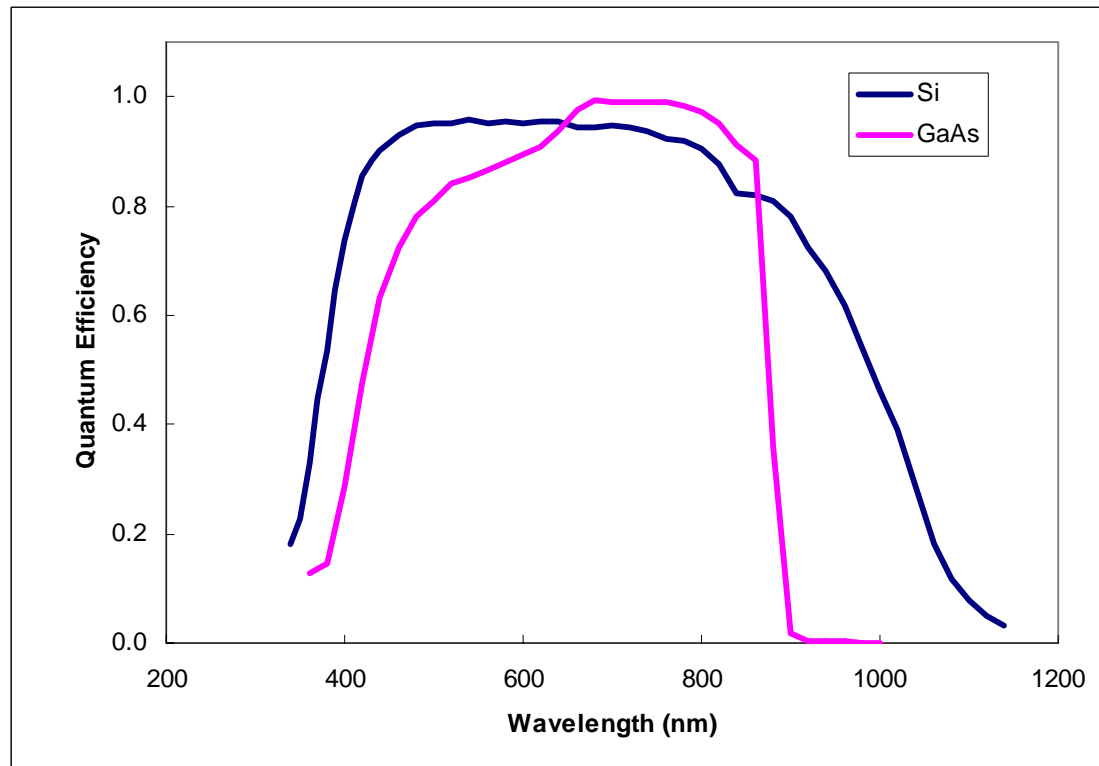
- Il Si ha dominato sia il mercato terrestre che spaziale dagli inizi fino alla metà degli anni '90.
- Il GaAs, a partire dagli anni '90, è diventato una scelta obbligata per aumentare l'efficienza di conversione

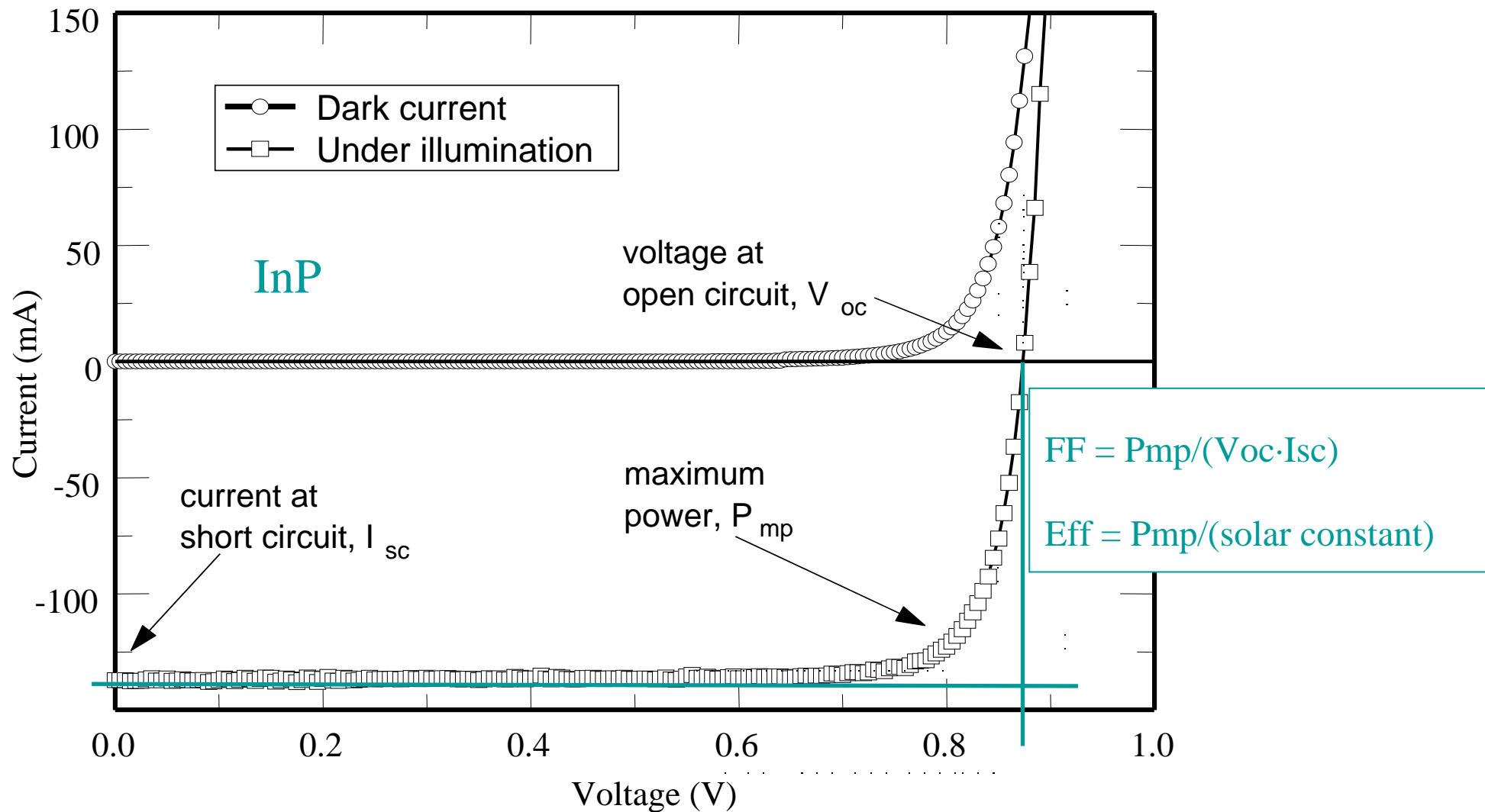
Giunzione P-N



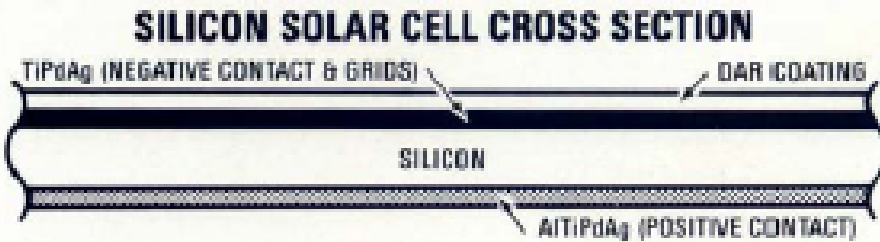
Efficienza di conversione

- Risposta della cella solare alla luce monocromatica: quantum efficiency/risposta spettrale
- Quantum efficiency = numero di coppie elettrone-lacuna per fotone

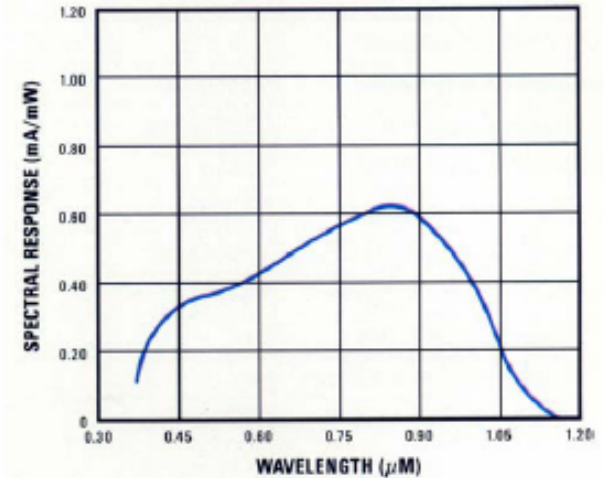




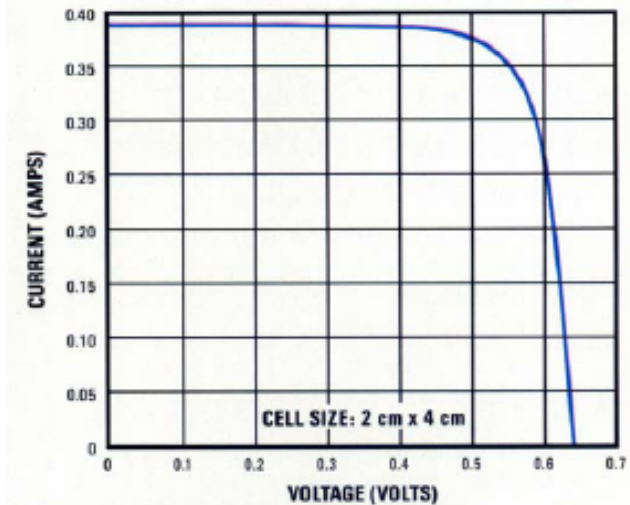
Principali tipologie di celle solari Silicio monocristallino



Spectral Response

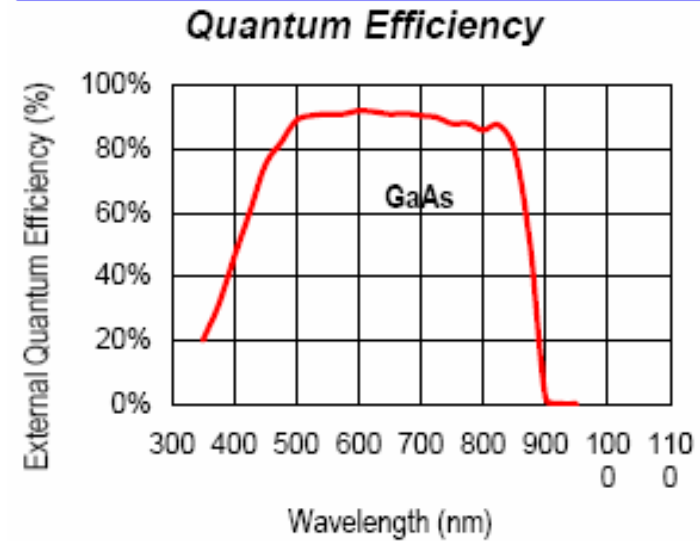
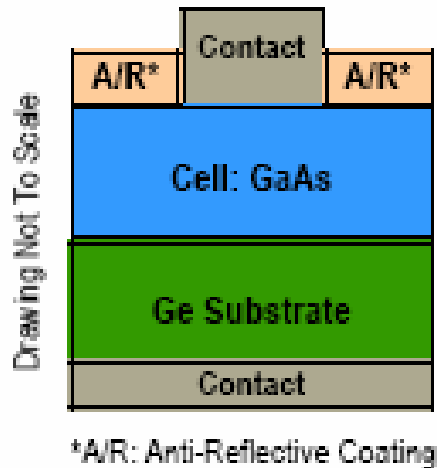


Typical I-V Characteristic Curve AM0 Sunlight (135.3 mW/cm²), 28°C



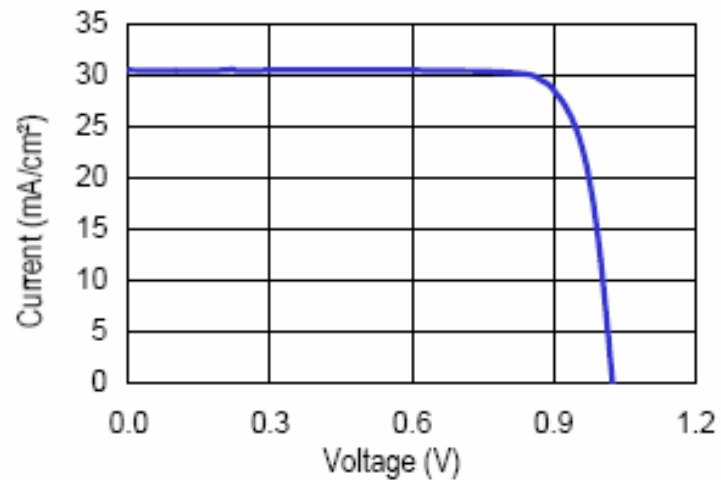
Principali tipologie di celle solari
Arseniuro di Gallio singola giunzione

$E_g = 1.42 \text{ eV}$



Typical I-V Characteristic Curve

AMO (135.3 mW/cm²), 28°C Bare Cell



Descrizione di un generatore solare per utilizzo spaziale

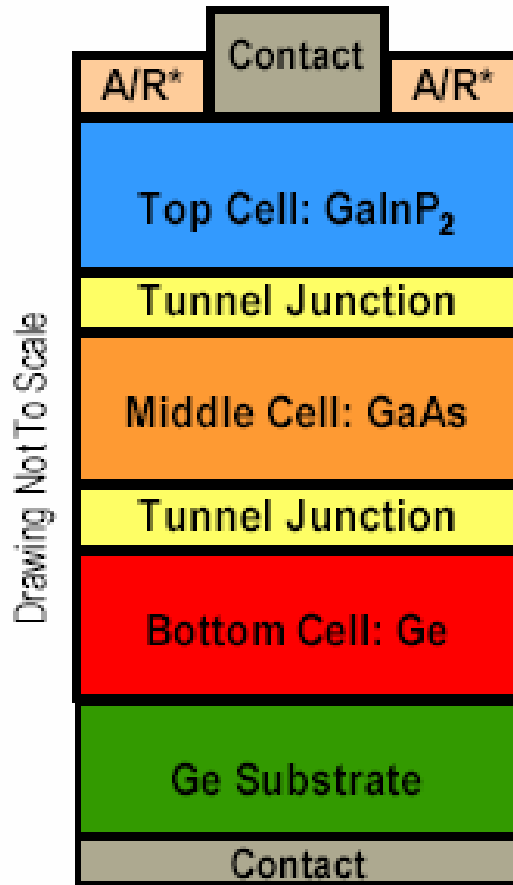
Principali tipologie di celle solari
Arseniuro di Gallio multi giunzione

$E_g=1.88 \text{ eV}$

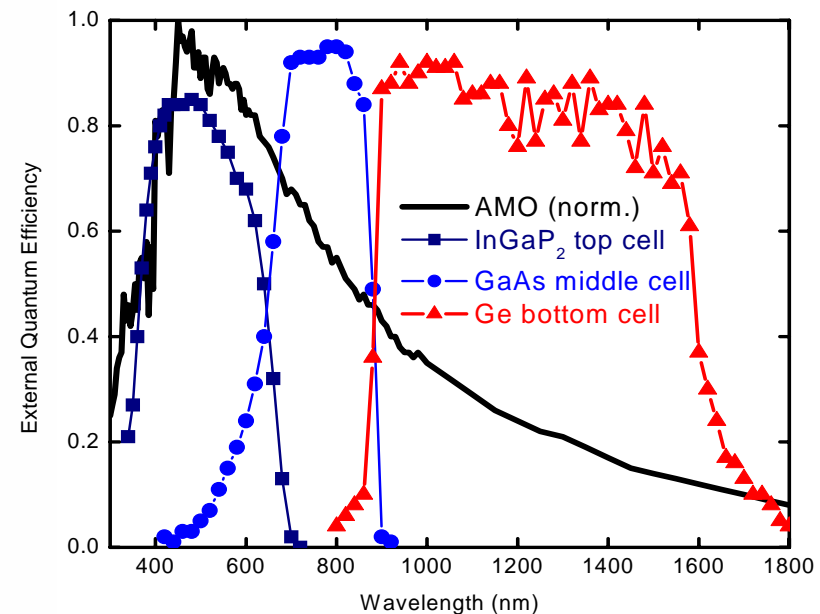
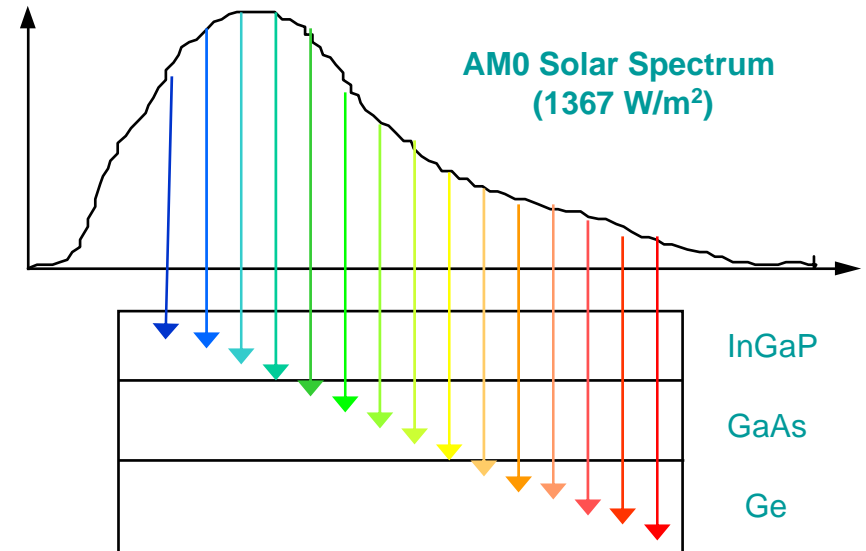
$E_g=1.42 \text{ eV}$

$E_g=0.65 \text{ eV}$

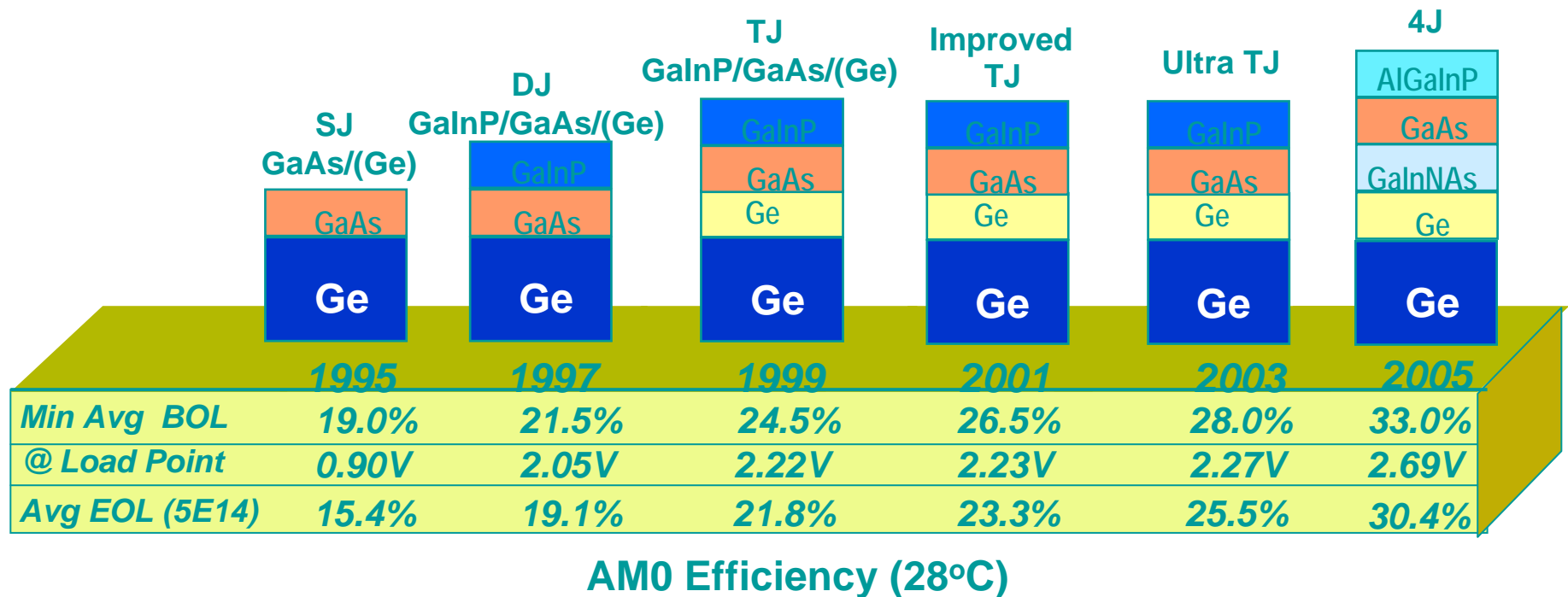
Best - ~30%
Lot avg - ~27%



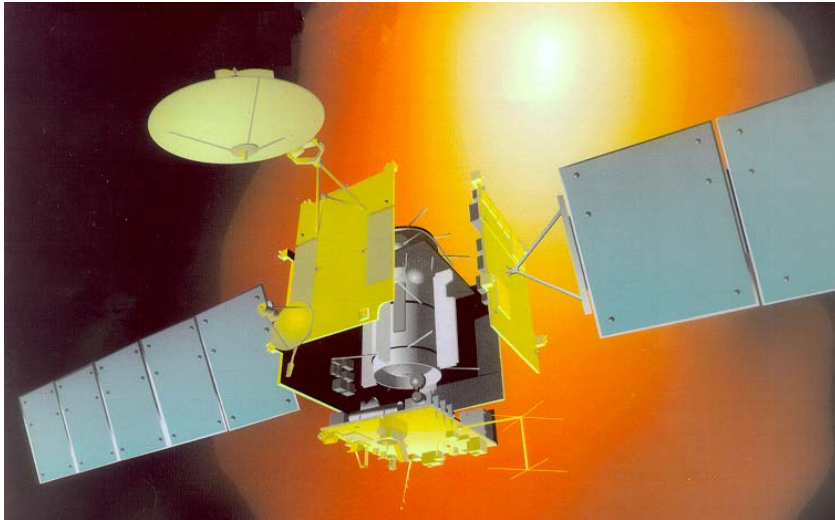
*A/R: Anti-Reflective Coating



Principali tipologie di celle solari
GaAs trend tecnologico



ROSETTA



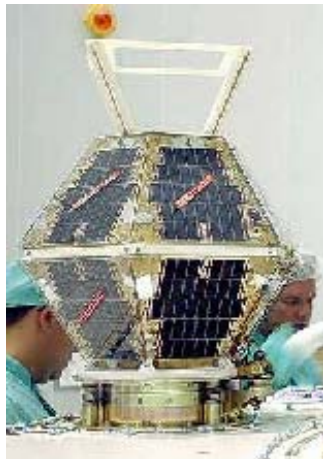
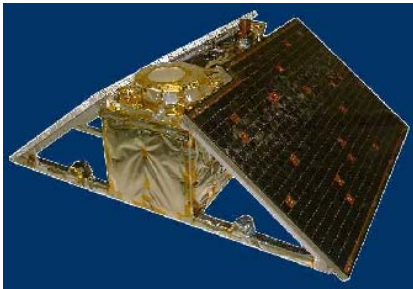
MISSIONE

- Scientifica, rendez-vous con una cometa
- Data di lancio: Gennaio 2004

DESCRIZIONE DEL SOLAR ARRAY

- Due ali dispiegabili di cinque pannelli ciascuna per un'area totale di 62 m²
- 23240 Hi-ETA/NR LILT celle solari corrispondenti a 12 KW di potenza installata
- Protezione da ESD per mezzo di vetri conduttivi

Micro and small satellites



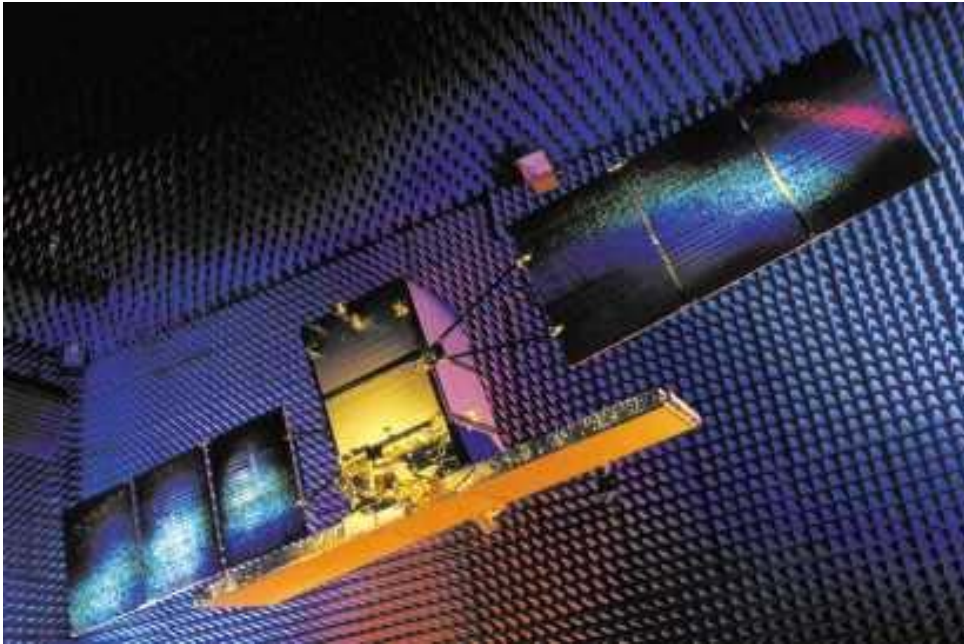
MISSIONE

- LEO osservazione e scientifiche
- Orbita 400 – 1000 Km
- Lifetime fino a 3 anni

DESCRIZIONE DEI SOLAR ARRAYS

- Body mounted, CFRP/Al honeycomb
- Celle solari al GaAs singole e multi giunzione
- Potenza installata da 50 a 500 W

COSMO SkyMed

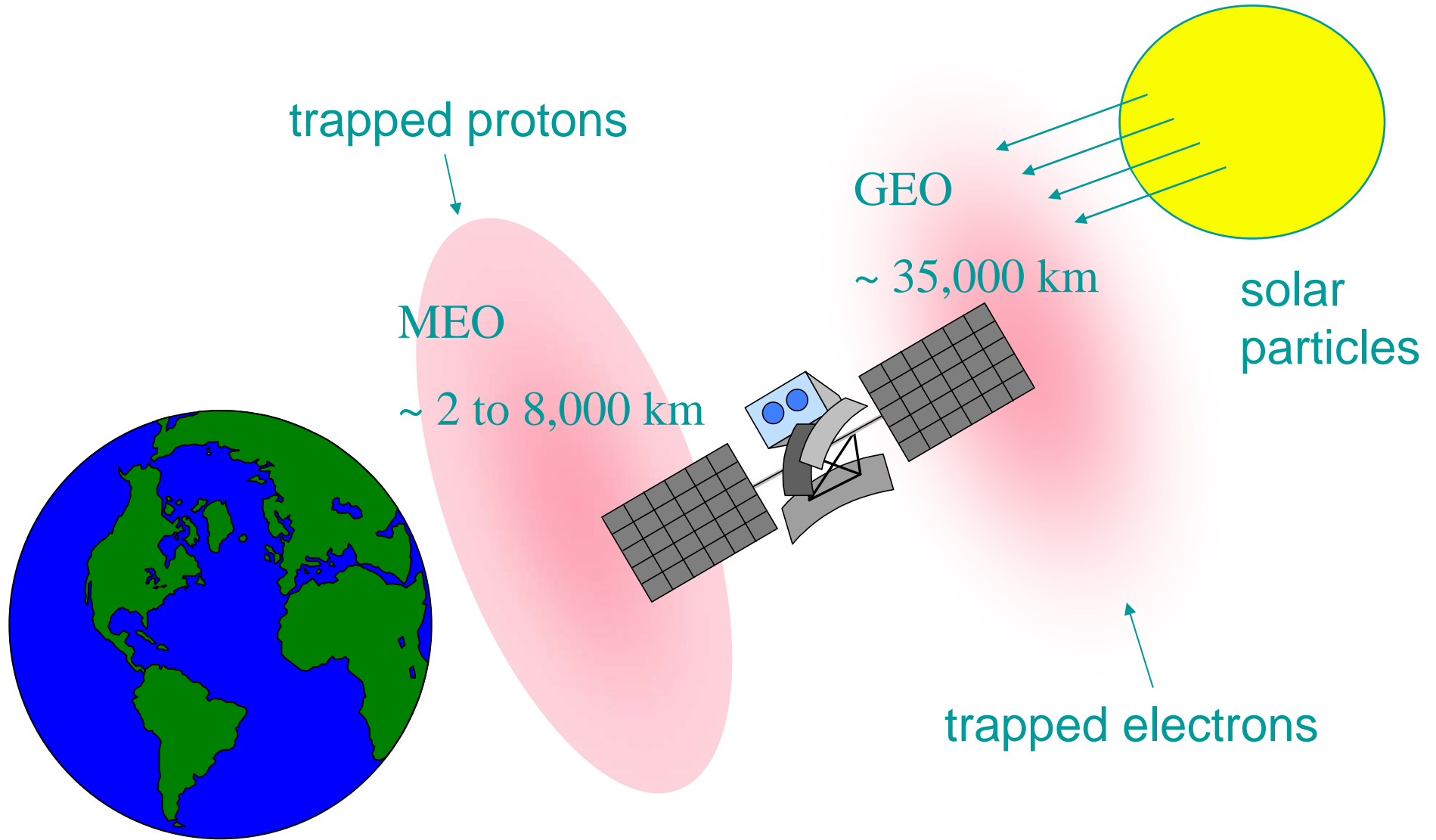


MISSIONE

- LEO osservazione della terra
- Orbita 600 Km
- Inclinazione 98°
- Lifetime 5 anni

DESCRIZIONE DEL SOLAR ARRAY

- Due ali costituite da quattro pannelli ciascuna, CFRP/Al honeycomb
- Celle solari 8x4 cm² InGaP/GaAs/Ge
- Potenza installata 5000 W
- Efficienza di conversione 27%



Parametri che possono influenzare le performance a fine vita

- Ambiente operativo
 - Fasce di Van Allen
 - Particelle (protoni ed elettroni) con energia compresa tra ≈ 0 eV e centinaia di MeV
- Sensibilità delle celle solari ai danni da radiazione
 - Funzione dell'energia
 - Funzione dei fattori schermanti (vetrino protettivo, pannello solare e/o satellite)
 - Funzione della tecnologia
 - Materiali impiegati (Si, GaAs, ...)
 - Profondità della giunzione

Cenni storici

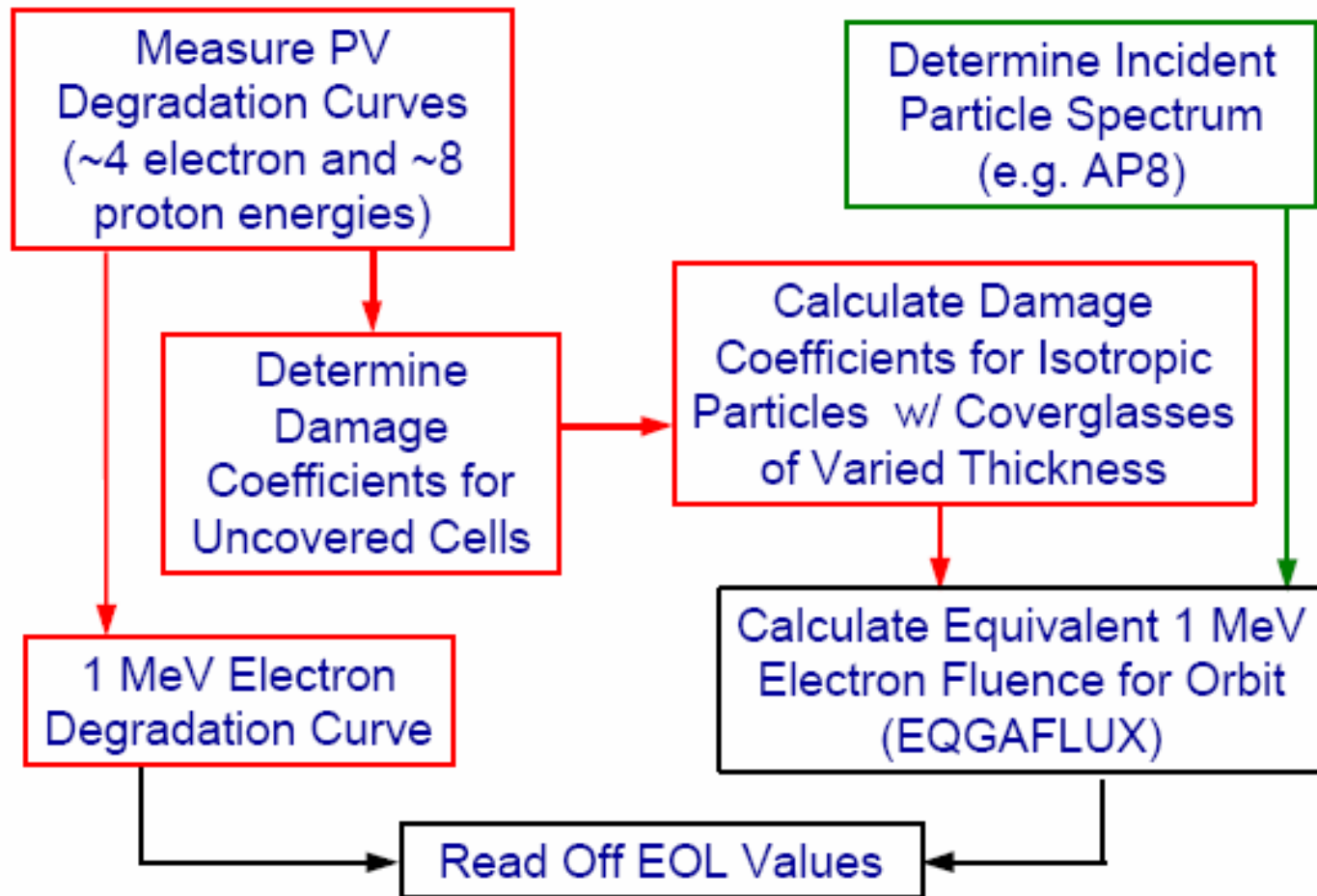
- 1982: JPL rende pubblico il metodo per il calcolo del danno equivalente
 - Programma FORTRAN (EQFLUX)
 - INPUT: - spettro di radiazione incidente
- RDC determinati sperimentalmente
 - OUTPUT: - fluence equivalente pesata sul fattore di schermo
 - Aggiornamenti 1984 e 1989 per l'introduzione di nuove celle al silicio e GaAs
 - Aggiornamento 1996 per l'introduzione di EQGAFLUX dedicato espressamente alle GaAs realizzate con tecnologia LPE.
 - Aggiornamento 2000 con i nuovi dati (RDC) relativi alle celle GaAs DJ e TJ (tecnologia MOCVD)

- 1993: NRL (Naval Research Lab) propone un approccio alternativo basato sul calcolo del NIEL (precedentemente utilizzato per i rivelatori di particelle)

Approccio analitico

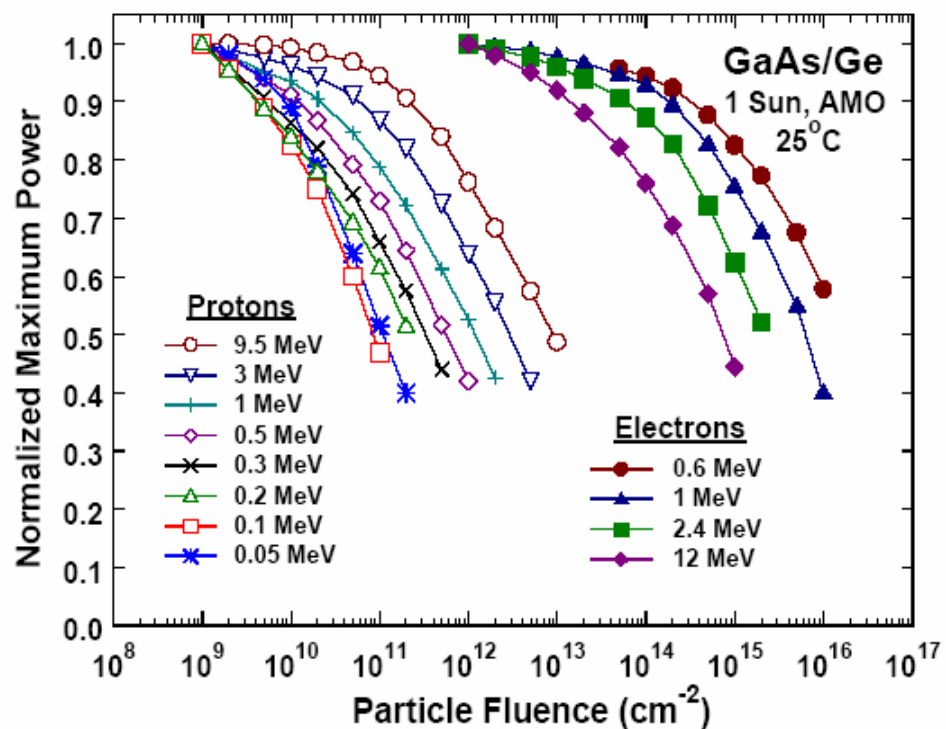
1. Trovare la correlazione tra l'energia delle particelle incidenti e il coefficiente di degrado
2. Specificare l'ambiente operativo di missione (flussi di particelle in funzione dell'orbita e della durata della missione)
3. Combinare i punti 1 e 2 per arrivare all'espressione del coefficiente di degrado pesato sull'intera vita operativa
4. Definire un corrispondente test a terra alla "fluence equivalente" per verificare sperimentalmente il degrado del componente
 - Storicamente la scelta è caduta su test fatti con elettroni di energia 1MeV

JPL Equivalent Fluence Method



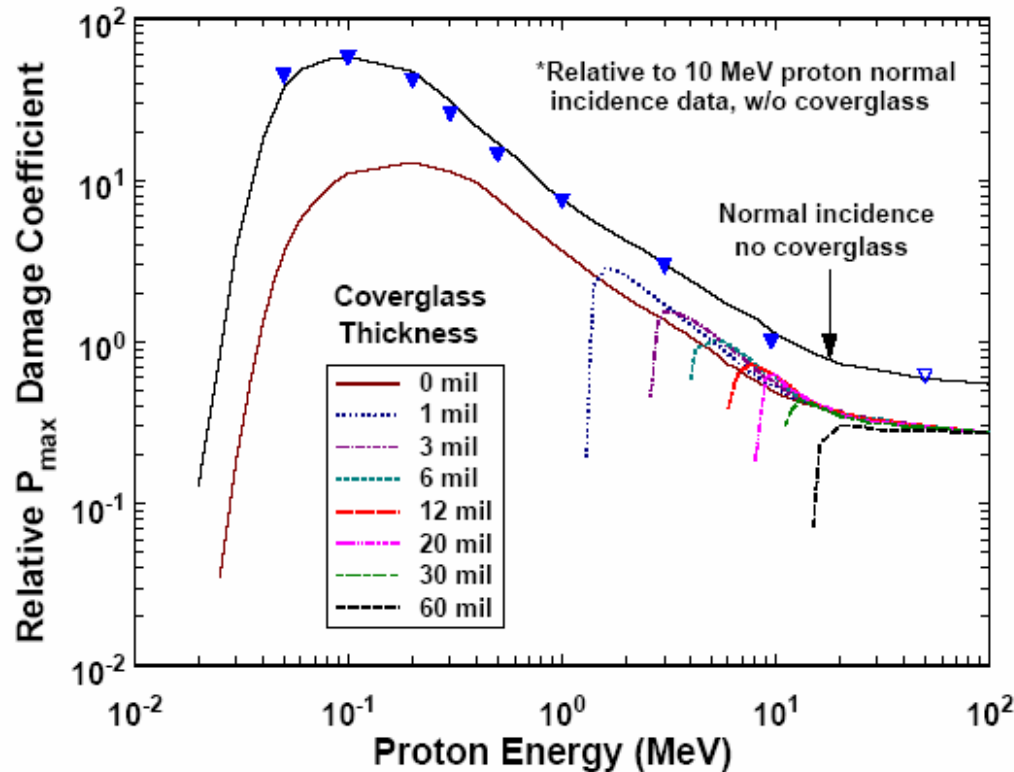
Descrizione del metodo JPL

1. Misura delle curve di degrado per ogni parametro elettrico tramite irraggiamento (monodirezionale)
 - 4 energie di elettroni per 8 fluences distinte
 - 8 energie di protoni per 8 fluences distinte
 - Più di 1000 caratterizzazioni I/V!!!



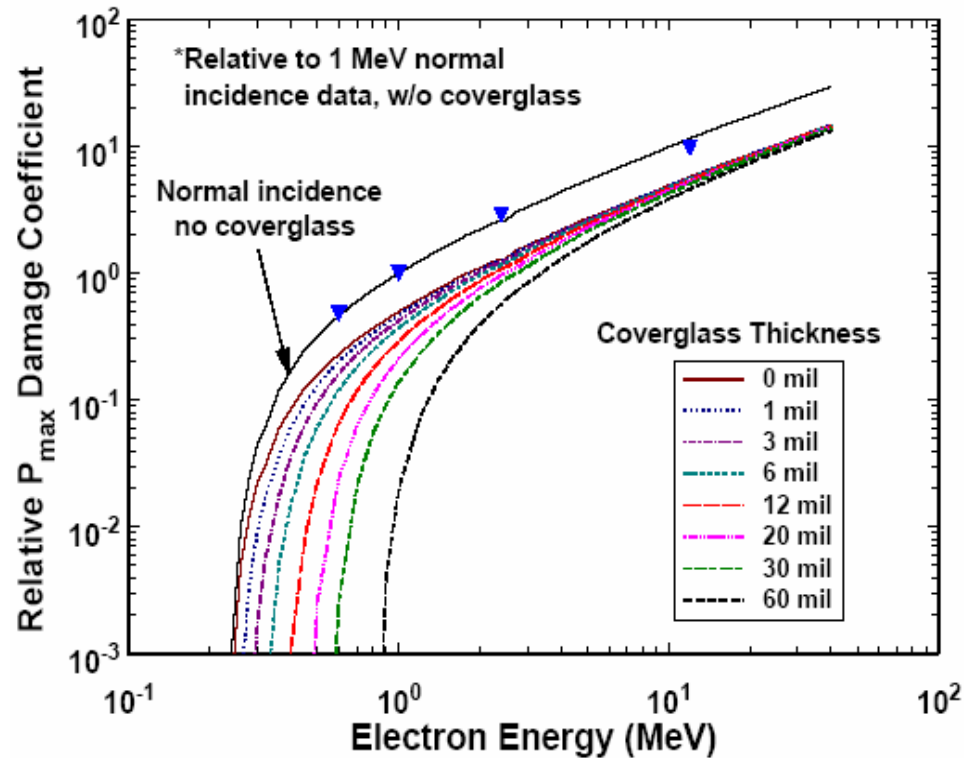
Descrizione del metodo JPL

2. Misura delle fluence critiche (degrado corrispondente al 75%) e determinazione degli RDC
3. Adattamento per irraggiamento omnidirezionale (moltiplicare per 1/2)
4. Introduzione dell'effetto schermo



Descrizione del metodo JPL

- Determinazione delle fluence equivalenti in combinazione con dati di orbita e vita



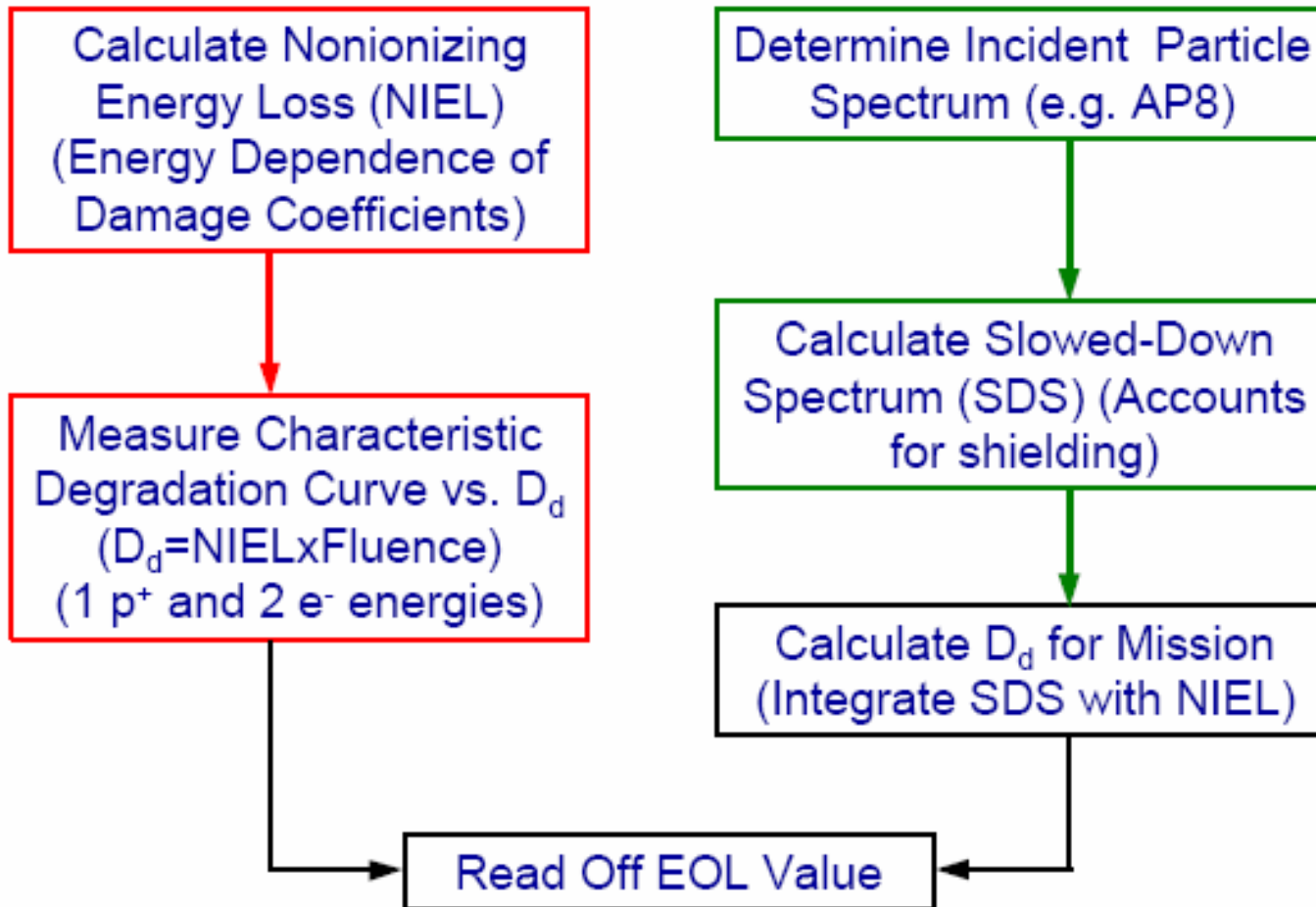
$$\Phi_{1\text{MeV electron, electrons}} = \int \frac{d\Phi_e(E)}{dE} D_e(E) dE$$

$$\Phi_{1\text{MeV electron, protons}} = D_{pe} \int \frac{d\Phi_p(E)}{dE} D_p(E) dE$$



Total fluence

NRL Displacement Damage Dose Method

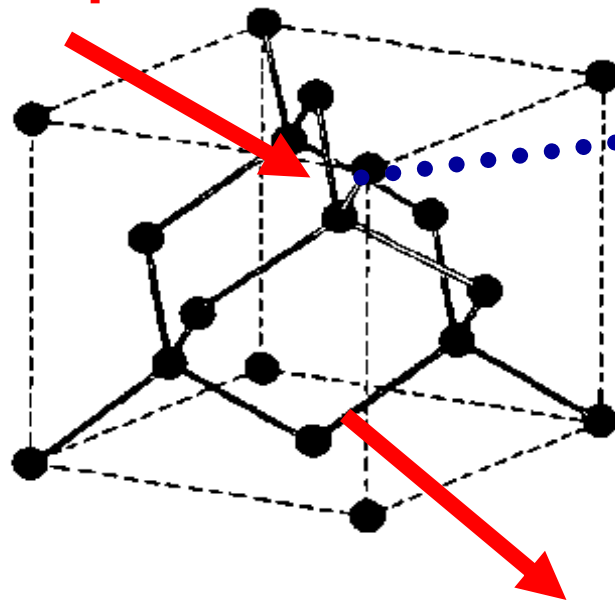


Descrizione del metodo NRL

1. Calcolare la dipendenza degli RDC dall'energia delle particelle incidenti (tramite il NIEL) tramite il calcolo della sezione d'urto differenziale (DXS funzione del materiale e della particella incidente)

- Principali tipi di interazioni

Incident particle



**Primary
knock-on
atom (PKA)
or recoil**

DAMAGE

Scattered particle

PROTONS

Coulombic
Nuclear Elastic
Nuclear Inelastic

ELECTRONS

Coulombic

SIMPLE DEFECTS

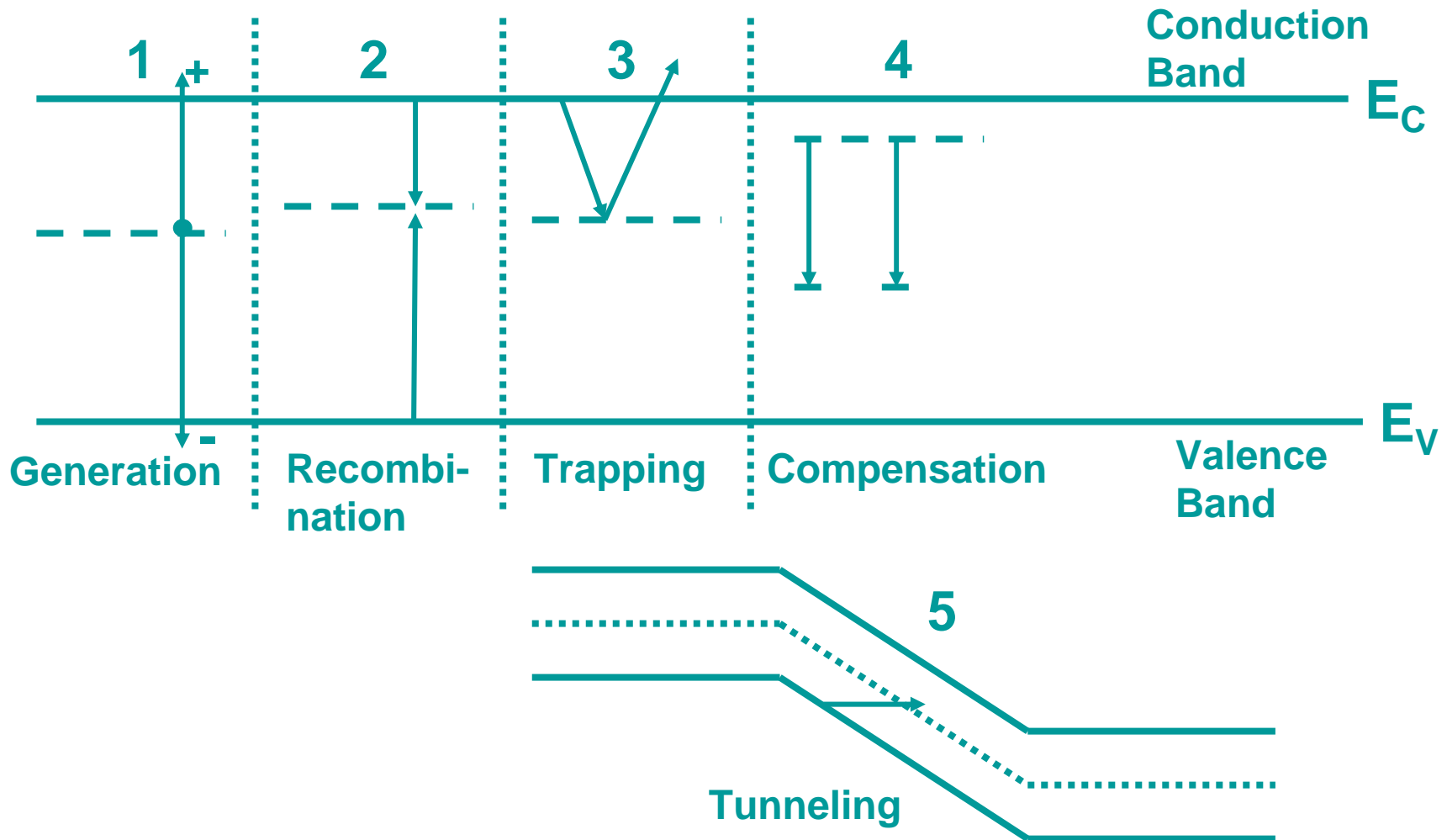
Vacancies
Interstitials

COMPLEXES

Vacancy/impurity
Multi-vacancy/interstitial
Clusters

Descrizione del metodo NRL - Meccanismi di degrado

Effetti dei livelli localizzati sulle proprietà elettriche dei semiconduttori

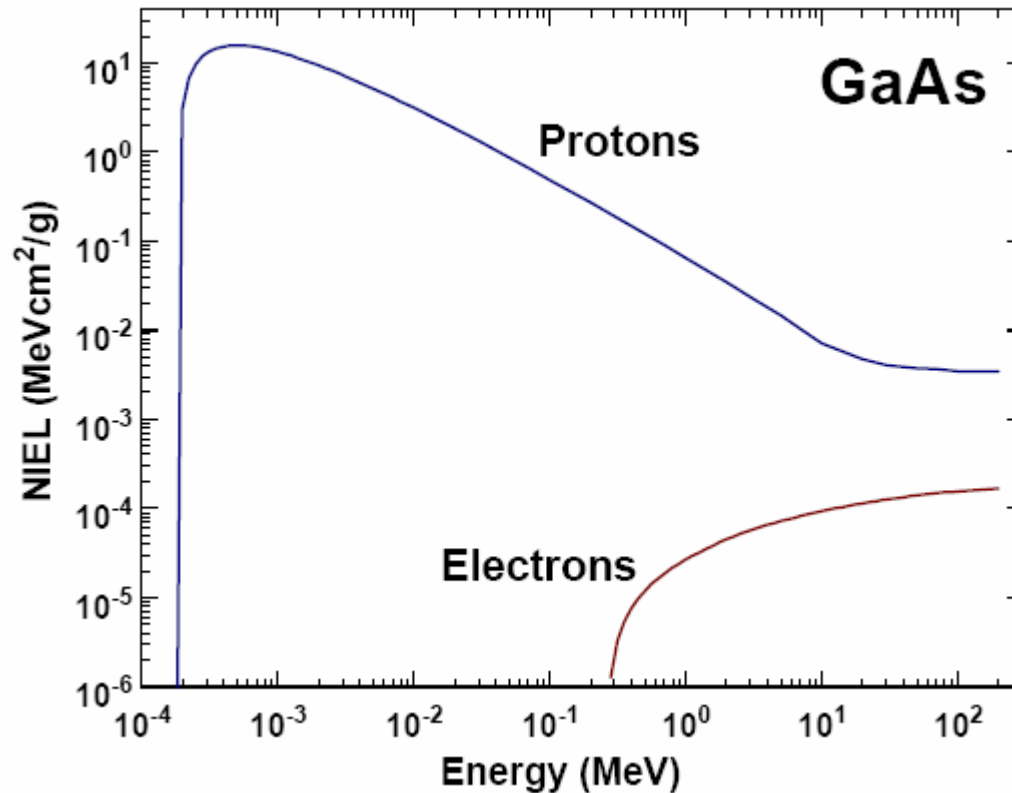


Descrizione del metodo NRL

- Interazione principale dovuta a protoni incidenti
 - Scattering Rutherford (~ 100 eV - ~ 10 MeV)
 - Nucleare elastica (> 1 MeV)
 - Considerando anche l'effetto schermante del vetro protettivo
 - Scattering Rutherford è dominante e il calcolo della DXS è ben consolidato
- Interazione principale dovuta a elettroni incidenti
 - Interazione coulombiana valida per la maggior parte dello spettro incidente
 - Interazioni nucleari significative solo per grandi energie
 - Il calcolo della DXS è fatto nel modo seguente:
 - Valutazione della total recoil energy degli atomi target
 - Applicazione del fattore di Lindhard per correlare gli effetti ionizzanti e non
 - Integrazione del risultato sull'angolo solido

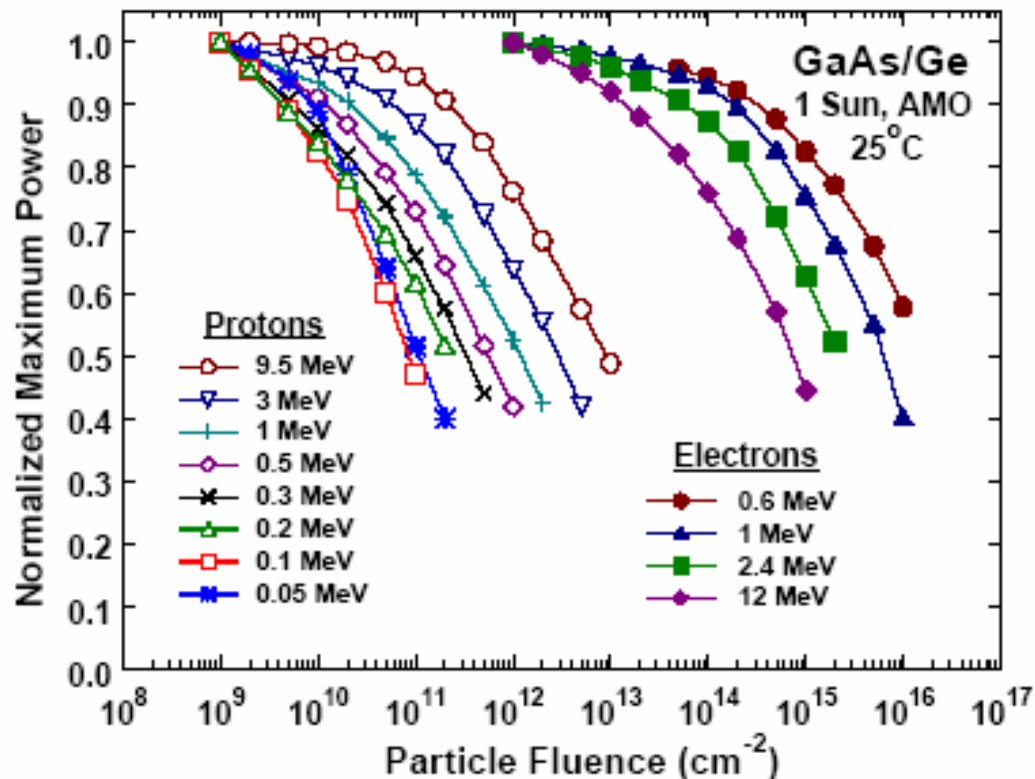
Descrizione del metodo NRL

- Risultati del calcolo del NIEL per protoni ed elettroni



Descrizione del metodo NRL

- L'analisi dei dati sperimentali rivela una sostanziale similarità tra i meccanismi di degrado indotti da particelle di energia differente (shifting dei parametri caratteristici)



- Anomalie solo per basse energie (< 0,1 MeV per i protoni)

Descrizione del metodo NRL

- La “somiglianza” degli effetti delle radiazioni sui parametri tipici fa pensare come possa essere trovata un’espressione che unifichi l’intero approccio alla valutazione del danno
- Questo è il calcolo del coefficiente di Displacement Damage (DD)
 - Per I protoni: tutte le curve collassano su di una singola (anomalia del Si)

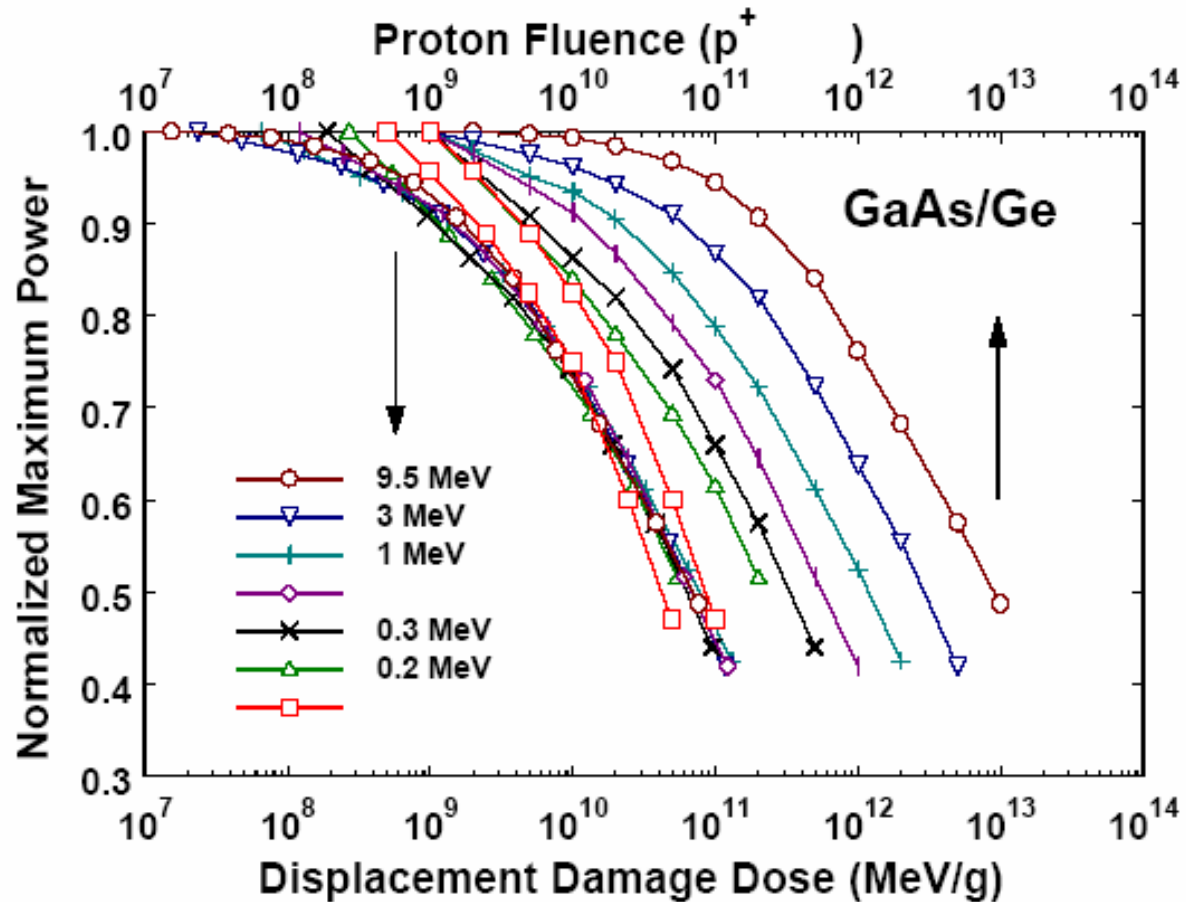
$$D_p = \Phi_p(E) S_p(E) \quad \longrightarrow \quad D_p = \int \frac{d\Phi_p(E)}{dE} S_p(E) dE$$

- Per gli elettroni vi sono dipendenze diverse a seconda che il materiale sia drogato n o p ed è per questo che si deve definire un DD “efficace”

$$D_{e,eff}(1.0) = D_e(E) \left[\frac{S_e(E)}{S_e(1.0)} \right]^{(n-1)} \quad \longrightarrow \quad D_{e,eff}(1.0) = \frac{1}{S_e(1.0)^{n-1}} \int \frac{d\Phi_e(E)}{dE} S_e(E)^n dE$$

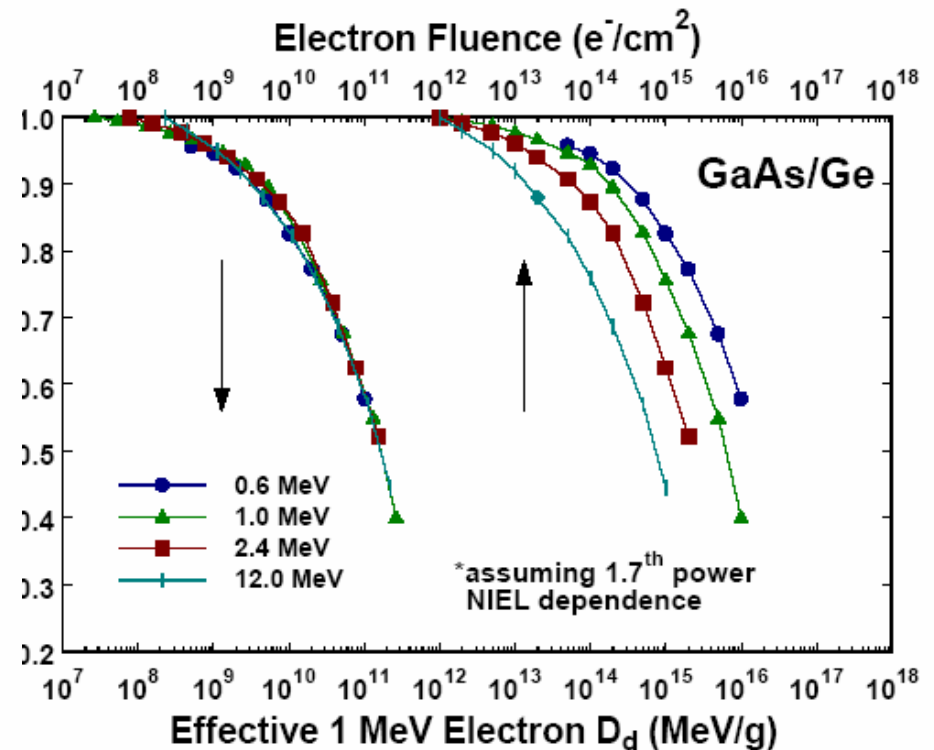
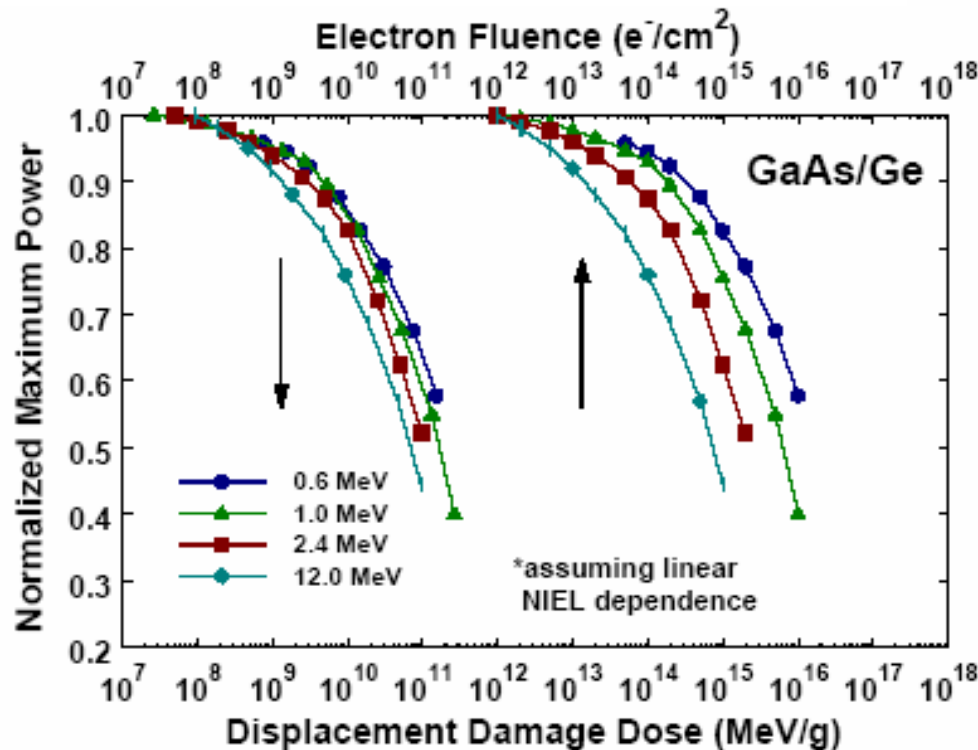
Descrizione del metodo NRL

- Confronto tra i dati sperimentali ricavati per protoni di diverse energie e la curva raffigurante la dose di DD (tutte le curve collassano tranne quelle per protoni di bassa energia)



Descrizione del metodo NRL

- Confronto tra i dati sperimentali ricavati per elettroni di diverse energie e le curve raffiguranti la dose di DD (le curve collassano solo se una dipendenza “quasi” quadratica è assunta)



Descrizione del metodo NRL

- Considerando le dipendenze trovate per il calcolo dei coefficienti di DD possiamo concludere che per essere in grado di fare previsioni sul comportamento in vita delle celle solari servono:
 - Misure fatte a una singola energia di protoni (differenti fluences)
 - Misure fatte su due energie di elettroni a causa della dipendenza non lineare)
- E' possibile trovare una formula empirica che consenta l'espressione dei cosiddetti Remaining Factors in funzione del coefficiente di DD:

$$\frac{P}{P_0} = 1 - C \log \left(1 + \frac{D}{D_x} \right)$$

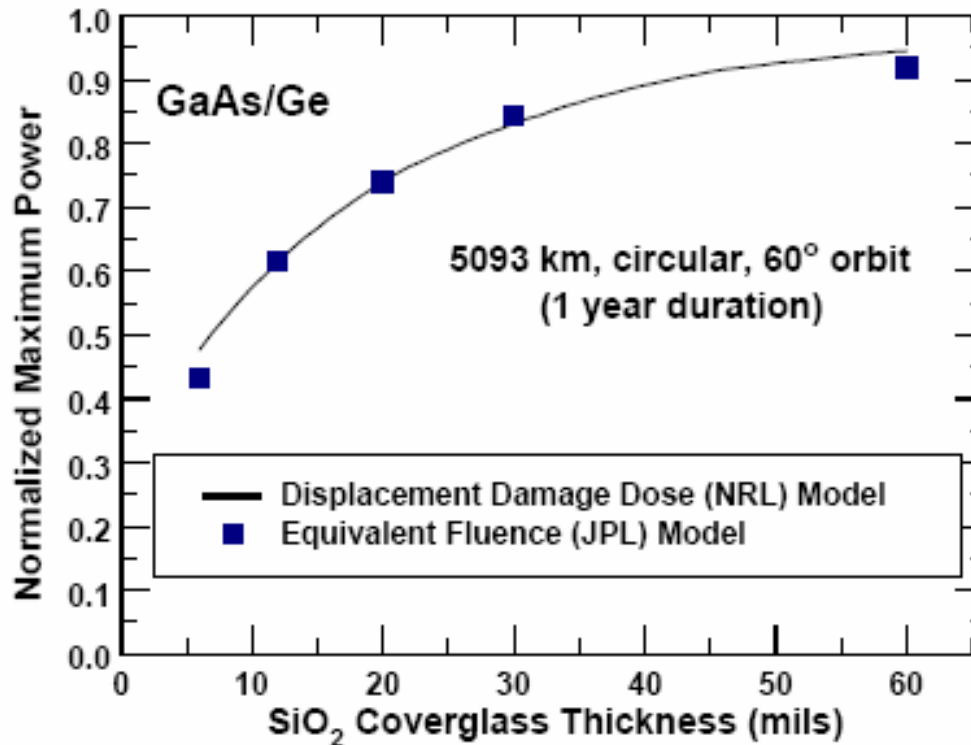
- D che in questo caso è la dose totale effettiva può essere calcolata nel seguente modo:

$$D_{\text{tot}} = D_p + \frac{D_{e,\text{eff}}(1.0)}{R_{ep}}$$

- Dove R_p è un coefficiente che tiene conto della differenza intrinseca degli effetti di protoni ed elettroni

Descrizione del metodo NRL

- Per concludere la valutazione dell'effetto delle radiazioni basta considerare l'effetto schermante del vetro protettivo
- Confronto tra le previsioni del modello JPL e NRL



Pro e contro dei due modelli (JPL vs NRL)

- Pro del modello JPL
 - Buon accordo con i dati in orbita
 - Ottimo per tecnologie consolidate (Si monocristallino film “spesso”)
- Contro del modello JPL
 - Richiede una massa notevole di dati statistici
 - Protoni ed elettroni di diverse energie
- Pro del modello NRL
 - Richiede pochi dati sperimentali per poter essere utilizzato
 - 2 energie di protoni e 1 di elettroni
 - Fornisce dati attendibili per celle basate sulle nuove tecnologie (InP e CIS)
- Contro del modello NRL
 - Nel caso di celle Si film “spesso” non è attendibile

- I test di caratterizzazione a terra sono fondamentali per poter fornire una previsione realistica delle performance a fine vita di un generatore solare
- I campioni da testare devono essere celle solari nude (prive di vetrino protettivo) per non frenare le particelle incidenti
- Il range ottimale di energie utile alla comprensione dei differenti fenomeni di degrado sia per protoni sia per elettroni è tra 1 e 8 MeV
- Le fluences tipiche che coprono il più ampio spettro di missioni spaziali variano tra 10^9 e 10^{13} p⁺/cm² e 10^{12} e 10^{15} e⁻/cm².

- Stephen Taylor – European Space Agency (ESA-ESTEC)
- Robert J. Walters – US Naval Research Laboratory (NRL)
- Galileo Avionica Solar Array team
 - Gwenael Beltrame
 - Mauro Caccivio
 - Raffaella Contini
 - Davide Hazan
 - Fausto Mangiarotti
 - Stefano Riva
 - Francesco Rizzi
 - Luca Vallini
 - Pietro Zanella