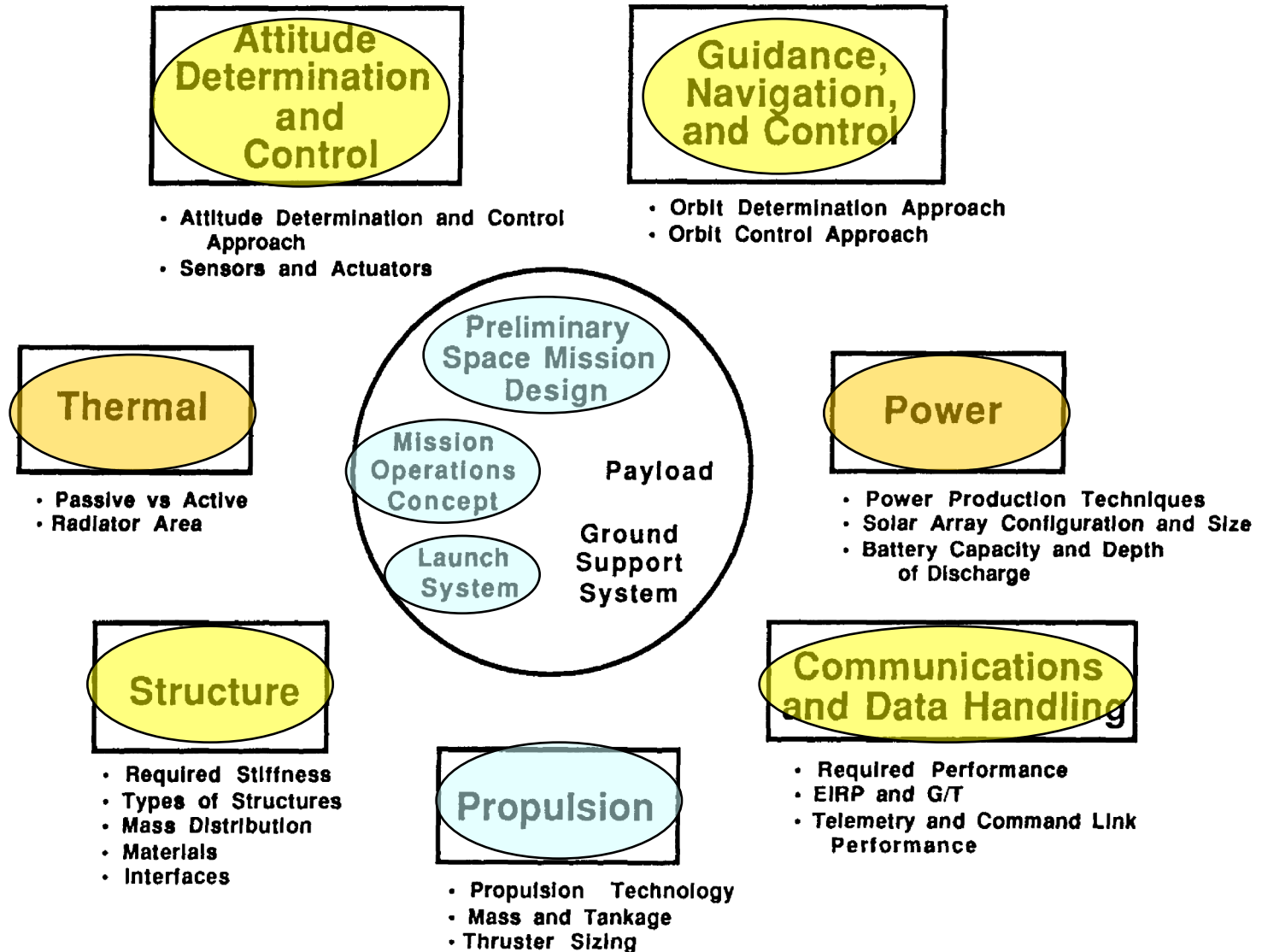


---

# Sistemi di Alimentazione e Termici

# (SOTTO)-SISTEMI



# Sistemi di Alimentazione

---

Il sistema di potenza dev'essere in grado di generare potenza, conservarla, distribuirla, regolarla e controllarla

- Sistemi di Conversione di Energia
  - sorgente di potenza (celle solari, ...)
- Sistemi di Condizionamento e Controllo della Potenza Elettrica
  - regolatori, convertitori, circuiti di controllo, ...
- Sistema di Utilizzazione della Potenza
  - i vari carichi

# Potenze tipiche

---

- Lavatrici: ~ 2000 W
- LCD/plasma TV: 150÷350 W
- Telefonini: 3.6 W
- Satelliti: 500÷2000 W
  - Planck 1630 W
  - AtmoCube ~ 2 W

# Sorgenti / Sistemi di Alimentazione 1/3

---

## ➤ Celle Solari Fotovoltaiche

- radiazione solare

## ➤ Sorgenti Statiche

- sorgenti di calore (decadimento radioattivo / reazioni nucleari) + conversione termoelettrica diretta/processo termo-ionico:  $\varepsilon \sim 5\div 20\%$

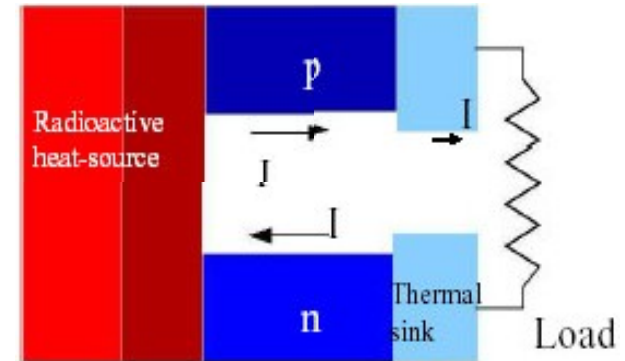
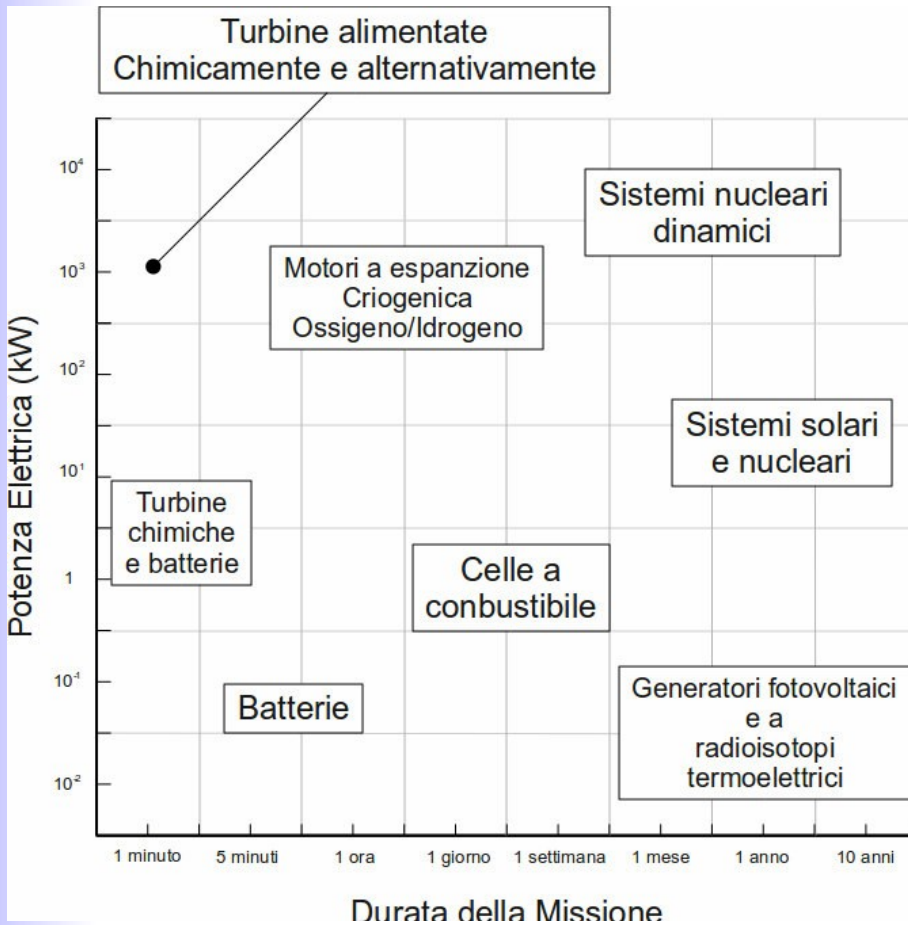
## ➤ Sorgenti Dinamiche

- sorgenti di calore (decadimento radioattivo / reazioni nucleari / energia solare) + macchina termodinamica ciclica (Rankine / Brayton):  $\varepsilon \sim 15\div 35\%$

## ➤ Celle Chimiche

- reazioni di ossidazione (batterie)

# Sorgenti / Sistemi di Alimentazione 2/3



**RTG**

**Radioisotope Thermoelectric Generator**

**Cassini-Huygens 1997**

# Sorgenti / Sistemi di Alimentazione 3/3

---

## ➤ Celle Solari Fotovoltaiche

Convertono la radiazione solare incidente direttamente in energia elettrica durante il **Giorno**

## ➤ Batterie

Accumulano l'energia elettrica prodotta dalle Celle e la rilasciano durante la **Notte**

- @ 400 km      T = 93 min / 56 min *giorno*
- @ 1000 km    T = 105 min / 70 min *giorno*
- @36000 km    T = 1440 min / *stagionale*

+ circuiti  
+ carichi

# Pannelli Solari: componenti

---

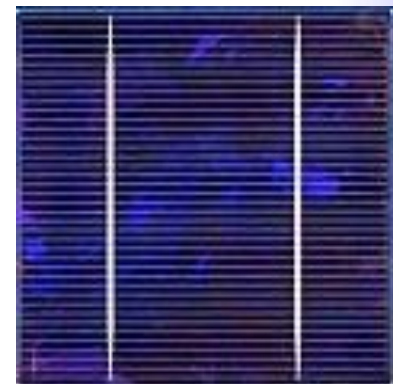
- Celle solari
  - connessioni elettriche fra le celle
  - componenti elettroniche (diodi/resistenze)
  - sub-strato meccanico per le celle
  - meccanismi di spiegamento
  - sistemi di puntamento al Sole
- Sistema di controllo della potenza elettrica
  - regolatori, convertitori, circuiti controllo, batterie
- Sistema di utilizzazione della potenza (carichi)



# Le Celle Solari 1/4

---

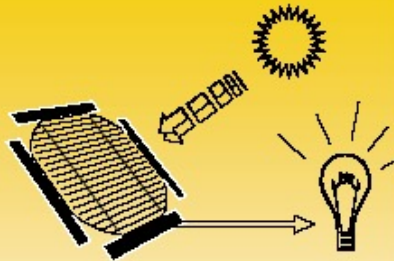
- La cella solare è un dispositivo che, quando illuminata, sfrutta le proprietà di conduzione dei materiali semiconduttori e converte la radiazione solare incidente direttamente in energia elettrica
- È la sorgente di potenza più comune per satelliti in orbita terrestre:
  - facili da realizzare
  - ben conosciute
  - poco costose (silicio) 800-3000 €/W



# Le Celle Solari 2/4

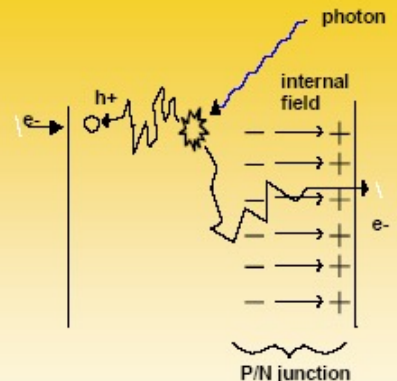
## What Are Solar Cells?

- Thin wafers of silicon
  - Similar to computer chips
  - much bigger
  - much cheaper!
- Silicon is abundant (sand)
  - Non-toxic, safe
- Light carries energy into cell
- Cells convert sunlight energy into electric current- they do not store energy
- Sunlight is the “fuel”



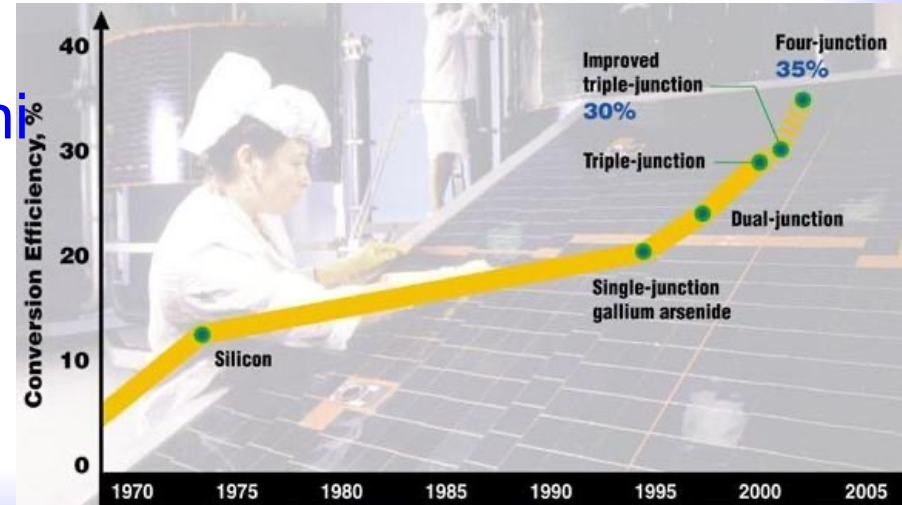
## How Solar Cells Change Sunlight Into Electricity

- Light knocks loose electrons from silicon atoms
- Freed electrons have extra energy, or “voltage”
- Internal electric field pushes electrons to front of cell
- Electric current flows on to other cells or to the load
- Cells never “run out” of electrons



# Le Celle Solari 3/4: Tecnologie

- Quando la luce colpisce la cella solare, viene:
  - in parte riflessa, in parte assorbita e in parte passa attraverso la cella
- Silicio (Si)
  - esperienza spaziale e terrestre, ISS, vasta produzione commerciale, efficienza bassa (15%)
- Arsenurio di Gallio (GaAs)
  - esperienza spaziale (limitata), efficienza elevata (20%)
- Fosfato di Indio (InP)
  - nuove, tolleranti alle radiazioni; produzione non commerciale
- Tripla/Quadrupla Giunzione



# Le Celle Solari 4/4

---

Efficienza  $\eta$  di conversione di energia di una cella solare, definita:

$$\eta = \text{potenza uscita} / \text{potenza ingresso}$$

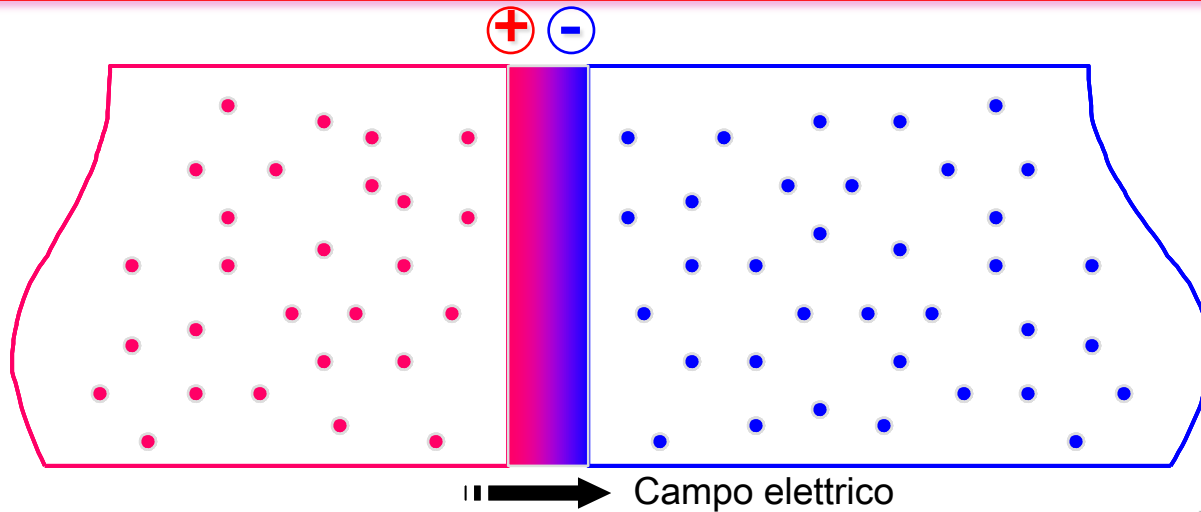
Il pannello solare assemblato è meno efficiente delle singole celle

- assemblaggio: celle applicate su un substrato di alluminio → perdita del 10% della superficie del substrato
- ombra: altre parti del satellite possono oscurare parzialmente i pannelli
- variazioni di temperatura: la temperatura di riferimento per una cella è di  $28^\circ \text{C}$ , la perdita di efficienza è del 0.5% per grado sopra i  $28^\circ \text{C}$



si introduce un fattore di degradamento  $I_d$  (inherent degradation) che tiene conto di questi effetti

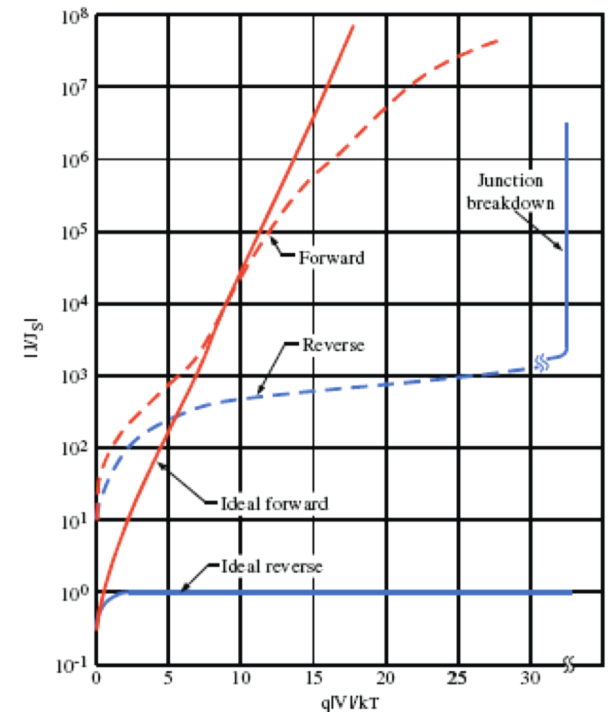
# Giunzione P-N



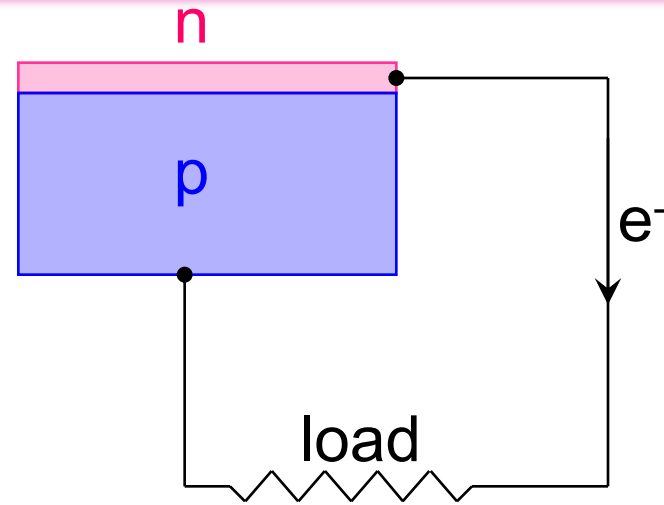
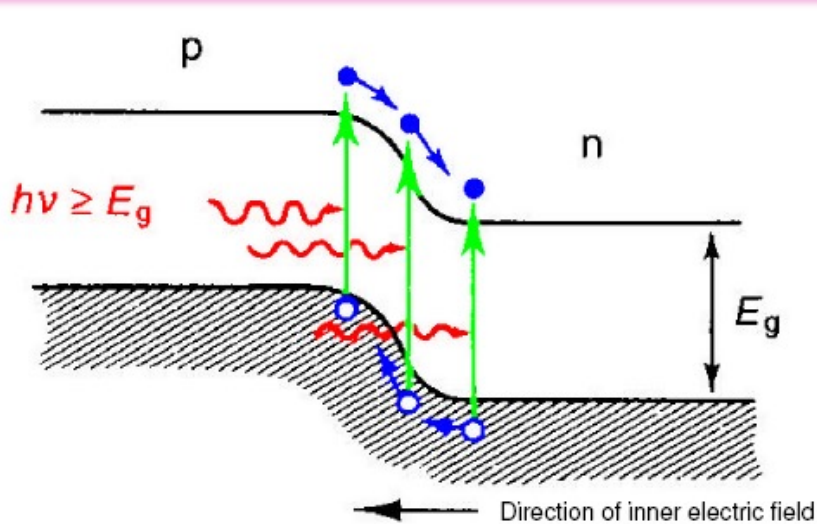
Si: 4 e<sup>-</sup> valenza

- Strato P: contiene “buchi di elettroni”  
→ B (3 e<sup>-</sup> v.)
- Strato N: contiene “eccesso di elettroni”  
→ P (5 e<sup>-</sup> v.)

Barriera di potenziale: 0.6 V

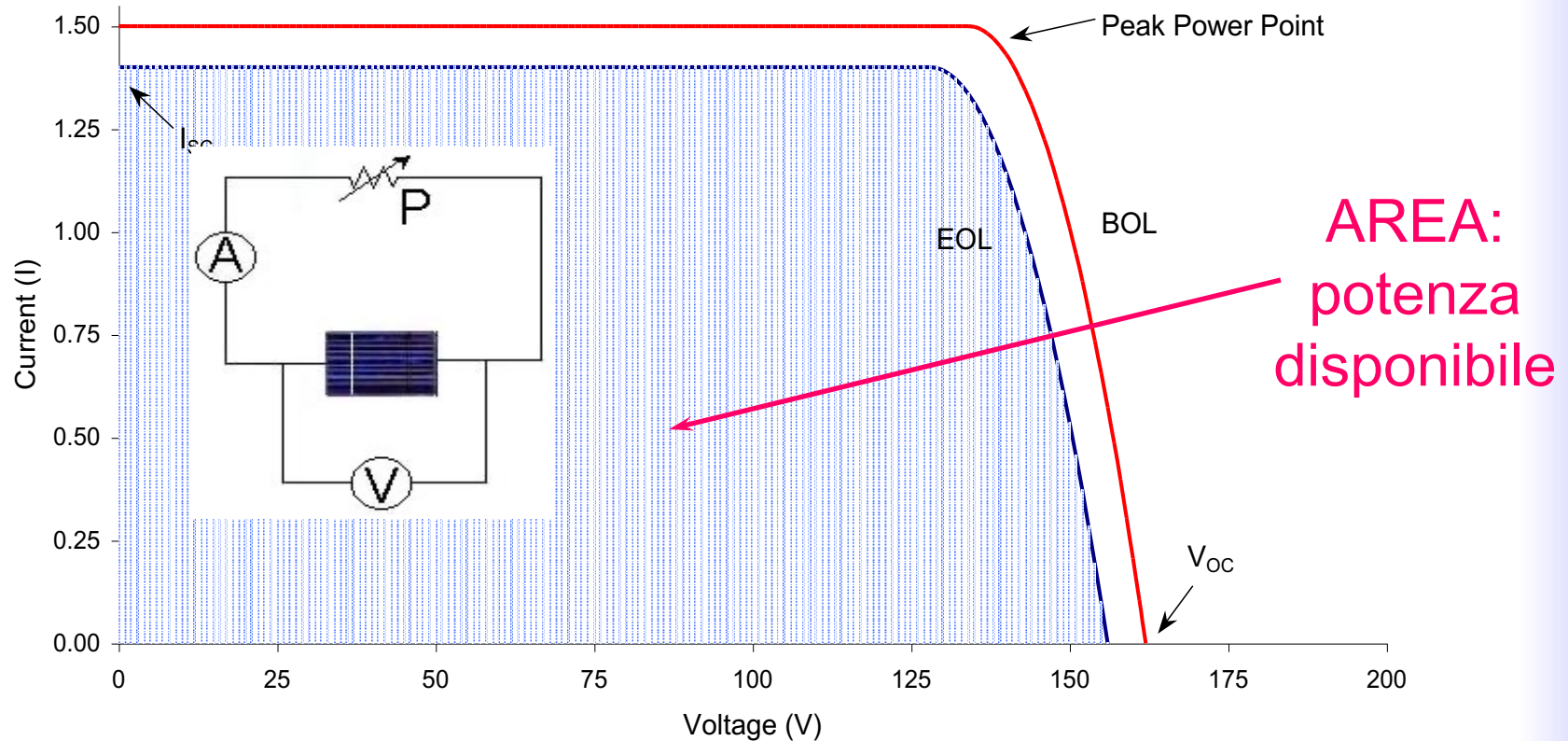


# Circuito Elettrico



- Pannello solare:
  - Celle solari in serie o parallelo
- Serie:  $I_1, nV_1$ 
  - AC: stessa faccia
- Parallelo:  $nI_1, V_1$ 
  - AC: facce diverse
- Band gap Si: 1.12 eV
- $\lambda < 1107 \text{ nm}$

# Potenza Disponibile



EOL = End of Life

BOL = Beginning of Life

$V_{oc}$  = Open Circuit Voltage ( $R \rightarrow \infty$ )

$I_{sc}$  = Short Circuit Current ( $R \rightarrow 0$ )

# Dimensionamento Pannelli Solari 1/2

- Potenza richiesta:  $P_{sa}$ 
  - $P_{sa} T_d = P_e T_e / X_e + P_d T_d / X_d$ 
    - 0.60-0.65 (pointing to  $X_e$ )
    - 0.80-0.85 (pointing to  $X_d$ )
- Tipo di cella solare:  $\eta$ ,  $p_o$ 
  - $p_o = \eta K$ 
    - 14.8% (Si) / 18.5% (GaAs) (pointing to  $\eta$ )
    - 1368 W/m<sup>2</sup> (pointing to  $K$ )
- Capacità reale di produzione all'inizio della missione:  $p_{bol}$ ,  $I_d$ 
  - $p_{bol} = p_o I_d \cos\theta$ 
    - 0.77 (disegno, temperatura, ombra) (pointing to  $\cos\theta$ )
- Performance alla fine della missione:  $p_{eol}$ ,  $L_d$ 
  - $p_{eol} = p_{bol} L_d = p_{bol} (1 - \text{degradamento/anno})^{vita}$ 
    - 0.0375 (Si) / 0.0275 (GaAs) (pointing to  $(1 - \text{degradamento/anno})^{vita}$ )

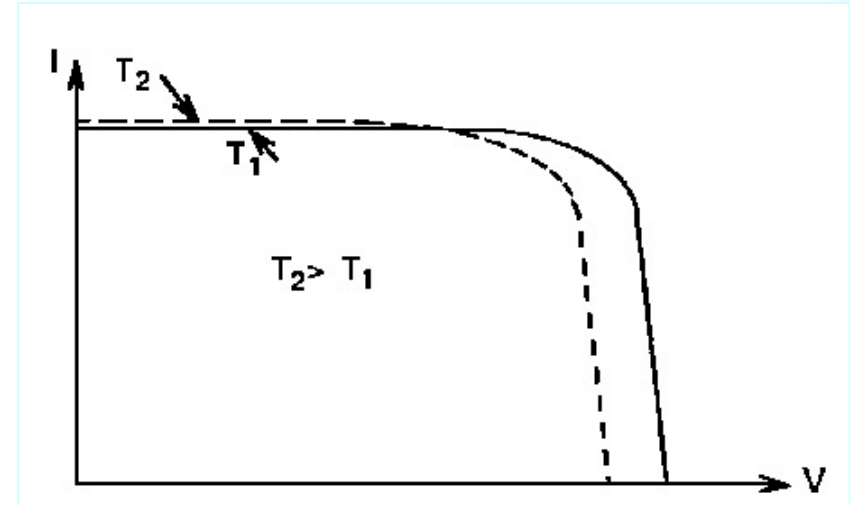


# Dimensionamento Pannelli Solari 2/2

➤ Superficie necessaria:  $A_{sa}$

○  $A_{sa} = P_{sa} / p_{eol}$

➤ Dipendenza temperatura



# Procedura di Valutazione

## ➤ Step 1

- Durata missione, invecchiamento celle

## ➤ Step 2

- Stima durata giorno e notte (altezza orbita)

## ➤ Step 3

- Scelta tipo di cella (Silicio, Arsenurio di Gallio ...)
- Efficienza = potenza in uscita / potenza in ingresso

Si: 204 W/m<sup>2</sup>

GaAs: 272 W/m<sup>2</sup>

Sole: 1368 W/m<sup>2</sup>

## ➤ Step 4

- Misura realistica delle proprietà delle celle

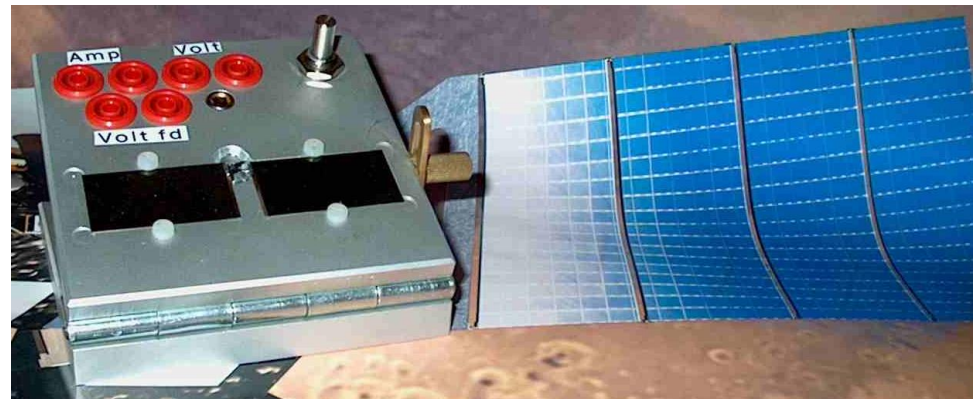


# Calcoli

- Misurate un punto sulla curva con lo strumento a disposizione (nota la forma della curva, trapezio)
- Calcolate l'Area al di sotto della Curva
- Misurate l'Area della cella
- Sapete la potenza prodotta dal Sole sulla vostra cella



Valutate l'Efficienza della cella solare



# Immagazzinamento di Energia: Batterie

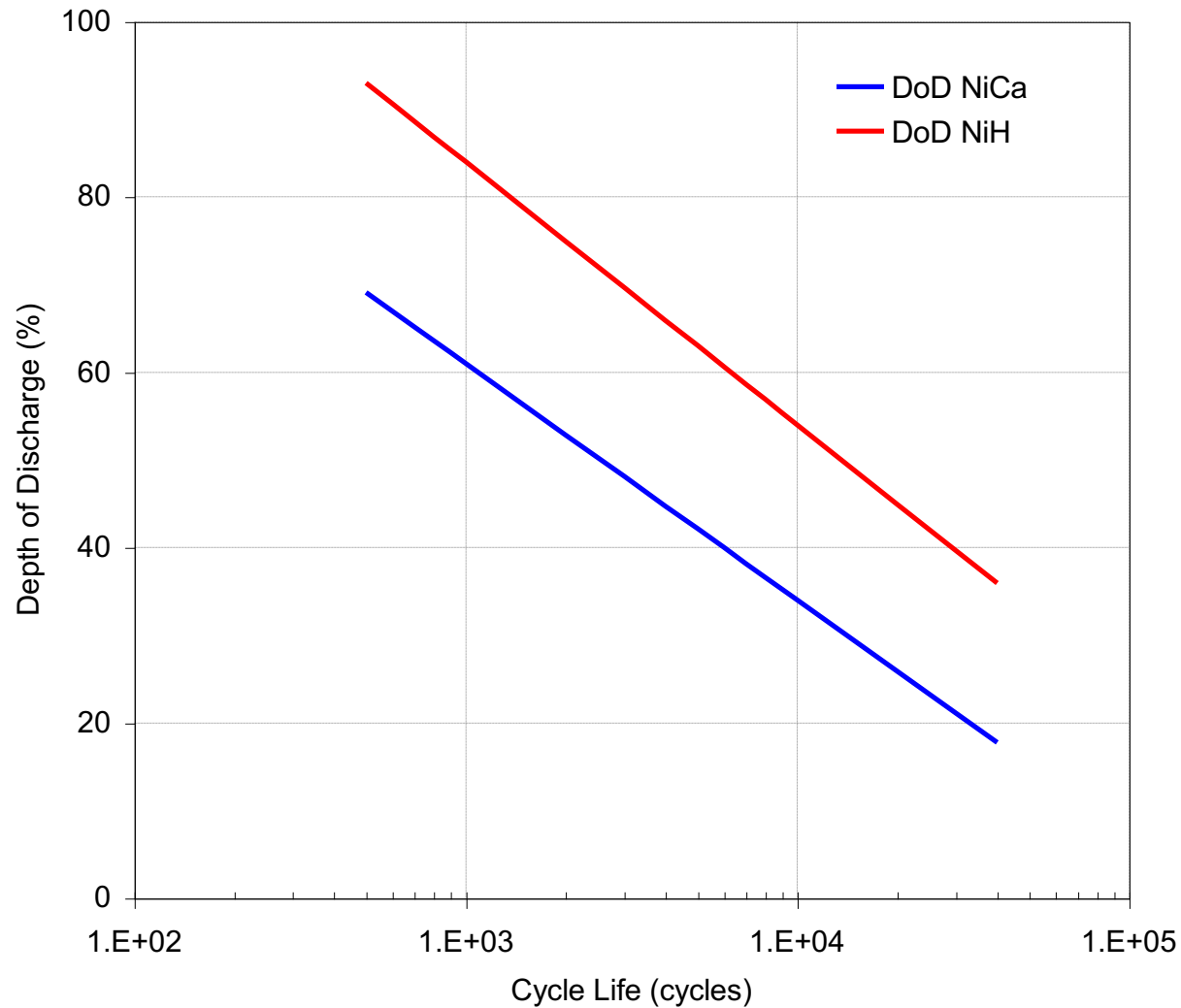
- Per alimentare lo strumento durante l'eclisse
- Elementi chiave per definire il sistema:
  - fisici (dimensioni, massa, posizione, ambiente ...)
  - elettrici (voltaggio, carico, cicli di lavoro, tempi di attivazione e di accumulazione ...)
  - sistematici (costo, affidabilità, produzione ...)
- Caratteristiche tipiche:
  - Densità specifica di energia (W-ora/kg)

<b>Tipo</b>	<b>Densità specifica energia</b>	<b>Stato</b>
Nichel-Cadmio	25-35	Qualificato spazio
Nichel-Idrogeno	35-57	Qualificato spazio
Litio-Ione	70-110	In fase di sviluppo
Sodio-Zolfo	140-210	In fase di sviluppo

# Dimensionamento batterie

- Determinare i requisiti di energia
  - cicli carica/scarica, durata dell'eclisse, carico dell'eclisse
- Selezionare il tipo di batteria
- Determinare la capacità della batteria:  $C_{batt}$ 
  - $C_{batt} = P_e T_e / DOD / n$  ←  $\sim 0.9$      $\sim 20-70\%$  (NiCd) /  $\sim 30-90\%$  (Ni-H)
- Determinare la massa della batteria:  $m_{bat}$ 
  - $m_{bat} \sim C_{batt} / e_{batt} \sim C_{batt} / 35$  (NiCd)  
← densità specifica di energia

# Depth of Discharge



# ESERCIZIO

Power Budget	(W)	
Payload	165.0	
Structure	0.0	
Thermal	20.6	
Power	113.4	
Communications	26.8	
OBDH	26.8	
ADCS	51.6	
Propulsion	8.3	
Margin	61.9	15%
	474.4	

Calcolate le dimensioni dei pannelli solari e la capacità (e massa) del sistema di batterie ( $h = 600$  km,  $i = 60^\circ$ , vita del satellite = 5 anni)

DoD(100 cicli) = 88%

DoD(10000 cicli) = 34%

## Solar Cell

Efficiency	0.185
Degradation/year	0.0275
Daylight eff	0.85
Eclips eff	0.65
Inherent degradation	0.77
Sun angle	23.5 deg

## Gallium Arsenide

Efficiency	0.185
Degradation/year	0.0275
Daylight eff	0.85
Eclips eff	0.65
Inherent degradation	0.77
Sun angle	23.5 deg

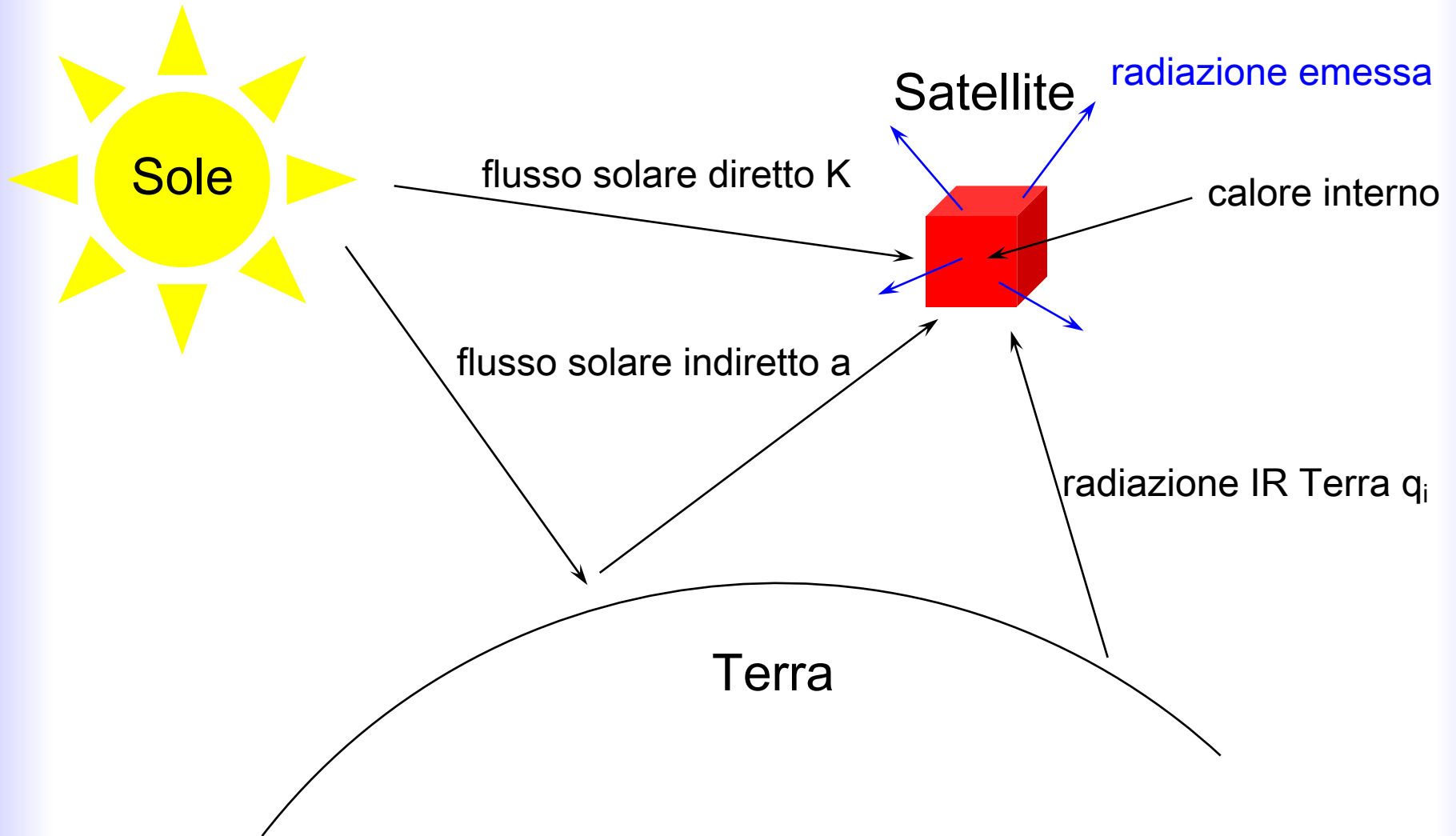
## Battery

Depth of Discharge	
Transmission eff	0.9
Specific energy density	30 W.hr/kg

## Nickel Cadmium

Transmission eff	0.9
Specific energy density	30 W.hr/kg

# Sistema Termico: equilibrio





# Principi Trasferimento Calore 1/3

---

## ➤ Convezione

○  $Q = h A \Delta T$  (h=coeff. trasmissione calore)

## ➤ Conduzione

○  $Q = -k A \Delta T / \Delta x$  (k = conducibilità termica)

## ➤ Irraggiamento – onde elettromagnetiche

○  $Q = \varepsilon \sigma A T^4$  (Legge Stefan-Boltzmann)

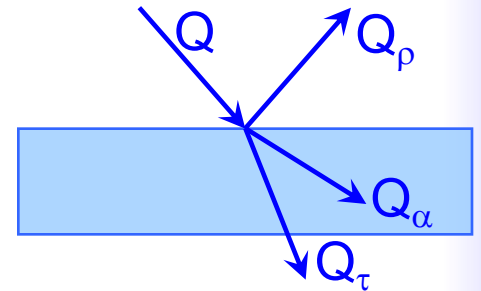
○  $E_{b\lambda} = \frac{2\pi hc^2}{\lambda^5} \frac{1}{e^{hc/k\lambda T} - 1}$  (Eq. Planck)

(emissione)

# Principi Trasferimento Calore 2/3

➤ Ogni materiale irradiato da un' onda e.m.:

- trasmette parte dell' onda  $\tau$
- assorbe parte dell' onda  $\alpha$
- riflette parte dell' onda  $\rho$



$$\tau + \alpha + \rho = 1$$

➤ Ogni materiale ad una data temperatura irradia secondo la legge di Stefan-Boltzmann:

- $Q = \varepsilon \sigma A T^4$

# Principi Trasferimento Calore 3/3

➤ Per un corpo nero:

○  $\alpha = 1, \varepsilon = 1$       ( $\rho = 0, \tau = 0$ )

➤ Corpo reale:

○  $\alpha = \alpha(\lambda) = \alpha_\lambda$

○  $\varepsilon = \varepsilon(\lambda) = \varepsilon_\lambda$

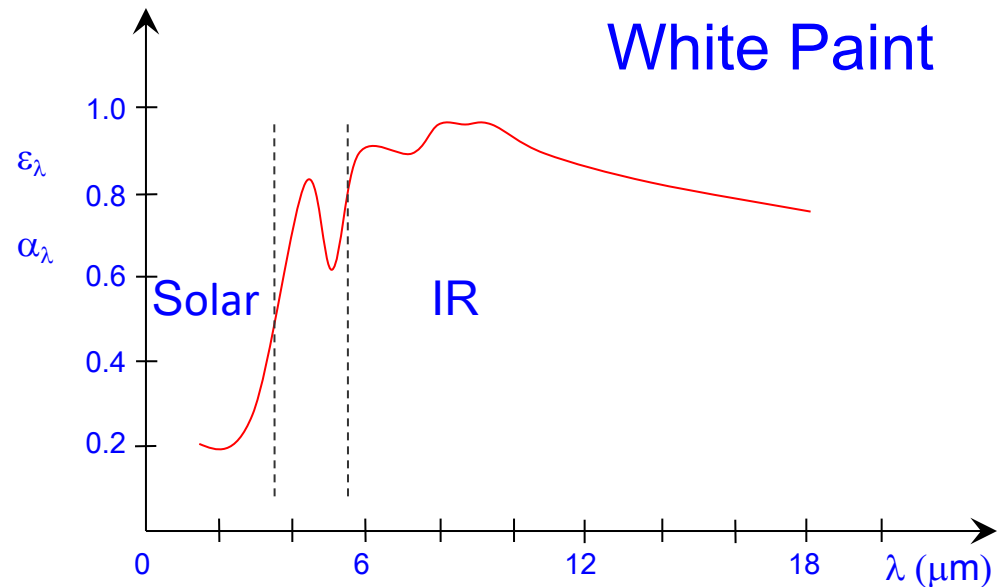
➤ Legge di Kirchoff:

○  $\alpha_\lambda = \varepsilon_\lambda$

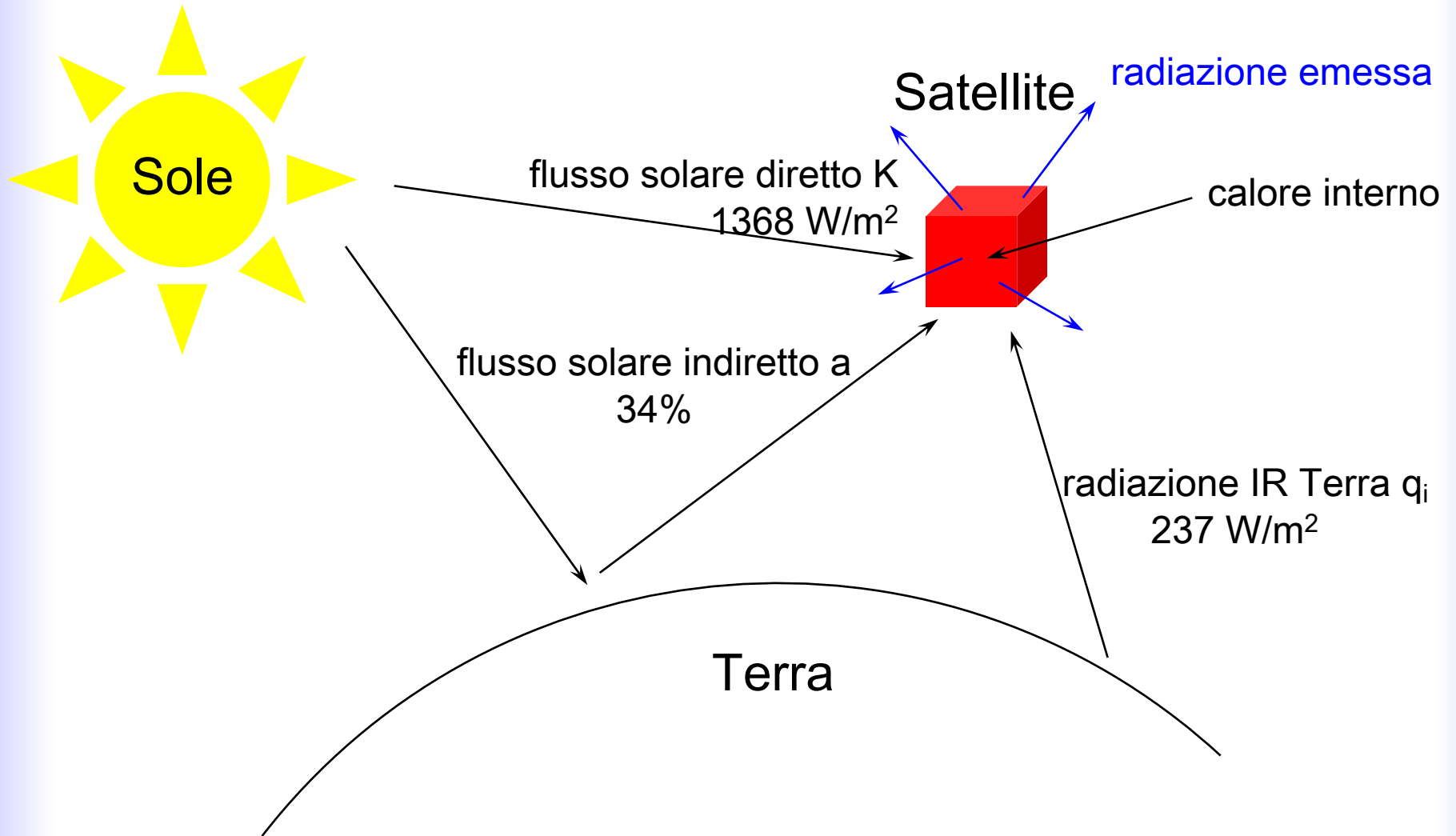
➤ Superficie bianca,  
isolata dietro

○  $\alpha_{WP}(V) = \alpha_S = \alpha \leq 0.4$

○  $\varepsilon_{WP}(IR) = \varepsilon_{IR} = \varepsilon \geq 0.8$



# Sistema Termico: equilibrio



# Equilibrio

$$Q_{\text{assorbito}} + Q_{\text{int}} = Q_{\text{emessa}}$$

$$\underbrace{Q_{\text{sole}} + Q_{\text{albedo}} + Q_{\text{IR terra}}}_{0.853-0.874} + Q_{\text{int}} = Q_{\text{emessa}}$$

➤  $Q_{\text{emessa}} = \epsilon \sigma T^4 A_T$  (radiazione: Stefan-Boltzmann) 0.252-0.975

➤  $Q_{\text{sole}} = \alpha K A_{\perp}$

➤  $Q_{\text{IR terra}} = \epsilon_b Q_i A_{\perp} = \epsilon_b q_i 4\pi R_T^2 / 4\pi (R_T + h)^2 A_{\perp} = \epsilon_b A_{\perp} q_i \sin^2 \rho$

➤  $Q_{\text{albedo}} = \alpha K A_{\perp} a K_a \sin^2 \rho$

➤  $Q_{\text{int}} = \dots$

$K_a = 0.664 + 0.521 \rho - 0.203 \rho^2$   
(0.738 ÷ 1)

$A_T / A_{\perp} = 4 \pi r^2 / \pi r^2 = 4$  (sfera)

$$T = \left( \alpha K / 4 \epsilon \sigma + \alpha K a K_a \sin^2 \rho / 4 \epsilon \sigma + \epsilon_b q_i \sin^2 \rho / 4 \epsilon \sigma + Q_{\text{int}} / 4 \pi r^2 \epsilon \sigma \right)^{1/4}$$

# Temperature max/min sui pannelli

$$Q_{\text{sole}} + Q_{\text{albedo}} + Q_{\text{IR terra}} = Q_{\text{emessa(t,b)}} + Q_{\text{conv}}$$
$$\frac{1}{2} A_{\top} / A_{\perp} = \frac{1}{2} 2L^2 / L^2 = 1 \text{ (flat panel)}$$

$$Q_{\text{conv}} = \eta K A$$

$$T = \left( (\alpha_t K + \alpha_b K_a K_a \sin^2 \rho + q_i \varepsilon_b \sin^2 \rho - \eta K) / (\varepsilon_t + \varepsilon_b) \sigma \right)^{1/4}$$

➤ Caso peggiore: temperatura massima

$$T_{\text{max}} = T$$

➤ Caso peggiore: temperatura minima

$$T_{\text{min}} = \left( q_i \varepsilon_b \sin^2 \rho / (\varepsilon_t + \varepsilon_b) \sigma \right)^{1/4}$$

# Esercizio 1 (Temp. Equilibrio max&min)

---

Considerare:

- Sfera di raggio 0.97 m
- Potenza dissipata  $250 \pm 25$  W
- Black Paint  $\alpha = 0.975, \varepsilon = 0.874$
- White Paint  $\alpha = 0.252, \varepsilon = 0.853$
- Altitudine 700 km

Calcolare  $T_{\max}$  e  $T_{\min}$  all'equilibrio nei due casi  
( $K = 1368 \pm 51$  W/m<sup>2</sup>,  $a = (34 \pm 5)\%$ ,  $q_i = 237 \pm 21$  W/m<sup>2</sup>)

# Esercizio 2 (Temp. max&min + pannelli)

Considerare:

- Sfera di raggio 0.97 m
- Potenza minima dissipata 80 W
- Potenza massima dissipata 170 W
- $\alpha$  e  $\varepsilon$  valori medi fra WP e BP
- Altitudine 700 km
- Efficienza celle  $\eta$  20 %
- $\varepsilon_t = 0.825$ ,  $\alpha_t = 0.805$
- $\varepsilon_b = 0.800$ ,  $\alpha_b = 0.600$

Calcolare  $T_{\max}$  e  $T_{\min}$  all'equilibrio e sui pannelli solari  
( $K = 1368 \pm 51$  W/m<sup>2</sup>,  $a = (34 \pm 5)$  %,  $q_i = 237 \pm 21$  W/m<sup>2</sup>)