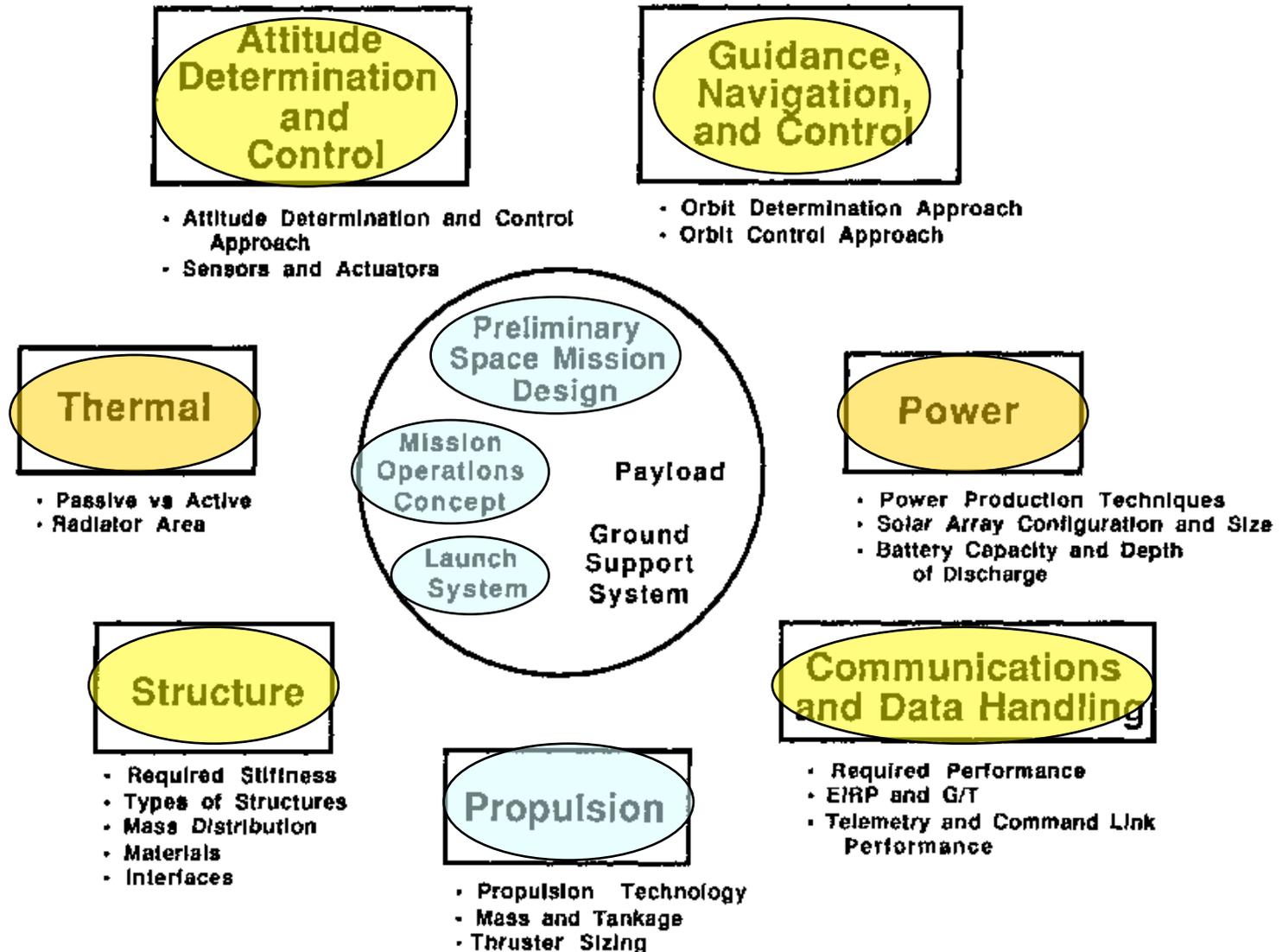

Sistemi di Alimentazione e Termici

(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:
 - 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: $\varepsilon \sim 5 \div 20\%$

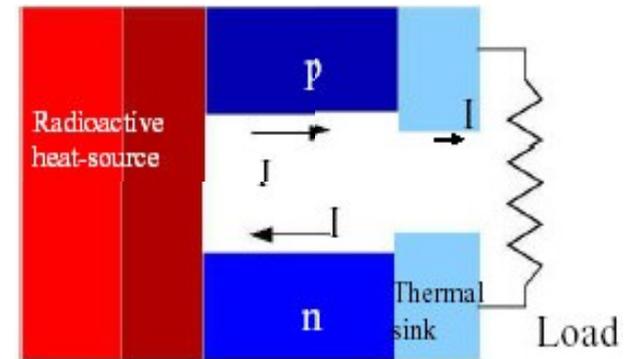
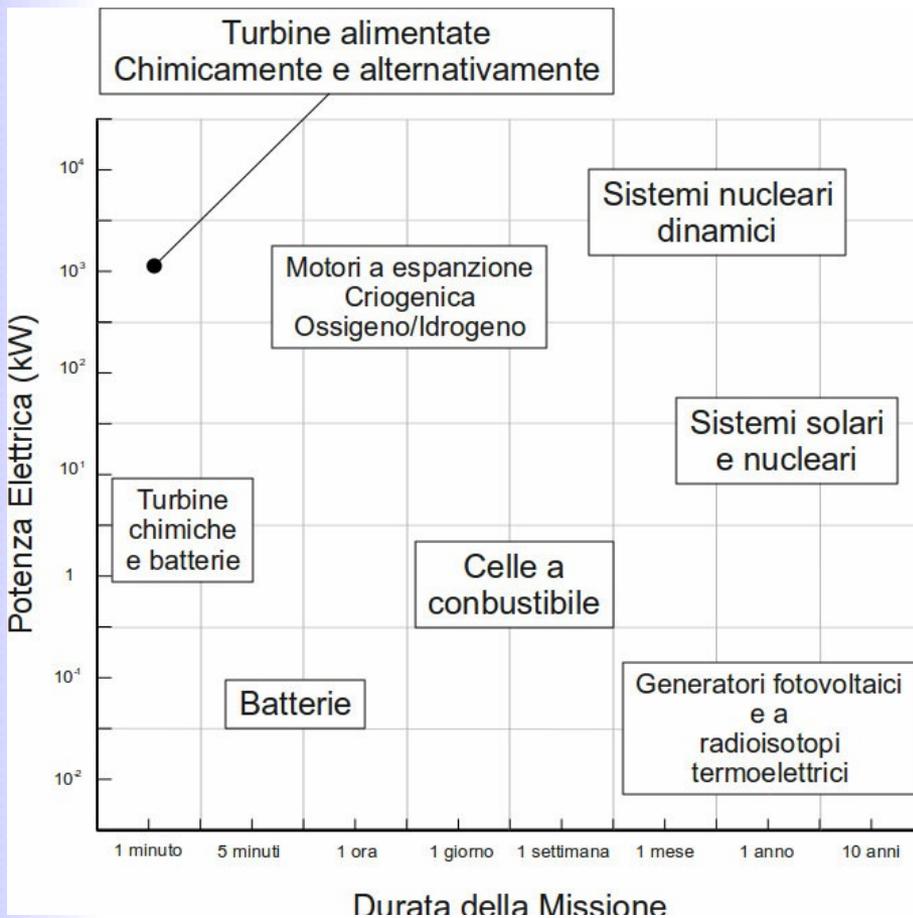
➤ Sorgenti Dinamiche

- 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*

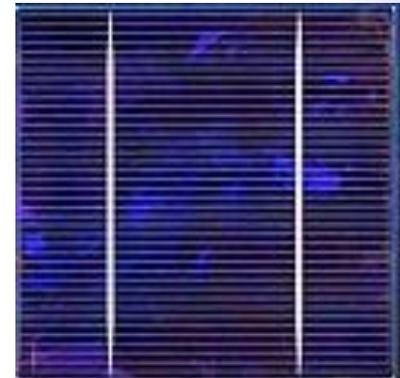
+ circuiti
+ carichi

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

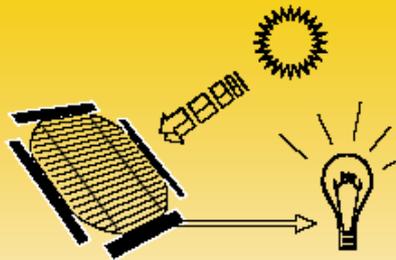
- La cella solare è un dispositivo che, quando illuminata, sfrutta le proprietà di conduzione dei materiali semiconduttori e converte la radiazione solare incidente direttamente in energia elettrica
- È la sorgente di potenza più comune per satelliti in orbita terrestre:
 - facili da realizzare
 - ben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



Le Celle Solari 2/4

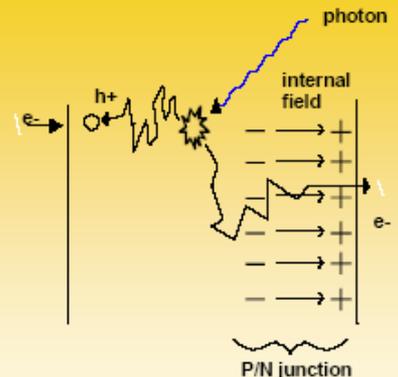
What Are Solar Cells?

- 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”



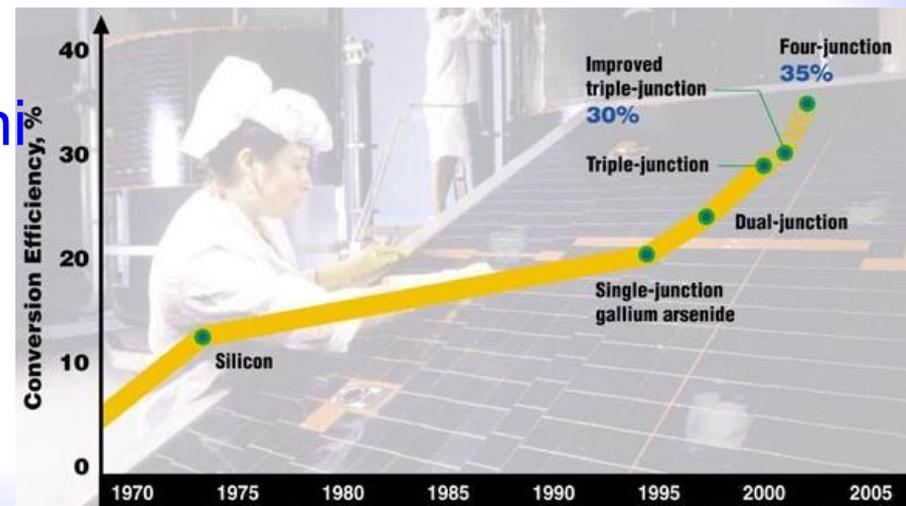
How Solar Cells Change Sunlight Into Electricity

- 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 η di conversione di energia di una cella solare, definita:
 $\eta = \text{potenza uscita} / \text{potenza ingresso}$

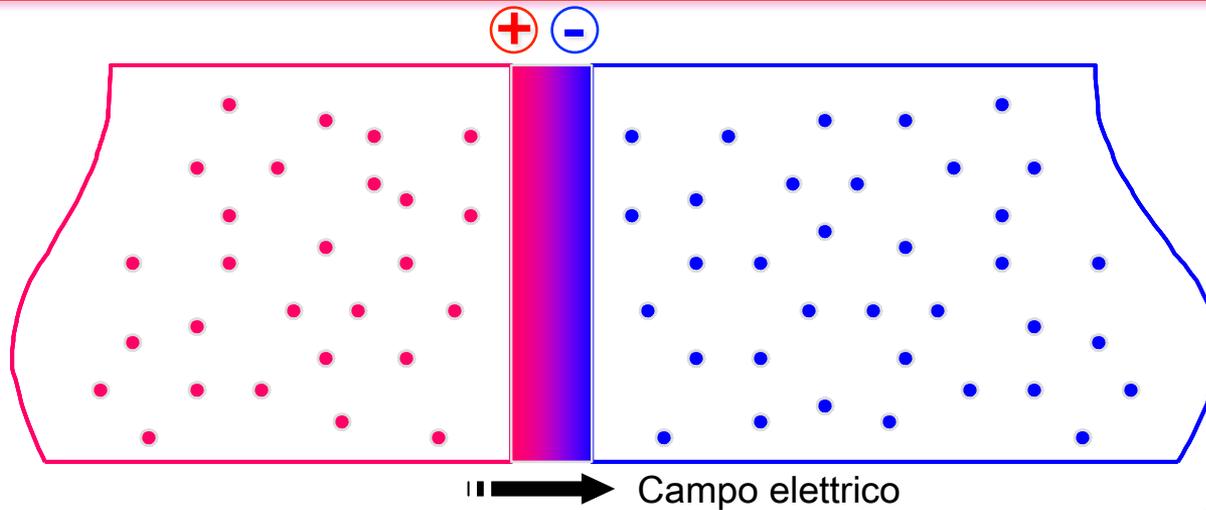
Il pannello solare assemblato è meno efficiente delle singole celle

- 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°C, la perdita di efficienza è del 0.5% per grado sopra i 28°C



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

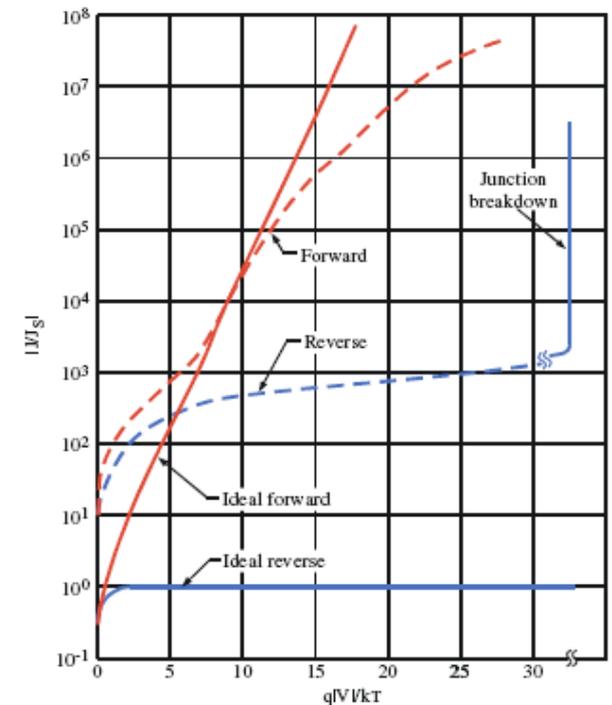
Giunzione P-N



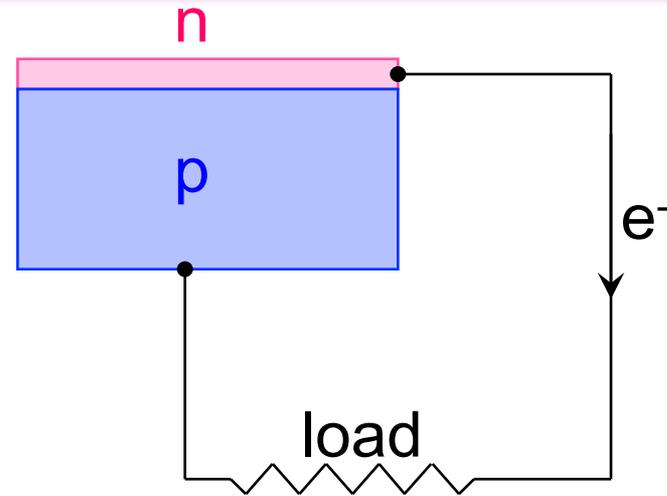
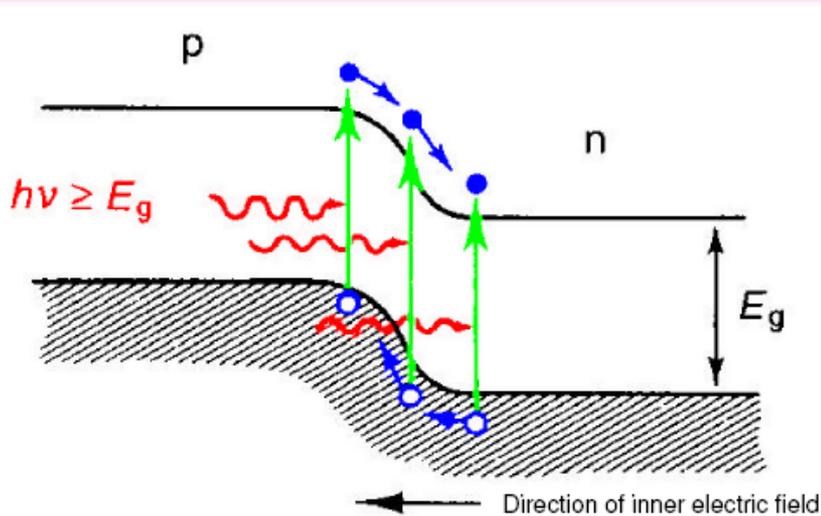
Si: 4 e⁻ valenza

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

Barriera di potenziale: 0.6 V

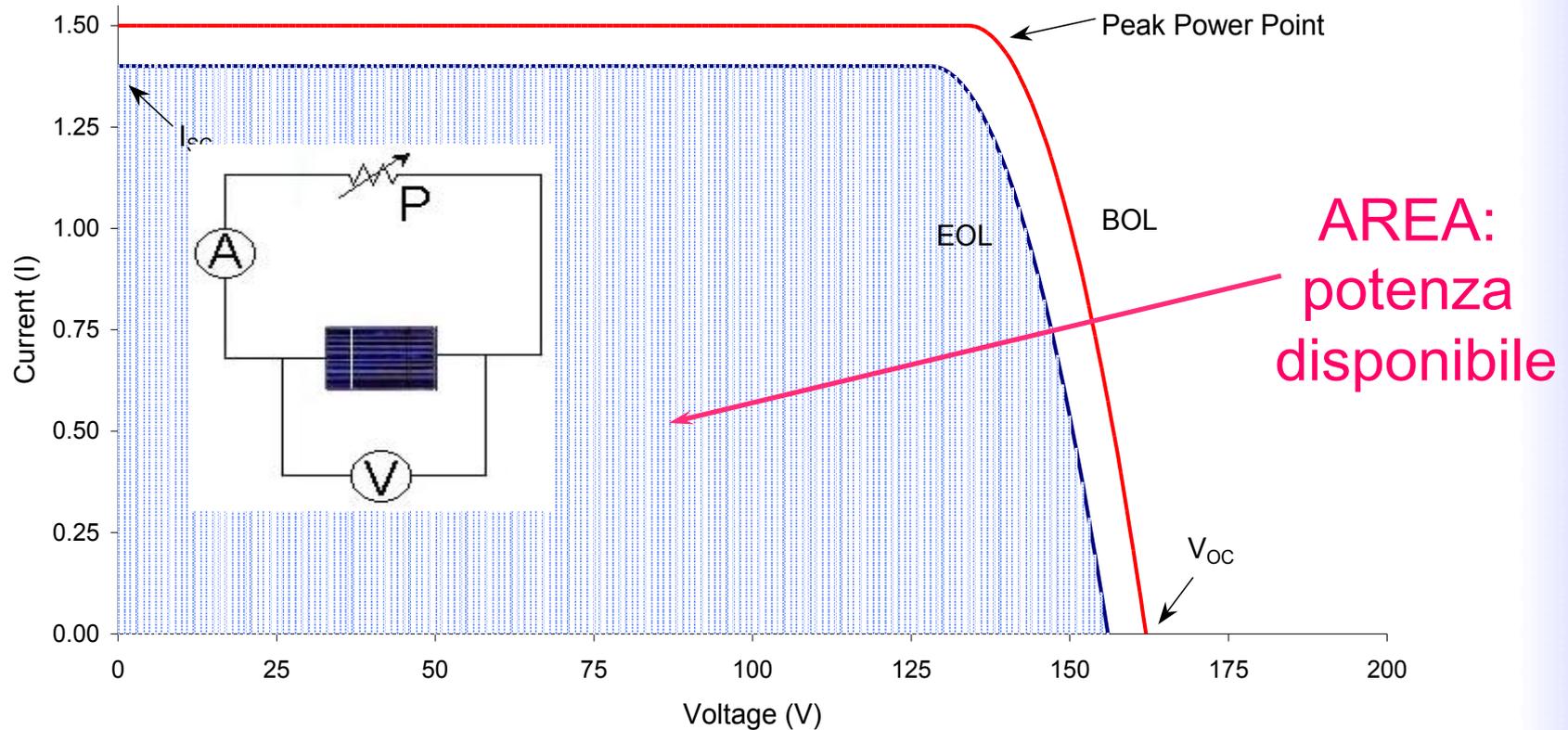


Circuito Elettrico



- 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

0.80-0.85

- Tipo di cella solare: η , p_o
 - $p_o = \eta K$

14.8% (Si) / 18.5% (GaAs)

1368 W/m²

- Capacità reale di produzione all'inizio della missione: p_{bol} , I_d

0.77 (disegno, temperatura, ombra)

- $p_{bol} = p_o I_d \cos\theta$

- Performance alla fine della missione: p_{eol} , L_d

- $p_{eol} = p_{bol} L_d = p_{bol} (1 - \text{degradamento/anno})^{vita}$

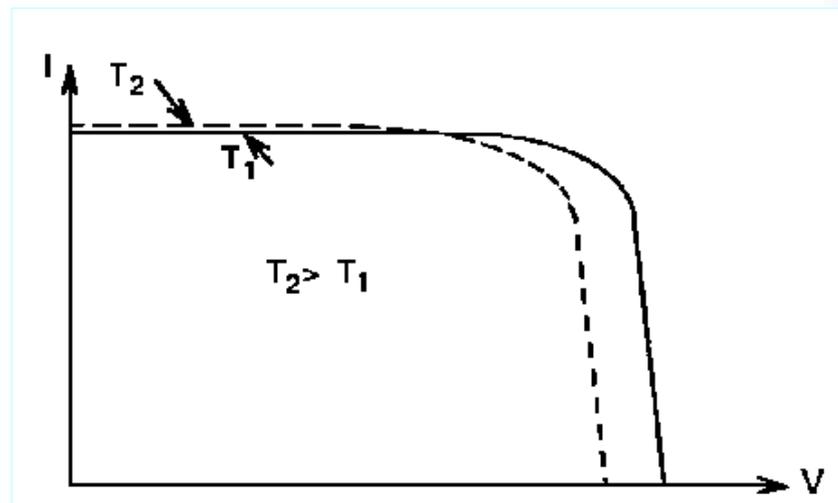
0.0375 (Si) /
0.0275 (GaAs)

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/m²

GaAs: 272 W/m²

Sole: 1368 W/m²

➤ Step 4

- Misura realistica delle proprietà delle celle

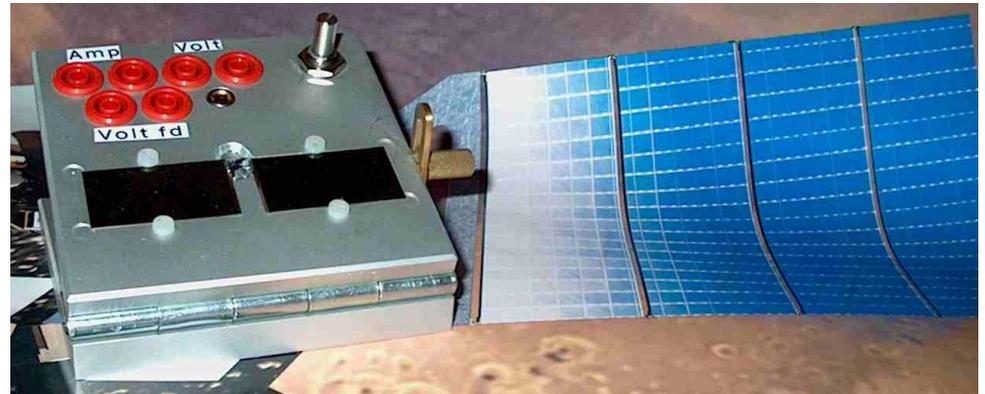


Calcoli

- 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

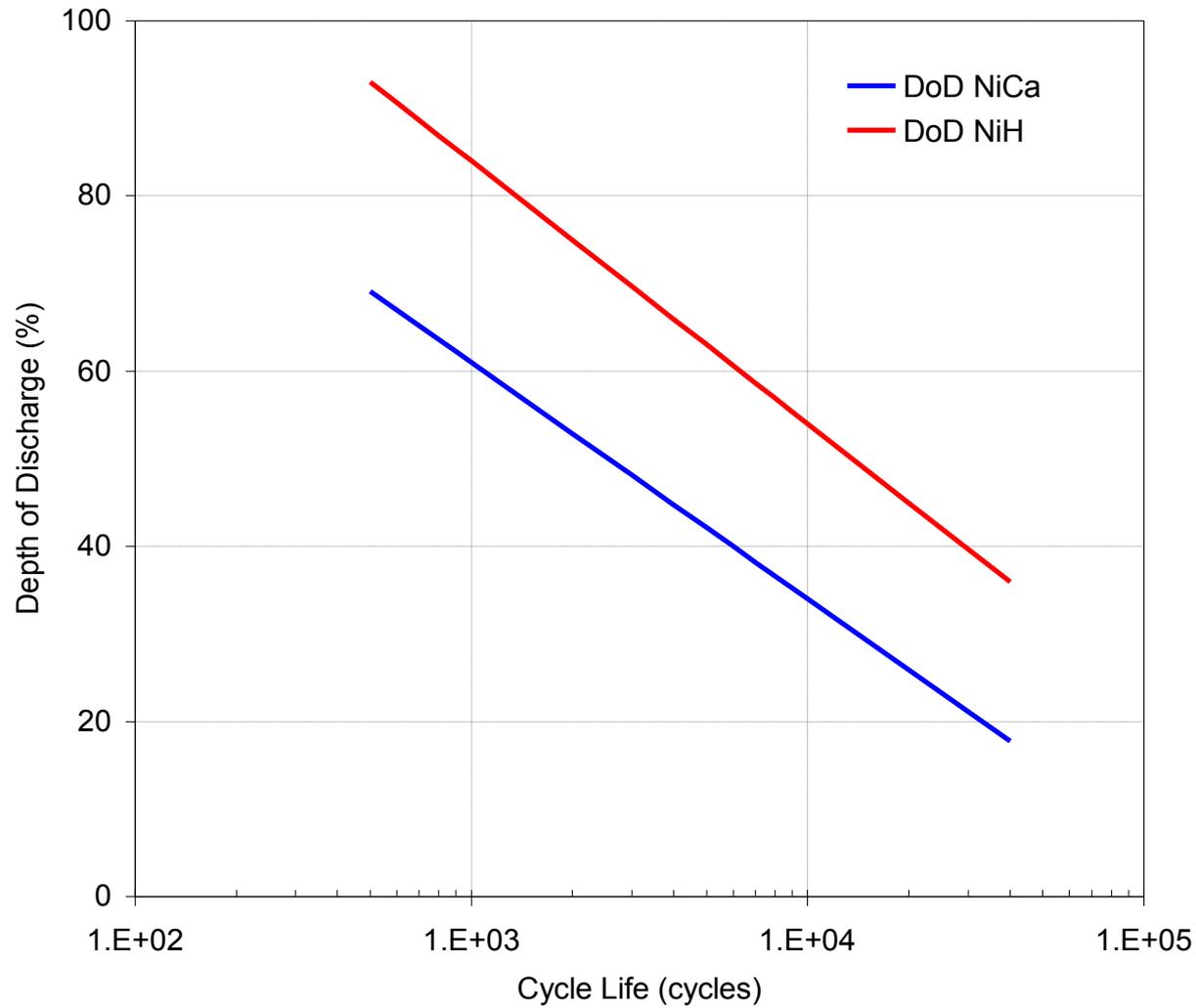
- Per alimentare lo strumento durante l'eclisse
- Elementi chiave per definire il sistema:
 - fisici (dimensioni, massa, posizione, ambiente ...)
 - elettrici (voltaggio, carico, cicli di lavoro, tempi di attivazione e di accumulazione ...)
 - sistematici (costo, affidabilità, produzione ...)
- Caratteristiche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

Tipo	Densità specifica energia	Stato
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}
 - $C_{batt} = P_e T_e / DOD / n$ ← ~ 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

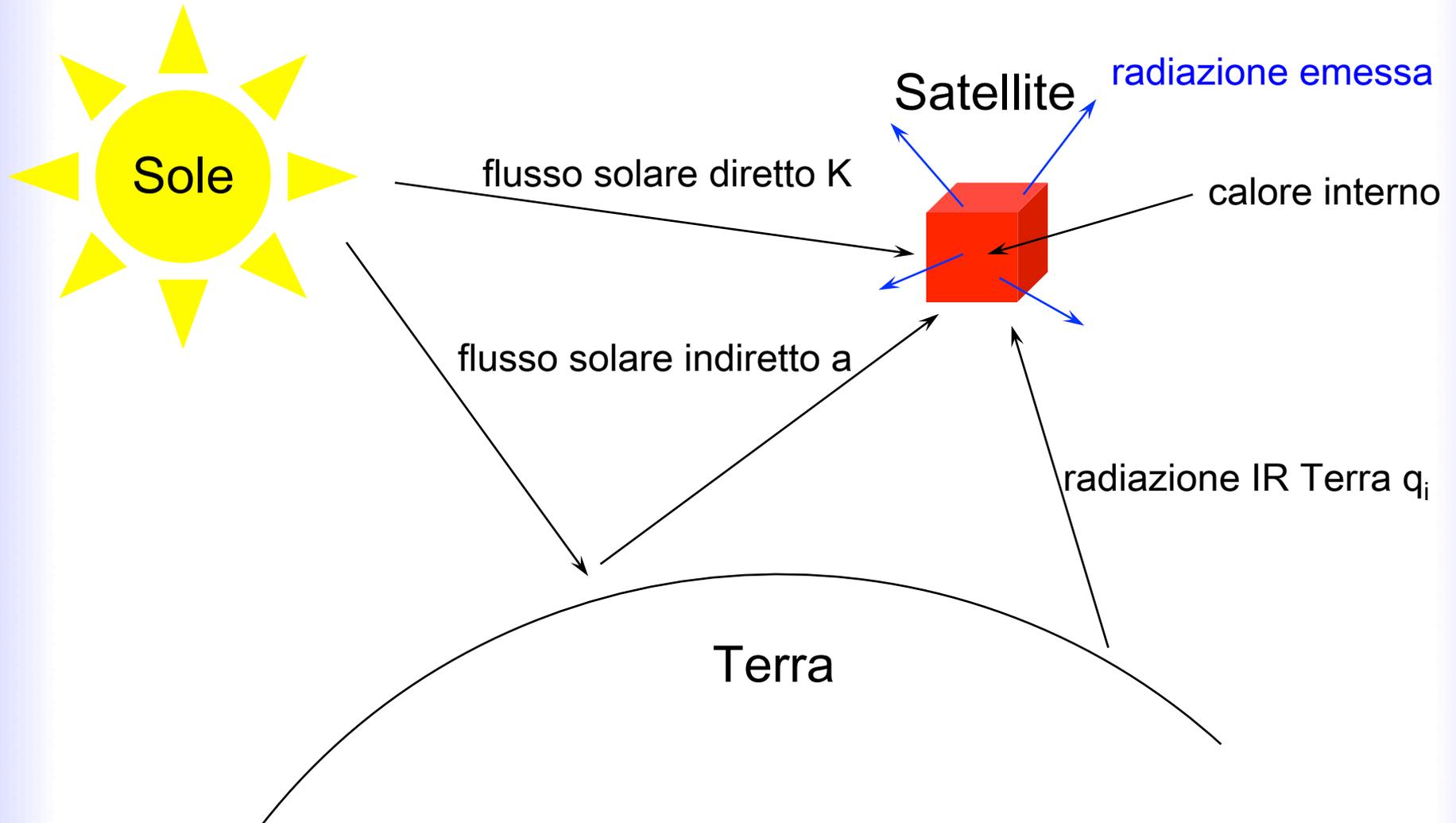
Battery

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

Nickel Cadmium

0.9
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)

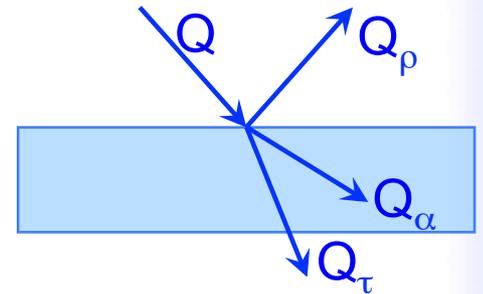
○ $E_{b\lambda} = \frac{2\pi hc^2}{\lambda^5} \frac{1}{e^{hc/k\lambda T} - 1}$ (Eq. Planck)

(emissione)

Principi Trasferimento Calore 2/3

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

- trasmette parte dell' onda τ
- assorbe parte dell' onda α
- riflette parte dell' onda ρ



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

➤ 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:

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

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

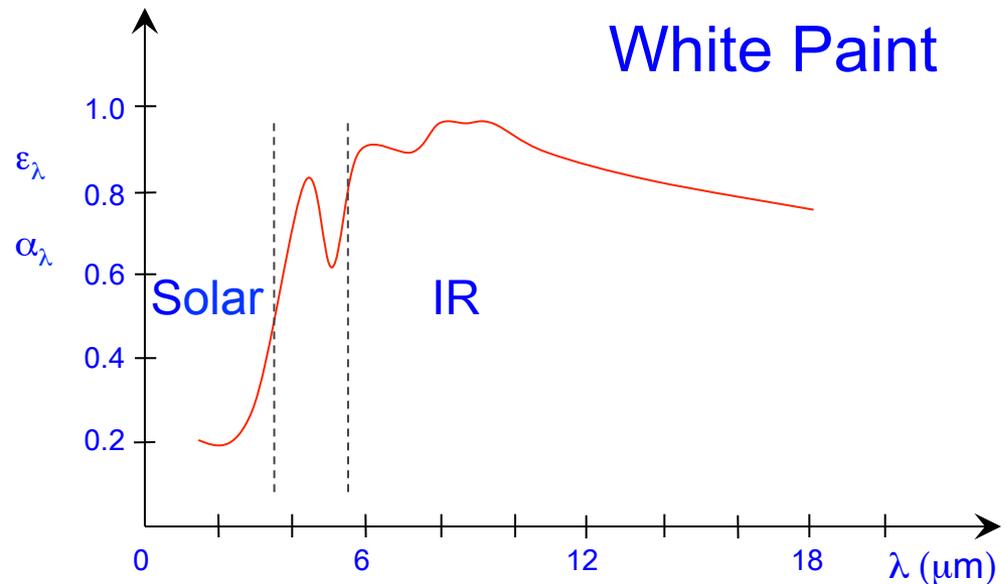
➤ Legge di Kirchoff:

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

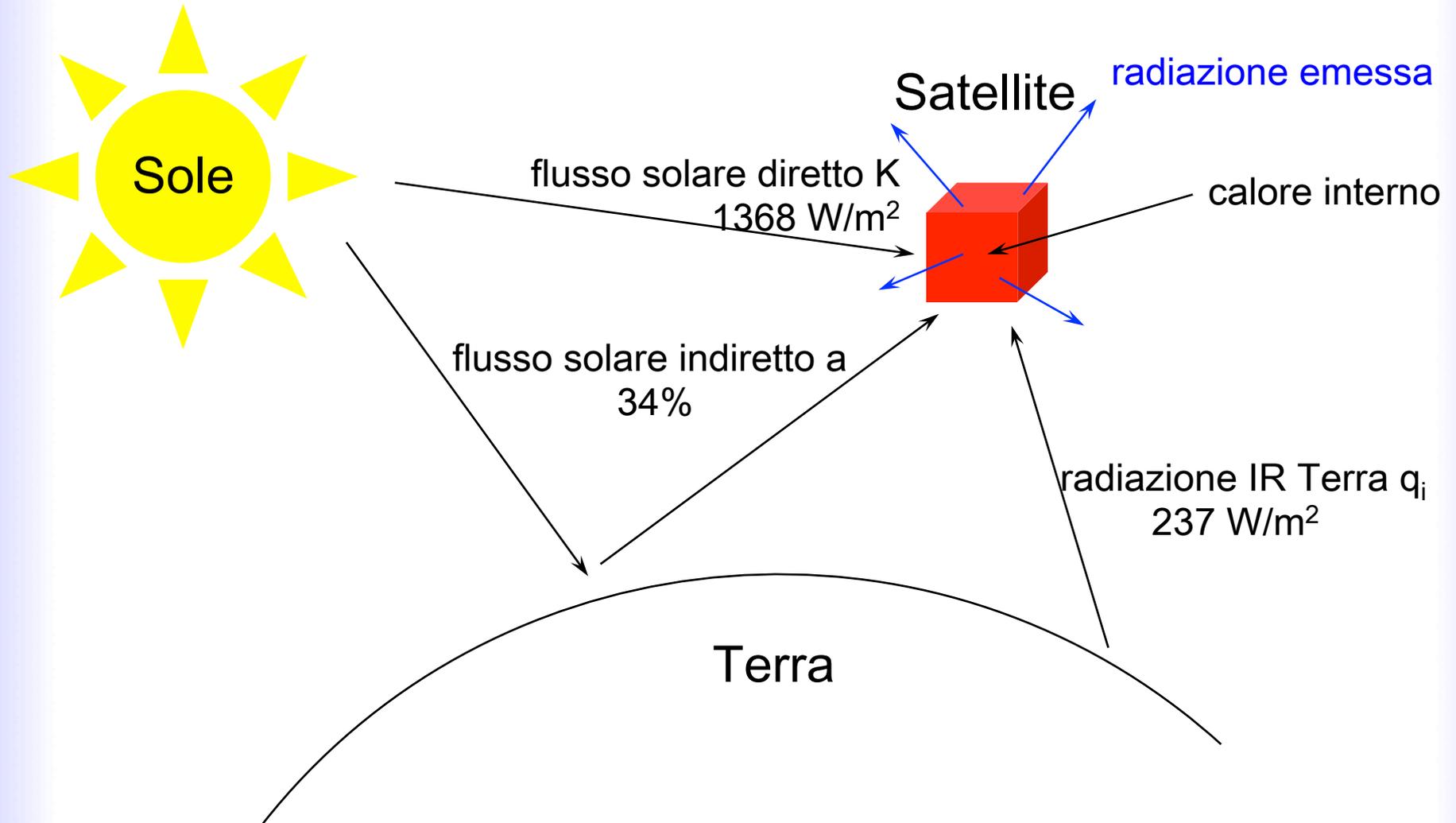
➤ Superficie bianca,
isolata dietro

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

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



Sistema Termico: equilibrio



Equilibrio

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

$$Q_{\text{sole}} + Q_{\text{albedo}} + Q_{\text{IR terra}} + Q_{\text{int}} = Q_{\text{emessa}}$$

0.853-0.874

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

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

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

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

➤ $Q_{\text{int}} = \dots$

$K_a = 0.664 + 0.521 \rho - 0.203 \rho^2$
(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 ± 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/m², $a = (34 \pm 5)\%$, $q_i = 237 \pm 21$ W/m²)

Esercizio 2 (Temp. max&min + pannelli)

Considerare:

- Sfera di raggio 0.97 m
- Potenza minima dissipata 80 W
- Potenza massima dissipata 170 W
- α e ε valori medi fra WP e BP
- Altitudine 700 km
- Efficienza celle η 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/m², $a = (34 \pm 5)$ %, $q_i = 237 \pm 21$ W/m²)