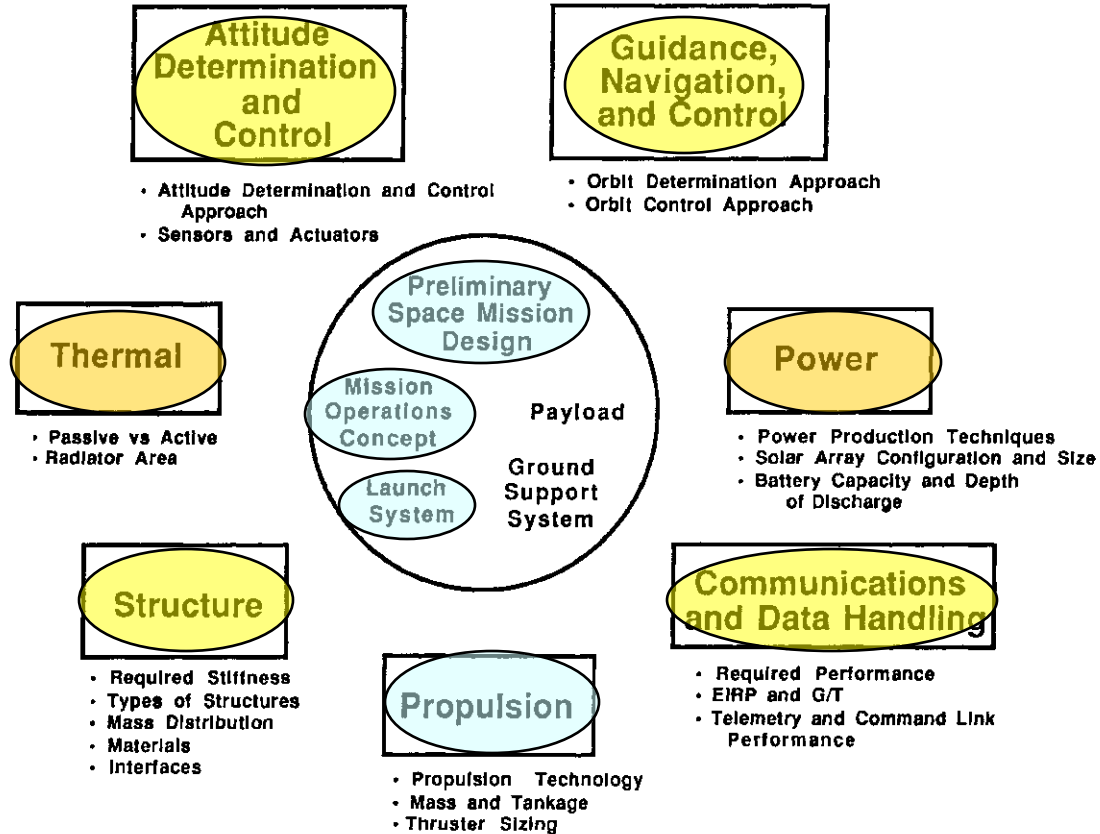

Sistemi di Alimentazione e Termici

(SOTTO)-SISTEMI



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

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

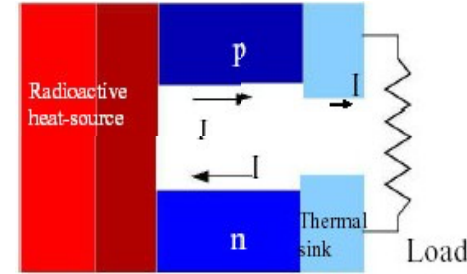
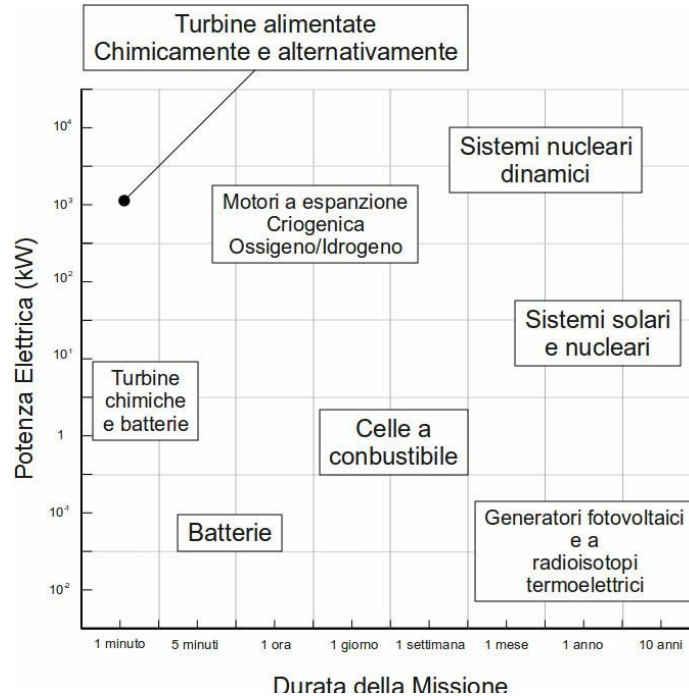
Potenze tipiche

- Lavatrici: ~ 2000 W
- LCD/plasma TV: 150÷350 W
- Telefonini: 3.6 W
- Satelliti: 500÷2000 W
 - o Planck 1630 W
 - o Euclid 1920 W
 - o AtmoCube ~ 2 W (100 W)

Sorgenti / Sistemi di Alimentazione1/3

- Celle Solari Fotovoltaiche
 - o radiazione solare
- Sorgenti Statiche
 - o sorgenti di calore (decadimento radioattivo / reazioni nucleari) + conversione termoelettrica diretta/processo termo-ionico: $\varepsilon \sim 5\div 20\%$
- Sorgenti Dinamiche
 - o sorgenti di calore (decadimento radioattivo / reazioni nucleari / energia solare) + macchina termodinamica ciclica (Rankine / Brayton): $\varepsilon \sim 15\div 35\%$
- Celle Chimiche
 - o reazioni di ossidazione (batterie)

Sorgenti / Sistemi di Alimentazione 2/3



RTG

Radioisotope Thermoelectric
Generator

Cassini-Huygens 1997

<https://en.wikipedia.org/wiki/Cassini%E2%80%93Huygens>

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 $T = 93 \text{ min} / 56 \text{ min}$ *giorno*
- @ 1000 km $T = 105 \text{ min} / 70 \text{ min}$ *giorno*
- @36000 km $T = 1440 \text{ min} /$ *stagionale*

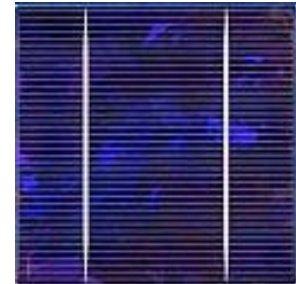
+ circuiti
+ carichi

Pannelli Solari: componenti

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

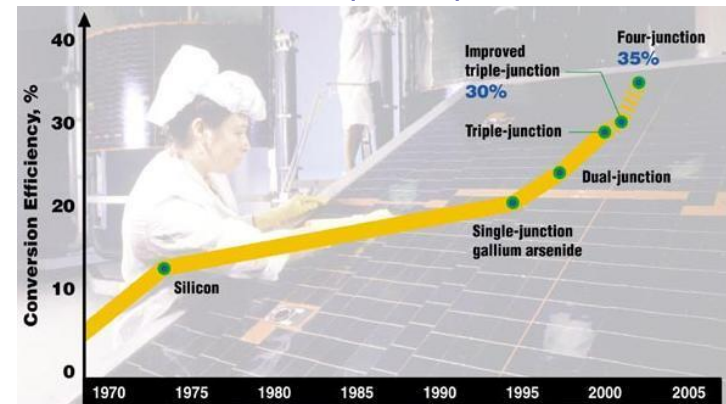
Le Celle Solari 1/4

- 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:
 - o facili da realizzare
 - o ben conosciute
 - o poco costose (silicio) 800-3000 €/W



Le Celle Solari 3/4: Tecnologie

- Quando la luce colpisce la cella solare, viene:
 - o in parte riflessa, in parte assorbita e in parte passa attraverso la cella
- Silicio (Si)
 - o esperienza spaziale e terrestre, ISS, vasta produzione commerciale, efficienza bassa (15%)
- Arsenurio di Gallio (GaAs)
 - o esperienza spaziale (limitata), efficienza elevata (20%)
- Fosfato di Indio (InP)
 - o 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:

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

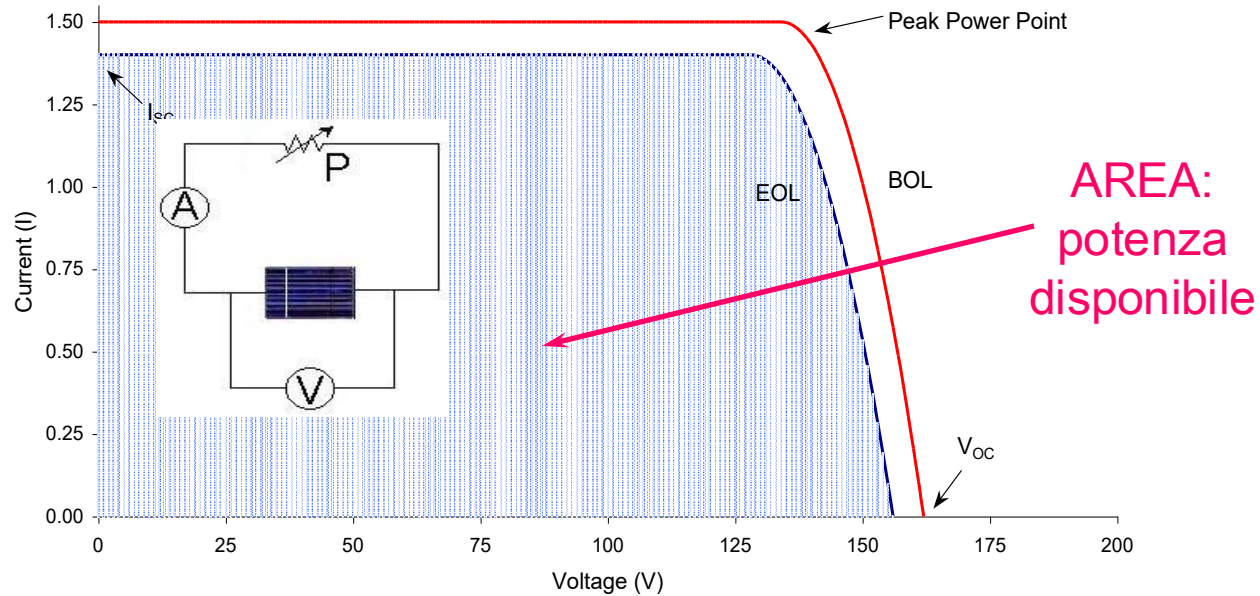
Il pannello solare assemblato è meno efficiente delle singole celle

- 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

Potenza Disponibile



EOL = End of Life
BOL = Beginning of Life

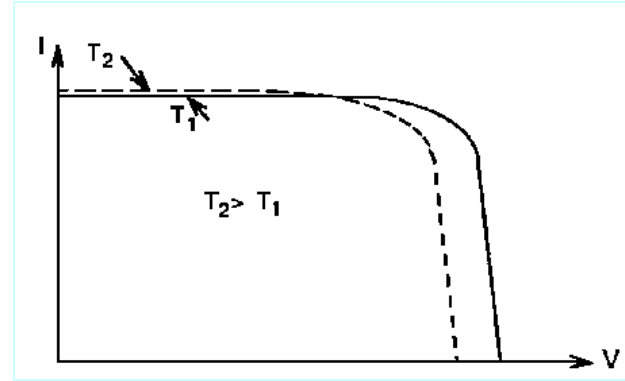
V_{oc} = Open Circuit Voltage ($R \rightarrow \infty$)
 I_{sc} = Short Circuit Current ($R \rightarrow 0$)

Dimensionamento Pannelli Solari 1/2

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

Dimensionamento Pannelli Solari 2/2

- Superficie necessaria: A_{sa}
 - o $A_{sa} = P_{sa} / p_{eol}$
- Dipendenza temperatura



Procedura di Valutazione

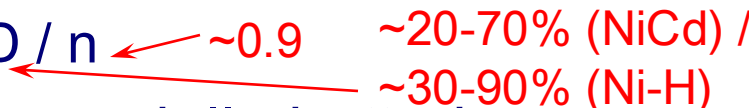
- Step 1
 - o Durata missione, invecchiamento celle
 - Step 2
 - o Stima durata giorno e notte (altezza orbita)
 - Step 3
 - o Scelta tipo di cella (Silicio, Arsenurio di Gallio ...)
 - o Efficienza = potenza in uscita / potenza in ingresso
 - Step 4
 - o Misura realistica delle proprietà delle celle
- Diagram illustrating the evaluation procedure for solar cell selection and efficiency calculation:
- Efficiency (Efficienza) is calculated as $\text{potenza in uscita} / \text{potenza in ingresso}$.
 - For Step 3, the efficiency is determined by the choice of cell type (Silicio, Arsenurio di Gallio ...).
 - For Step 4, the realistic measurement of cell properties is required.
 - Additional data points shown:
 - 15% efficiency (green arrow pointing to the efficiency calculation).
 - 20% efficiency (green arrow pointing to the efficiency calculation).
 - Si: 204 W.m^{-2} (green arrow pointing to the efficiency calculation).
 - GaAs: 272 W.m^{-2} (green arrow pointing to the efficiency calculation).
 - Sole: 1368 W.m^{-2} (red arrow pointing to the efficiency calculation).

Immagazzinamento di Energia: Batterie

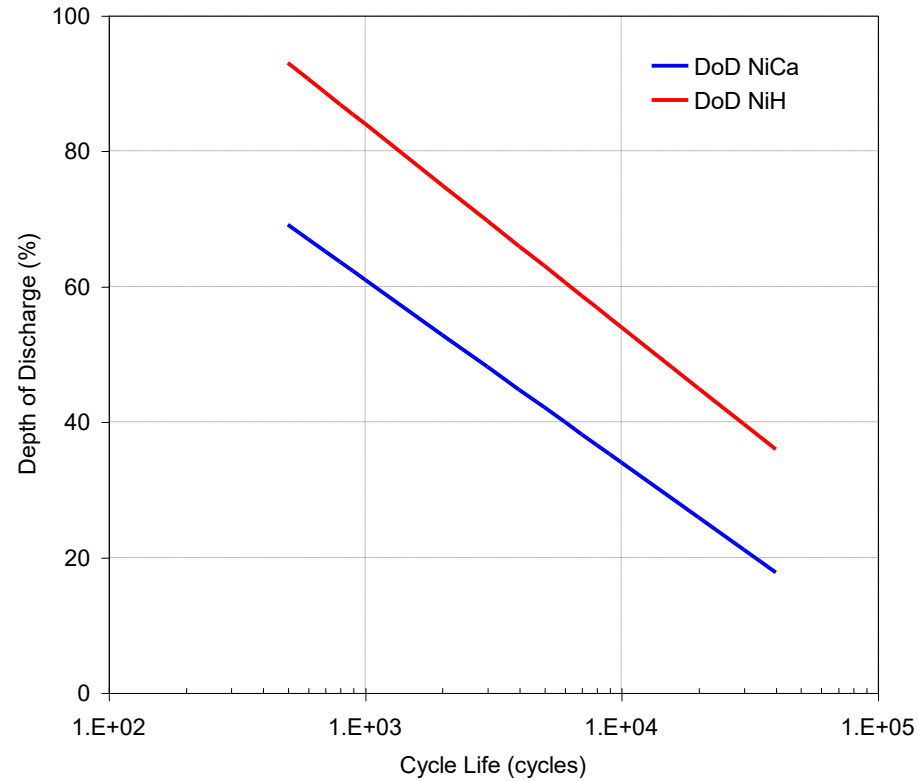
- Per alimentare lo strumento durante l'eclisse
- Elementi chiave per definire il sistema:
 - o fisici (dimensioni, massa, posizione, ambiente ...)
 - o elettrici (voltaggio, carico, cicli di lavoro, tempi di attivazione e di accumulazione ...)
 - o sistematici (costo, affidabilità, produzione ...)
- Caratteristiche tipiche:
 - o Densità specifica di energia ($\text{W}\cdot\text{ora}\cdot\text{kg}^{-1}$)

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
 - o cicli carica/scarica, durata dell'eclisse, carico dell'eclisse
- Selezionare il tipo di batteria
- Determinare la capacità della batteria: C_{batt}
 - o $C_{batt} = P_e T_e / DOD / n$ 
 - ~ 0.9 $\sim 20-70\%$ (NiCd) /
 - $\sim 30-90\%$ (Ni-H)
- Determinare la massa della batteria: m_{bat}
 - o $m_{bat} \sim C_{batt} / e_{batt} \sim C_{batt} / 35$ (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
	474.4

15%

➤ Potenza richiesta: P_{sa}

$$P_{sa} T_d = P_e T_e / X_e + P_d T_d / X_d$$

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

$$p_{bol} = p_o I_d \cos \theta, p_o = \eta K$$

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

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)

$$\text{DoD}(100 \text{ cicli}) = 88\%$$

$$\text{DoD}(10000 \text{ cicli}) = 34\%$$

$$R_T = 6378 \text{ km}$$

$$\mu = 398600 \text{ km}^3 \cdot \text{s}^{-2}$$

$$\tau = 2\pi \text{ rad/q} (a^3/\mu)$$

$$\tau_e = 35.4\% \tau$$

Solar Cell

Gallium Arsenide

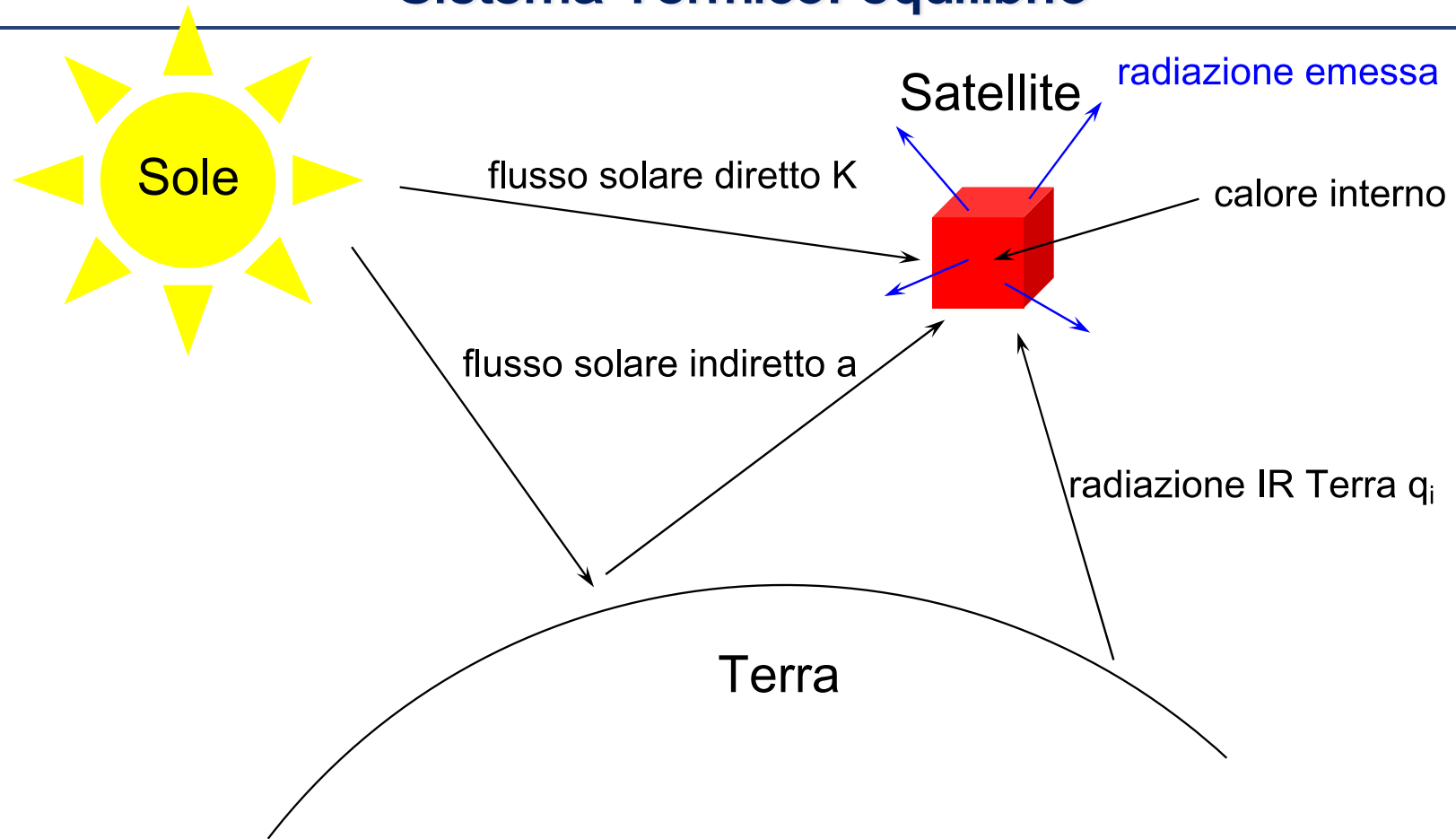
Efficiency	0.185
Degradation/year	0.0275
Daylight eff	0.85
Eclips eff	0.65
Inherent degradation	0.77
Sun angle	23.5 deg

Battery

Nickel Cadmium

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

Sistema Termico: equilibrio



Principi Trasferimento Calore 1/3

➤ Convezione

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

➤ Conduzione

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

➤ Irraggiamento – onde elettromagnetiche

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

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

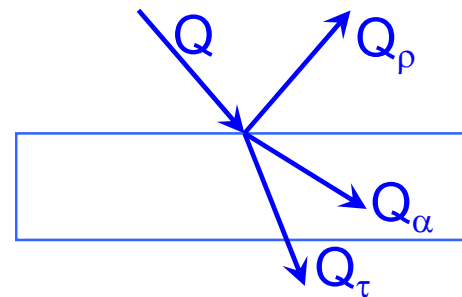
(emissione)

Principi Trasferimento Calore 2/3

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

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

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



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

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

Principi Trasferimento Calore 3/3

➤ Per un corpo nero:

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

➤ Corpo reale:

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

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

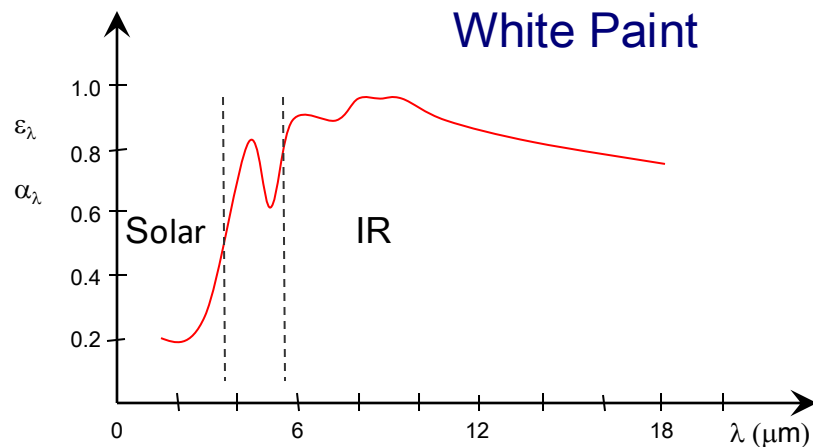
➤ Legge di Kirchoff:

o $\alpha_\lambda = \varepsilon_\lambda$

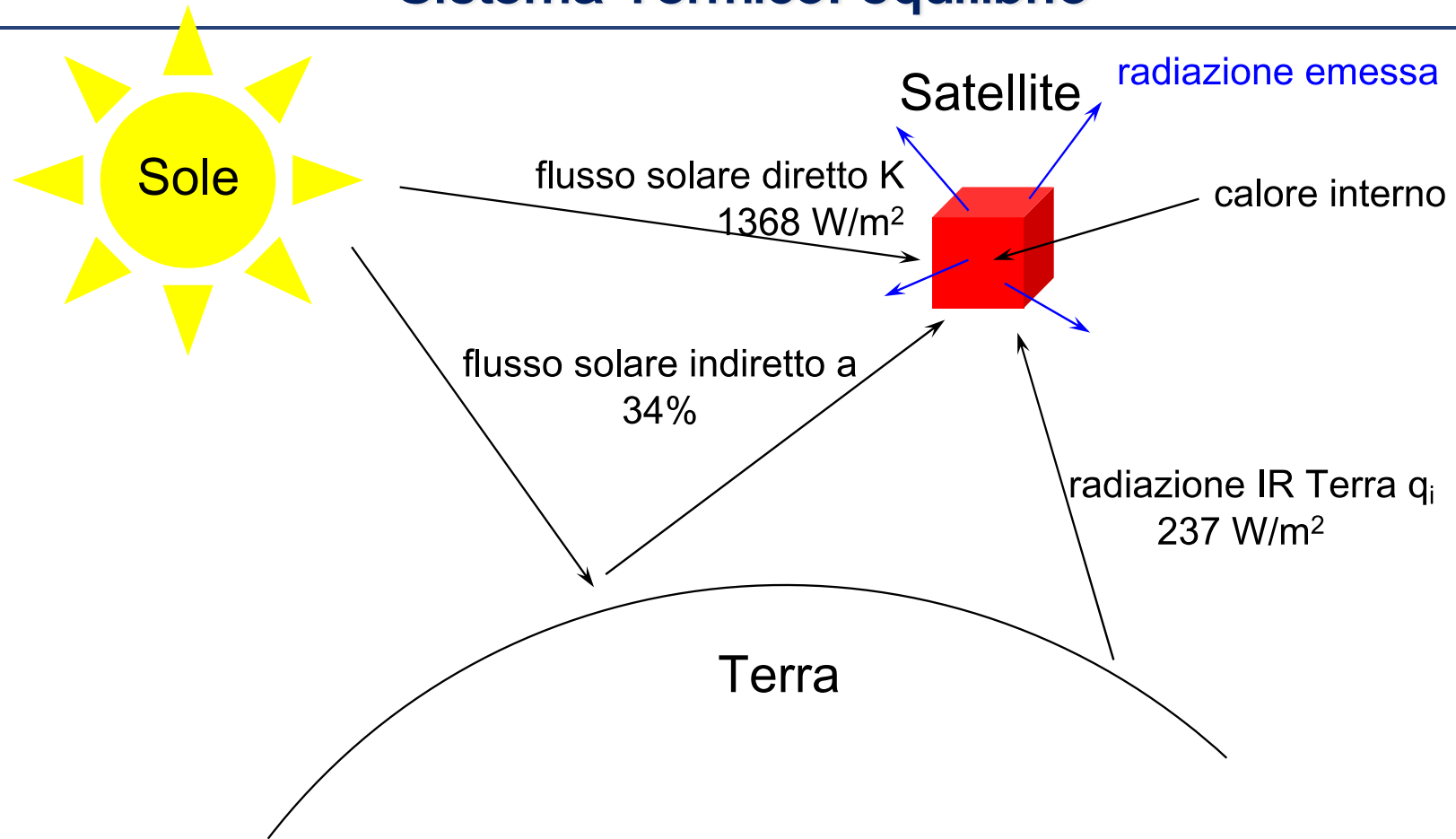
➤ Superficie bianca,
isolata dietro

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

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



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)

➤ $Q_{\text{sole}} = \alpha K A_{\perp}$ 0.252-0.975

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

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

➤ $Q_{\text{int}} = \dots$ $K_a = 0.664 + 0.521 \rho - 0.203 \rho^2$
(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

$$Q_{\text{sole}} + Q_{\text{albedo}} + Q_{\text{IR terra}} = Q_{\text{emessa}(t,b)} + Q_{\text{conv}}$$

$$\frac{1}{2} A_T / A_{\perp} = \frac{1}{2} 2L^2 / L^2 = 1 \text{ (flat panel)}$$

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

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

➤ Caso peggiore: temperatura massima

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

➤ Caso peggiore: temperatura minima

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

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.m⁻², $a = (34 \pm 5)\%$, $q_i = 237 \pm 21$ W.m⁻²)

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