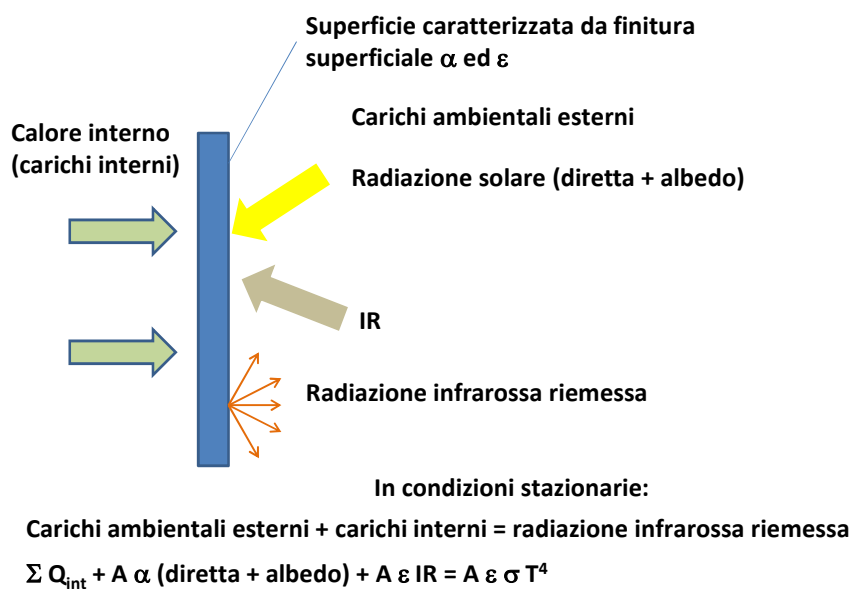


# FINITURE SUPERFICIALI

Rif. Cap. 4 Gilmore

## PROBLEMA FISICO



## CARATTERISTICHE DELLE DIVERSE FINITURE

- Cattivi assorbitori della radiazione solare (la riflette):  
pitture bianche, second surface mirror, Teflon con film di Al e Ag
- Cattivi assorbitori della radiazione solare e cattivi emettitori di IR:  
metalli puliti
- Buoni assorbitori della radiazione solare e buoni emettitori di IR:  
pitture nere

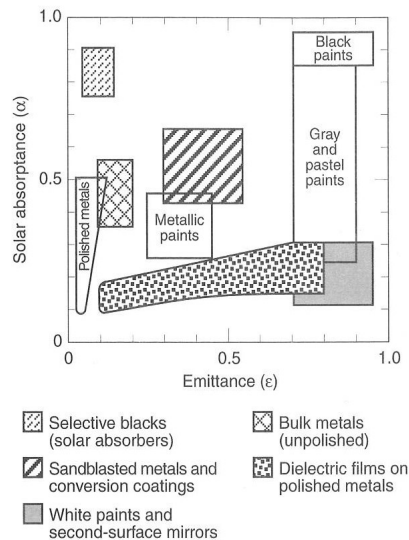


Fig. 4.2. Surface properties by type of finish.

## QUATTRO TIPI DI FINITURA SUPERFICIALE

- **Riflettore solare** Riflette la radiazione solare incidente, ma emette e assorbe IR
- **Assorbitore solare** Assorbe la radiazione solare incidente, ma emette una bassa percentuale di IR
- **Flat reflector** Riflette energia su tutto il range di lunghezze d'onda
- **Flat absorber** Assorbe energia su tutto il range di lunghezze d'onda

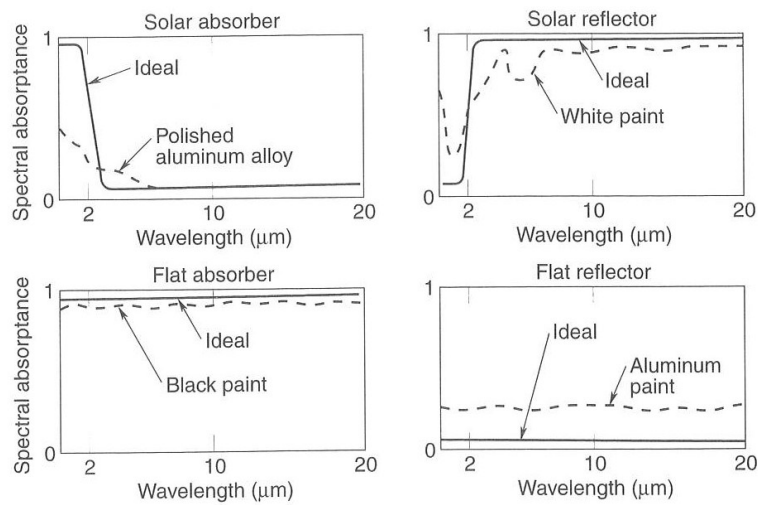
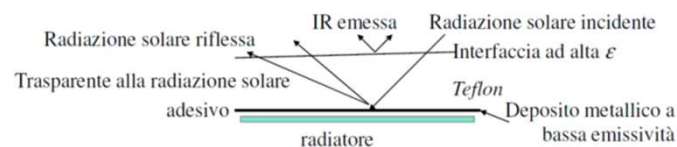


Fig. 4.3. Ideal representation of four basic passive-control surfaces.

### SOLAR REFLECTOR:

pitture bianche, OSR “optical solar reflector”, che lavorano sul principio del “second surface mirror”, con la radiazione solare che penetra attraverso un materiale trasparente ad alta emissività (Teflon, vetro), poi viene riflessa da un substrato metallico, producendo bassi  $\alpha$  alti  $\varepsilon$ . Un OSR popolare è il Teflon argentato (127  $\mu\text{m}$  di spessore con il teflon verso l’ambiente) applicato con un adesivo sulla superficie.

- 127  $\mu\text{m}$  Teflon argentato  $\alpha = 0.07$ ,  $\varepsilon = 0.79$
- Il Quartz mirror ( $\alpha = 0.08$ ,  $\varepsilon = 0.78$ ) è stabile, viene fornito in quadrati di lato 2-4 cm, 150-200  $\mu\text{m}$  di spessore.



**SOLAR REFLECTOR :**

Riflettori solari con alti rapporti  $\alpha / \epsilon$ , (es. vapori di alluminio depositati su acciaio inossidabile) raramente usati sui satelliti.

**FLAT ASSORBER:**

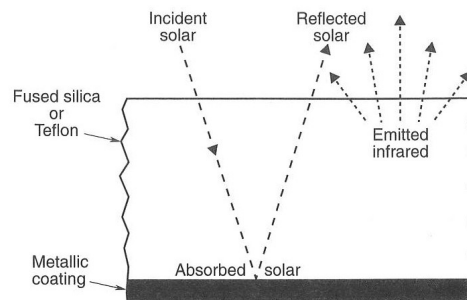
Pitture nere usate all'interno dei satelliti, inclusi i coperchi per l'elettronica) per aumentare lo scambio per radiazione.

Le principali superfici esterne di molti veicoli spaziali sono lo strato esterno degli isolanti, le coperture dei radiatori e le pitture.

- Lo **strato esterno degli isolanti** è fatto di Kapton alluminizzato, Kapton nero (Kapton nome Du Pont per una pellicola poliammide, stabile tra  $-269^{\circ}\text{C}$  e  $400^{\circ}\text{C}$ , utilizzato per le tute degli astronauti, non molto resistente allo stress meccanico), Beta cloth (stoffa tessuta con fibre simili a fibre di vetro. Il prodotto finale non brucia, fonde a temperature superiori a  $650^{\circ}\text{C}$ , viene utilizzato per le tute spaziali. Per ridurre la tendenza a rovinarsi quando manipolate le fibre possono essere ricoperte di teflon).
- Il Kapton alluminizzato è un materiale dal colore dorato, con moderato coefficiente di assorbimento solare, alta emissività IR, spessore da 0.0254 a 0.0762 mm.
- Il Kapton nero ha alto coefficiente di assorbimento solare, perché è caricato con carbonio per aumentarne la conducibilità elettrica.
- Il Beta cloth è una stoffa di fibre di vetro ricoperte di Teflon con basso coefficiente di assorbimento solare e alta emissività IR.

- Le coperture per i **radiatori** sono pittura bianca o “second surface mirror”.
- La “second surface mirror” è composta da un materiale trasparente (vetro di quarzo o Teflon) con grande emissività, posta su una superficie (foglio di argento o alluminio) a basso coefficiente di assorbimento solare. La “second surface mirror” di quarzo viene spesso detta “optical solar reflector” (OSR) e viene fornita in mattonelle di lato pochi centimetri e spessori fino a 0.25 mm. Queste mattonelle sono attaccate alla superficie del radiatore con adesivi siliconici o acrilici (minima -45°C).

La “second surface mirror” di teflon (OSR flessibile) viene fornita in molti spessori come nastro con adesivo acrilico per facilitare l’installazione



- Le **pitture** bianche e nere sono le più usate. Quasi tutte le pitture hanno grande emissività, per cui la scelta è determinata dal coefficiente di assorbimento solare e dal suo deterioramento nell’ambiente spaziale, la facilità di applicazione e la conduttività elettrica. Gli interni sono spesso pitturati di nero per avere grande emissività, le superfici esterne compresi i radiatori sono spesso dipinte di bianco per minimizzare l’energia solare assorbita. Alcune pitture bianche aumentano il coefficiente di assorbimento solare più di altre nell’ambiente spaziale.
- Le pitture metalliche e le superfici metalliche hanno bassa emissività. Kapton con alluminio depositato o oro (il metallo è esposto), superfici pulite di alluminio o acciaio inossidabile. Si utilizzano sul serbatoio del combustibile o sugli ugelli per bloccare il flusso termico radiativo verso altri componenti
- Superfici come TiNOX (titanio e quarzo vengono evaporati e fatti reagire con ossigeno ed azoto si trasformano in TiNOX e depositati su nastro metallico) sono caratterizzati da alto coefficiente di assorbimento solare e bassa emissività. Vengono usate per alzare la temperatura di una superficie esposta al sole

**Table 4.1. Properties of Common Thermal Surface Finishes**

Surface Finish	$\alpha$ —Absorptance (beginning-of-life)	$\epsilon$ —Emittance
Optical Solar Reflectors		
8-mil quartz mirrors	0.05 to 0.08	0.80
Quartz mirrors (diffuse)	0.11	0.80
2-mil silvered Teflon	0.05 to 0.09	0.66
5-mil silvered Teflon	0.05 to 0.09	0.78
2-mil aluminized Teflon	0.10 to 0.16	0.66
5-mil aluminized Teflon	0.10 to 0.16	0.78
White Paints		
S13G-LO	0.20 to 0.25	0.85
PCBZ	0.16 to 0.24	0.87
Z93	0.17 to 0.20	0.92
ZOT	0.18 to 0.20	0.91
Chemglaze A276	0.22 to 0.28	0.88
Black Paints		
Chemglaze Z306	0.92 to 0.98	0.89
3M Black Velvet	~0.97	0.84

Surface Finish	$\alpha$ —Absorptance (beginning-of-life)	$\epsilon$ —Emittance
Aluminized Kapton		
1/2 mil	0.34	0.55
1 mil	0.38	0.67
2 mil	0.41	0.75
5 mil	0.46	0.86
Metallic		
Vapor-deposited aluminum (VDA)	0.08 to 0.17	0.04
Bare aluminum	0.09 to 0.17	0.03 to 0.10
Vapor-deposited gold	0.19 to 0.30	0.03
SiOx on VDA tape	0.14	0.12
FSS-99 (overcoated silver)	0.03	0.02
Miscellaneous		
1/4-mil aluminized Mylar, Mylar side	(Material degrades in sunlight)	0.34
Beta cloth	0.32	0.86
Astro Quartz	~0.22	0.80
TiNOX	0.95	0.05
Maxorb	0.90	0.10

## PROBLEMA DEL DEGRADO

Normalmente aumenta l'assorbimento solare con effetto minimo sull'emissività.

I radiatori devono essere dimensionati per tenere conto del degrado nel tempo. Il sovradimensionamento dei radiatori per far fronte all'aumento del carico solare a fine missione richiede sistema di riscaldamento per non causare sottoraffreddamento dei componenti elettronici ad inizio missione.

La stabilità del rivestimento serve per limitare l'eccesso di carico solare e minimizzare la potenza di riscaldamento necessaria

## DETERIORAMENTO DELLE SUPERFICI PER IL CONTROLLO TERMICO

- Le superfici per il controllo termico subiscono l'effetto delle particelle cariche, della radiazione UV, dei film di contaminanti che si depositano sulle superfici dei satelliti. Il risultato finale di questi processi è di solito un aumento del coefficiente di assorbimento solare con quasi nessun effetto sull'emissività IR. I radiatori dei velivoli spaziali devono quindi essere dimensionati per tener conto di questo aumento nel tempo dell'energia solare assorbita. All'inizio della missione a causa del sovradimensionamento dei radiatori, il velivolo spaziale sarà più freddo; si dovranno utilizzare riscaldatori per evitare basse temperature dei componenti elettronici.
- Di seguito saranno presentati gli effetti dei **contaminanti**, della **radiazione UV**, dell'**ossigeno atomico (OA)**, delle **particelle cariche**, dei **detriti spaziali** sulle superfici per il controllo termico.

### CONTAMINAZIONE

- Sono contaminanti particelle e composti rilasciati in fase gassosa da materiali come film plastici, adesivi, schiume, lubrificanti, pitture.
- Alcune particelle sono depositate sulle superfici del velivolo spaziale e derivano dagli scarichi del motore durante il decollo o dalla turbolenza all'interno che muove particelle presenti.
- Altre particelle derivano dal fatto che frazioni a basso peso molecolare di materiali polimerici diventano prima volatili e poi condensano sulle superfici fredde come i radiatori. Questo processo è importante nei primi mesi della missione e diminuisce con il tempo. Poiché però il processo di diffusione di questi componenti volatili è molto lento, il fenomeno continua per molti anni.
- Questi componenti volatili condensano sulle superfici a velocità maggiore se la superficie è illuminata dal sole, perché gli UV favoriscono il legame chimico. A causa degli UV poi, lo strato di contaminante depositato diventerà sempre più scuro nel tempo, aumentando il coefficiente di assorbimento solare delle superfici. Studi sperimentali e teorici indicano un aumento del coefficiente di assorbimento solare di 0,01 ogni 0,1  $\mu\text{m}$  di contaminante, anche se i valori riportati variano molto

### CONTAMINAZIONE

- La contaminazione può essere minimizzata scegliendo materiali opportuni, proteggendo le superfici dai gas di scarico dei motori, disponendo opportunamente i fori di aerazione del velivolo spaziale.
- Le rifiniture metalliche e le superfici metalliche non sono fonte di materiale volatile e non contribuiscono alla contaminazione delle superfici per il controllo termico o delle ottiche.
- I materiali possono essere sottoposti a Test ASTM E 595-77/84. Si riscaldano i provini a 125°C per 24 ore e si raccolgono i prodotti volatili su una superficie a 25°C. In tabella sono riportati
- TML (%) percent total mass loss
- CVCM (%) percent volatile condensable materials raccolti
- Per NASA TML deve essere < 1% e CVCM <0.1%.



**Table 4.2. Outgassing Data for Thermal-Control Surface Materials**

Material	TML (%)	CVCM (%)
OSR	0.00	0.00
FEP Teflon	0.77	0.35
Kapton	0.78	0.03
Glass fabric/Kapton	0.42	0.05
Black Kapton	0.50	0.02
Glass fabric/Black Kapton	0.53	0.06
White polyurethane paint	0.99	0.08
Black polyurethane paint	1.91	0.28
White silicone paint	0.54	0.10
Black silicone paint	0.43	0.04
White inorganic paint	>1.00	0.00

TML (%) percent total mass loss

CVCM (%) percent volatile condensable materials

## RADIAZIONE UV

La porzione UV dello spettro elettromagnetico viene di solito suddiviso in due regioni:

- UV vicino, con lunghezze d'onda comprese tra 0.2 e 0.4  $\mu\text{m}$ , abbastanza costante nel tempo;
- UV in vuoto "vacuum UV, VUV", con lunghezze d'onda minori di 0.2  $\mu\text{m}$ ; si trasmette solo nello spazio vuoto perché i gas dell'atmosfera assorbono queste onde elettromagnetiche a piccola lunghezza d'onda; VUV fluttua con l'attività solare, può aumentare anche di un fattore 3 in corrispondenza ai picchi di attività solare.

## RADIAZIONE UV

La ragione per la quale le superfici vengono rese scure dagli UV aumentandone il coefficiente di assorbimento solare non è ben nota. Si pensa che:

- a) gli UV danno luogo a sbilanciamento di elettroni nei cristalli ionici, dando luogo a centri di colore che, con associate bande di assorbimento, provocano quindi un aumento dell'assorbimento solare;
- b) nelle pitture e nei film polimerici gli UV iniziano reazioni chimiche. L'assorbimento del fotone UV eccita la molecola polimerica tanto da rompere il legame chimico nella molecola, dando luogo a due radicali liberi, molto reattivi, (con singoli elettroni negli orbitali), che reagiscono con altre molecole dando luogo ad altri radicali. Alla fine del processo, dall'unione di due radicali, si sono formate molecole più grandi, con bande di assorbimento a lunghezze d'onda superiori a  $0.4 \mu\text{m}$ , con aumento e presenza di bande di assorbimento attraverso lo spettro solare, e aumento di assorbimento solare.

## RADIAZIONE UV

- Il Teflon presenta piccolo aumento di assorbimento quando soggetto agli UV. La ragione non è chiara.
- Poliuretano e pitture silconiche presentano grande aumento di assorbimento quando soggetti agli UV.

### OSSIGENO ATOMICO AO

- Nelle orbite basse “Low Earth orbit (LEO)”, l’ossigeno atomico è responsabile dell’**erosione** esterna dei materiali per il controllo termico a base di idrocarburi.

***Low Earth orbit (LEO):** avvengono ad un’altezza minore di 2000 km, hanno un periodo di circa 1,5 ore, possono essere circolari o ellittiche. Hanno un diametro poco più grande di quello della terra che è pari a 12760 km).*

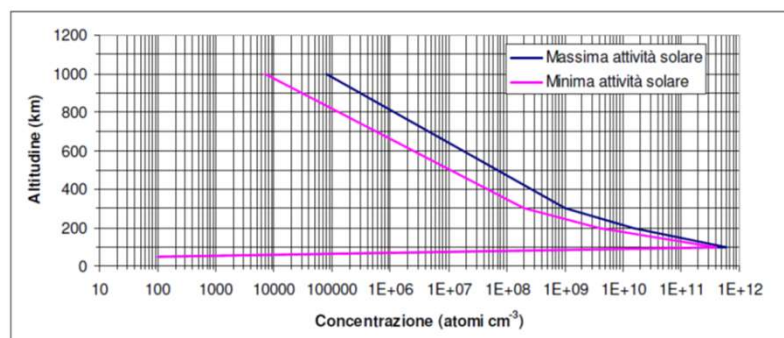
- L’ossigeno atomico si forma dalla dissociazione e fotolisi UV dell’ossigeno molecolare nell’atmosfera alta. La concentrazione di AO varia inversamente con l’altitudine tra 100 e 1000 km e direttamente con l’attività solare (aumenta la componente VUV della radiazione solare).
- L’erosione AO è quindi un problema solo per orbite sotto i 1000 km di altezza.
- AO è molto reattivo perché contiene un solo elettrone nello shell di valenza. Inoltre nelle orbite LEO l’alta velocità del velivolo spaziale rispetto all’atmosfera attorno ( $8000 \text{ m s}^{-1}$ ) impartisce ulteriore energia all’AO.

### OSSIGENO ATOMICO AO

- Questa energia è sufficiente per rompere i legami chimici nei materiali polimerici o nei contaminanti depositati. Nel caso di materiali a base di idrocarburi, i prodotti formati ( $\text{CO}$ ,  $\text{CO}_2$ ,  $\text{H}_2\text{O}$ ) a seguito dell’attacco di AO sono volatili ed evaporano dalla superficie lasciando altra superficie per ulteriore reazione.
- Per i materiali siliconici (che contengono un po’ di idrocarburi HC) l’erosione è limitata a pochi strati atomici. La parte HC del polimero viene erosa lasciando una superficie vetrosa-silicea non più attaccabile dall’AO.
- Rivestimenti protettivi resistenti all’AO sono stati sviluppati per Kapton e Teflon; questi rivestimenti sono delicati e saltano via durante la costruzione del velivolo spaziale.
- Le efficienze di reazione all’AO di vari materiali, senza rivestimento protettivo, sono riportate in tabella 4.3, da space shuttle tests di 2 settimane ma confermate da tests sul periodo più lungo.
- La figura 4.5 mostra la concentrazione di AO nell’atmosfera in presenza degli estremi di attività solare.

**Table 4.3. Atomic-Oxygen Reaction Efficiencies of Commonly Used Thermal-Control Materials**

Material	AO Reaction Efficiency $10^{-24} \text{ cm}^3/\text{AO atom}$
Fused silica	Negligible
Clear FEP or TFE Teflon	0.05
Polyimide (Kapton)	2.6
Carbon-filled (black) polyimide	2.5
Gloss white polyurethane paint	0.9
Flat black polyurethane paint	0.9
Gloss black polyurethane paint	4.5
Silicone paints	Negligible
Z-93 white paint	Negligible
YB-71 white paint	Negligible
Aluminum, bare and anodized	Negligible
Beryllium	Negligible
Magnesium, DOW 17 coated	Negligible
Stainless steel	Negligible
Titanium, bare and anodized	Negligible



A 500 km di altitudine (concentrazione di AO=  $6 \times 10^7$  atomi  $\text{cm}^{-3}$ ),  
 velocità di orbita  $8000 \text{ m s}^{-1}$  l'erosione superficiale di Kapton non protetto  
 nel periodo

1 anno = 31 500 000 s è:

$$6 \times 10^7 \text{ atomi cm}^{-3} \times 800000 \text{ cm s}^{-1} \times 31\,500\,000 \text{ s} \times 2.6 \times 10^{-24} \text{ cm}^3 \text{ atomo}^{-1} = 3.9 \times 10^{-3} \text{ cm}$$

### PROTONI, ELETTRONI, NEUTRONI

- Protoni ed elettroni sono particelle cariche che danneggiano i materiali per il controllo termico. I neutroni sono neutri elettricamente, ma hanno grande capacità di penetrare nei materiali ma non li danneggiano.
- Protoni ed elettroni sono concentrati nelle fasce di Van Allen. Le orbite GEO sono allocate nella fascia esterna di Van Allen, per cui le superfici esterne dei velivoli GEO sono soggette a grandi dosi di radiazione ionizzante.

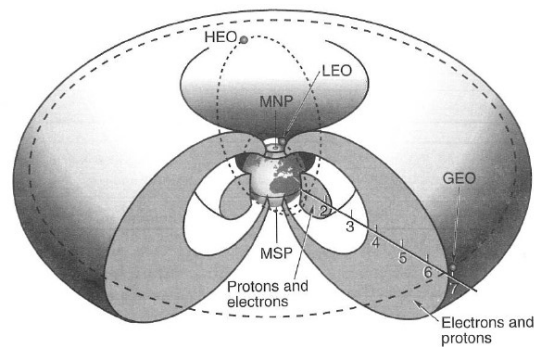


Fig. 4.6. Earth's radiation belts.

### PROTONI, ELETTRONI, NEUTRONI

- Le cinture di Van Allen sono due anelli concentrici posti sopra l'equatore.  
*(Geosynchronous (GEO): è l'orbita più comune, circolare, a bassa inclinazione (<10 gradi), ad un'altezza di 35786 km, il periodo è pari a quello della rotazione per cui rimangono sempre sullo stesso punto della Terra (osservazioni meteo, sorveglianza, comunicazione).*
- Le particelle cariche elettricamente (protoni ed elettroni) colpiscono il velivolo spaziale da tutte le direzioni, mentre solo la superficie esposta al sole è soggetta simultaneamente a UV e particelle cariche.
- Il limite inferiore della cintura di Van Allen è ad un'altitudine di circa 1000 km, così i velivoli in LEO non sono esposti a grande quantità di radiazione ionizzante. Gli aumenti di assorbimento solare in LEO sono dovuti a radiazione solare UV.  
*(Low Earth orbit (LEO): avvengono ad un'altezza minore di 2000 km, hanno un periodo di circa 1,5 ore, possono essere circolari o ellittiche. Hanno un diametro poco più grande di quello della terra che è pari a 12760 km).*

## PICCOLE METEORITI E DETRITI

- Meteoriti sono oggetti naturali che arrivano da tutte le direzioni. Sono stati localizzati i detriti di dimensioni maggiori di 10 cm. Quelli tra 1 e 10 cm sono un problema per gli astronauti in attività fuori del veicolo e per i veicoli in LEO. Dell'esistenza di detriti con dimensioni minori di 1 cm ci si rende conto vedendo i crateri sui veicoli che tornano dallo spazio.
- Il danno sui materiali per il controllo termico è piccolo

## PEGGIORAMENTO DELLE CARATTERISTICHE NEL TEMPO

- il teflon viene danneggiato dalle particelle cariche e dalla deposizione dei contaminanti.
- Nell'orbita LEO il peggioramento delle caratteristiche è minore a causa della relativa assenza delle particelle cariche. In GEO è più intensa

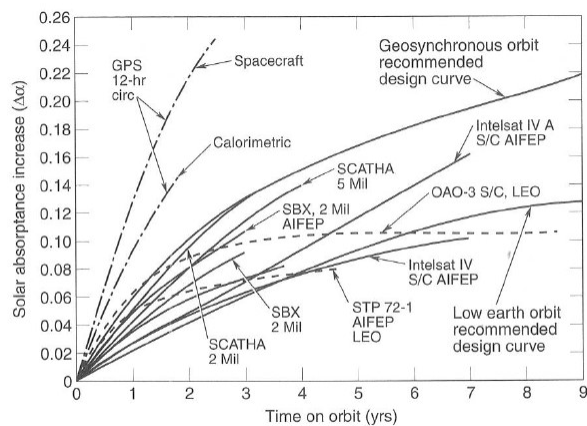


Fig. 4.9. Metalized Teflon degradation.

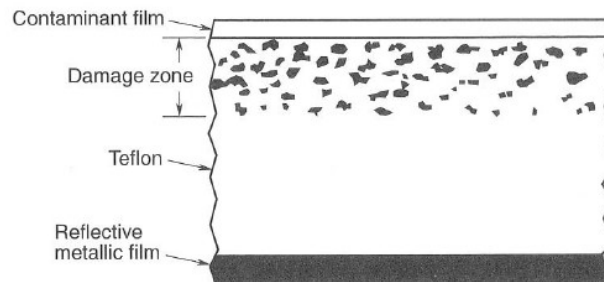


Fig. 4.8. Metalized Teflon degradation model.

Argentato o alluminato

### PEGGIORAMENTO DELLE CARATTERISTICHE NEL TEMPO

La pittura bianca S13GLO (ossido di zinco con legante siliconico) risente di UV e particelle cariche. Z93 (ossido di zinco con legante silicato di potassio)

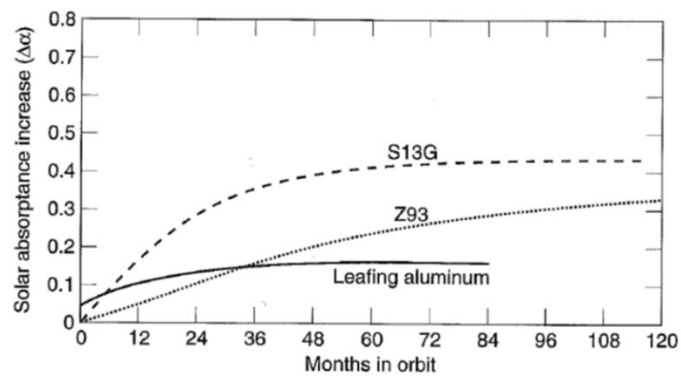


Fig. 4.10. Paint degradation.

## PEGGIORAMENTO DELLE CARATTERISTICHE NEL TEMPO

- Kapton in orbita GEO

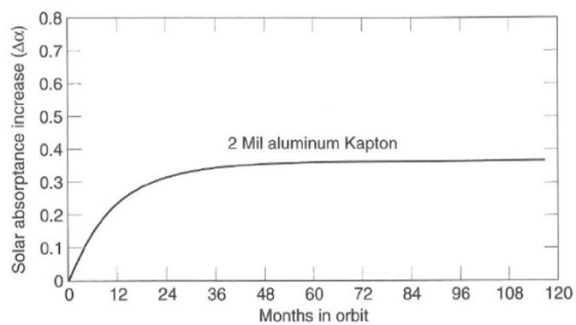


Fig. 4.11. Kapton absorptance degradation.

Superficie	Coefficiente di assorbimento $a^s$	Emissività $\epsilon$
Alluminio pulito (le proprietà dipendono dalla pulitura)	0.08-0.15 +0.001/anno	0.03-0.04
Pittura nera Z306 erosione da AO tra 200 e 500 km	0.95 no degradazione	0.85
Pittura nera D111 Stabile resiste ad AO	0.98	0.93



Superficie	Coefficiente di assorbimento $a^S$	Emissività $\epsilon$
Pittura bianca Z93 <1500 km resiste a AO pesante esposizione agli UV  lieve esposizione agli UV  GEO	0.17±0.01  0.19 1 anno 0.25 > 5 anni  0.19 1 anno 0.22 > 5 anni  0.23 1 anno 0.3 2 anni	0.86±0.02
Pittura bianca YB71 <1500 km resiste a AO pesante esposizione agli UV  lieve esposizione agli UV  GEO	0.15 ±0.01  0.18 1 anno 0.25 > 5 anni  0.17 1 anno 0.22 > 5 anni  0.25 1 anno 0.35 2 anni	0.86±0.02
Pittura bianca S13GLO <1500 km pesante esposizione agli UV grave erosione da AO tra 200 e 500 km  lieve esposizione agli UV  GEO	0.2±0.02  0.3 dopo 1 anno 0.4 > 5 anni  0.3 dopo 1 anno 0.37 > 5 anni  0.33 1 anno 0.68 >5 anni	0.84±0.02

Superficie	Coefficiente di assorbimento $a^S$	Emissività $\epsilon$
Uncoated quartz mirror 152 µm <1500 km  GEO	0.08±0.005  0.09 dopo 1 anno +0.004 /anno  0.09 dopo 1 anno +0.004/anno	0.78±0.02
Kapton alluminizzato 127 µm (kapton all'esterno) erosione da AO tra 200 e 500 km GEO dopo 3 anni	0.48±0.02  0.6-0.67	0.81±0.01
Kapton alluminizzato 50 µm (kapton all'esterno) erosione grave da AO tra 200 e 500 km  GEO dopo 3 anni	0.4±0.02  +0.05 per anno max 0.6	0.71±0.01
Celle solari, GaAs Degradazione da contaminazione	0.88 +0.005/anno	0.8
Celle solari, silicio Degradazione da contaminazione	0.75 +0.005/anno	0.82

I radiatori con coperture critiche devono essere posti in regioni dove UV e flussi di contaminazione non sono eccessivi.

- Con le ricoperture adesive si deve evitare che rimangano sacche d'aria.
- Si deve evitare Kapton esposto in LEO, perché viene danneggiato da ossigeno atomico. L'erosione può essere accettata in posti non soggetti a radiazione solare.
- Il teflon argentato è accettato per i radiatori in LEO