

رنگ و پوشش های حرارتی سطوح

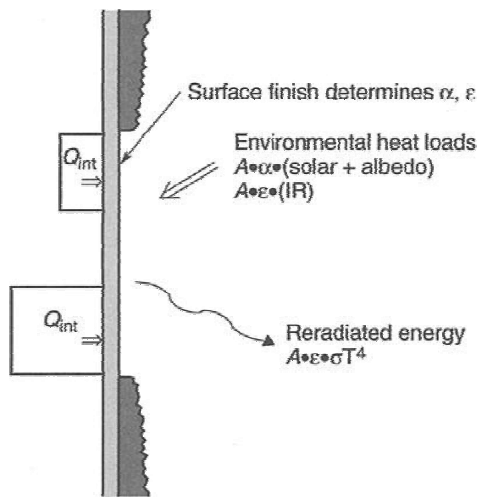
- ❖ رنگ ها و پوشش های حرارتی سطوح
- ❖ نمونه هایی از پوشش های حرارتی معمول سطوح
- ❖ عوامل کاهش خواص پوشش ها
 - آلودگی ها
 - تشعشع فرابنفش
 - اکسیژن اتمی
 - پرتون ها، الکترون ها و نوترون ها
 - خرده شهاب سنگ ها و ریززباله های فضایی
- ❖ نرخ کاهش خواص ترموآپتیکی پوشش های سطوح
- ❖ ملاحظات اتصال زمین

رنگ و پوشش های حرارتی

پوشش های حرارتی

- ❖ طراحی حرارتی به کارگیری پوشش های حرارتی وابسته به طول موج های مختلف برای مقاصد متفاوت

Wave length-dependent thermal-control coating



Environmental loads + ΣQ_{int} = Reradiated energy
 (Steady state)

- ❖ کوپل تشعشعی سطوح خارجی ماهواره با محیط فضا
- ❖ قرارگیری سطوح خارجی در معرض منابع مختلف انرژی مانند خورشید، آلبدو، IR
- ❖ بالانس انرژی بین انرژی دریافتی از محیط، اتلافات اجزای داخلی و انرژی صادر شده به محیط
- ❖ اهمیت خواص تشعشعی سطوح داخلی برای تعدیل دماهای اجزای داخلی

دو خاصیت مهم سطح { IR emittance (ϵ)
 Solar absorber (α)

پوشش های حرارتی

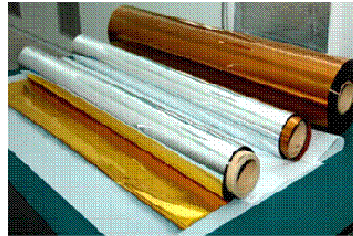
رنگ های پوشش های حرارتی

❖ مثال هایی از کاربردهای پوشش های مختلف در ماهواره ها

○ حداقل کردن انرژی خورشیدی جذب شده و حداکثر کردن انرژی IR موج بلند ساطع شده

مثال:

- Solar reflector (second-surface mirrors)
- White paints
- Silver or aluminum-backed Teflon



○ حداقل کردن انرژی خورشیدی جذب شده و انرژی IR ساطع شده

مثال:

- Polished metal (aluminum foil & gold plating)

○ حداکثر کردن انرژی IR ساطع شده و جذب شده

مثال:

- Black paints

پوشش های حرارتی

رنگ های پوشش های حرارتی

❖ پوشش ها (Coating)

○ شامل یک یا چند لایه از یک ماده (Substance) بر روی یک زیرلایه (Substrate)

○ استفاده از پوشش های اپتیکی (Optical coating) در کنترل دمای ماهواره ها از سال ۱۹۵۷ میلادی

○ توسعه پوشش ها در دهه های گذشته در راستای:

- پایداری خواص ترموپستیکی در شرایط محیطی فضا (in-space stability)
- کاهش میزان گازروی (outgassing)
- چسبندگی مکانیکی پوشش به زیرلایه (mechanical adhesion to the substrate)
- دستیابی به گستره وسیعی از ترکیب های مختلف از ضرایب جذب و صدور

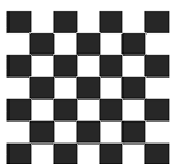
$$0.05 \leq \text{hemispherical infrared emissivity } (\epsilon) \leq 0.95$$

$$0.05 \leq \text{solar absorptance } (\alpha) \leq 0.95$$

○ استفاده از ترکیب چند پوشش به صورت صفحه شطرنجی یا نواری برای دستیابی به

ضرایب صدور و جذب معین

stripe pattern

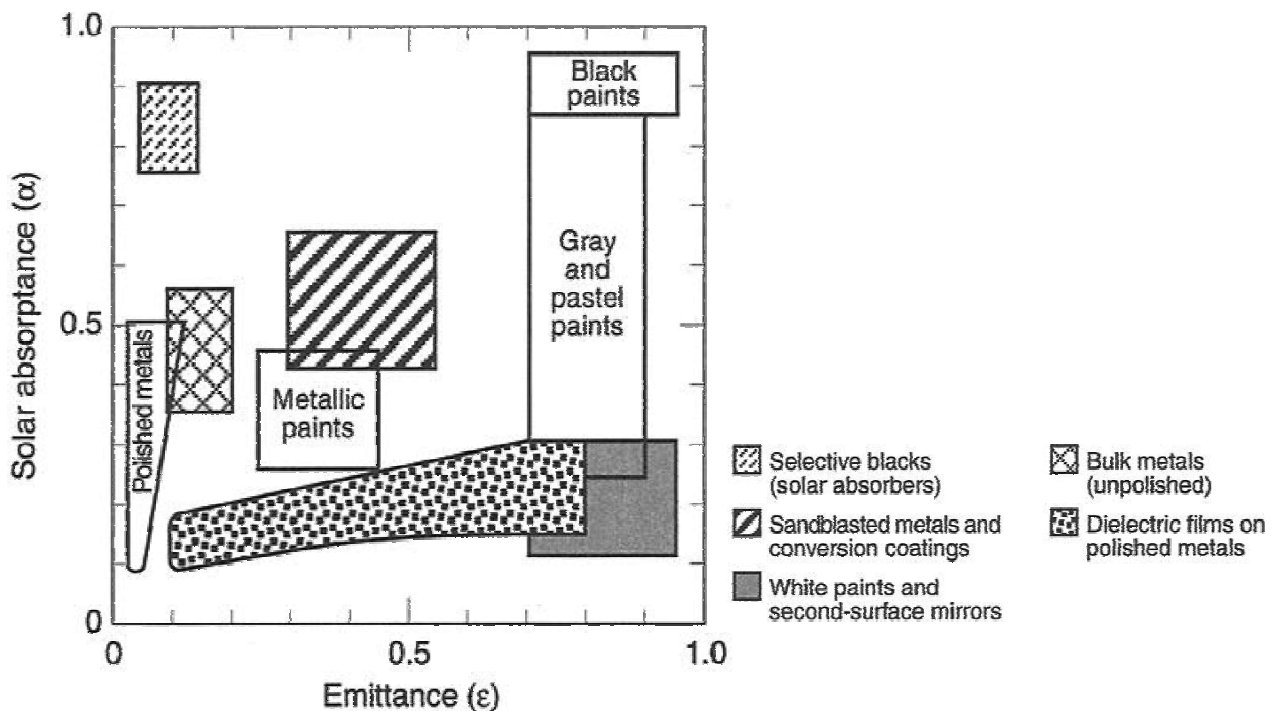


checkerboard pattern

❖ انواع پوشش ها به لحاظ ترکیب فیزیکی (۱۹۷۲ میلادی)

- پوشش های رنگ دانه ای (Pigmented coatings): ترکیبی از رنگ دانه یا ماده ملونه (Pigment) و یک حلال (Solvent)
- پوشش های تماسی (Contact coatings): متشکل از لایه هایی از یک ماده که بر روی زیرلایه پوشانده شده است بدون آنکه بین ماده پوششی با زیرلایه واکنش شیمیایی رخ دهد
- پوشش های تبدیلی (Conversion coatings): ترکیبی از لایه هایی از مواد معین که طی یک عملیات شیمیایی بر روی زیرلایه نشانده شده و در آن زیرلایه و ماده پوشش دهنده باهم واکنش شیمیایی می دهند

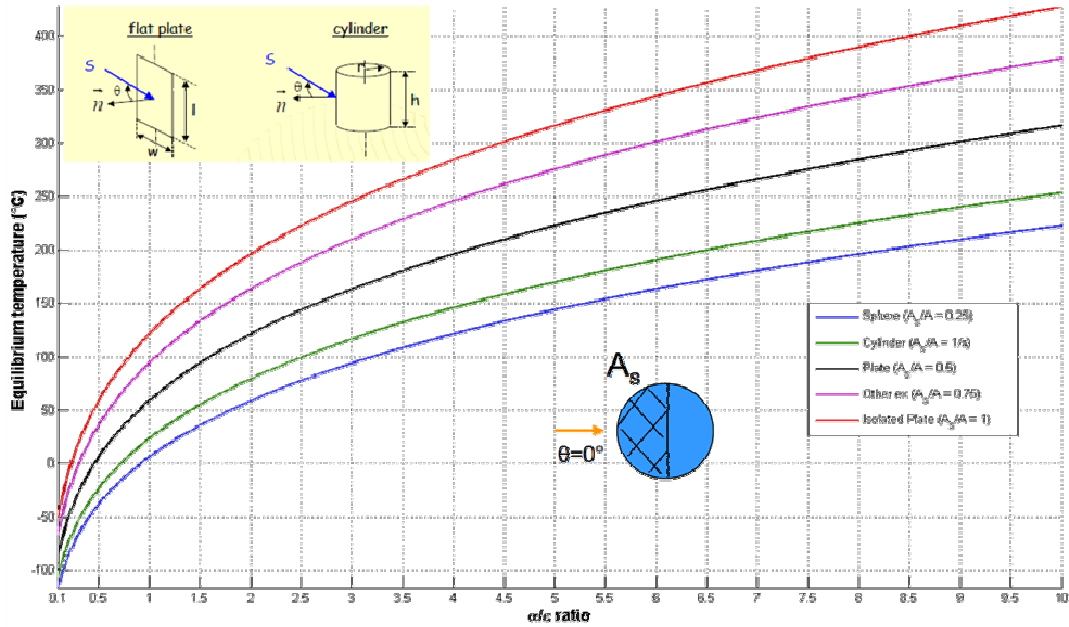
❖ گستره خواص ترمو اپتیکی برای مواد و پوشش های مختلف



❖ دمای تعادل سطوح مختلف در معرض خورشید و فضا (deep space)

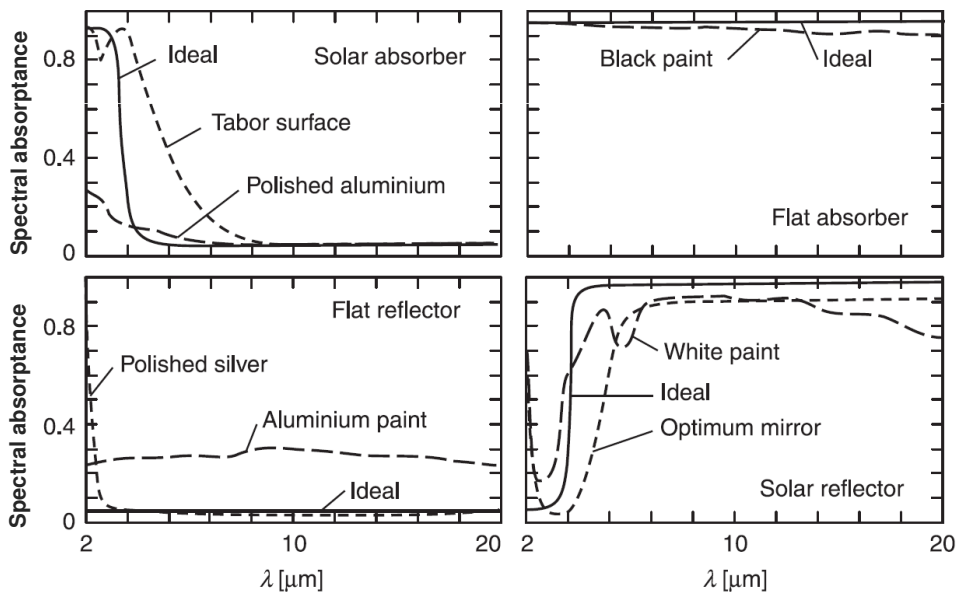
$$T = \sqrt[4]{T_{DS}^4 + \frac{\alpha}{\epsilon} \frac{A_s \cdot \cos \theta}{A} \frac{q_s}{\sigma}}$$

- وابسته به نسبت سطح در معرض خورشید و سطح روبه فضا
- وابسته به نسبت ضریب جذب به صدور

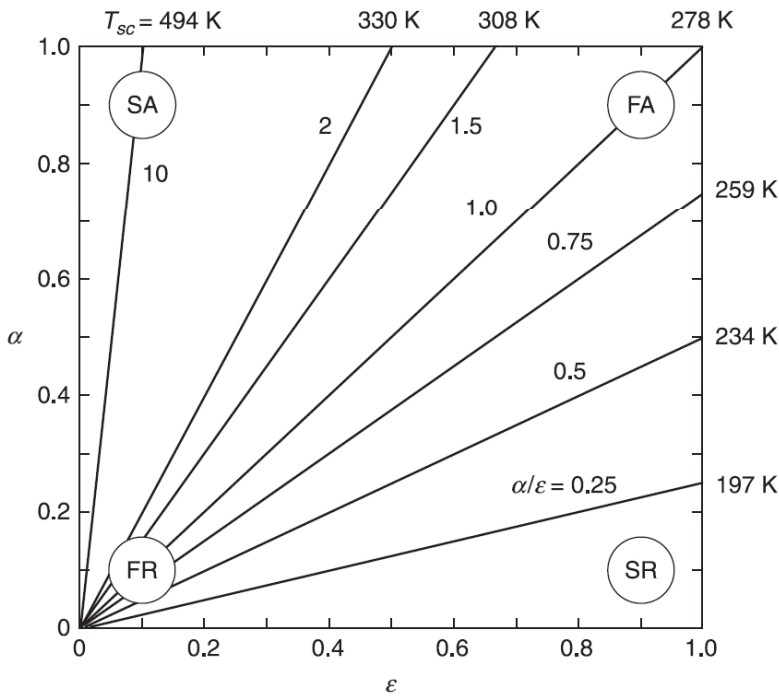


❖ تقسیم بندی سطوح کنترل حرارت براساس خواص ترموپاتیکی

- ✓ Solar absorber ($\alpha/\epsilon > 1$) (hot coatings)
- ✓ Solar reflector ($\alpha/\epsilon \ll 1$) (cold coatings)
- ✓ Flat absorber ($\alpha/\epsilon \sim 1$)
- ✓ Flat reflector ($\alpha/\epsilon \sim 1$)



❖ کره ای در معرض خورشید و دور از زمین بدون اتلاف حرارتی داخلی در حالت دائم



$$Q_{in} = \alpha q_{Sun} \pi r^2$$

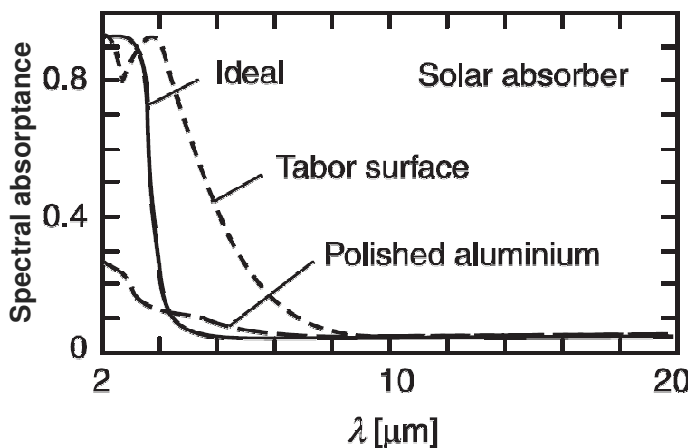
$$Q_{out} = 4\pi r^2 \epsilon \sigma (T^4 - 2.7^4)$$

$$T[K] = \sqrt[4]{\frac{\alpha q_{Sun}}{4\epsilon\sigma} + 2.7^4}$$

❖ جاذب خورشیدی (Solar absorber)

- جاذب درصد زیادی از انرژی خورشیدی برخوردی با سطح و ساتع کننده درصد کمی از انرژی IR به محیط
- نسبت بالای α/ϵ
- نمونه ها:

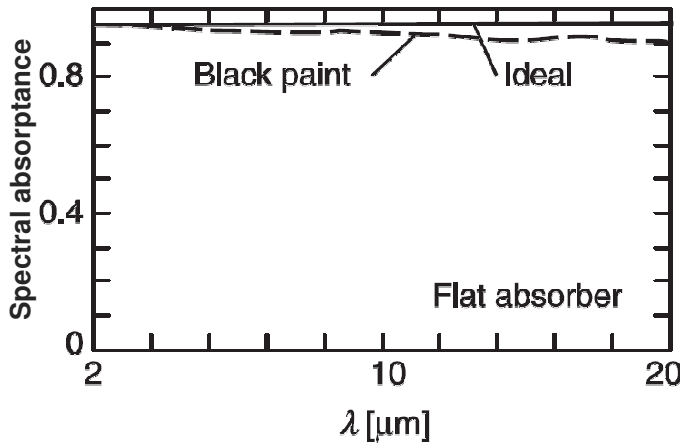
- Polished metal surface
- Polished beryllium
- Metal films
- Thin films of metal oxides



❖ جاذب کامل (Total or Flat absorber)

- جاذب انرژی برخوردی با سطح در تمام طیف (جذب درصد زیادی از انرژی خورشیدی و IR، و ساطع کننده درصد بالایی از انرژی IR به محیط)
- نمونه ها:

- رنگ های سیاه (black paints)
- آبکاری سطح با فلزاتی مانند مس و نیکل
- آنودایز سطح



- استفاده از پوشش سیاه در داخل ماهواره ها
- توزیع حرارت یکسان
- توزیع دما یکنواخت

❖ رنگ های سیاه (black paints)

- رنگ دانه های سیاه (black pigments) مانند:
 - Oxides
 - Mixed oxides
- حاملی از جنس الاستومر سیلیکونی (silicone elastomers) یا فلز قلیایی سیلیکاتی (alkali metal silicate)
- اطلاق رنگ سیاه به خاطر خواص نزدیک به جسم سیاه (black body)

❖ آبکاری سطح (plating)

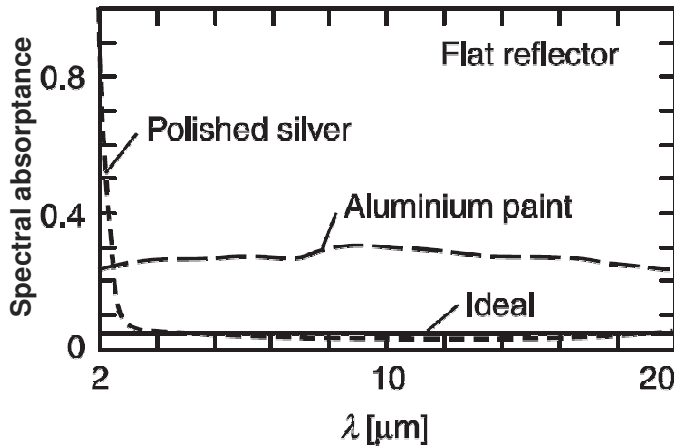
- با استفاده از فلزاتی مانند مس (copper) و نیکل (nickel) و متعاقباً اکسیداسیون (oxidation) سطح

❖ آنودایز سطح (anodizing)

- جنس مواد مورد استفاده در ماهواره آلیاژهای آلومینیوم و منگنزیم
- ایجاد یک پوشش محافظ در برابر خوردگی (CORROSION) همراه با خواص ترموپاتیکی مطلوب طی یک فرآیند ویژه

❖ بازتاب کننده کامل (Total or Flat reflector)

- انعکاس درصد بسیاری از انرژی برخوردی با سطح در تمام طیف (طیف خورشیدی و IR)
- نمونه ها:
- سطوح فلزی براق شده (highly polished metals)
- رنگ هایی با رنگ دانه هایی از جنس پولک های فلزی (paints pigmented with metal flakes)
- استفاده به منظور دی کوپل حرارتی (thermally decouple) سطح از سایر قسمت ها

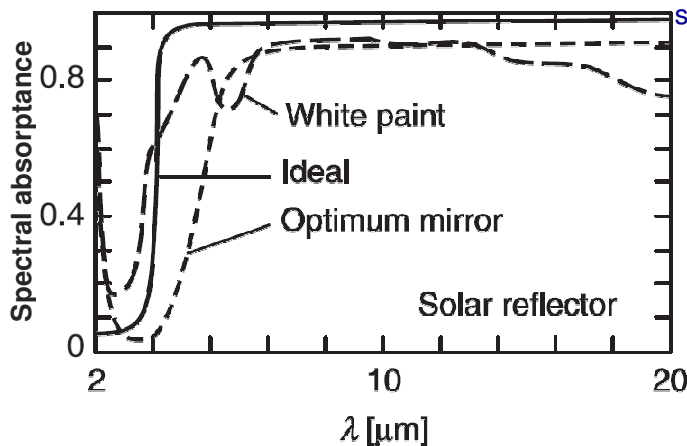


❖ بازتاب کننده خورشیدی (Solar reflector)

- انعکاس درصد بسیاری از انرژی خورشیدی و جذب و ساتع کننده خوب انرژی IR
- نسبت پایین α/ϵ
- نمونه ها:



- رنگ های سفید (white paints) $\alpha \approx 0.2$ & $\epsilon \approx 0.9$
- optical solar reflectors (OSR)
- second surface mirrors (SSM)

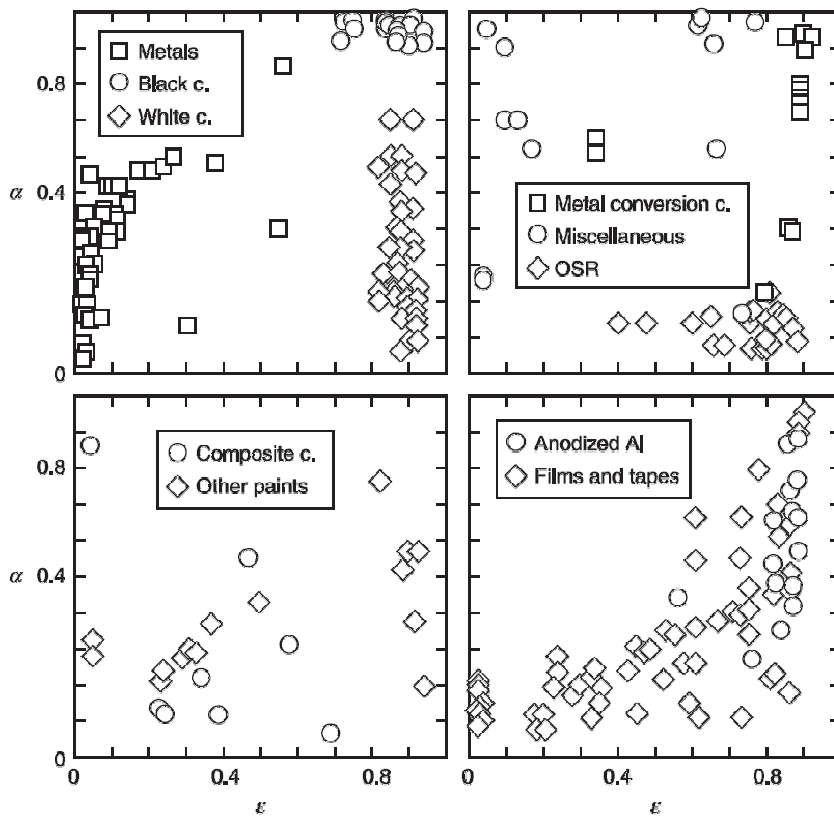


- fused silica mirrors ✓
- silvered Teflon tapes ✓
- $\alpha \approx 0.1$ & $\epsilon \approx 0.9$

- استفاده برای پوشش سطوح سرد و رادیاتورهای در معرض خورشید

پوشش های حرارتی

رنگ باد پوشش های حرارتی



❖ خواص ترموپلاستیکی پوشش های مختلف

انواع پوشش های حرارتی

رنگ باد پوشش های حرارتی



❖ پوشش های First Surface Mirror (FSM)

- نسبت ضریب جذب به صدور حدود ۳ الی ۱۵
- ضریب جذب و صدور پایین سطح فلزی
- دمای تعادل سطح بالا با توجه به نسبت جذب به صدور

❖ زیرلایه های (substrate) معمول

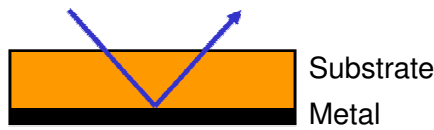
- PET (polyethylene terephthalate, polyester, Mylar)
- Polyimide (Kapton)
- FEP (Teflon)

Metal	Typical Emittance (ϵ)	Typical Absorptance (α)	α/ϵ
Gold	0.02	.28	14
Silver	0.02	.07	3.5
Aluminum	0.03	.12	4

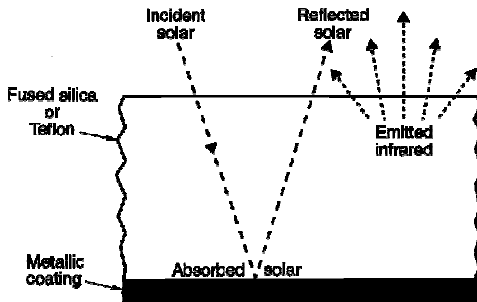
انواع پوشش‌های حرارتی

رنگ‌ها و پوشش‌های حرارتی

❖ پوشش‌های Second Surface Mirror (SSM)



- نسبت ضریب جذب به صدور پایین
- دمای تعادل پایین‌تر
- دستیابی به ضریب جذب پایین با سطح فلزی
- دستیابی به ضریب صدور بالا با زیرلایه



❖ زیرلایه‌های (substrate) معمول

○ PET (polyethylene terephthalate, polyester, Mylar)

• قیمت کمتر با قابلیت استفاده در دماهای به نسبت پایین

○ FEP (Teflon)

• قابلیت استفاده در دماهای به نسبت بالا با ضریب صدور بالاتر و قیمت متوسط

○ Polyimide (Kapton)

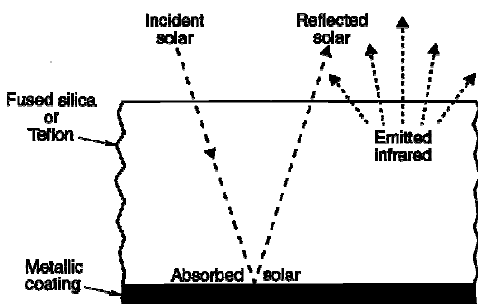
• قابلیت استفاده در دماهای بالاتر و مقاومت سازه‌ای بالاتر در عین انعطاف‌پذیری، قیمت بالا

انواع پوشش‌های حرارتی

رنگ‌ها و پوشش‌های حرارتی

❖ پوشش‌های رادیاتورها

- معمولاً از نوع SSM با زیرلایه آینه‌ای یا رنگ سفید
- پوشش فلزی بازتابی از جنس آلومینیوم یا نقره
- استفاده از یک ماده شفاف (visibly transparent)
 - Teflon
 - Quartz glass



❖ تأمین ضرایب صدور و جذب مختلف با استفاده از:

- تغییر ماده زیرلایه (substrate)
- تغییر ضخامت زیرلایه
- تغییر پوشش فلزی (coating)

Metal	Solar Absorptance
Silver	.06-.09
Aluminum	.10-.14
Copper	.20-.30
Germanium	.50-.70
Inconel®	.60-.70

Film Thickness		Typical Emittance	
Mils	Microns	FEP	Polyimide
0.5	12.5	0.41	0.52
1	25	0.52	0.64
2	51	0.65	0.76
5	127	0.79	0.85
10	254	0.86	

❖ پوشش های رادیاتورها

Quartz second-surface mirrors → optical solar reflectors (OSRs)

Teflon second-surface mirror → flexible OSR

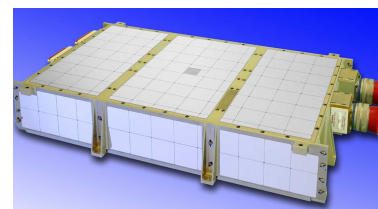


small tiles
with dimensions on the order of a few cm
Thickness up to 0.25 mm
bonded to the radiator surface with
acrylic or silicone adhesives

Flexible OSR (Tape & Sheet)
with acrylic adhesive

Surface Finish	α —Absorptance (beginning-of-life)	ϵ —Emitance
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

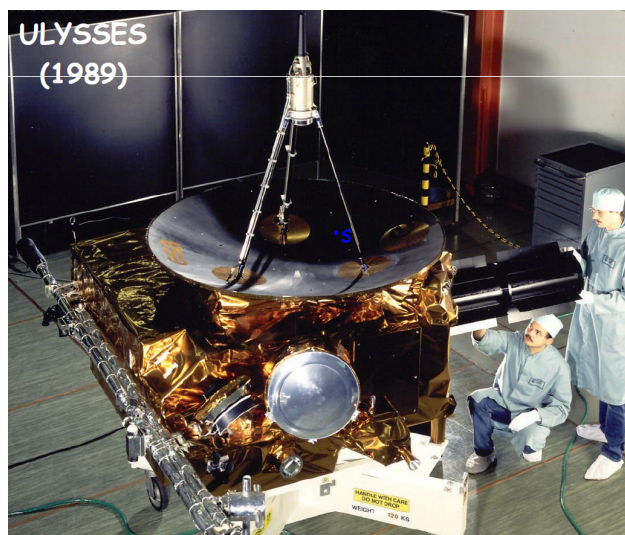
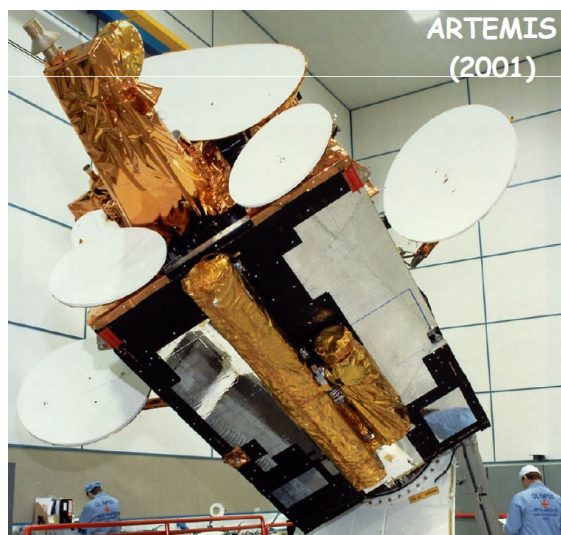
- ✓ Standard quartz & Teflon OSRs (highly specular)
- ✓ Diffuse variety of OSRs (higher absorptance)



❖ لایه های خارجی عایق های چند لایه (MLI)

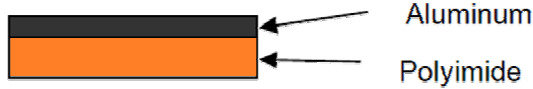
Aluminized Kapton ○

- ماده ای طلایی رنگ با ضریب جذب خورشیدی متوسط و ضریب صدور بالا (ضخامت در حدود ۱ الی ۳ mils)



❖ لایه های خارجی عایق های چند لایه (MLI)

Aluminized Kapton ○



Thickness mil (μm)	Second Surface Mirror Properties			Typical Weight (g/m ²)
	α	ε _N	ε _H	
0.3 (8)	≤ 0.35	≥ 0.40	≥ 0.40	11
0.5 (12.5)	≤ 0.36	≥ 0.50	≥ 0.52	19
1.0 (25)	≤ 0.39	≥ 0.62	≥ 0.64	36
2.0 (51)	≤ 0.44	≥ 0.71	≥ 0.75	71
3.0 (76)	≤ 0.46	≥ 0.77	≥ 0.81	109
5.0 (127)	≤ 0.49	≥ 0.81	≥ 0.89	181

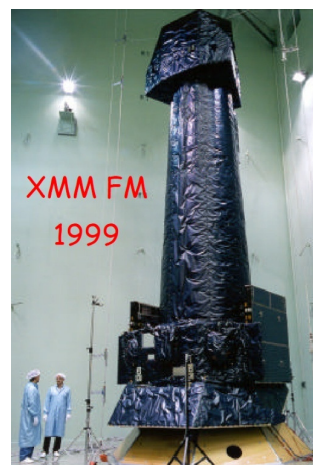
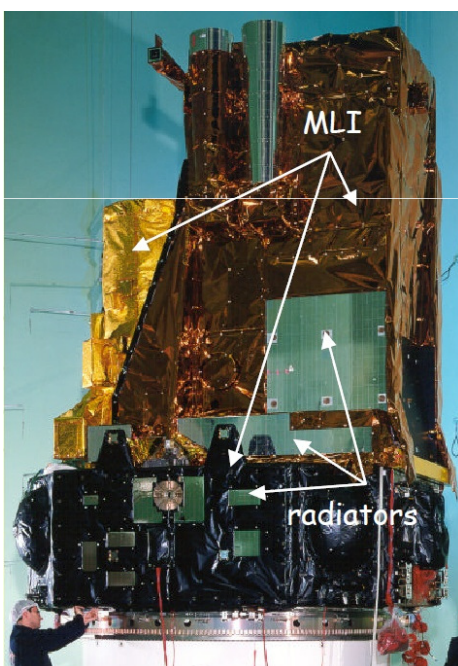
Parameter (independent of film thickness)	Specified Value
First surface solar absorptance (α)	≤ 0.14
First surface hemispherical emittance (ε _H)	≤ 0.035
First surface normal emittance (ε _N)	≤ 0.035
Typical first surface α/ε	4 - 5
Aluminum surface resistivity	≤ 1 Ω/square
Intermittent temperature range	-250° C to 400° C (-420° F to 750° F)
Continuous temperature range	-250° C to 290° C (-420° F to 550° F)



❖ لایه های خارجی عایق های چند لایه (MLI)

Black Kapton ○

- ماده ای سیاه رنگ با ضریب جذب خورشیدی بالا
- رنگ سیاه با توجه به مواد کربنی به کار رفته در آن برای افزایش هدایت الکتریکی و اتصال زمین (grounding)

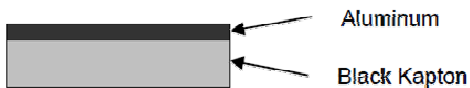


- ✓ 1.3 mils thick
- ✓ a carbon-filled polyester binder
- ✓ A polyimide substrates
- ✓ solar absorptance (0.85)
- ✓ emittance (0.78)
- ✓ electrically conductive (≤ 1,000 Ω/m²)
- ✓ a matte finish

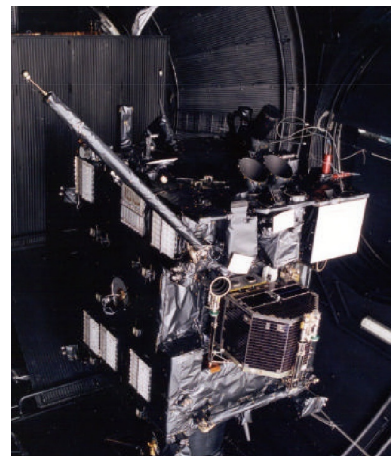
❖ لایه های خارجی عایق های چند لایه (MLI)

Aluminized Black Kapton

• ضریب جذب و صدور بالا، α/ϵ حدود ۱



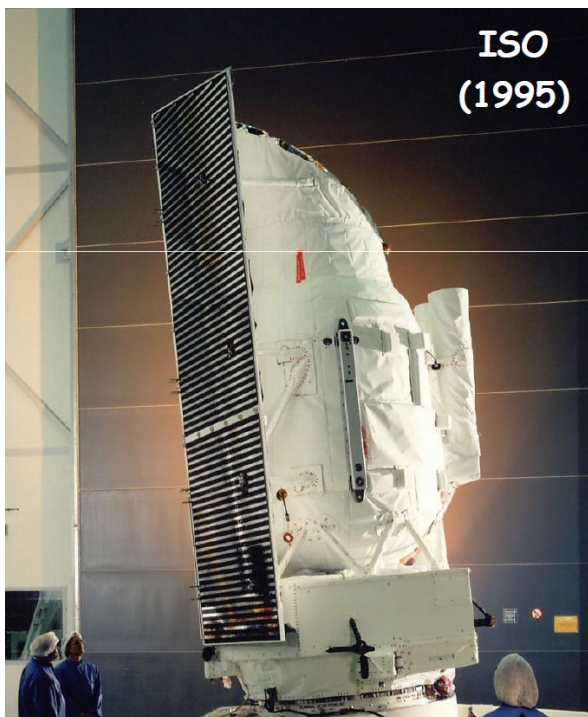
Parameter	Specified Value			
	100CB	100XC	160XC	275XC
Film type	100CB	100XC	160XC	275XC
Film surface resistivity	$\geq 10^{13}$ Ω/square	10^5 to 10^9 Ω/square	300-430 Ω/square	230-290 Ω/square
Intermittent temperature range	-250° C to 400° C (-420° F to 750° F)			
Continuous temperature range	-250° C to 290° C (-420° F to 550° F)			
Kapton side solar absorptance (α)	≥ 0.90	≥ 0.90	0.93 typical	0.93 typical
Kapton side normal emittance (ϵ_N)	≥ 0.82	≥ 0.82	0.84 typical	0.84 typical
Aluminum side solar absorptance (α)	≤ 0.18	≤ 0.22	≤ 0.22	≤ 0.22
Aluminum side emittance (ϵ)	≤ 0.05	≤ 0.05	≤ 0.05	≤ 0.05
Typical weight (g/m^2)	38	38	61	95
Film Thickness	1.0 mil	1.0 mil	1.6 mil	2.75 mil
Outgassing: Meets NASA guidelines per ASTM E595	TML - WVR ≤ 1.0 %; CVCM ≤ 0.1 %			
Item number	146589	146624	162493	147452
Old part number	G414810	G422610	G902120	G902130
Item number if Perforated	159947	159280	177084	TBD



❖ لایه های خارجی عایق های چند لایه (MLI)

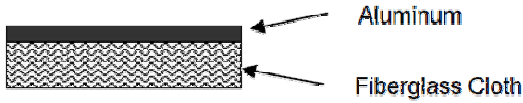
Beta cloth

- پارچه ای بافته شده از الیاف شیشه ای پوشانده شده با تفلون (Teflon coated glass fabric)
- ضریب جذب پایین و ضریب صدور بالا



انواع پوشش های حرارتی


رنگ نانو پوشش های حرارتی



❖ لایه های خارجی عایق های چند لایه (MLI)

Aluminum Coated Glass Cloth ○

Parameter (independent of film)	Specified Value	
	Beta Cloth	1080
Cloth type		
Intermittent temperature range	-151° C to 315° C (-240° F to 600° F)	-185° C to 260° C (-300° F to 500° F)
Continuous temperature range	-151° C to 260° C (-240° F to 500° F)	-185° C to 200° C (-300° F to 400° F)
Fabric side solar absorptance (α)	≤ 0.45	≤ 0.85
Fabric side hemispherical emittance (ϵ)	≥ 0.80	≥ 0.80
Aluminum side absorptance (α)	≤ 0.22	
Aluminum side hemispherical emittance (ϵ_H)	≤ 0.30	
Weight (g/m ²)	274 Typical	≤ 170
Thickness	0.008±0.001 in.	
Tensile strength (lb./in. of width)	≥ 90 Warp ≥ 80 Fill	≥ 40 Warp ≥ 39 Fill
Tear strength (lb.)	≥ 4.0 Warp ≥ 4.0 Fill	
Width (in.)	51 (1.30 m)	36 (0.91 m)
Item number	146626	146585
Old part number	G423800	G414500

- ✓ tear resistance
 - ✓ low solar absorptance
 - ✓ diffuse reflections
 - ✓ resistant to atomic oxygen erosion
- 

انواع پوشش های حرارتی

رنگ نانو پوشش های حرارتی

❖ انتخاب لایه های خارجی بر اساس الزامات طراحی حرارتی

- خواص اپتیکی (optical properties)
- جلوگیری از تالو (glint prevention)
- اتصال زمین (electrical grounding)
- کنترل تنشها (stress handling)
- حفاظت در برابر سنگ ریزه های آسمانی (micrometeoroid protection)

❖ انتخاب پوشش ها

- خواص اپتیکی (optical properties) به عبارتی α/ϵ
- نرخ تغییر خواص ترمو اپتیکی (degradation)
- راحتی به کارگیری (ease of application)
- ملاحظات الکتریکی و رسانایی (electrical conductivity)
- ملاحظات وزنی (mass)
- ملاحظات قیمتی (cost)
- ملاحظات دسترسی (availability)



کاربردهای پوشش‌های حرارتی

رنگ‌های پوشش‌های حرارتی

❖ سطوح داخلی

- یکنواخت سازی دمایی
 - جعبه‌های الکترونیک داخل ماهواره (رنگ با ضریب صدور بالا، رنگ سیاه)
 - پنل‌های سازه که جعبه‌های الکترونیک بدان متصل می‌شود (رنگ با ضریب صدور بالا، رنگ سیاه)
- عایق سازی اجزای داخلی حساس به دما که اتلاف حرارتی بالا ندارند، مانند تانک‌ها و خطوط انتقال سوخت (پوشش دارای ضریب صدور پایین، پوشش‌های آلومینیومی و طلائی)

کاربردهای پوشش‌های حرارتی

رنگ‌های پوشش‌های حرارتی

❖ خواص ترموپاتیکی و کاربردهای پوشش‌ها

Surface Finish	α —Absorptance (beginning-of-life)	ϵ —Emittance
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
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

❖ سطوح خارجی

- عایق‌سازی در برابر افت دما یا افزایش دما یا هر دو با لایه‌های خارجی متفاوت پوشش‌های عایق چند لایه (outer layer of insulation blankets)
- کاهش دما با استفاده از پوشش‌های رادیاتور (Radiator coating)، استفاده از رنگ سفید برای سطوح روبه خورشید و رنگ سیاه برای سطوحی که در معرض نور خورشید نیستند
- حفظ دما و جلوگیری از افت دما با رنگ‌های (Paints) دارای ضریب صدور پایین
- افزایش دما با رنگ‌های دارای ضریب جذب بالا و صدور پایین
- کاهش انتقال حرارت تشعشعی (رنگ‌های متالیک، سطوح فلزی خام یا براق، نوارهای کپتونی)
- حفاظها و شیلدهای استیل برای جلوگیری از تشعشع نازل داغ تراستر

❖ خواص ترموپلاستیکی و کاربردهای پوشش‌ها

Surface Finish	α —Absorptance (beginning-of-life)	ϵ —Emittance
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

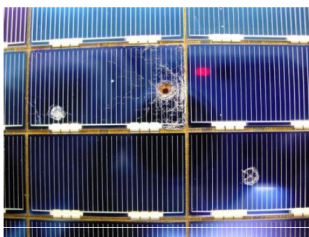
کاربردهای پوشش های حرارتی

رنگ پود پوشش های حرارتی

- ❖ ضریب جذب بسیار بالا و صدور پایین
 - برای افزایش دمای سطوح در معرض خورشید (Moxorb و Tinox)
- ❖ ضریب جذب بسیار پایین
 - پوشش نقره ای حفاظ خورشیدی رادیاتورهای برودتی (over-coated silver for sun shields)
- ❖ ضریب جذب نسبتاً پایین
 - کاهش نوسانات دمایی سازه ماهواره در معرض دید خورشید (silicon oxide coated aluminum)
- ❖ فرآیندهای کنترل شده آنودایز و آلوداین
 - برای سطوح آلومینیومی که سایر پوشش های حرارتی قابل استفاده یا مجاز به استفاده نباشند (Chromic-acid-anodizing) با ضریب صدوری بین 0.1 تا 0.72 و ضریب جذبی بین 0.2 تا 0.4

تنزل خواص پوشش های حرارتی

رنگ پود پوشش های حرارتی

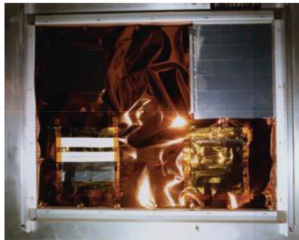


- ❖ عوامل تنزل خواص ترموپاتیکی پوشش ها (cause of thermal surface degradation)
 - آلودگی های سطحی (contamination)
 - تشعشعات ماوراء بنفش (UV radiation)
 - خلاء بالا (high vacuum)
 - اکسیژن اتمی (Atomic oxygen)
 - ذرات باردار (charged particles)
 - خرده شهاب سنگ ها و ریزباله های فضایی (micrometeoroids & debris)
- ❖ عمده تأثیرات عوامل بر افزایش ضریب جذب پوشش ها و به نسبت اثر کمتر بر روی ضریب صدور
- ❖ تأثیر تنزل خواص پوشش ها بر طراحی حرارتی
 - سطح رادیاتورها و تغییر دمای حداقل طراحی
 - نیاز به گرمکن های الکتریکی

$$\alpha \uparrow \longrightarrow A_{\text{radiator}} \uparrow \longrightarrow T_{\text{average}} \downarrow \longrightarrow Q_{\text{heater}} \uparrow$$

❖ آلودگی ها (contamination)

- از اصلی ترین عوامل کاهش ترموپتیکیتی
- ❖ کاهش خواص ترموپتیکیتی سطح در غالب



- افزایش ضریب جذب
- کاهش خاصیت انعکاسی (reflectivity)
- کاهش خاصیت عبوردهی (transmission)

❖ انواع آلودگی ها (contamination varieties)

- آلودگی ناشی از ذرات (particles)
- آلودگی ناشی از گازروی مواد بکار رفته در ماهواره (compounds outgassed of satellite material)



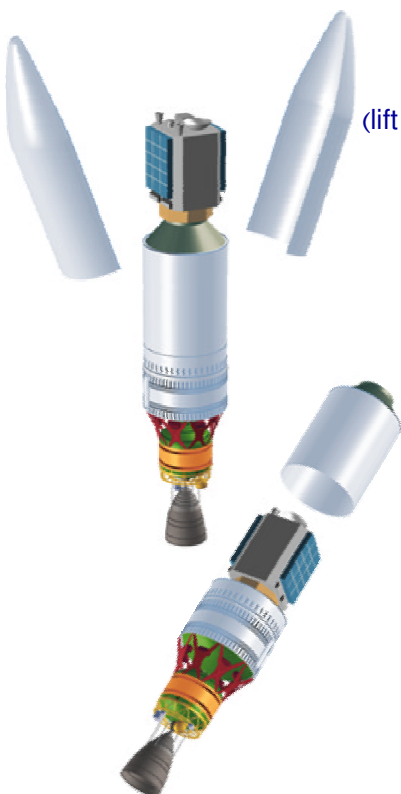
- فیلم های پلاستیکی (plastic film)
- چسبها (adhesive)
- فومها (foams)
- روغن ها (lubricants)
- رنگها (paints)

❖ آلودگی ناشی از ذرات (particles)

- حضور ذرات در داخل فیرینگ پرتابگر تا چند دقیقه بعد از برخاست (lift off)
- افزایش ذرات پیرامون ماهواره در اثر

- جدایش مراحل پرتابگر (stage separation)
- روشن شدن موتور راکت مرحله آخر
- روشن شدن موتورهای کنترل وضعیت

- ته نشینی ذرات پیرامونی بر روی سطوح ماهواره
- چرخش (circulation) ذرات پیرامون ماهواره در طول صعود در اثر
- شعله موتور راکت حامل
- توربولانس داخل فیرینگ



❖ آلودگی ناشی از گازروی مواد (outgassing)

- تبخیر گونه‌های وزن ملکولی پایین مواد پلیمری و میعان آنها بر روی سطوح سرد مانند سطوح رادیاتورها
- تدریجی بودن فرآیند گازروی
- شدت بیشتر فرآیند گازروی در ابتدای مأموریت (چند ماه ابتدایی تا حدود یک سال)
- کاهش فرآیند گازروی با زمان و توقف تدریجی
- کند بودن فرآیند گازروی از سطوح جامدات در دماهای معمول
- افزایش فرآیند ته نشینی آلودگی‌ها بر روی سطوح در حضور نور خورشید به واسطه امواج ماوراء بنفش
- کدر شدن تدریجی لایه آلودگی ته نشین شده بر روی سطوح در اثر تابش امواج ماوراء بنفش و در نتیجه افزایش ضریب جذب

increasing solar absorptance by about 0.01 for every 100 Å of contaminant film thickness

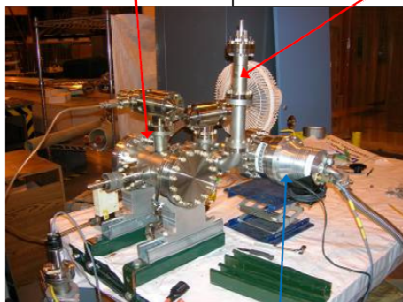
- اندازه‌گیری میزان گازروی براساس استاندارد ASTM-E-595-77/84

❖ اندازه‌گیری گازروی مواد براساس استاندارد ASTM-E-595-77/84

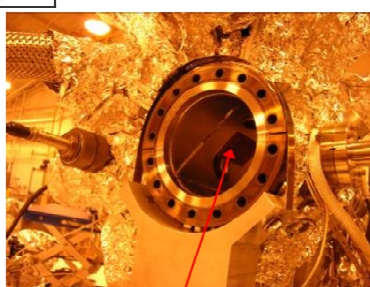
- گرم کردن نمونه تا دمای ۱۲۵ درجه سانتیگراد برای مدت ۲۴ ساعت
- جمع آوری تولیدات حاصل از گازروی بر روی سطحی با دمای ۲۵ درجه سانتیگراد
- داده‌های تست
 - %TML درصد کل جرم از دست رفته (total mass loss)
 - %CVCM درصد مواد چگالش یافته جمع آوری شده (collected volatile condensable materials)

Sample Chamber

Residual Gas Analyzer



Vacuum Pump



Silver paste sample cut to fit system

تشریح خواص پوشش‌های حرارتی

رنگ پوشش‌های حرارتی

❖ حد مجاز میزان گازروی مواد براساس استاندارد NASA برای استفاده در ماهواره‌ها

○ TML کمتر از 1.0%

○ CVCM کمتر از 0.1%

❖ داده‌های گازروی برخی مواد کنترل حرارتی متداول (NASA/GSFC and Lockheed Martin)

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

سطوح فلزی بدون پوشش (clean metal) و پوشش‌های فلزی (metal finishes) منبع تولید مواد فرار نمی‌باشند و نقشی در آلودگی سطوح ماهواره و سطوح اپتیکی ندارند

آلودگی‌ها

رنگ پوشش‌های حرارتی

❖ پروژه LONG DURATION EXPOSURE FACILITY (LDEF)

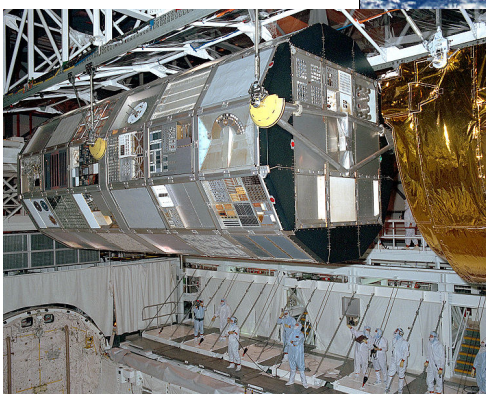
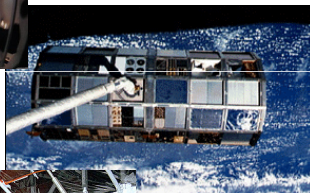
○ رهاسازی در مدار LEO توسط شاتل Challenger در سال ۱۹۸۴ میلادی

○ بازیابی توسط شاتل Columbia در سال ۱۹۹۰ میلادی

○ پایداری براساس گرادیان جاذبه (gravity-gradient stabilized)

○ استوانه‌های ۱۲ وجهی با ۲ وجه انتهایی

○ حاوی ۵۷ نمونه آزمایشگاهی



Length	30 feet	(9.14 m)
Width	14 feet	(4.27 m)
Empty Weight	~9,000 pounds	(3,629 kilograms)
Launch Weight	21,393 pounds	(9,724 kilograms)
Experiment Bays	86	(72 peripheral & 14 end)
Number Of Experiments	57	
Deployment Date	April, 1984	by Challenger (STS-41C)
Retrieval Date	January, 1990	by Columbia (STS-32)
Orbital Altitude	250 - 179 miles	(400 - 286 kilometers) at deployment and retrieval, respectively
Exposed Surface Area	~130 square meters	

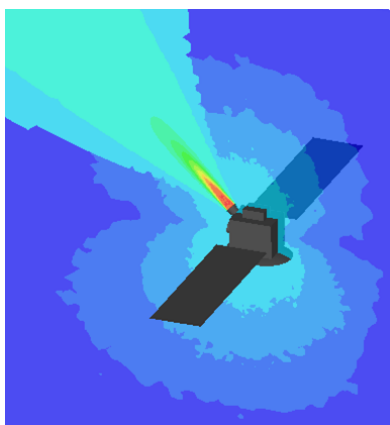


❖ تحلیل نتایج LDEF در ارتباط با تأثیر آلودگی ها بر تنزل خواص ترموپلاستیکی

- ناشناخته ماندن مکانیزم های آلودگی
- شکل گیری نقاط تیره و آلودگی ها در مکان های دور از انتظار
- غیرقابل انتظار بودن توزیع آلودگی ها در اطراف روزنه های ونت، برخلاف شبیه سازی ها
- عدم تغییر ضریب جذب OSR با وجود مستعد بودن سطح به علت سردی سطح
- باقی ماندن روش های تحلیل و شبیه سازی فرآیندهای آلودگی به عنوان یک چالش

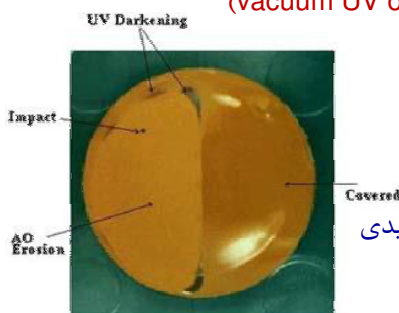
❖ راهکارهای کاهش میزان آلودگی ها

- حفظ سطوح در برابر اگزوز شعله بوسترها (booster exhaust plumes)
- انتخاب و مکانیابی بهینه و مناسب روزنه های ونت (vent)
- انتخاب و مکانیابی بهینه برای تراسترهای کنترل وضعیت
- انتخاب مواد با میزان گازروی پایین



❖ تشعشعات ماوراء بنفش (UV radiation)

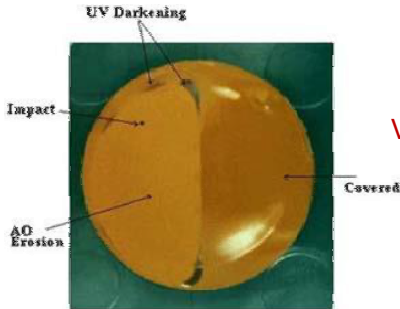
- تقسیم ناحیه UV طیف الکترومغناطیسی به دو بخش
 - محدود قرار گرفته در طول موج های 0.2 تا 0.4 میکرومتر (near UV)
 - محدود قرار گرفته در طول موج های کمتر از 0.2 میکرومتر (vacuum UV or VUV)



- نام گذاری این ناحیه با توجه به جذب این طیف توسط اتمسفر
- آسیب رسانی طیف VUV
- تشعشع خورشید در طول موج بین 0.25 تا 0.4 میکرومتر
- افزایش میزان VUV خورشیدی تا سه برابر در زمان حداکثر فعالیت خورشیدی
- ناشناخته ماندن مکانیزم کدرکننده مواد کنترل حرارتی در اثر امواج UV
- تأثیر UV موج کوتاه و اشعه X (x-ray photon) در افزایش میزان ضریب جذب
- پایداری ضریب جذب موادی مانند تفلون در برابر تابش UV
- افزایش شدید میزان ضریب جذب موادی مانند پلی اتان (polyurethane)، سیلیکون (silicone) و رنگ پایه ها (paint binders)

❖ اکسیژن اتمی (atomic oxygen)

- اصلی ترین عامل آسیب در مدارهای LEO
- عامل فرسایش و فساد سطوح خارجی مواد کنترل حرارت (به خصوص سطوح هیدروکربنی)
- شکل گیری AO در اثر امواج UV و یونیزاسیون ملکول اکسیژن اتمسفر فوقانی و ارتفاعات بالا
- تغییرات غلظت AO



• کاهش غلظت AO با افزایش ارتفاع از ۱۰۰ به ۱۰۰۰ کیلومتر

• افزایش غلظت AO با افزایش فعالیت های خورشیدی و افزایش VUV

- عدم اهمیت فرسایش AO در مدارهای بالاتر از ۱۰۰۰ کیلومتر
- اهمیت فرسایش AO برای ماهواره های GEO در مدار پارکینگ
- گونه شیمیایی بسیار فعال با توجه به جفت الکترون آزاد
- افزایش واکنش پذیری AO با توجه به سرعت ماهواره ها در مدار LEO
- سرعتی در حدود 8 km/s

• انرژی در حدود 5eV (انرژی کافی برای شکستن پیوندهای بین ملکولی مواد پلیمری)

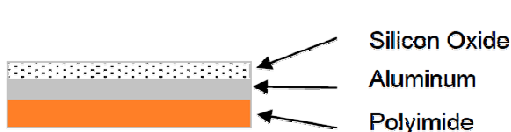
❖ اثر اکسیژن اتمی بر مواد هیدروکربنی

- تولید H_2O ، CO_2 و CO در اثر برخورد اکسیژن اتمی با سطح و فرار تولیدات از سطح به صورت بخار، و در نتیجه در معرض قرارگیری سطح بیشتری از جسم

❖ اثر اکسیژن اتمی بر مواد سیلیکونی (وجود مقدراری مواد هیدروکربنی)

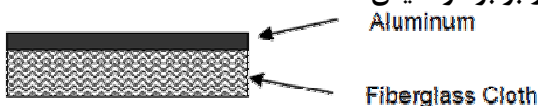
- محدود بودن فرسایش ناشی از AO تنها به چند لایه اتمی بیرونی سطح
- تولید ساختار سیلیکاتی مانند شیشه (glass-like) در اثر فرسایش AO اجزای هیدروکربنی پلیمرهای سیلیکونی
- پایداری و مقاومت لایه سیلیکاتی در برابر فرسایش AO

❖ استفاده از پوشش های اکسیدسیلیکونی (silicon oxide) برای محافظت سطوح در برابر فرسایش AO



○ تأثیر ناچیز پوشش اکسیدسیلیکونی بر خواص ترموپلاستیکی

❖ استفاده از پوشش فایبر کلاس و بتا برای محافظت سطوح در برابر فرسایش AO



❖ نرخ فرسایش ناشی از AO برای مواد مختلف

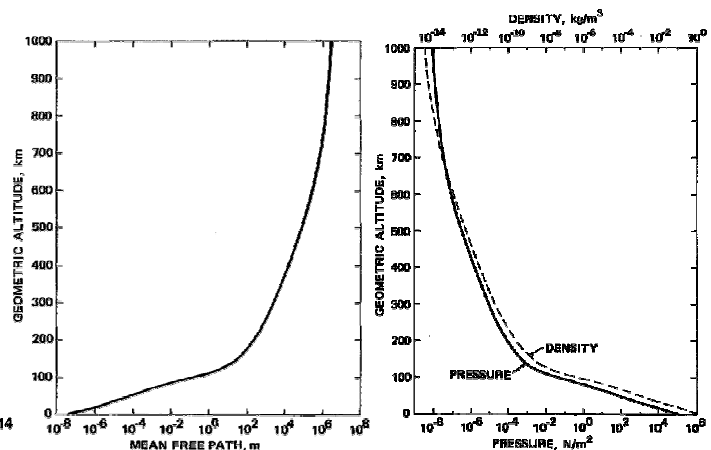
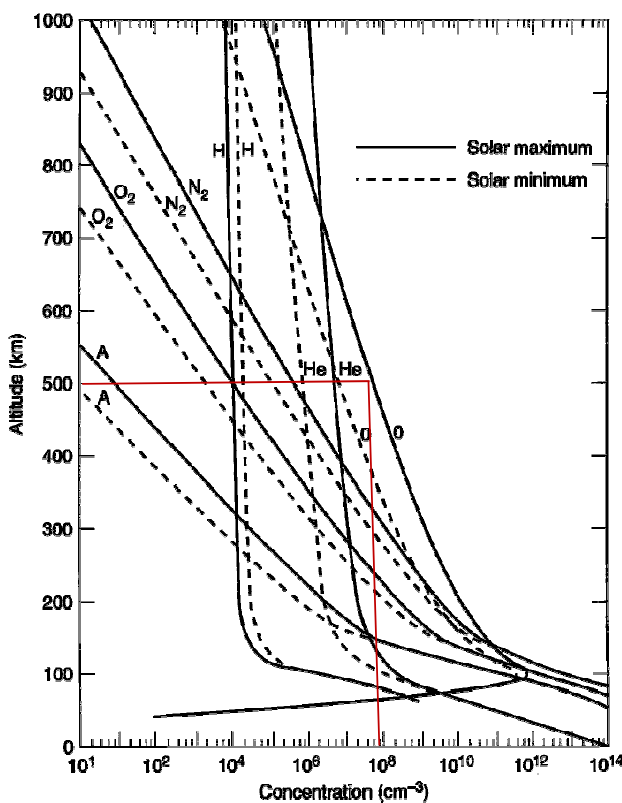
Material	AO Reaction Efficiency $10^{-24} \text{ cm}^3/\text{AO atom}$
Fused silica	Negligible
Clear FEP or TFE Teflon	0.05
Polyimide (Kapton)	2.6
Carbon-filled (black) polyimide	2.5
Gloss white polyurethane paint	0.9
Flat black polyurethane paint	0.9
Gloss black polyurethane paint	4.5
Silicone paints	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

اندازه گیری نرخ فرسایش ناشی از AO با استفاده از نتایج تست مواد مختلف در شاتل برای مدت زمان های محدود (دو هفته یا کمتر)

تأیید نتایج توسط نتایج LDEF

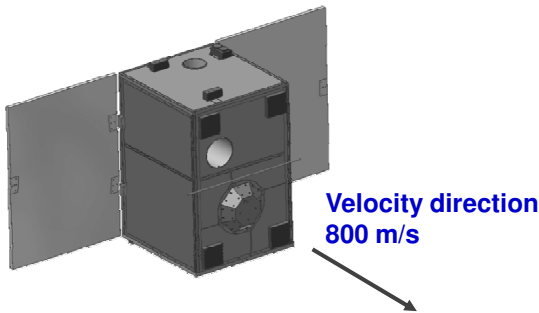
❖ غلظت اکسیژن اتمی برای اتمسفر طبیعی در ارتفاعات مختلف

- حداکثر فعالیت خورشیدی
- حداقل فعالیت خورشیدی



- ❖ افزایش میزان فرسایش AO در جهت حرکت (ram direction)
- ❖ تخمین میزان فرسایش ناشی از AO در مدت مأموریت (AO fluence in the ram direction)

- میزات غلظت اکسیژن اتمی (AO concentration)
- سرعت ماهواره (spacecraft velocity)
- مدت زمان مأموریت (mission time)
- کارایی واکنش (reaction efficiency)



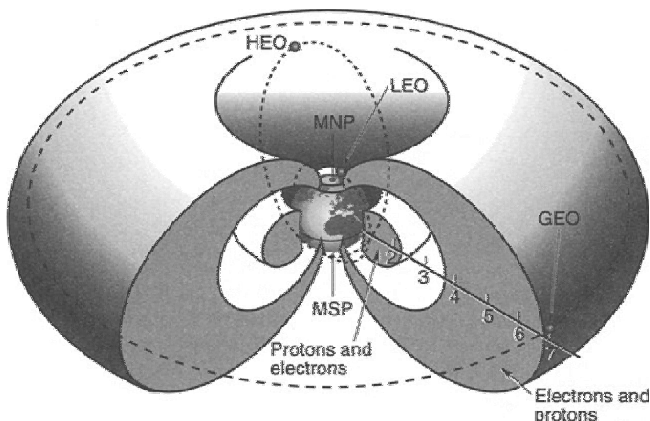
- ❖ مثال: میزان فرسایش سالانه پوشش کپتونی بدون محافظ

- ارتفاع 500 km
- حداکثر غلظت AO 6×10^7 atoms/cm³
- سرعت مداری 8000 m/s

$$\text{annual fluence} = (6 \times 10^7 \text{ atoms/cm}^3) \times (8 \times 10^5 \text{ cm/sec}) \times (31.5 \times 10^6 \text{ sec}) = 1.5 \times 10^{21} \text{ atoms/cm}^2$$

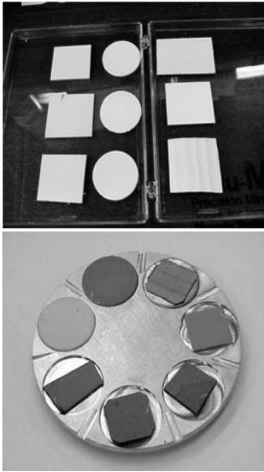
$$\text{annual surface erosion of unprotected Kapton} = (1.5 \times 10^{21} \text{ atoms/cm}^2) \times (2.6 \times 10^{-24} \text{ cm}^3/\text{atom}) = 3.9 \times 10^{-3} \text{ cm}$$

- ❖ پرتون ها (protons)، الکترون ها (electrons) و نوترون ها (neutrons)
- باردار شدن ماهواره (charging effect) در اثر حضور ذرات باردار و تشعشع ماوراء بنفش خورشید
- عدم یا تأثیر کم نوترون ها (ذراتی خنثی با قدرت نفوذ بالا) بر سخت افزارهای حرارتی
- قرارگیری تمامی سطوح خارجی ماهواره های GEO در معرض تابش یونی (ionizing radiation)
- قرارگیری سطوح روبه خورشید ماهواره های GEO در معرض همزمان تشعشعات ماوراء بنفش و تابش یونی
- تابش یونی بسیار ناچیز برای ماهواره های مدار LEO با توجه به قرارگیری مرز پایینی کمربند ون آلن در ارتفاع ۱۰۰۰ کیلومتری زمین



- پرتون های پرنرژی 30 keV (plasma-sheet)
- الکترون های پرنرژی 7 keV (plasma-sheet)
- تشعشعی در حدود 10^{11} rads در مدار GEO در طول مأموریتی ۵ ساله

تغییرات رنگ سفید در مدار GEO پس از ۱۰ سال



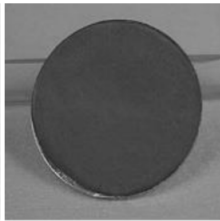
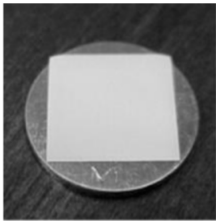
❖ تأثیر ذرات باردار بر روی پوشش های کنترل حرارت

- نفوذ پرتون های 30 keV تا عمق 0.01 mil در تفلون (FEP Teflon)
- نفوذ الکترون های 7 keV تا عمق 0.06 mil در تفلون
- نفوذ الکترون های 200 keV تا عمق 10 mil در تفلون
- تولید یون در برخورد ذرات باردار پراثری با ملکول های مواد پلیمری
- واکنش شیمیایی یون ها با ملکول های مجاور
- تشکیل ملکول های بزرگتر پلیمری با باند جذب خورشیدی بالاتر
- افزایش ضریب جذب ماده، مانند کپتون
- عدم تأثیر تابش یونی بر مواد شفاف مانند fused silica

یک سال مدار LEO

یک سال مدار GEO

سه سال مدار GEO



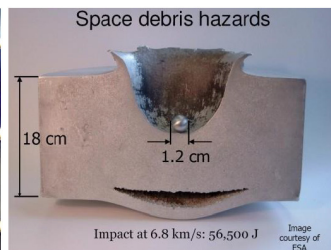
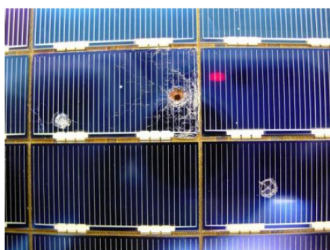
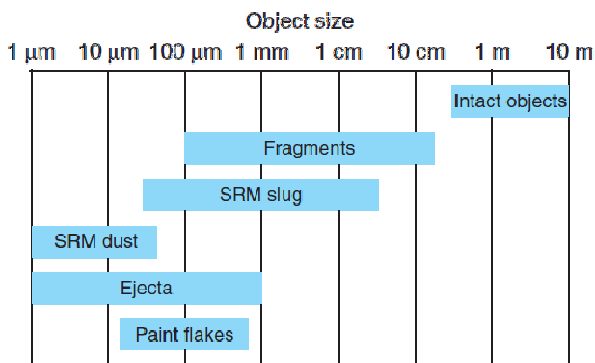
تدلار (فیلم فلوروپلیمر سفید) در معرض تابش

ریز اجرام آسمانی و خرده زباله های فضایی

رنگ پودشش های حرارتی

❖ خرده شهاب سنگ ها و ریز زباله های فضایی (micrometeoroids & debris)

- احتمال برخورد زباله های فضایی با ماهواره ای در مدار LEO ۱۰ برابر بیشتر از احتمال برخورد خرده شهاب سنگ ها
- تخمین تعداد و تمرکز زباله های فضایی با استفاده از تکنیک های اپتیکی و راداری
- تشخیص تکه هایی تا قطر 10 cm
- تخمین شار قطعات کوچکتر از 1 cm با استفاده از شمارش حفره های ایجاد شده بر روی فضاپیما های بازگشتی
- تهدید آمیز بودن قطعات بین 1 الی 10 cm برای فضاوردان در مأموریت های خارج از فضاپیما و ماهواره های مدار LEO

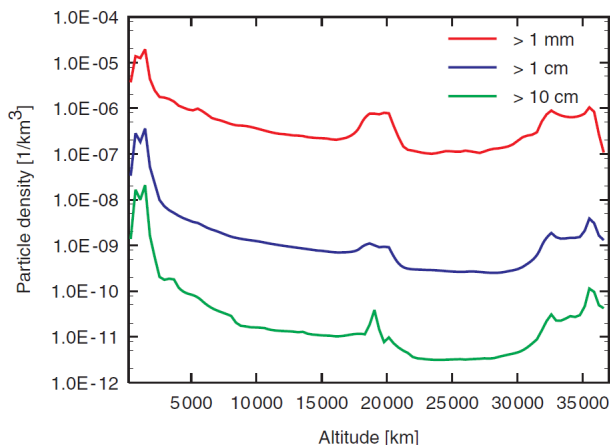
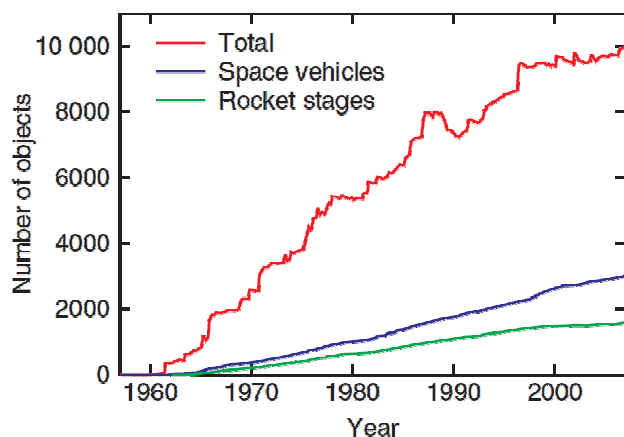


❖ خرده شهاب سنگ ها

- رهگیری خرده شهاب سنگ ها با توجه به مسیر حرکت شهاب سنگ اصلی

❖ تحلیل حفره های ایجاد شده در پروژه LDEF

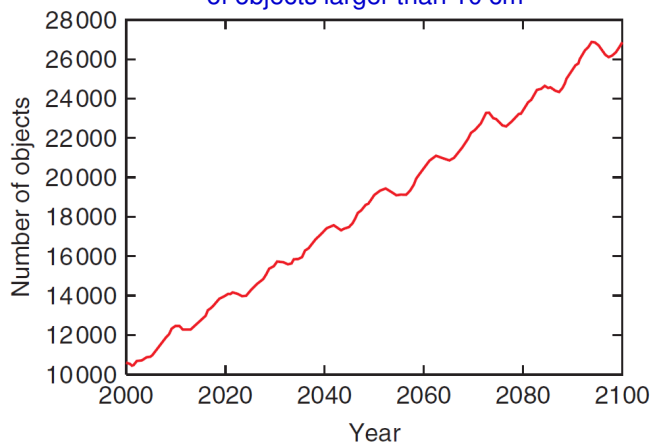
- حفره های ایجاد شده در سطوح لبه حمله ۱۰ برابر بیشتر از لبه فرار،
- حفره های لبه حمله بیشتر مربوط به زباله های فضایی
- حفره های لبه فرار بیشتر مربوط به خرده شهاب سنگ ها



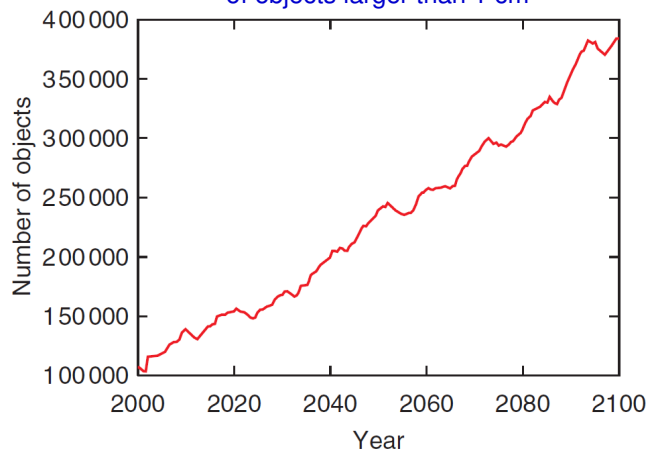
❖ تأثیر برخورد اجرام با سطوح کنترل حرارت

- تیره شدن ناحیه آسیب دیده (silvered Teflon زمانی که ذرات به داخل لایه فلزی نفوذ کرده است)
- از بین رفتن لایه محافظ و نفوذ اکسیژن اتمی
- تأثیر ناچیز حفره ها بر خواص ترموپاتیکی سطوح

Prediction of the development of objects larger than 10 cm



Prediction of the development of objects larger than 1 cm



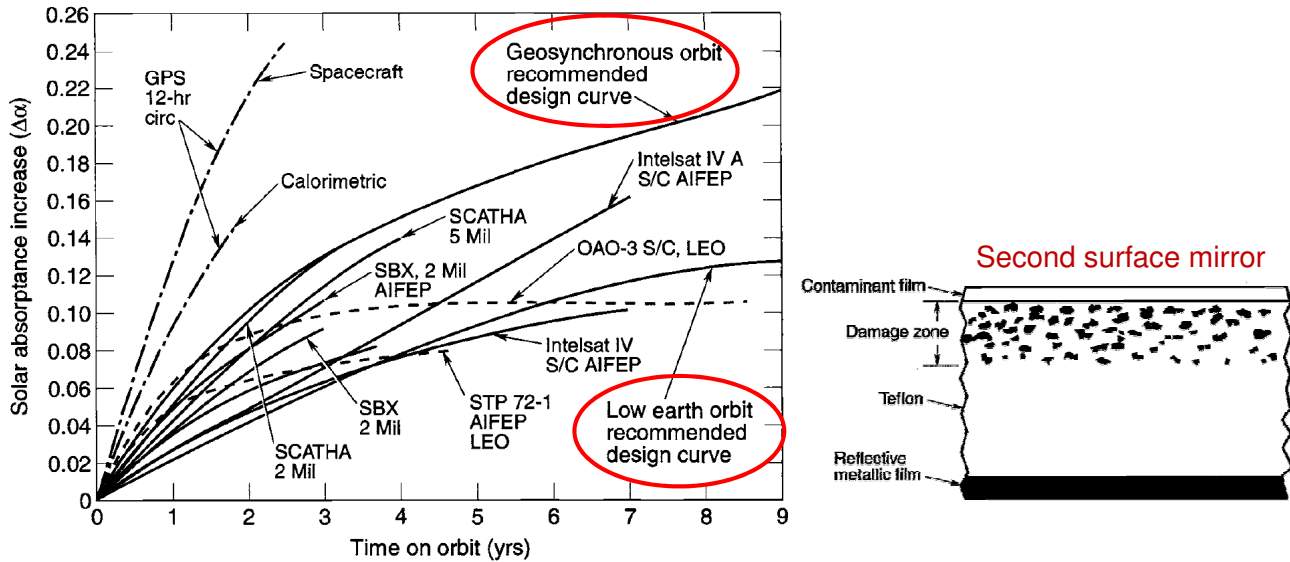
تنزل خواص پوشش های حرارتی متداول

رنگ با پوشش های حرارتی

❖ فیلم های تفلونی با پوشش آلومینیومی و نقره ای (Aluminized/Silvered Teflon films)

- تأثیر آلودگی ها بر افزایش ضریب جذب
- تأثیر ذرات باردار بر افزایش ضریب جذب

Metalized Teflon degradation (aluminized/silvered Teflon films)



تنزل خواص پوشش های حرارتی متداول

رنگ با پوشش های حرارتی

❖ تنزل خواص ترموپلستیکی فیلم های تفلونی با پوشش آلومینیومی و نقره ای

- وابستگی نرخ تخریب به شرایط محیط مدار
 - نرخ تخریب پایین تر در مدار LEO با توجه به نبود ذرات باردار
 - نرخ تخریب بالاتر در مدار GEO با توجه به محیط تشعشعی بالای این مدار
 - بالاترین نرخ تنزل خواص در مدار 12-hour با توجه به عبور ماهواره از محیط بسیار حاد کمربند ون آلن
- کاهش ضریب صدور در اثر فرسایش ناشی از AO در مدار LEO (میزان کاهش وابسته به درصد نفوذ و فرسایش)
 - میزان ضریب صدور تابعی از میزان ضخامت لایه تفلونی
 - تخمین میزان تنزل ضریب صدور براساس فرسایش سطح
 - محاسبه میزان فرسایش سطح با استفاده از پروفیل مأموریت و مدت زمان مأموریت و میزان فرسایش AO

تنزل خواص پوشش های حرارتی متداول

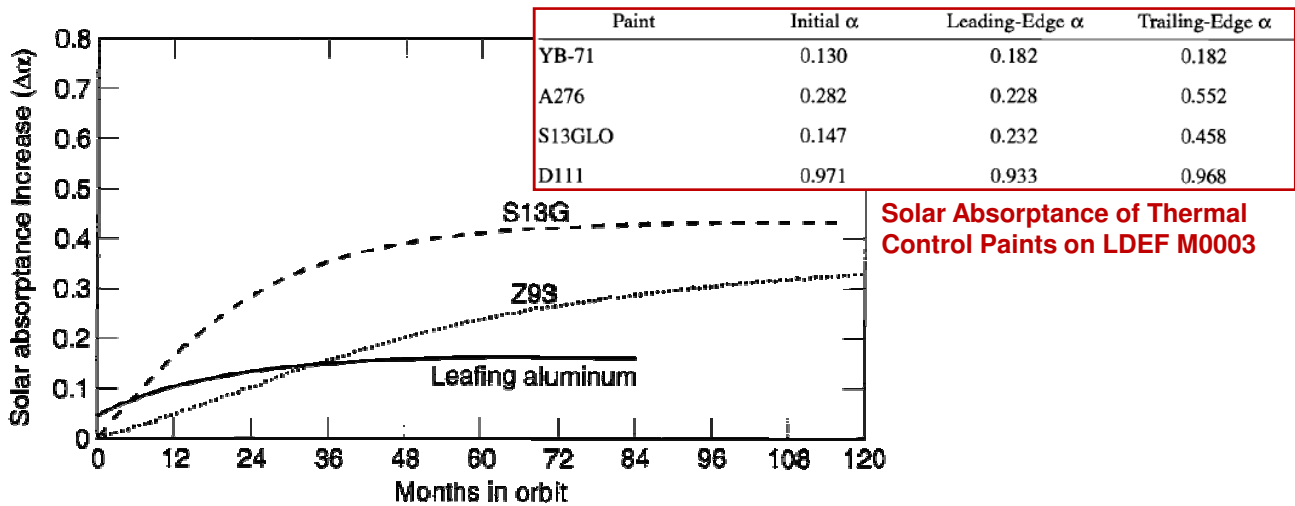
رنگ باد پوشش های حرارتی

❖ رنگ های سفید (White paints)

- تأثیر شدید امواج UV و ذرات باردار بر رنگ های سفید مانند S13G-LO
- افزایش ضریب جذب از 0.2 تا 0.7 طی چند سال

❖ رنگ های سیاه (Black paints) و پوشش های دارای ضریب جذب بالا

- عدم تغییر ضریب جذب یا کاهش اندک آن در اثر امواج UV



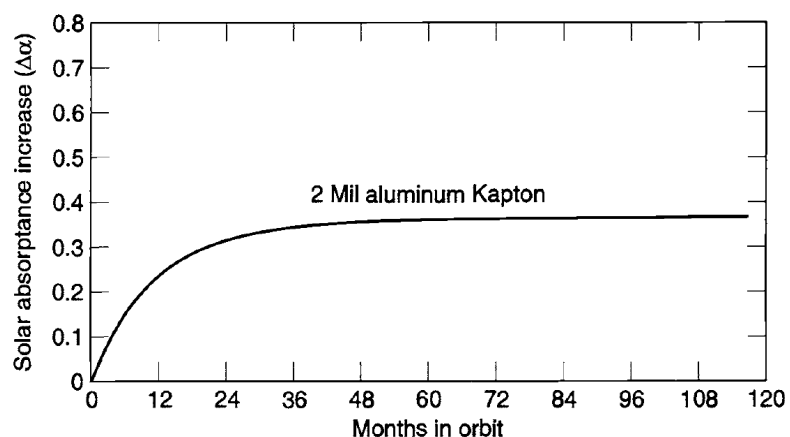
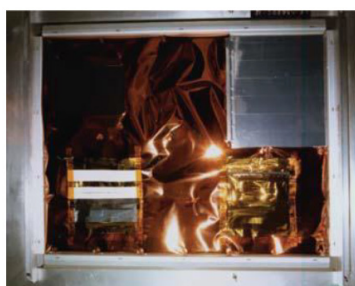
تنزل خواص پوشش های حرارتی متداول

رنگ باد پوشش های حرارتی

❖ پوشش های خارجی MLI

- تنزل و تخریب اساسی و قابل توجه در مدار GEO برای پوشش های کپتونی (Kapton) و بتا (Beta cloth)
- تنزل خواص به نسبت کمتر در مدار LEO با توجه به کمتر بودن تشعشعات
- کاهش ضریب جذب black Kapton در اثر امواج UV

❖ تأثیر ناچیز تنزل خواص پوشش خارجی MLI در تعادل حرارتی ماهواره



❖ ملاحظات اتصال زمین (Electrical grounding)

- باردار شدن سطح خارجی ماهواره در اثر تماس ماهواره با پلاسما حاوی ذرات باردار در محیط فضا
- دشارژ الکتریسیته ساکن سطح خارجی به سازه ماهواره
- اهمیت بار الکتریکی ساکن در مدارهای میانی تا مدار GEO و مدارهای LEO با شیب مداری بالا
- راه حال اتصال به زمین سطوح خارجی و پوشش‌های حرارتی
- استفاده از رنگ‌های رسانا مانند رنگ سیاه (Z307)، رنگ سفید (PCBZ) و black Kapton
- سایر پوشش‌های و فیلم‌های عایق مانند gold Kapton، quartz mirrors و تفلون با استفاده از لایه نازک از جنس indium tin oxide و اتصال این لایه به سازه ماهواره
- اتصال لایه فلزی پوشش‌های silvered Teflon، aluminized، Kapton و quartz mirrors به زمین (با استفاده از اتصال مکانیکی یا چسب‌های رسانا)
- افزایش رسانایی چسب‌ها با استفاده از ذرات فلزی

