

Elaborato finale per il conseguimento  
della Laurea in Ingegneria aerospaziale

## Analisi dello scudo termico del telescopio James Webb

Candidato: Leonardo Veltri  
Matricola: 1835161

Relatore: prof. Luciano Iess  
SSD: ING-IND/05

**Abstract.** Il telescopio spaziale James Webb è un progetto storico per la NASA, si propone un'analisi dello scudo termico, componente fondamentale nella sua missione, dal punto vista degli obiettivi, delle tecnologie impiegate (materiali e dei processi realizzativi). Infine si presenta un resoconto delle metodologie di *testing* e della missione dello scudo.

### 1. Introduzione

Il telescopio spaziale James Webb è il telescopio spaziale più potente e complesso mai realizzato. Nasce durante il Next Generation Space Telescope Workshop: una conferenza tenuta nel 1988 nello Space Telescope Science Institute (STScI), l'obiettivo era "... to figure out what do we do after Hubble.", come dice in un'intervista il Dr. John Mather, responsabile scientifico della realizzazione del telescopio [1]. Dopo un'analisi delle sue capacità si sono determinati i campi in cui era più limitato e si sono scelti gli obiettivi in modo da essere complementari a questo progetto: essere in grado di intercettare anche lunghezze d'onda maggiori, nel campo dell'infrarosso, avrebbe permesso al James Webb di guardare più lontano (intercettando le radiazioni di galassie più anziane che subiscono un *redshift* maggiore), di sondare meglio le nubi di gas e di polveri (la lunghezza

d'onda più elevata delle radiazioni infrarosse è disturbata di meno di quelle più basse) e analizzare gli oggetti più freddi (per esempio le stelle appena nate). Questi obiettivi hanno determinato delle condizioni di lavoro estreme raggiungibili solo nel punto L2 e tramite l'impiego di uno scudo termico che deve proteggere gli specchi (che hanno 6 volte la superficie di raccolta del telescopio Hubble), deve fornire un ambiente termico stabile al di sotto dei 50K per permettere agli strumenti *near infrared* NIRCam NIRSpec e FGS/NIRISS di raggiungere la temperatura di lavoro di 39K e allo strumento *mid infrared* MIRI di 7K.

### 2. Obiettivi missione e tecnologie impiegate

La missione dello scudo /citeAbout the Sunshield pertanto è quella di evitare che le radiazioni solari interferiscano con le rilevazioni dell'osservatorio e che non riscaldino la stru-



mentazione: se questa viene riscaldata emette a sua volta deboli radiazioni che però possono diminuire la sensibilità, inoltre se la temperatura non viene mantenuta costante l'espansione dei materiali può disallineare gli strumenti ottici creando degli errori di misurazione; inoltre lo scudo deve essere in grado di resistere alle condizioni dell'ambiente spaziale (in particolare evitare accumuli di carica e impedire a strappi dovuti a micro meteoriti di allargarsi) e di essere in grado di essere contenuto nella punta dell'Ariane 5 per poi estendersi una volta fuori dall'atmosfera.

Come si può vedere dalla fig.1, dal punto di vista costruttivo [2] lo scudo è costituito da:

1. 5 Layer di kapton
2. Front e aft four bar linkage
3. Momentum trim tab
4. Forward and aft spreader bars
5. Mid booms
6. Mid spreader bars

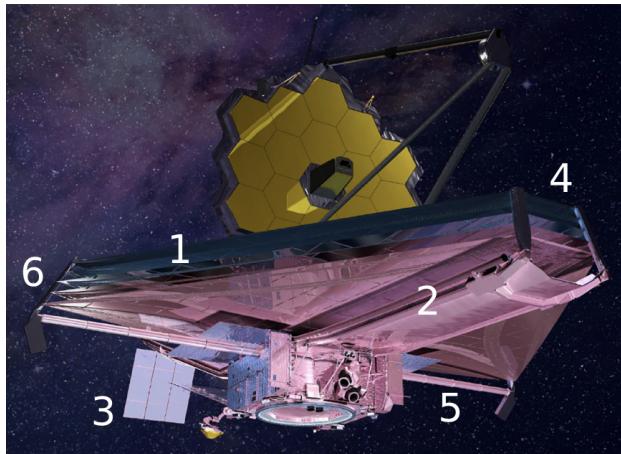


Figura 1: Ricostruzione del James Webb Space Telescope, da [3]

Altri componenti installati sono i *bipod launch lock assemblies*, dove il segmento dello scudo solare era connesso

all'OTE quando era piegato durante il lancio. Durante la fase di apertura sono stati fondamentali anche i 107 *pin*, i 90 *cable drivers* e vari motori per permettere l'attuazione dei bracci e delle *spreader bars*.

## 2.1. Momentum trim tab

Il telescopio è investito dalla radiazione solare che esercita una pressione sugli scudi, i quali, una volta dispiegati, hanno una forma che crea un momento angolare risultante non bilanciato e quindi causerebbe problemi di assetto; il *momentum trim tab* aiuta a risolvere questo problema equilibrando la risultante, quindi c'è bisogno di meno carburante per desaturare le ruote di reazione e ciò allunga la vita della missione. Dal punto di vista costruttivo si tratta di un pannello di materiale riflettente che è dimensionato in modo da subire una pressione radiativa tale da svolgere la sua missione. Viene tenuto fermo da dei meccanismi di bloccaggio, che poi vengono rilasciati e permettono ad una molla di metterlo in posizione.

## 2.2. Layer protettivi

I 5 *layer* riflettono la luce solare e sono disposti in modo che quando questa viene riflessa tra un *layer* e l'altro venga dispersa verso l'esterno: al centro hanno una distanza di 0.127m, ai lati di 0.254m, come è spiegato nella fig.2. Un solo scudo avrebbe condotto calore per conduzione verso il telescopio, gli spazi vuoti tra i fogli contribuiscono all'insulazione. Ogni *layer* è in Kapton, rivestito di alluminio per renderlo elettricamente conduttivo e collegarlo elettricamente al resto del telescopio per evitare l'accumulo di carica statica. I due pannelli più vicini al Sole hanno un rivestimento di Silicio dopato per aumentare la radiazione riflessa: il Silicio è un elemento che ha un'alta emissività, quindi blocca la maggior parte della radiazione in ingresso, ma essendo un semiconduttore viene dopato (viene aggiunto altro materiale in quantità minori durante il processo di copertura) per renderlo conduttivo e quindi essere protetto da accumuli di carica statica.

Il Kapton è una fibra sviluppata da Dupont negli anni '60



## Cross-Section of Webb's Five-Layer Sunshield

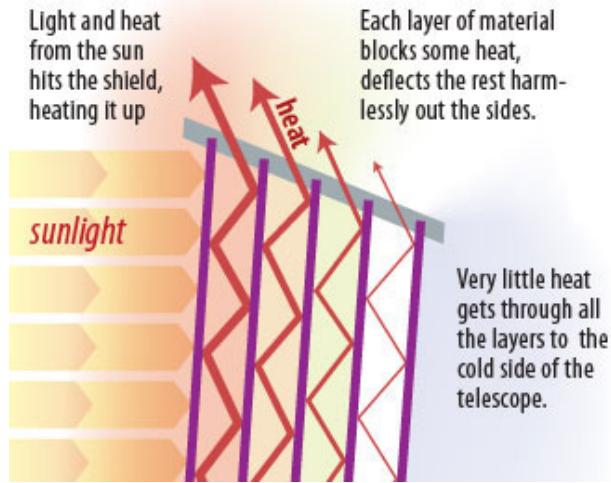


Figura 2: riflessione del calore verso l'esterno dello scudo, da [4]

che sulla Terra è usata come isolante per componenti elettrici, essendo stabile nel range di temperature dai -269°C ai 400°C, come si evince dalla tabella in fig.3 in questo caso è utilizzata anche per la sua scarsa espansione termica. Il calore generato dallo spacecraft bus al centro

Table 12. Effect of Gamma Radiation Exposure on Kapton® Polyimide Film (Cobalt 60 Source, Oak Ridge)

Property	Control 1 mil Film	$10^4$ Gy 1 h	$10^4$ Gy 10 h	$10^4$ Gy 4 d	$10^4$ Gy 42 d
Tensile Strength, MPa (psi $\times 10^3$ )	207 (30)	207 (30)	214 (31)	214 (31)	152 (22)
Elongation, %	80	78	78	79	42
Tensile Modulus, MPa (psi $\times 10^3$ )	3172 (460)	3275 (475)	3378 (490)	3275 (475)	2903 (421)
Volume Resistivity $\Omega \cdot \text{cm} \times 10^3$ at 2°C (392°F)	4.8	6.6	5.2	1.7	1.6
Dielectric Constant 1 kHz at 2°C (73°F)	3.46	3.54	3.63	3.71	3.50
Dissipation Factor 1 kHz at 23°C (73°F)	0.0020	0.0023	0.0024	0.0037	0.0029
Dielectric Strength V/ $\mu\text{m}$ (kV/mm)	256	223	218	221	254

Table 13. Effect of Electron Exposure on Kapton® Polyimide Film Mixed Neutron and Gamma

	$5 \times 10^7$ Gy	$10^8$ Gy
$5 \times 10^7$ neutrons/cm $^2$ /Flux at 175°C (347°F)	Film Darkened	Film Darkened and Tough

Table 14. Effect of Ultraviolet Exposure on Kapton® Polyimide Film\*

	1000 h Exposure
Tensile Strength, % of Initial Value Retained	100
Elongation, % of Initial Value Retained	74

\*Vacuum environment,  $2 \times 10^{-6}$  mmHg at 50°C (122°F). UV intensity equal to space sunlight to 2500A.

Figura 3: proprietà del Kapton, da [5]

è intrappolato tra i layer di membrana per non scaldare l'ottica.

La forma è stata determinata con l'uso di modelli di

ray tracing per proteggere l'OTE e il ISIM da radiazioni solari e terrestri e minimizzare il momento dalla pressione radiativa, inoltre è tale che il Sole punti sempre sul Layer 1 indipendentemente da come è orientato, la maggior parte del calore viene dissipato nei primi 4 layer, il 5° layer è usato soprattutto per sicurezza contro eventuali imperfezioni, micrometeoriti ecc...

Questa forma treidimensionale viene ottenuta attraverso l'utilizzo di Light Lines e Catenaries: strisce di metallo che vengono applicate sulla superficie, le prime lungo i bordi le seconde lungo l'interno della membrana, e i Compliant borders: delle forme che permettono alla membrana di muoversi e mantenere una forma riflettente assorbendo le deformazioni, come si può vedere in fig.4. E' di importanza



Figura 4: Si osservano Light Lines, Catenaries e Compliant Borders, questi ultimi avranno forme diverse a seconda di dove si trovano nella membrana, da [6]

fondamentale evitare la formazione di pieghe, perché queste degradano la capacità di riflessione dello scudo, ecco perchè si utilizzano questi accorgimenti: per creare in ogni punto dello scudo una superficie piana, come uno specchio. Quando sono estesi raggiungono le dimensioni di 21.197 m x 14.162 m (quanto un campo da tennis!). Il layer 1 è spesso 0.05 mm, gli altri quattro 0.025mm. La maggior parte dello spessore è costituito da Kapton, su cui sono aggiunti dei rivestimenti di Alluminio di circa 100 nm e di Silicio di circa 50 nm. Il Sole punta sempre al primo



layer.

Il risultato finale è di passare dai  $383K$  rilevati al primo layer al minimo di  $36K$  all'ultimo, da  $200kW$  di potenza al primo schermo a meno di  $1 W$  all'ultimo.

Una procedura di *Termal spot bonding* è utilizzata per applicare delle strisce di materiale ogni  $1.83 m$  per evitare allargamento di eventuali buchi causati da micrometeoriti che comprometterebbero la capacità del sistema di riflettere la luce: i fori effettuati per applicare i *pin* di chiusura dello scudo sono posizionati in modo da non essere mai allineati e quindi far oltrepassare alla radiazione più di un livello.

### 2.3. Mid-Boom Assembly

I componenti del Mid-Boom Assembly sono 1 tubo base e 5 tubi telescopici in fibra di carbonio che si estendono e dispiegano i layer dello scudo termico. All'interno c'è uno *stem deployer*: questo sistema spinge fuori una lastra di acciaio resistente alla corrosione, in grado di spingere 100 pounds e tirarne 400, quest'ultimo passaggio è necessario perché i tubi telescopici sono connessi ad un cavo che tensiona lo scudo solare e separa le 5 membrane.

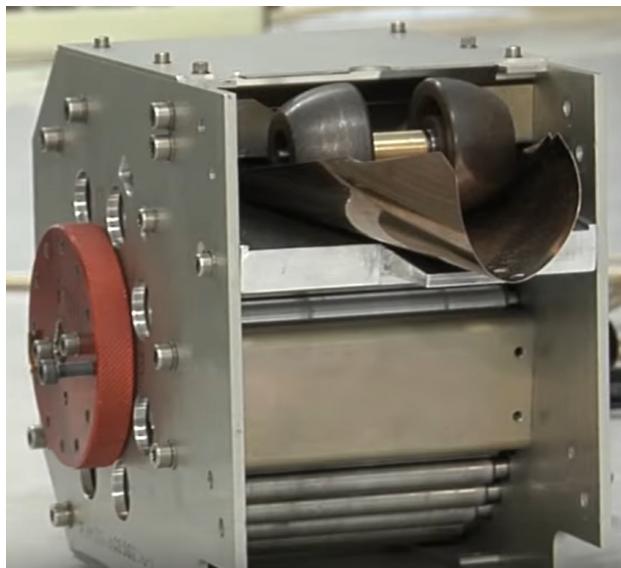


Figura 5: Stem Deployer, da [7]

Lo *stem deployer* utilizza una tecnologia di tipo *boom*: la trave è conservata all'interno sotto forma di nastro, quando è attuata diventa una circonferenza cava per resistere meglio ai carichi statici e al *buckling*.

### 2.4. Spreader bars

Le spreader bars sono dei binari metallici sui quali scorrono le estremità dei layer dello scudo termico, sono realizzati anch'essi dalla Northrop Grumman come parte del Mid-Boom assembly e sono determinanti nel distanziare i layer e quindi influenzare le proprietà riflettenti dello scudo.

### 3. Testing

Dal punto di vista del *testing* il telescopio si è rivelato troppo grande per essere testato completo in sicurezza, quindi si è utilizzato un approccio a blocchi: ogni componente è stato testato individualmente. Inoltre lo scudo, essendo troppo grande per entrare in una camera a vuoto esistente, è stato utilizzato della grandezza pari ad uno scudo un terzo delle dimensioni di quello reale[8].

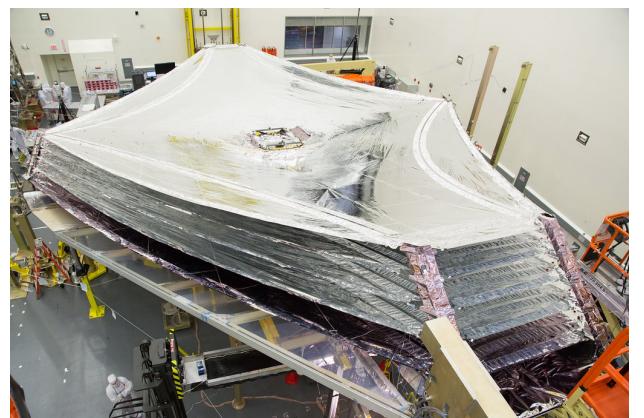


Figura 6: Scudo del James Webb telescope disteso durante l'ultima fase di testing, da [4]

Parte della missione avrebbe incluso lo spiegamento dello scudo durante il viaggio verso L2, questo sarebbe stato effettuato tramite l'estensione di alberi telescopici, ma la membrana ha presentato delle difficoltà dal punto di vista



del *testing* perchè questo processo sarebbe stato non deterministico, ovvero impossibile da prevedere, quindi è stato necessario un processo di un mese di diversi cicli di piegatura e dispiegamento dello scudo effettuato da un team di tecnici (il materiale era troppo delicato per una soluzione automatizzata) per “allenarli” fino a raggiungere una piegatura soddisfacente. La curvatura delle superfici ha aggiunto complessità ulteriore a questa fase e il dover simulare l’ambiente spaziale di assenza di peso ha richiesto carriole aggiuntive per sollevare i bracci durante il dispiegamento e quindi cancellare forze peso ed attriti ad esse connesse. I *layer* sono stati alzati verticalmente e distesi su un supporto speciale per essere sostenuti durante la piegatura. Il team di tecnici ha quindi piegato accuratamente ogni *layer* a zig zag per creare una forma a fisarmonica e permettere l’inserimento nella punta del razzo Ariane 5, come si vede dalla fig.6 Un altro aspetto intricato è stato allineare gli strati di membrana: ogni strato ha centinaia di buchi intenzionali che devono essere allineati per poter inserire dei *pin*, che hanno la funzione di mantenere fermi i *layer* durante il lancio e sono stati rilasciati per permettere il dispiegamento dello scudo.

#### 4. Missione

Il lancio è stato effettuato il 25 Dicembre 2021 e il dispiegamento dei vari componenti è durato otto giorni. Queste sono state le varie fasi [9]:

1. Il terzo giorno dal lancio si spiega la Forward Unitized Pallet Structure, che supporta i 5 *layer* di Kapton. Per preparare questa manovra il telescopio viene manovrato per far raggiungere alla UPS anteriore temperature più calde e vengono riscaldati diversi componenti chiave. Si attivano i meccanismi di rilascio. Diversi circuiti elettronici e software realizzati a terra supportano questa manovra, guidata da un motore. Successivamente viene spiegata la UPS posteriore. La fig.7 mostra le fasi di questo processo.
2. Il quinto giorno viene spiegato il Momentum Flap e viene rilasciata la copertura dello scudo: vengono attivati



Figura 7: James Webb telescope nel fairing del razzo Ariane 5, da [10]

dei meccanismi di rilascio che liberano la membrana di copertura che quindi si arrotola, come si può vedere dalla fig.8, per lasciare spazio a future manovre.

3. Il sesto giorno si è disteso il Mid-Boom sinistro (+J2) e destro (-J2), determinando quindi la massima apertura dello scudo.
4. Il nono giorno comincia un’operazione divisa in più fasi e che occupa i due giorni successivi con l’obiettivo di completare i membrane release finali e tensionare i 5 *layer* dello scudo.

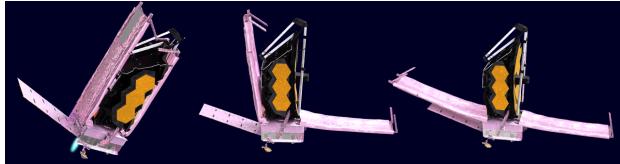


Figura 8: Spiegamento Forward e Aft UPS, da [9]

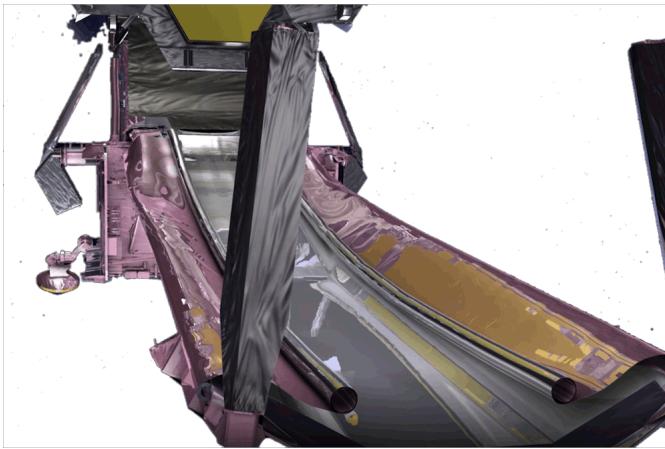


Figura 9: Sunshield cover completamente arrotolata, da [9]

Lo spiegamento e tensionamento dello scudo ha impiegato: 139 dei 178 meccanismi di rilascio totali del telescopio, 70 *hinge assemblies*, 8 motori di *deployement*, circa 400 carrucole e 90 cavi individuali dalla lunghezza totale di circa 400m. Il team ha messo in pausa il processo per ottimizzare i sistemi di potenza e i motori di tensionamento per assicurarsi che il Webb fosse nelle condizioni migliori prima di cominciare il lavoro di tensionamento.

## 5. Conclusioni

Il James Webb Space Telescope è un progetto ambizioso che ha richiesto 11,57 miliardi di dollari, distribuiti in 20 anni di operazioni; alla luce del lavoro svolto si può apprezzare il motivo di questa spesa dal punto di vista delle sfide ingegneristiche da superare e i rischi ad esse connessi. Lo scudo termico ha superato la sua missione con successo, permettendo di realizzare condizioni di lavoro stringenti a più di un milione di miglia dalla Terra.

## 6. Bibliografia

### Bibliografia

- [1] Website <https://youtu.be/zXyz1QtPqUY>, consultato il 26/09/2023
- [2] Website [https://it.wikipedia.org/wiki/Telescopio\\_spaziale\\_James\\_Webb](https://it.wikipedia.org/wiki/Telescopio_spaziale_James_Webb), consultato il 26/09/2023
- [3] Website [https://www.youtube.com/channel/UCfi4\\_aCc2nEhtL](https://www.youtube.com/channel/UCfi4_aCc2nEhtL), consultato il 26/09/2023
- [4] Website <https://www.jwst.nasa.gov/content/observatory/sunshield.html>, consultato il 26/09/2023
- [5] Website [https://www.dupont.com/content/dam/dupont/amer/us/en/ei-transformation/public/documents/en/EI-10142\\_Kapton-Summary-of-Properties.pdf](https://www.dupont.com/content/dam/dupont/amer/us/en/ei-transformation/public/documents/en/EI-10142_Kapton-Summary-of-Properties.pdf), consultato il 26/09/2023
- [6] Website <https://youtu.be/hGDazUwaXEc>, consultato il 26/09/2023
- [7] Website <https://youtu.be/BQ7CugNVhV4>, consultato il 26/09/2023
- [8] Website <https://www.nasa.gov/feature/goddard/2020/webb-sunshield-successfully-unfolds-and-tensions-in-final-tests>, consultato il 26/09/2023
- [9] Website <https://webb.nasa.gov/content/webbLaunch/deploymentExplorer.html>, consultato il 26/09/2023
- [10] Website <https://webb.nasa.gov/content/about/launch.html>