

Università degli Studi di Padova – Dipartimento di Ingegneria Industriale

Corso di Laurea in Ingegneria Aerospaziale

Relazione per la prova finale

*Ottimizzazione dei parametri di progettazione
di Vele Solari per l'esplorazione spaziale*

Tutor universitario:

Prof. Bettanini Fecia Di Cossato Carlo

Laureanda:

Ennio Linda

Padova, 15/03/2023

- Nel corso della storia la brama di conoscenza dell'uomo ha incoraggiato l'evoluzione scientifica, superando limiti sempre più lontani dalla nostra portata, con l'unico limite rappresentato dalle tecnologie in nostro possesso.
- *"Fornite navi o vele adatte alle brezze celesti, e ci saranno alcuni che affronteranno anche quel vuoto»* scriveva Keplero a Galileo nel 1610, intuendo per la prima volta il concetto alla base delle **Vele Solari**, in grado oggi di generare moto senza l'impiego di carburante.
- Dalla fine del 1800, con gli studi di Tsiolkovsky e Tsander, alle recenti applicazioni (IKAROS, LightSail), questa tecnologia ha visto una rapida evoluzione, rendendosi competitiva nel campo dell'esplorazione spaziale.

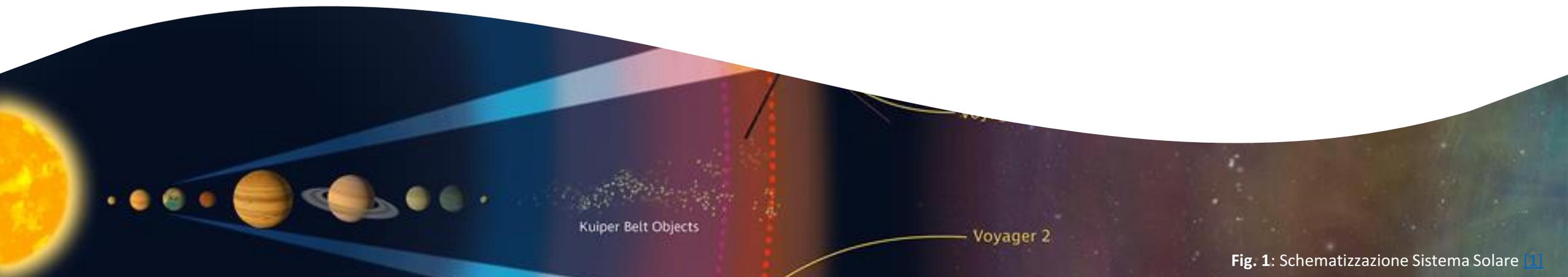
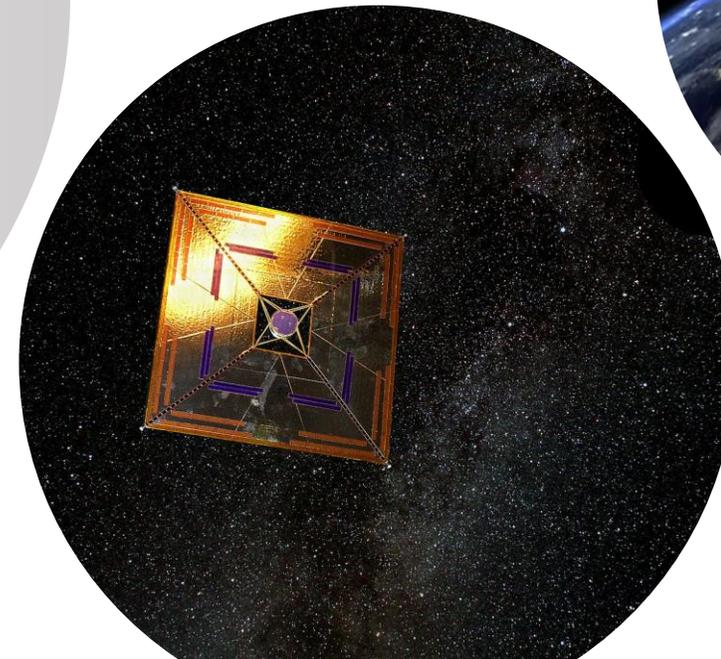
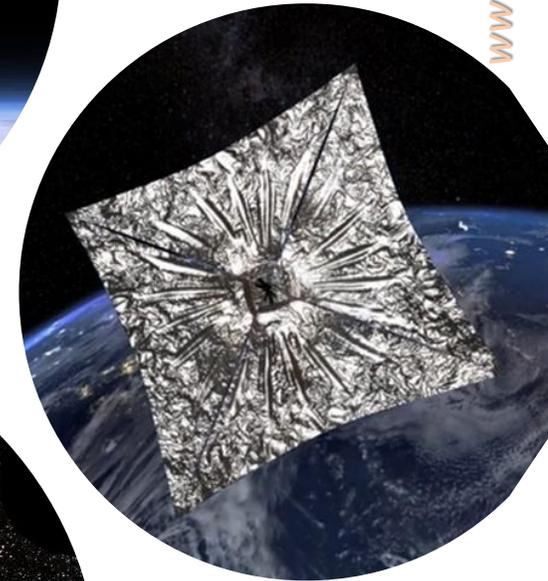
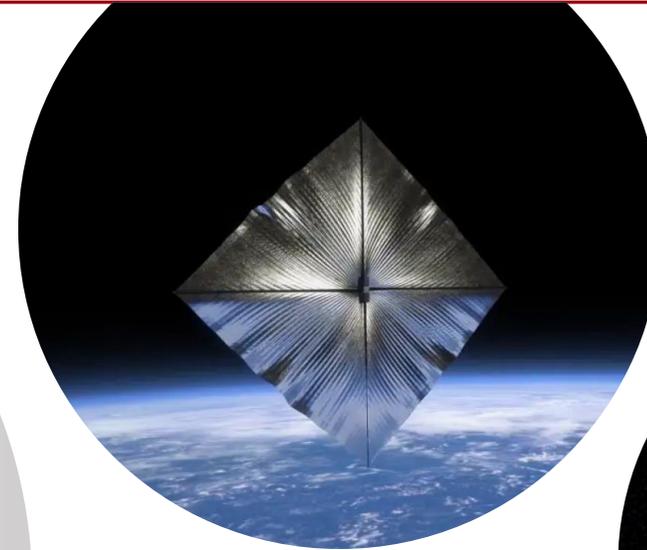


Fig. 1: Schematizzazione Sistema Solare [1]

Si intende dunque individuare l'insieme di **parametri** influenti alla progettazione di una **Vela Solare** per l'esplorazione spaziale.

- Motivazioni
- Principi di funzionamento
- Parametri termo-ottici
- Materiali
- Comportamento meccanico
- Conclusioni



Dall'alto:

Fig. 2: Modello di Vela Solare [\[2\]](#)

Fig. 3: LightSail 2 (NASA) [\[3\]](#)

Fig. 4: IKAROS (JAXA) [\[4\]](#)

I sistemi di propulsione rispondono all'**Equazione del Razzo** di Tsiolkovsky:

$$\frac{M}{M_{tot}} = 1 - e^{\frac{\Delta v}{I_{sp} \cdot g_0}}$$

Si evidenziano così i **principali limiti** di tali sistemi:

- **Massa e volume** del segmento spaziale aumenta al crescere del carburante richiesto;
- Criticità legate al **mantenimento ottimale** del carburante entro i serbatoi (incendi, perdite, degradazione, ...);
- Limite alla **durata della missione**

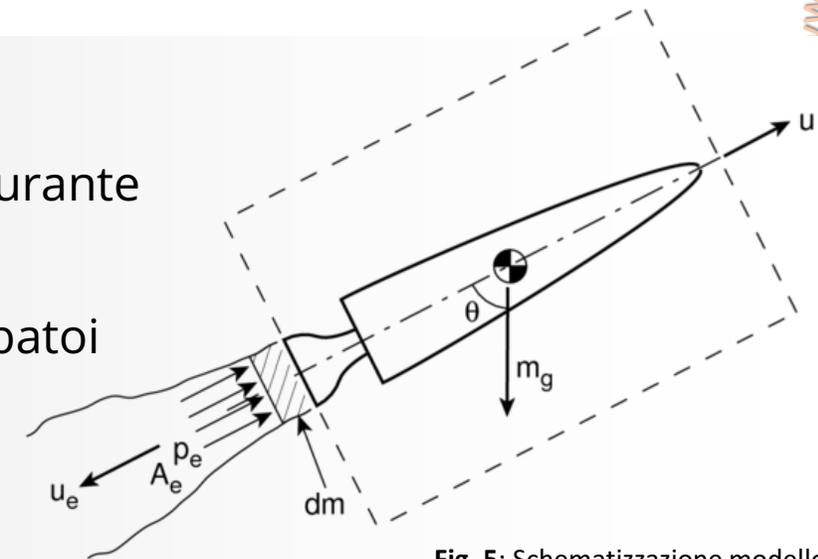


Fig. 5: Schematizzazione modello propulsione con carburante [5]

L'introduzione della **Vela Solare** entro il Segmento Spaziale permette di oltrepassare tali limiti, rendendo possibile l'esplorazione di regioni dello spazio difficilmente raggiungibili altrimenti.

Il moto della vela si basa sullo sfruttamento della **pressione di radiazione** proveniente dalla luce emessa dal Sole, per **accelerare** e **compiere manovre**.

Colpendo una superficie, i fotoni solari trasferiscono una **quantità di moto (p)**, percepita come **pressione (P)** dalla superficie stessa

$$p = \frac{E}{c} \rightarrow P = \frac{F}{S} = \frac{dp}{dt} \cdot \frac{1}{dA}$$

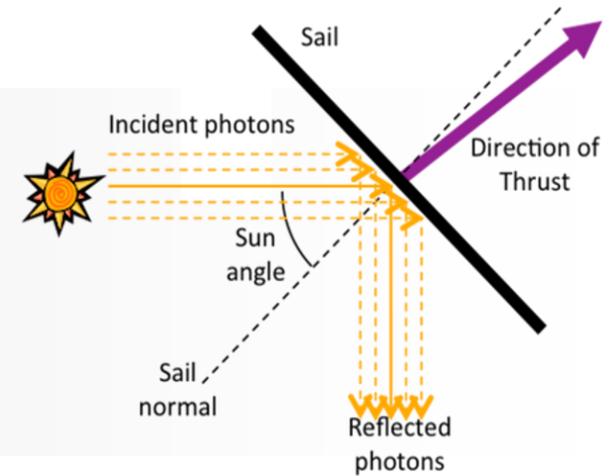


Fig. 6: Modello di funzionamento della generazione di moto della Vela [7]

Definendo **l'energia** della **radiazione elettromagnetica (E)** tramite **flusso radiante (I)** del Sole

$$E = I dt dA \cos\theta d\Omega$$

$$I(r) = \frac{L_{\odot}}{4\pi r^2}$$

$$\rightarrow P_{max} = 2 \frac{I(r)}{c} \left[\frac{kg}{ms^2} \right]$$

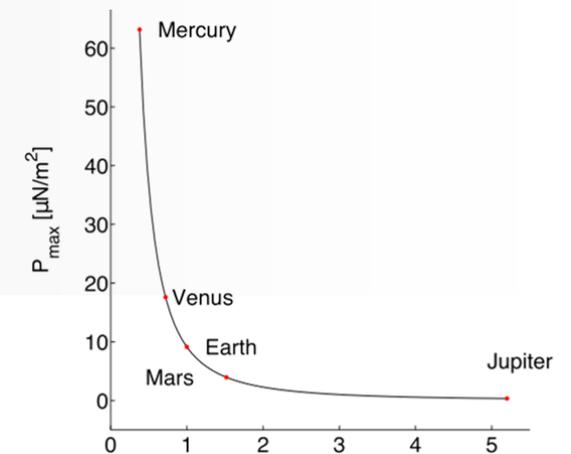


Fig. 7: Andamento della Pressione di Radiazione con la distanza dalla sorgente (AU) [8]

Per individuare il legame tra **parametri ottici** e **l'accelerazione** prodotta dalla pressione della radiazione solare, viene sfruttato il modello matematico della **riflessione non perfetta**.

Questa sarà dunque definita dalla somma di due componenti, rispettivamente:

Normale:


$$a_{\perp} = 2 \frac{I}{cm} S \cos\theta (a_1 \cos\vartheta + a_2)$$

Parallela al piano:


$$a_{\parallel} = -2 \frac{I}{cm} S a_3 \sin\vartheta$$

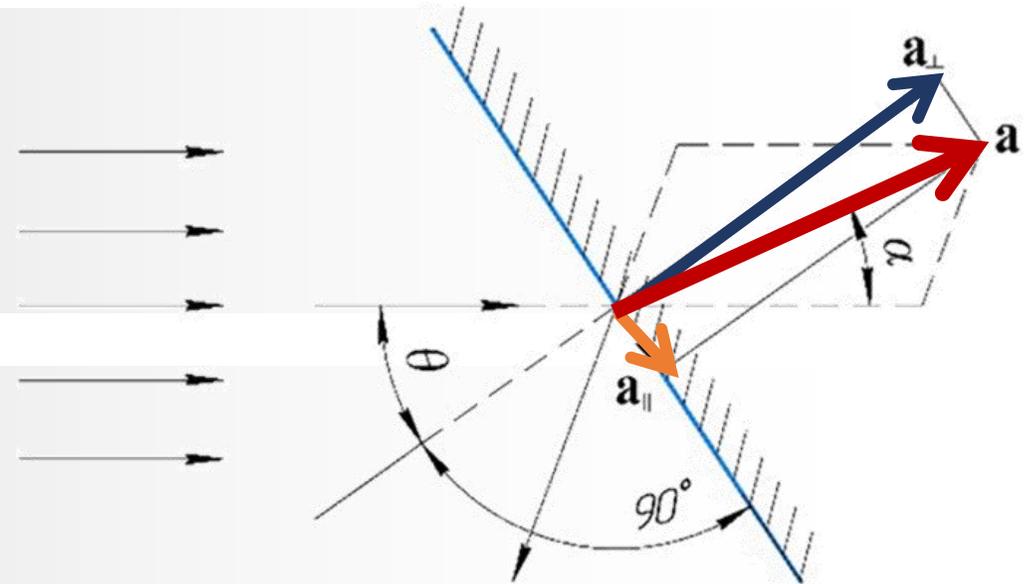


Fig. 8: The scheme of the acceleration produced by solar radiation pressure and its normal and parallel projections.[8]

Si evidenzia la stretta dipendenza tra accelerazione della vela e coefficienti termo-ottici dei materiali:

$$a_1 = \frac{1}{2} (1 + \varsigma\rho) \quad a_2 = \frac{1}{2} \left(B_f(1 - \varsigma)\rho + (1 + \rho) \frac{\varepsilon_f B_f - \varepsilon_b B_b}{\varepsilon_f - \varepsilon_b} \right) \quad a_3 = \frac{1}{2} (1 - \varsigma\rho)$$

Sarà dunque necessario implementare materiali, forme e spessori in modo da ottenere:

Ottimizzazione prestazioni:

- Emissione minima nella faccia riflettente
- Emissione massima nella faccia in ombra
- Massima riflessione
- Densità limitata

Limitazione effetti di non lambertianità:

- Riducono il valore dell'accelerazione;
- Aumentano l'accelerazione laterale;
- Accelerano il processo di degradazione;
- Aumentano la quantità di energia assorbita, dunque la temperatura superficiale;

La parte attiva di Vela è composta classicamente da:

Uno strato metallico riflettente:

- **Alluminio:**
flat reflector, commercialmente diffuso, bassa temperatura di fusione;
- **Berillio:**
Alta temperatura di fusione, elevata tossicità;
- **Argento:**
solar reflector, richiede uno spessore inferiore per analoghe prestazioni.

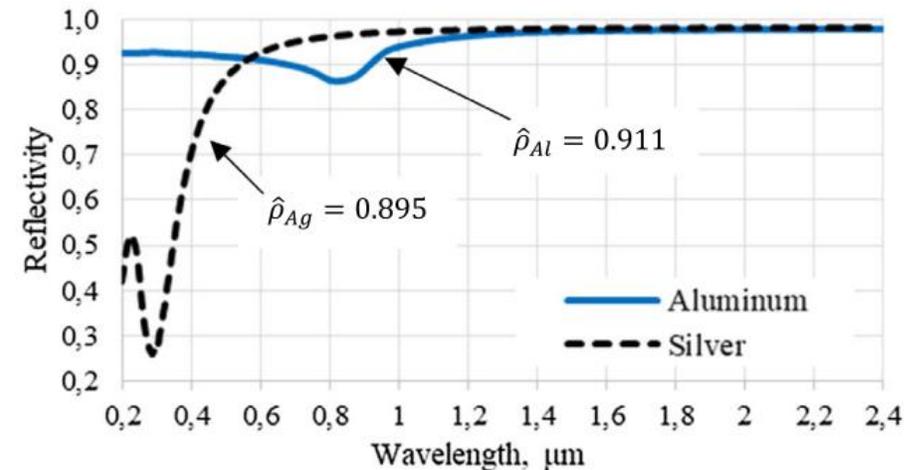


Fig. 9: Andamento del coefficiente di riflessione di Argento e Alluminio [9]

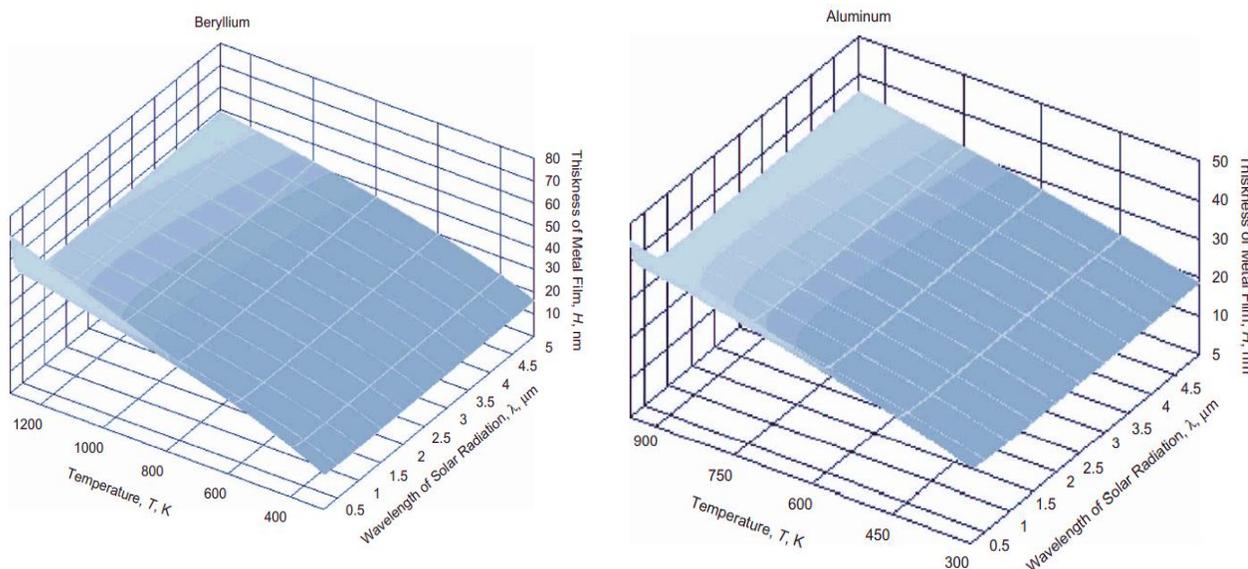


Fig. 10: Andamento degli spessori di Alluminio e Berillio con temperatura e lunghezza d'onda [10]

Spessori:

- La determinazione dello spessore minimo che fornisce la massima riflettività dipende da
 - **Temperatura**
 - **Lunghezze d'onda** della radiazione solare
- Con l'aumentare della temperatura, la conducibilità elettrica del materiale diminuisce e lo spessore cresce. Lo spessore minimo ha una dipendenza esplicita dalla frequenza attraverso il fattore $\frac{1}{\sqrt{\omega}}$

Un substrato polimerico, con funzione di:

- Supporto
- Controllo termico
- Protezione da impatti/resistenza meccanica

Pellicole polimeriche:

- Kapton
- Mylar
- CP-1



- Spessore nell'ordine dei μm
- Resistenza chimica
- Auto estinguenza
- Ottimo strumento di controllo termico

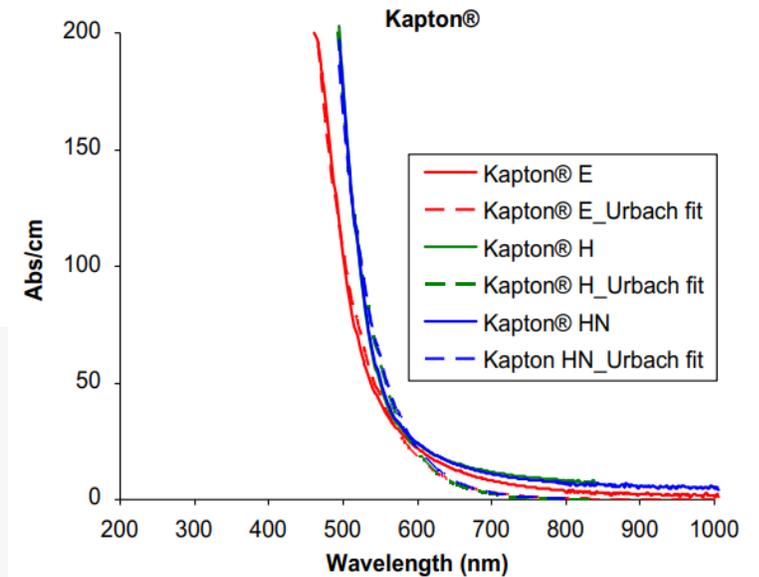


Fig. 11: Optical absorbance of polyimides. [11]

Soluzioni alternative:

- Dielettrici :
($\text{SiO}_2, \text{ZrO}_2, \text{Si}, \text{MgF}_2$)
- Grafene



- *Solar adsorbers* ($\frac{\alpha}{\epsilon} \ll 0,1$)
- Basse densità
- Elevati punti di fusione



Da sinistra:
Fig. 12: Kapton [12]
Fig. 13: Grafene [13]

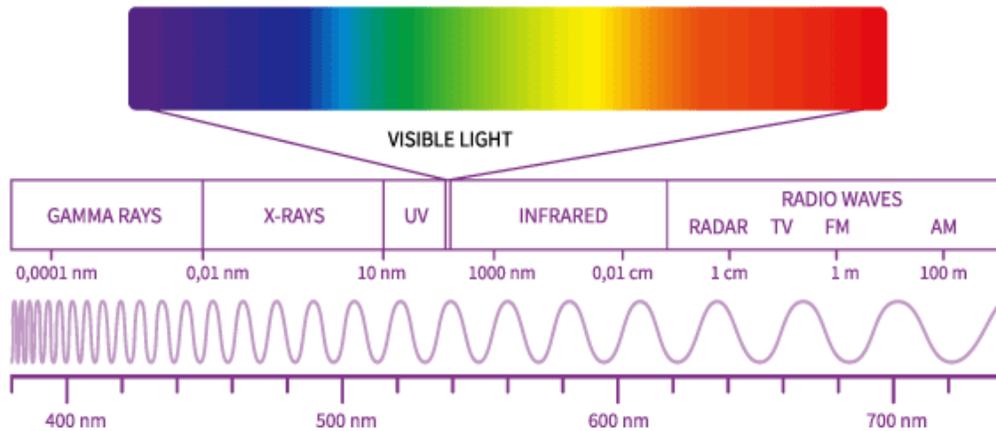


Fig. 14: Spettro Elettromagnetico [14]

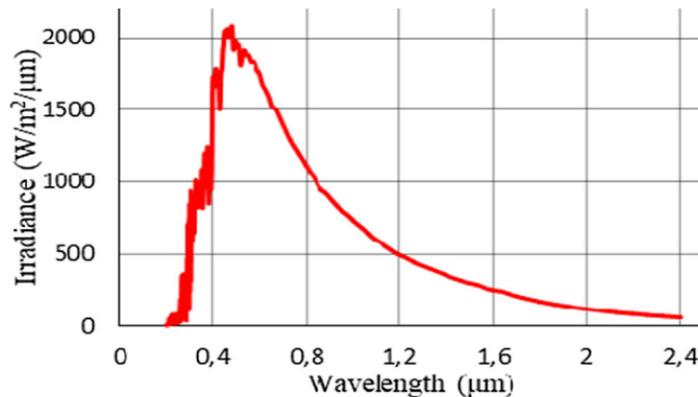


Fig. 15: Distribution of the solar spectral irradiance according to the data from the LISIRD and measurements gathered by the SORCE. [15]

Spettro infrarosso: la radiazione sarà principalmente assorbita dalla vela, causandone un **aumento di temperatura**

Spettro visibile: la maggior parte viene riflessa dalla vela, in funzione dei coefficienti termo-ottici che la caratterizzano. È da questa porzione di spettro che la vela risulta in grado di generare la più grande percentuale di **accelerazione**

Spettro ultravioletto: Le radiazioni solari ultraviolette ionizzano la lamina metallica e la vela solare acquisisce una **carica elettrica positiva**.

L'effetto prodotto consiste in un'accelerazione ulteriore della vela, che si comporta ora come uno **scudo elettrico** estraendo quantità di moto deviando la componente protonica del plasma del vento solare.

Forme e integrazioni:

- **Resistenza meccanica** allo stress derivante dalla pressione di radiazione:



$$F \approx T\theta = \tau \frac{l_0}{R}$$

$$P = \frac{F}{S} \approx \tau \frac{H}{R}$$

- Necessità di mantenersi entro la curva di **deformazione elastica**

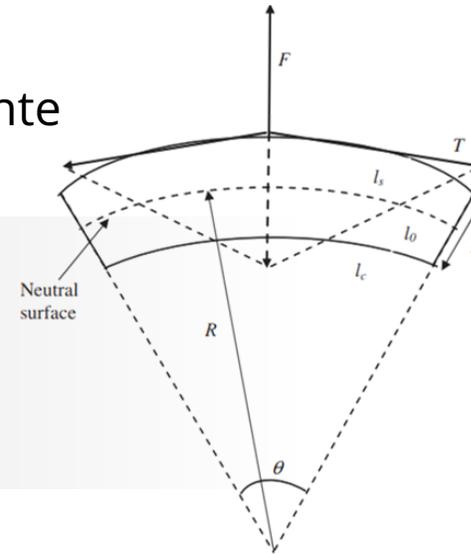


Fig. 16: Andamento delle forze risultanti [16]

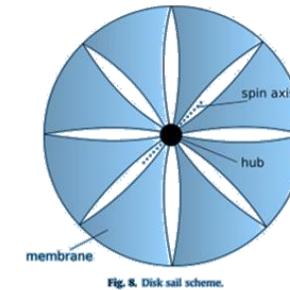


Fig. 8. Disk sail scheme.

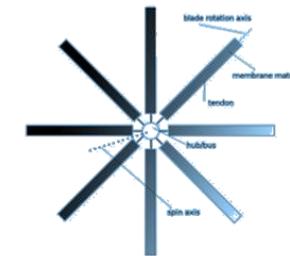


Fig. 9. Helogyro sailcraft scheme [61].

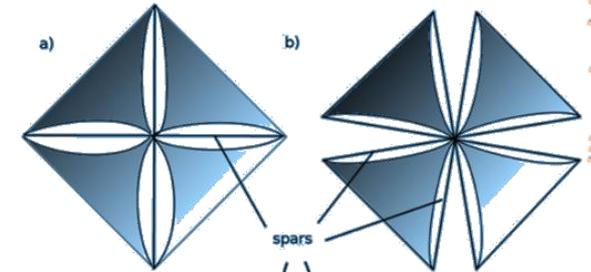


Fig. 7. Rigid sail schemes: clipper (a), quad (b), butterfly (c) [61].

Fig. 17: Possibili configurazioni di Vele Solari [17]

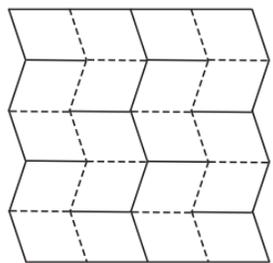


Fig. 22. Miura-ori folding pattern.

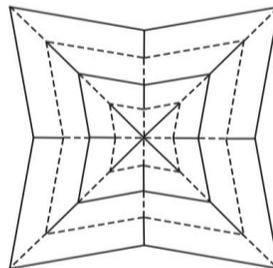


Fig. 20. An example of a tree leaf folding pattern.

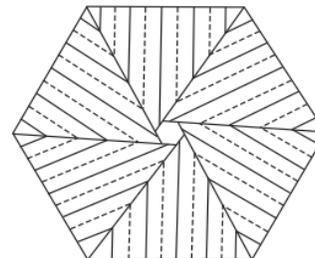


Fig. 23. Spiral folding pattern.

Fig. 18: Possibili sistemi di pieghe [18]

- Necessità di **orientare** sezioni in maniera indipendentemente per
 - Ottimizzare l'angolo di incidenza della radiazione
 - Effettuare manovre
- Necessità di integrare un **sistema di pieghe** che non influenzi le prestazioni della vela in funzione

Pretensionamento e grinze:

Per **ridurre la deflessione** della vela e rendere più efficace l'urto con i fotoni, è utile pretensionare la membrana tramite dei punti di attacco

Il pretensionamento favorisce la **formazione di grinze**, che influenzano negativamente l'efficienza della vela.

Dallo studio comparativo [3] di una vela con 5 punti di attacco (5PCS) e punti d'attacco multipli (MPCS), risulta che:

- All'aumentare del pretensionamento, aumentano il numero e l'ampiezza delle grinze
- Gli spostamenti massimi fuori piano variano con una potenza del pretensionamento;
- Il numero e l'ampiezza delle grinze formate in MPCS è notevolmente inferiore rispetto a quelle emerse in 5PCS.

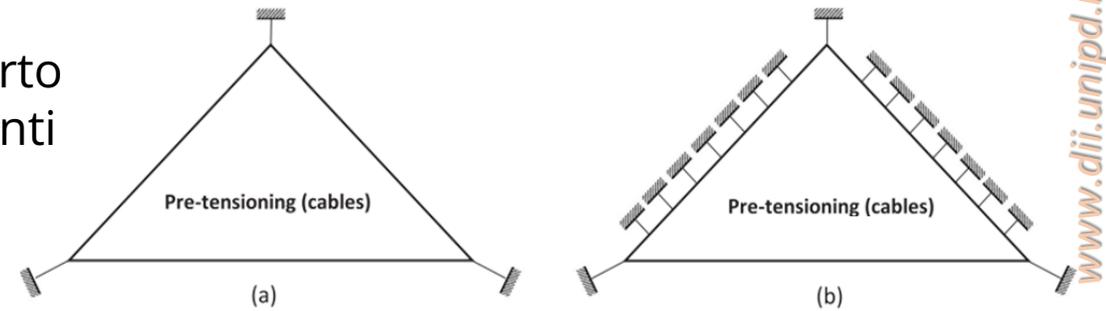
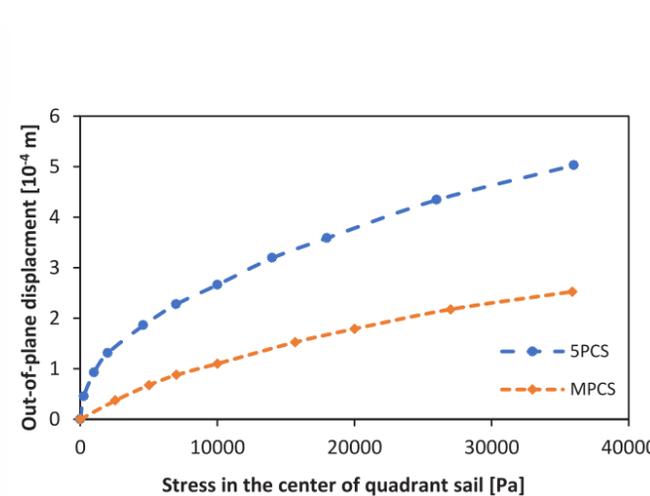


Fig. 19: Boundary conditions of the pre-tensioning, for (a) 5PCS and (b) MPCS. [19]



In alto:

Fig. 20: Confronto andamento delle grinze per 5PCS e MPCS [20]

A destra:

Fig. 21: Confronto distribuzione delle grinze tra 5PCS e MPCS [21]

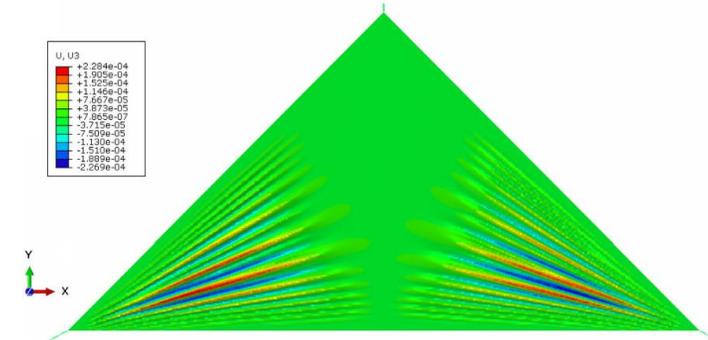


Fig. 16. Transversal (along z-axis) displacement field of a solar sail quadrant with 5PCS - U_z [m].

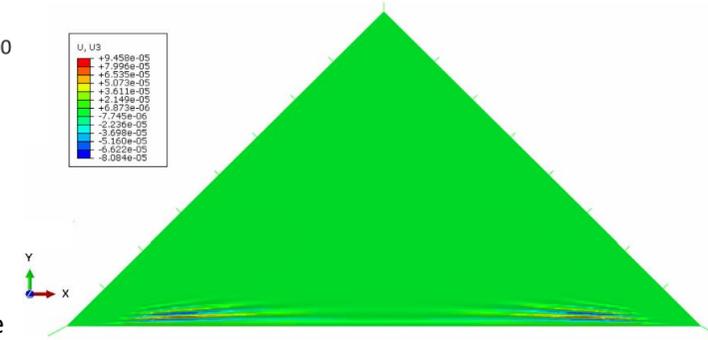


Fig. 18. Transversal (along z-axis) displacement field of a solar sail quadrant with MPCS - U_z [m].

La tecnologia delle Vele Solari nonostante sia notevolmente maturata negli ultimi decenni, trova davanti a sé notevoli margini di miglioramento.

In particolare si sta investigando su materiali più performanti, come ad esempio dielettrici e gas inglobati entro strati di grafene.

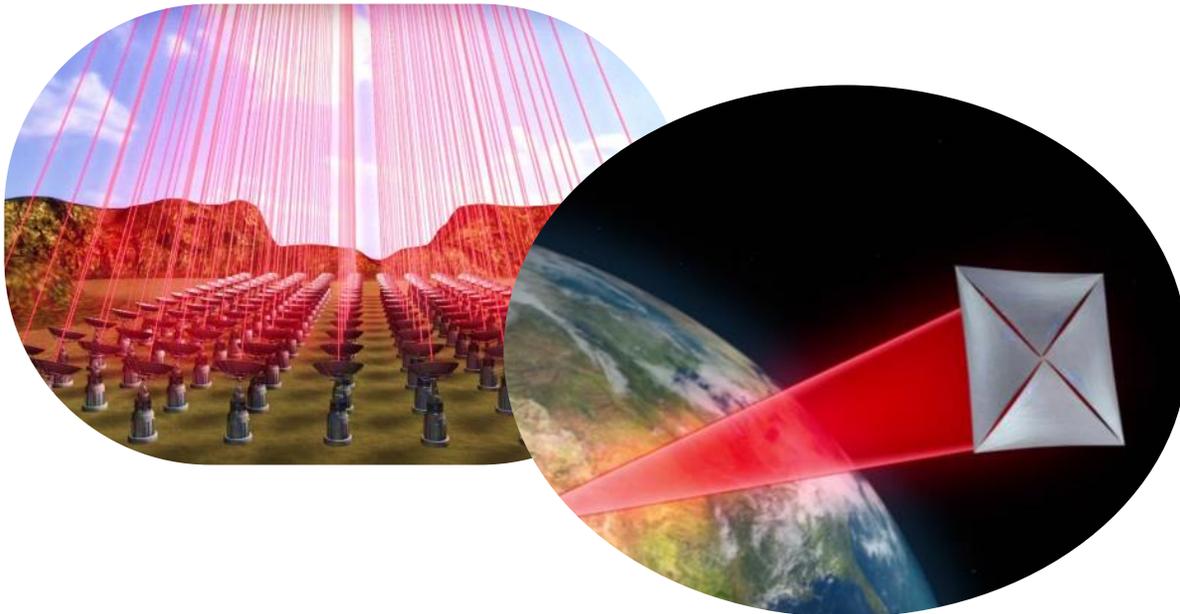


Fig. 24: Sistema di puntatori laser per vele fotoniche [24]

Fig. 25: Vela fotonica spinta da un raggio laser generato sulla Terra [25]

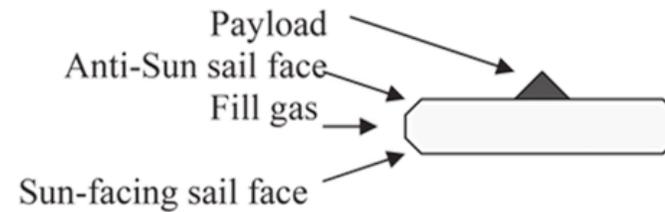


Fig. 22: Schema Vela in grafene [22]

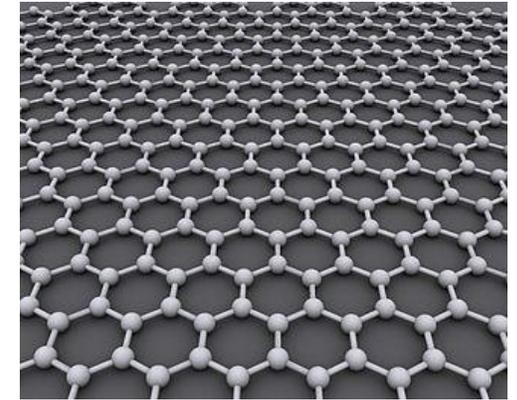


Fig. 23: Modello molecolare del grafene [23]

Da tempo si ipotizza inoltre la possibilità di spingere le vele tramite fonti di luce diverse dal Sole: tramite l'impiego di **puntatori laser**- a Terra o in orbita- è possibile ottenere risultati analoghi a quelli della classica propulsione tramite radiazione solare. In questo caso, si parla di **vele fotoniche**.

Grazie alla nuova applicazione, è possibile ovviare i problemi relativi alla posizione della vela solare nello spazio, legata naturalmente a quella del Sole.

1. Rozhkov, Miroslav A., Olga L. Starinova, and Irina V. Chernyakina. "Influence of optical parameters on a solar sail motion." *Advances in Space Research* 67.9 (2021): 2757-2766.
2. Kezerashvili, Roman Ya. "Thickness requirement for solar sail foils." *Acta astronautica* 65.3-4 (2009): 507-518.
3. [Galhofo, Diogo, et al. "Structural behaviour of pre-tensioned solar sails." *Thin-Walled Structures* 181 \(2022\): 110007.](#)
4. Fu, Bo, Evan Sperber, and Fidelis Eke. "Solar sail technology—A state of the art review." *Progress in Aerospace Sciences* 86 (2016): 1-19.
5. Johnson, Les, et al. "Status of solar sail technology within NASA." *Advances in Space Research* 48.11 (2011): 1687-1694.
6. Miller, Daniel, et al. "High-performance solar sails for interstellar object rendezvous." *Acta Astronautica* 200 (2022): 242-252.
7. French, R. H., et al. "Optical properties of polymeric materials for concentrator photovoltaic systems." *Solar Energy Materials and Solar Cells* 95.8 (2011): 2077-2086.

- [1] <https://www.focus.it/scienza/spazio/voyager-e-hubble-insieme-nello-studio-dello-spazio-interstellare>
- [2] <https://www.passioneastronomia.it/bloccare-il-sole-come-soluzione-al-surriscaldamento-globale/>
- [3] https://www.hwupgrade.it/news/scienza-tecnologia/lightsail-2-la-vela-solare-sembra-funzionare-veramente_83742.html
- [4] <https://www.rinnovabili.it/mobilita/aeronautica-sostenibile/vela-solare-diffrazione/>
- [5] <https://web.mit.edu/16.unified/www/SPRING/propulsion/notes/node103.html>
- [6] <http://jacobsjournal.ucsd.edu/2021/06/16/the-future-of-solar-sailing-may-be-closer-than-it-seems/>
- [7] [17] [18] Fu, Bo, Evan Sperber, and Fidelis Eke. "Solar sail technology—A state of the art review." *Progress in Aerospace Sciences* 86 (2016): 1-19.
- [8] [9] [15] Rozhkov, Miroslav A., Olga L. Starinova, and Irina V. Chernyakina. "Influence of optical parameters on a solar sail motion." *Advances in Space Research* 67.9 (2021): 2757-2766.
- [10] [16] Kezerashvili, Roman Ya. "Thickness requirement for solar sail foils." *Acta astronautica* 65.3-4 (2009): 507-518
- [11] French, R. H., et al. "Optical properties of polymeric materials for concentrator photovoltaic systems." *Solar Energy Materials and Solar Cells* 95.8 (2011): 2077-2086.
- [12] <https://www.sharemind.eu/wordpress/il-kapton-questo-sconosciuto/>
- [13] <https://grafene.cnr.it/tecnica-micromeccanica-per-la-produzione-di-nanopiastre-di-grafene-mai-stato-cosi-semplice/>
- [14] <https://www.istockphoto.com/it/vettoriale/diagramma-della-luce-visibile-spettro-elettromagnetico-del-colore-frequenza-gm1277151562-376444523>
- [19] [20] [21] Galhofo, Diogo, et al. "Structural behaviour of pre-tensioned solar sails." *Thin-Walled Structures* 181 (2022): 110007
- [23] <https://it.wikipedia.org/wiki/Grafene>
- [24] <https://aliveuniverse.today/flash-news/fisica-tecnologia/5531-ecco-come-arrivare-velocemente-su-alpha-centauri>
- [25] https://www.ansa.it/scienza/notizie/rubriche/spazioastro/2016/05/24/la-missione-su-alpha-centauri-approda-al-congresso-usa_57842203-093f-4ef7-9ffe-9cf85098cf5e.html