

Università degli Studi di Padova – Dipartimento di Ingegneria Industriale

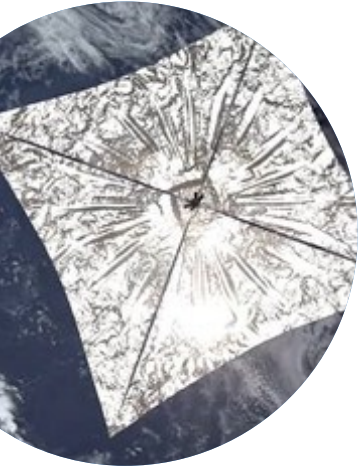
Corso di Laurea in Ingegneria Aerospaziale

***Relazione per la prova finale  
«Le vele solari e la loro interazione  
con l'ambiente spaziale»***

Tutor universitario: Prof. Brunello Pierfrancesco

Laureando: *Zanin Matteo*

Padova, 22/09/2023



Fonte: [26]



Fonte: [27]



Fonte: [28]

- Confronto fra sistemi di propulsione
- Funzionamento delle vele
- Materiali impiegati
- Struttura della vela
- Interazione con l'ambiente spaziale
- Missioni

## Propulsione chimica

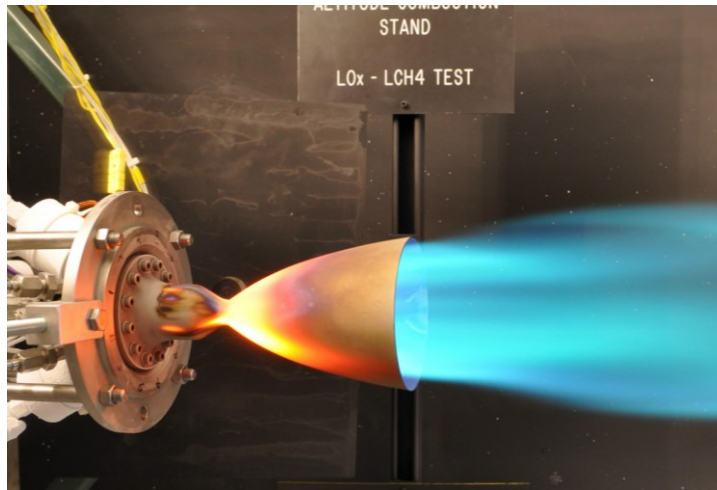
- Spinta elevata e manovrabile rapidamente e precisamente
- Richiede carburante
- Massa elevata
- Soluzione compatta, efficiente e affidabile, ma complessa
- Elevati costi di produzione e mantenimento

## Propulsione al plasma

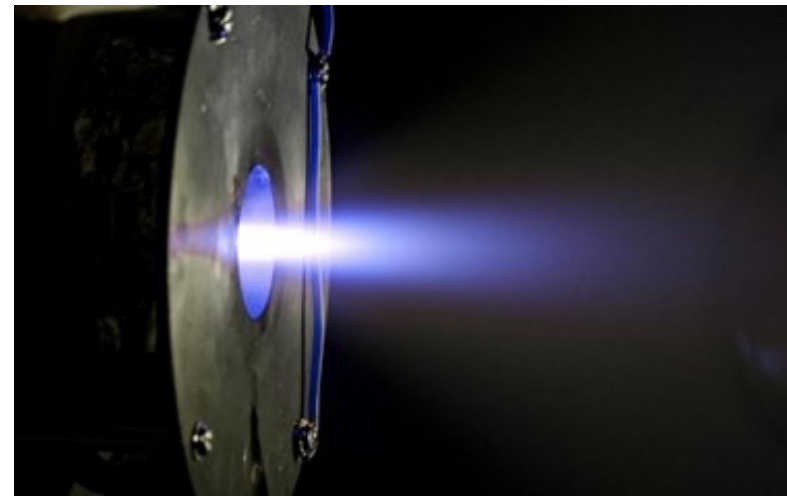
- Spinta contenuta e manovrabile
- Sfrutta campi elettromagnetici per spingere masse gassose ionizzate
- Ampie zone di applicabilità nello spazio
- Durata di volo ridotta rispetto altri metodi di propulsione a bassa spinta
- Configurazione compatta
- Alta efficienza per lunghi periodi di tempo

## Propulsione con vele solari

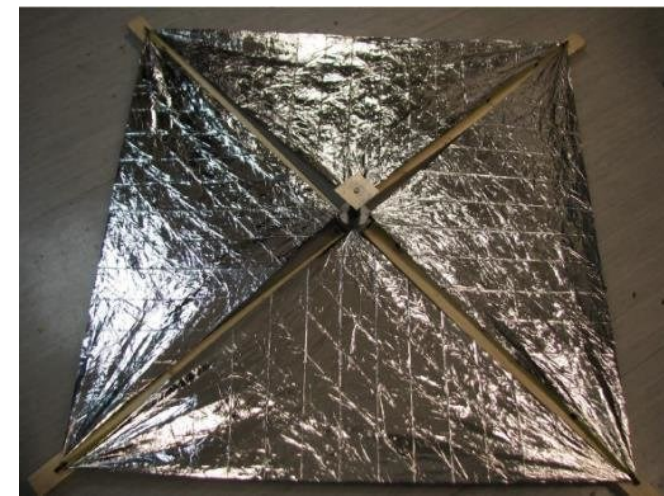
- Spinta continua ma debole e scarsa manovrabilità del satellite
- Consumo del propellente assente, ma il sistema dipende dalla radiazione solare
- Ingombro delle vele e payload ridotto
- Hardware semplice e massa ridotta, ma meno affidabile
- Costo contenuto



Fonte: [29]



Fonte: [30]



Fonte: [31]

Una particella di energia  $U$ , la quale viene definita rispetto velocità nulla, massa  $m_0$  e quantità di moto  $M$  rispetta l'equazione [7]:

$$U^2 = M^2 c^2 + m_0^2 c^4$$

Per un fotone:

$$U_{PH} = M_{PH} c$$

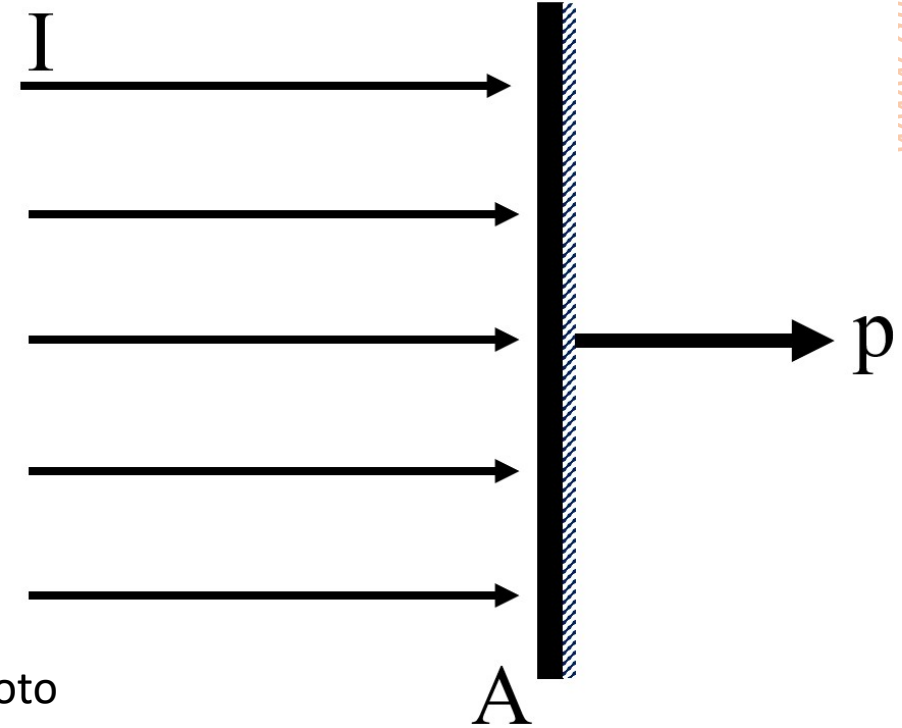
$$M_{PH} = U_{PH} / c$$

Dunque, considerando un'onda elettromagnetica di intensità  $I$ , la quantità di moto per unità di tempo e superficie risulta:

$$M = I / c$$

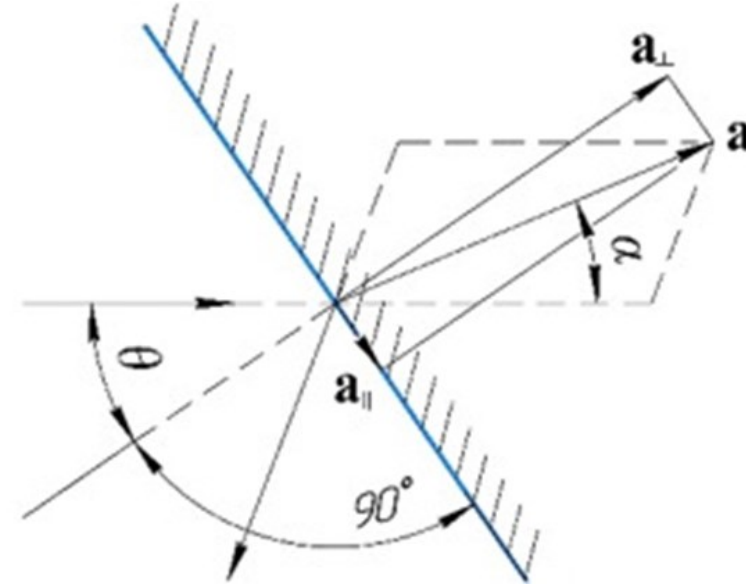
Per valutare la pressione di radiazione sulla vela si considera la quantità di moto trasferita dall'onda ortogonale ad una superficie perfettamente riflettente. Questa sarà  $2 M$ , e allora, dall'equazione di Newton  $F = dM/dt$ , la pressione risulta:

$$p = 2 I / c$$



## Orbite a spirale

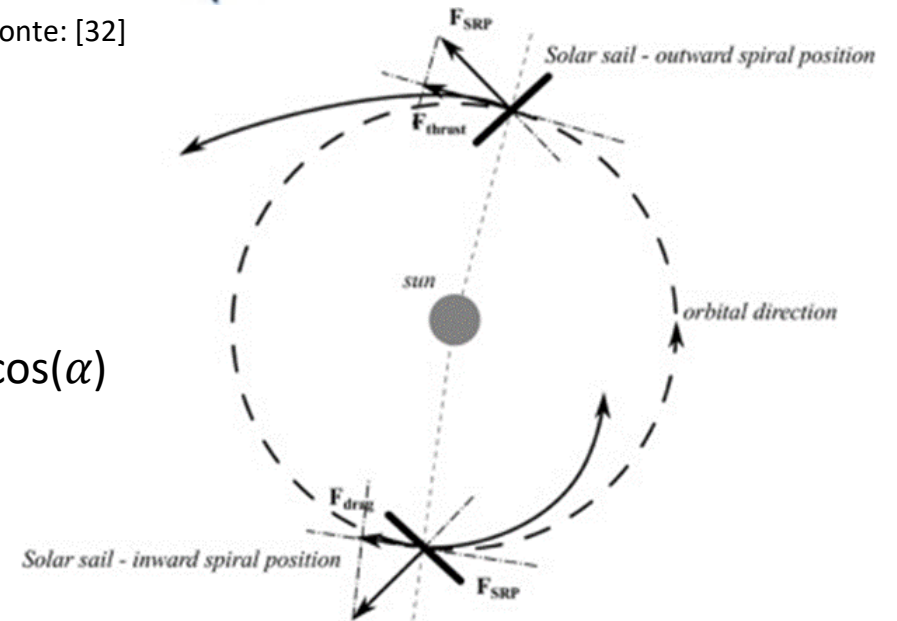
- Moto di allontanamento
- Moto di avvicinamento



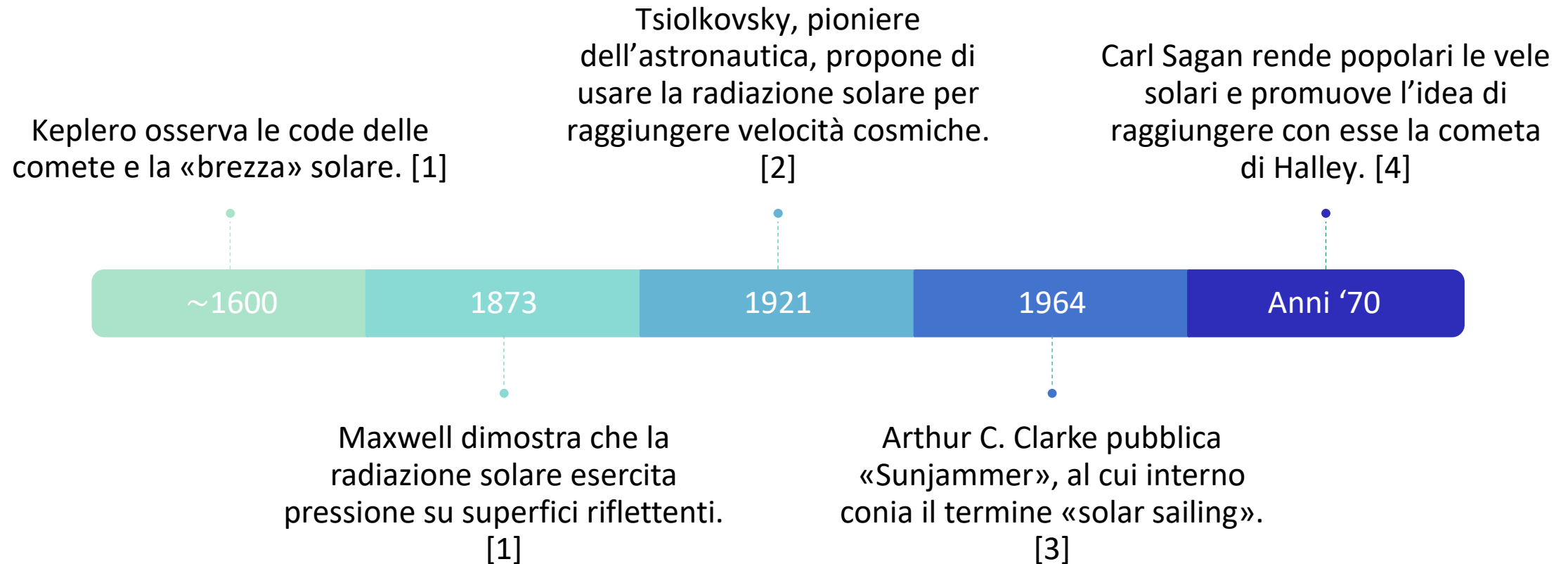
Fonte: [32]

Componenti della forza propulsiva della vela solare [19]:

$$\begin{cases} F_t = -PA(1 - \tilde{r}s) \cos(\alpha) \sin(\alpha) \\ F_n = -PA(1 - \tilde{r}s) \cos^2(\alpha) - PABf(1 - s)\tilde{r} \cos(\alpha) - PA(1 - \tilde{r}) \left( \frac{\epsilon_f B_f - \epsilon_b B_b}{\epsilon_f + \epsilon_b} \right) \cos(\alpha) \end{cases}$$



Fonte: [33]

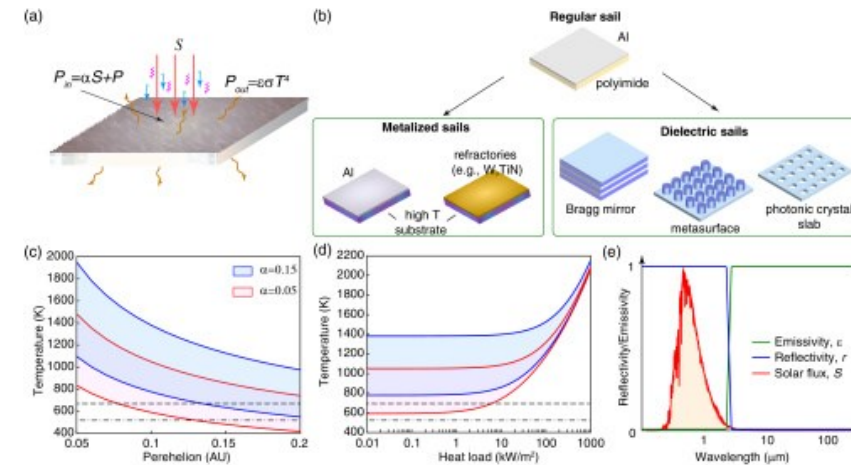




- Materiali riflettenti:  
Alluminio, litio, argento
- Materiale del substrato:  
Mylar, Kapton, Lexan, CP-1, CORIN
- Ripstops



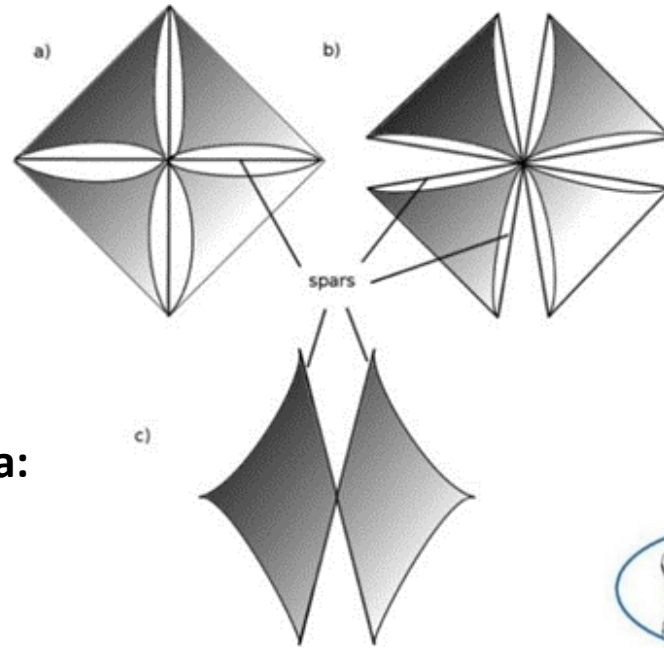
Fonte: [34]



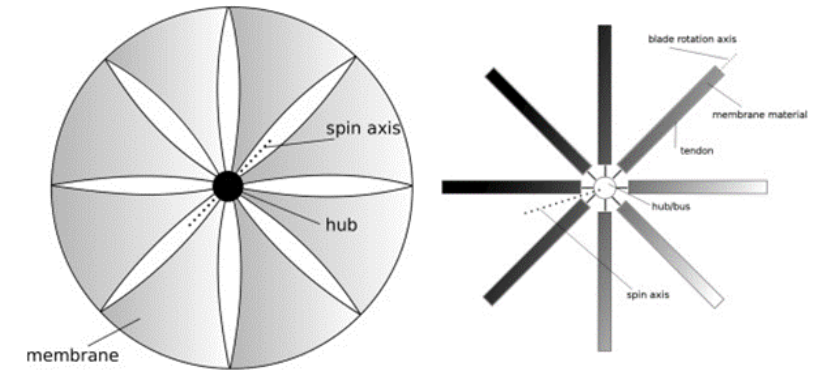
Fonte: [35]

### Requisiti di missione per la scelta del materiale:

- Durata della missione
- Proprietà ottiche
- Temperatura di fusione
- Spessore degli strati del materiale
- Massa dello strato
- Emissività del film sottile e back-coating
- Interazione vela con vento solare e particelle ad alta energia
- Resistenza meccanica della vela e dimensioni



Fonte: [36]



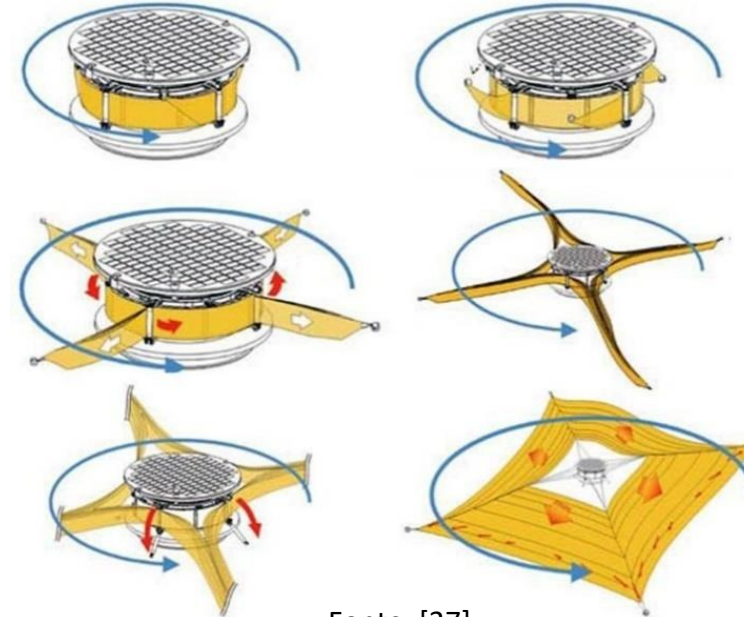
Fonte: [38]

## Modello della membrana:

- Vele rigide
- Vele non rigide

## Apertura:

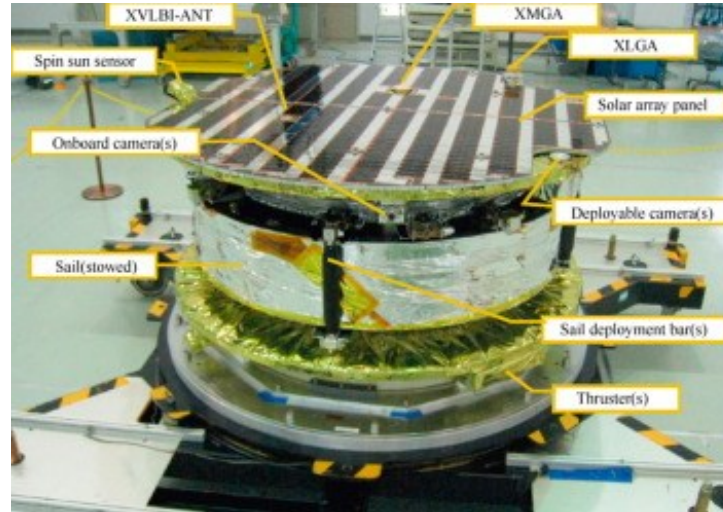
- Vele stabilizzate a tre assi
- Vele spinnanti



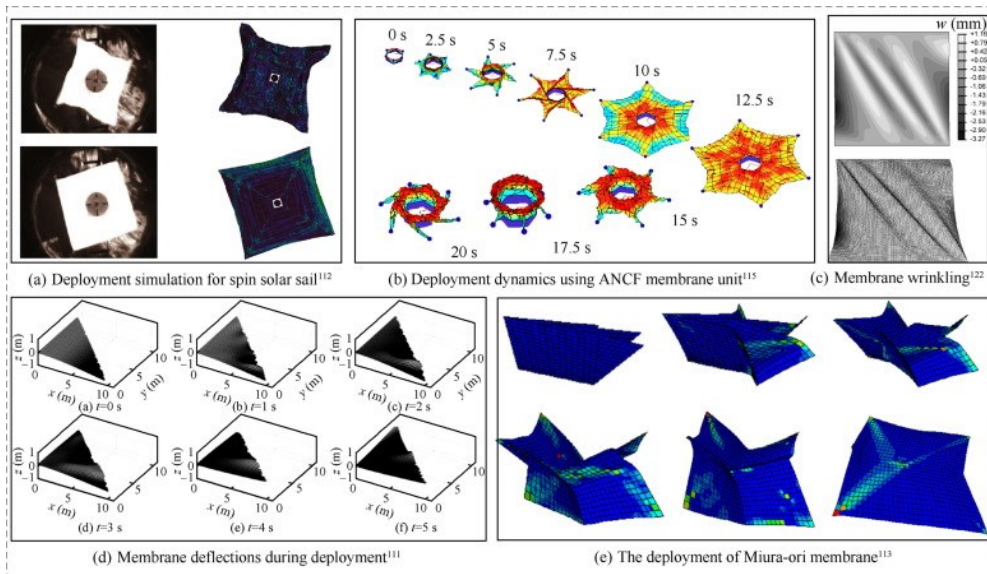
Fonte: [37]



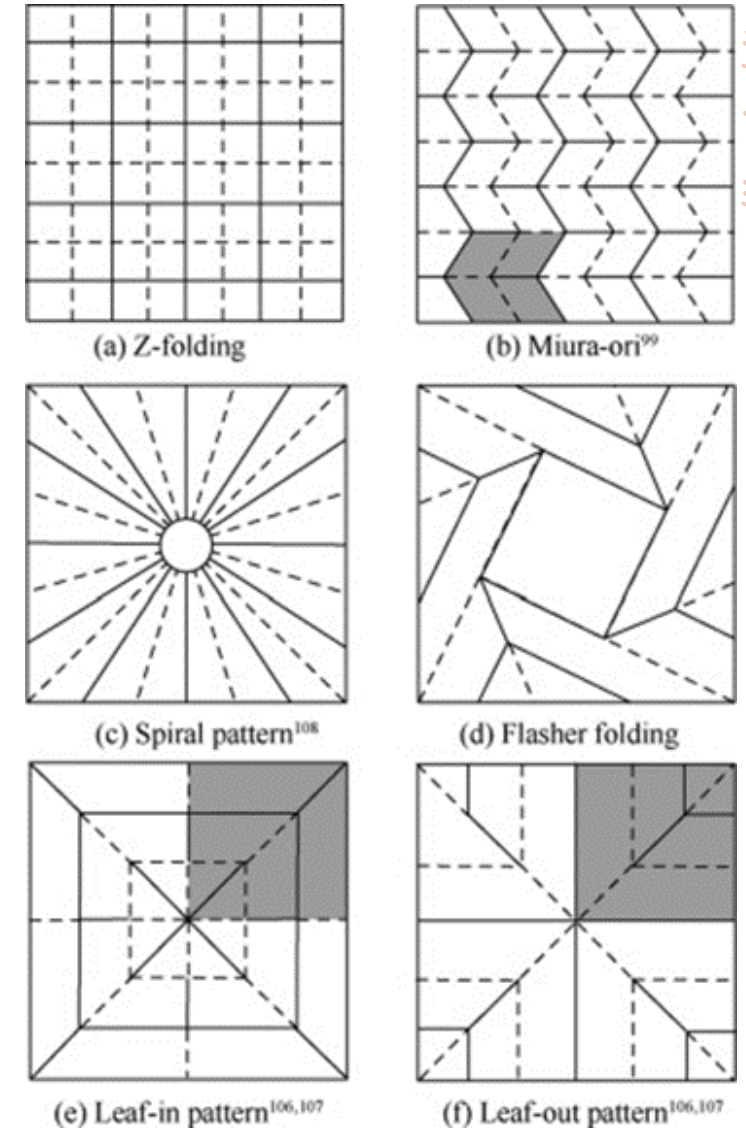
- Pattern e Principi degli origami
- Impatto sulla membrana



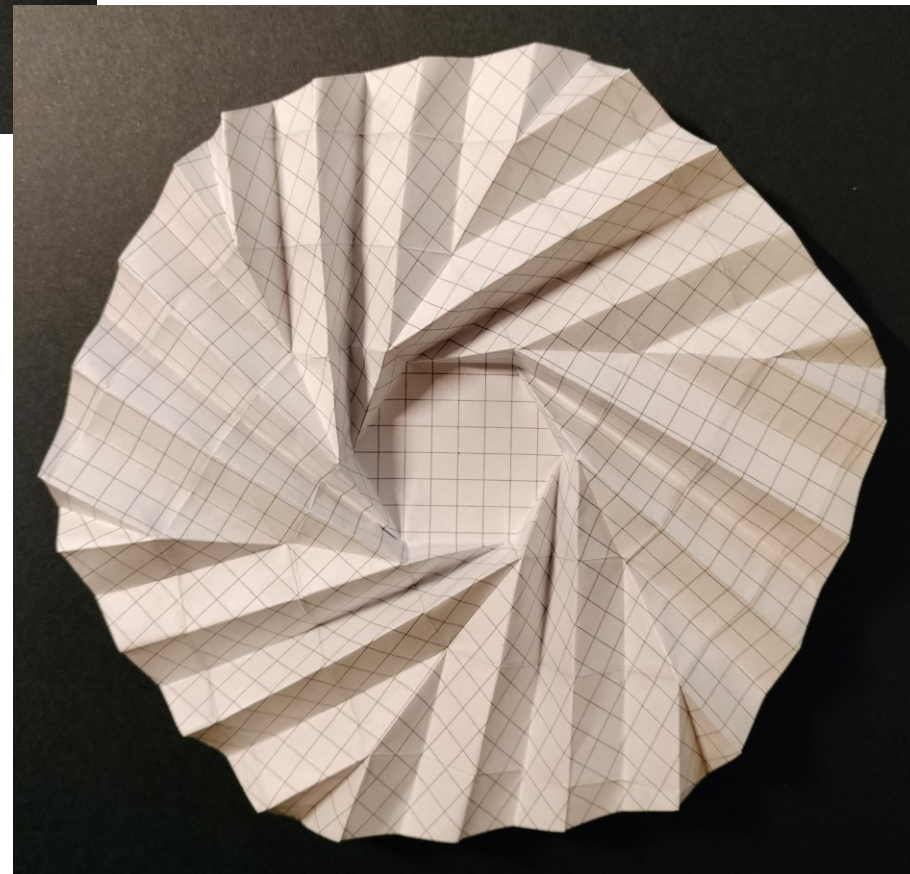
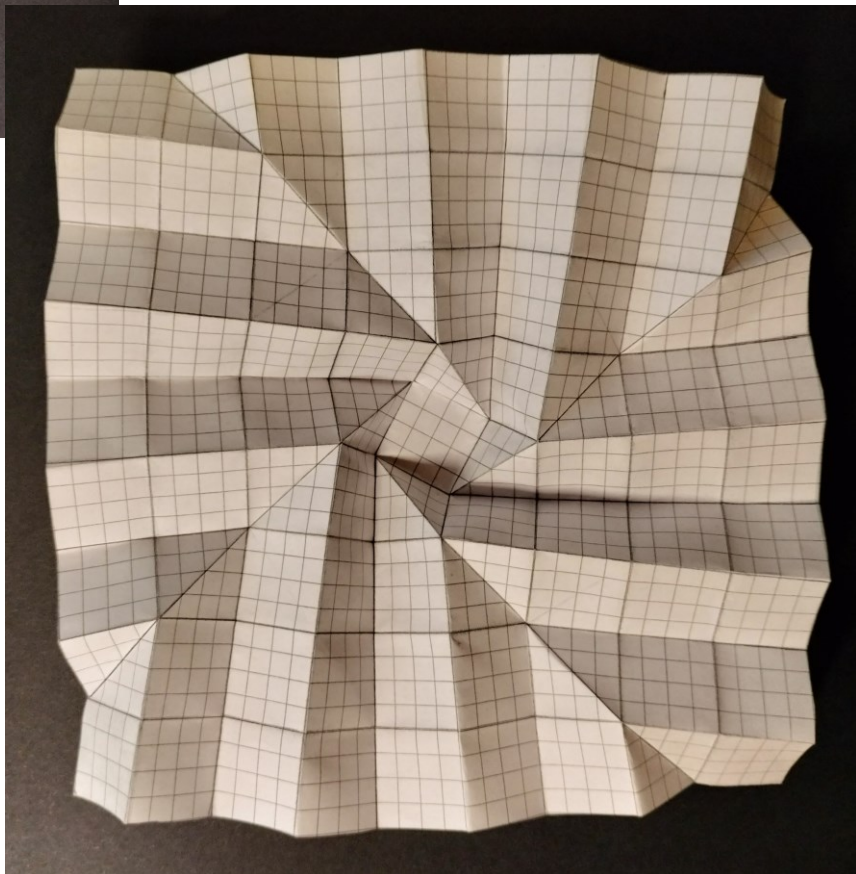
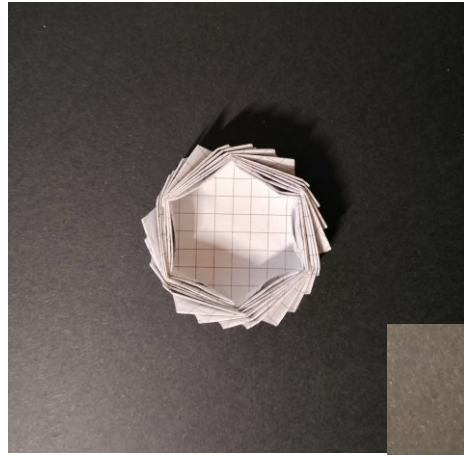
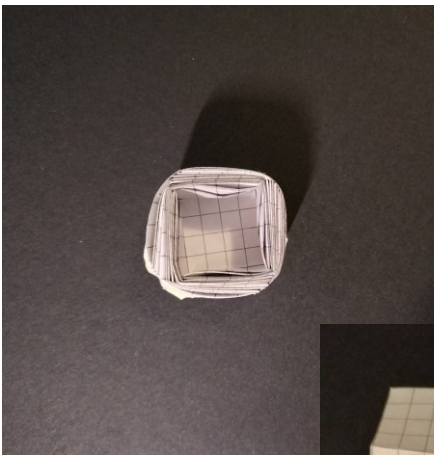
Fonte: [40]



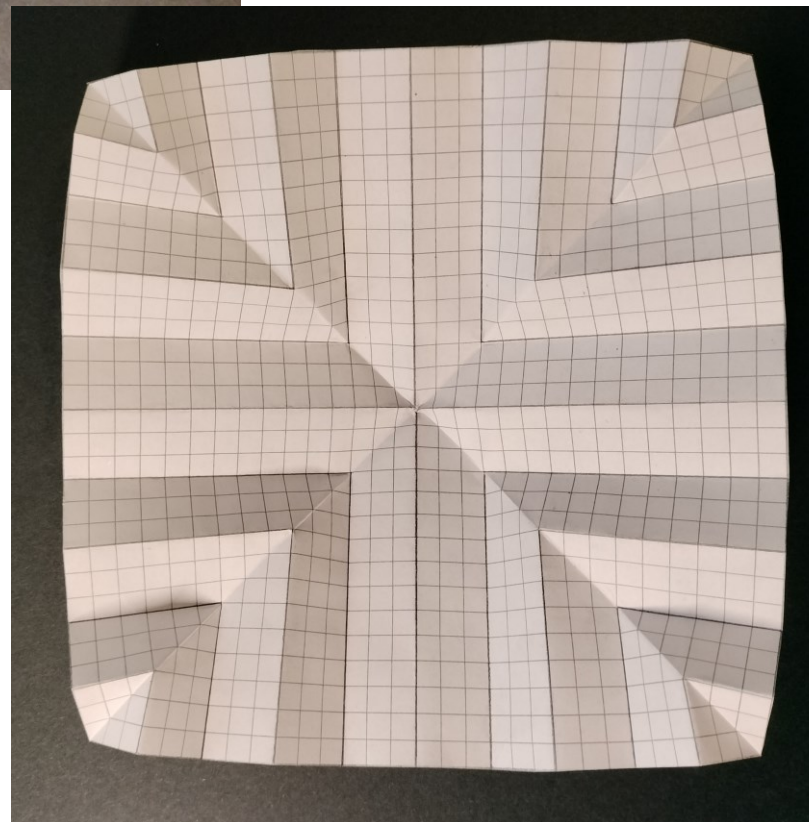
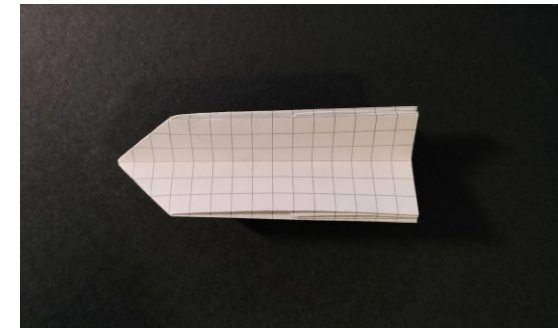
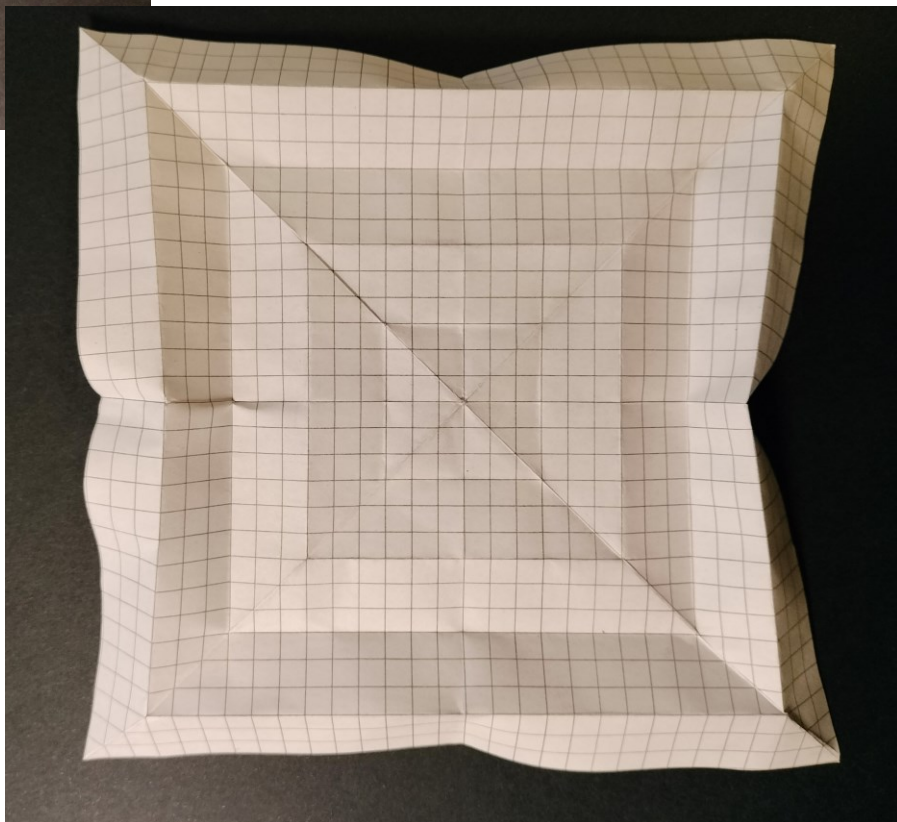
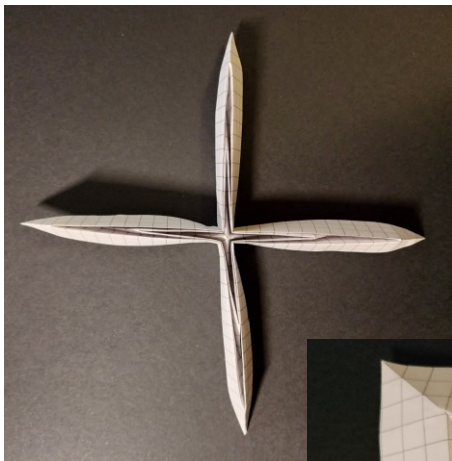
Fonte: [39]



Fonte: [41]

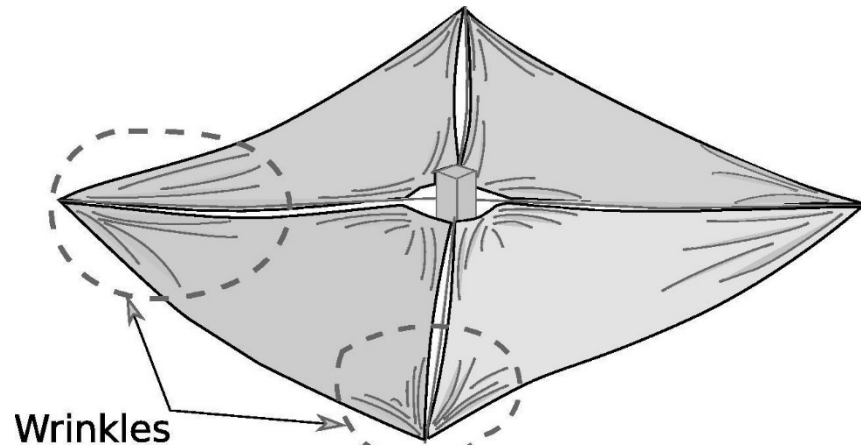






Domini rugosi si formano durante i cicli di deployment.

- Rughe
- Pieghe



Fonte: [42]

Tensionamento della vela  
Ricalibramento dell'orbita



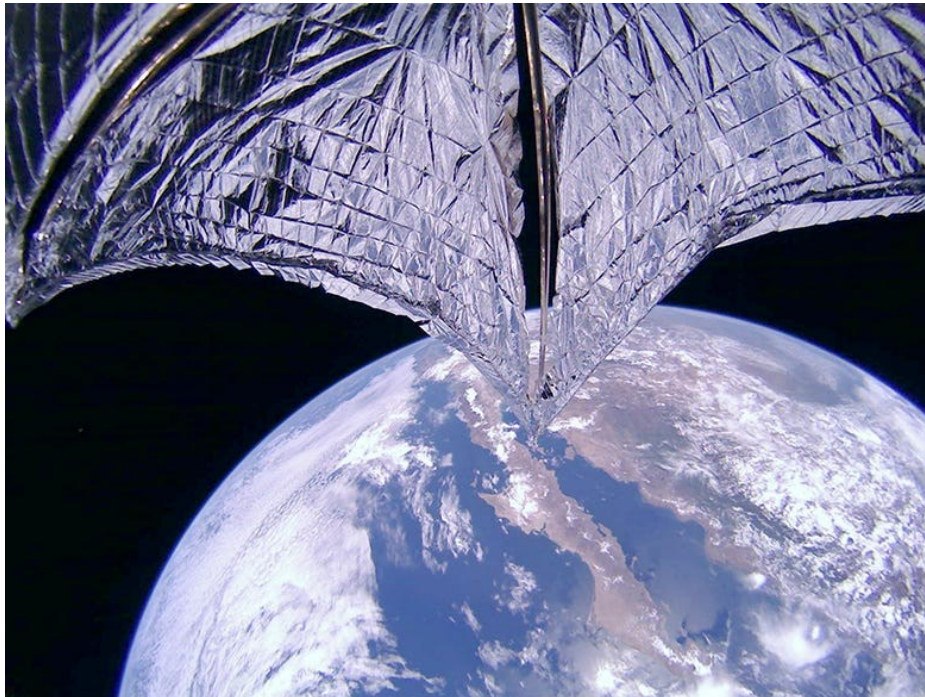
Formazione del dominio  
rugoso a seguito di cicli di  
imballaggio e  
disimballaggio con  
distribuzioni di carichi  
diagonali.



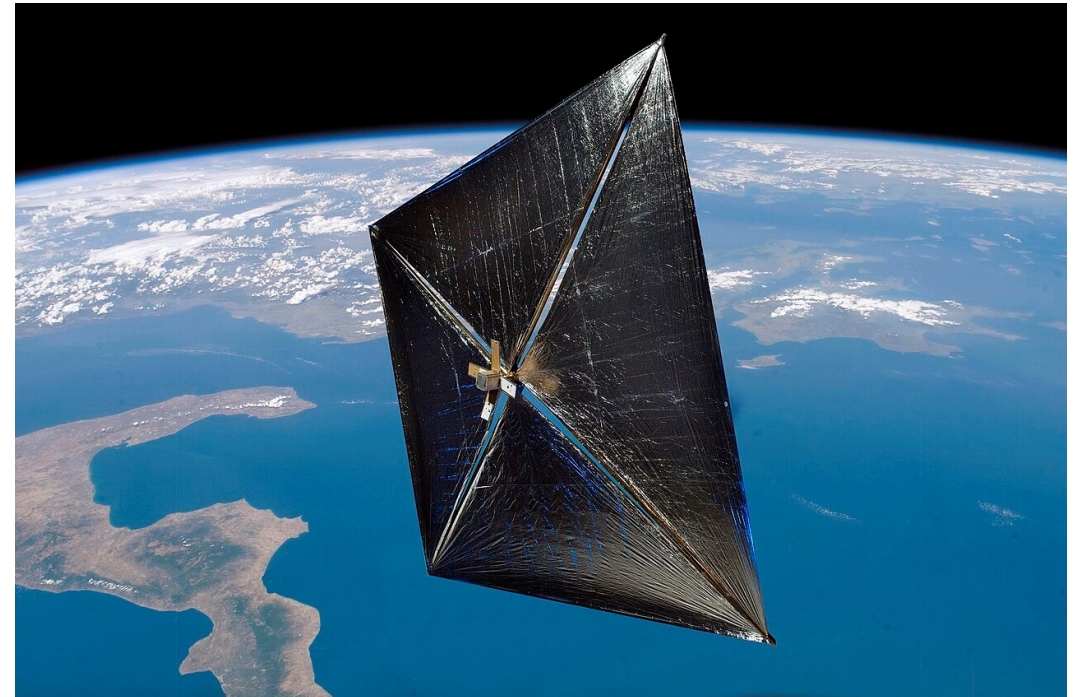
Fonte: [43]



- Impatto con meteoroidi
- Esposizione a radiazione ultravioletta
- Esposizione a radiazione ionizzante
- Temperature operative della vela legate alla diretta esposizione alla luce solare



Fonte: [44]

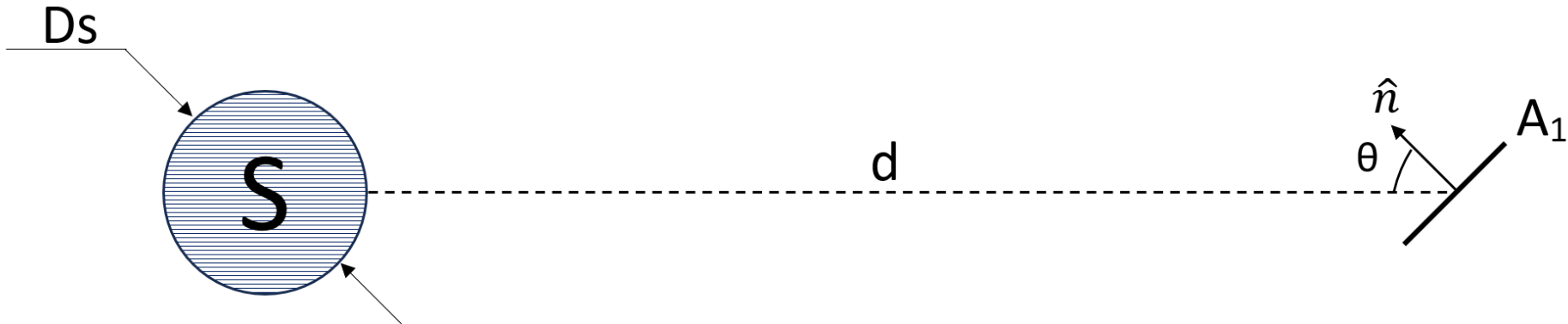


Fonte: [45]



## Assunzioni:

- Flusso solare costante
- Satellite a distanza  $d$  generica dal sole, scambi nulli con la terra (orbita interplanetaria) e con il bus/payload
- Vele solari di forma approssimabile ad una lastra sottile
- Solo uno dei due lati della vela punta il sole, l'altro si comporta da radiatore dissipando potenza nell'infrarosso termico verso lo spazio vuoto
- Dimensioni vela solare  $A_1$
- Vela solare assunta come corpo grigio
- Temperatura e radiazione uniforme sulla superficie della vela
- Strutture di tensionamento assenti
- Spazio vuoto assunto come corpo nero e temperatura  $T_{sky}$  nulla
- Coefficienti termo-ottici aggiornati per NEA Scout e Lunar Flashlight ( $2\mu\text{m}$  di CP1 rivestito di alluminio) [18]:  
 $\alpha_{f,s} = 0.09$ ,  $\varepsilon_{f,IR} = 0.025$  e  $\varepsilon_{b,IR} = 0.27$

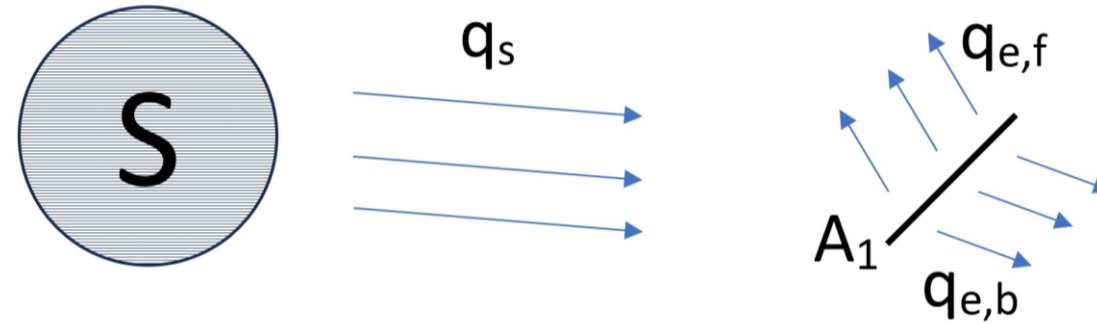


Il calore emesso dal sole ed assorbito dalla vela risulta:

- $q_s = \alpha_{f,s} q_s^{inc} = \alpha_{f,s} \sigma A_1 F_{1 \rightarrow s} (T_s^4 - T_v^4) = \alpha_{f,s} \sigma \frac{D_s^2}{4} (T_s^4 - T_v^4) \frac{\cos \vartheta}{d^2} A_1$
- $q_s \cong \alpha_{f,s} \sigma \frac{D_s^2}{4} T_s^4 \frac{\cos \vartheta}{d^2} A_1$

Il calore emesso dalla vela per irraggiamento nell'infrarosso termico risulta:

- $q_v = A_1 \varepsilon_{b,IR} \sigma (T_v^4 - T_{sky}^4) + A_1 \varepsilon_{f,IR} \sigma (T_v^4 - T_{sky}^4) = A_1 (\varepsilon_{b,IR} + \varepsilon_{f,IR}) \sigma T_v^4$



Allora il bilancio di I principio applicato alla vela risulta, in regime stazionario:

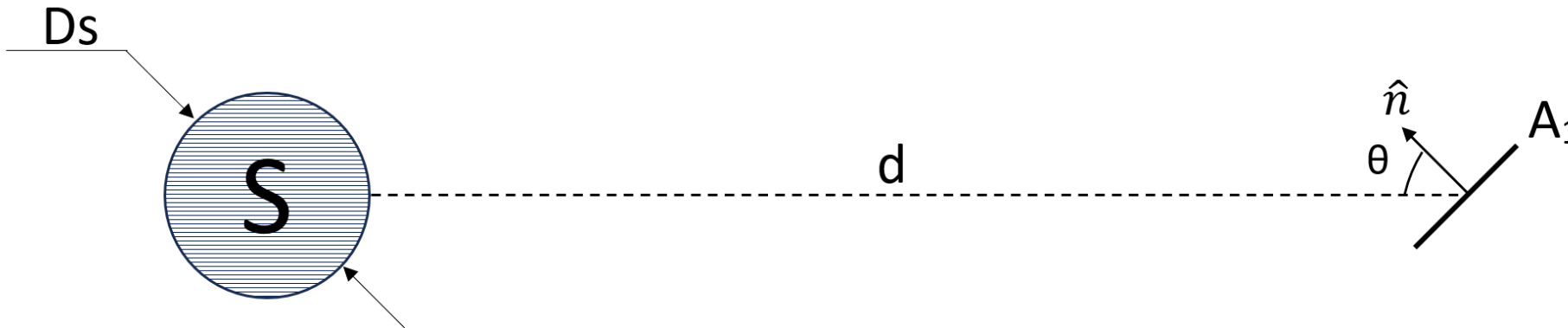
$$\bullet \quad \alpha_{f,s} \sigma \frac{D_S^2}{4} (T_S^4 - T_v^4) \frac{\cos \vartheta}{d^2} A_1 = A_1 (\varepsilon_{b,IR} + \varepsilon_{f,IR}) \sigma T_v^4$$

Da cui si ottiene:

$$\bullet \quad T_v = \left( \frac{\alpha_{f,s}}{(\varepsilon_{b,IR} + \varepsilon_{f,IR})} \frac{D_S^2}{4} T_S^4 \cos \vartheta \right)^{\frac{1}{4}} \left( \frac{1}{d} \right)^{\frac{1}{2}}$$

Nel caso di distanza dal sole  $d = 1 \text{ AU}$  e di  $\theta = 35,26^\circ$ , spirale logaritmica, risulta:

$$\bullet \quad T_v \cong 277,80 \text{ K}$$



Per evidenziare la corretta dipendenza della temperatura dalla distanza dal sole si considera  $\alpha_{f,s} = \text{cost}$  e  $\varepsilon_{f,IR} = \varepsilon_{b,IR} = \varepsilon(T_v)$  [21]:

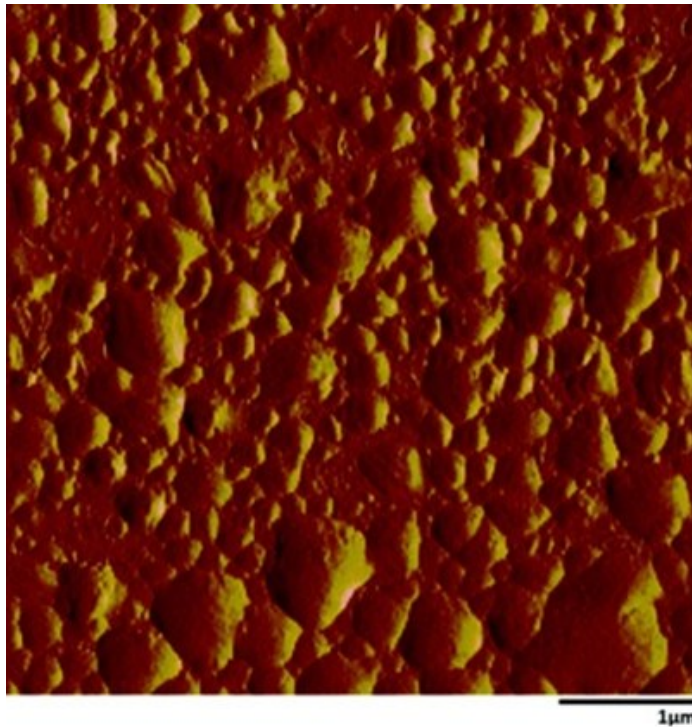
$$\bullet \quad \varepsilon(T_v) = 7.66 \sqrt{\frac{T_v}{\chi(T_v)}} + \left[ 10 + 8.99 \ln \left( \frac{T_v}{\chi(T_v)} \right) \right] \times \left( \frac{T_v}{\chi(T_v)} \right) - 17.5 \left( \frac{T_v}{\chi(T_v)} \right)^{\frac{3}{2}} \cong 7.66 \sqrt{\frac{T_v}{\chi(T_v)}}$$

Ove la conduttività elettrica [21]:  $\chi(T_v) = \frac{1}{\tilde{\rho}(T_v)} = \frac{1}{\tilde{\rho}_0 [1 + \alpha_t (T_v - T_{v,0})]} \cong \frac{T_{v,0}}{\tilde{\rho}_0} \frac{1}{T_v}$

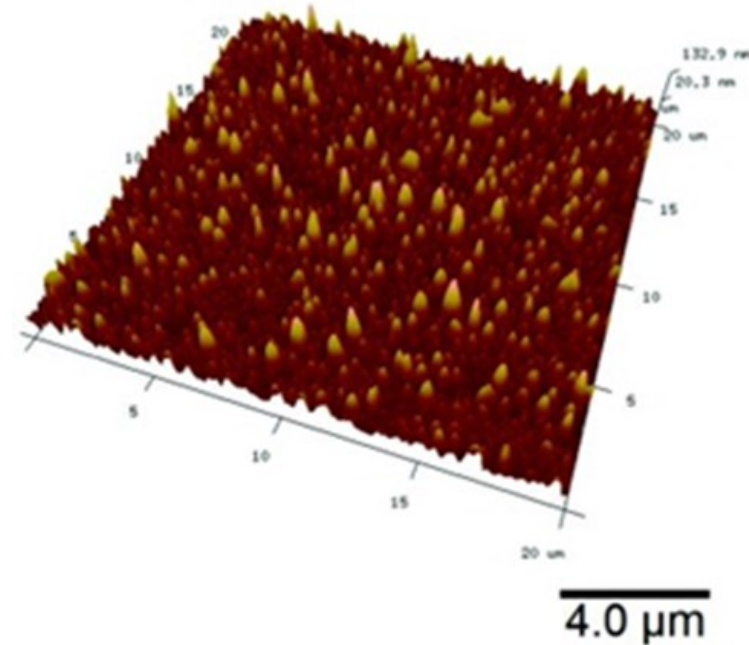
Introducendo le relazioni nella formula precedente della temperatura della vela si ottiene:

$$\bullet \quad T_v = \left\{ \frac{\alpha_{f,s}}{2 \cdot \left[ 7.66 \sqrt{\frac{\tilde{\rho}_0}{T_{v,0}}} \right]} \frac{D_s^2}{4} T_s^4 \cos \vartheta \right\}^{\frac{1}{5}} \left( \frac{1}{d} \right)^{\frac{2}{5}}$$

- Cause
- Effetti

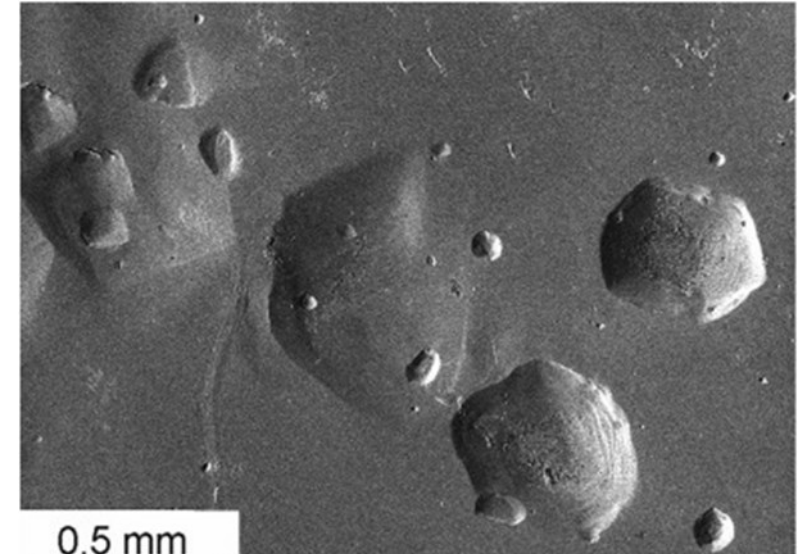


(a) A 2D 5x5 μm<sup>2</sup> viewfield of Al sample exposed to 2.5 keV p<sup>+</sup>.



(b) A 3D 20x20 μm<sup>2</sup> viewfield of Al sample exposed to 2.5 keV p<sup>+</sup>.

Fonte: [46]



Fonte: [47]

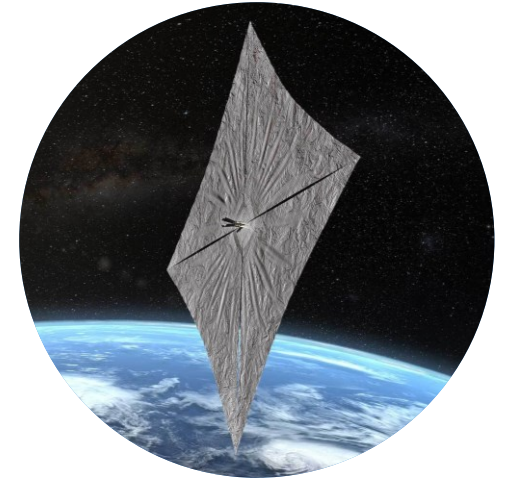
Immagine al microscopio elettronico a scansione (SEM) di bolle sulla superficie del ferro.



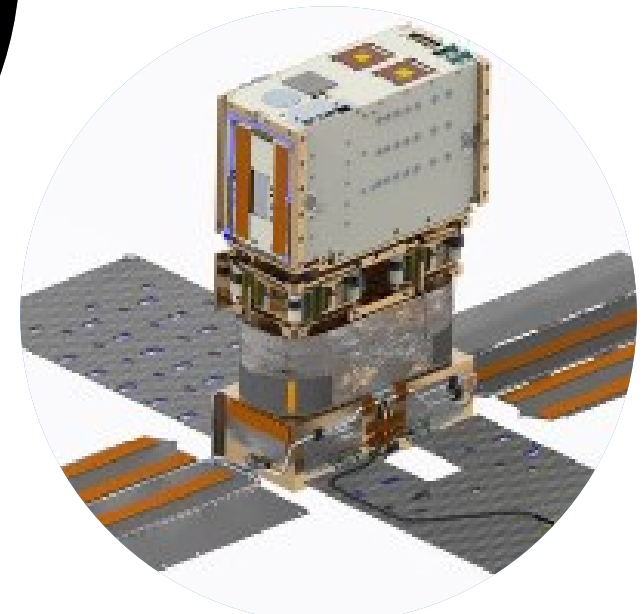
- IKAROS
- Nanosail-d2
- Lightsail-2



Fonte: [49]



Fonte: [48]



Fonte: [50]

- 1) Coulter, D., (2008). A Brief History of Solar Sails [online]. *NASA Science*. [Consultato il 13 settembre 2023]. Disponibile: [https://science.nasa.gov/science-news/science-at-nasa/2008/31jul\\_solarsails](https://science.nasa.gov/science-news/science-at-nasa/2008/31jul_solarsails).
- 2) Hollerman, W., (2003). THE PHYSICS OF SOLAR SAILS [online]. The 2002 Nasa Faculty Fellowship Program Research Reports [Consultato il 13 settembre 2023]. Disponibile: <https://ntrs.nasa.gov/api/citations/20030093608/downloads/20030093608.pdf>.
- 3) Harbaugh, J., (2017). Solar Sail Demonstrator ('Sunjammer') [online]. *NASA*. [Consultato il 13 settembre 2023]. Disponibile: [https://www.nasa.gov/mission\\_pages/tm/solarsail/index.html](https://www.nasa.gov/mission_pages/tm/solarsail/index.html).
- 4) Esa, (2019). LightSail-2 [online]. *eoPortal*, 22 maggio. [Consultato il 13 settembre 2023]. Disponibile: <https://www.eoportal.org/satellite-missions/lightsail-2#>.
- 5) MacNeal, R., (1972). COMPARISON OF THE SOLAR SAIL WITH ELECTRIC PROPULSION SYSTEMS [online]. NASA CONTRACTOR REPORT. [Consultato il 13 settembre 2023]. Disponibile: <https://ntrs.nasa.gov/api/citations/19720011121/downloads/19720011121.pdf>.
- 6) Khabibullin, R., (2017). Comparison of solar sail spacecraft flight and low thrust spacecraft flight to potentially hazardous asteroid orbit [online]. *Procedia Engineering*, vol. 185, pp. 425 – 431. [Consultato il 13 settembre 2023]. Disponibile: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.03.325>.
- 7) Fu, B., Sperber, E. e Eke, F., (2016). Solar sail technology—A state of the art review [online]. *Progress in Aerospace Sciences*, Vol. 86, pp. 1-19. [Consultato il 13 settembre 2023]. Disponibile: <https://doi.org/10.1016/j.paerosci.2016.07.001>.
- 8) Davoyan, A., Munday, J., Tabiryan, N., Swartzlander, G., Johnson, L., (2021). Photonic materials for interstellar solar sailing [online]. *Optica*, vol. 8, pp. 722-734. [Consultato il 13 settembre 2023]. Disponibile: <https://doi.org/10.1364/OPTICA.417007>.
- 9) Kang, J., Gordon, K., Bryant, R., Stohlman, O., Wilkie, W., Stark, A., Barfield, R., Sindle, B., Finckenor, M., Craven, P., (2021). Durability characterization of mechanical interfaces in solar sail membrane structures [online]. *Advances in Space Research*, vol. 67, pp 2643-2654. [Consultato il 13 settembre 2023]. Disponibile: <https://doi.org/10.1016/j.asr.2020.08.015>.
- 10) Spencer, D., Johnson, L., Long, A., (2019). Solar sailing technology challenges [online]. *Aerospace Science and Technology*, vol. 93. [Consultato il 13 settembre 2023]. Disponibile: <https://doi.org/10.1016/j.ast.2019.07.009>.
- 11) Zhao, P., Wu, C., Li, Y., (2023). Design and application of solar sailing: A review on key technologies [online]. *Chinese Journal of Aeronautics*, Vol. 36, pp. 125-144. [Consultato il 13 settembre 2023]. Disponibile: <https://doi.org/10.1016/j.cja.2022.11.002>.
- 12) Hibbert, L., Jordaan, H., (2021). Considerations in the design and deployment of flexible booms for a solar sail [online]. *Advances in Space Research*, vol. 67, pp. 2716-2726. [Consultato il 13 settembre 2023]. Disponibile: <https://doi.org/10.1016/j.asr.2020.01.019>.

- 13) Esa, (2012). IKAROS (Interplanetary Kite-craft Accelerated by Radiation Of the Sun) [online]. *eoPortal*, 30 maggio. [Consultato il 13 settembre 2023]. Disponibile: <https://www.eoportal.org/satellite-missions/ikaros#>.
- 14) Vulpetti, G., Apponi, D., Zeng, X., Circi, C., (2021). Wrinkling analysis of solar-photon sails [online]. *Advances in Space Research*, vol. 67, pp. 2669-2687. [Consultato il 13 settembre 2023]. Disponibile: <https://doi.org/10.1016/j.asr.2020.07.016>.
- 15) Nerovny, N., Lapina, I., (2021). Application of a modified generalized sail model on a solar sail with wrinkles [online]. *Advances in Space Research*, vol. 67, pp. 2767-2775. [Consultato il 13 settembre 2023]. Disponibile: <https://doi.org/10.1016/j.asr.2020.01.020>.
- 16) Zeiders, G., (2005). *Design Rules and Scaling for Solar Sails* [online]. The Sirius Group, Huntsville, Alabama. [Consultato il 13 settembre 2023]. Disponibile: <https://ntrs.nasa.gov/api/citations/20050209955/downloads/20050209955.pdf>.
- 17) Deng, X., Xu, Y., Clarke, C., (2019). Wrinkling modelling of space membranes subject to solar radiation pressure[online]. *Composites Part B: Engineering*, vol. 157, pp. 266-275. [Consultato il 13 settembre 2023]. Disponibile: <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2018.08.088>.
- 18) Heaton, A., Artusio-Glimpse, A., (2015). An Update to the NASA Reference Solar Sail Thrust Model [online]. *NTRS*. [Consultato il 13 settembre 2023]. Disponibile: <https://ntrs.nasa.gov/api/citations/20150021404/downloads/20150021404.pdf>.
- 19) Rozhkov, M., Starinova, O., Chernyakina, I., (2021). Influence of optical parameters on a solar sail motion [online]. *Advances in Space Research*, vol. 67, pp. 2757-2766. [Consultato il 13 settembre 2023]. Disponibile: <https://doi.org/10.1016/j.asr.2020.06.017>.
- 20) Chernyakina, I., (2021). Solar sailing in realistic mode, based on a locally-optimal control laws [online]. *Advances in Space Research*, vol. 67, pp. 2844-2854. [Consultato il 13 settembre 2023]. Disponibile: <https://doi.org/10.1016/j.asr.2020.01.032>.
- 21) Ancona, E., Kezerashvili, R., (2017). Temperature restrictions for materials used in aerospace industry for the near-Sun orbits [online]. *Acta Astronautica*, vol. 140, pp. 565-569. [Consultato il 13 settembre 2023]. Disponibile: <https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2017.09.002>.
- 22) Sznajder, M., Seefeldt, P., Spröwitz, T., Renger, T., Kang, J., Bryant, R., Wilkie, W., (2021). Solar sail propulsion limitations due to hydrogen blistering [online]. *Advances in Space Research*, vol. 67, Issue 9, pp. 2655-2668. [Consultato il 13 settembre 2023]. Disponibile: <https://doi.org/10.1016/j.asr.2020.06.034>.
- 23) Martin, M., Sofronis, P., (2022). Hydrogen-induced cracking and blistering in steels: A review [online]. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, vol. 101. [Consultato il 13 settembre 2023]. Disponibile: <https://doi.org/10.1016/j.jngse.2022.104547>.
- 24) Spencer, D., Betts, B., Bellardo, J., Diaz, A., Plante, B., Mansell, J., (2021). The LightSail 2 solar sailing technology demonstration [online]. *Advances in Space Research*, vol. 67, Issue 9, pp. 2878-2889. [Consultato il 13 settembre 2023]. Disponibile: <https://doi.org/10.1016/j.asr.2020.06.029>.
- 25) Esa, (2012). NanoSail-D2 [online]. Observation of the Earth and Its Environment: Survey of Missions and Sensors. *eoPortal*, 1 giugno. [Consultato il 13 settembre 2023]. Disponibile: <https://www.eoportal.org/satellite-missions/nanosail-d2#>.

- 26) <https://www.tomshw.it/images/images/2019/07/lightsail2-41322.large.jpg>
- 27) <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1270963818314391#fg0010>
- 28) [https://www.researchgate.net/figure/IKAROSs-image-taken-by-a-deployed-tiny-subsatellite-camera-in-deep-space-on-June-14-2010\\_fig1\\_224263727](https://www.researchgate.net/figure/IKAROSs-image-taken-by-a-deployed-tiny-subsatellite-camera-in-deep-space-on-June-14-2010_fig1_224263727)
- 29) <https://www1.grc.nasa.gov/research-and-engineering/chemical-propulsion-systems/>
- 30) [https://www.esa.int/ESA\\_Multimedia/Images/2020/09/Plasma\\_propulsion\\_for\\_small\\_satellites](https://www.esa.int/ESA_Multimedia/Images/2020/09/Plasma_propulsion_for_small_satellites)
- 31) [https://www.researchgate.net/figure/Membrane-of-a-typical-solar-sail\\_fig1\\_319096659](https://www.researchgate.net/figure/Membrane-of-a-typical-solar-sail_fig1_319096659)
- 32) <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0273117720304191#f0005>
- 33) <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0376042116300100#f0095>
- 34) [https://www.researchgate.net/figure/Two-meter-Kapton-solar-sail-test-article-rotated-slightly-with-billow\\_fig9\\_24374103](https://www.researchgate.net/figure/Two-meter-Kapton-solar-sail-test-article-rotated-slightly-with-billow_fig9_24374103)
- 35) <https://opg.optica.org/optica/fulltext.cfm?uri=optica-8-5-722&id=451120>
- 36) <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0376042116300100>
- 37) [https://www.researchgate.net/figure/Deployment-Process-of-IKAROS-Source-http-wwwaviationweekcom\\_fig2\\_259653757](https://www.researchgate.net/figure/Deployment-Process-of-IKAROS-Source-http-wwwaviationweekcom_fig2_259653757)
- 38) <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0376042116300100>
- 39) <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1000936122002564#s0025>
- 40) <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1000936122002564#s0025>
- 41) <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1000936122002564#s0025>
- 42) <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0273117720300387#f0005>
- 43) <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0273117720304932>
- 44) <https://www.businessinsider.com/first-solar-sail-spacecraft-orbiting-earth-powered-by-sunlight-2019-7?r=US&IR=T>
- 45) [https://en.wikipedia.org/wiki/NanoSail-D2#/media/File:NanoSail-D\\_in\\_orbit\\_\(artist\\_depiction\).jpg](https://en.wikipedia.org/wiki/NanoSail-D2#/media/File:NanoSail-D_in_orbit_(artist_depiction).jpg)
- 46) <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0273117720304543>
- 47) <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1875510022001378>
- 48) <https://www.planetary.org/sci-tech/lightsail>
- 49) <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0273117720304075>
- 50) <https://www.nanosats.eu/sat/nea-scout>