

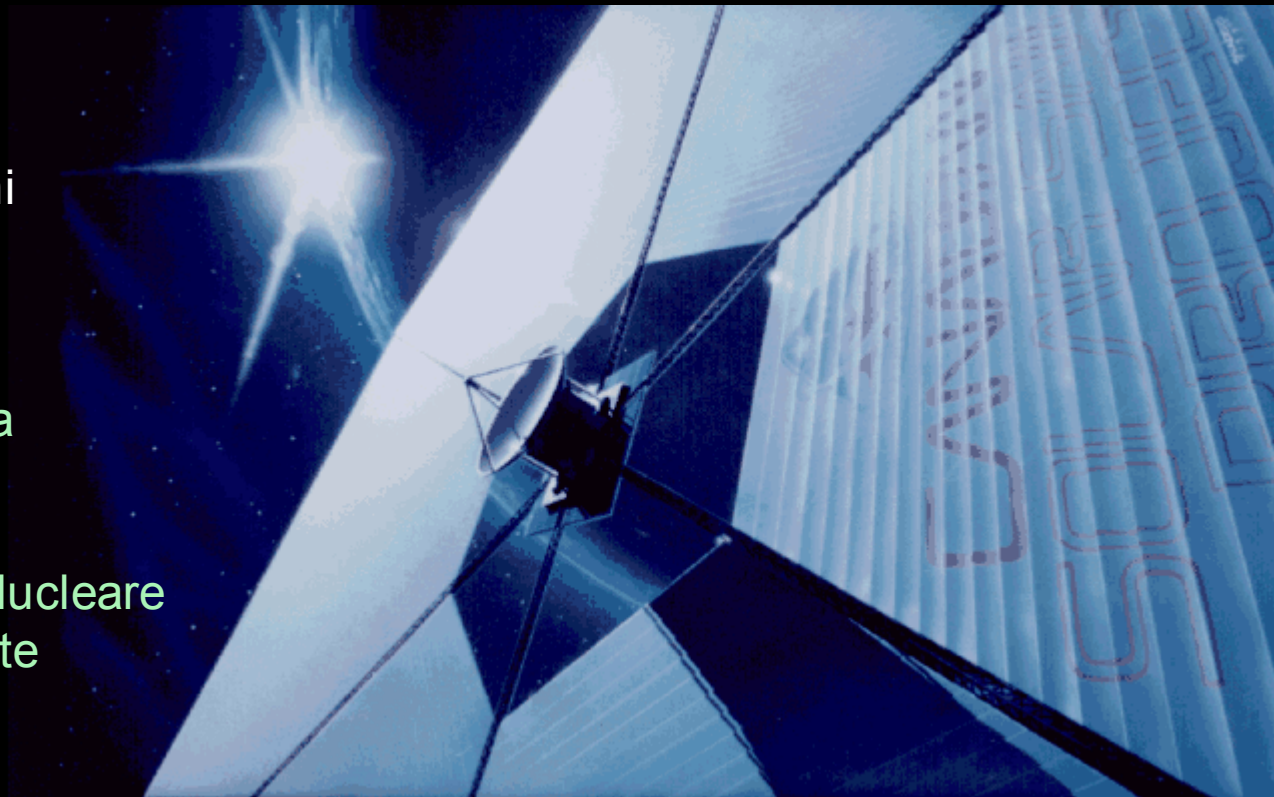


Vele spaziali solari: funzionamento e tecniche di manovra

Gianrossano Giannini
Eleonora Presani
Anna Gregorio

Dipartimento di Fisica
Universita' di Trieste

Istituto Nazionale di Fisica Nucleare
INFN Sezione Di Trieste



Storia e fantascienza

● XVII sec.

Keplero osserva che una coda delle comete è opposta alla direzione del Sole

● 1873 Maxwell lo dimostra teoricamente



● 1889 F. Fauré e Graffigny immaginano un vascello con un immenso specchio

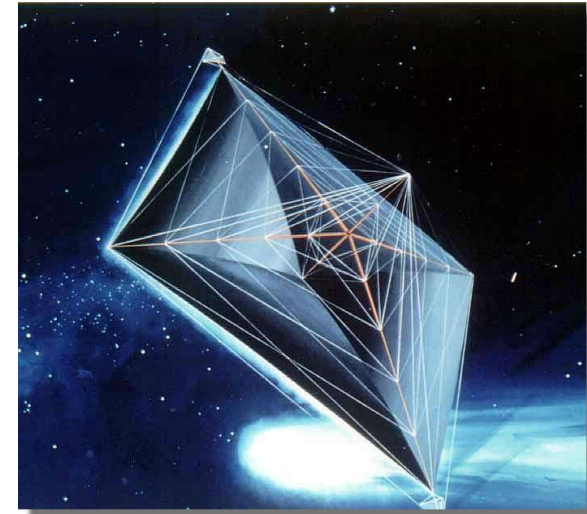
● 1963 Pierre Boule pubblica il libro “Il pianeta delle Scimmie”

● 2002: StarWars Episode II: Un extraterrestre usa un “Solar Sailor” per fuggire



I primi tentativi

- Mariner 10: utilizzo dei pannelli solari per inserire la sonda su un'orbita corretta
- 1973 al JPL si sviluppa un progetto per l'incontro con la cometa di Halley



- Vengono fondate diverse associazioni:
 - WSF : World Space Foundation
 - U3P : Union pour la Promotion de la Propulsion Photonique
 - SSUJ : Solar Sail Union of Japan
 - CVS : Comicion Vela Solar
 - SRC : Space Regatta Consortium

La “Space Sail Cup” del 1992

In **December 1988** the **Christopher Columbus Quincentenary Jubilee Commission**, a Presidential commission created by the Congress of the United States, approved the establishment of a **Columbus 500 Space Sail Cup competition** to commemorate his voyage to the Americas.

The intent of the Space Sail Cup was to bring about the launch of at least **three solar sail vehicles representing the Americas, Europe and Asia**, selected among all the presented projects, that would have travelled **from a High Earth Orbit (HEO) toward the Moon and then toward Mars**.

The space company then called Aeritalia Gruppo Sistemi Spaziali (today Alenia Spazio) produced the contest-winning solar sail design among the European countries.


Pressione di radiazione

- Pressione P su una superficie S :

$$P = \frac{1}{S} \left(\frac{\Delta p}{\Delta t} \right) = \frac{\Delta E}{cS\Delta t} \quad \text{dove} \quad \rightarrow \rightarrow \quad \frac{\Delta E}{S\Delta t} \quad \text{è un flusso di energia } \Phi_E$$

- Flusso di energia solare:

$$\Phi_E = \frac{L_*}{4\pi r^2} = C_* \left(\frac{r_0}{r} \right)^2 \quad \text{Dove } C_* = 1368 \text{ W/m}^2 \text{ e } L_* \text{ è la luminosità solare; } r_0 = 1 \text{ UA} = 149.598 \times 10^6 \text{ km}$$


$$P_*(r) = \frac{L_*}{4\pi r^2 c} = \frac{C_*}{c} \left(\frac{r_0}{r} \right)^2$$

$$p \equiv \Phi_E / c$$

Pianeti	Distanza dal Sole (semiasse maggiore dell'orbita) [U A]	Flusso Solare [W/m ²]	Pressione di radiazione solare [N/m ²]
☿ Mercurio	0.387	9134	3.046 10 ⁻⁵
♀ Venere	0.723	2617	8.729 10 ⁻⁶
♁ Terra	1	1368	4.563 10 ⁻⁶
♂ Marte	1.524	589.0	1.965 10 ⁻⁶
♃ Giove	5.203	50.53	1.686 10 ⁻⁷
♄ Saturno	9.539	15.03	5.015 10 ⁻⁸
♅ Urano	19.182	3.718	1.240 10 ⁻⁸
♆ Nettuno	30.057	1.514	5.051 10 ⁻⁹
♇ Plutone	39.75	0.8657	2.888 10 ⁻⁹

Tabella 1: Flusso e pressione di radiazione solare nelle vicinanze dei pianeti

Riflessione perfetta

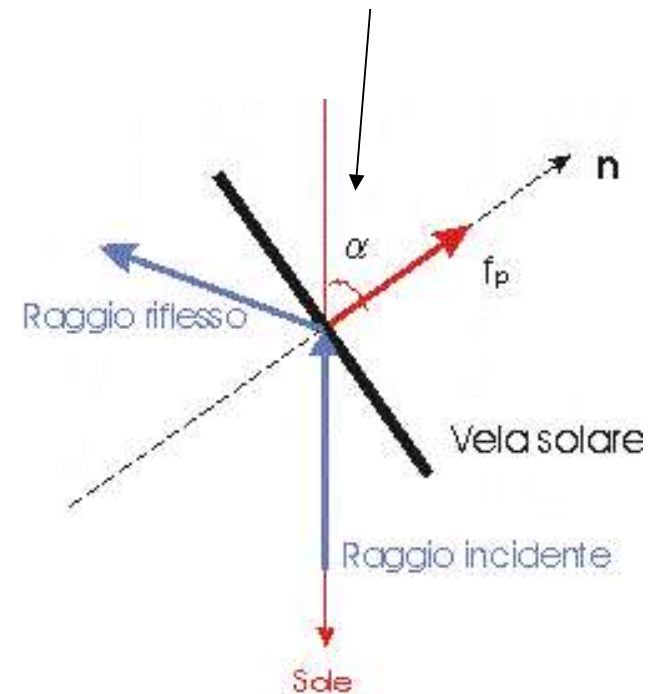
- Angolo di incidenza $\alpha =$ angolo di riflessione

$$\vec{f}_{P,*} = \frac{2S}{m} P_*(r) \cos^2 \alpha \hat{n}$$

Angolo di puntamento $\alpha =$ angolo di cono Θ

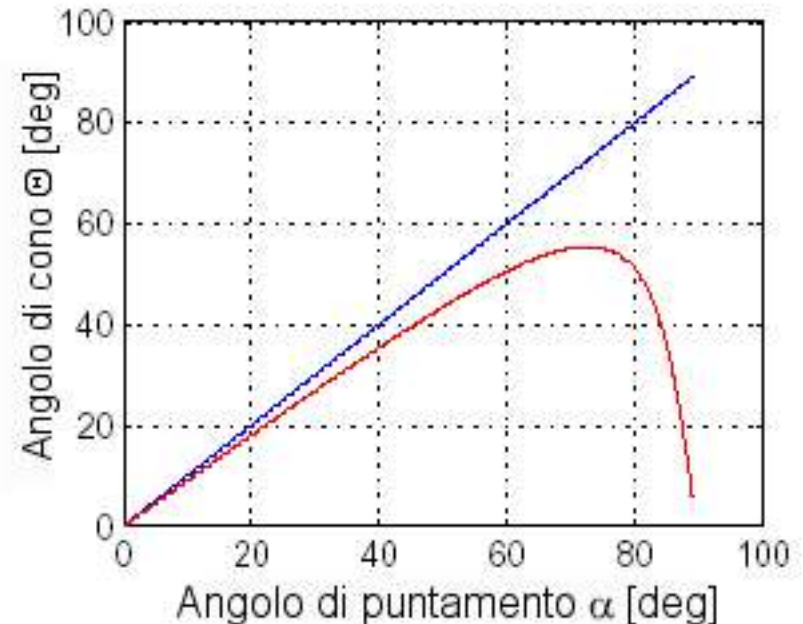
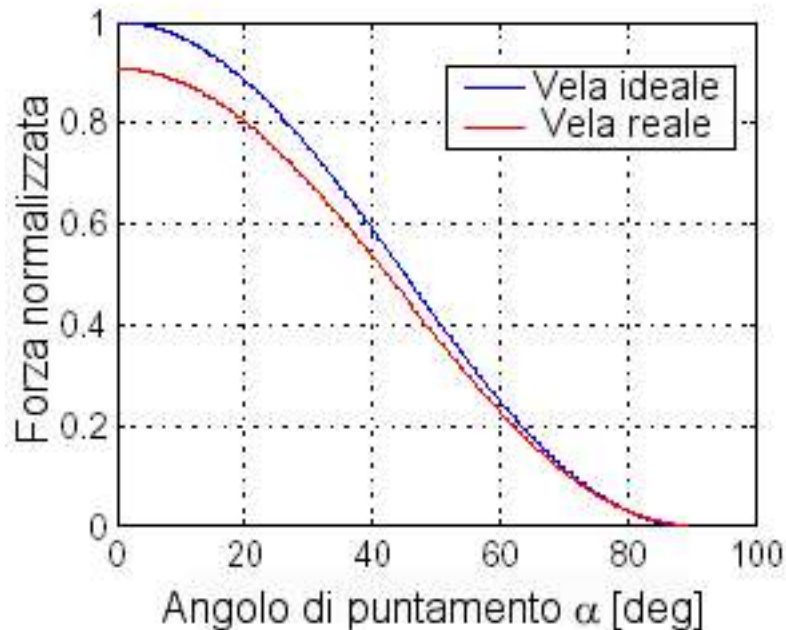
efficienza di riflessione

$$\eta = 0.85 - 0.9$$



Confronto caso ideale - ottico

- C'è una degradazione nelle prestazioni
 - Assorbimento della vela ($\eta \sim 0.85$)
 - Valore di cut-off nell'angolo di cono ($\Theta \sim 55.5^\circ$)



Modello parametrico

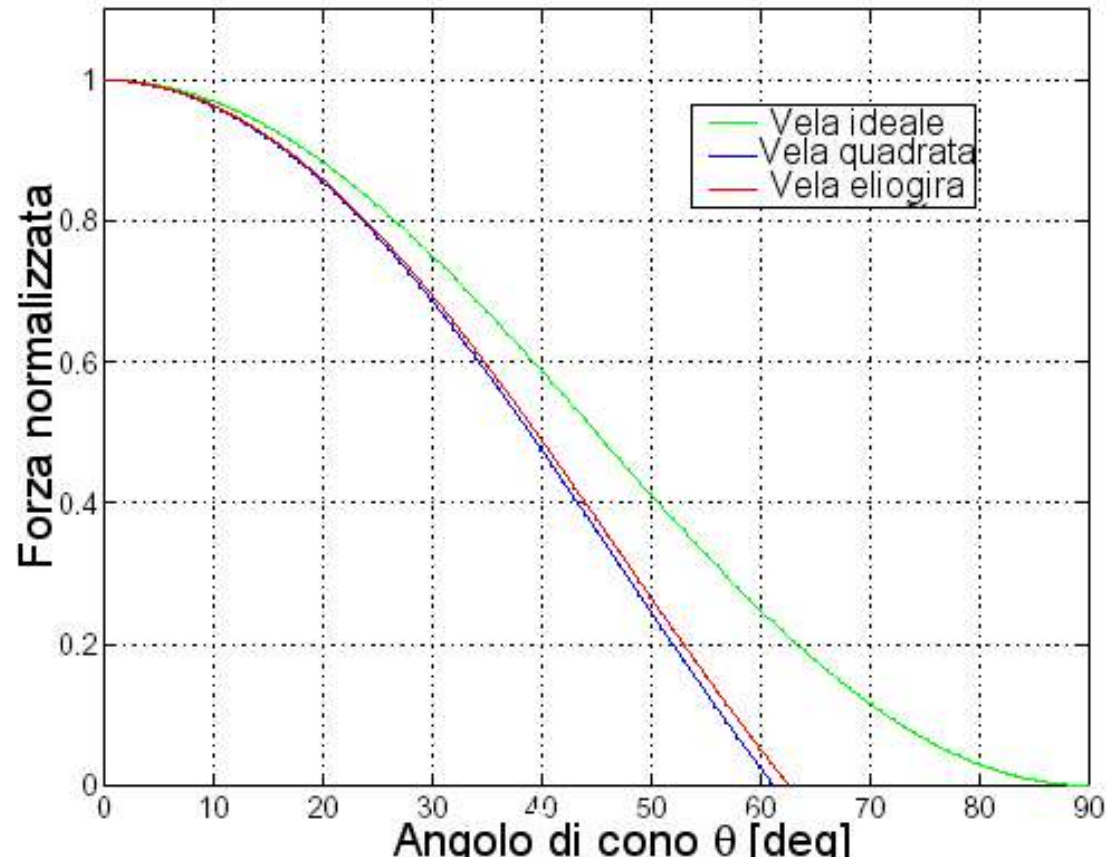
Tiene conto dell'effetto di rigonfiamento (billowing)

Modello parametrico studiato al JPL per l'incontro con la cometa Halley

$$f_{P,*} = f_0 [C_1 + C_2 \cos(2\Theta) + C_3 \cos(4\Theta)] \hat{m}$$

f_0 = forza esercitata quando la vela è ortogonale al Sole

Tipo di vela	C_1	C_2	C_3
Vela ideale	0.5	0.5	0
Vela quadrata	0.349	0.662	-0.011
Vela eliogira	0.367	0.643	-0.010



Misura delle prestazioni di una vela

● Impulso specifico

$$I_{sp} = \frac{P}{g_0 \frac{dm}{dt}} = \infty \quad \longrightarrow \quad \text{Si scelgono altri parametri!}$$

● Carico o massa superficiale

$$\sigma = \frac{m}{S} = \frac{m_{vela} + m_{struttura}}{S}$$

● Accelerazione caratteristica

$$a_0 = \frac{2\eta P_*(1UA)}{\sigma}$$

Accelerazione esercitata su una vela ortogonale al Sole ad una distanza di 1UA

Indice di leggerezza

- Confronto forza gravitazionale e forza di pressione

$$f_{P,*} = \frac{K}{r^2} \quad f_{g,*} = \frac{\mu_*}{r^2} \quad \Rightarrow \quad \lambda = \frac{f_{P,*}}{f_{g,*}} = \text{const.}$$
$$\mu_* = GM_* = 1.33 \times 10^{20} \text{ m}^3 / \text{s}^2$$

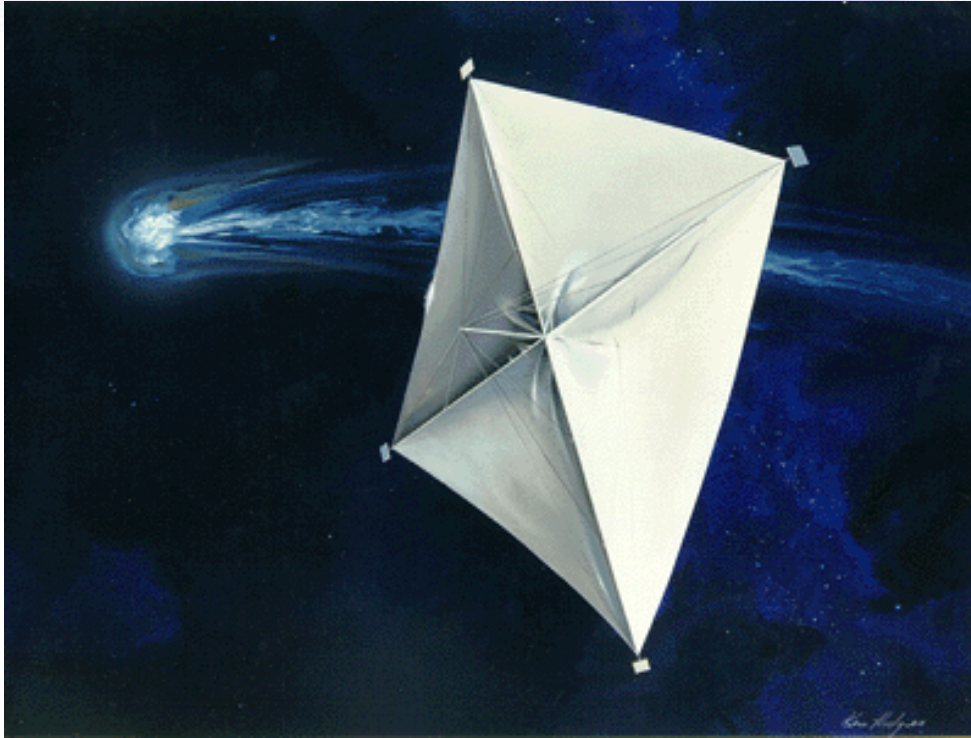
- Si può legare al carico come

$$\lambda = \frac{2\eta C_* r_0^2 S}{cm\mu_*} = \frac{\eta\sigma^*}{\sigma}$$

$\sigma^* = 1.53 \text{ g/m}^3$ è detta CARICO CRITICO

$\lambda > 1$: vele ultraperformanti

Vela quadrata



● Vantaggi

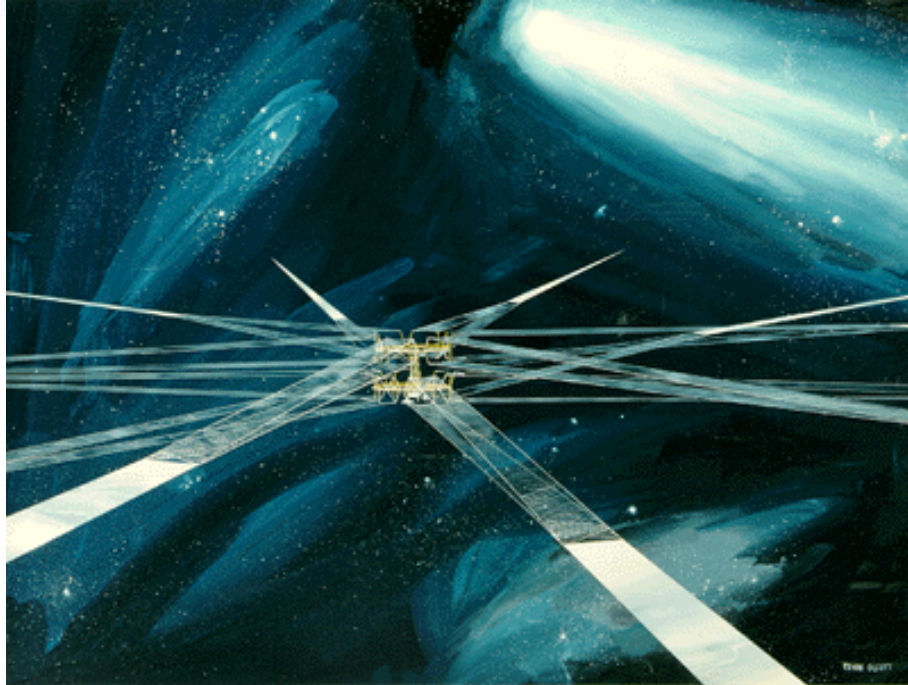
- Facile manovrabilità
- Controllo assetto tramite coppia di torsione o spostamento del CdM

● Svantaggi

- Flessione dei pali sotto il proprio peso
- Fasi di piegamento e spiegamento molto difficoltose

- 4 pali pieghevoli supportano le vele
- Perno centrale che comprende il payload, meccanismi di spiegamento, sistema di comunicazione, generatore elettrico, sistema di controllo termico...

Vela eliogira



- Pellicola divisa in lamelle lunghe e sottili, attaccate al perno centrale
- La vela ruota lentamente, aumentando la tensione della vela

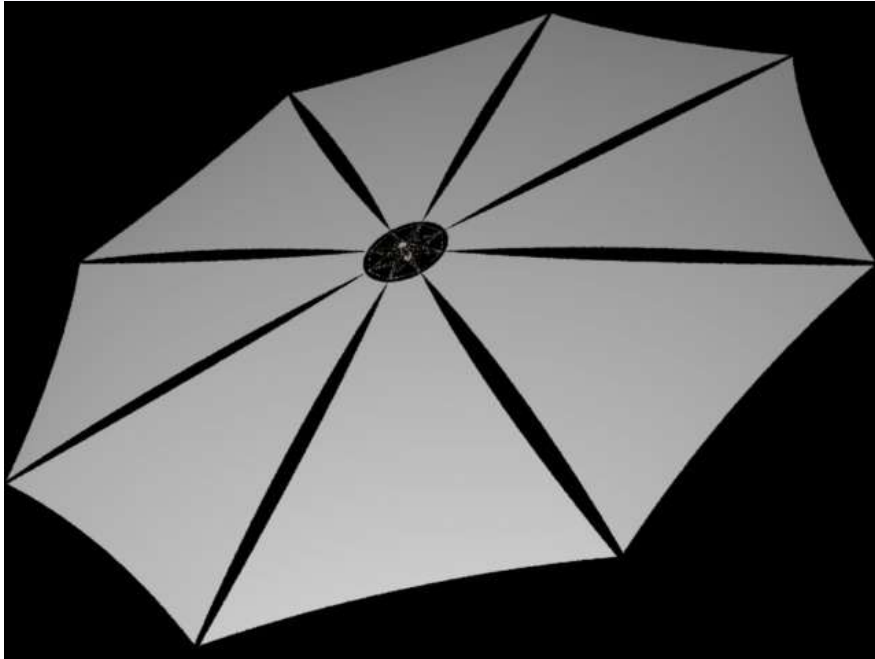
● Vantaggi

- La rigidità delle lame e la tensione della pellicola è aumentata dalla rotazione
- Massa ridotta

● Svantaggi

- Il controllo dell'assetto è fatto tramite una coppia di torsione generato dalla precessione
- Bisogna rinforzare le lamine per irrobustirle in torsione
- Lamine facilmente deformabili

Vela a disco



- Pellicola continua
- Rotazione
- Assetto per spostamento del CdM
- Payload al centro delle braccia

● Vantaggi

- I pali sono meno soggetti a flessione grazie alla rotazione
- Massa ridotta
- Fasi di piegatura e spiegatura più facili

● Svantaggi

- Manovrabilità limitata
- Coppia di torsione per spostamento del centro di massa

La pellicola a tre strati

- Per ragioni di maneggevolezza e resistenza, oggi le pellicole sono a tre strati
 - Un substrato che serve da base
 - Migliori candidati i polimeri: Kapton, Mylar e il Lexan
 - Kapton: inerte chimicamente, fisicamente stabile ad alte temperature, resistente alle radiazioni UV, punto di transizione alto (680K). Purtroppo ancora troppo spesso ($2.5\mu\text{m}$)
 - Uno strato rivolto verso il Sole altamente riflettente
 - Spesso circa $0.1\mu\text{m}$, i candidati sono alluminio, litio e argento.
 - Alluminio miglior compromesso, punto di fusione 933K, leggero e altamente riflettente
 - Uno strato posteriore per espellere il calore immagazzinato
 - Cromo, spesso $0.0125\mu\text{m}$
 - Possono essere usati anche mini radiatori

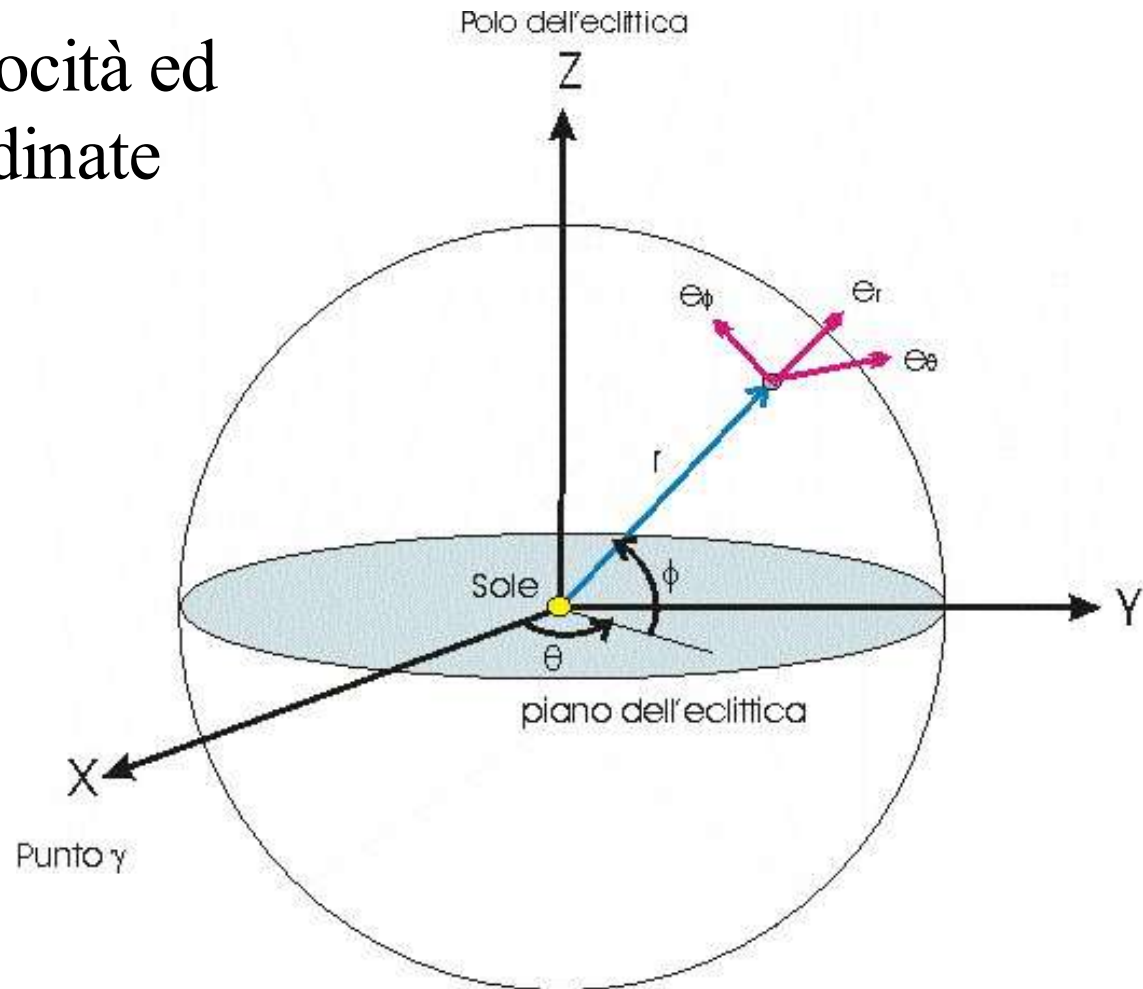
Pellicole metalliche

- Nel futuro sarebbe preferibile avere un unico strato metallico, staccando il substrato dopo lo spiegamento
 - Il substrato può vaporizzare sotto l'effetto dei raggi UV
 - Inserire uno strato di DLC (Diamond-Like Carbon) tra il substrato di polimeri e lo strato di alluminio. Gli UV distruggono il DLC e l'alluminio si stacca
 - Con processi di stratificazione nanometrica si possono ottenere strati di qualche centinaia di atomi

Dinamica dei movimenti eliocentrici

- Determinazione del sistema di coordinate

- Vettori posizione, velocità ed accelerazione in coordinate sferiche celesti



Forze presenti

- Forze gravitazionali

$$\vec{f}_{g,*} = -\frac{GM_*}{r^2} \hat{e}_r = -\frac{\mu_*}{r^2} \hat{e}_r$$

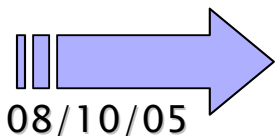
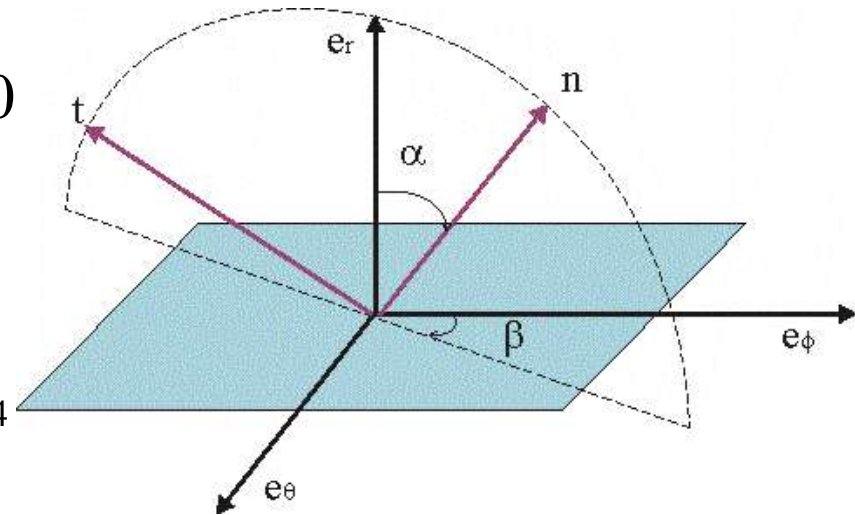
- Forza di pressione radiativa

$$\vec{f}_{P,*} = \lambda \frac{\mu_*}{r^2} (f_{er}(\alpha) \hat{e}_r + f_{e\phi}(\alpha) \cos \beta \hat{e}_\phi + \sin \beta \hat{e}_\theta)$$

- Forze perturbatrici

- Vento Solare: $P_w \sim m_p n_w V_w \approx 3 \times 10^9 \text{ Nm}^2$

- Effetti relativistici: Poiché la velocità della vela è paragonabile alla velocità orbitale $\beta = V/c = 10^{-4}$



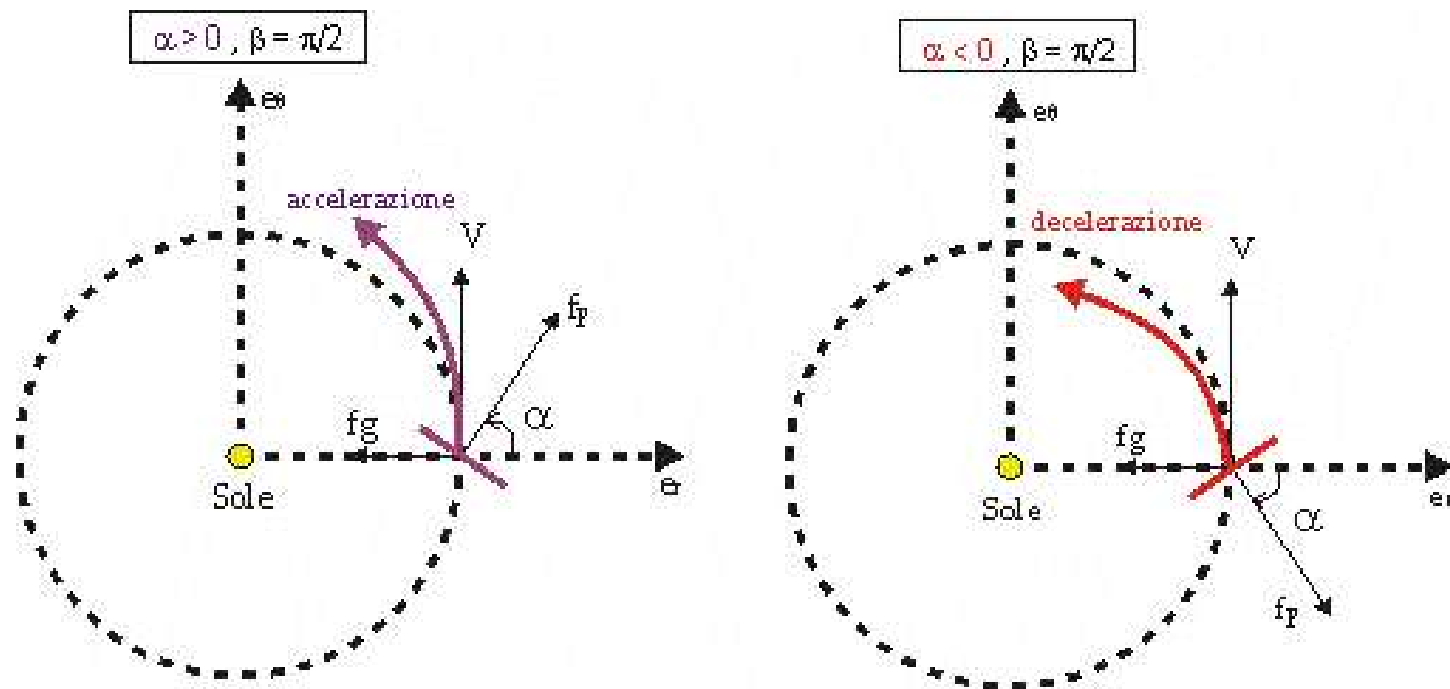
Le forze perturbatrici si possono trascurare

Strategie di pilotaggio

- Principali differenze con la propulsione classica
 - Nelle vele solari non c'è perdita di massa: la materia espulsa viene dal Sole e non dal veicolo
 - Il vettore di spinta non può essere orientato in una qualsiasi direzione
 - Si può però raggiungere una qualsiasi orbita kepleriana eliocentrica
 - Non c'è un limite superiore all'impulso ΔV realizzato
 - Ci può però essere un limite alla durata del trasferimento

Strategie di pilotaggio

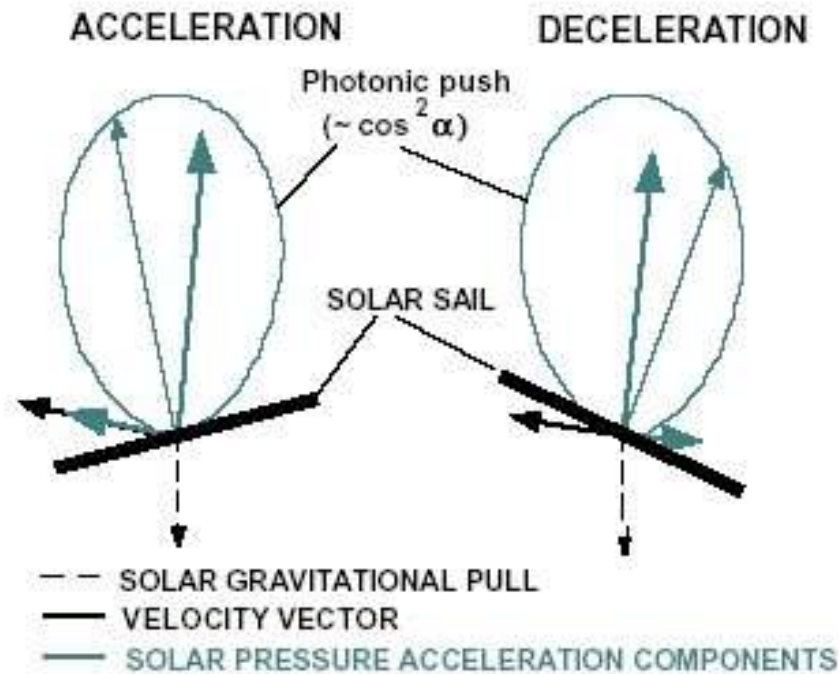
- Manovre sul piano dell'orbita
 - Variazione dell'angolo di puntamento α



V : vettore velocità, f_p : forza di pressione radiativa, f_g : forza di gravità

Strategie di pilotaggio

- Cambio di piano
 - Variazione dell'angolo orario β



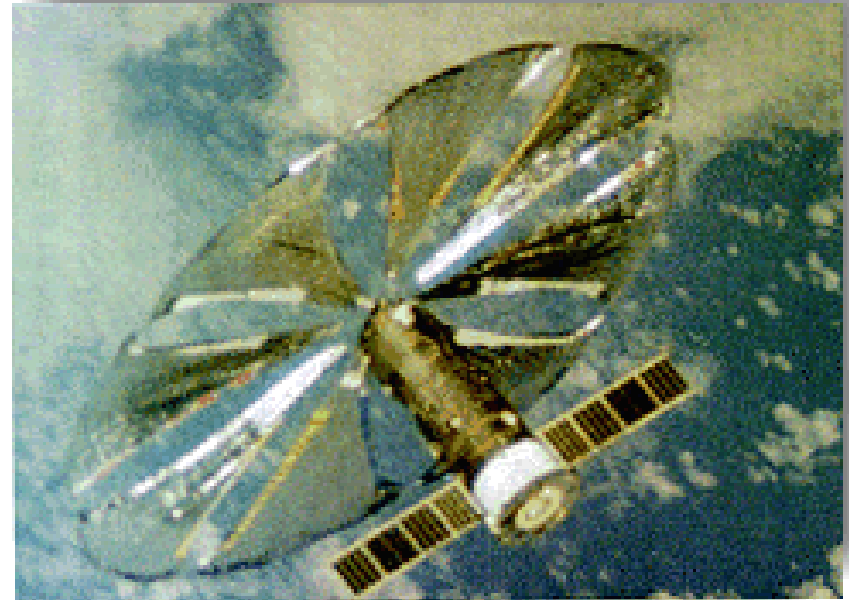
Strategie di pilotaggio

- Si può variare anche la superficie della vela (vele eliogire)
 - Modifica l'indice di leggerezza entro un intervallo
 - Permette alla vela di restare in una posizione stazionaria

Progetti recenti

● Programma Zamnya

- Zamnya 2.0 (1993): pellicola Ø20m spessore 5 µm
 - Illumina diverse regioni durante il suo volo
- Zamnya 2.5: Ø25m da lanciare nel 1999
 - Tecniche di pilotaggio
 - Fallimento dopo il volo di prova
- Zamnya 3.0 : Ø60-70m
 - Controllo assetto tramite vele
 - Inizialmente previsto per il 2002, viene poi ritardato

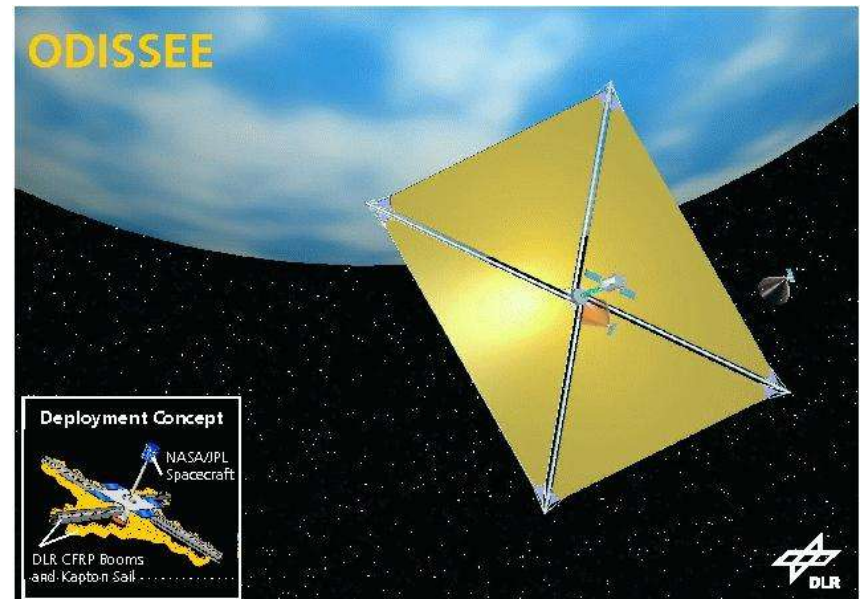


Progetti recenti

● ODISSEE: Orbit Demonstration of an Innovative Solar Sail driven Expandible Structure Experiment

● Collaborazione ESA-NASA (1996)

- Dimostrare la fabbricazione, piegamento e spiegamento di una vela solare
- Controllo assetto con lo spostamento del centro di massa
- Vela quadrata 40x40m, pellicola Kapton 7.6 μm , 0.1 μm alluminio, 0.015 μm cromo
- Massa tot 77kg (48.1 g/m²)



Progetti attuali

● Progetto Cosmos 1: *Planetary Society – Studios Cosmos (2000)*

- Lanciatore Volna da un sottomarino russo (2003)
- Orbita circolare, $h=400\text{km}$
- Effettuare il primo volo con una vela solare e aumentare l'altitudine dell'orbita
- Vela $\varnothing 30\text{m}$, 100kg, 8 lame triangolari
- Volo previsto per il 2003, ma ritardato a fine 2004 per il fallimento del volo di prova

08/10/05

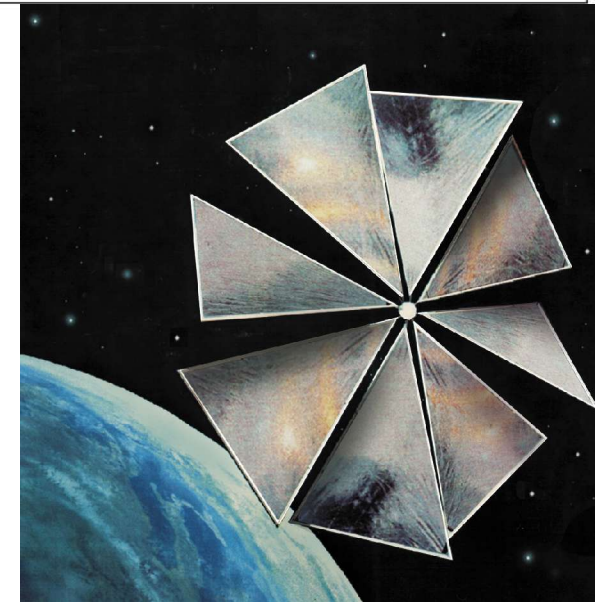
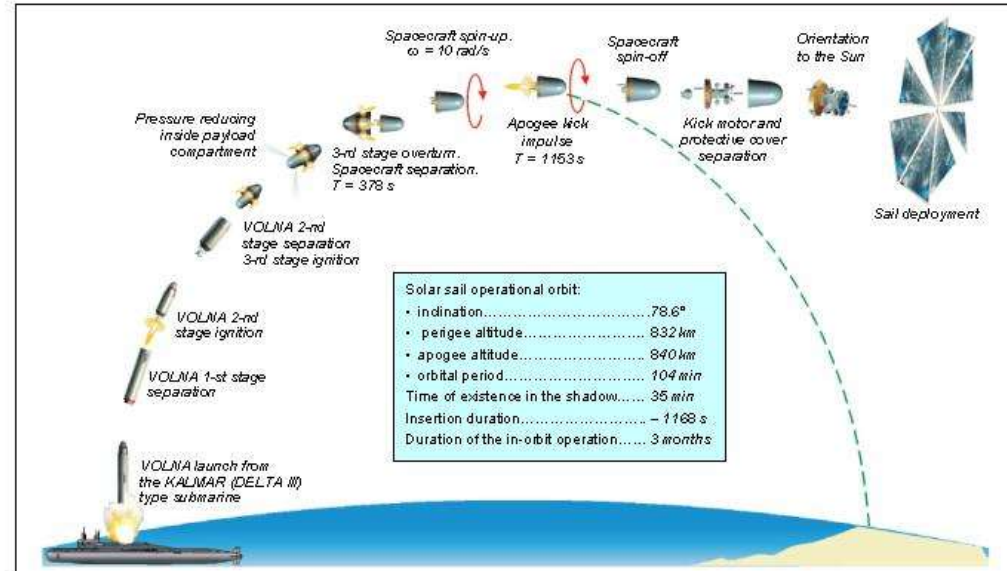
SOLAR SAIL PROJECT

BABAKIN SCIENCE & RESEARCH CENTER SPACE RESEARCH INSTITUTE RAS



2-ND PHASE – DEMONSTRATION EXPERIMENT

MISSION PROFILE



Progetti attuali

● Progetto Humanity's First Starship

- Della *Team Encounter*, fine 2005

 - Diventerà la prima vela a uscire dal Sistema Solare

- Vela quadrata 76m di lato, 19kg (payload 3kg)

- Portata su un'orbita GTO

 - Dopo 7d si spiega a comincia il suo volo

 - In 110d incontrerà Marte

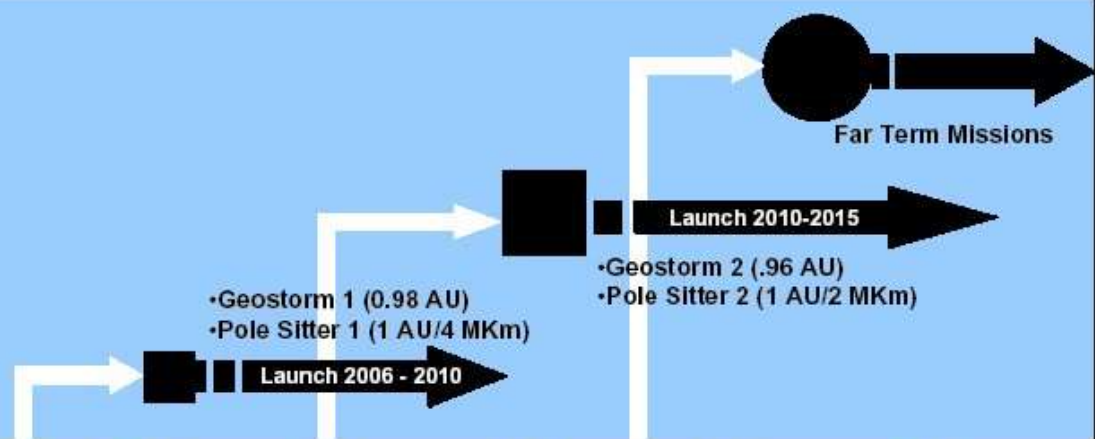
 - In 511d raggiunge Giove

 - Dopo 13,5y giungerà su Plutone

 - Lascerà il Sistema Solare a una velocità di 12.5 km/s

NOAA/USAF MISSIONS

Enabled by Validation Flights



TECH DEMO FLIGHTS

2004

2006

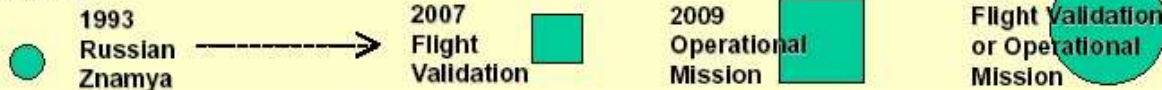
2008

2010

2012

2014

2016



10 m (Radius)	40 - 80 m	80 - 150 m	300 - 400 m	<i>SAIL EDGE LENGTH</i>
20 g/m ²	10 - 20 g/m ²	5 - 10 g/m ²	3 - 7 g/m ²	<i>SAIL AREAL DENSITY</i>
From Mir Station	Validation Mission	Flight Mission, e.g. SPI	Flight Mission, e.g. ISP	<i>MISSION SCENARIO</i>
LEO	GTO, GEO, L1, etc.	Near Sun Trajectory	Outer Solar System	<i>FLIGHT PATH</i>
First Zero-G Deploy	First Stability & Control	First Sail Jettison	Advanced Sail	<i>OTHER</i>

NASA MISSIONS

Enabled by Validation Flights



SOLAR SAIL TECHNOLOGY DEVELOPMENT 15-YEAR ROADMAP

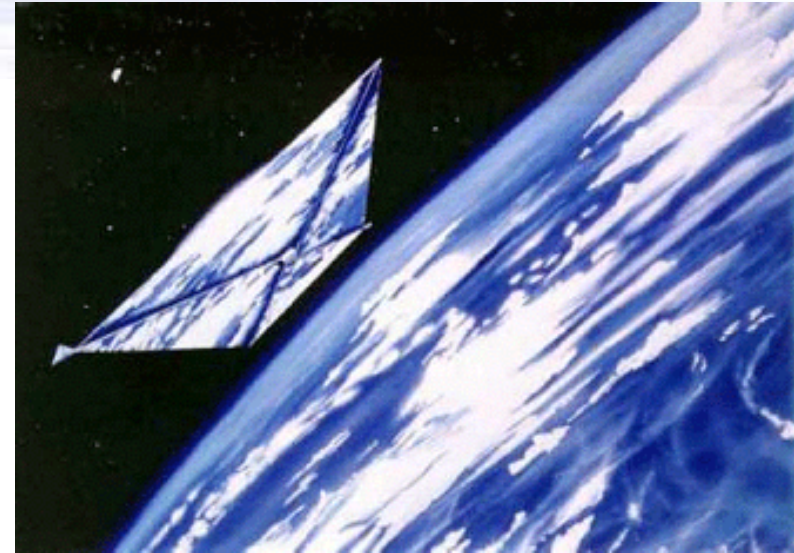
Stato tecnologico attuale e missioni future

Indice di prestazione	Attuale – breve termine	Medio termine (~5 – 10 y)	Lungo termine (>15y)
Carico σ_{vela}	30 – 15 g/m ²	10 g/m ²	1.5 g/m ²
Accelerazione caratteristica a_0	0.1 – 0.5 mm/s ²	0.94 mm/s ²	6 mm/s ²
Indice di leggerezza λ	0.05 – 0.1	0.15	1

Missioni future

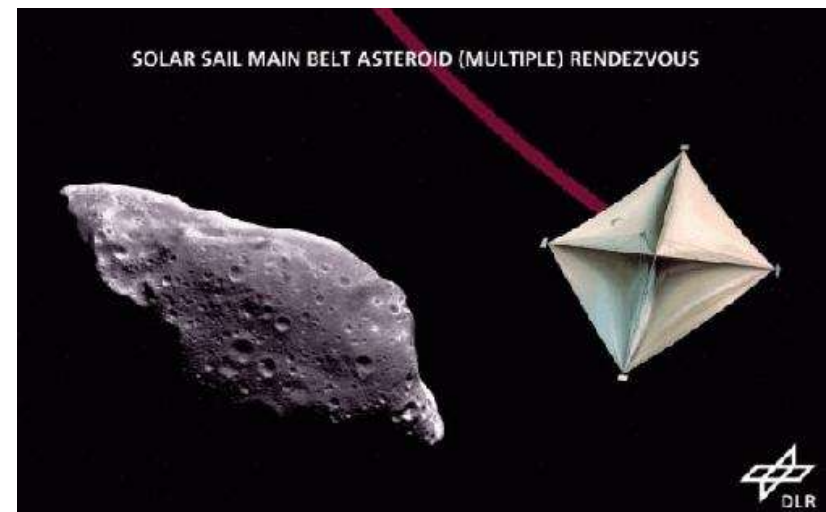
● Missioni a breve termine

- Missioni in orbita terrestre ($a_0 \sim 0.1 \text{ mm/s}^2$)
- Osservazione di eventi solari (punto L_1)
($a_0 \sim 0.25 \text{ mm/s}^2$)
- Orbite polari attorno al Sole
($a_0 \sim 0.25 \text{ mm/s}^2$)
- Missioni verso Mercurio ($a_0 \sim 0.30 \text{ mm/s}^2$)
- Missioni di “Pole Sitter” ($a_0 \sim 0.50 \text{ mm/s}^2$)



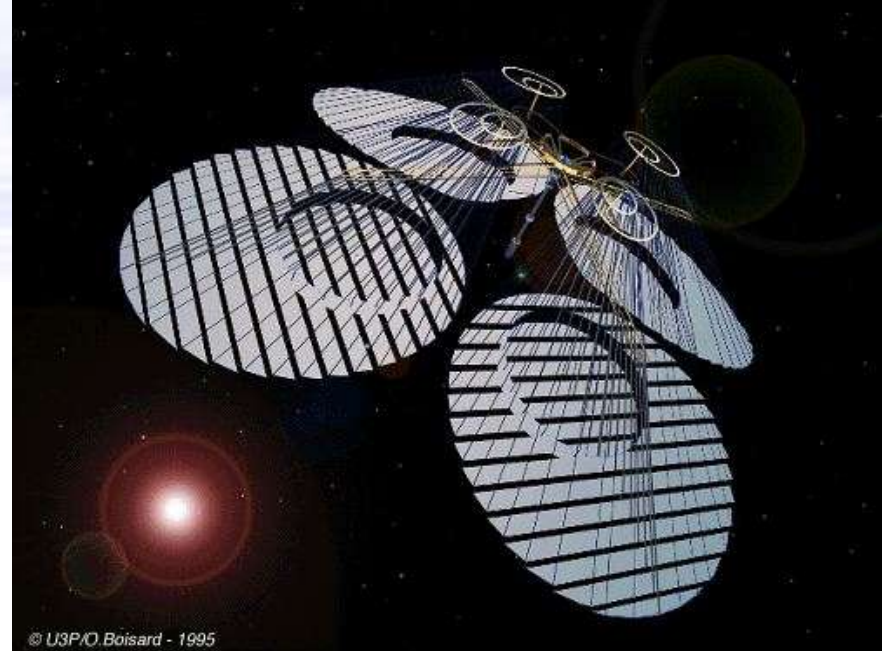
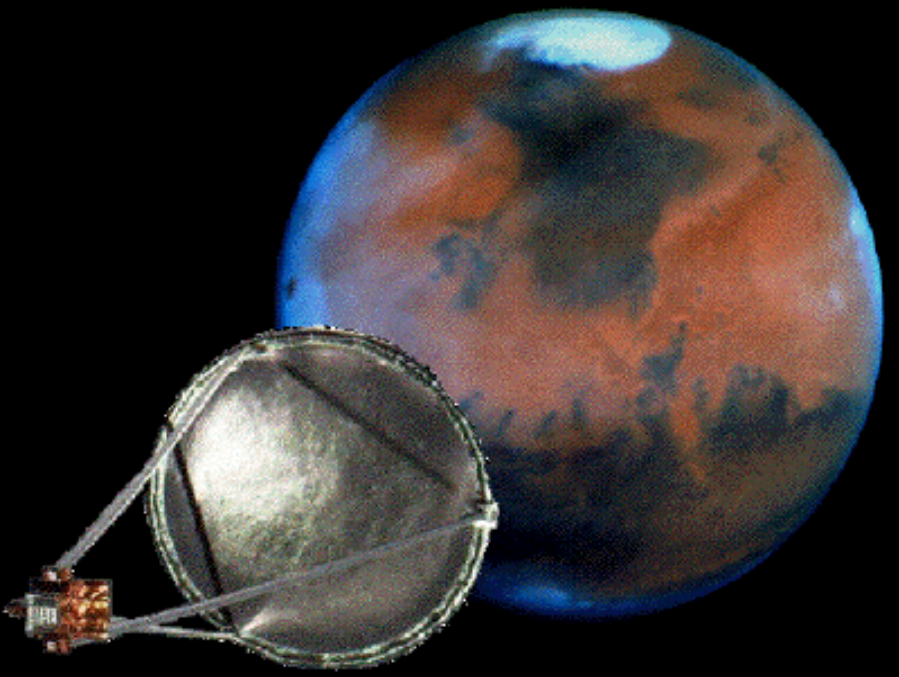
● Missioni future

- Incontro multiplo con diversi asteroidi
($a_0 \sim 1 \text{ mm/s}^2$)
- Missioni di incontro con delle comete
($a_0 \sim 2 \text{ mm/s}^2$)
- Missioni verso l'eliopausa (100UA) o di uscita dal Sistema Solare ($a_0 \sim 3 \text{ mm/s}^2$)

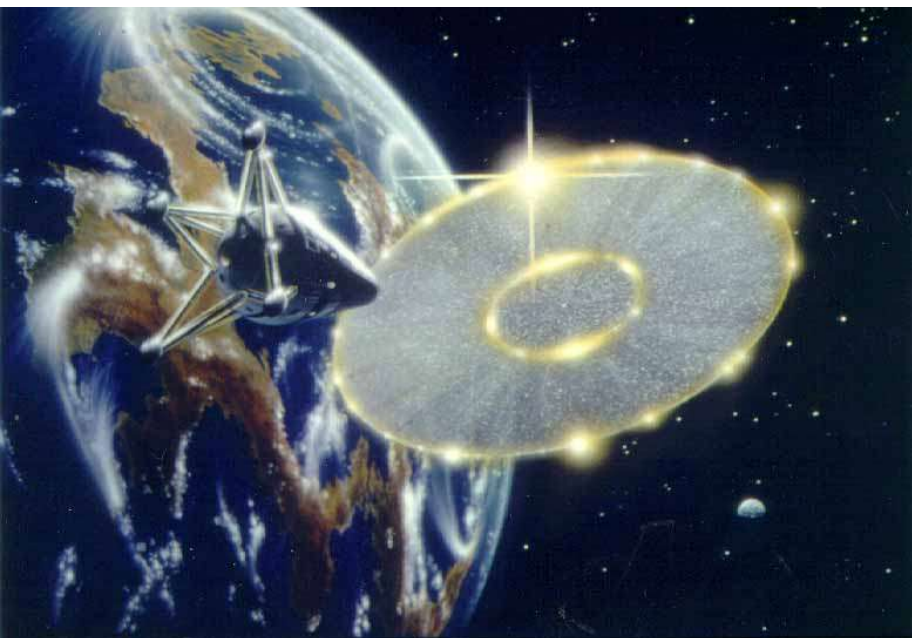


Conclusioni

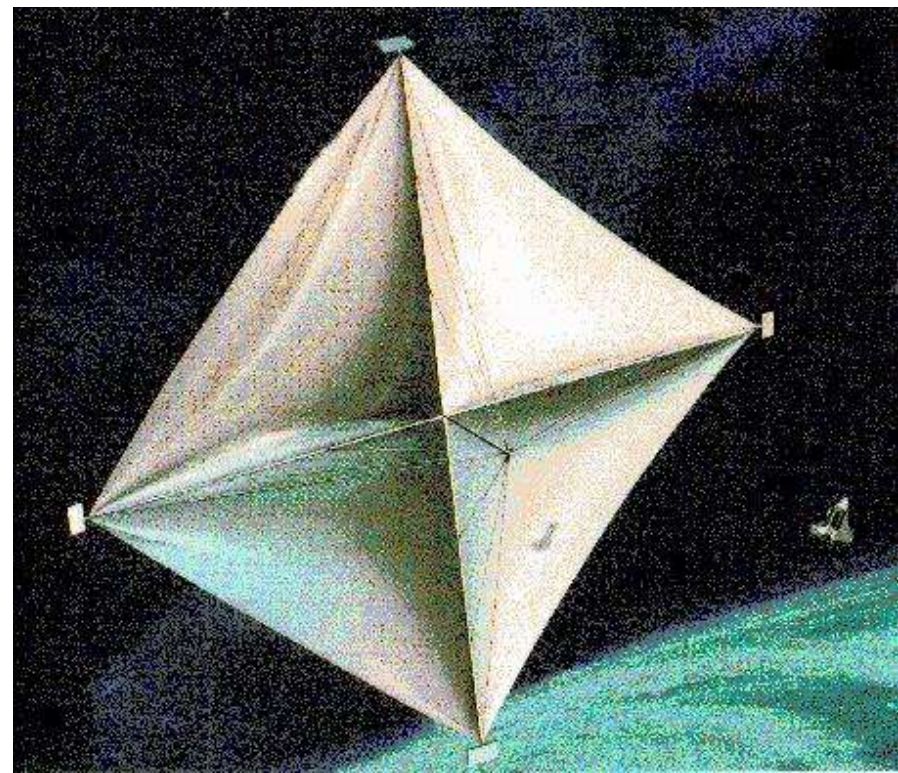
- Principali vantaggi delle vele solari
 - Molto economiche rispetto ai sistemi tradizionali
 - Ottime nel sistema di controllo del mantenimento di lunga durata nell'orbita
- Principale svantaggio
 - Difficoltà nel modellizzare accuratamente la spinta
- Sono adatte per
 - Missioni con voli molto lunghi, con alto impulso ΔV , orbite non molto precise, s/c molto leggeri (100kg)



© U3P/O. Boisard - 1995



08/10/05



Bibliografia

•**Project: Solar Sail** - [Arthur C. Clarke](#), [David Brin](#), and [Jonathan Post](#).

Penguin Books, 1990. ISBN: 0-451-45002-7

A collection of essays and short stories about solar sails. This book was part of a fund-raising effort for the World Space Foundation.

Solar Sailing: Technology, Dynamics and Mission Applications - by [Colin R. McInnes](#).

Springer-Verlag, London, ISBN 1-85233-102-X, 1999. 296 pages.

This is a very comprehensive book on all aspects of solar sailing. The first chapter is a broad summary discussing principles, history, practicality, applications, and future direction. The following chapters go into great depth - both in discussion and mathematics - on light pressure, design (including many historical designs) and steering, orbital mechanics, "non-Keplerian" orbits, mission case studies, and laser-driven sails. Look at the table of contents and cover for a preview:

•**Space Sailing** - by [Dorothy M. Souza](#).

Lerner Publications, Minneapolis, 1994. Library of Congress call number: TL783.9 .568
1994. ISBN: 0822528509

Provides an overview of solar sailing, from history, to interplanetary missions, to interstellar travel. Includes many photographs and images. Listed as juvenile literature, but good for any readership.

• **Space Sailing** - by [Jerome Wright](#).

Gordon and Breach Science Publishers, 1992. Library of Congress call number: TL783.9.W75 1992. ISBN 2-88124-803-9 (hardcover) and ISBN 2-88124-842-X (softcover).

• **Space Sailing** was written by Jerome Wright to publish details of the JPL Halley rendezvous study from the 1970s, as well as his own continuing work. The book discusses a rich variety of solar sail configurations, applications, and considerations to be taken in their design. Some of the topics discussed are:

- Uses for a sail at every body in the solar system (and beyond)
- Numerous possible sailing vessel designs
- Details of the fabrication and deployment of sail films
- Support structure construction
- Considerations for solar sail operation in a variety of circumstances
- Laser (and microwave) propelled solar sails for interstellar travel

• **Starsailing: Solar Sails and Interstellar Travel** - by [Louis Friedman](#).

Wiley, New York, 1988. Library of Congress call number: TL783.9 .F75 1988.

Discusses the history of solar sailing up to 1988, particularly the 1977-78 JPL Halley Rendezvous study. Also discusses the designs for the JPL study, possibilities for travel throughout the solar system and beyond, and a proposed race to the moon for the 500 year anniversary of Columbus reaching North America.

Indice

- *Evoluzione vele solari*
- *Progetti passati e attuali*
- *Utilizzo della pressione di radiazione*
- *Sviluppo delle vele solari*
 - *Parametri importanti*
 - *Tipi di vele solari*
- *Fabbricazione della pellicola della vela*
 - *Pellicola a tre strati*
 - *Pellicola metallica*
- *Dinamica dei movimenti eliocentrici*
- *Strategie di pilotaggio*
- *Conclusioni*