

Università degli Studi di Padova – Dipartimento di Ingegneria Industriale

Corso di Laurea in Ingegneria Aerospaziale

***Relazione per la prova finale  
« Space Solar Power Project:  
dalla sua concezione al primo esperimento  
dimostrativo »***

Tutor universitario: Prof. Ugo Galvanetto

Laureanda: *Agnese Peratoner*

Padova, 13/11/2024

# L'IDEA

Sfruttare l'energia solare per la generazione di energia elettrica attraverso la conversione fotovoltaica per mezzo di pannelli posti al di sopra dell'atmosfera: nello spazio.

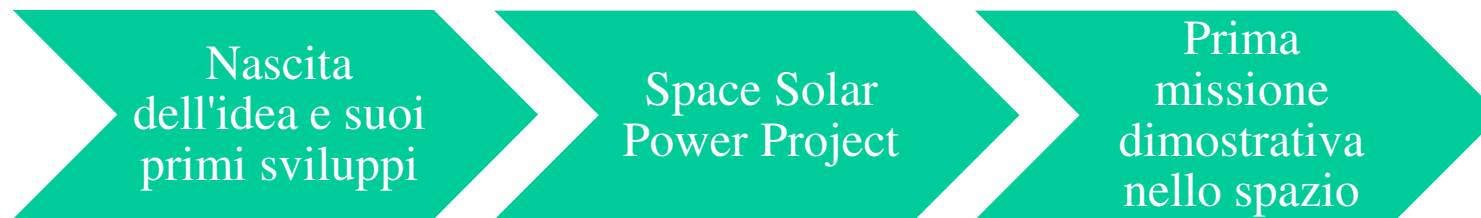
## Perché ?

Il flusso energetico medio incidente sulla superficie terrestre è di circa  $175 \frac{W}{m^2}$ , mentre quello misurabile oltre l'atmosfera è di ben  $1367 \frac{W}{m^2}$  (quasi 8 volte superiore). Questo si deve alla presenza dell'atmosfera e alla forma sferoidale della Terra.

Altri fattori da considerare:

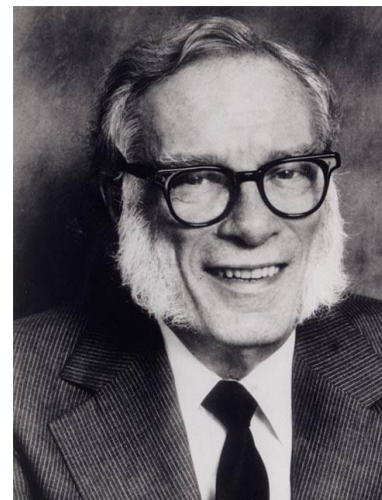
- Alternanza giorno/notte
- Stagioni
- Condizioni meteo

## Storia degli Space-Based Solar Power Systems (SBSPSs):



## Tsiolkovskij e Asimov

- 1923: K.E. Tsiolkovskij, ingegnere e scienziato, teorizza un sistema di specchi posti nello spazio per raccogliere e ridirezionare l'energia solare a Terra.
- 1941: I. Asimov, scrittore e divulgatore scientifico, pubblica *Reason*, racconto fantascientifico, in cui stazioni spaziali trasmettono energia fornita dalle stelle ai pianeti.

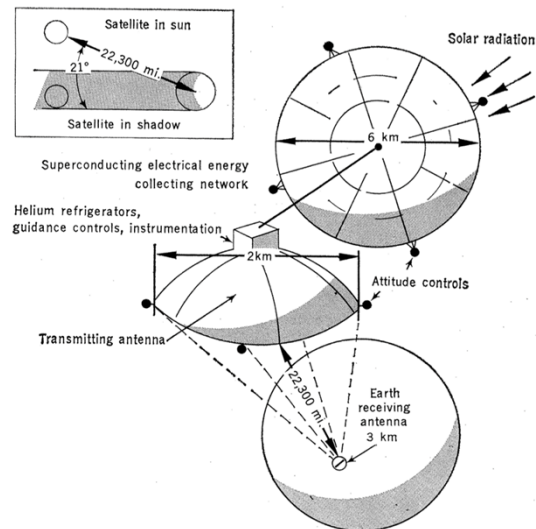


# I paper scientifici di Peter Glaser

## *Power from the Sun: Its Future (1968)*

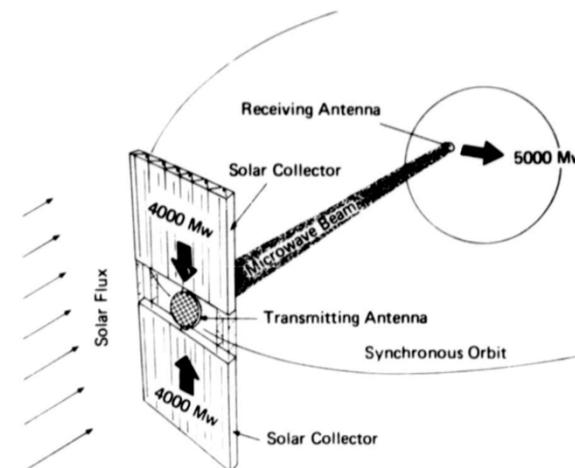
Analisi dei diversi aspetti da prendere in considerazione:

- Caratteristiche dell'orbita
- Dispositivi per la conversione di energia solare
- Trasmettitori
- Stazioni riceventi di terra



## *Space Satellite Power System (1974)*

- Sistema che genera 5000 MW di potenza
- Posto in orbita sincrona
- 11 300 000 kg
- Spesa stimata di 1000 \$/kg
- «Rectenna»

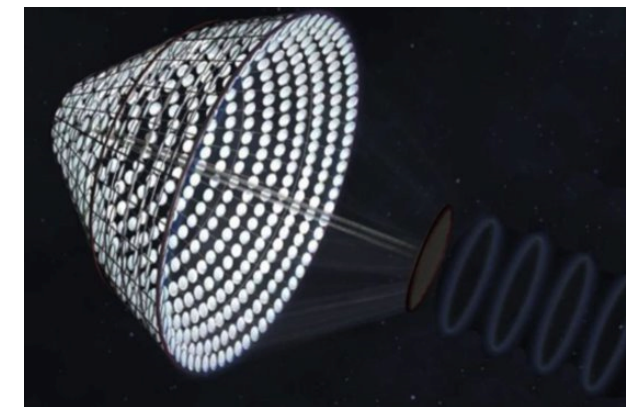
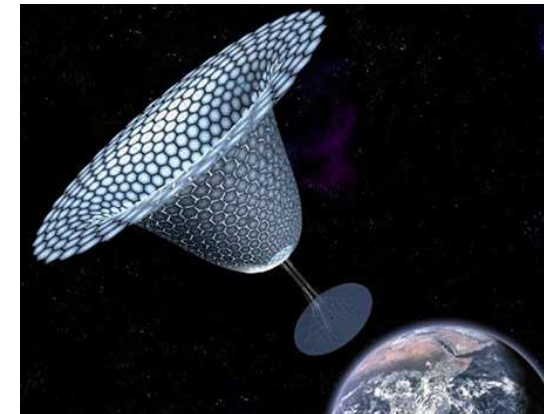
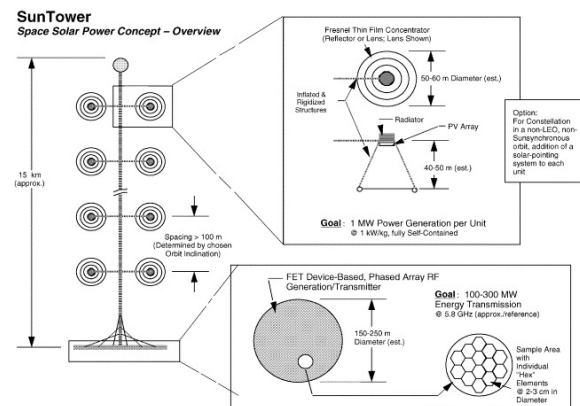


# Solar Power Satellites

1976-1980: Studio (DoE, NASA) → SPS Reference Systems

**Fresh Look Study** (Mankins, 1997) :

- SunTower
- SolarDisk

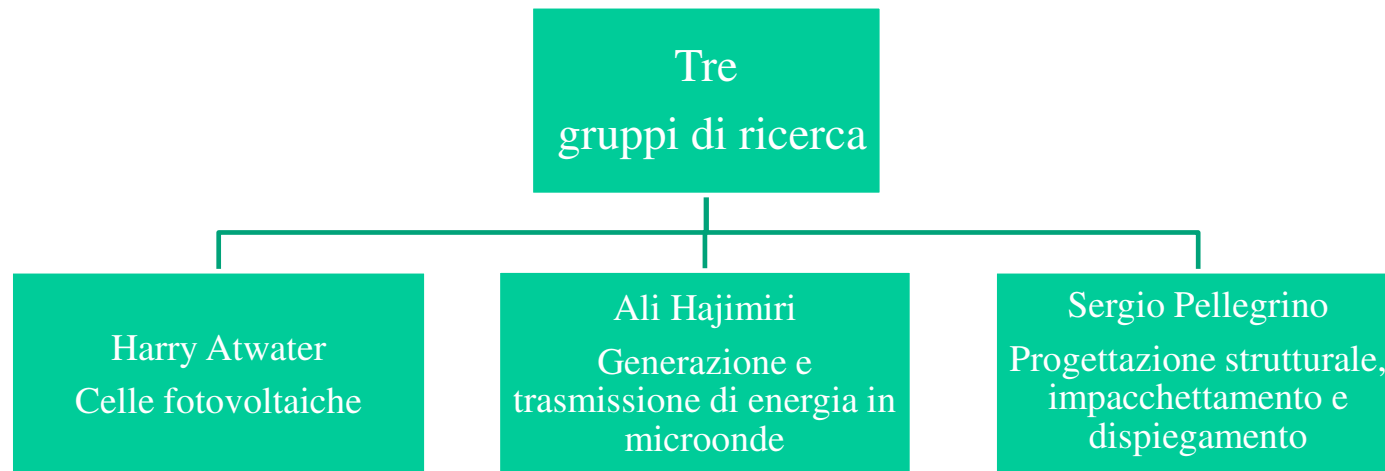


SPS-ALPHA satellite (NASA, 2012)

Tecnologie richieste complesse (superconduttività a temperature elevate, sistemi attivi di refrigerazione, multilayer insulation )

# Lo Space Solar Power Project

Progetto che nasce in seno al California Institute of Technology ed è avviato nel 2014 grazie ad una donazione di 100 milioni di dollari dalla Fondazione Donald Bren, a cui si aggiunsero 17,5 milioni nel contesto di un accordo con la Norhtrop Grumman Corporation.



Concept: l'elemento multifunzionale di base *tile*

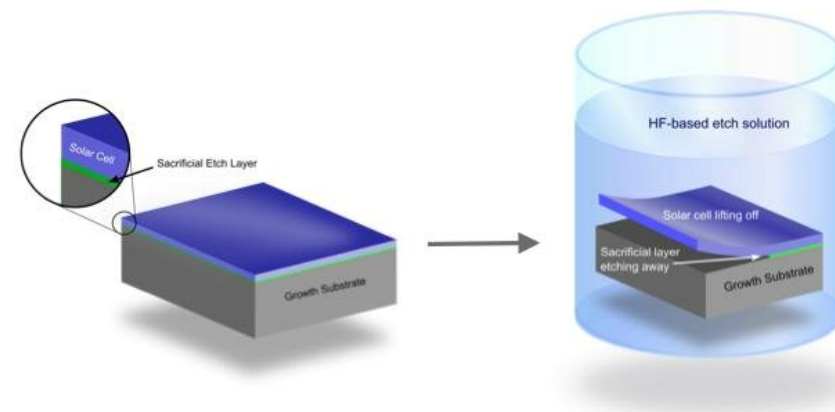
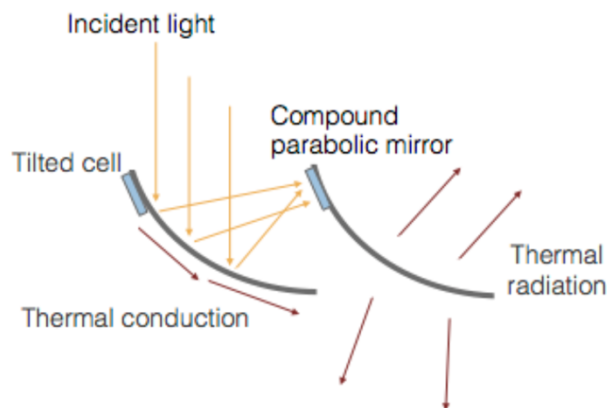
# Celle Fotovoltaiche

Celle principalmente studiate sono celle solari multigiunzione (tripla giunzione), costituite da materiali semiconduttori: composti GaInP, GaInAs, GaAs.

Strategie di riduzione della massa (potenza del sistema complessivo sale da  $70 \frac{W}{kg}$  a  $3.18 \frac{kW}{kg}$ ):

- Uso di riflettori solari a semi parabola con struttura:  $25 \mu m$  polimide (Kapton),  $15 - 30 \mu m$  Al,  $100 nm$  Ag
- *Epitaxial Lift-off* (ELO)  $\rightarrow$  abbattimento costi di produzione, massa ridotta fino a 15 volte, aumento della flessibilità

Efficienza ottenibile del 25 – 30% con temperatura operativa al di sotto dei  $100^\circ$ .



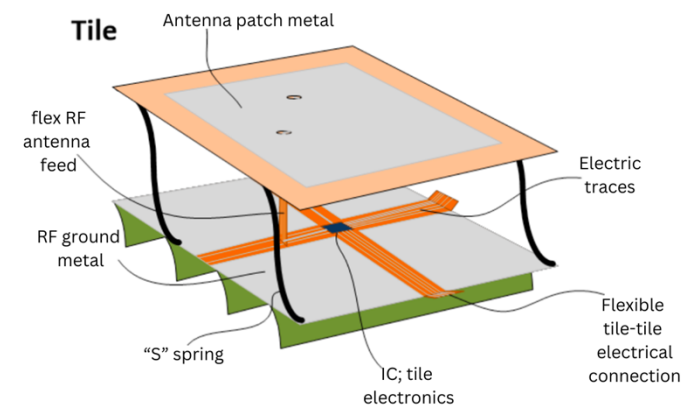
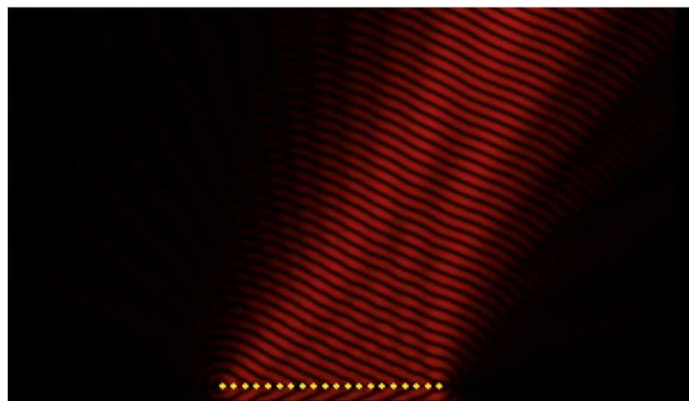


# Generazione e trasmissione di energia sottoforma di microonde

Principio operativo: gran numero di trasmettitori elettronici di potenza in microonde che operino in sincronia di fase ed ampiezza controllate → creazione di fascio di energia focalizzabile in un punto.

Fattore chiave: sfasamento (*timing*) → introduzione di differenza di fase tra sorgenti permette di spostare ed orientare il fascio, cambiando il target a cui fornire energia.

Le antenne (presenti su ciascun *tile*), sarebbero controllate da circuiti integrati (realizzati con tecnologia CMOS), capaci di ben resistere a radiazioni ionizzanti → sistema più resiliente a SEEs

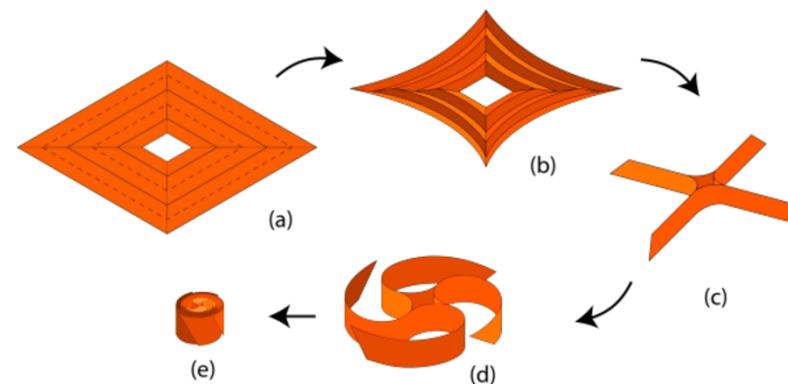
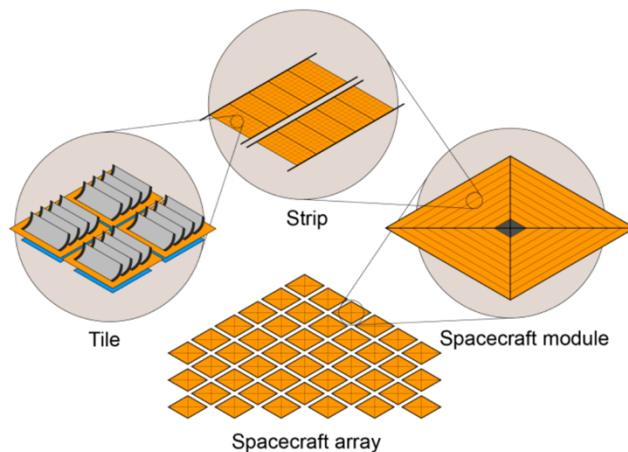


# Progettazione strutturale, impacchettamento e dispiegamento

Elemento multifunzionale di base: *tile*

Numerosi *tiles* vengono assemblati a formare strisce (*strips*) trapezoidali, le quali sono disposte come lati di quadrati concentrici, uno dentro l'altro, arrivando a costituire un' unità modulare ( $60\text{ m} \times 60\text{ m}$ ), di massa  $650\text{ kg}$ .

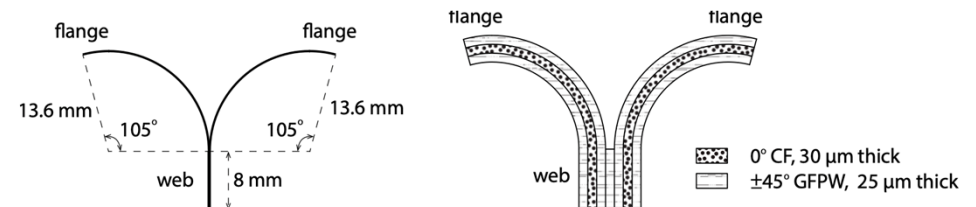
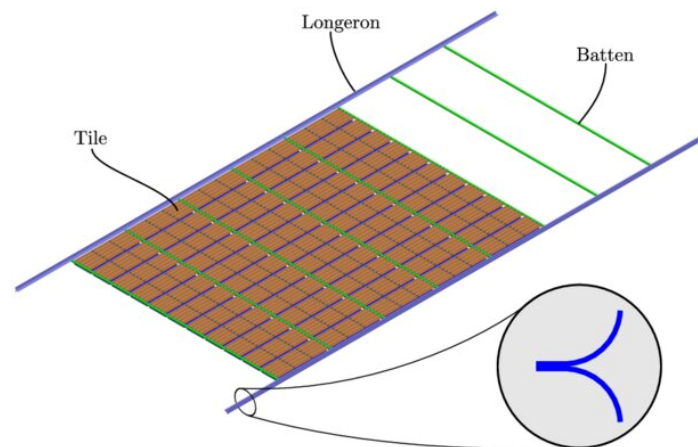
Tra i carichi a cui questa struttura risulterebbe soggetta in GEO, la SRP risulta quella più importante ( $9.1 \times 10^{-6}\text{ Pa}$ , con raggi solari perpendicolari).



# Progettazione strutturale, impacchettamento e dispiegamento

Componenti fondamentali per appiattimento dei *tiles* nella configurazione «impacchettata» e dispiegamento:

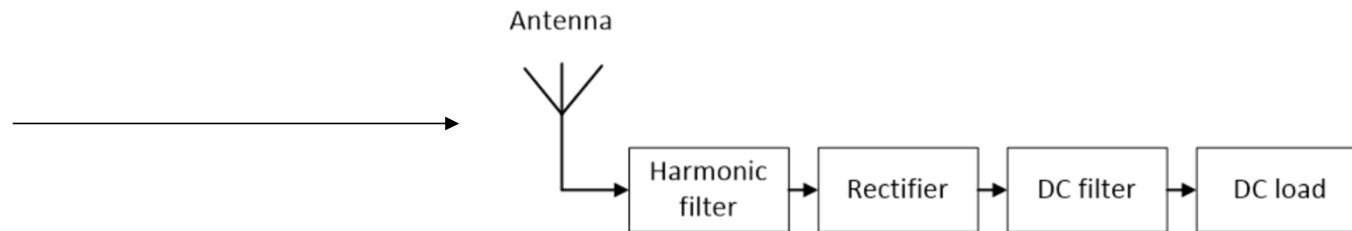
- TRAC
- Strutture elastiche contornanti i concentratori (fibra di carbonio pultrusa)
- 4 molle dal profilo ad «S» (fibra di carbonio)



## Osservazioni sul sistema complessivo

Nel paper analizzato, in base ad alcuni parametri presi in considerazione, quali la potenza fornita da un sistema spaziale di 130 moduli ad una rete elettrica terrestre  $P_g$  ( $= 50 MW$ ), all'ipotetico costo che avrebbe tale sistema (17.5 miliardi di dollari), considerando un ciclo di vita di 20 anni, si è stimato un  $LCOE$  di  $2.05 \frac{\$}{kWh}$ , un costo che se confrontato con altre fonti di energia risulta molto elevato.

Sistema di terra  $\rightarrow$  gruppo di *Rectenne*



Considerando  $\eta_{PV} = 25 - 30\%$ ,  $\eta_{CCRF} = 55 - 65\%$ ,  $\eta_{TX/diff} = 84\%$  e  $\eta_{RCT} = 60 - 85\%$ , l'efficienza complessiva da un capo all'altro dell'intero sistema è di  $7 - 14\%$ .

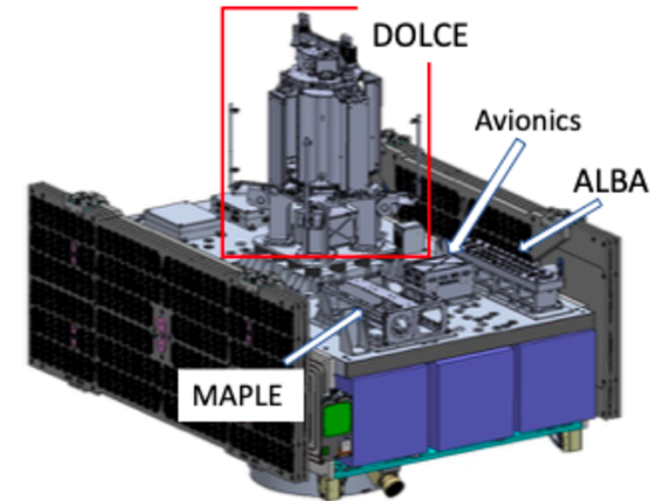
# Space Solar Power Demonstration One

Primo esperimento dimostrativo del progetto.

È stato lanciato il 3 gennaio 2023, ospite del satellite Vigoride 5, a bordo del Falcon 9, e si è concluso l'11 novembre dello stesso anno.

Tre esperimenti, sviluppatisi in parallelo, ognuno da un gruppo di ricerca e corredati da un sistema di controllo a distanza:

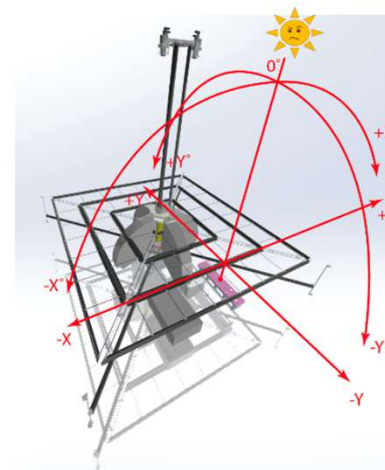
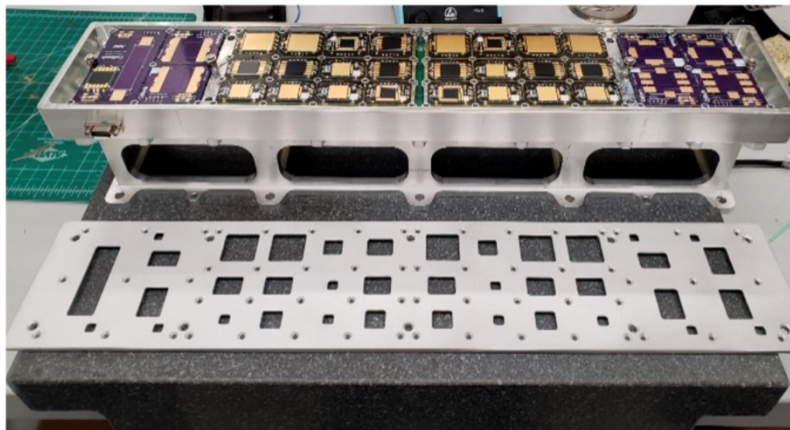
- Alba
- MAPLE (Microwave Array for Power Transfer LEO Experiment)
- DOLCE (Deployable on-Orbit ultraLight Composite Experiment)


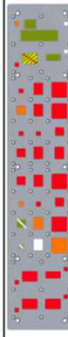




# Alba

- Dimensioni e peso:  $494 \times 110 \times 100 \text{ mm}$ ,  $3.6 \text{ kg}$  ;
- 32 campioni di celle solari di svariate dimensioni: celle ultraleggere di perovskite sia flessibili che rigide, celle a nanofili di InP e GaAs, celle per concentratori solari luminescenti (LSC), celle CIGS, celle sottili in Silicio, celle  $III - V$  a giunzione diffusa e una cella  $III - V$  convenzionale a tripla giunzione;
- A causa del dispiegamento di DOLCE, le celle hanno subito un parziale oscuramento;

Risultati: analisi dei cambiamenti nel funzionamento delle celle hanno evidenziato gran variabilità nelle prestazioni delle celle perovskitiche, celle GaAs stabili.



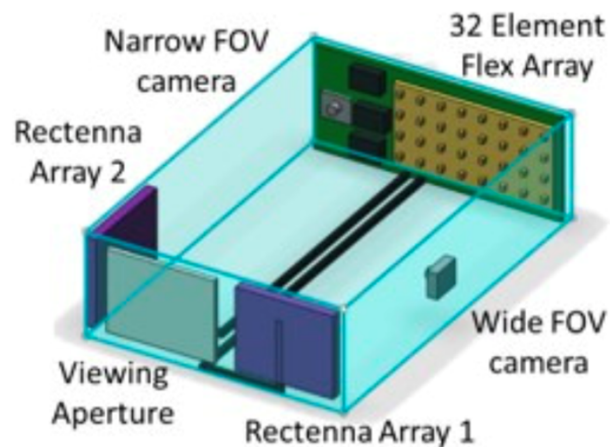
X (deg)	0	4	-12	18
Y (deg)	0	-14	12	-3
				



# MAPLE

- Dimensioni e peso:  $20 \times 10 \times 34.05$  cm, 2.6 kg;
- Struttura rivestita da coperta termica contenente: 32 antenne flessibili a dipolo, controllate da CMOS RFICs, due rectenne dotate di 1 LED, due camere ed una finestra circolare

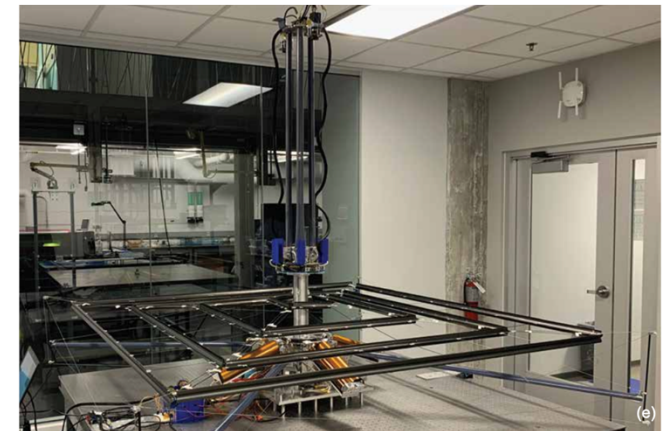
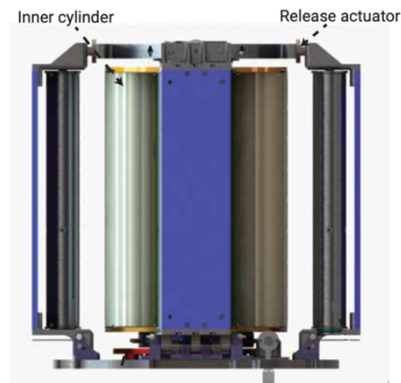
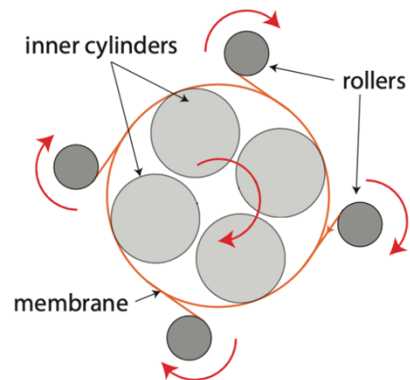
Risultati: un confronto delle prestazioni tra inizio e fine missione ha riscontrato un calo nella potenza totale trasmessa, lo si è attribuito al deterioramento di singoli elementi trasmettenti e ad alcune complesse interazioni di tipo elettrico-termico avvenute all'interno del sistema; è stata trasmessa e rilevata energia a terra (segnale debole, durato 90 secondi).



## DOLCE

- Dimensioni e peso:  $355 \times 355 \times 730 \text{ mm}$ ,  $33 \text{ kg}$ ;
- Meccanismo di dispiegamento costituito da 4 cilindri interni, attornati da 4 rulli; membrana in polimide che fornisce una pressione di avvolgimento alla struttura ultraleggera in fibra di carbonio/vetro, appoggiata su di essa; 4 boom in fibra di carbonio che si estendono orizzontalmente lungo le diagonali della struttura e 3 che si ergono verticalmente.

Risultati: la struttura è riuscita a completare il proprio dispiegamento, con due complicazioni; il filo che collegava l'estremità esterna di uno dei boom ad un angolo della struttura si è impigliato e parte della struttura prima di aprirsi si è incastrata sotto al dispositivo di dispiegamento.





# Conclusioni

Architettura «monolitica» vs architettura frammentata : i vantaggi dei concept più recenti

- Assenza di rete di distribuzione dell'energia, no articolazioni meccaniche tra antenne e superfici fotovoltaiche;
- Scalabilità del sistema: replicabile, meno costoso da realizzare, più affidabile, adattabile a diverse applicazioni.

Aspetti ambientali:

- Difficile fare un bilancio tra impatto e vantaggi ambientali di un tale sistema: da un lato i lanci di vettori immettono gas serra in atmosfera, dall'altro il fotovoltaico sfrutterebbe l'energia solare in quantitativi molto maggiori rispetto ad ora, e ridurrebbe il consumo di suolo.

Risvolti socioeconomici:

- «Democratizzazione dell'accesso all'energia».