

Università degli Studi di Padova – Dipartimento di Ingegneria Industriale

Corso di Laurea in Ingegneria dell'Energia

**Relazione per la prova finale**  
**“Esplorazione spaziale: l'utilizzo del**  
**generatore termoelettrico a radioisotopi”**

Tutor universitario: Prof. Azzolin Marco

Laureando: Brunello Pier Antonio

Padova, 10/07/2024

Matricola 1223797

- Breve introduzione sulla storia dell'RTG
- Decadimento radioattivo
- Combustibile utilizzato negli RTG
- Conversione termoelettrica
- RTG utilizzati in ambito spaziale
- Futuro della tecnologia RTG

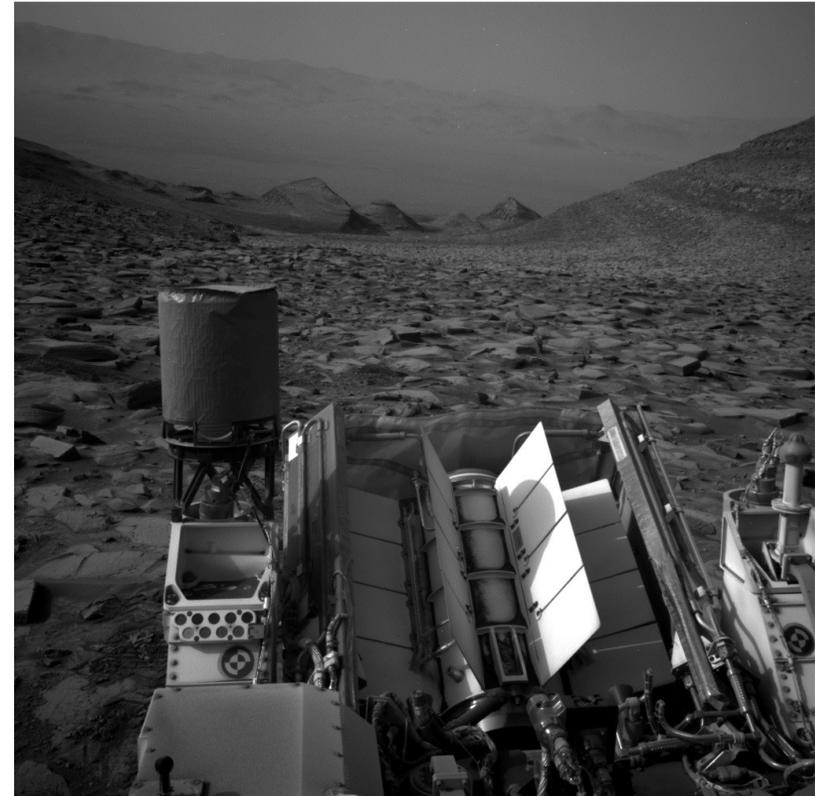


Fig. 1 RTG a bordo del rover Curiosity

- Il generatore termoelettrico a radioisotopi (RTG) converte il calore prodotto dal decadimento radioattivo di un combustibile in energia elettrica
- Tecnologia inventata da Kenneth Jordan e John Birden nel 1954
- Viene utilizzato in ambito spaziale per fornire energia a missioni di lunga durata e distanti dal Sole
- Il combustibile utilizzato è il diossido di plutonio



Fig. 2 GPHS e New Horizons sul fondo

Un radioisotopo è un particolare tipo di isotopo caratterizzato da un'instabilità dovuta a un eccesso di neutroni. Un atomo di questo tipo segue un processo spontaneo di trasformazione, definito decadimento radioattivo, durante il quale perde energia per trasformarsi, infine, in un isotopo stabile. Durante questo processo viene rilasciata energia termica che sarà poi utilizzata nel convertitore termoelettrico per produrre potenza elettrica.

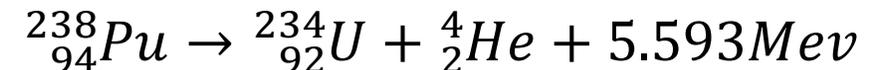
Formula di decadimento:  $N(t) = N_0 e^{-\lambda t}$   $\longrightarrow$

Il tempo di dimezzamento del plutonio-238 è pari a 87.7 anni

Esistono tre tipi di emissioni:  $\alpha$ ,  $\beta$  e  $\gamma$   $\longrightarrow$

Plutonio-238 e polonio-210 decadono con emissione  $\alpha$

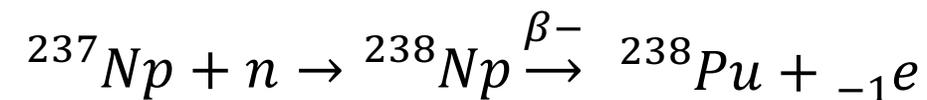
Decadimento del Plutonio-238:  $\longrightarrow$



Diossido di plutonio:  $PuO_2$   $\longrightarrow$

- 80% Plutonio-238
- 16% Plutonio-239
- 3% Plutonio-240
- 1% Plutonio-241

Il plutonio non esiste in natura, è ottenuto mediante l'irraggiamento del Nettunio-237, il prodotto viene poi estratto per essere trasformato in diossido di plutonio



## Effetto Seebeck:

- Un materiale termoelettrico produce un voltaggio se sottoposto a una differenza di temperatura
- È possibile esprimere il coefficiente di Seebeck mediante il rapporto tra il gradiente di temperatura e il gradiente del potenziale

$$S = \frac{\Delta V}{\Delta T}$$

$$S = -\frac{\nabla V}{\nabla T}$$

## Coefficiente di merito:

- Il coefficiente di merito consente di valutare l'efficienza di un materiale termoelettrico

$$ZT = \frac{T\sigma S^2}{\kappa}$$

$$\eta = \frac{P}{q_A} = \frac{T_h - T_c}{T_h} \cdot \frac{\frac{R}{R+1}}{1 + \frac{1}{ZT} \cdot \frac{R+1}{T_h} - \frac{T_h - T_c}{2T_h} \frac{1}{R+1}}$$

Rendimento di un generatore termoelettrico

$$\eta_{max} = \frac{T_h - T_c}{T_h} \cdot \frac{\sqrt{1 + ZT} - 1}{\sqrt{1 + ZT} + \frac{T_c}{T_h}}$$

Rendimento massimo della conversione termoelettrica

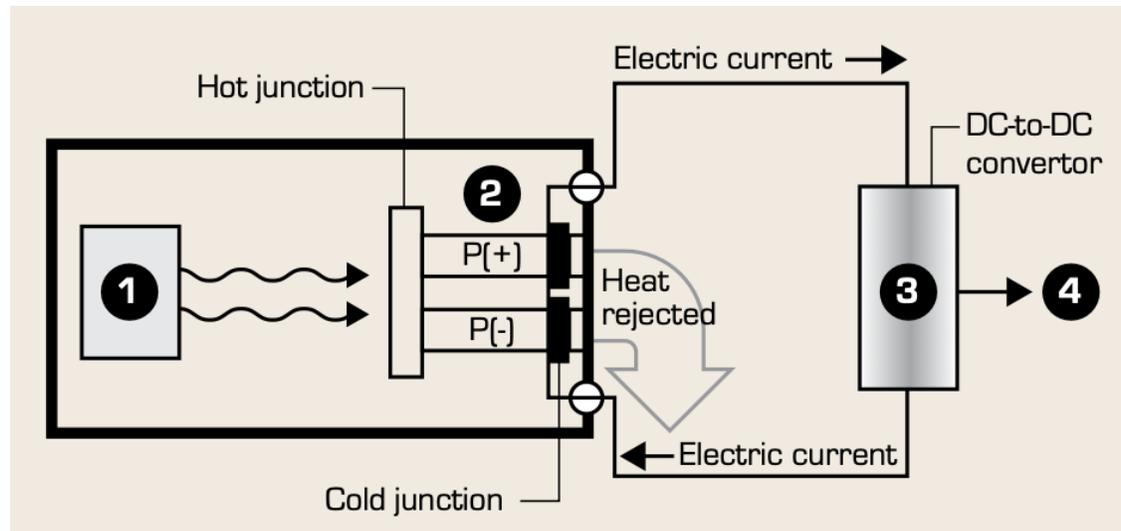


Fig. 3 Convertitore termoelettrico

Nell'immagine è rappresentato un convertitore termoelettrico:

1. Generatore di calore
2. Termocoppia
3. Convertitore DC-DC
4. Erogazione di potenza elettrica

La differenza di potenziale ottenuta implica la presenza di uno spostamento di cariche e dunque un passaggio di corrente elettrica



Per sfruttare al meglio questo effetto si crea una termocoppia in cui vengono effettuate due drogature, una di tipo p ed una di tipo n



Elettroni e lacune presenti all'interno del materiale si muovono generando due campi elettrici

## SNAP-3B

### Caratteristiche del generatore:

- A bordo del Transit 4A lanciato il 29/06/1961
- 42 Watt termici
- 2.4 Watt elettrici
- 5% efficienza
- Plutonio-238
- 27 termocoppie in PbTe
- $T_h = 382^\circ\text{C}$
- $T_c = 72^\circ\text{C}$

Lo Snap-3B fu il primo generatore termoelettrico a radioisotopi utilizzato in ambito spaziale

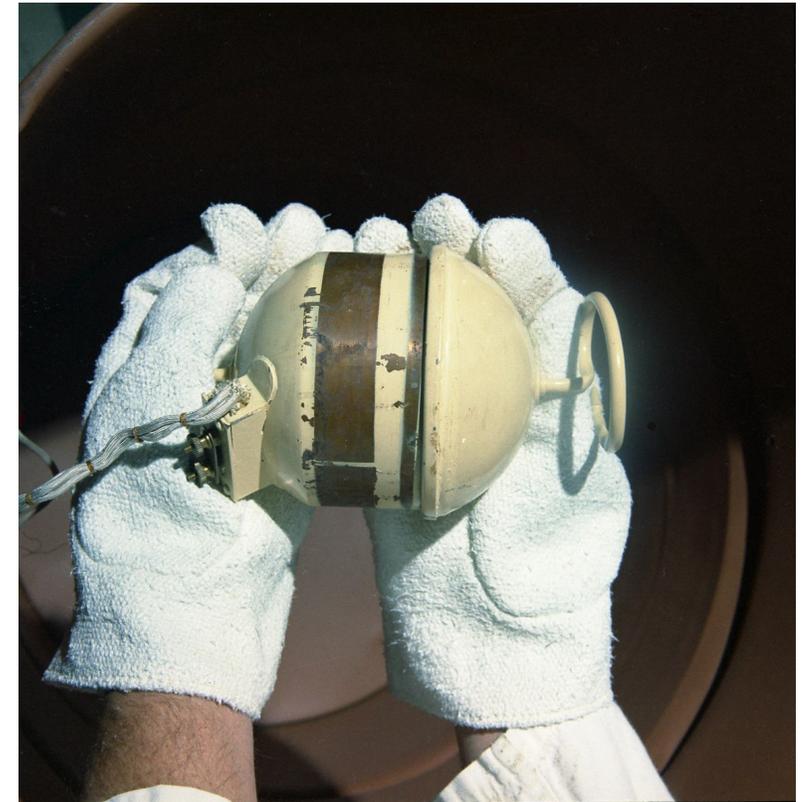


Fig. 4 Contenitore del combustibile dell'RTG Snap-3b

**Caratteristiche del generatore:**

- 682 Watt termici
- 42 Watt di potenza elettrica
- 6% efficienza
- Plutonio-238
- Termocoppia in PbTe
- 6 moduli termoelettrici
- 15 coppie per modulo
- 90 coppie totali nel convertitore
- Lato P di TAGS-85
- Lato N di 3M-TEGS-2N
- $T_h = 510^\circ\text{C}$
- $T_c = 160^\circ\text{C}$

**SNAP-19**



Pioneer 10 e 11: sonde gemelle che esplorarono i pianeti esterni del sistema solare, in ciascuna erano installati 4 RTG di tipo Snap-19



Viking 1 e 2: lander gemelli atterrati su Marte, in ciascuno erano installati 2 RTG di tipo Snap-19

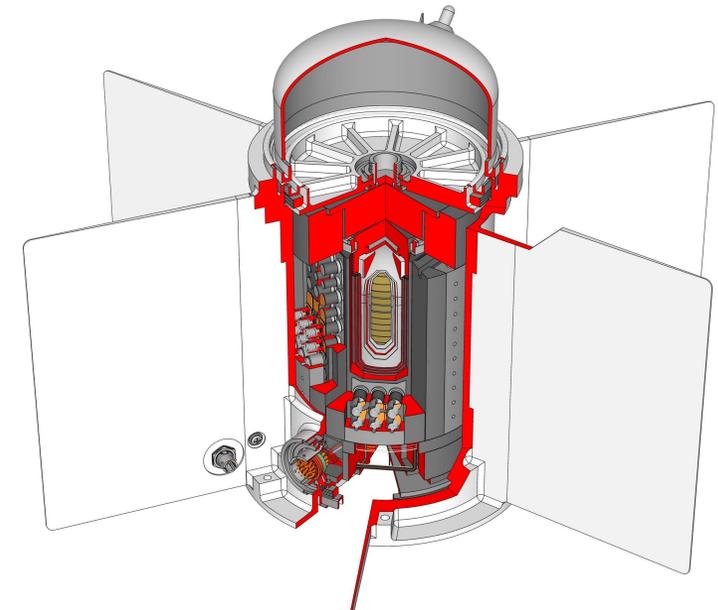


Fig. 5 RTG Snap-19

## SNAP-27

- 1250 Watt termici
- 5,7% efficienza
- Plutonio-238
- Termocoppia in PbTe

Generatore utilizzato nelle missioni Apollo per alimentare la strumentazione scientifica ALSEP.

Il generatore e gli strumenti furono lasciati sulla Luna dagli astronauti, da dove continuarono a operare per diversi anni fornendo informazioni sul satellite terrestre.



Fig. 6 RTG Snap-27

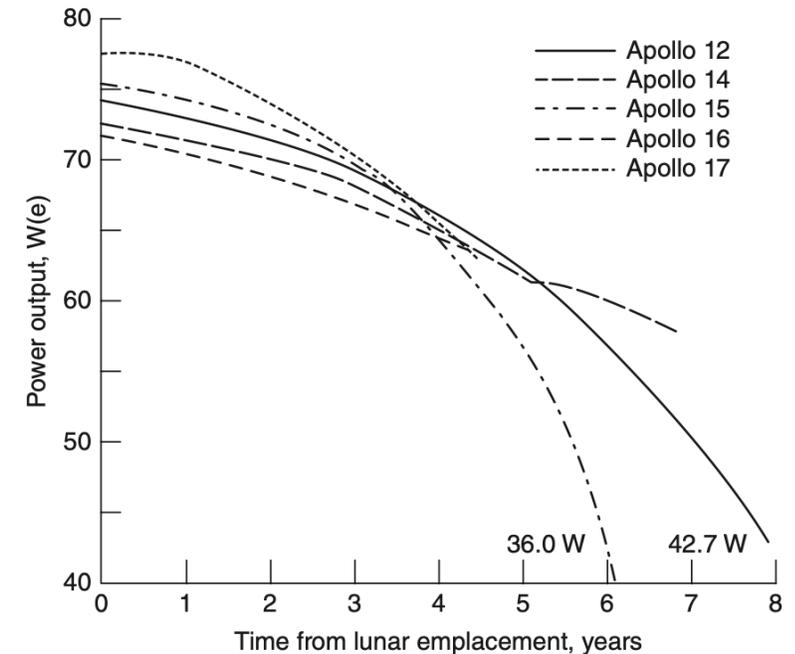


Fig. 7 Andamento della potenza durante l'attività dell'ALSEP

### Caratteristiche del generatore:

- 2651 Watt termici
- 175 Watt elettrici
- 6.6% efficienza
- 24 sfere in gusci di iridio
- Plutonio-238
- 4.2 We/kg
- Termocoppie in SiGe
- $T_h = 1000^\circ\text{C}$
- $T_c = 300^\circ\text{C}$

## MHW

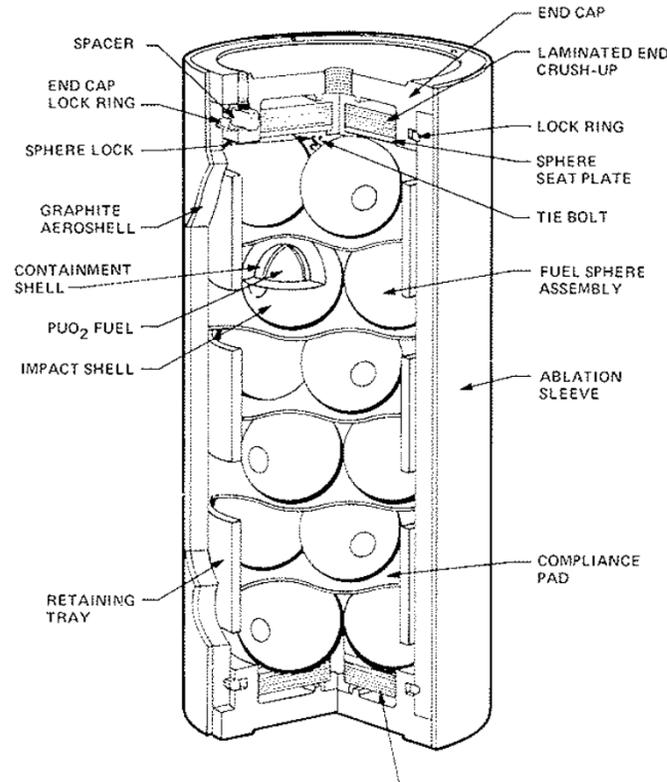


Fig. 8 Interno dell'RTG MHW

### Sonde utilizzanti MHW:

- Voyager 1 venne lanciata nel 1977, esplorò Giove, Saturno e la sua luna Titano
- Voyager 2 venne lanciata nel 1977, esplorò Giove, Saturno, Urano e Nettuno

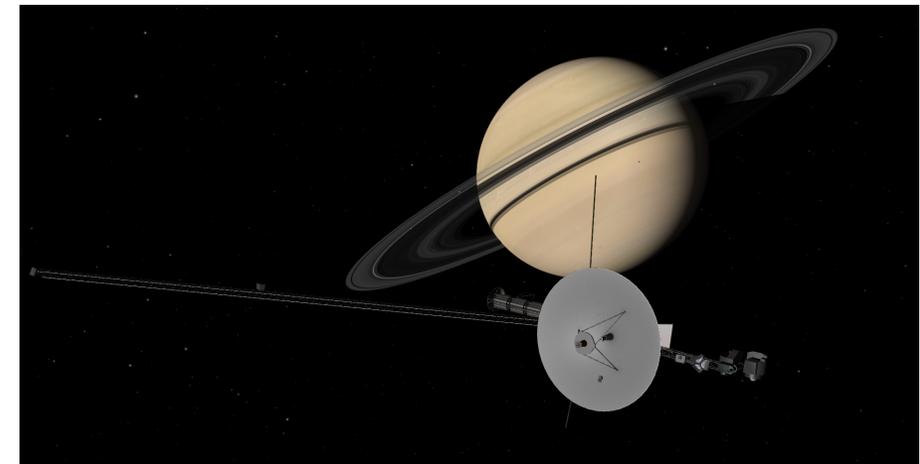


Fig. 9 Voyager 1 sorvolando Saturno

### Caratteristiche del generatore:

- 4410 Watt termici
- 285 Watt elettrici
- 6,4% efficienza
- Plutonio-238, 5.1 We/kg
- 18 moduli GPHS di combustibile
- 4 pellet per modulo
- 572 termocoppie
- Termocoppia in SiGe
- $T_h = 1000^\circ\text{C}$
- $T_c = 293^\circ\text{C}$
- Isolamento in  $\text{SiO}_2$

### GPHS

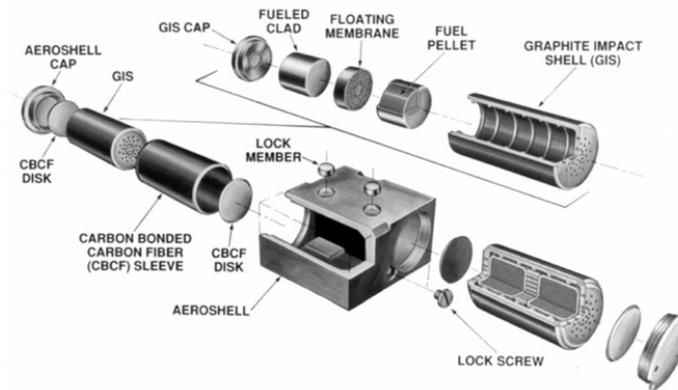


Fig. 10 Interno del modulo dell'RTG GPHS

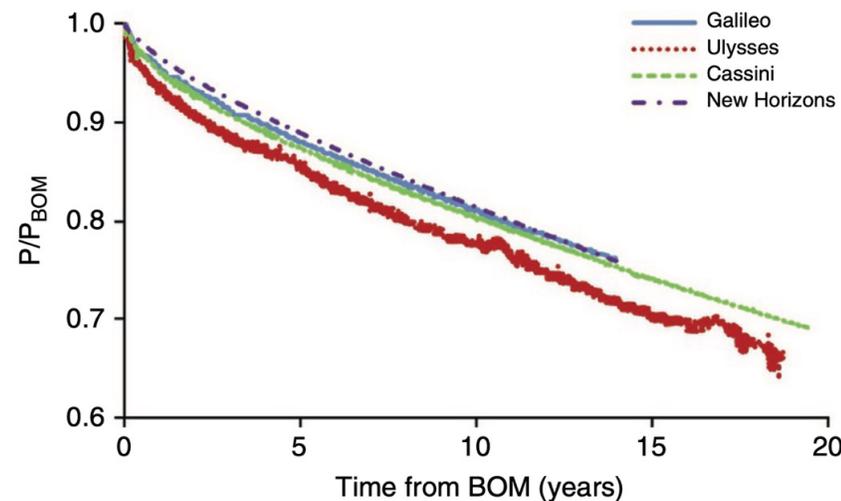


Fig. 11 Andamento della potenza delle sonde utilizzanti il GPHS

### Sonde utilizzanti GPHS:

- Sonda Galileo (1989) utilizzava 2 RTG, per un totale di 570 Watt di potenza elettrica
- Sonda Ulysses (1990) utilizzava 1 singolo RTG
- Sonda Cassini (1997) utilizzava 3 RTG, per un totale di 826 Watt di potenza elettrica
- Sonda New Horizons (2006) utilizzava 1 singolo RTG che garantiva 245 Watt di potenza elettrica

## Caratteristiche del generatore:

- 1960 Watt termici
- 120 Watt elettrici
- 6,2% efficienza
- Plutonio-238
- 8 moduli GPHS
- 4 pellet per modulo
- 768 termocoppie
- Termocoppia in PbTe
- Lato-n in TE1010
- Lato-p suddiviso in TE-2003 e TAGS-85
- Isolamento in Haynes-25 (lega di Cobalto-Nichel-Cromo-Tungsteno)

## MMRTG

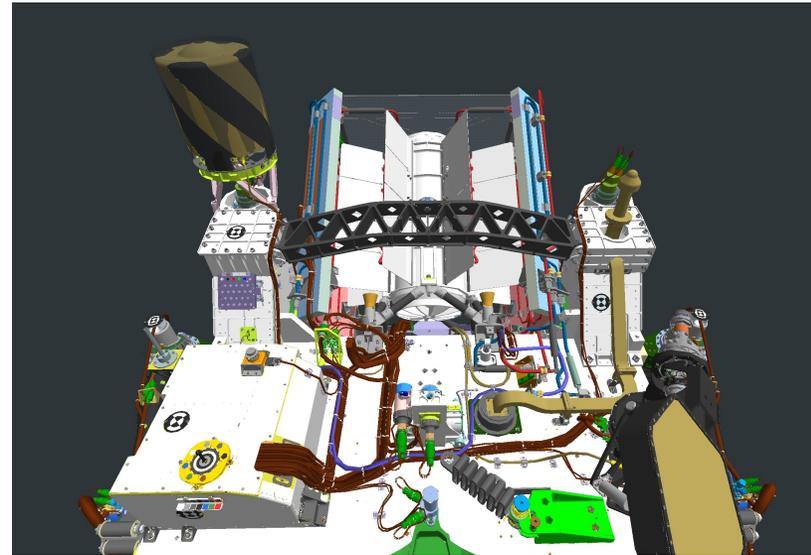


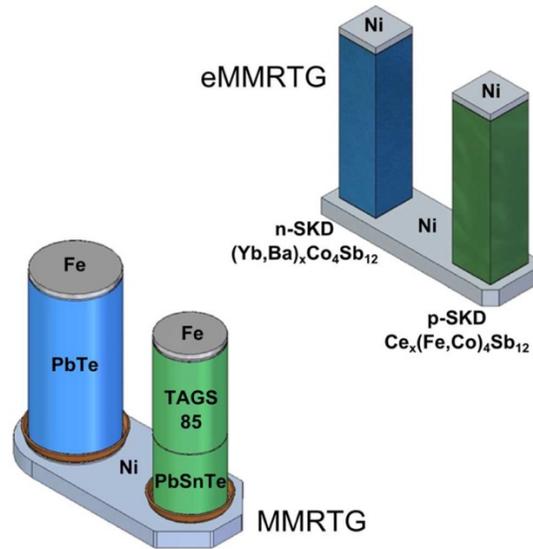
Fig. 12 MMRTG a bordo del rover Perseverance

## Rover utilizzanti MMRTG:

- **Curiosity** (2012)
- **Perseverance** (2020)

Entrambe le missioni consistono in due rover atterrati su Marte, a bordo dei quali è installato un singolo RTG che fornisce energia necessaria per la strumentazione e gli spostamenti.

In aggiunta, il calore emesso dal generatore viene utilizzato per mantenere in temperatura il rover e la strumentazione scientifica a fronte delle basse temperature raggiunte durante le notti marziane



## eMMRTG

Questa tecnologia permette un aumento del 25% dell'efficienza nell'erogazione di potenza, riuscendo ad arrivare all'8%.

Questo può avvenire mediante le seguenti modifiche al precedente RTG di tipo MMRTG:

- Termocoppie in Skutterudite
- $T_h = 600^\circ\text{C}$
- Isolamento in Aerogel tra le termocoppie
- Aggiunta di uno strato di ossido all'esterno dei moduli di combustibile per aumentare l'emissività superficiale

Fig. 13 Confronto tra le termocoppie dell'MMRTG e dell'eMMRTG

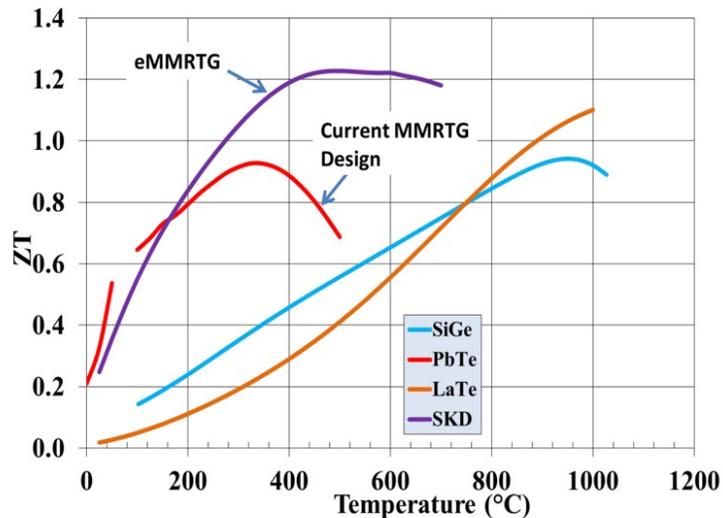


Fig. 14 Andamento del valore dello ZT rispetto alla temperatura

## Missione Dragonfly

La missione consiste nell'invio su Titano, una luna di Saturno, un drone alimentato da un RTG di tipo MMRTG

- All'arrivo su Titano saranno disponibili 70 Watt di potenza elettrica
- A bordo sono presenti batterie agli ioni di litio da 134 Ampere-ora
- Il volo sarà consentito dalle batterie ricaricate dall'MMRTG durante la notte
- Il calore di scarto dell'RTG sarà utilizzato per mantenere le batterie a una temperatura accettabile

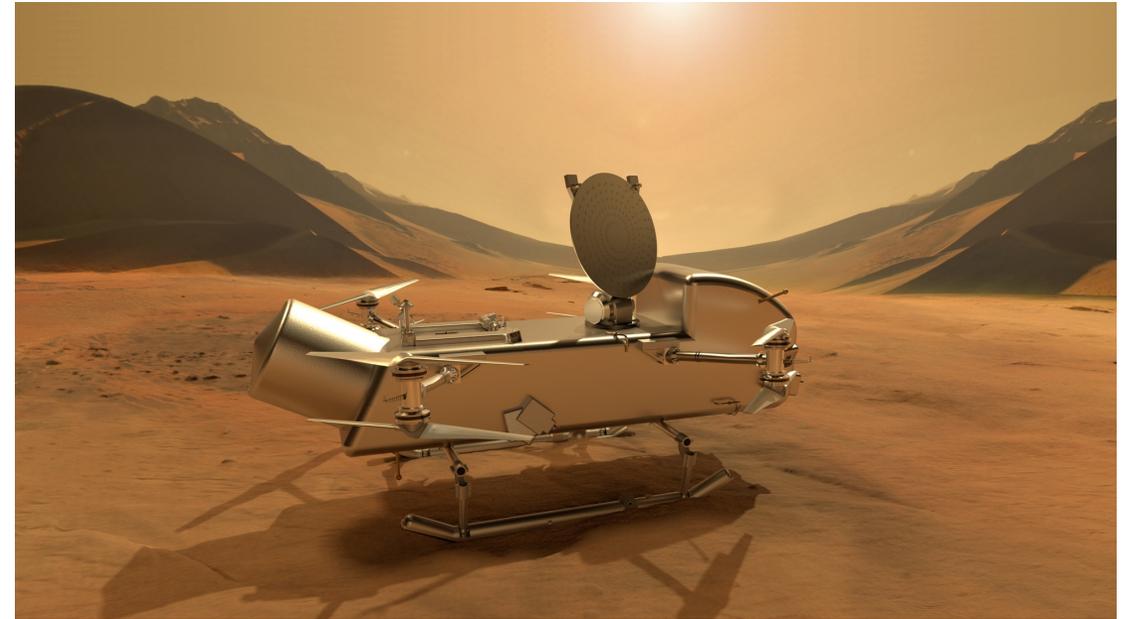


Fig. 15 Render di Dragonfly su Titano

Titano è un satellite naturale molto simile alla Terra nell'epoca della formazione della vita circa tre miliardi di anni fa, studiandone le caratteristiche è possibile capire come si sia formata la chimica prebiotica sul nostro pianeta

I generatori termoelettrici a radioisotopi (RTG) si sono dimostrati affidabili e duraturi, fornendo energia costante e continua in ambienti estremi dove altre fonti di energia non sono efficienti.

Grazie alla loro capacità di operare per decenni senza necessità di manutenzione, gli RTG ad oggi rappresentano l'unica soluzione energetica per missioni spaziali distanti dal sole e a lungo termine



Fig. 16 Plutone fotografato dalla sonda New Horizons

[Fig 1] mars.nasa.gov

[Fig 2] nasa.gov

[Fig 3] Hula, G. (2015). *Atomic Power in Space II: A history of space nuclear power and propulsion in the United States* (No. INL/EXT-15-34409-Rev000). Idaho National Laboratory (INL), Idaho Falls, ID (United States).

[Fig 4] Mound Science and Energy Museum

[Fig 5] <https://forums.sketchup.com/t/viking-75-mars-lander-fuel-tanks-and-other-components/137123/20?page=2>

[Fig 6] Nasa.gov

[Fig 7] Woerner, D. F. (Ed.). (2023). *The Technology of Discovery: Radioisotope Thermoelectric Generators and Thermoelectric Technologies for Space Exploration*. John Wiley & Sons.

[Fig 8] [https://digital.library.unt.edu/ark:/67531/metadc1019258/m2/1/high\\_res\\_d/4242405.pdf](https://digital.library.unt.edu/ark:/67531/metadc1019258/m2/1/high_res_d/4242405.pdf)

[Fig 9] eyes.nasa.gov

[Fig 10] <https://science.nasa.gov/mission/cassini/>

[Fig 11] [https://digital.library.unt.edu/ark:/67531/metadc1019258/m2/1/high\\_res\\_d/4242405.pdf](https://digital.library.unt.edu/ark:/67531/metadc1019258/m2/1/high_res_d/4242405.pdf)

[Fig 12] <https://science.nasa.gov>

[Fig 13] Holgate, T. C., Bennett, R., Hammel, T., Caillat, T., Keyser, S., & Sievers, B. (2015). Increasing the efficiency of the multi-mission radioisotope thermoelectric generator. *Journal of Electronic Materials*, 44, 1814-1821.

[Fig 14] Hammel, T., Bennett, R., & Sievers, B. (2016, March). Evolutionary upgrade for the multi-mission radioisotope thermoelectric generator (MMRTG). In *2016 IEEE Aerospace Conference* (pp. 1-8). IEEE.

[Fig 15] <https://science.nasa.gov/mission/dragonfly/>

[Fig 16] NASA/JHUAPL/SwRI