

Batterie NUCLEARI PER MISSIONI AEROSPAZIALI

Ing. Mario Caporale
Referente Area AEROSPAZIO
13 febbraio 2025

CONTENUTI

- Cosa sono le batterie nucleari per lo Spazio
- Limiti dei pannelli solari e vantaggi delle batterie nucleari
- La ricerca in quest'area tecnologica sta incrementando
- Il Generatore Termico a Radioisotopi RTG
- Cronistoria dell'uso degli RTG nello Spazio
- Potenze generate nelle batterie nucleari
- Autonomia delle batterie nucleari
- Il materiale radioattivo utilizzato
- Rischi e incidenti noti
- Schema tipo di una batteria nucleare
- Isotopi alternativi

Batterie NUCLEARI PER MISSIONI AEROSPAZIALI

Si tratta di dispositivi in grado di fornire una **potenza elettrica costante per anni**, anche per decenni, senza bisogno di essere ricaricati o sostituiti, essendo stabili in condizioni ambientali estreme (alte/basse temperature),
convertendo in elettricità l'energia dei decadimenti radioattivi di isotopi naturali o prodotti artificialmente.

LIMITI DEI PANNELLI SOLARI

I pannelli solari: la scelta più popolare per i veicoli spaziali che viaggiano all'interno del sistema solare.

Purtroppo l'intensità solare diminuisce secondo la legge dell'inverso del quadrato. Un veicolo due volte più lontano dal Sole riceverà solo un quarto dell'energia solare.

- Intorno alla Terra, circa **1374 Watt/m²** sono disponibili dalla luce solare,
- Vicino a Giove, **50 Watt/m²**,
- Vicino a Plutone, **1 Watt/m²**.

Più un veicolo spaziale è lontano dal sole, più grandi sono i pannelli solari che deve trasportare.

Gli aumenti richiesti nelle dimensioni e nella massa della sonda vanno ad aumentare di conseguenza il costo del lancio. Ecco quindi la necessità di ricorrere ad altre fonti di energia come le batterie nucleari.

VANTAGGI DELLE BATTERIE NUCLEARI

Le **batterie nucleari** hanno permesso di portare avanti tutte le attività delle missioni spaziali, dal **Pioneer 10** (lanciato nel 1972, che ha trasmesso informazioni fino al 2003) al **Curiosity** (lanciato nel 2011, e che è ancora attivo) all'attuale **Perseverance** che raccoglie e trasmette dati da Marte.

Le ricerche in questa area tecnologica stanno incrementando, grazie:

- alle interessanti prestazioni delle batterie nucleari,
- al sempre maggiore impegno in missioni spaziali da parte non solo di NASA ed ESA ma anche dei nuovi players nel settore spazio (Cina, India, Corea..) ,
- alle prospettive di un più esteso uso in applicazioni terrestri.

INCREMENTO DELLA RICERCA SULLE BATTERIE NUCLEARI

I brevetti depositati e le pubblicazioni scientifiche prodotte dal 2010 ad oggi indicano una **dinamica espansione del campo** evidenziando una crescente diversificazione dei sistemi per produzione di elettricità da fonti nucleari.

Si stanno realizzando differenti meccanismi di conversione (termici, voltaici, ibridi), differenti sorgenti radioattive e differenti materiali convertitori.

La distribuzione geografica dei brevetti indica il ruolo prevalente di USA e Cina, seguiti da Australia, Giappone e Korea.

IL GENERATORE TERMICO A RADIOISOTOPI RTG

Il **Generatore Termico a Radioisotopi (RTG)** è stato inventato nel **1954** dagli scienziati **Kenneth (Ken) C. Jordan (1921–2008)** e **John Birden (1918–2011)** del **Mound Laboratories (Ohio)**.

Il primo RTG lanciato nello spazio dagli Stati Uniti fu **SNAP 3B** nel **1961** alimentato da **96 grammi di plutonio-238 metallico**, a bordo della navicella spaziale **Navy Transit 4A**.

Uno dei primi usi terrestri degli RTG è stato nel **1966** da parte della Marina degli Stati Uniti a **Fairway Rock** una zona disabitata in **Alaska**. Gli RTG sono stati utilizzati in quel sito fino al **1995**.

(SNAP) Systems Nuclear Auxiliary Power

CRONISTORIA DELL'USO DEGLI RTG NELLO SPAZIO

Anni '60 e '70

1961: La NASA inizia a utilizzare batterie nucleari nei satelliti per fornire energia a lungo termine, nei programmi Transit, Nimbus III, LES 8 e 9 (Lincoln Experimental Satellite).

1972: La missione **Pioneer 10** utilizza una batteria nucleare al plutonio-238 (Pu-238) per alimentare i suoi strumenti. La batteria ha una potenza iniziale di circa 155 watt e ha permesso alla sonda di trasmettere dati fino al 2003.

Anni '80 e '90

1989: La missione **Galileo** utilizza batterie nucleari al plutonio-238 per esplorare Giove e le sue lune. La missione è durata fino al 2003.

Anni 2000

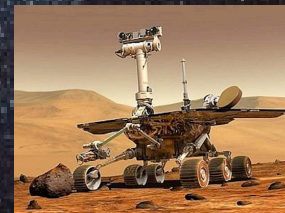
2006: La missione **New Horizons** utilizza una batteria nucleare al plutonio-238 per esplorare Plutone e la fascia di Kuiper. La sonda è ancora operativa.



CRONISTORIA DELL'USO DEGLI RTG NELLO SPAZIO cont.d

Anni 2010

2011: La missione **Curiosity**, un rover della NASA, utilizza una batteria nucleare al plutonio-238 per esplorare Marte. Il rover è ancora attivo e continua a trasmettere dati.



Anni 2020

2020: La missione **Perseverance**, un altro rover della NASA, utilizza una batteria nucleare al plutonio-238 per esplorare Marte. Il rover è attualmente operativo e raccoglie dati dal pianeta rosso.



2024: Viene sviluppata la **prima batteria nucleare al diamante**, che sfrutta il decadimento del **carbonio-14** per generare energia per migliaia di anni.



La prima batteria nucleare al diamante

Recentissimamente, un gruppo composto da ricercatrici e ricercatori dell'**Autorità per l'Energia Atomica del Regno Unito (UKAEA)** e dell'**Università di Bristol** ha prodotto il primo **diamante al carbonio-14** al mondo e ha realizzato con successo la **prima batteria nucleare al diamante** contenente questo isotopo.

La batteria al diamante con carbonio-14 genera energia sfruttando il decadimento radioattivo del carbonio-14, che ha un'**emivita di 5.700 anni**:



Questa nuova tecnologia ha il potenziale per diventare una fonte di energia estremamente duratura, particolarmente utile nei casi in cui la sostituzione delle batterie risulta complicata o comporta disagio.

$$1\text{g } ^{14}\text{C} \rightarrow 15 \text{ Joules /day} \quad \text{circa } 0,00018 \text{ W}$$

Energia per le future missioni lunari

Per le future missioni lunari, attualmente, i piani si concentrano principalmente sull'uso di **reattori nucleari** piuttosto che sulle sole batterie nucleari.

I reattori nucleari offrono una fonte di energia più stabile e continua, essenziale per le lunghe notti lunari di circa 14 giorni terrestri.

Tra i vari sviluppi, c'è il progetto italiano **SELENE (Sistema Energetico Lunare con l'Energia NuclearE)**, finanziato dall'Agenzia Spaziale Italiana (ASI) e condotto dall'ENEA, mira a sviluppare piccoli reattori nucleari a fissione per fornire energia ai futuri insediamenti lunari.

POTENZE GENERATE NELLE BATTERIE NUCLEARI

1. RTG (Radioisotope Thermoelectric Generators):

- **Pioneer 10 e 11:** Utilizzavano RTG al plutonio-238 con una potenza iniziale di circa **155 watt**.
- **Voyager 1 e 2:** Utilizzavano RTG al plutonio-238 con una potenza iniziale di circa **470 watt**.
- **Galileo:** Utilizzava RTG al plutonio-238 con una potenza iniziale di circa **570 watt**.
- **Cassini:** Utilizzava RTG al plutonio-238 con una potenza iniziale di circa **870 watt**.
- **Curiosity e Perseverance:** Utilizzano MMRTG (Multi-Mission Radioisotope Thermoelectric Generator) al plutonio-238 con una potenza iniziale di circa **110 watt**.

2. Batterie Betavoltaiche (sfruttano il decadimento β degli isotopi radioattivi):

- **Betavolt BB100:** Utilizza l'isotopo **nicel-63** e genera circa **100 microwatt** di potenza per 50 anni.

AUTONOMIA DELLE BATTERIE NUCLEARI

Autonomia :le batterie nucleari RTG hanno un'autonomia che può durare decenni.

- le sonde Voyager, lanciate nel 1977, stanno ancora trasmettendo dati grazie ai loro RTG, anche se la potenza è diminuita nel tempo.
- I generatori utilizzati su Curiosity e Perseverance hanno un'autonomia prevista di circa 14 anni, con una riduzione graduale della potenza nel tempo.
- Le batterie al diamante con carbonio-14 possono durare migliaia di anni, generando energia a bassa potenza per periodi estremamente lunghi.

IL MATERIALE RADIOATTIVO UTILIZZATO

Caratteristiche del materiale radioattivo utilizzato negli RTG:

- La sua emivita o «tempo di dimezzamento» deve essere sufficientemente lunga da rilasciare energia a un ritmo relativamente costante per un periodo di tempo ragionevole.
- La quantità di energia rilasciata per tempo (potenza) di una data quantità è inversamente proporzionale al tempo di dimezzamento. Un isotopo con il doppio dell'emivita e la stessa energia per decadimento rilascerà energia a metà della velocità per mole.
- Le emivite tipiche per i radioisotopi utilizzati negli RTG sono quindi di diverse decadi, sebbene gli isotopi con emivite più brevi possano essere utilizzati per applicazioni specializzate.

IL MATERIALE RADIOATTIVO UTILIZZATO cont.d

- Per l'uso nei voli spaziali, il carburante deve produrre una grande quantità di energia per massa e volume (densità).

L'energia di decadimento può essere calcolata se si conosce l'energia della radiazione radioattiva o la perdita di massa prima e dopo il decadimento radioattivo.

- Il rilascio di energia per decadimento è proporzionale alla produzione di energia per mole.

La radiazione deve essere di un tipo facilmente assorbibile e trasformato in radiazione termica, preferibilmente radiazione α .

La radiazione β può emettere una notevole radiazione γ /raggi X attraverso la produzione di radiazioni secondarie bremsstrahlung e quindi richiede una forte schermatura. Gli isotopi non devono produrre quantità significative di radiazioni gamma, neutroniche o radiazioni penetranti in generale attraverso altri modi di decadimento o prodotti a catena di decadimento.

IL MATERIALE RADIOATTIVO UTILIZZATO cont.d

I primi due criteri limitano il numero di possibili combustibili a meno di trenta isotopi atomici all'interno dell'intera tabella dei nuclidi.

Il plutonio-238, il curio-244 (^{244}Cm), lo stronzio-90 (^{90}Sr) e più recentemente l'**americio-241** sono gli isotopi candidati più spesso citati, ma altri 43 isotopi su circa 1.300 sono stati considerati all'inizio degli anni '50 .

Rischi per veicoli spaziali

Se si dovesse verificare un incidente durante il lancio o un successivo passaggio di un veicolo spaziale vicino alla Terra, il materiale dannoso potrebbe essere rilasciato nell'atmosfera.

Per ridurre al minimo il rischio di rilascio del materiale radioattivo, il combustibile viene immagazzinato in singole unità modulari con una propria schermatura termica. Sono circondati da uno strato di metallo iridio e racchiusi in blocchi di grafite ad alta resistenza.

Intorno ai blocchi di grafite c'è un **guscio aerodinamico**, progettato per proteggere l'intero gruppo dal calore del rientro nell'atmosfera terrestre.

Il combustibile al plutonio è inoltre immagazzinato in una **forma ceramica** resistente al calore, riducendo al minimo il rischio di vaporizzazione e aerosolizzazione. La ceramica è anche altamente insolubile.

INCIDENTI NOTI

Ci sono stati diversi incidenti noti che hanno coinvolto veicoli spaziali alimentati da RTG:

- Un lancio fallito il **21 aprile 1964** in cui il satellite di navigazione statunitense Transit-5BN-3 non riuscì a raggiungere l'orbita e bruciò al rientro a nord del Madagascar.

Il combustibile metallico al plutonio da 17.000 Ci (630 TBq) nel suo RTG SNAP-9a è stato espulso nell'atmosfera sopra l'emisfero australe, dove è bruciato, e tracce di plutonio-238 sono state rilevate nell'area pochi mesi dopo.

Questo incidente ha portato il Comitato di Sicurezza della NASA a richiedere il rientro intatto nei futuri lanci di RTG, il che a sua volta ha avuto un impatto sulla progettazione degli RTG in cantiere.

- Il satellite meteorologico **Nimbus B-1**: il lanciatore fu deliberatamente distrutto poco dopo il lancio il **21 maggio 1968** a causa della traiettoria irregolare. Il suo SNAP-19 RTG contenente biossido di plutonio relativamente inerte è stato recuperato intatto dal fondale marino nel Canale di Santa Barbara cinque mesi dopo e non è stata rilevata alcuna contaminazione ambientale.

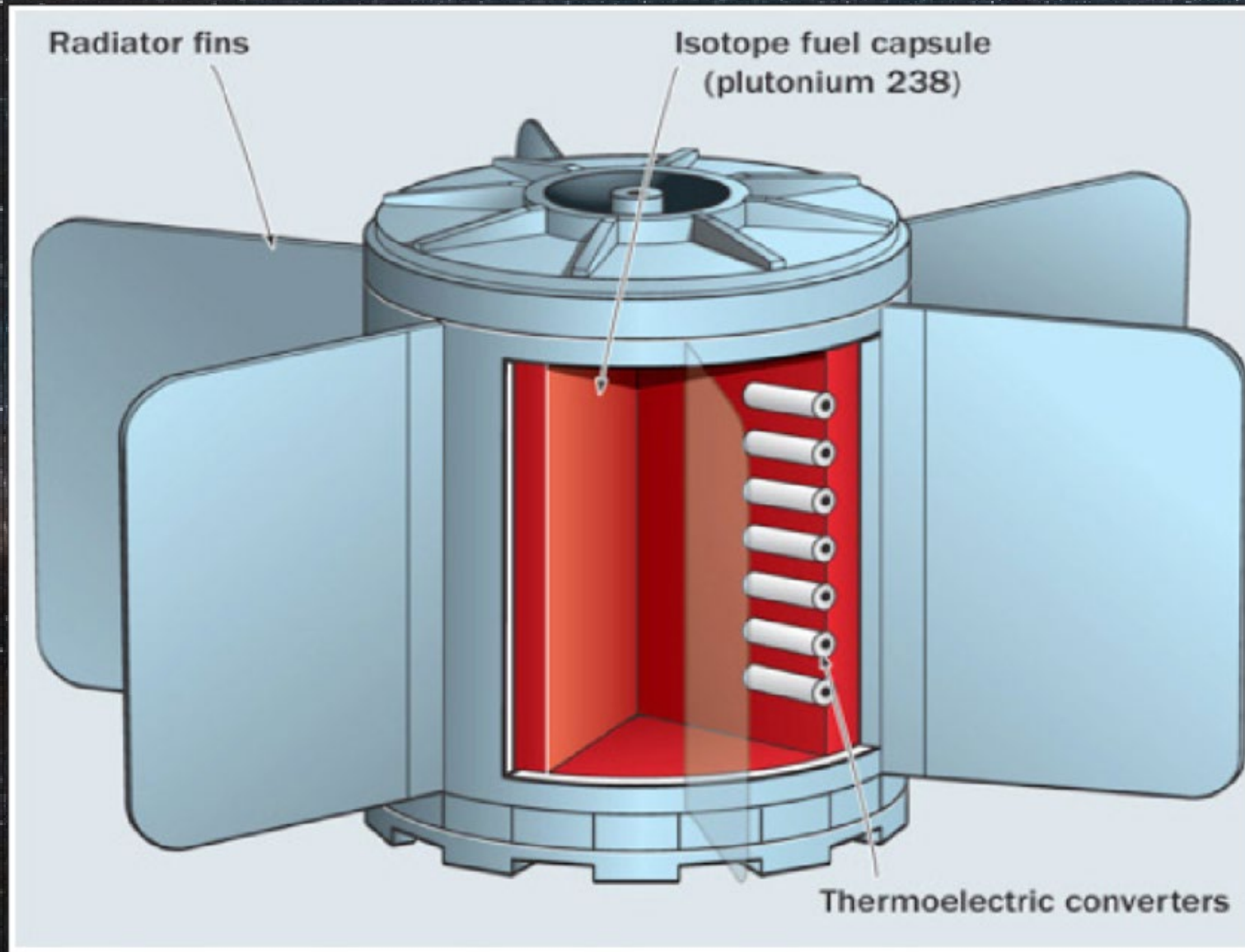
INCIDENTI NOTI cont.d

- Nel **1969** il lancio della prima missione del rover lunare Lunokhod fallì, diffondendo il polonio-210 su una vasta area della Russia.
- Il fallimento della missione Apollo 13 nell'**aprile 1970** significò che il modulo lunare rientrò nell'atmosfera trasportando un RTG e bruciò sopra le Figi.

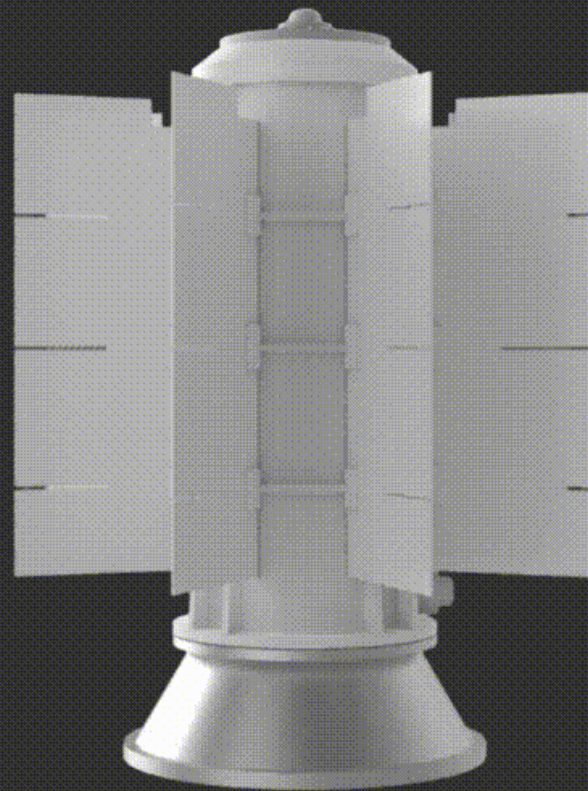
Trasportava uno SNAP-27 RTG contenente 44.500 Curies (1.650 TBq Tera-Becquerel) di biossido di plutonio in un barile di grafite sulla gamba del lander che sopravvisse intatto al rientro nell'atmosfera terrestre, come era stato progettato per fare, la traiettoria fu organizzata in modo da immergersi in 6-9 chilometri d'acqua nella fossa di Tonga nell'Oceano Pacifico. L'assenza di contaminazione da plutonio-238 nei campionamenti atmosferici e di acqua di mare ha confermato l'ipotesi che il barile sia intatto sul fondo marino. Questo incidente è servito a convalidare il design degli RTG di ultima generazione come altamente sicuri.
- Mars 96 è stato lanciato dalla Russia nel **1996**, ma non è riuscito a lasciare l'orbita terrestre ed è rientrato nell'atmosfera poche ore dopo.

I due RTG a bordo trasportavano in totale 200 g di plutonio e si presume che siano sopravvissuti al rientro come erano stati progettati. Si pensa che ora si trovino da qualche parte in una zona che corre da nord-est a sud-ovest lungo 320 km e largo 80 km, centrato a 32 km a est di Iquique, in Cile.

Componenti principali di un RTG



MMRTG: MULTI-MISSION RADIOISOTOPE THERMOELECTRIC GENERATOR



Struttura di una Batteria Nucleare NASA

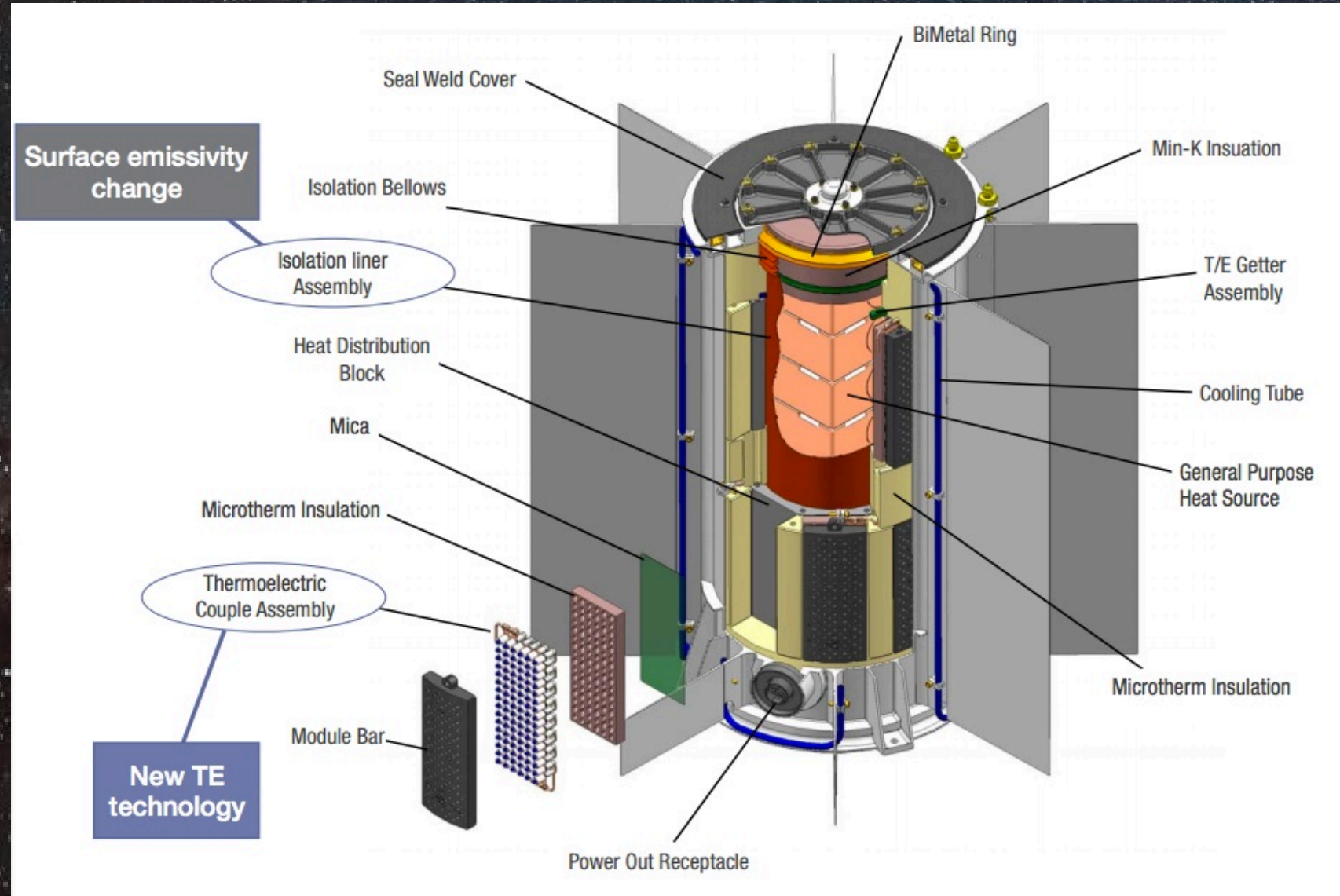
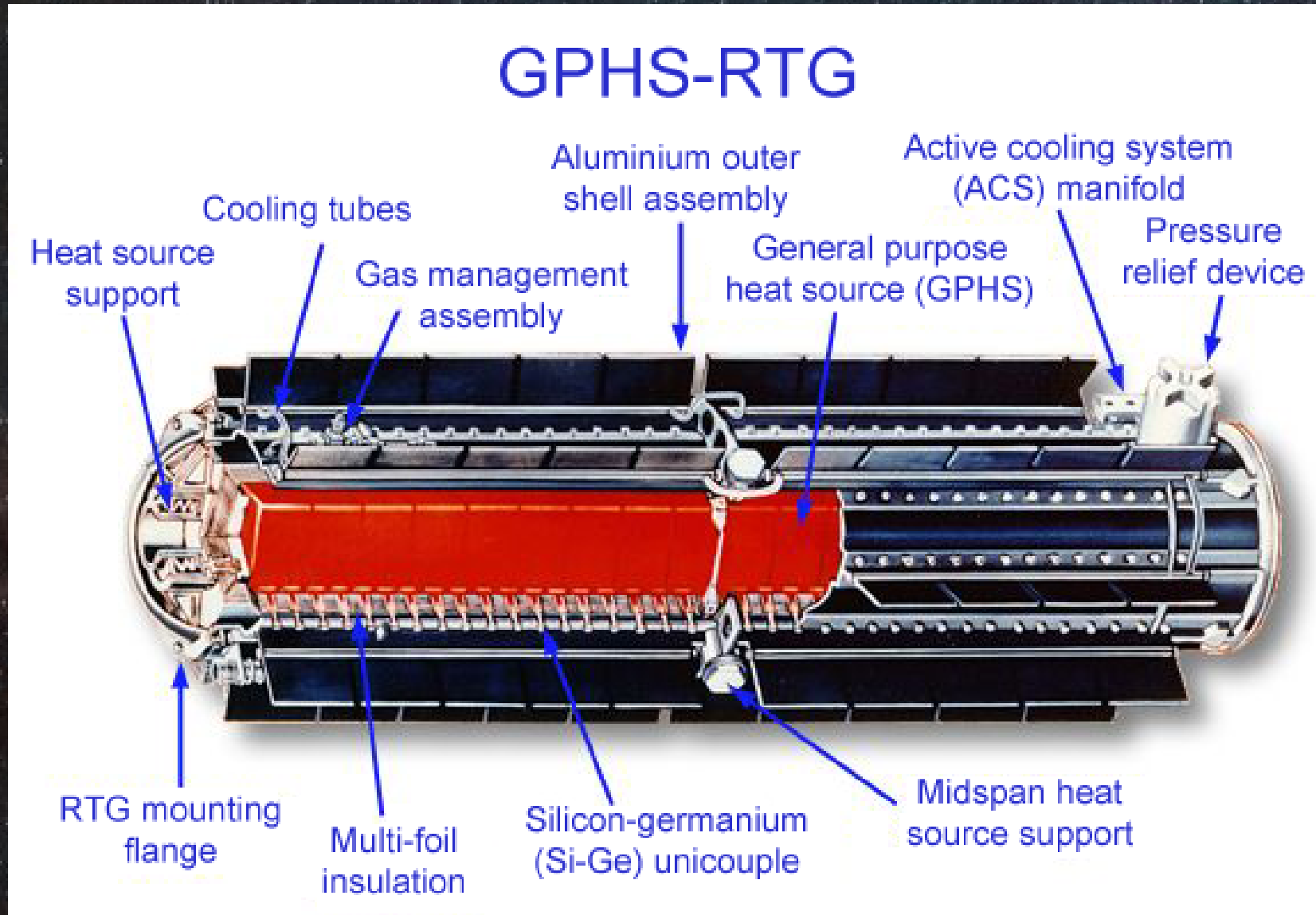
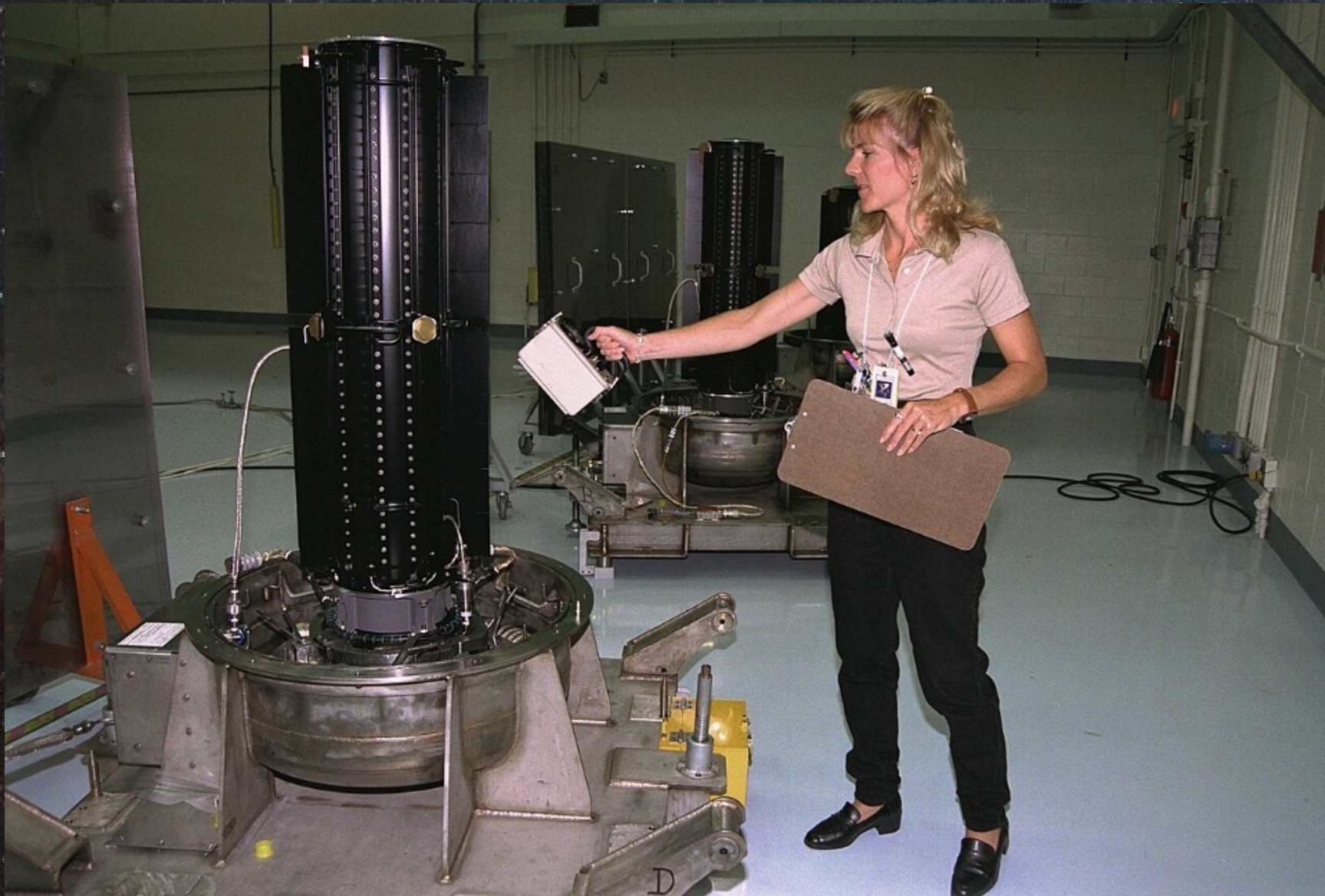


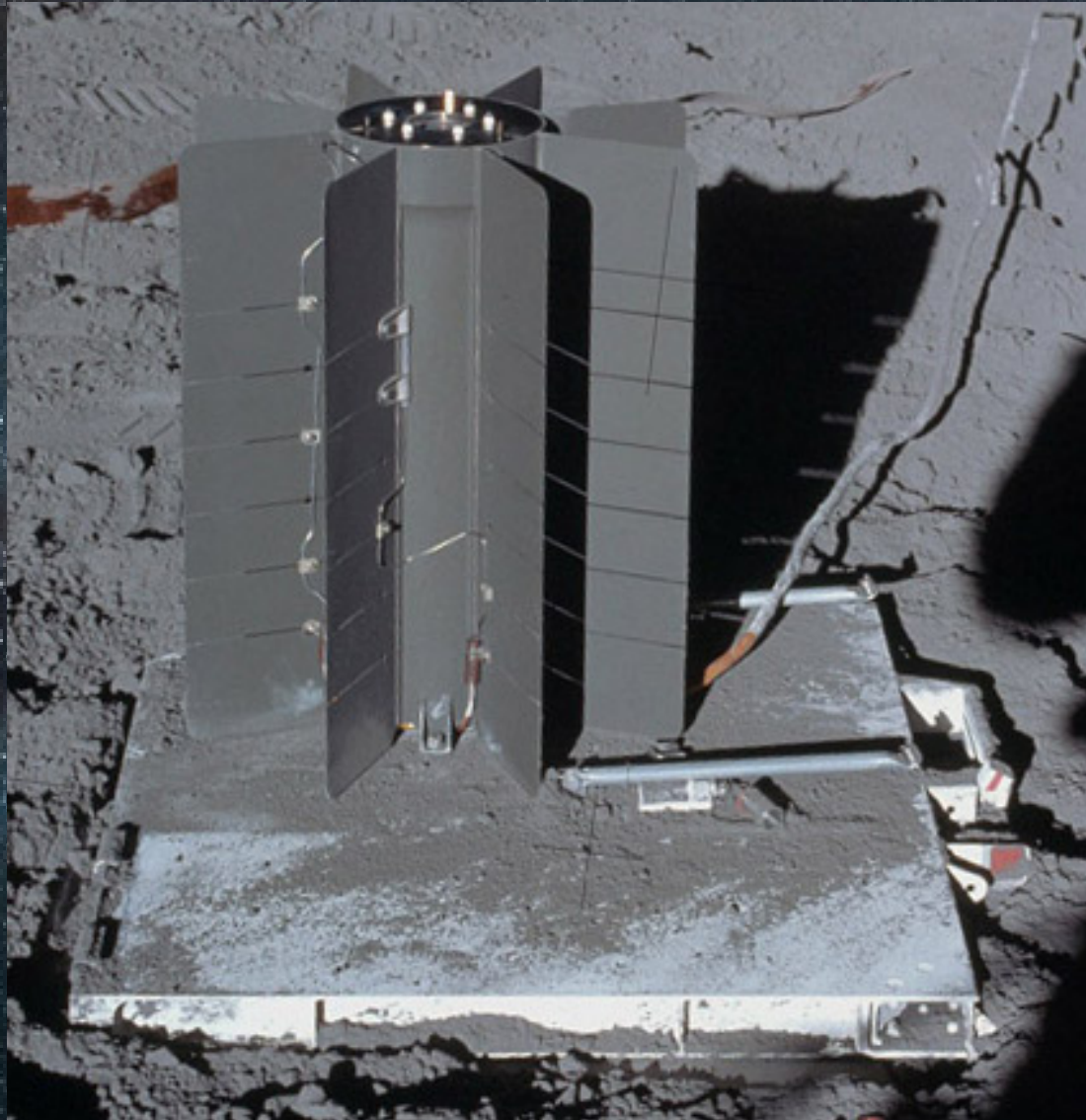
Diagramma del RTG usato sulla sonda Cassini



Ispezione degli RTG della sonda Cassini prima del lancio



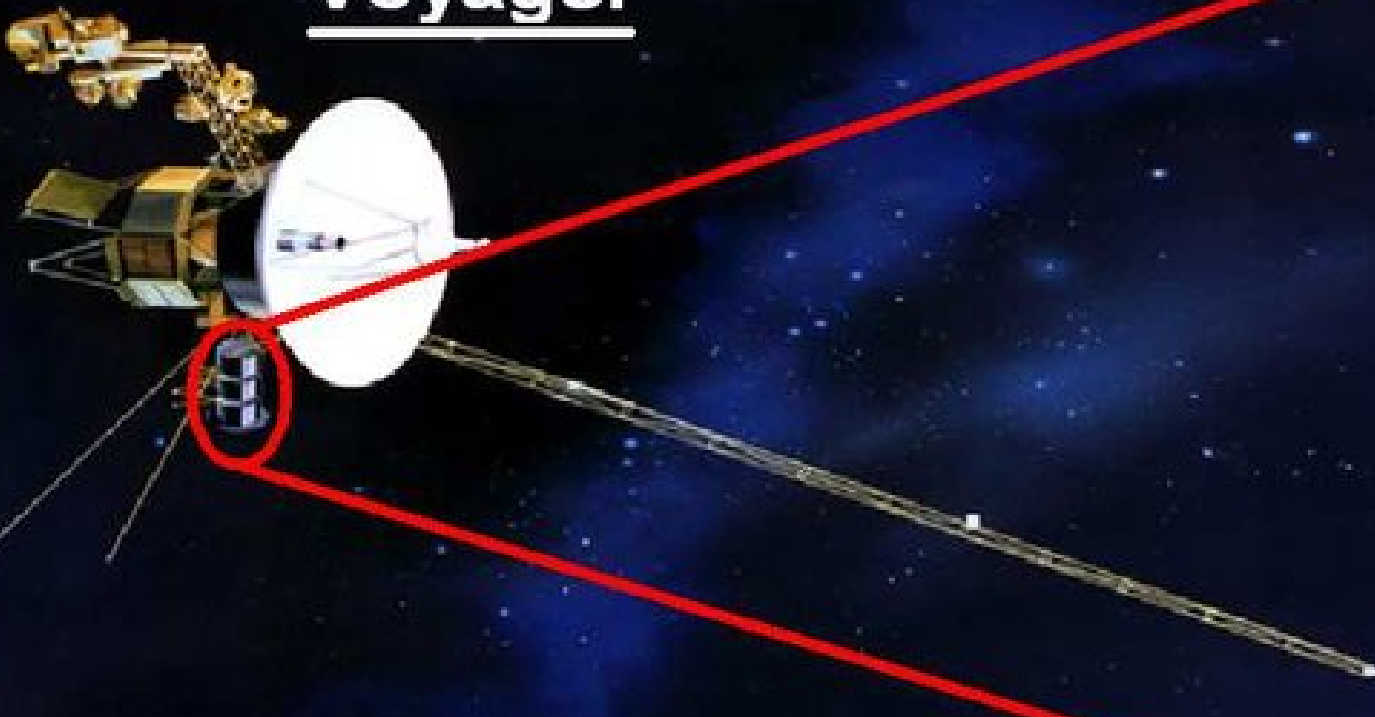
SNAP-27 sulla Luna



**Missioni
Apollo 12
e successive
dal 1969**

RTG usato nella missione spaziale Voyager space www.researchgate.net

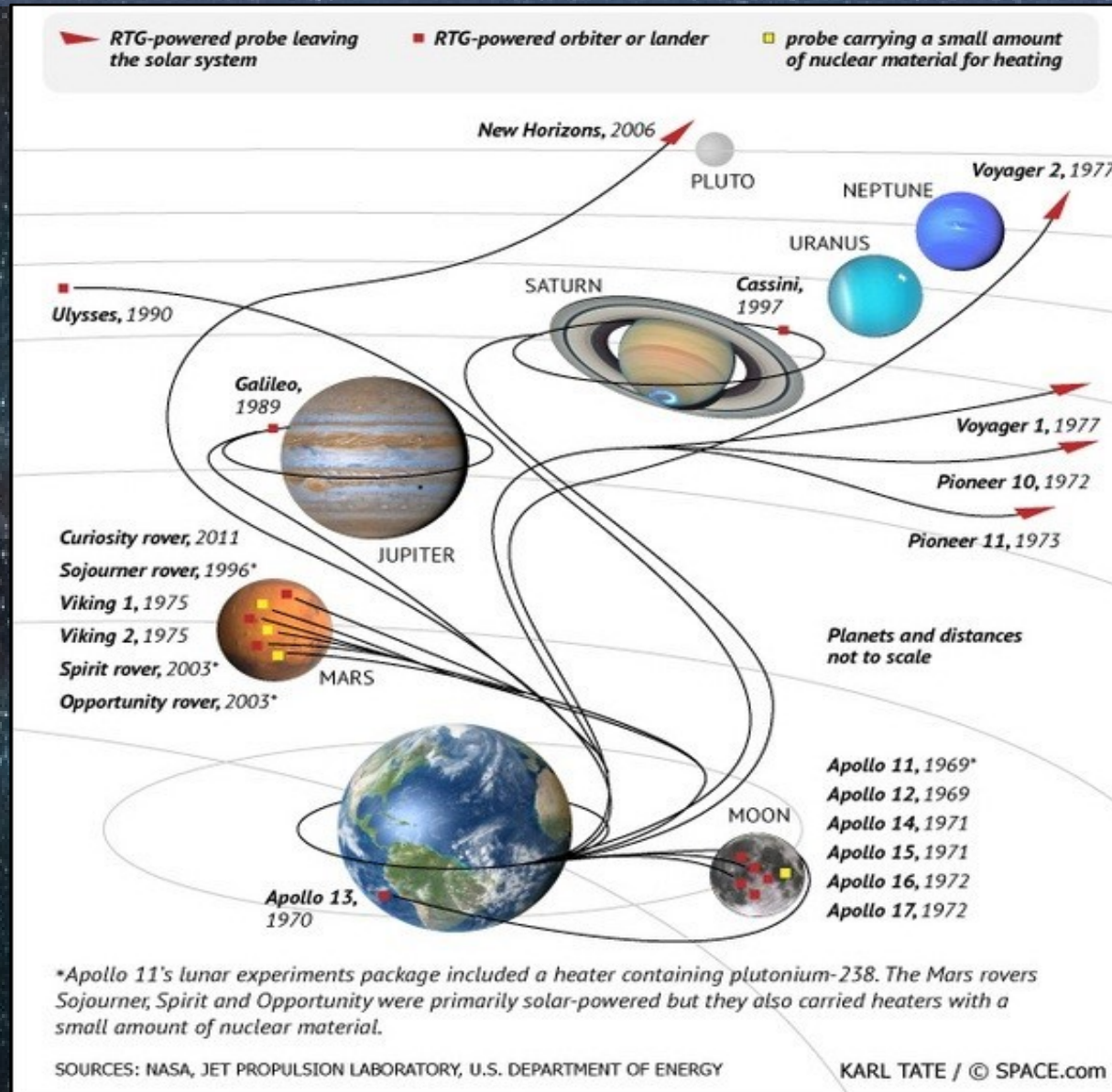
Voyager



RTG SNAP 27 | credit: Smithsonian National Air and Space Museum



NASA - missioni che trasportano RTG oltre l'orbita terrestre a partire dal 2014



ISOTOPI ALTERNATIVI

Il ^{238}Pu è stata storicamente la scelta più popolare, ma esistono radioisotopi alternativi.

Per essere efficaci negli RTG, queste alternative devono presentare le seguenti qualità:

1. Buona densità di potenza, per tenere conto delle basse efficienze di conversione dell'energia
2. Lunga emivita, per fornire una potenza utile per una lunga durata
3. Bassi requisiti di schermatura, per la sicurezza e per ridurre le interferenze con gli strumenti scientifici
4. Elevato rapporto potenza/massa, per ridurre la massa totale della missione

Il Plutonio ^{238}Pu soddisfa tutti e quattro questi requisiti, mentre alternative come lo stronzio-90, il polonio-210 (utilizzato nei vecchi RTG russi) e il curio-242/244 non sono all'altezza in una o più aree.

L'ALTERNATIVA PIÙ PROMETTENTE È L'AMERICIO-241

Favorito dall'Agenzia Spaziale Europea e attualmente utilizzato nei rilevatori di fumo e nei misuratori di umidità, il ^{241}Am è molto più abbondante perché è un sottoprodotto dei normali reattori nucleari piuttosto che delle raffinerie per armi.

Ha un'emivita di 432 anni rispetto agli 88 del ^{238}Pu , il che lo rende superiore nella categoria 2 di cui sopra.

D'altra parte, soffre nelle categorie 1 e 3: ha circa un quarto della densità di potenza di ^{238}Pu (0,15 Watt per grammo contro 0,56) ed emette alti livelli di radiazioni gamma, una forma di radiazioni ionizzanti più pericolosa di quella prodotta da ^{238}Pu .

Se, tuttavia, i futuri RTG riusciranno a migliorare l'efficienza compensando la ridotta densità di potenza del ^{241}Am , potrebbe diventare una fonte di combustibile più popolare.

mario.caporale68@gmail.com

GRAZIE !