

Università degli Studi di Padova – Dipartimento di Ingegneria Industriale

Corso di Laurea in Ingegneria Aerospaziale

Relazione per la prova finale
La propulsione termica nucleare per
viaggi interplanetari: stabilità e
sicurezza del sistema

Tutor universitario: Prof.ssa Bertani
Roberta

Laureando: *Segatto Mattia*

Padova, 16/03/2022

La propulsione gioca un ruolo fondamentale nel progetto di un sistema spaziale

- Razzo lanciatore: permette di raggiungere l'orbita operativa
- Sistema propulsivo di bordo: effettuare manovre correttive, modifica dell'assetto
- Un fallimento del sistema propulsivo nella fase di lancio porta inevitabilmente al fallimento dell'intera missione.

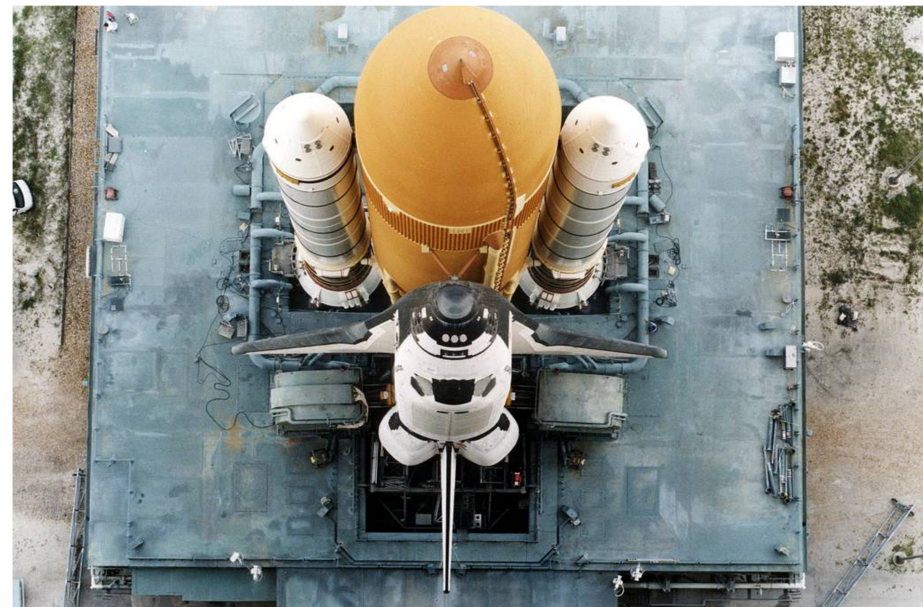


Fig. 1 Lo Shuttle Atlantis (NASA) sulla rampa di lancio nel 1996.

In questa relazione si vuole illustrare una particolare tipologia di propulsore spaziale: il razzo termico nucleare. Dopo una panoramica sul principio di funzionamento e la configurazione del motore, verranno esposte le problematiche in termini di sicurezza che questa tecnologia pone, nonché i grandi vantaggi che ne derivano dall'utilizzo.

Indice degli argomenti:

- **La propulsione spaziale**

1. *Principio fisico*
2. *Classificazione delle tecnologie propulsive*

- **La propulsione termica nucleare**

1. *Cenni sulla fissione nucleare*
2. *Configurazione del motore e proprietà*
3. *Stabilità, sicurezza e controllo*
4. *Applicazioni del motore termico nucleare*

Il **razzo** è un dispositivo che si spinge in avanti emettendo un getto di materia, il quale venendo espulso varia la propria quantità di moto.

- *Propellente*: materiale espulso, genericamente un fluido
- *Spinta*: la variazione della quantità di moto del propellente genera sul razzo, in base al principio di azione-reazione, la forza che lo muove in avanti e che sta alla base della propulsione
- *Equazione di Tsiolkovsky*

$$v = v_e \ln \frac{m_0}{m_f}$$

Dove

v : velocità finale del razzo

v_e : velocità del getto in corrispondenza dell'uscita dall'ugello

m_0 : massa iniziale del razzo

m_f : massa finale del razzo

- La velocità del razzo dipende dalla velocità di espulsione del propellente e dal *rapporto di massa*

$$R = \frac{m_0}{m_f}$$

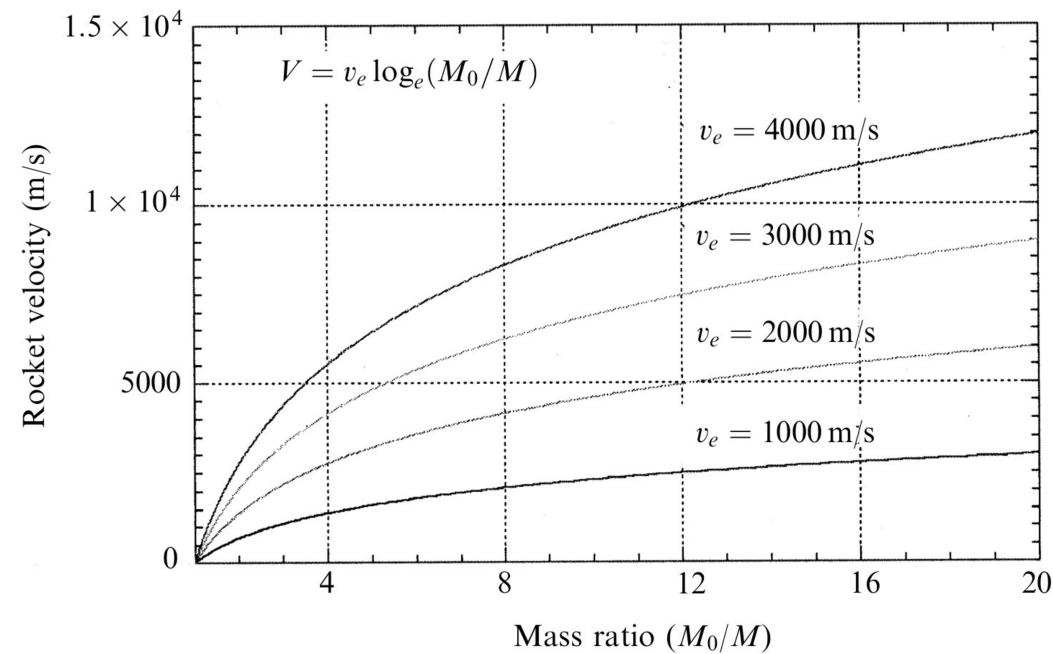


Fig. 2 velocità del razzo in funzione del rapporto di massa, in corrispondenza della velocità di espulsione del propellente.

- Per raggiungere grandi velocità è richiesto un grande rapporto di massa: la percentuale di propellente a bordo deve coprire la maggior parte della massa totale.

Parametri prestazionali chiave del razzo:

- **Impulso specifico**

$$I_{sp} = \frac{T}{\dot{m}_e g_0} \quad [s]$$

T spinta generata dal razzo, \dot{m}_e portata di massa del propellente espulso.

- **Velocità caratteristica**

$$c = \frac{p_1 A_t}{\dot{m}_e} \quad [m/s]$$

p_1 pressione nella camera di combustione, A_t l'area della gola.

Inoltre vale la relazione seguente

$$I_{sp} = \frac{C_F c}{g_0}$$

- **Propulsione chimica:** l'energia è fornita al propellente mediante una reazione di combustione. Il razzo chimico è storicamente il più impiegato. Si differenzia in base al tipo di propellente utilizzato: *liquido*, *solido* o *ibrido*.
- **Propulsione elettrica:** il fluido propulsivo viene riscaldato mediante energia elettrica, che può essere fornita da vari dispositivi, tra i quali si elencano
 - *Batterie*
 - *Celle a combustibile*
 - *Pannelli solari*
 - *RTG:* Generatori Termoelettrici a Radioisotopi. Sfruttano il decadimento radioattivo per produrre energia termica, che tramite l'effetto Seebeck viene poi convertita in elettrica.
- **Propulsione solare:** l'energia solare può essere utilizzata per riscaldare il propellente oppure per spingere delle vele solari, sfruttando la pressione della radiazione solare.
- **Propulsione nucleare:** sfrutta energia di tipo nucleare, questa può derivare
 - Da una reazione di *fissione*
 - Da una reazione di *fusione*.

Il **razzo termico nucleare** è un motore termico, nel quale il calore che riscalda il propellente viene fornito da una reazione di fissione nucleare.

- *Fissione*: assorbimento da parte di un nucleo di uranio di un neutrone, che causa la divisione del nucleo in due nuclei accompagnata dal rilascio di una quantità di energia di circa 200 MeV, la maggior parte della quale è presente sotto forma di energia cinetica nei due frammenti di fissione, con una porzione minore rilasciata sotto forma di raggi gamma.
- Mentre avviene la fissione del nucleo di uranio vengono emessi due o più neutroni. Questi possono colpire altri nuclei di uranio vicini, innescando una *reazione a catena* che provoca il rilascio continuo di energia.
- *Assorbitori*: il tasso di rilascio dell'energia dipende solamente dal flusso di neutroni, che viene controllato inserendo dei materiali che assorbono i neutroni.

Questa configurazione è alla base del *reattore nucleare*. L'energia cinetica contenuta nei frammenti di fissione è convertita in calore col rallentamento dei frammenti all'interno dell'uranio. Per sfruttare l'energia liberata dalla fissione è quindi sufficiente raffreddare l'uranio.

- Isotopi dell'uranio
 - U^{238} è il costituente maggiore ed è soggetto a fissione
 - U^{235} costituisce solo lo 0.72% dell'uranio totale, ma domina il processo di fissione.
- Necessità di avere una reazione auto-sostenibile:
 - Aumentare la percentuale di U^{235} nella matrice, in questo caso si parla di *uranio arricchito*. Processo complicato e costoso
 - *Moderatore*: tipicamente carbonio o acqua, rallenta i neutroni per dispersione anelastica, senza assorbirli. Può essere omogeneo o eterogeneo.
- L'uranio a basso tasso di arricchimento, è concentrato in barre, dette *barre di combustibile*.
- Raffreddamento: è necessario predisporre dei canali di passaggio del liquido refrigerante all'interno del reattore.
- Forma cilindrica.

- **Fattore k :** *fattore di moltiplicazione* oppure *costante di riproduzione*. Rappresenta il numero effettivo di neutroni che sopravvive alle principali cause di perdita e causa fissione in un altro nucleo
 - $k < 1$: non è possibile ottenere una reazione a catena
 - $k = 1$: livello critico (*criticalità*), produzione di calore stabile
 - $k > 1$: la reazione a catena progredisce incontrollata, fusione del reattore.
- **Barre di controllo:** materiali con alta capacità di assorbimento dei neutroni. La posizione delle barre di controllo nel reattore controlla la fissione.
- **Riflettore:** moderatore che riveste esternamente il reattore, limita ulteriormente la perdita di neutroni. Nei reattori per applicazioni spaziali sono implementati riflettori esterni con capacità di variare la propria capacità di riflessione per il controllo del flusso dei neutroni.

- Propellente: solitamente idrogeno liquido, entra nel motore e viene riscaldato mentre fluisce tra le barre di uranio del nucleo
- Il gas caldo si espande all'interno di un *ugello* convergente-divergente, dal quale viene poi espulso ad alta velocità generando la spinta
- Nucleo del reattore: l'uranio puro fonde a 1400 K. La massima spinta ottenibile dipende dalla massima temperatura dell'idrogeno in entrata nell'ugello. Si scelgono come materiali del nucleo dei *composti dell'uranio*
 - diossido di uranio UO_2 (punto di fusione 3075 K)
 - carburo di uranio UC_2 (punto di fusione 2670 K)
 - nitrato di uranio U_2N_3 (punto di fusione 3160 K).

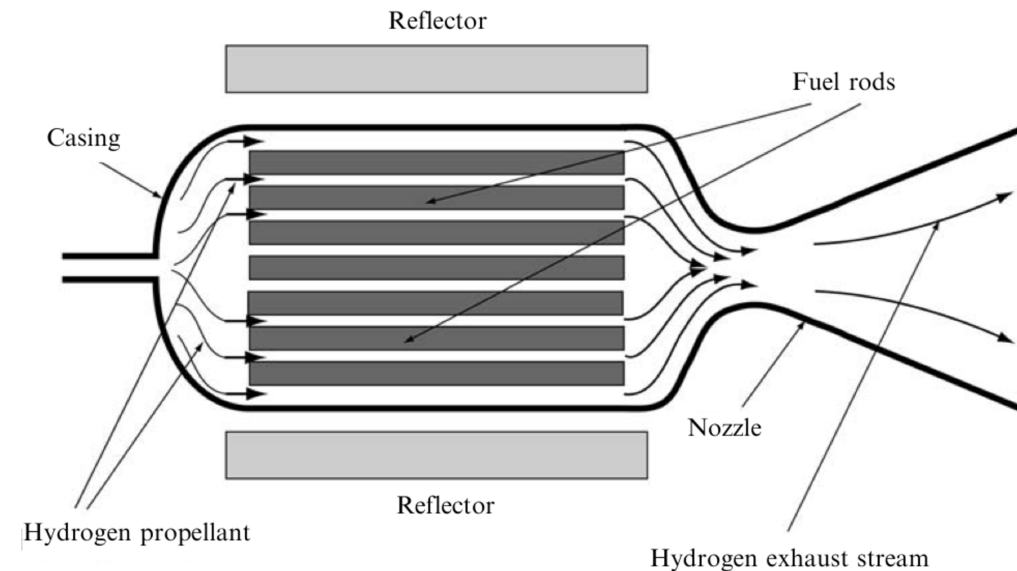


Fig. 3 schema funzionale del motore a fissione.

- Velocità di uscita dall'ugello dei gas di scarico di un motore nucleare a idrogeno liquido

$$v_e = C_F \cdot 1.54 \sqrt{\frac{8.13 \times 10^3 T_c}{M}}$$

C_F dipende dalle proprietà dell'ugello (per propulsori spaziali solitamente è pari a 1.85)

T_c temperatura di uscita dell'idrogeno

M peso molecolare del propellente, per l'idrogeno è pari a 2

- Reattore KIWI (NASA): $T_c = 2330 \text{ K}$, $v_e = 8768 \text{ m/s}$
- Aumentare la temperatura media del "combustibile" nucleare
 - utilizzando dei composti di uranio e carbonio può essere migliorata la conduttività del materiale delle barre di combustibile
 - Ottimizzare la distribuzione del materiale fissile e il flusso di elettroni.

Parameters	NRX XE	NERVA 1	New designs based on NERVA		
Fuel rods	UO ₂ beads embedded in graphite	UO ₂ beads ZrC coat, embedded in graphite	UC ₂ + ZrC + C composite	UC ₂ + ZrC all carbide	UC ₂ + ZrC + NbC all carbide
Moderator	Graphite	Graphite + ZrH	Graphite + ZrH	Graphite + ZrH	Graphite + ZrH
Reactor vessel	Aluminum	High-strength steel	High-strength steel	High-strength steel	High-strength steel
Pressure (bar)	30	67	67	67	67
Nozzle expansion ratio	100 : 1	500 : 1	500 : 1	500 : 1	500 : 1
I_{sp} (s)	710	890	925	1,020	1,080
Chamber temperature (K)	2,270	2,500	2,700	3,100	3,300
Thrust (kN)	250	334	334	334	334
Reactor power (MW)	1,120	1,520	1,613	1,787	1,877

Fig. 4 Configurazioni dei motori a fissione del progetto NERVA (NASA), dal 1964 al 1972. NRX XE e NERVA 1 furono sviluppati durante il progetto, le ultime tre colonne si riferiscono a evoluzioni di questi motori in fase di studio.

Accensione e spegnimento

- Accensione: reattore in condizione super-critica. In poche decine di secondi la produzione di potenza del reattore aumenta.
- Dopo la fase di accensione, si porta il reattore alla condizione critica mediante rotazione delle barre di controllo
- Spegnimento: molto complicato. Allo spegnimento del reattore:
 - Una certa quantità di potenza continuerà ad essere prodotta a causa della presenza di “neutroni di ritardo” (prodotti di fissione intermedi)
 - I raggi gamma prodotti dalla fissione continuano ad essere emessi a lungo dopo lo spegnimento.

A causa di questi fenomeni, il combustibile nucleare appena spento è molto pericoloso. Le barre di controllo dovranno essere raffreddate dall'idrogeno anche dopo lo spegnimento, l'efficienza globale del motore risulta ridotta.

Nel circuito di controllo devono essere inclusi dei sistemi *fail-safe* per prevenire il surriscaldamento del reattore a causa di una diminuzione intensa della portata di propellente.

Controllo della reazione di fissione nucleare: barre di controllo cilindriche divise assialmente in due metà

- assorbitore di neutroni ad alta efficienza
- moderatore
- Vengono ruotate mediante attuatori idraulici o elettrici. La loro rotazione permette di variare il coefficiente k , tenendo sotto controllo il processo di fissione che alimenta il motore
- Al lancio i cilindri controllori devono essere bloccati nella posizione di spegnimento del motore, potranno essere rimossi in sicurezza solamente quando il propulsore sarà in orbita.

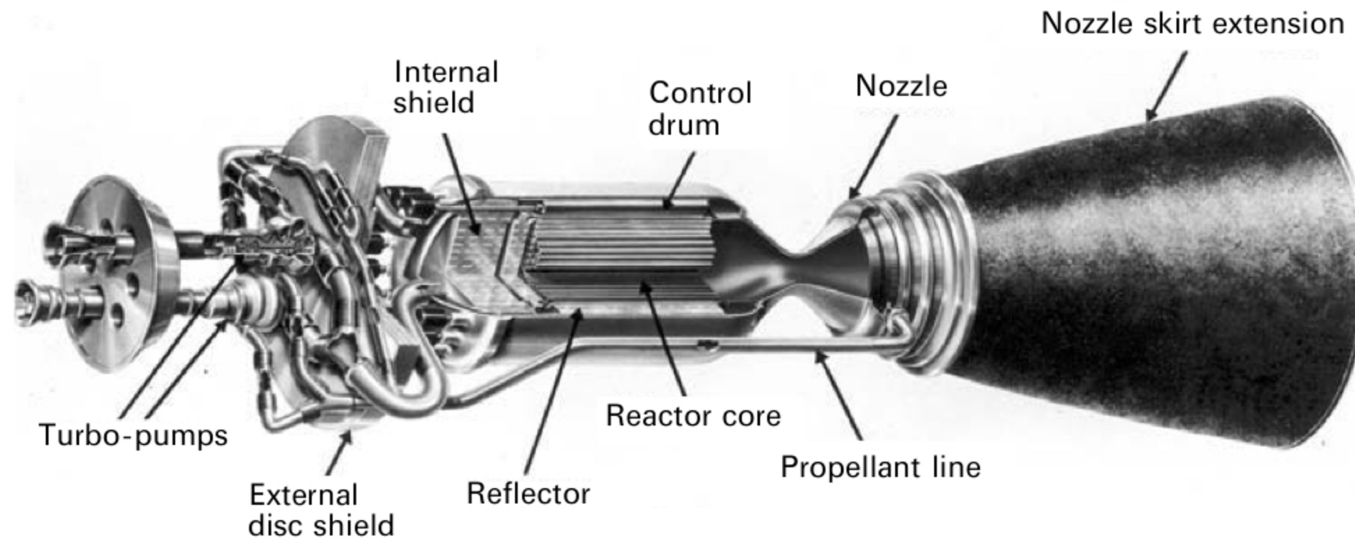


Fig. 5 sezione del motore nucleare NERVA (NASA). Si notino le schermature interna ed esterna, nonché il nucleo del reattore, le barre di controllo e i riflettori.

Gestione delle radiazioni

- Il razzo nucleare deve essere lanciato in uno stato “vergine”, e la sua accensione deve avvenire nello spazio, in un’orbita sufficientemente alta e che renda improbabile il ritorno alla Terra per cause accidentali.
- Dei 200 MeV prodotti da una reazione di fissione, circa 12 di questi sono dovuti all’emissione di raggi gamma. Il raffreddamento è importante per mantenere le condizioni operative degli elementi strutturali. Anche il riflettore e il guscio del motore devono essere raffreddati.
- Durante il funzionamento del motore eventuali esseri umani a bordo del veicolo e componenti elettronici devono essere adeguatamente protetti. Tale protezione è di natura passiva tramite *schermatura*: a monte del motore vengono montati più dischi di materiale ad alta densità in grado di schermare le radiazioni.

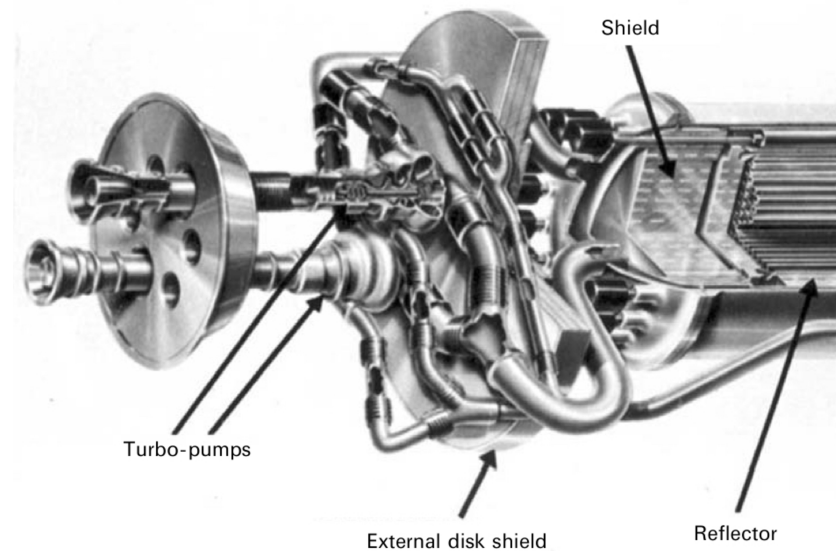


Fig. 6 schermatura esterna del motore

- Rendimento del propellente

$$\frac{M_F}{M} = e^{\frac{v}{v_e}} - 1$$

- Per missioni che richiedono grandi incrementi di velocità, un aumento della velocità di espulsione dei gas di scarico comporta una notevole diminuzione del propellente richiesto
- *Esempio*: inserimento in un'orbita di trasferimento verso Marte
 - velocità richiesta pari a 11 km/s
 - motore nucleare fornisce $v_e = 9 \text{ km/s}$ al costo di circa 2.4 kg di propellente per kg di payload da trasportare
 - razzo chimico tradizionale: $v_e = 4,55 \text{ km/s}$ al costo di 10 kg di propellente per 1 kg di payload.
- Spinta generata nell'ordine delle centinaia di kilo-Newton
 - propulsore elettrico con motore a ioni: circa 169 giorni per raggiungere la velocità di 11 km/s
 - motore nucleare: raggiunge la stessa velocità in due ore, in virtù della grande spinta sviluppata. Rispetto al motore a ioni (0.73 kg per kg di payload) ha una richiesta in termini di propellente più esosa, ma il tempo necessario all'inserimento è di molto inferiore.

- **Manovre di trasferimento interplanetarie più efficienti:** sempre prendendo come riferimento un'orbita di trasferimento ellittica verso Marte, la totale variazione di velocità richiesta è pari a circa 33 km/s. Un propulsore termico nucleare fornisce questo grande ΔV in breve tempo e usando una quantità di propellente ragionevole, limitando i costi e gli ingombri.
 - Il razzo in questo caso è pensato come un booster.



Fig. 7 struttura di testing del motore NERVA, NASA; dal 1964 al 1965. Ad oggi risulta l'unico test condotto a terra.

- **Viaggi interplanetari più veloci:** l'utilizzo di un motore a fissione permette di aumentare sensibilmente la velocità del veicolo, può essere aumentata l'eccentricità dell'orbita di trasferimento; in modo tale che il sistema intercetti l'orbita di Marte in un tempo minore.

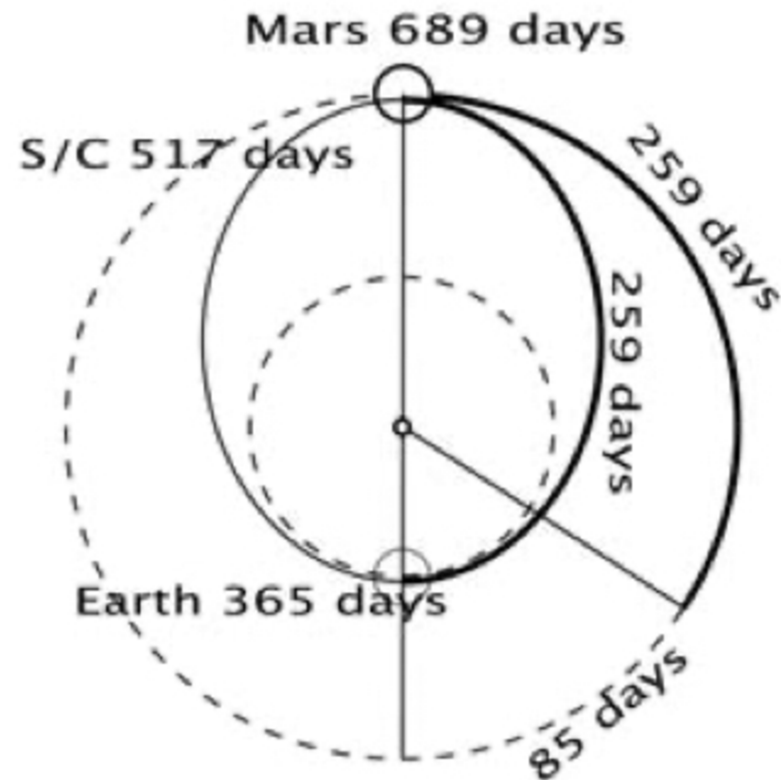


Fig. 8 orbita di trasferimento di Hohmann per Marte a minima energia. Il motore a fissione permette l'ingresso in soli 85 giorni.

È probabile che nel futuro assisteremo a una missione che sfrutta un propulsore nucleare.
Tuttavia vi sono ancora molte problematiche da risolvere:

- è assolutamente vietato testare un motore a fissione in atmosfera
- miglioramento dell'affidabilità dei dispositivi *fail-safe*
- dismissione del razzo
- l'opinione pubblica tende a guardare con diffidenza a tutto ciò che ha a che fare con l'energia nucleare
- resistenza degli organi governativi.