

Università degli Studi di Padova – Dipartimento di Ingegneria Industriale

Corso di Laurea in Ingegneria Aerospaziale

***Relazione per la prova finale
«L'oggi e il domani della
propulsione»***

Tutor universitario: Prof.ssa Roberta Bertani

Padova, 23/11/2023

Laureanda: *Gaia Brizzolari*

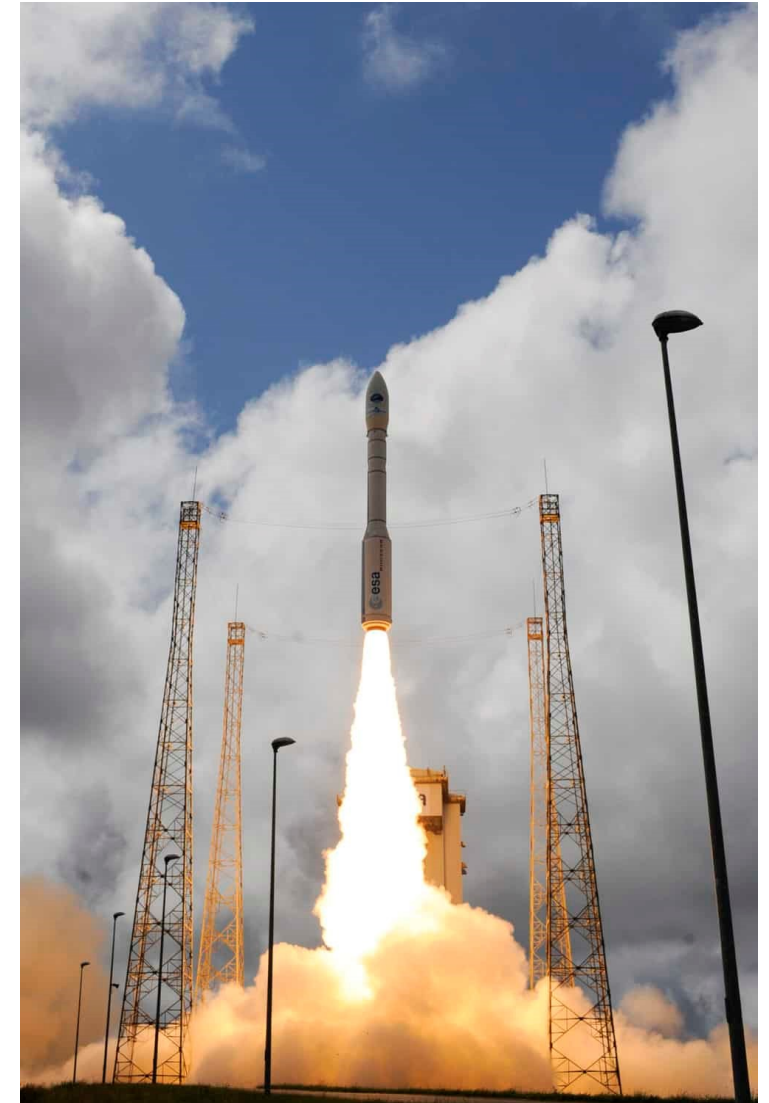
Il sistema fondamentale per la propulsione spaziale è la propulsione a razzo .

La **PROPULSIONE A RAZZO** sfrutta il principio contenuto nella terza legge del moto di Newton, secondo cui ad ogni azione corrisponde una reazione uguale ed opposta. Nei motori a reazione infatti l'espulsione dei gas ad alta velocità dall'ugello genera una spinta in direzione opposta e questo spinge il veicolo spaziale in avanti.

CLASSIFICAZIONE

I sistemi di propulsione a razzo sono classificabili secondo i seguenti criteri:

- le fonti di energia (chimica, nucleare o solare)
- il tipo di veicolo
- le dimensioni
- il tipo di propellente
- il tipo di costruzione
- ecc..



Le **prestazioni di un razzo** sono misurabili in base alla capacità del razzo di modificare l'entità della sua velocità in una data direzione mediante l'espulsione di massa ad una velocità caratteristica.

Variazione della velocità (equazione del razzo) →



SPINTA →

$$F = v_e \frac{dM}{dt} + A_e(p_e - p_a)$$

IMPULSO SPECIFICO: è il rapporto tra la spinta e la perdita di peso. Indica la spinta generata dal sistema di propulsione per unità di flusso di massa di propellente consumato ed è misurato in secondi

Per i razzi chimici l'impulso specifico è:

$$I_{sp} = \frac{F}{g\dot{M}}$$

$$I_{sp} = K \sqrt{\frac{T_c}{\mu}}$$

VELOCITA' CARATTERISTICA : $I_{sp} \cdot g_0$ →

$$\Delta v = I_{sp} g_0 \ln \frac{m_i}{m_f}$$

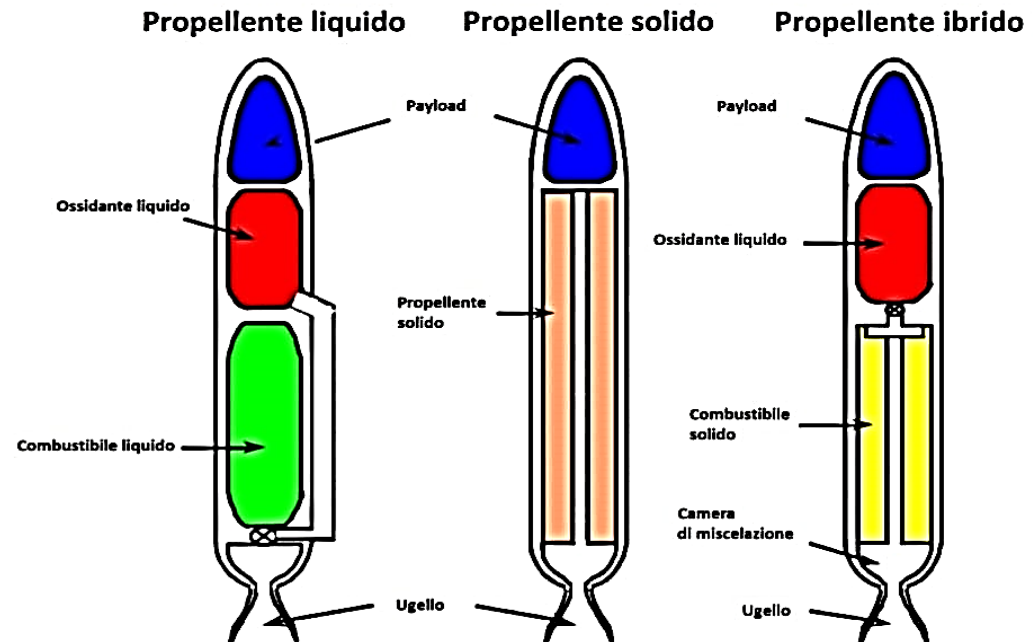
Come funziona:

Viene generata energia grazie ad una reazione di combustione ad alta pressione di propellenti chimici. Quest'ultimi sono costituiti di solito da un combustibile (idrogeno o cherosene) e da una sostanza chimica ossidante che fornisce l'ossigeno necessario per innescare la reazione di combustione.

L'energia generata viene poi utilizzata per riscaldare i prodotti della reazione di combustione a temperature molto elevate (da 2500 a 4100°C).

La reazione di combustione genera calore e gas ad alta pressione, il gas successivamente viene espanso in un ugello ed accelerato ad alte velocità (1800 to 4300 m/sec).

Poiché le temperature del gas sono circa due volte il punto di fusione dell'acciaio è necessario raffreddare o isolare tutte le superfici che sono esposte ai gas caldi.



Tipi di motori a razzo in base allo stato fisico con il quale sono immagazzinati i propellenti:

- 1) MOTORI A RAZZO A **PROPELENTE LIQUIDO**
- 2) MOTORI A RAZZO A **PROPELENTE SOLIDO**
- 3) MOTORI A RAZZO A **PROPELENTE IBRIDO** (sono meno usati dei due precedenti)

Il sistema propulsivo maggiormente usato è il motore a razzo a propellente liquido. Esso è generalmente costituito dalle seguenti parti:

1) **Serbatoio di propellente** : come combustibile di solito viene usato il cherosene e come ossidante l'ossigeno liquido.

2) **Sistema di alimentazione** :

- sistema a gas pressurizzante o turbopompe
- Condotti di alimentazione
- valvole

3) **Camera di spinta** ove i propellenti vengono mescolati , bruciati nella camera di combustione e poi accelerati.

PROPELLENTI LIQUIDI :

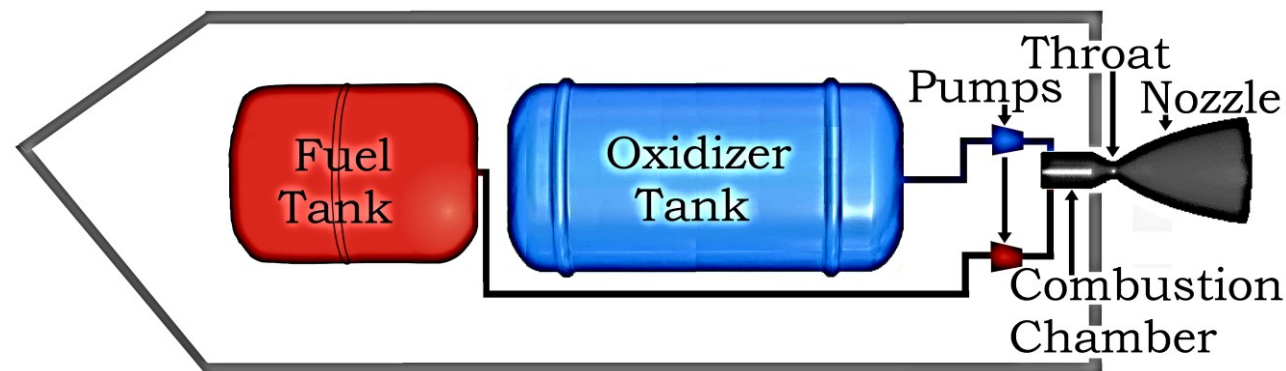
- 1) **BIPROPELLENTI**: il combustibile e l'ossidante sono stivati separatamente
- 2) **MONOPROPELENTE**: utilizza solo un liquido che si decompone in gas caldo in presenza di opportuni catalizzatori. Tale liquido è di solito l' idrazina.

Combustibili principali:

- Idrocarburi
- Idrogeno
- Idrazina N_2H_4

Ossidanti principali:

- Ossigeno
- Fluoro
- Acido Nitrico HNO_3



La peculiare funzione dei sistemi di alimentazione è quella di immettere i propellenti nella camera di spinta .
Si usano due tipi di sistemi di alimentazione.

SISTEMA A GAS PRESSURIZZANTE

Il gas viene stivato ad alta pressione (per es. l'elio) e attraverso delle valvole opportunamente regolate innalza e mantiene costante la pressione nei serbatoi e spinge i propellenti verso la camera di combustione.

SVANTAGGI: all'aumentare della pressione desiderata nella camera di combustione i serbatoi diventano più pesanti

VANTAGGI: questo sistema è meno complesso delle turbopompe ed inoltre è un sistema semplice e presenta costi modesti.

SISTEMA A TURBOPOMPE

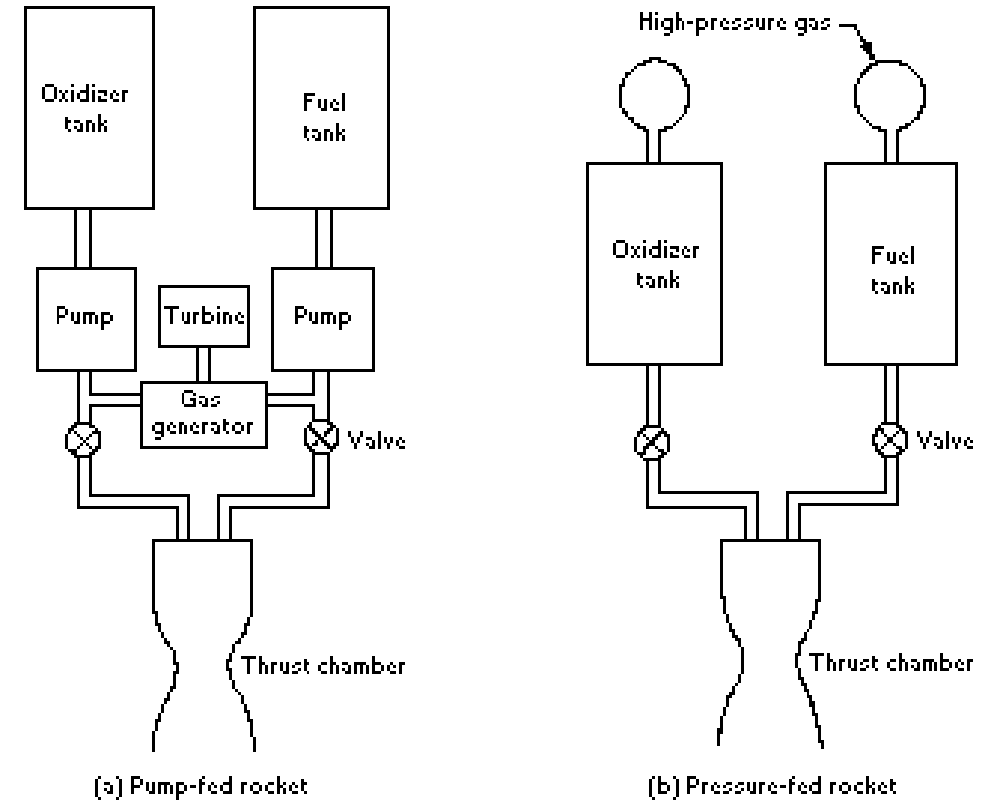
È costituito da un sistema di turbopompe che innalza la pressione dei propellenti a valle dei serbatoi prima di immetterli nella camera di combustione.

In genere ho una turbina che muove due pompe calettate sullo stesso albero.

La turbina genera potenza grazie all'espansione di un gas caldo prodotto da un generatore di gas.

SVANTAGGI: sistema più complesso, ci sono rischi di malfunzionamento.

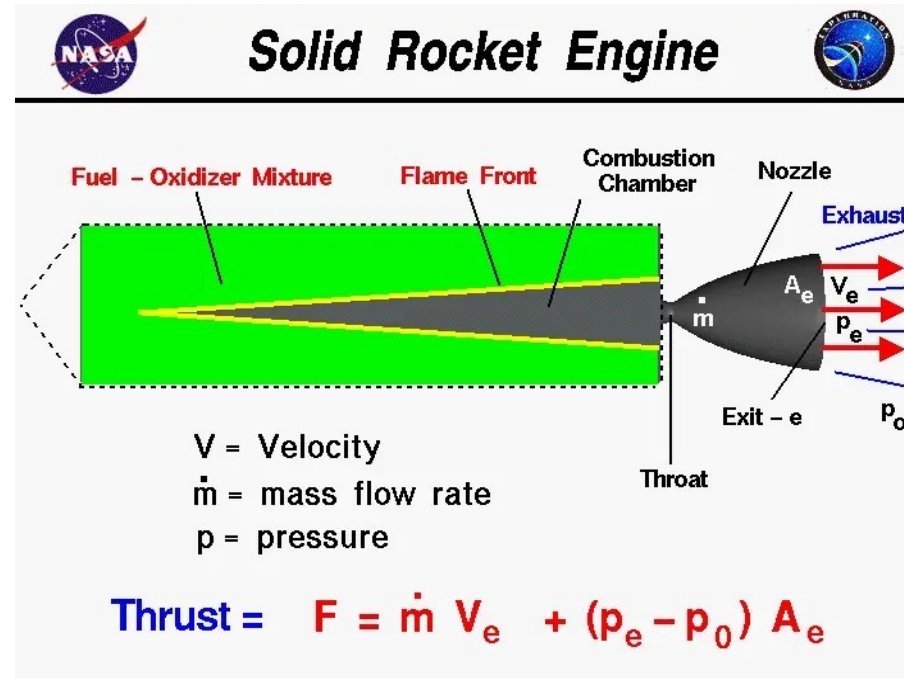
VANTAGGI: serbatoi più leggeri



I motori a razzo a propellente solido utilizzano una combinazione di combustibile e ossidante chiamato "**grain**" (perché si presenta in forma di grani).

ELEMENTI PRINCIPALI

- 1) **Camera di combustione:** cilindrica (a volte sferica).
- 2) **Ignitore:** dispositivo necessario per l'accensione costituito da carica esplosiva. Quest'ultimo genera gas ad alta pressione e temperatura che fuoriescono da uno o più ugelli e innescano la combustione sulla superficie del propellente solido.
- 3) **Ugello :** converte energia termica dei gas in uscita in energia cinetica



FUNZIONAMENTO: il propellente solido è contenuto nella camera di combustione e la reazione inizia grazie all'ignitore. Dopo essere stata innescata la reazione di combustione si propaga lungo la superficie scoperta del propellente e i gas prodotti ad alte temperature vengono espansi nell'ugello ed espulsi ad alte velocità in modo da generare spinta propulsiva.

VANTAGGI:

- sono motori di facile utilizzo e particolarmente affidabili
- sono motori di facile costruzione perché non presentano turbopompe o sistemi di alimentazione complicati.
- il propellente può rimanere immagazzinato per molto tempo nella camera di combustione ed è sempre pronto per essere utilizzato.
- la spinta raggiunge valori elevati perché i propellenti solidi hanno una densità più alta.
- economicamente convenienti
- presentano delle dimensioni abbastanza contenute perché il propellente solido ha volume specifico abbastanza basso (densità alta)

SVANTAGGI:

- non possono essere regolati, se inizia il processo di combustione non può essere interrotto
- valori più bassi di impulso specifico(da 180s a 260s).
- I gas espulsi potrebbero essere tossici



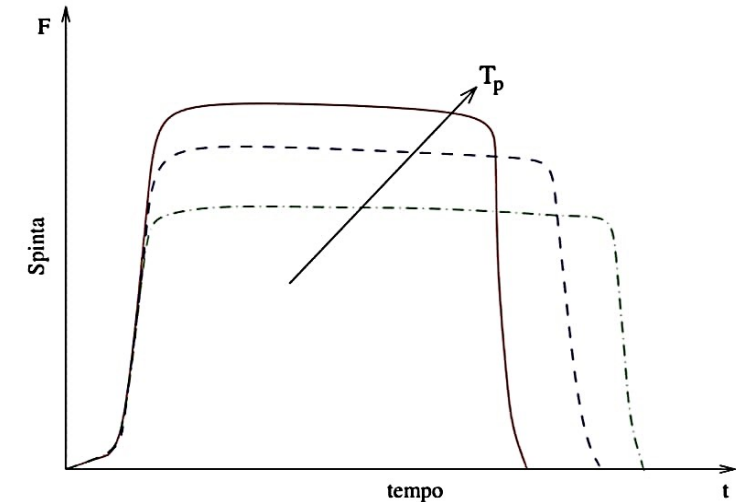
COME AVVIENE

La superficie di combustione regredisce in direzione normale a se stessa.

VELOCITA' DI COMBUSTIONE (r): è la velocità di regressione di tale superficie in direzione normale a se stessa nell'unità di tempo.

PRINCIPALI FATTORI DI INFLUENZA DELLA VELOCITA' DI COMBUSTIONE

- Dipende dalla composizione del propellente. (da 1 mm/s a 100 mm/s)
- Temperatura iniziale del propellente (T_p): se aumenta la temperatura iniziale del propellente aumenta anche la velocità di combustione e quindi si riduce il tempo di combustione.
Se aumenta la temperatura iniziale del combustibile aumenta la spinta.
- Pressione nella camera di combustione: se aumenta la pressione nella camera di combustione (p_c) aumenta anche la velocità di combustione. È presente perciò una dipendenza lineare a "tratti" e quindi lo stesso propellente per diversi intervalli della pressione nella camera di combustione fornisce valori diversi dei coefficienti a e n .
 - $n > 1$ combustione instabile
 - n compreso tra 0.8 e 0.2 è l'intervallo più diffuso che consente di avere combustione stabile.



relazione empirica :

$$r = a p_c^n$$

n = coefficiente di combustione
 a = coefficiente di temperatura e dipende dalla temperatura iniziale del propellente .
 Sono coefficienti ottenuti dall'interpolazione di dati sperimentali.

Le prestazioni del motore dipendono dalla **configurazione geometrica** del grano e dal suo **materiale**.

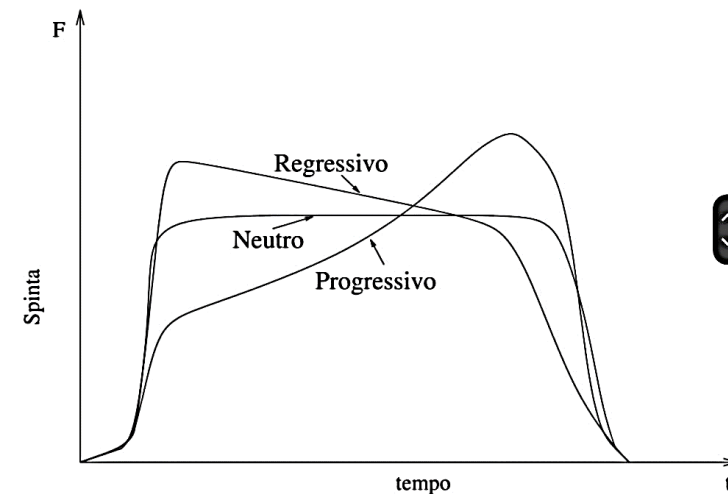
Il **GRANO DI PROPELLENTE SOLIDO** è la massa di propellente presente nel motore ed è un solido colato la cui consistenza è simile a gomma dura e viene posto nel suo contenitore (telaio) in diversi modi:

1) **Cartridge-loaded**: il propellente viene realizzato attraverso la colatura in uno stampo separato e poi i grani di propellente solido vengono inseriti nel telaio come fossero cartucce.

2) **Case-bonded**: il telaio viene usato come stampo dove viene colato direttamente il propellente.

La **spinta propulsiva** è influenzata dalle diverse tipologie geometriche di grano che a seconda dell'evoluzione della superficie di combustione nel tempo si può classificare in:

- **PROGRESSIVO**: la spinta cresce
- **NEUTRO**: la spinta varia in maniera trascurabile
- **REGRESSIVO**: la spinta diminuisce



Le configurazioni geometriche del grano che realizzano i vari tipi di spinta sono :



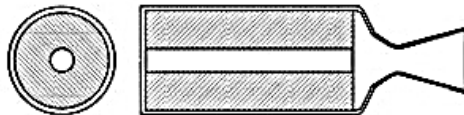
Propellenti **tridimensionali**:

- 1) Grano a sigaretta(neutro)
- 2) Grano tubolare interno(progressivo)
- 3) Grano tubolare esterno(regressivo)
- 4) Grano a stella(neutro)

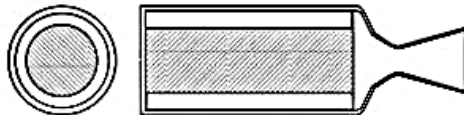
Grano a sigaretta: Neutro



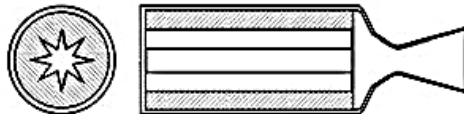
Grano tubolare interno: Progressivo



Grano tubolare esterno: Regressivo



Grano a stella: (circa) Neutro



PROPELLENTI SOLIDI A DOPPIA BASE

- Sono miscele di esplosivi.
- Ciascun esplosivo contiene **nitrocellulosa** (solida) disciolta nella **nitroglicerina**.
- Vi sono anche piccole quantità di additivi .

Questi propellenti si usano per basse prestazioni (Impulso specifico = 220s).

Hanno purtroppo grande pericolosità , però sono poco costosi.

PROPELLENTI SOLIDI ETEROGENEI O COMPOSITI

- Sono costituiti da un combustibile plastico(detto legante) all'interno del quale sono immersi dei cristalli di ossidante.
- I **combustibili** possono essere :

Leganti: sostanze organiche gommosi che uniscono il propellente solido

Additivi: sono polveri metalliche

- Gli **ossidanti** più usati sono :

Perclorato di ammonio

Nitrato di ammonio

Perclorato di potassio

Questi propellenti si usano per ottenere un impulso specifico di 290s e sono poco pericolosi rispetto a quelli a doppia base.

PROBLEMATICHE

Attraverso l'uso della propulsione chimica realizzare viaggi interplanetari risulterebbe pressoché impraticabile .

Problematiche principali :

- Quantitativo eccessivo di propellente da utilizzare che aumenterebbe troppo la massa del veicolo
- tempi lunghi di missione che renderebbero difficile il sostentamento dell'equipaggio e la sua sopravvivenza (l'impulso specifico è relativamente basso: il massimo sono 450s)
- valori di spinta elevati ma per brevissimi intervalli temporali che renderebbero impossibile il raggiungimento di mete lontane.



Per tali ragioni appare necessario sviluppare nuove tecnologie di propulsione .

NUOVI OBIETTIVI:

- 1) Limitare consumo di propellente
- 2) Ottenere impulsi specifici notevolmente più alti
- 3) Spinta elevata

SOLUZIONE:

L'ENERGIA NUCLEARE.

Sfrutto l'energia che permette ai nucleoni(neutroni + protoni presenti nel nucleo atomico) di rimanere uniti. Si stanno sviluppando 3 tipologie di razzi che sfruttano la propulsione nucleare:

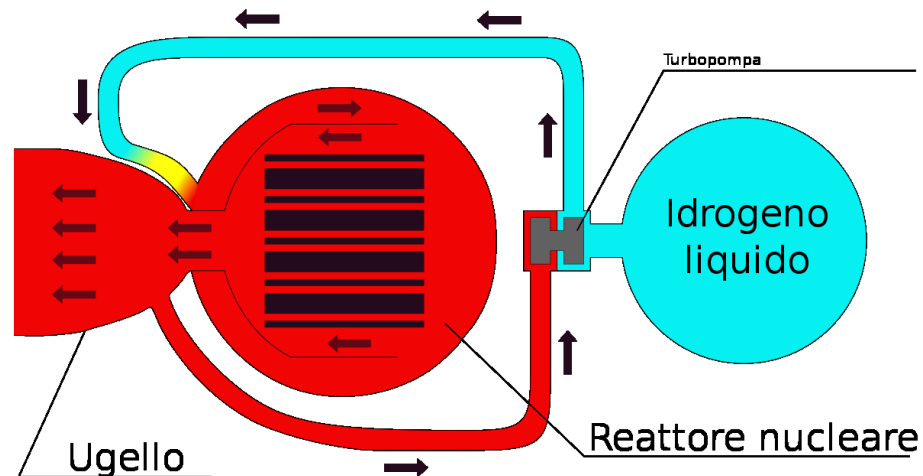
- 1) **Razzo termico nucleare, NTP(produce grande spinta)**
- 2) Razzo nucleare- elettrico, NEP(elevato impulso specifico)
- 3) Propulsione nucleare ad impulso

L' NTP utilizza il **PROCESSO DI FISSIONE** : nuclei di atomi di Uranio-235(sono nuclei pesanti) o nuclei di atomi di Plutonio-239 vengono bombardati con neutroni generando più nuclei leggeri e un numero variabile di neutroni. Questo processo produce un grande quantitativo di energia.

Se i nuovi neutroni prodotti vengono assorbiti dai restati atomi di uranio o plutonio si innescano nuove fissioni realizzando un EFFETTO A CATENA.

COMPONENTI PRINCIPALI DELL'NTP

- Reattore nucleare a nucleo solido
- Propellente : di solito idrogeno liquido perché ha peso molecolare basso e aumenta l'impulso specifico
- Ugello



PRINCIPIO DI FUNZIONAMENTO

Il calore prodotto dalla fissione viene usato per scaldare il propellente che passa nel reattore e in seguito entra in un ugello che lo espande e lo accelera generando spinta propulsiva esattamente come per i razzi chimici.

L' idrogeno liquido viene usato anche come refrigerante del reattore.

PROBLEMI IRRISOLTI

- ridurre la massa del reattore , del motore e degli schermi di radiazione
- affrontare l'espulsione residua di radiazioni dopo la chiusura del reattore nucleare
- modalità di raffinamento del carburante per ottenere materiale fissile potrebbero presentare dei rischi per la sicurezza
- diffidenza verso il nucleare da parte dell'opinione pubblica

NUOVE OPPORTUNITA':

- utilizzare propellenti come l'idrogeno liquido che ha un peso molecolare basso e quindi riuscire ad arrivare a valori di impulso specifico anche di 900s.
- diminuire i tempi delle missioni
- offrire una spinta molto elevata riducendo la massa della navicella in termini di propellente (a parità di spinta è la metà di un razzo chimico)
- ottenere una densità energetica di 10 milioni di volte maggiore rispetto a quella dei propellenti chimici più sofisticati.

- La NASA e DARPA (Defence Advanced Research Projects Agency) hanno iniziato una collaborazione per sviluppare e testare un razzo termico nucleare entro il 2027.
- **OBIETTIVO:** permettere le missioni spaziali anche verso destinazioni più lontane dando la priorità a spedizioni con equipaggio verso il Pianeta Rosso
- Questo accordo si chiama programma DRACO (Demonstration Rocket for Agile Cislunar Operations)
- DRACO ha il vantaggio di poter attingere a studi precedenti in cui l'NTP era stato testato a terra .
- Il programma DRACO per evitare ulteriori rischi sta progettando il motore in modo che la sua reazione di fissione si attivi solo dopo aver raggiunto lo spazio.



- Rocket Propulsion Elements di George P. Sutton e Oscar Biblarz
- Future Spacecraft Propulsion Systems, Enabling Technologies for Space Exploration di Paul A. Czysz e Claudio Bruno
- Appunti delle lezioni di "Turbomacchine"