

Scheda 3 – Nucleare per l’Innovazione

In collaborazione con newcleo

A cura di Andrea Pola ingegnere nucleare e professore ordinario di Misure e Strumentazione Nucleari presso il Dipartimento di Energia del Politecnico di Milano

Articolo di giornale

Estratto dall’articolo “Nasa, via al progetto per costruire razzi a propulsione nucleare che raggiungeranno Marte in metà del tempo”

di Cecilia Mussi, pubblicato il 29/07/2023 nel Corriere della Sera.

https://www.corriere.it/tecnologia/23_luglio_29/nasa-via-al-progetto-per-costruire-razzi-a-propulsione-nucleari-che-raaggiungeranno-marte-in-meta-del-tempo-52b05a83-7126-40c3-a037-7884d0260x1k.shtml?utm_source=chatgpt.com

Il prossimo passo per tentare di conquistare Marte passa attraverso un razzo a propulsione nucleare. Si chiama Draco (Demonstration Rocket for Agile Cislunar Operations) il progetto targato Nasa, del valore di 499 milioni di dollari, per sviluppare e costruire un nuovo razzo da mandare, si spera, verso il pianeta Rosso. Il programma è portato avanti insieme all'agenzia statunitense per i progetti di ricerca avanzata per la difesa (Darpa). Il 26 luglio la conferma dell'appaltatore che dovrà lavorare ai razzi: si tratta di Lockheed Martin, azienda californiana che potrebbe avere i primi modelli pronti nel 2027.

Ridurre a metà il tempo del viaggio

L'obiettivo della missione Draco è trovare un modo per ridurre drasticamente (secondo il New York Times fino alla metà del tempo ad ora ritenuto necessario); si potrebbe passare dagli attuali 9 mesi a 3-4 mesi di viaggio. «La propulsione chimica è stata a lungo lo standard per i voli spaziali - hanno spiegato da Lockheed Martin - Ma per fare in modo che gli esseri umani possano raggiungere Marte, avremo bisogno di una propulsione molto più efficiente». La Nasa aveva già testato motori a razzo termici nucleari oltre 50 anni fa, costruendone oltre 20, ma poi a causa della Guerra Fredda i progetti furono abbandonati.

Primi lanci tra tre anni

Se tutto andrà bene, il primo volo dei razzi è previsto per la fine del 2026 o l'inizio del 2027. Il veicolo spaziale dovrebbe volare a un'altitudine compresa tra 700 e quasi 2mila km di altezza. Lockheed Martin ha trovato come partner del progetto la Bwx Technologies per sviluppare il reattore nucleare. Tra i vantaggi di questa tecnologia, c'è anche quello di avere una maggiore capacità di carico di materiale scientifico e una maggiore quantità di energia disponibile per gli strumenti e le comunicazioni.

Introduzione

Il nucleare non può essere limitato al solo contesto, seppur molto importante, della produzione di energia. A questo punto, affrontate le prime due schede del percorso, appare ormai chiaro che esso riveste un ruolo cruciale e ha ricadute dirette anche in molti altri ambiti, dal medicale, all’ambientale, ecc. Non è tutto. Nel momento in cui passiamo a considerare le ricadute indirette, allora la numerosità dei contesti interessati dal nucleare diviene davvero sorprendente. Ad esempio, esso costituisce un settore fondamentale per lo sviluppo di materiali avanzati e di tecnologie in grado di operare in condizioni estreme. Dalla fusione nucleare ai veicoli spaziali, passando per ambienti ostici, come i

fondali oceanici e il sottosuolo profondo, le applicazioni sono molteplici e decisive per la scienza e la tecnologia del futuro

1. Materiali e ambienti estremi

I materiali avanzati sviluppati grazie alla ricerca e all'esperienza nucleare rappresentano il frutto di decenni di studi multidisciplinari che combinano fisica e ingegneria. Questi materiali sono progettati per mantenere le proprie prestazioni anche in condizioni estreme, dove **temperature, pressioni, radiazioni ionizzanti e altri** mettono a dura prova o inficiano il funzionamento del sistema d'interesse. A livello microscopico, questi materiali possiedono strutture cristalline controllate, legami chimici ad alta energia e microstrutture composite ottimizzate, che conferiscono resistenza alla corrosione, alla fatica meccanica, all'erosione chimica e all'azione provocata da forte irraggiamento. Alcuni materiali integrano nanoparticelle o rinforzi ceramici, che aumentano la durezza e la stabilità termica senza compromettere la duttilità o la capacità di assorbire urti meccanici.

Nei **fondali oceanici**, ad esempio, la pressione può superare i 1000 bar e le temperature si possono assumere valori prossimi allo zero nelle acque profonde oppure superare i 400 °C in corrispondenza di sorgenti idrotermali sommerse. Le condizioni chimiche sono spesso aggressive, con elevata salinità e concentrazioni di minerali corrosivi, come solfuri e cloruri. Per resistere a questi ambienti, sono utilizzate leghe metalliche avanzate sviluppate per sommergibili a propulsione nucleare, ad esempio leghe al titanio, e ceramiche ad alta temperatura rinforzate con carburo di silicio o ossidi nanostrutturati. Inoltre, si impiegano compositi polimerici con matrici nanostrutturate, capaci di assorbire energia meccanica e limitare la propagazione di microfratture. Questi materiali sono di fatto utilizzati per la costruzione di sensori oceanografici, strumenti geochimici, veicoli autonomi come i sommergibili Nereus e Alvin, e moduli scientifici sottomarini, garantendo operazioni continuative per anni senza manutenzione diretta, anche in punti estremamente remoti e inaccessibili.

Nel **sottosuolo profondo**, le condizioni sfidanti includono temperature superiori a 300 °C, pressione elevata e presenza di fluidi chimicamente aggressivi, come acidi e soluzioni saline ad alta concentrazione. Qui, materiali avanzati, leghe metalliche ad alta resistenza, ceramiche rinforzate e cermet (compositi ceramico-metallici) vengono progettati per prevenire fenomeni di corrosione, deformazione plastica e creep (deformazione lenta sotto stress costante) a lungo termine. L'integrazione di sensori resistenti alle radiazioni e di sistemi di monitoraggio avanzati permette di controllare in tempo reale lo stato delle strutture geotermiche, dei reattori sotterranei sperimentali o di infrastrutture minerarie profonde, riducendo i rischi e ottimizzando la manutenzione preventiva.

La **fusione nucleare** rappresenta uno degli esempi più emblematici di sfida tecnologica per i materiali. I reattori sperimentali come ITER (International Thermonuclear Experimental Reactor), attualmente in costruzione a Cadarache in Francia nell'ambito di una cooperazione internazionale che coinvolge 35 diversi paesi, operano con plasma a temperature superiori ai 150 milioni di gradi Celsius, circa dieci volte la temperatura del nucleo solare, e lo devono confinare senza che i materiali circostanti subiscano rapida degradazione o addirittura si distruggano. A questo scopo sono utilizzate leghe speciali a base di tungsteno, estremamente resistenti al calore e al bombardamento neutronico, acciai inox avanzati rinforzati con particelle ceramiche per aumentare la stabilità meccanica e rivestimenti superficiali raffreddati da flussi di elio o di metallo liquido. Ogni componente deve sopportare non solo l'alta temperatura, ma anche gli effetti cumulativi dei neutroni ad alta energia, che possono provocare rigonfiamenti, formazione di vacanze nei reticoli cristallini e modifiche della microstruttura. La progettazione dei materiali per la fusione richiede, dunque, una comprensione integrata della fisica e dell'ingegneria, con test sperimentali in laboratori come il JET (Joint European Torus) nel Regno Unito o il Nuclear Materials Research Center in Giappone, dove simulazioni e irraggiamenti controllati aiutano a prevedere la durata dei componenti e a sviluppare leghe sempre più resistenti.

Molti di questi materiali, come acciai speciali, tungsteno, leghe di litio, trovano applicazione negli impianti aerospaziali, nelle turbine ad alta efficienza e impianti chimici, oltre che nell'aeronautica o nel settore delle batterie ad alta energia.

I materiali nucleari avanzati non rappresentano semplicemente metalli o ceramiche performanti, ma sistemi complessi. La loro progettazione e applicazione costituiscono un ponte tra scienza e tecnologia, e apre nuove frontiere per esplorazioni estreme e tecnologie energetiche innovative.

2. Spazio e propulsione nucleare

Lo spazio è l'ambiente estremo per eccellenza: vuoto, radiazioni cosmiche, escursioni termiche estreme e gravità variabile rappresentano sfide uniche. La **propulsione nucleare**, come nel progetto Draco citato nell'articolo precedente, mira a ridurre drasticamente i tempi di viaggio verso Marte, aumentando contemporaneamente la capacità di carico e l'energia disponibile per strumenti scientifici e comunicazioni. I motori nucleari termici utilizzano un reattore nucleare compatto per riscaldare un propellente (tipicamente idrogeno) a temperature altissime, che viene poi espulso ad altissima velocità producendo spinta. Rispetto ai sistemi chimici tradizionali, questa tecnologia offre una maggiore efficienza, permettendo di ottenere più chilometri percorsi per unità di carburante, consentendo dunque viaggi più rapidi e riducendo l'esposizione dell'equipaggio alle radiazioni cosmiche.

Dal punto di vista fisico, il cuore del sistema è un piccolo reattore in grado di operare in sicurezza anche a temperature elevate, garantendo al contempo protezione dai neutroni e dai raggi gamma prodotti durante la reazione nucleare.

Ma la propulsione nucleare non può funzionare senza **materiali innovativi**. I componenti del reattore e del sistema di scambio termico devono resistere a condizioni estreme: temperature superiori ai 2.000 °C, pressioni elevate e radiazioni intense. Per questo, la ricerca si concentra su leghe speciali, ceramiche avanzate e materiali compositi, progettati per mantenere stabilità strutturale e proprietà chimico-fisiche anche dopo esposizioni prolungate a stress meccanici e termici. Questi materiali devono inoltre essere leggeri, per non penalizzare la spinta, e compatibili con l'ambiente dello spazio, evitando fenomeni di corrosione o degrado. Inoltre, rivestimenti ceramici e leghe a base di tungsteno o boro sono molto studiati per sviluppare scudi multistrato, ovvero strutture in gradi di schermare il personale e le apparecchiature di bordo dalle radiazioni che popolano l'ambiente spaziale. Questo chiama in causa nuovamente il settore nucleare, con quella che è la tematica cruciale della radioprotezione.

Oltre alla propulsione, il nucleare risulta essere di grande interesse per la generazione di energia elettrica per sonde e stazioni orbitanti. Infatti, sono stati sviluppati e/o sono allo studio piccoli reattori nucleari o **generatori a radioisotopi** (RTG) che assicurano funzionamento continuo di strumenti scientifici, sistemi di comunicazione e habitat umani, anche lontano dal Sole.

Ma come funzionano tali generatori a radioisotopi? Si tratta di dispositivi che trasformano direttamente il calore prodotto dal decadimento radioattivo di alcuni isotopi in energia elettrica. La loro peculiarità è quella di funzionare senza alcuna parte meccanica in movimento e senza bisogno di combustibile chimico, rendendoli strumenti estremamente affidabili e duraturi, in grado di operare in condizioni dove altre fonti di energia sarebbero inefficaci.

Il fulcro di un generatore di questo tipo è basato su un isotopo radioattivo, il quale emette calore nel corso del suo decadimento spontaneo. Questo calore, a sua volta, viene trasferito a materiali speciali, detti convertitori termoelettrici, i quali sfruttano la differenza di temperatura tra la parte

Il decadimento radioattivo è un processo in cui un nucleo instabile si trasforma in un altro più stabile, liberando energia. Questa energia non "scompare", ma viene rilasciata sotto forma di particelle che attraversano la materia, urtano gli atomi e li fanno vibrare.

Il risultato è un aumento del movimento degli atomi, cioè quello che noi percepiamo come **calore**. Per questo motivo materiali molto radioattivi, anche senza fiamme o reazioni chimiche, diventano caldi.

Un esempio concreto è il calore che si sviluppa all'interno delle centrali nucleari, detto calore di decadimento.

calda e quella fredda per generare corrente elettrica continua. In altre parole, l'energia termica prodotta dal decadimento radioattivo non è dispersa, ma trasformata in elettricità utilizzabile dai sistemi a bordo.

Uno dei principali vantaggi dei generatori a radioisotopi è la loro capacità di fornire energia in modo continuo e costante per decenni, senza interruzioni. Questa caratteristica li rende strumenti insostituibili per missioni nello spazio profondo, dove la luce solare è troppo debole per alimentare pannelli fotovoltaici, oppure per ambienti estremi come la superficie di Marte, dove polvere e condizioni atmosferiche limitano l'efficienza dei sistemi solari. Oltre allo spazio, sistemi simili potrebbero essere utili anche in contesti terrestri estremi, come fondali oceanici profondi o miniere sotterranee isolate, dove fornire energia continua è molto complesso.

Gli RTG hanno trovato applicazione in numerose missioni storiche della NASA e di altre agenzie spaziali. Ad esempio, le sonde Voyager 1 e 2, lanciate negli anni '70 e tuttora operative, utilizzano RTG per alimentare strumenti scientifici e sistemi di comunicazione mentre viaggiano ai confini del Sistema Solare. Altre missioni, come Cassini verso Saturno o New Horizons verso Plutone, si sono affidate alla stessa tecnologia per garantire autonomia energetica in regioni dello spazio dove il sole è molto debole. Anche i rover marziani, come Curiosity e Perseverance, utilizzano versioni moderne degli RTG, capaci di fornire energia costante agli strumenti scientifici e ai sistemi di bordo per lunghi periodi, senza necessità di ricarica.

3. Sfide e prospettive future

Le sfide rimangono enormi: ridurre i costi dei materiali avanzati, garantire affidabilità a lungo termine, gestire la sicurezza dei reattori nucleari in ambienti remoti e creare sistemi modulari per applicazioni spaziali e terrestri. Tuttavia, i progressi sono promettenti: esperimenti su plasma da fusione, motori nucleari termici e materiali refrattari stanno aprendo la strada a una nuova generazione di tecnologie capaci di operare in condizioni un tempo ritenute impossibili.

L'integrazione tra materiali innovativi e nucleare non è dunque solo una strada di ricerca, ma la chiave che può aprire le porte ad un futuro ricco di nuove possibilità.

Traccia per l'attività in classe

1. Materiali e ambienti estremi

- Quali caratteristiche devono avere i materiali avanzati per resistere a condizioni di alta pressione, alte temperature e radiazioni intense?
- *Discussione:* perché lo studio dei materiali in ambienti terrestri estremi può essere utile per applicazioni spaziali?
- *Discussione:* come pensate che i progressi nei materiali per la fusione nucleare possano influenzare altre tecnologie spaziali o terrestri?

2. Applicazioni nello spazio e propulsione nucleare

- Descrivi il progetto Draco: obiettivi, tempistiche e vantaggi rispetto alla propulsione chimica tradizionale.
- Come funziona un motore nucleare termico e in che modo la propulsione nucleare aumenta l'efficienza e riduce i tempi di viaggio nello spazio?
- *Discussione:* quali rischi e vantaggi possono derivare dall'uso della propulsione nucleare nello spazio?

3. Generatori a radioisotopi

- Come funzionano i generatori a radioisotopi? E perché sono adatti a missioni in ambienti estremi o lontani dal Sole?
- *Discussione:* quali vantaggi offrono questi generatori rispetto ai pannelli solari in contesti estremi? Quali potrebbero essere applicazioni terrestri simili?

4. Sfide e prospettive future

- *Discussione:* quali innovazioni tecnologiche pensate potrebbero diventare decisive nei prossimi 10-20 anni per missioni spaziali e applicazioni terrestri avanzate?