

A detailed illustration of a Space Shuttle docked to the International Space Station (ISS) in orbit above Earth. The shuttle is positioned at the bottom of the frame, with its nose pointing towards the right. The ISS is a complex structure of white modules and large solar panel arrays, extending upwards and across the middle of the frame. The Earth's surface is visible below, showing blue oceans, white clouds, and brown landmasses. The background is a dark space filled with numerous small white stars.

ENEA PER LO SPAZIO

SPECIALE Energia Ambiente e Innovazione

ENEA magazine
Speciale 1/2022
eai.enea.it

Sommario

Nuovi materiali e componenti per 'resistere' a condizioni estreme	2
<i>di Giuseppe Barbieri ed Antonio Rinaldi</i>	
Il Frascati Neutron Generator e i test di resistenza a radiazione	5
<i>di Salvatore Fiore</i>	
Il volo parabolico: l'ENEA a zero-G	8
<i>di Luca Saraceno e Giuseppe Zummo</i>	
Il Progetto ESA-INSURE: i satelliti per la messa in sicurezza delle piattaforme energetiche marine	14
<i>di Antonio Palucci</i>	
REX e TOP-IMPLART, due facilities uniche per la ricerca in campo spaziale	18
<i>di Monia Vadrucchi</i>	
Sopravvivere nello spazio: le biotecnologie per la 'Space Economy'	21
<i>di Angiola Desiderio, Luca Nardi, Eugenio Benvenuto</i>	
Radiazioni e spazio: una facility unica per la ricerca	25
<i>di Alessia Cemmi, Ilaria Di Sarcina, Carino Ferrante, Giuseppe Ferrara, Francesco Filippi, Fabio Panza, Jessica Scifo, Adriano Verna</i>	
L'Osservatorio ENEA di Lampedusa e i dati satellitari	28
<i>di Daniela Meloni, Alcide di Sarra, Francesco Monteleone, Giandomenico Pace, Damiano Sferlazzo</i>	
Il laboratorio "Eccimeri" per test sui materiali spaziali	30
<i>di Paolo Di Lazzaro, Daniele Murra, Luca Mezi, Sarah Bollanti, Francesco Flora</i>	
Navigare tra i pianeti con la bussola 'marziana'	33
<i>di Francesco Flora, Sarah Bollanti, Paolo Di Lazzaro, Gian Piero Gallerano, Luca Mezi, Daniele Murra, Fabrizio Andreoli, Luca Murra</i>	
Simulazione numerica e supercalcolo per la propulsione chimica aerospaziale	37
<i>di Eugenio Giacomazzi e Donato Cecere</i>	
Lo sviluppo dei componenti ottici per le applicazioni della Space Economy	41
<i>di Anna Sytchkova</i>	
La ricerca ENEA sui piccoli reattori per applicazioni spaziali	44
<i>di Mariano Tarantino</i>	
I sistemi di mappatura non distruttiva UT	46
<i>di Angelo Tati</i>	
Esplorare lo spazio con le 'vele fotoniche'	51
<i>di Danilo Zola e Salvatore Scaglione</i>	
ENEA e Università di Roma Tor Vergata studiano un robot "astronauta"	56
<i>di Marco Paoloni</i>	

Nuovi materiali e componenti per 'resistere' a condizioni estreme

di Giuseppe Barbieri ed Antonio Rinaldi

Laboratorio di Materiali e Processi chimico-fisici - ENEA

L'ENEA supporta lo sviluppo della Space economy e il tessuto produttivo nazionale nello sviluppo di soluzioni innovative e di tecnologie avanzate per produrre componenti e nuovi materiali per velivoli spaziali, operanti in condizioni estreme e per la protezione dalle radiazioni cosmiche. Le attività progettuali sono svolte in stretto raccordo con l'infrastruttura MAIA (Materiali Avanzati Infrastruttura Aperta) del centro ENEA della Casaccia, specializzata nella stampa 3D di materiali avanzati, tra i quali materiali metallici ad alte prestazioni per l'aeronautica e l'aerospazio.

Uno dei settori emergenti per l'economia mondiale ma soprattutto per la sostenibilità del genere umano è la Space Economy (SE), definita dall'OCSE come "l'intera gamma di attività e l'uso di risorse che creano valore e benefici per gli esseri umani nel corso dell'esplorazione, della ricerca, della comprensione, della gestione e dell'utilizzo dello spazio"⁽¹⁾.

ENEA supporta con svariate attività lo sviluppo delle SE e il tessuto produttivo nazionale nella messa a punto di soluzioni innovative legate alla realizzazione di componenti e nuovi materiali mediante l'applicazione di tecnologie avanzate. Nel recente passato, ad esempio, ha supportato Thales Alenia Space nella realizzazione di componenti per la stazione spaziale orbitale sviluppando processi di saldatura automatizzati ad alta densità di energia a fascio di elettroni ed a fascio laser. Nel corso degli anni è stato maturato il know-how sulla saldatura in pratica di tutte le famiglie di metalli, dai semplici acciai inossidabili alle superleghe di nichel passando per le leghe leggere di magnesio, alluminio e titanio. Alcuni dei prodotti della collaborazione con grandi aziende del settore aerospace sono state utilizzate con successo a bordo della Stazione Spaziale Internazionale

(ISS). Ad esempio, due cold-plates progettate da Thales Alenia Space Italia (TASI) e realizzate con il supporto di ENEA in lega di alluminio AA 6061 T651 (2). Le cold plates (Figura 1) sono i principali componenti del sistema di raffreddamento per il payload MDS (Mice Drawer System). Lo sviluppo e la realizzazione di questo componente, finanziato dall'ASI, ha reso possibile lo svolgimento di vari programmi di ricerca spaziali. L'MDS è stato necessario per mantenere le temperature richieste, sia per le unità elettroniche di controllo sia per l'habitat delle cavi (raffreddamento dell'aria di ricircolo e dell'acqua alimentare) a bordo della ISS. Sempre per TASI, è stato sviluppato il

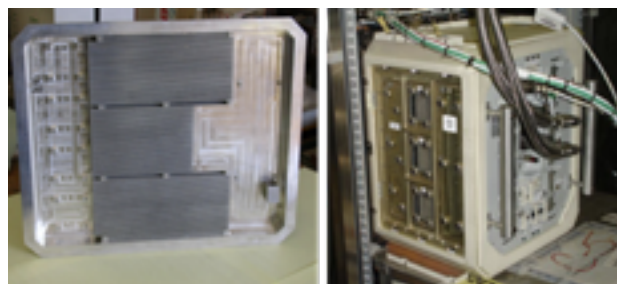


Fig. 1 Sistema di raffreddamento per il payload MDS (Mice Drawer System) saldato mediante fascio elettronico



Fig. 2 - Test di Saldatura laser "key hole" di superlega di nichel IN 718 per la messa a punto di processi di saldatura per motori aerospaziali

processo di saldatura laser per l'assemblaggio di specifici sensori per la componentistica del satellite per l'esperimento LISA Pathfinder (3). Il progetto finanziato dall'Agenzia Spaziale Europea (ESA) mirava alla costruzione e messa in orbita di un satellite per lo sviluppo di tecnologie per il rilevamento delle onde gravitazionali nello spazio. **ENEA ha sviluppato alcuni processi di saldatura laser per assemblare speciali sensori realizzati in leghe di titanio differenti e rispettando requisiti stringenti in termini di tenuta, con pressione di prova fino a 130 Bar, contenendo la temperatura sugli elementi sensibili al di sotto di 120°C, riprogettando le geometrie di giunzione e sviluppando i sistemi di monitoraggio del processo. Arrivando alle applicazioni e collaborazioni più recenti, ENEA ha instaurato in questi anni consolidati rapporti con AVIO SpA, leader mondiale nella produzione di sistemi per l'accesso allo spazio. Oltre che attraverso**

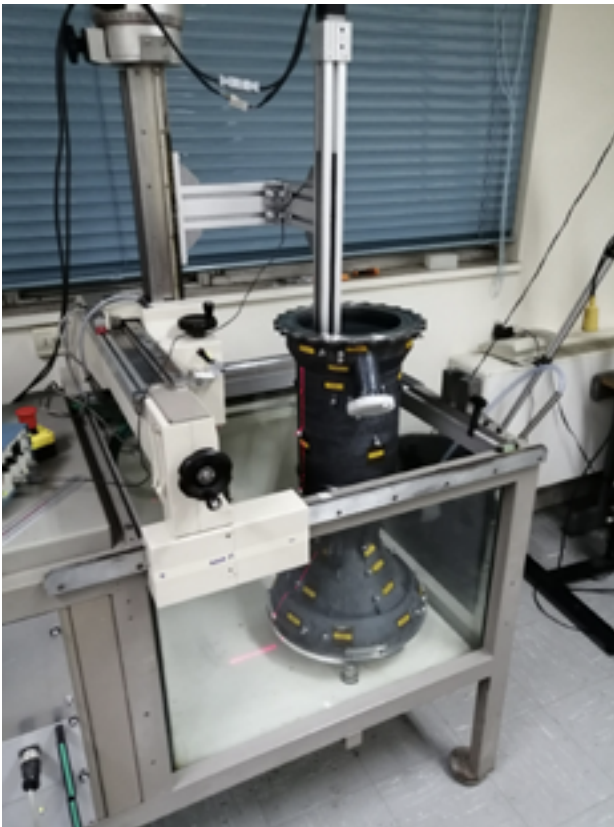


Fig. 3 - Controllo UT automatizzato di camera di combustione presso ENEA (courtesy of AVIO)

specifici contratti di servizio avanzato e progetti Proof of Concept (SAMUT - Sistema automatico di mappatura ultrasonora per componenti aerospaziali), la collaborazione è stata rafforzata attraverso la partecipazione ai progetti di ricerca e sviluppo promossi attraverso LAerospazio, iniziativa finanziata dal FESR Fondo Europeo di Sviluppo Regionale - Programma Operativo Regionale del Lazio. In questo speciale bando, ENEA agisce da Organismo di Ricerca Cardine Mandatario dell'aggregazione con ASI, INFN e Consorzio Hypatia, in veste di OdR associati. Gli OdR stanno realizzando, in collaborazione con differenti imprese 7 progetti inerenti all'Area di Specializzazione "Aerospazio". In uno di questi progetti denominato **MAGIC** (Tecnologie abilitanti per la Manifattura ALM, la Giunzione e il Controllo di propulsori aerospaziali), **ENEA sta progettando soluzioni innovative per la realizzazione di componenti per velivoli spaziali operanti in condizioni estreme e per proteggere passeggeri e componenti dalle radiazioni cosmiche. Con i partner AVIO, Hypatia, COMEB ed ASI, (<https://www.laerospazio.enea.it/>), sono in fase di sviluppo sistemi robotizzati per produrre e caratterizzare componenti di propulsori per i lanciatori aerospaziali di nuova generazione operanti in condizioni estreme di pressioni e temperature. In particolare, si stanno sviluppando sistemi di assemblaggio robotizzati che impiegano i processi di saldatura laser e i complementari sistemi automatizzati di controllo non distruttivo mediante mappatura ultrasonora dell'integrità strutturale dei componenti realizzati. Le future evoluzioni del lanciatore VEGA prevedono infatti una struttura a tre stadi in cui l'ultimo sarà costituito da un motore criogenico a ossigeno e metano liquido in sviluppo presso AVIO che andrà a sostituire gli attuali terzo e quarto stadio, rispettivamente a solido e liquido storable, proponendo una soluzione flessibile che permetta simultaneamente di massimizzare il carico utile e ridurre l'impatto ambientale. Lo sviluppo di tali propulsori passa dall'applicazione di nuovi materiali e nuove tecnologie di assemblaggio che permettano la minimizzazione del numero di componenti. Ciò è possibile sfruttando al massimo l'impiego di tecnologie di stampa 3D e di tecnologie di giunzione**

automatizzate, quali la saldatura laser (Figura 3), che permettono un alto livello di ripetibilità ed affidabilità. Assieme alle tecnologie di realizzazione dei nuovi componenti saranno sviluppate le tecnologie di controllo automatizzate sia Ultrasonore (UT) che Eddy Current (EC) rapide migliorando quanto già applicato in termini di controllo qualità mediante scansione UT di camere di combustione. **La buona riuscita del progetto permetterà di sviluppare sistemi per lo Zero Defect Manufacturing per l'aerospazio che consentiranno alle imprese coinvolte un enorme salto in avanti in un comparto altamente competitivo dove per mantenere la leadership è indispensabile puntare costantemente all'eccellenza.**

Sempre nell'ambito **LAerospaZIO**, nel progetto **W-SHIELD**, assieme ai partner SIT, CRYOLAB e Consorzio HYPATIA, ENEA sta sviluppando materiali compositi a matrice polimerica microstrutturati caricati con tungsteno per la realizzazione di schermature flessibili candidati a far parte della nuova generazione di sistemi di protezione da radiazioni, sia per l'uomo sia per le strumentazioni di bordo, nei futuri viaggi interplanetari e nelle stazioni orbitanti. **Le attività progettuali sono svolte sinergicamente alle attività dell'infrastruttura MAIA (Materiali Avanzati Infrastruttura Aperta), nel centro ENEA della Casaccia, specializzata nella stampa 3D di materiali avanzati, tra cui materiali metallici ad alte prestazioni per l'aeronautica e l'aerospazio.**

La schermatura dalle radiazioni cosmiche

A fianco alla realizzazione di componenti strutturali per lo spazio, esiste tutta la problematica legata alla protezione dei componenti ma anche dei passeggeri per i futuri viaggi interplanetari collegata alla schermatura dalle radiazioni cosmiche. Queste tematiche sono affrontate dal progetto W-SHIELD che ha l'ambizione di produrre sistemi schermanti compositi a matrice polimerica caricati di tungsteno. W-SHIELD persegue un nuovo approccio volto all'esplorazione di due tecnologie di manifattura avanzata, i.e. l'elettrofilatura e la stampa 3D, selezionate per tre ordini di motivi. In primo luogo, entrambe le tecnologie sono applicabili in ambiente

spaziale e in assenza di gravità, aspetto importante per rispondere alla necessità di avere sistemi produttivi localizzati fuori orbita terrestre. In secondo luogo, l'elettrofilatura consente di produrre sistemi tessuto-non-tessuto (TNT) micro e nanostrutturati con proprietà uniche ed innovative a costi relativamente accessibili. Questa tecnica in W-SHIELD sarà utilizzata per creare schermature metalliche flessibili, cercando di unire le eccellenti proprietà schermanti del metallo (tungsteno in questo caso) a quelle di flessibilità e conformabilità proprie dei tessuti. Da ultimo, diversamente dalle tecniche produttive tradizionali di tipo sottrattivo, la stampa 3D consente di ottenere oggetti "near-net-shape" con nessuno o minimo sfrido, aspetto fondamentale per la gestione ottimale delle risorse nello spazio. Il progetto W-SHIELD punta a combinare i vantaggi di elettrofilatura e 3D-printing, utilizzandoli in modo sinergico, dimostrando la loro vantaggiosa applicazione anche per applicazioni terrestri in ambito biomedicale per la protezione di persone, attrezzature e luoghi di lavoro in contesto radiogeno e biomedicale. Insieme alla collaborazione con l'azienda laziale S.I.T-Sordina IORT (www.soiort.com), che è un'azienda leader nel settore di attrezzature biomedicali per terapia radiogena, il partenariato condurrà un complesso piano di sviluppo che include attività fabbricative e dimostrative su cellule ed animali, valutando la capacità schermante di schemi prototipali rispetto ad irraggiamenti condotti con fasci di elettroni e fotoni a livelli energetici significativi. Il livello di protezione verrà quantificato attraverso la misura del danno da irraggiamento su DNA tramite modelli messi a punto dall'ENEA, che dispone di competenze e laboratori specializzati per condurre questo tipo di attività. Il progetto W-SHIELD culminerà con un'attività prototipale mirata ad ingegnerizzare un componente schermante opportunamente individuato per fare un confronto con un componente standard tradizionale sulle macchine S.I.T-Sordina IORT. In prospettiva, i risultati potranno aprire un nuovo filone di ricerca e sviluppo industriale per implementare schermature flessibili e performanti rispetto alle radiazioni cosmiche nello spazio.

Il Frascati Neutron Generator e i test di resistenza a radiazione

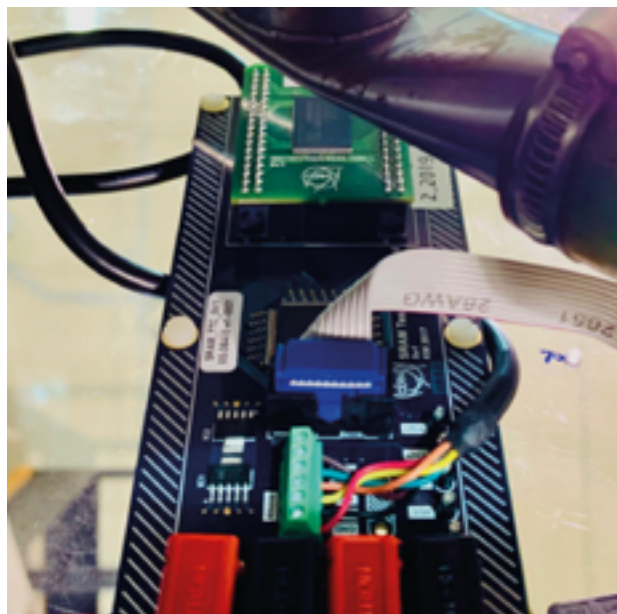
di Salvatore Fiore

Dipartimento Fusione e Tecnologie per la Sicurezza Nucleare - ENEA

Sempre più attività e servizi anche in ambito di R&S fanno uso di osservazioni da satelliti. Garantire l'affidabilità di questi sistemi progettandoli con test di resistenza è quindi di grande importanza, in particolare per quelli elettronici che possono subire gravi malfunzionamenti per effetto della radiazione cosmica. Presso il Centro ricerche di Frascati, ENEA dispone del Frascati Neutron Generator, una facility unica nel panorama internazionale in grado di svolgere questi test.

Un numero crescente di attività e servizi fanno oggi un uso imprescindibile di satelliti in orbite terrestri. Ricerca e sviluppo in ambiti scientifici, tecnologici, medici, si basano spesso su esperimenti e missioni esplorative svolti nello spazio e osservazioni da satellite. Garantire l'affidabilità di questi sistemi, sempre più numerosi e complessi dal punto di vista tecnologico, nello spazio presenta una difficoltà in più, in particolare per i sistemi elettronici. Questa difficoltà deriva da un fenomeno emerso in tempi recenti, difficile da immaginare prima che se ne vedessero i primi effetti.

Nel 2008, un Airbus 330 della compagnia Qantas entrò improvvisamente in picchiata senza motivo apparente. Fortunatamente non ci furono vittime. La causa fu rintracciata in un errore dell'unità di gestione dei dati inerziali, nella quale il dato sull'altitudine era stato scambiato improvvisamente con quello dell'angolo di attacco dell'aereo. Nel 2003, durante uno spoglio elettorale in Belgio con un sistema di voto elettronico, si verificò un'insolita incongruenza: una candidata aveva avuto più preferenze personali rispetto a quelle del suo partito, impossibile secondo le regole elettorali in vigore. La differenza era 4096 voti in più: ovvero 2 elevato alla 12. Chi ha familiarità con l'elettronica digitale avrà già immaginato che un



Test su memorie digitali a FNG in collaborazione con il CERN

errore simile potrebbe essere stato dovuto ad un "bit flip" in un chip di memoria digitale, ovvero un valore che nella memoria è passato da 0 a 1 apparentemente senza motivo. In entrambi questi incidenti, **la causa del fenomeno è stata individuata in un effetto, ormai ben noto, della radiazione cosmica sui sistemi elettronici dell'aeroplano e del sistema di voto.**

La radiazione che proviene dallo spazio, composta per lo più da particelle come protoni e ioni, interagisce continuamente con l'atmosfera generando cascate di altre particelle diverse. Queste "particelle secondarie", elettroni, muoni e neutroni proseguono il loro cammino verso il suolo attraversando la materia che incontrano. A volte questo incontro è innocuo, ma in una frazione dei casi, quando il materiale attraversato è un componente elettronico, si possono verificare

effetti di vario genere. Sono i cosiddetti “Single Event Effects”, eventi singoli che vanno dalla piccola perturbazione del funzionamento del componente, subito ripristinato, al salto di un valore numerico in una memoria digitale, al danneggiamento permanente del componente.

I test di resistenza a radiazione

I due episodi citati sono certamente eclatanti, ma i sistemi spaziali come satelliti per telecomunicazioni o telerilevamento, la Stazione Spaziale Internazionale e i veicoli che la riforniscono, le sonde delle missioni di esplorazione del sistema solare, sono costantemente soggetti a eventi di questo tipo. Le prime evidenze di questi effetti risalgono agli anni settanta, quando ci si trovò davanti ai primi episodi di perdita di contatto con satelliti in orbita. Da allora, i componenti elettronici utilizzati su sistemi spaziali sono diventati sempre più complessi e numerosi, rendendo necessaria una mitigazione dei Single Event Effects.

Questo tipo di disturbi o danneggiamenti, nei componenti elettronici, possono indurre effetti anche gravi sul sistema in cui sono inseriti. Per questo motivo i componenti elettronici più critici vengono oggi progettati includendo dei test di resistenza a radiazione, o Radiation Hardness. Questi test vengono effettuati su campioni dei componenti da utilizzare in missioni spaziali, satelliti, aerei e, sempre più spesso, anche su sistemi critici che funzionano a terra come auto a guida autonoma o droni.

Ma come si testa un transistor, o un microprocessore, per gli effetti della radiazione cosmica primaria o secondaria in atmosfera? La maniera più efficace è esporre il componente allo stesso tipo e quantità di radiazione che incontrerà nella sua vita su un satellite, o su un jet di linea. Questi effetti sono (fortunatamente) rari: per raccogliere una casistica di eventi, che consenta di fare delle stime sulla probabilità che questi accadono, dobbiamo in qualche maniera “accelerare” i test. Un po' come accade per una maniglia di automobile, che viene aperta e chiusa continuamente e velocemente, testandola in poche ore per il numero di volte che verrà utilizzata in anni di vita. Per accelerare un test di resistenza a radiazione quindi abbiamo due modi. Il primo è testare un gran



Il bersaglio del Frascati Neutron Generator da cui vengono emessi i neutroni utilizzati nei test sperimentali

numero di componenti, pochi dei quali subiranno un danneggiamento; come per la lotteria, però, per vincere con certezza bisognerebbe spendere milioni in giocate e per un test di massa su milioni di componenti il costo diventerebbe proibitivo.

L'altra maniera è esporre i componenti allo stesso tipo di radiazioni che incontreranno nella loro vita spaziale, ma con una intensità milioni di volte maggiore. In questo modo, aumenteranno le probabilità di registrare un evento dannoso, e si potrà misurare la probabilità che questo avvenga per stimarne la robustezza. Ciò che serve è, quindi, una sorgente di particelle simili a quelle presenti nello spazio e in atmosfera, con un'intensità tale da emettere in poche ore ciò che colpirebbe i componenti in anni di funzionamento. Realizzare sorgenti simili è una difficile sfida scientifica e tecnologica, che nel Centro Ricerche ENEA di Frascati è stata vinta con FNG, il Frascati Neutron Generator.

Il Frascati Neutron Generator, una facility unica nel panorama internazionale

FNG è una facility in cui si conducono test con neutroni di energia pari a 14 Mega elettronvolt (MeV), ovvero quelli che si producono nelle reazioni di fusione nucleare tra nuclei di deuterio e di trizio. Questi sono entrambi isotopi dell'idrogeno, che hanno uno

(Deuterio) o due (Trizio) neutroni in più del loro “cugino”. Analogamente a quanto avviene nelle macchine Tokamak, con le quali si studia la fusione nucleare per la produzione di energia, ad FNG le reazioni di fusione necessitano di una quantità di energia iniziale tale da innescare la reazione. A questo scopo, un acceleratore di ioni deuterio porta questi a scontrarsi con un bersaglio contenente trizio, provocando la fusione dei due nuclei con la successiva emissione di neutroni e nuclei di elio. **Il flusso di neutroni raggiunto da FNG è uno dei più intensi al mondo: 100 miliardi di neutroni possono essere emessi ogni secondo dal bersaglio, rendendo FNG una facility unica nel suo genere nel panorama internazionale.**

Per la sua unicità, FNG viene utilizzata per numerose attività di ricerca e sviluppo. Nata per test sui materiali utilizzati nei reattori per l'energia da fusione, la facility viene oggi sfruttata da centri di ricerca ed aziende internazionali anche per **test di radiation hardness su componenti e sistemi per lo spazio, aeronautica, per gli acceleratori di particelle di alta intensità e per gli**

stessi tokamak di futura generazione come ITER.

FNG è parte di consorzi di ricerca e progetti europei, che consentono l'accesso ai gruppi di ricerca di istituzioni ed aziende attraverso finanziamenti europei. In particolare, **FNG fa parte del network ASIF che tramite l'Agenzia Spaziale Italiana promuove l'utilizzo di facility di irraggiamento a livello nazionale tra le aziende dell'aerospazio.** FNG partecipa inoltre al **progetto H2020 RADNEXT**, che ha come obiettivo la creazione di un network europeo di facilities per test di radiation hardness e la semplificazione dell'accesso per gli utenti, in particolare delle imprese dell'aerospazio, finanziando le attività sperimentali presso le infrastrutture del network.

Tramite RADNEXT, nei primi mesi di attività decine di proposte di test su elettronica sono state selezionate per l'accesso alle facilities del network, tra cui anche FNG che sarà anche utilizzata come banco di prova per nuovi sistemi di gestione che semplificheranno e renderanno più efficiente lo svolgimento dei test sperimentali.

Impianto FNG di Frascati



Il volo parabolico: l'ENEA a zero-G

di Luca Saraceno e Giuseppe Zummo

Laboratorio Ingegneria dei Processi e dei Sistemi per la Decarbonizzazione Energetica - ENEA

La ricerca in condizioni di microgravità può dare un contributo essenziale alla realizzazione di applicazioni innovative, di esperimenti scientifici e allo studio di fenomeni fisici, chimici e biologici che potrebbero essere mascherati o modificati dalla gravità terrestre. ENEA svolge attività a zero-g dal 2004, nell'ambito della ricerca sulla trasmissione di calore per applicazioni spaziali, in particolare per la strumentazione elettronica di veicoli spaziali, satelliti e stazioni orbitanti. Per la grande esperienza maturata con i voli parabolici e l'analisi dei dati raccolti durante le 10 campagne sperimentali effettuate nell'ambito di progetti ESA, la ricerca ENEA in questo campo può essere considerata tra le più importanti e all'avanguardia a livello mondiale.

Da sempre lo spazio rappresenta quella frontiera dove la ricerca scientifica e lo sviluppo tecnologico hanno trovato, forse, il migliore degli habitat possibili. Enormi risorse economiche e umane profuse nel corso degli anni; migliaia di progetti scientifici portati a compimento; centinaia di tecnologie di derivazione spaziale sviluppate per poi arricchire il

nostro quotidiano vivere da “terrestri”. Ma non tutte le innovazioni tecnologiche sviluppate per lo spazio possono essere preventivamente testate in quelle che saranno le reali condizioni di funzionamento. Da qui l'importanza di poter usufruire delle strutture, infrastrutture e informazioni di ricerca spaziale messe a disposizione della comunità scientifica internazionale da parte delle Istituzioni/Agenzie Governative, e non, dei paesi tecnologicamente più avanzati, per far crescere quel know-how, nelle aree dell'ipergravità e della microgravità, necessario per lo sviluppo tecnologico in ambito satellitare e per le future missioni nello spazio profondo.

Sperimentazione a zero-g: il volo parabolico

La microgravità è un ambiente unico per lo studio di alcuni fenomeni fisici, chimici e biologici, che possono essere mascherati o modificati dalla gravità terrestre e per condurre esperimenti in una varietà ampia di settori scientifici. Sperimentare in questo contesto aiuta enormemente gli scienziati a migliorare le conoscenze fondamentali in varie discipline,



Fig. 1: L'airbus Zero-G della Novespace (credits: ESA)

Test facility Flights	Time	Operation	Constraints	g-level	Costs (€)/flight ^(a)	Flights
Drop tower	5–9 s	A	<ul style="list-style-type: none"> Brief flight time. 5–50 g landing acceleration. 30 g start acceleration in catapult mode. 	10^{-4} – 10^{-8}	6–10 K	2–3 per day
Parabolic flights	15–30 s	A, M, B	<ul style="list-style-type: none"> Low level of microgravity 	10^{-2} – 10^{-3}	30 K	18 p.a.
Sounding rockets	4–13 min	A, M	<ul style="list-style-type: none"> Increased launch acceleration up to 6 g 	10^{-2} – 10^{-4}	1–2 M	2 p.a.
Recoverable satellites	Up to 3 month	A	<ul style="list-style-type: none"> High launch accelerations, long preparation phase 	10^{-3} – 10^{-5}	> 1 M	< 1 p.a.
International Space Station (ISS)	Up to years	A, M, B	<ul style="list-style-type: none"> Long preparation phase 	10^{-2} – 10^{-5}	> 1 M	Several p.a.

Tabella 1: A = automatic, M = manual, B = manned

^(a) Costs of space experiments depend on size and weight and can thus only be estimated roughly.

fonte: www.embopress.org/doi/full/10.15252/embr.201948541

con la conseguenza di accelerare lo sviluppo di applicazioni innovative nei campi della tecnologia, dei processi industriali e della medicina. Ma se non è realisticamente possibile condurre con continuità una sperimentazione in condizioni di assenza di gravità su stazioni spaziali o veicoli in orbita attorno alla Terra, **è tuttavia possibile ricreare condizioni di gravità ridotta in prossimità della superficie terrestre a mezzo di alcune facility che consentono di acquisire dati sperimentali unici, sebbene per un lasso di tempo ridotto.** La microgravità, che è la condizione di apparente (quasi) assenza di peso, può essere raggiunta sulla o vicino alla Terra solo ponendo un oggetto in uno stato di caduta libera. Razzi sonda e capsule, velivoli che effettuano voli parabolici e le torri di caduta rappresentano quindi le cosiddette “microgravity platforms”, ognuna delle quali offre un diverso livello di qualità e durata della microgravità (Tab.1).

Tra di esse, **il volo parabolico è l'unica piattaforma, insieme alla Stazione Spaziale Internazionale (ISS), in cui gli scienziati (ovvero gli astronauti) possono partecipare alle fasi di sperimentazione, intervenire sull'apparato strumentale, seguire direttamente l'andamento delle misure.** In pratica, i voli parabolici prevedono l'esecuzione da parte di un aeromobile di un profilo di volo che alterna manovre ascendenti e

discendenti, da cui appunto il termine “parabola”. Ognuna di queste manovre permette di ottenere fino a circa 22 secondi di assenza di peso.

Per le sue campagne di volo parabolico^[1] l'ESA utilizza un Airbus A-310 della compagnia francese Novespace, presso l'aeroporto di Bordeaux-Mérignac. L'Airbus Zero-G (Fig.1), un aereo di linea opportunamente modificato, esegue nei tre giorni della campagna poco più di novanta parabole nei cieli antistanti la costa di Bordeaux: grazie alle particolari manovre compiute dai quattro piloti, nel corso di ciascuna parabola è possibile ottenere, per circa 20 secondi, condizioni di gravità ridotta o appesanteur, durante la quale i ricercatori europei effettuano i loro test sugli impianti sperimentali montati a bordo dell'aereo, fluttuando nell'aria come astronauti.

Il termine microgravità si riferisce al fatto che non è mai possibile raggiungere la condizione di perfetta assenza di peso: alcune forze esterne residue continuano ad esercitare la loro influenza, come ad esempio la resistenza dell'aria o turbolenze locali, o piccole oscillazioni, cambi di direzione, dovuti alle manovre dei piloti e alle turbolenze che fanno discostare il valore dell'accelerazione di gravità da quello ideale.

Prima di iniziare la manovra parabolica, l'Airbus Zero-G vola orizzontalmente ad una quota di 6.000

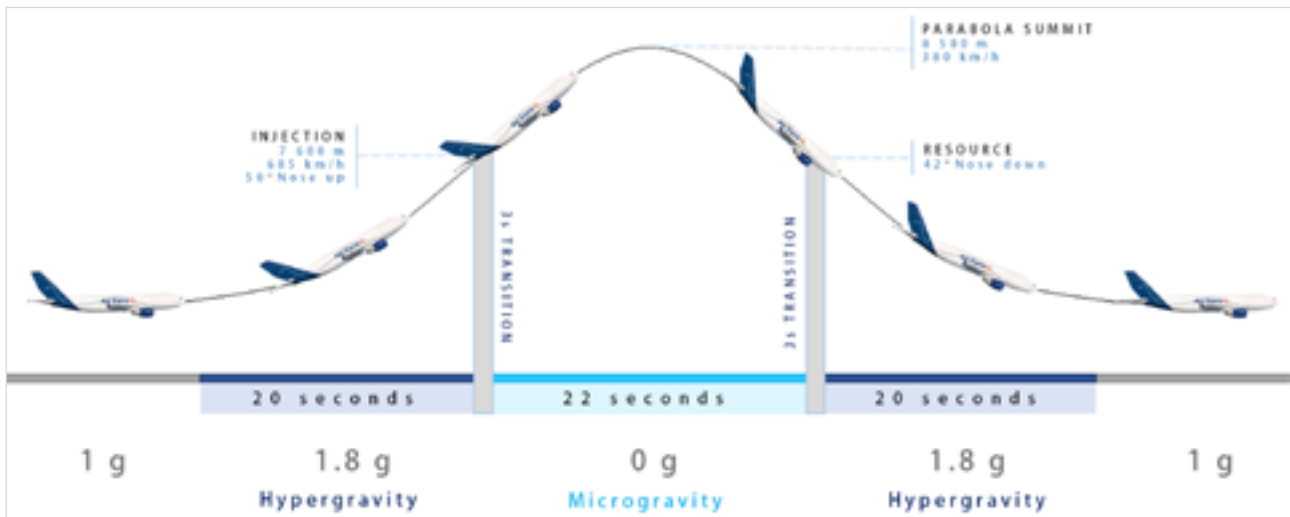


Fig. 2: Le differenti fasi della gravità durante una parabola (credits: ESA_Multimedia)

metri, raggiungendo una velocità di circa 810 km/h (Fig.2). Comincia poi la fase di salita fino a toccare i 47° a 7600 metri, ovvero alla “fase di ingresso” nella quale i passeggeri avvertono una sensazione di ipergravità poiché il peso di ogni corpo a bordo è circa 1,8 volte maggiore di quello sulla terra. A questo punto i piloti ‘annullano’ la portanza alare e, contestualmente, lasciano ai motori la sola potenza necessaria per fornire una spinta che possa controbilanciare la resistenza aerodinamica. Questa fase transitoria dura circa 5 secondi. Da questo momento l'aeromobile e i suoi occupanti sono in caduta libera per circa 22 secondi nei quali l'aereo segue un arco di traiettoria ellittica nel quale la forza di gravità viene bilanciata dalla forza centrifuga. Il percorso, che raggiunge la quota massima di 8.500 metri, ha la forma di un arco di parabola simile a quella che seguirebbe un oggetto lanciato in aria. Quando l'aereo raggiunge nuovamente i 7600 metri, il pilota lo raddrizza e dopo 20 secondi di ipergravità a 1,8 g si ritorna alle condizioni iniziali di volo livellato. Dopo due minuti circa inizia una nuova sequenza. Trenta volte per ciascun giorno dei tre previsti da ogni campagna sperimentale.

Da ENEA nuove tecnologie per lo spazio

Le attività di ricerca in microgravità dell'ENEA hanno inizio nel lontano 2004, con la prima campagna di volo



Fig. 3: L'ENEA a Zero-g

parabolico nell'ambito del progetto BOILING promosso dall'ESA per investigare i fenomeni relativi alla trasmissione del calore in assenza di gravità. Il gruppo di ricerca dell'allora Istituto di Termofluidodinamica guidato dall'ing. Gian Piero Celata ha proseguito poi tale filone di ricerca partecipando, negli anni successivi, ad altri progetti finanziati dall'ESA (MANBO, INWIP, MANBO-2) dedicati nella fattispecie allo sviluppo di sistemi avanzati di controllo termico bifase per applicazioni spaziali, fino ad arrivare alla decima campagna sperimentale di volo parabolico effettuata nel novembre del 2019 (Fig.3). In particolare,

in quest'ultima campagna, la sperimentazione ENEA ha riguardato lo studio, la progettazione e la realizzazione di **sistemi innovativi di raffreddamento a flusso bifase** (Two-Phase Flow Cooling System) **ad alta efficienza**, in grado di dissipare il calore generato dalle apparecchiature elettroniche (CPU, GPU, ecc.) durante il loro funzionamento mediante il cambiamento di fase del fluido refrigerante che circola al suo interno (Fig. 4). La trasformazione di un fluido dalla fase liquida a quella vapore, rappresenta, infatti, il meccanismo di trasmissione di calore più efficiente che possa esistere in natura. Efficiente ma assai complesso, la cui piena comprensione rappresenta ad oggi un traguardo da raggiungere, ancor più distante se si parla di applicazioni in ambito aerospaziale dove l'assenza di gravità non consente di utilizzare le correlazioni sperimentali derivanti dal processamento dei dati ottenuti sugli impianti a terra. **La ricerca ENEA in questo ambito si inquadra in un più ampio settore della ricerca scientifica internazionale per nuove tecnologie in grado di assicurare un migliore controllo termico della sofisticata strumentazione elettronica installata a bordo dei veicoli spaziali, satelliti e stazioni orbitanti: obiettivo per il quale è stato necessario mettere a punto sistemi di trasferimento del calore non solo molto efficienti, ma che possano operare in maniera affidabile anche nello spazio.** Con il progresso tecnologico, infatti, si stima che nei satelliti di nuova generazione (piccoli e grandi) alcuni componenti possano raggiungere flussi termici da dissipare fino a 200-300 W/cm² su piccole superfici di 50-100 cm². Il raffreddamento bifase a convezione forzata è il solo in grado di gestire

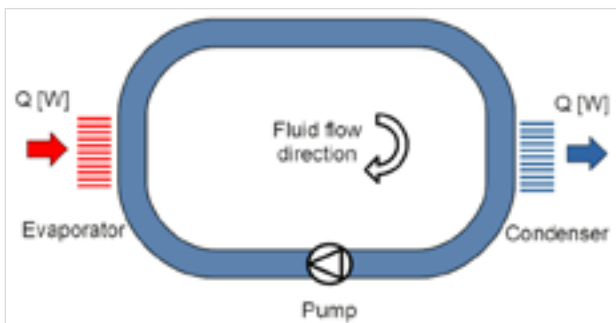


Fig 4: Schema semplificato di un sistema di controllo termico a flusso bifase

flussi termici così elevati, trasportando il calore anche lungo grandi distanze, utile in ambienti di grandi dimensioni dove i radiatori possono trovarsi a vari metri di distanza dai sistemi da raffreddare.

Le dieci campagne del MICRO.BO.

Nel campo della sperimentazione a zero-g è quindi da citare l'impianto MICRO.BO. (MICROgravity BOiling) (Fig.5) dell'ENEA, progettato e realizzato con contributo ASI, è una delle più avanzate facility europee per lo sviluppo e la caratterizzazione di sistemi di trasferimento di calore ad alta efficienza in applicazioni spaziali. Attualmente, l'impianto è impiegato per le prove sperimentali del progetto MANBO (finanziato dall'ESA, European Space Agency). Si tratta di un impianto sperimentale estremamente sofisticato in termini di sistemi hi-tech di automazione, sistemi di sicurezza, attrezzature tecnologiche

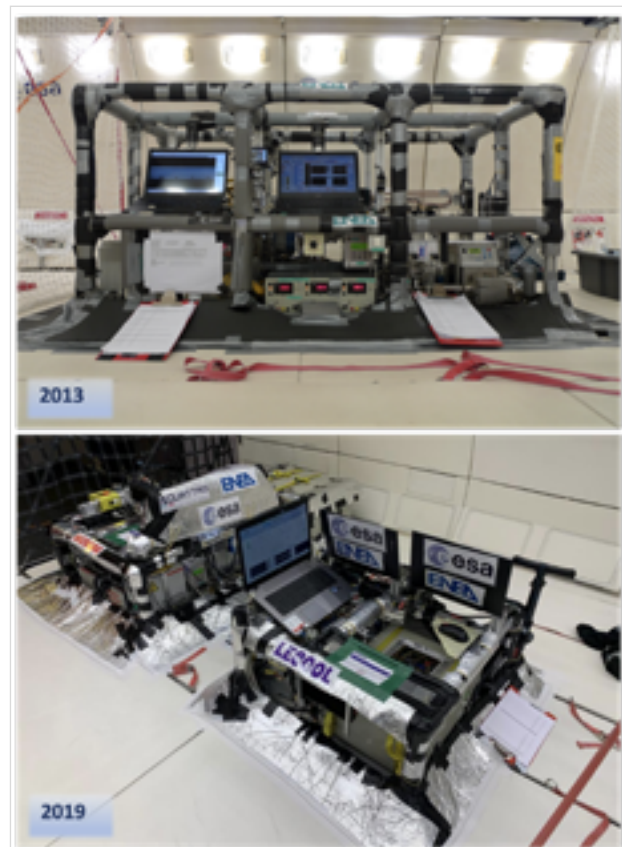


Fig. 5: Configurazione di volo del MICRO.BO.

(es. telecamere ad alta velocità di ripresa, sensori miniaturizzati, trattamenti di coating su tubi trasparenti per riscaldamento del fluido e contestuale visualizzazione).

Le campagne sperimentali ENEA nel corso degli anni hanno riguardato inizialmente lo studio di base degli aspetti qualitativi della fenomenologia dell'ebollizione in condizioni di assenza di gravità, con particolare riguardo alla distribuzione delle fasi liquida e vapore durante il movimento del fluido all'interno di piccoli canali. È stato inoltre investigato il ribagnamento di pareti ad alta temperatura susseguente alla totale evaporazione del fluido, la cui conoscenza è fondamentale per la corretta movimentazione del combustibile criogenico dei razzi vettore (attività finanziata dall'industria aerospaziale francese Snecma).

L'obiettivo delle successive campagne è stato di ottenere valori quantitativi sul rateo di trasferimento di calore in ebollizione in assenza di gravità utilizzando tubi di tre diversi diametri interni (2, 4 e 6 mm), differenti portate del fluido refrigerante e condizioni termodinamiche specifiche definite sulla base delle precedenti esperienze, focalizzando l'attenzione nella zona di massima influenza dell'assenza di gravità sull'ebollizione.

L'utilizzo di tubi in pyrex trattati con uno speciale rivestimento metallico in ITO (Indium-Tin-Oxide, ossido di Indio e Stagno) di uno spessore inferiore a 100 nanometri, ha consentito sia il riscaldamento del fluido (FC-72 e perfluoroesano) per provocarne l'ebollizione ed effettuare così misure accurate dei relativi coefficienti di scambio termico, sia, grazie allo spessore nanometrico di tale rivestimento, la visualizzazione ad alta velocità degli efflussi bifase (liquido/vapore) all'interno del canale. Questa tecnologia ha consentito di ottenere una dettagliata analisi dei fenomeni caratterizzanti l'ebollizione in regime di convezione forzata in assenza di gravità, con risultati determinanti per la progettazione di scambiatori di calore nelle stesse condizioni di assenza di gravità. La peculiarità della campagna sperimentale del 2014 è consistita nell'applicare artificialmente al fluido refrigerante un campo elettrico, tramite un elettrodo collocato al centro della tubazione, con

la funzione di sostituire la forza di gravità assente in condizione di gravità zero con le forze del campo elettrico. Si è trattato di una novità assoluta negli studi sui fluidi in movimento: controllando, tramite il campo elettrico, il fenomeno dell'ebollizione che avviene nel circuito di raffreddamento è infatti possibile "gestirlo" in maniera simile a quanto si riesce a fare a terra. Sono state così acquisite informazioni fondamentali per l'avanzamento tecnologico nella capacità di progettazione di scambiatori di calore per applicazioni spaziali sulla base delle conoscenze derivanti dal loro funzionamento a terra.

Nella campagna 2016 è avvenuta una profonda riprogettazione dell'impianto MICRO.BO, con la suddivisione della struttura originaria in tre rack differenti e la possibilità di avere due differenti circuiti idraulici per la conduzione in contemporanea di altrettanti esperimenti scientifici. Nel primo loop è proseguita la sperimentazione in condizioni di efflusso bifase o flow boiling all'interno di canali circolari di diverso diametro: nella fattispecie, sono stati utilizzati tubi d'acciaio da 1, 2 e 4mm, all'uscita dei quali sono stati collegati dei tubi trasparenti del medesimo diametro per consentire la visualizzazione dei vari regimi di efflusso (flow pattern) al variare della portata di refrigerante e della potenza elettrica imposte nonché dei diversi livelli di gravità raggiunti durante le parabole. Particolare attenzione è stata in questo caso rivolta al calcolo dei coefficienti di scambio termico nelle fasi di transizione da iper a microgravità e viceversa. Il secondo circuito, denominato **LECOOL (Loop for Electronics COOLing)** è stato progettato per eseguire esperimenti di trasferimento di calore in flow boiling in condizioni di gravità variabile utilizzando un innovativo microevaporatore a multicanali, per investigare gli effetti della gravità su tale sistema e testare sul campo un primo dimostrativo tecnologico del two-phase pumped loop sviluppato dai ricercatori ENEA per il controllo termico avanzato dell'elettronica in ambito aerospaziale. Tale configurazione d'impianto è stata poi mantenuta anche nelle due successive campagne di volo, andando principalmente ad investigare i vantaggi derivanti dall'adozione di nuovi fluidi refrigeranti e di sistemi di regolazione e controllo più sofisticati.

Nello spazio ma non solo

Da quanto detto sin qui si evince come la ricerca ENEA nel campo della trasmissione di calore per applicazioni spaziali possa essere considerata tra le più importanti e all'avanguardia a livello mondiale, grazie alla grande esperienza maturata con i voli parabolici e all'analisi dei dati raccolti in condizioni di microgravità durante le dieci campagne sperimentali effettuate nell'ambito dei progetti ESA. Un importante riconoscimento in tal senso è rappresentato dalla recente collaborazione con il Dipartimento di Ingegneria Aeronautica, Elettrica ed Energetica (DIAEE) dell'Università di Roma "La Sapienza", nell'ambito del progetto BARIDI SANA⁽²⁾, uno tra i primi nove esperimenti selezionati dal bando congiunto UNOOSA (Ufficio delle Nazioni Unite per gli Affari dello Spazio Extra-Atmosferico) e CMSA (China Manned Space Agency) per la sperimentazione a bordo della nascente stazione spaziale cinese. Il bando internazionale ha visto coinvolti complessivamente 23 istituzioni di 17 Stati membri delle Nazioni Unite nelle regioni dell'Asia-Pacifico, dell'Europa, dell'Africa, del Nord America e del Sud America: tra i partner del progetto BARIDI SANA vi sono anche l'Università di Machacos in Kenya e la startup italiana In Quattro (spin off ENEA). La sperimentazione riguarderà un sistema di Two-Phase Pumped Loop che verrà installato a bordo della stazione spaziale Tiangong 2, in fase di ultimazione: il sistema sperimentale dovrebbe essere lanciato in orbita a fine 2023. Ma la ricerca ENEA non si è fermata allo spazio. **Nel Laboratorio IPSE del Dipartimento Tecnologie Energetiche e Fonti Rinnovabili, vengono attualmente condotte ulteriori campagne sperimentali per l'ottimizzazione del sistema di raffreddamento progettato per lo spazio, sviluppando al contempo soluzioni innovative e prototipi avanzati per un suo utilizzo specifico nel controllo termico dei processori dei computer e dell'elettronica di potenza per applicazioni terrestri, dal raffreddamento di computer ad alte prestazioni (workstation professionali) al controllo termico dei server di un Data Center HPC (High**

Performance Computing), fino alla gestione termica dell'elettronica dei veicoli elettrici (IGBT, batterie), solo per citare le principali. Infatti, nel corso degli ultimi anni a causa dell'impennata delle prestazioni dei componenti elettronici e della loro sempre maggiore miniaturizzazione, il raffreddamento di tali dispositivi è diventato un problema estremamente delicato e critico non solo nel settore aerospaziale ma in svariati ambiti dell'industria mondiale. I sistemi, semplici ed affidabili, finora maggiormente adottati, basati sul raffreddamento ad aria (air cooling) o a liquido (liquid cooling) sono caratterizzati da una forte limitazione in termini di massima potenza termica asportabile, in particolare per le geometrie ridotte.

La tecnologia studiata in ambito aerospaziale dall'ENEA consente di superare l'inadeguatezza dei sistemi tradizionali e si pone come la nuova frontiera dei sistemi di controllo termico avanzato, evidenziando ancora una volta l'importanza delle cosiddette "ricadute pratiche" della ricerca spaziale nella vita quotidiana di tutti noi.

Ringraziamenti

Un enorme e caloroso ringraziamento va a tutto il personale del Laboratorio di Termofluidodinamica dell'ENEA, oggi Laboratorio Ingegneria dei Processi e dei sistemi per la Decarbonizzazione Energetica, per il supporto tecnico e morale alle attività legate ai voli parabolici. Senza di loro le attività sperimentali in microgravità non avrebbero potuto essere portate a compimento con successo. In particolare: G.P. Celata, F. D'Annibale, A. Lattanzi, M. Morlacca, A. Scotini, M. Sica, L. Simonetti. Un grande ringraziamento va inoltre a coloro che, come assegnisti, dottorandi o tesisti hanno fattivamente contribuito alla preparazione di alcune delle campagne sperimentali del MICRO.BO, partecipando anche ai voli parabolici: C. Valencia Castillo, M. Gervasi, D. Iceri e G. Lancione.

Note

[1] https://www.esa.int/Science_Exploration/Human_and_Robotic_Exploration/Research/Parabolic_flights

[2] http://www.unoosa.org/documents/doc/psa/hsti/CSS_1stAO/1stAO_FinSelResults.pdf; http://www.unoosa.org/documents/pdf/copuos/stsc/2021/crp/AC105_C1_2021_CRP15E.pdf

Il Progetto ESA-INSURE: i satelliti per la messa in sicurezza delle piattaforme energetiche marine

di Antonio Palucci
NATO Advisor

Una cordata pubblico-privata italiana composta da Eni, METAPROJECTS, International Research School of Planetary Sciences, NEXT Ingegneria dei Sistemi, S.R.S. Servizi di Ricerche e Sviluppo e TIM, coordinata da ENEA ha vinto un bando dell'Agenzia Spaziale Europea per uno studio di fattibilità sull'utilizzo di tecnologie satellitari per la messa in sicurezza di infrastrutture energetiche marine come piattaforme petrolifere, del gas e wind farm. Il cuore del sistema è una piattaforma di realtà virtuale aumentata, in grado di integrare i dati provenienti dalle immagini satellitari Earth Observation (radar, ottici ed iperspettrali) e da sensori installati su droni aerei e subacquei, utilizzando i sistemi di navigazione satellitare globale (GSNS), le comunicazioni satellitari (SatCom) e 5G. All'esaurimento dei giacimenti per l'estrazione di olio e gas, molte delle piattaforme in mare aperto arrivano a fine vita. **Si stima che nel prossimo decennio verranno chiusi circa 1.800 pozzi e le loro strutture smantellate.** La maggior parte sono localizzate nel Golfo del Messico, nel Mare del Nord, ma anche in altre parti del mondo compreso il Mediterraneo. **Lo smantellamento di queste piattaforme coinvolgerà operatori e governi, generando un giro di affari che potrebbe ammontare fino a 100 miliardi di dollari nel solo Mare del Nord e circa 2 miliardi di dollari nel Mar Mediterraneo.**

In questo contesto, crescono le opportunità e l'interesse per sistemi innovativi che possano supportare le attività di smantellamento. Una cordata italiana guidata da ENEA e composta da enti di ricerca pubblici e privati, aziende che riuniscono un mix di know-how tecnologico e scientifico di eccellenza in questo settore quali Eni, METAPROJECTS, IRSPS (International Research School of Planetary Sciences),

NEXT Ingegneria dei Sistemi, S.R.S. (Servizi di Ricerche e Sviluppo) e TIM, ha vinto il bando dell'Agenzia Spaziale Europea per un studio di fattibilità particolarmente innovativo.

Il progetto denominato INSURE (INnovation in SUstainable offshoRe dEcommissioning) si focalizza sull'implementazione di nuove metodologie per lo smantellamento in sicurezza di piattaforme petrolifere, di gas naturale ed olioparchi eolici marini giunti a fine vita e la valutazione delle possibili soluzioni di 'second life'.

Una piattaforma di realtà virtuale aumentata

INSURE punta sull'utilizzo di tecnologie innovative, droni, sensori, sistemi IoT (Internet of Things) e di intelligenza artificiale e si incardina nel programma ARTES 4.0 voluto dall'ESA per esplorare nuove opportunità commerciali per l'impiego delle tecnologie satellitari.

L'obiettivo è di mettere insieme queste competenze al servizio dell'industria e promuovere un approccio innovativo che consenta di migliorare la sicurezza dei lavoratori, di potenziare il monitoraggio ambientale, di ridurre l'impatto e i costi operativi, di incrementare l'efficienza delle operazioni e offrire soluzioni per la sostenibilità di investimenti pubblici e privati.

Il cuore del sistema è una piattaforma di realtà virtuale aumentata (AVRP), sviluppata da NEXT Ingegneria dei Sistemi, in grado di integrare le informazioni provenienti dalle immagini satellitari Earth Observation (radar, ottici ed iperspettrali), dai sensori installati su droni aerei e subacquei, utilizzando i sistemi di navigazione satellitare globale (GSNS), le comunicazioni satellitari (SatCom) e 5G (Figura 1).

A questo insieme tecnologico avanzato si aggiungono infrastrutture di tipo cloud per consentire un accesso

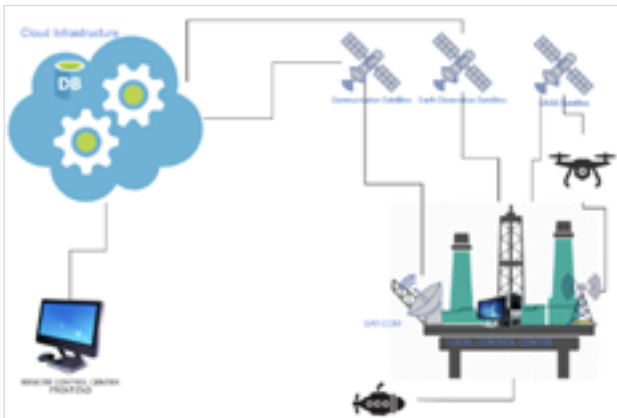


Fig. 1: Il sistema integrato di sorveglianza satellitare e terrestre nella rete di comunicazione



Fig. 2: Sensore per il monitoraggio remoto LIF installato su drone

rapido e completo ai dati ad altissima risoluzione spaziale e temporale e seguirne in tempo reale gli spostamenti e le movimentazioni in campo. Il progetto mira a portare l'effettivo accesso ai dati e alle informazioni dall'IoT al paradigma dell'Internet of Knowledge. Questo particolare aspetto di comunicazioni viene seguito e supportato da TIM. ENEA mette a disposizione le tecnologie di monitoraggio ambientale con strumentazione

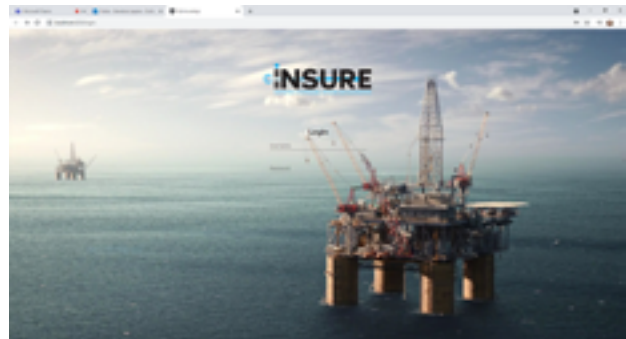


Fig. 3: Portale di accesso al sistema di controllo INSURE

e strutture di alto contenuto di innovazione; in particolare, sta completando lo sviluppo di un payload LIF (Laser Induced Fluorescence) da installare sui droni realizzati in ambito dell'iniziativa EXADRONE sviluppata con MetaProjects presso il Centro ENEA del Brasimone, sull'Appennino tosco emiliano, in provincia di Bologna (Figura 2).

Il drone con il suo payload permetterà di effettuare mappature dello stato di salute delle acque intorno alla piattaforma, monitorando in tempo reale e a distanza l'ecosistema marino e l'eventuale presenza/ assenza di sostanze organiche di derivazione naturale o indotta da rilasci. Per la parte sommersa, ENEA dispone di **droni sottomarini filoguidati ed autonomi**, in grado di operare in sciame e dotati di un'intelligenza artificiale che permette di impostare missioni di monitoraggio e di eseguire operazioni anche complesse in completa autonomia permettendo una comunicazione integrata tra modem acustici e ottici che si collegheranno anche all'esterno.

La piattaforma di realtà aumentata, mostrata in Figura 3, è stata realizzata preimpostando una serie di satelliti con le loro rispettive traiettorie e zone di monitoraggio marino, oltre a quelli di comunicazione basati sulle tecnologie SATCOM e 5G, predisponendo già l'acquisizione dei dati dalle agenzie spaziali (Figura 4). Il partner IRSPS si occupa della selezione delle immagini ottiche e radar e del loro processamento.

A questi dati si aggiungeranno quelli provenienti dai sistemi di indagine mobili (droni e sottomarini) (Figura 5), dati ambientali, video. I componenti software saranno ospitati in un'infrastruttura di tipo cloud, con vantaggi quali la scalabilità, la dematerializzazione

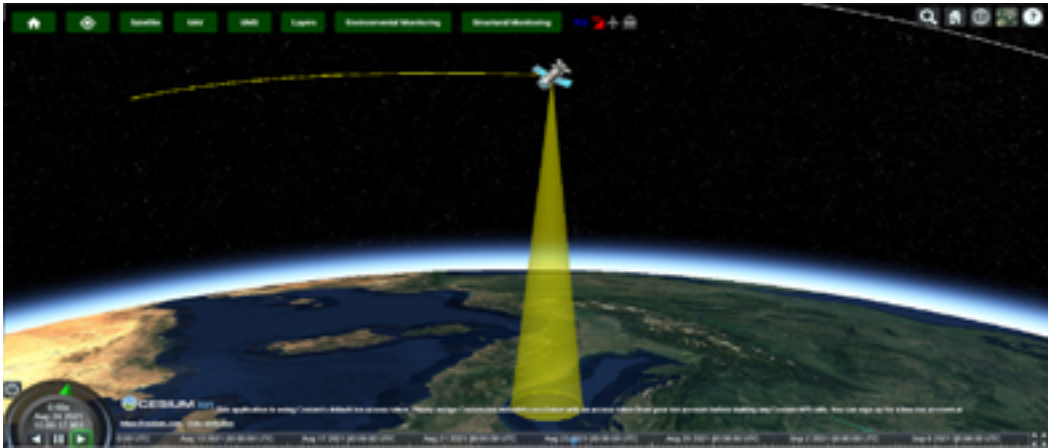


Fig. 4: Traiettorie satellitari preimpostate nel sistema INSURE

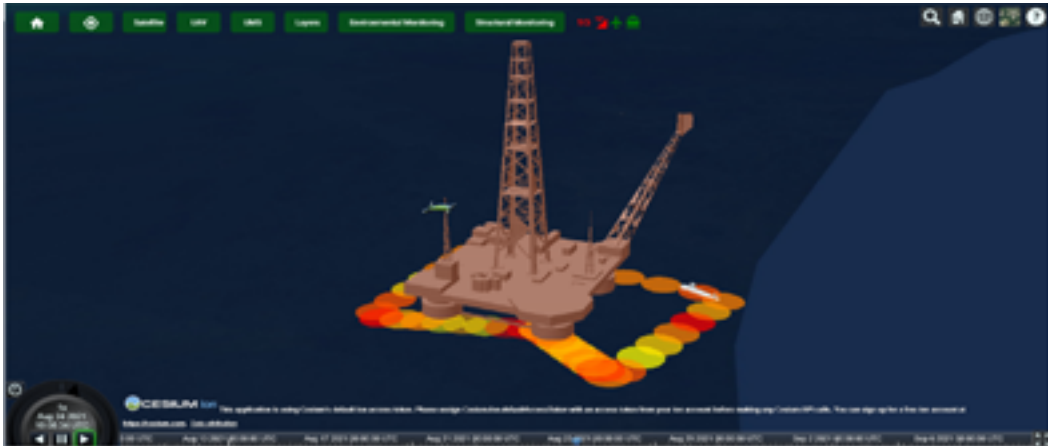


Fig. 5: Controllo remoto di droni volanti e sottomarini

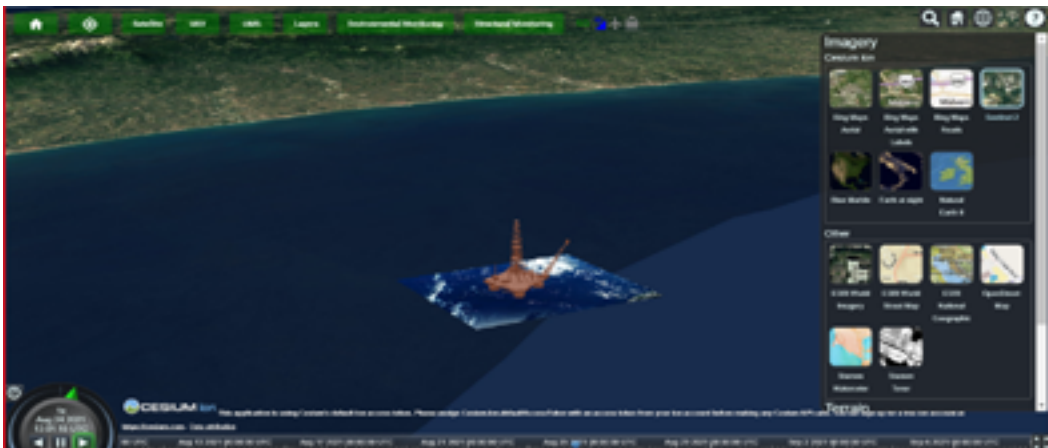


Fig. 6: Sistema Informativo Geografico selezionabile da menù

di server, l'abbattimento dei costi, la velocizzazione nel ciclo di sviluppo e la distribuzione fino all'utente finale. Il front-end del centro di controllo è implementato come una Web-App che integra un GIS 3D (Sistema Informativo Geografico), utilizzato sia per la pianificazione che per il monitoraggio delle attività, la presentazione dei dati geografici e l'incorporazione di immagini EO (Figura 6). La Web-App ospitata nell'infrastruttura cloud implica che il sistema INSURE sarà accessibile a tutti gli utenti autorizzati da qualsiasi luogo, ogni volta che è disponibile una connessione Internet.

'Fase 2' e blue economy

Fra gli aspetti più complessi dello smantellamento vi sono la definizione delle procedure di intervento, la tracciabilità dei trasporti in mare e a terra, l'identificazione delle modalità di trattamento e gestione dei materiali di risulta, aspetti di cui si fa carico il partner S.R.S..

Tra le richieste che ha posto ESA nel bando, c'è anche quella di approfondire un'eventuale 'Fase 2' del processo, nel momento in cui una piattaforma è stata liberata dalle attrezzature proprie dell'attività estrattiva e si apre la possibilità di un suo futuro riutilizzo nell'ambito della blue economy.

INSURE ha cercato sin dall'inizio di coinvolgere istituzioni (Regioni e Ministero), operatori turistici, del settore energetico e non sul territorio per valutare, attraverso l'invio di uno specifico questionario, le proposte per gli eventuali riutilizzi di queste infrastrutture e, nel caso, i requisiti da rispettare. Nell'approccio di progetto, INSURE ha deciso di **focalizzare la sua azione nella zona del bacino mediterraneo italiano**, anche se gli incontri avuti con istituzioni e addetti stranieri hanno confermato che le esigenze sono simili e quindi trasferibili nelle diverse parti del mondo. Gli operatori intervistati hanno sottolineato in particolare l'importanza di conoscere

lo stato delle parti emerse/sommerse, le dimensioni, la distanza dalla costa, le connessioni/comunicazioni esistenti, gli aspetti logistici, i regolamenti, i supporti finanziari e i potenziali riutilizzi. Fra questi ultimi prevale l'idea di applicare nuove tecnologie per la produzione di energia eolica e/o solare e di idrogeno 'verde' che potrebbe essere stoccato nel pozzo esausto o inviato a terra con le sue linee di trasporto. Alcune soluzioni hanno riguardato l'installazione di ripetitori di grandi dimensioni, tenuto conto del bassissimo rumore di fondo e che le piattaforme sono lontane dai centri abitati urbani. Gli operatori del territorio sono invece più interessati ad uno sfruttamento commerciale/turistico tipo resort o 'isole' balneari, mentre enti ed organizzazioni culturali sono interessate ad un'applicazione didattico/formativo come laboratori di addestramento in mare con sviluppo di isole ecologiche sottomarine dedicate.

Grazie quindi a questo coinvolgimento delle imprese operanti nel settore e non, INSURE ha raccolto informazioni utili per realizzare una specifica proposta operativa da sottoporre a valutazione economica per poi essere offerta ad una più vasta platea a livello internazionale. In questo contesto il partner Eni sta eseguendo un'attenta analisi delle proprie infrastrutture marine al fine di individuare la 'candidata' dove testare questo insieme di tecnologie. In generale, lo studio di fattibilità sta gettando le basi per dare vita ad una solida piattaforma dalla quale partire per applicare questa metodologia con un progetto pilota in mare. In conclusione, **INSURE vuole offrire un approccio integrato e un'opportunità per una transizione economica innovativa e sostenibile, al fine di migliorare la gestione dello smantellamento delle strutture in mare aperto arrivate a fine vita, avendo come obiettivi primari il monitoraggio ambientale e gli aspetti socio-economici per la gestione e lo sviluppo di nuove strutture per impianti ad energia rinnovabili e/o sfruttamento turistico rispettoso dell'ambiente.**

REX e TOP-IMPLART, due facilities uniche per la ricerca in campo spaziale

di Monia Vadrucchi

Laboratorio di sviluppo di acceleratori di particelle per applicazioni medicali - ENEA

Nel Centro ENEA di Frascati operano due infrastrutture di particolare rilievo per la ricerca d'avanguardia nel settore dello spazio e dell'aerospazio, gli acceleratori di particelle REX e TOP-IMPLART, fra le poche facilities in Europa in grado di offrire servizi di Radiation Exposure Tests. Per le loro molteplici applicazioni e grandi potenzialità di impiego REX e TOP-IMPLART sono stati inclusi nel programma dell'Agenzia Spaziale Italiana Asi Supported Irradiation Facilities e sono al centro di collaborazioni con istituzioni prestigiose quali ESA, CERN, DIAEE, INAF, CNR, INFN, industrie ed università per studi e ricerche scientifiche e tecnologiche.

Il potere di innovare e competere è stata la chiave per la crescita economica ed il miglioramento della qualità dello stile di vita. La ricerca nell'ambito delle tecnologie spaziali è stata una parte indispensabile di tale innovazione avendo rivoluzionato la nostra vita quotidiana grazie ai progressi in campi come le previsioni del tempo, la comunicazione globale, la gestione del traffico aereo, l'agricoltura, il monitoraggio del clima e dei cambiamenti ambientali, la telemedicina, l'intelligenza artificiale, la nanotecnologia, la robotica e la produzione ed immagazzinamento di energia. Tutto ciò è reso possibile dalle applicazioni sistematiche di varie discipline scientifiche come la fisica e l'ingegneria inserite in un complesso ecosistema costituito da imprese private, dipartimenti centrali, enti locali, centri accademici ed istituzioni pubbliche. In questo panorama, presso il Centro di ricerche ENEA di Frascati, si svolgono diverse attività tecnologiche avanzate per il settore spazio fra le quali la simulazione della radiazione in ambiente spaziale interplanetario con macchine uniche quali gli acceleratori di particelle REX e TOP-IMPLART, in grado di riprodurre le condizioni

del 90% del picco di flusso dei raggi cosmici.

I due impianti operano nel panorama internazionale ed offrono i servizi di Radiation Exposure Tests che solo pochissime altre facilities nel Nord Europa, specificatamente realizzate e destinate a queste finalità, sono in grado di proporre. Nello specifico, questi acceleratori in grado di generare rispettivamente fasci di elettroni/raggi-X e protoni, vengono impiegati per campagne sperimentali nelle quali sistemi biologici, elettronica, materiali e sensori innovativi sono sottoposti ai campi di radiazione per caratterizzarne il comportamento nei casi di utilizzo in condizioni ostili come ad esempio in ambiente spaziale e nucleare.

Collaborazioni sinergiche con ASI, CERN, DIAEE, INAF, CNR, INFN

REX e TOP-IMPLART fanno capo al Laboratorio di sviluppo di acceleratori di particelle per applicazioni medicali dell'Agenzia che ha da tempo solide collaborazioni con ASI, CERN, DIAEE, INAF, CNR, INFN, industria ed Università per studi e ricerche scientifiche e tecnologiche. La sinergia con queste diverse istituzioni è di grande interesse per l'intera comunità spaziale, anche perché la mutua contaminazione e cooperazione contribuisce alla definizione di nuovi approcci tecnici, oltre che commerciali.

Di fatto, i costi di fattibilità per nuove e più impegnative missioni, si basano su vari fattori e, in primis, sulla **conoscenza dei meccanismi del danno indotto dalle radiazioni nell'ambiente interplanetario e dell'effetto delle radiazioni sulla sopravvivenza nello spazio di hardware e merci, campi nei quali gli acceleratori di particelle REX e TOP-IMPLART possono dare un apporto fondamentale.**

La ricerca condotta con gli acceleratori di particelle

REX e TOP-IMPLART in ambito spazio ed aerospazio è rivolta allo studio degli effetti della radiazione **ionizzante sia sui sistemi biologici a breve termine per insorgenza di sindrome da radiazioni acute ed a lungo termine per degenerazione dei tessuti ed insorgenza di tumori o leucemia, sia sui sistemi non biologici attivi e passivi**, materiali e dispositivi, attraverso l'analisi della modifica delle loro proprietà.

Soluzioni innovative ed orientate al futuro in settori di punta

La ricerca d'avanguardia condotta con entrambe queste facilities nell'ambito spazio ed aerospazio è direttamente connessa con altri **settori di punta e di primato in termini di ricerca, economia e proiezione internazionale**: i test riguardano l'interesse verso l'incremento della conoscenza circa il comportamento dell'uomo e dell'hardware in ambienti ostili e pertanto sono di **fondamentale rilievo nel campo dello sviluppo tecnologico**. Ma non solo. La ricerca è rivolta anche allo studio della capacità di sopravvivenza di tessuti vivi, delle attività di rimedio cellulare, di predizione del deterioramento cellulare e della resistenza cellulare per lo studio delle parentele cellulari stesse. **Tutto ciò è di notevole importanza sia in astronautica, sia in campo terrestre, nell'ambito della salute con particolare riferimento alle terapie oncologiche e degenerative e nel settore degli interventi in emergenze radiologiche e nucleari e, dunque, nel comparto ambientale.**

Di ulteriore e notevole interesse relativamente all'esposizione dei sistemi "in-vivo" sono poi le campagne di irraggiamento di sistemi biotici e lo studio della loro interconnessione, ovvero delle capacità dei microrganismi di colonizzare specifici ambienti e quindi di interesse per la geologia, nonché le campagne di interesse dell'area agro-spazio poi strettamente collegate allo sviluppo di tecnologie agrarie per la soluzione dei problemi di approvvigionamento di sostanze nutritive nello spazio per le missioni lunari ed interplanetarie di lunga durata, con il rilevante impatto nell'ambito del Global Food Solving sulla Terra. Gli sforzi e le soluzioni messe a punto in questi settori risultano inoltre anche di fondamentale importanza nella scienza dei

materiali dimostrando forti utilità e competitività se rivolti alla capacità di lavorazione delle materie prime Extra-Terrestri. Tutto ciò, per di più, attira ed istruisce persone giovani e di talento, incoraggiandole a partecipare alle attività che possono fornire soluzioni innovative ed orientate al futuro.

È per tali motivi, per le molteplici applicazioni e le grandi potenzialità di impiego degli acceleratori REX e TOP-IMPLART nel settore spazio ed aerospazio che essi sono stati inclusi nell'Asi Supported Irradiation Facilities. Questo programma dell'**Agenzia Spaziale Italiana** mira a stabilire un insieme coordinato e interattivo di sistemi di radiazione in tutto il paese, al servizio della comunità spaziale nazionale e internazionale, consentendo il trasferimento di conoscenze dal campo della ricerca sulle particelle elementari e sui rivelatori di particelle alla comunità scientifica spaziale e all'industria, con innegabili ritorni competitivi sull'industria e sulla stessa ricerca spaziale. Le attività di ricerca finanziata da ASI riguardano i test per lo studio di:

- ▶ durabilità dei materiali: degradazione; erosione; modifica delle proprietà termiche, meccaniche, ottiche.
- ▶ strumentazione scientifica: rumore o riduzione delle prestazioni.
- ▶ elettronica: danno da spostamento; Indurimenti; effetto singolo evento; garanzia del prodotto spaziale; dose ionizzante totale.
- ▶ effetti delle radiazioni: effetti dannosi sui sistemi biologici; effetti a lungo termine (tumori, leucemia, degenerazione tissutale a lungo termine); effetti a breve termine da Solar Particle Event (sindrome da radiazione acuta).

Inoltre, le attività di REX e TOP-IMPLART, nonché le competenze scientifiche coinvolte, sono inclusi nel white-paper "Italian contribution to Moon exploration".

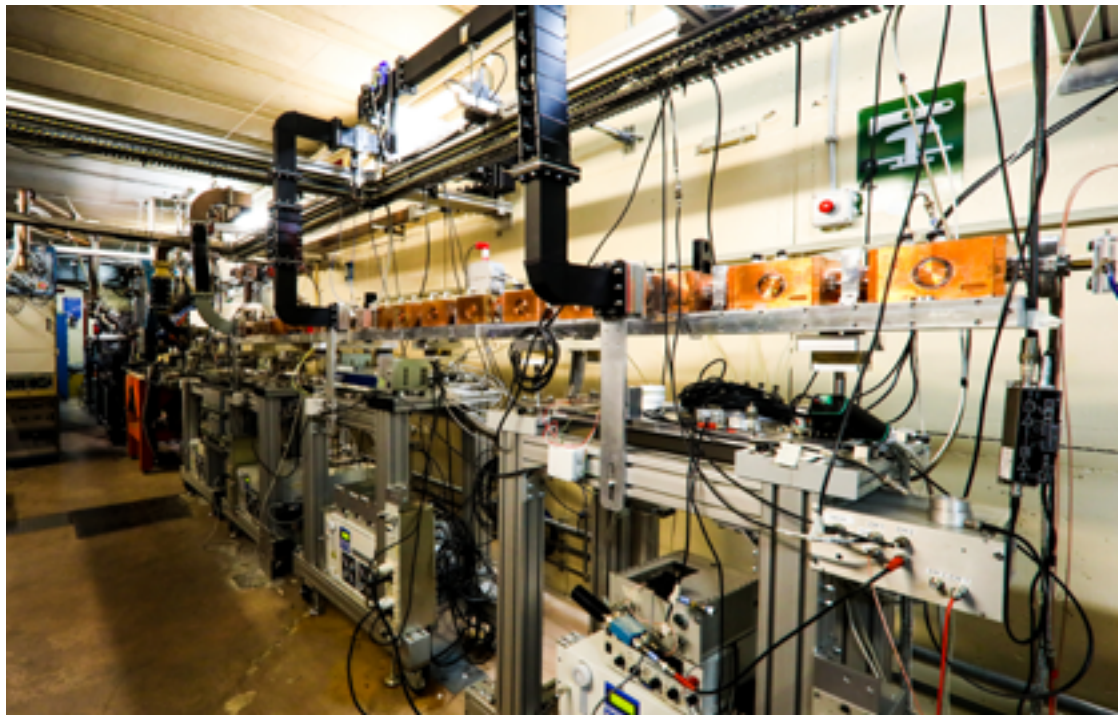
Le caratteristiche di REX e TOP-IMPLART

Presso il centro ricerche ENEA di Frascati, convivono due filoni principali di ricerca: quello legato alla sfida della produzione di energia dal processo di **fusione nucleare** nel quale vengono sviluppate tecnologie all'avanguardia per ogni aspetto del complesso

sistema di un impianto di fusione termonucleare controllata, e quello relativo alle **tecnologie fisiche per la produzione e l'utilizzo delle radiazioni**. In quest'area di lavoro sono stati sviluppati gli acceleratori di particelle REX e TOP-IMPLART, di pertinenza del dipartimento Fusione e Sicurezza Nucleare e della divisione Tecnologie Fisiche per la Salute e la Sicurezza, presso il Laboratorio che sviluppa acceleratori di particelle per applicazioni mediche. Qui vengono progettate e realizzate strutture e impianti per accelerare particelle cariche, principalmente al fine di sviluppare impianti per trattamenti di terapia oncologica con radiazioni ionizzanti. L'apparato REX è stato realizzato nell'ambito di un programma di ricerca industriale nel quale sono state realizzate le ormai commerciali macchine IntraOperativeRadioTherapy per trattamenti oncologici con fasci di elettroni accelerati all'energia dei megaVolt. Esso è stato aggiornato con un progetto finanziato dal governo locale della Regione Lazio per le applicazioni delle radiazioni ionizzanti alla scienza dei materiali ed alla conservazione del patrimonio e dei beni culturali. REX è stato il dimostratore tecnologico di una sorgente di raggi-X prodotta dalla conversione di elettroni di media energia applicata al trattamento dei beni di interesse storico ed artistico, sia per il trattamento anti-biodeterioramento, sia per lo studio specifico - in stretta collaborazione con le Università di Roma - delle proprietà dei materiali costituenti e

degli effetti radioindotti su di essi. Questo impianto è anche attualmente richiesto per studi relativi ai campi della fusione nucleare volti alla caratterizzazione dei materiali utilizzati per la costruzione dei tokamak. Fra i progetti più significativi attualmente in corso nel Laboratorio dedicato di Frascati vi è **TOP-IMPLART, per la realizzazione e lo sviluppo del primo prototipo di acceleratore lineare di protoni per terapia clinica**, operante con microimpulsi di carica, a 3 GHz di frequenza di radiofrequenza. Il programma è finanziato interamente dalla Regione Lazio ed è condotto da ENEA in collaborazione con l'Istituto Superiore di Sanità e l'IRCCS IFO con la partecipazione diretta dell'Istituto Tumori Regina Elena di Roma. Inoltre l'impianto TOP-IMPLART è impiegato per i test sugli effetti della radiazione, già descritti, e anche per diagnostica e studi di fisica delle superfici con i fasci di energia variabile. L'acceleratore TOP-IMPLART, interamente costruito ed ingegnerizzato da ENEA, è una macchina innovativa: tutte le caratteristiche fisiche del fascio di protoni (energia, intensità, direzione, ...) possono essere modificate in modo rapido e attivo, offrendo precisione e flessibilità nell'erogazione della dose di radiazione al bersaglio. Attualmente eroga fasci di protoni aventi l'energia adatta alla cura delle patologie cancerose più superficiali, quali il melanoma uveale ma, a breve, sarà adatto al trattamento di tumori di media e alta profondità.

Vista d'insieme del tratto finale dell'acceleratore lineare TOP IMPLART nell'attuale configurazione.



Sopravvivere nello spazio: le biotecnologie per la ‘Space Economy’

di Angiola Desiderio, Luca Nardi, Eugenio Benvenuto

Laboratorio Biotecnologie - ENEA

Nelle missioni spaziali di lunga durata, per garantire la sopravvivenza degli astronauti, sono indispensabili tecnologie bio-rigenerative altamente innovative per coltivare cibo e verdure freschi. ENEA si colloca in primo piano in questo contesto di ricerca, insieme all'Università Federico II di Napoli, al CNR, all'Università La Sapienza di Roma, grazie ad una ricca e articolata progettualità sviluppata negli ultimi anni, in stretta collaborazione con ASI.

La nuova corsa allo spazio vede protagoniste collaborazioni tra le principali agenzie spaziali internazionali e società private di settore, con la prospettiva di spingere l'esplorazione umana oltre l'orbita terrestre. Per valutare adeguatamente la fattibilità di un'impresa così ambiziosa, è stato sviluppato dalla NASA il programma "Artemis" che prevede la creazione di una stazione spaziale orbitante circumlunare, e successivamente l'atterraggio sulla Luna⁽¹⁾. L'obiettivo è quello di **gettare le basi per un'economia lunare, mettendo a punto soluzioni e tecnologie per l'esplorazione sostenibile**, che consentano di realizzare il prossimo passo da gigante: inviare l'uomo su Marte⁽²⁾.

Una delle problematiche da affrontare per le missioni spaziali di lunga durata, lontane dall'orbita terrestre, è legata all'impossibilità di fare affidamento solo sui costanti scambi con la Terra per garantire la sussistenza degli astronauti. Infatti, se sul nostro pianeta diventa sempre più impellente il cambio di paradigma economico-ambientale, impostando i consumi su modelli basati sul riciclo delle risorse, in ambito spaziale questo requisito diventa irrinunciabile. Cibo, acqua e aria devono poter essere rigenerati e riciclati (almeno in parte) per garantire la sopravvivenza degli equipaggi in missione.

La sfida è quindi quella di ricostruire “tecnosistemi” spaziali, per il riciclo ottimale di risorse ed energia

La ricerca spaziale degli ultimi anni si sta concentrando sulla definizione di “sistemi biorigenerativi per il supporto alla vita nello Spazio” (Bioregenerative Life Support Systems, BLSS), finalizzati ad individuare soluzioni biologiche e tecnologiche nella direzione di una gestione sempre più autonoma delle risorse primarie in missioni umane. Si tratta in pratica di ecosistemi artificialmente controllati, basati sull'interazione tra uomo, piante superiori ed altri organismi, in cui ogni componente biologica utilizza come risorsa i prodotti di scarto del metabolismo degli altri.

Perché coltivare nello spazio

In questo contesto, **le piante indubbiamente giocano un ruolo chiave come fonte di cibo fresco**, integrando opportunamente le razioni alimentari preconfezionate (che per un viaggio su Marte ammonterebbero ad alcune tonnellate) e garantendo un apporto nutrizionale equilibrato (vitamine, sostanze bioattive, sali minerali), fondamentale per la sopravvivenza in condizioni ambientali estreme. Oltre alla capacità di convertire anidride carbonica in biomassa edibile, gli organismi vegetali sono in grado di rigenerare risorse preziose come aria, acqua e nutrienti minerali.

La coltivazione di verdure fresche rappresenta quindi la soluzione ottimale per rispondere alle esigenze di missione. Poiché l'ambiente spaziale è proibitivo, tanto per l'uomo quanto per i vegetali, è indispensabile creare ambienti artificiali che ripropongano condizioni opportune per la crescita delle piante. Piccoli impianti di coltivazione in assenza di suolo (in genere in



Vegetable Production System: Sperimentazione sulla Stazione Spaziale Internazionale (Progetto V-GELM di ENEA)
Source: <https://www.flickr.com/photos/nasa2explore/23860137753/>

condizioni idroponiche), attrezzati con illuminazione specifica, controllo di temperatura e umidità, sono stati appositamente progettati per rispondere ai requisiti restrittivi di ambienti spaziali: alta produttività per unità di superficie tale da sopperire alle esigenze alimentari dell'equipaggio, controllo automatizzato delle condizioni ambientali per minimizzare i tempi operativi, ambiente estremamente pulito per evitare contaminazioni, sistemi per il riciclo di acqua, aria e substrati per la coltivazione.

Da non sottovalutare è anche il **beneficio psicologico** per l'equipaggio, derivante dalla coltivazione e dal consumo di verdura fresca che richiamano la familiarità di abitudini e ambienti terrestri. Accorgimenti di questo genere sono oggetto di studi finalizzati a far fronte allo stress psicologico cui gli astronauti sono soggetti, dovuto alle condizioni di isolamento in un ambiente totalmente artificiale.

I progetti 'Lunar Greenhouse', 'EDEN ISS', 'Veggie' e 'APH'

La ricerca agrotecnologica ha portato alla formulazione di diverse unità prototipali di coltivazione in ambiente confinato, con la prospettiva di adattamento a condizioni spaziali. Tra questi, è stato testato in Antartide il modulo **EDEN ISS**, su progetto diretto dell'Agenzia Spaziale Tedesca, con la partecipazione del CNR e di società italiane, per simulare le condizioni estreme di coltivazione in isolamento che caratterizzano le missioni extraterrestri⁽³⁾. Similmente,

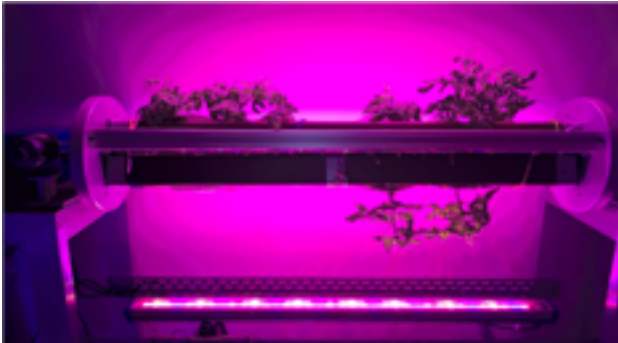
la NASA ha diretto il progetto "**Lunar Greenhouse**", una serra montabile su avamposti lunari o planetari, ideale per ospitare un sistema idroponico biorigenerativo⁽⁴⁾. Alcuni sistemi sono stati sottoposti a sperimentazione direttamente in ambiente spaziale. E' il caso del **Vegetable Production System, noto come "Veggie"**, delle dimensioni di un bagaglio a mano. Veggie è stato assemblato sulla Stazione Spaziale Internazionale (ISS), allo scopo di fornire elementi di studio sulla crescita delle piante in condizioni di microgravità⁽⁵⁾. Altro esempio di impianto sperimentale sulla ISS è costituito dall'**Advanced Plant Habitat (APH)**, che, rispetto a Veggie, contiene telecamere e sensori che registrano i parametri ambientali e di crescita, quindi non necessita di particolari cure da parte dell'equipaggio.

La chiusura dei cicli biorigenerativi nello spazio

Le piante sono pertanto organismi utili per fornire cibo e rigenerare aria e acqua in missioni umane di lunga durata. Per ottenere però un ecosistema il più possibile "autoconsistente" è necessario chiudere il ciclo, attraverso il recupero della biomassa di scarto. Questo concetto diventa particolarmente stringente in ambiente spaziale, dove gli scambi con l'esterno sono praticamente nulli e dove è fondamentale ottimizzare il riutilizzo di tutte le componenti necessarie al mantenimento della vita.

La prima risorsa da recuperare è l'acqua. Ma anche gli scarti organici, come residui alimentari, parti vegetali non edibili, reflui umani, carta usata per l'igiene personale ed ambientale, plastiche, rappresentano una risorsa preziosa che in un contesto estremo non può andare perduta. Sono allo studio soluzioni di trattamento dei rifiuti organici che prevedono processi di degradazione fisica e biologica (operata da batteri, funghi ed insetti), per favorire la bioconversione in componenti chimiche reinseribili nel ciclo produttivo come fertilizzanti per promuovere la crescita e lo sviluppo delle piante.

Una delle prospettive più interessanti del reimpiego di materia organica rigenerata dagli scarti è la possibilità di poter ammendare terreni lunari o marziani. Questa potenzialità va nella direzione di utilizzare risorse



Clinostato per studiare la risposta delle piante in condizioni di microgravità simulata (Progetto Hortspace di ENEA)

in situ per favorire lo sviluppo di un ecosistema a supporto della sopravvivenza dell'uomo su altri pianeti. Infatti i suoli extraterrestri sono composti da matrici minerali, prive di componente organica, quindi di per sé non adatte alla coltivazione di piante. L'aggiunta di compost da biodegradazione degli scarti potrebbe rendere fertili anche questi substrati, modificandone opportunamente le caratteristiche chimico-fisiche.

Il ruolo dell'ENEA nella bioeconomia spaziale 'made in Italy'

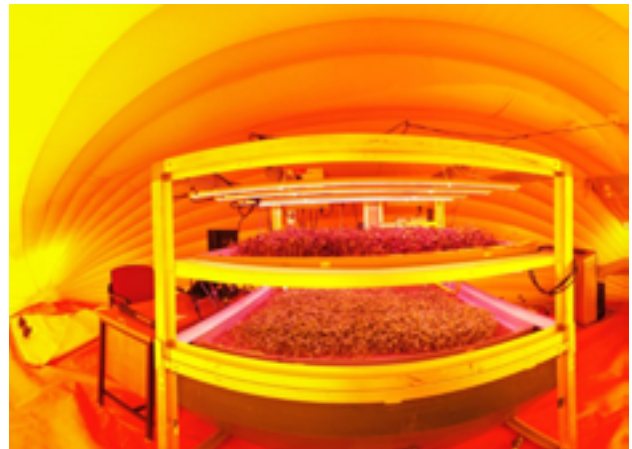
L'Agenzia Spaziale Italiana (ASI) sta fortemente promuovendo le ricerche nazionali finalizzate all'esplorazione umana dello Spazio, favorendo la creazione di una rete scientifica italiana e supportando la progettualità. Questo ha permesso di sviluppare competenze uniche, riconosciute a livello internazionale, che mettono l'Italia tra i paesi in grado di proporre soluzioni valide e innovative. Infatti, oggi la nostra nazione è tra le poche al mondo a disporre di una filiera completa, che si avvale della collaborazione tra ricerca pubblica ed imprese di settore, per realizzare ecosistemi basati sulle tecnologie bio-rigenerative a sostegno della vita degli astronauti, come definito dalle linee guida tracciate per l'esplorazione umana dello Spazio, inclusa la Global Exploration Roadmap 2020.

ENEA si colloca in primo piano in questo contesto di ricerca, insieme all'Università Federico II di Napoli, al CNR, all'Università La Sapienza di Roma, grazie ad una ricca e articolata progettualità sviluppata negli ultimi

anni, in stretta collaborazione con ASI. La Divisione Biotecnologie e Agroindustria (ENEA, SSPT-BIOAG), in particolare, ha saputo coniugare con successo la competenza scientifica maturata al proprio interno sulle applicazioni delle biotecnologie a sistemi di coltivazione d'avanguardia, con multidisciplinarietà della ricerca (in termini di conoscenza scientifica e dotazione tecnologica) che costituisce uno dei tratti distintivi di ENEA sul territorio nazionale.

I progetti ENEA per l'"agospazio"

Questa scelta sinergica è alla base di attività di ricerca finalizzate ai BLSS per lo Spazio, che si sono intensificate nel tempo, a partire dal **progetto BIOXTREME**, che ha fornito elementi conoscitivi di fondamentale utilità per lo studio della risposta delle piante in condizioni che simulano gli stress spaziali. A questo si è affiancato il **progetto HORTSPACE**, per la realizzazione di un impianto di coltivazione idroponica in ambiente controllato e la selezione di varietà vegetali biofortificate ('ideotipi') per una maggiore resilienza alle condizioni estreme dell'ambiente spaziale. Il sistema messo a punto per la coltivazione di 'microverdure' in condizioni idroponiche controllate è stato poi validato in un esperimento su campo, organizzato all'Austrian Space Forum (OeWF), nell'ambito di una simulazione di missione su Marte realizzata nel deserto dell'Oman (Missione AMADEE-18). I progetti **V-GELM** e **LOOPS-M**



Prototipo di serra lunare automatizzata presentato nell'ambito dell'iniziativa europea IGLUNA (Progetto V-GELM di ENEA)

(nell'ambito dell'iniziativa europea IGLUNA) hanno previsto la progettazione di una serra lunare automatizzata per la nutrizione degli astronauti.

Su questo filone di ricerca si collocano anche i diversi progetti attualmente attivi, tra cui **REBUS** per la definizione di cicli di recupero della biomassa di scarto attraverso bioprocessi controllati, **GREENCUBE** per la coltivazione di piante in ambiente estremo attraverso la realizzazione di un microsatellite che è stato lanciato oltre l'orbita terrestre bassa con il lanciatore Vega-C, **SOLE** per la realizzazione di una camera di coltivazione per lo spazio con illuminazione LED in grado di potenziare le proprietà nutraceutiche delle microverdure prodotte, **MICROx2** per la realizzazione di un BLSS per lo spazio basato sull'utilizzo delle piante superiori. **L'innovazione della ricerca ENEA per lo spazio sta nell'integrazione di soluzioni tecnologiche idonee alle peculiari e limitanti condizioni di coltivazione in ambiente spaziale (spazi ristretti, standardizzazione di processo, automatizzazione del sistema, ottimizzazione delle risorse) con i requisiti di qualità e sicurezza.** E' infatti fondamentale nella formulazione di un BLSS, garantire l'assenza di contaminanti potenzialmente pericolosi per la salute degli astronauti, sia nella produzione di alimenti freschi che nei processi di riciclo delle risorse. Al tempo stesso, è importante mettere a punto sistemi di produzione che garantiscano un'alta qualità degli

alimenti, privi di contaminanti chimici o biologici, in grado sia di rispondere alle esigenze nutrizionali appositamente studiate, sia di produrre cibo funzionale ricco di metaboliti a potere nutraceutico (come antiossidanti e vitamine) per contrastare lo stress fisiologico cui l'equipaggio è sottoposto.

Le innovazioni per lo spazio ritornano a terra

E' ben noto come la corsa all'esplorazione dello spazio abbia rappresentato un potente acceleratore per la messa a punto di soluzioni tecnologiche che hanno poi trovato ampia applicazione sulla Terra. La coltivazione fuori suolo in ambiente controllato risponde all'attuale tendenza a sviluppare un'agricoltura di precisione, che permetta una produzione primaria di qualità virtualmente in qualsiasi ambiente, comprese le città e gli ambienti climaticamente ostili (come i deserti o le aree polari) o contaminati. L'ulteriore vantaggio di questa prospettiva è la produzione a chilometro zero, che rafforza la sostenibilità dei sistemi di coltivazione "indoor". D'altro canto, lo sviluppo per lo spazio di tecnologie controllate per il riciclo degli scarti organici trova pieno riscontro nell'interesse crescente per un'economia circolare terrestre sempre più efficiente e sostenibile, nell'intenzione di far fronte alla scarsità delle risorse, ai cambiamenti climatici, alla degradazione dei suoli, all'abbandono delle pratiche agronomiche poco redditizie.

Riferimenti

- [1] <https://www.nasa.gov/what-is-artemis>
- [2] <https://www.nasa.gov/content/nasas-journey-to-mars>
- [3] https://www.dlr.de/content/en/articles/news/2019/03/20190823_project-eden-iss-presents-results.html
- [4] <https://www.nasa.gov/feature/lunar-martian-greenhouses-designed-to-mimic-those-on-earth>
- [5] https://www.nasa.gov/sites/default/files/atoms/files/veggie_fact_sheet_508.pdf



Radiazioni e spazio: una facility unica per la ricerca

di Alessia Cemmi, Ilaria Di Sarcina, Carino Ferrante, Giuseppe Ferrara, Francesco Filippi, Fabio Panza, Jessica Scifo, Adriano Verna

Laboratorio Sistemi Nucleari Innovativi - ENEA

Le Agenzie Spaziali europee e dei maggiori Paesi industrializzati prevedono per i prossimi anni, la realizzazione di vere e proprie basi lunari permanenti da utilizzare anche come avamposto per missioni di esplorazione spaziale di lunga durata come quelle con destinazione Marte. Per rendere possibile tutto ciò, è necessario conoscere e prevenire gli effetti che l'ambiente spaziale - e le radiazioni di cui è ricco - può provocare sull'uomo e sui dispositivi tecnologici. Queste (e molte altre) attività di ricerca vengono condotte presso Calliope, una facility di irraggiamento gamma collocata presso il Centro Ricerche ENEA Casaccia di Roma^[1], che vanta caratteristiche uniche nel panorama italiano ed europeo ed è fra gli impianti più utilizzati per applicazioni in ambito spazio.

Lo spazio non è caratterizzato solo da assenza di ossigeno, da temperature molto basse o estremamente elevate, ma anche dalla presenza di radiazioni di origine cosmica e solare di diversa natura, sia cariche che neutre (raggi gamma, elettroni, raggi X, neutroni, ioni pesanti, protoni...). Sono proprio le radiazioni a rappresentare uno degli ostacoli più complessi da superare per l'esplorazione dell'Universo da parte dell'uomo. Queste infatti sono in grado di provocare sensibili modifiche e danneggiamenti sia nei sistemi biologici che nei materiali e nei dispositivi tecnologici impiegati nelle missioni spaziali di breve e lunga durata.

Ricreare a terra le radiazioni spaziali: il Programma ASIF

Proprio nell'ottica di evitare problematiche legate alla salute degli astronauti ed al malfunzionamento degli apparati elettronici, ottici e meccanici, è di

fondamentale importanza la possibilità di eseguire a Terra qualifiche e test di resistenza a radiazione in impianti in grado di simulare l'ambiente spaziale. È proprio in questo ambito che l'Agenzia Spaziale Italiana ASI, a partire dal 2016, ha sviluppato il **Programma ASIF (ASI Supported Irradiation Facilities)** con la finalità di costituire un network coordinato e operativo di primo livello delle facilities di irraggiamento italiane a servizio della comunità spaziale nazionale ed internazionale, secondo i requisiti e standard di riferimento dall'Agenzia Spaziale Europea. Questo processo vede attualmente coinvolti impianti e laboratori di eccellenza di ENEA, INFN e Università degli Studi di Milano Bicocca: tramite l'istituzione di un portale interattivo (ASIF gateway), gli utenti istituzionali, industriali e del mondo della ricerca potranno fruire di una serie di servizi di irraggiamento con radiazioni di diversa tipologia. Per quanto riguarda l'ENEA, il programma vede coinvolti gli impianti di irraggiamento del Dipartimento Fusione e Tecnologie per la Sicurezza Nucleare - FSN (Calliope, Frascati Neutron Generator FNG, i reattori nucleari Triga e Tapiro e gli acceleratori Top-Implart e Rex).

Da molti anni la facility di irraggiamento gamma Calliope, con caratteristiche uniche nel panorama italiano ed europeo, opera nel Centro Ricerche ENEA Casaccia (Roma) nel campo della qualifica e dello studio della resistenza a radiazioni di materiali e sistemi biologici per ambienti ostili (Spazio, nucleare, fisica delle alte energie)^[2].

La facility è costituita da un impianto di irraggiamento a piscina con sorgente di Cobalto-60 (energia media di 1,25 MeV, attività massima di 3.7×10^{15} Bq, intensità di dose massima di 8 kGy/h) e da una cella di irraggiamento di grandi dimensioni, ma anche da

un laboratorio dosimetrico e di caratterizzazione per lo studio delle modifiche provocate dai raggi gamma su materiali e dispositivi. Per simulare al meglio condizioni ambientali differenti da quelle terrestri si possono condurre test di irraggiamento in vuoto o in atmosfera inerte, a basse o ad alte temperature, oppure prove sotto tensione. Per studiare le condizioni di irraggiamento, il personale del laboratorio ha sviluppato anche modelli di simulazione basati su codici Monte Carlo validati attraverso numerosi dati sperimentali dosimetrici ottenuti all'interno della camera di irraggiamento.

Per queste sue caratteristiche, la facility Calliope è uno degli impianti più utilizzati per le applicazioni in ambito spazio. Tra gli aspetti più importanti dal punto di vista industriale bisogna senza dubbio considerare i test di qualifica dei componenti e sistemi elettronici. **Qualsiasi dispositivo, sensore, memoria o microchip che viene inviato nello spazio deve possedere un grado di affidabilità estremamente elevato ed assenza di difetti in modo da non compromettere l'esito della missione cui è destinato.** A tal fine questi sistemi devono rispondere a stringenti standard e normative specifiche e devono essere opportunamente validati dalle campagne sperimentali di qualifica a terra. Le stesse problematiche valgono per componenti ottici quali lenti, specchi, dispositivi multistrato che possono andare incontro a perdita di trasparenza o a fenomeni di opacizzazione se esposti a radiazione: questo sarebbe deleterio in satelliti o telescopi^[3, 4]. Altri materiali di grande utilizzo in questo ambiente estremo sono i polimeri, impiegati come fibre per la realizzazione delle tute degli astronauti, nei compositi per materiali strutturali (molto leggeri e meccanicamente resistenti), nella realizzazione di film e tessuti, oppure come adesivi e collanti nei dispositivi optoelettronici. I test di irraggiamento in questo caso sono volti a verificarne il mantenimento delle caratteristiche per evitare fenomeni indesiderati di infragilimento o degradazione. **In questo ambito, la facility Calliope, in collaborazione con altri laboratori ENEA, partecipa allo studio del comportamento di fluidi sintetici refrigeranti più sicuri ed affidabili rispetto a quelli attualmente utilizzati sulla Stazione Spaziale Internazionale (ISS).**

Packaging alimentari, protezioni cosmiche e 'mattoni' spaziali

Un'altra applicazione di grande interesse riguarda lo sviluppo di packaging alimentari edibili realizzati a partire da sostanze naturali: in tal modo si otterrebbe il duplice risultato di un maggiore apporto nutrizionale alla dieta degli astronauti e di una sostanziale riduzione di rifiuti, importante problematica legata alle lunghe permanenze dell'uomo nello Spazio o sulla ISS^[5].

Come accennato in precedenza, un altro aspetto molto interessante è rappresentato dalla realizzazione di **protezioni dalle radiazioni cosmiche**. In tal modo, la creazione di avamposti lunari e successive missioni verso Marte o verso zone dell'Universo ancora più remote potrebbero davvero tradursi in realtà in quanto diventerebbero più sicure per la salute degli astronauti. **Sono attualmente allo studio, in collaborazione con l'Università della Tuscia, le proprietà schermanti delle regoliti lunari e marziane, polveri di varia composizione chimica che costituiscono gli strati più superficiali di questi corpi celesti. Dai primi promettenti risultati, si potrebbe pensare di utilizzare queste risorse già presenti nello spazio per produrre veri e propri mattoni per edilizia.** Si avrebbe quindi un valore aggiunto legato al concetto di In Situ Resource Utilization (ISRU), sempre più richiesto dalle Agenzie Spaziali internazionali, che porterebbe ad un enorme risparmio economico evitando l'invio di materiale dalla terra.

La facility Calliope inoltre collabora con vari Laboratori ENEA del Dipartimento Sostenibilità dei Sistemi Produttivi e Territoriali - SSPT nell'ambito dell'agrospace, in particolare per studiare **gli effetti delle radiazioni spaziali sulle piante**. Attualmente sono due i progetti principali in cui è coinvolto l'impianto: Greencube e HortSpace.

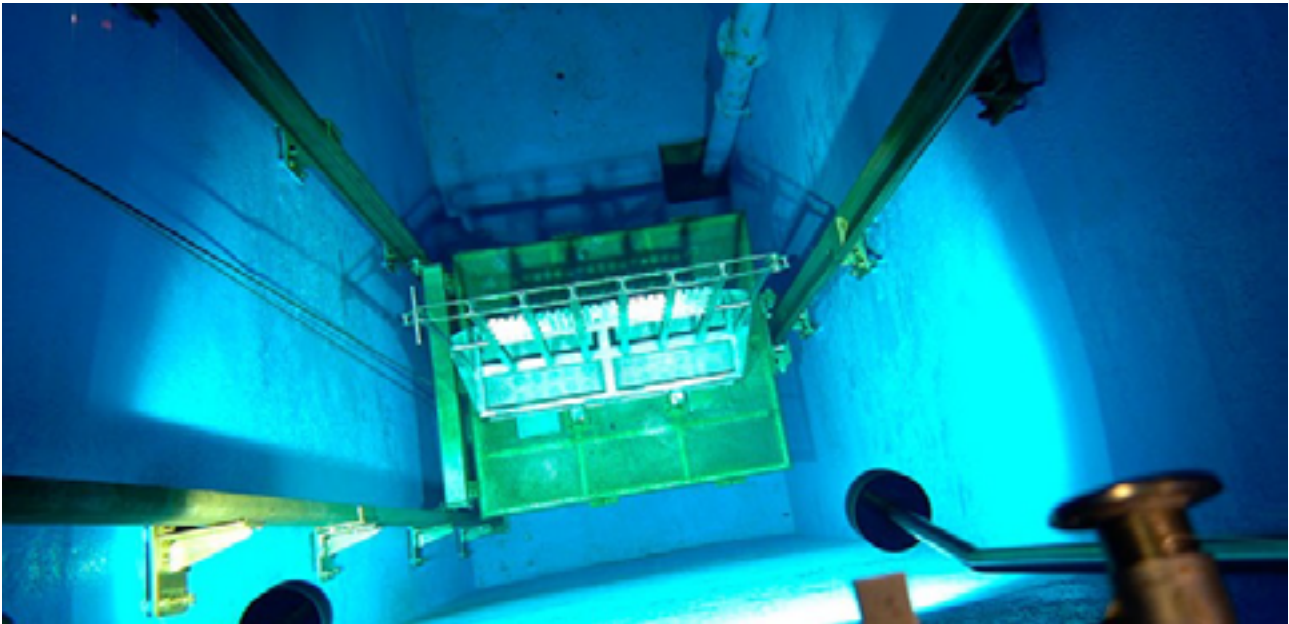
Entrambi i progetti riguardano l'integrazione della dieta degli astronauti con verdure fresche da far crescere direttamente nello Spazio. Con Greencube si stanno effettuando, per la prima volta, test in vivo degli effetti della radiazione gamma sulla pianta di crescita (*Lepidium sativum*). Il progetto HortSpace invece è volto allo sviluppo di piattaforme

in cui i vegetali vengono arricchiti con sostanze nutraceutiche. In questo caso l'utilizzo della radiazione gamma consente di simulare condizioni ambientali estreme, studiare gli effetti biologici sui parametri fisiologici e morfologici delle piante e sul loro ciclo di crescita oltre che effettuare test sulle capacità antiossidanti delle piante stesse.

Infine, avete mai pensato che alcuni microrganismi possono sopravvivere non solo nelle zone più estreme del nostro pianeta (temperature e acidità elevate, presenza di sali e metalli pesanti) ma anche nello spazio? È questo un aspetto di grande interesse per l'astrobiologia, la disciplina che studia la possibilità di esistenza di forme viventi su altri pianeti. **È proprio questo il contesto in cui, in collaborazione con**

l'Università della Tuscia e con l'Università di Roma La Sapienza, si studiano le capacità di sopravvivenza di microrganismi sottoposti ad irraggiamento.

In particolare, la prima collaborazione riguarda il *Cryomyces antarcticus*, detto banalmente fungo nero, presente nelle rocce antartiche. Questo fungo è molto ricco di melanina e la sua presenza lo rende così resistente alle radiazioni da poter pensare ad un suo utilizzo come materiale schermante; la seconda collaborazione ha invece come oggetto un particolare ceppo batterico che, in presenza di materiale sabbioso ed urea, è in grado di produrre un vero e proprio bio-cemento. Anche in questo caso quindi sarebbe possibile utilizzare risorse già in situ in caso di presenza umana.



Riferimenti

- [1] S. Baccaro, A. Cemmi, I. Di Sarcina, G. Ferrara (2019), Gamma irradiation Calliope facility at ENEA – Casaccia Research Centre (Rome, Italy), ENEA Technical Report RT/2019/4/ENEA.
- [2] S. Baccaro, A. Cemmi, I. Di Sarcina (2019), Calliope 60Co gamma irradiation facility for space qualification at ENEA-Casaccia research centre (Rome), *Phys Astron Int J.* 3(2):94–100. DOI: 10.15406/paij.2019.03.00164.
- [3] A.J. Corso, E. Tassarolo, S. Baccaro, A. Cemmi, I. Di Sarcina, D. Magrin, F. Borsa, R. Ragazzoni, V. Viotto, A. Novi, M. Burresi, F. Pellowski, M. Salatti, I. Pagano, M. G. Pelizzo (2018), Rad-hard properties of the optical glass adopted for the PLATO space telescope refractive components, *Optics Express*, Vol. 26, Issue 26, pp. 33841-33855; DOI: 10.1364/OE.26.033841.
- [4] S. Baccaro, A. Cemmi (2016), Optical characterization of ion-doped crystalline and glassy matrices operating under hostile environmental conditions, *J. Phys: Conf. Series* 763 (2016) 012001; DOI: 10.1088/1742-6596/763/1/012001.
- [5] S. Baccaro, O. Bal, A. Cemmi, I. Di Sarcina (2018), The Effect of Gamma Irradiation on Rice Protein Aqueous Solution, *Rad. Phys. Chem.*, 146, pp. 1-4; DOI: 10.1016/j.radphyschem.2018.01.011.

L'Osservatorio ENEA di Lampedusa e i dati satellitari

di Daniela Meloni, Alcide di Sarra, Francesco Monteleone, Giandomenico Pace, Damiano Sferlazzo

Laboratorio di Osservazioni E Misure per l'ambiente e il clima -ENEA

La giornata nazionale dello spazio, istituita per la prima volta nel 2021 e celebrata il 16 dicembre, è l'occasione per evidenziare il ruolo che l'Osservatorio climatico ENEA di Lampedusa ha nella validazione dei dati satellitari. Infatti, le osservazioni da sensori installati su satelliti giocano un ruolo sempre più importante per la comprensione dei fenomeni che riguardano i cambiamenti climatici e gli impatti antropici su atmosfera, superficie terrestre e oceani; ma affinché le informazioni ricavate dalle osservazioni satellitari siano utilizzabili e affidabili, è necessario che vengano verificate mediante confronto con misure di riferimento da terra, ottenute con strumenti in situ o mediante tecniche di telerilevamento.

Negli anni, le missioni spaziali dedicate all'Osservazione della Terra si sono avvalse di strumenti sempre più evoluti e sensibili, con i quali oggi si ha la possibilità di esaminare con sempre maggiore dettaglio informazioni sulla composizione dell'atmosfera, le proprietà biogeochimiche delle acque, le tipologie di suolo e come queste evolvono a causa dei cambiamenti che l'uomo sta operando sull'ambiente.

In questo contesto, l'Agenzia Spaziale Italiana ha iniziato un programma di validazione delle osservazioni del PRecursore IperSpettrale della Missione Applicativa (PRISMA), sviluppato dalla stessa ASI e lanciato nel 2019, composto da un sensore iperspettrale e da una camera pancromatica.

Grazie alla altissima capacità di distinguere le firme spettrali dei materiali che compongono la superficie terrestre nell'intervallo di lunghezze d'onda 0.4-2.5 micrometri, PRISMA è in grado di identificare la composizione chimico-fisica degli oggetti che osserva, oltre alla loro forma geometrica. Le applicazioni di PRISMA coprono una vasta gamma di

ambiti, che vanno dalla geologia all'agricoltura, alla protezione delle coste, alla qualità delle acque, allo studio del clima. L'attività di calibrazione/validazione di PRISMA, **attraverso il progetto PRISCAV**, (PRISMA CALibration/Validation), si avvale di una rete nazionale di siti rappresentativi della varietà geografica italiana (siti montani, agricoli, forestali, lacustri e marini), in cui sono disponibili sia strumenti che riproducono in situ la misura da satellite, sia le proprietà atmosferiche (parametri meteorologici, contenuto di gas, aerosol e nubi) che influenzano il segnale proveniente dalla superficie terrestre rilevato dallo spazio.

Misure di fondamentale importanza

L'ENEA partecipa al progetto PRISCAV attraverso una collaborazione con il CNR-ISMAR, che effettua misure di radiazione uscente dal mare presso l'Osservatorio Oceanografico di Lampedusa, unico sito della rete di validazione rappresentativo di condizioni di mare aperto nel Mediterraneo. Presso l'Osservatorio Atmosferico sull'isola, inoltre, si effettuano misure continuative della struttura e composizione dell'atmosfera e di proprietà degli aerosol, indispensabili per correggere il segnale atmosferico che perturba la misura da satellite. Inoltre, la posizione, le ridotte dimensioni e l'elevata frequenza di condizioni di cielo sereno, maggiore che nel resto di Italia, rendono Lampedusa un sito ottimale per la validazione di osservazioni satellitari. **I confronti tra dati misurati presso l'Osservatorio e dati ricavati da satellite hanno già mostrato come le misure di Lampedusa siano rappresentative di una porzione di mare più vasta: questa peculiarità garantisce condizioni di omogeneità nella scena vista dallo spazio, ottimali per l'inversione del dato satellitare.**

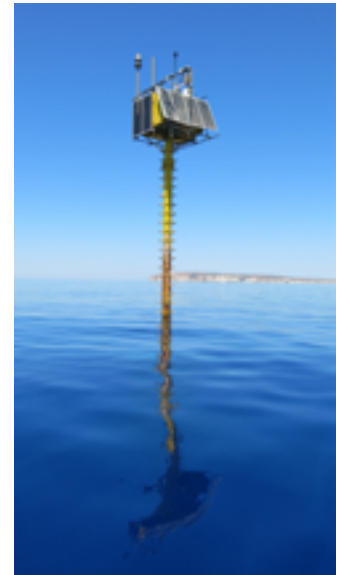
I primi risultati del progetto PRISCAV mostrano che le acque di Lampedusa sono tra le più trasparenti del mondo. Questa regione del Mediterraneo ha un contenuto di clorofilla molto basso per buona parte dell'anno. In queste condizioni la radiazione uscente dal mare è molto bassa, e sono necessari sia una elevata sensibilità del sensore da satellite che una accurata correzione atmosferica per poter derivare le proprietà delle acque. In queste difficili condizioni le

misure ottenute a Lampedusa sono di fondamentale importanza.

L'unicità dell'Osservatorio e la grande disponibilità di dati, che sta crescendo grazie ai progetti di potenziamento in corso legati principalmente alle infrastrutture europee ACTRIS ed ICOS, rendono Lampedusa un sito importantissimo per la validazione delle osservazioni satellitari presenti e future, sia a livello nazionale che europeo.



Osservatorio atmosferico di Lampedusa



Osservatorio Oceanografico di Lampedusa

Riferimenti

<https://www.asi.it/scienze-della-terra/prisma/>
<https://ambiente.sostenibilita.enea.it/projects/priscav>

Il laboratorio “Eccimeri” per test sui materiali spaziali

di Paolo Di Lazzaro, Daniele Murra, Luca Mezi, Sarah Bollanti, Francesco Flora

Laboratorio sorgenti diagnostiche e interazioni laser materia - ENEA

Il laboratorio “Eccimeri” del Centro di Ricerche ENEA di Frascati ha sviluppato sin dal 1980 competenze nella realizzazione, sviluppo e caratterizzazione di sorgenti di radiazione ultravioletta (UV) e nell'estremo ultravioletto, sia coerenti (Laser) sia non coerenti. In quest'ambito, di recente è stato progettato e realizzato un apparato di irraggiamento ultravioletto, già sperimentato con successo per test di resistenza alle radiazioni solari fuori dall'atmosfera terrestre su materiali da usare anche in applicazioni spaziali.

Nel Centro ENEA di Frascati il laboratorio “Eccimeri” ha sviluppato sin dal 1980 competenze nella realizzazione, sviluppo e caratterizzazione di sorgenti di radiazione ultravioletta (UV) e nell'estremo ultravioletto (EUV), sia coerenti (Laser) sia non coerenti^[1]. Tali sorgenti di radiazione sono state utilizzate in molti campi, dalla realizzazione di transistori a film sottile alla sverniciatura controllata di graffiti su materiali metallici, plastiche e pietre, dalla modifica delle proprietà chimiche della superficie di materiali elettronici e tessuti alla micro-litografia EUV di ultima generazione, dalla sanificazione di superfici alla scrittura invisibile su film sottili dielettrici per anticontraffazione.

Recentemente, il laboratorio Eccimeri ha progettato e realizzato un apparato di irraggiamento UV per test di resistenza di materiali da usare in applicazioni spaziali, mostrato nella figura 1.

La sorgente di radiazione UV è costituita da una lampada a vapori di mercurio a media pressione alimentata da una scarica elettrica da 500 W. Il “cuore” della lampada consiste in un bulbo cilindrico posto nel fuoco di un riflettore parabolico di alluminio e in una sottile finestra di quarzo a protezione del bulbo. Le prestazioni della lampada sono state caratterizzate

misurando lo spettro di emissione e la distribuzione spaziale dell'intensità ultravioletta al variare della distanza dal bulbo. La lampada è raffreddata da una ventola tangenziale ed è posizionata sopra una camera cilindrica da vuoto, di diametro 18 cm e profondità 12 cm, avente una camicia esterna raffreddata ad acqua. La camera da vuoto è chiusa da una finestra di quarzo che consente una trasmissione del 90% della radiazione ultravioletta. I campioni da irraggiare sono posti nella camera che può essere riempita di gas inerte allo scopo di evitare l'ossidazione dei campioni e di trasferire il calore all'intera superficie delle pareti della camera, in modo da limitare a 40°C la temperatura massima dei campioni, anche per irraggiamenti di lunga durata. La pressione nella camera, l'emissione nell' ultravioletto e nel visibile, la temperatura dei campioni e la quantità di ossigeno residuo nella camera sono costantemente monitorati 24/24, 7/7 da un sistema di controllo e acquisizione dati gestito da un datalogger dedicato, basato su una scheda Arduino. Il sistema di acquisizione dati è monitorato e gestito da remoto durante l'intera durata dell'irraggiamento.

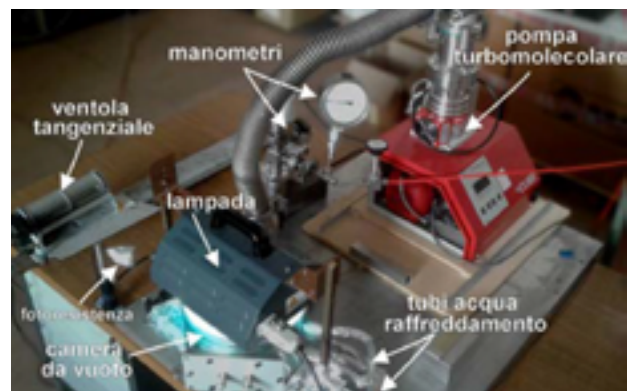


Fig.1: apparato di irraggiamento UV per test di resistenza di materiali

I progetti Nano Hybrid Transparent Materials e FIRST-FLEX

L'apparato è in grado di irraggiare i campioni in continua, con controllo in tempo reale della dose rilasciata (energia per unità di superficie) e delle sue eventuali variazioni nel periodo di irraggiamento. Il sistema è stato provato fino a 42 giorni consecutivi, 24/24.

Dalle misure effettuate, l'intensità della radiazione emessa dal nostro apparato nella finestra spettrale ultravioletta (lunghezza d'onda compresa fra 200 e 400 nm) è pari a 80 mW/cm² cioè 7 volte più elevata rispetto all'intensità ultravioletta irraggiata dal sole fuori dall'atmosfera terrestre. In pratica, il nostro apparato prova la resistenza all'ultravioletto di un materiale nello Spazio in un tempo 7 volte più breve di quello effettivo. I test di resistenza alla radiazione ultravioletta sono stati effettuati in atmosfera inerte nell'ambito dei seguenti progetti:

- ▶ **progetto Nano Hybrid Transparent Materials**^[2], che si propone di realizzare materiali poliimmide nano-ibridi trasparenti (cioè a bassa assorbanza di luce solare) adatti all'uso come substrati per i Second Surface Mirrors nei telescopi spaziali^[3]. I test di resistenza dei materiali sono stati effettuati irraggiando una dose complessiva UV pari a 3.000 ore solari equivalenti (equivalent sun hours, esh);
- ▶ **progetto FIRST-FLEX** mirante a sviluppare un nuovo tipo di riflettori solari ottici, gli Optical Sun Reflectors (OSR). Si tratta di elementi termici passivi che svolgono un ruolo cruciale nella progettazione termica di un veicolo spaziale. Gli OSR sono infatti usati per migliorare la capacità

di smaltimento del calore dei radiatori esterni e per ridurre l'assorbimento del flusso solare. In questo ambito, il nostro apparato è stato usato per irradiare un nuovo tipo di rivestimento inorganico depositato sulla superficie flessibile (metallica o polimerica) degli OSR con radiazioni UV con una dose complessiva pari a 300 esh^[4] secondo gli standard ECSS / ESA pertinenti^[5, 6].

A titolo di esempio, nelle figure 2 e 3 mostriamo alcuni rivestimenti candidati per gli OSR prima e dopo l'irraggiamento.

In un altro ambito, allo scopo di rilevare gli effetti sinergici tra UV e ossigeno atmosferico nel processo di degradazione dei materiali, abbiamo irraggiato alcuni campioni in aria, senza la camera da vuoto, come mostrato nella figura 4.

È allo studio un perfezionamento del sistema che prevede di sostituire la lampada a mercurio con una matrice di LED UV in modo da riprodurre più fedelmente lo spettro solare nel range spettrale 200 nm–400 nm, e limitare gli effetti termici per consentire irraggiamenti in vuoto, oltre che in atmosfera controllata. Riassumendo, l'impianto di irraggiamento UV sviluppato presso il laboratorio Eccimeri del Centro ENEA di Frascati può sperimentare su qualsiasi materiale e in condizioni controllate gli effetti dell'irraggiamento ultravioletto che il sole rilascia, fuori dall'atmosfera terrestre, in un periodo di tempo sette volte maggiore rispetto al test. L'impianto è già stato sperimentato con successo su vari campioni, ed abbiamo in programma un upgrading per riprodurre ancora più fedelmente lo spettro solare nell'intervallo spettrale 200 nm – 400 nm.

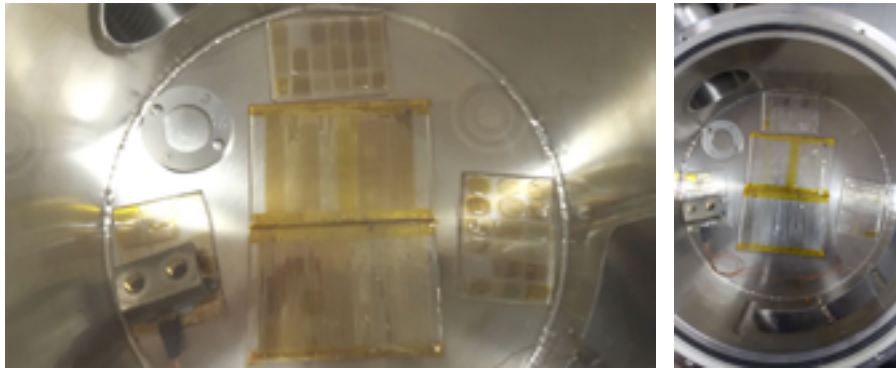


Fig.2 e 3: alcuni rivestimenti candidati per gli OSR prima e dopo l'irraggiamento

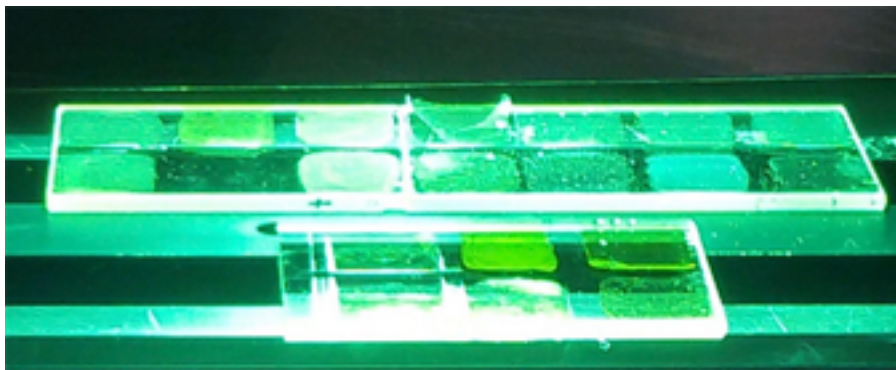


Fig.4: irraggiamento di alcuni campioni in aria, senza la camera da vuoto

Riferimenti

- [1] P. Di Lazzaro, R. De Angelis, G.P. Gallerano, A. Doria: "Tutti i 'colori' dell'ENEA" Energia, Ambiente e Innovazione, n. 6, pagg. 38-54 (2015). DOI: 10.12910/EAI2015-092 <http://www.enea.it/it/seguici/pubblicazioni/pdf-eai/n-6-novembre-dicembre-2015/tutti-i-colori-enea.pdf>
- [2] P. Di Lazzaro, D. Murra, S. Bollanti, F. Flora, L. Mezi, T. Kaplanoğlu, B. Alpat: "Test di substrati per telescopi spaziali: irraggiamenti nell'ultravioletto di film poliimmide in aria, vuoto e atmosfera controllata" RT/2017/9/ENEA (2017). <https://iris.enea.it/retrieve/handle/10840/8534/526/RT-2017-09-ENEA.pdf>
- [3] V. Liedtke, L. Bača, N. Stelzer, J. Eck, D. Lavielle, T. Rohr: "Development of nano-hybrid transparent polymer film" Proceedings of the 13th International Symposium on Materials in the Space Environment (At Pau, France, 2015)
- [4] B. Alpat, M. Gulgun, G. Çorapcioglu, M. Yildizhan, P. Di Lazzaro, D. Murra, et al.: "Testing of substrates for flexible optical solar reflectors: irradiations of nano-hybrid coatings of polyimide films with 20 keV electrons and with 200-400 nm ultraviolet radiation" Journal of Instrumentation, vol. 14, T06003 (2019). DOI <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1748-0221/14/06/T06003/pdf>
- [5] Vedi le regole standard in ECSS-Q-ST-70-06C – Particle and UV radiation testing for space materials, available at <http://ecss.nl/standard/ecss-q-st-70-06c-particle-and-uv-radiation-testing-for-space-materials/>
- [6] Vedi le regole standard in ECSS-E-ST-20-06C – Spacecraft charging available at <http://ecss.nl/standard/ecss-e-st-20-06c-spacecraft-charging/> <https://ecss.nl/standard/ecss-e-st-20-06c-rev-1-spacecraft-charging-15-may-2019/>

Navigare tra i pianeti con la bussola ‘marziana’

di Francesco Flora, Sarah Bollanti, Paolo Di Lazzaro, Gian Piero Gallerano, Luca Mezi, Daniele Murra, Fabrizio Andreoli, Luca Murra

Laboratorio sorgenti diagnostiche e interazioni laser materia - ENEA, Laboratorio Tecnologie Nucleari - ENEA, Univ. di Roma Sapienza

Quasi tutti gli escursionisti portano con sé una bussola per orientarsi. Ma se potessero fare una passeggiata su un altro pianeta, ad esempio su Marte, che è privo di campo magnetico, scoprirebbero subito che la loro bussola non è più in grado di funzionare, come pure sarebbe inutilizzabile il GPS del loro cellulare (dal momento che su Marte non esiste ancora una costellazione di satelliti di tipo GPS). Come orientarsi allora? La tecnica più semplice, in questo caso, è quella che veniva usata sulla Terra prima dell'invenzione della bussola magnetica: guardare la posizione del sole nel cielo. Un tempo il sole era il riferimento principale sia per avere un'indicazione approssimata dell'ora e sia per l'orientamento. Tuttavia, per ottenere la direzione del Nord in modo preciso, era necessaria un'intera giornata. Bisognava infatti piantare uno stilo verticale (detto gnomone) su un piano orizzontale e tracciare sul piano, per tutta la giornata, il percorso seguito dall'ombra della punta dello stilo. Fatto ciò, come mostrato in Fig. 1, si tracciava un cerchio centrato sulla base dello stilo e sufficientemente

grande da intersecare il percorso dell'ombra: la retta (rossa in Fig. 1) di congiunzione tra i due punti di intersezione (A e B in Fig. 1) forniva con precisione la direzione Est-Ovest mentre quella che univa la base dello stilo al punto medio (M) tra le intersezioni, detta "linea meridiana" o anche "linea del mezzogiorno", forniva la direzione del Nord geografico (per essere precisi, tale direzione indicherebbe il Sud geografico se questa stessa operazione venisse eseguita nell'emisfero australe).

Successivamente, quasi due secoli fa, furono inventate le prime bussole solari, strumenti in grado di indicare la direzione del Nord geografico con precisione ben superiore a quella delle bussole magnetiche, attraverso un rilevamento del sole, da eseguire in pochi minuti grazie al mirino dello strumento, e attraverso la consultazione degli almanacchi delle effemeridi che fornivano i valori quotidiani di declinazione del sole ed dell'equazione del tempo, indispensabili per far funzionare la bussola.

A partire dal 2000, con l'avvento della microelettronica e dei rivelatori di immagine (CCD), le bussole solari sono diventate strumenti compatti e funzionanti automaticamente. Quella brevettata da ENEA, qui mostrata in Fig. 2, è tra le più precise e con un alto livello di compattezza ed automazione^[1,2]; essa fornisce la direzione del Nord geografico in pochi secondi e con una accuratezza di 1 primo d'arco (0.017°), ovvero circa 100 volte migliore di quella consentita dalle bussole magnetiche.

“ENEA Mobile Sun Compass”, la App che trasforma i cellulari in una bussola smart

Recentemente è stata creata anche una versione “smart”, ovvero una App, denominata “Enea

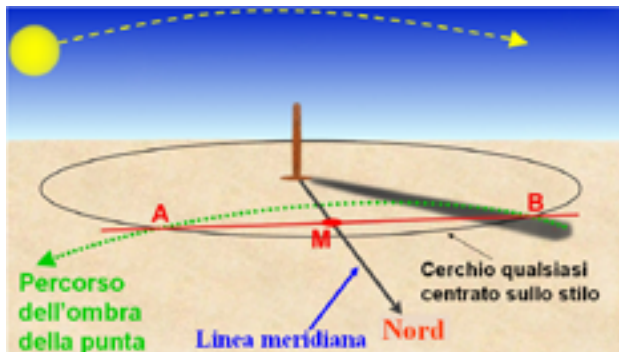


Fig. 1: Antico metodo di orientamento con il sole: uno stilo verticale piantato su una superficie piana orizzontale

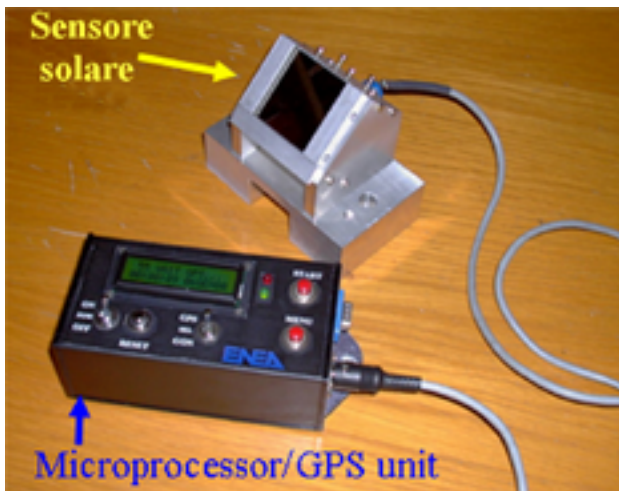


Fig. 2: La bussola solare elettronica di alta precisione brevettata da ENEA

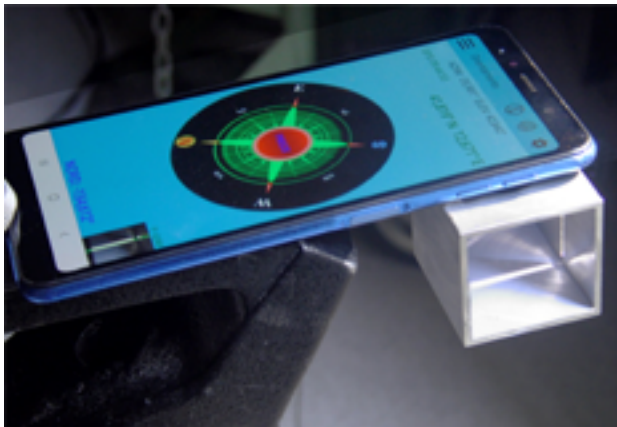


Fig. 3 La versione smart della bussola ENEA: la App Enea Mobile Sun Compass riconosce la direzione del sole a partire dall'immagine di una riga di luce solare prodotta da una fenditura e proiettata sul fondo di una piccola scatola metallica collocata sotto al cellulare

Mobile Sun Compass” (precedentemente chiamata “Sunpass”), che trasforma qualsiasi cellulare (attualmente solo se di tipo Android) in una bussola solare con caratteristiche simili a quella della bussola ENEA brevettata. In questo caso l'accuratezza raggiungibile, limitata dalle imprecisioni meccaniche dei cellulari, è di circa 0.1° , quindi ben 10 volte migliore^[3] di quella delle bussole magnetiche.

Nella Fig. 3 è riportato un cellulare mentre è in funzione Sunpass.

Come nel caso della bussola ENEA, anche con Enea Mobile Sun Compass la direzione del sole si calcola

a partire dall'immagine di una riga di luce prodotta da una fenditura posta su una parete laterale di una piccola scatola collocata sotto al cellulare (a destra nella Fig. 3). A differenza di quanto avviene nella bussola ENEA, dove la riga di luce viene direttamente proiettata su un sensore di immagine, in questo caso l'immagine viene catturata dalla fotocamera del cellulare e poi elaborata in tempo reale per l'ottenimento della pendenza della riga di luce (immagine in basso a destra sul display di Fig. 3). Sul display appare la rosa dei punti cardinali indicante il Nord geografico e l'azimut del lato lungo del cellulare (in basso in blu, vedi Fig. 3).

Una bussola ‘marziana’

Sarebbe possibile modificare la bussola solare ENEA in modo che possa funzionare in un altro pianeta, ad esempio su Marte? La risposta è positiva. La bussola ENEA infatti non utilizza tabulati e non si collega ad internet per poter funzionare. E' completamente autonoma e calcola le effemeridi del sole in tempo reale sfruttando una soluzione analitica approssimata delle leggi di Keplero^[4] che sono ovviamente valide in tutto il sistema solare.

In linea di principio, sarebbe quindi sufficiente sostituire i parametri astronomici della Terra (inclinazione dell'asse, eccentricità dell'orbita, posizioni del perielio-afelio, ecc.) con quelli di Marte e la bussola sarebbe perfettamente in grado di fornire le coordinate del sole visto dal nuovo pianeta e la direzione del Nord di quel pianeta^[5]. Inoltre, per certi aspetti, una bussola solare su Marte godrebbe di alcuni vantaggi naturali rispetto alla sorella terrestre: su Marte c'è sempre il sole (non piove mai ed il cielo non si annuvola mai) ed il diametro angolare del sole visto dal pianeta rosso è circa $2/3$ di quello che abbiamo sulla terra (quindi circa 0.3° anziché 0.5°) per cui la riga di luce solare che si produce nella bussola sarebbe più stretta. La possibilità di ottenere un discreto funzionamento della bussola anche in condizioni critiche, ad esempio quando il cielo è offuscato da deboli nuvole o da polvere o addirittura parzialmente coperto come durante un'eclissi di sole, è già stata dimostrata^[6].

In realtà, per trasformare la bussola attuale in una

bussola marziana servono ulteriori accorgimenti, legati al fatto che l'immediato interesse, emerso anche dal recente convegno dell'Agenzia Spaziale Italiana "Tavolo tematico su Strumentazione Scientifica Spaziale" a novembre 2020, è di avere una bussola che possa funzionare senza un operatore ed ancorata a bordo di un mezzo mobile.

Questo significa che la bussola deve avere molteplici sensori (almeno 4 a 90° tra loro in modo da coprire contemporaneamente un campo visivo di 360° in cui cercare il sole), una fenditura modificata in modo che possa determinare automaticamente l'altezza del sole ed essere integrata di una base inerziale (detta IMU), ovvero di un dispositivo elettronico che fornisce continuamente la direzione della verticale del luogo anche in presenza delle forze apparenti che si presentano nei mezzi mobili, come la forza centrifuga (durante una sterzata del mezzo mobile) o la forza di inerzia (durante una frenata).

Altre importanti implementazioni, per ottenere la bussola solare marziana, sono legate alla diversità dell'ambiente marziano rispetto a quello terrestre per cui è necessario:

- ▶ Un orologio a tempo medio marziano (l'ora esatta su Marte è diversa da quella sulla terra)
- ▶ Un sistema di sincronismo dell'orologio con il mezzogiorno locale (ad esempio prevedendo di mantenere ferma la bussola per un'intera giornata).
- ▶ Disponibilità di materiali leggeri indeformabili per l'involucro della bussola.
- ▶ Lo studio di un sistema automatico di pulizia delle finestre di ingresso per proteggerle dalla polvere marziana (ad esempio tramite una finestra aggiuntiva lentamente girevole).

L'idea di una bussola/meridiana solare per missioni marziane non è nuova. Già sulla missione del Rover "Spirit" del 2004-2008 era stata installata una bussola solare rudimentale, mostrata in Fig. 4.

La bussola solare che emergerebbe dalla ricerca sopra descritta presenterebbe un nuovo ed importante vantaggio rispetto a quanto utilizzato fino ad oggi per missioni spaziali: fornirebbe la direzione del Nord geografico di Marte in tempo reale con una



Fig. 4: La meridiana/bussola solare del rover Spirit su Marte. La foto di destra mostra chiaramente l'effetto delle polveri marziane dopo un solo anno
Source: Image Courtesy Nasa/JPL

accuratezza così elevata (circa 0.01°) da consentire un'integrazione bidimensionale (x,y) del movimento del mezzo mobile (rover) tale da poterne determinare costantemente le proprie coordinate geografiche, come se avesse a bordo un GPS. In questo modo, il mezzo mobile potrebbe produrre fotografie del territorio marziano con precisi riferimenti geografici (latitudine, longitudine ed orientamento) e rientrare alla base, dopo un viaggio di chilometri, con un errore di pochi metri.

Ovviamente, per poter ottenere questa integrazione del movimento è indispensabile che il rover sia dotato di un dispositivo che misuri con precisione la distanza che viene percorsa.

Le ricadute industriali

Lo sviluppo di una bussola solare marziana, necessario affinché essa possa funzionare a bordo di mezzi mobili, avrebbe immediate ed importanti ricadute per applicazioni terrestri ed in particolare per:

- ▶ navigazione su mezzi mobili terrestri convenzionali (navi ed aerei)
- ▶ navigazione di mezzi mobili speciali (mezzi attrezzati per rilevamenti ambientali)
- ▶ navigazione di mezzi ad intelligenza artificiale (mezzi privi di autista).

L'ENEA è aperta sin da ora a collaborazioni con altri Enti di ricerca o con imprese per lo sviluppo della bussola marziana o semplicemente di una bussola per mezzi mobili terrestri.

Riferimenti

- [1] S. Bollanti, D. De Meis, P. Di Lazzaro, F. Flora, G. P. Gallerano, L. Mezi, D. Murra, A. Torre, and D. Vicca: "Electro-optical sun compass with a very high degree of accuracy", *Optics Letters*, vol. 40, N° 15, pp. 3619-3622, (2015).
- [2] Brevetto WO2014102841, UIBM # 0001416021
- [3] Fabrizio Andreoli, Sarah Bollanti, Paolo Di Lazzaro, Francesco Flora, Luca Mezi, Daniele Murra, AND Luca Murra: "Converting a smartphone into an accurate solar compass", *Applied Optics*, Vol. 61, n° 6, 20 February 2022.
- [4] S. Bollanti, D. De Meis, P. Di Lazzaro, A. Fastelli, F. Flora, G. P. Gallerano, L. Mezi, D. Murra, A. Torre, D. Vicca: "Calcolo analitico della posizione ..." RT/2012/24/ENEA (2012).
- [5] F. Flora, S. Bollanti, D. De Meis, P. Di Lazzaro, G.P. Gallerano, L. Mezi, D. Murra, A. Torre, D. Vicca: "Electronic solar compass for high precision orientation on any planet" *Journal of Instrumentation* vol. 11, C07014 (2016). <http://iopscience.iop.org/article/10.1088/1748-0221/11/07/C07014>
- [6] S. Bollanti, D. De Meis, P. Di Lazzaro, F. Flora, G.P. Gallerano, L. Mezi, D. Murra, D. Vicca: "Performance of an electro-optical solar compass in partially-obscured Sun conditions" , *Applied Optics* vol. 55, 3126-3130 (2016). <https://doi.org/10.1364/AO.55.003126> and <https://www.osapublishing.org/ao/fulltext.cfm?uri=ao-55-12-3126&id=338922>

Simulazione numerica e supercalcolo per la propulsione chimica aerospaziale

di Eugenio Giacomazzi e Donato Cecere

Laboratorio di Ingegneria dei Processi e dei Sistemi per la Decarbonizzazione Energetica - ENEA

Nel Centro di ricerche ENEA della Casaccia opera un gruppo di ricercatori specializzati nella simulazione numerica termo-fluidodinamica di processi reattivi e non, applicabili al comparto della propulsione spaziale sfruttando le potenzialità del supercomputer CRESCO dell'Agenzia. Queste capacità sono state utilizzate in un progetto con il CIRA e nel progetto europeo LAPCAT per lo studio delle principali tecnologie di propulsione sia per lanciatori di satelliti che per il volo ipersonico.

L'aerospazio è oggi un settore ricco di attività commerciali, che offre nuove opportunità in diversi campi anche ad attori non istituzionali: dalla navigazione accurata all'agricoltura, dalla sorveglianza alle comunicazioni, dal monitoraggio ambientale al turismo spaziale ed al controllo degli asteroidi. Per raggiungere una spinta sufficiente all'immissione in orbita gli attuali lanciatori spaziali utilizzano sistemi di propulsione di tipo chimico, a propellente solido o liquido, basati su tecnologie ormai mature e che hanno registrato solo piccoli miglioramenti negli ultimi 50 anni. Nel frattempo, sul mercato si stanno affacciando compagnie che adottano lanciatori riutilizzabili, sia per ridurre i costi, sia per aumentare il numero dei lanci offerti. In uno scenario a lungo termine sono attesi grossi cambiamenti attraverso lo sviluppo e l'implementazione di tecnologie innovative, come motori a razzo "air breathing" ipersonici, o velivoli di lancio che possano decollare ed atterrare come aerei. Un altro settore fondamentale per la propulsione chimica è quello dei viaggi atmosferici e trans-atmosferici con velivoli ipersonici e supersonici: questi richiedono adeguati sistemi propulsivi sia per ridurre i tempi per gli spostamenti sulla Terra che per uscire dall'atmosfera e rientrarci (si veda per esempio



Fig.1: Uno dei lanci di Vega

lo Skylon spacecraft). Mentre proseguono gli studi su tecnologie di combustione già battute, la scoperta di poter stabilizzare una detonazione ha oggi aperto una nuova e promettente strada nel campo della propulsione ipersonica, con possibili ricadute anche per i sistemi di lancio: tuttavia, i tempi per la sua reale applicazione sono ancora lunghi.

L'Italia ha sia competenze che tecnologie internazionalmente riconosciute nel campo della

propulsione di lanciatori per l'accesso allo spazio: Vega ne è la testimonianza pratica (Fig. 1). Vega è il lanciatore spaziale leggero Europeo capace di mettere in orbite diverse un satellite principale ed un certo numero di satelliti più piccoli nella stessa missione ad un costo competitivo. Oggi si sta investendo nel suo sviluppo per aumentarne la competitività, le prestazioni e la sostenibilità. In particolare, l'attenzione è focalizzata sul **Vega-E (Evolution)**, che avrà un ultimo stadio completamente rinnovato con un motore a liquido, criogenico, ossigeno/metano, a basso costo: questo consentirà di aumentare la flessibilità del lanciatore in termini di massa e volume del carico pagante e di ridurre i costi di lancio.

Le competenze italiane nel settore dei lanciatori spaziali possono essere ulteriormente sviluppate (uso sinergico di simulazione numerica avanzata e metodologie classiche di progettazione, identificazione di nuove tecnologie) mirando alla sostenibilità ambientale dei sistemi di lancio e alla riduzione dei relativi costi anche attraverso nuove tipologie di mini/micro lanciatori.

L'Italia è anche in grado di contribuire al settore della propulsione per i voli ipersonici suborbitali o trans-atmosferici, per trasporto civile e turismo spaziale, per la messa in orbita di piccoli satelliti, ma anche per scopi di ricerca e difesa. Di fatto, il nostro paese ha ottime competenze scientifiche ed 'applicate' sia sugli aspetti gasdinamici che di combustione; inoltre, la realizzazione di velivoli ipersonici civili consentirebbe l'impiego delle potenzialità degli spazioporti nazionali, come quello di Grottaglie.

Ruolo e problematiche della simulazione numerica per l'aerospazio

Le applicazioni aerospaziali, ed in particolare i motori ad ossigeno liquido per razzi ed i sistemi di raffreddamento, hanno da sempre promosso la ricerca nel campo dei fluidi reali, cioè quei fluidi che trovandosi in certe condizioni di temperatura e pressione mostrano un comportamento termodinamico ben lontano da quello dei gas ideali. Negli ultimi dieci anni, la combustione ad alta pressione di reagenti con comportamento di gas reale ha assunto notevole importanza, non solo per un rinnovato e rafforzato

interesse nell'accesso allo spazio, ma anche per le sue applicazioni nel settore della generazione elettrica, come nei cicli turbogas avanzati a CO₂ supercritica⁽¹⁾. La pressione nelle camere di combustione dei sistemi propulsivi a liquido va dai 50 ai 250 bar; alcuni dei propellenti comunemente adottati sono iniettati in condizioni transcritiche, cioè a pressioni maggiori della loro pressione critica ma a temperatura inferiore a quella critica, e la combustione avviene in condizioni supercritiche⁽¹⁾. In tali applicazioni, il diverso comportamento termodinamico del fluido deve essere considerato per mezzo di apposite equazioni di stato per gas reali e specifici modelli per le proprietà di trasporto molecolare.

Le attività sperimentali in tali condizioni di alta pressione possono essere proibitive: a parte il costo delle strutture stesse, che può essere molto elevato, l'uso di diagnostica laser avanzata non è semplice; questo giustifica la scarsa disponibilità di casi test corredati da un ampio ventaglio di misure per la validazione di codici di simulazione fluidodinamica^(2,3). Di conseguenza, la maggior parte della ricerca e della progettazione nel campo della combustione transcritica/supercritica si fonda sulla simulazione numerica.

Tuttavia, anche questo approccio non è affatto semplice. Sorgono diverse problematiche. Alcune riguardano l'accuratezza modellistica delle equazioni di stato, cioè la loro abilità di catturare ampie variazioni delle proprietà del fluido durante il passaggio dalla fase liquida a quella gassosa per pressioni maggiori di quella critica (questo aspetto è fondamentale nei problemi con iniezione transcritica dei propellenti). Altre riguardano l'efficienza computazionale, cioè equazioni di stato molto accurate ma complesse e computazionalmente onerose non possono essere utilizzate in approcci di simulazione fluidodinamica già molto costosi, come la LES (Large Eddy Simulation) o la DNS (Direct Numerical Simulation); in questi casi è preferibile usare equazioni di stato analitiche⁽⁴⁾. Inoltre, gli schemi numerici devono essere sufficientemente robusti per limitare la formazione di oscillazioni numeriche spurie dovute ai forti gradienti di densità (in particolare nei casi con iniezione criogenica) ed alle forti non linearità dell'equazione di stato per gas reali.

In letteratura sono stati investigati e suggeriti diversi approcci numerici^[5]. Infine, i meccanismi cinetici ad altissime pressioni hanno incertezze ed il ruolo di alcuni meccanismi fisici, come il trasferimento dell'energia radiante, è ancora incognito.

A causa della complessità del problema, la maggior parte degli articoli scientifici puntano al confronto delle predizioni numeriche con i dati sperimentali disponibili per alcuni casi test di validazione; altri mostrano il confronto di diversi modelli fisici e le lacune da colmare nella modellazione di alcuni fenomeni.

Prospettive ed attività di ricerca e sviluppo in ENEA

I supercalcolatori oggi consentono di simulare complessi fenomeni fluidodinamici con scale di rilevanza applicativa e con risoluzioni spaziali (e temporali, nel caso di processi non stazionari) molto elevate. I risultati che si ottengono hanno quindi un notevole livello di dettaglio e possono dare utilissime informazioni per la progettazione. Un esempio è offerto dalla simulazione della camera di combustione di un propulsore spaziale criogenico H_2/O_2 ^[6]: la simulazione eseguita dai ricercatori del CERFACS utilizzando 65536 processori del supercomputer Bluegene Q del CINECA ha consentito di identificare le instabilità di combustione rilevate sperimentalmente presso il DLR. Questo testimonia che la conoscenza accurata di tali fenomeni offerta dalla simulazione numerica ad alte prestazioni è fondamentale per promuovere lo sviluppo di propulsori a metano e ossigeno liquido di nuova generazione. Un altro esempio che dimostra l'importanza della simulazione numerica per capire la fisica di fenomeni complessi e per giungere al loro controllo, è lo studio delle detonazioni. Infatti, la scoperta di poter stabilizzare una detonazione^[7] ha aperto nuove ed interessanti possibilità per la propulsione ipersonica, ma la brevissima durata delle detonazioni (da micro-a milli- secondi) pone notevoli difficoltà agli studi necessari per l'implementazione di questa modalità di combustione nelle reali applicazioni: la simulazione numerica ad elevata risoluzione spazio-temporale si pone dunque come un utile strumento.

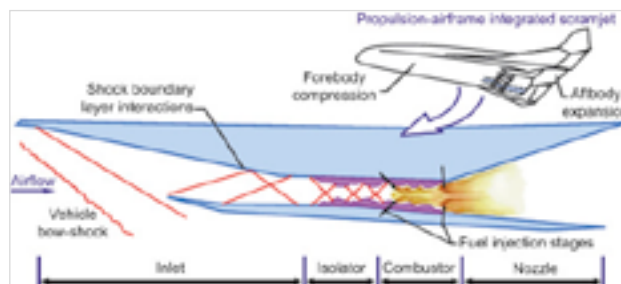


Fig. 2: Schematizzazione di un velivolo ipersonico e del suo sistema di propulsione

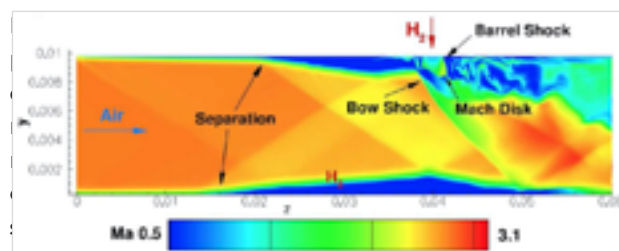


Fig. 3: Campo istantaneo del numero di Mach nel propulsore a combustione supersonica studiato nel progetto LAPCAT II

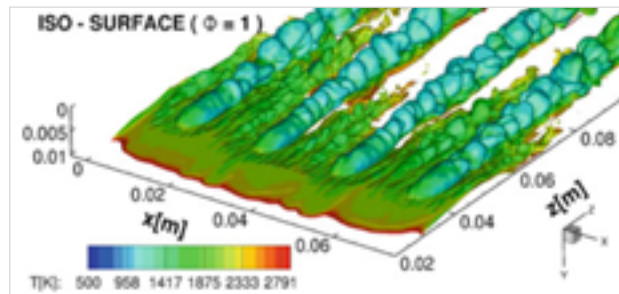


Fig. 4: Distribuzione della temperatura sulla iso-superficie con composizione stechiometrica nel propulsore a combustione supersonica studiato nel progetto LAPCAT II

viene sviluppato un codice di calcolo proprietario chiamato HearT (Heat Release and Turbulence), che consente simulazioni di tipo LES o DNS, sfruttando le potenzialità offerte dal sistema HPC (High-Performance Computing) CRESCO^[8] dell'ENEA sito in Portici.

Il gruppo di simulazione svolge attività sia per il settore energia che per quello aerospaziale. In tale campo, il codice HearT è stato utilizzato nell'ambito del progetto Europeo LAPCAT II^[9] per simulare la combustione supersonica nel propulsore di un velivolo da trasporto civile ipersonico (Fig. 2): i risultati hanno avuto un ottimo accordo con quelli sperimentali ed hanno consentito di definire i dettagli delle complesse strutture d'urto in prossimità dell'iniezione

dell'idrogeno usato come combustibile e di capire i meccanismi di stabilizzazione della combustione (vedi Fig. 3 e 4, a titolo di esempio). HeaRT è stato anche usato come codice pilota nell'ambito di un progetto finanziato dal CIRA^[10] per svolgere attività di modellistica fisica e numerica e simulare il mescolamento dei reagenti e la combustione all'interno di motori a razzo a liquido (ossigeno liquido e metano). **Attualmente si continuano a svolgere attività di sviluppo competenze in questo settore, in attesa di nuovi progetti nel campo dei lanciatori spaziali e della propulsione supersonica;** a titolo di esempio, si riporta in Fig. 5 un campo istantaneo di temperatura relativo alla combustione di ossigeno liquido ed idrogeno gassoso a 60 bar, con un maggior dettaglio di informazione in Fig. 6.

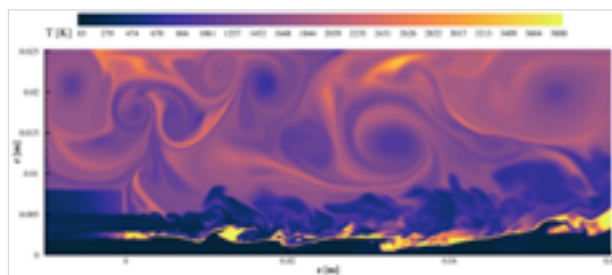


Fig. 5: Campo istantaneo di temperatura in un'applicazione per motori a razzo a ossigeno liquido (iniettato dal condotto centrale) ed idrogeno gassoso (iniettato coassialmente)

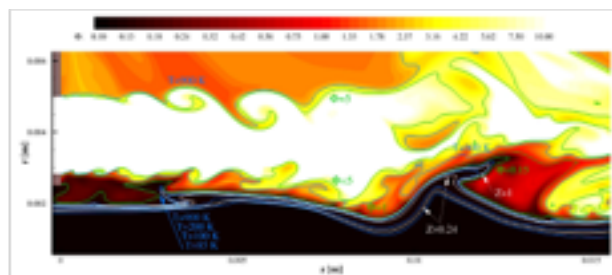


Fig. 6: Campo istantaneo del numero di Mach nel propulsore a combustione supersonica studiato nel progetto LAPCAT II

Note

- (1) Il punto critico di una sostanza si riferisce alle condizioni di massima temperatura e massima pressione (dette critiche) in cui quella sostanza può esistere come miscela bifase gas-liquido; le due fasi assumono lo stesso valore di densità e non mostrano un'interfaccia di separazione. Nel diagramma di fase la linea di cambiamento di fase tra liquido e gas termina proprio nel punto critico. Oltre tale punto le fasi liquido e gas sono indistinguibili, e si parla solo di fluido supercritico: questo si comporta come un liquido dal punto di vista della densità, e come un gas dal punto di vista delle proprietà diffusive; inoltre, la tensione superficiale e l'entalpia di vaporizzazione si annullano.

Riferimenti

- [1] Crespi F., Gavagnin G., Sanchez D., Martinez, G.S., Supercritical carbon dioxide cycles for power generation: A review. Appl. Energy, 195:152-183, 2017.
- [2] Foust M., Deshpande M., Pal S., Merkle C., Santoro R., Experimental and analytical characterization of a shear coaxial combustor GO₂/GH₂ flowfield. In 34th Aerospace Sciences Meeting and Exhibit. AIAA, January 1996.
- [3] Clauss W., Vereschagin K.A., Klimenko D.N., Oschwald M., Smirnov V.V., Stelmakh O.M., Fabelinski V.I., CARS Investigation of Hydrogen Q-branch Linewidths at High Temperatures in a High-Pressure H₂/O₂- Burner. J. of Raman Spectroscopy, 33:906-911, 2002.
- [4] Poling B.E., Prausnitz J.M., O'Connell J.P., Chp. 4.6, The Properties of Gases and Liquids. McGraw-Hill, 5th edition, 2001.
- [5] Ma P.C., Benuti D.T., Ihme M., On the numerical behaviour of diffusive- interface methods for transcritical real-fluids simulations. Int. J. Multiphase Flow, 113:231-249, 2019.
- [6] Urbano A., Selle L., Staffebach G., Cuenot B., Schmitt T., Ducruix S., Candel S., Exploration of combustion instability triggering using Large Eddy Simulation of a multiple injector liquid rocket engine, Comb. And Flame, 169:129-140, 2016.
- [7] Rosato D.A., Thornton M., Sosa J., Bachman C., Goodwin G.B., Ahmed K.A., Stabilized detonation for hypersonic propulsion, Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 118(29):1-7, 2021.
- [8] Iannone F. et al., CRESCO ENEA HPC clusters: a working example of a multifabric GPFS Spectrum Scale layout. In Proc. Int. Conf. on High Performance Computing and Simulation, volume HPCS 2019, pages 1051-1052, Dublin, Ireland, 2019.
- [9] FP7-Transport EC Project, Long-Term Advanced Propulsion Concepts and Technologies II (LAPCAT II), <https://cordis.europa.eu/project/id/211485/it>, 2008-2013.
- [10] Progetto "Statement of Work for an Activity on Large Eddy Simulation for Application on LOx/CH₄ Rocket Engines", RFQ/ITT No. ACQU-0813/CIRA-POO-14-0540, 2015-2018.

Lo sviluppo dei componenti ottici per le applicazioni della Space Economy

di Anna Sytchkova

Laboratorio Ingegneria Processi e Sistemi per l'Energia - ENEA

Il gruppo Componenti Ottici dell'ENEA vanta una lunga tradizione nello sviluppo di componenti ottici per un vasto spettro di applicazioni utilizzate in programmi di esplorazione nell'orbita terrestre, ma anche nello spazio interplanetario, il Deep Space. Il Gruppo collabora a progetti dell'Agenzia Spaziale Europea, con numerosi organismi e istituti di ricerca in Italia e in protocolli internazionali come il Progetto di Grande Rilevanza AstroOptElect, nell'ambito del Protocollo di collaborazione scientifica e tecnologica tra l'Italia e la Cina 2019-2022.

Lo sviluppo degli strumenti ottici per lo spazio, per decenni è stato oggetto di ricerca e studi di ingegneria finanziati dai governi. Nel tempo, il ruolo dell'osservazione della Terra dallo spazio e lo studio dell'Universo dai satelliti si sono evoluti: pur conservando la funzione di propulsori della rivoluzione tecnologica, sono diventati anche uno strumento di uso quotidiano che garantisce un flusso continuo dei dati essenziali per scopi civili e militari. Infatti, la sicurezza e la difesa rimarranno sempre i campi d'interesse strategico, e quindi controllati dagli organismi statali, anche se ormai più di tre quarti di tutti i lanci spaziali vengono effettuati per missioni riferite alla Space Economy e alla New Space Economy. Il business privato nello spazio, basato sull'uso dei componenti ottici, si occupa non solo delle telecomunicazioni e delle previsioni meteorologiche che costituiscono ancora la gran parte dei servizi forniti dai satelliti orbitanti attorno alla Terra. Il numero di applicazioni cresce velocemente, insieme all'insorgere dei nuovi modelli di business.

La 'commercializzazione' dello spazio significa, in particolare, che i singoli operatori possono acquistare soluzioni tecnologiche avanzate e tradurre rapidamente le loro idee nella pratica. Per i

componenti degli strumenti ottici utilizzati nello spazio questo significa innanzitutto la miniaturizzazione e l'abbattimento dei costi di produzione. Sono i due aspetti per i quali la ricerca può proporre soluzioni efficienti basate sull'expertise acquisita nei progetti realizzati in passato, ma anche investendo nello sviluppo mirato ad uno scopo specifico, su richiesta del committente.

Il Gruppo Componenti Ottici dell'ENEA

Il Gruppo Componenti Ottici dell'ENEA nato all'inizio degli anni '80 vanta una lunga tradizione di sviluppo di componenti ottici per un vasto spettro di applicazioni, dagli specchi per cavità laser ai vetri per la protezione dei beni culturali ai filtri ottici per i programmi spaziali, come quelli dell'Agenzia Spaziale Europea (ESA), spesso in collaborazione con altri istituti in Italia e all'estero. I programmi come **Lightning Imager** (Fig.1), per il monitoraggio dei fulmini nell'atmosfera terrestre e le previsioni climatiche, hanno visto l'affinamento delle tecnologie di realizzazione dei rivestimenti ottici a film sottili. Il filtro per il Lightning Imager era un filtro passa-banda spettralmente molto stretto ma uniforme lungo la sua ampia superficie, due qualità difficilmente conciliabili. Questo lavoro ha creato delle basi per la prototipazione e poi la realizzazione industriale del satellite Meteosat della terza generazione, Meteosat Third Generation (MTG). **Ancor prima, ENEA ha realizzato progetti mirati allo sviluppo dei mini-spettrometri basati su filtri variabili.** La prestazione ottica varia lungo una direzione sulla superficie del filtro, mentre è costante nella direzione ortogonale alla direzione di variazione. La variazione tipicamente segue una legge lineare a gradiente costante, cosiddetto filtro variabile lineare (LVF). Il design di alcuni spettrometri, richiede una variazione

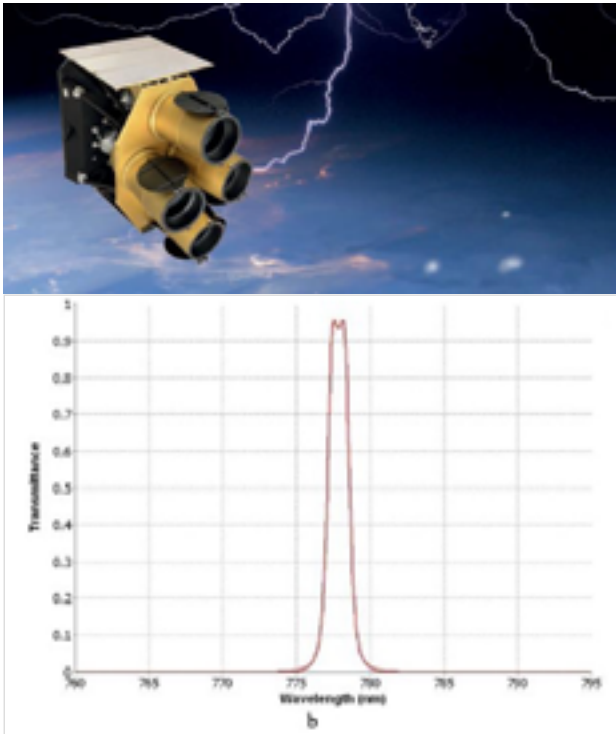


Fig. 1: Filtro passa-banda stretto per il monitoraggio dei fulmini nell'atmosfera dallo spazio. In alto: Immagine del satellite portatore dello strumento Lightning imager. In basso: La banda di trasmissione del filtro è centrata sulla tripletta d'emissione d'ossigeno a 777.4 nm.

non lineare e l'ENEA ha nel portfolio anche lo sviluppo dei filtri variabili non lineari (NLVF). Il doppio LVF illustrato nella Fig.2 copre un range spettrale inusualmente vasto, dall'ultravioletto all'infrarosso 440-2500 nm. Inoltre, il suo design ottico innovativo che impiega relativamente pochi strati, assicura un'elevata stabilità delle prestazioni ottiche del LVF rispetto ad eventuali errori di produzione.

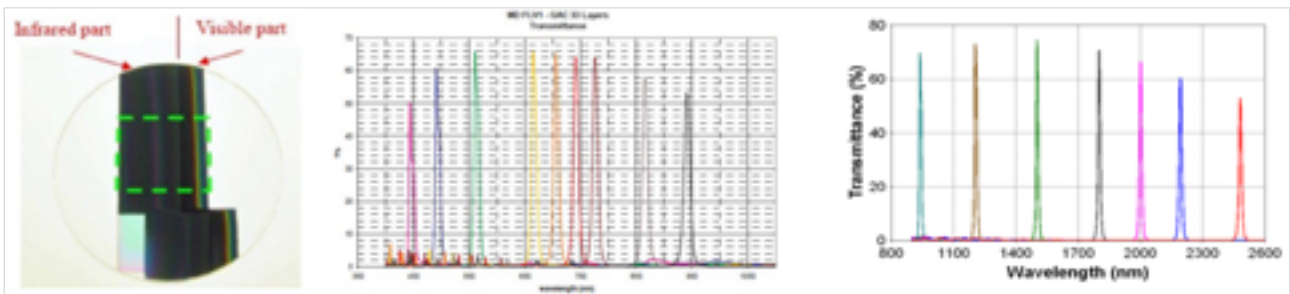


Fig. 2: Filtro variabile lineare (LVF). La risposta ottica del filtro varia lungo una direzione sulla superficie del filtro, in un modo continuo e lineare. A sinistra: la fotografia di un doppio filtro, vedi dettagli nel testo. Al centro: variazione della posizione spettrale delle bande di trasmissione ottica del filtro "Visible part". A destra: alcune bande di trasmissione ottica nell'infrarosso del filtro "Infrared part".

Lo studio dei materiali di cui erano composti i filtri, ha stimato la loro resistenza all'ambiente spaziale per garantire la stabilità della risposta ottica degli spettrometri basati su utilizzo di filtri variabili. Gli spettrometri di questo tipo hanno poi visto l'utilizzo nelle missioni che producono la spettroscopia d'immagine multi ed iperspettrale nell'osservazione della Terra e altri pianeti, come ad esempio la missione FLEX (FLuorescence Explorer) Eight Earth Explorer dell'ESA, nonché lo studio degli asteroidi come ad esempio OVIRS - OSIRIS-Rex lanciato dalla NASA verso l'asteroide Bennu.

Competenze ad ampio spettro

L'attività di sviluppo dei componenti ottici a film sottili richiede delle competenze ad ampio spettro.

Si parte dalla progettazione del dispositivo ottico sulla base delle specifiche tecnologiche, in stretta collaborazione con gli ingegneri che ideano lo spettrometro, il telescopio o altro strumento ottico dove il componente poi sarà utilizzato. Si passa poi alla scelta dei materiali, lo studio della loro compatibilità e resistenza all'ambiente d'esercizio: i componenti non devono compromettere la risposta ottica dello strumento nell'arco della sua vita.

La realizzazione del prototipo si effettua mediante le tecniche di deposizione da vapore fisico, come ad esempio sputtering a radio frequenza. L'operare di impianti di deposizione dei film sottili, quando eseguito a stato d'arte, permette di variare a richiesta le caratteristiche fisico-chimiche dei materiali dei film, imponendo il tal modo la loro risposta ottica e le caratteristiche meccaniche come la durezza,

lo stress residuo ecc. Il prototipo innovativo ha poi spesso caratteristiche tali da rappresentare una sfida nel misurare la sua risposta ottica, in quanto non permette l'utilizzo degli strumenti commerciali. **Perciò il Gruppo ENEA sviluppa anche le metodologie di misure ottiche ad alta precisione, nonché gli strumenti dedicati alla caratterizzazione specifica dei filtri con proprietà particolari.** Ad esempio, i piccoli filtri variabili o filtri grandi che devono essere molto uniformi, necessitano di banchi ottici di misura spazialmente risolta, Fig. 3. Il primo esempio illustra il caso di quando la caratterizzazione deve tracciare la variazione dello spettro trasmesso dal filtro in ogni punto lungo tutta la sua ampia superficie. Nel secondo caso la luce deve essere concentrata su una zona del filtro di dimensioni molto piccoli (alcuni micrometri) per minimizzare l'integrazione della risposta spettrale la quale varia lungo la superficie del filtro con un gradiente elevato che può essere anche di 200-300 nm/mm. La metodologia di sviluppo dei componenti ottici a film sottili per applicazioni spaziali necessita anche degli studi sistematici sugli effetti d'esposizione dei singoli strati e dei filtri ottici a multistrato alle condizioni tipiche per l'ambiente spaziale. **Se nel**

passato la maggior parte delle applicazioni sulle quali il Gruppo ha lavorato riguardava le orbite terrestri, ora l'interesse si è spostato verso le applicazioni nello spazio interplanetario, Deep Space, dove possono operare i satelliti per gli studi di astrofisica. L'interesse teorico e l'attività sperimentale si concentrano sui fattori come la radiazione dei protoni di bassa energia, dei raggi gamma e quelli cosmici, della radiazione ultravioletta intensa. L'impatto di questi singoli fattori e il loro impatto sinergistico sui materiali è l'oggetto dello studio attuale dove l'ENEA è capofila di un consorzio che, dal lato italiano, vede la partecipazione dell'Università di Torino, dell'Università di Roma Tor Vergata e di una piccola-media industria MITEC s.r.l., mentre dal lato cinese partecipano l'istituto scientifico Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics e una grande industria che è il Beijing Institute for Space Environmental Engineering.

Il Progetto di Grande Rilevanza "Effetti dell'ambiente spaziale sui dispositivi ottici ed elettronici per le missioni spaziali astrofisiche," AstroOptElect, fa parte dell'attuale Protocollo di collaborazione scientifica e tecnologica tra l'Italia e la Repubblica Popolare Cinese per il periodo 2019-2022.

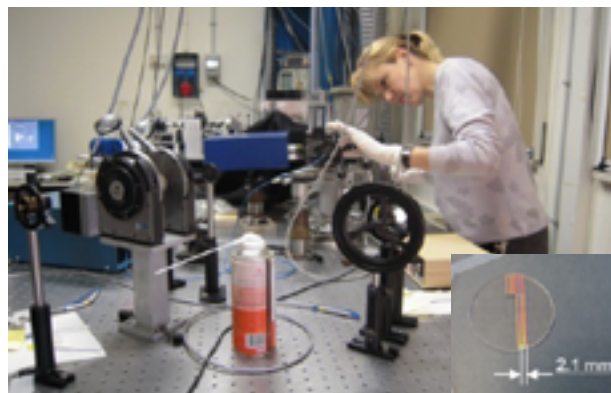
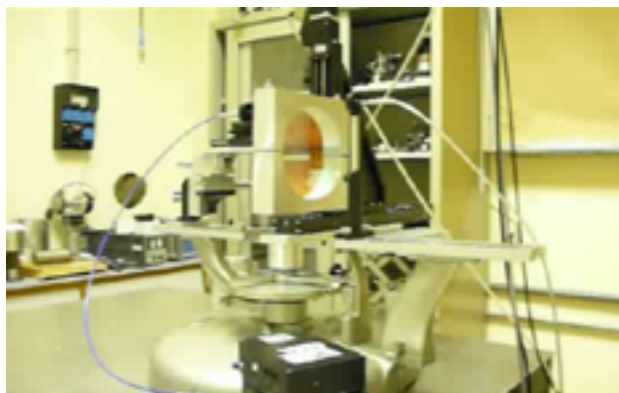


Fig. 3: Banchi ad hoc per la caratterizzazione ottica dei componenti a film sottili. A sinistra: Misura di trasmittanza di un filtro uniforme di grandi dimensioni, rif. Fig. 1. A destra: Misura di trasmittanza di un filtro lineare variabile, rif. Fig.2. La zona di variazione è illustrata nell'insero sotto.

La ricerca ENEA sui piccoli reattori per applicazioni spaziali

di Mariano Tarantino

Responsabile Sezione Progetti Innovativi - Dipartimento Fusione e Tecnologie per la Sicurezza Nucleare - ENEA

I reattori nucleari per applicazioni spaziali sono stati studiati fin dagli anni '50 come alternativa più affidabile, efficiente e compatta rispetto all'energia solare. A partire dagli anni 2000 il rinnovato interesse per la esplorazione umana della Luna e, successivamente di Marte, hanno contribuito ad accrescere gli investimenti per la progettazione di piccoli reattori per future basi lunari. In questo



Fig 1: Assemblaggio prototipo SNR per test di qualifica

contesto, ENEA ha dato vita a uno specifico gruppo di ricerca per sviluppare un reattore di piccola taglia per applicazioni spaziali, compatto, leggero, affidabile e sicuro.

I reattori nucleari per applicazioni spaziali (Space Nuclear Reactor – SNR) sono stati studiati fin dagli anni '50 come alternativa più affidabile, più compatta e di maggior efficienza rispetto all'utilizzo dell'energia solare. Se nel secolo scorso l'utilizzo di questi reattori è stato limitato ad alcuni prototipi negli Stati Uniti e in Russia, a partire dagli anni 2000 il rinnovato interesse per la esplorazione umana della Luna, e quindi successivamente su Marte, ha contribuito ad incrementare gli investimenti per la progettazione di un reattore di piccola taglia per una futura base lunare. In particolare, la NASA, l'agenzia governativa civile responsabile del programma spaziale e della ricerca aerospaziale degli Stati Uniti d'America, insieme a diverse agenzie di ricerca americane, tra cui il Los Alamos National Laboratory e il Nevada National Security Site, ha realizzato il progetto Kilopower, progettando un reattore da qualche kilowatt di potenza raffreddato a tubi di calore con sodio. Kilopower genera energia attraverso una fissione nucleare attiva, nella quale gli atomi si separano sprigionando energia e può produrre fino a 10 kilowattora di energia elettrica, abbastanza per rifornire un insieme di edifici residenziali per almeno un decennio: l'alimentazione elettrica di una stazione su Marte richiederebbe circa 40 kW, o quattro reattori Kilopower.

Collaborazione ENEA-ASI per un Space Nuclear Reactor italiano

In questo contesto si inserisce l'interesse di **ENEA per lo sviluppo di un reattore di piccola taglia per**

applicazioni spaziali, compatto, leggero, affidabile e sicuro. A tale scopo ENEA ha costituito un gruppo di progetto presso il Dipartimento Fusione e Tecnologie per la Sicurezza Nucleare, con sede al Centro di ricerche del Brasimone, sull'Appennino tosco-emiliano dove sono stati avviati studi di option-engineering sugli SNRs.

Sfruttando le competenze dell'Agenzia Spaziale Italiana e il know how ENEA nel campo dei sistemi nucleari innovativi, e potenziali collaborazioni con università e centri di ricerca italiani e industrie del settore, si vuole definire un concetto di SNR "italiano" che possa poi essere successivamente sviluppato attraverso una fase di progetto concettuale, ingegneristico e di prototipazione con associate le azioni di Ricerca e Sviluppo necessarie.

La prima fase, che vede una collaborazione ENEA-ASI, della durata prevista di 15 mesi, si concluderà con uno studio di fattibilità nel quale si delineano le caratteristiche di un SNR "italiano". I principi di base

che guideranno la progettazione sono la modularità, per garantire un facile ampliamento della potenza a disposizione dei coloni lunari, la ridondanza dei sistemi essenziali al corretto funzionamento del reattore, per garantirne la massima sicurezza, la minimizzazione del peso totale del sistema, per rendere possibile il trasporto a bordo di un razzo cargo, e l'affidabilità dei componenti, privilegiando quindi ove possibile tecnologie mature rispetto a più incerte soluzioni esotiche. In questa prima fase ENEA partecipa in-kind allo studio mentre ASI, oltre al proprio know-how, mette a disposizione fondi per bandire assegni di ricerca dedicati a questi temi. E' inoltre prevista un'analisi costi-benefici di SNRs in ottica esplorazione della Luna, di Marte ed esplorazione dello spazio profondo.

Nelle fasi successive del progetto sono invece previsti gli studi sulle caratteristiche nucleari dei SNRs, sui sistemi di conversione della potenza e sugli schermaggi necessari.

I sistemi di mappatura non distruttiva UT

di Angelo Tati

Laboratorio Materiali e processi chimico-fisici - ENEA

Per le attività di ricerca sui nuovi materiali e componenti utilizzati in campo nucleare ed aerospaziale, l'ENEA ha sviluppato un software di acquisizione ed elaborazione per controlli non distruttivi (non destructive testing) e, in particolare, per la tecnica ultrasonora^[1]. I risultati ottenuti sono stati presentati a vari congressi nazionali, attirando l'attenzione delle ditte operanti nel settore dei controlli non distruttivi, in particolare del comparto aeronautico.

Per le attività di ricerca sui nuovi materiali e componenti utilizzati in campo nucleare ed aerospaziale, l'ENEA ha sviluppato un software di acquisizione ed elaborazione per controlli non distruttivi (non destructive testing) e, in particolare, per la tecnica ultrasonora^[1]. I metodi applicati sono quelli degli esami clinici, quali la radiografia, gli ultrasuoni e diversi altri, più specifici, in grado di garantire l'assenza di difetti che ne compromettano il funzionamento, e allo stesso tempo non "invadano" o distruggano l'oggetto esaminato. Il software gestisce, tramite computer e schede elettroniche, dei sistemi motorizzati ed acquisisce i segnali provenienti dai sensori relativi al metodo utilizzato. I dati ottenuti sono elaborati per ottenere delle mappature in bianco e nero e falsi colori che evidenziano i difetti presenti nel materiale. Tutti i metodi si avvalgono di sistemi automatici che aiutano l'esperto a valutare la 'salute' del componente in modo veloce e ripetibile sollevandolo da un compito certe volte lungo e stancante. L'esame ultrasonoro è un metodo molto efficace se abbinato ad un sistema d'ispezione motorizzato.

Gli ultrasuoni

Come per tutti i fenomeni ondulatori, è possibile definire per le onde sonore una lunghezza d'onda, un

periodo T e una frequenza f , grandezze che sono legate fra loro dalle relazioni della meccanica ondulatoria, mentre c rappresenta la velocità di propagazione del suono nel mezzo considerato. Tuttavia, a differenza della luce, le onde acustiche necessitano per la loro propagazione, di un mezzo elastico nel quale viaggiare. Ciò spiega perché nel vuoto non si propaga alcun suono. Quando la frequenza di tale onda sonora è compresa nel range tra 20 e 20000 Hz si parla di suoni udibili, mentre laddove il valore di 20 KHz sia oltrepassato si parla di ultrasuoni.

Sviluppo del software di mappatura ultrasonora

Lo sviluppo di un software di mappatura ultrasonora ha avuto inizio negli anni 80 con l'acquisto di una macchina a 3 assi cartesiani motorizzati e 2 assi rotativi manuali per l'orientazione della sonda ad ultrasuoni. L'acquisto fu realizzato dal laboratorio di Controlli non Distruttivi dell'ENEA Casaccia il cui responsabile era il collega Ing. Franco Imperiali. Questa macchina sviluppata dalla ditta Gilardon era nata per lo sviluppo e la caratterizzazione delle sonde ad ultrasuoni ed era utilizzata dall'ENEA per la messa a punto di tecniche ultrasonore in campo nucleare e controllo di componenti di grosso spessore. Una seconda macchina, più grande della prima, fu sviluppata a partire dagli 90 dalla ditta Contek in collaborazione con l'ENEA Frascati per controllare componenti di grandi dimensioni e geometria complessa. La macchina fu dotata di un braccio portasonda con due assi rotativi motorizzati in grado di muovere la sonda e inseguire la superficie dei pezzi curvi^[2].

Agli inizi degli anni '90 l'acquisto dei primi personal computer nei laboratori dell'ENEA permise di utilizzare delle schede di interfaccia hardware per la

comunicazione con gli oscilloscopi, per l'acquisizione dei segnali ultrasuoni, e con le macchine di movimentazione automatica suddette. La connessione di questa strumentazione al computer e l'uso di ambienti di sviluppo software a partire dal pacchetto ASYST e successivamente con il linguaggio Basic, C ed ASSEMBLER permisero la creazione delle prime applicazioni automatiche ad ultrasuoni.

La difficoltà iniziale di questi software fu la gestione di grandi quantità di dati, la durata molto lunga delle misure e la presentazione grafica dei risultati che fu risolta nel corso dei 10 anni successivi con la comparsa di computer più potenti dotati di processori multi-thread, schede video con memoria dedicata, RAM di decine di Megabyte e dischi con spazio di memorizzazione di alcune decine di GigaByte.

Negli anni 2000 appare sul mercato l'ambiente di sviluppo Labview che permette di realizzare applicazioni grafiche in modo veloce avendo a corredo diverse librerie (grafica, comunicazione, acquisizione, controllo motori, visione e elaborazione segnali, ecc.). Il vantaggio di questo ambiente di sviluppo è la programmazione tramite icone grafiche e fili di connessioni simili ad un circuito elettrico che permette un rapido sviluppo rispetto ai linguaggi tradizionali supportati da testo e compilatore. La società National Instruments (NI) sviluppatrice del LABVIEW ha inoltre sviluppato delle schede hardware di acquisizione segnali e immagini, controllo motori che integrati insieme al software permettono la creazione di applicazioni molto complesse.

Applicazioni in campo aerospaziale

Il primo progetto in campo aerospaziale che ha visto l'utilizzo del software di mappatura ad **ultrasuoni (Software UT) è stato per il controllo di un disco di turbina in titanio con un'anima interna in fibra di carbonio prodotto dalla società AVIO.** Questa collaborazione ha permesso poi di realizzare il progetto Europeo AWFORS (Advanced Welding Technologies For Repair and Salvage of high valued engine components on nickel and titanium based alloys) del Quinto Programma Quadro UE (1998-2002) insieme al CSM ed altri partner europei fra cui il Fraunhofer Tedesco. Il progetto puntava a realizzare

un disco di turbina con palette integrate partendo da un unico blocco di metallo opportunamente lavorato di macchina ad asporto di truciolo e senza la calettatura di palette separate. Inoltre prevedeva la messa a punto di diversi metodi di riparazione/saldatura delle palette tra cui il laser cladding e la saldatura con scarica capacitiva.

La macchina di mappatura ultrasonora è stata utilizzata per il controllo non distruttivo delle barrette a trazione in leghe metalliche di diverso tipo tra cui l'inconel, il titanio, il renè e l'acciaio. Le barrette erano prima divise in due parti, poi saldate tra di loro con i vari metodi e poi sottoposte ai test non distruttivi ed infine ai test meccanici. I controlli non distruttivi delle barrette cilindriche sono stati condotti tramite il Software UT utilizzando due assi motorizzati per la scansione. L'asse Z alzava e abbassava la barretta, l'asse rotativo girava la barretta di 360° e la combinazione dei due movimenti permetteva alla sonda fissa su un lato, di scandire l'intera superficie controllandone il volume interno. Analogamente software fu realizzato per il metodo a correnti parassite o Eddy Current.

Il progetto prevedeva la produzione anche di barrette a profilo alare saldate similmente a quelle cilindriche. In questo caso il software UT a 2 assi non fu sufficiente per il controllo non distruttivo, perciò è stato sviluppato un nuovo software a 4 assi motorizzati. La forma alare delle barrette rendeva problematica la loro rotazione rispetto alla sonda fissa perciò l'unica alternativa praticabile era far muovere la sonda intorno al campione fissato ad un supporto.

La soluzione fu estrarre il profilo della superficie della barretta, da un file CAD di tipo STL (Stereo Lithography interface format), lo stesso file con cui era realizzata meccanicamente tramite le macchine a controllo numerico (CNC). Il file STL consiste in una mesh di piccoli triangoli che descrive la superficie esterna del pezzo; questa viene processata da un programma sviluppato ad hoc estraendo i triangoli relativi ad una determinata quota Z (zona da controllare). I triangoli sono rappresentati dalle coordinate dei 3 vertici e dai 3 coseni direttori che ne determinano l'orientazione nello spazio.

Queste informazioni estratte ed opportunamente elaborate vengono poi utilizzate dal software di

mappatura per muovere la sonda UT intorno al campione secondo una traiettoria composta dalle coordinate : X , Y e l'angolo della sonda. Questo movimento ha permesso alla sonda di ruotare intorno alla barretta ed essere sempre perpendicolare alla superficie. Il software fu sviluppato per controllare il provino sia con gli ultrasuoni e con l'Eddy Current (EC) mostrando su unica interfaccia grafica i risultati di entrambe le tecniche. Il software passava da un movimento a 2 gradi libertà a 4 gradi libertà e questa traguardo permise nuove applicazioni sempre più complesse.

Questi risultati sono stati esposti a vari congressi nazionali, attirando l'attenzione delle ditte operanti nel settore dei controlli non distruttivi, in particolare del settore aeronautico.

La prima applicazione del software all'esterno

La prima applicazione del software all'esterno dell'ENEA fu il controllo di una pala del rotore secondario dell'elicottero A109 dell'Agusta/Westland. Il componente da analizzare, in materiale composito in vetro e carbonio, assicurava la pala al mozzo del rotore. Nelle precedenti applicazioni veniva impiegata la tecnica in riflessione o ecografica (Pulse-Echo,PE) ed una sonda unica, mentre in questo caso la tecnica utilizzata si chiama "in trasmissione" (True Transmission, TT) e sfrutta due sonde UT; se il campione da controllare è chiuso si trova tra le due sonde, mentre se presenta una cavità troveremo una sonda esterna o una interna allo stesso. I materiali compositi a differenza di quelli metallici hanno una forte attenuazione dell'onda sonora. Il pezzo da controllare è immerso in acqua per assicurare la trasmissione dell'onda ultrasonora; quest'ultima partendo dalla sonda interna attraversa lo spessore del cilindro giunge alla sonda esterna. L'intensità dell'onda, convertita in un segnale elettrico, determina la qualità del materiale attraversato composto da vari strati di matrice polimerica e da fibre di rinforzo in vetro o carbonio. Il movimento della pala secondo l'asse Z e la sua rotazione permette di controllare lo spessore del cilindro per la sua lunghezza ricostruendo così una mappa in falsi colori. La mappa rappresenta lo sviluppo circonferenziale del pezzo. Il difetto viene rappresentato sulla mappa da una zona

rossa indicante, per esempio, una delaminazione (disbonding) di qualche strato del composito.

L'ENEA partecipò al progetto fornendo il software di mappatura, la consulenza alle prove sui campioni con difetti artificiali e naturali e al collaudo finale della macchina.

Il capo commessa fu la ditta del settore CND che ha fornito lo strumento UT, l'oscilloscopio, le sonde. La macchina a 2 assi fu realizzata da ditta di meccanica di precisione ed infine la parte elettrica ed elettronica comprensiva di PLC e joystick a schermo LCD fu realizzata da una ditta di elettronica.

A questo progetto ne seguì un altro più complesso, con l'intento di fornire un sistema che unisse le due tecniche TT e PE per controllare le **pale** e il **mozzo** del rotore principale dell'elicottero EH101 (Agusta/Westland). Le pale lunghe 9 metri e il rotore largo più di 2 metri richiesero la realizzazione di una macchina larga 2,5 m, lunga 4 m e alta 2,5 m. In questo caso le pale in composito venivano controllate dividendo in settori la lunghezza. La tecnica utilizzata era la TT e le sonde erano inserite ognuna all'interno di un supporto in plexiglass generanti una colonna d'acqua (Squirter) per l'impossibilità di immergere l'intero pezzo in acqua. La colonna d'acqua è generata da un ugello e da una pompa elettrica che spinge l'acqua all'interno dello squirter; l'acqua della colonna colpisce il pezzo creando una particolare forma ad ombrello priva di turbolenze, l'acqua utilizzata viene raccolta da una vasca sottostante e rimessa nel ciclo. Il mozzo è stato controllato con la tecnica PE sempre tramite un singolo Squirter. Il mozzo in composito e titanio presentava una pianta pentagonale con 5 fori interni uno per ogni lato. In questi fori venivano poi fissate le pale nella fase finale dell'assemblaggio dell'elicottero. Il mozzo con profili curvi fu controllato da un software simile a quello sviluppato per il progetto AWFORS con la differenza che la paletta aveva una larghezza di circa 2 cm mentre il mozzo un diametro di più di 2 metri.

Il progetto successivo in collaborazione nuovamente con AVIO fu il progetto FANTASIA (Flexible and Near-net-shape generative manufacturing chains and repair techniques for complex shaped aero engine parts) nel quale l'ENEA mise in atto una campagna di controlli non distruttivi con 5 tecniche diverse:

1. Esami Visivi-VT
2. Eddy current-ET
3. Liquidi penetranti fluorescenti-PT
4. Raggi X-RT
5. Ultrasuoni-UT

Per la messa a punto delle tecniche non distruttive sono stati progettati e costruiti campioni di riferimento con geometrie diverse e aventi all'interno difetti artificiali. Il materiale esaminato era una lega di titanio con cui sono fatte le palette di turbina degli aerei moderni capaci di resistere ad altissime temperature e dotati di un peso specifico basso (4507 kg/m^3). Il risultato fu che le prime tre tecniche permisero una ispezione veloce in grado di rilevare difetti molto piccoli sia superficiali che sub-superficiali ma senza determinare le dimensioni dei difetti. Mentre le ultime due tecniche determinarono le dimensioni del difetto nelle tre dimensioni e che per questo vengono chiamate tecniche volumetriche. Gli UT e RT necessitano del supporto del computer per l'elaborazione delle immagini. Per queste ragioni le prime tre tecniche furono utilizzate per l'esame non distruttivo di grandi fogli di lamiera in titanio prodotte tramite laminatura e servirono per delimitare le zone prive di difetti dove estrarre i campioni per le successive lavorazioni. Mentre le tecniche volumetriche furono utilizzate per l'esame dei campioni prima e dopo le saldature laser. Seguirono a queste attività di laboratorio lo sviluppo di una macchina ad ultrasuoni per il controllo del radome in materiale ceramico. Trattasi di quel componente aeronautico che contiene il RADAR e che deve essere trasparente alla radiazione elettromagnetica emessa. La macchina e il software di mappatura hanno permesso di controllare l'incollaggio del materiale ceramico ad un anello di lega INVAR.

Le esperienze scaturite da questi progetti sopra brevemente descritti, sono in realtà risultati fondamentali per la messa a punto dei software di analisi dei dati ultrasonori (BigDATA). Il software di mappatura fu utilizzato nel Progetto ELIOS (Progettazione di componenti aeronautici in titanio saldati con impianto laser in fibra) per la verifica delle saldature in titanio di spessore di circa 3 millimetri tramite una tecnica definita TOFD (Time of Diffraction) che permette l'analisi della giunzione saldate testa-

testa con una singola scansione lungo la saldatura. I risultati vengono esposti al convegno delle prove non distruttive nella sessione AEROSPAZIO tenuto nel 2015 a Milano. Con l'Università UNICUSANO di Roma e la collaborazione del Professor Tiziano Pagliaroli vengono svolte due tesi riguardanti il comportamento di una superficie alare trattata con lavorazioni di microforatura in un regime supersonico. Per questo tipo di controllo vengono utilizzate due sonde ad ultrasuoni con accoppiamento in aria che simulano l'impatto dell'aria sul campione microforato; l'onda generata dalla sonda viaggia alla velocità del suono in aria pari a 340 m/s corrispondente a 1235 Km/h corrispondente a Mach 1.

Sviluppo del software di mappatura per motori criogenici aerospaziali

Nel 2017 l'ENEA viene contattata da una società che fornisce servizi ad AVIO SPAZIO per la messa a punto di saldo-brasature da utilizzare per la costruzione di camere di combustione per motori criogenici. Dopo il controllo ultrasonoro di un provino piano che simula una piccola porzione della camera cilindrica, si dimostra come la tecnica di mappatura ultrasonora evidenzia la qualità della saldatura. Si avvia così una collaborazione che vede il controllo UT di un primo prototipo in scala ridotta di una camera di combustione in rame ed Inconel^[5] saldo-brasate.

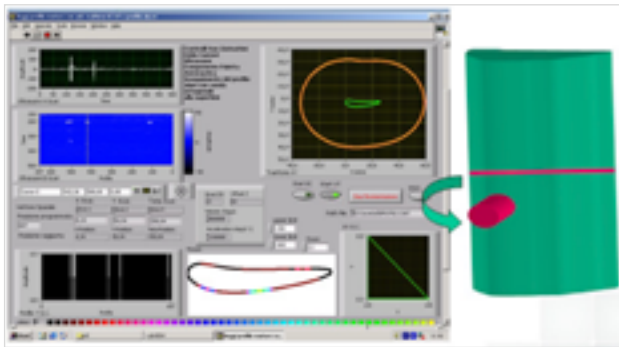
La camera è composta da una parte cilindrica, una convergente e una divergente entrambi con un profilo tronco-conico. Per questo tipo di controllo si sviluppa un software dove la sonda segue il profilo della superficie tramite 2 assi motorizzati X e Z mentre la camera ruota su una tavola rotante. La camera è appoggiata sulla tavola tramite un strato di gomma che funge da guarnizione. La camera in questo modo può contenere l'acqua e la sonda, permettendo così il controllo UT. **La tecnica si rivela vincente per una successiva serie di camere prodotte con la tecnica ALM (Additive Layer Manufacturing).**

Sviluppi successivi

Ad oggi, oltre al metodo di produzione tradizionale (liner di rame e close-out di nichel elettrodepositato),

una camera di spinta può essere realizzata con leghe metalliche ad alte prestazioni attraverso la tecnologia di Additive Layer Manufacturing (ALM). Quest'ultima offre diversi vantaggi ma, allo stesso tempo, richiede un controllo approfondito volto ad identificare le eventuali criticità di una tecnologia che solo di recente ha iniziato ad essere impiegata nello sviluppo di motori per lo spazio.

Il software gestisce il sistema di movimentazione della sonda e l'acquisizione del segnale ultrasonoro. Dai segnali acquisiti vengono generate delle mappe, in falsi colori, che descrivono la geometria del componente, permettendo la misura degli spessori ed evidenziando eventuali difetti presenti nel materiale.



Software di controllo dei provini a forma di paletta di turbina saldati con scarica capacitiva. L'interfaccia grafica mostra i risultati dei metodi UT ed EC ver 2

Questo software, grazie alla maggiore flessibilità rispetto ai software commerciali, è stato utilizzato con successo per il controllo NDT di componenti motore, a geometria complessa, realizzati da AVIO S.p.A. In particolare, sono stati controllati 5 prototipi in scala ridotta della camera di spinta di un motore criogenico, dedicato allo sviluppo del 3° stadio propulsivo del lanciatore VEGA E.

Nell'ambito dell'iniziativa ENEA chiamata POC Proof of Concept i laboratori PROMAS MATPRO (Casaccia) e PROMAS MATAS (Brindisi) hanno vinto il bando 2019 per lo sviluppo di una macchina complessa per il controllo dei motori criogenici (Responsabile del progetto Ing. Fania Palano).



Sistema automatico a 6 gradi libertà sviluppato per Agusta/Westland

Note

- [1] I controlli non distruttivi sono gli esami che si eseguono sui materiali e sui componenti costituenti un qualsiasi manufatto per garantire, in termini di affidabilità sia strutturale che prestazionale, l'efficace comportamento del componente stesso.
- [2] Le macchine sono sempre corredate da una grossa vasca per contenere il pezzo che è immerso in acqua per l'accoppiamento sonda-pezzo.
- [3] Inconel è un marchio registrato dell'azienda statunitense Special Metals Corporation e fa riferimento alla famiglia delle superleghe a struttura austenitica a base di nichel-cromo.

Esplorare lo spazio con le 'vele fotoniche'

di Danilo Zola e Salvatore Scaglione

Laboratorio Ingegneria dei Processi e dei Sistemi per la decarbonizzazione Energetica - ENEA

È possibile immaginare che la luce del sole possa esercitare una spinta che possa perfino condurci oltre i confini del sistema solare? La propulsione solare fotonica rappresenta una sfida per diversi ambiti avvalendosi anche di proprie infrastrutture di ricerca che sono uniche in Italia.

Mediante le equazioni di Maxwell che descrivono tutti i fenomeni elettromagnetici di cui la luce è parte, si deduce che una superficie illuminata subisce una pressione nota come pressione di radiazione^[1]. Chiunque può constatare quanta poca farina occorra per averne 1 grammo usando una bilancia domestica, ma la pressione che un grammo di farina esercita sul piatto della bilancia è circa un milione di volte superiore a quella che eserciterebbe la luce sullo stesso piatto se questo fosse esposto al sole in una bella giornata. Ci vuole una mente speculativa e una buona dose di fantasia per capire e credere che una pressione dell'ordine di 10^{-4} g/cm² possa essere utilizzata per la propulsione di veicoli spaziali.

Enormi razzi trasportano satelliti e sonde nello spazio. Maggiore è la distanza dell'orbita da raggiungere tanto più enormi sono i razzi che li trasportano. Infatti, non è sufficiente vincere la forza di gravità della terra raggiungendo la velocità di fuga, ma è necessario spingere i veicoli a una velocità sufficiente per raggiungere in tempi ragionevoli l'obiettivo. Ad esempio, i razzi utilizzati per lanciare in orbita i veicoli spaziali con massa di soli 500 kg, possono arrivare a pesare centinaia di tonnellate, dei quali buona parte è costituita dal combustibile. Anche parte della massa della sonda è costituita dal combustibile necessario a correggerne l'assetto. **La messa in orbita dalla terra di satelliti e sonde non può essere effettuata con la propulsione fotonica. Tuttavia, una volta che la sonda è nello spazio, questa può essere spinta dalla sola**

luce del sole senza la necessità di avere carburante a bordo.

La propulsione fotonica, un cambio di paradigma

La propulsione fotonica comporta un cambio di paradigma; alla spinta potentissima e per un tempo breve si sostituisce la spinta piccolissima della luce solare per un periodo paragonabile alla durata della missione. Ad esempio, nella missione New Horizons^[2] che ha raggiunto Plutone il 14 Luglio 2015, la velocità finale della sonda era dovuta in larga parte alla spinta del razzo Atlas V - 575 tonnellate a tre stadi - raggiungendo la velocità di 16 km/s (57600 km/h) mai raggiunta prima. New Horizons ha ricevuto la spinta dal razzo ATLAS per circa 20 minuti subendo un'accelerazione media di circa 13400 mm/s². Solo venti minuti di spinta per 9 anni di viaggio. Mentre per la propulsione fotonica, **la velocità finale non viene raggiunta dopo pochi minuti dal lancio, ma costruita durante tutto il viaggio secondo una traiettoria che consente di aumentare costantemente la velocità della sonda. Una piccolissima accelerazione dell'ordine di 1 mm/sec² consente di raggiungere la velocità di 30 km/s in un anno.** Utilizzando orbite che hanno un perielio molto vicino al Sole, la propulsione a fotoni solari permetterebbe di raggiungere velocità dell'ordine delle centinaia di chilometri al secondo, sfruttando l'effetto combinato dei fotoni e della gravità del sole.

La propulsione solare fotonica è stata proposta già nei primi anni del secolo scorso da menti visionarie come i sovietici Tsiolkovsky (1857-1935)^[3] e Tsander (1887-1933)^[4]. Il primo articolo scientifico sull'argomento è stato pubblicato sulla rivista Jet Propulsion^[5] nel 1958 da Richard Garwin dell'IBM Watson Laboratory della

Columbia University. Da allora, sono stati pubblicati un numero significativo di articoli e libri scientifici sull'argomento (si veda ad esempio i riferimenti ^{6,7,8}). Tra i più prolifici autori italiani, con due libri pubblicati e più di 120 articoli, non possiamo non citare il Dr. Giovanni Vulpetti che nei suoi lavori ha investigato i diversi aspetti della propulsione solare fotonica scoprendo e calcolando traiettorie innovative per missioni con grandi velocità di fuga⁹⁻¹⁰. Egli ha recentemente analizzato una missione che prevede la messa in orbita di un satellite innovativo che segnali con maggior anticipo, rispetto ai tempi di preavviso attuali (30 minuti), l'arrivo di una tempesta magnetica la cui intensità possa causare un black-out elettrico planetario¹¹.

IKAROS e la missione spaziale giapponese

Il primo tentativo di una missione spaziale con l'uso della propulsione fotonica risale al 1976, con una missione della NASA per il rendez-vous al perielio della cometa di Halley, previsto per il dicembre del 1985. Grazie ai calcoli di Jerome Wright, una sonda spinta dai fotoni solari avrebbe impiegato solo 4 anni per il rendez-vous. La NASA fece decadere il progetto in quanto ritenuto prematuro rispetto alle tecnologie allora a disposizione per la realizzazione della vela⁶⁻⁷. Negli anni successivi, studi, esperimenti in laboratorio e dimostrazioni nello spazio si sono susseguiti senza mai arrivare ad una vera e propria missione operativa. La prima vera dimostrazione si è avuta nel 2010, quando l'Agenzia Spaziale Giapponese (JAXA) è riuscita a portare in orbita terrestre IKAROS (Interplanetary Kitecraft Accelerated by Radiation Of the Sun) un veicolo spaziale dotato di una vela solare fotonica di 200 m².

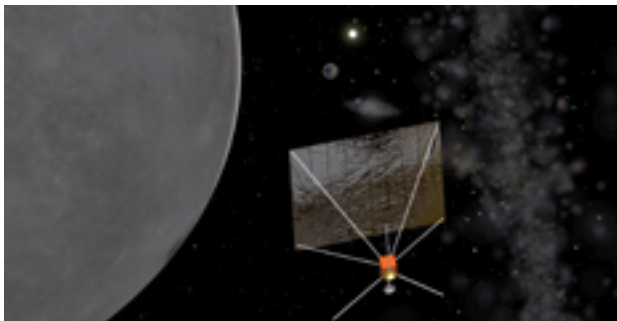


Fig. 1: Illustrazione di una sonda spaziale spinta da una vela solare fotonica

La vela è stata dispiegata con successo e sono state effettuate le manovre necessarie per metterla su una traiettoria verso Venere ^{8,12}. IKAROS ha dimostrato che si può considerare concreta la possibilità che la propulsione solare fotonica possa essere utilizzata in una missione spaziale.

Le missioni a propulsione solare fotonica

Il fascino della propulsione solare fotonica risiede soprattutto nella possibilità di realizzare, un giorno non troppo lontano, una missione interstellare ⁸. Uno dei parametri più importanti per la propulsione fotonica è $s^* = 1.57 \text{ g/m}^2$ che rappresenta il valore critico al di sotto del quale la forza di gravità locale è inferiore alla spinta dei fotoni solari. Il valore di s^* non dipende dalla distanza dal Sole poiché la forza di attrazione gravitazionale e la spinta generata dai fotoni diminuiscono con il quadrato della distanza. Di conseguenza, anche allontanandosi molto dal sole, la vela produrrà comunque una spinta. Il valore di s^* va confrontato con il parametro $s = mV/A$ dato dal rapporto tra la massa della vela mV e la superficie dello specchio A . Nell'ipotesi in cui lo specchio di 1 m² fosse costruito con un materiale denso come l'acqua (1000 kg/m³), per avere $s = s^*$ lo strato dovrebbe avere uno spessore di soli 1.57 micrometri. Attualmente, i materiali più idonei sono polimeri simili al Mylar utilizzato per avvolgere gli alimenti, che hanno una densità tra 1200 - 1800 kg/m³ e con i quali si possono produrre grandi superfici con spessore dell'ordine di qualche micrometro. Depositando un film di alluminio spesso 80 - 100 nm, tali superfici diventano riflettenti e in analogia con le vele spinte dal vento, vengono chiamate vele solari fotoniche.

Un veicolo spaziale a propulsione fotonica è costituito dalla vela (il propulsore) e il carico utile che contiene gli strumenti scientifici e i sistemi di bordo (vedi l'illustrazione in figura 1). Si deve quindi tener conto di tutta la massa del veicolo spaziale e non solo della vela. In questo caso $s = (mV + mU)/A$, dove mU è la massa totale della sola sonda. In una missione che voglia superare i confini del sistema solare, la superficie della vela dovrebbe essere tale da compensare la massa aggiuntiva del carico utile. Ad esempio, se il carico utile pesasse 100 Kg, per avere un

$s=s^*$ la superficie della vela dovrebbe essere circa 100 ettari. Tuttavia, missioni all'interno del sistema solare quali ad esempio: un sistema cargo Terra-Marte, una missione per l'esplorazione delle miriadi di asteroidi potenzialmente pericolosi per la Terra o sfruttabili per le materie prime contenute, non necessitano di vele di tali dimensioni [8]. Per missioni di questo tipo non è necessario avere un Σ per il quale la spinta sia maggiore della forza di attrazione del Sole. Potrebbero essere sufficienti valori di Σ compresi tra 10 e 100, per le quali basterebbe una vela di 30 m x 30 m a patto di avere un carico utile di massa piccola.

La propulsione solare fotonica come traino per lo sviluppo tecnologico

Come già scritto, un veicolo spaziale spinto dalla luce del Sole ha una grande vela riflettente, generalmente realizzata con una membrana polimerica, sulla quale è depositato uno strato di alluminio di spessore dell'ordine di 80-100 nm. Considerando le condizioni operative della vela, la sintesi di nuovi polimeri con spessore sempre più piccolo, con un carico di rottura sempre maggiore e che non si degradino per effetto della radiazione UV è la sfida che renderà possibili le missioni descritte. **L'impacchettamento a terra e il dispiegamento della vela nello spazio sono punti cruciali per questo sistema propulsivo. Alla vela devono essere quindi aggiunte delle strutture che non comportino un aumento significativo della massa totale.** In tal senso, una soluzione potrebbe essere nell'utilizzo di fili o membrane polimeriche a memoria di forma ovvero materiali che opportunamente attivati siano in grado di riprendere la forma iniziale. La propulsione fotonica impone di usare poca massa e sfruttare poca energia, un punto di vista simile alla richiesta di sostenibilità che si deve realizzare in ambito terrestre. In questa ottica, grazie a soluzioni progettuali originali, ogni componente può concorrere a ridurre le dimensioni della vela e diminuire il valore di s . In questo contesto, si potrebbero integrare nella vela altre funzionalità utilizzando dispositivi optoelettronici a larga area realizzati mediante multistrati a film sottile. Tali dispositivi potrebbero migliorare l'equilibrio termico della vela e consentire il controllo di assetto, ottenuto ad esempio, variando

la riflettanza di alcune aree della vela.

In generale, nell'ambito dello sviluppo tecnologico, la pianificazione di missioni spaziali a propulsione fotonica, avrebbe il vantaggio di creare collaborazioni fortemente correlate tra i diversi gruppi di ricerca operanti nell'ambito delle scienze di base e dell'ingegneria, favorendo il coinvolgimento anche dell'industria e delle piccole e medie imprese. Di tale approccio può beneficiare non solo l'industria aerospaziale per applicazioni convenzionali - trasportare nello spazio del materiale costa circa 5000 euro al kg - ma anche settori che nulla hanno in comune con l'ambito che stiamo trattando.

Grazie al successo di IKAROS, c'è un rinnovato interesse nello sviluppo delle vele solari fotoniche da parte delle maggiori Agenzie Spaziali. La NASA ha ripreso con maggior vigore a destinare risorse a questo settore con le missioni NEA Scout (Near Earth Asteroid Scout) e soprattutto ACS3 (Advanced Composite Solar Sail System) che partiranno nel prossimo anno. In questa direzione, l'Agenzia Spaziale Italiana (ASI) sta incoraggiando e supportando attività di ricerca su nuovi sistemi di propulsione spaziale consentendo che si sviluppino in Italia tale tecnologia (vedi riquadro).

La ricerca sulle vele spaziali in ENEA

La ricerca sullo sviluppo della propulsione a fotoni solari in Italia ha inizio grazie a **Giovanni Vulpetti** membro dell'International Academy of Astronautics (IAA) e del **professor Gregory Matloff** del New York City College of Technology. Un gruppo di ricerca su base volontaria si incontra regolarmente per discutere la possibilità di una missione a propulsione fotonica che portasse una sonda al di fuori del sistema solare[8]. Tale gruppo prese il nome di "Aurora project" dove Aurora rimandava alla più bella delle sorelle del dio Sole nella mitologia greca. Vi parteciparono ricercatori prevalentemente italiani appartenenti non solo alle Università ed Enti di Ricerca ma anche a industrie private del settore aerospaziale.

Al gruppo ha partecipato uno degli autori (**Salvatore Scaglione**) occupandosi della realizzazione e caratterizzazione di una vela "selfstanding" di alluminio e cromo[14]. La vela, delle dimensioni di

qualche centimetro quadrato, è stata realizzata depositando un doppio strato di alluminio e cromo, dello spessore complessivo di circa 110 nm, su di un polimero colloidale che aveva la funzione di supporto temporaneo. Una vela così concepita avrebbe permesso il distacco del film nanometrico di alluminio/cromo dal substrato polimerico sfruttando i raggi ultravioletti nello spazio. In questo modo, il s della sola vela sarebbe potuto arrivare a valori dell'ordine di 10-3g/m². Tale valore avrebbe consentito viaggi verso l'elio pausa (ovvero è il confine presso il quale il flusso di particelle emesso dal Sole – il vento solare - è bloccato dal flusso analogo proveniente dallo spazio profondo) in circa dieci anni, brevi in confronto ai 35 anni necessari alla sonda Voyager I (lancio 5 Settembre 1977 ed eliopausa superata il 12 Agosto 2012).

Gli esperimenti hanno dimostrato la fattibilità dell'idea di partenza anche se la fragilità meccanica del solo strato metallico suggeriva la necessità di ulteriori attività di ricerca. Comunque, le caratteristiche ottiche della vela prodotta nei laboratori ENEA sono state utilizzate per lo sviluppo di un modello di spinta più accurato di quello allora a disposizione^[14].

La realizzazione di strati nanometrici di alluminio e la caratterizzazione ottica delle vele è ancora l'attività principale che i due autori svolgono nel campo della propulsione solare fotonica. Rispetto alla fase iniziale, la strumentazione a disposizione in ENEA ha permesso di affinare ancor di più le tecniche di misura e l'analisi dei dati sperimentali. Inoltre, i sistemi di deposizione e la strumentazione per la caratterizzazione ottica e topografica della superficie, hanno permesso di produrre e caratterizzare campioni dell'ordine della decina di centimetri quadrati. Tale scala è significativa per stimare le proprietà microscopiche e macroscopiche di una vela di grandi dimensioni. La modellizzazione delle proprietà ottiche della vela, essenziali per il modello di spinta, si avvale di algoritmi sviluppati dagli autori. **Il relativo software sfrutta le risorse di calcolo di CRESCO di ENEA (<https://www.eneagrid.enea.it/CRESCOportal/>).** Tali algoritmi calcolano le proprietà ottiche della vela tenendo conto anche della topografia su scala microscopica. In questo modo, è possibile analizzare gli effetti che

la morfologia reale della superficie ha sulla diffusione dei fotoni incidenti^[15-16].

Infrastrutture di ricerca uniche

Attualmente le attività sulle vele fotoniche solari in ENEA si svolgono nell'ambito di un progetto finanziato da ASI e che coinvolge 9 gruppi di ricerca italiani. Di fatto, l'Agenzia possiede alcune infrastrutture di ricerca uniche in Italia per simulare alcune delle condizioni dell'ambiente spaziale. In particolare, è possibile esporre le vele al flusso di neutroni e raggi gamma utilizzando rispettivamente il reattore di ricerca TAPIRO e l'impianto CALLIOPE. La caratterizzazione ottica anche a temperature criogeniche, consente di valutare il degrado delle caratteristiche della vela a seguito dell'esposizione simulata a condizioni ambientali simili o peggiori di quelle presenti nello spazio.

In anni più recenti, un nuovo impulso alla ricerca in questo ambito è stato dato dalla collaborazione, ancora in corso, tra gli autori e il gruppo di ricerca del professor Christan Circi del Dipartimento di Ingegneria Astronautica Elettrica ed Energetica (DIAEE) dell'Università La Sapienza di Roma. In figura 2 è mostrata una delle vele presenti presso i laboratori



Fig. 2: Una vela dispiegata nel laboratorio del DIAEE dell'Università la Sapienza di Roma

di ricerca del DIAEE. Grazie a questa collaborazione sono state svolte diverse tesi magistrali che hanno coinvolto brillanti studenti del corso di Laurea in Ingegneria Aerospaziale.

Conclusioni

Fino ad oggi, la propulsione spaziale è stata dominata dalla propulsione chimica ed elettrica mentre la propulsione solare fotonica viene ancora considerata una tecnologia prematura. La necessità di effettuare missioni interplanetarie non convenzionali (orbite retrograde, al di sopra dell'eclittica, etc) potrà rendere concreta la realizzazione di una missione, non solo dimostrativa, che utilizzi le vele. Attualmente, la ricerca in Italia in questo ambito viene svolta principalmente a livello accademico mentre nel prossimo futuro ci si aspetta un coinvolgimento delle imprese nello sviluppo di tale tecnologia. Dall'integrazione tra ricerca pubblica e privata si potrebbero avere dei

benefici nella progettazione di sottosistemi satellitari più leggeri, compatti e meno energivori così come nelle tecniche di produzione e realizzazione di materiali resistenti, leggeri e multifunzionali.

Tali tecnologie possono avere un impatto positivo nello sviluppo di satelliti di nuova generazione di cui i micro e nano satelliti sono un esempio. Di conseguenza, **la propulsione solare può essere uno dei vettori per tecnologie originali utilizzabili sulla Terra in accordo con le sempre più pressanti esigenze di risparmio energetico e sostenibilità nell'uso delle risorse.**

La propulsione solare fotonica continuerà la sua strada e difficilmente le idee che ne sono alla base potranno essere abbandonate. L'entusiasmo mostrato da molti dei ricercatori coinvolti in tale attività anche da più di 40 anni è animato dallo stesso spirito che ci spinge ad osservare l'orizzonte nell'intimo desiderio, innato nell'uomo, di voler raggiungere quel luogo lontano per poi poter guardare oltre.

Riferimenti

- [1] Jackson, John David "Elettrodinamica Classica", seconda edizione italiana (2001) Zanichelli
- [2] https://www.nasa.gov/pdf/139889main_PressKit12_05.pdf
- [3] Tsiolkovsky K. E. "Extension of Man into Outer Space", 1921
- [4] Tsander, K. "From Scientific Heritage", NASA Technical Translation TTFT-541 1967
- [5] Garwin R. L. "Solar Sailing – A practical method of propulsion within the solar system" Jet Propulsion 28, (1958) pp.188-190
- [6] Wright J. L. "Space Sailing" Gordon and Brach Philadelphia 1992
- [7] McInnes C. L. "Solar Sailing" Springer-Verlag London 1999
- [8] Vulpetti G., Johnson L., Matloff G. L. , "Solar Sails - A novel approach to Interplanetary Travel" Springer, New York, NY 2015
- [9] Vulpetti G. "Sailcraft at high speed by orbital angular momentum reversal" Acta Astronautica 40 (1997), pp. 733-758
- [10] Vulpetti G. "Fast Solar Sailing: Astrodynamics of Special Sailcraft Trajectories" Springer Dordrecht 2013
- [11] Vulpetti G, Circi C., Pino T. "Coronal Mass Ejection early warning mission by solar-photon sailcraft" Acta Astronautica 140 (2017) pp. 113-125
- [12] Yuiki Tsuda et al. "Achievement of IKAROS — Japanese deep space solar sail demonstration mission" Acta Astronautica 82 (2012) pp. 183-188
- [13] Scaglione S. and Vulpetti G. "Aurora project: removal of plastic substrate to obtain an all-metal solar sail" Acta Astronautica 44 (1999) pp. 147-150.
- [14] Vulpetti G. and Scaglione S. "Aurora project: estimation of the optical sail parameters" Acta Astronautica 44 (1999) pp. 123-132
- [15] Zola D. Circi C. Vulpetti G. and Scaglione S. "Photon momentum change of quasi-smooth solar sails" Journal of the Optical Society of America A 35, (2018) pp. 1261 – 1271
- [16] Zola D. and Scaglione S. "Computation of solar photon sail thrust by using light scattering models" in High Performance Computing on CRESCO infrastructure: research activities and results 2019. ENEA-Terim 2020 pp. 122-125-ISBN: 978-88-8286-403-3

ENEA e Università di Roma Tor Vergata studiano un robot “astronauta”

di Marco Paoloni

Laboratorio di Robotica e intelligenza artificiale del Dipartimento di Tecnologie energetiche e fonti rinnovabili - ENEA

ENEA e Università degli Studi di Roma “Tor Vergata” stanno studiando un nuovo robot per affiancare e in prospettiva di sostituire, gli astronauti nelle operazioni di manutenzione e monitoraggio delle strutture esterne delle stazioni orbitali, le cosiddette EVA (Extra-Vehicular-Activity). Le attività si collocano nell’ambito del progetto di ricerca biennale TORVEastro finanziato dalla Regione Lazio⁽¹⁾, tramite Lazio Innova e coinvolgono il Laboratorio di Robotica e meccatronica del Dipartimento di Ingegneria industriale dell’Università degli Studi di Roma Tor Vergata e il Laboratorio di Robotica e intelligenza

artificiale del Dipartimento di Tecnologie energetiche e fonti rinnovabili di ENEA.

Le operazioni di Extra-Vehicular-Activity richiedono l’uso di costosi e complessi dispositivi che consentano ai membri dell’equipaggio di sopravvivere all’esterno della stazione in un ambiente ostile, quale quello dello spazio, caratterizzato da vuoto spinto, grandi escursioni termiche ed elevati livelli di radiazioni ionizzanti. Un altro fattore di rischio è la presenza, della cosiddetta “spazzatura cosmica”, ovvero di detriti prodotti da precedenti missioni, alcuni dei quali potrebbero perforare tute e caschi.



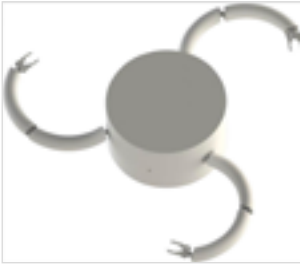


Fig. 1 : Elaborazione CAD del prototipo dimostratore. Vista esterna



Fig. 2 : Elaborazione CAD del prototipo dimostratore. Vista interna

Da quanto brevemente esposto, emerge chiaramente come un robot di servizio dedicato a questi compiti, potrebbe mitigarne i rischi ed i costi, nonché ridurre lo stress per gli astronauti (la durata tipica di queste operazioni è superiore alle sei ore).

Il progetto prende spunto dal brevetto del prof. Marco Ceccarelli dell'Università di Roma Tor Vergata in cui il robot è descritto come costituito da un corpo centrale a cui sono connessi tre arti capaci di comportarsi, a seconda della necessità, come braccia e gambe; per ricevere maggiore protezione, i suoi servomotori sono collocati all'interno del corpo e la trasmissione agli arti dei loro movimenti e delle forze da loro attuate è realizzata per mezzo di cavi, similmente a quanto avviene nell'uomo con i tendini.

Il suo principale obiettivo è la realizzazione di un prototipo in scala ridotta, che possa dimostrare in laboratorio la capacità del robot di svolgere proficuamente alcune delle operazioni che potrebbero essergli richieste a bordo, quali, per esempio, muoversi lungo gli stessi supporti usati dagli astronauti.

Anche se il prototipo, ormai in via di completamento, è destinato ad operare solo in laboratorio, nello svolgimento del progetto, i ricercatori hanno affrontato anche tematiche più "spaziali"; ad esempio, una particolare enfasi è stata dedicata alla caratterizzazione dell'ambiente di lavoro del futuro robot "astronauta" e all'esame delle sollecitazioni a cui potrebbe essere sottoposto durante il lancio, al fine di tracciare i requisiti di un suo progetto meccanico.

Per presentare i risultati finali delle ricerche condotte, è stata organizzata la conferenza internazionale "TORVEASTRO 2023 - International Conference on Robots for Space Applications in Orbital Stations", che si terrà in Roma il 20 ed il 21 Aprile 2022 ed i cui atti saranno diffusi presso imprese ed enti di ricerca attivi nel settore spaziale al fine di costruire un gruppo di lavoro che possa ottenere i finanziamenti necessari per la realizzazione del prototipo spaziale.

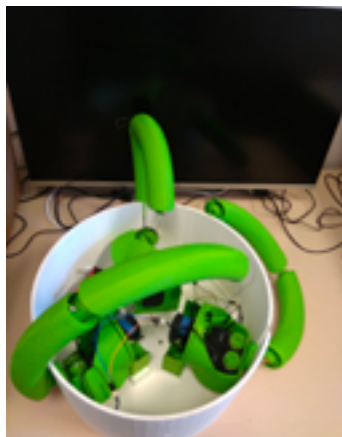


Fig. 3 : Prototipo realizzato in stampa 3D



Fig. 4 : Prototipo realizzato in stampa 3D. Vista elementi interni

Note

- [1] Bando "Progetti Gruppi di Ricerca 2020" alimentato da fondi provenienti dal POR FESR (Fondi Europei di Sviluppo Regionale) Lazio 2014 – 2020.